



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

电力电缆工程

(原书第3版)

Electrical Power Cable Engineering, 3rd edition

(美) William A. Thue 等著
孙建生 徐晓峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

电力电缆工程

(原书第3版)

Electrical Power Cable Engineering,
3rd edition

(美) William A. Thurmon 等著

孙建生 徐晓峰 等译



机械工业出版社

Electrical Power Cable Engineering, 3rd edition, by William A. Thue

© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All Rights Reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版, 版权所有, 侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-5196 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电缆工程: 原书第 3 版/(美) 图厄 (Thue, W. A.) 等著; 孙建生等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electrical Power Cable Engineering, 3rd edition

ISBN 978-7-111-47480-7

I. ①电… II. ①图…②孙… III. ①电力电缆 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 169932 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 阎洪庆

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 薇

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 22 印张 · 428 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47480-7

定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心: (010) 88361066 教 材 网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

本书是一本完整阐述电力电缆相关技术的专著。全书内容丰富，由浅入深，涵盖了中压和低压电力电缆的设计、安装、运行和维护内容。本书的作者为美国 IEEE 资深会员，在电缆行业有五十多年的经验。本书目前已经是第 3 版，主要内容来自于大学教授的相关课程。内容在原理上阐述得非常细致，同时，结合了实际的生产与使用，对我国电力电缆工业的发展有很好的借鉴作用。同时，该书详细地介绍了美国乃至北美对电力电缆的要求，对出口北美市场也有很好的指导作用。

本书对于从事电线电缆制造，以及电力电缆工程设计、施工、运行和维护的人员，都是一本不可多得的好书！

译者序

电力电缆是一门古老的学科，有相对稳定的技术框架。但它又是一块不断发展的领域，智能化、可靠性、全寿命周期管理等热门议题不断出现。

本书是一本比较完整地阐述电力电缆相关技术的专著。本书内容源于美国威斯康星大学电缆专业课程的讲稿。自 20 世纪 90 年代以来，已历经三版，反映了北美电力电缆技术和发展动态。

全书内容丰富，由浅入深，涵盖了低压和中压电力电缆的设计、安装、运行和维护内容。共分 24 章，由各领域的专家编写。主要内容包括：电力电缆的历史、基础理论、电缆结构（导体、绝缘、屏蔽、护套和铠装）、标准和规范、制造、敷设、附件、载流量、土壤热阻系数、护套互联和接地、故障定位、现场评估、雷电保护、腐蚀等内容。

本书适合于从事电线电缆研究制造，电力电缆工程设计、施工、运行和维护等人员学习使用。也可以作为电线电缆相关专业的大专及本科院校学生的参考书。

本书的翻译得到上海电缆研究所的热忱支持，在参与翻译的同仁们倾力合作、认真工作下得以完成。本译稿尚有夏俊峰、于红旭、李闯、陆燕红、史建设、邱晓彬、仲伟霞、曲文波和胡双诸位工程师参与部分章节的翻译、校对和电子版整理成稿等工作，在此一并致以衷心的感谢。

译者

第3版前言

作者要感谢威斯康星大学麦迪逊分校工程专业发展部的 Willis F. Long 教授。他具有 40 年的专业经验，使本书的出版成为可能。由于他的努力，《Power Cable Engineering Clinic》一书在 20 世纪 70 年代出版。当时 Eugene Greenfield 博士也提供了日常课程的讲稿，后来又补充了一些讲稿，丰富了本书的内容。

这一课程在 1999 年进行了调整，称为“如何设计、安装、运行和维护可靠的电力电缆系统”。它还分为两部分：“理解电力电缆特性与应用”和“评估并延长屏蔽电力电缆系统寿命”。目前这个课程名称为“理解电力电缆特性与应用”。多年来，大量的讲座产生了丰富的课堂笔记，打下了资料基础，并已经汇编成册。贡献者希望团队的努力能够为面向所有电缆专业工程师的资料库添砖加瓦。

