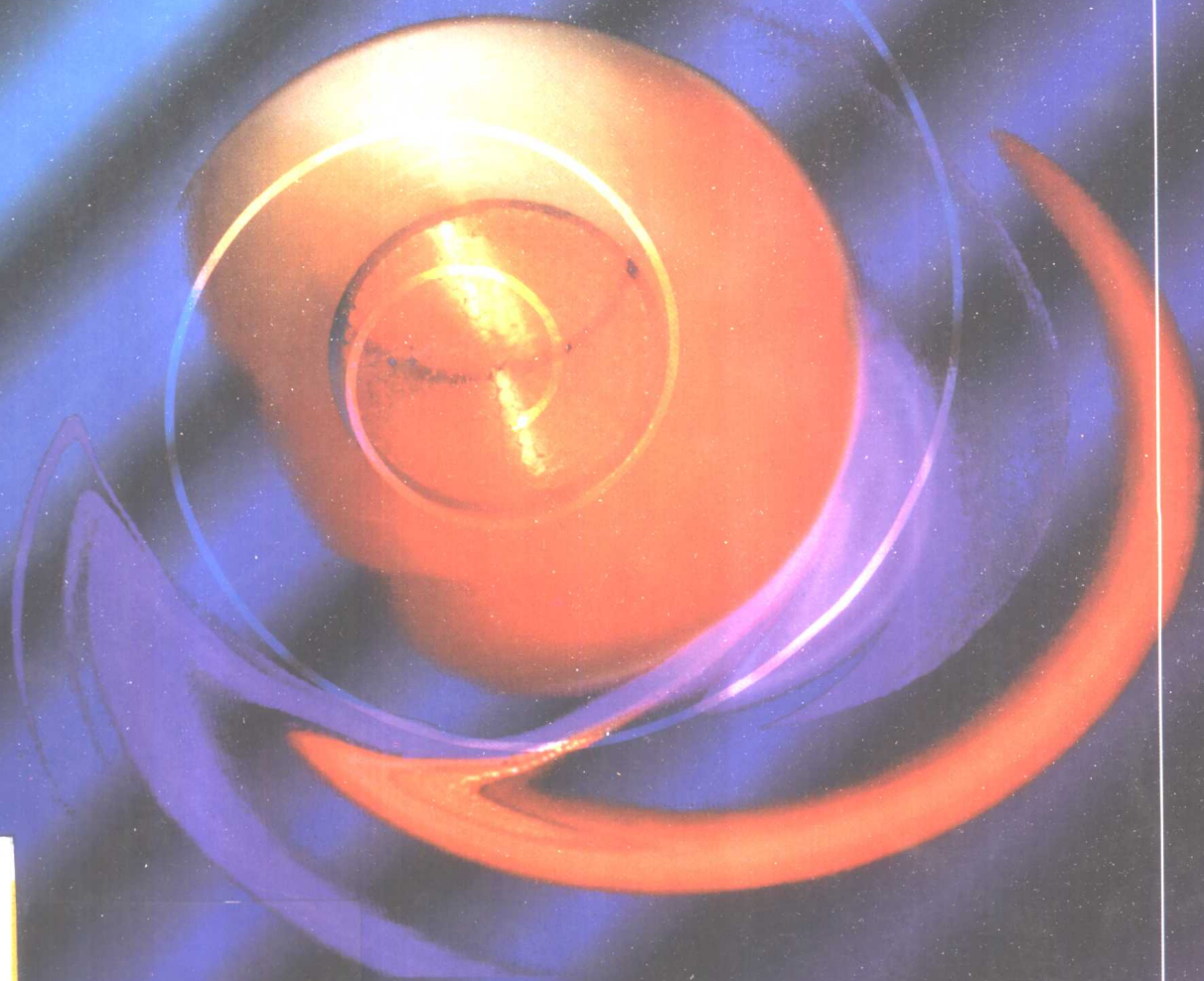


高等学校教材

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

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

CA/AS9/101

目 录

前言			
第一章 电力电缆概述	1		
第一节 现代电力系统简介	1		
第二节 电力电缆在电力系统中的作用 和发展概况	1		
第二章 电力电缆的结构分析	5		
第一节 35kV 及以下的电力电缆	5		
第二节 高压充油电力电缆	13		
第三节 高压交联聚乙烯绝缘电力电缆	18		
第四节 新型电力电缆简述	22		
第三章 电力电缆的电气参数	28		
第一节 导电线芯电阻	28		
第二节 电缆的绝缘电阻	31		
第三节 电缆的电容	33		
第四节 电缆的电感	34		
第五节 电力电缆金属屏蔽层（金属护套） 中的感应电压	36		
第六节 电缆线路的相序阻抗	39		
第四章 电缆的损耗和电磁力	46		
第一节 导电线芯损耗和绝缘层介质损耗	46		
第二节 金属屏蔽层（金属护套）和铠装 层损耗	46		
第三节 电缆中的电磁力	50		
第五章 电缆绝缘厚度的核定	52		
第一节 电缆绝缘层中的电场分布	52		
第二节 电力电缆在运行中所承受的电压	56		
第三节 脉冲波在电缆中的传播	64		
第四节 电缆绝缘层击穿强度的统计理论	66		
第五节 电缆绝缘层厚度的确定	73		
第六章 电力电缆连续允许载流量			
			的计算
第一节 热场分析	78		
第二节 等值热路方程	79		
第三节 电缆各部分热阻的计算	83		
第四节 电缆周围媒质的热阻	85		
第五节 电缆连续允许载流量的计算	90		
第六节 载流量的影响因素分析和提高传 输容量的方法	93		
第七章 电缆允许短期过载和短路电 流的计算	97		
第一节 短期过载电流的计算	97		
第二节 电缆允许短路电流的计算	102		
第八章 电力电缆附件设计原理	104		
第一节 电缆终端电场分布特点和放 电形式	104		
第二节 电场分布的等效回路分析	105		
第三节 电缆连接接头盒的典型结构和设计 计算	107		
第四节 终端接头盒的典型结构和设计 计算	115		
第五节 电缆终端电场的数值分析	127		
第九章 直流电力电缆	133		
第一节 直流输电的基本原理	133		
第二节 直流电缆绝缘的设计特点	134		
第十章 电缆的试验和运行中的故障 测寻	137		
第一节 电力电缆的试验	137		
第二节 电力电缆在运行过程中的故 障测寻	143		
参考文献	156		

