

高等学校教材

# 电力电缆设计原理

哈尔滨理工大学 卓金玉 编著



机械工业出版社

书中主要研究了电力电缆的设计原理。主要内容为电力电缆在电力系统中的作用；电力电缆的工艺和典型结构；电力电缆的电气参数；绝缘结构设计；载流量的计算；暂态温度响应；附件的设计原理；电力电缆的试验和运行故障测寻。

本书可作为高等学校电气工程与自动化专业的教材，也可供从事电力电缆设计及应用的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电缆设计原理/卓金玉编著. —北京: 机械工业出版社, 1999.4  
高等学校教材  
ISBN 7-111-07059-3

I. 电… II. 卓… III. 电力电缆-设计-高等学校-教材 IV. TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 07481 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)  
责任编辑: 韩雪清 版式设计: 张世琴 责任校对: 韩 晶  
封面设计: 姚 毅 责任印制: 何全君  
三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1999 年 4 月第 1 版第 1 次印刷  
787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$ ·10 印张·243 千字  
0 001—3 000 册  
定价: 17.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

## 前 言

本书是根据 1997 年国家教委“工科本科专业目录修订工作研讨会”的会议精神编写的。在压缩内容的前提下又力求兼容电力电缆的设计制造和应用的内容，以增加适应性。

编者曾从师刘子玉教授，吸收和继承了先生的许多理论和思想，并积累了 20 余年的教学经验，博采了国内外有关的先进理论，尤其注意吸收了有关电力工程方面的相关知识，使电力电缆的理论更加完善。

为了适应现代工程的需要，在设计计算中，力求采用了国内外的最新理论和方法。

因篇幅所限，有关附件和实验及故障测寻只能从理论上从简阐述，读者需要时可参阅有关的专著。

本书的出版得到了各方面的大力支持和关怀，编者在此谨表示诚挚的谢意！

由于编者水平所限，书中难免有不妥与错误，恳请读者批评指正。

编 者

1998 年 10 月



## 第一章 电力电缆概述

### 第一节 现代电力系统简介

发电厂把机械、热等形式的能量转换成电能，电能经过变压器和输电线路输送并分配给用户，再通过各种用电设备转换成适合用户需要的各种形式的能量。这些生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起组成的整体称为电力系统。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网。它包括升降变压器和各种电压的输电线路，见图 1-1。

为了降低发电成本和保证供电的可靠性，现代的电力系统都是将分散的电力系统并网联成一个大的电力系统整体运行。在 80 年代初，世界各国几乎 90% 的电厂容量集中在国家大电力系统中，甚至建立巨大的国家间联合电力系统。大系统的远距离输电必须使用较高的电压。架空的交流输电线路传输的功率大致随系统运行电压的二次方成正比增加。近几十年来，电能需求

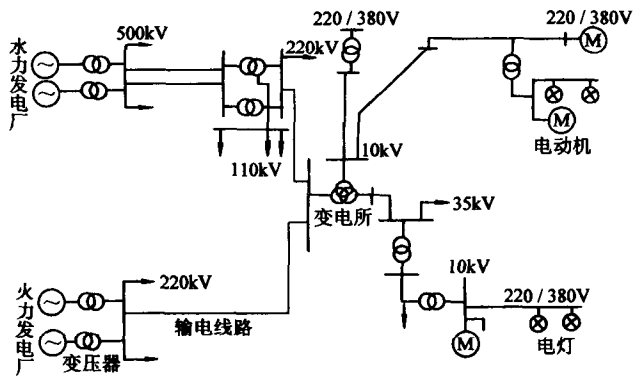


图 1-1 电力系统单线连接图

量的不断增长，远离工业中心的大型水电站的开发，更需远距离输送电能，使输电电压水平迅速上升。目前我国交流输电系统额定电压最高仅达 500kV，而国外如俄罗斯输电电压已达 1150kV，并开始对 1500~2500kV 输电建设的技术进行开发研究，美国在 1985~1995 年间就采用 1000/1100kV 电压输电。

交流系统输电十分便捷，但线路损耗巨大，每年有大约 1/5 的能量损耗在线路上。电容电流的影响又使海底交流电缆输电更加困难。而直流输电损耗小，没有电容电流的影响，因此，现代电力系统都采用交流—直流—交流系统。

### 第二节 电力电缆在电力系统中的作用和发展概况

#### 一、电力线路的结构

电力线路包括输电线路和配电线路。按结构又可分为架空线路和电缆线路两大类。

##### 1. 架空线路

即将线路架设在杆塔上，敷设于户外地面上空。它由导线、避雷线（又称架空地线）、杆塔、绝缘子及金具等元件组成，如图 1-2 所示。

导线和避雷线均采用裸线。导线的作用是传输电能。避雷线的作用是将雷电流引入大

地，保护电力线路免受雷击。因此它们都应有良好的导电性能。导线和避雷线均架设在户外，除了要承受导线的自身重量及风暴、冰雪及温度变化等产生的机械力作用外，还要受空气中有害气体的化学腐蚀作用。所以，导线和避雷线还应有较高的机械强度和抗化学腐蚀能力，为此 10kV 级以上的线路大都采用钢芯铝绞线。它是由多股铝线绕在单股或多股的钢导线外层而构成的。铝线主要载流，而钢线主要承受机械应力。

杆塔用于支撑导线和避雷线。绝缘子用来支持或悬挂导线并使导线与杆塔绝缘。因此必须具有良好的绝缘性能和足够的机械强度。金具是用来组装架空线路的各种金属零件的总称。

## 2. 电缆线路

电力电缆是电力系统主网的主要元件。一般敷设在地下的廊道内，其作用是传输和分配电能。电力电缆主要用于城区、国防工程和电站等必须采用地下输电的部位。电力电缆主要由三大部分组成：①导体：传输电流，指导功率传输方式；②绝缘层：承受电压，起绝缘作用；③保护覆盖层：保护电缆绝缘不受外界环境的影响和防止机械损伤等。

我国解放初期仅能生产低压油浸纸绝缘电力电缆。随着工业的发展和科技进步，目前我国生产的电力电缆主要采用交联聚乙烯绝缘电力电缆。油纸绝缘和交联聚乙烯绝缘电力电缆均达到了 500kV 电压等级。

## 二、电力电缆传输电能的基本原理

### 1. 电线电缆的定义

电线电缆就是用以传输电磁能信息和实现电磁能转换的线材产品。电力的传输，实则为电磁能的传播。根据电磁场理论，电场随时间而变动，都会形成位移电流，从而激发出磁场；凡磁场随时间而变动，都会产生感应电动势而激发出电场。时变电场和时变磁场要相互影响，组成一个统一的整体——时变电磁场。它是统一的，不可分割的，且作为一种特殊形式的物质，具有能量的属性。其能量是以波的形式向外传播的。电磁能流动传播的矢量称为坡印亭矢量 ( $S$ )，其和电场强度 ( $E$ ) 及磁场强度 ( $H$ ) 的关系为

$$S = E \times H$$

方向满足右手螺旋法则， $E \rightarrow H$  旋转，螺旋前进的方向即电磁波前进的方向。如图 1-3。

从导线表面来看，电场强度具有切向分量  $E_t$  和法向分量  $E_n$  (图 1-4)，后者是由电压决定的，前者是由电流决定的。在实际工程中，由于  $E_t$  很小可忽略不计，只计算  $E_n$  即可。在图中  $P$  点的磁场强度  $H$  的方向是由纸面垂直进入纸内。这样，在  $P$  点坡印亭矢量  $S$  斜向进入导线，它的切向分量  $S_t = E_n \times H$  标志着有电磁能量沿导线传输。它的法线分量  $S_n = E_t \times H$  标志着还有电磁能量由导线表面穿入到内部化为热能散失。

为简单计，以直流输电为例进一步说明。如图 1-5b 所示为线路周围空间的电磁场分布图形。其中虚线代表电力线，实线代表磁力线。磁力线与电力线正交。因此在任意一点  $P$  上的坡印亭矢量都是由纸内穿出指向读者。图 1-5a 是同图 b 的左面侧视图。图中的点线是代表坡印亭矢量场的线，其方向从左向右，标志着输电线路周围广大空间中处处都有电磁能由

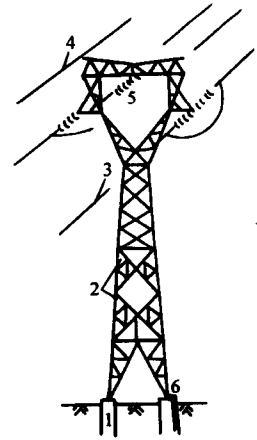


图 1-2 线路主要元件示意图

- 1—基础 2—铁塔  
3—导线 4—避雷线  
5—绝缘子 6—接地装置

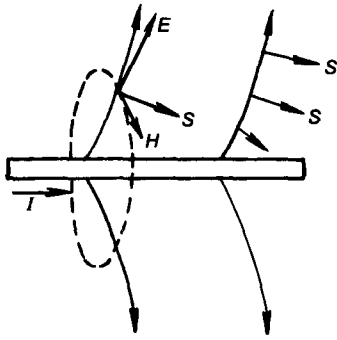


图 1-3 电磁波传播示意图

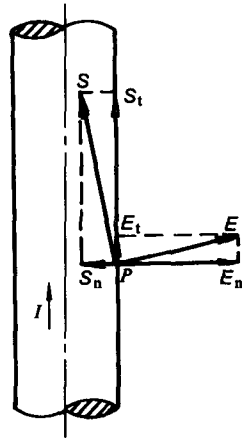


图 1-4 坡印亭矢量和电场强度矢量示意图

左向右传输，而输电线本身仅仅是引导电磁能向一定方向传输的作用。这就可以理解为什么细小的线束能传输较大的功率。

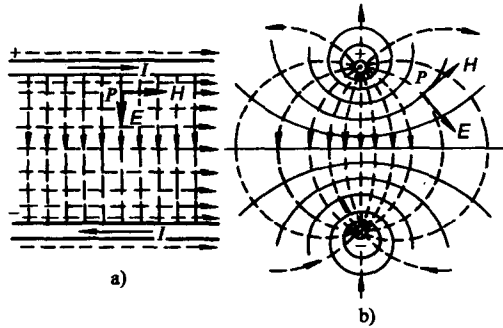


图 1-5 线路周围空间电磁场分布图形

## 2. 电缆传输线的等效电路和基本方程

(1) 等效电路 如图 1-6 为分布参数的等效电路。图中的  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $g_1$ ,  $b_1$  分别表示线路单位长度的电阻，电抗，电导和电纳。

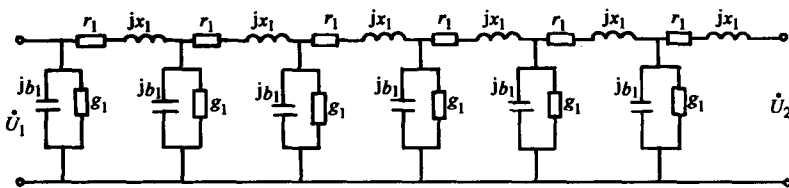


图 1-6 分布参数的等效电路 (Π 形)

(2) 远距离输电线 (长线) 的基本方程 为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \lambda l + I_2 Z_C \operatorname{sh} \lambda l \\ I_1 &= I_2 \operatorname{ch} \lambda l + \frac{\dot{U}_2}{Z_C} \operatorname{sh} \lambda l \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \sqrt{ZY} + I_2 \sqrt{\frac{Z}{Y}} \operatorname{sh} \sqrt{ZY} \\ I_1 &= I_2 \operatorname{ch} \sqrt{ZY} + \dot{U}_2 \sqrt{\frac{Y}{Z}} \operatorname{sh} \sqrt{ZY} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中,  $\dot{U}_1, I_1, \dot{U}_2, I_2$  分别为首末端的电压和电流;  $Z_C$  为线路的波阻抗 (又称特性阻抗),  $Z_C = \sqrt{z_1/y_1}$  ( $\Omega$ ) 其中  $z_1, y_1$  为单位长度的线路阻抗和导纳;  $\lambda = \sqrt{z_1 y_1}$  (1/km) 为线路的传播常数;  $Z = z_1 l = (r_1 + jx_1) l$  为线路的总阻抗;  $Y = y_1 l = (g_1 + jb) l$  为线路的总导纳。

(3) 电缆输电线路的二端口网络 输电线路可写成二端口网络的形式。

对一般的二端口网络, 可用  $A, B, C, D$  四个参数把首端和末端的关系表示成如图 1-7 的形式, 表达式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2 \\ I_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

对于分布参数的电缆长距离线路, 据式 (1-2) 和 (1-3) 可得出  $A, B, C, D$  的值为

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{ch} \sqrt{ZY}; & B &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} \operatorname{sh} \sqrt{ZY} \\ C &= \sqrt{\frac{Y}{Z}} \operatorname{sh} \sqrt{ZY}; & D &= \operatorname{ch} \sqrt{ZY} \end{aligned} \quad (1-4)$$

写成矩阵的形式为

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

(4) 根据缓变电磁场的定义, 若波的波长和场域中任意点间的距离不可比拟时, 则为缓变场或似稳场。电力电缆一般承受的是工频 50Hz 的电压, 其波长

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m}}{50} = 6000 \text{ km}$$

显然, 电缆中任意两点间的场域均不可与  $\lambda$  相比拟, 故电缆的场域均为缓变场。缓变电磁场中的电场符合静电场的规律而磁场符合恒定磁场的变化。所以在电缆的电场和磁场的分析中我们均采用静电电场和恒定磁场的公式和方法。

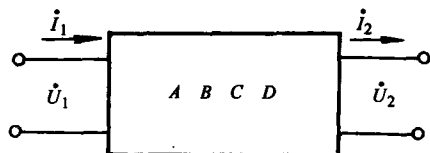


图 1-7 二端口网络



## 第二章 电力电缆的结构分析

输电系统和配电系统之间在电压等级上没有严格的界限，各国的规定也不尽相同。目前我国规定电压在 110kV 及以上的电力网叫输电系统（或高压系统），电压在 35kV 及以下的电力网叫配电系统（或低压系统）。

### 第一节 35kV 及以下的电力电缆

随着化学合成工业的发展，橡塑绝缘电力电缆得到了迅速的发展。在橡皮绝缘中乙丙橡皮绝缘电力电缆在国外已达到 35kV 电压等级。在国内，聚氯乙烯绝缘电力电缆主要用于千伏级的电力电缆。其余电压等级大部分为交联聚乙烯绝缘电力电缆。但油浸纸绝缘电力电缆仍占有一定的比例。

#### 一、橡皮绝缘电力电缆

普通的合成橡胶有丁苯橡胶，丁基橡胶，氯丁橡胶和氯磺化聚乙烯等。但其分子结构中含有双键，故耐臭氧差，在电晕作用下会发生开裂，击穿场强较低，所以不能用于高的电压等级，只能用于低压配电系统和经常移动的场所。

乙丙橡胶主键由化学稳定的饱和烃所组成，其分子式为  $\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_m \left[ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$  远

比含双键的二烯类橡胶优越。具有较高的耐臭氧性和耐候性。交流击穿强度在 35~45 kV/mm。加入第三单体如环戊二烯或乙叉降冰片烯形成三元乙丙橡胶，更能改善其工艺性能。可用于 35kV 级电力电缆或高压电机引出线。若和其他橡胶共混使用更可获得优异的性能。

乙丙橡皮绝缘电力电缆和塑力缆的结构大致相同，可参阅塑力缆的结构。

#### 二、聚氯乙烯绝缘电力电缆

聚氯乙烯塑料是以聚氯乙烯树脂为基础，配以增塑剂，稳定剂，防老剂等多组份的混合材料。聚氯乙烯分子式为  $\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$ ，它具有一定的优点，如加工简单、生产率高、

成本低、耐油、耐腐蚀、化学稳定性好。但由于它是极性材料，介质损耗大，耐热性低（最高允许工作温度 70℃）；耐电强度低，长期工频击穿强度 4kV/mm 左右，脉冲击穿强度 40~50kV/mm。tgδ 为 0.1 左右。相对介电系数 ε 为 5 左右。燃烧时产生 HCl 有毒气体，所以限制了它的使用和发展。其结构如图 2-1 所示。

1kV 级的三芯电力电缆可以没有金属屏蔽层，三芯成缆后包以铠装层，再挤包外护层即可。其产品如铝芯、聚氯乙烯绝缘、双钢带铠装、聚氯乙烯护套电力电缆，额定电压相电压为 0.6kV，线电压为 1kV，三芯，标称截面为 240mm<sup>2</sup>，据 GB12706.1—91 应写为

VLV—0.6/1 3×240 (GB12706.2—91)

若铜芯将“L”改为“T”，亦可省略不写。“V”表示聚氯乙烯。数字中，前位数字表示铠

装层，后一位数字表示外披层，若是聚乙烯外披层应表示为“3”。(以下同)

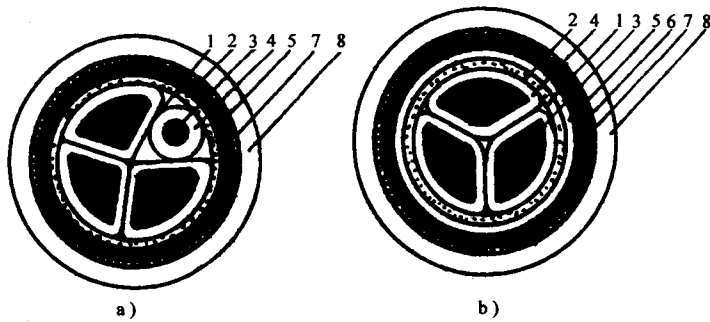


图 2-1 聚氯乙烯绝缘电力电缆结构图

a) 三芯电缆 b) 四芯电缆

1—聚丙烯填充 2—绕包内衬层 3—铜(铝)导电线芯 4—聚氯乙烯绝缘

5—铜带屏蔽层 6—隔离层 7—铜丝(铜带)铠装层 8—聚氯乙烯(聚乙烯)外套

绝缘料的代号为 PVC (Poly Vinyl Chloride) 分 A、B 两类，A 类用于  $U_0/U \leq 1.8/3kV$ ；B 类用于  $U_0/U > 1.8/3kV$  电缆。

### 三、交联聚乙烯绝缘电力电缆

#### 1. 聚乙烯树脂

聚乙烯分子式为  $[-CH_2-CH_2-]_n$ ，介电系数和  $tg\delta$  较小，分别为 2.11 和 0.002；且为非极性材料，电气性能良好。但其耐热性低，力学性能较差，在环境应力作用下易形成开裂。因其分子结构是结晶相和无定形相两相并存，在生产和运行中由于温度和应力的变化容易在界面上产生气隙而引发树枝化放电。目前在我国聚乙烯料仅用来做电缆护套料使用。

为了克服聚乙烯的缺点，主要采用交联的方法使聚乙烯的线型分子结构变成三维空间的网状结构，可极大地提高其击穿强度和耐热性能，而保持了聚乙烯原有的优点。

#### 2. 交联聚乙烯

即通过物理方法或化学方法将聚乙烯进行交联。物理方法主要是利用高能射线将 C-H 键断开使聚乙烯生成游离基，游离基相互结合形成 C-C 键而形成交联聚乙烯。化学方法是通过交联剂(如过氧化二异丙苯 DCP)夺取分子中的氢原子使之生成游离基进而进行交联。其交联生产方式主要是通过惰性气体(如氮气)保护，电加热和惰性气体保护冷却，即所谓“全干式”交联，最大限度地生产过程中防止水分进入绝缘以免生成水树枝。高压和超高压交联聚乙烯电力电缆均需采用“全干式”交联生产线。在低压系统中，可采用硅氧烷即“温水”交联，通过硅氧烷的“接枝”，在  $80 \sim 100^\circ C$  的水中实现聚乙烯的交联，成本低，工艺简单，在低压系统可完全取代聚氯乙烯绝缘电力电缆。交联聚乙烯的体积电阻系数为  $5 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ ， $tg\delta$  为 0.0006，相对介电系数  $\epsilon$  为 2.11，平均工频击穿强度为  $8 \sim 10kV/mm$ ；平均冲击强度为  $50 \sim 60kV/mm$ 。

#### 3. 交联聚乙烯绝缘电力电缆的结构

35kV 及以下的电力电缆大部分为三芯结构，如图 2-2 为一分相屏蔽型交联聚乙烯电力电缆。为了改善电场分布，相电压  $U_0$  在 1.8kV 以上的电缆应有导体屏蔽层和绝缘屏蔽层。导体屏蔽应为挤包的半导体层。标称截面  $500mm^2$  及以上的电缆导体屏蔽应由半导体包带和挤包半导体层联合组成。半导体料以聚乙烯为基料加碳黑组成。半导体层应均匀地包覆在

导体上，表面应光滑，无明显纹线和凸纹。不应有尖角，颗粒，烧焦和擦伤的痕迹。

绝缘屏蔽在相电压  $U_0$  为 8.7kV 以下时可采用挤包型，包带型或包带内加石墨涂层结构。相电压  $U_0$  为 8.7kV 以上时应为挤包半导体层。相电压  $U_0$  为 12kV 及以下时挤包型绝缘屏蔽应是可剥离的。

半导体屏蔽层的主要作用是均化电场，使偶然形成的凸纹突起屏蔽于半导体屏蔽层内，防止了电场集中；因半导体层和导电线芯是等位的，故它们之间的气隙不受电场力的作用。半导体层的物理性能介于导体和绝缘层之间，可使三者紧密地结合在一起，减少了气隙，也减少了气隙放电的可能。半导体层还有一定的隔热作用，防止由于运行时损耗产生的过热使绝缘加速老化。一般挤出的半导体屏蔽层厚 0.1mm。

额定电压  $U_0$  为 1kV 及以上时应有金属屏蔽层。金属屏蔽有铜丝屏蔽和铜带屏蔽两种结构。额定电压  $U_0$  为 21kV 以上且导体标称截面为  $500\text{mm}^2$  以上电缆的金属屏蔽层应采用铜丝屏蔽结构。铜丝屏蔽由疏绕的软铜丝组成，其表面应用反向铜丝或铜带扎紧，其厚度可据故障电流选取。除此之外，一般的金属屏蔽层为不小于 0.10mm 厚的软铜带重叠绕包组成。对于三芯电缆，金属屏蔽层可统包或分相绕包。一般 35kV 级的电缆应分相包覆金属屏蔽层，以实现“分相”屏蔽达到电场径向分布的目的。

金属屏蔽层的作用主要为静电屏蔽。电缆敷设时通过金属屏蔽层接地使其电位为零。在单芯或分相屏蔽电缆绝缘内的电场径向分布，消除了切向分量。可防止绝缘表面产生滑闪放电。金属屏蔽层亦可做为部分短路电流的回路。

35kV 及以下的交联聚乙烯绝缘电力电缆的表示方法大致同前述，只是用“YJ”表示交联聚乙烯绝缘，“Y”表示聚乙烯绝缘或护套，外护层代号按 GB2952 规定。产品用型号、规格（额定电压、芯数、标称截面）及标准编号表示。如铝芯交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆，额定电压为 21/35kV，三芯，标称截面  $150\text{mm}^2$ ，表示为

YJLV23-21/35 3×150 (GB12706.3-91)

聚乙烯绝缘料，代号 PE (Poly Ethylene)，交联聚乙烯绝缘料代号 XLPE；聚乙烯护套料，代号 PE-S；聚氯乙烯护套料代号 PVC-S1 或 PVC-S2 两类。PE-S 和 PVC-S1 用于正常运行导体最高额定温度为  $70^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$  的电缆，PVC-S2 用于  $90^\circ\text{C}$  的电缆。

#### 四、粘性型浸渍纸绝缘电力电缆

35kV 及以下的油浸纸绝缘电力电缆目前逐渐被塑料绝缘电力电缆所代替，但仍占有一定的市场。其结构类型主要有带绝缘电力电缆和分相铅包电力电缆。

油浸纸绝缘是由木纤维纸（木纤维的分子式为  $[\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5]_n$ ）和浸渍剂组成的复合绝缘。浸渍剂为粘性浸渍剂，其主要有两种配方，一种是松香光亮油复合剂；一种是不滴流电缆用

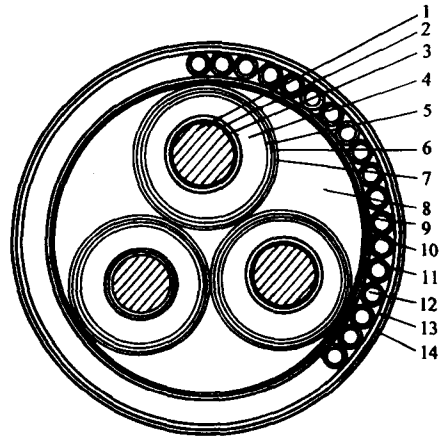


图 2-2 35kV 三芯交联聚乙烯绝缘水底电缆的结构（单层钢丝铠装）

- 1—铜芯导体 2—半导体包带 3—挤包的半导体屏蔽层 4—交联聚乙烯绝缘 5—挤包的半导体屏蔽层 6—纱包带 7—铜屏蔽带 8—麻填料 9—涂橡胶的布包带 10—麻衬垫 11—聚乙烯涂层 12—镀锌钢丝 13—浸渍麻护层 14—塑料护套

浸渍复合剂。松香光亮油复合剂的主要组成成分是松香和光亮油。光亮油又称低压电缆油，系从软蜡裂解产物烯烃经聚合，白土精制，常压蒸馏，减压蒸馏制成。松香是从松树脂提出松节油后所剩的残渣。其主要成分是同分子式异结构树脂酸，通式是  $C_{20}H_{30}O_2$ 。松香具有较小的体积电阻系数和  $\text{tg}\delta$ 。稳定性较高，加入松香后可增加复合剂的粘度和稳定性。

不滴流电缆的浸渍剂配方为光亮油 60% 左右，合成微晶地蜡 40% 左右，再加入少量的防老剂和粘拉剂（如 1% 的分子量 2~8 万聚异丁烯）。这样在浸渍温度下具有相当低的粘度以保证浸渍充分；在电缆工作温度范围内又会形成塑性固体，避免流动产生气隙。气隙会降低电缆的耐电强度。因电场强度和介电系数成反比分布，所以在电缆工作时气隙上承受的场强要大于纤维纸承受的场强。耐电强度低的气隙易发生游离，产生移滑放电。而粘性浸渍纸绝缘电力电缆在生产和运行中均不可避免地产生气隙，这是这种电缆的主要缺点，所以这种电缆只能用于配电系统的低压电缆。

带绝缘电力电缆的结构如图 2-3 所示。因相绝缘厚度是按相间平板电场分布计算的，即 2 倍的相绝缘承受线电压，则对金属屏蔽层间仅有一个相绝缘承受相电压而每个相绝缘只能承受  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  倍相电压，故应再包以带绝缘。

和塑力缆不同，相绝缘成缆后再包以带绝缘。然后再包以铅护套。即做为屏蔽层又可密封，防止水分杂质进入绝缘层。铅护套外面包以内衬层，外面依次是铠甲和外披层。

带绝缘电力电缆因是统包金属屏蔽层，所以绝缘内部存在有电场强度的切向分量，而切向耐电强度仅为径向的  $1/15 \sim 1/10$ ，且填充处亦存在着电场的作用。为了克服带绝缘的这些缺点，较高电压等级如 35kV 级电缆均采用分相屏蔽型的电力电缆，即每相均分别包以铅套或金属化纸作为金属屏蔽层分相静电屏蔽，接地后电位为零，绝缘中电力线径向分布，消除了场强的切向分量。分相屏蔽后再成缆，填充处亦无电场的作用。其结构如图 2-4 所示。

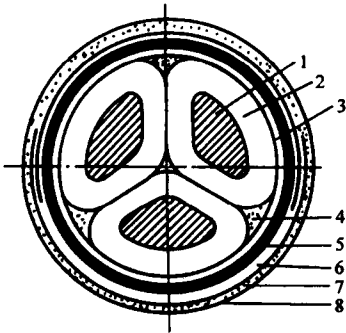


图 2-3 带绝缘电缆结构图

- 1—导电线芯 2—相绝缘  
3—带绝缘 4—填充 5—铅层  
6—内衬层 7—铠甲 8—外披层

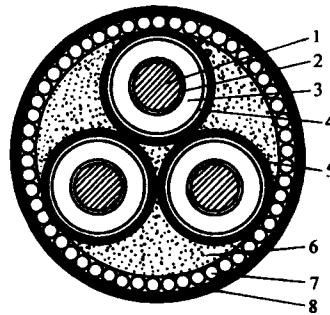


图 2-4 分相铅包电缆结构示意图

- 1—导电线芯 2—半导电纸屏蔽  
3—绝缘层 4—半导电纸屏蔽层  
5—铅套 6—内衬层及填料  
7—钢丝铠装 8—外披层

## 五、导电线芯的工艺参数和材料结构

### 1. 线芯材料

从技术上讲，要求线芯材料电导率高和加工性能好。线芯的作用是传输电流，高电导系

数可以减少线芯损耗；加工性能好便于线芯拉制和绞合等加工，目前主要使用铜和铝。

一般金属或金属合金的导电能力常以标准初炼纯铜在 20°C 的电导系数为 100% 的百分比表示，称为该金属的百分电导率 (% IACS) 或简称电导率。

(1) 铜 均为电解铜，电导率  $\gamma_{Cu} = 58 \times 10^6 \text{S/m}$  相应的电阻率  $\rho_{Cu} = 0.017241 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻温度系数  $\alpha_{Cu} = 0.00393/^\circ\text{C}$ 。纯的铜百分电导率为  $59.52 \times 10^6 \text{S/m} / 58 \times 10^6 \text{S/m} = 102\%$  IACS，铜导体必须纯度高，不低于“三九”铜（质量分数 99.9%），有杂质会使导电性能下降。铜内氧的存在会增加脆性，拉制中易断线。目前多使用无氧铜，含氧量不超过万分之八。铜对于某些浸渍剂（如矿物油、松香复合浸渍剂等）和硫化橡胶有促进老化的作用，为此可在铜线表面镀锡，防止铜和绝缘起化学反应，又使接头易于焊接。

(2) 铝 铝的资源丰富，钒土 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 占地壳的 8%。经过初炼在 20°C 时的化学纯铝的电导率为  $\gamma_{Al} = 38 \times 10^6 \text{S/m}$ ，电阻率为  $\rho_{Al} = 0.026 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻温度系数  $\alpha_{Al} = 0.00403/^\circ\text{C}$ 。铝的百分电导率为  $38 \times 10^6 \text{S/m} / 58 \times 10^6 \text{S/m} = 65.5\%$  IACS。铝的比重小，资源丰富，铝作为导体可更经济。

## 2. 导电线芯工艺参数

电缆在生产和敷设过程中，经常需要弯曲，为了增加其柔软性和可弯曲度，导电线芯均由多根小直径的单线绞合而成。

### (1) 绞合的分类

1) 规则绞合 导线有规则、同心地相继各层依不同方向的绞合。这种方法的线芯绞合结构稳定，电力电缆大都采用这种绞合方法。

2) 不规则绞合（束绞） 所有组成导线都依同一方向的绞合。仅用小截面的低压电缆。

### (2) 绞合参数

1) 绞合节距  $h$  单线绕线芯一周沿线芯中心线的长度。

2) 节距比（绞合系数） $m$  将通过某层单线中心所在圆的直径记为  $D'$ ，则节距  $h$  和  $D'$  之比为节距比  $m = \frac{h}{D'}$ 。

3) 绞合角 图 2-5 将规则绞合的线芯中任一沿螺旋线绞合的单线展开，则得一直角三角形。单线的中心轴绕线芯一周的长度  $L$  构成该直角三角形的斜边；穿过该层各单线中心的圆周之长为一直角边  $\pi D'$ ，节距  $h$  为另一直角边。则  $L$  边和  $\pi D'$  边间的夹角  $\alpha$  为绞合角， $\alpha = \arctg \frac{h}{\pi D'} = \arctg \frac{m}{\pi}$ 。

4) 绞入率  $k$  即单线长度比线芯长度增加的百分比。

$$k = \frac{L - h}{h} = \frac{L}{h} - 1 = \frac{1}{h} \sqrt{h^2 + (\pi D')^2} - 1 = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi D'}{h}\right)^2} - 1 = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} - 1$$

一般情况  $\frac{\pi}{m} \leq 1$ ，据二项式展开定理

$$k \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} - 1 = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} \quad (2-1)$$

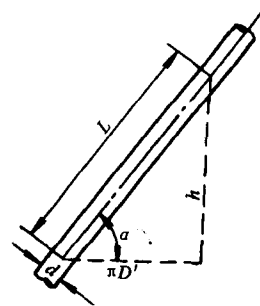


图 2-5 绞合导线展开示意图

从上述公式可知, 节距比  $m$  愈小, 绞合角  $\alpha$  愈小, 柔软程度愈高。但  $k$  值会愈大, 所需单线愈长。

(3) 最小节距比 层数与单线根数的关系。如对规则绞合线芯沿其垂直线芯长度方向切开, 每根单线的截面积将为椭圆形, 如图 2-6 所示。

椭圆长轴

$$d' = \frac{d}{\sin\alpha} = d \sqrt{1 + \cot^2\alpha} \quad (2-2)$$

式中,  $d$  为单线的直径;  $\alpha$  为该层单线的绞合角。若  $\alpha$  足够大, 则  $\sqrt{1 + \cot^2\alpha} \approx 1 + \frac{1}{2} \cot^2\alpha$  而  $\cot\alpha = \frac{\pi D'}{h} = \frac{\pi}{m}$  则  $\frac{1}{2} \cot^2\alpha = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} = k$

故

$$d' = d(1 + k) \quad (2-3)$$

由图 2-6 可知, 若规则绞合线芯上第  $n$  层的单线根数为  $z_n$ , 则  $z_n$  约等于该层单线中心所在圆的周长与椭圆长轴之比。即

$$z_n = \frac{\pi(D_{n-1} + d)}{d'} = \frac{\pi(D_{n-1} + d)}{(1 + k_n)d} \quad (2-4)$$

而第  $n-1$  层的单线根数为

$$z_{n-1} = \frac{\pi(D_{n-2} + d)}{(1 + k_{n-1})d} \quad (2-5)$$

式中  $k_n, k_{n-1}$  分别为第  $n$  层,  $n-1$  层的绞入率, 而各层的绞入率可认为近似相等, 故  $k_n = k_{n-1} = k$  则相邻两层单线根数之差

$$z_n - z_{n-1} = \frac{2\pi}{1+k} \approx 6 \quad (2-6)$$

故各层单线直径相同, 各相邻两层间根数相差为 6。但中心单线根数为 1 的规则绞合, 第二层单线根数为 6, 则两层根数相差为 5。

当绞入率  $k$  增加, 据图 2-6 和式 (2-3) 可知, 每根单线在圆周上所占长度增加。若层间单线根数仍保持 6, 则  $k$  有一容许最大值  $k_{\max}$ , 当  $\frac{2\pi}{1+k_{\max}} = 6$  时,  $k_{\max} = 0.047$ , 相应节距比称为极限节距比, 此时

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\pi^2}{0.047}} \approx 10 \quad (2-7)$$

相应绞合角称为极限绞合角。

对于油浸纸绝缘电力电缆, 圆形线芯的节距比  $m$  一般为 18~22; 对于橡塑绝缘电力电缆  $m$  值为 16~20, 外层  $m$  值可达 10~12。

(4) 线芯的填充系数 线芯绞合后, 虽经紧压, 单线间必定还有空隙。故引入填充系数, 即线芯导体实际截面与线芯轮廓截面之比。对于圆形绞合线芯有

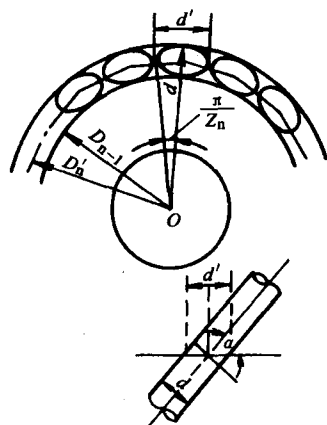


图 2-6 规则绞合几何关系说明

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\frac{\pi}{4} D_c^2} \quad (2-8)$$

式中,  $A_i$  为每根单线截面积;  $n$  为线芯单线总根数;  $D_c$  为绞合线芯外接圆的直径。

从提高填充系数和稳定性考虑, 中心为一根导线的规则绞合的结构最佳, 在大多数情况下, 电力电缆的线芯都采用中心为一根导线的规则绞合结构。

### 3. 线芯的典型结构形式

35kV 及以下的电力电缆导电线芯大多采用圆形芯和扇形芯。

(1) 圆形线芯 即中心为一根的规则绞合线芯。绞合后应予紧压, 使结构紧凑, 线芯表面光滑, 减少了多导丝效应。计算截面时应乘以 90%~95% 的紧压系数。紧压后的结构如图 2-7 所示。其各种截面的具体结构参照表 2-1。分一次紧压和分层紧压。圆形线芯主要用于 35kV 级的分相屏蔽形电力电缆, 或用于电压级很低且线芯截面积较小的电缆。

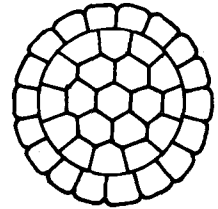


图 2-7 紧压圆形线芯结构

表 2-1 普通与紧压圆形线芯的结构及外径

截面积 /mm <sup>2</sup>	普通圆形绞线		一次紧压线芯			分层紧压线芯		
	根数×直径 /(根×mm)	外径 /mm	根数×直径 /(根×mm)	外径 /mm	外径缩小 到/%	根数×直径 /(根×mm)	外径 /mm	外径缩小 到/%
25	7×2.1	6.30	—	—	—	7×2.3	5.66	89.8
35	7×2.49	7.50	—	—	—	7×2.74	6.75	90.0
50	19×1.81	9.05	19×1.83	8.38	92.6	7×2.21 12×1.87	8.19	90.4
70	19×2.14	10.7	19×2.16	9.92	92.7	7×2.59 12×2.2	9.6	89.7
95	19×2.49	12.5	19×2.50	11.55	92.4	7×3.03 12×2.57	11.2	89.7
120	19×2.8	14.0	37×2.01	13.12	93.6	7×3.38 12×2.88	12.5	89.2
150	19×3.13	15.7	37×2.25	14.68	93.5	7×2.86 12×2.52 18×2.25	14.2	90.4
185	37×2.49	17.4	37×2.52	16.30	93.6	7×3.17 12×2.78 18×2.49	15.7	90.2
240	37×2.83	19.8	37×2.85	18.57	93.7	7×3.62 12×3.17 18×2.84	17.9	90.4
300	37×3.17	22.2	61×2.5	21.14	95.2	7×3.23 12×3.02 18×2.64 24×2.46	20.2	90.9

(2) 扇形芯 主要用于较低而截面积较大的电缆。

绝缘线芯成缆后为圆形，减少了电缆的体积，使结构紧凑，降低成本。一般截面积为  $10\sim 16\text{mm}^2$  的扇形芯由相同直径的圆形线绞合而成。截面积由  $25\sim 70\text{mm}^2$  的 6 根不绞合的中央导线外加 12 根单线绞合而成如图 2-8 所示。截面积  $70\text{mm}^2$ ， $95\text{mm}^2$ ， $120\text{mm}^2$  的扇形芯，采用 7 根单线绞合的中央线芯，沿其两侧平放 2 根圆形单线，然后再加盖一层或两层单线 ( $150\text{mm}^2$  及以上)，如图 2-9 和图 2-10 所示。

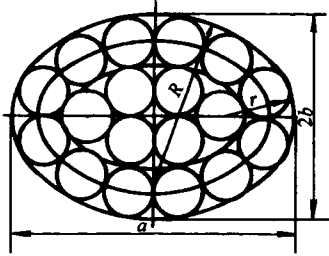


图 2-8 截面积为  $25\text{mm}^2$ 、 $35\text{mm}^2$ 、 $50\text{mm}^2$ 、 $70\text{mm}^2$  扇形芯坯结构

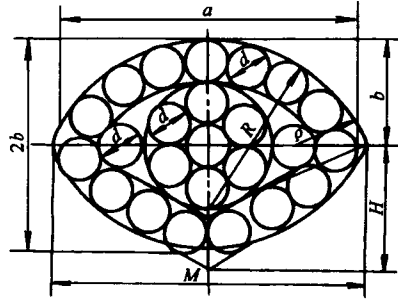


图 2-9 截面积为  $70\text{mm}^2$ 、 $95\text{mm}^2$ 、 $120\text{mm}^2$  扇形芯坯结构

设计扇形时应注意扇形线芯边角圆弧化半径必须选择足够大，以免线芯尖角引起电场集中和损伤电缆绝缘层。对于截面积在  $25\sim 30\text{mm}^2$  范围内的线芯，圆弧化半径一般选定为  $1\text{mm}$ 。

为了保证成缆后电缆外形为圆形，绝缘线芯成缆后半径减去绝缘线芯的相绝缘厚度必须等于绝缘线芯扇形圆弧半径  $R$  (图 2-11)，从图 2-11 可看出如  $R'$  小于正确值  $R$ ，则扇形高度，相间空隙，电缆直径将比正确值时为大。同样也会增加电缆的体积，甚至在绞合成缆时，损伤电缆绝缘层。扇形芯的具体结构参数见表 2-2。

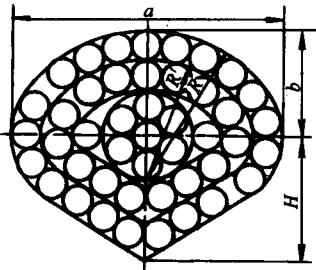


图 2-10 截面积为  $150\text{mm}^2$ 、 $185\text{mm}^2$ 、 $240\text{mm}^2$  扇形芯坯的结构

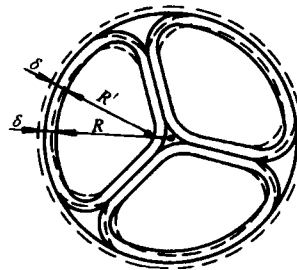


图 2-11 正确选择扇形圆弧半径说明

### 六、35kV 及以下电力电缆的外护层

电力电缆大多须地下敷设，为了免受周围环境的影响，避免造成损伤，需在金属屏蔽层外施加以保护覆盖层。为此，国家标准 GB2952.1—89 明确规定外护层是“包覆在电缆的金属套，非金属套或组合套外面，保护电缆免受机械损伤和腐蚀或兼具其他特种作用的保护覆盖层。”具体的分类和技术规范等国家标准 GB2952.1—89 至 GB2952.4—89 对所有的电力电



表 2-2 三芯电缆的扇形芯结构(紧压)

标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导线根数×直径/mm				扇形(3芯120°)尺寸/mm				备注
	中心		第一层	第二层	R	M	H	r	
	绞合	平放							
25	—	6×1.34	12×1.34	—	6.35	9.3	1.95	0.8	
35	—	6×1.59	12×1.56	—	7.35	11.0	2.45	1.0	
50	—	6×1.90	12×1.90	—	8.50	13.0	3.0	1.1	
70	—	6×2.25	12×2.25	—	9.85	15.4	3.7	1.3	
95	—	6×2.62	12×2.62	—	11.3	18.0	4.4	1.6	
120	7×2.62	2×2.62	15×2.40	—	12.55	20.0	5.0	1.7	
150	7×2.07	2×2.07	15×2.07	21×2.07	10.4 13.9	16.4 22.5	3.9 5.65	1.4 1.9	第一层 第二层
185	7×2.29	2×2.29	15×2.29	21×2.29	11.5 15.4	18.3 25.1	4.5 6.4	1.6 2.2	第一层 第二层
240	7×2.62	2×2.62	15×2.62	21×2.62	13.0 17.4	20.9 28.5	5.25 7.45	1.8 2.5	第一层 第二层

缆都有详尽的说明和规定。其中金属套电缆通用外护层主要指油浸纸绝缘金属护套电缆所用外护层；非金属套电缆通用外护层一般指橡塑绝缘电力电缆的外护层。

外护层一般分为内衬层，铠装层和外披层。内衬层位于铠装层和金属护套或金属屏蔽层之间，起铠装衬垫和金属套防腐等作用。橡塑绝缘电力电缆内衬层为绕包的塑料带或挤出塑料套，一般为1.5~2.0mm。铠装层为钢带或钢丝，主要使电缆承受压力或拉力。其结构尺寸根据用户的要求按标准选取。橡塑绝缘电缆的外披层为聚乙烯或聚氯乙烯外护套，一般厚度为2.0~4.0mm。油浸纸绝缘电缆的外披层一般为电缆沥青—塑料外套或电缆沥青—浸渍麻—电缆沥青—白垩粉。

35kV及以下的电力电缆外护层的各组成部分的尺寸应用直径的假定值确定。主要是为了消除在一般设计方法中经常遇到的各种差异。达到统一标准化。具体的计算方法均按GB2952.2—89和GB2952.3—89的附录A中的规定进行。

## 第二节 高压充油电力电缆

充油电缆是利用补充浸渍原理来消除绝缘层中形成的气隙以提高电缆工作场强的一种电缆结构。充油电缆根据护层结构不同分成两类：一类是自容式充油电缆，一类是钢管充油电缆。自容式充油电缆护层结构和一般电缆相同，采用铅护套或铝护套，而钢管充油电缆则是三根屏蔽电缆拖入一无缝钢管内，无缝钢管也就是电缆的坚固护套。下面分述其典型结构。

### 一、自容式充油电缆

自容式充油电缆一般在线芯的中心(有的在金属护套下)具有与补充浸渍设备(供油箱等)相连接的油道。当电缆温度升高时，浸渍剂受热膨胀，膨胀出来的浸渍剂经过油道流至补充浸渍设备中；当电缆温度下降时，浸渍剂收缩，补充浸渍设备中的浸渍剂经过油道对绝

缘层进行补充浸渍。这样既消除了绝缘层中气隙的产生，又防止在电缆中产生过高的压力。为了提高补充浸渍速度，防止油流产生过高的压降，充油电缆一般采用低粘度油作为浸渍剂。为了提高绝缘层的击穿强度、防止护套破裂时潮气侵入，便于补充浸渍，一般浸渍剂压力均高于大气压。

典型自容式充油电缆的线路如图 2-12 所示，电缆内浸渍剂的体积变化可由压力供油箱或重力供油箱中的油来补偿供给或贮存，重力供油箱安装于电缆线路最高位置，而压力供油箱则根据线路的需要和可能可安装在电缆线路中任何地点。

重力供油箱的结构原理如图 2-13 所示。它的主要组成部分是一组弹性元件。弹性元件内装有补充浸渍电缆的绝缘油与电缆中油道相通，元件外面的油与电缆油道隔绝而与大气相通，用以指示供油箱的压力。当电缆温度升高时，电缆内浸渍剂体积膨胀，多余的浸渍剂经电缆油道被压送到重力供油箱的元件内，弹性元件体积增大，弹性元件外的油面提高。反之，当电缆温度下降，浸渍剂体积收缩，弹性元件内浸渍剂经油道返回到绝缘层内，因而得到补充浸渍，消灭了气隙的形成。重力供油箱的压力主要由它在电缆线路中的位置决定。

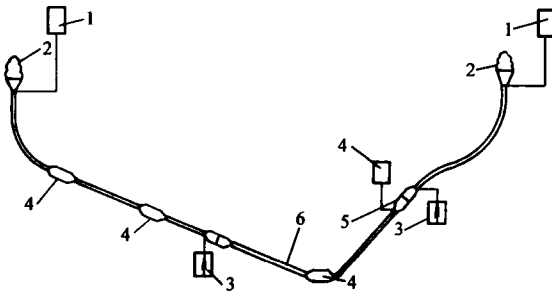


图 2-12 自容式充油电缆线路工作原理示意

- 1—重力供油箱 2—终端接头盒 3—压力供油箱  
4—连接接头盒 5—阻止式连接接头盒 6—电缆

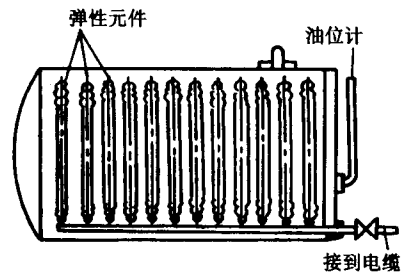


图 2-13 重力供油箱

压力供油箱的工作原理见图 2-14。实际上，它的工作原理与重力箱类似。在弹性元件内充有一定压力的气体，这些弹性元件置于一密封的盛油箱中，箱中的油与电缆油道中的油相接通。在相同供油量的情况下，压力供油箱可以适应不同的压力，因此它可以根据电缆位置要求选择弹性元件内充气压力。重力供油箱只能依靠它本身相对电缆线路的高度改变其压力，因此重力供油箱一般只能安装在高处，否则需要采取其他措施抬高供油箱的地位，这样会增加电缆安装敷设费用。

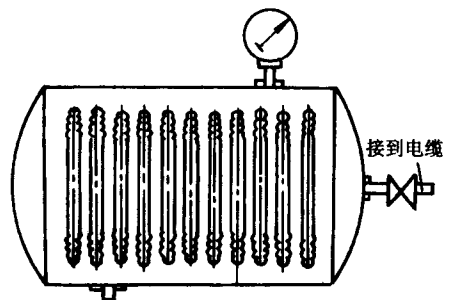


图 2-14 压力供油箱

阻止式连接接头盒的作用是将电缆分成只有电的连接而油流互不相通的两段，以限制电缆中静压力和故障影响区。在电缆水平敷设条件下，两阻止式连接接头盒间距离约为 1000~2500m，而对于垂直或倾斜敷设电缆，两阻止式连接接头盒间距离主要根据电缆允许最大静压力来确定。

充油电缆的结构大多采用单芯自容式。

### 1. 导电线芯

单芯自容式充油电缆的线芯与一般电缆线芯的结构不同，它具有与补充浸渍设备相联通的油道。把油道放在线芯中心的主要原因是：大量补充浸渍剂位于线芯，补充电场强度最大处（线芯表面）的绝缘层最及时，对提高电缆电气性能有利；另外，线芯具有中空结构，集肤效应小，同时人为增加电缆线芯外径可提高绝缘层的利用系数。

如图 2-15 和图 2-16 为中空线芯示意图。



图 2-15 具有螺旋支撑的中空线芯示意图

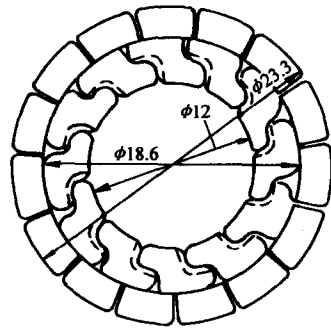


图 2-16 由型线构成的中空线芯剖面图

油道内径一般为 12~18mm，如电缆采用内部中心油冷，中心油道兼作冷却管路，为了减少油流阻降，可采用更大的中心油道直径。

其一是用一镀锡硬铜带（6mm×1mm）做成的螺旋（螺旋节距一般为 9mm）支撑，支撑的直径由所需油道直径大小来确定，一般为 12 毫米，在支撑外面同心圆地绞合镀锡导线（规则绞合），如图 2-15 所示。其二由型线绞合而成，第一层为 Z 形线，第二层及以上用弓形线绞合，如图 2-16 所示。为了使线芯中心油道与绝缘相通，在 Z 形线内边缘相距 1~3mm 刻有深 0.3~0.4mm 的细槽（如图 2-16 虚线所示）。这两种结构各有其优点，例如型线结构省材料（没有中心支撑螺旋），稳定性好（不易变形），油道内表面光滑，在制造过程中遗留的脏物容易被油冲洗带出。但有螺旋支撑结构的柔软性，工艺性较好。

对于大截面导电线芯，为了减小其集肤效应而采用四分割或六分割中空导电线芯，如图 2-17 所示。它的结构特点是四根或六根相互绝缘的扇形芯绞合而成，而每股扇形芯又是多根单线围绕其中心绞合而成。采取这样的线芯结构，使在每一节距长度上，从线芯中心至每一导线的平均距离大致相等，若沿导线方向通过的电流远大于导线间通过的电流（由于导线表面的氧化层，实际上导线间通过的电流可忽略不计），那么，每根导线的感应电动势将大致相等，于是每根导线通过的电流将大致相等，大大降低了线芯中的集肤效应。同样，在一个节距长度上，每一扇形体对相邻扇形体中的每一导线的平均距离也大致相等，这样也不会增加扇形体的邻近效应。正常结构 2000mm<sup>2</sup> 铜线芯的交直流电阻比可达 1.5，而小心控制

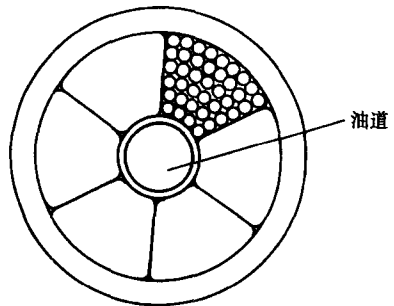


图 2-17 六分割中空线芯剖面图

制造工艺的分割导线的这一比值可降低到 1.1 左右。

## 2. 绝缘层

充油电缆一般用于较高工作电压线路，因此，对它的绝缘层（包括屏蔽层）提出更高的要求。充油电缆在线芯表面及绝缘层表面均有屏蔽层。我国生产的充油电缆均采用半导电纸带和双色半导电纸带作为屏蔽层，屏蔽用半导电纸带的层数，一般由导体表面情况决定。螺旋支撑圆形导丝组成的线芯表面没有用弓形线组成的线芯表面光滑，用的半导电纸层数就多些，一般为 2~6 层。绝缘层外表面屏蔽层数较少，一般为 2~3 层。

为了提高绝缘层的脉冲击穿强度，超高压充油电缆绝缘层内层一般采用较薄的电缆纸（0.02~0.075mm）。充油电缆的纸包工艺与粘性浸渍纸绝缘相同，只不过充油电缆的工作电压较高，绝缘层较厚，纸带（尤其是薄纸）发皱成为严重的问题。为了减少纸带发皱，一方面要求高压电缆纸具有较高的机械强度，较小的摩擦系数；另一方面，包绕绝缘时，纸卷应进行预干燥，严格控制纸包车间的湿度和纸带张力，并采用较大直径的收线盘等。

充油电缆干燥、浸渍工艺和粘性浸渍纸绝缘工艺略有不同，它是将绝缘纸包好的电缆经过预干燥（第一次干燥）后，进行压铅，然后推入烘房进行第二次真空干燥，二次干燥完毕后进行浸渍。最近多采用一次干燥工艺，以减少干燥时间，提高生产率和干燥质量。

最广泛采用的充油电缆合成浸渍剂为十二烷基苯和聚丁烯油。十二烷基苯是具有侧链的单环芳香烃。侧链上碳原子数平均为 12 个。其结构使它具有很高的热稳定性和介电稳定性。十二烷基苯浸渍剂还具有优异的吸气性能，可吸收氢气、氮气和水蒸气等，大大提高了绝缘的电气性能。

聚丁烯油主要用于钢管电缆。

国产充油电缆绝缘层的厚度，根据电缆工作电压，分别为 10~11mm（110kV）、17~20mm（220kV）、25mm（330kV）。对于 110kV 及以上电压等级电缆，由于电压高、绝缘层厚，电缆热稳定性必须予以足够重视。另外，由于电压高，绝缘层的介质损耗往往成为限制电缆传输功率大小的重要因素，因此要求电缆绝缘层的介质损耗因数（ $\text{tg}\delta$ ）较低和具有较高的稳定性。

## 3. 金属护套及保护层

由于充油电缆的绝缘均在一定压力下工作，我国自行设计制造的充油电缆金属护套采用铅锡铜合金（质量分数锡 0.4%~0.8%，铜小于 0.08%，其余为铅），厚度根据电缆直径不同约为 3.5~4.0mm，目前也进行其他合金铅护套的研究和采用铝套的试验。

我国生产充油电缆外护层有两种结构：一种结构是 21 型护层结构，径向铜带加固，适用于一般地下水平或倾斜敷设。具体结构（依次）是：一层沥青涂料→四层聚氯乙烯带→2mm×0.2mm 硬黄铜带→一层沥青→三层聚氯乙烯带→一层橡胶玻璃丝布带（或一层预浸渍纸）→一层沥青涂料→电缆麻被→一层沥青涂料→白垩液。另一种是 25 型护层结构，径向铜带加固、粗钢丝铠装，适用于大落差或水底敷设。具体结构（依次）是：一层沥青涂料→四层聚氯乙烯带→2mm×0.2mm 硬黄铜带→一层沥青→三层聚氯乙烯带→一层橡胶玻璃丝布带或（一层预浸渍纸）→ $\phi 5.7\text{mm}$  镀锌钢丝 +  $\phi 5.7\text{mm}$  硬紫铜丝 5 根（均匀地夹在镀锌钢丝中，以减小钢丝的磁效应，降低钢丝铠装损耗）→一层沥青涂料→电缆麻被→沥青→白垩液。铜带层主要承受电缆内部压力，而钢丝则主要承受拉力。

单芯电缆不允许用铜带铠装。这是因为三芯电缆通过的线芯电流为平衡负载时，其矢量

和为零，则叠加到铠装层上的感应电动势矢量和也为零。这样就不能产生环流损耗；而单芯电缆若用钢带铠装，则由于钢带为铁磁性材料，就会产生很高的感应电动势。一旦铠装层某处接地就会形成较大的环流，造成损耗。所以一般单芯电缆均用镀锌钢丝大节距绕包，并间以铝丝等非铁磁性材料，或用铜带铠装。

图 2-18 为一高压力 (0.1MPa) 380kV 单芯充油电缆截面图。它具有以下特点：

(1) 线芯由镀锡弓形线组成，为了保证中心油道的油能流入绝缘层，在线芯上每隔一定距离 (0.3m) 钻有一小孔。

(2) 由于绝缘层较厚 (28mm) 采用了两个油道，一在线芯中心，一在铅套下 (24 个半圆槽，深度为 3.3mm)。

(3) 由于铅套内有油槽，为了使铅套表面光滑及运行可靠，采用了双铅套结构，第一层铅套厚度为 5.5mm，第二层铅套厚度为 3.5mm。

(4) 由于电缆工作油压较高 (1013kPa，相当于 10 个大气压)，采用了两层小包缠节距径向铜带加固层，和一层大包缠节距轴向铜带加固层。

## 二、钢管充油电缆

钢管充油电缆如图 2-19 所示，它是由三根屏蔽的单芯电缆置于无缝钢管内组成。线芯用铝丝或铜丝绞合，没有中心油道。绝缘层的结构与自容式充油电缆相同，只不过浸渍剂的粘度较高，以保证电缆拉入钢管时，浸渍剂不会大量从绝缘层流出。线芯有半导电纸或金属化纸的屏蔽，在绝缘层表面均包有打孔铜带屏蔽层。在打孔铜带屏蔽层外缠以 2~3 根半圆形 (D 形) 青铜丝 (如图中 5 所示)，包缠节距约为 300mm 以减少电缆拖入钢管的拉力，并防止电缆拖入钢管时，损伤电缆绝缘层。同时，由于青铜丝使电缆绝缘外屏蔽与钢管内壁间保持一定距离，浸渍剂在这个间隙可以流通，因此还有降低电缆热阻提高电缆载流量的作用。为了避免电缆在运输过程潮气侵入电缆，电缆表面挤有临时铅套，在拖入钢管前剥去。

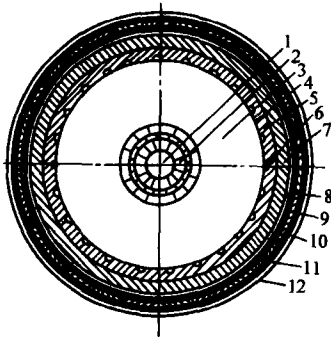


图 2-18 380kV、500mm<sup>2</sup> 自容式单芯充油电缆

1—中心油道 2—由镀锡弓形铜线组成的线芯 3—绝缘层 (最薄纸带厚度为 0.02mm) 4—屏蔽层 5—铅套 6—铅套下油道 7—第二层铅套 8—内衬层 9—径向加固铜带 (由 2 根 55×1mm<sup>2</sup> 初炼铜带以节距约 77mm 包缠而成) 10—轴向加固铜带 (由 2 根 30×0.5mm<sup>2</sup> 初炼铜带以节距约 1200mm 包缠而成) 11—径向加固铜带 (2 根 30×0.5mm<sup>2</sup> 初炼铜带以节距约 65mm 包缠而成) 12—外被层

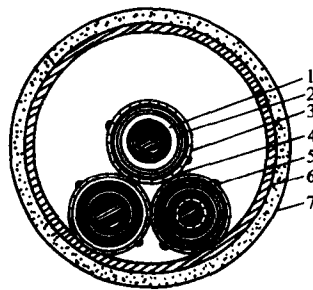


图 2-19 钢管充油电缆

1—线芯 2—线芯表面屏蔽 3—绝缘层 4—绝缘层表面屏蔽 5—半圆形青铜丝 6—钢管 7—防腐蚀外被层

目前我国主要生产自容式充油电缆，电压等级已达 500kV。80 年代由上海电缆研究所，沈阳电缆厂和哈尔滨理工大学（原哈尔滨电工学院）联合研制成功。充油电缆的国家标准为 GB9326.1—88，它是等效采用了国际电工委员会 IEC141—1（1976）的规定。一切技术标准可按该标准执行。

### 第三节 高压交联聚乙烯绝缘电力电缆

交联聚乙烯绝缘电力电缆以其合理的工艺和结构，优良的电气性能和安全可靠的运行特点，近年来在国内外获得了迅猛的发展。尤其在高压输电领域更取得了巨大的进展。敷设安装方便，运行维护简单，没有油的淌流问题，较之充油电缆有着巨大的优越性。目前日本已开发 750kV 级交联聚乙烯绝缘电力电缆，俄罗斯 220kV 级交联聚乙烯绝缘电力电缆已稳定运行十年左右，我国目前正式投产的电压等级为 220kV。

#### 一、工艺、材料和结构

用于高压输电系统的电力电缆大都为单芯结构。按照国家标准 GB11017—89 规定如铝芯、单芯，标称截面积  $630\text{mm}^2$ ，110kV 交联聚乙烯绝缘，皱纹铝包，聚氯乙烯护套电力电缆则应表示为

YJLLW02 110/1×630 (GB11017—89)

导体一般为铝或铜单线规则绞合紧压结构。有关工艺参数和 35kV 及以下的电缆相同。

为了降低损耗，提高载流量日本三菱电线工业株式会社研制成导电线芯为中空内水冷式结构，和充油电缆相仿，中空铜管通以冷水，实现强迫冷却。

内半导体层为导体屏蔽，应为挤包的半导体层。标称截面大于或等于  $500\text{mm}^2$  的电缆导体屏蔽应由半导体包带和挤包半导体层组成。绝缘屏蔽应为挤包半导体层。半导体屏蔽为可交联型的，由聚乙烯和碳黑组成。

