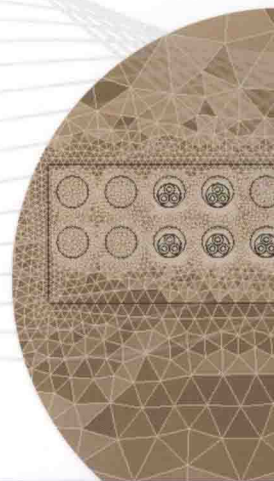


马国栋 编著



# 电线电缆载流量

(第二版)



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

杨文才 杨葵

# 电线电缆载流量

(第二版)



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书以基本概念作为起点对电缆载流量理论进行阐述和分析。通过模拟试验、线路设计、软件计算和实际线路动态载流量温度监测,检验计算数据的准确性和可靠性,以确定电缆载流能力。

本书共分为8章,包括电缆基本概念、架空导线载流量计算、电缆持续负荷载流量计算、电缆最佳经济截面的设计、电缆短时负荷与短路电流计算、18/30(36)kV及以下电缆周期负荷计算、18/30(36)kV以上电缆周期负荷计算、电缆运行中实时温度监测。附录为电线电缆载流量表。

本书以理论为基础,并注重实用性,可供设计研究院、电网企业、电缆制造企业和大型工矿企业相关人员学习使用,亦可作为教学参考书,供高等院校相关专业师生参阅。

## 图书在版编目(CIP)数据

电线电缆载流量/马国栋编著. —2版. —北京:中国电力出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5123-4653-6

I. ①电… II. ①马… III. ①电线-电缆-载流量-研究  
IV. ①TM246

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 148594 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2003 年 10 月第一版

2013 年 11 月第二版 2013 年 11 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 474 千字 1 彩页

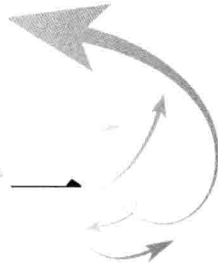
印数 6001—9000 册 定价 96.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



# 序 言 一

为了人类生活环境更好的与自然和谐，城市架空线路逐渐被地下电缆网络取代。因此，研究电缆负荷能力是科技人员的重要任务。按照国际标准和国内标准使电缆载流量管理向数字化、程序化、智能化目标前进，达到充分、有效、科学地利用电能是我们首要的任务。

早在 20 世纪 60 年代，我国就开始了电缆载流量的研究。第一个电缆载流量试验基地建立在第一机械工业部上海电缆研究所。在简陋的环境条件下，第一代电缆科技工作者开始向电缆载流量领域探索、追求。本书作者以执着和敬业精神，历经挫折，坚持不懈地从事载流量研究。《电线电缆载流量(第一版)》于 2003 年由中国电力出版社首次出版。该书出版后，受到相关方面的肯定和欢迎，取得显著的社会效益。

与第一次出版相距近十年的间隔，由于电力事业迅速发展，电缆载流量越来越受到人们的重视。无论从理论计算的深化、计算标准的完善，还是动态线路的检测等，都有新的内容补充和创新。同时，电缆产品也在更新换代，需要及时反映这方面的新成果和动态创新。如果说《电线电缆载流量(第一版)》是近半个多世纪以来电缆载流量领域里科技人员研究、试验和总结出来的系统知识宝库，那么《电线电缆载流量(第二版)》则是第一版的延续和拓宽。无论从理论计算方面，还是科学试验、线路检测等，增添了许多新内容。本书理论计算为软件编制奠定了基础。按实际电缆参数和环境条件计算不再是人们的梦想。本书内容显示了目前国际和国内科研人员对电缆载流能力研究的水准，有一定的参考价值。

在求知无尽的渴望中，书籍是捷径，但很多人习惯于一味地接收和装载，忽略了疑问。而现实中很多条条框框，经过时间的淬炼之后，容易形成固有的模式而成为权威和真理，也成了人们思考问题的准绳。其实，知识本体是一种提出观点和加以论证的过程。不应该只是借用，更需要质疑、探索和突破。不要满足于只重复别人的思路，用逆向思维来对待遇到的问题，更全面更深入地思考问题，尝试寻找新的突破。

杨黎明

2012.5 于南京



## 序 言 二

电能的需求量越来越大是人类社会发展的必然趋势。属于二次能源的电能目前还是以化石为主。有句话说得好，善待地球吧，它不是你的，它是你的孩子借给你的。因此，我们要竭力减少化石发电，除了风力、太阳能发电之外，还要充分有效地利用电能，尽量减少无谓的电能损耗，提高利用率。

在各个领域需求者的行为相当一致，他们目不转睛地盯着各自感兴趣的东西。这种趋势使创造者及时把握时机做出迅速反应。本书作者抓住了电缆输电范畴内历年来被人们忽视的点汇聚成蕴涵着丰富的理念和商机的光束。