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

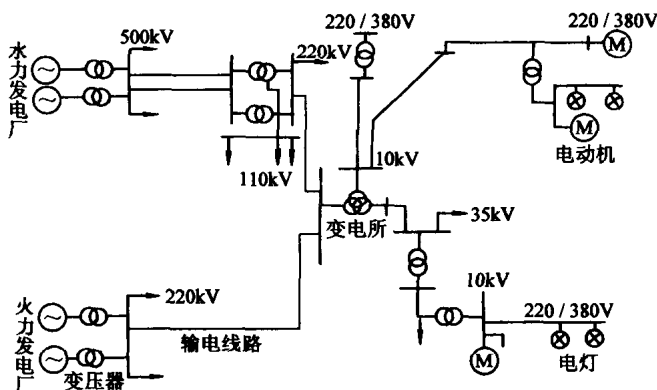


图 1-1 电力系统单线连接图

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

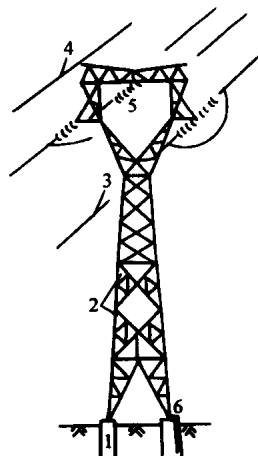


图 1-2 线路主要元件示意图

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

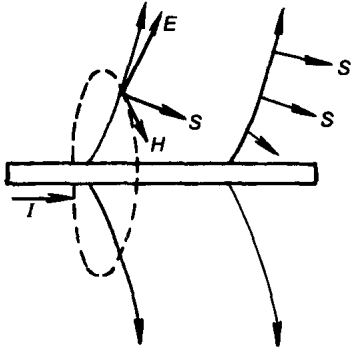


图 1-3 电磁波传播示意图

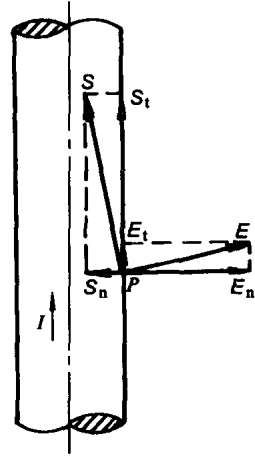


图 1-4 坡印亭矢量和电场强度矢量示意图

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。

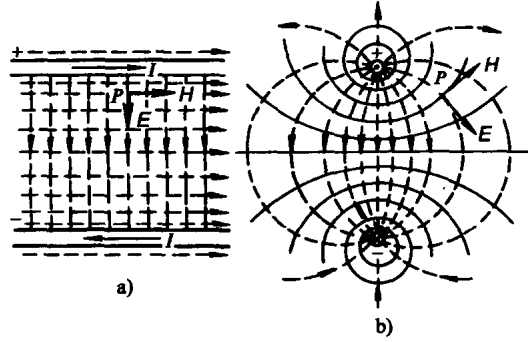


图 1-5 线路周围空间电磁场分布图形

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。

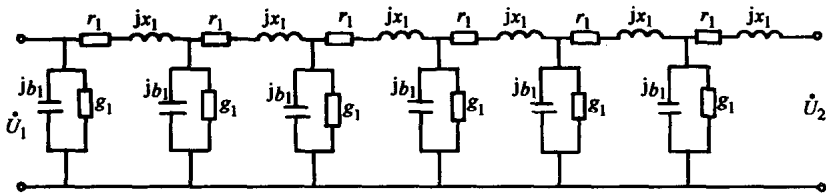


图 1-6 分布参数的等效电路 (Π 形)

(2) 远距离输电线 (长线) 的基本方程 为

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

或

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

式中, $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$ 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; $\lambda = \sqrt{z_1 y_1} (1/\text{km})$ 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

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

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

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

(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 λ 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。

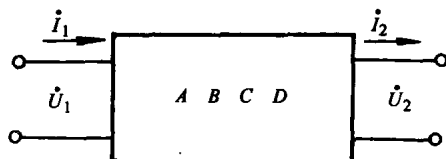


