

供用电工人职业技能培训教材

电力电缆

中国电机工程学会城市供电专业委员会 组编
上海电缆输配电公司 史传卿 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

供用电工人职业技能培训教材

电力电缆

中国电机工程学会城市供电专业委员会管理体制和技能培训专家工作组 组编

上海电缆输配电公司 史传卿 主编

上海电缆输配电公司 姜芸 主审

北京电力公司 陈平



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本教材是根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范·电力电缆工》和《电力行业职业技能鉴定指导书·电力电缆》对技能培训的要求,结合我国目前电力电缆生产工作实际进行编写的,是《供用电职业技能鉴定培训教材》的一个分册。全书共七章,主要介绍电力电缆基础知识、基本技能、试验技术、敷设方法、终端和接头安装、电缆线路运行检修以及电缆工程管理和新技术应用等。本书适用性和系统性较强,文章结构合理,重点突出。为方便教学,针对教材中的重点和难点问题,还将配套出版本分册的《复习题与题解》。

本书可用作各级电力电缆技工的技能培训教材及现场生产技能培训用书,也可作为电缆专业技术人员、管理人员以及有关院校教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电缆/史传卿主编. —北京:中国电力出版社, 2005

供用电工人职业技能培训教材

ISBN 7-5083-3621-6

I. 电... II. 史... III. 电力电缆-技术培训-教材 IV. TM247

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第112620号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年1月第一版 2006年1月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 13印张 346千字

印数0001—4000册 定价25.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《供用电工人职业技能培训教材》

编 委 会

主任委员：宗 健 曾德君 廖泽龙

副主任委员：朱良镛 秦继承 陈金玉 孙秉正

肖 兰

委 员：（按姓氏笔画排序）

王 炜 付迎拴 刘忠浦 李天友

李兆华 李海星 徐景国 曹文华

黄奇峰 鲁 鹏

前 言

为配合供用电工人职业技能鉴定培训的需要，中国电机工程学会城市供电专委会管理体制和技能培训专家组和中国电力出版社组织编写了《供用电工人职业技能培训教材》。本套培训教材共14本，包括线路运行与检修专业5个工种，变电运行与检修专业10个工种，营业用电专业5个工种。《带电检修》一书包括“变电线路带电检修”。电能表修理工和电能表校验工合为《电能表修校》。总体涵盖了供用电职业的主要知识内容。

1. 本套教材的编写指导思想。1999年，劳动和社会保障部正式颁发施行电力行业《国家职业技能鉴定规范》（以下简称《规范》）。《规范》对职业培训从内容和要求上都有较大的改革。本套教材的编写指导思想就是按照《规范》和配套复习题与题解（14本）中对供用电职业技能鉴定培训的要求，以《规范》体现出的新的培训内容和新的模式体系为指导，以实际生产中成熟的规程、制度为依据，按《职业技能鉴定指导书》（以下简称《指导书》）中“职业技能培训”的要求编写。

2. 本套教材的编写要求。教材紧扣《指导书》中“职业技能培训大纲”来编写。体现模块技能培训法（MES）的基本模式，采用职业功能分析和职业工作分析相结合的理论方法，密切结合生产实际，突出实际操作技能，以本职业技能为主线，以实际操作步骤为序，理论知识为提高技能服务，确定模块—学习单元的教学文件体系。教材力求体现实用性、先进性，吸收新知识，介绍新技术、新工艺、新设备，符合现代电力工业的生产要求。

以技能培训大纲中的“职业技能模块”（MU）设章及章序。也可根据生产实际及培训的可操作性的需要，对模块进行调整设章并调整章序。要将相关专业理论知识和工作标准融入技能要求

的模块中。以培训大纲中的“学习单元”(LE)设节及节序。每节前要讲清本节的“学习目标”，应包括操作步骤、注意事项(含工作态度、安全环境等)、工作实例、相关知识等。

以培训大纲中的“学习内容”分列的点作为培训的重点内容叙述，完整系统地涵盖了《指导书》中对各等级工的培训相应要求，不再明确分割各等级的培训内容。各章后对本章的重点内容适应等级予以提示。