电缆是电能传输的载体，在电能传递过程中，如果选择电缆规格与要传输的电能(载流量)不匹配，导致两种可能，一是传递电能小于电缆本体负荷能力，导致资源浪费；二是传递电能大于电缆本体负荷能力。轻则造成线损率加大，重则导致电缆毁坏。建筑物用电电缆关键是载流量确定是否准确，它关系到人身安全问题。建筑物失火屡见不鲜，大多数是因为电线电缆过载或短路引起。电能传输的载体质量、设计选型以及用户使用问题是造成事故的关键。然而，电缆属性中一个最重要的参数——载流量——是个软肋。虽然有国家和 IEC 计算标准，但由于其计算的烦琐性和复杂性，涉及参数很多，再加上环境条件的制约，一般工厂技术人员难以熟练掌握。目前市场上专业书籍几乎看不到，客观上造成了人们学习载流量知识的困难。无根据地提高电缆载流能力，会导致电缆产品安全运行可靠性得不到保障，事故频繁发生。

涉及建筑物用电电缆首先考虑的是防火阻燃、敷设方式问题。另外，在建筑物失火状态下，如何在给定时间内向用电设备提供电源也是新课题。这些课题都与电缆负荷能力(载流量)相关。因此，正确地确定载流量参数将有重要的实用价值。

本书作者曾著有《电线电缆载流量(第一版)》，赢得了广大读者的好评。相隔近十年，《电线电缆载流量(第二版)》问世。第二版将近十年内作者对载流量研究加深和本领域内国内外专家们睿智和经验的结晶汇聚于一体，学术价值和实用价值高。希望可以为电力传输、电力设计乃至电缆制造奠定相应的理论基础。

本书理论内容是今后载流量计算应用软件的基础。建议电缆制造厂将电缆载流量计算软件随着电缆产品一起赠与电缆使用者。这样既是对自己制造的产品负责，又是对投资者负责。

推荐本书可供电缆制造、设计、使用者以及相关专业的管理者参考学习。

洪元颐

2012.8 于北京



# 序言(第一版)

电线电缆载流量是电线电缆产品的主要基本参数。世界各国长期以来均在不断地进行试验研究。上海电缆研究所建所后不久也建立试验研究基地，从事相应的试验研究工作。并于上世纪六十年代中期，根据试验研究工作成果，首先提出有关油浸纸绝缘电力电缆和布电线载流量的计算方法和相应的载流量数据。随后，由于种种原因，此项工作未能进一步全面、系统地继续深入进行。编著者凭借执着的精神，历经挫折，坚持不懈地从事有关载流量试验研究工作，广泛收集大量国内外有关文献，终于编就《电线电缆载流量》。敬佩之感油然而生，欣然从命，代写序言。深信该书之出版，必将取得显著的社会效益。

编著者详尽地介绍了电线电缆载流量的基本计算方法、相应的计算软件和有关试验验证方法，并在此基础上结合电线电缆国家标准，在给定的基准条件下提出目前通用类型电线电缆产品的载流量数据，对电线电缆生产企业和使用部门均有较大的指导和现实意义。

正确地选择电线电缆产品的截面积，除了参照基准条件的载流量外，尚应考虑结合实际敷设条件和运行方式。为此，编著者还详细论述了不同环境和敷设条件下的修正方式，并提出短时负荷、周期负荷以及短路电流和短路温度的计算方法。此外，有关直接埋地电缆的土壤周围发生水分迁移而形成土壤干燥区域以及引用“经济截面”新概念选择电缆等方面也均有论述，可谓是有有关电线电缆载流量的大全。可供电线电缆制造企业、电线电缆使用部门、设计研究院所和大专院校等有关人员参考使用。

杨文才

2003.6 于上海

# 前言



2003 年,《电线电缆载流量(第一版)》出版后引起读者的广泛好评。随着电力建设速度的快速增长,人们对电缆线路负载能力、安全可靠运行越来越重视,《电线电缆载流量(第一版)》的内容已经不能满足实际的需要,决定对第一版进行修订和拓展。

本书编写以理论为基础,以 IEC 标准为主线,介绍电线电缆载流量的基本计算方法并结合国内外文献予以补充和拓宽。如根据实际电力运行部门的需要,除了线路负荷因数为满负荷(负荷因数  $load=1$ )外,增加了在欠负荷(负荷因数  $load<1$ )状态下如何确定载流量;并在电缆集聚敷设等方面提供了计算方法。通过实际示例的演算,验证理论的正确性和计算过程中选用参数的真实性和重要性。

这一系列手段都是优化电缆负载能力(载流量),确定设计电缆线路负荷能力的参考指导数据,是实际电缆线路安全可靠运行的参考。本书还包括电缆载流量动态监测,并附以部分类型电缆载流量表作为读者参考。

鉴于篇幅所限,相关电缆载流量计算软件和载流量表等将另行出版。

在本书出版之际,我要衷心感谢以下专家学者为本书付出的心血和汗水。审阅者包括赵浩、刘毅刚、冯云力、华建飞、马纪财、谷亮、张俊、卫岚。

为本书提供资料的有(基于篇幅所限,有部分资料本书中未纳入):牛海清、孙建生、刘毅刚、马刚、张晓明、胡泽祥、余乐华、宗曦华、朱静筠、涂兆钜、韩云武、杨峰、章涛、刘瑜、马纪财。