随着电缆工业的不断发展，产生了许多新材料、新产品和新概念，这些也都纳入本版内容。本版还增加了新章节（低压电缆和土壤热阻系数）；其他章节也有更新和扩充（导体部分包括公制单位，缩略语添加到术语中）。

本书的重点仍为低压和中压电缆，因为它们涵盖了世界各地的大多数电缆。从工程角度来看，输电电缆更具技术难度，但所有用于输电电缆的基础理论也适用于较低电压等级的电缆。

本书知识丰富，背景资料多元，从中受益的读者包括：

- 电缆工程师和电力技术人员、工业用户和发电企业生产人员。
- 开设电力课程的大学。
- 电缆制造商，可作为员工电力电缆技术培训的材料。
- 专业人员，用来查找和理解电力电缆的名词术语、工程特性和背景信息，帮助其在电力电缆规范、采购、安装、维护和运行等方面做出正确的选择。

William A. Thue

第 1 版前言

有人认为电力电缆就是导体外面包一层绝缘，或者经常也就是再加上一层屏蔽或护套而已。也许，恰恰就是这些天真、简单的想法导致如今美国的大学里电气工程课程严重忽视电缆工程，特别是电力电缆工程，而只注重于计算机、电子和通信的缘故。然而实际上，就是电力电缆连接了全世界！电力电缆工程的历史精彩纷呈，其中既包含巨大的成就，也伴随着未曾预料的失误。

正如本书所强调的，电缆工程技术上非常复杂。可以肯定地说，电气、机械以及土木工程（某种程度上）也都与电缆工程息息相关。此外，电缆工程还与很多其他学科，诸如物理、无机化学、有机化学（主要是高分子聚合物）、物理化学、冶金以及腐蚀等有关联，试验和标准会涉及这些领域。当然，不能指望在一本书中对所有涉及的领域都进行全面透彻的论述。但是，通过对电力电缆各个构成部件详尽的论述，也能为理解上述各个领域的基本概念提供指导。书中所列出的参考资料也为那些有兴趣对各个专题进行更深入探索的人们提供了更多信息。

书中强调了与不同的电缆敷设形式相关的各因素的重要性。垂直敷设大长度电缆线路存在特殊问题。排管敷设可能会在接头、终端、肘形连接器以及牵引力上有麻烦。一开始，挤包绝缘电缆采用沟道直埋敷设时就没有考虑到聚乙烯的“水树”问题。最初人们认为聚乙烯不受潮气的影响。发生了大量的现场故障后，关于水树问题的论文数量过千。现场故障与多种因素有关，如雷击、开关浪涌电压、重复机械应力以及电场屏蔽层被石油或汽油等有机溶剂溶胀，等等。正确认识上述各种不同因素对现场运行电缆的影响是十分重要的。

本书深入浅出地阐明了电缆相关复杂问题，特别适合那些对电缆背景了解不多和应用经验不丰富的读者。同时，本书还能为那些迫切需要在特定用途下评估不同电缆的读者提供足够的详情。最重要的是，借助本书，电缆材料的供应商可以对电缆有更加全面的理解。另一方面，有经验的电缆工程师也能对以前没有用过的材料的特性参数有更好的理解和掌握。

Kenneth N. Mathes

咨询工程师，斯克内克塔迪，纽约

【编者的话：在本书第 3 版出版之际，尽管已经过去了十多年，Kenneth 所说的话到今天仍然是适用的】

目 录

译者序

第3版前言

第1版前言

第1章 电力电缆的历史	1
1.1 地下电缆的发展	1
1.2 早期电报线路	1
1.3 电气照明	2
1.4 照明用配电	3
1.5 纸绝缘电缆	5
1.6 地下住宅配电系统	6
1.7 挤包绝缘电力电缆	7
1.8 存在的问题	7
1.9 中压电力电缆的研制	8
参考文献	10
第2章 电缆介质基础理论	11
2.1 引言	11
2.2 电场与电压	11
2.3 空气绝缘导体	12
2.4 利用绝缘节省空间	12
2.5 更高的电压	13
2.6 绝缘屏蔽	14
2.7 必要的导体屏蔽	15
2.8 屏蔽层要求	15
2.9 绝缘层要求	16
2.10 护层	16
2.11 术语	16
2.11.1 非屏蔽电力电缆	16
2.11.2 中压屏蔽电缆	16
2.11.3 导体	16