3. 各本教材的编写人员。为了保证本套教材的编写质量，根据中国电机工程学会城市供电专委会管理体制和技能培训专家组的推荐，由各编写单位挑选了有丰富实践经验的一线生产人员直接参加编写。编写单位给予了大力度的支持，编写提纲和初稿均由编写单位组织审定，又经全国性的专家审稿会审议，最后每本书均由有丰富实践经验的专家作为主审，从而保证了本书稿的技术质量和本套教材的权威性。

4. 本套教材的读者对象。除作为供用电专业有关工种的培训使用外，还可供其他相关人员学习参考。

本书在编写过程中得到中国电机工程学会城市供电专委会与各级组织的领导、各编者所在单位、各主审所在单位的大力支持和热诚帮助，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在错误或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

《供用电工人职业技能培训教材》编委会

2005年1月

编者的话

本书是为适应供用电职业技能培训的需要而编写的，它是《供用电职业技能鉴定培训教材》的一个分册。本书按照《中华人民共和国职业技能鉴定规范》和《电力行业职业技能鉴定指导书》对电力电缆工技能培训的要求而编写。内容包括电力电缆技工所必备的基础理论和技能知识、电缆线路试验技术、敷设方法、电缆终端及接头安装、电缆线路运行维修等。为满足高级别技工学习需要，本书还编入了电缆工程管理和新技术应用方面的内容。本书每章末均有教学内容提示，对本章内容着重对应的技术等级予以说明，以便不同等级技工培训对内容的选用。

本书由史传卿主编，徐国柱、俞瑾华、张璐琰参编，姜芸、陈平主审，林曾荣绘制插图。上海电缆输配电公司领导对本书编写工作给予了很大支持和关心，戴慈万、李文庆、朱绍彬、孟卓青、蒋晓娟、蒋洪权等对文稿提出了许多宝贵意见，在此一并致以深切感谢。

限于编者水平，书中难免有不当之处，敬请使用本书的学校师生及各位读者批评指正。

编者

2005年5月

目 录

前言

编者的话

第一章 基础知识	1
第一节 电力电缆的应用	1
第二节 电缆结构和种类	3
第三节 电缆型号和选用	17
第四节 电缆绝缘理论	24
第五节 电缆线路损耗和载流量	34
第六节 电缆热稳定性	53
第七节 电缆金属护套接地方式	55
第八节 变配电设备概述	59
第二章 电缆工基本技能	68
第一节 电工操作	68
第二节 钳工操作	81
第三节 起重和搬运	98
第四节 识图和绘图	104
第五节 电缆工基本操作	121
第三章 电缆试验和故障测寻	139
第一节 电缆工厂试验	139
第二节 电缆线路试验常用设备	143
第三节 电缆线路竣工试验	148
第四节 电缆线路预防性试验	165
第五节 电缆线路故障测寻步骤和常用仪器	168
第六节 电缆线路故障测距	172
第七节 电缆故障的精确定点	179

第八节	电缆线路的路径探测和鉴别	183
第四章	电缆敷设	187
第一节	电缆敷设路径	187
第二节	敷设施工机械和工器具	190
第三节	电缆敷设质量控制	196
第四节	电缆敷设施工主要准备工作	207
第五节	电缆敷设方式和施工方法	209
第六节	非开挖施工技术	234
第五章	电缆终端和接头	237
第一节	终端和接头的选择、技术性能与类型	237
第二节	终端和接头的绝缘性能	246
第二节	电缆附件密封方式和终端装置	262
第四节	35kV 及以下油纸电缆终端和接头	268
第五节	35kV 及以下交联聚乙烯电缆终端和接头	275
第六节	充油电缆终端和接头	289
第七节	高压交联聚乙烯电缆终端和接头	312
第六章	电缆线路运行和检修	327
第一节	电缆线路验收	327
第二节	预防电缆故障的主要措施	335
第三节	电缆线路运行维护	339
第四节	电缆线路检修	354
第七章	电缆工程管理和新技术应用	369
第一节	电缆工程安全管理	369
第二节	电缆工程质量管理	377
第三节	电缆工程施工大纲编制	386
第四节	电缆工程概预算	389
第五节	电缆线路在线检测	396
第六节	计算机技术在电缆线路管理中的应用	402

