

电力电缆头 制作与故障测寻

✧ 黄威 夏新民 等编

DIANLI DIANLANTOU
ZHIZUO YU GUZHANG CEXUN

第三版

The Third Edition



化学工业出版社

电力电缆头 制作与故障测寻

DIANLI DIANLANTOU
ZHIZUO YU GUZHANG CEXUN



黄 威 夏新民 等编

第三版

The Third Edition



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电缆头制作与故障测寻/黄威等编. —3 版. 北京: 化学工业出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-122-29268-1

I. ①电… II. ①黄… III. ①电力电缆-制作②电力电缆-故障检测 IV. ①TM247②TM757

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 048162 号

责任编辑: 高墨荣

责任校对: 王 静

装帧设计: 刘丽华

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 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 276 千字

2017 年 6 月北京第 3 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电力电缆是电力配电系统中用量最大的电气材料之一。各类电缆的生产制造、新品种的开发使用越来越多的同时，因各种原因引起的电缆故障也日趋增多。对电气工程维修技术人员而言不但要掌握电力电缆构造方面的基本知识，而且要通过不断地积累实践经验，学会采用先进技术和电气安装工艺进行电缆接头制作和电缆故障判断及测寻的方法。

本书从电缆构造入手，全面系统地讲述了 35kV 及以下电力电缆构造的基本知识，电力电缆头制作工艺及电缆故障判断测寻技术等内容。本书第一版 2008 年出版，第二版 2012 年出版，本书出版后深受读者欢迎，帮助电力电缆维修人员提高了理论水平和实际操作技能。本次为修订版，该版在第二版的基础上删除了过时内容，增加了电力电缆制作新技术和新材料的应用，并汇编了电缆故障实测案例。

本书适合各类电气工程安装中电缆安装单位的技术、管理人员、施工技术工人使用；同时还适合已敷设各类电缆线路的厂矿、企业电气维护人员、运行操作人员、故障检测与修理人员学习。

本书由黄威、夏新民、黄一平、黄禹编写。全书共 8 章，其中第 1、2 章由黄一平编写，第 3 章由夏新民编写，第 4、5、7、8 章由黄威编写，第 6 章由黄禹编写。全书由夏新民统稿。本书在编写过程中，得到了刘学红、王艳红、张敏的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电力电缆的典型结构.....	1
1.1 概述	1
1.2 电力电缆的品种及型号	2
1.3 电力电缆的基本组成	2
1.3.1 线芯	3
1.3.2 绝缘层	5
1.3.3 护层	6
1.4 电力电缆的典型结构	8
1.4.1 油浸纸绝缘电力电缆	8
1.4.2 橡胶绝缘电力电缆.....	12
1.4.3 聚氯乙烯绝缘电力电缆.....	14
1.4.4 交联聚乙烯绝缘电力电缆.....	18
1.4.5 阻燃电缆.....	21
1.4.6 耐火电缆.....	27
1.4.7 架空电力电缆.....	29
第 2 章 电缆终端头和中间头	33
2.1 对电缆终端头和中间头的基本要求.....	33
2.1.1 电缆终端头和中间头.....	33
2.1.2 对电缆终端头和中间头的基本要求.....	33
2.1.3 安装电缆终端头要遵守的规定.....	34
2.1.4 电缆终端和接头的接地线规定.....	36
2.1.5 电缆接头的防腐蚀和机械保护.....	36
2.2 导体连接.....	37
2.2.1 导体连接的基本要求.....	37

2.2.2	铝芯电缆的机械冷压接·····	38
2.2.3	铜芯电缆的机械冷压接·····	42
2.2.4	不同材料、不同截面电缆的连接·····	46
2.3	绝缘·····	47
2.3.1	对绝缘胶和绝缘带的要求·····	47
2.3.2	电缆头用绝缘带加工方法·····	48
2.3.3	手工绕包绝缘的注意事项·····	49
2.3.4	应力锥的作用·····	50
2.3.5	绕包应力锥·····	51
2.3.6	反应力锥的作用·····	52
2.3.7	绕包反应力锥·····	52
2.4	密封·····	52
2.4.1	封铅的材料和方法·····	53
2.4.2	铝包电缆封铅的特殊要求·····	53
2.4.3	电缆头的橡胶压装密封·····	54
2.4.4	塑料电缆的密封·····	55
2.5	接头专用机具·····	56
2.5.1	导体压接机具·····	56
2.5.2	剥切塑料电缆护套、绝缘和外屏蔽层的专用工具·····	60
2.5.3	电缆矫直机·····	62
2.6	电力电缆附件的设计原理·····	64
2.6.1	电力电缆附件·····	64
2.6.2	电力电缆附件的结构设计·····	66