对本书进行专业校对的有徐晓峰、杨峰、涂兆钜、高明等。

为本书策划和绘图编制软件等方面付出精力的有:张骥俊、马东明、李哲晟、郁慧等。

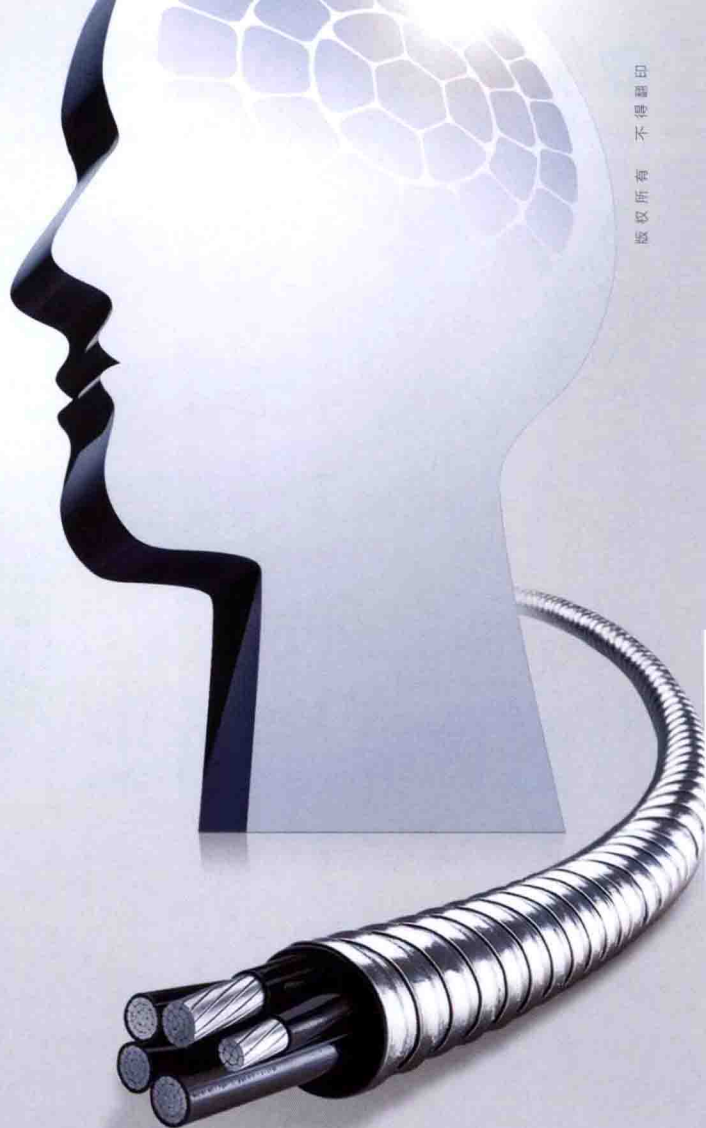
由于水平所限,书中疏漏之处在所难免,如果读者在本书中发现了错误,请发送邮件到 MGDSH@126.com,非常感谢。

马国栋

2013.8 于上海



# 铝合金电缆的缔造者 世德合金® 电缆



400-650-8577 [www.generalcable.cn](http://www.generalcable.cn)

作为高强度、抗蠕变、高导电率的**AA8030** 铝合金电缆的发明者，  
**世德合金® STABILOY®**的科学家们从未间断对产品与技术的研发和创新，  
为全国各地、不同领域的用户度身制定高效可行的解决方案。



美国通用电缆 (中国)

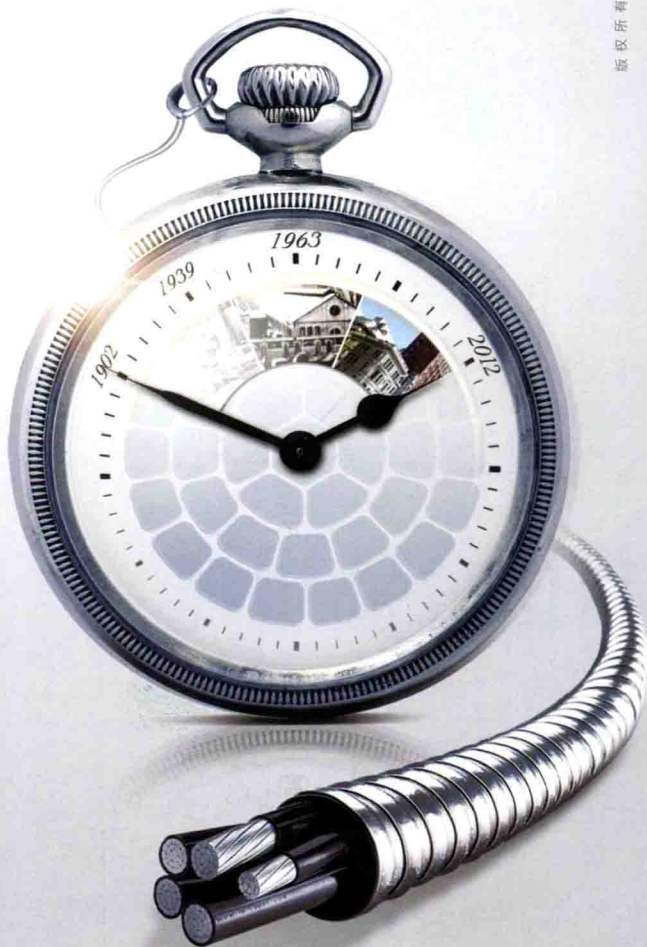
上海 / 北京 / 天津 / 广州 / 成都 / 厦门 / 武汉 / 西安 / 合肥 / 太原 / 沈阳