第一章

基础知识

第一节 电力电缆的应用

一、我国电力电缆的制造和应用

1897年(清,光绪廿三年)3月,一条长2.27km供照明用的橡胶绝缘、铅包电缆在上海敷设入地,揭开了我国电力电缆应用史的第一页。我国电缆制造业始于20世纪30年代,起先只能生产低压橡胶电缆。1951~1956年,6kV和35kV油纸铅包电缆相继问世。20世纪60年代中期至70年代初,我国自行研究制造成功66kV充油电缆,接着研制和安装了110、220、330kV充油电缆,1983年研制成功500kV充油电缆,并投入了试运行。在20世纪60年代末到70年代初,10kV和35kV交联聚乙烯电缆逐步在全国投入运行,我国与工业发达国家相比晚了约5年。

近二十多年来,我国电力电缆及附件的研究、制造和应用有了迅速发展。1990年,国产110kV交联聚乙烯电缆在电力系统投入运行。从此,在电站建设和城市电网建设中110kV及以下电压等级交联聚乙烯电缆逐步成为首选产品。1999年起国产220kV交联聚乙烯电缆投入运行。目前,高电压、大容量、大长度电力电缆的研制和应用不断取得进展,电力电缆以其独具的特点得到广泛应用。

当今世界,环境保护越来越受到人们重视。在我国,环保型电缆材料的研究已经起步。影响环保的传统材料——铅等重金属、PVC以及对环境有害的材料将得到严格控制,逐步被与环境友好的新型材料所取代。

二、电缆的特点

电缆能适应地下、水底等各种敷设环境，能满足长期、安全传输电能的需要。电缆的结构比架空线复杂，除具有传输电能的导体外，还具有能承受电网电压的绝缘层；具有包覆在绝缘层外，使其不受外界环境影响和防止机械损伤的保护覆盖层；电压等级在 6kV 及以上的电缆，在导体外与绝缘层外，还有用半导体或金属材料制成的屏蔽层。

与架空线相比，电缆具有下述优点：电缆敷设在地下，基本上不占用地面空间，同一地下电缆通道，可以容纳多回电缆线路；在城市道路和大型工厂采用电缆输配电，有利于市容、厂容整齐美观；电缆供电，对人身比较安全，自然气象因素（如风雨、雷电、盐雾、污秽等）和周围环境对电缆影响很小，因此，电缆线路供电可靠性较高；电缆线路运行维护费用比较小。

电缆线路的缺点在于：建设投资费用较高，一般电缆线路工程总投资是相同输送容量架空线路的 5~7 倍；电缆线路故障测寻和修复时间比较长；电缆不容易分支。

三、电缆在电网中的作用

电力电缆线路是电网中传输和分配电能的主要元件之一。特别是在以下场合被广泛应用的电力电缆，起着架空线所无法替代的重要作用。

- 1) 电力线路密集的发电厂和变电站；
- 2) 现代大、中城市的繁华市区、高层建筑区和主要道路。
- 3) 供电可靠性和安全运行要求较高、电网结构中的重要线路和重要负荷用户；
- 4) 建筑面积较大、负荷密度较高的住宅区和依据城市规划不能或不宜通过架空线的街道或地区。

此外，电缆的电容能起到改善电力系统功率因数的作用，有利于降低供电成本。

第二节 电缆结构和种类

一、电缆结构

电缆的基本结构为导体、绝缘层和护层三大组成部分，对于6kV及以上电缆，导体外和绝缘层外还有屏蔽层。

(一) 导体

导体是电缆中具有传导电流特定功能的部件。

1. 电缆导体材料及其性能

(1) 常用电缆导体材料是金属铜和铝，这两种金属的电导率大，机械强度高，易于加工。其主要性能如表1-1（不同规格型材的数据与此略有差异）。

表 1-1 铜和铝的主要性能指标

名 称	铜	铝
密度 g/cm^3	8.89	2.70
20℃时电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$	1.724×10^{-8}	2.80×10^{-8}
电阻温度系数 $1/^\circ\text{C}$	0.00393	0.00407
抗拉强度 N/mm^2	200 ~ 210	70 ~ 95