绝缘料代号 XLPE，为聚乙烯基料和交联剂及各种添加剂配好的粒状料。必须严格工艺，要求做到“超净”，严防杂质和水分浸入绝缘。在挤出时，内外半导体屏蔽层和绝缘层要同时挤出。交联线应采用“全干”式交联线，即加温交联和冷却均用惰性气体保护和循环。

金属屏蔽层应由疏软铜丝组成，在表面用反向铜丝或铜带扎紧。采用铅包或铝包金属套时，金属套可作金属屏蔽层。如产品有防水要求，可根据使用场合不同，选用金属套加缓冲层或综合防水层加缓冲层的防水结构。

电缆如需铠装，其铠装应符合 GB2952 规定。单芯电缆的铠装层必须使用非铁磁性材料，以减少损耗。

外被层采用聚氯乙烯或聚乙烯护套料代号为 PVC—S2 或 PE—S。为了对外被层绝缘电阻测试方便，表面应有导电涂层。

图 2—20 为日本三菱电线工业株式会社 220~275kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆截面示意图。

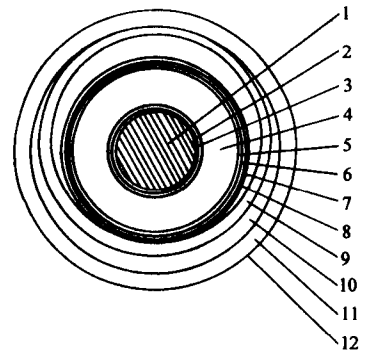


图 2—20 220~275kV XLP 电缆截面图

- 1—导体 2—半导体带 3—挤压  
半导体层 4—挤压交联绝缘层  
5—挤压半导体层 6—半导体带  
7—铜屏蔽 8—铜纤维带  
9—波纹铝护套 10—防蚀层  
11—挤压 PVC 护套 12—石墨涂层

## 二、高电压交联聚乙烯绝缘的树枝化放电老化

交联聚乙烯绝缘电力电缆虽然具有优异的电气性能和敷设维护方便等诸多优点，但经运行和研究表明，交联聚乙烯绝缘在运行中易产生树枝化放电，造成绝缘老化破坏，严重地影响了交联聚乙烯绝缘电力电缆的使用寿命。应据其生成机理，找出抑制树枝化放电老化的方法和措施。

树枝化放电据其形态和生成机理不同主要分为电树枝和水树枝。可简介如下：

### 1. 电树枝

主要是由于绝缘内部放电产生的细微开裂，形成细小的通道，其通道内空，管壁上有放电产生的碳粒痕迹。分枝少而清晰，呈冬天的树枝状。如图 2-21 所示。其产生机理主要有：

(1) 由于机械应力的破坏使交联聚乙烯绝缘产生应变造成气隙和裂纹，产生电树。这些机械应力，一方面是由于在电力电缆生产和敷设运行中不可避免地弯曲，拉伸等外力产生应力，另一方面是由于电缆在运行中电动力对绝缘产生的应力。其电动力

$$F = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

式中， $\epsilon$  为材料的相对介电系数； $E$  为电场强度。

尤其在线路短路情况下将会产生更大的电磁力。其数值为

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{i_1 i_2}{s} l \quad (\text{N}) \quad (2-9)$$

式中， $i_1$ ， $i_2$  为短路电流； $s$  为两导体之间的距离； $l$  为电缆长度。

从而使交联聚乙烯绝缘产生应力和应变。

(2) 气隙放电造成电树的生长。近代全干式交联生产线仅管可以消除某些宏观气隙，但仍有  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  或少量的  $20 \sim 30 \mu\text{m}$  的气隙形成微观多孔结构。多孔结构中的放电形式主要以电晕放电为主。通道中的放电所产生的气体压力增加，导致了树枝的扩展和形状的变化。

树枝通道内充气的程度，气化的能量由放电决定。放电后气体体积增加。一个脉冲放电能可表示为

$$J = \frac{1}{2} QU \quad (2-10)$$

式中， $Q$  为一个脉冲放电的电荷； $U$  为外施电压。

因一个脉冲放电能量所产生的体积为

$$V = J/J_p \quad (2-11)$$

式中， $J_p$  为有机材料的气化能，单位为  $\text{J}/\text{cm}^3$ ，聚乙烯的气化能为  $3057 \text{J}/\text{cm}^3$ 。

最大放电量  $Q_m$  和树枝长度  $L$  之间的关系为

$$Q_m = \alpha L^\beta \quad (2-12)$$

式中， $\alpha$ 、 $\beta$  为有关的系数。

故得放电产生的气体体积和气隙长度的关系为

$$V = \frac{QU}{2J_p} L^\beta \quad (2-13)$$

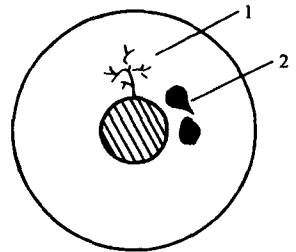


图 2-21 电缆绝缘中  
树枝示意图

1—电树枝 2—水树枝

(3) 场致发射效应造成电树的引发。在高电场作用下, 电极发射的电子由于隧道效应注入介质, 电子在注入路程中获得足够的动能, 使电子不断地与介质碰撞引起介质破坏, 导致树枝的引发。

电子的发射是受电场库仑力的作用。在电场作用下, 若电子从电场中获得的能量为  $A$ , 而电子通过晶格受质点的振动也会发生能量的转移, 这个过程称为“散射”。设电子在散射中损耗的能量为  $B$ , 据费罗利赫 (Frohlich) 理论, 若  $A > B$  成立, 电子会有能量的积累而加速, 不断对介质进行轰击。一般带电粒子有  $10\text{eV}$  能量, 而高分子键能低于  $10\text{eV}$ 。因而带电粒子的轰击可能破坏高分子结构, 造成裂解。

另一方面, 轰击介质的高能电子不仅来自电极的冷发射效应, 而且还要包括介质内的电子离开价带跃迁到空带的场致介质发射效应。

这两种综合效应的电子, 在交变电场作用下, 获得足够的动能, 与聚合物分子不断碰撞引起介质的化学变化导致树枝的引发。

(4) 缺陷论。缺陷主要是导体屏蔽上的节疤和绝缘屏蔽中的尖刺及绝缘内的杂质和空穴。缺陷可造成电场集中, 使节疤等附近的场强提高。如一电缆如图 2-22 所示。设尖凸物的曲率半径为  $R$ , 绝缘厚度为  $d$ , 且  $R \ll d$ 。  $R_1$ ,  $R_2$  为绝缘内外半径, 据 Mason 公式可计算出尖凸物尖端的最大场强。

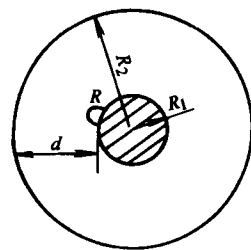


图 2-22 缺陷示意图

$$E_{\max} = \frac{2U}{R \ln\left(1 + \frac{4d}{R}\right)} \quad (2-14)$$

若无尖凸物时, 该处的最大场强

$$E'_{\max} = \frac{U}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

故场强增加的倍数

$$k = \frac{E_{\max}}{E'_{\max}} = \frac{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}{R \ln\left(1 + \frac{4d}{R}\right)} \quad (2-15)$$

若以  $35\text{kV}$  塑力缆为例, 相电压为  $21\text{kV}$ ,  $R_1 = 5\text{mm}$ ,  $R_2 = 14\text{mm}$ , 设  $R = 4 \times 10^{-1}\text{mm}$ ,  $d = 9\text{mm}$  则  $k = 5.74$ , 最大场强增大近 6 倍。

电场集中会引起场致发射。高能电子轰击聚合物, 导致高聚物裂解, 进而出现微裂缝, 即树枝状开裂。

## 2. 水树枝

主要是由于水分浸入交联聚乙烯绝缘, 在电场作用下形成的树枝状物, 如图 2-21 所示。它的特点是引发树枝的空隙含有水分, 且在较低的场强下发生。水树枝的产生, 将会使介质损耗增加, 绝缘电阻和击穿电压下降, 电缆的寿命明显缩短。据此也可通过非破坏性试验来判断电缆老化程度和电缆的使用寿命。

目前国内外研究水树枝生长机理的理论繁多, 其中主要有:

(1) 剩余应变使水树枝增长。当电缆在经受电压和水时, 导体附近的交联聚乙烯绝缘的



应变就会增加，而在应变较大的区域便生成水树枝。

电缆的应变大致有三类，即在生产过程中引起的应变，在敷设过程中由于拉伸和弯曲引起的应变以及在电缆运行中由于绝缘间隙中的水在电场作用下引起的应变即剩余应变。

剩余应变形成水树枝主要有两种原因。一个是间隙内的水由于损耗发热而产生热膨胀力。电缆中的损耗主要是线芯损耗，介质损耗，金属屏蔽和铠装损耗。由于损耗发热会使温度升高。据日本东京电力工业研究所计算，间隙内的水每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，压力会升高  $47.3\text{kg}/\text{cm}^2$ ，从而造成微观间隙的生长。

剩余应变导致水树枝的另一个原因是电致伸缩力。

如图 2-23，一个充水的间隙在电场的作用下会受到向间隙外的、沿着电场方向 Maxwell 应力和 Helmholtz 应力，称为电致伸缩外向力。同时水的表面张力会对抗外向力造成电致伸缩，此时间隙受到的净压力

$$p = 1.44 \times 10^{-10} E \times \frac{0.06}{r} \quad (2-16)$$

式中， $r$  为水的半径； $E$  为电场强度。

这个应力沿电力线方向，且从间隙向外，产生的机械应力可达几十  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 。如该方向上存在无定形区和杂质便会使间隙扩大发展。

(2) 电场下的化学势作用发展了水树。如图 2-24 为一绝缘模型。将绝缘浸在水中，并对绝缘施加电场  $E_0$ 。少量的水分子扩散进绝缘，其化学势为  $\mu_1$ 。绝缘内有一充分的微观空隙，其化学势为  $\mu_2$ ，场强为  $E_1$ 。外界水的化学势为  $\mu_{00}$ 。



图 2-23 电致伸缩力示意图

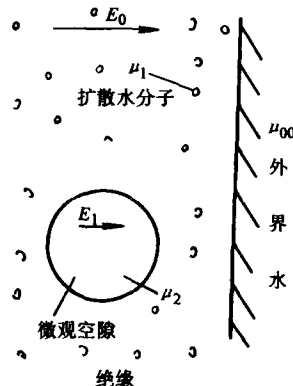


图 2-24 绝缘模型

绝缘内电场的总的化学势

$$\mu = \mu_{00} - \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \quad (2-17)$$

式中， $\epsilon_0$  为真空介电系数； $\rho$  为水的密度； $\epsilon$  为水的介电系数。

水向着化学势较小的部分运动，直至平衡。 $\mu_2 = \mu_1 = \mu_{00}$ 。微观空隙中的水和扩散进绝缘材料中的水之间的平衡状态会对间隙产生压力  $p_1$ 。

$$p_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 k_0 \rho E_1^2 - P_s \quad (2-18)$$

式中， $k_0$  为常数， $k_0 = 7.9 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{kg}$ ； $\rho$  为水的密度； $P_s$  为界面能对微观空隙中的水施

加的压力。

假定微观空隙是圆球形，则

$$P_s = 2 \frac{\alpha}{R} - \frac{3}{2} \epsilon_0 E_0^2 \quad (2-19)$$

式中， $\alpha$  为水和绝缘之间的界面张力，单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ ； $R$  为微观空隙的半径。

若  $p_1 > 0$  则微观空隙的水便会产生一个促使绝缘材料流动变形的力，于是便会增加微观空隙的体积即水树枝的生长。

(3) 电泳与扩散力理论。介质电泳可以认为是不带电荷，但是已极化的粒子或分子在畸变电场中的运动。若绝缘中存在一个含水杂质粒子，如图 2-25 若令  $U$  为施加的电压， $r_1$  为导体的半径， $r_2$  为绝缘半径， $a$  为杂质粒子半径， $r$  为杂质中心至线芯表面的距离， $\epsilon_0$  为真空介电系数， $\epsilon_1$  为绝缘介电系数， $\epsilon_2$  为粒子的介电系数。 $r^0$  为单位半径矢量。则据 Pohl 计算粒子将受到电场力

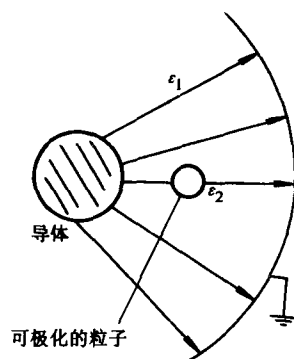


图 2-25

$$F = -4\pi a^3 \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \left( \ln \frac{r_1}{r_2} \right)^2} r^0$$

这个力和所施加的电压平方成正比，故和电压的极性无关。力的方向和半径矢量相反，在  $F$  的作用下，含水杂质会向导线线芯附近的高场区集聚。该区的温度亦高，则水会反复受热膨胀，造成很大的应力，使间隙扩大，即引起水树枝扩大和发展。

### 3. 目前减少和抑制树枝化放电的方法

各类树枝引发和生长的机理及条件不尽相同，因而抑制的方法也很多，仅简单归纳如下：

(1) 改进电缆结构，消除电缆绝缘结构中电场局部集中的缺陷，如采用内外半导电屏蔽和防电子发射屏蔽等。

(2) 严格加工工艺生产条件，采用三层同时挤出的全干式交联工艺，精选净化原材料，防止杂质，水分污染，采用封闭式生产加工流水线。

(3) 减少气隙数目和气隙尺寸，防止局部放电，可加入液体浸渍剂或固体粉末填料。

(4) 采用共混聚合物代替单一介质；加入电压稳压剂，减少电子注入的能量；溶以少量的强电解质如  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等降低间隙内的电场强度和增大化学势等。

## 第四节 新型电力电缆简述

随着科学技术的发展和大量远距离输电的要求，一些新型结构的电力电缆不断问世，如管道充气电缆、低温有阻电缆和超导电缆。跨世纪的新的输电方法可能从根本上改变了电缆的传统结构。

### 一、管道充气电缆 (CGI)

为适应大容量输电要求，特别是为适应封闭式电站需要，产生了管道充气电缆，也称六

氟化硫电缆，它相当于用压缩气体（ $\text{SF}_6$ ）为绝缘的封闭母线。它的结构是由内、外导体组成，外导体即管道，内导体即线芯，内外导体之间以压缩气体作为绝缘。图 2-26、图 2-27 分别为单芯、三芯充气电缆的结构图。

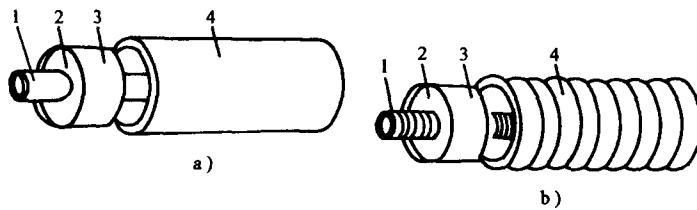


图 2-26

a) 刚型、单芯管道充气 b) 可挠型电缆结构  
1—线芯 2—绝缘支撑 3—安装屏蔽 4—外套（导体）

管道充气电缆的线芯一般由铜或铝制成，它的机械强度、外径大小、壁厚等由电压、电流容量、短路时的电磁力的大小等来决定。对于三芯管道充气电缆的外护套（管道），一般用无缝钢管或铝管制成；对于单芯电缆外护套则必须用非磁性材料——铝或不锈钢制成。护套的壁厚一般由气体压力和由于温度变化所产生的应力大小决定，一般长度为 12m。导体和支持绝缘子均在工厂装配好后，经过试验后充气密封到现场焊接。线芯在管道中全靠绝缘支持固定，支撑一般用氧化铝陶瓷材料，或者环氧树脂做成。它的形状可分圆板式和柱式，它的几何尺寸及固定形式，由耐电压特性、机械强度来决定。线芯与绝缘支撑接触面，应经过仔细处理，两者之间必须良好紧密结合。若有间隙存在，间隙处的电场强度将比无绝缘支撑处气体中的场强几乎大  $\epsilon$  倍（ $\epsilon$  为绝缘支撑的介电常数）。管道充气电缆在一定长度内必须有伸缩连接，以适应负载，温度变化所引起的管道伸缩。

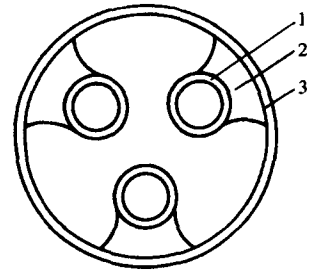


图 2-27 三芯管道充气  
电缆结构

1—线芯 2—绝缘支撑  
3—外导体（管道）

作为绝缘的压缩气体一般采用  $\text{SF}_6$ ，它是一种无毒、无臭、无色、无味的不燃气体。150°C 以下化学稳定性很好，甚至到 500°C 以下不会自行分解；绝缘强度很高，为空气或氮气的 2.3 倍。在  $3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5 \text{Pa}$ （3~4 个大气压）下，它的击穿强度与  $10^5 \text{Pa}$ （1 个大气压）下的变压器油的耐电强度相当。不过在不均匀电场下  $\text{SF}_6$  的绝缘强度下降很多，故应保证电场均匀性。

管道充气电缆的优点是：

(1) 具有与架空线相同程度的传输能力，同时又与电缆一样，受周围环境（盐雾、污秽、雷击）影响小。

(2)  $\text{SF}_6$  气体相对介电常数约为 1，与相同容量充油电缆相比，它的静电容量几乎只有充油电缆的 1/10。因此，充电电流小，作为超高压用的电缆无需电容电流补偿装置，有效输电距离长。

(3) 介质损耗很小，几乎可以忽略不计。这消除了由于介质损耗随温度上升，而增加限制电缆传输容量的因素。因此，它的工作温度高，比充油电缆具有更大的传输容量。

## 二、超导电缆

某些金属和金属化合物在某一温度以下，直流电阻率几乎等于零，这一现象称为超导现象。导体呈现超导现象的最高温度称为超导临界温度。运行温度在导体的超导临界温度以下的电缆称为超导电缆。运行温度在超导临界温度以上 20K 和 80K 左右的电缆为低温有阻电缆。二者结构大体相同。低温有阻电缆是采用涂冷技术把导体冷却到很低的温度，可使导体电阻系数大大降低，从而提高电流密度，增加传输容量。而超导电缆导体处于超导状态，导体电阻等于零，其传输的容量会更大。现就超导电缆的结构简述之。

### 1. 超导电缆的特性

超导体分为 I 型和 II 型两类。I 型超导体包括除铌、钽以外的大部分纯金属如铅、锡和汞等。这类超导体的特点是超导性能决定于一个较低的临界磁场  $H_c$ 。当磁场超过  $H_c$  时即回到正常状态。在超导状态下它们几乎是反磁性的，即磁场不能透入导体内部，只存在于表面极薄的一层，其厚度约为  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  mm。这类超导体的缺点是临界磁场低而且临界温度亦低，因此不利于应用。II 型超导体包括铌、钒和它的许多合金如铌三锡 ( $Nb_3Sn$ )，铌钽 ( $NbTi$ )，铌锆 ( $NbZr$ )，铌三锗 ( $Nb_3Ge$ )，钒三镓 ( $V_3Ga$ ) 以及近来发现的铌铝锗合金  $Nb_3(Al_{0.8}Ge_{0.2})$  等。它们具有两个临界磁场，在达到第一个临界磁场  $H_{c1}$  之前，其性能与 I 型的相似。超过这一点后，导体就不是完全反磁性的，有一些磁场能透过导体内部。在这个阶段内导体处于超导和正常的混合状态，直至磁场达到第二个临界值  $H_{c2}$  以后，导体就完全回到正常状态。这类超导体的临界温度和临界磁场均比 I 型的高。

从理论上说，在 I 型超导体中，当磁场低于临界值时，应该没有损耗。但实际上由于在导体表面极薄的一层厚度内仍有一些磁场透过，加上导体表面的缺陷，会导致一些磁滞，从而产生小的交流损耗。同样，对于 II 型来说，当磁场低于第一临界值时，也有一些交流损耗，但当磁场超过第一临界值，导体处于混合状态时，交流损耗就较大。

### 2. 超导电缆的结构型式

对于超导电缆来说，为了获得大的载流能力和低的交流损耗，选用的超导体必须具有高的临界磁场值和临界温度。从目前来看，铌似乎是最合适的，但它的价格较贵。铌的临界温度为 9.2K，必须采用液氮作为冷却介质。

在超导体中，电流只在表面极薄的一层流过，因此对导体不要求有大的截面，而要求有大的表面，一般采用细小的绞线束或大直径的管形导体。超导电缆的导体可以用纯铝作为底材，在其表面涂以一层铌；或用铜作底材在其表面涂以一层铌的合金。铌的交流损耗与其厚度无关。在发生故障时，底材将分担通过一部分故障电流，此外，它将增大导体的热容量，从而防止超导体过热。

图 2-28 为最早设计的 (1967 年提出) 超导直流电缆。缆芯由铌三锡超导体的细绞线构成，外面包有一层塑料绝缘。两个缆芯和一根液氮管道一起装在一个直径为 12cm 的管子内。管子内部的空隙是液氮的回路。电缆的外层是热辐射屏蔽，直径为 14cm，它借液氮的冷却，保持温度在 77K 左右。电缆管与热辐射屏蔽之间的空隙保持真空。电缆管道下面有二根液氮管道。整个系统装在一个密封的真空金属槽内，使与周围环境隔热。因为是直流，所以导体应该没有损耗，但由于输送功率的波动，会导致一些损耗，特别是合上和切断电源时。对于 20km 长的这种线路，液氮的热负荷所需的制冷功率约为 300kW，而液氮的制冷功率则需 1200kW。

交流超导电缆的损耗随着输送容量的增大而迅速上升，因此它的输送容量要比直流超导电缆小得多。交流超导电缆的损耗主要包括导体的磁滞损耗和绝缘的介质损耗。前者与负荷电流的立方成正比，而后者则与电压的平方成正比。图 2-29 示出了三芯交流超导电缆的结构（也称之为硬导体结构）。导体是由高纯度的铝管加上一层  $10\sim 25\mu\text{m}$  厚的铌构成。铝管可加强超导体的机械强度，而且在失去超导性能时提供电流的另外的通路。三相导体是同轴布置的，其优点是导体的表面积大，而电缆的尺寸较小。此外，由于这种布置消除了杂散磁场，所以不需要电磁屏蔽，三相导体之间也不存在机械的力。这是由于对第三相采用分裂导体作为其他两相电流的回路，使所得到的电流具有正确的相位关系。

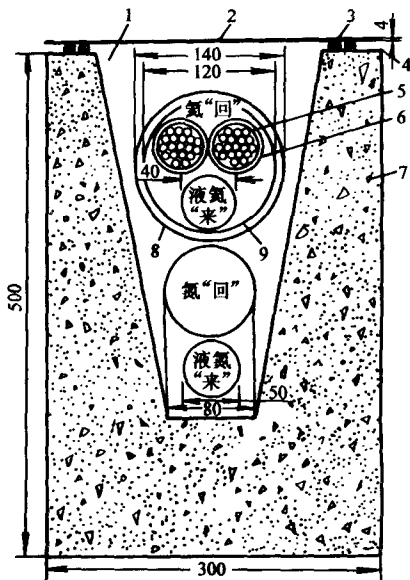


图 2-28 200kV100000MW 二芯直流超导电缆 (单位: mm)

- 1—真空 2—盖板 3—密封垫圈
- 4—金属衬层 5—超导电缆 6—塑料绝缘
- 7—混凝土 8—热屏蔽 (77K) 9—真空

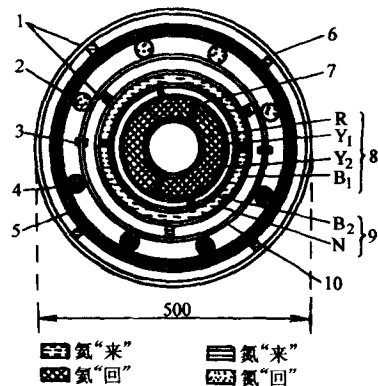


图 2-29 33kV750MW 三芯交流电缆

- 1—承重支撑 2—液氮管 3—聚丙烯绝缘条 4—超级热绝缘 5—聚丙烯管
- 6—具有防腐保护的钢管 7—绝缘隔板 8—铌、铝相导体 9—铅、铝相导体
- 10—辐射屏蔽 R—红相  $Y_1, Y_2$ —黄相  $B_1, B_2$ —绿相 N—液氮“来”管管壁

用液氮冷却的三相导体处在一个由液氮冷却的热辐射屏蔽内。液氮循环系统共有 8 根管子，其中“来”、“回”各 4 根。为了防止热短路，将热辐射屏蔽分成两个半圆形并用聚丙烯隔开。全部导体和低温管道均装在一个聚丙烯的管子内。电缆的外壳是具有防腐保护的钢管。聚丙烯管子与钢管之间填以超级绝热材料并保持真空。三相导体之间借液氮和真空作为电气绝缘。为了保持三相导体同轴布置，必须使用绝缘支撑。由于这些支撑的介质常数与液氮和真空的不同，所以在这些支撑处形成了绝缘的薄弱点。对于 10 公里长的这种线路，液氮的进口和出口温度分别为 4.2K 和 5.0K，而压力则分别为 2.2 和 2.0 $\text{kg}/\text{cm}^2$ 。进口和出口的压力差小，这是因为液氮的粘度非常小的缘故。这种电缆每段的制造长度不超过 20m，因此在一条线路中要有很多接头，这是很不利的。此外电缆的结构也较复杂，对于安装和修理都带来了困难。

图 2-30 示出了另一种交流超导电缆的结构型式。导体是由铜条镀上很薄一层的铌，以螺旋形绕成一个管状，因此是可挠的。导体的绝缘采用液氮浸渍的绝缘带绕成，绝缘外面有一层用镀铌铜带制成的涡流屏蔽。三相导体以三角形排列布置在一个不变钢制的管子内。液氮流过管子使导体冷却，然后经过另一个小管回到制冷设备。不变钢管子系用钢丝绳悬挂在一个由液氮冷却的，铝和不变钢合金制成的热辐射屏蔽内。整个装置再用钢丝绳悬挂在一个保护钢管内。热辐射屏蔽内部保持真空，它与保护钢管之间的间隙填以氧化铝粉末并抽真空作为绝热间隔。

这种结构的特点是以钢丝绳悬挂的办法代替固定的支撑。这样在安装时可以有一些自由活动的余地。同时也避免了由于支撑冷缩引起的问题。这种设计的优点是绕包绝缘在 4.2K 时的介质损耗非常低，缺点是投入运行之前需要冷却的时间太长，约需 40 天。

图 2-31 示出了三芯 400kV5000MV·A 超导电缆的典型结构（也称之为软导体结构）。每相缆芯有一对同心圆导体，其中内导体接相电压，外导体接地。两者之间用液氮浸渍的包带绝缘。导体是由镀有一层厚约  $15\mu\text{m}$  铌的宽 10mm、厚 1mm 铜条组成的。因为外导体中的电流基本上与相电流相等，而方向相反，所以缆芯外部几乎没有磁场。这样不仅基本上消除了每相管道的涡流损耗，而且三相之间也不会有大的电动力存在。每个缆芯放在一个单独的波纹钢管内。三个钢管以三角形排列由一个管架夹紧，然后用支撑固定在一个装有滚轮的台架中。辐射热屏蔽借液氮冷却到 73K 的温度。整个装置外面有一个保护钢管。液氮由两个缆芯管道进入，由另一个缆芯管道返回。

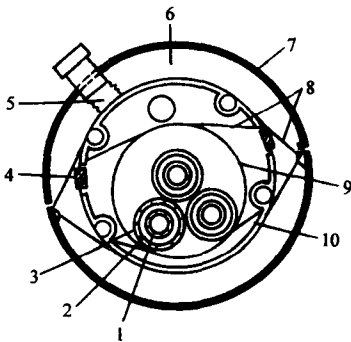


图 2-30 三芯软导体交流超导电缆  
1—相导体（镀铌铜带） 2—浸渍绝缘  
（聚乙烯带-液氮） 3—电屏蔽（镀铌铜带）  
4—热绝缘分隔片 5—抽真空管接头 6—热  
绝缘 7—钢外壳 8—悬吊钢丝绳 9—内壳  
（不变钢） 10—热屏蔽（铝-不变钢）

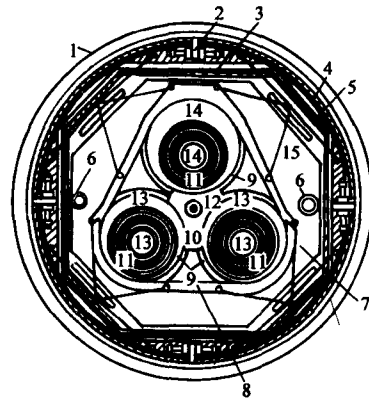


图 2-31 三芯 400kV、5000MV·A  
超导电缆

- 1—外钢管 2—滑轮 3—超级热绝缘  
4—台架 5—热屏蔽 6—液氮管  
7—支撑杆 8—固定三芯的管架  
9—液氮管（波纹管） 10—氮管  
间隔板 11—缆芯 12—拉引绳  
13、14—液氮来回途径 15—真空

这种设计由于导体是可挠的，缆芯及其波纹管的制造长度可达 300m。在现场装配好夹紧三芯的管架、热辐射屏蔽、液氮管道和台架后，借台架的滑轮整体拉入保护钢管内，因此

每 300m 只有一个接头。

### 三、无损耗管道输电法

世界上许多国家的电力消耗每 10 年增加近一倍。电力从电源至消费者的距离在不断延长。可是输电线路的潜力已经接近极限。全世界的发电量几乎有 1/5 消耗在输送过程中。为了消除损耗，前苏联科学院高温研究所的科学家提出一个几万 km 输电无损耗的崭新方法。世界上独一无二的管道输电试验装置已开始运行。

该方法的实质是将电能在其产地变成加速电子流的动能，强力加速器使电子加快到近光速的程度，然后将电磁聚焦的电子束驱入真空管以电磁辐射形式输送到所需要的距离。在接收电力的地方，专用减速装置制动并将加速电子还原为电能。

如果沿着埋入地下 2m 处的直径达 1m 的钢管，可以廉价地将大功率的电力无损耗地输送到任何距离的地方。

如运行成功，21 世纪初就可望建立第一条工业用管道输电线路。

### 第三章 电力电缆的电气参数

电气参数对电力电缆是至关重要的。它决定了电缆的传输性能和传输容量。这是由于容量主要取决于各部分的损耗发热，而损耗则是根据电气参数来计算的。相序阻抗又是线路保护系统所依据的重要参数，直接影响着电网的安全运行。电气参数也往往做为检查电缆质量和工艺的指标和依据。

电气参数取决于电缆所用的材料和几何尺寸，所以可据此计算电气参数。反之，亦可据电气参数的要求来选择设计电缆的结构和尺寸。所以电气参数是电缆设计的重要依据之一。

电气参数主要有导电线芯电阻、绝缘电阻、电缆的电感和电容，以及正（负）序阻抗和零序阻抗。下面分别予以介绍。

#### 第一节 导电线芯电阻

最高工作温度下，单位长度导电线芯的交流电阻由下式计算

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (3-1)$$

式中， $R'$ 为最高工作温度下，导电线芯的单位长度直流电阻，单位为 $\Omega/\text{m}$ ； $y_s$ 为集肤效应因数； $y_p$ 为邻近效应因数。

##### 一、导电线芯的直流电阻 $R'$

最高工作温度下，单位长度导电线芯的直流电阻用下式计算

$$R' = \frac{\rho_{20}}{A} [1 + \alpha(\theta - 20^\circ)] k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \quad (3-2)$$

式中， $A$ 为线芯截面积，如线芯由 $n$ 根相同直径 $d$ 的导线绞合而成，则 $A = \frac{n\pi d^2}{4}$ ； $\rho_{20}$ 为线芯材料在温度为 $20^\circ\text{C}$ 时的电阻率，对于标准软铜： $\rho_{20} = 0.017241 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，对于标准硬铝： $\rho_{20} = 0.02864 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ； $\alpha$ 为 $20^\circ\text{C}$ 时每度温度系数常数，对于铜导体为 $0.00393$ ，铝导体为 $0.00403$ ； $\theta$ 为最高工作温度，见表3-1； $k_1$ 为单根导线加工过程中引起金属电阻率增

表 3-1 各类绝缘的最高允许工作温度

绝缘类型	导线最高额定温度/ $^\circ\text{C}$	
	正常运行	短路（最大持续时间 5s）
油纸	75~80	220
聚氯乙烯	65~70	160
聚乙烯	70	130~150
交联聚乙烯	90	250

加所引入的系数，它与导线直径大小，金属种类，表面是否有涂层有关，线径越小，系数越大，一般可取 $1.02 \sim 1.07$ ； $k_2$ 为由于多根导线绞合使单线长度增加所引入的系数，一般取 $1.02$ （ $250\text{mm}^2$ 以下） $\sim 1.03$ （ $250\text{mm}^2$ 及以上）； $k_3$ 为因紧压过程使导线发硬，引起电阻



率增加所引入的系数，一般取 1.01； $k_4$  为因成缆绞合，使线芯长度增加所引入的系数，一般取 1.01 左右； $k_5$  为因考虑导线允许公差所引入的系数，对紧压结构一般取 1.01 左右。

### 二、集肤效应因数 $y_s$

集肤效应因数即由于集肤效应使电阻增加的百分数，可由下式求得

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (3-3)$$

式中， $X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s$ ，其中  $f$  为电源频率，工频为 50Hz； $R'$  为单位长度电缆导体线芯直流电阻（见式 3-2），单位为  $\Omega/m$ ； $k_s$  为除分割导体取 0.435 外均取 1。

### 三、邻近效应因数 $y_p$

即由于邻近效应使电阻增加的百分数，可用下式表示

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \quad (3-4)$$

式中， $X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$ ，其中  $f$ 、 $R'$  同式 (3-3)， $k_p$  除分割导体取 0.37 外，其他型式线芯取 0.8~1； $D_c$  为线芯外径，对于扇形芯电缆，等于截面积相同的圆形芯的直径，如  $A$  为线芯截面，则扇形芯等效圆的直径为  $D_c = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ ； $s$  为线芯中心轴间距离，对于扇形多芯电缆  $s = D_c + \Delta$ ， $\Delta$  为线芯间绝缘层厚度，其邻近效应因数  $y_p$  为式 (3-4) 计算所得值乘 2/3。

对于高压充油电缆，线芯为中空结构，其  $k_s$  可按式计算

$$k_s = \frac{D'_c - D_0}{D'_c + D_0} \left( \frac{D'_c + 2D_0}{D'_c + D_0} \right)^2 \quad (3-5)$$

式中， $D_0$  为线芯内径（中心油道直径）； $D'_c$  为具有相同中心油道的等效实芯导体的外径。

**例 3-1** 试计算 YJLV23—6/10 3×150 (GB12706.3—91) 型电力电缆导电线芯的电阻，已知该电缆内外半导电屏蔽层各厚 1mm，扇形导电线芯结构为 (7×2.07+2×2.07+15×2.07)mm<sup>2</sup>，统包金属屏蔽层，金属屏蔽层为 0.1×2mm<sup>2</sup> 的绕包铜带，交联聚乙烯绝缘厚度为 3.4mm。导体允许最高工作温度为 90℃。

**解** 线芯实际面积

$$A = \frac{\pi}{4} (7 \times 2.07^2 + 2 \times 2.07^2 + 15 \times 2.07^2) \text{mm}^2 = 80.72 \text{mm}^2 = 80.72 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$\rho_{20}$  取  $0.02864 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ， $\alpha$  取 0.00403， $k_1 = k_2 = 1.02$ ， $k_3 = k_4 = k_5 = 1.01$ 。故单位长度直流电阻为

$$R' = \frac{0.02864 \times 10^{-6}}{80.72 \times 10^{-6}} [1 + 0.00403(90^\circ - 20^\circ)] 1.02^2 \times 1.01^3 \Omega/m = 4.853 \times 10^{-4} \Omega/m$$

等效圆直径  $D_c = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 80.72}{\pi}} \text{mm} = 10.14 \text{mm}$

$s = D_c + \Delta + (\text{内外半导电层厚度}) \times 2 =$

$$(10.14 + 3.4 \times 2 + 2 \times 2) \text{ mm} = 20.94 \text{ mm}$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f \times 10^{-7}}{R'} k_s = \frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7}}{4.85 \times 10^{-4}} \times 1 \text{ m}/\Omega = 0.259 \text{ m}/\Omega$$

$$X_p^2 = \frac{8\pi f \times 10^{-7}}{R'} k_p = \frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7}}{4.85 \times 10^{-4}} \times 1 \text{ m}/\Omega = 0.259 \text{ m}/\Omega$$

代入式 (3-3) 和式 (3-4) 得

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} = \frac{0.259^2}{192 + 0.8 \times 0.259^2} = 0.0003$$

$$y_p = \frac{2}{3} \left\{ \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \right\} = 0.0004$$

故导电线芯单位长度的交流电阻

$$R = R'(1 + y_s + y_p) = 4.853 \times 10^{-4} (1 + 0.0003 + 0.0004) \Omega/\text{m} = 4.857 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

**例 3-2** 试计算 220kV 裸铅包低油压充油电缆线芯的有效电阻。电缆运用于三相平衡线路，其中心轴间距离  $s = 220 \text{ mm}$ ，电缆线芯结构尺寸如下：

线芯标称面积	400mm <sup>2</sup>
线芯结构	铜芯 (18 + 24 + 30) × φ2.86mm <sup>2</sup>
螺旋管支撑内径	12mm
螺旋管支撑外径	13.2mm
线芯外径	29.3mm
线芯屏蔽厚度	0.85mm
线芯屏蔽外径	31.0mm
绝缘层厚度	20.0mm
绝缘层屏蔽厚度	0.5mm
绝缘层屏蔽外径	72.0mm
铅套厚度	3.5mm
铅套外径	79.0mm
电缆允许最高工作温度	75℃

$$\text{解 } A = \frac{\pi}{4} \times 72 \times (2.86)^2 = 464 \text{ mm}^2 = 464 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\text{取 } \rho_{20} k_1 = 0.01748 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}, k_2 = 1.02, k_3 = k_4 = k_5 = 1 \text{ 得}$$

$$R' = \frac{\rho_{20}}{A} [1 + \alpha (\theta - 20^\circ)] k_1 k_2 = \frac{0.01748 \times 10^{-6}}{464 \times 10^{-6}} [1 + 0.00393 (75 - 20)] \times 1.02 \Omega/\text{m} = 0.464 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

线芯等效直径

$$D'_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} A + D_0^2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 464 + 13.2^2} \text{ mm} = 27.7 \text{ mm}$$

$$k_s = \frac{D'_c - D_0}{D'_c + D_0} \times \frac{(D'_c + 2D_0)^2}{(D'_c + D_0)^2} = \frac{27.7 - 13.2}{27.7 + 13.2} \times \left( \frac{27.7 + 2 \times 13.2}{27.7 + 13.2} \right)^2 = 0.622$$

$$k_p = 0.8$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s = \frac{8\pi \times 50}{0.464 \times 10^{-4}} \times 10^{-7} \times 0.622 = 1.69$$

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p = \frac{8\pi \times 50}{0.464 \times 10^{-4}} \times 10^{-7} \times 0.8 = 2.17$$

代入式 (3-3) 和 (3-4) 得

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} = \frac{1.69^2}{192 + 0.8 \times 1.69^2} = 0.0147$$

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left( \frac{D_c}{S} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{D_c}{S} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] =$$

$$\frac{2.17^2}{192 + 0.8 \times 2.17^2} \left( \frac{29.3}{220} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{29.3}{220} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{2.17^2}{192 + 0.8 \times 2.17^2} + 0.27} \right] =$$

$$0.00169$$

$$\therefore R = R' (1 + y_s + y_p) = 0.464 \times 10^{-4} [1 + 0.0147 + 0.00169] \Omega/m =$$

$$0.47 \times 10^{-4} \Omega/m$$

## 第二节 电缆的绝缘电阻

绝缘电阻的确切含义,是指绝缘在用直流电压度量时,在导电电流下的电阻值。在计算时,是由绝缘材料的电阻率和电缆的结构尺寸所确定。在电缆制造和运行中,可通过绝缘电阻的变化来检查分析绝缘质量的变化。

### 一、单芯电缆绝缘层电阻

如图 3-1 所示,  $D_c$  为电缆内半导体屏蔽外径,  $D_i$  为绝缘层外径 (不含外半导体层厚度)。  $\Delta_1$  为内外半导体屏蔽层间的绝缘厚度。

在单位长度电缆距电缆中心  $x$  处取厚度为  $dx$  的绝缘层,则该圆柱体的绝缘电阻为

$$dR_i = \frac{\rho_i}{2\pi x} dx \quad (3-6)$$

式中,  $\rho_i$  为电缆绝缘的电阻率。

则单位长度电缆绝缘的电阻为

$$R_i = \int_{D_c/2}^{D_i/2} \frac{\rho_i}{2\pi x} dx = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \frac{D_i}{D_c} = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \frac{D_c + 2\Delta_1}{D_c} \quad (3-7)$$

式中,  $\ln \frac{D_i}{D_c} = G$ , 称为几何因数。各种型式的电缆的  $G$  值可从图 3-2 中查出, 则

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi} G \quad (3-8)$$

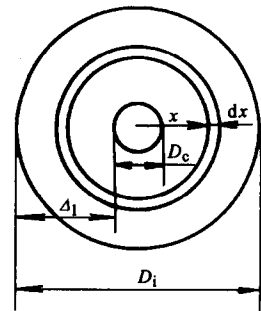


图 3-1 计算电缆绝缘电阻说明

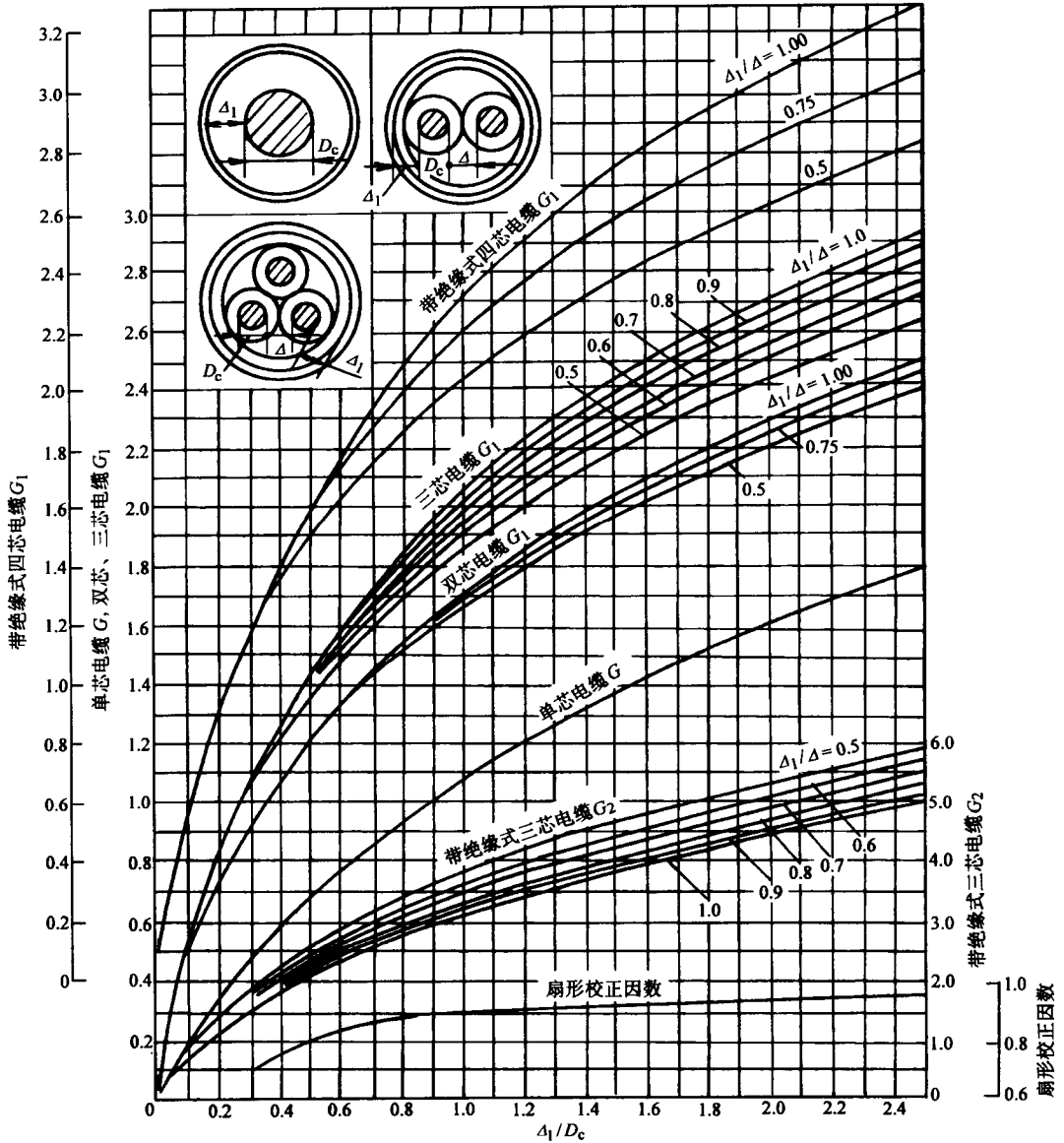


图 3-2 各种型式电缆的几何因数

## 二、多芯电缆的绝缘电阻

对于圆形芯电缆 
$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi n} G_1 \quad (3-9)$$

式中,  $n$  为电缆的芯数;  $G_1$  相当于三芯连结在一起对于公共金属屏蔽层的几何因数。

对于扇形芯电缆 
$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi n} G_1 F \quad (3-10)$$

式中,  $F$  为扇形校正因数, 亦可从图 3-2 中查得。

电缆在交流下的电阻为工作电阻 (交流泄漏电阻)

$$R = \frac{U}{I_r} = \frac{U}{I_c \operatorname{tg} \delta} = \frac{U}{U \omega \cot \delta} = \frac{U^2}{U^2 \omega \cot \delta} = \frac{U^2}{\omega_i} \quad (3-11)$$

即等于绝缘层承受的电压的二次方与介质损耗之比。要比直流电阻值小。

电缆常用绝缘材料在 20℃ 下的绝缘电阻率概值如表 3-2 所示。

表 3-2 电缆的几种常用绝缘材料的电阻率 (概值)

材料名称	绝缘电阻率 /Ω·m (20℃)
浸渍纸绝缘	$10^{13} \sim 10^{15}$
橡皮	$10^{11} \sim 10^{13}$
聚氯乙烯	$10^{11} \sim 10^{12}$
聚乙烯	$10^{14} \sim 10^{15}$
交联聚乙烯	$10^{14} \sim 10^{15}$

### 第三节 电缆的电容

电缆本身便是一个标准的圆柱形电容器。导电线芯和接地的金属屏蔽层 (或金属护套) 构成了电容器的两个极。电容电流将会限制电缆的传输容量和长度。通过电容的测量, 也可检查电缆的质量和工艺。所以电容亦是电缆较重要的一个电气参数。

单芯电缆电容的计算可忽略边缘效应。介质中任一点的电场均沿半径方向分布。类似绝缘电阻的计算方法, 在绝缘中距电缆中心  $x$  处取一单位长度的小圆柱体。据高斯定理, 穿出均匀介质中任意闭合面的电场强度矢量的通量, 恒等于闭合面内所包围的电荷的代数和与介质的介电常数  $\epsilon$  之比, 而与闭合面的形状大小, 电荷分布无关。

因对称关系, 各处的电场都是沿着与导线相垂直的方向 (忽略电场的切向分量), 这样圆柱体侧面上的电场方向处处都与侧面积的外法线方向一致, 在数值上均相等。而圆柱的上下底面积上的电场方向则与外法线方向垂直。因此, 在积分过程中, 只计算圆柱侧面积上的电场通量即可。所以

$$\oint_S E dS = \frac{q}{\epsilon_i} \quad \text{即} \quad E \int_S dS = \frac{q}{\epsilon_i}$$

$$E \times 2\pi x \times 1 = \frac{q}{\epsilon_i}, \text{故} \quad E = \frac{q}{2\pi x \epsilon_i} \quad (3-12)$$

式中,  $q$  为线芯所带电荷;  $\epsilon_i$  为介质的介电常数;  $E$  为场强。

而相电压

$$u = \int_l E dl = \int_{D_c/2}^{D_i/2} \frac{q}{2\pi x \epsilon_i} = \frac{q}{2\pi \epsilon_i} \ln \frac{D_i}{D_c} \quad (3-13)$$

式中,  $D_i$  为绝缘层外径;  $D_c$  为导电线芯外径 (含内半导电层)。

所以单位长度电缆的电容

$$C = \frac{q}{u} = \frac{2\pi \epsilon_i}{\ln \frac{D_i}{D_c}} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon}{\ln \frac{D_i}{D_c}} \quad (3-14)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $\epsilon$  为绝缘材料的相对介电常数。

为方便计, 可将式 (3-14) 写成

$$C = \frac{55.7\epsilon}{G} \times 10^{-12} \text{F/m} \quad (3-15)$$

$G$  为几何因数, 如前述。

对于多芯圆形芯电缆, 三芯联在一起对金属屏蔽层 (或金属护套) 的电容

$$C = \frac{55.7n\epsilon}{G_1} \times 10^{-12} \text{F/m} \quad (3-16)$$

对于扇形芯电缆, 三芯联在一起对金属屏蔽的电容

$$C = \frac{55.7n\epsilon}{G_1 F} \times 10^{-12} \text{F/m} \quad (3-17)$$

与绝缘电阻一样,  $G$  及  $F$  值均可从图 3-2 中的相应曲线查得。

常用绝缘材料 (相对) 介电常数和  $\text{tg}\delta$  如表 3-3。

表 3-3 电缆常用绝缘材料相对介电常数  $\epsilon$  及  $\text{tg}\delta$

材料名称	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
粘性浸渍纸绝缘	4.0	0.01
充油电缆绝缘	3.3~3.7	0.004~0.0045
橡皮绝缘 (乙丙、丁基)	3.0~4.5	0.04~0.05
聚氯乙烯绝缘	8.0	0.1
聚乙烯绝缘	2.3	0.001
交联聚乙烯绝缘	2.5	0.008

#### 第四节 电缆的电感

在工频下, 电磁场为缓变场。可仅考虑由于磁场的变动而引起的感应电压, 而感应电压反过来对磁场的影晌可不必考虑, 且磁场按恒定磁场计算。

##### 一、单相回路电缆的电感

在实际工程中, 可将线芯内部磁通链所产生的电感称为内感  $L_i$ ; 线芯外部所链磁通产生的电感称为外感  $L_e$ 。整个回路的电感为二者之和

$$L = L_i + L_e \quad (3-18)$$

##### 1. 内感 $L_i$

如图 3-3 所示。设导电线芯的直径为  $D_c$ , 材料的磁导率为  $\mu$ 。导电线芯为铜和铝, 它们均为非磁性材料, 其磁导率可认为等于真空磁导率 ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )。

距导电线芯中心  $x$  处的磁场强度  $H_i$ , 据安培环路定律: 沿其矢量任一闭合路径的线积分, 等于穿过该回路所限定面积的电流的代数和  $I_i$ 。即

$$\oint_L H_i dl = I_i \quad (3-19)$$

可写为  $H_i \oint_L dl = I_i$  (3-20)

而  $\oint_L dl$  为半径为  $x$  的圆的周长即  $2\pi x$

故式 (3-20) 为  $H_i 2\pi x = I_i$

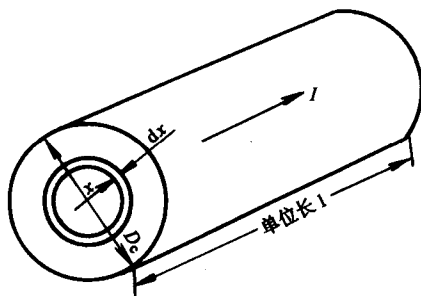


图 3-3 计算线芯内感说明

则

$$H_i = \frac{I_i}{2\pi x} = \frac{I}{2\pi x} \cdot \frac{x^2}{(D_c/2)^2} \quad (3-21)$$

而单位长度线芯导体的磁场能量

$$W = \int_0^{D_c/2} \frac{1}{2} \mu_0 H_i^2 dV = \int_0^{D_c/2} \frac{1}{2} \mu_0 H_i^2 \times 2\pi x dx$$

将式(3-21)代入得  $W = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi}$ ; 又因  $W = \frac{1}{2} L_i I^2$  (3-22)

于是单位长度每根电缆线芯的内感为

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} = 0.5 \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-23)$$

对于中空线芯结构, 如有中心油道电缆的线芯  $L_i$  可用简化公式

$$L_i = 0.5 \left[ 1 - \left( \frac{D_0}{D_c} \right)^{1.5} \right] \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-24)$$

式中,  $D_c$  为线芯外径;  $D_0$  为中空油道内径。

## 2. 外感 $L_e$

如图 3-4, 可近似认为电流集中在线芯的几何中心轴线上, 在离电缆中心轴线  $x$  ( $x > D_c/2$ ) 处的磁场强度为两个积分曲线所链磁通在  $x$  处产生的磁场强度的叠加。据安培环路定律

A 相  $\oint_{L_A} H_A dl = I$  即  $H_A 2\pi x = I$  得  $H_A$

$$= \frac{I}{2\pi x};$$

B 相  $\oint_{L_B} H_B dl = I$  即  $H_B \cdot 2\pi(s-x) = I$  得

$$H_B = \frac{I}{2\pi(s-x)}$$

式中,  $s$  为电缆中心间距离;  $I$  为线芯电流。则  $x$  处的磁场强度

$$H = H_A + H_B = \frac{I}{2\pi x} + \frac{I}{2\pi(s-x)} \quad (3-25)$$

又因磁通  $\phi = \int_s B \cos \beta ds = \int_{D_c/2}^{s-D_c/2} B ds = \int_{D_c/2}^{s-D_c/2} \mu_0 H dx$  (3-26)

将式(3-25)代入式(3-26)得

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln \frac{s - D_c/2}{D_c/2} \quad (3-27)$$

在一般情况下  $D_c/2 \ll s$  故  $\phi = \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln \frac{2s}{D_c}$  对每根电缆而言, 磁通链为其一半, 故每单位长度电缆的外感  $L_e$

$$L_e = \frac{\phi}{2I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2s}{D_c} = (2 \ln \frac{2s}{D_c}) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-28)$$

故单相电缆回路每单位长度电缆线芯电感为

$$L = L_i + L_e = 0.5 \times 10^{-7} \text{H/m} + (2 \ln \frac{2s}{D_c}) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-29)$$

## 二、三相回路电缆的电感

电力电缆在实际工程中, 尤其高压输电线路均为三相水平直线敷设和三相等边三角形敷

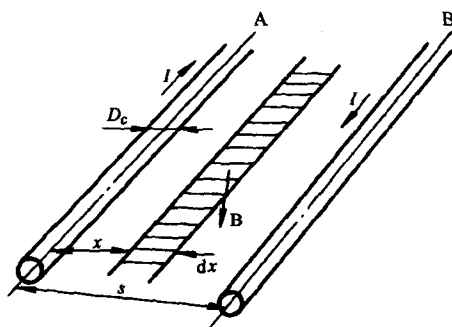


图 3-4 计算外感说明

设（三芯电缆亦属此列）。均可近似地使用单相回路电感的计算公式，即

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_i + (2 \ln \frac{2s}{D_c}) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-30)$$

值得指出的是，对于水平直线敷设的三相电缆，为了保证线路平衡运行，电缆经过一定长度后需进行换位敷设。如图 3-5。

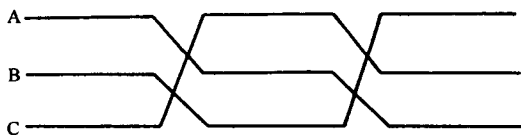


图 3-5 电缆换位示意图

此时电感应取三段电感之平均值即

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} = L_i + 2 \left( \ln \frac{2 \sqrt[3]{s_1 s_2 s_3}}{D_c} \right) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-31)$$

若

$$s_1 = s_2 = s; s_3 = 2s \text{ 时上式为}$$

$$L = L_i + 2 \left( \ln \frac{2 \sqrt[3]{2} s}{D_c} \right) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-32)$$

## 第五节 电力电缆金属屏蔽层（金属护套）中的感应电压

当电缆在交变电压下运行时，线芯中通过的交变电流必然会产生交变的磁场。磁场产生的磁链不仅和线芯相链，也和金属屏蔽层及铠装层相链，必然会在金属屏蔽和铠装层上产生感应电动势。金属屏蔽层一般均采用单点接地或交叉互连接地方式，这样就会在金属屏蔽层上产生感应电压。

对于具有公共金属屏蔽的三芯电缆，因线芯通过的三相电流的相量和为零，故在公共的金属屏蔽层中的感应电压相量和亦为零，可忽略不计。但对单芯的高压和超高压电力电缆，感应电压就可能达到很大的数值，尤其在短路情况下，线芯中可能通过几十倍于正常的电流，产生的感应电压不仅会危及人身安全，也可能击穿金属护套的外护层。感应电压也是制定护层保护器参数的决定因素之一。如护套形成通路，护套电流（环流）将消耗电源能量、产生损耗，引起电缆发热，成为决定电缆载流量的因素之一。

所以，对感应电压必须予以计算和采取限制措施。计算时金属屏蔽层和金属护套概念可通用。

### 一、正常运行时电力电缆金属屏蔽层（金属护套）中的感应电压

#### 1. 两根单芯电缆组成的单相回路

护套电感和线芯电感计算方法相同，且金属护套的厚度比线芯直径小得多，其内感可忽略不计。单位长度金属护套的电感

$$L_s = (2 \ln \frac{2s}{D_s}) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (3-33)$$

式中， $s$  为电缆中心间的距离； $D_s$  为电缆金属护套的平均直径。

单位长度金属护套的感应电压



$$\dot{U}_s = -j\omega L_s \dot{I} = -j2\omega I \left(\ln \frac{2s}{D_s}\right) \times 10^{-7} \text{V/m} \quad (3-34)$$

或 
$$\dot{U}_s = 2\omega j \left(\ln \frac{2s}{D_s}\right) \times 10^{-7} \text{V/m} \quad (3-35)$$

2. 三相等边三角形敷设 (含三相分相屏蔽型电缆)

其计算方法和单相回路计算方法相同。

3. 三相水平直线敷设

设电缆中心轴间距离为  $s$  ( $s_1 = s_2 = s$ ,  $s_3 = 2s$ ) 且三相平衡电流  $I_1 = I/\underline{120^\circ}$ ,  $I_2 = I/\underline{0}$ ,  $I_3 = I/\underline{-120^\circ}$

则 
$$\dot{U}_{s1} = I \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} (X_s + X_m) + \frac{1}{2} j (X_s - X_m) \right] \quad (3-36)$$

$$\dot{U}_{s2} = -jIX_s \quad (3-37)$$

$$\dot{U}_{s3} = I \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} (X_s + X_m) + \frac{1}{2} j (X_s - X_m) \right] \quad (3-38)$$

各相感应电压的有效值为

$$|\dot{U}_{s1}| = |\dot{U}_{s3}| = I \sqrt{X_s^2 + X_s X_m + X_m^2} \quad (3-39)$$

$$|\dot{U}_{s2}| = IX_s \quad (3-40)$$

式中  $X_s = 2\omega \left(\ln \frac{2s}{D_s}\right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$ ;  $X_m = 2\omega (\ln 2) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$ 。

二、电缆线芯短路时金属屏蔽层(金属护套)上的感应电压

短路是电力系统的严重故障,所谓“短路”,是指一切不正常的相与相之间,或相与地(中性点接地系统)发生通路的情况。在中性点直接接地系统中,以单相接地(短路)的故障最多,约占全部故障的90%左右。短路电流一般为电缆额定负载电流的十几倍至几十倍,将在金属护套上产生很高的感应电压。在各种短路中中性点接地系统中单相短路产生的感应电压最大。我们以此为例,且假设接地电流全部以大地为回路,如图3-6所示设A相短路接地。

这种情况感应电压最高,因地下的金属线、地线都能起到部分的回流作用,因此,这种计算结果要比实际的大,较安全。

可将大地等效为一根具有一定深度的抽象“导线”。接地电流以此和线芯形成一单相回路如图3-7所示。

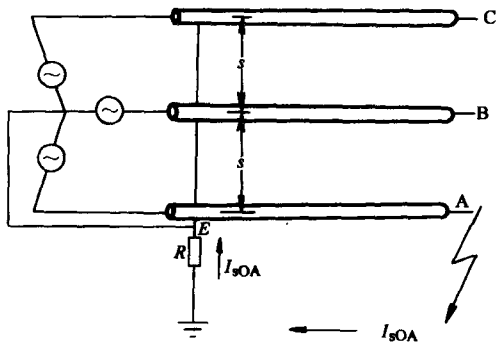


图 3-6 单相接地短路示意图

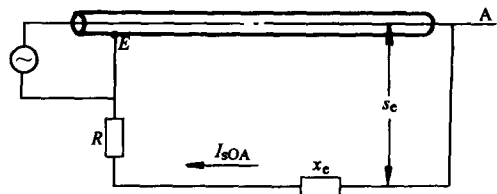


图 3-7 接地等效电路图

这时,该相金属护套感应电压为

$$\dot{U}_{SAE} = -(R + jX_e l) \dot{I}_{soA} \quad (3-41)$$

式中,  $R$  为接地电阻;  $X_e = 2\omega(\ln 2 \frac{s_e}{D_s}) \times 10^{-7} \Omega/m$  为大地的等值阻抗;  $l$  为电缆长度;  $D_s$  为金属护套的外径;  $s_e$  据经验公式为  $94 \sqrt{\rho_e}$  (m),  $\rho_e$  为土地的电导率; 若不能确切测定,  $s_e$  一般可取 1000m;  $\dot{I}_{soA}$  为短路电流。

### 三、减少金属护套感应电压的方法

#### 1. 敷设“三七开”回流线

所谓回流线,即通常对于金属护套只在一处互联接地的电缆线路,沿线路敷设一条或多条两端妥善接地的金属导线,这种两端接地的导线称为回流线。

这样短路电流可以通过回流线流回系统的中性点。特别是当接地点故障发生在电厂或变电所附近时,有良好的回流线,可认为短路电流全部流过回流线。

“三七开”,是根据回线敷设的方式和位置决定的。采用回线,即减少了土地等值阻抗  $X_e$  的数值,也排除了地网接地电阻的影响。因三相电缆发生短路的几率相等,因此应与三根电缆的平均距离相等。