General Cable (China)

Shanghai/Beijing/Tianjin/Guangzhou/Chengdu/Xiamen/Wuhan/Xi'an/Hefei/Taiyuan/Shenyang



# 铝合金电缆的历史 世德合金®的历史



400-650-8577 [www.generalcable.com](http://www.generalcable.com)

**170** 年来，美国通用电缆专注电缆及线缆的研发、制造、应用与改进。

从发明高强度、抗蠕变、高导电率的铝合金，到领先使用铝合金导体替代传统低压铜导体生产世德合金® STABILOY® 电缆；

从开拓8000系列铝合金电缆中国市场，到坚持社会、环境和经济的可持续发展；

世德合金® STABILOY® 电缆以卓越超凡的专业实力撰写铝合金电缆的光辉历史。



美国通用电缆 (中国)

上海 / 北京 / 天津 / 广州 / 成都 / 厦门 / 武汉 / 西安 / 合肥 / 太原 / 沈阳

General Cable (China)

Shanghai/Beijing/Tianjin/Guangzhou/Chengdu/Xiamen/Wuhan/Xi'an/Hefei/Taiyuan/Shenyang

# 目 录



序言一

序言二

序言(第一版)

前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>1 电缆基本概念</b>             | 1  |
| 1.1 电力电缆                    | 1  |
| 1.2 电缆载流量计算应用软件             | 6  |
| 1.3 分布式光纤测温传感器              | 7  |
| 1.4 热点探测器                   | 8  |
| 1.5 电缆安装辅件                  | 8  |
| 1.6 土壤热物理性能                 | 10 |
| 1.7 电缆载流量试验                 | 11 |
| 附录 F1 电缆相关术语                | 14 |
| F1.1 电缆结构                   | 14 |
| F1.2 电缆属性                   | 14 |
| F1.3 电缆敷设                   | 15 |
| F1.4 电缆运行                   | 15 |
| F1.5 电缆桥架性能试验               | 16 |
| <b>2 架空导线载流量计算</b>          | 20 |
| 2.1 架空导线载流量计算               | 20 |
| 2.2 接触网用导线载流量的测算            | 24 |
| 2.3 架空导线经济电流计算              | 25 |
| 2.4 母线排载流量计算                | 26 |
| 附录 F2 架空导线载流量相关参数和图表        | 30 |
| F2.1 母线排计算示例                | 30 |
| F2.2 架空裸导线电性参数值             | 31 |
| <b>3 电缆持续荷载流量计算</b>         | 38 |
| 3.1 一般情况                    | 38 |
| 3.2 负荷因数为( $load=1$ )的载流量计算 | 39 |
| 3.3 已知电缆表面温度和施加电流导体温度的计算    | 42 |

|          |                                        |            |
|----------|----------------------------------------|------------|
| 3.4      | 导体交流电阻计算 .....                         | 43         |
| 3.5      | 绝缘介质损耗 .....                           | 45         |
| 3.6      | 金属套和金属屏蔽损耗 .....                       | 46         |
| 3.7      | 铠装、加强带和钢管的损耗因数计算 .....                 | 53         |
| 3.8      | 双回路平面排列金属套涡流损耗因数计算 .....               | 56         |
| 3.9      | 单芯电缆多根并连电流分配和环流损耗的计算 .....             | 61         |
| 3.10     | 电缆本体热阻计算 .....                         | 63         |
| 3.11     | 空气中电缆外部热阻 $T_4$ .....                  | 69         |
| 3.12     | 空气中电缆束敷设载流量计算 .....                    | 73         |
| 3.13     | 土壤中敷设的电缆外部热阻 $T_4$ 计算 .....            | 75         |
| 3.14     | 电缆负荷因数小于 1 ( $load < 1$ ) 的载流量计算 ..... | 84         |
| 3.15     | 土壤中电缆集聚敷设下载流量计算 .....                  | 90         |
| 3.16     | 混凝土排管的负荷能力计算 .....                     | 93         |
| 3.17     | 电缆有局外热源时外部热阻的计算 .....                  | 94         |
|          | 附录 F3 计算电缆载流量相关材料参数和图表 .....           | 100        |
| F3.1     | 电缆最高允许工作温度 .....                       | 100        |
| F3.2     | 电缆常用材料的物理常数 .....                      | 100        |
| F3.3     | 计算导体交流电阻相关参数 .....                     | 102        |
| F3.4     | 双回路金属套损耗计算示例 .....                     | 104        |
| F3.5     | 双回路金属套损耗计算 $H$ 、 $N$ 、 $J$ 系数表 .....   | 114        |
| F3.6     | 电缆热阻图解计算 .....                         | 125        |
| F3.7     | 空气中电缆群外部热阻计算 .....                     | 128        |
| F3.8     | 土壤中敷设电缆群外部热阻计算 .....                   | 130        |
| F3.9     | 电缆群载流量降低因数 .....                       | 131        |
| F3.10    | 64/110kV XLPE 绝缘皱纹铝套电缆参数计算 .....       | 133        |
| F3.11    | 电缆隧道电缆截面选择 .....                       | 135        |
| <b>4</b> | <b>电缆最佳经济截面的设计 .....</b>               | <b>137</b> |
| 4.1      | 电力电缆经济截面的设计概算 .....                    | 137        |
| 4.2      | 导体经济截面的计算方法 .....                      | 140        |
| 4.3      | 导体平均温度和电阻计算 .....                      | 141        |
| 4.4      | 电缆经济截面计算示例 .....                       | 142        |
| <b>5</b> | <b>电缆短时负荷与短路电流计算 .....</b>             | <b>150</b> |
| 5.1      | 电缆短时负荷 .....                           | 150        |
| 5.2      | 电缆短路电流计算 .....                         | 152        |
| 5.3      | 短路温度的计算 .....                          | 156        |
| 5.4      | 短路时的电磁力计算 .....                        | 157        |
| 5.5      | 电缆线路的相序阻抗计算 .....                      | 158        |
|          | 附录 F5 短路故障相关参数 .....                   | 162        |