第3章 电缆终端头和中间头的制作、安装 ····· 70

3.1	电缆终端头和中间头制作的一般工艺·····	70
3.1.1	电缆终端头和中间接头制作的常见工具和材料·····	70
3.1.2	交联聚乙烯绝缘电缆终端头制作的工艺要求和 施工步骤·····	87

3.1.3	交联聚乙烯绝缘电缆中间头制作的工艺要求和 施工步骤·····	90
3.1.4	高压电缆中间头、终端头安装注意事项·····	90
3.2	1kV 三芯交联电缆热缩头制作工艺 ·····	92
3.2.1	1kV 三芯交联电缆热缩终端头制作工艺 ·····	92
3.2.2	1kV 三芯交联电缆热缩中间头制作工艺 ·····	93
3.3	10kV 交联电缆热缩头制作工艺 ·····	95
3.3.1	10kV 单芯交联电缆热缩终端头制作工艺 ·····	95
3.3.2	10kV 单芯交联电缆热缩中间头制作工艺 ·····	97
3.3.3	10kV 三芯交联电缆热缩终端头制作工艺 ·····	100
3.3.4	10kV 三芯交联电缆热缩中间头制作工艺 ·····	102
3.3.5	10kV 油浸纸绝缘三芯电缆热缩终端头制作工艺 ···	105
3.3.6	10kV 油浸纸绝缘三芯电缆热缩中间头制作工艺 ···	108
3.4	35kV 三芯交联电缆热缩头制作工艺 ·····	112
3.4.1	35kV 三芯交联电缆热缩终端头制作工艺 ·····	112
3.4.2	35kV 三芯交联电缆热缩中间头制作工艺 ·····	115
3.5	15kV 交联电缆冷缩头制作工艺 ·····	119
3.5.1	15kV 单芯交联电缆冷缩终端头制作工艺 ·····	119
3.5.2	15kV 单芯交联电缆冷缩中间头制作工艺 ·····	121
3.5.3	15kV 三芯交联电缆冷缩终端头制作工艺 ·····	126
3.5.4	15kV 三芯交联电缆冷缩中间头制作工艺 ·····	131
3.6	35kV 交联电缆冷缩头制作工艺 ·····	136
3.6.1	35kV 单芯交联电缆冷缩终端头制作工艺 ·····	136
3.6.2	35kV 单芯交联电缆冷缩中间头制作工艺 ·····	139
3.6.3	35kV 三芯交联电缆冷缩终端头制作工艺 ·····	143
3.6.4	35kV 三芯交联电缆冷缩中间头制作工艺 ·····	148
3.7	特种电缆的安装 ·····	153
3.7.1	防火电缆的安装工艺方法 ·····	153
3.7.2	屏蔽电缆的安装工艺方法 ·····	157

3.7.3	矿用电力电缆的安装工艺方法	160
3.7.4	塑料及橡胶绝缘终端头制作	164
3.8	电缆头制作的安全注意事项	169
第4章	电力电缆的故障	172
4.1	电力电缆故障发生的原因与特征	172
4.1.1	常见电缆故障原因及特征	172
4.1.2	电缆绝缘老化原因分析	175
4.1.3	几种环境老化机理分析	178
4.1.4	环境条件老化实例及分析	179
4.2	电缆线路的故障分类	181
4.2.1	电缆线路故障按故障部位分类	181
4.2.2	电缆线路故障按故障时间分类	181
4.2.3	电缆线路故障按故障责任分类	182
4.2.4	电缆线路故障按故障性质分类	182
4.3	电力电缆故障诊断的一般步骤与方法	184
4.3.1	确定故障性质	185
4.3.2	粗测距离	185
4.3.3	探测路径或鉴别电缆	185
4.3.4	精测定点	186
4.4	故障性质的判断	187
4.4.1	运行故障	187
4.4.2	预试故障	189
4.5	电缆剩余寿命的预测	191
4.5.1	电缆使用寿命	191
4.5.2	聚乙烯绝缘电缆剩余寿命的预测	191
4.6	电缆故障的修复	192
4.6.1	电缆渗漏油故障的修复	193
4.6.2	电缆电晕放电故障的修复	195