2.11.4 电气绝缘 (电介质)	17
2.11.5 电场	17
2.11.6 等位线	17
参考文献	17
第3章 导体	18
3.1 引言	18
3.2 材料选择	18
3.2.1 直流电阻	18
3.2.2 重量	19
3.2.3 载流量	19
3.2.4 电压降	19
3.2.5 短路	19
3.2.6 其他重要因素	19
3.3 导体规格	20
3.3.1 美国线规 (AWG)	20
3.4 圆密耳 (截面积单位) 规格	20
3.5 公制标准	27
3.6 绞合	31
3.6.1 同心绞合	31
3.6.2 紧压绞合	32
3.6.3 型线绞合	32
3.6.4 束绞	32
3.6.5 束丝复绞	33
3.6.6 扇形导体	33
3.6.7 分割导体	34
3.6.8 环形导体 (中空导体)	35
3.6.9 同向绞合导体	36
3.7 机械物理性能	36
3.7.1 导体性能	36
3.7.2 硬度	36
3.8 绞合阻隔	37
3.9 电气参数计算	38
3.9.1 导体直流电阻	38
3.9.2 导体交流电阻	38
3.9.3 集肤效应	39

3.9.4 邻近效应	39
3.9.5 磁性金属管中的电缆	39
3.9.6 高频电阻	39
参考文献	40
第4章 电缆电气参数	41
4.1 电缆额定电压	41
4.2 100% 水平	41
4.3 133% 水平	41
4.4 173% 水平	42
4.5 不适用电缆的场合	42
4.6 低压电缆额定电压	42
4.7 电缆计算中的常量	42
4.7.1 电缆绝缘电阻	42
4.7.2 体积电阻率	42
4.7.3 表面电阻率	43
4.7.4 直流充电电流	43
4.8 介电常数	44
4.9 电缆绝缘的介质损耗	44
4.10 电缆电容	45
4.11 容抗	46
4.12 交流运行时的充电电流	46
4.13 电缆的感抗	47
4.13.1 高频下电缆的感抗	47
4.14 电缆内的互感	47
4.15 电缆导体阻抗	48
4.16 电缆总电抗	48
4.17 电缆介质损耗因数	48
4.18 绝缘参数	49
4.18.1 电缆内的电应力	49
4.18.2 介电强度	49
4.18.3 交流介电强度	50
4.18.4 冲击强度	50
4.19 电气参数综述	50
4.19.1 电阻	50
4.19.2 电导	50

4.19.3 电导率	51
4.19.4 体积电阻率	51
4.19.5 电感	51
4.19.6 多导体电缆电感	51
4.19.7 电缆互感	52
4.19.8 同轴电缆电感	52
4.20 电容	52
4.20.1 电缆电容	52
4.21 电抗	52
4.21.1 感抗	52
4.21.2 容抗	53
4.21.3 总电抗	53
4.22 阻抗	53
4.23 导纳	53
4.24 电力工程的功率因数	53
4.25 圆筒的切向应力	54
参考文献	54
第5章 绝缘材料的基本原理	55
5.1 引言	55
5.2 电气绝缘材料的物理化学特性	58
5.2.1 概述	58
5.2.2 聚乙烯分子链长度及分子量	59
5.2.3 支链	61
5.2.4 结晶度	62
5.2.5 聚乙烯共聚物	64
5.3 聚乙烯的制造	65
5.3.1 传统制造工艺	65
5.3.2 分子量分布控制技术	65
5.4 交联聚乙烯	66
5.4.1 基本原理	66
5.4.2 过氧化物交联	68
5.4.3 辐照交联	71
5.4.4 硅烷交联	72
5.4.5 温度对材料特性的影响	74
5.4.6 抗氧化剂	75