图 1-7 二端口网络

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合。

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 240mm²，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)

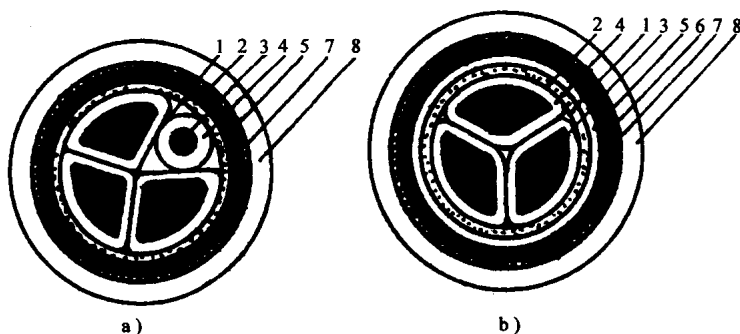


图 2-1 聚氯乙烯绝缘电力电缆结构图

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—钢丝(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 $U_0/U \leq 1.8/3\text{kV}$ ；B 类用于 $U_0/U > 1.8/3\text{kV}$ 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 $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ ，介电系数和 $\text{tg}\delta$ 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 $80\sim 100^\circ\text{C}$ 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 $5 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ ， $\text{tg}\delta$ 为 0.0006，相对介电系数 ϵ 为 2.11，平均工频击穿强度为 $8\sim 10\text{kV/mm}$ ；平均冲击强度为 $50\sim 60\text{kV/mm}$ 。

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 500mm^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 150mm^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°C 和 80°C 的电缆，PVC-S2 用于 90°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

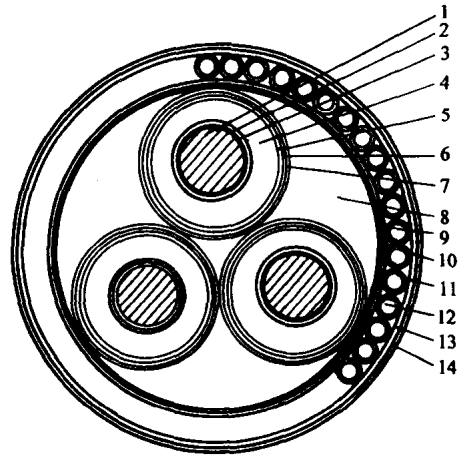


图 2-2 35kV 三芯交联聚乙烯绝缘水底电缆的结构（单层钢丝铠装）

- 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 $\tan\delta$ 。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。