4.6.3	电缆闪络故障的修复	195
4.6.4	电缆线路绝缘破损的修复	196
4.6.5	电缆铅包龟裂故障的修复	197
4.6.6	电缆外护层损坏的修复	197
第5章	电力电缆故障的测寻.....	198
5.1	脉冲反射法的基本概念及特征参数	198
5.1.1	脉冲反射法的分类	198
5.1.2	电力电缆的长线等效线路	200
5.1.3	电波在电缆中的传播速度	201
5.1.4	电缆的特性阻抗	203
5.1.5	电缆中电波的反射	205
5.1.6	故障点的闪络机理	206
5.2	脉冲反射法基本原理	207
5.2.1	低压脉冲反射法的基本原理	207
5.2.2	脉冲反射电压取样法的基本原理	208
5.2.3	脉冲反射电流取样法的基本原理	209
5.3	电力电缆故障距离的粗测	209
5.3.1	经典法简介	210
5.3.2	低压脉冲反射法	214
5.3.3	直流高压闪络测试法	219
5.3.4	冲击高压闪络测试法	224
5.3.5	故障距离测试中的问题与处理	233
5.4	电力电缆故障的精确定点	237
5.4.1	声测定点法	238
5.4.2	音频感应定点法	242
5.4.3	时差定点法	248
5.4.4	同步定点法	249
5.4.5	特殊定点法	249

5.4.6	低压电力电缆故障的定点	251
5.5	HD-5816 型电力电缆故障测试仪简介	253
5.5.1	测试仪概述	253
5.5.2	主要技术指标	253
5.5.3	仪器功能与技术特点	254
5.5.4	仪器的系统组成和工作原理	255
5.5.5	HD-5816 型电力电缆故障测试仪操作面板说明 ...	256
5.5.6	HD-5816 型电力电缆故障测试仪操作流程	257
5.6	水底敷设电力电缆的故障测寻和修复	272
5.6.1	水底电缆故障分析和探测	272
5.6.2	水底故障段电缆的修复	273
第 6 章	电力电缆路径的探测	275
6.1	地下电缆磁场分析	275
6.1.1	相地连接时电缆的磁场	275
6.1.2	相相连接时电缆的磁场	277
6.1.3	暂态脉冲电流的磁场	278
6.2	电缆路径探测仪基本工作原理	278
6.2.1	探测电缆路径	279
6.2.2	探测电缆埋设深度	281
6.3	电缆路径的探测方法	281
6.3.1	直接式连接	282
6.3.2	耦合式连接	283
6.3.3	鉴别电缆	284
6.4	路径仪的使用方法与注意事项	285
6.4.1	技术指标	285
6.4.2	使用方法与注意事项	286
第 7 章	电力电缆故障的在线监测	287
7.1	电力电缆绝缘在线监测技术	287

7.1.1	交联聚乙烯电缆绝缘电阻在线监测	287
7.1.2	交联聚乙烯绝缘电缆 $\tan\delta$ 在线监测	288
7.1.3	电力电缆局部放电在线监测	289
7.1.4	电力电缆温度在线检测系统	290
7.1.5	电力电缆直流分量在线监测法	291
7.2	电力电缆故障在线测试	291
第8章 电力电缆故障探测案例		294
8.1	高压电缆故障探测案例	294
8.1.1	单相开路故障	294
8.1.2	单相泄漏性故障	295
8.1.3	高阻接地故障	296
8.1.4	多相断路故障 1	297
8.1.5	多相断路故障 2	298
8.1.6	多相泄漏性故障	299
8.1.7	单相接地故障	300
8.1.8	耐压试验击穿故障 1	301
8.1.9	耐压试验击穿故障 2	302
8.1.10	耐压试验击穿故障 3	303
8.1.11	电缆机械损坏故障	304
8.1.12	耐压试验击穿故障 4	305
8.1.13	耐压试验击穿故障 5	306
8.2	低压电缆故障探测案例	307
8.2.1	低压电缆短路故障探测	307
8.2.2	低压电缆低阻并开路故障探测	309
8.2.3	低压电缆高阻并开路故障探测	311
参考文献		313