|          |                                            |            |
|----------|--------------------------------------------|------------|
| F5.1     | 电缆短路温度 .....                               | 162        |
| F5.2     | 电缆用材料热性常数 .....                            | 163        |
| F5.3     | 导体和屏蔽分隔线在简化公式中的系数 .....                    | 163        |
| F5.4     | XLPE 电缆短路参数参考值 .....                       | 164        |
| F5.5     | 50/66~127/220kV 电缆正负序阻抗参考值 .....           | 165        |
| F5.6     | 短路电流引起的电磁力参数 .....                         | 167        |
| <b>6</b> | <b>18/30(36)kV 及以下电缆周期负荷计算 .....</b>       | <b>168</b> |
| 6.1      | 概述 .....                                   | 168        |
| 6.2      | 周期载流量因数( $M$ )计算 .....                     | 168        |
| 6.3      | 周期负荷载流量计算示例 .....                          | 171        |
| 附录 F6    | 18/30(36)kV 及以下电缆周期负荷计算相关参数 .....          | 174        |
| F6.1     | 日周期负荷某线路负荷记录和曲线图 .....                     | 174        |
| F6.2     | 计算埋地电缆土壤热阻示意图 .....                        | 176        |
| F6.3     | 土壤热阻系数与散热系数的对应关系 .....                     | 176        |
| F6.4     | 指数积分数字计算 .....                             | 178        |
| <b>7</b> | <b>18/30 (36) kV 以上电缆周期负荷计算 .....</b>      | <b>179</b> |
| 7.1      | 适用范围 .....                                 | 179        |
| 7.2      | 持续时间长且为周期负荷的暂态响应 .....                     | 180        |
| 7.3      | 持续时间短且为周期负荷的暂态响应 .....                     | 184        |
| 7.4      | 某些参数变化对暂态温升的校正 .....                       | 187        |
| 7.5      | 周期负荷因数( $M$ )的计算 .....                     | 188        |
| 7.6      | 负荷损失因数 $\mu$ 的计算 .....                     | 190        |
| 7.7      | $\theta_R(i) / \theta_R(\infty)$ 的计算 ..... | 190        |
| 7.8      | 土壤呈干燥状态下电缆并列排列周期负荷因数计算 .....               | 192        |
| 7.9      | 电缆应急情况下载流量计算 .....                         | 193        |
| 7.10     | 电缆周期负荷和应急负荷计算示例 .....                      | 194        |
| 附录 F7    | 18/30 (36) kV 以上电缆周期负荷计算相关参数 .....         | 202        |
| F7.1     | 电缆常用材料物理性能 .....                           | 202        |
| F7.2     | 土壤热阻系数与散热系数的对应关系 .....                     | 203        |
| F7.3     | 计算埋地电缆土壤热阻示意图 .....                        | 204        |
| F7.4     | 指数积分数字计算 .....                             | 205        |
| F7.5     | 某线路日周期负荷记录 .....                           | 206        |
| <b>8</b> | <b>电缆运行中实时温度监测 .....</b>                   | <b>208</b> |
| 8.1      | 概述 .....                                   | 208        |
| 8.2      | 载流量模型 .....                                | 209        |
| 8.3      | DCR 模型的稳态应用 .....                          | 216        |
| 8.4      | 电缆分布温度的特征 .....                            | 217        |
| 8.5      | 对 DTS 和测温光缆的要求 .....                       | 218        |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 8.6 监测系统 .....                     | 219        |
| <b>附录 A 电线电缆载流量表 .....</b>         | <b>225</b> |
| A.1 总论.....                        | 225        |
| A.2 柔性矿物绝缘防火电缆 .....               | 236        |
| A.3 铜包铝导体电缆 .....                  | 239        |
| A.4 铝合金电力电缆 .....                  | 245        |
| A.5 50/66kV 交联聚乙烯绝缘电缆 .....        | 253        |
| A.6 64/110kV 交联聚乙烯绝缘电缆 .....       | 257        |
| A.7 127/220kV 交联聚乙烯绝缘电缆载流量计算值..... | 261        |
| <b>参考文献.....</b>                   | <b>265</b> |