5.4.7 本节内容回顾	76
5.5 抗水树交联聚乙烯	77
5.6 乙丙橡胶绝缘	78
5.6.1 机理	78
5.6.2 其他乙丙橡胶	81
5.6.3 乙丙橡胶并不都是类似的	81
5.6.4 自由电荷与限制电荷	83
5.7 屏蔽材料	83
5.7.1 综述和聚合物的作用	83
5.7.2 炭黑的作用	84
5.7.3 非导电的屏蔽材料	85
5.8 护套材料	85
5.9 阻水技术	87
5.10 纸绝缘电缆	88
5.10.1 机理	88
5.10.2 老化行为	90
5.10.3 测试方法	91
5.11 低压聚合物绝缘电缆	92
5.11.1 绝缘材料	92
5.11.2 次级电缆	97
5.12 挤包绝缘的修复	97
5.12.1 概念介绍	97
5.12.2 修复原理	99
5.12.3 电缆修复的现场过程	100
5.13 中压绝缘材料的比较	101
参考文献	103
附录	105
附录 A 聚乙烯分子链在极低温度下的运动	105
附录 B 单点催化聚合	105
第6章 电缆绝缘材料电气性能	107
6.1 引言	107
6.2 体积电阻率 (VR)	108
6.3 运行场强下绝缘材料的响应	109
6.3.1 极化	109
6.3.2 介电常数	112

6.3.3 介质损耗	113
6.3.4 色散	113
6.3.5 矿物填充体系和界面极化	115
6.3.6 电导	115
6.3.7 电缆响应	116
6.3.8 纸/液绝缘系统	116
6.3.9 小结	117
6.4 高场强时的绝缘响应	117
6.4.1 介绍	117
6.4.2 介电强度	117
6.4.3 测试方法	118
6.4.4 击穿和故障	120
6.4.5 局部放电	122
6.5 本章小结	125
参考文献	126
第7章 电力电缆的屏蔽	127
7.1 引言	127
7.2 导体屏蔽	127
7.3 中压电缆的绝缘屏蔽	128
7.3.1 应力消减层	128
7.3.2 金属屏蔽	128
7.3.3 同心中性线电缆	129
7.4 低压电力电缆的金属屏蔽	129
7.4.1 电场	129
7.4.2 磁场	130
参考文献	130
第8章 护套和铠装	131
8.1 金属护套	131
8.2 热塑性护套	131
8.2.1 聚氯乙烯	131
8.2.2 聚乙烯(不导电的)	132
8.2.3 半导体护套	133
8.2.4 聚丙烯	134
8.2.5 氯化聚乙烯	134

8.2.6 热塑性弹性体	134
8.2.7 尼龙	134
8.2.8 低烟无卤 (LSZH) 护套	135
8.3 热固性护套材料	135
8.3.1 交联聚乙烯	135
8.3.2 氯丁橡胶	135
8.3.3 氯磺化聚乙烯	135
8.3.4 丁腈橡胶	136
8.3.5 丁腈/聚氯乙烯	136
8.3.6 乙丙橡胶	136
8.4 铠装	136
8.4.1 连锁铠装	136
8.4.2 钢丝铠装	137
8.4.3 其他铠装类型	138
参考文献	138
第9章 低压电缆	139
9.1 引言	139
9.2 设计	139
9.2.1 导体设计	139
9.2.2 单层绝缘导体	140
9.2.3 带绝缘和护套的导体	142
9.2.4 成股的单芯导体电线和电缆	144
9.2.5 多芯电缆	145
参考文献	150
第10章 标准和规范	151
10.1 引言	151
10.2 制造商组织	151
10.2.1 绝缘电缆工程师协会 (ICEA)	151
10.2.2 国家电气制造商协会 (NEMA)	152
10.2.3 铝协会 (AA)	152
10.3 使用者组织	152
10.3.1 爱迪生照明公司协会 (AEIC)	152
10.3.2 乡村公共服务 (RUS) [之前的 REA]	152
10.4 共识组织	153

