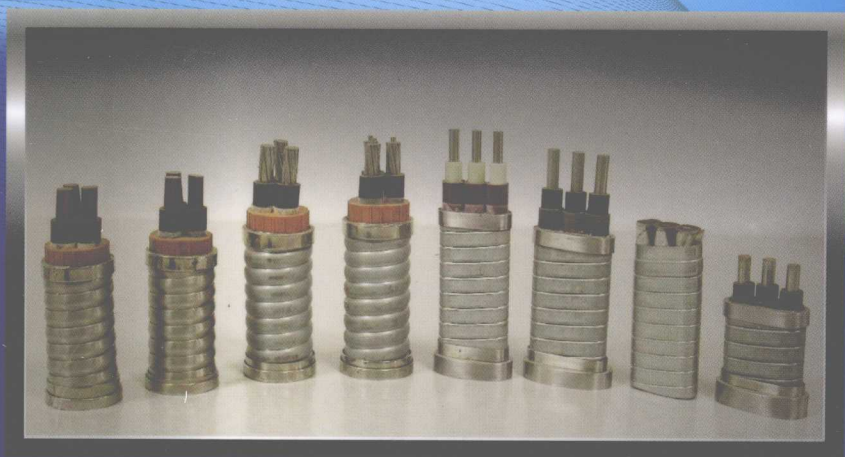


夏新民 主编

电力电缆选型 与敷设

DIANLI DIANLAN
XUANXING YU FUSHE

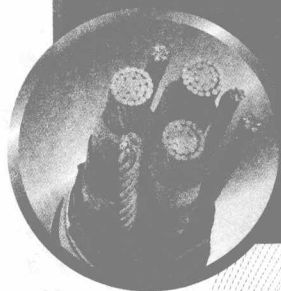


化学工业出版社

夏新民 主编

电力电缆选型 与敷设

DIANLI DIANLAN
XUANXING YU FUSHE



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电缆选型与敷设/夏新民主编. —北京: 化学工业出版社, 2008.4
ISBN 978-7-122-02383-4

I. 电… II. 夏… III. ①电力电缆-选型②电力电缆-
电缆敷设 IV. TM247 TM757

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 035433 号

责任编辑: 高墨荣

装帧设计: 张 辉

责任校对: 宋 玮

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市兴顺印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 211 千字

2008 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电缆线路相比较架空线路有着极大的优越性，因此电缆的应用日益广泛，各类电缆的生产制造、新品种的开发也日趋增多。特别是从城乡电网改造开始，工矿企业、城镇的景观街道、高层建筑等已经普遍实现电缆化。摆在使用者和建设者面前的任务是如何培养和训练一支具有中、高级技术水平和操作技能的电缆敷设安装及维护队伍，使员工既能采用先进的技术和安装工艺进行电缆线路的敷设，又能在电缆运行维护全过程中用有关质量标准进行跟踪监视和检测，同时也能进行必要的故障检查和判别。为了满足广大电气专业技术人员和工人学习和掌握电力电缆选型、敷设施工技术需要，也为了提高电力电缆敷设工程质量，确保电力系统安全经济运行，我们在参考有关技术资料的基础上，结合多年的施工和维修经验，编写了本书，力求帮助读者解决在电力电缆线路选型、敷设施工及平时维护管理中遇到的问题。

本书可供从事电力电缆选型、线路设计施工的工程技术人员和现场工人使用，也可供职业技术学院有关专业师生参考。

本书由夏新民主编，黄威、黄一平、黄禹、孙琴梅参与编写。其中孙琴梅编写第1章，黄一平编写第2章，黄禹编写第3、4章，夏新民编写第5章，黄威编写第6章。全书由夏新民统稿。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

第1章 电力电缆的基础知识

1.1 电力电缆的用途与优缺点

发电厂发出的电能传送到远方的变电所、配电所及各种用户，是通过架空线路或电缆线路实现的。用于传送和分配电能的电缆，称为电力电缆。

电能传送中，通过建筑物和居民密集的地区，地面空隙有限，不能设立杆塔和架空线，就需要敷设地下电缆。在发电厂或变电所中，引出线很多，往往因空间不够，也需用电缆来输送电能。