在电缆线路正常运行时,要求三相线路在回线上感应电动势相量和应为零,以免产生感应电流造成损耗。为此,回流线敷设的方式和到各相的距离应为

$$\begin{cases} s_1 = 1.7s \\ s_2 = 0.3s \\ s_3 = 0.7s \end{cases} \quad (3-42)$$

式中,  $s$  为各相中心间的距离,  $s_1, s_2, s_3$  如图 3-8 所示。

在有“三七开”回流线的三相系统,单相短路回路电流不经过大地而经过回流线返回接地点,短路相电缆单位长度金属护套感应电压为

$$\dot{U}_{SAE} = -j\dot{I}_{soA} 2\omega(\ln \frac{2s_3}{D_s}) \times 10^{-7} (\Omega/m) \quad (3-43)$$

比较式 (3-41) 可知感应电压明显减小。

#### 2. 金属护套的几种连接方法

电缆金属护套的感应电压应限制在 10~50V 安全范围内,否则会危及人身安全和造成电缆运行事故。为此,可采取如下措施。

(1) 金属护套一点接地 即在电缆线路一端或中点接地,电缆护套对地绝缘,这样护套没有环流损耗,但感应电压与电缆长度成正比,长度须限制在使电压不超过安全值范围内。

(2) 采用金属护套分段隔离接地 当电缆需大长度时,可采用绝缘外套连接盒实行分段隔离接地。绝缘外套连接盒如图 3-9,可使导电线芯保持正常的电的连接,而金属护套每段相互绝缘。各连接盒之间的电缆长度以感应电压不超过安全值为准。

(3) 金属护套两端接地 金属护套采用两端接地。这种连接方法,虽然金属护套感应电压小,但金属护套和大地形成了回路,可产生护套环流损耗,影响功率传输。

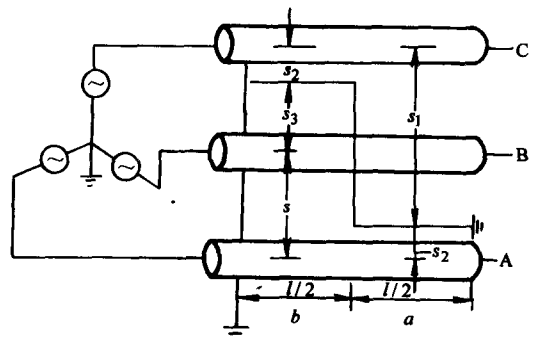


图 3-8 三相电缆线路“三七开”回流线

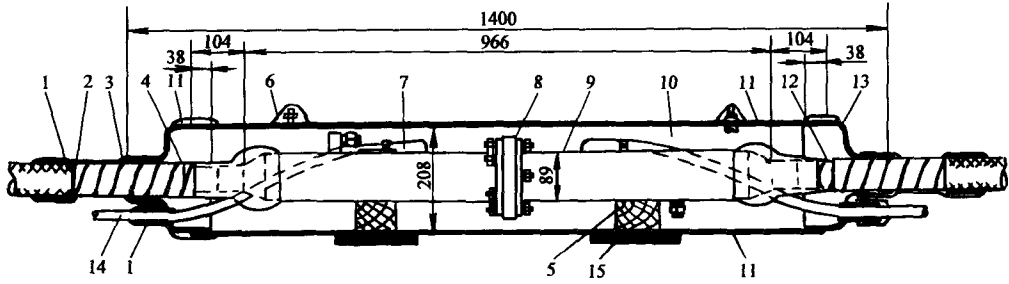


图 3-9 绝缘外套连接接头盒

1—绝缘橡皮带包缠，外再包浸渍棉纱 2—外护层端点 3—用以承垫聚氯乙烯端盖的橡皮带层 4—橡皮带包缠  
5—木质垫块 6—填料装入口 7—换位接线头 8—法兰橡皮垫块 9—电缆接头外壳 10—沥青填料 11—聚  
氯乙烯外套 12—聚氯乙烯及橡皮带护层端缘 13—聚氯乙烯端盖 14—换位接线 15—橡皮带衬垫加强支撑物

(4) 换位连接法 较好的方法是两端接地，中间以绝缘外套连接盒连接而实现金属护套交叉换位如图 3-10。

如电缆对称敷设，且每段长度相等，在平衡负载下，在金属护套中两接地点间的感应电动势相量和为零。如图 3-11a，因此不会产生电流，图 a 中， $A_I$ 、 $A_{II}$ 、 $A_{III}$ ， $B_I$ 、 $B_{II}$ 、 $B_{III}$ ， $C_I$ 、 $C_{II}$ 、 $C_{III}$ ，分别表示相应于图 3-10 中各缆各段的感应电动势。图 b 中点 1、2、……表示相应于图 3-10 连接接头盒的点， $U_s$  为地电压的大小，每一绝缘外套连接接头盒承受的电压为每段电缆长度感应电压的  $\sqrt{3}$  倍。采用这种连接方式，每段电缆长度应力求相等，敷设位置应力求对称平衡。

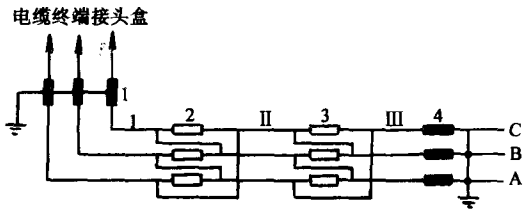


图 3-10 电缆金属护套换位连接接线

1、4—普通型式连接接头盒 2、3—绝缘外套连接接头盒

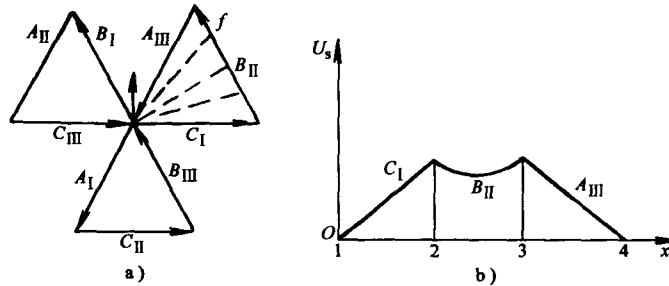


图 3-11 电缆金属护套换位连接感应电动势及对地电压

a) 电缆金属护套换位连接，感应电动势相量图 b) 电缆金属护套换位连接，沿电缆长度对地电压分布图

## 第六节 电缆线路的相序阻抗

前面讲述的导体电阻，绝缘电阻，电缆的电容、电感等均指在电缆线路正常运行时的电气参数。也即三相电气量在数值（绝对值）上相等而相位互差  $120^\circ$  的对称运行状态。但是，

电力系统在实际运行时，还可能出现不对称的运行状态。如三相负载大小不等、不对称短路等。其中出现最多的一种故障形式即电力系统的短路。相序阻抗的计算就是针对中性点直接接地系统，在短路情况下的阻抗。

一、电力系统的短路

短路是电力系统的严重故障。所谓“短路”，是指一切不正常的相与相之间，或相与地（对于中性点接地系统）发生通路的情况。如图 3-12 为各种短路的示意图。

在中性点直接接地系统中，以单相接地短路的故障最多，约占全部故障的 90% 左右。

在中性点不接地系统中（低压系统）短路故障主要是各种相间短路故障，包括不同相两点接地。但单相接地不会造成短路，仅有不大的电容电流通过，使中性点产生位移。由于线电压保持不变，故仍可继续运行。

短路电流对电缆的设计十分重要。一方面要求计算允许短路电流的大小，另一方面须计算不对称运行时电缆线路的阻抗，以使电缆能满足运行的要求。

二、对称分量法

为了计算线路的不对称问题，须引入对称分量法。该方法是基于电工基础的迭加原理，认为任何一组不对称的三相系统，均是由三个对称的系统组成。或任何一组三相不对称的量可以分解为三个对称的分量。这样可以运用分析对称运行的问题来解决不对称运行的问题。

1. 相序

若对称三相电路，随时间变化，各相电压（电流）最大值出现的先后次序称为相序。

2. 正序分量（又称顺序分量）

正序分量的下角注 1，如图 3-13a 所示  $I_{A1} \rightarrow I_{B1} \rightarrow I_{C1}$  为正序均相互领先  $120^\circ$ 。相当于

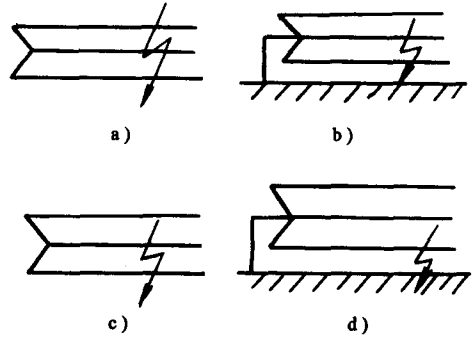


图 3-12 各种短路的示意图  
a) 三相短路 b) 两相短路接地  
c) 两相短路 d) 单相短路接地

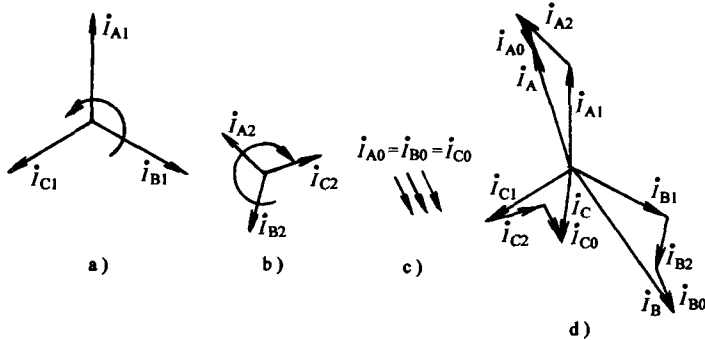


图 3-13 相序分量示意图

a) 正序分量 b) 负序分量 c) 零序分量 d) 叠加相量

一般对称三相制情况。若以  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ，则一个相量乘以  $\alpha$ ，表示相量逆时针旋转  $120^\circ$ ，乘  $\alpha^2$  表示顺时针旋转  $120^\circ$ 。其数学展开式为

$$\alpha = \rho^{j\frac{2}{3}\pi} = \cos \frac{2}{3}\pi + j\sin \frac{2}{3}\pi = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3-44)$$

$$\alpha^2 = \rho^{j\frac{4}{3}\pi} = \cos \frac{4}{3}\pi + j\sin \frac{4}{3}\pi \quad (3-45)$$

$$= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\alpha^3 = \rho^{j2\pi} = 1 \quad (3-46)$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (3-47)$$

故正序分量为  $I_{A1}, I_{B1} = \alpha^2 I_{A1}, I_{C1} = \alpha I_{A1}$

### 3. 负序分量 (又称逆序分量)

负序分量的下角注 2, 如图 3-13b 所示。这个三相系统同样是对称的, 但是旋转方向与正序系统恰好相反,  $I_{A2} \rightarrow I_{C2} \rightarrow I_{B2}$ 。

即  $I_{B2} = \alpha I_{A2}, I_{C2} = \alpha^2 I_{A2}$

### 4. 零序分量

零序分量下角注 0, 如图 3-13c 所示, 是一组大小相等, 相位一致的量, 故仍为一组对称系统。

$$I_{A0} = I_{B0} = I_{C0}$$

如将上述正序、负序、零序分量叠加在一起即可得到如图 3-13d 所示的一组不对称三相系统。其数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \\ I_B &= I_{B1} + I_{B2} + I_{B0} \\ I_C &= I_{C1} + I_{C2} + I_{C0} \end{aligned} \right\} \quad (3-48)$$

将上述各分量代入上式可得

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \\ I_B &= \alpha^2 I_{A1} + \alpha I_{A2} + I_{A0} \\ I_C &= \alpha I_{A1} + \alpha^2 I_{A2} + I_{A0} \end{aligned} \right\} \quad (3-49)$$

写成矩阵形式, 若令  $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}$

则式(3-49)可写成

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{A2} \\ I_{A0} \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

或简写成

$$I_{ABC} = AI_{120} \quad (3-51)$$

显然  $\det A \neq 0$ , 故矩阵为非奇异矩阵, 它的逆矩阵为

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

根据线性变换原则,将式(3-51)两端分别乘  $A^{-1}$  即可

$$I_{120} = A^{-1} I_{ABC}$$

即

$$\left. \begin{aligned} I_{A1} &= \frac{1}{3}(I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C) \\ I_{A2} &= \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C) \\ I_{A0} &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \end{aligned} \right\} \quad (3-53)$$

从上式可知,当  $I_A + I_B + I_C = 0$  时,则  $I_{A0} = 0$ ;当  $I_A + I_B + I_C \neq 0$  时,才有  $I_{A0} \neq 0$ 。这就说明,在不对称系统中,三相之和等于零的那部分是由正序分量和负序分量构成的,而不等于零的那部分正是由零序分量构成的。

从上述分析中又可断言任何一组三相不对称电流系统均可分解为三个电流对称的分量。

对称分量不仅仅是抽象的概念,而且是客观存在的。每个分量分别具有独立的物理意义。输电线的零序电流是通过大地形成回路的。

### 三、不对称故障的序网图

当电力系统的某一点发生不对称故障时,三相系统的对称条件将受到破坏,但这种对称条件的破坏,往往只是局部性的。即除了在故障点出现某种不对称之外,电力系统其余的部分仍旧是对称的。故可运用对称分量法,将故障处的电压,电流分解为正序、负序和零序三组对称分量系统。由于电路的其余部分是三相对称的,所以各序分量即具有独立性,从而可以形成独立的三个序网络。这种方法可以大大方便对各种不对称故障的计算。

现以单相接地故障为例进一步分析。如图 3-14,设网络为中性点直接接地电力网。三相电源电动势  $E_A, E_B, E_C$  都是对称的,并接于空载电缆线路。如 A 相发生单相接地,则 A 相对地电压为零,而 B 相和 C 相的对地电压则不为零。故在接地点将出现三相电压不对称系统,引起线路上的电流也出现三相电流不对称系统。但三相电源系统仍是对称的,不对称的系统只是出现在故障点。

如根据对称分量法,把接地点出现的电压、电流不对称系统分解为三组对称分量系统,则如图 3-15 所示。

如将零序电压,电流单独取出,即得零序网络如图 3-16。

零序系统是大小和方向都相同的三相系统,故  $I_{A0}, I_{B0}, I_{C0}$  是大小相等,方向相同的电流。所以流向中点的三相零序电流只能经过地线(或大地)流动;反之,如没有地线(如中性点不接地电力网),就不会出现零序电流。对三角形接法的线路,零序电流可以在内部闭合循环,但线路上无零序电流。因此,零序电流具有地中电流的特点。且流经地线的电流应是三相零序电流之和。故接于中线上的阻抗,应等值为每相阻抗的三倍。

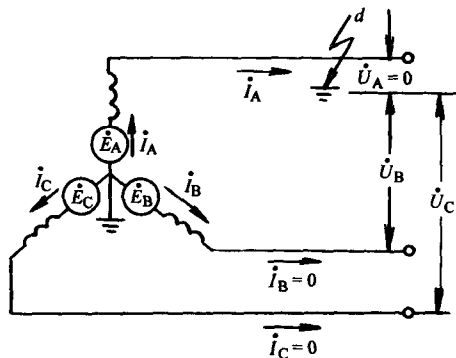


图 3-14 中性点直接接地电力网  
单相接地图

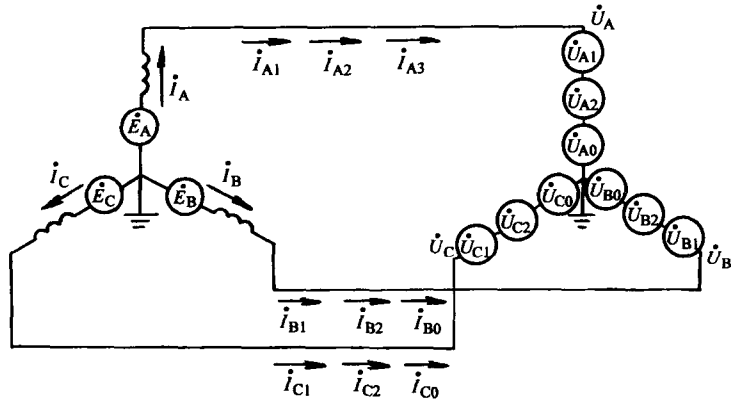


图 3-15 单相故障接地的电压电流分量图

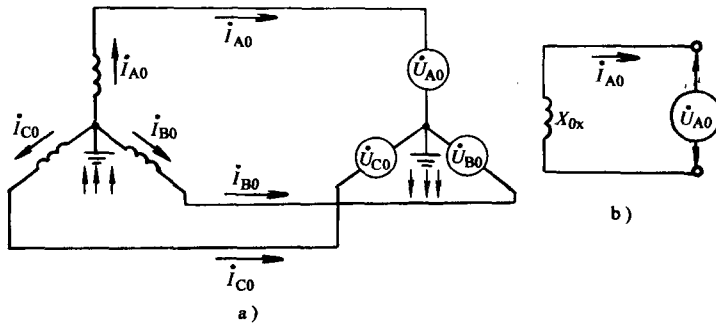


图 3-16 零序网络  
a) 序网图 b) 等效电路图

由于零序系统仍然是一个对称三相系统，可用其等值电路图表示，其基本方程可写为

$$\dot{U}_{A0} = -j\dot{I}_{A0} X_{0\Sigma} \quad (3-54)$$

式中， $X_{0\Sigma}$  为短路点的总等效零序电抗，即网络元件对零序电流所呈现的电抗。

由于发电机不能发出零序电势，所以零序网络也是无源网络。零序电压出现在故障点，可以看成零序电源位于故障点处，零序电流必须以大地为回路，因此，只有中性点接地的电力网，才能构成零序网络。

#### 四、几何平均半径和距离比率

在计算相序阻抗时，常常使用几何平均半径和距离比率。完全是为了简化运算和方便，并无实际物理意义。

##### 1. 单线的几何平均半径 GMR

如图 3-17，有两根平行的实心圆导线组成一单相电路，导线的半径分别为  $r_1$  和  $r_2$ ，中心距离为  $s$ ，则半径为  $r_1$  的导线单位长度的电感可用下式表示

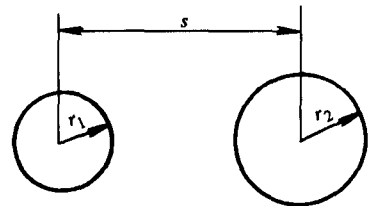


图 3-17 两根不同半径的平行导线

$$L_1 = \left[ 2 \ln \frac{s + r_2}{r_1} + \frac{1}{2} \right] \times 10^{-4} \text{H/km}$$

一般  $s \gg r_2$  故上式可写为

$$L_1 = 2 \left[ \ln \frac{s}{r_1} + \frac{1}{4} \right] \times 10^{-4} \text{H/km} \quad (3-55)$$

式中  $1/4$  可写作  $\ln e^{1/4}$ , 故式(3-55)为

$$\begin{aligned} L_1 &= 2 \left( \ln \frac{s}{r_1} + \ln e^{1/4} \right) \times 10^{-4} = \\ &= 2 \left[ \ln \frac{s}{e^{-1/4} r_1} \right] \times 10^{-4} = \\ &= 2 \times 10^{-4} \left( \ln \frac{s}{0.7788 r_1} \right) \text{H/km} \end{aligned} \quad (3-56)$$

式中,  $0.7788 r_1$  即被定义为半径为  $r_1$  的实心圆导线的几何平均半径 GMR, 故

$$L_1 = 2 \times 10^{-4} \left( \ln \frac{s}{\text{GMR}} \right) \text{H/km} \quad (3-57)$$

显然, 这样使用几何平均半径的方法简捷而又方便。可推广到由多根单线绞合成的线芯。

### 2. 紧压绞合线芯的几何平均半径

紧压绞合线芯的几何平均半径可按下式进行计算

$$\text{GMR} = 0.7788 r_c \quad (3-58)$$

式中,  $r_c = \sqrt{\frac{A}{\eta\pi}}$ , 其中  $A$  为线芯导体的实际截面积,  $\eta$  为线芯导体的填充系数。

故式(3-58)可写为

$$\text{GMR} = 0.7788 \sqrt{\frac{A}{\eta\pi}} \quad (3-59)$$

### 3. 距离比率

为了方便对各种排列的电缆线路的阻抗计算, 采用比率表示各相电缆之间的中心距离。如图 3-18 所示, 设  $AB = s$ , 而  $n, m$  分别表示  $AC, BC$  两相的中心距离的比率, 即

$$n = \frac{AC}{AB}, m = \frac{BC}{AB}$$

则三相电缆的几何平均距离

$$\text{GMD} = (s \times ns \times ms)^{1/3} \quad (3-60)$$

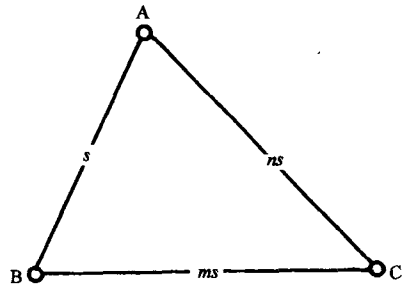


图 3-18 以比率表示各相电缆间的中心距离

## 五、电缆线路的相序阻抗计算方法

### 1. 正(负)序阻抗

电缆输电线路是静止的磁耦合回路, 它的负序阻抗和正序阻抗是相等的, 故对称的运行状态和不对称的运行状态亦是相同的。

(1) 金属护套内无感应电流 这种情况一般是由单芯电缆组成的单相回路, 金属护套一点接地或金属护套连续良好换位, 则

当线路正三角形排列时

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{s}{\text{GMR}_c} \Omega/\text{km} \quad (3-61)$$

当线路等间距直线排列时



$$Z_1 = Z_2 = R_c + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{\sqrt[3]{2}s}{GMR_c} \Omega/\text{km} \quad (3-62)$$

式中,  $Z_1$  为正序阻抗;  $Z_2$  为负序阻抗;  $R_c$  为导电线芯电阻;  $s$  为电缆中心间的距离;  $GMR_c$  为导电线芯的几何平均半径。

(2) 金属护套内有感应电流 这种情况一般为金属护套两端接地。感应电流和线芯电流方向相反, 故正、负序阻抗有所减少。对单回路, 正、负序阻抗的计算公式为

$$Z_1 = Z_2 = R_c + \frac{X_m^2 R_s}{X_m^2 + R_s^2} + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{(nm)^{1/3} s}{GMR_c} \Omega - j \frac{X_m^2}{X_m^2 + R_s^2} \Omega/\text{km} \quad (3-63)$$

$$\text{式中} \quad X_m = X_s = j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{(nm)^{1/3} s}{GMR_s} \Omega/\text{km} \quad (3-64)$$

其中,  $R_s$  为金属护套电阻;  $GMR_s$  为金属护套几何平均半径,  $GMR_s = 0.7788 (D_s/2)$ , 其中  $D_s$  为金属护套直径。

## 2. 电缆线路的零序阻抗

当三相输电线路流过零序电流时, 由于三相零序电流之和不为零, 就必须另有回路, 通常都是以大地为回路。

从空间磁场情况分析, 对正(负)序电流来说, 它们产生的磁场将主要集中在导线附近的空内。在远离导线处, 将急剧衰减, 加之各相电流之间具有  $120^\circ$  的相位差, 各相电流在周围空间所产生的磁通将互相抵消。这就使得距导线较远的空间磁场更为减弱。但三相零序电流是同方向的。所以在导体附近的空内, 磁力线将相互排斥而使得磁通减少, 但在导线外部的空间磁力线将相互叠加而使得磁场增强。故正(负)电流所产生的磁通基本上不进入大地内部。所以正(负)序电抗基本不受大地的电导率的影响。反之, 零序电流产生的磁通, 将要深入到大地内部形成回路。故零序电抗将在较大程度上受大地电导率的影响。故很难用解析方法精确计算。多年来, 许多人从理论分析和试验测定上作了大量工作, 特别是卡尔松提示的公式, 经过实践证明, 这个公式较方便地解决了线路零序电抗计算问题, 其准确度完全满足要求。

其方法是将大地回路看成一根虚构的导线, 其和电缆的距离, 即等效回路深度为  $D_d$ ,

$$D_d = \frac{2.085}{\sqrt{f\lambda \times 10^{-9}}} \times 10^{-3} \text{m} \quad (3-65)$$

式中,  $f$  为频率, 单位为 Hz;  $\lambda$  为大地电导率, 单位为  $1/(\Omega \cdot \text{cm})$ 。

通常  $D_d = 1000\text{m}$ 。

零序电流在三相线路内是同相的, 因此流经大地的电流是三倍零序电流。零序阻抗显然是三相线路中三个相的并联阻抗。三相线路的等效几何平均半径为各电缆导电线芯的几何平均半径和各相距离的连乘积, 然后以相数加距离数之和作为开方的根次来开方。即

$$GMR_0 = \{GMR_c^3 (s \times ns \times ms)^2\}^{1/9}$$

$$\text{故} \quad Z_0 = 3 \left\{ \frac{R_c}{3} + R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_d}{GMR_0} \Omega/\text{km} \right\} \quad (3-66)$$

式中,  $R_g$  为大地的漏电阻,  $R_g = \pi^2 f \times 10^{-4} = 0.0493\Omega/\text{km}$ 。其中  $f$  为频率。

## 第四章 电缆的损耗和电磁力

电缆的损耗，主要是由于在交变电磁场的作用下，在导体、绝缘层、金属屏蔽层和铠甲中产生的功率损耗。这些损耗一方面大量地消耗了传输的功率，另一方面损耗转变为热能，使电缆的温度升高，又严重地限制了功率的传输。电缆传输的容量主要是根据损耗决定的。所以应对损耗进行分析和计算。

### 第一节 导电线芯损耗和绝缘层介质损耗

#### 一、导电线芯损耗

该损耗主要是导体通过直流或交流电时造成的功率损耗。单位长度电缆在允许工作温度时的每相导体损耗

$$W_c = I^2 R_c \quad (4-1)$$

式中， $I$  为导体电流； $R_c$  为单位长度在其允许工作温度下每相导体的交流电阻。

#### 二、绝缘层介质损耗

介质在电压作用下有能量损耗。一种是由电导引起的损耗，另一种是由极化引起的损耗。如极性介质中的偶极子转向极化，夹层介质界面极化等。电介质的能量损耗简称介质损耗。在实际工程中以功率来计算。

$$W_i = U_0^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad \text{W/m} \quad (4-2)$$

式中， $U_0$  为电缆绝缘承受的相电压，单位为 kV； $\omega$  为电源角频率； $\operatorname{tg} \delta$  为绝缘材料的损耗因数； $C$  为单位长度电缆的每相电容。对单芯圆形导体电缆，有

$$C = \frac{55.7\epsilon}{\ln \frac{R}{r_c}} \times 10^{-12} \quad \text{F/m} \quad (4-3)$$

对多芯电缆，如三芯电缆，一般均用于低压，中性点不接地系统。其每相等效电容可用近似公式计算，即

$$C = \frac{55.7\epsilon}{\ln \frac{D}{r_c}} \times 10^{-12} \quad \text{F/m} \quad (4-4)$$

上二式中， $\epsilon$  为介质的相对介电常数； $R$  为绝缘外半径； $r_c$  为导电线芯半径； $D$  为三芯电缆中每两导体中心间的距离。

### 第二节 金属屏蔽层（金属护套）和铠装层损耗

线芯回路产生的磁通，亦和金属屏蔽层（金属护套）及铠装层相链，必然在金属屏蔽层和铠装层上产生感应电动势，也就产生电磁损耗。

### 一、金属屏蔽层（金属护套）损耗

在实际工程中，一方面为了减少感应电动势，另一方面，保护系统需用金属护套做为接地电流的通路，所以大多数情况下，金属护套两端都是接地的，则必然会产生环流损耗。又由于金属护套各点的感应电动势不同，形成电位差，又会造成涡流损耗，所以金属屏蔽层损耗应为二者之和。

首先分析环流损耗。最简单的是由两根单芯电缆组成的单相回路。如前述，单相回路单位长度金属屏蔽层中的感应电动势

$$E_s = -jIX_s \quad (4-5)$$

式中， $I$  为线芯电流； $X_s$  为单位长度金属屏蔽层的感抗， $X_s = 2\omega (\ln \frac{2s}{D_s}) \times 10^{-7} \Omega/m$ 。

则接地回路电流

$$I_s = \frac{E_s}{R_s + jX_s} \quad (4-6)$$

式中， $R_s$  为金属屏蔽层电阻。故单位长度电缆金属屏蔽层损耗为

$$W_s = I_s^2 R_s = \frac{I^2 X_s^2}{R_s^2 + X_s^2} R_s \quad (4-7)$$

实际工程中，常以线芯损耗  $W_c$  作为基值的百分比表示，即损耗因数

$$\lambda'_1 = \frac{W_s}{W_c} = \frac{R_s X_s^2}{R R_s^2 + X_s^2} \quad (4-8)$$

对于等边三角形敷设（含三相分相屏蔽型电缆） $\lambda'_1$  同单相回路，电缆不换位，金属屏蔽层两端短接，水平敷设的单芯电缆，其最大损耗电缆（即敷设于外侧的滞后相电缆）的损耗因数

$$\left. \begin{aligned} \lambda'_1 &= \frac{R_s}{R} \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \\ \lambda'_1 &= \frac{R_s}{R} \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

中间电缆的损耗因数为

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right]$$

在上式中  $P = X_s + X_m$ ； $Q = X_s - \frac{1}{3}X_m$  而  $X_m = 2\omega (\ln 2) \times 10^{-7} (\Omega/m)$ 。

据式 (4-7) 可知，当  $R_s = 0$  时， $W_s = 0$ ； $R_s = \infty$ （相当于开路）时， $W_s = 0$ 。据数学中值定理， $R_s$  自  $0 \rightarrow \infty$  中  $W_s$  必有一极值。令  $\frac{dW_s}{dR_s} = 0$ ，得当  $X_s = R_s$  时  $W_s$  最大。又随电缆敷设距离的增加，所链磁通亦增加，感应电流也越大，造成的损耗也大。所以在金属护套接成通路的情况下，应尽可能减少敷设距离，以减少护层损耗。

除了环流损耗外，既使在一点接地的开路情况下，也由于金属护套上各点的感应电动势

不同而形成局部电流而造成损耗。其和线芯损耗的比值记为  $\lambda''_1$ 。

所以金属屏蔽层（金属护套）总的损耗因数

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (4-10)$$

对于  $\lambda'_1$  和  $\lambda''_1$  的计算公式可采用国际电工委员会〔IEC—287〕所规定的公式，详见表 4-1。

表 4-1 电缆金属护套损耗计算公式（IEC—287）

电缆型式及敷设连接方式	$\lambda'_1$	$\lambda''_1$	备注
单芯电缆（三相电路）			
1. 护套两端短接		不 计 <sup>①</sup>	$X_s = 2\omega \left( \ln \frac{2s}{D_s} \right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$
(1) 等边三角形敷设	$\frac{R_s X_s^2}{R R_s^2 + X_s^2}$	不 计 <sup>①</sup>	$X'_s = 2\omega \left( \ln \frac{2s'}{D_s} \right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$
(2) 等距平行并列敷设			$s' = \sqrt[3]{2s \times s \times s} = \sqrt[3]{2}s$
1) 电缆换位（第三换位点护套连接）	$\frac{R_s X_s^2}{R R_s^2 + X_s^2}$	不 计 <sup>①</sup>	$F = \frac{4M^2 N^2 + (M+N)^2}{4(M^2+1)(N^2+1)}$
2) 电缆不换位	公式（4-9）	$A_1 \frac{R_s}{R}$	等边三角形敷设：
2. 护套单点连接或交叉连接 <sup>②</sup>		$\times \frac{(D_s/2s)^2 [1 + A_2 (D_s/2s)^2]}{(R_s \times 10^7/\omega)^2 + \left( \frac{1}{5} \right) (2s/D_s)}$	$M = N = \frac{R_s}{X_s}$
(1) 等边三角形敷设	不 计	$A_1 = 3.0, A_2 = 0.417$	等距平行并列敷设：
(2) 等距平行并列敷设	不 计	$A_1 = 1.5, A_2 = 0.27$	$M = \frac{R_s}{X_s + X_m} \quad N = \frac{R_s}{X_s - \frac{X_m}{3}}$
1) 两侧电缆	不 计		
2) 中间电缆	不 计	$A_1 = 6, A_2 = 0.083$	
共同护套三芯电缆			
(1) 圆形芯或椭圆芯 $R_s \leq 100 \mu\Omega/\text{m}$	不 计	$\frac{3R_s}{R} \left[ \left( \frac{2C}{D_s} \right)^2 \times \frac{1}{(1 + 159R_s \times 10^4/f)^2} + \left( \frac{2C}{D_s} \right)^4 \right]$	C —— 电缆中心至线芯中心距离 $r_1$ —— 包围三扇形导体圆的半径
(2) 圆形芯或椭圆芯 $R_s > 100 \mu\Omega/\text{m}$	不 计	$\times \frac{1}{1 + 4(159R_s \times 10^4/f)^2}$	$\Delta$ —— 线芯间绝缘层厚度 $D_s$ —— 金属护套平均直径，对椭圆线芯， $D_s$ 等于长半轴和短半轴之和
(3) 扇形芯	不 计	$0.94 \frac{R_s}{R} \left( \frac{2r_1 + \Delta}{D_s} \right)^2 \times \frac{1}{1 + (159R_s \times 10^4/f)^2}$	
钢带铠装三芯电缆	不 计	共同护套三芯电缆相应的 $\lambda'_1$ 乘以 $\left[ 1 + \left( \frac{D_s}{D'_A} \right)^2 \frac{1}{1 + D'_A/\mu\Delta_A} \right]^2$	$D'_A$ —— 铠装平均直径 $\mu$ —— 钢带平均磁导系数（ $\approx 300$ ） $\Delta_A$ —— 铠装等效厚度， $\Delta_A = A_A/\pi D_A$
分相铅包铠装电缆	$\frac{R_s 1.7X_s^2}{R R_s^2 + X_s^2}$	不 计	

(续)

电缆型式及敷设连接方式	$\lambda'_1$	$\lambda''_1$	备注
钢管形三芯电缆 (每一芯绝缘层表面有屏蔽或金属护套)	$\frac{R_s 1.7X_s^2}{R R_s^2 + X_s^2}$	不 计	如每一绝缘线芯具有一金属传压膜套和非磁性加强带, 也可应用此式计算 $\lambda'_1$ , 此时 $R_s$ 为护套电阻与加强带电阻 <sup>①</sup> 并联值, 而 $D_s = D'_s = \sqrt{(D_{s1}^2 + D_{s2}^2)}/2$ , (对于椭圆形线芯, $D_{s1}$ , $D_{s2}$ 分别取其最大和最小直径的几何平均值), $D_{s1}$ 为金属传压膜平均直径, $D_{s2}$ 为加强带平均直径

- ① 对于分裂线芯结构,  $\lambda'_1$  等于护套单点连接时的  $\lambda'_1$  乘以  $F$ 。
- ② 对于等距平行并列敷设正规换位电缆, 三段的平均每相单位长度损耗可用等边三角形敷设的参数 ( $A_1$ ,  $A_2$ ) 和计算公式计算  $\lambda'_1$ 。
- 对于交叉连接电缆, 如三段长度不相等而分别为  $m_s$ ,  $n_s$ ,  $a$ , 则  $\lambda'_1$  等于相应敷设位置、不换位电缆每大段二端连接接地的  $\lambda'_1$  乘以  $\left(\frac{n+m-1}{n+m+1}\right)^2$ , 如不知每段电缆长度, 则对于直埋电缆  $\lambda'_1=0.03$ , 敷设在水泥槽管道中电缆  $\lambda'_1=0.05$ 。
- ③ 加强带电阻计算的规定:
- (1) 对于绕包节距很大 (轴向加强带) 的加强带, 其电阻可按一个内径和重量都和加强带相同的圆柱体计算。
  - (2) 若加强带与电缆轴约呈  $54^\circ$ , 或包绕节距很短但有互相接触的两层或两层以上的加强带, 其电阻为 (1) 的 2 倍。
  - (3) 若加强带包绕节距很小 (径向加固), 其电阻可认为等于无穷大, 即损耗可忽略不计。

## 二、铠装层中的损耗

如电缆具有铠装, 铠装将在不同程度上改变护套电流, 因之损耗也随之改变。同时, 当铠装接成通路时, 铠装中也会产生损耗。计算铠装损耗公式的推导过程比较繁琐, 这里只介绍 IEC 推荐的计算公式。

非磁性材料铠装损耗可用下述方法计算: 以护套和铠装并联电阻代替  $R_s$ , 护套直径和铠装直径均方根值代替护套平均直径  $\left[D_s = \sqrt{\frac{D_{s1}^2 + D_{s2}^2}{2}}\right]$ , 用相应单一护套公式计算护套和铠装中总损耗。

顺便指出, 单芯电缆 (小截面电缆  $10\text{mm}^2$  除外) 一般不容许采用钢带铠装, 因为属于磁性材料的钢带会大大增加护套及铠装损耗。第三章已经讲过, 高压单芯充油电缆采用铜带作为径向或轴向加固 (铠装)。高落差或水底单芯电缆容许采用钢丝铠装以承受轴向拉力, 因为钢丝铠装可以采取措 (大的包绕节距, 钢丝中夹以非磁性材料金属丝), 以减小它的磁效应。

对于钢丝铠装圆形三芯电缆, 铠装中损耗可用下列公式计算:

$$\lambda_2 = \frac{\text{铠装中损耗}(W_A)}{\text{线芯中损耗}(W_C)} = 1.23 \times \frac{R_A}{R} \left(\frac{2C}{D_A}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{44R_A \times 10^4}{f}\right)^2 + 1} \quad (4-11)$$

式中,  $R_A$  为铠装在其工作温度下的单位长度电阻, 单位为  $\Omega/\text{m}$ ;  $D_A$  为铠装平均直径;  $C$

为电缆中心与线芯中心距离。

对于分相铅包钢丝铠装电缆，铠装中损耗等于式(4-11)与 $(1-\lambda'_1)$ 相乘，即

$$\lambda_2 = 1.23(1-\lambda'_1) \frac{R_A \left(\frac{2C}{D_A}\right)^2}{\left(\frac{44R_A \times 10^4}{f}\right)^2 + 1} \quad (4-12)$$

而 $\lambda'_1$ 由式(4-9)确定，显然，钢丝铠装中的损耗由于护套中电流屏蔽作用而减小了。

对于钢丝铠装扇形三芯电缆

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A \left(\frac{2r_1}{D_A}\right)^2}{\left(\frac{44R_A \times 10^4}{f}\right)^2 + 1} \quad (4-13)$$

式中， $r_1$ 为包围三扇形导体圆的半径。

对于钢带铠装电缆，铠装中损耗与线芯损耗之比

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2 \quad (4-14)$$

式中， $\lambda'_2$ 、 $\lambda''_2$ 分别为铠装中磁滞、涡流损耗与线芯损耗之比。

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 \left[ \frac{1}{1 + \frac{D_A}{\mu \Delta_A}} \right]^2 \times 10^{-7}}{RD_A \Delta_A} \quad (4-15)$$

$$\lambda''_2 = \frac{2.25s^2 \left[ \frac{1}{1 + \frac{D_A}{\mu \Delta_A}} \right] \Delta_A \times 10^{-6}}{RD_A} \quad (4-16)$$

式中， $s$ 为线芯中心轴间距离，单位为cm； $\Delta_A$ 为铠装等效厚度， $\Delta_A = \frac{A_A}{\pi D_A}$ ，单位为cm； $A_A$ 为铠装截面积，单位为 $\text{cm}^2$ ； $D_A$ 为铠装平均直径，单位为cm； $\mu$ 为钢带有效磁导率（一般取300）。

### 第三节 电缆中的电磁力

电力电缆在通过交变电流时，磁场便会对电缆本身产生电磁力。尤其在短路时，电磁力可能达到较大的数值。对电缆各部分，尤其会对电缆绝缘造成很大的机械破坏力，使之产生应变，亦是交联聚乙烯绝缘产生树枝化放电的一个重要成因。

对单相回路，应用虚位移法求电磁力。单位长度电缆磁场能量

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4-17)$$

式中， $I$ 为线芯导体电流； $L$ 为单位长度电缆的电感。

$$L = 0.5 \times 10^{-7} \text{H/m} + (2 \ln \frac{2s}{D_c}) \times 10^{-7} \text{H/m} \quad (4-18)$$

式中， $s$ 为回路中电缆中心间的距离； $D_c$ 为导线线芯直径，则单位长度电缆受到的电磁力

$$F = -\frac{\partial W}{\partial s} = -\frac{I^2}{s} \times 10^{-7} \text{N/m} \quad (4-19)$$

由两根电缆组成的单相回路，若  $i = I_m \cos \omega t$ ，则单位长度电缆所受的电磁力为

$$F = -2 \times 10^{-7} I^2 / s = - \left( \frac{I_m^2}{s} + \frac{I_m^2}{s} \cos 2\omega t \right) \times 10^{-7} \text{N/m} \quad (4-20)$$

在三相电力系统中，如电缆位于等边三角形三个顶点，每一电缆之电流分别为

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_m \cos \omega t \\ i_2 &= I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_3 &= I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4-21)$$

根据式 (4-19)，并参见图 4-1，线芯 1 与线芯 2 之间的作用力为

$$F_{12} = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{s} \cos \omega t \cos(\omega t - 120^\circ) \text{N/m} \quad (4-22)$$

线芯 1 和线芯 3 之间的作用力

$$F_{13} = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I_m^2}{s} \cos \omega t \cos(\omega t + 120^\circ) \text{N/m} \quad (4-23)$$

作用于线芯 1 上的总力在  $y$  轴上的分量

$$F_{1y} = (F_{12} + F_{13}) \cos 30^\circ = \frac{-\sqrt{3} \times 10^{-7}}{s} I_m^2 \cos^2 \omega t \quad (4-24)$$

在  $x$  轴上的分量  $F_{1x}$

$$F_{1x} = (F_{12} - F_{13}) \cos 60^\circ = \frac{\sqrt{3} \times 10^{-7}}{2s} I_m^2 \sin 2\omega t \quad (4-25)$$

而

$$\theta = \arctg \frac{F_{1y}}{F_{1x}} = \arctg(-\cot \omega t) \quad (4-26)$$

如三根电缆等距平行并列敷设，各线芯承受的力也可按上述公式计算，例如作用在线芯 1 上的力为

$$\begin{aligned} F_1 &= F_{12} + F_{13} = \frac{2 \times 10^{-7}}{s} I_m^2 \cos \omega t \left[ \cos(\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{2} \cos(\omega t + 120^\circ) \right] \\ &= \frac{\sqrt{3} I_m^2}{2s} \times 10^{-7} \cos \omega t (\sin \omega t - \sqrt{3} \cos \omega t) \end{aligned} \quad (4-27)$$

在上列诸式中，负号表示相斥力。

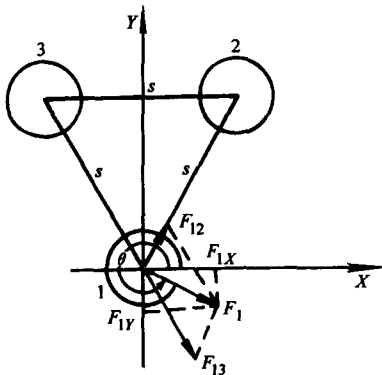


图 4-1 三相电力系统中电缆  
(三角形敷设) 间之电磁力

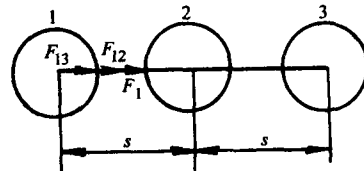


图 4-2 三相电力系统中电缆  
(平行并列敷设) 间的电磁力

## 第五章 电缆绝缘厚度的核定

电缆绝缘厚度的确定，是电力电缆设计的核心。电力电缆绝缘的质量和绝缘水平，决定了电缆的使用寿命。设计绝缘厚度，应从多方面进行分析。首先要分析电缆绝缘内的电场分布，一般以最大场强作为设计的依据。然后要考虑电力电缆在运行中所承受的各种电压及绝缘材料击穿的统计规律，还要考虑绝缘的机械强度和工艺性能等。

对一般常规产品的绝缘厚度，国家标准和国际电工委员会（IEC）均有统一的规定，其厚度确定的实际意义是对所选用的绝缘材料进行考核。

### 第一节 电缆绝缘层中的电场分布

#### 一、圆形芯单芯电缆绝缘层中的电场分布

##### 1. 均匀介质

该型式的电缆的电场是标准的圆柱形电场。因其长度和半径是不可比拟的，故可忽略复杂的边缘效应。采用柱面坐标。因各处的电场轴向分量很小，均可看成与导线相垂直的方向。这样圆柱侧面积上的电场方向处处与外法线的方向一致（ $\cos\beta=1$ ），而上下底面的电场方向与底面的外法线方向垂直（ $\cos 90^\circ=0$ ），故据高斯定理，在积分过程中，可只计算圆柱侧面积的电场矢量通量即可。又因对称关系，圆柱侧面上各点的场强在数值上均相等。则

$$\oint_s E ds = E \oint_s ds = E 2\pi r = \frac{\tau}{\epsilon} \quad (5-1)$$

式中  $r$  ——绝缘中任意一点到电缆中心间的距离；

$\tau$  ——线电荷密度；

$\epsilon$  ——介电常数，故

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon r} \quad (5-2)$$

设一电缆，线芯半径（含内半导体屏蔽层）为  $r_c$ ，绝缘外半径为  $R$ ，如图 5-1，则相电压  $U$  和场强的关系为

$$U = \int_{r_c}^R E dr = \int_{r_c}^R \frac{\tau}{2\pi\epsilon r} dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{r_c} \quad (5-3)$$

得 
$$\tau = \frac{U 2\pi\epsilon}{\ln \frac{R}{r_c}} \quad (5-4)$$

将式（5-4）代入式（5-2）即得

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_c}} \quad (5-5)$$

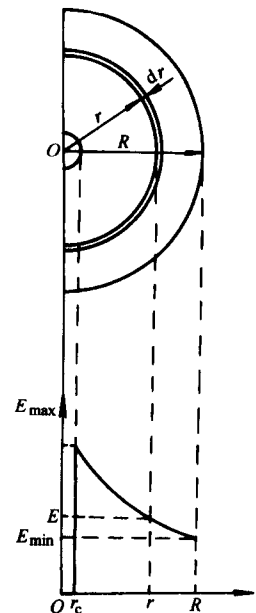


图 5-1 同心圆柱体均匀介质中电场分布



从式 (5-5) 中可看出:

(1) 电场分布和  $r$  成反比, 最大场强  $E_{\max}$  位于线芯表面, 且

$$E_{\max} = \frac{U}{r_c \ln \frac{R}{r_c}} \quad (5-6)$$

最小场强位于绝缘外表面

$$E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r_c}} \quad (5-7)$$

绝缘内的电场强度分布情况如图 5-1 所示, 如绝缘内的电场均匀分布, 则其电场强度

$$E_{\text{av}} = \frac{U}{R - r_c} = \frac{U}{\Delta} \quad (5-8)$$

(2) 平均场强和最大场强之比定义为绝缘层的利用系数, 它是描述电场分布均匀程度的物理量。

$$\eta = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{r_c}{R - r_c} \ln \frac{R}{r_c} \quad (5-9)$$

(3) 当电压一定时, 我们希望  $E_{\max}$  取得最小值, 为此假设绝缘外半径  $R$  为定值, 令

$$\frac{dE_{\max}}{dr_c} = 0 \quad (5-10)$$

可得  $\frac{R}{r_c} = e = 2.718$  时最大场强取得极小值。

(4) 从经济效益考虑, 我们希望在满足一定条件下绝缘体积最小。单位长度电缆绝缘层体积

$$V = \pi (R^2 - r_c^2) = \pi r_c^2 \left[ \left( \frac{R}{r_c} \right)^2 - 1 \right] \quad (5-11)$$

对一定的绝缘材料,  $E_{\max}$  一定, 可令  $\frac{R}{r_c} = N$ 。又  $r_c = \frac{U}{E_{\max} \ln N}$ , 故

$$V = \pi \frac{U^2}{E_{\max}^2 \ln^2 N} (N^2 - 1) \quad (5-12)$$

又令  $\frac{dV}{dN} = 0$  得  $N = \frac{R}{r_c} = 2.2$  时, 绝缘层体积最小, 且

$$V_{\min} = 19.4 \left( \frac{U}{E_{\max}} \right)^2 \quad (5-13)$$

## 2. 分阶绝缘

如前述, 单芯电缆绝缘内的电场分布也是不均匀的, 随绝缘半径的增加而降低, 造成绝缘利用系数下降。为了提高绝缘利用系数, 使电场分布尽可能的均匀, 可利用电场强度和介电常数成反比分布的原理, 采用两层或多层介电常数不同的材料实现分阶绝缘。一般从导电线芯表面到绝缘表面采用  $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \dots > \epsilon_n$  的方法使线芯表面的场强尽可能降低, 而绝缘外部的场强尽可能提高, 以实现绝缘合理的使用。

如图 5-2, 若线芯半径为  $r_c$ , 绝缘外半径为  $R$ , 采用  $n$  层分阶, 各层介电系数分别为  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_i, \dots, \epsilon_n$ , 电场强度分别为  $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$ , 据高斯定理

$$\oint_{s_1} E_1 \epsilon_1 ds_1 = \oint_{s_2} E_2 \epsilon_2 ds_2 = \cdots = \oint_{s_i} E_i \epsilon_i ds_i = \cdots = \oint_{s_n} E_n \epsilon_n ds_n \quad (5-14)$$

对单位长度电缆

$$E_1 \epsilon_1 2\pi r_1 = E_2 \epsilon_2 2\pi r_2 = \cdots = E_i \epsilon_i 2\pi r_i = \cdots = E_n \epsilon_n 2\pi r_n \quad (5-15)$$

$$\text{而相电压 } U = u_1 + u_2 + \cdots + u_i + \cdots + u_n \quad (5-16)$$

$$\text{即 } U = \int_{r_c}^{r_1} E_1 dr + \int_{r_1}^{r_2} E_2 dr + \cdots + \int_{r_{i-1}}^{r_i} E_i dr + \cdots + \int_{r_{n-1}}^R E_n dr \quad (5-17)$$

则第  $i$  层的电场强度为

$$E_i = \frac{U}{r_i \epsilon_i \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \cdots + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{R}{r_{n-1}} \right)} \quad (5-18)$$

对于双层分阶绝缘, 各层的相对介电常数分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ , 分阶半径为  $r_1$  则

在  $r_c < r < r_1$  范围内

$$E_1 = \frac{U}{r \epsilon_1 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (5-19)$$

在  $r_1 < r < R$  范围内

$$E_2 = \frac{U}{r \epsilon_2 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (5-20)$$

线芯表面上的电场强度为

$$E_{1\max} = \frac{U}{r_c \epsilon_1 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} = \frac{U}{r_c \left( \ln \frac{R}{r_c} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (5-21)$$

第二层绝缘层最大电场强度位于分阶面上

$$E_{2\max} = \frac{U}{r_1 \epsilon_2 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} = \frac{U}{r_1 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \ln \frac{R}{r_c} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (5-22)$$

而分阶处第一层绝缘层内的场强为

$$E'_{2\max} = \frac{U}{r_1 \epsilon_1 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (5-23)$$

因  $\epsilon_1 > \epsilon_2$ , 故明显  $E_{2\max} > E'_{2\max}$ , 即在分阶处电场发生了阶跃。这主要是由于极化作用, 束缚电荷使分阶内侧的电场减弱而使分阶外侧的电场得以加强。而据式 (5-6) 和式 (5-21) 可知分阶后线芯表面的场强明显比均介介质场强低。分阶绝缘均匀了场强从而提高

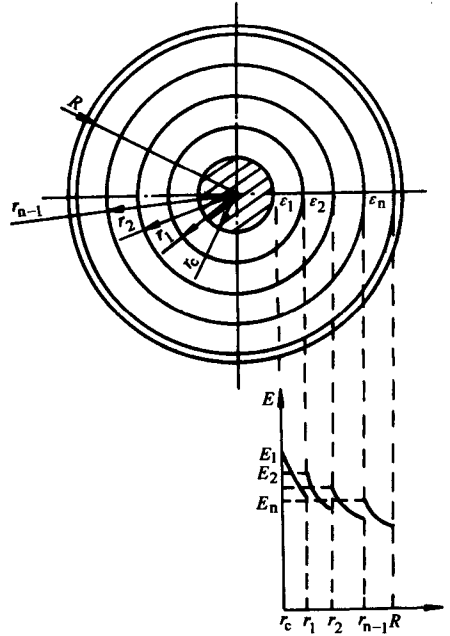


图 5-2 分阶绝缘电场分布

了绝缘利用系数。也减薄了绝缘厚度。对于油纸绝缘高压电缆一般均采用2~3层分阶绝缘。

一般高压和超高压电力电缆均为圆形芯单芯电缆。分相屏蔽型电力电缆的电场亦可按单芯电缆分析计算。

## 二、多芯电缆绝缘层中的电场分布

多芯电缆即一般三芯或多芯绝缘线芯成缆后统包以金属屏蔽层（或金属护套），这种型式的电缆，一般均用于低压配电系统。我们可仅考虑具最大场强的分布，且电场可接近似公式进行计算。因这种型式的电缆绝缘主要考虑机械强度的要求。在满足机械强度的情况下，一般都能满足电气性要求。

### 1. 三芯圆形芯电缆最大场强近似计算

如图5-3， $r_c$ 为导电线芯半径， $R$ 为绝缘外半径，绝缘层厚度 $\Delta = R - r_c$ ，当线芯1和线芯2间的瞬时电压为线电压 $U$ 时，最大场强出现在 $a$ 的位置。其值可接近似公式计算

$$E_{a \max} = \frac{U \sqrt{\frac{N+1}{N-1}}}{2r_c \ln(N + \sqrt{N^2 - 1})} \quad (5-24)$$

式中， $U$ 为线电压； $r_c$ 为导电线芯半径， $N = R/r_c$ 。

当线芯间电压，如线芯2和3间的电压为0.5倍的相电压时，最大场强出现在 $b$ 的位置，其值为

$$E_{b \max} = U_0 \left( \frac{1}{2\Delta} + \frac{0.18}{r_c} \right) \quad (5-25)$$

式中， $U_0$ 为相电压； $\Delta$ 为相绝缘厚度； $r_c$ 为导电线芯半径。

### 2. 三芯扇形芯电缆最大场强的近似计算

这种型式的电缆，一般用于35kV级以下的油纸绝缘或聚氯乙烯绝缘的电力电缆。如图5-4，我们仅考虑 $a$ ， $b$ ， $c$ 三处的电场强度。

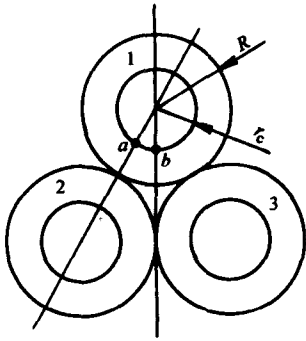


图5-3 三芯圆形芯最大电场分布

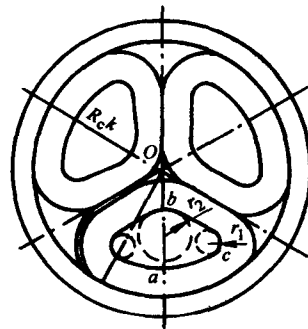


图5-4 三芯扇形芯最大电场分布

$a$ 处为大圆弧部分，电场强度可按单芯电缆的计算公式

$$E_a = \frac{U_0}{R_{ck} \ln \frac{R_{ck} + \Delta}{R_{ck}}} \quad (5-26)$$

式中， $U_0$ 为相电压； $R_{ck}$ 为导电线芯大圆弧所在圆的半径即其大圆弧曲率半径； $\Delta$ 为相绝缘厚度，对油纸带绝缘电力电缆， $\Delta$ 含带绝缘厚度。

$R_{ck}$ 可按经验公式求出

$$R_{ck} = 0.955 \left( \Delta + \sqrt{1.05s + 0.36\Delta^2} \right) \quad (5-27)$$

式中,  $\Delta$  为相绝缘厚度;  $s$  为每相导电线芯的标称截面。

$R_{ck}$ 亦可按假定值进行计算

$$R_{ck} = 1.08(d + 2\Delta) - \Delta \quad (5-28)$$

式中,  $d$  为导电线芯的假定直径。

而小尖角  $c$  部分可按式 (5-24) 计算

$$E_c = \frac{U \sqrt{\frac{N+1}{N-1}}}{2r_1 \ln(N + \sqrt{N^2 - 1})} \quad (5-29)$$

式中,  $r_1$  为小圆角处的曲率半径,  $r_1 = 0.17R_{ck}$ ,  $N = \frac{r_1 + \Delta}{r_1}$ ;  $U$  为线电压。

$b$  处场强

$$E_b = \frac{U_0}{r_2 \ln \frac{r_2 + 1.155\Delta}{r_2}} \quad (5-30)$$

式中,  $U_0$  为相电压;  $\Delta$  为相绝缘厚度;  $r_2$  为  $b$  处的圆弧曲率半径,  $r_2 = 0.27R_{ck}$ 。

三芯电缆绝缘层中的电场可视为一平面场, 外施三相平衡交流电压, 它即为一随时间变化的旋转电场。图 5-5 即为一圆形三芯电缆在某一时刻的电场分布。在实际工程中, 我们仅考虑最大电场即可。

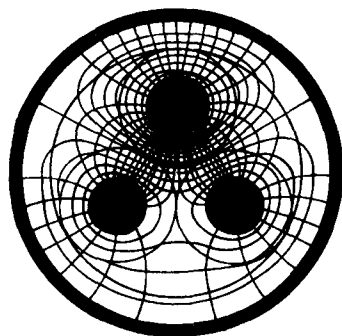


图 5-5 圆形三芯电缆绝缘层中瞬时电场分布

## 第二节 电力电缆在运行中所承受的电压

在设计绝缘厚度时, 不仅要考虑绝缘层中的电场分布, 还要考虑电缆在运行时承受的各种电压。

电缆在运行中, 电缆绝缘不仅要承受工频电压及其过电压, 而且还要承受操作过电压和大气过电压。为此, 必须对其进行分析和计算。

### 一、工频电压

是指工业频率所用电压。我国频率为 50Hz。工频电压是电缆绝缘结构在整个运行过程中长期、连续承受的工作电压。一般所说额定电压, 均指工频时的线电压。我国目前的电压等级 (单位均为 kV) 为 1、3、6、10、35、110、220、330、500, 均为额定工作线电压。绝缘结构实际承受的是相电压。电缆线路电压在正常工作条件下允许有一定的波动, 线路电压越高, 这一允许变化愈小。200kV 以下不允许超过 15%, 330kV 以上不允许超过 10%。

### 二、内部过电压

所谓过电压, 即危及绝缘的电压升高。过电压根据形成的机理不同分为内部过电压和外部过电压。内部过电压是由于系统内部的原因造成的, 可分为两类。一类为操作过电压, 即

操作及故障时在过渡过程中出现的过电压。其持续时间较短，以单相电弧接地和开合线路，切断长线路容性负载等过电压为主。另一类为谐振过电压。是在某些操作或故障后形成的回路，在振荡频率与电源频率满足一定关系时出现的谐振现象。谐振时，将出现持续时间较长，波形有周期重复的过电压。

研究内部过电压有很重要的意义。它与大气过电压一样是决定电力系统绝缘水平的重要依据，我们应分析、研究其产生的原因和影响因素，制定限制过电压的措施，以满足电力系统经济、安全运行的要求。

内部过电压的能量来自电网本身，所以它的幅值是和电网的工频电压基本上成正比的，其幅值与工频相电压幅值之比，称为内部过电压倍数，以  $k_0$  表示。一般  $k_0 \approx 2 \sim 4$ 。若以  $U_{xg}$  表示最高相电压，则过电压一般可取  $(2 \sim 4) U_{xg}$ 。

我们以操作过电压为例，着重分析一下其产生的原因和物理过程。

1. 单相电弧接地过电压 三相系统中，若发生单相电弧接地，就会在健全相产生过电压。据中心点接地方式不同，健全相产生的过电压大小也不同。我国目前电力系统主要是中性点不接地，中性点非有效接地和中性点直接接地系统。前者主要用于低压系统，后者主要用于 110kV 以上的高压系统。

(1) 中性点不接地系统 电力系统发展初期，中性点都是对地绝缘的。在中性点绝缘的电网中，发生单相接地，将会引起健全相的对地电压升高  $\sqrt{3}$  倍。但线电压基本保持不变。

1) 线路分析 如图 5-6 所示。在三相系统中令  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  为三相电源电压。在平衡条件下

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U/0^\circ \\ \dot{U}_B = U/-120^\circ \\ \dot{U}_C = U/120^\circ \end{cases} \quad (5-31)$$

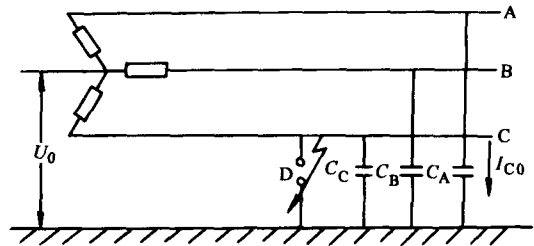


图 5-6 单相故障接地线路图

在各相导线之间和相对地之间沿导线全长均有分布电容。因而在电压作用下，通过这些电容将流过附加的电容电流。在一般实际工程中可用集中参数来计算这些电容。当导线换位后，各相对地电容是相等的，即  $C_A = C_B = C_C$ 。因而在对称三相电压下，各相流过的附加电容电流也相等，记为  $I_{C0}$ ，只是相位差  $120^\circ$ ，所以相量和为零。即无电容电流流过大地。一般变压器的中性点是接地的，具有地的电位。三相线路和变压器相连。当三相对称，且各相电容相等时，则中性点虽然不直接接地，但电位也为零。

但当中性点不接地系统的各相对地导纳（容性电纳）大小不等时，即使正常状态，中性点的电位也不再为零，即“中性点位移”。

令中性点位移电压为  $\dot{U}_0$ ，而  $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$  为对地电压，其关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{A0} = \dot{U}_A + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{B0} = \dot{U}_B + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{C0} = \dot{U}_C + \dot{U}_0 \end{cases} \quad (5-32)$$

当 C 相发生故障接地时，C 相的电压降为零，即  $\dot{U}_{dc} = 0$ 。据故障条件

$$\dot{U}_0 + \dot{U}_C = \dot{U}_{dc} = 0 \quad (5-33)$$

$$\text{即} \quad \dot{U}_0 = -\dot{U}_C \quad (5-34)$$

而 A 相或 B 相健全相的对地电压

$$\begin{aligned} \text{如} \quad \dot{U}_{dA} &= \dot{U}_0 + \dot{U}_A = -\dot{U}_C + \dot{U}_A = \dot{U}_A - \dot{U}_C = U \angle 0^\circ - U \angle 120^\circ \\ &= U[1 - (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)] \\ &= \sqrt{3} U \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} \right) \\ &= \sqrt{3} U \angle -150^\circ \end{aligned} \quad (5-35)$$

