

■ 梁永春 著

# 高压电力电缆 载流量数值计算



國防工業出版社

National Defense Industry Press

## 内 容 简 介

高压电力电缆载流量是电缆运行中受到环境条件、敷设方式等多种因素影响的重要动态运行参数,是保证电力电缆在寿命周期内安全、可靠、稳定运行的重要保障。本书分两部分介绍有关电缆载流量的计算方法。

第一部分简单介绍目前常用的 IEC-60287 计算标准,给出载流量的解析计算公式,损耗因数的计算方法,热阻的计算方法。

第二部分详细介绍了利用有限元法计算电力电缆焦耳损耗、温度场分布的过程,利用迭代法实现电磁场和温度场的耦合计算过程,利用迭代法实现载流量的计算过程,以及基于环境因素监测和有限元温度场计算的实时载流量预测方法。

在稳态温度场和载流量计算的基础上,本书介绍了利用有限差分和有限元相结合的方法,计算暂态温度场和载流量的计算过程。

### 图书在版编目(CIP)数据

高压电力电缆载流量数值计算/梁永春著. —北京:国防工业出版社,2012. 1

ISBN 978-7-118-07851-0

I. ①高... II. ①梁... III. ①高压电缆-载流量-数值计算 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 275655 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 字数 304 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

随着绝缘材料的快速发展和城市化进程的加快,城市输配电线路逐步由架空敷设转向地下电力电缆敷设。地下电力电缆与架空敷设相比,可以节省空中走廊,减少输配电线路对城市市容的影响,但也带来了不易维护和散热条件恶化的问题。这就要求电力部门合理、准确地确定电力电缆的负荷,在电缆使用寿命期间,保证电缆的安全、可靠、稳定运行。

由于地下电力电缆敷设环境复杂,如何准确确定电力电缆的负荷,尽量提高电力电缆的利用率一直是电力部门密切关注的一个问题。为此,国际电工委员会(IEC)于1982年根据国际大电网会议(CIGRE)233号报告提出了电缆额定载流量(100%负荷因数)计算标准 IEC-60287,以后逐年进行了修正补充。IEC-60287 是目前国内外电力部门计算高压电力电缆载流量的主要依据。

IEC-60287 是建立在 Kennely 假设的基础上将三维电缆敷设的模型简化为一维模型,然后进行温度场和载流量的解析计算。随着地下电缆敷设逐步向密集化方向发展,以及地下电缆周围复杂的环境条件,造成了 IEC-60287 在很多场合下的局限性。例如,多个回路、多种电压等级的电缆密集敷设于一个狭小的断面时,IEC-60287 没有给出准确的焦耳损耗的计算公式;对于排管敷设、沟槽敷设、隧道敷设等敷设方式,在电缆外表面和外围土壤或排管内表面之间存在空气层,当电缆通以负荷电流时,空气层内存在热传导、热对流和热辐射等多种导热方式的耦合,断面内存在固体导热和流体导热的流固耦合传热问题。这些问题在 IEC-60287 中均以经验公式的方式给出,而对于密集电缆群也没有给出现成的计算公式。电力部门的多次试验证明了 IEC-60287 在载流量计算中是保守的。

有限元等数值计算方法适用于复杂的边界条件,能够模拟真实的边界条件,解决多重介质的温度场计算问题,实现流固耦合的温度场计算、多种导热方式耦合的温度场计算、多个场的耦合计算,各个环节易于标准化,可形成通用的计算程序,具有较高的计算精度,逐渐成为地下电力电缆温度场和载流量计算的重要手段。

本书从介绍 IEC-60287 入手,在此基础上详细介绍了有限元法在地下电力电缆群温度场和载流量计算中的使用方法,具体内容如下:

(0) 绪论。主要介绍什么是电力电缆的载流量,当前电力电缆载流量计算中存在的问题等。

(1) 高压电力电缆结构和安装方式。介绍常用单芯、三芯交联聚乙烯电力电缆的结构。

(2) IEC - 60287 简介。给出 IEC - 60287 载流量计算公式及各个参数的计算方法。

(3) 高压电力电缆焦耳损耗计算。给出交联聚乙烯电力电缆缆芯导体、金属套、铠装层等金属部件内损耗的数值计算过程,以及利用 Bessel 函数和电路模型计算损耗和环流的方法。