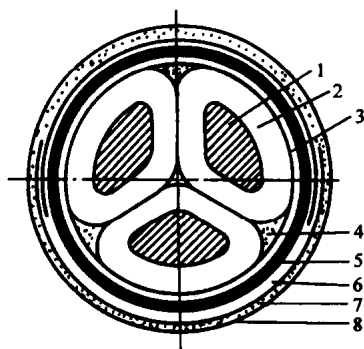


图 2-3 带绝缘电缆结构图

- 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

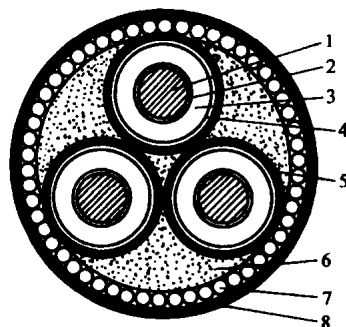


图 2-4 分相铅包电缆结构示意图

- 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 $\gamma_{\text{Cu}} = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$ 相应的电阻率 $\rho_{\text{Cu}} = 0.017241 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻温度系数 $\alpha_{\text{Cu}} = 0.00393/^{\circ}\text{C}$ 。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）和硫化橡皮有促进老化的作用，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 (Al_2O_3) 占地壳的 8%。经过初炼在 20°C 时的化学纯铝的电导率为 $\gamma_{\text{Al}} = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$ ，电阻率为 $\rho_{\text{Al}} = 0.026 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻温度系数 $\alpha_{\text{Al}} = 0.00403/^{\circ}\text{C}$ 。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 α 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

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

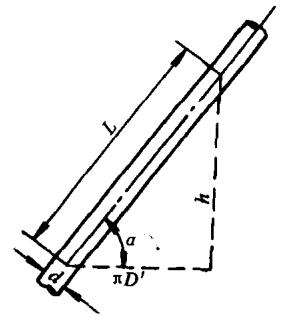


图 2-5 绞合导线展开示意图

从上述公式可知, 节距比 m 愈小, 绞合角 α 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; α 为该层单线的绞合角。若 α 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

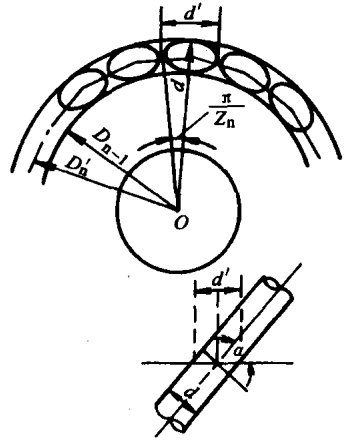


图 2-6 规则绞合几何关系说明

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\frac{\pi}{4} D_c^2}$$

(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。

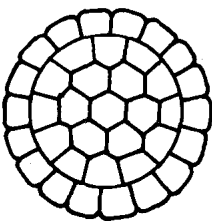


图 2-7 紧压圆形
芯结构

表 2-1 普通与紧压圆形线芯的结构及外径

截面积 /mm ²	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 70mm^2 ， 95mm^2 ， 120mm^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 (150mm^2 及以上)，如图 2-9 和图 2-10 所示。

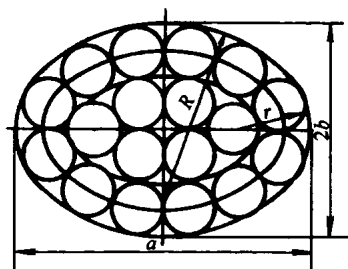


图 2-8 截面积为 25mm^2 、 35mm^2 、 50mm^2 、 70mm^2 扇形芯坯结构

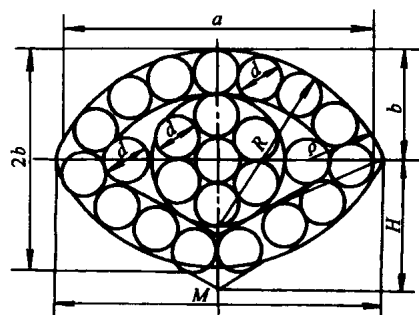


图 2-9 截面积为 70mm^2 、 95mm^2 、 120mm^2 扇形芯坯结构

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 1mm 。

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。

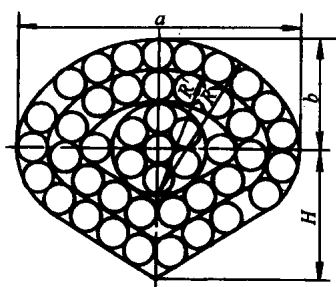


图 2-10 截面积为 150mm^2 、 185mm^2 、 240mm^2 扇形芯坯的结构

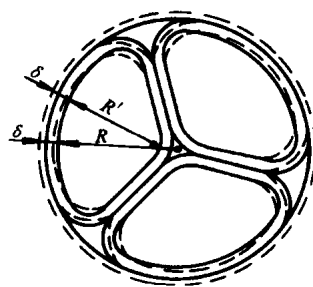


图 2-11 正确选择扇形圆弧半径说明

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