10.4.1	美国国家标准学会 (ANSI)	153
10.4.2	美国材料试验协会 (ASTM)	153
10.4.3	加拿大标准协会 (CSA)	153
10.4.4	国际电工委员会 (IEC)	153
10.4.5	美国国家电气规范 (NEC)	153
10.4.6	美国安全检测实验室 (UL)	153
10.5	典型的标准和规范	154
10.5.1	导体	154
10.5.2	导体屏蔽	155
10.5.3	绝缘	155
10.5.4	挤包绝缘屏蔽	157
10.5.5	金属屏蔽	158
10.5.6	电缆护套	159
10.5.7	常规文献	159
	参考文献	159
第 11 章	电缆的制造	161
11.1	引言	161
11.2	导体的制造	161
11.2.1	拉丝	161
11.2.2	退火	161
11.2.3	退火拉丝	162
11.2.4	绞合	162
11.3	挤包绝缘电缆制造	162
11.3.1	绝缘材料和护套材料	162
11.3.2	挤出	163
11.3.3	硫化	163
11.3.4	冷却	165
11.4	挤出生产线的构造	165
11.4.1	单台挤出机生产线	165
11.4.2	“两步法”挤出	165
11.4.3	“一步法”挤出生产线	166
11.4.4	“真正三层”共挤	167
11.4.5	挤出机头	167
11.4.6	加工	167
11.4.7	成缆	167

11.5 纸绝缘电缆	168
11.5.1 纸绝缘	168
11.5.2 纸张绕包	169
11.5.3 成缆	169
11.5.4 浸渍材料	169
11.5.5 干燥和浸渍	170
11.5.6 浸渍油的处理	171
11.5.7 浸渍控制	171
11.5.8 冷却工序的控制	171
11.6 出厂检验	172
11.6.1 低压电缆全长度电性能试验	172
11.6.2 中压电缆电性能试验	173
11.6.3 其他出厂检验	173
参考文献	173
第12章 电缆敷设	174
12.1 引言	174
12.2 电缆敷设拉力的讨论	175
12.2.1 导体的最大允许拉力	175
12.2.2 敷设拉力计算	175
12.2.3 摩擦系数	176
12.2.4 侧壁承载压力 (SWBP)	176
12.2.5 管道或排管中多根电缆的敷设	177
12.3 敷设计算	180
12.3.1 横向弯曲外的拉力	180
12.3.2 敷设方向的选择	181
12.4 电缆敷设研究	182
12.4.1 研究成果	183
12.5 现场经验	183
参考文献	185
第13章 接头、终端和附件	186
13.1 引言	186
13.2 终端理论	186
13.2.1 电场介绍	186
13.2.2 终端的用途	186

13.2.3 简单消除应力的终端	187
13.2.4 电压梯度终端	188
13.3 终端设计	190
13.3.1 应力锥设计	190
13.3.2 电压梯度设计	190
13.3.3 纸绝缘电缆终端	190
13.3.4 钎柄(接线端子)	190
13.3.5 可分离连接器(肘形)	191
13.4 接头	194
13.4.1 接头理论	194
13.4.2 接头设计和绝缘	195
13.5 可替代设计	198
13.6 接头和终端的选择	199
13.7 故障分析	199
参考文献	199
第14章 电缆载流量	200
14.1 引言	200
14.2 土壤热阻系数	200
14.3 载流量计算	201
14.3.1 热路模型	201
14.3.2 负载因数	202
14.3.3 损耗因数	202
14.3.4 导体损耗	202
14.3.5 介质损耗的计算	204
14.3.6 金属屏蔽损耗	204
14.4 典型热路	206
14.4.1 有护套和屏蔽电缆的内部热路	206
14.4.2 单层绝缘, 连续负载	206
14.4.3 不同材料电缆的内部热路, 连续负载	206
14.4.4 有护套和屏蔽简单电缆的热路, 连续负载	206
14.4.5 例3中电缆, 周期性负载	206
14.4.6 外部热路, 沟道中电缆, 连续负载	207
14.4.7 外部热路, 沟道中电缆, 时变负载, 外部热源	207
14.4.8 外部热路, 直埋电缆, 周期性负载, 可能有外部热源	207
14.4.9 外部热路, 空气中电缆, 可能有外部热源	207