即健全相的对地电压升高了  $\sqrt{3}$  倍, 由相电压升高为线电压。

2) 过电压产生的物理过程 一般发生一相电弧接地过电压产生的过程是发弧—振荡—熄弧(零值)—发弧。在振荡过程中健全相可能出现的最大过电压据拉氏变换可得

$$\text{过电压} = 2 \text{ 倍稳态值} - \text{初始值}$$

若 C 相对地短路, 其对地电压立即降为零, 而健全相 (A、B 两相) 的相电压 (对地电压) 在振荡过程中增加到线电压。

我们分析最严重的时刻:

设  $C_A, C_B, C_C$  为三相对地电容,  $u_A, u_B, u_C$  为三电容上的电压。若 C 相对地发弧, 以 D 表示故障点的发弧间隙, 三相电压的瞬时值为

$$\begin{cases} u_A = U_{xg} \sin(\omega t + 120^\circ) \\ u_B = U_{xg} \sin(\omega t) \\ u_C = U_{xg} \sin(\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (5-36)$$

选择 C 相电压达最大值时刻  $t_1 \left( \omega t = \frac{\pi}{6} \right)$ , 各相的瞬时值为

$$\begin{cases} u_A = \frac{1}{2} U_{xg} \\ u_B = \frac{1}{2} U_{xg} \\ u_C = -U_{xg} \end{cases} \quad (5-37)$$

式 (5-37) 可视为振荡前的初始值。此时线电压为

$$u_{AC} = [0.5 - (-1)] U_{xg} = 1.5 U_{xg} \quad (5-38)$$

假设此时间隙 D 击穿, 故障点发弧, 即 C 相接地,  $u_C = 0$ 。但由于时间很短, 电荷不能立即泄漏掉, 故 A 相健全相对故障相仍维持原线电压, 但此时已变为对地电压, 即

$$u_{AC} = U_{Ad} = 1.5 U_{xg} \quad (5-39)$$

或者说健全相的相电压升为线电压, 此电压可视为振荡中的稳态值。

实际上以  $C_A$  而论, 这一过程是由线电压  $u_{AC}$  通过系统电感  $L_s$  对  $C_1$  充电来进行的。这是一个高频振荡过程, 其振荡角频率为  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_A}}$ 。振荡过程中  $C_A$  上电压的初始值为  $\frac{1}{2} U_{xg}$ , 稳态值为  $1.5 U_{xg}$ , 故振荡中  $C_A$  上的最大电压值为

$$\begin{aligned} u_{Am} t_1 &= 2 \text{ 倍稳态值} - \text{初始值} \\ &= 1.5 \times 2 U_{xg} - 0.5 U_{xg} \\ &= 2.5 U_{xg} \end{aligned} \quad (5-40)$$

这时流过故障点  $D$  的电流正是流经  $C_A, C_B$  的高频振荡电容电流。当电压振荡到最大值  $u_{Am}t_1$  时, 流过  $D$  点的高频电流因容性电流超前电压  $\frac{\pi}{2}$ , 电压达最大值时电流为零, 电弧就此熄灭。此时整个系统中的电荷积累为

$$2.5U_{xg}(C_A + C_B) = 5U_{xg}C_A \quad (5-41)$$

又经过半周  $\pi$  后,  $u_C = U_{xg}, u_A = u_B = -0.5U_{xg}, 5U_{xg}C_A$  的电荷在三相上重新分布, 则每相增加电荷  $\frac{5}{3}U_{xg}C_A$ 。则每相叠加电压  $\frac{5}{3}U_{xg}C_A/C_A = \frac{5}{3}U_{xg}$ 。

这样, 在第二次发弧之前 A 相  $C_A$  上的初始电压已由第一次的  $0.5U_{xg}$  变为

$$U_A = -0.5U_{xg} + \frac{5}{3}U_{xg} = 1.17U_{xg} \quad (5-42)$$

而稳态值为

$$U_{AC} = -0.5U_{xg} - U_{xg} = -1.5U_{xg} \quad (5-43)$$

当  $D$  再次击穿后  $u_C = 0$ , 而健全相 A 相上的过电压为

$$2(-1.5U_{xg}) - 1.17U_{xg} = -4.17U_{xg} \quad (5-44)$$

如图 5-7。

这种振荡回路思想是由高列夫 1937 年提出的, 彼烈考夫近年来又在广泛试验基础上做了修正。他指出, 过电压的发展过程以及它的幅值, 首先是和中性点电位上升有关, 而熄弧的条件是和电流过零后弧道上的耐电强度恢复有关。

对于低压系统, 若一相接地是短时的, 电弧过零值时可自行熄灭, 系统可以很快恢复工作, 无须采取特别的措施予以限制。

但是对高压和超高压系统, 单相接地的短路电流较大, 电弧不可能自行熄灭, 易造成间歇性电弧接地, 就会产生很高的过电压。可能使另外两相和接在两相上的设备发生故障, 一相接地变成多相接地, 造成供电中断。为此, 高压系统必须将中性点直接或间接接地。

(2) 中性点直接接地系统 如图 5-8 中性点直接接地。当单相接地时, 故障相上的电压降为零, 而其他两健全相上的电压仍等于相电压。中性点电位永远为零, 不会发生位移。(当然也可能有一些位移, 产生一点振荡, 但数值不大)。

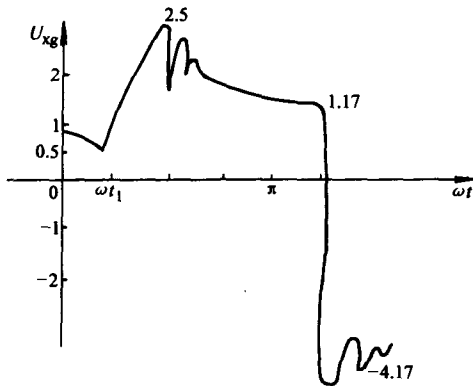


图 5-7 单相故障接地引起健全相的电压升高

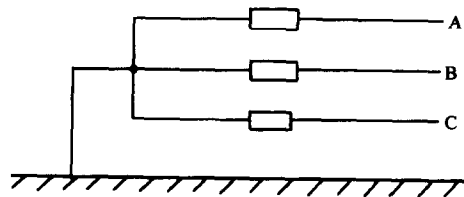


图 5-8 中性点直接接地系统

它的重要优点是对地电容和相间电容积累的静电荷都可以直接经过中性点流入大地。因此不可能产生电弧重燃过电压。现代超高压输电系统几乎毫无例外地采用中性点直接接地方

式,我国 220kV 以上系统均采用中性点直接接地。

其缺点是发生故障时,必须由线路继电保护装置将故障相切断。(因和接地点形成回路,使整个系统不能运行)。

在电压较低的系统,若采用中性点接地的运行方式则会自动重合闸操作次数多,增加了设备成本。为此在电容电流超过规定值(3-10kV 电网 30A)电弧不易熄灭时,采用中性点经消弧圈接地,这种电网称为补偿电网,或称为非有效接地。

(3) 非有效接地 如图 5-9 为非有效接地示意图。其原理是 1919 年彼得森提出利用中性点通过电感线圈接地。故障点流过的电容电流恰好是在相电压作用下,流过三相电容电流之和。接入消弧圈后,故障点还将流过电感  $L_p$  上的电感电流。

当补偿度为 1 时  $|I_c| = |I_L|$ ,二者恰好抵消,即消弧圈上的感性电流补偿了单相故障点电弧中的电容电流,使电弧中的电流接近于零。故电弧易于熄灭,并大大降低了电弧重燃的概率。所以在大多数情况下,能够迅速消除单相瞬态接地电弧,而不破坏电网的正常运行。

但是消弧圈的阻抗较大,既不能释放线路上的残余电荷,也不能降低过电压的稳态分量,对其他过电压不起作用。在高压电网中,有功泄漏电流分量较大,使用不当还会引起某些谐振过电压,不宜在电压等级高的电网中使用。消弧圈上的压降大约为相电压的 15% 将叠加在电路上。以 110kV 电缆为例,在非有效接地系统中其相电压为  $\frac{1}{\sqrt{3}} \times 110 \times 1.15 \times 1.15 \text{kV} = 85 \text{kV}$ 。

## 2. 切断空载长线或容性负荷所引起的过电压

当切断电容负荷时,例如切断空载输电线路时,由于断路器中电弧重燃,可能使线路上产生很高的过电压。研究这种过电压是非常必要的,在一定程度上,这种过电压决定电缆的绝缘水平。

切断空载线路时,断路器触头的分离可能在电源相位角为任一数值时发生。如果此时的电流不为零,就会在触头间产生电弧,线路就没有切断。一般交流电弧要在电流过零时,加上灭弧室吹弧作用而熄灭。由于空载线路的电流是容性的,线路电流过零时,线路上的电压恰为最大值。如图 5-10 电容电流  $i_c$  超前电源电压  $90^\circ$ 。设在  $t_1$  时电流过零,  $i_c = 0$ ,将线路断开。此时电压为最大  $U_{xg}$ 。

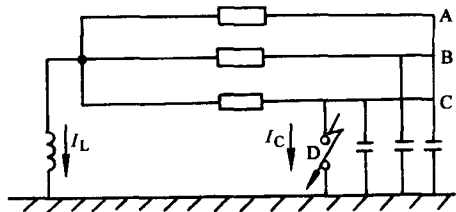


图 5-9 非有效接地

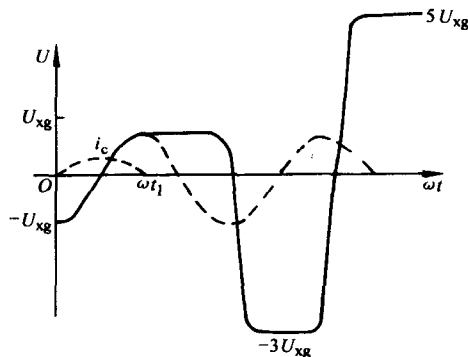


图 5-10 切断空载时在线路上产生的过电压



如果开关触头间耐游离能力很强,电弧从此熄灭,线路被断开,则线路上不会产生任何过电压。但若开关性能不良,开关拉开后,由于导线上的电荷不能立即泄漏掉,触头间电压仍维持  $U_{xg}$  不变。而电源仍按余弦变化,经半周后,当电源电压变到  $-U_{xg}$  时,触头间(开关断口上)的电位差达到  $U_{xg} - (-U_{xg}) = 2U_{xg}$ ,因而间隙可能被击穿和出现重燃,引起电容上的过渡过程,此时过电压 = 2 倍稳态值 - 初始值。初始值为  $U_{xg}$ ,稳态值为  $-U_{xg}$ ,所以过电压为

$$2(-U_{xg}) - U_{xg} = -3U_{xg} \quad (5-45)$$

此时,高频振荡电流过零值熄灭,触头上获得  $-3U_{xg}$  的电压。又经半周后在  $t_4$  时,电源电压符号改变为  $U_{xg}$ ,此时过电压为

$$2U_{xg} - (-3U_{xg}) = 5U_{xg} \quad (5-46)$$

如果断路器反复重燃,就可能出现更高的过电压。但实际上断路器往往最多只发生一次重燃,且重燃也不一定在电源电压达到最大值时发生。同时线路电阻和过电压下的电晕损耗都限制了过电压的发展。实际测量过电压约为相电压的 3~4 倍。

对操作过电压,可采用在断路器断口上加装并联电阻加以限制。

### 三、外部过电压

外部过电压即雷闪(长气体间隙击穿)——大气过电压。大气过电压对电气设备,尤其对电力电缆是最危险的。大气过电压分直击雷过电压和感应雷过电压。对前者必须给予防护。对后者,一般幅值小于 500kV,则对于冲击耐压只有 180~200kV 的系统是最危险的。对此,我们必须知道大气过电压产生和发展的物理过程,以找出防护措施。

#### 1. 雷云对地放电的物理过程

(1) 先导放电过程 如图 5-11,大气过电压是由带电荷的雷云对地放电引起的。观测表明,首先云层在大气流的作用下摩擦起电,大部分带有负电荷,而且电荷集中在几个带电中心。当某一中心电荷较多,在其附近的场强达到足以使空气绝缘破坏的程度(空气的耐电强度为 2~3kV/mm),空气开始游离。当某一段空气游离后,这段空气就由原来的绝缘状态变为导电通道,称为先导放电通道。它是从云中带电中心向地面发展的。由于这个通道的一端和云中某一带电中心相连,故云中的电荷也就沿通道向下运动,近似地均匀分布在通道的表面上。通道直径较小,可近似地看成一条线。单位长度电荷密度可记为  $\sigma$ 。

在先导通道下面(地面上或架空线上)的某一点,由于静电感应会集中产生异号的束缚电荷。

每一段先导通道发展的速度相当高,一般为  $5 \times 10^9$  cm/s (是光速  $3 \times 10^{10}$  cm/s 的 15%),但它是不连续的,称为分级先导。如图 5-11a 所示。

(2) 主放电过程 当先导通道的端部与异号的感应电荷的集中点间的距离很小时,由于

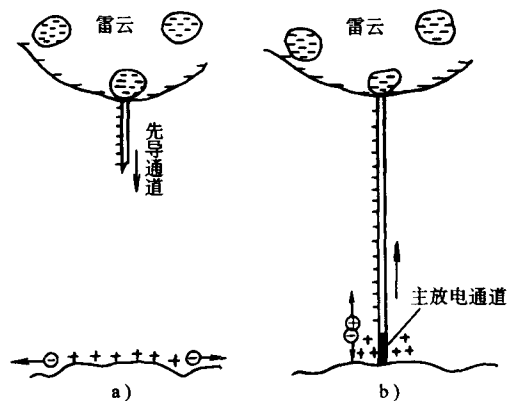


图 5-11 雷云对地放电的发展过程

a) 先导放电 b) 主放电

一端约为雷云的对地电位（可高达 10MV），而另一端为地电位，故空气间隙的场强可达极高的数值，使空气急剧游离。游离后产生的正负电荷将分别向上向下运动，中和先导通道及被击物的电荷，即开始了主放电阶段，如图 5-11b 所示。

在主放电通道与先导放电通道的交界面上，也有极高的场强，又会产生极强烈的游离。这样，上述游离—中和过程就不间断地沿着已游离的连续的先导通道以极大的速度由下向上发展。这个速度叫主放电速度  $v$ ，它比先导通道发展的平均速度大许多倍，可达 0.05~0.5 倍的光速。对设备最危险的是主放电时的电流，其幅值很高。如果先导通道的线电荷密度为  $\sigma$  单位为 (q/m)，主放电速度  $v$  单位为 (m/s)，通过被击物的雷电流

$$i = \sigma v \quad (5-47)$$

在发生主放电时，先导通道的电荷被剧烈地中和，未受雷击的导体上的束缚电荷就成为自由电荷。由于电流突然增大，被击点周围的磁场也会发生很大变化。

由于云中有多个带电中心，当一次主放电完成后，原来的带电中心便具有地的电位。云中其他带电中心与之电位差增大，这样便会先在云中发生放电，之后再沿原来的主放电通道放电，对被击物发生重复雷击。

## 2. 直击雷过电压

如图 5-12，有一高度为  $h$  的避雷针，其接地电阻在传导雷电流时的数值为  $R_{ch}$ ，单位长电感为  $L_0$ ，雷电流上升的速度为  $\frac{di_{Ld}}{dt}$ ，则感应电动势为  $L_0 h \frac{di_{Ld}}{dt}$ 。故直击雷过电压即为雷电流在被击物阻抗上的压降

$$U = i_{Ld} R_{ch} + L_0 h \frac{di_{Ld}}{dt} \quad (5-48)$$

## 3. 感应雷过电压

当雷击于线路附近的大地，以及直接击于避雷线或杆塔时，在线路的工作导线上就会产生感应过电压。其幅值可达 300~400kV，足以使 60~80cm 的气隙放电，因此对低压线路是非常危险的。

其物理过程如图 5-13 所示。在雷云放电的起始阶段，由于先导通道中充满与雷云同极

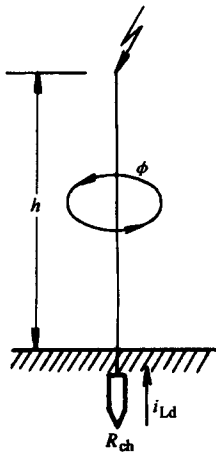


图 5-12 雷击避雷针

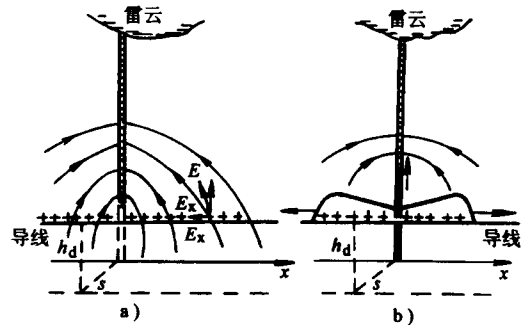


图 5-13 感应雷过电压形成示意图

a) 先导放电 b) 主放电

$h_d$ —导线高度  $s$ —雷击电与导线间的距离

性的电荷，则先导通道对导线产生静电感应。因电场强度的切向分量  $E_x$  的作用，将与雷云异号的正电荷从导线的两端吸引到靠近先导通道的一段导线上成为束缚电荷，越靠近先导通道，则导线上的电荷密度也就越大。

因为先导通道发展的速度不快，导线上电荷集中过程也很缓慢，导线上的电流很小，正电荷的电场在导线高度上被先导通道上的负电荷电场所抵消。

主放电开始时，先导通道上的负电荷由下向上被迅速中和，先导通道的电场消失，电场强度  $E_x$  迅速降低，使导线上的正电荷得以释放，并沿导线向两侧流动，形成脉冲电流，引起过电压。由于主放电速度非常大，所以导线中的电流也很大，感应电压可达很大的数值。

为了防止和限制大气过电压以保护输电线路和电气设备，一般采用避雷针，沿线路装设避雷线和在变电所、发电厂附近装设避雷器。

#### 4. 避雷器的工作原理和特性参数

(1) 工作原理 避雷器实质上是一种放电器，并联在被保护的设备附近。上端接于高压线，下端接地。避雷器平时处于绝缘状态。当出现的大气过电压超过避雷器的放电电压时，避雷器就对地放电，将入侵波导入大地，以不致于危害被保护的设备绝缘。当过电压消失后，避雷器必须迅速恢复绝缘状态，以保证系统继续正常运行。避雷器的类型主要有保护间隙、管型避雷器、阀型避雷器和氧化锌避雷器等。避雷器的保护性能直接决定着被保护设备的绝缘水平。换言之，电力电缆等设备的绝缘水平是根据避雷器的保护性能选取的。绝缘水平即电缆等设备能够承受各种电压的能力和数值。

以阀型避雷器为例，如图 5-14 所示，阀型避雷器的基本元件为火花间隙和非线性电阻。间隙元件由多个统一规格的单个放电间隙串联而成。每个间隙主要由两个黄铜电极组成，在电极间有云母片将其隔绝。非线性电阻元件是由多个非线性阀片电阻盘串联而成。阀片电阻盘是由半导体材料碳化硅粉末压制而成的圆片。这种材料的电压和电流的关系是非线性的。电阻值与流过的电流有关，电流越大，电阻越小；反之，电流越小，电阻越大。阀片与间隙也串联，在系统正

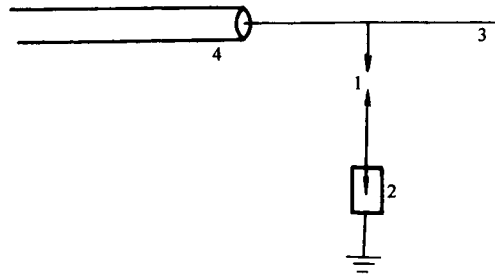


图 5-14 阀型避雷器原理图

1—间隙 2—阀片电阻 3—架空线 4—电缆

常工作时，间隙将阀片电阻与工作母线隔开，以免由工作电压在阀片电阻中产生的电流使阀片烧坏。当系统中出现过电压且幅值超过间隙的放电电压时，间隙先击穿，冲击电流通过阀片流入大地。由于阀片的非线性特性，其电阻在流过大的冲击电流时变得很小，故在阀片上产生的压降，即残压较少，限制了作用于设备上的过电压值，使其低于被保护设备的冲击耐压值，因而设备得到保护。当过电压消失后，间隙中由工作电压产生的工频续流仍将继续流过避雷器，此续流由于变阀片电阻的限制较冲击电流要小得多，故阀片电阻急剧上升，从而进一步限制了工频续流的数值，使间隙能在工频续流第一次经过零值时将电弧熄灭，线路又恢复正常运行。

#### (2) 避雷器的特性参数

1) 额定电压 是指避雷器的两端允许施加的最高工频电压有效值。即相当于相电压。系统的额定电压一般指线电压。

2) 冲击放电电压 当过电压达到或超过此值时, 避雷器就要放电, 即避雷器的对地放电电压。其值必须低于被保护设备的绝缘水平, 并留有一定的裕度, 这样才能对设备进行保护。但是亦不能太低, 以免避雷器动作频繁, 使避雷器损坏和系统不稳定。

3) 冲击残压 当避雷器在大气过电压作用下放电时, 雷电流在避雷器两端产生的电压降。残压和电缆绝缘的相电压是并联电压, 所以残压也应低于被保护设备的绝缘水平。

电缆的基本绝缘水平 BIL [Base Insulate level] 就是按照冲击放电电压和残压进行选取的。

4) 灭弧电压 一般为过电压经过以后, 电弧熄灭时的电压。须保证可靠熄灭工频续流电弧的条件下, 允许加在避雷器上的最高工频电压。灭弧电压应大于避雷器工作母线上可能出现的最高工频电压, 否则避雷器可能因为不能灭弧而爆炸。这个电压为工频过电压, 即在单相故障接地时引起的健全相上的电压升高。对 110kV 及以上的中性点直接接地系统, 灭弧电压取系统最大工作线电压的 80%; 对 35kV 及以下的中性点不接地系统和经消弧圈接地的系统, 则分别取系统最大工作线电压的 110% 和 100%。

5) 保护比 以  $K$  记。指避雷器的冲击放电电压或冲击残压较高者与灭弧电压之比。

$$K = \frac{U_{pf}(\text{或 } U_{pc})}{U_{off}} \quad \text{或} \quad U_p = KU_{off} \quad (5-49)$$

$K$  越小, 则  $U_{pf}$ ,  $U_{pc}$  较小, 较安全, 或  $U_{off}$  较高, 可在工频过电压较高时切断工频续流, 则避雷器保护性能越好。

### 第三节 脉冲波在电缆中的传播

电缆一般和架空线相连接, 产生内外过电压时, 脉冲波将进入电缆传播。脉冲波的幅值大小和传播状况是确定电缆绝缘水平的因素之一。

#### 一、进入电缆脉冲波的幅值

如图 5-15, 设脉冲波为  $e_a$ ; 在架空线中传播的速度为  $v_a$ ; 在电缆中传播的速度为  $v_c$ ; 架空线的波阻抗为  $Z_a$ ;  $Z_{12}$  为电缆线芯对金属护套的波阻抗;  $Z_2$  为电缆金属护套对地的波阻抗;  $Z$  为与电缆另一端相连接的电气设备的等效波阻抗;  $Z_{s1}$ 、 $Z_{s2}$  分别为电缆金属护套两端的等效接地阻抗。

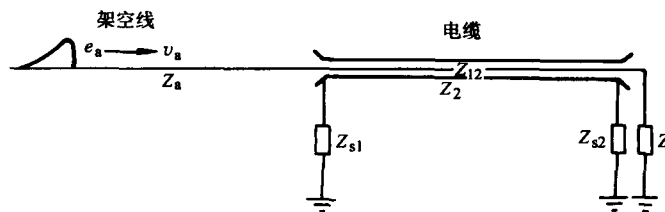


图 5-15 与架空线相连接的电缆, 雷击波传播示意

当脉冲波到达架空线与电缆连接点的不均匀处时, 将产生反射和透射。图 5-16 为等效电路图。据彼得逊等效回路原理, 用集中参数来代替分布参数的波阻抗, 将入射波的电压加倍作用在回路上。得出作用在电缆线芯上和金属护套上的脉冲电压的幅值分别为  $e_1$  和  $e_2$

$$e_1 = \frac{2e_a Z_{12}}{Z_a + Z_{12} + \frac{Z_{s1} Z_2}{Z_{s1} + Z_2}} \quad (5-50)$$

$$e_2 = \frac{2e_a \left( \frac{Z_{s1} Z_2}{Z_{s1} + Z_2} \right)}{Z_a + Z_{12} + \frac{Z_{s1} Z_2}{Z_{s1} + Z_2}} \quad (5-51)$$

## 二、脉冲波在电缆中的反射与透射

如图 5-17，脉冲波进入电缆后沿电缆传播到达波阻抗不均匀处 (A, B)，就会产生反射与透射。由于波的多次反射和透射，电缆受到的脉冲电压可能高于波的幅值。

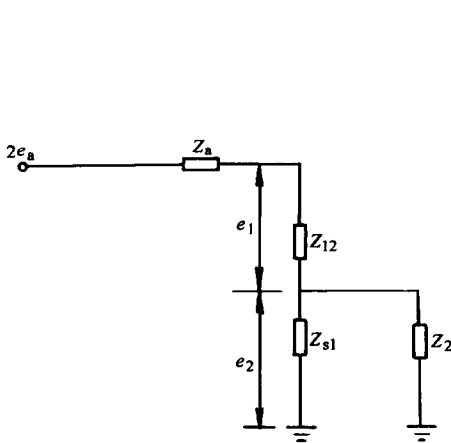


图 5-16 图 5-15 的等效电路

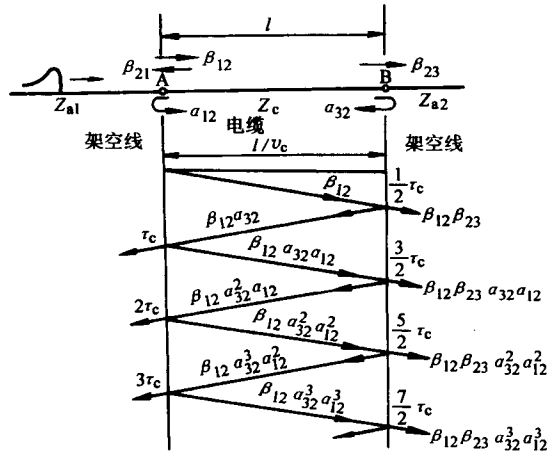


图 5-17 脉冲波在电缆中的传播、反射与透射

沿线路传播的脉冲波，一般可用简化的式子表示

$$u = U_0 e^{-a \left( t - \frac{x}{v} \right)} \quad (5-52)$$

式中， $U_0$  为脉冲波的幅值； $t$  为时间，单位为  $\mu s$ ； $x$  为距离，单位为  $m$ ； $v$  为脉冲波传播的速度，单位为  $m/\mu s$ ； $a$  为与波形有关的常数，如对于  $1/50\mu s$  的脉冲波， $a = 0.01461/\mu s$ 。

若令  $Z_{a1}$ 、 $Z_{a2}$ 、 $Z_c$  分别为架空线 1、2 和电缆的波阻抗，则电缆两端的反射系数分别为

$$\alpha_{12} = \frac{Z_{a1} - Z_c}{Z_{a1} + Z_c} \quad (5-53)$$

$$\alpha_{32} = \frac{Z_{a2} - Z_c}{Z_{a2} + Z_c} \quad (5-54)$$

电缆两端的透射系数分别为

$$\beta_{12} = \frac{2Z_c}{Z_{a1} + Z_c} \quad (5-55)$$

$$\beta_{23} = \frac{2Z_{a2}}{Z_{a2} + Z_c} \quad (5-56)$$

$$\beta_{21} = \frac{2Z_{a1}}{Z_{a1} + Z_c} \quad (5-57)$$

作为第一近似，可以认为传输线的波阻抗等于它的单位长度电感除以单位长度电容的平方

根, 即  $\sqrt{\frac{L}{C}}$ 。

脉冲波在电缆内传播时, 沿电缆长度方向各点电压是变化的, B 点入射、反射、透射次数较多, 故最大电压总是发生在电缆的末端 B。为方便计, 可仅看电压传播的倍数, 且假设进入电缆的波为单指数衰减波, 电缆的长度不大, 沿电缆脉冲波幅值衰减忽略不计, 仅考虑电缆连接点的反射。

如图 B 点的电压仅有一个, 可将右侧的波叠加。令脉冲波沿电缆长度折射、反射往返一次所用的时间, 即时间常数,  $\tau_c = \frac{2l}{v}$ 。则 B 点的电压为

$$u_{B(t)} = U_0 e^{-a\left(t - \frac{\tau_c}{2}\right)} \left[ \beta_{12}\beta_{23} + \beta_{12}\beta_{23}\alpha_{12}\alpha_{32}e^{a\tau_c} + \beta_{12}\beta_{23}\alpha_{12}^2\alpha_{32}^2e^{2a\tau_c} + \dots + \beta_{12}\beta_{23}\alpha_{12}^{n-1}\alpha_{32}^{n-1}e^{(n-1)a\tau_c} \right] \quad (5-58)$$

此为等比级数, 故其和为

$$u_{B(t)} = U_0 \beta_{12}\beta_{23} \left[ \frac{1 - (\alpha_{12}\alpha_{32})^n e^{na\tau_c}}{1 - \alpha_{12}\alpha_{32}e^{a\tau_c}} \right] e^{-a\left(t - \frac{\tau_c}{2}\right)} \quad (5-59)$$

$n$  为入射波的序数 (从 1 开始), 波为衰减波, 且考虑右侧波滞后  $\frac{1}{2}\tau_c$ 。为了确定电缆中可能发生的最大脉冲电压, 仅考虑  $t = \left(n - \frac{1}{2}\right)\tau_c$  即可, 故

$$u_B \Big|_{t = \left(n - \frac{1}{2}\right)\tau_c} = \frac{U_0 \beta_{12}\beta_{23} \left[ (\alpha_{12}\alpha_{32})^n - e^{-na\tau_c} \right]}{\alpha_{12}\alpha_{32} - e^{-a\tau_c}} \quad (5-60)$$

当  $n$  为某数时,  $u_{13}$  取得最大值, 故令

$$\frac{du_B}{dn} = 0, \quad \text{得}$$

$$n = \frac{\ln \frac{-a\tau_c}{\ln \alpha_{12}\alpha_{32}}}{(\ln \alpha_{12}\alpha_{32}) + a\tau_c} \quad (5-61)$$

当侵入波  $U_0$  和 B 点的最大脉冲电压  $U_{(B)\max}$  相等时, 其相应的电缆长度  $l_0$  称为脉冲波特性长度, 或称为临界长度。

当  $\frac{U_{(B)\max}}{U_0} = 1$  时, 且由  $\tau_c = \frac{2l_0}{v_c}$  和式 (5-61) 可求得  $l_0$  的值。式中,  $v_c$  为脉冲波沿电缆传播的速度。

由于进入波的多次反射, 故 B 点的电压为入射波和多次反射波的叠加, 甚至有波峰叠加的情况, 故可能高于进入波。这种情况一般出现在  $l < l_0$  的时候。此时, 电缆的基本绝缘水平必须取比线路较高值, 或对电缆另加保护措施, 如在电缆远端接避雷器。

反之, 电缆的长度  $l > l_0$ , 有可能是波峰和波尾相叠加, 电缆中可能受到的脉冲电压不会超过架空线上的最大脉冲电压, 此情况较安全, 电缆基本绝缘水平可取比系统较低值。

#### 第四节 电缆绝缘层击穿强度的统计理论

电缆绝缘的击穿强度, 是电力电缆绝缘的主要电气参数之一。它是决定绝缘厚度的主要依据。击穿强度受材料组分、杂质、几何尺寸等诸多因素的影响和制约。所以, 它是一个具

有统计性的数值，应按统计理论对其进行分析和确定。目前，世界上较为科学和准确的是按威伯尔分布函数对击穿强度进行实验和确定。

### 一、用威伯尔分布函数对击穿强度的确定

这是由威伯尔在 50 年代提出的分布函数理论。在 70 年代开始应用于高压电缆的击穿研究。至今被世界各国广泛采用。

#### 1. 分级的概念

假定有一个由五个试样组成的小样本，将这些试样进行击穿试验直到破坏。第一个试样失效代表 20% 的样本已损坏，那么相应于总体失效的百分比应为多少？

如果用总体进行试验，就要消耗大量的人力和财力，而亦不能得出科学的结论。所以必须采取统计的方法来估计样本中五次失效的每一个所代表的总体百分数，换言之，必须确定每个失效的试样等级。即以小样本代替大样本。等级有若干级，一般大多数采用中值（或 50%）等级。

所谓中值等级，即从一个概率密度函数为已知的总体中取出若干个由 5 个试样组成的样本，将这些试样进行试验直到破坏。每一组样本第一个试样的失效时间将是随机分布的，这些寿命的中值称为第一次失效的中值等级，意在估计在总体中试样的失效分配为：50% 在寿命低于中值下发生，50% 在寿命高于中值下发生。对于五个试样组成的样本，第一次失效的中值等级为 12.94%。第二、第三、第四、第五次失效的中值等级可按下式进行计算

$$\text{中值(50\%)等级} = \frac{j-0.3}{n+0.4} \quad (5-62)$$

式中， $n$  为样本容量； $j$  为失效序数。

#### 2. 威伯尔概率积分函数

其表达式为

$$p(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\theta-x_0}\right)^b\right] \quad (5-63)$$

式中， $x_0$  为变量  $x$  的最小期望值，也称定位参数； $x$  为概率变量，可表示时间或场强； $b$  为威伯尔斜率，又为行状参数，表示实验数据的分散性； $\theta$  为特征值，或标度参数，表示试样破坏相应总体达 63.2% 时的击穿强度。

$x_0$  为总体中能预期的最小击穿强度，故  $x_0 \neq 0$ ，故分析时用三参数 ( $x_0, b, \theta$ ) 威伯尔函数。

将式 (5-63) 改写为

$$\frac{1}{1-p(x)} = \exp\left(\frac{x-x_0}{\theta-x_0}\right)^b \quad (5-64)$$

两边取自然对数

$$\ln \frac{1}{1-p(x)} = \left(\frac{x-x_0}{\theta-x_0}\right)^b \quad (5-65)$$

$$\ln \ln \frac{1}{1-p(x)} = b \ln(x-x_0) - b \ln(\theta-x_0) \quad (5-66)$$

上式可用直线方程表示

$$y = bx + c \quad (5-67)$$

式中

$$y = \ln \ln \left( \frac{1}{1 - p(x)} \right);$$

$$x = \ln(x - x_0); c = -b \ln(\theta - x_0)$$

显然  $y$  和  $x$  为直线关系，采用威布尔概率坐标纸（如图 5-18）可将  $p(x)$  和  $x$  转换成  $y$  和  $x$  的关系。一个威布尔变量  $E$  标绘所得图形将是斜率为  $b$  的直线。据此可求出三参数。为此须在威布尔概率纸上把绝缘强度标绘在横坐标上，中值等级标绘在纵坐标上；确定绝缘强度下限  $x_0$ （总体能预期击穿的最小值）。对所得曲线进行修正；从修正的曲线中确定威布尔函数的三参数。

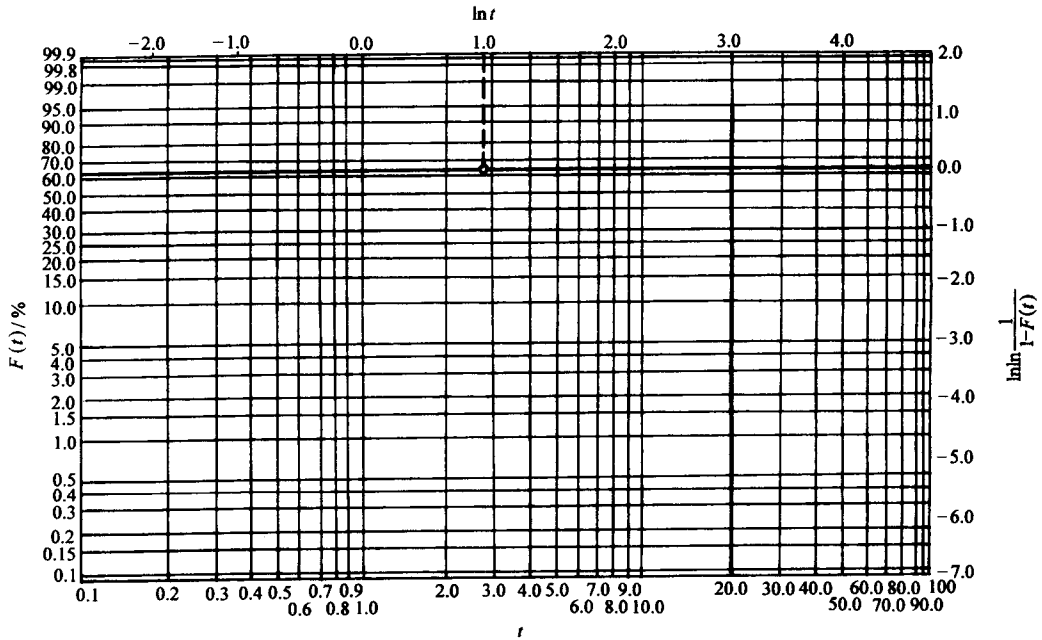


图 5-18 威布尔概率纸

如一批绝缘料，取五块试样，测量其击穿强度，其值分别为 57.3、59.2、62.5、55.3、61.4 单位均为  $\text{kV}/\text{mm}$ 。把数据按上升次序排列，并配上中值等级，如表 5-1 所示。

表 5-1

$x / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	$x - x_0 / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	中值等级 / %
55.3	5.3	12.94
57.3	7.3	31.47
59.2	9.2	50.00
61.4	11.4	68.53
62.5	12.5	87.06

确定  $x_0$  的可能值。以  $x - x_0$  为横坐标，选择若干组  $x$  和  $x_0$  值，在坐标图中得出一系列曲线，如图 5-19 所示。

其中最接近于直线的曲线  $c$  所对应的  $x_0$  即为所求。即  $x_0 = 50$ ，将  $x - 50$  的各组数据列



于表 5-1 中。然后可用最小二乘法对曲线 c 回归。

从图 5-18 曲线 c 上读取在 63.2% 时的  $x - x_0$  的值，求出特征绝缘场强  $\theta$

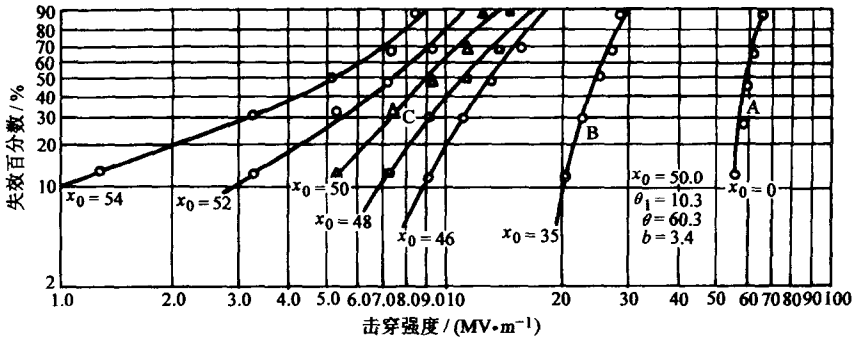


图 5-19 确定参数的威伯尔标绘图

$$(x - x_0) \Big|_{63.2\%} = \theta_1 = 10.3 \text{ kV/mm}$$

故  $\theta = (x) \Big|_{63.2\%} = \theta_1 + x_0 = (10.3 + 50) \text{ kV/mm} = 60.3 \text{ kV/mm}$

即为所求的绝缘击穿强度。

斜率  $b$  可由曲线  $c$  上任取二点求取

$$\begin{aligned} x_1 - x_0 &= 6 & p(x_1) &= 0.16 \\ x_2 - x_0 &= 10 & p(x_2) &= 0.6 \end{aligned}$$

将上式代入式 (5-66) 得

$$\ln \ln \left( \frac{1}{1-0.16} \right) - b \ln 6 = \ln \ln \left( \frac{1}{1-0.6} \right) - b \ln 10 \quad (5-68)$$

所以求得

$$b = 3.4$$

故三参数为

$$\begin{cases} x_0 = 50 \text{ kV/mm} \\ \theta = 60.3 \text{ kV/mm} \\ b = 3.4 \end{cases} \quad (5-69)$$

威伯尔概率积分函数中的  $\theta$ ，即为特征值。若变量  $x$  代表时间  $t$ ，则  $\theta$  代表击穿的“特性寿命”；若变量  $x$  代表击穿强度  $E$ ，则  $\theta$  为“特性击穿强度”，它较科学和准确地表征了绝缘材料的击穿强度。

当  $x = \theta$  时原概率函数

$$\begin{aligned} p(x) &= 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{x - x_0}{\theta - x_0} \right)^b \right\} \\ &= 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{\theta - x_0}{\theta - x_0} \right)^b \right\} \\ &= 1 - 1/e = 0.632 \end{aligned} \quad (5-70)$$

即相应击穿概率为 63.2%。

## 二、电缆绝缘的寿命统计规律

寿命的统计规律，即电缆绝缘层发生击穿的统计规律。或者说场强和作用时间的统计关系。

为了分析其规律,可在绝缘结构内取一单元立方体,设在单元立方体中的电场强度为  $E$ 。设  $E$  作用  $t$  时刻后不发生击穿,而在时间增量  $\Delta t$  内可能击穿,则在  $t + \Delta t$  时间内发生击穿的概率为

$$f(t) = \alpha \Delta t \quad (5-71)$$

式中,  $\alpha$  为和  $E$ 、 $t$  有关的常数。

而在  $t + \Delta t$  时刻不击穿的概率则为

$$1 - \alpha \Delta t \quad (5-72)$$

为了简化分析,可令  $t$  从零开始,时间分为  $\Delta t_1, \Delta t_2 \cdots \Delta t_n$  等小时间区域。则  $t$  从零开始,在  $t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \cdots + \Delta t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$  内不发生击穿的概率为

$$\begin{aligned} p(t) &= (1 - \alpha_1 \Delta t_1)(1 - \alpha_2 \Delta t_2) \cdots (1 - \alpha_n \Delta t_n) \\ &= \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i \Delta t_i) \end{aligned} \quad (5-73)$$

两边取对数得

$$\ln p(t) = \sum_{i=1}^n \ln(1 - \alpha_i \Delta t_i) \quad (5-74)$$

因  $\alpha_i \Delta t_i \ll 1$  故

$$\begin{aligned} \ln p(t) &= \sum_{i=1}^n -\alpha_i \Delta t_i \\ &= \int_0^t -\alpha(E, t) dt \end{aligned} \quad (5-75)$$

为方便计,  $\alpha(E, t)$  可先令  $E$  为常数,  $\alpha = \alpha_0 t^{n_t}$ 。其中  $n_t, \alpha_0$  均为常数。

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \ln p(t) &= \int_0^t -\alpha(t) dt = \int_0^t -\alpha_0 t^{n_t} dt \\ &= -\frac{\alpha_0 t^{n_t+1}}{n_t+1} \end{aligned} \quad (5-76)$$

又令  $A = \frac{\alpha_0}{n_t+1}, a = n_t+1$ , 则

$$\ln p(t) = -At^a$$

$$\text{所以} \quad p(t) = e^{-At^a} = \exp(-At^a) \quad (5-77)$$

在式 (5-63) 的威伯尔概率函数中,若令  $x$  为时间  $t$ , 且  $t$  从零开始即  $x_0=0$ , 则不发生击穿的概率为

$$\exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^b\right] \quad (5-78)$$

若令  $A = \frac{1}{\theta^b}, a = b$  则式 (5-78) 为

$$\exp[-At^a] \quad (5-79)$$

即和式 (5-77) 完全相同。从上述分析可知,绝缘层的击穿规律完全符合威伯尔分布函数的规律。

同理,把  $t$  作为常量,  $E$  为变量亦可得

$$p(E) = \exp[-BE^b] \quad (5-80)$$

将式 (5-77) 和式 (5-80) 合并,则得出绝缘层(材料)不击穿的统计规律为

$$p(E, t) = \exp[-ct^a E^b] \quad (5-81)$$

$a, b, c$  是和  $E, t$  无关的常数。

从式 (5-81) 可知若在  $t_1$  下施加的场强  $E_1$  和在  $t_2$  下施加的场强  $E_2$  不击穿的概率相同, 则

$$t_1^a E_1^b = t_2^a E_2^b \quad (5-82)$$

$$\text{或} \quad t_1 E_1^{\frac{b}{a}} = t_2 E_2^{\frac{b}{a}} \quad (5-83)$$

如令  $\frac{b}{a} = n$  则式 (5-63) 为

$$t_1 E_1^n = t_2 E_2^n \quad (5-84)$$

式中,  $n$  为寿命指数。对于粘性浸渍纸绝缘和聚氯乙烯绝缘电缆,  $n \approx 6 \sim 7$ ; 对于交联聚乙烯绝缘电缆  $n \approx 5 \sim 9$ ;  $a, b$  均为威伯尔概率函数中的形状参数, 其大小和材料质量、加工性能有关。

在实际工程中, 常常以下式来确定绝缘的长期允许击穿强度  $E_\infty$ 。

$$E = E_\infty + \frac{A}{\sqrt[n]{t}} \quad (5-85)$$

当  $E \gg E_\infty$  时其表达形式和式 (5-84) 是完全相同的。  $n, A$  均为常数。

研究电缆绝缘寿命统计规律的实际意义在于可以预知电缆的使用寿命; 确定电缆绝缘长期允许的击穿强度, 以对绝缘进行正确的设计; 确定电缆出厂试验电压, 以保证电缆安全使用的年限。

实际上, 寿命的研究是一项十分繁重的工作, 需要进行加速老化实验和大量的数学分析等工作。本书对此不再赘述。

### 三、电缆绝缘击穿强度与电缆几何尺寸的关系

式 (5-81)  $p(E, t) = \exp[-ct^a E^b]$  是单位体积, 在电场强度  $E$  作用  $t$  时刻不发生击穿的概率, 而欲求出整个绝缘层不发生击穿的概率, 则在绝缘层内首先取一  $\Delta V_i$  体积, 如图 5-20 所示。则其不发生击穿的概率为

$$p(t, E_i) = \exp[-ct^a E_i^b \Delta V_i] \quad (5-86)$$

那么, 整根电缆绝缘层不发生击穿的概率为

$$\begin{aligned} p(t, E) &= \prod_{i=1}^n \exp[-ct^a E_i^b \Delta V_i] \\ &= \exp\left[-\sum_{i=1}^n (ct^a E_i^b \Delta V_i)\right] \end{aligned} \quad (5-87)$$

对于单芯电缆, 第  $i$  体积处的场强

$$E_i = \frac{E_{\max} r_c}{r_i} \quad (5-88)$$

式中,  $E_{\max}$  为电缆绝缘内最大场强;  $r_c$  为线芯半径;  $r_i$  为第  $i$  体积处的半径。若令  $c = \beta l^k$ ,  $\beta, k$  为与几何尺寸无关的常数;  $l$  为电缆长度。利用柱面坐标, 则

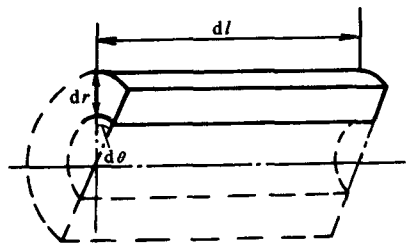


图 5-20 在电缆绝缘内取出的单元体积

$$\begin{aligned}
 p(E, t) &= \exp\left[-\iiint_V ct^a E_i^b \theta V_i\right] \\
 &= \exp\left[-\iiint_V \beta l^k t^a E_i^b r d\theta dr dl\right] \quad (5-89)
 \end{aligned}$$

将式(5-88)代入则

$$\begin{aligned}
 p(E, t) &= \exp\left[-\int_0^l \beta l^k dl \int_{r_c}^R t^a E_{\max}^b r_c^b \frac{1}{r^{b-1}} dr \int_0^{2\pi} d\theta\right] \\
 &= \exp\left\{\frac{-2\pi\beta}{b-2} t^a E_{\max}^b \frac{l^{k+1}}{k+1} r_c^2 \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^{b-2}\right]\right\} \quad (5-90)
 \end{aligned}$$

则最大场强为  $E_{\max}$  时, 在  $t$  时刻发生击穿的概率为

$$\begin{aligned}
 F(E, t) &= 1 - p(E, t) \\
 &= 1 - \exp\left\{\frac{-2\pi\beta}{b-2} t^a E_{\max}^b \frac{l^{k+1}}{k+1} r_c^2 \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^{b-2}\right]\right\} \quad (5-91)
 \end{aligned}$$

为了确定击穿场强和几何尺寸的关系, 我们取两根电缆, 其几何尺寸不同, 但令其场强作用的时间和击穿概率相同, 且认为最大场强为击穿场强。它们的几何尺寸线芯半径  $r_c$ 、绝缘外半径  $R$ , 最大场强、电缆长度、绝缘厚度分别为  $r_{c1}$ 、 $R_1$ 、 $E_{\max 1}$ 、 $l_1$ 、 $\Delta_1$ ;  $r_{c2}$ 、 $R_2$ 、 $E_{\max 2}$ 、 $l_2$ 、 $\Delta_2$ 。故按假设击穿概率相同, 则

$$E_{\max 1}^b l_1^{k+1} r_{c1}^2 \left[1 - \left(\frac{r_{c1}}{R_1}\right)^{b-2}\right] = E_{\max 2}^b l_2^{k+1} r_{c2}^2 \left[1 - \left(\frac{r_{c2}}{R_2}\right)^{b-2}\right] \quad (5-92)$$

经整理, 上式可写为

$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = \left\{ \frac{r_{c2}^2 \left[1 - \left(\frac{r_{c2}}{R_2}\right)^{b-2}\right]}{r_{c1}^2 \left[1 - \left(\frac{r_{c1}}{R_1}\right)^{b-2}\right]} \right\}^{\frac{1}{b}} \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{\frac{1}{b_L}} \quad (5-93)$$

式中,  $R_2 = r_{c2} + \Delta_2$ ;  $R_1 = r_{c1} + \Delta_1$ ;  $b$ 、 $b_L$  称为形状参数, 其大小与电缆绝缘层的材料性质、质量工艺等有关,  $b_L = \frac{b}{k+1}$ 。各种电缆绝缘层的形状参数值如表 5-2 所示。

表 5-2 各种电缆绝缘层的形状参数

电缆型式	电压波形	形状参数	
		$b$	$b_L$
充油电缆	脉冲	7~25	43~60
	工频	14	40~60
交联聚乙烯 电缆	脉冲	4.5~16.5	16.5
	工频	5.5~6.5	6.2~7

从上述公式和形状参数的数值中可分析主要几何尺寸对击穿强度的影响。

### 1. 绝缘层厚度对击穿强度的影响

为方便计, 可假设  $l_1 = l_2$ ,  $r_{c1} = r_{c2} = \Delta_1$ ,  $\Delta_2 = 2\Delta_1$ , 则式(5-93)可写为

$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = \left[ \frac{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{b-2}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{b-2}} \right]^{\frac{1}{b}} \approx 1 \quad (5-94)$$

从这一特殊情况可知，绝缘层厚度对击穿强度无太大影响。增加绝缘厚度，在电压不变的情况下，只是减少了绝缘结构承受的场强，而做为表征绝缘材料的重要特性的参数之一击穿强度，并无多大影响。

## 2. 电缆长度对击穿强度的影响

可假设  $r_{c1} = r_{c2} = \Delta_1$ ,  $\Delta_1 = \Delta_2$ ，则式 (5-93) 写成为

$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^{\frac{1}{b_L}} \quad (5-95)$$

一般  $b_L \gg 1$ ，故从式 (5-95) 中可知长度对击穿场强也无多大影响。 $b_L$  越大，绝缘质量越好，影响越小。但从实际事故统计中，对于塑力缆，当长度增大 100 倍时，其击穿强度将下降 50%。

3. 线芯半径对击穿强度的影响 为了说明问题，可令  $\Delta_1 = \Delta_2$ ,  $l_1 = l_2$ ，则式 (5-93) 可写成

$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = \left( \frac{r_{c2}}{r_{c1}} \right)^{\frac{2}{b}} \quad (5-96)$$

从式 (5-96) 可知，线芯半径的影响大小关键取决于形状参数  $b$ 。若  $b$  较大，表明绝缘的质量及工艺性能较好，绝缘击穿强度受线芯半径影响较小。若  $b$  值较小，表明绝缘的质量较差，在式 (5-96) 中，若  $b$  值为 1，则场强之比几乎是半径的反比平方。这主要是绝缘质量较差，在导体和绝缘的界面上导体半径越大，绝缘的弱点分布越集中，故击穿场强越小。

所以一般形状参数较小的塑力缆，均按平均击穿场强设计绝缘厚度。而充油电缆可按最大击穿强度设计绝缘厚度。

## 第五节 电缆绝缘层厚度的确定

上面分析了影响绝缘厚度的诸多因素，这些因素都是确定绝缘厚度的依据。综合分析，对于低压小截面电缆，如 500V 以下的小截面橡塑绝缘和 1000V 及以下的浸渍纸绝缘，其厚度往往由工艺规定的最小厚度决定。橡塑绝缘最小厚度规定为 0.3mm，油纸绝缘纸层最少不低于 5~10 层等，防止可能出现穿透的孔隙和导电点重合。最小厚度的确定也考虑工艺实现的可能性。

而对于低压大截面的电缆，其绝缘厚度主要根据机械性能确定。主要考虑电缆在生产和安装时所受到的拉、压、弯、扭、剪切等机械应力。因为电缆工作电压低，对于能满足承受可能的机械损伤的绝缘厚度，均能满足电气击穿强度的要求。对于热带、寒带、船用及矿用等特殊场合所用电缆，须承受很大的机械应力。这类电缆的绝缘设计，往往是根据制造和运行经验或机械实验来选定其厚度，然后再进行电气核算。

只有工作电压高至 10kV 以上时，绝缘的击穿场强才逐渐成为决定绝缘层厚度的主要因素。电缆绝缘结构在设计使用期限内应能安全承受各种形式的电压。此时绝缘层厚度的确定，主要是根据电缆绝缘内的最大场强等于其击穿场强的原理来设计的。

对于高压单芯不分阶绝缘电缆，其绝缘厚度可按式 (5-97) 进行计算

$$\frac{E}{m} = \frac{U}{r_c \ln \frac{R}{r_c}} \quad (5-97)$$

式中,  $U$  为试验电压, 为工频试验电压时, 大约为 2.6~3.3 倍的相电压, 为脉冲实验电压时, 可据保护水平选取, 或为  $6U_0 + 40\text{kV}$ , 二者均可按电压等级从标准中选取;  $E$  为击穿场强, 油纸绝缘的工频和脉冲击穿强度可参照例 5-1;  $m$  为相应于工频和脉冲电压下的安全裕度, 一般取 1.2~1.6;  $r_c$  为导电线芯半径, 一般含内半导电屏蔽层;  $R$  为绝缘层外半径。

可据式 (5-97) 分别按工频电压和场强及脉冲电压和场强进行计算, 然后选择厚度较大者。其厚度为

$$\Delta_i = R - r_c = r_c \left[ \exp\left(\frac{mU}{Er_c}\right) - 1 \right] \quad (5-98)$$

对  $n$  层分阶绝缘结构的电缆, 可应用 (5-18) 式得

$$\frac{E_1}{m_1} r_c \epsilon_1 = \frac{E_2}{m_2} r_1 \epsilon_2 = \dots = \frac{E_n}{m_n} r_{n-1} \epsilon_n \quad (5-99)$$

式中  $r_c$  为导体半径;  $r_1, r_2, \dots, r_{n-1}$  分别为各分阶绝缘层内半径;  $E_1, E_2, \dots, E_n$  为相应于  $U$  为工频电压或脉冲电压时的长期工频击穿强度或脉冲击穿强度;  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为安全裕度。

当击穿强度、介电常数、 $r_c$  给定后就可按式 (5-99) 确定各分阶内半径  $r_1, r_2, \dots, r_{n-1}$ , 及绝缘外半径  $R$ 。各层绝缘厚度分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{i1} &= r_1 - r_c \\ \Delta_{i2} &= r_2 - r_1 \\ &\dots\dots \\ \Delta_{in} &= R - r_{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (5-100)$$

$$\text{绝缘层总厚度} \quad \Delta_i = R - r_c \quad (5-101)$$

而对于塑力缆, 由于击穿强度受半径等几何尺寸影响较大, 所以可以采用平均击穿场强来确定绝缘层厚度。

仍然是分别按脉冲和工频进行计算, 然后取其厚者。

按脉冲电压确定塑料绝缘厚度

$$\Delta_i = \frac{U_{\text{BIL}} k_1 k_2}{E_{\text{av}}} \quad (5-102)$$

式中,  $U_{\text{BIL}}$  为基本绝缘水平, 可根据线路的保护水平选取脉冲试验电压;  $k_1$  为脉冲电压老化系数, 交联聚乙烯可取 1.2;  $k_2$  为绝缘层温度系数, 交联聚乙烯取 1.3;  $E_{\text{av}}$  为平均脉冲击穿强度, 应据威伯尔分布函数通过实验确定, 参考数值: 交联聚乙烯为 50~70kV/mm, 聚氯乙烯为 40kV/mm 左右。

按工频电压确定塑料绝缘厚度

$$\Delta_i = \frac{U_0 k_3}{E'_{\text{av}}} \quad (5-103)$$

式中,  $U_0$  为最大工作相电压;  $k_3$  为工频电压老化系数, 交联聚乙烯寿命指数  $n=9$  时  $k_3$  取 4。

上二式中的  $k$  值,对于聚氯乙烯要相对交联聚乙烯取较高数值; $E'_{av}$  为平均长期工频击穿强度,亦应按威伯尔分布函数确定,对交联聚乙烯大约为  $10\sim 30\text{kV/mm}$ ;对聚氯乙烯大约取  $4\sim 6\text{kV/mm}$ 。

### 例 5-1 试计算 -220kV 电缆的绝缘层厚度

已知数据:

线芯标称截面积	845mm <sup>2</sup>
线芯屏蔽外径	41.0mm
工作油压 不低于	101kPa(1atm)
系统额定线电压	220kV
系统额定相电压	127kV
最高工作相电压	146kV
一相接地,另一相可能出现最大电压	202kV
工频安全裕度	1.3
脉冲安全裕度	1.3

采用三层分阶,各层纸带绝缘性能如下:

纸带厚度 / $\mu\text{m}$	相对介电常数 $\epsilon$	长期工频击穿强度 <sup>①</sup> /( $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	脉冲击穿强度 <sup>①</sup> /( $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ )
45	4.1	36	111
75	3.3	33	100
125	3.3	30	90

① 是当线芯半径为 10mm 时之值,  $b=7$ (脉冲),  $b=14$ (工频)。

解 (1) 根据绝缘长期工频击穿强度确定绝缘层厚度三层分阶,各层取相同安全裕度,根据式(5-99)计算分阶半径

$$\epsilon_1 E'_1 r_c = \epsilon_2 E'_2 r_2 = \epsilon_3 E'_3 r_3$$

$$E'_1 = 36 \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/14}$$

$$E'_2 = 33 \left( \frac{10}{r_2} \right)^{2/14}$$

$$E'_3 = 30 \left( \frac{10}{r_3} \right)^{2/14}$$

$$4.1 \times 36 \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/14} \times 20.5 = 3.3 \times 33 \left( \frac{10}{r_2} \right)^{2/14} r_2$$

得  $r_2 = \left( \frac{4.1 \times 36}{3.3 \times 33} \right)^{7/6} \times 20.5\text{mm} = 1.425 \times 20.5\text{mm} = 29.2\text{mm}$

$$r_3 = \left( \frac{4.1 \times 36}{3.3 \times 30} \right)^{7/6} \times 20.5\text{mm} = 1.59 \times 20.5\text{mm} = 32.6\text{mm}$$

于是,相应的长期工频击穿强度

$$E'_1 = 36 \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/14} = 32.6\text{MV/m}$$

$$E'_2 = 33 \left( \frac{10}{31.3} \right)^{2/14} = 28.1\text{MV/m}$$

$$E'_3 = 30 \left( \frac{10}{35.9} \right)^{2/14} = 25.0 \text{ MV/m}$$

$$\frac{G_1}{m} = \frac{U}{r_c \epsilon_1 \left( -\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_2} \right)}$$

即

$$\frac{32.6}{1.3} = \frac{2.5 \times 127}{20.5 \times 4.1 \left( \frac{1}{4.1} \ln \frac{29.2}{20.5} + \frac{1}{3.3} \ln \frac{R}{29.2} \right)}$$

$$R = 29.2 \exp \left[ \frac{3.3}{4.1} \left( \frac{2.5 \times 127 \times 1.3}{20.5 \times 32.6} - \ln \frac{29.2}{20.5} \right) \right] = 29.2 \times 1.239 \text{ mm} = 36.2 \text{ mm}$$

$$\Delta_i = R - r_c = 36.2 - 20.5 \text{ mm} = 15.7 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i1} = (29.2 - 20.5) \text{ mm} = 8.7 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i2} = (92.6 - 29.2) \text{ mm} = 3.4 \text{ mm}$$

$$\Delta_{i3} = (36.2 - 32.6) \text{ mm} = 3.6 \text{ mm}$$

(2) 根据绝缘脉冲击穿强度确定绝缘层厚度

1) 采用 FZ 型避雷器

$$\text{FZ 型避雷器保护水平 } U_p = 2.4 \times \sqrt{2} \times 202 \text{ kV} = 686 \text{ kV}$$

$$\text{电缆基本绝缘水平 (BIL)} \approx 1.3 \times 686 \text{ kV} = 890 \text{ kV}$$

取

$$\text{BIL} = 950 \text{ kV}$$

如各层取相同脉冲安全系数, 根据式 (5-99) 计算绝缘层分阶半径

$$\epsilon_1 = 4.1 \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = 3.3$$

$$E_1 = 111 \times \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/7}$$

$$E_2 = 100 \times \left( \frac{10}{r'_2} \right)^{2/7}$$

$$E_3 = 90 \times \left( \frac{10}{r'_3} \right)^{2/7}$$

$$4.1 \times 111 \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/7} \times 20.5 = 3.3 \times 100 \left( \frac{10}{r'_2} \right)^{2/7} r'_2$$