采用电缆输送电能比用架空线具有下列优点。

① 占地小。地下敷设不占地面空间，不受地面建筑物的影响，不需在地面架设杆塔、导线，适用于城市、街道供电，使市容整齐美观。

② 对人身比较安全。地下隐蔽工程，人们不可能触及。

③ 供电可靠，不受外界的影响。自然界常见的如雷击、风害、水、风筝、鸟害等因素会造成架空线的短路和接地等故障，而电缆则不会受影响。

④ 运行维护简单方便，工作量少，费用低。

⑤ 电缆的电容较大，有利于提高电力系统的功率因素。

对于地下水电站来说，电缆引出线成为它不可缺少的一个重要组成部分，对于过江、过河输电线路，由于跨度太大而不宜敷设架空线，或者为了避免架空线对船只通航的障碍时，宜采用电缆，为避免电力线对通信产生干扰，则多采用电缆，在大城市人口稠密区

的配电网、大型工厂、发电厂以及电网交叉区、交通拥挤区等，也需采用电缆，其占地少，安全可靠，可以减少电网对交通、城市建设的影响。但是，电缆线路与架空线路比较存在如下缺点。

- ① 成本高，投资费用较大。
- ② 敷设后不易更换变动，不宜作临时性的线路使用。
- ③ 线路不易分支。
- ④ 故障测寻困难。
- ⑤ 检修费工、费时、费用大。
- ⑥ 电缆头的制作工艺要求较高。

综上所述，在什么情况下采用电缆，需综合考虑后再决定。

1.2 电力电缆的种类及特征

1.2.1 电力电缆的种类

电力电缆按绝缘材料、电能形式、结构特征、电压等级、导体标称截面积、导体芯数以及安装敷设的环境等有以下分类。

(1) 按绝缘材料分类

① 油纸绝缘

- a. 黏性浸渍纸绝缘（统包型、分相屏蔽型）。
- b. 不滴流浸渍纸绝缘（统包型、分相屏蔽型）。
- c. 有油压、油浸渍纸绝缘（自容式充油电缆、钢管充油电缆）。
- d. 有气压、黏性浸渍纸绝缘（自容式充气电缆、钢管充气电缆）。

② 塑料绝缘

- a. 聚氯乙烯绝缘。
- b. 聚乙烯绝缘。
- c. 交联聚乙烯绝缘。

③ 橡皮绝缘

- a. 天然橡皮绝缘。

b. 乙丙橡皮绝缘。

c. 丁基橡皮绝缘。

(2) 按传输电能形式分类

按传输电能形式分交流电缆和直流电缆。目前电力电缆的绝缘部分均为应用于交流系统而设计。直流电力电缆的电场分布与交流电力电缆不同,因此需要特殊设计。

(3) 按结构特征分类

① 统包型: 缆芯成缆后, 在外面包有统包绝缘, 并置于同一内护套中。

② 分相型: 主要是分相屏蔽, 一般用在 $10\sim 35\text{kV}$, 有油纸绝缘和塑料绝缘。

③ 钢管型: 电缆绝缘外有钢管护套, 分钢管充油、充气电缆和钢管油压式、气压式电缆。

④ 扁平型: 三芯电缆的外型呈扁平状, 一般用于大长度海底电缆。

⑤ 自容型: 护套内部有压力的电缆, 分自容式充油电缆和充气电缆。

(4) 按电压等级分类

电力电缆都是按一定电压等级制造的, 由于绝缘材料及运行情况不同, 使用于不同的电压等级。我国电缆产品的电压等级有 $0.6/1\text{kV}$ 、 $1/1\text{kV}$ 、 $3.6/6\text{kV}$ 、 $6/6\text{kV}$ 、 $6/10\text{kV}$ 、 $8.7/10\text{kV}$ 、 $8.7/15\text{kV}$ 、 $12/15\text{kV}$ 、 $15/20\text{kV}$ 、 $18/20\text{kV}$ 、 $18/30\text{kV}$ 、 $21/35\text{kV}$ 、 $26/35\text{kV}$ 、 $36/63\text{kV}$ 、 $48/63\text{kV}$ 、 $64/110\text{kV}$ 、 $127/220\text{kV}$ 、 $190/330\text{kV}$ 、 $290/500\text{kV}$ 共 19 种。