# 1 电缆基本概念

## 1.1 电 力 电 缆

### 1.1.1 电缆类型和电压等级

电缆可按电压等级、绝缘材料、电缆性能等分类。表 1-1-1 按电压等级分类。

表 1-1-1 电力电缆种类 (按电压等级分类)

| 电缆名称    | 电压等级 (kV) | 绝缘类型             | 工作温度 (℃) |
|---------|-----------|------------------|----------|
| 低压电力电缆  | 0.4 ~ 3   | PVC              | 70       |
|         |           | XLPE             | 90       |
|         |           | EP ER            | 90       |
| 中压电力电缆  | 6~35      | PVC              | 70       |
|         |           | XLPE ER          | 90       |
| 高压电力电缆  | 66~110    | XLPE ER          | 90       |
| 超高压电力电缆 | 220~500   | XLPE             | 90       |
| 油浸纸绝缘电缆 | 0.6/1~500 | 油浸纸 (中低压被挤包绝缘取代) | 80~65    |

电力电缆电压等级的划分以额定电压  $U_0/U$  ( $U_m$ ) 表示, 此值表示电力电缆的绝缘水平、使用电缆系统标称电压以及系统最高电压。其中:  $U_0$  为电缆设计用的每个导体与接地屏蔽或护套之间的工频电压, 其值与系统对地电压有关, 但并非相电压。因电缆标准规定所有与工频电压有关的试验项目对电缆绝缘施加的工频电压均以  $U_0$  的倍数表示,  $U_0$  实际上表示电缆绝缘水平。即电缆绝缘耐受电压和电压持续时间的能力。应按电力系统中性点接地方式单相接地故障时非故障相电压升高, 和系统接地故障排除时间合理地选择电力电缆的额定电压  $U_0$  值, 以便于保证电缆可靠运行。 $U$  为电缆设计采用的任何两个导体之间的额定工频电压, 即使用电缆的电力系统的标称电压。 $U_m$  为电缆设计采用的任何两个导体之间最大工频电压, 即三相系统最高电压或设备最高电压或者说每一个导体与屏蔽或护套之间的最大工频电压。以上三个值的单位均为 kV。

由于电力系统中性点接地方式、运行情况对系统设备的绝缘水平要求不同, 因而了解电力电缆额定电压含义, 合理地确定电力电缆额定电压是正确选用电力电缆, 保证其可靠运行的重要前提。系统电压等级使用电缆系统的标称电压  $U$  (标识系统的相与相之间的电压有效值与电缆额定电压  $U$  一致)。结合电力系统中性点接地方式以及我国电力电缆标准和相应 IEC 标准对系统的分类原则, 可以认为:

电缆的额定电压取决于电缆使用系统的运行条件, 分为三类。

1) A 类：接地故障在任何情况下在 1min 内切除。

2) B 类：单相接地故障一般不超过 1h。满足 GB/T 12706 标准的电缆允许更长带故障运行时间，但任何情况下不宜超过 8h，年接地故障总持续时间不宜超过 125h。

3) C 类：对接地故障持续时间不作任何限制。

### 1.1.2 0.6/1kV 及以下电力电缆

1kV 低压电缆的绝缘水平有足够的裕度，适用于 A、B、C 任何一类。建筑物较多采用低压电缆。建筑物对电缆的性能要求主要有防火、耐火、阻燃、无卤、无毒阻燃等方面，电压等级逐渐提高。如 8.7/15kV 阻燃耐火电缆已经问世，电缆载流能力可提高 10% 以上。

耐火电缆是耐火系列电缆是一个统称，目前主要分为四大类电缆：阻燃类、无卤低烟类、耐火类和防火类（或称矿物绝缘类）。从技术层面上说，阻燃类电缆是对普通 PVC 和 XLPE 电缆的发展；无卤低烟类电缆是对阻燃类电缆的发展；耐火类电缆是对无卤低烟类电缆的发展；而防火类电缆则又是对耐火类电缆发展，防火电缆也有不同级别，能同时满足 C、W、Z 三个指标的防火电缆是最高级别。能同时满足 C、W、Z 三个指标的防火电缆，目前世界上有两种：刚性铜管护套型和柔软结构型。

(1) 矿物绝缘电缆分为刚性和柔性两种。刚性矿物绝缘电缆是指用矿物（如氧化镁）作为绝缘的电缆，通常由铜导体、矿物绝缘、铜护套构成，而柔性矿物绝缘电缆是由铜绞线、矿物化合物绝缘和护套构成。矿物绝缘电缆不含有机材料，具有不燃、无烟、无毒和耐火特性。

(2) 柔性防火电缆属于耐火电缆系列中的矿物绝缘电缆大类，从性能上说，它是目前最高等级的耐火电缆。

柔性防火电缆与其他普通电缆相比，主要区别就在于生产过程中，利用了大功率电子加速器所产生的高能电子束（ $\beta$  射线），对特殊配方的无机化合物进行交联处理，使电缆在保持柔软性能的同时又大大提高了耐火性能，柔性防火电缆具有如下特性。柔性防火电缆的结构如图 1-1-1 所示。