(4) 土壤直埋高压电力电缆温度场数值计算。给出土壤直埋电力电缆的温度场计算模型,边界的确定方法,有限元方程,求解过程,并给出影响因素分析。

(5) 排管、隧道和构成敷设高压电力电缆群温度场数值计算。给出计算模型、边界条件、流场的计算方法、流固耦合计算方法和影响因素分析。

(6) 模拟热荷法计算地下电缆温度场。给出土壤直埋模拟热荷的选取、约束方程及求解方法。

(7) 载流量数值计算及影响因素分析。给出了热电偶、等负荷和不等负荷载流量计算方法,分析了四种敷设方式下电力电缆载流量的影响因素。

(8) 基于温度在线监测的实时载流量计算方法。通过对环境参数的在线监测,与有限元计算方法相结合,给出实时载流量的预测方法。

(9) 电力电缆温度场和载流量计算软件。简要介绍了作者编写的地下电力电缆群温度场和载流量计算软件。

本书的研究内容是在西安交通大学李彦明教授的指导下完成的,并得到了孟凡风硕士、柴进爱硕士的帮助,张静南硕士生做了部分书稿的整理工作,在此一并表示感谢。

愿本书对于我国高压电力电缆载流量的数值计算、提高载流量计算的精度以及载流量计算的软件化起到促进作用。

作者水平有限,错误难免,敬请读者多多指教。

作者

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第 0 章 绪论</b> .....              | 1  |
| 0.1 载流量的定义 .....                   | 1  |
| 0.2 载流量影响因素 .....                  | 2  |
| 0.3 载流量计算方法综述 .....                | 3  |
| 0.4 载流量计算中的多场耦合 .....              | 6  |
| 0.5 在线监测与实时载流量 .....               | 6  |
| <b>第 1 章 高压电力电缆结构和安装方式</b> .....   | 8  |
| 1.1 高压电力电缆的发展概况 .....              | 8  |
| 1.2 交联聚乙烯电力电缆结构 .....              | 8  |
| 1.3 电力电缆的安装方式 .....                | 9  |
| 1.3.1 土壤直埋电力电缆 .....               | 10 |
| 1.3.2 排管敷设电力电缆 .....               | 11 |
| 1.3.3 沟槽敷设方式 .....                 | 11 |
| 1.3.4 隧道敷设方式 .....                 | 12 |
| <b>第 2 章 IEC60287 简介</b> .....     | 13 |
| 2.1 额定载流量计算公式 .....                | 13 |
| 2.2 导体交流电阻计算 .....                 | 15 |
| 2.3 绝缘损耗(仅适用于交流电力电缆) .....         | 16 |
| 2.4 金属套和屏蔽的损耗(仅适用于交流电力电缆) .....    | 16 |
| 2.5 热阻计算 .....                     | 20 |
| 2.6 短时载流量计算 .....                  | 24 |
| <b>第 3 章 高压电力电缆焦耳损耗计算</b> .....    | 31 |
| 3.1 引言 .....                       | 31 |
| 3.2 电磁损耗计算方法 .....                 | 32 |
| 3.2.1 电磁损耗计算的有限元方法 .....           | 32 |
| 3.2.2 电力电缆电磁损耗 Bessel 函数计算方法 ..... | 41 |
| 3.2.3 双端接地电力电缆群金属套环流计算 .....       | 44 |
| 3.2.4 交叉互连接地电力电缆群电磁损耗计算 .....      | 50 |
| 3.3 电力电缆电磁损耗计算方法的验证 .....          | 51 |
| 3.3.1 单端接地电力电缆群电磁损耗 .....          | 51 |
| 3.3.2 双端接地电力电缆金属套环流 .....          | 52 |
| 3.4 多回路电力电缆群电磁损耗计算及影响因素分析 .....    | 53 |