得

$$r'_2 = \left( \frac{4.1 \times 111}{3.3 \times 100} \right)^{7/5} \times 20.5 \text{ mm} = 1.57 \times 20.5 \text{ mm} = 32.2 \text{ mm}$$

$$r'_3 = \left( \frac{4.1 \times 111}{3.3 \times 90} \right)^{7/5} \times 20.5 \text{ mm} = 1.83 \times 20.5 \text{ mm} = 37.4 \text{ mm}$$

于是脉冲击穿强度

$$E_1 = 111 \times \left( \frac{10}{20.5} \right)^{2/7} = 90.5 \text{ MV/m}$$

$$E_2 = 100 \times \left( \frac{10}{32.2} \right)^{2/7} = 71.5 \text{ MV/m}$$

$$E_3 = 90 \times \left( \frac{10}{37.4} \right)^{2/7} = 61.7 \text{ MV/m}$$

用式 (5-98) 确定绝缘层总厚度  $\Delta'_i$ 

$$\frac{E_1}{m'} = \frac{U}{r_c \epsilon_1 \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r'_2}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R'}{r'_2} \right)}$$



即

$$\frac{90.5}{1.3} = \frac{950}{20.5 \times 4.1 \left( \frac{1}{4.1} \ln \frac{32.2}{20.5} + \frac{1}{3.3} \ln \frac{R'}{32.2} \right)}$$

$$R' = 32.2 \exp \left[ \frac{3.3}{4.1} \left( \frac{950 \times 1.3}{20.5 \times 90.5} - \ln \frac{32.2}{20.5} \right) \right] = 32.2 \times 1.192 \text{mm} = 38.6 \text{mm}$$

于是

$$\Delta'_{i1} = (32.2 - 20.5) \text{mm} = 11.7 \text{mm}$$

$$\Delta'_{i2} = (37.4 - 32.2) \text{mm} = 5.2 \text{mm}$$

$$\Delta'_{i3} = (38.6 - 37.4) \text{mm} = 1.2 \text{mm}$$

$$\Delta'_i = (38.6 - 20.5) \text{mm} = 18.1 \text{mm}$$

## 2) 采用磁吹避雷器

国产磁吹避雷器保护水平  $U_p = 1.9\sqrt{2}U_a = 1.9 \times \sqrt{2} \times 202 \text{kV} = 545 \text{kV}$

电缆基本绝缘水平(BIL)  $\approx 1.3U_p = 1.3 \times 545 \text{kV} = 710 \text{kV}$

取 BIL = 750kV

如各层取相同安全裕度  $m = 1.3$ , 根据式(5-99)计算绝缘层分阶半径及绝缘层总厚度

$$r_c = 20.5 \text{mm}$$

$$r'_2 = 32.2 \text{mm}$$

$$r'_3 = 37.4 \text{mm}$$

$$R' = 32.2 \exp \left[ \frac{3.3}{4.1} \left( \frac{750 \times 1.3}{20.5 \times 90.5} - \ln \frac{32.2}{20.5} \right) \right] = 32.2 \times 1.063 \text{mm} = 34.2 \text{mm}$$

因为  $R' < r'_3$ , 故不用第三层绝缘

$$\Delta''_{i1} = 32.2 - 20.5 \text{mm} = 11.7 \text{mm}$$

$$\Delta''_{i2} = 34.2 - 32.2 \text{mm} = 2.0 \text{mm}$$

$$\Delta''_i = 34.2 - 20.5 \text{mm} = 13.7 \text{mm}$$

从上述计算结果可以看出:

(1) 如电缆线路采用 FZ 阀型避雷器, 电缆的脉冲击穿强度成为绝缘厚度的决定因素。此时绝缘层厚度  $\Delta'_i = 18.1 \text{mm}$ , 而工频安全裕度大于规定值。电缆在标称工作电压 (127kV) 下的工作场强

$$E = \frac{127}{20.5 \times 4.1 \times \left[ \frac{1}{4.1} \ln \frac{32.2}{20.5} + \frac{1}{3.3} \ln \frac{38.6}{32.2} \right]} = 9.32 \text{MV/m}$$

(2) 如电缆线路采用磁吹避雷器, 线路对电缆的冲击绝缘水平要求大大地降低了, 电缆的长期工频击穿强度成为绝缘层厚度的决定因素。此时绝缘层厚度  $\Delta_i = 15.7 \text{mm}$ , 而脉冲安全裕度大于规定值。电缆在标称工作电压 (127kV) 以下工作场强为

$$E = \frac{127}{20.5 \times 4.1 \times \left[ \frac{1}{4.1} \ln \frac{29.2}{20.5} + \frac{1}{3.3} \ln \frac{36.2}{29.2} \right]} = 10 \text{MV/m}$$

(3) 从 (1), (2) 可以看出, 改善线路保护设备性能, 可以提高电缆的工作场强, 从而减薄电缆绝缘层的厚度。

## 第六章 电力电缆连续允许载流量的计算

电力电缆做为电力系统的主要元件，担负着功率传输的任务 ( $P = IU$ )。电流的容量是功率的重要部分。电力电缆连续允许载流量的计算，也就是工作电流，或者说电力电缆允许负荷的计算。在电力电缆设计中，须计算按设计条件要求的，允许的负载能力。或反之，根据负载能力的大小来选择电缆各部分的结构和尺寸。

载流量转化的损耗，为线芯损耗 ( $W_c = I^2 R_c$ )，和其他损耗一起引起电缆发热。电缆各部分，尤其绝缘层，长期在热的作用下会引起高分子的降解破坏，甚至发生热击穿。所以电缆的温度不应超过允许的最高温度，故载流量的大小，亦应根据热性能来确定。

### 第一节 热场分析

#### 一、电缆热场的概念

电力电缆在运行过程中导电线芯、绝缘层、金属屏蔽层和铠甲都会产生损耗而引起电缆发热，致使电缆温度升高。这些发热的部分称为热源。热源产生热流，热总是由高温流向低温。如图 6-1 为三芯电缆的热场分布图。

热源的存在会使周围的物质处于一种特殊的状态，任何物体处在热场中温度都会升高，我们把一切点的温度分布称为热场。在由高温向低温散热过程中，热场中各点的温度将发生变化，所以我们又把热场分为稳态热流场和暂态热流场。

若电缆中任意一点的温度只是位置的函数，与时间无关， $\theta = f(x, y, z)$ ，这样的场称为稳态热流场，简称稳态。

若电缆中任意一点的温度，不仅是位置坐标的函数，而且是时间  $t$  的函数，即  $\theta = f(x, y, z, t)$ ，这样的场称为暂态热流场，简称暂态。

在实际运行中，电缆从零开始加负载，温度会逐渐升高，即温度随时间变化，此时即为暂态情况。但随温度的升高，电缆与周围媒质的温差也逐渐增大，致使散热增多。一旦发出的热量等于散失的热量，则热流便达到了动态平衡，各点的温度会保持不变，此时电缆便达到稳态。可据稳态发热特性确定电缆的连续载流量。

若电缆的负载是变化的，其温度亦随之变化，如过载、短路等情况。可据暂态发热特性确定电缆的短路容量及过载能力。

#### 二、热场中有关的物理量

电缆热场中的有关物理量和电场的有关物理量十分相似，且一一对应。所以我们也借用电场和电路的方法研究热场和热路。

热场的主要物理量如下：

$W$  为电缆各部分的功率损耗，在热路方程中为热流，单位为  $W/m$ ； $\Delta\theta$  为温升，单位

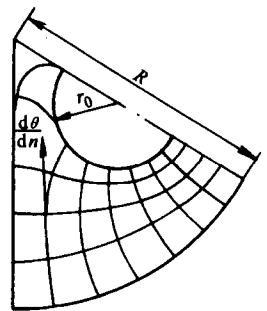


图 6-1 三芯电缆中  
一相热场分布图

为 K。T 为热阻，单位为  $K \cdot m/W$ ； $\rho_T$  为热阻系数，单位为  $K \cdot m/W$ ；c 为热容，即物体温度每升高（或降低）1K 所吸收（或放出）的热量，单位为 J/K。

### 三、富氏定律

在热场中任意一点处，流过某单元面积  $dA$  的热流  $dW$  和该点的温度梯度  $\frac{d\theta}{dh}$  成正比，和单元面积成正比，写成等式为

$$dW = -\lambda \frac{d\theta}{dh} dA \quad (6-1)$$

式中， $\lambda$  为比例系数，又称为导热系数；温度梯度的方向指向温度增大的方向，而热流总是由高温指向低温，故公式中应加负号。

### 四、热场方程

在电缆热场计算中，由于电缆均为圆柱形体，故可采用柱面坐标。以单芯电缆为例，其长度远远大于直径，可忽略复杂的边缘效应，电缆各横截面的情况均相同，可看成一个平面场，认为电缆仅沿径向散热。如图 6-2，在绝缘层中距中心距离  $r$  处，取一单位长度，厚度为  $dr$  的圆柱体，其体积为  $dV = 2\pi r \cdot dr \cdot 1$ 。设单位时间流入该体积的热流为  $W$ ；流出该体积的热流为  $W + \frac{dW}{dr} \cdot dr$ ；若  $q$  为热容系数，单位时间该体积温度升高  $\frac{d\theta}{dt}$  所吸收的热量为  $q dV \frac{d\theta}{dt}$ ；若  $W_i$  表示单位时间单位体积发出的热流，则据能量守恒定理和热流连续原理有等式成立，可写为

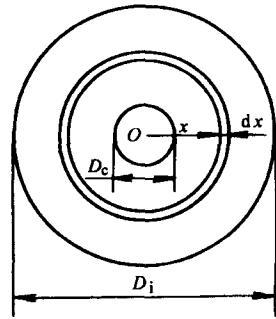


图 6-2 建立电缆热流平衡方程的说明

$$W + W_i dV = \frac{dW}{dr} dr + W + q dV \frac{d\theta}{dt} \quad (6-2)$$

据富氏定理可求出

$$\frac{dW}{dr} = -2\pi\lambda \left( r \frac{d\theta^2}{dr^2} + \frac{d\theta}{dr} \right) \quad (6-3)$$

将(6-3)式代入(6-2)式可得

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\lambda}{q} \left( \frac{d\theta^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} \right) + \frac{W_i}{q} \quad (6-4)$$

对于稳态情况  $\frac{d\theta}{dt} = 0$ ，故当有介质损耗  $W_i$  时，上式可写成泊松方程形式

$$\nabla^2 \theta = -\frac{W_i}{\lambda} \quad (6-5)$$

而无介质损耗时则为拉普拉斯方程形式

$$\nabla^2 \theta = 0 \quad (6-6)$$

## 第二节 等值热路方程

若求解热场方程，运算较为复杂。在实际工程中，可将场的问题转化为路的问题，以求出载流量的计算公式。这样可大大简化运算，也符合电缆实际运行情况。

以一单芯电缆为例。为了方便起见，可先考虑导电线芯损耗。设导电线芯半径为  $r_c$ ，绝缘外半径为  $R$ 。首先求稳态时绝缘层中的温度分布公式。为此可将式 (6-6) 改写为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\theta}{dr} \right) = 0 \quad (6-7)$$

对其进行两次积分得

$$\theta = C_1 \ln r + C_2 \quad (6-8)$$

$C_1, C_2$  为积分常数，可据初始条件求取。

当  $r = r_c$  时， $\theta = \theta_c$  (线芯温度)，故有

$$\theta_c = C_1 \ln r_c + C_2 \quad (6-9)$$

又因在稳态情况下，线芯产生的热流可认为全部进入绝缘层，则据富氏定律

$$W = W_c = -2\pi\lambda r_c \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=r_c} \quad (6-10)$$

又对式(6-8)两边求导

$$\left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=r_c} = \frac{C_1}{r_c} \quad (6-11)$$

据式 (6-10)、式 (6-11) 两式可得

$$C_1 = -\frac{W_c}{2\pi\lambda} \quad (6-12)$$

将式(6-12)代入式(6-9)得

$$C_2 = \theta_c - C_1 \ln r_c = \frac{W_c}{2\pi\lambda} \ln r_c + \theta_c \quad (6-13)$$

将  $C_1, C_2$  均代入式 (6-8) 可得

$$\theta_c - \theta = \frac{W_c}{2\pi\lambda} \ln \frac{r}{r_c} \quad (6-14)$$

上式即为稳态时绝缘层中任一点的温度分布公式。

当  $r = R$  时， $\theta = \theta_s$  (金属屏蔽层温度)，由式 (6-14) 可得

$$\theta_c - \theta_s = \frac{W_c}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_c} \quad (6-15)$$

令  $\frac{1}{\lambda} = \rho_{T1}$  为热阻系数，故 (6-15) 可写成

$$\theta_c - \theta_s = W_c \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_c} \quad (6-16)$$

又令  $\frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_c} = T_1$  为热阻，故 (6-16) 可写成

$$\theta_c - \theta_s = W_c T_1 \quad (6-17)$$

即由线芯损耗在导电线芯至金属屏蔽层间产生的温升等于热流和热阻之积。写成热路图如图 6-3 所示。这样就将热流场问题转化为热路问题。

以上分析仅考虑了导电线芯损耗，现再单独考虑由介质

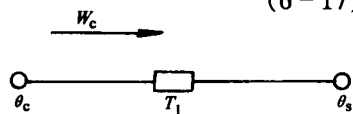


图 6-3 热路图

损耗产生的温升，也即相当于电缆加电压  $U_0$  后开路的情况。此时，线芯损耗  $W_c=0$ ，绝缘层单位体积发出的热流  $W_i=\gamma E^2$ 。由式 (6-5) 得

$$\lambda \left( \frac{d\theta^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} \right) + \gamma E^2 = 0 \quad (6-18)$$

将其改写为

$$\lambda \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\theta}{dr} \right) + \frac{\gamma U_0^2}{r \ln^2 \frac{R}{r_c}} = 0 \quad (6-19)$$

式中， $\lambda$  为导热系数； $\gamma$  为绝缘层等值电导率； $r_c$  为导电线芯半径； $R$  为绝缘层外半径； $U_0$  为相电压； $r$  为绝缘层中任意一点到电缆中心间的距离。

对式 (6-19) 两边积分

$$\lambda r \frac{d\theta}{dr} + \frac{\gamma U_0^2}{\ln^2 \frac{R}{r_c}} \ln r = C_1 \quad (6-20)$$

两边除  $r$  再积分

$$\lambda \theta + \frac{\gamma U_0^2}{\ln^2 \frac{R}{r_c}} \cdot \frac{1}{2} (\ln r)^2 = C_1 \ln r + C_2 \quad (6-21)$$

积分常数  $C_1, C_2$  可利用初始条件求取

当  $r=r_c$  时， $\theta=\theta_c$ 。

又据富氏定律

$$W_c = -2\pi\lambda r_c \frac{d\theta}{dr} \Big|_{r=r_c} = 0 \quad (6-22)$$

故  $\frac{d\theta}{dr} \Big|_{r=r_c} = 0$ ，将其代入 (6-20)

$$C_1 = \frac{\gamma U_0^2}{\ln^2 \frac{R}{r_c}} \ln r_c \quad (6-23)$$

同理，将  $r=r_c$ ， $\theta=\theta_c$  及  $C_1$  代入式 (6-21) 得

$$C_2 = \lambda \theta_c - \frac{\gamma U_0^2}{\ln^2 \frac{R}{r_c}} \frac{\ln^2 r_c}{2} \quad (6-24)$$

将  $C_1, C_2$  代入式 (6-21) 整理得

$$\theta = \theta_c - \frac{\gamma U_0^2}{2\lambda \ln^2 \frac{R}{r_c}} \ln^2 \frac{r}{r_c} \quad (6-25)$$

上式即仅考虑介质损耗时，绝缘层中任意一点的温度分布方程。

又可将其改写为

$$\theta = \theta_c - \frac{1}{2} \left[ \frac{2\pi\gamma U_0^2}{\ln \frac{\gamma}{r_c}} \right] \left[ \frac{1}{2\pi\lambda \ln \frac{R}{r_c}} \right] \left[ \frac{\ln \frac{r}{r_c}}{\ln \frac{R}{r_c}} \right]^2 \quad (6-26)$$

式中,  $\frac{2\pi\gamma U_0^2}{\ln \frac{R}{r_c}} = W_i$  为介质总的损耗;  $\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_c} = T_1$  为绝缘层热阻。

故当  $r = R, \theta = \theta_s$  时式(6-21)可写为

$$\theta_c - \theta_s = \frac{1}{2} W_i T_1 \quad (6-27)$$

即由于介质损耗在绝缘层两端产生的温升, 等于介质损耗和绝缘层热阻乘积之半。这可以理解成介质损耗为分布参数, 流经整个绝缘层的介质损耗所产生的热流, 实际可等效地看成为总的介质损耗热流的一半。

同理, 若将导电线芯损耗  $W_c$ , 介质损耗  $W_i$ , 金属屏蔽层损耗  $W_s$  和铠装层损耗  $W_p$  同时考虑, 令绝缘层热阻为  $T_1$ , 内衬层热阻为  $T_2$ , 外披层热阻为  $T_3$ , 周围媒质热阻为  $T_4$ , 则据叠加原理, 其热路方程为

$$\theta_c - \theta_a = \left( W_c + \frac{1}{2} W_i \right) T_1 + (W_c + W_i + W_s) T_2 + (W_c + W_i + W_s + W_p) (T_3 + T_4) \quad (6-28)$$

式中,  $\theta_c$  为导体允许最高温度, 见表 6-1;  $\theta_a$  为周围媒质温度, 参见表 6-2。热路图如图 6-4。

表 6-1 各种形式电缆允许最高工作温度

电 缆 形 式	长期允许最高工作温度	短时 (最长持续时间 5s)
	/°C	允许最高工作温度 /°C
油浸纸绝缘电力电缆		
粘性浸渍 3kV 及以下	80	220
粘性浸渍 6kV 及以下	65	220
粘性浸渍 10kV 及以下	60	220
粘性浸渍 20kV 及以上	50	220
不滴流电力电缆	65~75	—
充油型电力电缆		
自容式	75~80	160
钢管式	80	160
充气电力电缆	75	220
聚乙烯绝缘电力电缆	70~75	130~150
交联聚乙烯绝缘电力电缆		
10kV 及以下	90	250
20kV 及以上	80	250
聚氯乙烯绝缘电力电缆	65	160
橡皮绝缘电力电缆	65	150
丁基橡胶电力电缆	80	220
乙丙橡胶电力电缆	80	250

表 6-2 周围煤质温度 (°C)

地 带	周 围 空 气 温 度		周 围 土 壤 温 度 (深 1m)	
	最 低	最 高	最 低	最 高
热 带	25	55	25	40
亚 热 带	10	40	15	30
温 带	0	25	10	20

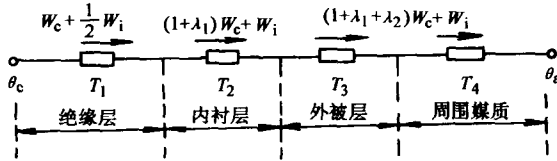


图 6-4 电缆全部等值热路

### 第三节 电缆各部分热阻的计算

从热路方程中可知，在温升和损耗已知的情况下，若求出载流量，须求出电缆及周围煤质的热阻。

#### 一、绝缘层热阻

和求绝缘电阻的方法相同，只须将其结果中的电阻系数换成热阻系数即可。各种材料的热阻系数如表 6-3 所示。

表 6-3 材料的热阻系数

材 料	热阻系数 $\rho_T$ /(K·m·W <sup>-1</sup> )	材 料	热阻系数 $\rho_T$ /(K·m·W <sup>-1</sup> )	材 料	热阻系数 $\rho_T$ /(K·m·W <sup>-1</sup> )
绝缘材料：		乙丙橡胶	5.00	绝缘材料一栏的相同	
粘性浸渍纸绝缘	6.00	丁基橡胶	5.00	数值	
充油电缆纸绝缘	5.00	橡胶	5.00	敷设管道材料：	
外压气电缆纸绝缘	5.50	护层材料：	6.00	水泥	1.00
内压气电缆纸绝缘		浸渍麻及纤维材料		纤维	4.80
a) 预浸渍	6.50	夹层橡胶	6.00	石棉	2.00
b) 整体浸渍	6.00	氟丁橡胶	5.50	陶土	1.20
聚乙烯	3.50	用于护层材料的塑料		聚氯乙烯	7.00
交联聚乙烯	3.50	和合成橡胶, 热阻		聚乙烯	3.50
聚氯乙烯 <sup>①</sup>	6.00	系数应取表中用于			

① 聚氯乙烯为平均值，因其热阻系数由合成物的种类而定。

#### 1. 单芯电缆绝缘层热阻

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} G \quad (6-29)$$

式中， $\rho_{T1}$  为绝缘材料的热阻系数； $G$  为几何因数，可据图 3-2 查出。

2. 多芯电缆绝缘层热阻

和多芯电缆绝缘电阻形式相同。圆形芯为

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi n} G_1 \tag{6-30}$$

式中， $n$  为电缆芯数； $G_1$  为三芯短接时的几何因数。在热性计算中相当于三芯温度相同，亦可从图 6-6 中查得。

扇形芯须在式 (6-30) 乘以校正因数  $F$ ， $F$  也可从图 3-2 中查得。

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi n} G_1 F \tag{6-31}$$

对于三芯分相屏蔽型电缆，绝缘层热阻为

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{6\pi} G_1 K \tag{6-32}$$

式中， $G$  为几何因数； $K$  为屏蔽层影响因数，可从图 6-5 中查得。

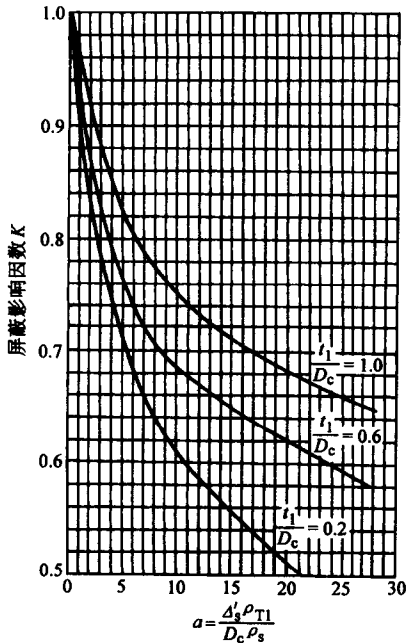


图 6-5 圆形芯分相屏蔽多芯电缆的屏蔽影响因数  $K$

图 6-5 中横坐标为  $\alpha = \frac{\Delta'_s \rho_{T1}}{D_c \rho'_s}$ 。 $\Delta'_s$  为分相屏蔽层厚度； $D_c$  为导电线芯直径， $t_1$  为相绝缘厚度； $\rho'_s$ 、 $\rho_{T1}$  分别为金属屏蔽层、绝缘层的热阻系数。

二、内衬层和外护层热阻

一般电缆均为同心圆结构，可以认为统包的金属屏蔽层和铠装层与电缆表面均为等温面。

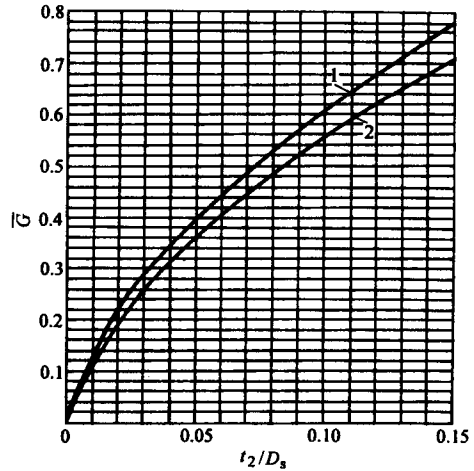


图 6-6 计算分相铅包或铝包电缆衬垫热阻的几何因数  $\bar{G}$

1—电缆的金属护套相接触 2—电缆的金属护套之间保护层的厚度与电缆金属护套和铠装之间的保护层厚度相等  $t_2$ —护套和铠装之间的保护层厚度  $D_s$ —护套外径



## 1. 内衬层热阻

$$T_2 = \frac{\rho_{T2}}{2\pi} \ln \frac{D_a}{D'_s} \quad (6-33)$$

式中,  $\rho_{T2}$  为内衬层热阻系数;  $D_a$ 、 $D'_s$  分别为内衬层的内、外直径。

对于分相屏蔽型电缆, 它的金属屏蔽层与铠装层不是同心圆结构, 内衬层热阻可用下式

$$\text{计算} \quad T_2 = \frac{\rho_{T2} \overline{G}}{2\pi} \quad (6-34)$$

式中,  $\overline{G}$  为几何因数, 可从图 6-6 中查得。图中横坐标为  $\Delta_2/D'_s$ 。  $\Delta_2$  为内衬层厚度,  $D'_s$  为金属屏蔽层外径。曲线 1 适用于屏蔽层 (或护套) 无涂层, 曲线 2 适用于分相铅包金属护套上有涂层或浸渍带包绕的电缆, 且其厚度等于金属护套表面至铠装内表面的厚度。

## 2. 外披层热阻

$$T_3 = \frac{\rho_{T3}}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D'_a} \quad (6-35)$$

式中,  $\rho_{T3}$  为外披层热阻系数;  $D'_a$ 、 $D_e$  为外披层的内、外直径。

## 第四节 电缆周围媒质的热阻

为了确定电缆的传输容量, 不仅要计算电缆本体各部分的热阻, 还要计算电缆外部即周围媒质的热阻。在电缆实际应用中, 一般是直接敷设于土地中、架设于空气中和敷设于水底中。

## 一、敷设于土地中的热阻

若无特殊要求, 一般地下敷设可取标准深度 1m。并可近似地认为电缆表面、土地表面均为等温面。土地为均匀媒质, 其热阻系数为  $k\rho'_{T4}$ , 一般  $k \approx \frac{2}{3}$ , 则  $k\rho'_{T4} = \rho_{T4}$ 。电缆散发到土地的热流均流向土地表面。如图 6-7。

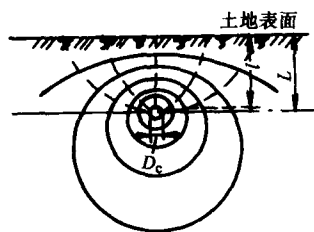


图 6-7 敷设在土壤中的电缆热流场

根据电工中的镜象法原理, 若电缆敷设深度为  $L$ , 以集中参数  $W$  代替流向大地表面的分布热流。则和  $W$  相对称在大地表面上部  $L$  处, 假设有一个  $-W$  为其虚象。那么,  $+W$  和  $-W$  之间的热场和实际热场相同。再用电轴法求场中的温度。如图 6-8。

电缆的截面较大, 电缆发热不集中在几何中心, 而可认为集中在电缆的某处。热流集中处称为等效热轴。设大地表面的温度为参考温度, 电缆半径为  $r_e$ , 等效热轴到参考点的距离为  $l$ , 电缆几何中心到参考点的距离为  $L$ 。故电缆表面 A 点到负热轴的距离为  $l + (L - r_e)$ ; A 点到正热轴的距离为  $l - (L - r_e)$ 。则 A 点的温度

$$\theta_A = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} W \ln \frac{l + (L - r_e)}{l - (L - r_e)} \quad (6-36)$$

故土地的热阻

$$T_4 = \frac{\Delta\theta}{W} = \frac{\theta_A}{W} = \frac{\rho'_{T4}}{2\pi} \ln \frac{l + (L - r_e)}{l - (L - r_e)} \quad (6-37)$$

又因  $L^2 = l^2 + \left(\frac{D_e}{2}\right)^2$  则  $l = \sqrt{L^2 - \left(\frac{D_e}{2}\right)^2}$ , 将其代入式(6-37)得

$$T_4 = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} \ln \left( \frac{2L}{D_e} + \sqrt{\frac{4L^2}{D_e^2} - 1} \right) \quad (6-38)$$

一般  $\frac{2L}{D_e} > 10$  时

$$T_4 = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_e} \quad (6-39)$$

如有多根电缆敷设于土地中, 必然会相互有热的影响, 相当于增加了热源, 可按镜象原理求取。如图 6-9 所示, 如有负载电流相同的  $N$  根电缆组成的电缆群, 其中如

$$\theta_A = \frac{W\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_e} \quad (6-40)$$

则

$$\theta_{AB} = \frac{W\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{s'_{21}}{s_{21}} \quad (6-41)$$

$$\theta_{AC} = \frac{W\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{s'_{31}}{s_{31}} \quad (6-42)$$

故

$$T_4 = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_e} \cdot F \quad (6-43)$$

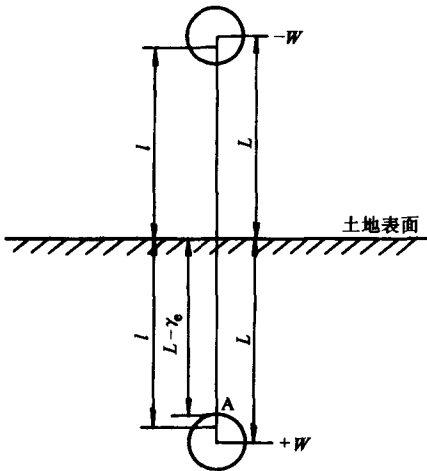


图 6-8 用镜象法计算土地热阻说明

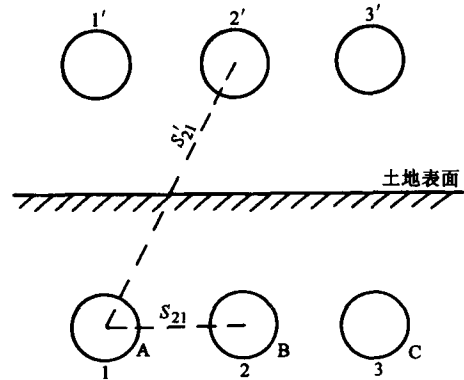


图 6-9 多根电缆镜象法求热阻示意图

式中,  $F = \frac{s'_{1K}s'_{2K}\cdots s'_{nK}}{s_{1K}s_{2K}\cdots s_{nK}}$ ,  $s_{1K}, s_{2K}, \cdots, s_{nK}$  为电缆 1、2... $N$  中心至电缆  $K$  中心距离;  $s'_{1K}, s'_{2K}$

$\cdots s'_{nK}$  为电缆 1、2... $N$  的镜像中心至电缆  $k$  中心的距离。(不含  $\frac{s'_{KK}}{s_{KK}}$ )

对于敷设在水中, 如海底、江河的电缆, 由于水的对流和热容大, 其周围媒质热阻可取为零。但在实际敷设时, 均敷设于水底的泥土中, 故可按式(6-38)计算热阻,  $\rho_{T4}$  可适当选取。

对于敷设于地下水泥槽管道中的电缆,  $T_4$  为  $T'_4, T''_4, T'''_4$  三者之和。如图 6-10 所

示。

$T'_4$  为电缆表面到管道内壁的热阻。可按下式求取

$$T'_4 = \frac{100A}{1 + (B + C\theta_m)D_e} \quad (6-44)$$

式中,  $\theta_m$  为电缆和管道间填充介质的平均温度。先用假定值, 如  $50^\circ\text{C}$ , 如果需要而后用校正正值反复进行计算;  $D_e$  为电缆外径;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为与电缆有关的常数, 其值列于表 6-4 中。

表 6-4 常数 A, B, C 的值

敷 设 条 件	A	B	C	敷 设 条 件	A	B	C
在金属管道中	5.2	1.4	0.011	钢管中的压气电缆	0.95	0.46	0.0021
在空气中的纤维管道中	5.2	0.83	0.006	钢管中的充油电缆	0.26	0.0	0.0026
在水泥中的纤维管道中	5.2	0.91	0.010	塑料管道	在 考 虑 中		
在空气中的石棉水泥管道中	5.2	1.2	0.006	陶土管道	1.87	0.28	0.0036
在水泥中的石棉水泥管道中	5.2	1.1	0.011				

$T''_4$  为管道本身热阻。可近似认为管道内外表面均为等温面, 可按圆柱形公式计算

$$T''_4 = \frac{\rho''_{T4}}{2\pi} \ln \frac{D_0}{D_d} \quad (6-45)$$

式中,  $\rho''_{T4}$  为管道材料的热阻系数;  $D_0$  为管道外径;  $D_d$  为管道内径;

$T'''_4$  为管道外部热阻。

首先假设管道周围媒质全部为水泥, 故可按式 (6-43) 计算, 只不过热阻系数为水泥热阻系数  $\rho_c$ 。故

$$T'''_4 = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left[ \frac{4L}{D_0} \cdot F \right] \quad (6-46)$$

式中,  $F$  为热邻近效应因数,  $F = \frac{d'_{21}d'_{31}d'_{41}d'_{51}}{d_{21}d_{31}d_{41}d_{51}}$ 。  $d'_{21}$ ,  $d'_{31}$ ,  $d'_{41}$ ,  $d'_{51}$  和  $d_{21}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{41}$ ,  $d_{51}$  分别为第一根电缆到第 2、3、4、5 根电缆的虚象和实际的距离。

但实际上, 周围媒质为水泥槽和土地, 故应从式 (6-46) 中减去水泥槽外的假设水泥部分, 加上实为土地的部分。

为此可把长方形的水泥槽等效成圆形槽, 其等效半径  $r_b$  可根据经验公式求出, 如式 (6-47)

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad (6-47)$$

式中,  $x$ ,  $y$  分别为水泥槽端面短边和长边的长度, 不考虑其位置。

若水泥槽有  $n$  根管道, 水泥槽中心到地面的距离, 则假设槽外水泥的热阻为

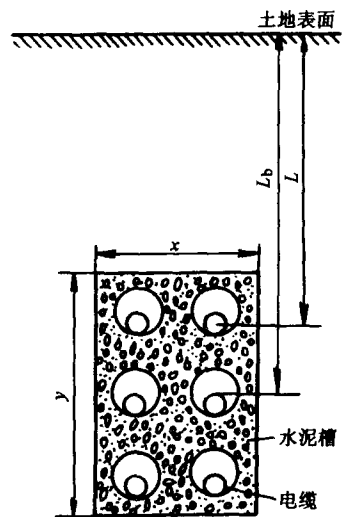


图 6-10 敷设在土地水泥槽中电缆示意

$$\frac{n\rho_c}{2\pi} \ln \left[ \frac{L_b}{r_b} + \sqrt{\frac{L_b^2}{r_b^2} - 1} \right] \quad (6-48)$$

而实际槽外为土地的热阻

$$\frac{n\rho_e}{2\pi} \ln \left[ \frac{L_b}{r_b} + \sqrt{\frac{L_b^2}{r_b^2} - 1} \right] \quad (6-49)$$

故  $T_4''$  应为

$$T_4'' = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left( \frac{4L}{D_e} F \right) - \frac{n(\rho_c - \rho_e)}{2\pi} \ln \left[ \frac{L_b}{r_b} + \sqrt{\frac{L_b^2}{r_b^2} - 1} \right] \quad (6-50)$$

式中,  $\rho_e$  为土地的热阻系数。

## 二、敷设在空气中的热阻

电缆周围媒质的热阻, 不仅和媒质有关, 而且还取决于热的传输方式。传热过程大约有三种形式, 即传导过程, 辐射换热和对流换热。

传导过程是传热媒质 (主要为固体) 没有相对运动, 热量从高温区转移到低温区。电缆内部和地下敷设中的散热均为传导过程。

对流换热是指由于流体微团改变空间位置所引起的流体和固体表面的热量传递。

辐射换热是指温度不同的两个 (或两个以上) 物体间相互进行的热的辐射和吸收所形成的换热过程。习惯上, 仅将与温度有关的辐射称为热辐射。它的能量是由热能变来的, 并且被物体吸收后又重新变成热能。当物体温度大于绝对温度  $0^\circ\text{K}$  时, 就可向空间放射各种波长的电磁波。波长在  $0.1 \sim 40\mu\text{m}$  范围内的射线称为热射线。热射线投射到物体上能够被物体吸收变成热能, 这种传播过程就称为热辐射。

太阳供给地球的大量能量就是靠辐射方式传递的。电缆敷设在空气中, 从表面向空气中散发热量也是以热辐射形式散热的。

辐射作用散发热量不仅与媒质有关, 而且与散热体表面温度和表面情况有关。黑色表面散热体较容易散热, 白色表面散热体散热较难。根据实验, 从单位长度电缆表面散发到周围媒质 (空气) 中的热流可用下式计算

$$W = \pi \left( \frac{D_e}{100} \right) h (\Delta\theta_s)^{5/4} \quad (6-51)$$

式中,  $h$  为散热系数, 单位为  $\text{W}/[\text{m}^2 (\text{C})^{5/4}]$ , 其数值与电缆表面情况和电缆外径大小有关。图 6-11 绘出了电缆表面两种极端情况 (光亮和黑色表面) 下的  $h$  值。对于有外披层的电缆可以认为是黑色表面, 对于有热塑性材料护套或裸护套的电缆可取光亮表面和黑色表面之平均值;  $D_e$  为电缆外径;  $\Delta\theta_s$  为电缆表面高于周围媒质的温度。

据式 (6-51) 可得敷设在空气中的电缆等效周围媒质热阻

$$T_4 = \frac{\Delta\theta_s}{W} = \frac{100}{\pi D_e h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (6-52)$$

因电缆表面温度不易确定, 所以式中  $\Delta\theta_s$  难求出。为此, 可利用下列关系和图表确定  $\Delta\theta_s$ 。

单位长度电缆发出的热量为线芯损耗 ( $nW_c$ )、介质损耗 ( $nW_i$ )、金属屏蔽层损耗 ( $n\lambda_1 W_c$ )、铠装层损耗 ( $n\lambda_2 W_c$ ) 之和, 应等于从电缆表面每单位时间散发到空气中的热

量，即

$$nW_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + nW_i = \frac{\pi D_e h}{100} (\Delta\theta_s)^{5/4} \quad (6-53)$$

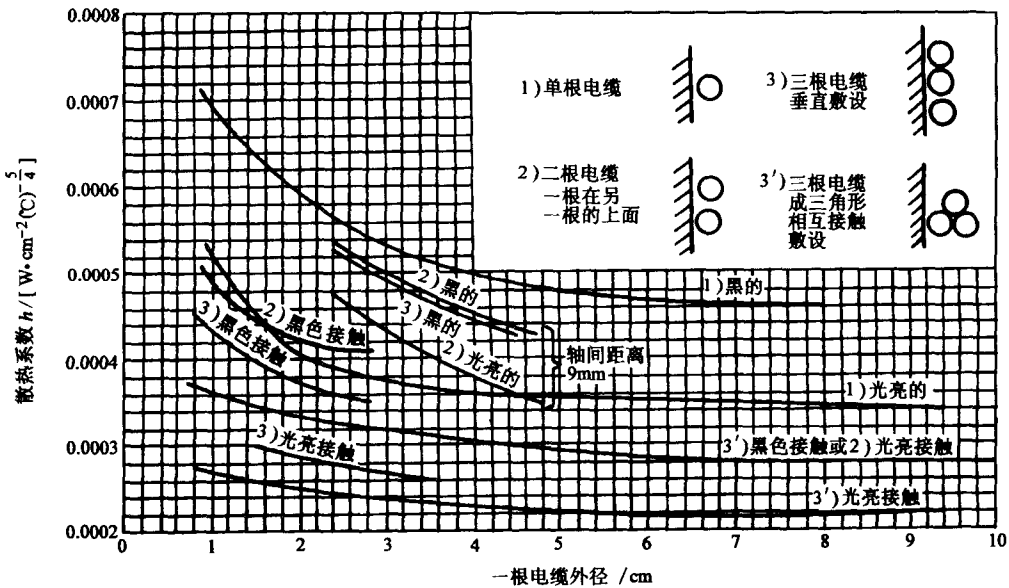


图 6-11 电缆表面散热系数与电缆外径的关系曲线

或改写为

$$\frac{\pi D_e h}{100} = \frac{nW_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + nW_i}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} \quad (6-54)$$

将式(6-54)两端乘以  $\frac{T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3}{1 + \lambda_1 + \lambda_2}$

$$\text{左边} = \frac{\pi D_e h}{100(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3] \quad (6-55)$$

$$\begin{aligned} \text{右边} &= \frac{1}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} [nW_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + nW_i] \left\{ \frac{T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right\} = \\ &= \frac{1}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} \left\{ nW_c [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3] + nW_i \left[ \frac{T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} \left\{ nW_c [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3] + nW_i \left[ \left( \frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 \right) - \left( \frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left( \frac{T_1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1 + \lambda_1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} T_2 + T_3 \right) \right] \right\} = \frac{1}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} \left\{ nW_c [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3] + \right. \\ &\quad \left. nW_i \left[ \left( \frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 \right) + \left( \frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \right\} \quad (6-56) \end{aligned}$$

设  $\theta_c$  为线芯允许最高温度， $\theta_s$  为电缆表面温度。则有电缆线芯至电缆表面的温升

$$\theta_c - \theta_s = \Delta\theta - \Delta\theta_s = nW_c [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3] + nW_i \left( \frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 \right) \quad (6-57)$$

$$\text{又令} \quad \Delta\theta_d = nW_i \left\{ \left( \frac{1}{1+\lambda_1+\lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{\lambda_2 T_2}{1+\lambda_1+\lambda_2} \right\} \quad (6-58)$$

故式(6-56)可写为

$$\frac{1}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} (\Delta\theta - \Delta\theta_s + \Delta\theta_d) \quad (6-59)$$

式中,  $\Delta\theta$  为线芯允许高于周围媒质温度。

将(6-55)和(6-59)写成等式

$$\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} = \frac{[T_1 + (1+\lambda_1)T_2 + (1+\lambda_1+\lambda_2)T_3] \pi D_e h}{100(1+\lambda_1+\lambda_2)} \quad (6-60)$$

图 6-12 即为式(6-60)在不同  $\Delta\theta + \Delta\theta_d$  情况下  $\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$  与  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$  的关系曲线。

于是计算  $T_4$  的具体步骤如下:

1) 根据电缆外径  $D_e$ , 敷设情况和电缆表面情况, 从图 6-10 中查出散热系数  $h$ 。

2) 根据式(6-60), 求得  $\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$  和  $\Delta\theta + \Delta\theta_d$  的值。

3) 根据 2) 所得结果, 从图 6-12 中查出  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 。

4) 根据以上结果及式(6-52)求得  $T_4$ 。

因  $\Delta\theta_s$  在计算中以  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$  出现, 故对  $T_4$  影响不大, 因此敷设在空气中的电缆有时也用下列简化公式计算

$$T_4 = \frac{100}{\pi D_e h'} \quad (6-61)$$

式中,  $h'$  为散热系数, 一般取  $7 \sim 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , 表面较粗糙或涂有黑色涂料的电缆取较大值, 表面光滑的电缆取较小值。

## 第五节 电缆连续允许载流量的计算

在前面的章节中, 已经介绍了导电线芯电阻, 各部分热阻等参数和各种损耗的计算方法。下面就可以根据热路方程求出载流量的计算公式。

电缆导体上所通过的电流叫做电缆的载流量, 有时也叫做电缆的负载或负荷。

电缆连续允许载流量是指电缆的负载为连续恒定电流(100%负载率)时的最大允许量。在实际工程中, 一方面是已知电缆的结构及敷设情况, 求允许的载流量; 另一方面, 也

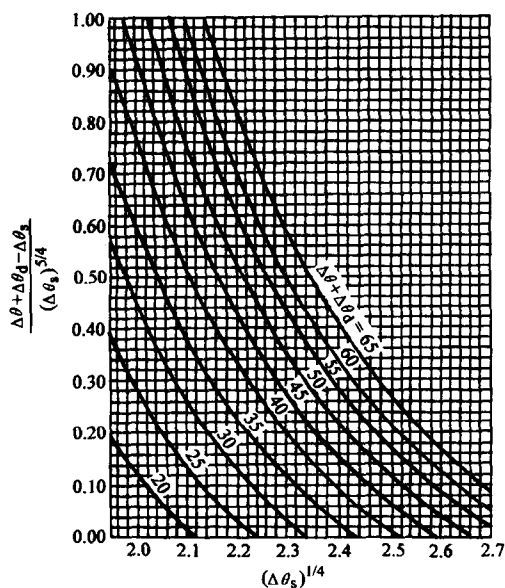


图 6-12  $\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$  与  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$  的关系曲线

可能已知需要传输的负载，求电缆导体的截面。给出的负载往往是功率形式，如视在功率，有功功率和无功功率。

本节介绍载流量的一般计算方法。可用导体高于周围媒质的稳态温升方程式求出。

以三相分相屏蔽型电缆为例，其热路图如图 6-13 所示。

热路方程为

$$\theta_c - \theta_a = (\theta_c - \theta_s) + (\theta_s - \theta_p) + (\theta_p - \theta_e) + (\theta_e - \theta_a) \quad (6-62)$$

式中， $\theta_c$  为导体允许最高温度； $\theta_a$  为周围媒质温度； $\theta_s$  为金属屏蔽处的温度； $\theta_p$  为铠装层处的温度； $\theta_e$  为电缆表面的温度； $\theta_a$  为周围媒质的温度。

各段的温升等于流过这段的热流（损耗）乘以该段的热阻。故式（6-62）可写成

$$\theta_c - \theta_a = 3 \left( W_c + \frac{1}{2} W_i \right) T_1 + 3(W_c + W_i + \lambda_1 W_c) T_2 + 3(W_c + W_i + \lambda_1 W_c + \lambda_2 W_c)(T_3 + T_4) \quad (6-63)$$

式中， $W_c$  为线芯损耗， $W_c = I^2 R_c$ ； $W_i$  为介质损耗， $W_i = U_0^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$ ； $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为金属屏蔽损耗因数和铠装层损耗因数； $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  分别为单位长度电缆绝缘层、内衬层、外披层、周围媒质热阻。于是电缆载流量计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_a) - 3W_i \left( \frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 + T_4 \right)}{3R_c [T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (6-64)$$

对于  $n$  芯电缆，将 3 换成  $n$  即可。

例 试计算下列电缆的载流量

电缆额定电压	220kV
线芯标称面积	400mm <sup>2</sup>
线芯结构	
中心油道内径	12mm
螺旋管支撑外径	13.2mm
线芯由 $\phi 2.86\text{mm} \times 72$ 铜丝组成	
线芯外径	29.3mm
线芯屏蔽厚度	0.85mm
线芯屏蔽外径	31.0mm
绝缘层厚度	20.0mm
绝缘层屏蔽厚度	0.5mm
绝缘层屏蔽外径	72.0mm
铅套标称厚度	3.5mm
铅套外径	79.0mm

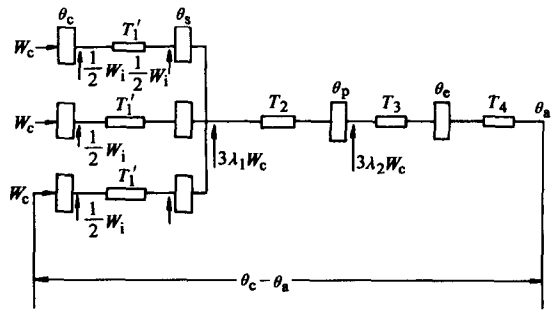


图 6-13 三相分相屏蔽型电缆等效热路图

内衬层厚度 (2×0.4mm 聚氯乙烯带)	0.8mm
铠装厚度 (2×0.2mm 铅锰青铜带)	0.4mm
外被层厚度	2.5mm
电缆外径	86.4mm
电缆敷设于土地中, 敷设深度	1000mm
直线敷设电缆, 中心轴间距离	220mm

护套铠装两端相接后接地, 电缆相互影响可忽略不计。

电缆允许最高工作温度	75°C
电缆绝缘层 $\text{tg}\delta$	0.003
电缆绝缘层 $\epsilon_r$	3.5

解

$$R = 0.47 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$C = 0.239 \times 10^{-9} \text{F}/\text{m}$$

(1) 介质损耗

$$W_i = \omega C U_0^2 \text{tg}\delta = 2\pi \times 50 \times 0.239 \times 10^{-9} \times \left( \frac{220}{\sqrt{3}} \times 1000 \right)^2 \times 0.003 \text{W}/\text{m} = 3.63 \text{W}/\text{m}$$

(2) 护层损耗

护套与铠装并联, 因此可近似地将护套与铠装合并计算其电气参数及其损耗。

$$X_m = 2\omega(\ln 2) \times 10^{-7} = 0.435 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$X_s = 2\omega \left( \ln \frac{2S}{D'_s} \right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$$

$$D'_s = \sqrt{\frac{D_{s1}^2 + D_{s2}^2}{2}}$$

$$D_{s1} = \text{护套平均直径} = (72 + 3.5) \text{mm} = 75.5 \text{mm}$$

$$D_{s2} = \text{铠装平均直径} = (79 + 2 \times 0.8 + 0.4) \text{mm} = 81 \text{mm}$$

$$D'_s = \sqrt{\frac{75.5^2 + 81^2}{2}} \text{mm} = 78.4 \text{mm}$$

$$X_s = 2 \times 2\pi \times 50 \left( \ln \frac{2 \times 220}{78.4} \right) \times 10^{-7} \Omega/\text{m} = 1.085 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$R_s = \frac{R_{s1} \times R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}}$$

$$R_{s1} = \text{护套电阻} = 2.78 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$R_{s2} = \text{铠装电阻} = \frac{\rho_{s2}}{A_{s2}} [1 + \alpha_{s2}(40 - 20)]$$

$$\rho_{s2} = 3.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\alpha_{s2} = 0.0031 / ^\circ\text{C}$$

$$A_{s2} = \pi D_{s2} \Delta_{s2} = \pi \times 81 \times 0.04 \text{cm}^2 = 1.02 \text{cm}^2$$

$$R_{s2} = \frac{3.5 \times 10^{-8}}{1.02 \times 10^{-4}} [1 + 0.003 \times 20] \Omega/\text{m} = 3.64 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$R_s = \frac{2.78 \times 3.64}{2.78 + 3.64} \times 10^{-4} \Omega/\text{m} = 1.58 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$



求护层损耗最大一相的护层损耗

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

$$P = X_s + X_m = (1.085 + 0.435) \times 10^{-4} \Omega/\text{m} = 1.52 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$Q = X_s - \frac{1}{3}X_m = \left(1.085 - \frac{1}{3} \times 0.435\right) \times 10^{-4} \Omega/\text{m} = 0.94 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

$$\lambda'_1 = \frac{1.58}{0.47} \left[ \frac{\frac{3}{4} \times 1.52^2}{1.58^2 + 1.52^2} + \frac{\frac{1}{4} \times 0.94^2}{1.58^2 + 0.94^2} + \frac{2 \times 1.58 \times 1.52 \times 0.94 \times 0.435}{\sqrt{3}(1.58^2 + 1.52^2)(1.58^2 + 0.94^2)} \right] = 1.665$$

$$\lambda''_1 = 0$$

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 = 1.665$$

$$\lambda_2 = 0$$

(3) 计算各部分热阻(每米长度)

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \frac{D_i}{D_c} = \frac{5.00}{2\pi} \ln \frac{72}{29.3} = 0.715 \text{T}\Omega$$

为了计算简单, 近似地认为护层损耗集中于护套, 而取  $\rho_{T2} = 6.00 \text{T}\Omega \cdot \text{m}$ 。

$$\begin{aligned} T_2 + T_3 &= \frac{6.00}{2\pi} \ln \frac{D_{s1} + \Delta_{s2} + 2(\Delta_{s1} + \Delta_{s2})}{D_{s1} + \Delta_{s2}} \\ &= \frac{6.00}{2\pi} \ln \frac{79 + 0.4 + 2(0.8 + 2.5)}{79 + 0.4} = 0.0772 \text{T}\Omega \end{aligned}$$

$$T_4 = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_c} = \frac{1.20}{2\pi} \ln \frac{4 \times 1000}{86.4} = 0.731 \text{T}\Omega$$

(4) 载流量

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_a) - W_i \left( \frac{1}{2} T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \right)}{R [T_1 + (1 + \lambda_1)(T_2 + T_3 + T_4)]}} \\ &= \sqrt{\frac{(75 - 25) - 3.63 \times \left( \frac{1}{2} \times 0.715 + 0.0772 + 0.731 \right)}{0.47 \times 10^{-4} [0.715 + (1 + 1.665)(0.0772 + 0.731)]}} \text{A} = 576 \text{A} \end{aligned}$$

$$\text{传输容量} = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 220 \times 1000 \times 576 \text{kV} \cdot \text{A} = 22 \times 10^4 \text{kV} \cdot \text{A}$$

## 第六节 载流量的影响因素分析和提高传输容量的方法

电缆的结构尺寸, 各部分材料的性能及敷设条件等因素均会影响电缆的载流量。为此对其影响因素进行分析, 确定影响因素和载流量的关系, 找出提高传输容量的方法, 以正确地设计和使用电缆。

为了分析方便, 以一单芯电缆为例, 并且仅分析线芯至金属屏蔽层部分, 其热路方程为

$$\Delta\theta = W_c T_1 + \frac{1}{2} W_i T_1 \quad (6-65)$$

$$\text{或} \quad W_c = \frac{\Delta\theta}{T_1} - \frac{1}{2} W_i \quad (6-66)$$

而  $W_c = \frac{\rho_c I^2}{\pi r_c^2}$ ;  $W_i = U^2 \omega \left[ \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R}{r_c}} \right] \text{tg}\delta$ ;  $T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_c}$ ;  $\ln \frac{R}{r_c} = \frac{U_0}{r_c E_{\max}}$ 。将它们均代入(6-66)式得

$$I = \sqrt{\frac{2\pi^2 r_c^3 E_{\max}}{\rho_c} \left[ \frac{\Delta\theta}{\rho_{T1} U_0} - \frac{1}{2} \omega\epsilon_0\epsilon U_0 \text{tg}\delta \right]} \quad (6-67)$$

或传输功率

$$P = U_0 I = \sqrt{\frac{2\pi^2 r_c^2 E_{\max} U_0}{\rho_c} \left[ \frac{\Delta\theta}{\rho_{T1}} - \frac{1}{2} \omega\epsilon_0\epsilon U_0^2 \text{tg}\delta \right]} \quad (6-68)$$

据式(6-68)可将影响因素分析归纳如下:

### 一、损耗的影响

#### 1. 导电线芯损耗的影响

从式(6-68)中可知,线芯损耗是由导电线芯半径  $r_c$  和导体的电导率  $\rho_c$  来体现的。为了提高传输容量,必须减少导体的杂质,提高纯度,采用高电导率的材料。

另一方面,亦可增大线芯截面。但随线芯截面的增大,电缆的体积也会增大。成本增加,弯曲困难,生产和敷设均增加了难度。而且趋表效应也会增大。为此,对截面在 800、1000mm<sup>2</sup> 的导体应采用分裂导体的方法克服趋表效应造成的电阻增大。一般电流应在 2.5A/mm<sup>2</sup> 的经济电流密度范围为宜。

#### 2. 介质损耗的影响

对于 10kV 级以下的低压系统,介质损耗占的比重较小,可忽略不计。但随电压等级的提高,介质损耗  $W_i = U_0^2 \omega C \text{tg}\delta$  因有电压平方的关系,故其影响会随电压的增加而增大,即便  $\text{tg}\delta$  较小的变化也会引起介质损耗较大的变化。因此高压和超高压电力电缆必须严格限制  $\text{tg}\delta$ 。

对此,图 6-14 较清楚地表达了传输功率与电压和  $\text{tg}\delta$  的关系。

如图 6-14,横坐标为电压,纵坐标为相对传输功率,即以  $\text{tg}\delta=0$  时的功率为基值的百分比。图中的曲线是不同的  $\text{tg}\delta$  时的相对传输功率。就每一具体曲线来看,随电压的变化,曲线都会有一极大值。

$$\text{令} \quad \frac{\partial P}{\partial U_0} = 0$$

极大值所对应的电压为

$$U_0 = \sqrt{\frac{2\Delta\theta}{3\rho_{T1} \omega\epsilon_0\epsilon \text{tg}\delta}} \quad (6-69)$$

当电压  $U < U_0$  时,因电压较低,介质损耗影响较小,随电压升高,功率亦会提高;但当  $U > U_0$  时,随电压的增

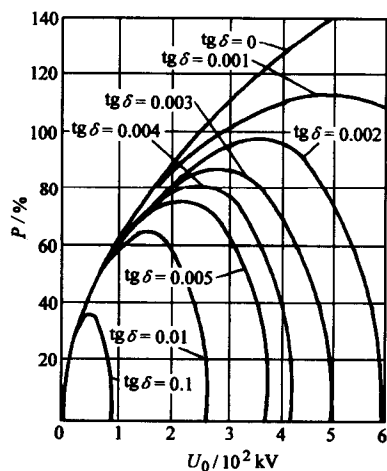


图 6-14

加曲线下降,这是由于电压较高时,介质损耗的影响随电压的增加而增压,功率会随之减少。

当  $\frac{\Delta\theta}{\rho_{T1}} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon U_0^2$  时传输功率为零。此时其相应的电压

$$U'_0 = \sqrt{\frac{2\Delta\theta}{\rho_{T1} \omega \epsilon_0 \epsilon \text{tg}\delta}} \quad (6-70)$$

其相应的  $\text{tg}\delta$  称为临界的损耗因数

$$\text{tg}\delta_0 = \frac{2\Delta\theta}{\rho_{T1} \omega \epsilon_0 \epsilon U_0^2} = \frac{\Delta\theta}{U_0^2 \omega C \left(\frac{1}{2} T_1\right)} \quad (6-71)$$

显然,若考虑全部的热阻,临界介质损耗因数可写为

$$\text{tg}\delta_0 = \frac{\Delta\theta}{U_0^2 \omega C \left(\frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 + T_4\right)} \quad (6-72)$$

式(6-71)和式(6-72)表达的物理意义是由于介质损耗产生的温升已等于电缆的允许温升,即处于热的临界状态,电缆中不允许通过任何数值的负载。

### 3. 金属屏蔽层损耗和铠装层损耗

对金属护套两端接地的电缆,环流损耗在传输功率中占有很大比例。为此高压电缆,金属护套应采取换位连接。沿电缆线路须敷设回流线。为了减少铠装损耗,单芯电缆不能用钢带铠装等,这些,前面已做了详细介绍。

## 二、热阻的影响

显然,热阻大、散热困难,必然会影响传输功率。当电缆的结构和材料一定时,减少本体的热阻较困难,有效的方法是降低周围媒质的热阻。其主要途径是强迫冷却。强迫冷却又分为内部冷却和外部冷却。

内部冷却是指冷却媒质经位于电缆中心的管道实现的强迫冷却。如充油电缆,其中心油道亦为冷却媒质通道,电缆油为冷却媒质,通过油的循环实现冷却。交联聚乙烯绝缘电缆则通过中心水冷却系统实现冷却。但必须有严密的防水措施,以防水对绝缘造成损害。

外部冷却系统主要有两种形式:一种是冷却媒质在埋于地下的金属或塑料管中循环;另一种是对敷设在坑道中的电缆通以压缩冷空气实现冷却。实现强迫冷却的电缆传输容量几乎可以提高2倍。

## 三、电容电流的影响

电缆本身就是一个长大的电容器,除了固有的直流漏导以外,还有交流下的电容电流。据电工原理,电力系统中,发送端和负载端电流电压的关系为

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_0} \text{sh}\Gamma l + I_2 \text{ch}\Gamma l \quad (6-73)$$

式中,  $I_1$  为发送端电流;  $I_2$ 、 $U_2$  为负载端的电流、电压;  $\Gamma$  为传播常数,  $\Gamma = \sqrt{yz}$ ;  $Z_0$  为电缆波阻抗,  $Z_0 = \sqrt{z/y}$ ;  $y$ 、 $z$  分别为单位长度电缆的导纳和阻抗,  $y = g + j\omega C$ ,  $z = r + j\omega L$ ;  $r$ 、 $L$ 、 $g$ 、 $C$  分别为单位长度电缆的电阻、电感、绝缘漏导和电容;  $l$  为电缆长度。

一般电缆的  $\Gamma l$  很小, 故  $\text{sh} \Gamma l \approx \Gamma l$ ,  $\text{ch} \Gamma l \approx 1$ 。同时  $r \gg \omega L$ ,  $g \ll \omega C$  故有

$$\frac{\dot{U}_2}{Z_0} \text{sh} \Gamma l = \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{\frac{r+j\omega L}{g+j\omega C}}} \text{sh} \sqrt{(r+j\omega L)(g+j\omega C)} l \approx \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{\frac{r}{j\omega C}}} \sqrt{j\omega C r} l = j\omega C l \dot{U}_2 = j i_c l = j I_c$$

(6-74)

故式 (6-73) 可写成

$$I_1 = I_2 + j I_c$$

(6-75)

也就是说, 从发送端发出的电流, 一部分为负载电流, 一部分为电容电流。当电容电流增大时, 会严重地影响负载电流。极限情况, 设  $I_T$  为额定电流, 当  $I_c = I_T$  时, 则

$$l_0 = \frac{I_T}{\omega C U_0}$$

(6-76)

称为电容电流的临界长度。电缆的长度越长, 电容电流越大。当长度超过临界长度时, 可在线路上并联电抗器以补偿电容电流。但此时, 负载电流的少许变化均会引起电缆超载过热而处于不稳定运行状态。所以跨江、跨海长距离输电, 一般不能用交流电缆而使用直流电缆。

另外在选择绝缘材料时, 应选择介电系数较小的材料以减少电容电流。为了提高传输容量绝缘材料更应严格限制  $\text{tg} \delta$ , 选择具有较高击穿强度和较高耐温等级的材料。

## 第七章 电缆允许短期过载和短路电流的计算

电力电缆在实际运行中，除了要通过连续额定的载流量以外，还须承受短时过载和短路电流。如一相电缆发生故障，在其修复期间，其他两健全相就必须在短期内（如 10h）承担较大的负载；又如由于短路接地故障，电缆在极短时间（1~2s）内也要承受短路电流的作用。

用严格的数学分析方法对它们计算将十分困难。根据实际工程情况，可采用集中参数代替分布参数的方法进行确定，其结果和实际基本吻合。

### 第一节 短期过载电流的计算

过载问题，一般是已知允许的过载时间，确定过载电流的大小；或已知过载电流求过载时间。

过载，即超过额定值的一定范围或数值。电缆在运行中如果经常满载，而且导体温度已经达到最高允许温度，那么过载就会造成过热，根据电缆在任何时间内的温度不得超过最高允许温度这一原则，造成过热的过载是不允许的。但一般在输配电的实际情况下，电缆在 24h 周期内，往往只有几个小时是满载运行，其余时间则低于最大允许载流量。况且导体的温度升高是经过逐渐的热平衡过程才达到稳定。因此，在达到最大允许值的一段范围内，温度和时间都有一定的裕度，允许电缆有一定的过载。实践证明，在短时过载时间为数小时范围内，过载温度可比长期允许温度高 10~15℃ 左右而对电缆寿命及性能没有明显影响。若过载时间越短，允许过载温度还可更高些。表 7-1 为短时过载温度推荐值。