(2) 为满足电缆的柔软性和可曲度的要求，电缆导体由多根导丝绞合而成。绞合导体有圆形、扇形、腰圆形和中空圆形等种类。圆形绞合导体几何形状固定，稳定性较好，表面电场比较均匀。20kV及以上油纸电缆和10kV及以上交联聚乙烯电缆，均采用圆形绞合导体结构。中空圆形导体适用于自容式充油电缆，其圆形导体中央以硬铜带螺旋管支撑形成中心油道，或者以型线（Z形线或弓形线）组成中空圆形导体。10kV及以下多芯油纸电缆和1kV及以下挤包电缆，为了减小电缆直径，节约材料消耗，一般采用扇形或腰圆形导体结构。

(3) 绞合导体经过紧压模（辊）紧压，成为紧压导体。扇形和腰圆形导体，均采用紧压结构。为避免在挤出和交联时绝缘料

被挤进导体间隙；为防止电缆在使用中水分通过导体间隙扩散，交联聚乙烯电缆必须采用紧压结构。导体经过紧压，每根导丝不再是圆形，而呈现不规则形状，如图 1-1 所示。

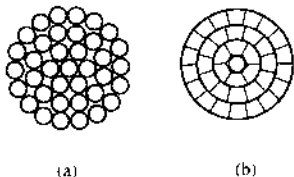


图 1-1 圆形导体紧压前后的断面图
(a) 紧压前；(b) 紧压后

表示绞合导体紧压程度的参数为填充系数，又称为紧压系数，用 η 表示。它是全部导丝实际截面积之和 A_1 和绞合导体外接圆所包含的面积 A 之比，对于圆形绞合导体，

$$\eta = \frac{A_1}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{Z} A_i}{\frac{\pi}{4} D_c^2} \quad (1-1)$$

式中： A_i ——第 i 根导丝截面积；

Z ——导丝总根数；

D_c ——绞合导体外接圆直径。

非紧压导体的填充系数 $\eta = 0.73 \sim 0.77$ ，经过紧压后， η 可达到 $0.88 \sim 0.93$ 。

已知填充系数 η ，用卡尺测得圆形绞合导体直径 D_c ，则可用公式 $A_1 = \frac{\pi}{4} \eta D_c^2$ 算出导体截面积。

2. 电缆导体电阻计算

(1) 直流电阻。单位长度电缆导体直流电阻 R_d 按以下公式计算

$$R_d = \frac{\rho_{20}}{A} [1 + \alpha(\theta - 20)] k_1 k_2 k_3 k_4 \times 10^6 \quad (1-2)$$

式中 R_d ——单位长度电缆导体在 $\theta^\circ\text{C}$ 时的直流电阻， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

ρ_{20} ——导体材料在 20°C 时的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

A ——导体截面积， mm^2 ；

α ——电阻温度系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

θ ——导体温度， $^\circ\text{C}$ ；

k_1 ——单根导丝因加工引起的电阻增加系数， $k_1 = 1.02 \sim$

1.07, 导丝直径较大时, k_1 取较大值;

k_2 ——导体绞合引起的电阻增加系数, $k_2 = 1.02 \sim$

1.04, 单根导丝直径较小时, k_2 取较大值;

k_3 ——绝缘线芯经成缆引起的电阻增加系数, $k_3 = 1.02$;

k_4 ——导体经紧压加工引起的电阻增加系数, $k_4 = 1.01$ 。

(2) 交流电阻。单位长度电缆导体交流电阻 R_a 按以下公式计算:

$$R_a = R_d(1 + Y_s + Y_p) \quad (1-3)$$

式中 Y_s ——集肤效应因数, 由于集肤效应使电阻增加的百分数, 和频率及导体结构有关, %;