电压等级有两个数值, 用斜杠分开, 斜杠前的数值是相电压值, 斜杠后的数值是线电压值 (设备最高电压)。常用电缆的电压等级 U_0/U (kV) 为 $0.6/1\text{kV}$ 、 $3.6/6\text{kV}$ 、 $6/10\text{kV}$ 、 $21/35\text{kV}$ 、 $36/63\text{kV}$ 、 $64/110\text{kV}$, 这种电压等级的电缆适用于每次接地故障持续时间不超过 1min 的三相系统, 而电压等级 U_0/U (kV) 为

1/1kV、6/6kV、8.7/10kV、26/35kV、48/63kV 的电缆适用于每次接地故障持续时间一般不超过 2h、最长不超过 8h 的三相系统。在选择、使用电缆时应特别注意。

从施工技术要求, 电缆中间接头、电缆终端结构特征及运行维护等方面考虑, 也可以依据电压这样分类: 低电压电力电缆 (1kV)、中电压电力电缆 (6~35kV)、高电压电力电缆 (110~500kV)。

(5) 按导体标称截面积分类

电力电缆的导体是按一定等级的标称截面积制造的, 这样既便于制造, 也便于施工。

我国电力电缆标称截面积系列为 1.5mm^2 、 2.5mm^2 、 4mm^2 、 6mm^2 、 10mm^2 、 16mm^2 、 25mm^2 、 35mm^2 、 50mm^2 、 70mm^2 、 95mm^2 、 120mm^2 、 150mm^2 、 185mm^2 、 240mm^2 、 300mm^2 、 400mm^2 、 500mm^2 、 630mm^2 、 800mm^2 、 1000mm^2 、 1200mm^2 、 1400mm^2 、 1600mm^2 、 1800mm^2 、 2000mm^2 共 26 种。

(6) 按导体芯数分类

电力电缆导体芯数有单芯、二芯、三芯、四芯和五芯共 5 种。单芯电缆通常用于传送单相交流电、直流电, 也可在特殊场合使用 (如高压电机引出线等), 一般中低压大截面的电力电缆和高压充油电缆多为单芯; 二芯电缆多用于传送单相交流电或直流电; 三芯电缆主要用于三相交流电网中, 在 35kV 及以下各种中小截面的电缆线路中得到广泛的应用; 四芯和五芯电缆多用于低压配电线路。只有电压等级为 1kV 的电缆才有二芯、三芯、四芯和五芯。

(7) 按敷设环境条件分类

地下直埋、地下管道、空气中、水底、矿井、高海拔、盐雾、大高差、多移动、潮热区等。一般环境因素对护层的结构影响较大, 有的要求考虑力学保护, 有的要求提高防腐能力, 有的要求增加柔软度等。

1.2.2 电力电缆的特征

现将几种电力电缆的主要特点分别叙述如下。

(1) 油纸绝缘电缆

① 黏性浸渍纸绝缘电力电缆

- a. 成本低, 工作寿命长。
- b. 结构简单, 制造方便。
- c. 绝缘材料来源充足。
- d. 易于安装和维护。
- e. 油易淌流, 不宜作高落差敷设。
- f. 允许工作场强较低, 不宜作高电压电力传输。

② 不滴流浸渍纸绝缘电力电缆

- a. 浸渍剂在工作温度下不滴流, 适宜高落差敷设。
- b. 工作寿命较黏性浸渍电缆更长。
- c. 有较高的绝缘稳定性。
- d. 成本较黏性浸渍纸绝缘电缆稍高。