表 7-1 允许短时过载温度的推荐值

电缆类型	允许短时过载温度/℃	过载时间
纸电缆 ≤ 1kV	160	10min 以下
橡皮电缆	120	10min 以下
聚氯乙烯电缆	120	10min 以下
交联聚乙烯	110	大于 10min 至 2h
电缆	150	10min 以下

过载，是随时间变化的，其热场为暂态热场。为了分析方便，首先从敷设于空气中的裸电线这一最简单的情况入手。

#### 一、裸电线的暂态响应

设单位时间内、单位长度裸导体产生的热流为  $W$ ，则在微单元时间  $dt$  内产生的热量为  $Wdt$ 。产生的热流又可分为两部分：一部分为  $W'$ ，散入周围媒质空气中。另一部分为  $W''$ ，作为导体自身温度升高所吸收的热量。其中

$$W' = hA(\theta - \theta_a)dt \quad (7-1)$$

式中,  $h$  为散热系数, 单位为  $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$  或  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $A$  为散热面积;  $\theta$ 、 $\theta_a$  分别为导体和周围媒质温度。

$$W'' = Q_T d\theta \quad (7-2)$$

式中,  $Q_T$  为单位长度电缆的热容, 称为热容系数, 单位为  $\text{J}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3$ 。表 7-2 为电缆常用材料的热容系数。

表 7-2 电缆几种常用材料的热容系数和膨胀系数

材料名称	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热容系数 / ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	体积膨胀系数 / $^\circ\text{C}^{-1}$
铜	$8.9 \times 10^3$	$3.5 \times 10^6$	$5 \times 10^{-5}$
铝	$2.7 \times 10^3$	$2.48 \times 10^6$	$7 \times 10^{-5}$
油	$0.85 \times 10^3$	$1.70 \times 10^6$	$75 \times 10^{-5}$
电缆纸	$0.8 \times 10^3$	$0.90 \times 10^6$	$10 \times 10^{-5}$
油浸纸	$(1.1 \sim 1.3) \times 10^3$	$(1.70 \sim 1.90) \times 10^6$	$42.5 \times 10^{-5}$
铅	$11.34 \times 10^3$	$1.50 \times 10^6$	$8.5 \times 10^{-5}$
钢	$7.8 \times 10^3$	$3.6 \times 10^6$	$3.6 \times 10^{-5}$
聚乙烯	$(0.91 \sim 0.97) \times 10^3$	$(1.20 \sim 1.30) \times 10^6$	—
聚氯乙烯	$(1.3 \sim 1.5) \times 10^3$	$(1.50 \sim 1.90) \times 10^6$	—
橡皮	$(1.2 \sim 1.8) \times 10^3$	$(1.90 \sim 2.00) \times 10^6$	—
沥青	$1.0 \times 10^3$	$1.67 \times 10^6$	—
电缆麻	$0.5 \times 10^3$	$0.67 \times 10^6$	—
土地	$(1.4 \sim 2.2) \times 10^3$	$(1.14 \sim 4.30) \times 10^{60}$	—
水泥	$2.2 \times 10^3$	$1.84 \times 10^6$	—

① 土地热容系数一般取  $2.52 \times 10^6 \text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

据上述分配原则

$$\begin{aligned} W dt &= W' + W'' \\ &= hA(\theta - \theta_a) dt + Q_T d\theta \end{aligned} \quad (7-3)$$

示意热路图如图 7-1。

由式 (7-3) 可得

$$\begin{aligned} dt &= \frac{Q_T d(\theta - \theta_a)}{W - hA(\theta - \theta_a)} \\ &= \frac{d[W - hA(\theta - \theta_a)] - Q_T}{W - hA(\theta - \theta_a)} \frac{1}{hA} \end{aligned} \quad (7-4)$$

对式 (7-4) 两边积分得

$$t = \frac{-Q_T}{hA} \ln[W - hA(\theta - \theta_a)] + C \quad (7-5)$$

$C$  为积分常数, 利用初始条件求取。当  $t=0$  时,  $\theta=\theta_a$  代入式 (7-5) 得

$$C = \frac{Q_T}{hA} \ln W \quad (7-6)$$

于是式 (7-5) 为

$$t = \frac{-Q_T}{hA} \ln[W - hA(\theta - \theta_a)] + \frac{Q_T}{hA} \ln W =$$

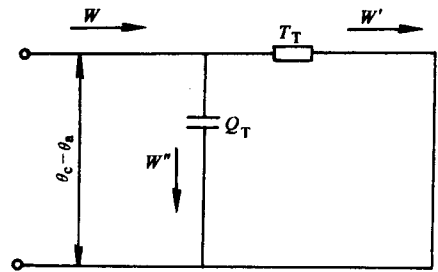


图 7-1 电缆暂态发热近似等效热路

$$\frac{Q_T}{hA} \ln \frac{\frac{W}{hA}}{\frac{W}{hA} - (\theta - \theta_a)} \quad (7-7)$$

式中,  $\frac{1}{hA}$  的单位为  $\frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}} = \frac{\text{C}}{\text{W}}$ , 具有热阻的量纲, 故  $\frac{1}{hA}$  可视为热阻; 而  $\frac{W}{hA}$  为热流和热阻之积, 可视为稳态温升  $\Delta\theta_m$ ;  $\frac{Q_T}{hA}$  为热容、热阻之积, 具有时间的量纲, 称为时间常数, 记为  $\tau$ 。于是式 (7-7) 可写成

$$t = \tau \ln \frac{\Delta\theta_m}{\Delta\theta_m - (\theta - \theta_a)} \quad (7-8)$$

也可写成

$$\theta - \theta_a = \Delta\theta_m (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7-9)$$

若电缆 (裸导体) 在运行状态下发生变载, 变载前的负载可视为“预加负载”, 其相应温度为  $\theta_1$ , 用同样的方法可得其暂态响应

$$\theta - \theta_a = \Delta\theta_m (1 - e^{-t/\tau}) + (\theta_1 - \theta_a) e^{-t/\tau} \quad (7-10)$$

式中,  $(\theta_1 - \theta_a) e^{-t/\tau}$  部分实为冷却方程, 式 (7-10) 可看成发热方程和冷却方程的叠加, 其曲线如图 7-2。

$\tau$  为时间常数, 参见图 7-2 可知其物理意义:

(1) 据式 (7-9), 当  $t = \tau$  时  $\theta - \theta_a = 0.632\Delta\theta_m$ , 即  $\tau$  为当温度上升达到稳态温升 63.2% 时所需要的时间。

(2) 对式 (7-9) 两边微分, 则  $\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\Delta\theta_m}{\tau}$ , 即  $t=0$  时温度的变化率的大小。当  $t = \tau$

时,  $\Delta\theta = \Delta\theta_m$ , 即温度从  $t=0$  时的变化率改变, 达到稳态温升所用的时间。

## 二、过载电流的确定

根据暂态响应, 可导出过载电流的计算公式。

### 1. 架空敷设电缆的暂态响应

(1) 大截面、薄绝缘的低压电缆 其等值热路仍可用图 7-1 的单支路网络表示。根据经验, 可用等效热容来代替各部分热容之和, 即以导电线芯的热容加上其他部分热容之和的一半做为等效热容; 电缆各部分的热阻与电缆周围媒质热阻之和为等效热阻。

对于低压电缆, 介质损耗可忽略不计, 温升仅与负载电流的平方成正比, 故可据式 (7-9) 得初载为零时的电流方程

$$I_N^2 = I_p^2 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7-11)$$

式中,  $I_N$  为长期允许的负载电流;  $I_p$  为过载电流;  $\tau$  为时间常数。

$$\tau = Q_T T_T \quad (7-12)$$

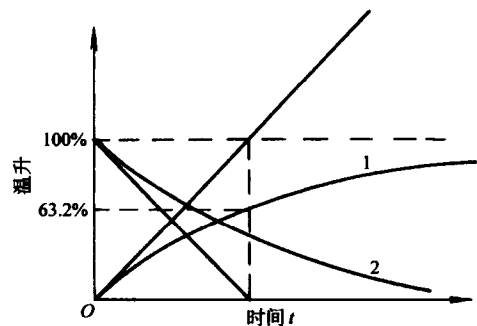


图 7-2 裸电线发热、冷却曲线  
1—发热曲线 2—冷却曲线

式中,  $Q_T$  为等效热容,  $Q_T = Q_c + \frac{1}{2} (Q_i + Q_s + \dots)$ ,  $Q_c$  为导电线芯热容;  $Q_i, Q_s \dots$  为绝缘层、金属屏蔽层等电缆各部分热容;  $T_T$  为等效热阻,  $T_T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$ 。则

$$I_p = I_N \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t/\tau}}} \quad (7-13)$$

如电缆变载前初始负载不为零, 即线芯温度不等于周围媒质温度  $\theta_a$  而为  $\theta_1$ , 则相应于初始负载为  $I_1$ , 则据式 (7-10) 有

$$I_N^2 = I_p^2 (1 - e^{-t/\tau}) + I_1^2 e^{-t/\tau} \quad (7-14)$$

于是电缆允许在  $t$  时间通过的电流

$$I_p = I_N \sqrt{\frac{1 - x^2 e^{-t/\tau}}{1 - e^{-t/\tau}}} \quad (7-15)$$

式中,  $x = \frac{I_1}{I_N}$  为电缆预加负载系数。

额定电流  $I_N$  亦可根据允许短时过载温度确定, 从而求出过载电流。

如果过载前电缆已在长期允许负载下工作, 达到了长期允许温度  $\theta_m$ , 电缆敷设于空气中, 则短时过载电流允许倍数可按式计算

$$\frac{I_p}{I_N} = \sqrt{\frac{R}{R_p} \left( 1 + \frac{\theta_p - \theta_m}{\theta_m - \theta_a} \frac{1}{1 - e^{-t/\tau}} \right)} \quad (7-16)$$

式中,  $I_N$  为允许连续载流量;  $I_p$  为允许短时过载电流;  $R$  为允许长期负载温度时的导体电阻;  $R_p$  为允许短时过载温度时的导体电阻;  $\theta_p$  为允许短时过载温度;  $\theta_m$  为允许长期工作温度;  $\theta_a$  为周围媒质温度;  $t$  为过载电流时间;  $\tau$  为时间常数。

(2) 对于高压电缆, 可采用两支路或多支路网络近似计算。

如采用两支路网络, 首先将绝缘层的热容分为两部分: 一部分集中在线芯, 另一部分集中在金属屏蔽层。集中在线芯部分的热容和线芯热容组成等效热容  $Q_1$ ; 集中在金属屏蔽层处的绝缘层热容和金属屏蔽层热容及电缆其他组成部分的热容组成等效热容  $Q_2$ 。则整个电缆的等效热容  $Q_T$  为

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (7-17)$$

式中,  $Q_1 = Q_c + pQ_i$ ;

$$Q_2 = (1-p) Q_i + Q_s + \dots$$

$p$  为一百分数, 可如下求出:

我们知道, 绝缘层中的温度可用稳态分布公式计算, 如距电缆中心  $r$  处点的温度  $\theta$

$$\theta = \theta_c - W_c \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_c} \quad (7-18)$$

又绝缘层吸收的热量按分布参数计算时有

$$\int_{r_c}^R \theta q_i dV = q_i \int_{r_c}^R (\theta_c - W_c \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_c}) 2\pi r dr \quad (7-19)$$

据  $p$  的分配原则有

$$q_i \int_{r_c}^R (\theta_c - W_c \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_c}) 2\pi r dr = pQ_i \theta_c + (1-p) Q_i \theta_s \quad (7-20a)$$



式中,  $q_i$  为绝缘层的热容系数;  $\theta_c$ 、 $\theta_s$  分别为线芯和金属屏蔽层的温度。

解之得

$$p = \frac{1}{2 \ln \frac{R}{r_c}} - \frac{1}{\left(\frac{R}{r_c}\right)^2 - 1} \quad (7-20b)$$

而等效热阻  $T_T$  为所有热阻之和。

$$T_T = \sum T \quad (7-21)$$

然后可按 (1) 部分中的方法和公式求解过载。其等值热网图如图 7-3。

### 2. 地下敷设电缆的暂态响应

对于架空敷设, 由于空气散热的特殊性, 可近似认为周围媒质空气的温度不变, 所以空气的热容未计及。但电缆敷设于地下, 周围土地的温度必然升高, 土地的热容必须考虑。我们在稳态计算土地热阻时, 是认为热流经土地全部流向大地表面, 故热容的理论值比实际要大的多, 致使时间常数偏大, 故按单一指数曲线所得温升变化速度比实际要慢。为了准确计算地下敷设电缆的暂态响应, 可据惠司门法, 将电缆和周围媒质分成六个区域分区计算。实践表明, 计算所得结果, 与较缓慢变化负载电缆温升基本吻合。

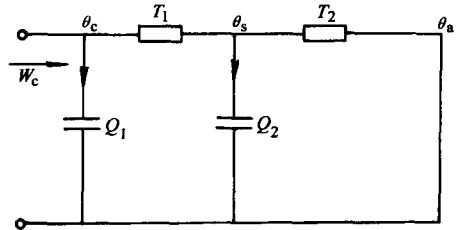


图 7-3 敷设在空气中电缆集中参数等效热路图

为了简便和安全, 可不考虑冷却曲线。如第  $i$  区的暂态响应为

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_{mi}(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (7-22)$$

式中,  $\Delta\theta_{mi}$  为第  $i$  区的稳态温升, 应等于流经该区的热流乘以该区的热阻;  $\tau_i$  为该区的时间常数, 应为该区的热容和该区的热阻之积。

那么, 整个电缆的暂态响应为

$$\theta_c - \theta_a = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \quad (7-23)$$

具体区域的划分为电缆本体分为两个区, 见表 7-3, 土地分为四个区。

表 7-3 电缆本体分为两区的热阻热容计算

电缆型式	区域	组成部分	热阻 $T$	热容 $Q$
单芯电缆	I	导体, 一部分绝缘层	$T_I = \frac{1}{2} T_1$	$Q_I = Q_c + \frac{1}{2} Q_i$
	II	另一部分绝缘层, 金属屏蔽层, 护层	$T_{II} = \frac{1}{2} T_1 + T_2 + T_3$	$Q_{II} = \frac{1}{2} Q_i + Q_s + Q_j$
三芯电缆	I	导体, 一部分绝缘层	$T_I = \frac{1}{6} T_1$	$Q_I = 3(Q_c + \frac{Q_i}{2})$
	II	另一部分绝缘层, 金属屏蔽层, 护层	$T_{II} = \frac{T_1}{6} + T_2 + T_3$	$Q_{II} = \frac{3}{2} Q_i + Q_s + Q_j$
分相屏蔽型电缆	I	导体, 一部分绝缘层	$T_I = \frac{1}{6} T_1$	$Q_I = 3(Q_c + \frac{Q_i}{2})$
	II	另一部分绝缘层, 金属屏蔽层, 护层	$T_{II} = \frac{1}{6} T_1 + T_2 + T_3$	$Q_{II} = 3(\frac{Q_i}{2} + Q_s) + Q_j$

注:  $T_1$  为单位长电缆每相绝缘层热阻。其他符号同前。

将周围媒质土地分成四个同心圆区域，周围媒质第一区域（即第三区域）的内径，即电缆本体外径  $D_e$ ，而周围媒质第四区域（即第六区域）的外径  $D_4 = 4L$ 。L 为敷设深度，可取 1m。令四个区域的截面积之比为 1:4:16:64，且第一个区域的面积为  $A$ ，各区截面的直径分别为  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ ，则

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_e^2) \\ 4A &= \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) \\ 16A &= \frac{\pi}{4}(D_3^2 - D_2^2) \\ 64A &= \frac{\pi}{4}(D_4^2 - D_3^2) \end{aligned} \right\} \quad (7-24)$$

解之得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4 \times 85}(D_4^2 - D_e^2) \\ D_1 &= \sqrt{\frac{4A}{\pi} + D_e^2} \\ D_2 &= \sqrt{\frac{16A}{\pi} + D_1^2} \\ D_3 &= \sqrt{\frac{64A}{\pi} + D_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (7-25)$$

据此可求出第  $i$  区的暂态响应。

一般过载时间较短，而过载电流较大，故相比之下介质损耗和金属屏蔽层等损耗仍可忽略。设过载倍数为  $n$ ，即过载电流与额定载流量之比，则可得

$$\frac{\sum T}{n^2} = \sum_{i=1}^6 T_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (7-26)$$

式中， $T$  为各部分热阻； $T_i$  为分区后第  $i$  区的热阻。

据式 (7-26) 采用试探法可求得过载倍数，或已知过载倍数求得过载时间。

## 第二节 电缆允许短路电流的计算

输电线路发生短路故障时，短路电流可达额定值的几十倍或上百倍。短路电流使线路的保护装置迅速动作，在几秒或更短的时间内使线路切断。

强大的短路电流在电缆导体通过时将产生很大的热量，使导体的温度很快升高。但电缆的温度不应超过短时允许最高工作温度。各种型式电力电缆的短时允许最高工作温度如表 6-1 所示。有锡焊连接头的电缆，一般短时允许最高工作温度不得超过 120℃。允许短路电流就是根据允许短路温升来计算的。

在计算时，由于短路时间很短，故可认为线芯损耗产生的热流全部消耗于线芯导体温度的升高，向绝缘层散发的热量忽略不计。则有

$$W dt = Q_{Tc} d\theta \quad (7-27)$$

式中  $W$  为短路电流单位时间产生的线芯损耗； $Q_{Tc}$  为单位长度线芯的热容。

据第四章第一节， $20^\circ\text{C}$  下的导体交流电阻

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{A}(1 + Y_s + Y_p) \quad (7-28)$$

故导体交流电阻

$$R = R_{20}[1 + \alpha(\theta - 20^\circ)] \quad (7-29)$$

则有

$$W = I_{sc}^2 R_{20}[1 + \alpha(\theta - 20^\circ)] \quad (7-30)$$

式中， $I_{sc}$ ——短路电流；

$\theta$ ——线芯在短路期间的温度，可取最高允许短路温度。

若  $t$  为短路时间，则

$$I_{sc}^2 R_{20}[1 + \alpha(\theta - 20^\circ)]dt = Q_{Tc}d\theta \quad (7-31)$$

将式 (7-31) 整理

$$\frac{d\theta}{1 + \alpha(\theta - 20^\circ)} = \frac{I_{sc}^2 R_{20}}{Q_{Tc}}dt \quad (7-32)$$

将式 (7-32) 两边积分，并据初始条件  $t=0$  时  $\theta=\theta_0$  得

$$I_{sc} = \left\{ \frac{Q_{Tc}}{R_{20}\alpha t} \ln \frac{1 + \alpha(\theta - 20^\circ)}{1 + \alpha(\theta_0 - 20^\circ)} \right\}^{1/2} \quad (7-33)$$

工程上往往希望问题简化一些，仅确定短路电流的稳态值即可。

设  $I_{sc}$  为短路电流， $t_s$  为短路时间（储备保护时间）。因  $I_{sc}$  为脉冲变量，为时间的函数，故  $t_s$  时间内短路电流产生的总损耗为

$$\int_0^{t_s} I_{sc}^2 R dt \quad (7-34)$$

这部分热量一部分为导电线芯所吸收，致使导体温度升高，另一部分散入绝缘层。设线芯吸收的总热量的百分比为  $\beta$ ，

则

$$\beta \int_0^{t_s} \frac{I_{sc}^2 R dt}{Q_{Tc}} + \theta_0 \leq \theta_{sc} \quad (7-35)$$

式中， $R$  为单位长电缆线芯电阻； $\theta_0$  为短路前温度； $\theta_{sc}$  为允许短路最高温度。

若  $I_{sc}$  从短路开始的最大有效值为  $I_H$ ，按直线规律下降，在  $t_s$  秒内达到短路的稳态值  $I_K$ 。故有

$$I_{sc} = I_H - \frac{I_H - I_K}{t_s} t \quad (7-36)$$

将式 (7-36) 代入式 (7-35) 积分，则有

$$\frac{\beta t_s [(I_H + I_K)^2 - I_H I_K] R}{3 Q_{Tc}} + \theta_0 \leq \theta_{sc} \quad (7-37)$$

式中， $t_s$  可取线路储备保护时间，当  $t_s \approx 2\text{s}$  时， $\beta \approx 0.82 \sim 0.93$ ； $t_s \approx 6\text{s}$  时， $\beta \approx 0.74 \sim 0.84$ ，可令  $I_H = I_K$ ，故据式 (7-37) 求得短路电流的稳态值。

## 第八章 电力电缆附件设计原理

电缆做为传输线输送电能，总归要有终端。电缆通过终端接头盒与变压器、架空线相连接。电缆的使用长度也受到制造的限制。对较长线路，须将两段或多段电缆连接起来，这就需要连接盒。对高压线路，为了减少金属护套（金属屏蔽层）的感应电动势，需用绝缘外套连接接头盒实行护套的换位连接。对充油电缆，为了便于运行和维护，供油系统要分段隔开，需采用阻止式连接接头盒。

我们把接头盒、连接盒统称“附件”。在电力运行中，约 60% 的故障来自附件。为此，掌握其设计原理，以正确地进行设计和生产，对电力系统的安全运行，是至关重要的。

### 第一节 电缆终端电场分布特点和放电形式

#### 一、电缆终端电场分布特点

任何绝缘结构设计的依据主要是电场分布特点和规律。终端结构也不例外，必须能准确地分析其电场分布，制定相应的均化电场的措施，以能正确地进行结构设计。

在电缆安装时，首先须将电缆终端处的外护套、铠装层和金属屏蔽层剥去。否则会引起线芯和金属屏蔽层间短路。即使这样延长了放电距离，但沿电缆长度方向的电场分布仍是不均匀的。如图 8-1 中，左半部分为只剥去金属屏蔽层，右半部分为将绝缘层一并剥去的电场分布图。电场分布在线芯和金属屏蔽层处比较集中，而且靠近金属屏蔽层边缘处电场强度最大。沿绝缘表面有电场的法向分量和切向分量的作用，达到一定数值后会起滑闪放电。

金属屏蔽层边缘处场强最大，主要是由于在忽略电感、电阻，而主要考虑电容作用时，其等效电容可简化为由体积电容和表面电容组成的电容链。电容电流由高电位流向低电位，这样在金属屏蔽层附近所汇集的电容电流最大。在认为沿电缆长度方向阻抗大致相同的前提下，金属屏蔽层附近的压降也就最大，因而场强最大。

又因为场强  $E = -\nabla\varphi$ ，则由于金属屏蔽层接地电位为零，因而此处电位的变化率最大，故场强最大。

另一方面，当剥开金属屏蔽后，不管是否安装终端装置，其绝缘均为两种以上的介质。这样，电场的方向斜射到介质的分界面上，在分界面上就会产生电场的弯折，电场就会产生法向和切向分量。一般介质切向方向耐电强度很低，而且在界面上又极易混有气隙和杂质，在一定条件下就会产生放电，造成绝缘的破坏。

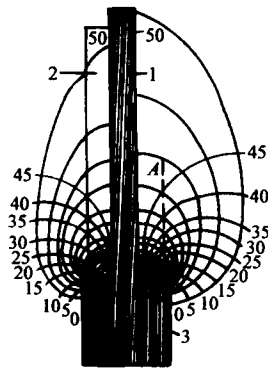


图 8-1 电缆终端电场分布  
 左边一只剥去电缆的铅套 右边一同时  
 剥去电缆的绝缘层和铅套  
 1—线芯 2—电缆绝缘层 3—铅套

## 二、电缆终端的放电形式

电缆终端处的放电，是极不均匀电场中的放电。其主要形式为：首先在金属屏蔽层附近，或法兰边缘处发生电晕放电，出现紫色的晕光及丝丝声响。随着电压的升高，电晕向前延伸，逐渐形成由许多平行火花细线组成的光带。这些细光带虽较电晕明亮，但仍较弱。放电细线的长度随电压成正比增加。放电通道中的电流密度较小、压降较大，称为辉光放电。当电压超过某临界值后，放电性质就会发生变化，个别细线开始迅速增长，进而转变为树枝状、紫色、明亮得多的火花。这些火花在法兰上的不同位置交替出现。在一处产生后，紧贴介质界面向前发展，随即很快消失，而后又在新的位置产生，这种放电称为滑闪放电。通道中电流密度较大，压降较小。滑闪放电火花随外加电压增加迅速增长，因而电压稍有增加，滑闪放电火花就可能延伸到高压极，形成完全击穿。若金属屏蔽处法兰很光滑，辉光放电可能不明显而直接出现滑闪放电。

在整个放电过程中，电晕放电和滑闪放电是主要的放电形式。

电晕放电，是不完全放电过程。电晕放电爆发时，首先在内电极周围强场区内爆发强烈的电离过程，形成大量的电子崩，放电转入自持。伴随着放电过程，间隙中出现大量的空间电荷。当内电极为正极性时，阴极远离发生电晕的极，只有在阳极附近的电子在跑向阳极途中才可能形成电子崩。游离产生的电子很快进入电极。正离子则由电晕层不断地进入外围区，向阴极移动。

当内电极为负极性时，电子由电晕层跑向外围区、形成负离子，而电晕层内的正离子，则被负电极所吸引，以很小的速度向电极移动。不管其正、负电极如何，在外围区总有和电晕电极同符号的离子，构成一定密度的空间电荷。

在交流电压作用下，电晕的空间电荷离开电极一定距离后，又将因为电压极性改变而反向向着电极移动，空间电荷的极性也将发生改变。离子的运动便形成了脉冲电流，迭加在电容电流分量上。电晕电流除了出现有效分量造成损耗外，而且出现高次谐波分量，使得通信无线电受到干扰。电晕放电还使空气发生化学反应，造成臭氧及氧化氮等产物，引起腐蚀作用。

滑闪放电的形成，主要是在放电的开始阶段，由于切向场强的作用发生碰撞电离，在细线通道内存在着大量带电质点。这些带电质点又在电场垂直分量的作用下不断撞击介质表面，引起局部温度升高。随着电压增加，沿着放电通道流过的带电质点增多，介质表面局部温度也就升得更高。在一定电压下，此处温度可高达足以引起气体热电离的数值。因此通道中带电质点数就将剧增，电阻骤降，通道头部的场强也将剧增，导致通道迅速增长，放电便转入了滑闪放电阶段。滑闪放电是以介质表面放电通道中发生了热电离为主要特征的。

## 第二节 电场分布的等效回路分析

导致沿面放电的主要原因是切向场强的作用。为此，将重点分析一下场强的切向分量。

电缆的终端，在剥去一定尺寸的外护层和金属屏蔽层后，可用电容和电阻的集中参数等效地表示。这样，可将终端简化为链形的等效回路，如图 8-2 所示。

绝缘体和绝缘外表面均可看成电阻和电容并联的等效电路。并设  $Y_V$  为单位长度电缆绝缘层的体积复导纳； $Y_S$  为单位长度电缆绝缘层的表面复导纳； $R_V$  为单位长度电缆绝缘层

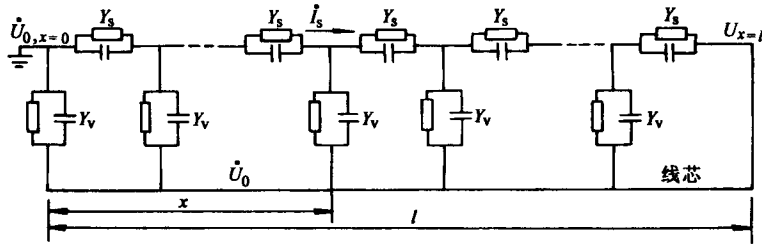


图 8-2 电缆终端的等效电路图

的体积电阻； $C_V$  为单位长度电缆绝缘层的体积电容。则有

$$R_V = \frac{\rho_V \ln \frac{R}{r_1}}{2\pi} \quad (8-1)$$

$$C_V = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R}{r_1}} \quad (8-2)$$

$$Y_V = \frac{1}{R_V} + j\omega C_V = \frac{2\pi}{\rho_V \ln \frac{R}{r_1}} + j\omega \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R}{r_1}} \quad (8-3)$$

若 
$$y_s = \left[ \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_m} + j\omega\epsilon_0\epsilon_m K \right] \quad (8-4)$$

则 
$$Y_s = y_s 2\pi R \quad (8-5)$$

式中， $r_1$  为线芯半径； $R$  为绝缘外半径； $\rho_V$  为介质体积电阻率； $\epsilon_0$  为真空介电常数； $\epsilon$  为介质的相对介电常数； $R_s$  为单位长度表面电阻； $R_m$  为单位长度周围媒质电阻； $K$  为和表面情况有关的常数。

若金属屏蔽层处的电位为零。设  $U_x$  为绝缘表面距原点（金属屏蔽层边缘） $x$  处的电压，线芯对金属屏蔽层的电压（电位）为  $\dot{U}_0$ ，则可认为在微分元素  $dx$  内，电位增量为  $dU_x$ ， $\frac{dU_x}{dx}$  为电位变化率，或为单位长度电压的增量。因  $dx$  为微分元素，故在  $dx$  内  $I$  可近似认为定值，故有

$$\frac{dU_x}{dx} = I \frac{1}{Y_s} \quad (8-6)$$

又电流为体积电流和表面电流之和，当  $dx$  很小时，可认为  $dI$  的变化和表面电流无关，即电流变化近似认为仅由体积电流引起的，电流沿  $x$  方向递减，故

$$-\frac{dI}{dx} = (U_0 - U_x) Y_V$$

或 
$$\frac{dI}{dx} = (U_x - U_0) Y_V \quad (8-7)$$

由式 (8-6) 对  $x$  求导，得

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = \frac{dI}{dx} \frac{1}{Y_s} \quad (8-8)$$

将式 (8-7) 代入式 (8-8) 得

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = (U_x - U_0) \frac{Y_V}{Y_s} \quad (8-9)$$

设  $\gamma^2 = \frac{Y_V}{Y_S}$ , 则有

$$\frac{d^2(U_x - U_0)}{dx^2} = \gamma^2(U_x - U_0) \quad (8-10)$$

此为二阶齐次微分方程, 其通解为

$$U_x - U_0 = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (8-11)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$  为积分常数, 据初始条件, 当  $x=0$  时,  $\dot{U}_x=0$ ;  $x=l$  时  $\dot{U}_x=U_0$ , 故得

$$C_1 = \frac{\dot{U}_0 e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}, C_2 = \frac{-\dot{U}_0 e^{\gamma l}}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}$$

则

$$\dot{U}_x = \dot{U}_0 \left[ 1 - \frac{\text{sh}\gamma(l-x)}{\text{sh}\gamma l} \right] \quad (8-12)$$

故切向场强

$$E = -\frac{\partial \dot{U}_x}{\partial x} = -\frac{U_0 \gamma \text{ch}\gamma(l-x)}{\text{sh}\gamma l} \quad (8-13)$$

式 (8-13) 即沿  $x$  方向绝缘界面的切向场强表达式。式中负号表示切向场强和  $x$  方向相反。式中,  $\gamma = \sqrt{\frac{Y_V}{Y_S}} = \sqrt{\frac{\epsilon_V}{R_e \epsilon_m K}}$ ,  $R_e = R \ln \frac{R}{r_1}$  称为等效半径。

从式 (8-13) 中可以看出:

(1)  $E_x$  的分布和  $x$  有关, 当  $x=0$  时

$$E_x \Big|_{x=0} = -U_0 \gamma \text{cth}\gamma l \quad (8-14)$$

双曲余切函数, 当自变量为零时取得极大值, 故当绝缘长度  $l=0$  时, 即金属屏蔽层边缘处场强最大, 从上述数学分析中又一次得到验证。

(2) 随绝缘长度  $l$  的增加,  $E_x$  呈下降趋势, 但当  $\gamma l \geq 1.5$  时  $\text{cth}\gamma l$  趋近于 1, 则增加绝缘的长度, 对金属屏蔽边缘处的场强并无多大影响。

(3) 为了有效地降低金属屏蔽层边缘处的场强, 可以采取诸如下列措施:

如在工厂绝缘上施加新的绝缘层, 以增大等效半径  $R_e$ ; 增大  $\epsilon_m$ , 可将绝缘浸入介电常数较大的油中; 降低  $\epsilon_V$ , 选择介电常数较小的绝缘材料, 亦可减少电容电流; 在金属屏蔽层边缘的绝缘表面涂以导电漆, 可以减少沿表面的阻抗和金属屏蔽层附近的电位梯度; 在金属屏蔽层附近加装接地屏蔽环, 增大曲率半径; 采用应力锥; 采用电容锥式接头盒, 强迫电场均匀分布等。

### 第三节 电缆连接接头盒的典型结构和设计计算

#### 一、连接盒的典型结构

连接盒的作用是将两根制造长度的电缆连接起来, 以满足实际工程长度的需要。连接的原则是保证导线芯电的良好连接, 绝缘部分的完好电气性能, 金属屏蔽处电场均匀分布。

根据绝缘不同, 可分为油纸绝缘连接盒和橡塑绝缘连接盒两大类。

##### 1. 油浸纸绝缘电缆的连接接头盒

电压较低的粘性浸渍纸绝缘电缆导电线芯是通过连接套、采用焊接（锡焊）或压接的方法将线芯连接。对高压的充油电缆，线芯的连接不仅要保证电气连通，而且要保证油流的畅通无阻。一般方法是在线芯中心油道中垫以钢管，线芯外套以连接套，采用冷焊压接将线芯连接起来，而不允许用焊接或锻接，以防止对油的污染和造成老化。靠近连接端的电缆绝缘（工厂绝缘）一般切削成阶梯或锥形面（反应力锥），然后包缠填充绝缘至与电缆绝缘外径相同，再在其外包绕增绕绝缘。增绕绝缘两端形成应力锥面。应力锥面和反应力锥面均按使其表面的切向场强为一常数（或小于一常数）设计的。两根相接的电缆的屏蔽用经过应力锥及增绕绝缘表面上包缠的导体（如铅丝）完全连接起来，形成等位面。整个装置与压力供油箱连通，保证油的供给和循环，粘性浸渍纸绝缘电缆的连接盒内应灌满电缆胶。图 8-3 为充油电缆普通连接接头盒。

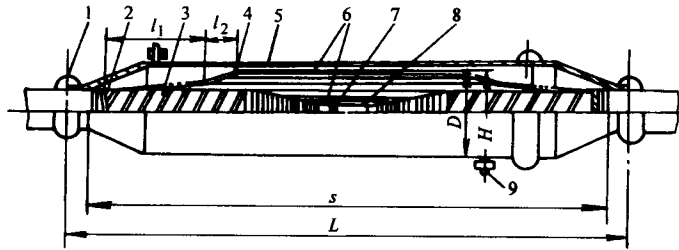


图 8-3 110~220kV 自容式充油电缆普通接头

- 1—封铅 2—接地屏蔽 3—电缆芯 4—半导体屏蔽 5—外壳 6—增绕绝缘 7—芯管 8—压接管 9—油嘴

为了减小金属护套损耗，长电缆线路各相电缆的金属护套需交叉换位互联接地，这时电缆的连接须用绝缘接头盒。其内绝缘结构尺寸和普通接头相同，但增绕绝缘外缠绕的半导体纸和金属接地层都要在接头中间断开、不能连续。接头的外壳铜管中间部分用环氧树脂绝缘片或瓷质绝缘垫片隔开，使电缆的金属屏蔽层（金属护套）在轴向绝缘。

为了防止电缆故障漏油扩大到整个电缆线路，并分隔电缆线路油压，使各段电缆内部压力不超过允许值及减少暂态油压的变化，往往采用塞止式连接盒。其只作电缆的电气连接，将被连接的电缆油道隔开，使油流互不相通。其结构分单室式和双室式两种。它们是用一个（单室）和两个（双室）环氧树脂套管（或瓷套管）将被连接的两根电缆的油流分开。如图 8-4 为一双室式塞止式连接盒结构图。

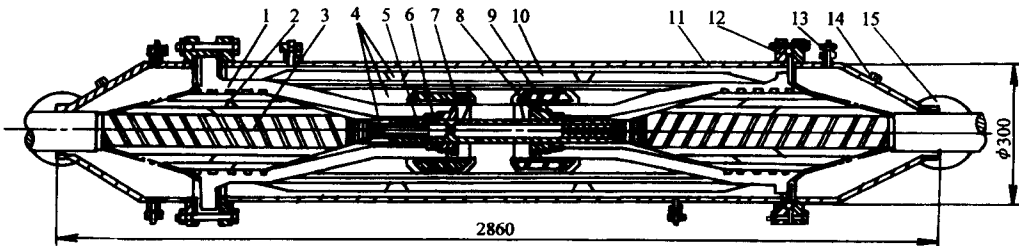


图 8-4 220kV 双室式塞止接头的结构

- 1—环氧树脂套管 2—电缆室增绕绝缘 3—电缆 4—填充绝缘  
5—芯管 6—导体连接 7—带有绝缘的电极 8—轴封螺帽 9—密封垫圈  
10—外腔增绕绝缘 11—外壳 12—密封垫圈 13—油嘴 14—接地端子 15—封铅



## 2. 橡塑绝缘电缆连接盒

橡塑绝缘电力电缆一般没有金属护套和浸渍剂，故只需用普通连接盒将电缆各制造长度连接起来。过去按照制造工艺分为绕包带型，模塑型和压力浇铸型等类型。随着工艺技术的发展，目前橡塑绝缘电缆的附件装置主要以预制式为主。

对 35kV 及以下的电缆，导电线芯连接以后，在原有工厂绝缘的上面套一热缩材料制成的应力管，然后再做其他部分的连接处理。热缩应力管，是由聚乙烯料加入一定的配合剂，经辐照交联后制成。这种管材具有“记忆”效应，即按预定尺寸制成后，经冷扩工艺过程，然后安装在接头处，再予以加热，管材会自动收缩到原先的尺寸，应力管便牢牢地套在工厂绝缘上。

对于高压交联聚乙烯绝缘电力电缆的连接盒，目前主要是在金属屏蔽层边缘的电场集中处安装以预制成型的应力锥。应力锥的类型和结构尺寸如图 8-5。

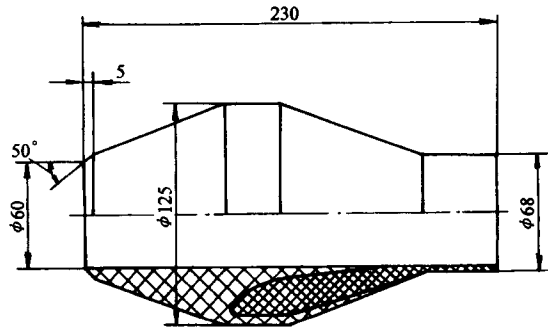


图 8-5 预制式应力锥结构图

## 二、连接接头盒的设计计算

### 1. 增绕（或填充）绝缘层的厚度

该厚度的确定，主要取决于连接接头盒的最大允许场强。因该部分绝缘，是在敷设安装现场施加，绝缘质量必将受到影响，加上连接线芯套管场强增加，故在设计时，该处线芯表面最大工作场强应取本体最大工作场强的 45%~60% 左右。

设增绕绝缘和填充绝缘的相对介电常数为  $\epsilon_n$ ；线芯连接套外半径为  $r_1$ ，增绕绝缘外半径为  $R_n$ ，则有

$$E_n = \frac{U}{r_1 \ln \frac{R_n}{r_1}} \quad (8-15)$$

式中， $U$  为相电压； $E_n$  为线芯连接套表面电场强度。

故由式 (8-15) 可得

$$R_n = r_1 \exp\left(\frac{U}{r_1 E_n}\right) \quad (8-16)$$

从而增绕绝缘层厚度为

$$\Delta_n = R_n - R = r_1 \exp\left(\frac{U}{r_1 E_n}\right) - R \quad (8-17)$$

式中， $R$  为电缆工厂绝缘外半径。

### 2. 应力锥的设计

应力锥，即均化场强应力的锥形体。将其施加于金属屏蔽层边缘的场强集中处，可使场强均匀分布。

应力锥的表面为一锥形曲面。由其形状所决定，曲面上的切向场强为一恒定值，或小于

某一允许值。锥面一定与金属屏蔽层相接，使其电位为零，所以锥面亦为等位面。

对油纸绝缘电缆，应力锥是在工厂绝缘上用纸带绕包而成。锥面缠以铅丝与金属屏蔽层相连，以实现电位为零。橡塑绝缘电力电缆所用应力锥，是用乙丙橡胶或硅橡胶预先加工制成。电缆连接时，将其套在工厂绝缘上。其应力锥面是用导电胶或半导电胶挤压成型。图 8-5 中的 b 是将半导电胶制成的锥面嵌入绝缘锥体。安装时，使锥面和金属屏蔽层相接。

如图 8-6 为接头内绝缘设计示意图。工厂绝缘为两层分阶，介电常数为  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 。增绕绝缘介电常数为  $\epsilon_n$ ，它们的半径分别为  $r_c$ 、 $r_2$ 、 $R$  和  $R_n$ 。在应力锥面上任取一点  $F$ ，锥面为等位面，故电力线与之正交， $\alpha$  为过  $F$  点的切线与  $X$  轴正向的交角，则切向场强和法向场强的关系为

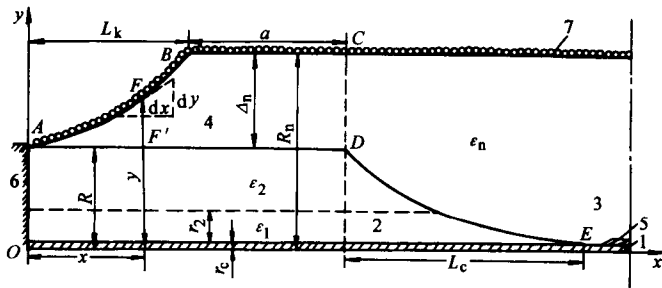


图 8-6 连接接头盒电气计算说明

1—线芯 2—工厂绝缘 3—填充绝缘 4—增绕绝缘 5—连接套 6—电缆金属护套 7—铅丝绕包屏蔽

$$E_t = E_n \operatorname{tg} \alpha$$

过  $F$  点的法向场强  $E_n$  可近似按圆柱形电场计算

$$E_n = \frac{U}{y \epsilon_n \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_2} + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{y}{R} \right)} = \frac{U}{y \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_c} + \frac{\epsilon_n}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_2} + \ln \frac{y}{R} \right)} \quad (8-18)$$

令  $\frac{\epsilon_n}{\epsilon_1} = a$ ,  $\frac{\epsilon_n}{\epsilon_2} = m$ , 则式 (8-18) 改写为

$$E_n = \frac{U}{y \left( \ln \left( \frac{r_2}{r_c} \right)^a + \ln \left( \frac{R}{r_2} \right)^m + \ln \frac{y}{R} \right)} = \frac{U}{y \ln \frac{r_2^{a-m} R^{m-1} y}{r_c^a}} \quad (8-19)$$

令  $\frac{r_2^{a-m} R^{m-1}}{r_c^a} = B$ , 则式 (8-19) 可写为

$$E_n = \frac{U}{y \ln B y} \quad (8-20)$$

而  $E_t = E_n \operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{y \ln B y} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{y \ln B y} \frac{dy}{dx}$  (8-21)

即  $E_t dx = \frac{U}{y \ln B y} dy$ , 两边积分

$$\int_0^x E_t dx = \int_R^y \frac{U}{y \ln B y} dy \quad (8-22)$$

选择曲面形状，使沿锥面的切向场强为一常数，则得锥面的方程为

$$x = \frac{U}{E_t} \ln \frac{\ln By}{\ln BR} \quad (8-23)$$

当  $y = R_n$  时,  $x = L$ , 即应力锥长度。

$$L = \frac{U}{E_t} \ln \frac{\ln(BR_n)}{\ln(BR)} \quad (8-24)$$

切向场强  $E_t$  决定了应力锥面的长度, 一般取  $E_t$  为连接盒绝缘层最大允许切向场强, 以缩短连接盒的尺寸。

在实际制作和敷设安装时, 很难做出如式 (8-23) 给出的锥面。为了工艺的可行性, 一般是用一根或几根直线所组成的锥面来代替由式 (8-23) 所表示的曲面。图 8-7 为用两条直线锥面代替曲线锥面的示意图。

因  $E_t = E_n \operatorname{tg} \alpha = f(y)$ , 故  $E_t$  不再为常数, 但锥面上的切向场强毫无疑问均小于锥面起点  $A$ , 即金属屏蔽处边缘的场强。

如图 8-7 用两根直线 ( $AH'$ ,  $H'B''$ ) 所组成的锥面代替  $AB$  曲线锥面, 最大切向场强只可能在  $A$  和  $H'$  点。而且  $A$  点的切向场强最大, 可令其等于接头中允许最大切向场强, 那么, 在各层介质介电常数相等时应力锥的长度方程为

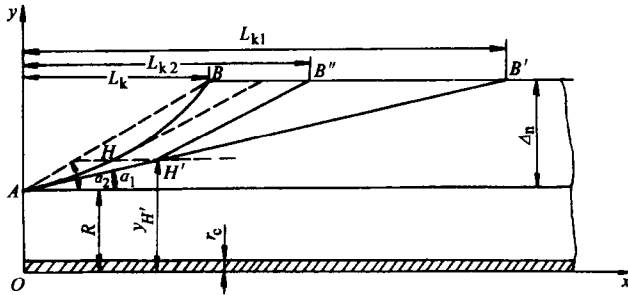


图 8-7 用直线锥面代替  $E_t = \text{常数}$  曲线锥面的应力锥

$$L = L_1 + L_2 = \frac{(y_{H'} - R)U}{E_{tM} R \ln \frac{R}{r_c}} + \frac{(R_n - y_{H'})U}{E_{tM} y_{H'} \ln \frac{y_{H'}}{r_c}} \quad (8-25)$$

式中,  $y_{H'}$  为  $H'$  点的纵坐标, 可据  $L$  为最小值来确定。为此令式 (8-25) 对  $y_{H'}$  微分并令

$$\frac{dL}{dy_{H'}} = 0, \text{ 得}$$

$$(N_2 + kN_1)^2 [\ln(N_2 + kN_1)]^2 = [N_2(N_1 + N_2) \ln(N_2 + kN_1) + N_1 N_2 (1 - k)] \ln N_2 \quad (8-26)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{y_{H'} - R}{\Delta n} \\ N_1 &= \frac{\Delta n}{r_c} \\ N_2 &= \frac{R}{r_c} \end{aligned} \right\} \quad (8-27)$$

当  $y_{H'}$  满足式 (8-26) 时, 应力锥长度  $l$  最小。

为了计算方便, 图 8-8 绘制了不同  $N_2$  值时方程 (8-26) 的  $k \sim N_1$  曲线。应用图 8-8 时, 首先按式 (8-27) 求得  $N_1$  和  $N_2$ , 再以图 8-8 中查出相应的  $k$  值, 再据  $k = \frac{y_{H'} - R}{\Delta_n}$  求得  $y_{H'}$ , 最后由式 (8-25) 求得应力锥的长度。一般情况下  $N_1 = 1.25 \sim 2.5$ ; 两条直线所组成的锥面长度约为原理想锥面长度的 120% ~ 150%。

### 3. 反应力锥

自导电线芯的连接处始, 填充绝缘与工厂绝缘的交界面称为反应力锥锥面。其设计和制造是连接盒设计和制造的关键部位。为了防止沿此面发生移滑放电, 反应力锥的形状也是根据沿该面的切向场强为一常数 (或小于某一常数) 确定的。如图 8-9, 反应力锥  $x$  处的电位

$$U_x = \frac{U_0 \ln \frac{y}{r_c}}{\ln p y^q} \quad (8-28)$$

式中,  $U_0$  为电缆导电线芯对地电压, 即相电压;  $y$  为锥面上任意一点的纵坐标;  $r_c$  为连接套半径; 且有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\epsilon_k}{\epsilon_n} &= m \\ \frac{R_n^m}{r_c} &= p \\ 1 - m &= q \end{aligned} \right\} \quad (8-29)$$

则切向场强

$$E_t = \frac{dU_x}{dx} = \frac{dU_x}{dy} \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dy} \left( \frac{U_0 \ln \frac{y}{r_c}}{\ln p y^q} \right) \frac{dy}{dx} \quad (8-30)$$

如  $E_t$  为一常数, 将上式变换, 并对  $x$  积分得

$$x = \frac{U_0}{E_t} \frac{\ln \frac{y}{r_c}}{\ln p y^q} \quad (8-31)$$

于是反应力锥沿电缆长度方向的长度

$$L_c = \frac{U_0}{E_t} \frac{\ln \frac{R}{r_c}}{\ln p R^q} \quad (8-32)$$

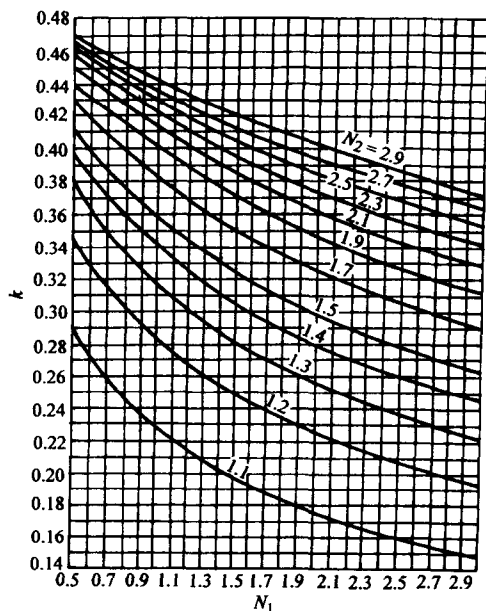


图 8-8 式 (8-26) 的曲线

$$k = \frac{y_{H'} - R}{\Delta_n}, \quad N_1 = \frac{\Delta_n}{r_c}, \quad N_2 = \frac{R}{r_c}$$

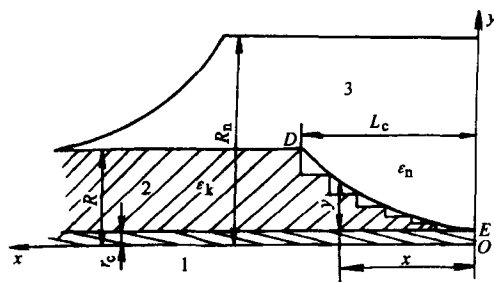


图 8-9 计算反应力锥面说明图

1—线芯 2—工厂绝缘 3—填充及增绕绝缘

式中,  $\epsilon_k$ 、 $\epsilon_n$  分别表示工厂绝缘和增绕绝缘的相对介电常数;  $r_c$  为线芯连接套半径;  $R_n$  为增绕绝缘半径。

对于单一直线组成的反应力锥面, 其最大轴向场强位于  $x=0$  处, 可由式 (8-30) 求得, 当  $\epsilon_k = \epsilon_n$  时,

$$E_t = \frac{U}{r_c \ln \frac{R_n}{r_c}} \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{U}{r_c \ln \frac{R_n}{r_c}} \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (8-33)$$

而反应力锥长度为

$$L_{c1} = \frac{R - r_c}{\operatorname{tg} \alpha_1} = (R - r_c) \frac{U}{r_c E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} \quad (8-34)$$

若用两根直线代替反应力锥曲线, 其最大切向场强与直线斜率的关系也可用类似方法求得, 如图 8-10。

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{r_c E_t \ln \frac{R_n}{r_c}}{U} \\ \operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{y_H E_t \ln \frac{R_n}{r_c}}{U} \end{aligned} \right\} \quad (8-35)$$

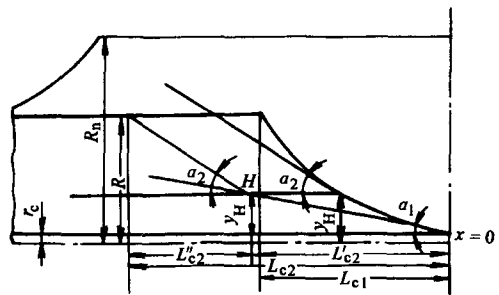


图 8-10 用两直线代替理想反应力锥说明

于是两根直线组成的反应力锥沿电缆长度方向总长为

$$\begin{aligned} L_{c2} = L'_{c2} + L''_{c2} &= (y_H - r_c) \frac{U}{r_c E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} + (R - y_H) \frac{U}{y_H E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} = \\ &= \frac{U}{E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} \left( \frac{y_H - r_c}{r_c} + \frac{R - y_H}{y_H} \right) \end{aligned} \quad (8-36)$$

$$\text{当 } \frac{dL_{c2}}{dy} = 0 \text{ 时, 长度 } L_{c2} \text{ 有最小值, 即交界面选在 } y_H = \sqrt{Rr_c} \quad (8-37)$$

为半径的圆周上时, 长度  $L_{c2}$  最小。此时

$$L'_{c2} = L''_{c2} = \frac{U}{E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} \left( \sqrt{\frac{R}{r_c}} - 1 \right) \quad (8-38)$$

$$\text{则 } L_{c2} = L'_{c2} + L''_{c2} = \frac{2U}{E_t \ln \frac{R_n}{r_c}} \left( \sqrt{\frac{R}{r_c}} - 1 \right) \quad (8-39)$$

连接接头盒中的切向场强, 主要根据运行经验选定。应力锥切向场强一般取电缆径向场强的  $1/10 \sim 1/20$  左右, 大约  $0.5 \text{ kV/mm}$ ; 反应力锥的切向场强一般取应力锥轴向场强的  $50\% \sim 90\%$  左右, 一般约为  $0.12 \text{ kV/mm}$ 。

**例 8-1** 110kV 低油压充油电缆, 其结构尺寸如下:

电缆标称截面积	240mm <sup>2</sup>
电缆线芯外半径	12mm
屏蔽外半径	13mm
电缆绝缘层外半径	24mm
绝缘屏蔽外半径	24.5mm

计算其连接接头盒主要尺寸。

解 (1) 确定连接接头盒中线芯连接套尺寸。根据经验, 一般选连接套截面积  $A_1$  为线芯截面积  $A_c$  的 60%~100%, 连接套长度  $l_1 = (6\sim 8)r_1$ ,  $r_1$  为连接套外半径。

$$\begin{aligned} \text{取} \quad A_1 &= 0.8A_c \\ \pi r_1^2 - \pi r_c^2 &= 0.8A_c \end{aligned}$$

得

$$r_1 = \sqrt{\frac{0.8A_c + \pi r_c^2}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.8 \times 240 + \pi \times 12^2}{\pi}} \text{mm} = 14.3 \text{mm}$$

$$\text{取} \quad r_1 = 15 \text{mm}$$

而连接套长度  $l_1$  取等于  $6r_1 = 90 \text{mm}$ 。

(2) 确定增绕绝缘厚度。取在连接套表面径向电场强度 = 0.5 × 电缆本体最大电场强度, 即

$$0.5 = \frac{r_c \ln \frac{R}{r_c}}{r_1 \ln \frac{R_n}{r_1}} = \frac{13 \ln \frac{24}{13}}{15 \ln \frac{R_n}{15}}$$

解之, 得

$$\ln \frac{R_n}{15} = \frac{13 \ln \frac{24}{13}}{15 \times 0.5} = 1.062$$

$$\text{得} \quad R_n = 43.5 \text{mm}$$

$$\text{取} \quad R_n = 45 \text{mm}$$

$$\text{得} \quad \Delta_n = 45 - 24 \text{mm} = 21 \text{mm}$$

(3) 确定应力锥长度。理想应力锥长度可根据式 (8-24) 求得。 $U$  取其最高工频试验电压即干放试验电压作为计算基准。 $E_t$  可取 1.8MV/m (根据试验结果, 应力锥起始游离轴向场强约为 2.5MV/m, 为保证其最高工频试验电压下不发生游离, 取  $E_t = 1.8 \text{MV/m}$ , 此时安全系数约为  $\frac{2.5}{1.8} = 1.4$ )。110kV 电缆工频试验电压为 295kV, 于是

$$L_k = \frac{295}{1.8} \ln \frac{\ln \frac{45}{13}}{\ln \frac{24}{13}} = 117 \text{mm}$$

如用两根直线代替理想应力锥曲线, 则  $L_{k2}$  应根据式 (8-25) 确定, 并用图 8-8 曲线确定  $y_H$  值。此时,  $N_1 = \frac{\Delta_n}{r_c} = \frac{21}{13} = 1.615$ ,  $N_2 = \frac{R}{r_c} = \frac{24}{13} = 1.845$ , 从图 8-8 中查得  $k =$

0.36。于是根据式(8-27)中第一式,  $y_H = k\Delta_n + R = 0.36 \times 21 + 24\text{mm} = 31.6\text{mm}$ 。

取  $y_H = 32\text{mm}$ , 代入式(8-25)得

$$L_{k2} = \left[ \frac{32 - 24}{24 \ln \frac{24}{13}} + \frac{45 - 32}{32 \ln \frac{32}{13}} \right] \frac{295}{1.8} \text{mm} = 163.5\text{mm}$$

它比理想应力锥长

$$\frac{163.5 - 117}{117} = \frac{46.5}{117} = 39.7\%$$

(4) 确定反应力锥长度。理想反应力锥长度  $L_c$  可根据式(8-31)求取。在充油电缆中,  $E_T$  一般取在应力锥中  $E_c$  的 50%~90%, 取  $E_T = 1.5\text{MV/m}$  ( $\frac{E_T}{E_c} = \frac{1.5}{1.8} = 83.4\%$ ), 于是

$$L_c = \frac{295}{1.5} \frac{\ln \frac{24}{13}}{\ln \frac{45}{13}} \text{mm} = 98.1\text{mm}$$

如用两根直线代替理想应力锥曲线, 则反应力锥长度根据式(8-39)得

$$L_{c2} = \frac{2 \times 295}{1.5 \ln \frac{45}{13}} \left( \sqrt{\frac{24}{13}} - 1 \right) \text{mm} = 114\text{mm}$$

而  $y_H$  根据式(8-37)得

$$y_H = \sqrt{Rr_c} = \sqrt{24 \times 13} \text{mm} = 17.7\text{mm}$$

取

$$L_{c2} = 230\text{mm}, y_H = 18\text{mm}$$

正反应力锥端点间距离一般为 10~50mm, 取 40mm, 连接接头盒计算尺寸如图 8-11 所示。

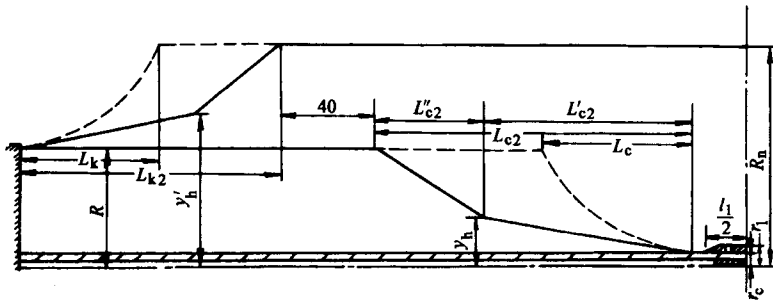


图 8-11 例 8-1 110kV 低油压充油电缆连接接头盒主要尺寸

## 第四节 终端接头盒的典型结构和设计计算

### 一、终端接头盒的典型结构型式

电缆是通过终端接头盒和其他输变电设备如架空线、变压器等相连接的。其结构型式根

据电缆型式、电压等级及用途的不同而有所区别。现分述如下。

(1) 一般电压较低的橡塑绝缘电力电缆在终端连接时, 首先将外护层, 铠装层, 金属屏蔽层等连接长度内的部分剥去, 然后将热缩材料制成的应力管和绝缘管依次套在工厂绝缘上, 接好屏蔽地线和线芯端子, 做好外绝缘和密封, 在外绝缘上套几个雨裙便可。如图 8-12。

35kV 及以下的电力电缆, 大都采用预制式的终端连接盒, 如图 8-13 所示为广东电缆附件厂生产的预制式终端接头盒。其应力锥嵌入内绝缘, 雨裙和接头盒连为一体。体积小, 安装简便, 保证了应有的电气性能和使用寿命。

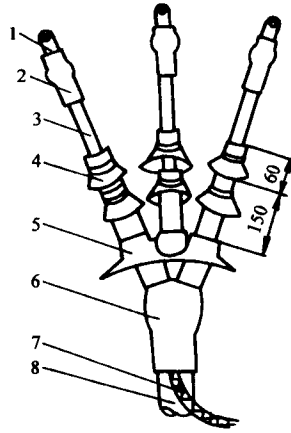


图 8-12 低压户外终端接头

1—端子 2—密封管  
3—绝缘管 4—单孔防雨裙  
5—三孔防雨裙 6—手套  
7—接地线 8—PVC 护套

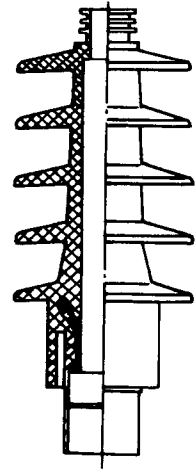


图 8-13 10kV 户外终端头

(2) 高压电缆终端接头盒一般由内绝缘、外绝缘、密封结构、出线杆和屏蔽罩等部分组成。

充油电缆主要有增绕式、电容式和象鼻式终端接头盒。

增绕式终端接头盒如图 8-14, 其主要特点是在工厂绝缘上加包了增绕绝缘层, 且在金属屏蔽层处包成应力锥, 这样可降低绝缘层中的电场强度。除此之外又采用了接地屏蔽环, 使电场集中得到一定的改善, 整个终端密封在一个高强度瓷套管中。在瓷套顶端装有高压屏蔽罩, 以防止接头处的尖端放电。

电容式终端接头盒主要是在工厂绝缘外附加一些电容器, 强制电场强度切向均匀分布, 从而减少了终端的高度。按附加电容器的形状, 电容式终端盒又分为电容锥式 (图 8-15) 和电容饼式 (图 8-16)。

在超高压电站中, 为了缩小电站厂房面积和高度, 往往采用象鼻式终端盒, 如图 8-17, 使电缆终端与变压器套管在油中连接, 既减少了厂房空间, 又可避免污秽和大气条件的影响。

高压塑力缆终端接头盒, 一般有绕包带型, 模塑型, 浇铸型和预制插入式等型式。图 8-18 为预制应力锥插入式结构。应力锥一般是用乙丙橡胶或硅橡胶预先制成, 然后在敷设现场将其插入接头盒中。插入方式有两种, 一种是在电缆工厂绝缘上包一些特殊纸带或涂硅油, 将预制应力锥插装上去, 如图 8-18a 所示。另一种是弹簧压紧结构, 如图 8-18b 所示。当应力锥装到一定部位后, 靠金具和弹簧紧压, 使界面紧密相接。