Y_p ——邻近效应因数, 由于邻近效应使电阻增加的百分数, %, 它是反映一相导体受其他两相导体所产生的交变磁场影响程度的系数。

集肤效应因数 Y_s 和邻近效应因数 Y_p 可由下列公式求得:

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (1-4)$$

其中,
$$X_s^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_d} \right)^2 \times 10^{-14} k_s \quad (1-5)$$

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{D_c}{S} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \quad (1-6)$$

其中,
$$X_p^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_d} \right)^2 \times 10^{-14} k_p \quad (1-7)$$

式中 f ——系统频率, 取 50Hz;

R_d ——单位长度电缆导体直流电阻, Ω ;

D_c ——导体外径, mm

S ——导体中心轴间距离, mm;

k_s ——与集肤效应有关的导体的结构常数, 分割导体 $k_s =$

0.435, 其他各种导体, $k_g = 1.0$;

k_p ——与邻近效应有关的导体的结构常数, 分割导体 $k_p =$

0.37, 其他各种导体, $k_p = 0.8 \sim 1.0$ 。

(二) 绝缘层

电缆绝缘层具有耐受电网电压的特定功能。在电缆使用寿命期间, 绝缘层材料应具有稳定的以下特性: 较高的绝缘电阻和工频、脉冲击穿强度, 优良的耐树枝放电和耐局部放电性能, 较低的介质损耗角正切值 ($\tan\delta$), 以及一定的柔软性和机械强度。电缆绝缘有油纸绝缘、挤包绝缘和压力电缆绝缘三种。

1. 油纸绝缘

油纸绝缘是电缆纸和浸渍剂复合绝缘材料。把电缆纸切成 $5 \sim 25\text{mm}$ 宽的纸带, 螺旋式地绕包在导体上。将绕包好的电缆纸带经过干燥处理, 排去吸附在纸表面和纤维素表面毛细管中的水分, 而后用油类绝缘剂进行真空浸渍处理, 形成油纸复合绝缘结构。

电缆纸是木质纤维纸, 其中纤维素是一种高分子化合物, 具有较高的电气性能、化学稳定性和机械强度。电缆纸带的绕包方式, 除紧靠导体和绝缘层最外层的几层外, 均采用间隙式 (又称负搭盖式) 绕包, 这样电缆在弯曲时, 纸带层间可以相互移动, 电缆在允许弯曲半径范围内弯曲时, 不致于损伤绝缘。

聚丙烯木纤维纸 (PPLP) 是适用于 110kV 及以上高压充油电缆的新型绝缘纸, 它是聚丙烯和木纤维纸的复合绝缘, 其中聚丙烯的厚度比为 $30 \sim 50\%$ 。这种绝缘纸具有介质损耗低等优良特性。

电缆浸渍剂按黏度分为两类, 一是黏性浸渍剂, 其黏度较高, 在电缆工作温度下不流动或基本不流动, 用于 35kV 及以下绝缘电缆。另一类是低黏度浸渍剂, 用于充油电缆。黏性浸渍剂又有两种配方, 一是光亮油和松香按 $7:3$ 比例配制的复合浸渍剂。另一种是加入低分子聚合物 (如聚异丁烯和适量固体配合剂) 而制成的不滴流电缆浸渍剂。充油电缆油有矿物油和合成油两种, 合成高压电缆油一般为十二烷基苯, 其黏度是矿物油的

1/4 ~ 1/3, 并具有稳定性好、介质损耗低等优点。

2. 挤包绝缘

(1) 交联聚乙烯绝缘。交联聚乙烯这一名称来源于其制造过程, 即它是利用物理的方法(如用高能粒子射线辐照)或者化学的方法(如加入过氧化物化学交联剂或用硅烷接枝等)来夺取聚乙烯中的氢原子, 形成带有活性基的聚乙烯分子, 使原来线型结构的聚乙烯经交联反应成为三维网状结构的交联聚乙烯, 从而使材料的电气性能、耐热性能、耐老化性能和机械性能得到明显提高。它的长期允许工作温度可达 90℃, 允许过载温度为 105 ~ 130℃, 允许短路温度为 250℃。交联聚乙烯简称 XLPE, 它是英文 cross Linked polyethylene 的缩写。