第 1 章 电力电缆的典型结构

1.1 概述

电力电缆在电力系统中是用来传送和分配电能的专用导体。电力电缆主要的结构部件为导线、绝缘层和护层，除 1~3kV 级产品外，均需有屏蔽层。线路中还必须配置各种中间连接盒和终端等附件。

电缆及其附件必须满足下列要求。

- ① 能长期承受电网的工作电压和运行中经常遇到的各种过电压，如操作过电压、大气过电压和故障过电压。
- ② 能可靠地传送需要传输的功率。
- ③ 具有较好的机械强度、弯曲性能和防腐蚀性能。
- ④ 有较长的使用寿命。

电力电缆品种很多。中低压电缆（一般指 35kV 及以下）有黏性浸渍纸绝缘电缆、不滴流浸渍纸绝缘电缆、聚氯乙烯绝缘电缆、聚乙烯绝缘电缆、交联聚乙烯绝缘电缆、天然橡胶绝缘电缆、丁基橡胶绝缘电缆、乙丙橡胶绝缘电缆等；高压电缆（一般为 110kV 以上）有自容式充油电缆、钢管充油电缆、聚乙烯绝缘电缆、交联聚乙烯绝缘电缆等。

电缆附件应具有和电缆本体相同的工作性能。但由于电缆附件的电场分布较电缆复杂，且现场施工工艺条件差，因此往往成为电缆线路中的薄弱环节，必须在设计、制造、安装施工和使用维护中充分重视。

迅速发展的电力工业，要求电力电缆的工作电压愈来愈高，传输容量日益增大。目前投入运行的电力电缆的最高电压是 700kV，最大传输容量达 2000MV·A。

提高电力电缆传输容量的方法有：对电缆采用人工冷却、研制新结构的电缆品种等。人工冷却系统结构不太复杂，效果显著。新结构的电缆品种有压缩气体绝缘电缆、低温电缆和超导电缆等。

1.2 电力电缆的品种及型号（表 1-1）

表 1-1 电力电缆的品种及型号			
绝缘类型	电 缆 名 称	电压等级/kV	允许最高工作温度/℃
油浸纸绝缘电缆	黏性浸渍纸绝缘电缆	1~35	1~3kV 80
	统包型		6kV 65
	分相屏蔽型		10kV 60
			20~35kV 50
	不滴流浸渍纸绝缘电缆	1~35	65~80
	统包型		
	分相屏蔽型		
	自容式充油电缆	110~750	80~85
塑料绝缘电缆	钢管充油电缆	110~750	80~85
	自容式充气电缆	110~220	80
	钢管充气电缆	35~110	75
橡胶绝缘电缆	聚氯乙烯绝缘电缆	1~10	65
	聚乙烯绝缘电缆	6~220	70
	交联聚乙烯绝缘电缆	6~220	10kV 及以下 90
			20kV 及以下 80
气体绝缘电缆	天然橡胶绝缘电缆	0.5~6	65
	乙丙橡胶绝缘	1~35	80~85
	丁基橡胶绝缘	1~35	80
新型电缆	压缩气体绝缘电缆	220~500	90
新型电缆	低温电缆		
	超导电缆		

1.3 电力电缆的基本组成

电力电缆的基本结构主要包括电缆线芯、绝缘层和护层三个部分。

1.3.1 线芯

(1) 线芯材料及性能

- ① 制作线芯常用的材料有铜和铝。
- ② 铜和铝的性能（表 1-2）。

表 1-2 铜和铝的性能

名称		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 ℃)	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) ^①	软态	40~45	
	硬态	80~120	35~45

① 1kgf/mm²=9.8MPa。

(2) 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 0.012~1000mm² 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 mm² 作单位。各国标准不同，我国目前规定中低压电缆截面有 2.5mm²、4mm²、6mm²、10mm²、16mm²、25mm²、35mm²、50mm²、70mm²、

95mm²、120mm²、150mm²、185mm²、240mm²、300mm²、400mm²、500mm²、625mm² 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。由多根单线组成导电线芯时须进行绞合，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 1-3 中所列公式计算。表中 m 为绞合层数（中心不作为层数）。

表 1-3 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，因系多层一次同向绞合，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特别柔软的大截面电缆，大多采用束绞的方式。

c. 复绞是将已绞合好的股线（一般为 7、19 根单线，可采用束绞或正规绞合）按正规绞合方式再进行绞合。复绞的绞向可与股线绞向同向（较柔软）或反向。单线根数多的中、大截面导线多采用复绞。