## 二、终端接头盒的设计计算

终端接头盒的设计, 主要是外绝缘和内绝缘的设计及其配合。上下屏蔽罩、紧固件, 底板和尾管等只要求有足够的机械强度即可。



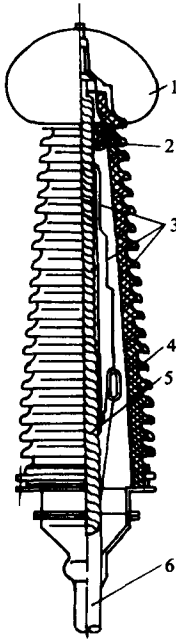


图 8-14 110~220kV 充油  
电缆增绕式终端接头盒  
1、2—高压端屏蔽 3—增绕  
绝缘 4—接地屏蔽  
5—应力锥 6—电缆

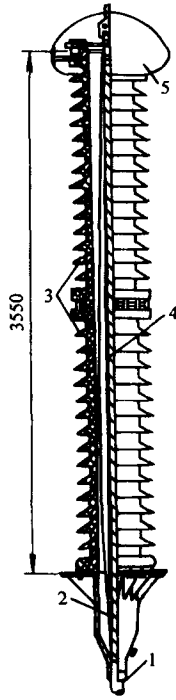


图 8-15 400kV 高油压充油  
电缆电容锥式终端接头盒  
1—电缆铅套 2—应力锥  
3—高强度瓷套 4—电容  
锥绕包 5—屏蔽罩

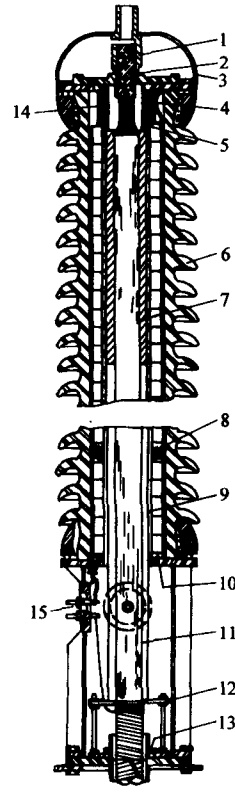


图 8-16 电容饼式终端接头盒  
1—连接接头 2—线芯连接头 3—高压屏  
蔽罩 4—电容器组连接头 5—支撑圆柱体  
6—瓷套 7—辅助支撑套筒 8—电容饼元件  
9—电容器组支撑筒 10—电容并调节栓  
11—应力锥 12—应力锥支撑 13—检验栓  
14—电容器支撑圆柱体 15—测量接头

### 1. 外绝缘的设计计算

外绝缘，主要包括瓷套、环氧树脂套筒、或预制式橡胶绝缘体及伞裙等。对其进行设计，主要是确定它们的长度和有关的结构尺寸。

一般终端接头盒的长度（或高度）主要由外绝缘的长度所决定。外绝缘长度也即放电距离。

油纸绝缘的密封瓷套和橡塑绝缘终端的外绝缘，实际上可看成为支柱绝缘子。伞裙的作用是雨天时，绝缘子还保持着一部分干燥表面和增加电极间沿瓷表面的放电距离，以提高湿闪络电压。

棒形支柱绝缘子属于具有弱垂直分量的极不均匀电场结构。电缆工作电压愈高，瓷套愈长，沿瓷套长度电场分布愈不均匀，平均放电场强愈低。各种电压下瓷套平均放电场强如表 8-1 所示。

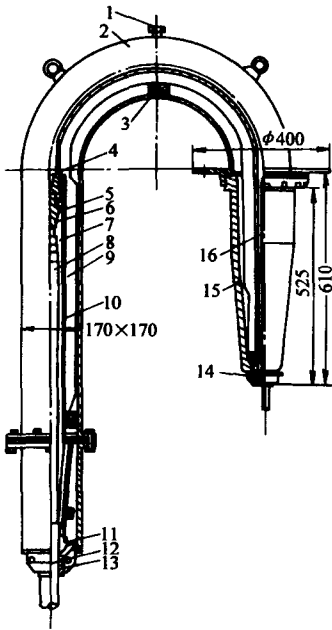


图 8-17 110kV 象鼻式终端头

- 1—油嘴 2—壳体 3—衬垫 4—电缆连接触头 5—电缆连接头
- 6—电缆导体 7—增绕绝缘 8—工厂绝缘 9—主绝缘
- 10—胶木筒 11—封铅 12—电缆铅包 13—防震套
- 14—套管引出触头 15—瓷套 16—导电杆

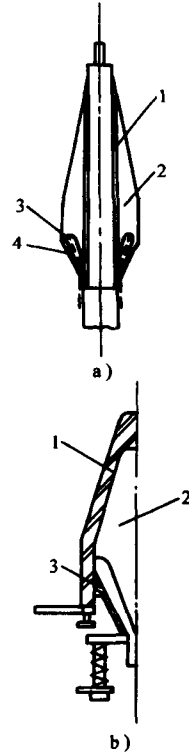


图 8-18 预制应力锥插入方式示意图

- a) 绕包纸带插入结构
- 1—特种浸渍纸 2—绝缘 3—半导体层 4—金属屏蔽
- b) 弹簧压紧结构
- 1—环氧树脂 2—应力锥 3—紧压金具

表 8-1 瓷套放电平均电场强度

(kV/mm)

额定线电压/kV	35	110~500
工频干放电场强	0.4~0.5	0.33~0.43
工频湿放电场强	0.25~0.27	0.23~0.26
脉冲放电场强	0.6~0.8	0.56~0.70
操作波放电场强	—	0.34~0.41

一般设计绝缘子时，先根据干闪络电压初步决定预制件的绝缘高度，再按湿闪络电压确定外形结构——伞数和伞形，并最终确定绝缘高度。

干闪络电压接近空气间隙的击穿电压。湿闪络电压是户外绝缘子最重要的性能指标。介质表面完全淋湿时，雨水形成连续的导电层，泄漏电流增加，闪络电压大大降低。标准洒下，被雨淋湿表面的闪络电压仅为干燥状态的 40%~50%。

短时的工频试验电压主要根据线路可能出现的操作过电压而确定。干闪络电压的峰值一般为操作过电压值的 120%~145%，而湿闪络电压峰值约等于操作过电压，为工频最大工作电压的 2.6~4 倍。各电压等级的放电试验电压如表 8-2。

表 8-2 瓷套放电试验电压

(kV)

额定线电压	放电试验电压	
	干	湿
35	110	85
110	295	215
220	550	425
500	925	700

因此, 根据下列公式确定终端的 (瓷套或预制件) 放电长度, 即上下屏蔽罩之间的距离。

$$L = (1.05 \sim 1.15) \frac{U}{E} \quad (8-40)$$

式中,  $E$  为瓷套工频干、湿放电平均场强;  $U$  为干、湿放电电压。均可据表 8-1, 表 8-2 取值。

当绝缘子长度不太大时, 湿闪电压比干闪电压低 15%~20%, 但随长度增大, 湿闪电压逐步和干闪电压接近, 甚至超过干闪电压。这可能是由于绝缘子电压分布不同所致。绝缘子较长时, 干燥状态下电压分布很不均匀, 而淋雨状态下由于绝缘子表面电导增加, 电压分布相对均匀些。

实践证明, 湿闪电压决定于绝缘子的有效高度和裙的结构。如图 8-19 所示, 绝缘子的伞宽  $a$  和伞间距离  $l$  是影响闪络电压和路径的主要因素。伞宽较小时表面干燥区域小, 湿表面所占比例大, 闪络电压低。伞宽增加, 湿闪电压随之增高。但过大时, 放电主要沿相邻二裙的边缘之间的空气间隙进行, 闪络电压不再增加。伞形较合理的关系为  $a = 0.5l$ 。裙的倾角在  $15^\circ \sim 25^\circ$  最有利。倾角过小, 表面形成水洼, 然后汇成激流流下, 将促使弧越。而且裙间空隙中的杆体易为水滴所溅湿。如倾角过大, 则显然降低了裙间空隙, 也不足取。表 8-3 为裙边数推荐表。

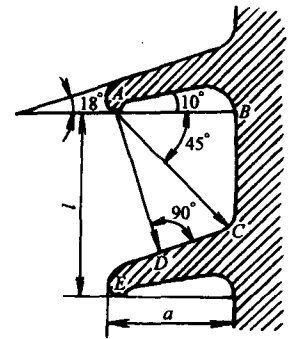


图 8-19 裙的结构

瓷套内径由电缆内绝缘最大外径确定, 壁厚由其机械强度和承受的压力确定。

## 2. 内绝缘的设计计算

(1) 橡塑绝缘电缆的预制式终端接头盒的内绝缘及应力锥的设计计算和连接盒的计算基本相同。而油纸绝缘电缆增绕式终端接头盒的内绝缘主要是确定增绕绝缘的厚度  $\Delta_n = R_n - R$ 、应力锥的形状和长度  $AD$ 、增绕绝缘末端至线芯顶点的距离  $DG$ 。如图 8-20 所示。 $D$ 、 $G$  两点附近的场强较集中, 为了降低场强, 一般可加屏蔽环。此时,  $D$ 、 $G$  处的场强可用下式计算

$$E = \frac{0.9U}{2r \ln \frac{r+d/2}{r}} \quad (8-41)$$

式中,  $r$  为屏蔽环半径 (一般约等于线芯半径  $r_c$ );  $d$  为屏蔽环内表面至线芯表面的距离;  $U$  为电缆绝缘承受的相电压。

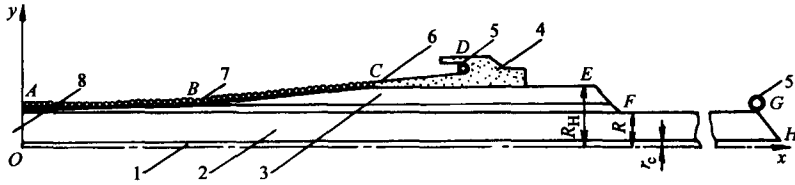


图 8-20 计算增绕式终端接头盒内绝缘说明图

- 1—线芯 2—工厂绝缘 3—增绕绝缘 4—环氧树脂套筒 5—屏蔽环
- 6—铜皮喇叭（接地屏蔽） 7—应力锥面上铅丝包绕（接地屏蔽） 8—电缆铅套

增绕绝缘末端至线芯顶点的距离，一般由瓷套长度所确定。因为内绝缘浸在油中，要求放电距离较小，故对其形状和长度要求不甚严格，但应力锥相对于瓷套下屏蔽罩的位置应当选择。若将内绝缘应力锥放得太低，则电场将会在瓷套屏蔽罩处集中，由于瓷套外部与空气接触，比内绝缘放电场强低，这样会降低终端接头盒的放电电压。反之，若将内绝缘应力锥相对瓷套屏蔽位置放得太高，就会缩短瓷套有效放电距离，同样降低终端接头盒的放电电压。根据经验，一般内绝缘的接地屏蔽环中心线高于瓷套屏蔽罩的距离约为瓷套放电长度的 10%~15% 时，终端接头盒具有最佳放电性能。

(2) 电容锥式终端的内绝缘设计 电容锥式终端内绝缘结构如图 8-21 所示。根据强制电场分布的条件，其等值电路如图 8-22 所示。

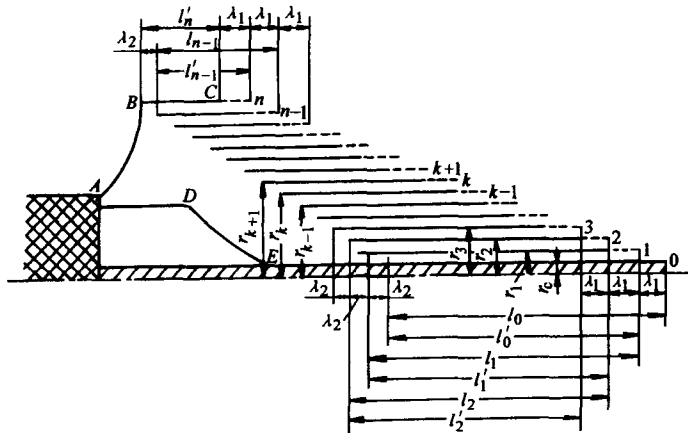


图 8-21 电容锥式终端接头盒内绝缘极板布置

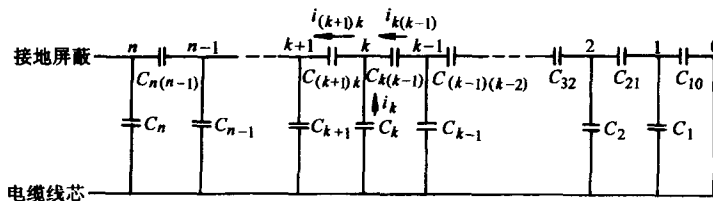


图 8-22 电容锥式终端接头盒内绝缘等值电路

设电容锥极板数为  $n$ ，第  $k+1$  极板与第  $k$  极板间电容为  $C_{(k+1)k}$ ，第  $k$  极板与电缆线芯间电容为  $C_k$ ，根据克希荷夫定律，在  $k$  点的电流应有下列关系

$$i_{(k+1)k} = i_{(k-1)} + i_k \tag{8-42}$$

$$\text{或} \quad (U_{k+1} - U_k)\omega C_{(k+1)k} = (U_k - U_{k-1})\omega C_{k(k-1)} + U_k\omega C_k \quad (8-43)$$

式中  $U_k$  为第  $k$  极板对线芯电位差,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为频率, 在电容锥式终端接头盒设计中, 一般取相邻电容锥极板间电压相等, 即

$$U_{k+1} - U_k = U_k - U_{k-1} = \frac{U}{n} \quad (8-44)$$

$$\text{且} \quad U_k = \frac{U}{n}k \quad (8-45)$$

将式 (8-44)、式 (8-45) 代入式 (8-43) 则有

$$C_{(k+1)k} = C_{k(k-1)} + kC_k \quad (8-46)$$

各极板均系以电缆中心轴为中心的同心圆柱体, 因此各电容器  $C_{(k+1)k}$  可用圆柱体电容器公式近似计算, 即

$$C_{(k+1)k} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l'_k}{\ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} \quad (8-47)$$

$$C_{k(k-1)} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l'_{k-1}}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} \quad (8-48)$$

$$C_k = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon\lambda_{2k}}{\ln \frac{r_k}{r_c}} \quad (8-49)$$

式中,  $r_c$  为线芯半径;  $r_k$  为第  $k$  极板半径;  $\lambda_{2k}$  为第  $k$  极内伸长度,  $l'_k$  为第  $k$  极板工作长度 (参见图 8-21)。将式 (8-47)、式 (8-48)、式 (8-49) 代入式 (8-46) 得

$$\frac{l'_k}{\ln \frac{r_{k+1}}{r_k}} = \frac{l'_{k-1}}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{k\lambda_{2k}}{\ln \frac{r_k}{r_c}} \quad (8-50)$$

每个极板长度  $l_k = l'_k + \lambda_{1k}$ ,  $\lambda_{1k}$  为电容锥极板外伸长度。

为了使电场沿电容锥表面呈均匀分布, 应使相邻极板间轴向场强相等。在推导式 (8-50) 时, 已令各相邻极板间电压相等 ( $= \frac{U}{n}$ )。因此, 取各极板内伸长度  $\lambda_{2k}$  和外伸长度  $\lambda_{1k}$  均各自相等 (即  $\lambda_{21} = \lambda_{22} = \dots = \lambda_{2k} = \dots = \lambda_{2n} = \lambda_2$ ;  $\lambda_{11} = \lambda_{12} = \dots = \lambda_{1k} = \dots = \lambda_{1n} = \lambda_1$ )。

这样, 方程式 (8-50) 仍包含六个待定数值:  $r_{k-1}$ ,  $r_k$ ,  $r_{k+1}$ ,  $l'_k$ ,  $l'_{k-1}$ ,  $\lambda_2$ , 因此, 还必须借助其他关系或经验数据确定其中五个, 方能用式 (8-50) 确定第六个待定数值。

电容极板尺寸 ( $l_k$ )、位置 ( $r_k$ ) 及其内伸 ( $\lambda_2$ ) 和外伸 ( $\lambda_1$ ) 长度, 可根据下述关系式来确定。

首先确定第  $n$  极板长度  $l_n$  (图 8-23)。为了保证第  $n$  极板对外绝缘 (瓷套) 的屏蔽作用, 分散瓷套低压屏蔽罩处电场集中, 以提高终端接头盒的放电电压, 第  $n$  个极板的端点 (图 8-23 中  $C$  点) 一般选择高于瓷套接地屏蔽罩的距离  $h_1$  为瓷套有效放电距离  $L_f$  的 10% ~ 15%。另外  $l_n$  的长度不能太短, 否则为了保证每一电容器要求值, 极板间距离将会太小, 以致包缠纸带弱点重叠会大大降低电容器极板间击穿电压。 $l_n$  也不可选择太长, 太长会使整个终端太长而不经济。考虑这些因素, 根据经验一般选取

$$l_n = (0.15 \sim 0.20)L_f \quad (8-51)$$

其次,第0极板的端点(图8-23中0点,在线芯表面与第一极板端点距离为 $\lambda_1$ )与高压屏蔽罩的距离为 $h_2$ ,一般为瓷套有效放电距离的20%~30%,于是,第 $n$ 极板端点C与第0极板间距离

$$L_{0n} = L_f - h_1 - h_2 \approx (0.5 \sim 0.7)L_f \quad (8-52)$$

从图8-22可以看出, $L_{0n}$ 等于 $n$ 个极板外伸长度之和,即

$$n\lambda_1 = L_{0n} \quad (8-53)$$

或 
$$\lambda_1 = \frac{L_{0n}}{n} = \frac{(0.5 \sim 0.7)L_f}{n} \quad (8-54)$$

电容锥极板数 $n$ 一般根据经验选定。 $\lambda_1$ 的数值一般应小于40mm,当 $\lambda_1$ 大于40mm时,放电电压不随 $\lambda_1$ 增加而增加。 $n$ 取得愈大,即极板数愈多, $\lambda_1$ 愈短,则轴向电场分布愈均匀,但另一方面,极板数增加,工艺复杂。一般建议110kV电缆终端接头盒取6~8,220kV取14~16,500kV取24~28。有的设计采用比上述大得多的数值,对于60~70kV电缆终端接头盒取18,140kV取34,250kV取约45,350kV取约65。随着电容锥制作工艺的改进,电缆终端接头盒电容锥内绝缘趋向在工厂用机器绕包,然后到工地装配。因此,趋向采用较多电容极板,以提高终端接头盒的质量。

电容锥极板内伸长度 $\lambda_2$ ,系根据容许轴向场强来确定,即

$$\lambda_2 = \frac{U}{E_T n} \quad (8-55)$$

如 $U$ 取为终端接头盒干放试验电压(kV),对于中、低油压充油电缆 $E_T$ 可取0.5~1MV/m。

当 $\lambda_1, \lambda_2, l_n$ 确定后,任一极板长度 $l_k$ 可用下式求定

$$l_k = l_n + (\lambda_1 - \lambda_2)(n - k) \quad (8-56)$$

第一极板半径 $r_1 = r_0 + \Delta_1$ , $r_0$ 为线芯半径, $\Delta_1$ 为第一电容器绝缘层厚度,可取为电容器极板间容许最小厚度的110%~300%。一般电容器极板间纸层数不得小于3~10。

当 $\lambda_2, r_0 (=r_c), r_1 (=r_0 + \Delta_1), l'_0, l'_1$ 五个数值按上述考虑初步确定后,即可用式(8-50)求定 $r_2$ ,即( $k=1, k+1=2$ )

$$\ln r_2 = \frac{l'_1}{\frac{l'_0}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{\lambda_2}{\ln \frac{r_1}{r_c}}} + \ln r_1 \quad (8-57)$$

依此顺序可求出 $r_3, r_4 \cdots r_{k+1} \cdots r_n$ ,即

$$\ln r_{k+1} = \frac{l'_k}{\frac{l'_{k-1}}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}} + \frac{k\lambda_2}{\ln \frac{r_k}{r_c}}} + \ln r_k \quad (8-58)$$

而任一层绝缘厚度 $\Delta_k = Y_{k+1} - Y_k$ ,如计算结果发现极板间绝缘层厚度小于规定值,可改变 $\Delta_1$ (或 $l_n$ )重新计算,直至获得满意结果。

为了加速工地施工,如前所述,电容锥可在工厂制造。为了简化安装工艺,有的电容锥包缠在胶木筒上,如图8-24所示。施工时,无需剥去电缆工厂绝缘,而是将胶木筒套在电

缆工厂绝缘外面。胶木筒上第一层极板（序号为零）与电缆线芯相连接如图 8-23 所示。对于这种结构电容锥式终端接头盒，用式（8-50）计算第一电容极板半径时，应取

$$r_{k-1} = r_0 = R + \Delta \quad (8-59)$$

$$r_k = r_1 = r_0 + \Delta_1 \quad (8-60)$$

式中， $r_0$  为胶木筒上第一层极板半径， $r_1$  为序号 1 极板的半径， $\Delta$  为胶木筒厚度， $\Delta_1$  为第一个电容器极板间绝缘层间的厚度， $R$  为电缆工厂绝缘外半径。在计算第二极板及下面极板的尺寸，方法同前。

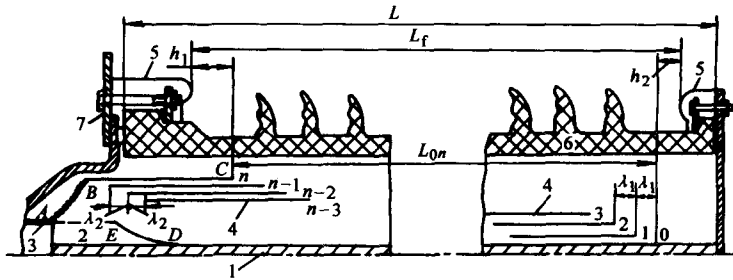


图 8-23 电容锥式终端接头盒内外绝缘相对位置示意

1—线芯 2—工厂绝缘 3—电缆护套 4—电容锥极板 5—屏蔽罩 6—瓷套 7—法兰

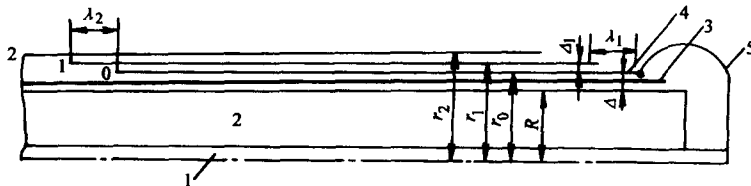


图 8-24 电容锥包绕在胶木筒上的结构

1—线芯 2—工厂绝缘 3—胶木筒

4—胶木筒上第一层极板（序号为零） 5—胶木筒上第一层极板与线芯连接线

例 8-2 220kV 中油压充油电缆，其结构尺寸如下：

标称截面积	500mm <sup>2</sup>
油道直径	12mm
线芯外半径	16.7mm
绝缘层外半径	35.7mm

采用电容锥式终端接头盒，电容锥衬筒外半径为 52mm，瓷套有效放电长度为 2110mm。计算电容极板尺寸。

解

(1) 确定电容锥极板外伸长度  $\lambda_1$ 。

选用极板数  $n = 14$ ，根据式（8-54）

$$\lambda_1 = 0.55 \times \frac{L_f}{n} = 0.55 \times \frac{2110}{14} \text{mm} = 83 \text{mm}$$

取

$$\lambda_1 = 85 \text{mm}$$

(2) 确定电容锥极板内伸长度  $\lambda_2$ 。

根据式 (8-55) 得

$$\lambda_2 = \frac{U}{E_T n}$$

终端接头盒干放试验电压为 550kV。

取  $E_T = 0.9 \text{ MV/m}$

得  $\lambda_2 = \frac{550}{0.9 \times 14} \text{ mm} = 43.6 \text{ mm}$

取  $\lambda_2 = 45 \text{ mm}$

(3) 确定极板长度  $l_k$  其工作长度  $l'_k$ 。

根据式 (8-51) 得

$$l_{14} = 0.19 \times L_t = 0.19 \times 2110 \text{ mm} = 400 \text{ mm}$$

取  $l_{14} = 400 \text{ mm}$

再根据式 (8-56), 计算极板长度

$$l_k = l_{14} + (\lambda_1 - \lambda_2)(14 - k) = 400 + (85 - 45)(14 - k)$$

$$\text{当 } k = 0 \quad l_0 = 960 \text{ mm}$$

$$k = 1 \quad l_1 = 920 \text{ mm}$$

$$k = 2 \quad l_2 = 880 \text{ mm}$$

.....

根据  $l'_k = l_k - \lambda_1$  计算极板工作长度

$$\text{当 } k = 0 \quad l'_0 = 875 \text{ mm}$$

$$k = 1 \quad l'_1 = 835 \text{ mm}$$

$$k = 2 \quad l'_2 = 795 \text{ mm}$$

.....

(4) 确定各极板半径  $r_k$ 。

在本电缆终端接头盒中, 电容锥衬筒半径比电缆工厂绝缘半径大, 中间可包缠适当层数绝缘。如忽略衬筒及包缠绝缘介电常数与电缆绝缘介电常数的差异, 则直接应用式 (8-50), 此时, 根据式 (8-59) 和式 (8-60), 当  $k=1$  时, 有

$$r_{k-1} = r_0 = \text{衬筒外半径} = 52 \text{ mm}$$

$$r_k = r_1 = r_0 + \Delta_1$$

如取  $\Delta_1 = 2.5 \text{ mm}$ , 则

$$r_1 = r_0 + \Delta_1 = (52 + 2.5) \text{ mm} = 54.5 \text{ mm}$$

应用式 (8-50) 或式 (8-57) 得

$$\ln r_2 = \frac{l'_1}{\frac{l'_0}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{\lambda_2}{\ln \frac{r_1}{r_0}}} + \ln r_1 = \frac{835}{\frac{875}{\ln \frac{54.5}{52}} + \frac{45}{\ln \frac{54.5}{16.7}}} \ln 54.5$$

得  $r_2 = 56.873 \text{ mm}$

$$\Delta_2 = r_2 - r_1 = (56.873 - 54.500) \text{ mm} = 2.373 \text{ mm}$$

当  $k=2$ ,  $k+1=3$ , 再应用式 (8-50) 得



$$\ln r_3 = \frac{l'_2}{\frac{l'_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{2\lambda_2}{\ln \frac{r_2}{r_c}}} + \ln r_2 = \frac{795}{\frac{835}{\ln \frac{56.873}{54.5}} + \frac{45 \times 2}{\ln \frac{56.873}{16.7}}} + \ln 56.873$$

得

$$r_3 = 59.111 \text{mm}$$

$$\Delta_2 = 59.111 - 56.873 = 2.238 \text{mm}$$

.....

依次计算结果列于表 8-3。

从上述计算结果可见，采用厚度为 0.125mm 的纸包缠，如层数不得小于 10（即极板间绝缘厚度不得小于 1.25mm）， $\Delta_{11}$ ， $\Delta_{12}$ ， $\Delta_{13}$ ， $\Delta_{14}$  不符合规定，因此应重新选择  $\Delta_1$ 。现选  $\Delta_1 = 3.5 \text{mm}$ ，其他参数照旧，即  $l_k = 400 \text{mm}$ ， $\lambda_1 = 85 \text{mm}$ ， $\lambda_2 = 45 \text{mm}$ ， $r_c = 16.7 \text{mm}$ ， $r_0 = 52 \text{mm}$ ，重复上述计算步骤，最后结果如表 8-4 所示。

表 8-3

k	$\lambda_1/\text{mm}$	$\lambda_2/\text{mm}$	$l_k/\text{mm}$	$l'_k/\text{mm}$	$r_k/\text{mm}$	$\Delta_k/\text{mm}$
0	85	45	960	875	52.000	—
1	85	45	920	835	54.500	2.5
2	85	45	880	795	56.873	2.373
3	85	45	840	755	59.111	2.238
4	85	45	800	715	61.209	2.098
5	85	45	760	675	63.163	1.954
6	85	45	720	635	64.970	1.808
7	85	45	680	595	66.634	1.663
8	85	45	640	555	68.153	1.519
9	85	45	600	515	69.531	1.378
10	85	45	560	475	70.772	1.241
11	85	45	520	435	71.880	1.108
12	85	45	480	395	72.860	0.980
13	85	45	440	355	73.719	0.859
14	85	45	400	315	74.500	0.780

表 8-4

k	$\lambda_1/\text{mm}$	$\lambda_2/\text{mm}$	$l_k/\text{mm}$	$l'_k/\text{mm}$	$r_k/\text{mm}$	$\Delta_k/\text{mm}$
0	85	45	960	875	52.000	—
1	85	45	920	835	55.500	3.5
2	85	45	880	795	58.880	3.380
3	85	45	840	755	62.119	3.239
4	85	45	800	715	65.188	3.079
5	85	45	760	675	68.102	2.905

(续)

$k$	$\lambda_1/\text{mm}$	$\lambda_2/\text{mm}$	$l_k/\text{mm}$	$l'_k/\text{mm}$	$r_k/\text{mm}$	$\Delta_k/\text{mm}$
6	85	45	720	635	70.822	2.720
7	85	45	680	595	73.349	2.527
8	85	45	640	555	75.679	2.330
9	85	45	600	515	77.810	2.130
10	85	45	560	475	79.743	1.933
11	85	45	520	435	81.480	1.737
12	85	45	480	395	83.026	1.546
13	85	45	440	355	84.386	1.361
14	85	45	400	315	85.620	1.234

上述计算结果, 所有极板间绝缘厚度 ( $\Delta_k$ ) 均大于 1.25mm (除  $\Delta_{14}$  略小外)。故决定采用  $\Delta_1 = 3.5\text{mm}$ , 但上述  $\Delta_k$  均系计算厚度, 应作修正, 使其每层厚度均为 0.125 的整数倍, 经修正后, 结果如表 8-5 所示。

$\Delta_1$  不宜选择太厚, 否则终端电容锥外径太大, 甚至影响瓷套尺寸, 从经济观点, 应尽可能地小。

表 8-5

$k$	$r_k$ (计算值)	$\Delta_k$ (计算值)	$\frac{\Delta_k}{0.125}$	修 正 $\frac{\Delta_k}{0.125}$	修 正 $\Delta_k$	修 正 $r_k$
0	52.000	—	—	—	—	52.000
1	55.500	3.500	28	28	3.500	55.500
2	58.880	3.380	27.1	27	3.375	58.875
3	62.119	3.239	25.9	26	3.250	62.125
4	65.188	3.079	24.6	25	3.125	65.250
5	68.102	2.905	23.2	23	2.875	68.125
6	70.822	2.720	21.8	22	2.750	70.875
7	73.349	2.527	20.2	20	2.500	73.375
8	75.679	2.330	18.6	19	2.375	75.750
9	77.810	2.130	17.1	17	2.125	77.875
10	79.743	1.933	15.5	16	2.000	79.875
11	81.480	1.737	13.9	14	1.750	81.625
12	83.026	1.546	12.4	13	1.625	83.250
13	84.386	1.361	10.9	11	1.375	84.625
14	85.620	1.234	9.9	10	1.250	85.875

## 第五节 电缆终端电场的数值分析

在电缆附件设计的同时,需及时对其电场分布进行数值分析,以确定电场分布是否均匀合理,以此做为设计方案修改和调整的主要依据之一。

电场数值分析的方法有多种,如有限差分法、有限元法和模拟电荷法等。由于用有限元法解非线性场及多层介质中的电磁场不受场域边界形状的限制,且对第二类、第三类及不同媒质分界面的边界条件能自动满足,不必作单独处理,因而用有限元法解电缆终端的电磁场较为适宜。

### 一、有限元法的基本原理和实施

电力电缆终端的场,可用圆程坐标系中轴对称二维拉普拉斯方程来描述。电磁场的计算问题,也即求解拉普拉斯方程的问题。而求解拉普拉斯偏微分方程可通过有限元法将其转化为代数方程组,然后结合边界条件求解。

因满足给定边值的拉普拉斯形式的偏微分方程将有唯一的解,故求解拉普拉斯方程又称为边值问题。而求解边值问题又可转化为相应的变分问题,也就是所谓泛函的极值问题。然后利用剖分插值将变分问题离解为普通多元函数的极值问题,最终归结为一组多元的代数方程组,解之即得待求边值问题的数值解。具体可归结为如下几个问题:

- 1) 找出与边值问题相应的泛函及其变分问题。
- 2) 将场域剖分,然后将剖分单元中任意点的未知函数用该剖分单元中形状函数及离散点上的函数值展开,即把连续介质中无限个自由度的问题离散化成有限个自由度的问题。
- 3) 求泛函的极值,导出联立代数方程组,也即有限元方程。
- 4) 用直接法或迭代法计算有限元方程。

#### 1. 线性边值与等价变分

若一个积分

$$I = \int_a^b y(x) dx \quad (8-61)$$

$y(x)$ 是一个可变的被积函数,则  $I$  是函数  $y(x)$  的函数,故称函数的函数为泛函。若研究  $y(x)$  在满足一定的条件下做何变化时可使积分取极值,那么这类问题称为变分问题。

静电场或恒定场一般可用泊松方程 ( $\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon$ ) 或拉普拉斯方程 ( $\nabla^2 \varphi = 0$ ) 来描述。在“数学物理方程”一书中,根据齐次边界条件下泊松方程的一般性质,已证明了它们和下列泛函取极值(即变分问题)的解等价

$$F(\varphi) = -\frac{1}{2} \int_V \epsilon \varphi \nabla^2 \varphi dV - \int_V \rho \varphi dV = \min \quad (8-62)$$

称上式中的积分项对应于泊松方程的泛函。

对轴对称场,若场域(如电缆绝缘)中无自由电荷,即  $\rho=0$ ,则采用圆柱坐标,位函数是  $r$  和  $z$  的函数,即  $\varphi = \varphi(r, z)$ , 故有

$$\begin{cases} F(\varphi) = \int_s \frac{1}{2} \epsilon \left\{ \left( \frac{2\varphi}{2r} \right)^2 + \left( \frac{2\varphi}{2z} \right)^2 \right\} r dr dz = \min \\ \varphi/L_2 = \varphi_0(s) \end{cases} \quad (8-63)$$

这种求极值（即变分）问题，即是用有限元法解电磁场问题的出发点。

## 2. 函数的分片展开及形状函数

在计算变分问题中，里兹法是一种古老的传统方法，它的内容是选取一组线性无关的基函数  $u_1, u_2, \dots, u_n$ ，并令泛函中的被积函数用下列级数展开：

$$\tilde{\varphi} = \sum_{i=1}^n a_i u_i \quad (8-64)$$

式中， $a_i$  是待定常数。将它代入泛函，便有

$$F(\varphi) \approx F(\tilde{\varphi}) = F(a_i) \quad (8-65)$$

令它对每个系数的一阶偏导数等于零，即令

$$\frac{\partial F(a_i)}{\partial a_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

便可得  $n$  个线性联立代数方程组，由此可求出  $n$  个待定系数  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，从而可确定变分问题中的近似解  $\tilde{\varphi}$ 。

用有限元法解题的过程和古老的里兹法非常相似，但对基函数的要求不甚严格，它只要求基函数具有分片连续的特点。在有限元法中需将连续场域剖分成有限个数的单元。如在二维场中，常用三角形或四边形剖分。这样泛函的面积分可表示成每个单元面积分的总和。

剖分时，各单元只能以顶点相交，不同单元的相同顶点电位相等，每个单元顶点的编号顺序需一致。单元中任意点的函数值  $\varphi$  可用单元各顶点的函数值表示为

$$\tilde{\varphi} = \sum_{i=1}^{n_0} N_i^e \varphi_i \quad (8-66)$$

式中， $n_0$  为剖分单元的顶点数； $\varphi_i$  表示单元中各个顶点处的电位值； $N_i^e$  称为单元形状函数。

基函数  $u_i$  应具备完备性、一致性和相容性，即这个基函数中的有限项元和能使  $\tilde{\varphi}$  以任何精度接近于真值  $\varphi$ 。且将式 (8-64) 代入式 (8-63) 能使泛函存在，而且函数在单元边界处连续。

由上述有限元的离散化，在各个三角元  $e$  内，分别给定对于  $x, y$  呈线性变化的插值函数  $\tilde{\varphi}(x, y)$ ，即

$$\tilde{\varphi}(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y \quad (8-67)$$

以此近似替代该三角元内的待求函数  $\varphi(x, y)$ 。式中三个未知数由三角形的三个顶点处的坐标及电位值决定。将它们分别代入上式，有

$$\begin{cases} \tilde{\varphi}(x_i, y_i) = \varphi_i = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i \\ \tilde{\varphi}(x_j, y_j) = \varphi_j = a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j \\ \tilde{\varphi}(x_m, y_m) = \varphi_m = a_1 + a_2 x_m + a_3 y_m \end{cases} \quad (8-68)$$

解上述联立代数方程组，有

$$a_1 = \frac{1}{2\Delta}(a_i \varphi_i + a_j \varphi_j + a_m \varphi_m)$$

$$a_2 = \frac{1}{2\Delta}(b_i \varphi_i + b_j \varphi_j + b_m \varphi_m)$$

$$a_3 = \frac{1}{2\Delta}(c_i\varphi_i + c_j\varphi_j + c_m\varphi_m)$$

上列各式中

$$\begin{cases} a_i = x_j y_m - x_m y_j & a_j = x_m y_i - x_i y_m \\ a_m = x_i y_j - x_j y_i & b_i = y_j - y_m \\ b_j = y_m - y_i & b_m = y_i - y_j \\ c_i = x_m - x_j & c_j = x_i - x_m \\ c_m = x_j - x_i \end{cases} \quad (8-69)$$

及  $\Delta = \frac{1}{2}(b_i c_i - b_j c_j)$ ,  $\Delta$  表示该三角元的面积。

将求出的  $a_1$ ,  $a_2$  和  $a_3$  代入插值多项式 (8-67) 经整理可得

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(x, y) &= \frac{1}{2\Delta}[(a_i + b_i x + c_i y)\varphi_i + (a_j + b_j x + c_j y)\varphi_j + (a_m + b_m x + c_m y)\varphi_m] \\ &= \sum_{i,j,m} N_i^e(x, y)\varphi_i \end{aligned} \quad (8-70)$$

上式表示三角元中任意点电位和该单元各顶点电位值之间的关系。

若用矩阵表示, 上式可写成

$$\tilde{\varphi}(x, y) = [N_i^e N_j^e N_m^e] \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_m \end{bmatrix} = \mathbf{N}_e \boldsymbol{\varphi}_e \quad (8-71)$$

式中

$$\begin{cases} N_i^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i x + c_i y) \\ N_j^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta}(a_j + b_j x + c_j y) \\ N_m^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta}(a_m + b_m x + c_m y) \end{cases} \quad (8-72)$$

式 (8-72) 统称为三节点三角元的形状函数。

### 3. 有限元方程的建立和求解

将式 (8-72) 中的  $x$  用  $r$  替代,  $y$  用  $z$  替代, 便成  $r-z$  轴对称面上的形状函数, 其表达式为

$$\begin{cases} N_i^e(r, z) = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i r + c_i z) \\ N_j^e(r, z) = \frac{1}{2\Delta}(a_j + b_j r + c_j z) \\ N_m^e(r, z) = \frac{1}{2\Delta}(a_m + b_m r + c_m z) \end{cases} \quad (8-73)$$

轴对称场中的单元系数矩阵为

$$\mathbf{K}_e = 2\pi \int_{S_e} \epsilon \mathbf{B}_e^T \mathbf{B}_e r dr dz \quad (8-74)$$

再利用式  $\int_{S_e} r dr dz = (r_i + r_j + r_m) \Delta / 3$  可使上式变为

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_e &= 2\pi\epsilon \mathbf{B}_e^T \mathbf{B}_e \int_{S_e} r dr dz \\ &= \frac{2\pi\epsilon}{12\Delta} (r_i + r_j + r_m) \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_m + c_i c_m \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_m + c_j c_m \\ b_m b_i + c_m c_i & b_m b_j + c_m c_j & b_m^2 + c_m^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_{ii}^e & K_{ij}^e & K_{im}^e \\ K_{ji}^e & K_{jj}^e & K_{jm}^e \\ K_{mi}^e & K_{mj}^e & K_{mm}^e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8-75)$$

系数矩阵中各元素的一般式为

$$K_{ij}^e = \frac{2\pi\epsilon}{12\Delta} (r_i + r_j + r_m) (b_i b_j + c_i c_j) \quad (i, j, m) \quad (8-76)$$

若场域剖分成  $e_0$  个单元, 共有  $N_0$  个节点, 则其泛函为

$$F(\tilde{\varphi}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} K_{ij} \varphi_i \varphi_j = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} \quad (8-77)$$

式中,  $\mathbf{K}$  是  $N_0$  阶方阵, 而  $\boldsymbol{\varphi}$  是由  $N_0$  个节点电位组成的列阵。求  $F(\tilde{\varphi})$  的极值时, 必须令  $F(\tilde{\varphi})$  对每个节点电位的一阶偏导数为零, 即令

$$\frac{\partial F(\tilde{\varphi})}{\partial \varphi_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N_0) \quad (8-78)$$

将式 (8-77) 代入上式, 可得

$$\sum_{j=1}^{N_0} K_{ij} \varphi_j = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N_0) \quad (8-79)$$

写成矩阵形式, 有

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{0} \quad (8-80)$$

上式便是拉普拉斯方程的有限元方程, 它是联立线性代数方程组。

通常把解线性代数方程组的方法分成直接法和迭代法两类。对电缆终端的电场, 因方程组的阶数不高, 采用直接法较好。由于位于边界  $L_i$  上的节点电位值是被给定的, 即是“强加的”, 必须对强加边界条件进行处理, 即把强加边界条件综合到有限元方程中去。

## 二、等位线的绘制与电场强度的计算

为了形象地描述电场的分布, 需画出电场的等位线图, 其中相邻的等位线间的电位差相等, 这样从等位线分布的疏密程度, 就可以判断电场强度的强弱。

为描绘等位线, 需在已知各节点电位值的基础上, 求出对应于各条等位线的空间函数。实践中常用插值方法建立待求函数的近似式。

设需用线性插值法绘制电位为  $\varphi_1$  的等位线, 首先将  $\varphi_1$  与全部剖分单元上节点的电位值  $\varphi_i$ 、 $\varphi_j$  和  $\varphi_m$  进行比较, 若  $(\varphi_1 - \varphi_i) \times (\varphi_1 - \varphi_j) < 0$ , 则表示  $\varphi_1$  值介于  $\varphi_i$  和  $\varphi_j$  值之间, 然后可用线性插值公式找出电位等于  $\varphi_1$  的相应插值点的空间坐标。设节点  $i$  的坐标为  $x_i$ ,  $y_i$ ; 节点  $j$  的坐标为  $x_j$ ,  $y_j$ , 而对应于电位为  $\varphi_1$  值的待求插值点的空间坐标为  $x$ 、 $y$ , 则上

述线性插值公式可综合为

$$T = (\varphi_i - \varphi_1) / (\varphi_i - \varphi_j)$$

$$x = (1 - T)x_i + Tx_j$$

$$y = (1 - T)y_i + Ty_j$$

于是把一系列插值点相连，即得所欲绘制的电位为  $\varphi_1$  的等位线。同理，可逐一地求出各条等位线，描绘出待求电场的等位线图。

电缆附件装置的设计，最需要知道其电场强度的分布，特别是最大电场强度的分布情况。因此，在求得各离散点电位值的基础上，需计算有关场域中的电场强度。

将式 (8-70) 分别对  $x$  及  $y$  求导，可得电场强度沿  $x$  方向及  $y$  方向的分量：

$$E_x = -\frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial x} = -\frac{1}{2\Delta}(b_i\varphi_i + b_j\varphi_j + b_m\varphi_m)$$

$$E_y = -\frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial y} = -\frac{1}{2\Delta}(c_i\varphi_i + c_j\varphi_j + c_m\varphi_m)$$

因在每一个单元中各点的  $E_x$  和  $E_y$  分别相等，即在每个单元内部，电场强度  $E$  为一个定值，但位于单元周界上的节点一般与相邻几个单元发生联系。为了将有关单元的场强综合计算出该节点的场强，可分别总和有关单元的  $E_x$  和  $E_y$ ，然后取其算术平均值，即

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} / n, E_y = \sum_{i=1}^n E_{yi} / n$$

$n$  系指与指定节点相关的单元数。

### 三、计算实例

15kV 预制式终端接头盒如图 8-25 所示。结构尺寸如表 8-6 所示。

表 8-6 预制式终端盒有关尺寸

(mm)

$D$	$l_1$	$k$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$d$
100	30	5	50	5	2	73.92

图 8-25 为采用电场模拟绘出的等位线分布图，以和采用有限元法计算的结果相比较。图 8-26 为用有限元法计算机绘制的剖分图，图 8-27 为用计算机绘制的等位线图。

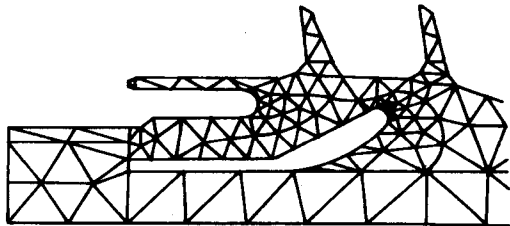


图 8-26 有限元法剖分图

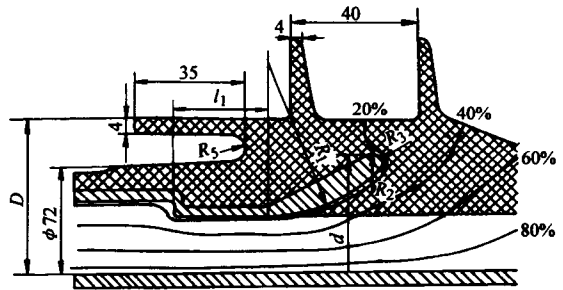


图 8-25 预制式终端头结构尺寸  
和电场模拟等位线分布图

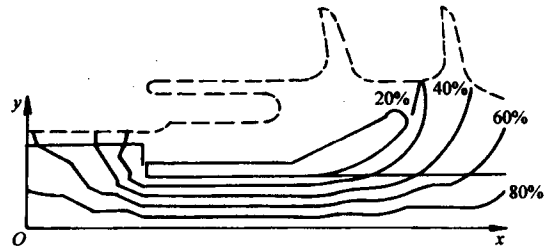


图 8-27 有限元法等位线分布图

表 8-7 为应力锥附近场强的计算结果。

表 8-7 应力锥附近部分节点的场强

$(R, Z) / \text{mm}$	$E / (\text{V} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(R, Z) / \text{mm}$	$E / (\text{V} \cdot \text{mm}^{-1})$
(6.910, 0.000)	2495.0020	(11.790, 25.000)	737.0145
(8.600, 2.033)	2278.0890	(13.270, 16.044)	725.0795
(6.910, 4.066)	2098.8090	(11.180, 2.400)	690.1770
(8.600, 6.099)	1838.4120	(10.310, 30.000)	666.6975
(6.910, 8.132)	1762.9030	(6.910, 40.000)	640.4090
(10.310, 4.066)	1636.1770	(13.270, 20.000)	639.3103
(8.600, 10.110)	1585.7970	(11.790, 35.000)	637.3221
(6.910, 12.088)	1549.9160	(8.610, 40.000)	619.8970
(8.600, 14.066)	1422.1930	(13.270, 8.132)	602.6192
(6.910, 16.044)	1421.9800	(10.310, 40.000)	586.2250
(10.310, 8.132)	1349.4550	(8.610, 25.000)	582.2762
(8.600, 18.022)	1338.0200	(11.790, 4.066)	543.2789
(10.310, 0.000)	1205.2370	(13.270, 30.000)	425.0456
(6.910, 20.000)	1188.8580	(24.000, 20.000)	389.5903
(10.310, 12.088)	1178.0210	(14.710, 12.088)	349.3395
(11.100, 6.099)	1171.0970	(16.150, 16.044)	332.9041
(10.310, 16.044)	1074.2950	(13.270, 40.000)	235.8239
(10.310, 20.000)	1037.3060	(34.000, 20.000)	216.2899
(11.900, 10.110)	957.9911	(17.590, 20.000)	157.9944
(8.610, 25.000)	956.5752	(14.400, 0.000)	0.0000
(11.790, 14.066)	849.7306	(13.200, 2.000)	0.0000
(13.270, 12.088)	832.6446	(17.590, 15.000)	0.0000
(11.790, 18.022)	783.6342	(15.400, 6.000)	0.0000
(6.910, 30.000)	747.3452	(16.000, 2.000)	0.0000



## 第九章 直流电力电缆

交流输电系统虽然能十分便捷地将电能传输到用户，但损耗较大。这主要是导电芯损耗、介质损耗、金属屏蔽层损耗和铠装层损耗等使总的传输功率近 1/5 左右消耗在输送过程中。对于远距离输电，电缆的电容电流亦严重地影响传输电流。当电缆的长度达到临界长度时，发送的电流几乎全部转为电容电流。如越海输电，用交流输电采用电抗器等补偿措施十分困难，海上不可能架设杆塔，故远距离输电，尤其越海输电须采用高压直流输电 (HVDC)。

### 第一节 直流输电的基本原理

高压直流输电系统的简单原理如图 9-1 所示。发电厂发出的交流电经变压器将电压升高后接至整流器，由整流器将高压交流变为高压直流，经过直流输电线路输送到受端。又经过逆变器重新将直流换成交流，再经变压器降压后供给用户使用。整流器和逆变器总称为换流装置。目前主要采用晶闸管换流装置，既解决了直流升压的问题，又保证了用直流高压输电的优点，且不存在发电机之间保持同步运行的问题，使电力系统的稳定性得到了控制。

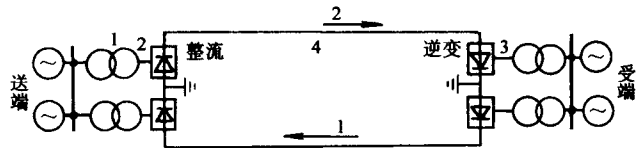


图 9-1 直流输电的基本接线方式

1—变压器 2, 3—晶闸管整流器和逆变器 4—直流高压线路

一般为双极直流输电线路，该线路具有两根导线，一根是正极，另一根是负极。每端有两组额定电压相等在直流侧相互串联的换流装置。如两侧的中性点（两组换流装置的联接点）接地，线路两极可独立运行。正常运行时以相同的电流工作，中性点与大地中没有电流，而当一根导线故障时，另一根以大地作回路，可带一半的负电荷，从而提高了运行的可靠性。

直流输电线路成本较低。三相交流线路要用三根导线，而直流输电线路则只需两根（正、负极）导线。若以大地或海水为回路，甚至只要一根导线。故传输相同的功率，成本却为交流的 1/3 左右。损耗小，没有介质中的极化损耗，也没有金属护套和铠装损耗，没有电容电流的影响。直流耐电强度大大高于交流的耐电强度，如交流 35kV 的电缆可适用于直流 100kV 左右。另外，当交直流线路并列运行时，可以迅速调节，限制短路电流等优点。

但直流的换流设备造价较高，当输电距离增加到一定值时，直流线路所节省的费用刚好抵偿了换流站所增加的费用，即交直流输电线路和两端设备总费用相等，该距离称为交直流输电的等价距离，对架空线路大约为 500~800km，对电缆线路大约为 20~50km。显然，当输电距离大于等价距离时，用直流比用交流经济，反之则宜用交流输电。

直流的换流设备造价较高，当输电距离增加到一定值时，直流线路所节省的费用刚好抵偿了换流站所增加的费用，即交直流输电线路和两端设备总费用相等，该距离称为交直流输电的等价距离，对架空线路大约为 500~800km，对电缆线路大约为 20~50km。显然，当输电距离大于等价距离时，用直流比用交流经济，反之则宜用交流输电。

直流电缆的结构和交流电缆基本相同。主要是绝缘设计差异较大。直流电缆的绝缘结构设计依然是根据其电场分布决定的。

## 第二节 直流电缆绝缘的设计特点

### 一、直流电压下的电场分布

在直流电压作用下，绝缘内的电场强度与电阻率成正比分布，或与电导率  $\gamma$  成反比分布。电缆在运行中，线芯通以高压大容量的电流，由此而产生的线芯损耗会使电缆内的温度升高。而温度分布是不均匀的，电阻率也会受温度的影响而发生变化。

电阻率和温度的关系可写为

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha\theta} \quad (9-1)$$

式中， $\rho_0$  为  $0^\circ\text{C}$  时的电阻系数； $\theta$  为工作温度； $\alpha$  为温度系数。

据稳态热性计算，绝缘层中的温度分布公式为

$$\theta = \theta_c - \frac{\theta_c - \theta_s}{\ln \frac{R}{r_c}} \ln \frac{r}{r_c} \quad (9-2)$$

式中， $\theta_c$  为导电线芯温度； $\theta_s$  为金属屏蔽层温度； $r_c$  为导电线芯半径； $R$  为绝缘层外半径； $r$  为绝缘中任意一点到电缆中心距离。

将式 (9-2) 代入式 (9-1) 可得

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha\theta_c} \left(\frac{r}{r_c}\right)^\beta \quad (9-3)$$

式中， $\beta = \alpha \frac{\theta_c - \theta_s}{\ln \frac{R}{r_c}}$ 。

对于单位长度电缆绝缘电阻

$$R_i = \int_{r_c}^R \rho \frac{dr}{2\pi r} = \frac{\rho_0 e^{-\alpha\theta_c}}{\beta 2\pi r_c^\beta} (R^\beta - r_c^\beta) \quad (9-4)$$

据恒定电场，绝缘内任意一点处的场强为

$$E = \rho\delta = \rho \frac{I_i}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi r} \frac{U_0}{R_i} \quad (9-5)$$

将式 (9-4) 代入式 (9-5) 可得

$$E = \frac{U_0 \beta r^{\beta-1}}{R^\beta - r_c^\beta} \quad (9-6)$$

式 (9-6) 描述了直流电压下电场强度分布的特点。因  $\theta_c - \theta_s = W_c \frac{\rho_{T_1}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_c}$  故

$$\beta = \frac{\alpha (\theta_c - \theta_s)}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{\alpha W_c}{2\pi} \rho_{T_1} \quad (9-7)$$

故可认为  $E = f(\beta) = f(W_c)$ ，线芯损耗决定了  $\beta$  的大小，而  $\beta$  的变化又直接影响了  $E$  的变化。

(1) 当  $\beta = 0$  即  $\theta_c = \theta_s$ ，相当于负载为零，而  $E = \frac{0}{0}$  为不定型。但为均匀介质，电导率  $\gamma$  不受温度的影响，即为定值。据电磁场理论，解恒定电场的问题，可应用相应的静电场的

分析方法，则有

$$U = \int_{r_c}^R E dr = rE \ln \frac{R}{r_c} \quad (9-8)$$

故

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_c}} \quad (9-9)$$

从上式可知此时场强的分布和交流电压下的场强分布相同。最大场强出现在导电线芯表面，而绝缘层表面场强最小。

(2) 当  $\beta=1$  时据式 (9-6) 可知

$$E = \frac{U}{R - r_c} \quad (9-10)$$

电缆相当于平行平板电容器，绝缘中电场均匀分布。

(3) 当  $\beta < 1$  时， $r^{\beta-1}$  为负指数， $E$  随  $r$  增加而减少，但比  $\beta=0$  时要均匀；当  $\beta > 1$  时  $r^{\beta-1}$  为正指数， $E$  随  $r$  增加而增加，最大场强有可能出现在绝缘层表面。即加上负载后，最大场强有向绝缘层表面移动的趋势。

因此，在设计直流电缆时，不仅应保证在无载时线芯表面电场强度不能超过其允许值，而且还应保证电缆在容许最大负载时，绝缘层表面处的电场强度不超过其允许值。

## 二、直流电缆的设计特点

目前直流电缆还主要使用油纸绝缘，大多采用充油电缆。由于在直流电压下，场强和电导率  $\gamma$  成反比，故绝缘中的气隙等弱点承受的场强较小，电场分布合理。基本消除了局部放电，所以击穿强度大大高于交流下的击穿强度。充油电缆的击穿场强可保持在 100kV/mm 左右，最大工作场强可选取 30~45kV/mm。

具体场强可详见表 9-1。

表 9-1 直流电缆绝缘材料击穿强度

电缆种类		粘性浸渍纸绝缘电缆		充油电缆	聚乙烯及交联 聚乙烯电缆
		新电缆	旧电缆 (浸渍剂流失)		
直流击穿强度 (MV/m)	常温	100~110	35~40	110~120	80~100
	60°C	35~90	—	—	—
	80°C	—	—	100~110	—
交流击穿强度 (MV/m)	短时间	40	—	—	—
	长时间	18~20	—	45~50	30~40
脉冲击穿强度 (MV/m)	常温	100~110	45	100~110	70~130
	80°C	90~100	—	90~100	50~80

在直流电缆运行过程中，有时为了改变能量传递方向，需改变电缆的极性。在电缆带有负载的情况下，改变电缆的极性可能使电缆内部场强增加 50%~70%。国际大电网会议建议极性转换试验在 1.5 倍工作电压下进行，这相当于电缆缓慢加上 2.5 倍工作电压，也就是说，电缆工作场强应低于绝缘材料击穿强度的  $\frac{1}{2.5}$ 。

对大气过电压和内部过电压，可用下式确定其脉冲水平：

$$BIL \geq m (U_p + kU_0) \quad (9-11)$$

式中,  $U_p$  为系统保护水平;  $U_0$  为额定工作电压;  $k$  为常数, 取  $(0.4 \sim 0.99)$ ;  $m$  为安全系数。

在设计充油电缆时, 由于采用工作场强较高, 应对内外过电压进行核算, 以保证在内外过电压下有足够的安全裕度。

直流电缆的结构和交流电缆基本相同。对于附件, 亦应考虑温度对场强分布的影响。

目前世界上已有十多个国家和地区都已有了直流输电工程, 总容量为 1400 万千瓦左右, 我国目前也正在建设葛洲坝—上海的  $\pm 500\text{kV}$  的直流输电工程, 预计随着我国一些大型水电中心和跨海输电工程的建设, 直流输电还会有较大的发展。

在英国, 随着供电负荷的不断增长, 1972 年在伦敦完成了全部地下电缆线路的直流输电工程。在大城市选择地下大功率直流输电的依据是: 1) 距离为  $30 \sim 40\text{km}$  的直流电缆线路的造价已低廉很多, 它能抵偿价值高昂的换流站设备的造价; 2) 受端系统的短路电流不再增大, 无需用更大的断路器去代替现有的断路器; 3) 具有交流系统运行方式的改变不影响传输功率调节的优越性, 这就提高了系统的稳定性和用户供电的可靠性。

图 9-2 为英国肯格斯纳特—伦敦的直流输电线路示意图。肯格斯纳特 (泰晤士河出口) 新热电站的电能将沿此线进行传输。它通过在城区相距  $22\text{km}$  的两个逆变站向地方交流电网输送  $640\text{MW}$  的补充功率。

该线路采用的是直流充油电缆。电缆的护层采用铝护套和塑料组成的组合护层。高压电缆相线的冲击绝缘强度在波  $1/50\mu\text{s}$  时为  $800\text{kV}$ , 零线电缆为  $150\text{kV}$ 。

肯格斯纳特—伦敦输电是第一个将  $400\text{kV}$  与  $132\text{kV}$  电网相连, 进行大功率直流输电。它表明, 用直流输电加强高压交流电网是有着广阔前途的。

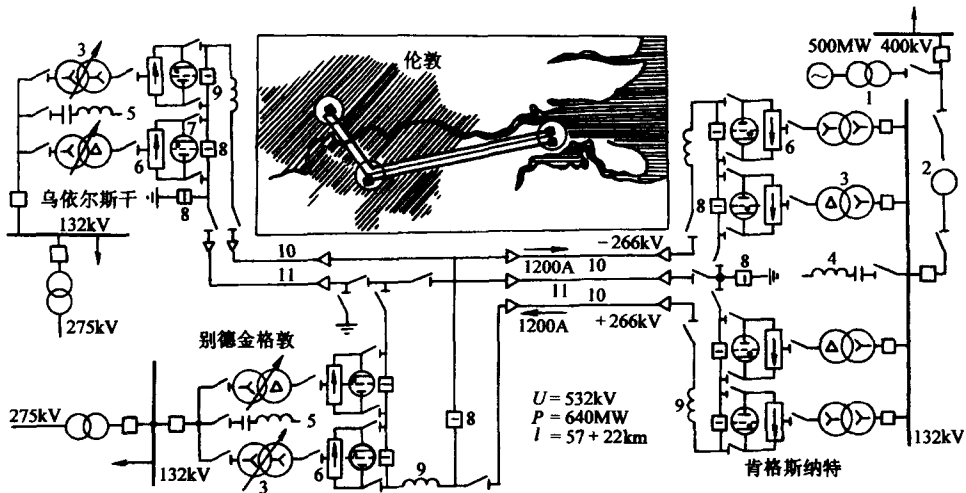


图 9-2 具有电缆线路 ( $\pm 266\text{kV}$ ) 的肯格斯纳特—伦敦直流输电接线

1—发电机变压器组/500MW 2—自耦变压器,  $400/132\text{kV}$ ,  $700\text{MV}\cdot\text{A}$  3—变压器,  $190\text{MV}\cdot\text{A}$

4—交流滤波器, 其次数为  $n=5, 7, 11, 13$  和更高频/ $120\text{MV}\cdot\text{A}$  5—同上,  $55\text{MV}\cdot\text{A}$  6—阀桥/ $133\text{kV}$ ,  $160\text{MW}$

7—旁路阀, 汞弧四阳极 8—旁路装置 9—线路电抗器/ $0.55\text{H}$  10—电缆/ $\pm 266\text{kV}$ ,  $1200\text{A}$  11—零线电缆/ $1200\text{A}$

## 第十章 电缆的试验和运行中的故障测寻

### 第一节 电力电缆的试验

电力电缆的试验主要指在电缆生产和安装敷设后所应进行的试验。其项目一般分为四类：例行试验、抽样试验、型式试验和安装敷设后检查及预防性试验。

例行试验是制造厂对所有电缆成品长度均应进行的试验，以证明电缆总体性能，它可发现电缆生产过程中偶然性缺陷，校验电缆产品质量是否与设计要求一致。

抽样试验也称特殊试验，它是根据一定取样规则，从一批产品中抽出一部分电缆长度进行的试验。与例行试验目的一样，但因它试验手续比较复杂，或在试验过程中可能损伤电缆，故仅取一部分试样进行试验。

型式试验主要是对新型产品被大量使用前所作的试验。经过型式试验证明该产品能满足运行提出的性能要求，或经过型式试验可以在较短时间确定新产品相对老产品的质量和新产品的寿命。除非电缆的材料、工艺或设计有变化并可能影响其性能，产品的型式试验不必重复。

敷设后检查及预防性试验，电缆安装敷设完毕后进行检查试验的目的是用来检查电缆安装敷设的质量，在安装敷设过程中有否严重损伤电缆。预防性试验或电缆定期检查试验，主要用来事先发现电缆使用过程中电缆的损伤，使电缆能及时修理和调换，以免发生意外停电事故或引起更大的故障。