(2) 其他挤包绝缘。除交联聚乙烯外, 用作挤包绝缘电缆材料还有聚氯乙烯、聚乙烯和乙丙橡胶等, 其主要性能如下。

1) 聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride 缩写为 PVC) 是以聚氯乙烯树脂为主要原料, 加入各类配合剂, 如增塑剂、稳定剂、填充剂等经混合塑化、造粒而制得聚氯乙烯塑料。聚氯乙烯的电气性能和机械强度都较好, 具有耐酸、耐碱和耐油性能。不延燃, 工艺性能也较好。缺点是耐热性能较低, 绝缘电阻率小, 介质损耗大, 只能用于 6kV 及以下的电缆绝缘。

2) 聚乙烯 (Polyethylene 缩写为 PE) 是由乙烯或乙烯与少量 α -烯烃共聚合而制得的高聚物。聚乙烯按其密度分类, 有低密度聚乙烯 (LDPE), 中密度聚乙烯 (MDPE) 和高密度聚乙烯 (HDPE)。根据分子量的大小, 聚乙烯可以分为高分子量聚乙烯和低分子量聚乙烯。高分子量聚乙烯具有较好的物理力学性能, 但加工性能趋向困难。聚乙烯具有优良的电气性能, $\text{tg}\delta$ 值和介电常数都较小。加入适量的添加剂, 可提高聚乙烯的耐电晕、耐热性能和机械强度, 并使环境应力开裂性能得到改善。

3) 乙丙橡胶 (Ethylene Propylene Rubber, 缩写为 EPR) 是由乙烯和丙烯共聚而成的新型合成橡胶, 乙丙橡胶具有良好的电气性能、耐热性能、耐臭氧和耐气候性能。除乙丙橡胶外, 用作电

缆绝缘的橡胶还有天然橡胶、丁苯橡胶、丁基橡胶和硅橡胶等。

3. 压力电缆绝缘

压力电缆绝缘是处于一定压力下的油纸绝缘，自容式充油电缆是压力电缆的一种，其油道与补充浸渍剂设备（供油箱）相连。当电缆温度升高时，浸渍剂膨胀，多出的某一体积的油通过油道流至供油箱。而当温度降低时，浸渍剂收缩，供油箱中的浸渍剂又通过油道返回绝缘层，以填补空隙。这样既消除了气隙的产生，又避免电缆中产生过高的压力。为了浸渍剂在电缆中流动顺畅，应选用低黏度油，如十二烷基苯等。充油电缆绝缘的浸渍剂应保持正压力（即高于大气压），以有效防止外界潮气侵入绝缘内。

（三）护层

1. 电缆护层的作用和结构

电缆护层是覆盖在绝缘层外面的保护层，它和导体、绝缘层统称为电缆的三大组成部分。护层的作用是在电缆使用寿命期间保护绝缘层不受水分、潮气及其他有害物质侵入，承受敷设条件下的机械外力，使电缆不受机械损伤和各种环境因素影响，确保电缆绝缘的电气性能长期稳定。

护层的结构取决于电缆的电压等级、绝缘材料和使用环境。典型的护层结构，包括内护套和外护层两部分。紧贴绝缘层的内护套是绝缘的直接保护层，外护层是内护套的保护层，它包覆在内护套外面，增加电缆受拉、抗压的机械强度，防止护套腐蚀及避免受到其他环境损害。通常，外护层由内衬层、铠装层和外被层三个同心圆层组成。充油电缆的外护层属于特种外护层，为承受电缆内部油压，铅护套充油电缆应有金属加强层结构。

2. 电缆护套

按所用材料不同，护套分为金属护套、非金属（橡塑）护套和组合护套三种。

1) 金属护套。金属护套具有完全不透水性。油纸绝缘电缆和 110kV 及以上的交联聚乙烯电缆应采用金属护套。按加工方式