(2) 橡皮绝缘电缆

① 柔软性好, 易弯曲, 橡胶在很大的温差范围内具有弹性, 适宜作多次拆装的线路。

② 橡胶的耐寒性能较好。

③ 橡胶电缆有较好的电气性能、力学性能和化学稳定性。

④ 对气体、潮气、水的防渗透性较好。

⑤ 耐电晕、耐臭氧、耐热, 耐油的性能较差, 仅能适用于 1000V 以下的电压等级。

(3) 塑料绝缘电缆

① 聚氯乙烯绝缘电缆

- a. 安装工艺简单。
- b. 聚氯乙烯化学稳定性高, 具有非燃性, 材料来源充足。
- c. 能适应高落差敷设。
- d. 敷设维护简单方便。

- e. 聚氯乙烯电气性能低于聚乙烯。
- f. 工作温度高低对其力学性能有明显的影响。

② 聚乙烯绝缘电缆

- a. 聚乙烯有优良的介电性能，但抗电晕、游离放电性能差。
- b. 聚乙烯工艺性能好，易于加工，耐热性差，受热易变形，易延燃，易发生应力龟裂。

③ 交联聚乙烯绝缘电缆

- a. 交联聚乙烯的允许温升较高，所以电缆的允许载流量较大。
- b. 交联聚乙烯有优良的介电性能，但抗电晕、游离放电性能差。
- c. 交联聚乙烯的耐热性能好。
- d. 适宜于高落差和垂直敷设。
- e. 接头工艺虽较严格，但因为对技工的手艺技术水平要求不高，因此便于推广使用。

1.3 电力电缆的制造流程

1.3.1 油浸纸绝缘电缆生产过程（图 1-1）

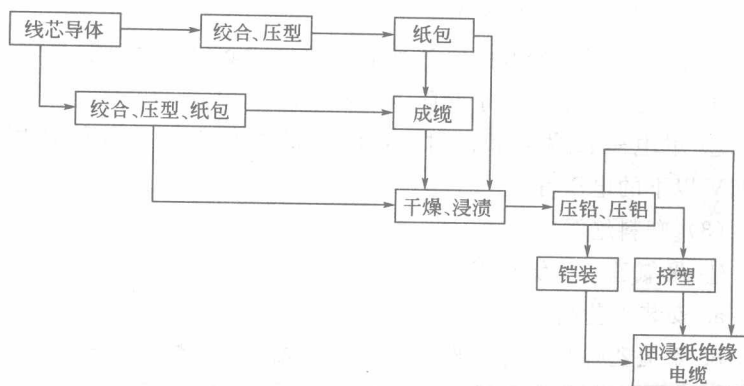


图 1-1 油浸纸绝缘电缆生产过程

1.3.2 橡塑绝缘电缆生产过程 (图 1-2)

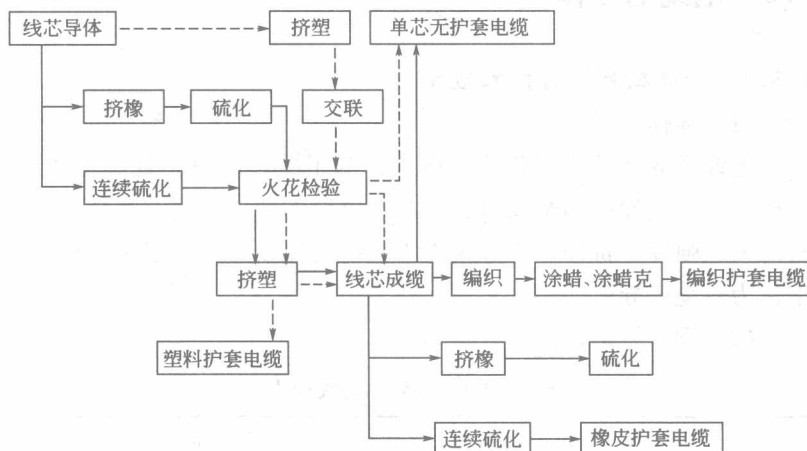


图 1-2 橡塑绝缘电缆生产过程

1.4 电缆的基本结构

电力电缆的基本结构主要包括电缆导体、绝缘层和保护层三个部分。

导体是用来传输电能的，它必须具有良好的导电性能，减少电能传输中的损耗，有一定的抗拉强度和伸长率，不易氧化，容易加工和焊接等特性同时还要价廉物美和资源丰富。绝缘层是用来将不同的导电线芯以及导电线芯与接地部分之间彼此绝缘隔离，并能承受长期工作电压和短时间的过电压和耐热性能。保护层又可分为内护层和外护层两部分，是保护绝缘层免受外界媒质的作用，防止水分浸入及腐蚀和外力损伤，因此它应有良好的密封及防腐性能和一定的力学强度。在油浸纸绝缘电缆中，保护层还有防止绝缘油外流的作用。