不同电压等级和不同型式的电缆，试验的内容也不尽相同，现根据国际电工委员会标准和国家有关标准分别予以介绍。

#### 一、额定电压 35kV 及以下塑料绝缘电力电缆的试验 (GB12706.1—91)

##### 1. 例行试验 (试验类型代号 R)

(1) 导体直流电阻试验 导体直流电阻应符合 GB3957 及表 2 的规定。

多芯电缆的导体直流电阻试验应在成盘电缆的所有导体上进行。

(2) 局部放电试验 额定电压  $U_0$  为 3.6kV 以上聚氯乙烯绝缘电缆和额定电压  $U_0$  为 1.8kV 以上交联聚乙烯、聚乙烯绝缘电缆应进行局部放电试验。

多芯电缆的局部放电试验应在电缆的所有绝缘线芯上进行。

试验应在成盘电缆上进行。施加交流电压  $1.5U_0$  时，聚氯乙烯绝缘电缆的放电量应不大于 40pC。额定电压  $U_0$  为 18kV 及以下的交联聚乙烯，聚乙烯绝缘电缆放电量应不大于 20pC；额定电压  $U_0$  为 18kV 以上的交联聚乙烯绝缘电缆放电量应不大于 10pC。

(3) 交流电压试验 试验应在成盘电缆上进行。试验可采用交流电压，也可采用直流电压，电缆按下列规定施加电压，持续 5min，试验过程中绝缘应不发生击穿。

额定电压  $U_0$  为 3.6kV 及以下电缆：

$$2.5U_0 + 2kV$$

额定电压  $U_0$  为 3.6kV 以上电缆：

$$2.5U_0$$

对应各额定电压的单相试验电压值如表 10-1 规定。

表 10-1

(kV)

额定电压 $U_0$	0.6	1.8	3.6	6	8.7	12	18	21	26
试验电压	3.5	6.5	11	15	22	30	45	53	65

若用三相变压器对三芯电缆进行试验时，相间试验电压应为表 10-1 规定值的 1.73 倍。采用直流电压试验时，其数值应为表 10-1 规定值的 2.4 倍。

### 2. 抽样试验 (试验类型代号 S)

(1) 抽样试验的频度 结构尺寸检查应在每批同一型号及规格电缆中的一根制造长度电缆上进行，其数量应不超过交货批长度数量的 10%。

交货批中多芯电缆总长度超过 2km，单芯电缆总长度超过 4km，可根据表 10-2 确定抽取的试样数。

表 10-2

电缆交货长度 $L/km$		试样数	电缆交货长度 $L/km$		试样数
多芯电缆	单芯电缆		多芯电缆	单芯电缆	
$2 < L \leq 10$	$4 < L \leq 20$	1	$20 < L \leq 30$	$40 < L \leq 60$	3
$10 < L \leq 20$	$20 < L \leq 40$	2	余类推		余类推

(2) 结构检查 导体结构、绝缘厚度、铠装及非金属外护套结构尺寸均应符合 GB12706.1—91 的有关规定。标称截面相等的 3 芯或 4 芯电缆，可取任意 3 个绝缘线芯进行检查。如果用户有要求，应提供电缆外径的实测数据。

(3) 4h 交流电压试验 额定电压  $U_0$  为 3.6kV 以上电缆应进行 4h 交流电压试验。除终端外，成品电缆试样长度应不少于 5m，按表 10-3 规定施加交流电压（试验电压为  $4U_0$ ），持续时间 4h。试验过程中绝缘应不发生击穿。

表 10-3

(kV)

额定电压 $U_0$	0.6	1.8	3.6	6	8.7	12	18	21	26
试验电压	2.4	7.2	14.4	24	34.8	48	72	84	104

(4) 热延伸试验 交联聚乙烯绝缘应进行热延伸试验。试验条件及要求应符合表 10-3 的规定。

### 3. 型式试验 (试验类型代号 T)

(1) 额定电压  $U_0$  为 3.6kV 以上聚氯乙烯绝缘电缆和额定电压  $U_0$  为 1.8kV 以上交联聚乙烯、聚乙烯绝缘电缆的电气性能试验。

试样为一段成品电缆、除附件外，试样长度为 10~15m。除特殊规定外，所有试验应依次在同一试样上进行。多芯电缆的每项试验或测量应在所有的绝缘线芯上进行。正常试验顺序规定如下：

- 1) 局部放电试验；
- 2) 弯曲试验后的局部放电试验；
- 3)  $\text{tg}\delta$  与电压关系试验；

- 4)  $\text{tg}\delta$  与温度关系试验;
- 5) 热循环试验后的局部放电试验;
- 6) 冲击电压试验及交流电压试验;
- 7) 4h 交流高电压试验。

试验内容从略,只是冲击电压试验须将电缆试样加热,使试样导体温度比电缆最高额定温度高  $5^{\circ}\text{C}$ ,接着按表 10-4 规定对电缆试样施加冲击电压,正负极性各 10 次,试样应不击穿。

表 10-4

(kV)

额定电压 $U_0$	3.6	6	8.7	12	18	21	26
试验电压	60	75	95	125	170	200	250

冲击电压试验后,还应对同一试样按表 10-1 施加交流试验电压 15min 和按表 10-3 施加交流试验电压 4h, 电缆试样应不击穿。

(2) 额定电压  $U_0$  为 3.6kV 及以下聚氯乙烯绝缘电缆和额定电压  $U_0$  为 1.8kV 及以下交联聚乙烯、聚乙烯绝缘电缆的电气性能试验,主要是绝缘电阻的试验。另外还要进行 4h 交流高电压试验。试验前去除所有外包复层,将绝缘线芯浸入室温水,浸水时间应不少于 1h。按表 10-3 规定对绝缘线芯试样施加交流试验电压 4h, 试样应不击穿。

(3) 机械物理性能试验 老化前和老化后绝缘机械性能试验,试验条件和试验结果应符合表 10-5 的规定。

表 10-5 绝缘机械性能试验

序号	试验项目	PVC-II		XLPE	PE
		A	B		
	导体最高额定温度/ $^{\circ}\text{C}$	70	70	90	70 <sup>①</sup>
1	老化前机械性质				
1.1	抗张强度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$ (最小)	12.5	12.5	12.5	10.0
1.2	断裂伸长率/% (最小)	150	125	200	300
2	空气箱老化后机械性能				
	处理条件: 温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	100	135	100
	温度偏差/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 2$
	持续时间/d	7	7	7	10
2.1	最小抗张强度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	12.5	12.5	—	—
	最大抗张强度化率/%	$\pm 25$	$\pm 25$	$\pm 25$	—
2.2	最小断裂伸长率/%	150	125	—	300
	最大断裂伸长率变化率/%	$\pm 25$	$\pm 25$	$\pm 25$	—

① 高密度聚乙烯为  $75^{\circ}\text{C}$

老化前和老化后护套机械性能试验,试验条件和试验结果应符合表 10-6 的规定。

表 10-6 护套机械性能试验

序号	试验项目	PVC-S1	PVC-S2	PE-S
1	老化前机械性能			
1.1	最小抗张强度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	12.5	12.5	10.0
1.2	最小断裂伸长率/%	150	150	300
2	空气箱老化后机械性能			
	处理条件: 温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	100	100	100
	持续时间/h	7	7	10

(续)

序号	试验项目	PVC-S1	PVC-S2	PE-S
2.1	最小抗张强度 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	12.5	12.5	—
	最大抗张强度变化率/%	$\pm 25$	$\pm 25$	—
2.2	最小断裂伸长率/%	150	150	300
	最大断裂伸长率变化率/%	$\pm 25$	$\pm 25$	—

另外还须对成品电缆段进行附加老化试验, 和对绝缘及护套进行一些特殊试验。试验项目及内容如表 10-7, 表 10-8 和表 10-9 所规定, 限于篇幅, 读者可详阅 IEC 和有关国家标准。

表 10-7 PVC 绝缘和护套特殊试验

序号	试验项目	PVC-11		PVC-S1	PVC-S2
		A	B		
1	失重试验				
1.1	处理条件: 温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	—	—	—	100
	持续时间/d	—	—	—	7
1.2	最大失重 / ( $Mg \cdot cm^{-2}$ )	—	—	—	1.5
2	高压压力试验				
2.1	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	80	80	80	90
2.2	最大压痕深度/%	50	50	50	50
3	低温性能试验				
3.1	未老化前的低温卷绕试验				
	最大冷弯试验电缆直径/mm	12.5	12.5	12.5	12.5
	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	-15	-5	-15	-15
3.2	低温拉伸试验				
	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	-15	-5	-15	-15
3.3	低温冲击试验				
	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	—	—	-15	-15
4	抗开裂 (热冲击) 试验				
4.1	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	150	150	150	150
4.2	持续时间/h	1	1	1	1
5	热稳定性试验				
5.1	试验温度 (偏差 $\pm 0.5^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	—	200	—	—
5.2	最少持续时间/min	—	100	—	—
6	吸水试验				
6.1	电压法				
6.1.1	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	70	—	—	—
6.1.2	持续时间/d	10	—	—	—
6.2	重量法				
6.2.1	试验温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}C$ ) / $^{\circ}C$	—	85	—	—
6.2.2	持续时间/d	—	14	—	—
6.2.3	最大重量变化值 / ( $mg \cdot cm^{-2}$ )	—	10	—	—

表 10-8 聚乙烯绝缘和护套特殊试验

序号	试验项目	PE	PE-S
1	密度 <sup>①</sup>		
2	熔体指数		
2.1	最大老化前熔体指数 ( $0.1g \cdot min^{-1}$ )	0.4	0.4
3	炭黑含量/% (最小)	—	2.0
4	吸水试验 (重量法)		



(续)

序号	试验项目	PE	PE-S
4.1	温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	85	—
4.2	持续时间/d	14	—
4.3	最大重量变化 / ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	1	—
5	收缩试验		
5.1	温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	100	—
5.2	时间/h	1	—
5.3	最大收缩率/%	4	—

① 密度的测定, 仅在其他试验有需要时才进行。

表 10-9 交联聚乙烯绝缘特殊性能试验

序号	试验项目	XLPE
1	热延伸试验	
	空气温度 (偏差 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	200
	处理条件载荷时间/min	15
	机械应力 / ( $\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	20
1.1	最大负载下伸长率/%	175
1.2	最大冷却后永久伸长率/%	15
2	吸水试验 (重量法)	
2.1	温度 (偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	85
2.2	时间 d	14
2.3	最大重量变化 ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	1 <sup>1)</sup>
3	收缩试验	
3.1	温度 (偏差 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) / $^{\circ}\text{C}$	130
3.2	时间/h	1
3.3	最大收缩率/%	4

注: 对密度大于 1 的交联聚乙烯正在考虑重量变化大于  $1\text{mg}/\text{cm}^2$  的要求。

二、额定电压 35kV 及以下的纸绝缘电力电缆的试验和塑料绝缘电力电缆的试验基本相同, 读者可参阅 GB12976.1-91。

三、额定电压 110kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆的实验项目及方法如表 10-10 规定。

表 10-10

序号	试验项目	标准条款 <sup>①</sup>	试验类型	试验方法
1	局部放电试验	11.2.1	R	GB3048.12
2	交流电压试验	11.2.2	R	GB3048.8
3	非金属外护套直流电压试验	11.2.3	R	本标准 11.2.3 和 GB2951.2~4
4	结构尺寸检查	11.3.1	S	本标准 11.3.1
5	导体直流电阻试验	11.3.2	S	GB3048.4
6	电容试验	11.3.3	S	GB3048.11
7	交联聚乙烯绝缘热延伸试验	11.3.4	S	GB2951.18
8	绝缘厚度检查	11.4.1.1	T	GB2951.2
9	弯曲试验及随后的局部放电试验	11.4.1.4	T	GB2951.23
10	$\text{tg}\delta$ 试验	11.4.1.5	T	GB3048.11
11	热循环电压试验及随后的局部放电试验	11.4.1.6	T	GB3048.8 和 GB3048.12
12	冲击试验及随后的交流电压试验	11.4.1.7	T	GB3048.8
13	结构尺寸检查	11.4.2.1	T	GB2951.2~4 和本标准 11.3.1
14	半导电层电阻试验	11.4.2.3	T	本标准附录 A

(续)

序号	试验项目	标准条款 <sup>①</sup>	试验类型	试验方法
15	绝缘层微孔和杂质试验	11.4.2.4	T	本标准附录 B
16	半导体层微孔和杂质试验	11.4.2.4	T	本标准附录 B
17	绝缘和护套机械性能试验	11.4.2.5 和 11.4.2.6	T	GB2951.5 及 .7
18	成品电缆材料相容性老化试验	11.4.2.7	T	本标准 11.4.2.7
19	聚氯乙烯护套高温压力试验	11.4.2.8	T	GB2951.16
20	聚氯乙烯护套低温性能试验	11.4.2.9	T	GB2951.13
21	聚氯乙烯护套抗开裂(热冲击)试验	11.4.2.10	T	GB2951.31
22	交联聚乙烯绝缘热延伸试验	11.4.2.11	T	GB2951.18
23	聚乙烯护套碳黑含量试验	11.4.2.12	T	GB2951.38
24	交联聚乙烯绝缘收缩试验	11.4.2.13	T	GB2951.33
25	聚氯乙烯护套电缆不延燃试验	11.4.2.14	T	GB2951.19

① 标准指 GB11017—89。

例行试验中的交流电压试验规定试验应在成盘电缆上进行。在室温下在导体和金属屏蔽之间施加交流电压  $160\text{kV}$  ( $2.5U_0$ )，保持 30min，绝缘应不发生击穿。

型式试验(试验类型代号 T)中的冲击电压试验及其随后的交流电压试验规定将试样导体加热到  $100\sim 105^\circ\text{C}$ ，对电缆试样施加  $550\text{kV}$  冲击试验电压，正负极性各 10 次，电缆应不击穿，随后进行交流电压试验，电缆试样在交流电压  $160\text{kV}$  ( $2.5U_0$ ) 下，保持 15min，电缆应不击穿。

其他试验详见 GB11017—89。

四、交流 330kV 及以下油纸绝缘自容式充油电缆的试验项目和方法如表 10-11 的规定。

表 10-11

序号	检查项目	标准条文	试验类型	试验方法
1	结构			
1.1	导体	6.1	S	目测
1.2	绝缘及屏蔽	6.3, 6.2	S	本标准第 7.3.1.2 条
1.3	铅护套	6.4	S	本标准第 7.3.1.3 条
1.4	外护层	6.5	S	GB2951.3
2	导体直流电阻试验	7.2.1	R	GB3048.4
3	电容试验	7.2.2	R	GB3048.11
4	介质损失角正切试验	7.2.3	R	GB3048.11
5	交流电压试验	7.2.4	R	GB3048.8
6	护套直流耐压试验	7.2.6	R	本标准第 7.2.6 条
7	铅护套密封性试验	7.2.5	R	本标准第 7.2.5 条
8	电缆油样试验	7.2.7	R	GB507
9	机械性能试验	7.3.2	S	本标准第 7.3.2 条
10	铅护套扩张试验	7.3.3	S	本标准第 7.3.3 条
11	介质损失角正切/温度试验	7.4.1	T	GB3048.11
12	交流长期耐压试验	7.4.2	T	GB3048.8
13	雷电冲击电压试验	7.4.3	T	GB311
14	操作冲击电压试验	7.4.4	T	GB311
15	铅护套和加强层液压试验	7.4.5	T	本标准第 7.4.5 条
16	外护层沥青滴出试验	7.4.6	T	本标准第 7.4.6 条
17	外护套刮磨试验	7.4.7	T	本标准第 7.4.7 条

注：标准系指 GB9326.2—88。

例行试验中的交流电压试验，成品电缆应经受表 10-12 规定的工频电压试验（亦可用直流电压试验代替），绝缘不应击穿。

试验在环境温度下进行，施加电压持续时间为 15min。

表 10-12 (kV)

额定电压		试验电压		
		例行试验、抽样试验		型式试验 交流
U	U <sub>0</sub>	交流	直流	
110	64	138	330	160
220	130	225	545	325
330	200	345	825	445

型式试验中的雷电冲击电压试验，是将电缆试样导体加热到 80°C，偏差 +5°C，至少保持 2h 后施加表 10-13 所规定的冲击试验电压（峰值）正、负极性各 10 次，绝缘应不击穿。

表 10-13 (kV)

额定电压	雷电冲击试验电压	操作冲击试验电压
110	450	—
	550	—
220	950	—
	1050	—
330	1175	850
	1300	950

冲击电压试验完成后，电缆试样应在环境温度下或在冷却过程中任何温度下进行工频电压试验。可按例行试验中的交流电压试验，电缆绝缘应不击穿。操作冲击电压试验可按表 10-13 规定进行。

交流长期耐压试验可在环境温度下进行，电缆应耐受表 10-12 规定的工频试验电压 24h，绝缘应不击穿。

其余试验可参阅 GB9326.2-88 进行。

## 第二节 电力电缆在运行过程中的故障测寻

### 一、电力电缆故障产生的原因和类别

电力电缆经过敷设和运行使用，由于各种原因，就会产生故障，影响电力网的安全运行。必须及时分清故障原因，准确判断故障点，从而消除故障，或更换新的电缆。

#### 1. 电缆故障产生的原因

(1) 电缆绝缘的破坏 这是故障产生的主要原因。特别是塑料绝缘电力电缆，绝缘在长期电场作用下，就会发生树枝化放电，使绝缘降解破坏，造成贯穿击穿。由于绝缘层的介质损耗和线芯护层损耗，可能造成电缆过热，进而加速了绝缘层老化。电缆密封不严，绝缘层进入水分而变潮，电缆过负荷或散热不良，安装于电缆密集地区、电缆沟及电缆隧道等通风不良处的电缆，穿在干燥管中的电缆以及与热力管道接近的电缆，都会因过热而使绝缘加速损坏。

(2) 机械损伤 这类损伤主要包括以下几个方面：

1) 直接受外力作用造成的破坏。这方面的损坏主要有施工和交通运输所造成的损坏,如挖土、打桩,起重,搬运等都可能误伤电缆,行驶车辆的震动或冲击性负荷也会造成穿越公路或铁路以及靠近公路或铁路敷设电缆的铅(铝)包裂损。

2) 敷设过程造成损坏。这方面的损坏主要是电缆因受拉力过大或弯曲过度而导致绝缘和护层的损坏。

3) 自然力造成损坏。这方面的损坏主要包括中接头或终端头受自然拉力和内部绝缘胶膨胀的作用所造成的电缆护套的裂损,因电缆自然胀缩和土壤下沉所形成的过大拉力,拉断中接头或导体以及终端头瓷套因受力而破损等。

(3) 护层的腐蚀 由于电解和化学作用使电缆铅包腐蚀,因腐蚀性质和程度的不同,铅包上有红色、黄色、橙色和淡黄色的化合物或类似海绵的细孔。

(4) 过电压 大气过电压和内部过电压使电缆绝缘所承受的电应力超过允许值而造成击穿。对实际故障进行分析表明,许多户外终端头的故障是由于大气过电压引起的,电缆本身的缺陷也会导致在大气过电压时发生故障。

(5) 材料缺陷 材料缺陷主要表现在三个方面。一是电缆制造的问题,主要有包铅(铝)留下的缺陷,在包缠绝缘过程中,纸绝缘上出现褶皱、裂损、破口和重叠间隙等缺陷。交联聚乙烯绝缘中含有杂质,导电线芯的缺陷引起内部放电等。二是电缆附件制造上的缺陷,如铸铁件有砂眼,瓷件的机械强度不够,或其他零件不符合规格或组装时不密封等。三是对绝缘材料维护管理不善,造成制作电缆中接头和终端头绝缘材料受潮、脏污和老化,影响中接头和终端头的质量。

(6) 中接头和终端头的设计和制作工艺问题 中接头和终端头的设计不周密,选用材料不当,电场分布考虑不合理,机械强度和裕度不够等是设计的主要弊病。另外中接头和终端头的制作工艺要求不严,不按工艺规程的要求进行,使电缆头的故障增多,例如封铅不严,导线连接不牢,芯线弯曲过度,使用的绝缘材料有潮气,绝缘剂未灌满造成盒内有空气隙等。

## 2. 电缆故障的分类

电缆的故障性质,可按试验结果分为以下五类:

(1) 低阻接地或短路故障 电缆一芯或数芯对地绝缘电阻或芯与芯之间的绝缘电阻低于 $100\text{k}\Omega$ ,而导体连续性良好者。一般常见的有单相接地,两相或三相短路或接地。

(2) 高阻接地或短路故障 电缆一芯或数芯对地绝缘电阻或芯与芯之间的绝缘电阻低于正常值很多但高于 $100\text{k}\Omega$ ,导体连续性良好。一般常见的有单相接地、两相或三相短路或接地。

(3) 断线故障 电缆各芯绝缘良好,但有一芯或数芯导体不连续。

(4) 断线并接地故障 电缆有一芯或数芯导体不连续,而且经电阻接地。

(5) 闪络性故障 这类故障大多在预防性耐压试验时发生,并多出现于电缆中接头或终端头内。发生这类故障时,故障现象不一定相同。有时在接近所要求的试验电压时击穿,然后又恢复,有时会连续击穿,但频率不稳定,间隔时间数秒至数分钟不等。

有时电缆在一定电压下发生击穿,待绝缘恢复后击穿现象便完全停止,通常称这类故障为封闭性故障。

上述五类故障中,高阻和低阻之间并无严格界限,它主要决定于试验设备的条件(如试

验电压高低、检流计的灵敏度和电桥的结构等)和被试电缆导体电阻的大小。目前使用的电缆探伤仪试验电压可达 600V,当电缆导体回路电阻在  $1\Omega$  以上时,容许的故障电阻值可达  $1k\Omega$ 。很明显,试验电压愈低或电缆导体回路电阻愈小,则容许的故障电阻值愈低。需测量高电阻故障时,必须增加试验电压或提高检流计的灵敏度。一般认为故障电阻在  $100k\Omega$  以下为低阻故障。

## 二、电力电缆故障的测寻

### 1. 电缆故障性质的确定

电缆发生故障以后,必须首先确定故障的性质,然后才能确定用何种方法进行故障的测寻。否则,胸中无数,盲目进行测寻,不但测不出故障点,而且会拖延抢修故障的时间,甚至因测寻方法不当而损坏测试仪器。

所谓确定故障的性质,就是指确定故障电阻是高阻还是低阻;是闪络还是封闭性故障;是接地、短路、断线,还是它们的组合;是单相、两相,还是三相故障。通常可以根据故障发生时出现的现象,初步判断故障的性质。例如,运行中的电缆发生故障时,若只给了接地信号,则有可能是单相接地故障。继电保护过流继电器动作,出现跳闸现象,则此时可能发生了电缆两相或三相短路或接地故障,或者是发生了短路与接地混合故障,发生这些故障时,短路或接地电流烧断电缆线芯将形成断路故障。但通过上述判断尚不能完全将故障的性质确定下来,还必须测量绝缘电阻和进行导通试验。

一般用兆欧表测量电缆线芯之间和线芯对地的绝缘电阻,  $1kV$  及以下电缆用  $1kV$  兆欧表,  $1kV$  以上电缆用  $2.5kV$  兆欧表。进行导通试验时,将电缆末端三相短接,用万能表在电缆的首端测量线芯电阻。现将一故障电缆线路的测量结果列于表 10-14 中,根据表 10-14 所列绝缘电阻的测量结果,可以分析出此故障是两相接地。根据导通试验结果,可以确定三相电缆未发生断线故障,此故障点的状况如图 10-1 所示。

表 10-14 绝缘电阻的测量与导通试验

用兆欧表测量绝缘电阻/ $M\Omega$				用万用表做导通试验/ $\Omega$	
线 芯 间		线 芯 与 地			
AB	2500	AE	2500	AB	0
BC	8	BE	5	BC	0
CA	2500	CE	3	CA	0

### 2. 故障点的烧穿

即通过烧穿将高阻故障或闪络性故障变为低阻故障,以便进行粗测。

随着绝缘监督工作的加强,电缆在运行中发生的故障逐渐减少,而在预防性试验中发现的故障相对增多。试验击穿的故障点电

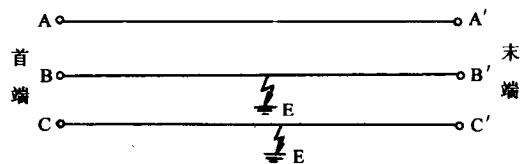


图 10-1 电缆故障状态图

阻一般都很高,多数属于高阻故障。据有关部门统计,预防性试验击穿的电缆故障中,90%以上是高阻故障,电缆运行中所发生的故障,高阻故障也占60%以上。然而,必须在低阻情况下才能用电桥法或音频感应法进行测量,所以要将高阻故障进行烧穿处理,使高阻变为低阻,以利测量。一般使用电桥法测量,要求故障电阻值不高于  $2k\Omega$ ,最高不超过  $100k\Omega$ ;使用低压脉冲反射法,要求故障电阻不大于  $100\Omega$ ;使用音频感应法要求电阻不高于  $10\Omega$ ;

使用声测法，故障电阻应在  $1\text{k}\Omega$  左右。烧穿后故障点的电阻值应能满足不同测量仪器的要求。

电缆故障点烧穿的方法有交流烧穿和直流烧穿两种。交流烧穿时需要向故障电缆提供无功电流，所以烧穿设备的容量必须足够大。而且采用交流烧穿方法时，由于在工频交流电一个周期内烧穿电流要通过两个零点，此时绝缘恢复，故障电阻迅速增大，所以故障点容易被烧断。因此，当无必要将故障点电阻烧到低达  $100\Omega$  以下时，一般不使用交流烧穿法。

交流烧穿的接线如图 10-2 所示，图中刀闸开关  $K$  选  $250\text{V}$ 、 $30\text{A}$ ，熔丝  $RD$  按烧穿变压器  $B$  低压侧额定电流选择， $R$  为水电阻，通常可利用容量较大的自来水槽。

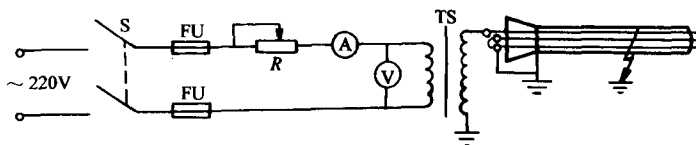


图 10-2 交流烧穿接线图

常用的烧穿方法是直流烧穿法。烧穿时所用的直流电压应采用负极性，因为正极性电压会使介质中的水离散，结果使故障点的绝缘电阻升高。采用直流烧穿时，应先对故障电缆进行直流耐压检测，以确定其故障点的击穿电压值。一般对于运行中的电缆故障需进行此步检测，对于经直流耐压而被击穿的电缆，在已了解击穿电压的情况下也就无需进行此步检测了。直流烧穿时，若电流增加太快，也存在故障点易被烧断的问题。在烧穿过程中，故障点电阻的降低与稳定需要一个过程。如果在此过程中电流增加太快，将由于故障点面积太小，因热效应而导致故障通道熔断。所以，在烧穿时电流的增加不可太快，应力求平稳，一般以每次增加的电流为原电流的  $0.3\sim 0.5$  倍为宜，而且应在每一个电流值上停留一段时间，一般可停留  $3\sim 5\text{min}$ 。只有这样，才能将故障点的固体绝缘物逐渐碳化，形成桥路，从而使过渡电阻值稳定地降下来。

必须指出，不要把故障点的电阻降得太低，因为随着故障电阻的降低，虽能给电桥法测量故障带来方便，但给声测定点带来了困难，因声测时故障点发出的能量随着接地电阻的降低而减小。

当试验设备较小时，常采用直流冲击法，其接线如图 10-3 所示。利用直流电源对电容器  $C$  充电，充到球隙  $G$  击穿时，电容器上的电荷经故障点放电，冲击电流将使碳化通道逐渐扩大，电阻降低。充电电容器  $C$  可取  $2\sim 10\mu\text{F}$ ，应能承受  $20\sim 30\text{kV}$  电压。若无适合的充电电容，也可用被试电缆中完好线芯作为充电电容，但在此种情况下，所加直流高压最多不得超过电缆的试验电压值。

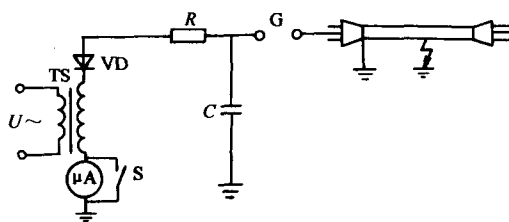


图 10-3 直流冲击烧穿故障点

### 3. 电缆故障点的粗测

就是测出故障点到电缆任一端的距离，这一步骤是故障定点的必要准备。粗测的方法有很多种，按基本原理归纳有两类，一类为电桥法，另一类为脉冲反射法。传统的粗测方法是将高阻故障经过烧穿后变成低阻故障，而后用电桥法或低压脉冲反射法进行测量。近年来，国内外很重视电缆故障的测寻，先后研究了许多方法。现在使用闪测仪探测电缆故障时，已无需将高阻烧穿，可以直接于故障点加直流高压或冲击高压，使之闪络，然后再通过闪络脉

冲反射测出故障点的位置。

(1) 直流电桥法测量短路和接地故障 直流电桥法是最早采用的探测电缆故障的方法，多年来一直是测寻电缆故障的主要手段。对于低阻接地和相间短路故障，目前这种方法仍然被广泛采用，而且精确度较高。一般要求故障点电阻不超过100kΩ，通常以2kΩ以下为宜。

直流电桥法是根据惠斯登电桥原理，将电缆故障点两侧的线芯电阻引入直流电桥，测量其比值。由测得的比值和电缆长度可算出测量端到故障点的距离。如图 10-4 所示，图中  $R_L$  是电缆全长的单芯电阻， $R_x$  是始端到故障点的电阻。测得电阻  $R_x$ ，即可算出始端到故障点的距离  $x$ 。使用电桥法对电缆故障点进行粗测时，常用单臂电桥（如 QJ23 即 850 型和惠斯登电桥）、双臂电桥等，QF1-A 型电缆探伤仪也是根据电桥原理制成的。

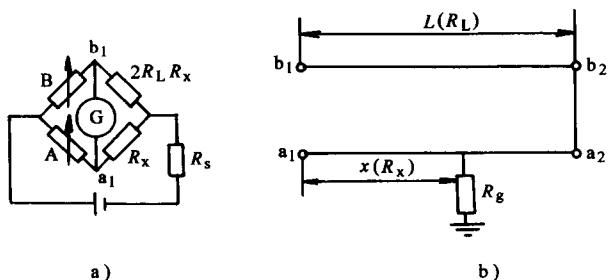


图 10-4 直流电桥法测量原理图  
a) 组成的单臂电桥 b) 故障电缆回路

1) 单相低阻接地故障的测寻 用回线法测寻单相低阻接地故障的原理接线如图 10-5 所示，将电桥的测量端子  $X_1$  和  $X_2$  分别接于故障缆芯和完好缆芯，这两芯的另一端用导线短接。电桥本身也有比例臂  $M$  和测量臂  $R$ ，故障点两侧的缆芯环线电阻则构成另两臂。图中  $R_f$  为分流器，其作用主要是

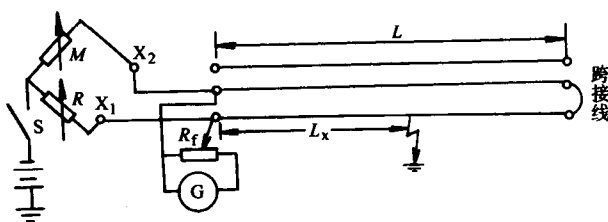


图 10-5 回线法测量单相接地故障  
 $M$ —比例臂  $R$ —测量臂  $G$ —检流计

是保护检流计  $G$ 。检流计的引线应直接接在缆芯上，这样可以使引至电桥的连接线电阻和接触电阻从线芯组成的桥臂转移到阻值比线芯电阻大得多的电桥电阻组的桥臂，从而减小测量误差。

在图 10-5 中，若电缆全部缆芯材料和截面都相同，则当电桥平衡时有如下关系：

$$\frac{M}{R} = \frac{2L - L_x}{L_x} \quad (10-1)$$

化简后得：

$$L_x = 2L \cdot \frac{R}{R + M} \quad (m) \quad (10-2)$$

式中， $L$  为电缆长度/m； $R$  为测量臂电阻/ $\Omega$ ； $M$  为比例臂电阻/ $\Omega$ ； $L_x$  为从测量端到故障点的距离/m。

如果将已损坏的缆芯与完好缆芯在电桥上的位置互相调换，则有

$$L_x = 2L \frac{M}{R + M} \quad (10-3)$$

上述两种接线方法，前者叫正接法，后者叫反接法。两者测得的故障点距离应该相同，

若误差较大或测得的故障点接近电缆的另一端时，应用同样的方法在电缆的另一端进行测量，并比较两次测量的结果。

2) 两相短路或短路接地故障的测寻 测量方法与单相接地基本相同。两相短路时测量电流不经过地成回路，而是经过相间故障点成回路。故障相缆芯接电桥，另一故障相的末端与完好相短接构成环线，如图 10-6a 所示。当电桥平衡时，同样可由式 (10-2) 和式 (10-3) 求出测量端到故障点的距离  $L_x$ 。当两相在不同点接地造成短路时，如图 10-6 所示，可按图 a) 接线，分别测出它们的故障点  $L_x$  和  $L'_x$ 。

3) 三相短路或短路并接地故障的测寻 测寻三相短路或三相短路并接地故障，因故障电缆无完整的芯线做回路，必须借助于其他与其并行的电缆线路或装设临时线作为回路。临时线一般可用低压两芯塑料线，对其截面无严格要求，只要便于架设即可，其电阻应预先加以测量。测试故障的原理接线如图 10-7 所示。

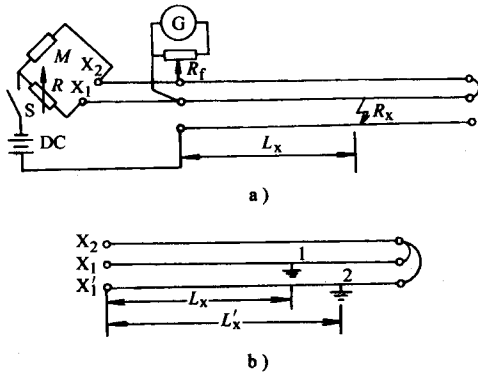


图 10-6 测量两相短路或短路接地故障接线图

a) 两相短路 b) 两相在不同点接地造成短路

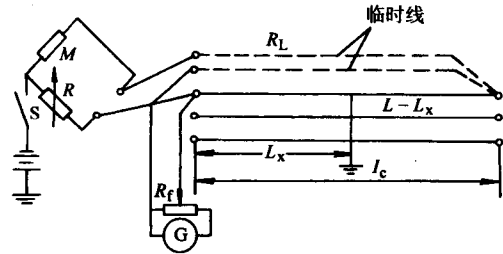


图 10-7 用临时辅助线测量三相短路接地故障接线图

设临时线的单线电阻为  $R_L$ ，当电桥平衡时有

$$\frac{M + R_L}{R} = \frac{L - L_x}{L_x} \quad (10-4)$$

则故障点的距离可按下式求得。

$$L_x = \frac{R}{M + R_L + R} \cdot L \quad (\text{m}) \quad (10-5)$$

如果三相电缆芯线不在同一点接地，用这种方法，可分别对每一相线芯进行测量，分别找出它们的故障点。

测量接线时应注意，两芯临时线绞接后直接与芯线相连，切勿将两芯临时线连接后再用短线与电缆芯线相连，因为这样相当于加长了电缆而形成较大的误差。

4) 高阻接地故障的测寻 高阻接地故障的测量一般是先将其接地电阻烧低后再测量。但有些故障不易烧成稳定的低阻，则必须采用高压冲击反射法或高压直流电桥回线法进行测量。前者适用于闪络性故障，一般采用“闪测仪”测量，后者适用于高阻故障，当接地电阻稳定并在冲击电压作用下不放电时，只能采用高压直流电桥法，其测量方法与低阻故障相似。由于故障电阻大，必须用高压电源，使通过故障点的电流不致太小，以保证测量的灵敏度与准确度。



采用高压直流电桥测量时，仍应用惠斯登电桥原理，其接线如图 10-8 所示。在结构上采用了滑线电阻  $r$ ，调节滑动点 C 使电桥平衡，因此又称滑线电桥。桥电阻  $r$  为 100 等分的  $3.5\Omega$  左右的滑线电阻，当电桥在 C 点达到平衡时，另一桥臂为  $(100 - C)$  等分，则

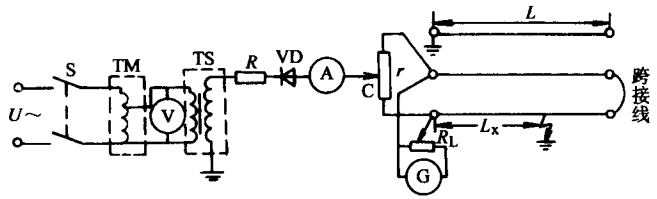


图 10-8 高压直流电桥测量高阻接地故障接线图

$$\frac{C}{100 - C} = \frac{L_x}{2L - L_x} \quad (10-6)$$

所以

$$L_x = 2L \frac{C}{100} \quad (10-7)$$

式中， $C$  为滑线电阻的读数； $L$  为电缆线路全长。

反接时

$$L_x = 2L \left(1 - \frac{C}{100}\right) \quad (10-8)$$

高压直流电桥只适用于测量稳定性高阻接地故障，不适于电缆在高压直流下内部有放电、闪络等情况，否则难以测量，还会损坏检流计。所以线路中接入电流表 A 监视电流。一般需控制电流在  $10 \sim 20\text{mA}$  范围内，并使其稳定。电流太小，灵敏度降低而误差增大；电流太大，则易损坏电桥。

(2) 脉冲反射法测量电缆故障 脉冲反射法测量电缆故障，能较好地解决高阻和闪络性故障的探测，而且不必过多地依赖电缆长度、截面等原始材料，因而得到广泛的应用。我国早在六十年代初就生产了应用脉冲反射法测量电缆故障的探测仪器。随着电子技术的迅速发展，故障探测器的性能日趋完善，最早使用的是一次性驱动扫描示波器，目前已发展成数字显示探测仪。

脉冲反射法测量仪器均是依据线路电磁波的传输及反射原理设计的。具体做法是根据电缆故障点电阻的高低，向故障缆芯施加不同的脉冲电压。这个脉冲电压以电磁波的形式在故障点与电缆终端头之间往返反射。在电缆的终端将电波记录下来，便可根据电磁波波形的求得电磁波往返反射的时间，进而再根据电磁波在电缆中传播的速度，计算出故障点到测试端的距离。

根据传输线理论，每条线路都有其一定的特性阻抗  $Z_c$ ， $Z_c$  只与线路的一次参数和传输频率有关，而与线路的长短无关。对于均匀传输线来说，其特性阻抗  $Z_c$  处处都是相等的。当线路终端所接负载等于特性阻抗  $Z_c$  时，线路传输能量全部被负载吸收，电流或电压沿线路传送时无反射，此时负载所吸收的能量最大。当线路负载阻抗不等于  $Z_c$  时，将使电流或电压波在该点产生全部或部分反射。反射程度可用反射点上的反射电压（或电流）与入射电压（或电流）之比表示，称为反射系数  $P$ 。反射系数  $P$  与线路的特性阻抗和该点的负载阻抗有关，电压反射系数  $P_u$  可用下式表示：

$$P_u = \frac{U_r}{U_i} = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c} \quad (10-9)$$

式中， $U_r$  为线路反射电压； $U_i$  为线路入射电压； $Z_x$  为线路反射点负载阻抗； $Z_c$  为线路的特性阻抗。

当线路发生断线故障时,  $Z_x \rightarrow \infty$ , 则

$$P_u = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c} = \frac{1 - \frac{Z_c}{Z_x}}{1 + \frac{Z_c}{Z_x}} = \frac{1 - 0}{1 + 0} = 1 \quad (10-10)$$

此时产生正反射, 即反射脉冲与入射脉冲方向相同。

当线路发生短路故障时,  $Z_x \rightarrow 0$ , 则

$$P_u = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c} = \frac{0 - Z_c}{0 + Z_c} = -1 \quad (10-11)$$

此时产生负反射, 即反射脉冲与入射脉冲方向相反。

当线路无故障时, 负载阻抗  $Z_x = Z_c$ , 则

$$P_u = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c} = \frac{Z_c - Z_c}{Z_c + Z_c} = 0 \quad (10-12)$$

此时无反射。

根据上述分析可知, 不管电缆发生何种故障, 故障点的负载阻抗与电缆特性阻抗不相等, 就会产生反射。因此, 脉冲反射法对于电缆的低阻接地、高阻接地、短路、断线和闪络性故障均适用。故障的性质可根据反射波形的图象加以判别, 图 10-9 为不同故障时的反射波形。由于衰减等作用, 反射波形一般不规整, 通常以波的前沿为准。

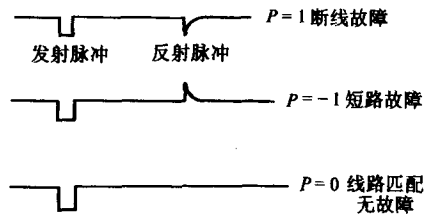


图 10-9 不同故障时的反射波形

下面以 DLG-1 型电缆故障测试仪为例, 介绍几种测试方法。

1) 低压脉冲法 对电缆的低阻接地、短路及断线故障, 低压脉冲法可很方便地测出故障距离。当线路输入一脉冲电波时, 该脉冲波以速度  $v$  沿线路传输。当行进  $L_x$  距离遇到故障点后, 被反射折回输入端, 其往返时间为  $T$ , 此时下式成立:

$$2L_x = v \cdot T \quad (10-13)$$

则故障点距离为:

$$L_x = \frac{1}{2} v T \quad (10-14)$$

电磁波在电缆线路中的传输速度  $v$  与电缆的一次参数有关, 对每一种线路来说是一个固定值, 可通过计算或仪器实测得到。传输速度  $v$  的计算公式为

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \quad (\text{m/s}) \quad (10-15)$$

式中,  $L_0$  为电缆单位长度电感, 单位为 H;  $C_0$  为电缆单位长度电容, 单位为 F。

很显然, 由于  $L_0$  和  $C_0$  的数值与导体的结构和绝缘材料有关, 因此对不同的电缆,  $v$  不是一个常数。经测量可知, 对浸渍纸绝缘电缆, 其值在  $150 \sim 170 \text{m}/\mu\text{s}$  之间, 塑料绝缘电缆为  $170 \sim 200 \text{m}/\mu\text{s}$ , 橡胶绝缘电缆为  $220 \text{m}/\mu\text{s}$ 。为了确定正确的波速, 在测寻故障之前, 可先在良好的电缆芯线上测定脉冲波来回全线所需的时间, 然后根据电缆的实际长度求出波速。该测试仪将脉冲源的发射脉冲和线路故障点的反射波以一显示器实时显示, 显示器同时提供时间标志, 通过时间标志和实时显示的脉冲波形, 即可测得传输时间  $T$ , 线路故障点

的距离  $L_x$  可用式 (10-17) 求得。

2) 高压脉冲法 (亦称直流闪络法) 对于高阻性故障, 因在低电压的脉冲作用下仍呈现很高的阻抗, 使反射不明显甚至无反射。此种情况下需加一逐渐升高的直流电压于被测电缆的故障相, 至一定电压值后故障点被击穿, 形成闪络。闪络电弧对所加电压形成短路反射, 反射回波在输入端又被高阻源 (参见图 10-10, 图中电阻  $R_1 \gg Z_c$ ) 形成开路反射。这样反射过程将在输入端与故障点之间继续下去, 直至能量消耗殆尽为止。

测试原理接线如图 10-10 所示, 图中限流电阻  $R_1$  用  $500\text{k}\Omega$  电阻, 电容器  $C$  选  $0.1\mu\text{F}$ 。

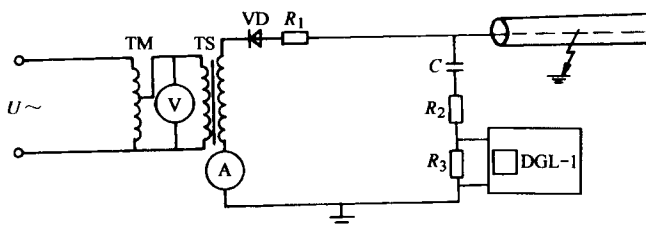


图 10-10 直流高压闪络法测试接线原理图

线路的反射波形见图 10-11 理论波形为陡直的矩形波, 实际上因反射不完全以及往返传输有相当大的损耗, 致使波过程幅度逐渐衰减, 波形边沿也越来越圆滑。

若从测量端到故障点往返反射一次所经历的时间为  $T$  ( $T = t_2 - t_1$ ), 则测量端到故障点的距离  $L_x$  为

$$L_x = \frac{1}{2} vT \quad (10-16)$$

其中  $T = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = \dots$

3) 冲击闪络法 当故障点处形成贯穿性通道或故障电阻不很高的情况下, 有两种场合不能使用直流闪络法。其一, 随着电压的慢慢增加, 泄漏电流逐渐增大, 但故障点并不闪络; 第二, 由于泄漏电流不断增大, 试验设备的

容量受到限制, 或由于试验设备内阻很大, 导致故障点加不上电压, 电压全降在试验设备的内阻上。遇到上述两种情况时, 必须采用冲击闪络法, 其原理接线如图 10-12 所示。

用冲击闪络法测试, 直流高压经球隙对电缆冲击直至击穿, 产生的闪络电弧形成短路反射。冲击闪络法测试线路必须于球隙与缆芯间串接电感  $L$ , 这是因为储能电容  $C$  的容量较大, 对于传输来的高频脉冲电压波相当于短路元件, 无法取出反射波形。为了取出故障波形, 必须串入电感  $L$ 。  $L$  对脉冲电压波有反应。脉冲开始瞬间电感中不能流过电流, 相当于  $L$  开路, 发生正反射。然后电流逐渐增加, 过一定时间后, 电感中电流可顺利通过, 相当于  $L$  短路, 变为负反射。若无电感  $L$ , 则如前所述, 取不出反射波形。所以, 冲击闪络

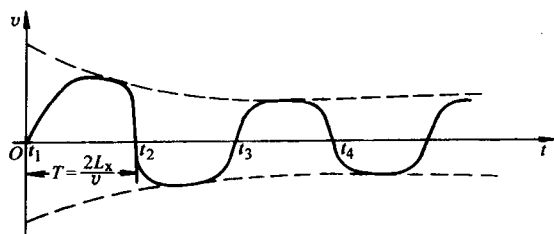


图 10-11 直流高压闪络法测试波形图

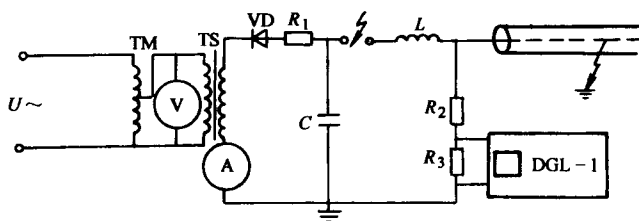


图 10-12 冲击闪络法测试原理图

法是在测量端利用电感反射电磁波，并通过电感（或电阻）使测量仪取得故障波形的。

由于电磁波在故障点被短路反射，在输入端又被  $L$  反射，在其间将形成多次反射，而整个线路又是由电容  $C$  和电感  $L$  组成的一个由  $LC$  放电的全过程，因此，在线路输入端所呈现的波是一个近于衰减的余弦曲线上叠加快速脉冲的多次反射波，如图 10-13a 所示，图 b 是扩展的脉冲反射波，图中  $\Delta T$  为故障点击穿的延迟时间。从反射脉冲的时间间隔可求出故障段的距离  $L_x$ 。

$$L_x = \frac{1}{2} vT \quad (10-17)$$

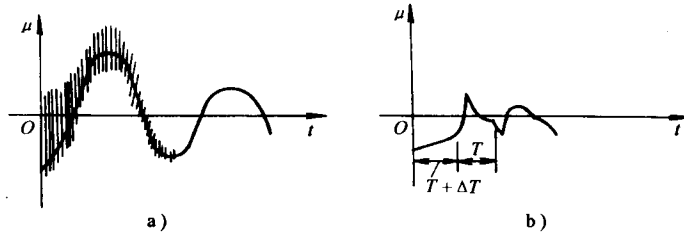


图 10-13 冲击闪络法测试波形图

a) 波形全过程 b) 扩散开的脉冲反射波

#### 4. 电缆敷设路径的探测和电缆的鉴别

测寻直埋电缆故障时，若无线路图或线路图不准确及标桩不清，就需要探测电缆的敷设路径，重新建立图样资料。特别是在故障电缆定点之前，需要准确测出其敷设路径，才能精确地定出故障点的位置。对于敷设在电缆隧道或电缆沟中的多条电缆，有时也需将其中的故障电缆或其一根电缆区别出来，这时也可用路径仪进行测寻。

目前，一般用音频感应法来探测电缆的敷设路径，其基本原理是：用 1~15kHz 音频信号发生器向被测电缆中通入音频信号电流，从而产生相应的电磁波。然后，用感应线圈接收音频信号，并将接收的音频信号送入接收机进行放大并送入耳机。根据耳机中响声的变化可探测电缆在地下的位置。发送音频信号的主要目的是为了区别工频电流、高次谐波电流和其他干扰信号，以减少探测所受的外界影响。

随着电缆数量的日益增多，各种电磁波的干扰也越来越多，例如工厂内某些电气设备在运行中不断产生电弧，电焊设备、各种电气开关等都会产生电磁波干扰。当被测寻电缆与正在运行的电缆并列敷设时，运行电缆的零序电流与高次谐波电流所产生的磁场将会影响探测工作的正常进行。因此，应使用可以间断产生有节奏的电磁波的音频信号，使接收机仪表的指针有规律地摆动，或从耳机中能听到“嘟，嘟，嘟……”的响声，以此来区别某些干扰信号。此外，还可在接收机中采用滤波器及选频器等来排除外来干扰。

如图 10-14 所示，当接收线圈的轴线（即磁棒）与地面（或电缆轴线）垂直，且接收线圈位于待测电缆的正上方（即图中的位置 a）时，音频电流所产生的磁力线不穿过线圈（磁力线与线圈轴线正交），线圈中无感应电动势，接收机收不到音频信号。当探测线圈向待测电缆两边移动时，就有一定量的音频电流磁力线穿过线圈，线圈中产生感应电动势并逐渐增大，使接收机的耳机中有响声或电表的指针偏转。当线圈偏移 to 一定距离时（图中的 b 点），线圈中穿过的音频电流磁力线最多，感应电动势最大，此电动势产生的音频信号电流最大，耳机中的声响或电表指针的偏转量最大。当线圈偏移更远时，音频电流的磁场逐渐减弱。反映上

述耳机中音量或指针偏转量与线圈在电缆轴线两侧移动距离之间关系的曲线为对称的马鞍形曲线。线圈在图中曲线上 a 位置时形成“音谷”，所以称这种探测方法为“音谷法”。

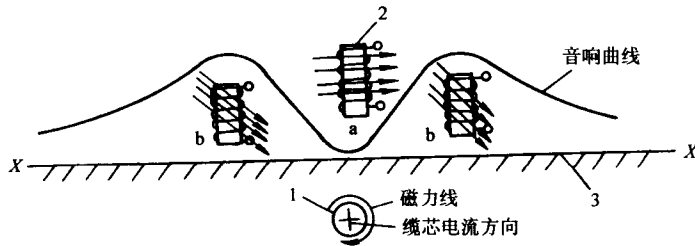


图 10-14 用音谷法探测电线路径

1—待测电缆 2—接收线圈 3—地面

另一种探测方法叫音峰法。如图 10-15 所示，使探测线圈的磁棒平行于地面。当线圈位于正上方 a 时，穿过线圈磁棒的音频信号电流所产生的磁力线最多，耳机中的声响或电表指针的偏转量最大。当线圈向待测电缆两边偏移时，穿过线圈磁棒的磁力线逐渐减少，耳机中听到的声响越来越弱，音量与线圈移动距离之间的关系如图 10-15 中的音响曲线所示。

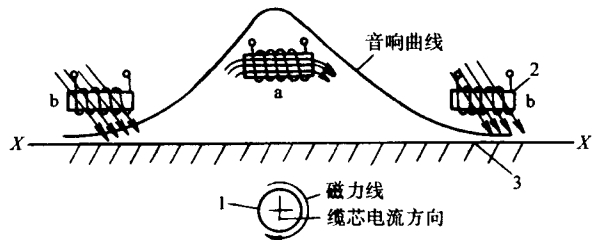


图 10-15 用音峰法探测电线路径

1—待测电缆 2—接收线圈 3—地面

根据探测线圈在被测电缆正上方时耳机中声响最小（音谷法）或最大（音峰法），可确定待测电缆的敷设路径或鉴别电缆。一般都用音谷法测寻电线路径，有时为了准确起见，上述两种方法一起用，以便相互验证和补充。

### 5. 电缆故障点的精测（定点）

如前述，电缆故障测寻的步骤一般为：确定故障的性质，“烧穿”故障点，粗测故障点到测试端的距离，测寻故障电缆的路径，最后一步就是精测定点。定点的方法一般有两种，一种是声测法；另一种是音频感应法。对于高阻故障一般用声测法定点。对于低阻故障，虽也可用声测法定点，但效果（响度）比较差，主要用音频感应法定点。电缆故障的定点精确与否，关系到能否顺利找到故障点和开挖土方量的大小。

(1) 声测法 声测法的原理接线与直流冲击烧穿故障点的接线图相同，如图 10-3 所示。直流高压向电容器充电使球隙击穿，将电压加在故障点上，使故障点击穿产生火花放电，引起电磁波辐射和机械的音频振动。声测法的原理就是利用放电的机械效应，在地面用声波接收器探头拾取震波，根据震波强弱判定故障点。

用声测法探测故障点，拾音设备的灵敏度和防外界杂音干扰性能很关键，球间隙对故障电缆放电时，故障点能否形成火花放电也至关重要。火花放电的形成主要取决于故障点电阻、充电电容器、电压的高低以及电压沿缆芯的衰减情况。通常选用  $1\sim 10\mu\text{F}$  电容，对于  $6\sim 10\text{kV}$  电缆，球隙放电电压调到  $20\sim 30\text{kV}$ ，对于  $35\text{kV}$  电缆可调到  $30\sim 35\text{kV}$ ，放电时间间隔以  $3\sim 5\text{s}$  为宜。

声波接收器由压电晶体拾音器、放大器和耳机组成。当放电能量足够大时，利用简单的振膜式听棒即可直接听音。故障点的放电能量与放电电流的平方及故障电阻成正比，所以故障点的电阻不能太低。否则，将因放电能量太小，而使耳机中听不到放电声，这就是声测法适用于高阻故障的原因。

(2) 音频电流感应法 音频感应法一般用于探测故障电阻小于  $10\Omega$  的低阻故障。当用声测法进行定点，因振动声传播受到屏蔽，或外界振动干扰很大，以及接地电阻极低，特别是金属性接地故障的故障点根本无放电声而无法定点时，需用音频感应法进行测量。

音频感应法定点的基本原理与用音频感应法探测埋地电缆路径的原理一样。探测时，用  $1\text{kHz}$  的音频信号发生器向待测电缆通音频电流，发出电磁波。然后，在地面上用探头沿待测电缆路径接收电缆周围电磁场变化的信号，并送入放大器放大。再将放大后的信号送入耳机或指示仪表，根据耳机中声响的强弱或指示仪表表示值的大小定出故障点的位置。在故障点，耳机中音频信号声响最强。当探头从故障点前移  $1\sim 2\text{m}$  时，音频信号声响即中断，则音频信号声响最强处即为故障点。图 10-16 为探测原理示意图。

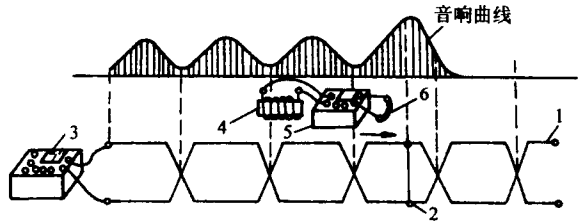


图 10-16 用音频感应法探测电缆相间短路故障的原理图

1—电缆两芯 2—故障点 3— $1\text{kHz}$  音频信号发生器  
4—接收线圈 5—接收机 6—耳机

用音频感应法探测两相短路或两相短路并接地故障，以及三相短路或三相短路并接地故障，一般都能获得满意的效果，测寻所得故障点位置的绝对误差能控制在  $1\sim 2\text{m}$  范围内。其他类型故障，如一相或两相断线，单相接地等，若采用特殊探头，也能准确地测出来。

1) 相间短路（两相或三相短路）故障的测寻 向短路缆芯通以音频电流，在地面上用接收线圈（电感式）接收信号，并将其送入接收机放大，用耳机听信号的变化，直到信号中断。然后在信号最强与信号中断点之间仔细收听信号的变化情况，以最后确定实际故障点的位置。测寻的原理接线如图 10-16 所示。

经验证明，测寻相间短路及相间短路并接地故障的故障点位置，用音频感应法比较灵敏。

2) 单相接地故障的测寻 测寻单相接地故障的故障点位置时，将音频信号发生器接在故障相与地之间，见图 10-17 相地之间通入音频电流  $I$ ，此时电流通过故障点（故障电阻为  $R$ ）铅皮（地）后分成两路。一路  $I_c$  由故障点直接返回测试端，另一路  $I'_c$  经由铅皮和大地流回故障电缆另一端，然后再经大地返回测试端。这就使全电缆线路均有音频信号通过，下面举例说明此道理。

设  $I=10\text{A}$ ， $I_c=9.5\text{A}$ ， $I'_c=0.5\text{A}$ ，因  $I$  与  $I_c$  方向相反，在故障点前两者的合成电流为

$$I_0 = I - I_c = 10 - 9.5\text{A} = 0.5\text{A}$$

在故障点前，可以看成是  $I_0$  产生磁通；故障点后的磁通，则是  $I'_c$  产生的。这样，若用一般电感线圈接收信号，则在电缆全长上都能听到信号响声，从而无法测出故障点。此时必须采用特殊的差动探头。用差动探头进行测寻时，在故障点前后，由于差动作用，使接收到的信号都较弱。在故障点前，由于电缆线芯绞合的原因，只可能收到一些较强的信号声

响。在探头跨越故障点时，由于此处有  $I_c$  和  $I'_c$  产生不同的磁场，因此能接收到最强的信号声响，据此可以测出故障点。

在使用差动探头时，应让探头的两个磁棒都平行于电缆，并沿电缆的路径进行探测，不应偏移或转向。如果发现差动不起作用，杂散干扰仍然大，可以将两个探头中的一个在水平面上旋转  $180^\circ$ 。

3) 一相、两相或三相断线故障的测寻 在测试端接 1kHz 音频信号发生器，电缆另一端所有芯线连同铅包全部短接在一起并接地。信号发生器输出端的接线视电缆断线情况而定。当一相或两相断线时，将信号发生器的一个输出端接至断线的一相或两相，另一端则相应接两相或一相非断相线芯。若三相断线，则将信号发生器的一个输出端接至断线的三条芯线，另一端接地（铅皮）。信号发生器的输出端接好后才能接通电源，开启信号发生器。开机前“阻抗匹配”旋钮应置于高阻抗。开机时信号发生器的输出为高压，应注意安全，信号发生器的输出线应有足够的绝缘。开机后，若需调整“阻抗匹配”，必须先断开电源。“阻抗匹配”应调至使信号发生器的输出电压为最大。

接收机用电容探头接收强弱变化的电信号。在故障点前，接收到的信号较强，故障点处信号最强。音响曲线和测试接线图见图 10-18。

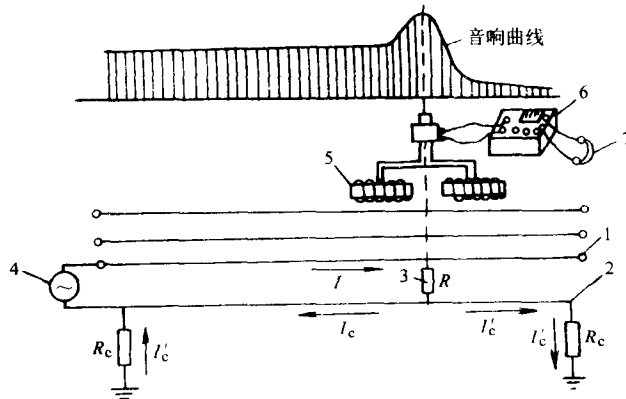


图 10-17 音频法测寻单相接地故障原理图

1—电缆芯线 2—铅皮 3—故障点 4—音频信号发生器  
5—差动探头 6—接收机 7—耳机

上述五个步骤是一般的测寻步骤，实际测寻时，可根据具体情况具体分析，采取灵活的测寻方法，可省略其中的一些步骤。例如，电缆敷设路径的图样很准确时可不必要再测敷设路径；对于高阻故障，可不经烧穿而直接用闪络法进行粗测；对于一些闪络性故障，不需要进行定点，可根据粗测得到的距离数据查阅资料，直接挖出粗测点处的中间接头，然后再通过细听而确定故障点；对于电缆沟或隧道内的电缆故障，可进行冲击放电，不需要使用仪器（如定

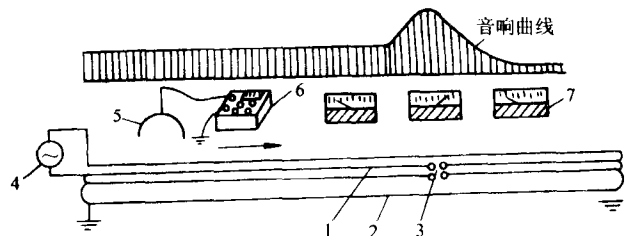


图 10-18 用音频感应法测寻电缆一相、二相或三相断线故障

1—电缆三芯 2—铅皮 3—故障点 4—信号发生器  
5—电容探头 6—接收机 7—指示电表

点仪等), 而通过直接用耳听来确定故障点。

### 参 考 文 献

- 1 刘子玉编. 电气绝缘结构设计原理. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 2 尹克宁编. 电力工程. 北京: 水利电力出版社, 1986
- 3 郑肇骥, 王焜明主编. 高压电缆线路. 北京: 水利电力出版社, 1983
- 4 何仰赞等编. 电力系统分析. 武汉: 华中理工大学出版, 1984
- 5 朱德恒, 严璋主编. 高电压绝缘. 北京: 清华大学出版社, 1990
- 6 刘耀南, 邱昌容编. 电气绝缘测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 7 [苏] 波谢 A、B 著. 直流输电结线及运行方式. 北京: 水利电力出版社, 1979
- 8 王润卿, 吕庆荣编. 电力电缆的安装、运行与故障测寻. 北京: 化学工业出版社, 1994
- 9 В. А. Привезенцев. Основы Кабельной Техники. Издательство. Унершя. москва, 1967