1.3.2 绝缘层

(1) 绝缘材料

电气设备用电电缆的绝缘层大多采用橡塑材料，选择绝缘材料须考虑如下因素。

① 电性能。对于 1kV 及以下的电线电缆，主要是绝缘电阻和耐电压强度；对 6kV 及以上的电缆，除上述两项外，还有表面放电、介质损耗、耐电晕等性能。在选用材料时应对橡塑材料、配合剂的基本性能及含水率、杂质、均匀性提出相应的指标，同时应考虑材料制备和绝缘工艺中的控制要求。

② 热性能。主要是长期和短期允许工作温度、热变形、热老化等。用于高温条件（如 100℃ 以上）的材料，热性能的要求更为突出，选择材料时应对材料的分子结构与热老化特性的关系及配合剂对改善热性能的作用效果进行分析。

③ 力学性能。主要是抗拉强度、伸长率、柔软性、弹性、抗撕性等。这些性能对没有护层的和使用时频繁移动的电缆更为重要。

④ 防护性能。对于仅有绝缘层的产品，要求绝缘材料具有一定的耐气候性和其他防护性能（如耐油、不延燃等）。

(2) 绝缘线芯成缆

将多根绝缘线芯绞合在一起称为成缆。成缆时，应将填芯、加强芯等进行合理排列。外径相同的绝缘线芯，成缆方式与导线正规绞合相似。

某些小截面的 2、3 芯电线，可将绝缘线芯平行排列，一次挤出，便于安装，也利于组成绝缘、护套生产流水线。

成缆时，线芯间、线芯与护套间的空隙须用纤维、橡胶条、泡沫塑料管（或条）等填充，使其结构紧密、稳固。小截面的多芯电缆可不加填充，使其结构紧密、稳固。移动使用的电线电缆，要求导线、各绝缘芯和护层间互不粘连。有的品种允许在绝缘与护层间包一层电缆纸或塑料薄膜，个别品种成缆时以密封胶浆填充线芯间，使产品具有横向或纵向密封性。

成缆的节距比一般如下。

- ① 固定敷设用电线电缆不大于 25。
- ② 移动使用的电线电缆不大于 14。
- ③ 柔软性要求高的产品，成缆节距比应小些。

(3) 电缆绝缘和电压等级的关系

电气装备用电线电缆的绝缘层大多是用热挤压法将橡塑材料整体包覆在导线上，成一个圆筒体。个别产品也采用橡胶纵包，合成纤维或薄膜绕包，以及挤压和绕包结合的综合结构。

电缆绝缘结构及厚度与电压等级有关，一般电压越高则绝缘越厚，但不成比例。

确定绝缘厚度时应考虑下列因素。

① 电压级为 6kV 及以上的电线电缆，其绝缘厚度主要按电场强度进行设计。传输电流较大的，应考虑绝缘层等的散热性对允许载流量的影响。

② 电压级在 1kV 及以下时，其绝缘厚度取决于运行中所受的各种机械力。同一品种的绝缘厚度随导线截面的增大而分级增厚。

③ 相同电压级的电线电缆的绝缘厚度一般是：没有护套的比有护套的较厚；移动式的比固定敷设用的较厚；使用条件苛刻或安全要求高的比一般的较厚。

④ 绝缘厚度和截面积的关系。对于一定电压等级的电缆，如果要保持电缆的最大电场强度不变，则电缆导体半径越大（电缆导体截面积越大），电缆绝缘可相应薄些。例如 35kV 油浸纸绝缘电缆截面积 $50\sim 95\text{mm}^2$ 的绝缘厚度为 11mm，截面积 $120\sim 300\text{mm}^2$ 的绝缘厚度则为 9mm。

对于电压等级较低的电缆，其绝缘层厚度则随着导体截面积加大而增厚，这主要是考虑机械强度的配合关系。例如 1kV 油浸纸绝缘多芯电缆，导体截面积为 $120\sim 150\text{mm}^2$ 的芯绝缘厚度为 0.85mm，导体截面积为 $185\sim 240\text{mm}^2$ 的芯绝缘厚度则为 0.95mm。

1.3.3 护层

(1) 护层的结构类型