1.5 电缆的导体

1.5.1 导体材料、性能和规格

(1) 导体材料

电缆中导体的作用是传送电流，为了减少线路损耗和电压降，一般采用高电导率的金属材料来制造电缆的导体。同时还应考虑材料的力学强度、价格、来源等因素，综合比较后，一般采用铜和铝来作为电缆的导体。

(2) 铜和铝的性能（表 1-1）。

表 1-1 铜和铝的性能

性 能		铜	铝
熔点/℃		1084.5	658
密度(20℃)/(g/cm ³)		8.9	2.7
电阻率(20℃)/(10 ⁻⁸ Ω·m)	软态	1.748	2.83
	硬态	1.790	2.90
电阻温度系数(20℃)/(10 ⁻³ ℃ ⁻¹)	软态	3.95	4.10
	硬态	3.85	4.03
抗拉强度/(kgf/mm ²) ^①	软态	20~24	7~9.5
	硬态	35~45	15~18
伸长率/%	软态	30~50	20~40
	硬态	>0.5	>0.5
硬度/(kgf/mm ²)	软态	40~45	
	硬态	80~120	35~45

① 1kgf/mm² = 0.980665kPa。

用铜来作为电缆的导体，是因为它具有许多技术上的优点，例如：它电导率大，力学强度相当高，加工容易（易压延、拉

丝、焊接)。

铜的含杂质质量对铜的电导率影响很大,微量杂质会引起电导率显著下降。各种杂质对铜的导电率的影响如图 1-3 所示。

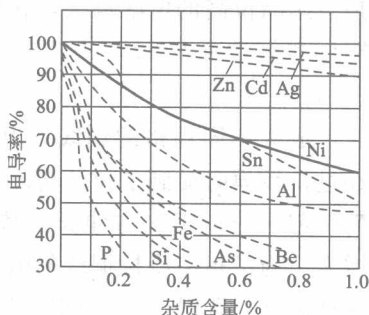


图 1-3 杂质含量对铜的电导率的影响

电解铜及电工用铜线锭,按化学成分铜品号规定见表 1-2。

表 1-2 按化学成分铜品号规定

铜品号	代号	化学成分/%											
		铜+银 (不小于)	杂质含量(不大于)										
			砷	锑	铋	铁	铅	锡	镍	锌	硫	磷	总和
一号	Cu-1	99.95	0.002	0.002	0.001	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.001	0.05
二号	Cu-2	99.90	0.002	0.002	0.001	0.005	0.005	0.002	0.002	0.004	0.004	0.001	0.10

① 铜线制作

用电解铜板或电工用铜线锭,首先加工成铜杆,然后由铜杆拉制成铜线。

铜杆生产的工艺不同,将影响铜杆的含氧量,而含氧量又影响到铜的电导率,传统的铜杆加工是将铜料在反射炉中熔化,氧化还原,然后铸锭,再把铜锭加热,然后在回线式轧机上轧成黑铜杆,再经酸洗后方可进入拉线。在铜锭浇铸后,由于冷却过程中在铜锭表面形成富氧层以及在反射炉中氧气去除有限,所以铜的质量较差,通常将锭刨面后再轧制,所轧铜杆含氧量也在 $300 \times 10^{-6} \sim$

500×10^{-6} 。这种传统的工艺已逐渐淘汰，取而代之的是连铸连轧工艺，省去了铜锭冷却过程，也就不会形成富氧层且生产效率大大提高，生产的铜杆含氧量在 $250 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 。对于要求含氧量低的铜杆，则是采用品位高的电解铜板，在保护气体下进行熔化和铸杆，生产的铜杆含氧量可在 20×10^{-6} 以下，常用的方法有浸涂法和上引法。