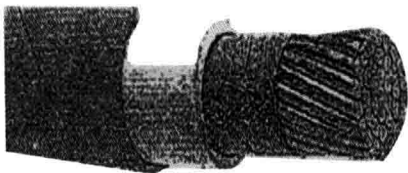


图 1-1-1 柔性防火电缆

1) 安全：电缆的设计结构决定了电缆本身的非燃性，即使在短路温度以上也可保持不变形，在火焰中可以保持 3h 电路不间断。

2) 环保：IEC 61034 烟气发散试验中，实际测试的透光度可超越标准（60%）20% 以上。即使是在火灾条件下，散发出的酸性气体也是极低的。

3) 柔性：电缆的工艺结构决定了电缆的柔软性。能避免设计和安装刚性防火电缆时不可回避的复杂走向问题。

4) 耐温：在正常使用下替代耐温 125℃ 的低烟无卤阻燃电缆使用。

5) 载流量：比照相同截面的电缆，防火电缆不仅能传送更高的电流，而且能承受较大的过载。

6) 大长度：柔性材料的产品结构决定了其制造长度的无限性，可根据用户设计的长度要求进行生产与供货。

7) 免接头：非铜管型的产品结构，恢复了产品在敷设时的传统工艺，不必使用中间连接和特殊终端。

8) 敷设特性：可根据不同的敷设环境，采用桥架、支架或沿墙明敷。

9) 使用特性：适用于由变电站或总配电室引至消防设备的电源主干线以及具有防火要求供电线路。

(3) 铜包铝导体电力电缆铜包铝线导体 20 世纪中叶后问世，此类电缆目前还没有国际标准和



国家标准。主要用于传输高频和射频信号通信电缆。铜包铝导线兼有铜、铝两种金属的特点：导电率、机械性能和柔软性比铜低，但比铝高；重量轻，约为铜的 1/3；生产成本比铜线低；耐腐蚀和连接方法与铜一样。

(4) 铝合金电缆。铝合金电缆起源于北美。为了克服纯铝（AA1350）导体在应用中易出现的断线、松动及发热等缺点，20 世纪 70 年代 Alcan Cable 公司成功研发出了 AA8030 电工级铝合金导体，并且通过佐治亚州电力试验验证了 AA8030 铝合金导体的安全性与可靠性。20 世纪 80~90 年代美国和加拿大陆续制定出了铝合金电缆及其连接的一系列标准，明确规定铝合金导体应采用 AA8000 系列电工级铝合金材料。在美国和加拿大，0.6/1kV 铝合金电力电缆至今已成熟应用 40 多年，如图 1-1-2 所示。

2006 年，Alcan Cable (China) [现为 General Cable (China)] 将铝合金电缆引入到中国，因其在经济性、节能环保、安装维护等方面的优势，铝合金电力电缆在我国具有非常广阔的发展前景。

铝合金电缆重量轻、易于敷设，相同的电气性能时重量仅为铜缆的一半左右。铝合金电缆还具有很好的柔韧性、记忆效应小，回弹量比铜缆少 40%，最小弯曲半径仅为 7 倍电缆外径。在敷设和安装时既可以减小建筑物的承重负荷又可以降低施工难度、缩短施工周期。

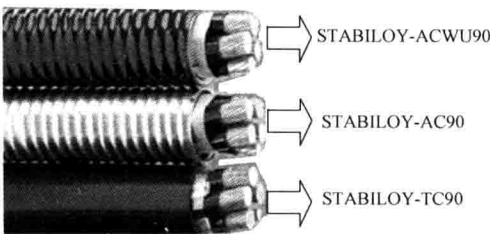


图 1-1-2 0.6/1kV 铝合金电力电缆

铝合金带联锁铠装结构是铝合金电力电缆的另一大特点，拱形联锁铠装可以很好地保护缆芯不受损害，抗压力可达 9000N，这种结构的铠装型铝合金电力电缆可采用支架、吊架等明敷方式敷设。和槽盒敷设相比，支架、吊架等明敷方式能很大程度提升电缆载流量，同时，联锁铠装结构可以减小电缆弧垂、增大固定点间距，既能降低安装材料的采购费用又可节省安装工时。从节能环保与资源利用的角度看，铝合金电力电缆综合性能优于铜缆。

铝合金导体的延伸率高达 30%；相对于纯铝抗蠕变性能提高 3 倍；铝合金电缆柔软性能比铜导体电缆高 30%。

在大气中，铝表面自然生成极薄而透明的氧化保护膜，最外层是硬质结晶——水软铝石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）；中间层是致密的活性阻挡层——不定形的氧化铝（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）；最内层是基体金属铝。氧化保护膜耐受各种形式的腐蚀，具有承受最恶劣环境的特性。

铝合金电缆导体中的合金成分大大地改进了传统铝导体电缆的连接性能，尤其是当导体退火时，添加的铁产生高强度蠕变性能，电缆即使长时间过载或过热，也能保证连接的稳定性。

绝缘采用阻燃硅烷交联聚乙烯，铠装是特殊的金属联锁结构，外护套采用研发的低烟、无卤、阻燃环保材料。该电缆反弹性能比铜导体电缆低 40%，柔韧性比铜导体电缆高 30%。从整体上保证了电缆连接的稳定性，降低了火灾风险。