铜杆再经过拉线，成为不同规格的铜线。由于拉线是冷加工，在加工过程中铜线经过拉线模时受到了拉、挤压变形，其金相结构也发生了变化，从而引起电导率下降与伸长率减少，而抗拉强度、屈服极限、弹性均增大。为了提高冷拉铜线的电导率和柔软性，则需要将铜线经过韧炼处理（或称退火），即把冷拉铜线加热到 $500 \sim 700^\circ\text{C}$ 左右，保温一段时间后冷却即可。传统退火的方法是非连续式的，把铜线盘放入专门的退火炉中进行退火，如罐式炉、水封炉、钟罩炉等。而新工艺采用连续退火，即在拉线设备上装有退火装置，边拉线边退火，这样不仅提高了线材退火的质量，而且也节约电能，节约了单独退火工序的人力、物力。各种退火方式为避免氧化，都是在保护气体下进行的。软铜线（TR）指韧炼过的铜线，多用于电缆线芯的制造；而硬铜线（TY）则多用于架空裸线生产。由于铜对浸渍剂（例如矿物油、松香复合浸渍剂等）、硫化橡胶有促进老化的作用，所以铜线表面有时要镀锡，使铜不直接与绝缘层接触，以减低绝缘老化速度。采用镀锡铜线提高了电缆产品的质量，并使得接头容易焊接，但增加了工序，提高了成本。传统的镀锡工艺是将软铜线经过酸洗后，除去线表面上的油污及氧化层，然后通过熔融的锡形成镀层，这种方法锡膜较厚，且不易均匀。采用电镀方法，将锡作阳极，铜线作阴极，在含锡盐的镀液中，加直流电压后在铜线上可镀上薄而均匀的锡层。

铝的电导率仅次于银、铜和金，它是地壳中含量最多的元素之一，仅次于硅和氧，重量占地壳的 8%。因此可用来代替铜作为导电材料。按化学成分铝品号规定见表 1-3。

表 1-3 按化学成分铝品号规定

铝品号	代号	铝/% (不小于)	杂质/%(不大于)				
			铁	硅	铁+硅	铜	杂质总和
特一号	Al-00	99.7	0.16	0.13	0.26	0.010	0.30
特二号	Al-0	99.6	0.25	0.18	0.36	0.010	0.40
一号	Al-1	99.5	0.30	0.22	0.45	0.015	0.50
二号	Al-2	99.0	0.50	0.45	0.90	0.020	1.0
三号	Al-3	98.0	1.1	1.0	1.80	0.050	2.0

② 铝线制作

铝锭制造铝线的工艺与铜线相似，首先采用连铸、连轧的压延工艺获得所需的圆铝杆，然后再拉制成不同规格的圆铝线。为了使铝线柔软性增加，用于制造电力电缆线芯的铝线，除了小截面（在 10mm^2 以下）之外，一般也要经过韧炼处理。由于铝线表面极易形成氧化膜，可以防止铝线在韧炼过程中进一步氧化，因此与铜线韧炼时不同，无需与空气隔绝。铝的再结晶温度比铜低，因此铝线的韧炼温度也比铜低（约 $300\sim 350^\circ\text{C}$ ），韧炼时间也较铜短。铝线经过韧炼后，柔软性提高，抗拉强度降低。由于铝的力学强度较铜差，一般多用于固定敷设的电力电缆线芯，而架空线多采用硬铝或合金铝。

(3) 导体规格

电缆由于用途不同，输送容量不同，因而导电线芯的构造分成许多种。线芯有大小、形状和数量不同等区别。

① 导线结构应满足力学性能要求，并力求通用化、系列化。

② 导线截面在 $0.012\sim 1000\text{mm}^2$ 间按优先数系合理分挡，每一品种选取用其中一段范围。某些传送弱电流的电线电缆（如信号电缆、钻探电缆），仅有一种导线截面，按最大工作电流和机械强度确定。

③ 导电线芯的大小是按横断面积（即截面）来衡量，以 mm^2 作单位。各国标准不同，我国目前规定中低压电缆截面有 2.5mm^2 、 4mm^2 、 6mm^2 、 10mm^2 、 16mm^2 、 25mm^2 、 35mm^2 、

50mm²、70mm²、95mm²、120mm²、150mm²、185mm²、240mm²、300mm²、400mm²、500mm²、630mm² 和 800mm² 等规格。

④ 电缆的线芯数有单芯、双芯、三芯和四芯四种。线芯的形状有圆形、半圆形、椭圆形和扇形等，圆形导线具有稳定性好、表面电场均匀、制造工艺简单等优点，所以高压电缆的线芯多数为圆形，但其又分为压紧和非压紧两种。此外还有应用于充油的“中空导体”等不同结构形式。

⑤ 导线绞合

为了增加电缆的柔软性和可曲度，较大截面的电缆线芯由多根较小直径的导线绞合而成。由多根导线绞合的线芯柔软性好、可曲度较大，因为单根金属导线沿某一半径弯曲时，其中心线圆外部分必须伸长，而其圆内部分必须缩短，如线芯是由多根导线平行放置而组成，导线之间可以滑动，因此，它比相同截面单根导线作相同弯曲时要省力得多。为了保持线芯结构形状的稳定性和减小线芯弯曲时每根导线的变形，多根导线组成的线芯都应绞合而成。图 1-4 (a)、(b)、(c) 表示一组平行放置的导线弯曲后变直时，由于导线的塑性变形可能在线芯表面产生凸出部分，使电缆绝缘层中电场分布产生畸变，并损伤电缆绝缘。而在绞合的线芯结构图 1-4(d)、(e) 中，线芯中心线内外两部分可以互相移动补偿，弯曲时不会引

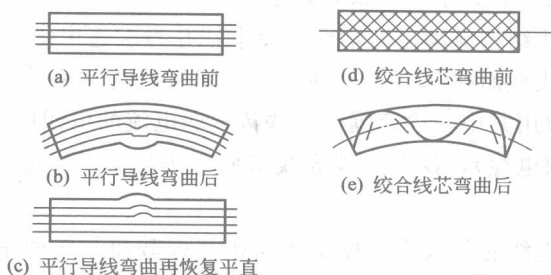


图 1-4 线芯弯曲时变形示意

起导线的塑性变形，因此线芯的柔软性和稳定性大大提高。要求线芯有较高的柔软性和稳定性，可采用较小直径导线用较小绞合节距绞合。此外，由多根导线绞合的线芯，与大截面的单根线芯不同，弯曲较平滑地分配在一段线芯上，因而弯曲时不容易损坏电缆的绝缘。

电缆的用途不同，对线芯可曲度的要求也有所不同。移动式橡皮、塑料绝缘电力电缆要求最高，其次是固定式橡皮、塑料绝缘电力电缆，它多用于可曲度要求较高的场合。油浸纸绝缘电力电缆线芯的可曲度比橡皮、塑料绝缘电力电缆低。因为油浸纸绝缘电力电缆的可曲度主要由护层结构来决定，线芯对电缆的可曲度影响较小，一般只要求线芯在生产制造、安装敷设过程中不致损伤绝缘即可。绞合方式有正规绞合、束绞和复绞三种。

a. 正规绞合外形较圆整、结构较稳定。其结构是在中心层（1根或 2、3、4、5 根单线）上依次绞合第 1 层、第 2 层……每层比前一层多 6 根单线，绞向与前一层相反。各层单线根数和绞完该层后单线的总根数，可按表 1-4 中所列公式计算，表中 m 为绞合层数（中心不作为层数）。

表 1-4 绞合层单线根数计算公式

中心根数 n_0	第 m 层的单线根数 n_m	包括 m 层在内的单线总根数 N
1	$n_m = 6m$	$N = 1 + 3m(m+1)$
2~5	$n_m = n_0 + 6m$	$N = (n_0 + 3m)(m+1)$

绞合节距的选择与导线的柔软度、稳定性、外径及生产速度有关。一般，单线根数多、直径小、要求导线较柔软的，采用较短的绞合节距。节距比是绞合节距对被绞合后导线外径的比值，是常用的结构参数。

b. 束绞的单线排列方式与正规绞合相同，因是多层一次同向绞合，故绞合后分层不明显，外形不太圆整和稳定。束绞的特点是生产率高，柔软性好，设备较简单。中小截面的移动式电线电缆和