在同样电气性能条件下，铝合金电缆综合投资成本比铜导体电缆低 20%；铝合金电缆重量轻，可节约安装费用。在我国城镇化建设、城乡电网改造加速时期，电缆的需求量不断加大之时，使用新型铝合金电力电缆对国家电力建设有巨大实用价值。

### 1.1.3 3.6/6~26/35kV 电力电缆

(1) 交联聚乙烯绝缘（XLPE）电力电缆。交联聚乙烯绝缘（XLPE）电力电缆通常由三部分组成，即导体、绝缘层和护层。

1) 导体。一般电缆线芯是由金属铜或铝构成，其作用是传导电流通过的载体。因此，要求

其导体材料电阻率越小越好。根据电缆芯数和导体截面的大小,有实芯导体或绞合导体,其结构有圆形、异型、分割导体等。在交流系统中,由于趋肤效应和邻近效应导致导体电阻增加(交流电阻),并会随着导体温度上升进一步增大。另外根据需要,有的电缆还包含中性导体和接地线等。

2) 绝缘层。起到隔绝导体与大地间电压的作用。最早的电缆绝缘材料是纸和布,用沥青、漆和油浸渍,现在仍有使用油浸纸绝缘。现代电缆绝缘大量使用橡胶、塑料。其中橡胶绝缘由于其特有的柔软性仍占有一定的比例,塑料由于其价格低廉和易于加工则占电力电缆的绝大部分。其中聚氯乙烯主要用于低压电力电缆,而乙丙橡胶和交联聚乙烯由于电气性能和热性能优越,主要用于中压、高压和超高压电缆。

3) 护层。为使电缆适应各种敷设环境,在电缆绝缘层上施加的保护覆盖层,称作电缆护层。其质量及选用适合与否,直接影响电缆的使用寿命。电缆护层用于保护电缆长期安全可靠地运行。免受各种外界介质侵害,如机械力、水及化学物质侵蚀、昆虫鼠害等。因此电缆选型时,应根据电缆安装敷设的具体环境条件,确定电缆护层类型。电缆护层有金属护层、橡皮塑料护层和组合护层三大类。特殊需要时采用特种护层。

4) 屏蔽层。电缆除了上述三大基本部件之外,根据电压等级不同还添加其他部件,如屏蔽层(有半导体屏蔽或金属屏蔽)屏蔽层的作用是均匀分布电场,控制电位和限制电场,避免在绝缘层表面产生局部放电,传导泄漏电流和充电电流等作用。半导体屏蔽层是构成中高压电缆绝缘体系的重要组成部分。良好的半导体屏蔽层应有较小的电阻,且阻值稳定。与绝缘层接触面光滑,结合紧密、无气孔和杂质。

中压电缆金属屏蔽大多数采用铜带,受铜带厚度、宽度、接头和绕包重叠率的影响,铜带屏蔽的纵向电阻差异较大。电缆经过较长时间运行后,其纵向电阻将发生较大的变化,直接影响电缆承受故障电流的能力。一般标准中不规定阻值。

若铜带直接绕包在绝缘芯上,由于交联聚乙烯热膨胀系数大于铜热膨胀系数的数倍,电缆经过若干热循环后往往会使铜带胀开断裂,一旦有大电流通过,会在铜带断裂处过热乃至电弧发生,从而导致电缆击穿,应引起重视。

交联聚乙烯绝缘电力电缆的结构简单,制造方便,重量轻,负荷能力大,安装方便,没有落差限制,终端和接头方便。但由于绝缘内交联剂分解产生残余以及交联副产物不可能完全消除,现代技术只能尽量减小其影响。

(2) 聚氯乙烯绝缘电缆。聚氯乙烯绝缘电缆制造工艺简单,安装方便,弯曲性能好,接头制作简便,孤立敷设电缆不易延燃,价格便宜,因此得到广泛地应用。其缺点是电性能一般,仅适于3kV及以下电压级。低温性差,着火时会释放出有毒和腐蚀性气体,因此,不适用于高层建筑物和重要公共设施等人员密集场所。

#### 1.1.4 50/66kV 以上电力电缆

(1) 单芯电缆。高压电缆大部分是单芯电缆。交联聚乙烯绝缘电缆目前是市场的主流产品,在60~150 kV 逐渐占据主导。由于绝缘交联剂分解产生残余以及交联副产物不可能完全消除。现代技术只能尽量减小其缺陷。此外,交联聚乙烯电缆热机械力大,附件技术相对复杂,运行中的高压电缆线路尚缺少有效的监测手段等也是应用中需要关注的问题,随着光纤测温技术的应用,有助于上述问题的解决。

高压电缆结构示意图和实物如图 1-1-3 所示。由以下各组成部分构成。一般通用的 XLPE 绝缘皱纹铝护套电缆其结构从内到外大体为:导体、内屏蔽、绝缘、外屏蔽、阻水、缓冲、空气隙、皱纹铝套、防腐层、外护套 / 半导体层。