|              |                                      |            |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 3.4.1        | 三回路并行排列 .....                        | 53         |
| 3.4.2        | 排列方式对损耗的影响 .....                     | 54         |
| 3.4.3        | 间距对损耗的影响 .....                       | 55         |
| 3.4.4        | 多根多芯电力电缆损耗 .....                     | 56         |
| 3.4.5        | 同相并联电力电缆排列方式优化 .....                 | 56         |
| 3.4.6        | 电力电缆群排列方式的优化 .....                   | 58         |
| 3.5          | 钢管损耗 .....                           | 60         |
| 3.6          | 计算例程 .....                           | 60         |
| 3.6.1        | Bessel 函数计算电力电缆导体损耗程序 .....          | 60         |
| 3.6.2        | 双端接地环流计算程序 .....                     | 75         |
| <b>第 4 章</b> | <b>土壤直埋高压电力电缆群温度场数值计算 .....</b>      | <b>81</b>  |
| 4.1          | 引言 .....                             | 81         |
| 4.2          | 土壤直埋电力电缆群温度场模型 .....                 | 82         |
| 4.3          | 土壤直埋温度场计算的有限元方法 .....                | 86         |
| 4.3.1        | 土壤直埋稳态温度场计算的有限元方程 .....              | 86         |
| 4.3.2        | 土壤直埋暂态温度场计算的有限元方程 .....              | 93         |
| 4.4          | 土壤直埋电力电缆群温度场有限元计算方法的验证 .....         | 96         |
| 4.4.1        | 土壤热阻试验装置 .....                       | 97         |
| 4.4.2        | 土壤直埋发热管试验研究 .....                    | 98         |
| 4.4.3        | 与文献对比验证有限元计算方法 .....                 | 99         |
| 4.5          | 土壤直埋电力电缆群温度场 .....                   | 99         |
| 4.5.1        | 温度场边界确定 .....                        | 99         |
| 4.5.2        | 温度场有限元计算 .....                       | 100        |
| 4.6          | 土壤直埋有限元计算例程 .....                    | 104        |
| <b>第 5 章</b> | <b>排管、隧道、沟槽敷设高压电力电缆温度场数值计算 .....</b> | <b>131</b> |
| 5.1          | 引言 .....                             | 131        |
| 5.2          | 排管、隧道和沟槽敷设电力电缆模型 .....               | 132        |
| 5.3          | 稳态温度场有限元计算模型 .....                   | 133        |
| 5.3.1        | 热传导有限元模型 .....                       | 133        |
| 5.3.2        | 自然对流有限元模型 .....                      | 133        |
| 5.3.3        | 热辐射有限元模型 .....                       | 139        |
| 5.3.4        | 流固耦合计算 .....                         | 140        |
| 5.4          | 暂态温度场计算有限元模型 .....                   | 141        |
| 5.5          | 排管、隧道和沟槽敷设电力电缆群温度场有限元计算 .....        | 142        |
| 5.5.1        | 排管敷设电力电缆群 .....                      | 142        |
| 5.5.2        | 隧道敷设电力电缆群 .....                      | 145        |
| 5.5.3        | 沟槽敷设电力电缆群 .....                      | 149        |
| 5.6          | 三维有限元实例分析 .....                      | 150        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第6章 模拟热荷法计算地下电力电缆温度场</b> .....   | 153 |
| 6.1 模拟热荷法的提出 .....                  | 153 |
| 6.1.1 模拟电荷法的基本原理 .....              | 153 |
| 6.1.2 模拟电荷和匹配点的确定 .....             | 153 |
| 6.2 模拟热荷法计算发热管温度场分布 .....           | 155 |
| 6.2.1 发热管的温度场模型 .....               | 155 |
| 6.2.2 发热管温度场计算 .....                | 157 |
| 6.3 模拟热荷法计算土壤直埋电力电缆温度场 .....        | 160 |
| 6.3.1 电力电缆模型的简化 .....               | 160 |
| 6.3.2 土壤直埋电力电缆温度场计算模型 .....         | 161 |
| 6.4 水平排列电力电缆温度场计算实例 .....           | 165 |
| 6.5 三角形排列电力电缆温度场计算 .....            | 168 |
| 6.6 模拟热荷法计算复合介质温度场 .....            | 169 |
| 6.6.1 回填沙土电力电缆温度场计算模型 .....         | 169 |
| 6.6.2 回填沙土电力电缆温度场计算实例 .....         | 171 |
| <b>第7章 载流量数值计算及影响因素分析</b> .....     | 173 |
| 7.1 热电耦合分析 .....                    | 173 |
| 7.2 载流量数值计算方法 .....                 | 175 |
| 7.3 载流量数值计算实例 .....                 | 177 |
| 7.3.1 土壤直埋电力电缆载流量计算 .....           | 177 |
| 7.3.2 排管敷设电力电缆载流量计算 .....           | 178 |
| 7.3.3 隧道敷设电力电缆载流量计算 .....           | 179 |
| 7.3.4 沟槽敷设电力电缆载流量计算 .....           | 179 |
| 7.4 载流量影响因素分析 .....                 | 179 |
| 7.4.1 土壤直埋电力电缆影响因素分析 .....          | 179 |
| 7.4.2 排管敷设电力电缆影响因素分析 .....          | 183 |
| 7.4.3 排管敷设电力电缆影响因素分析 .....          | 184 |
| 7.4.4 沟槽敷设电力电缆影响因素分析 .....          | 185 |
| <b>第8章 基于温度在线监测的实时载流量计算方法</b> ..... | 186 |
| 8.1 引言 .....                        | 186 |
| 8.2 分布式光纤测温系统 .....                 | 186 |
| 8.3 热路模型 .....                      | 188 |
| 8.3.1 单芯电力电缆热路模型 .....              | 188 |
| 8.3.2 电力电缆群线芯导体温度计算 .....           | 189 |
| 8.4 基于有限元的电力电缆温度在线监测和载流量实时计算 .....  | 191 |
| 8.4.1 有限元载流量实时计算基本思想 .....          | 191 |
| 8.4.2 土壤直埋电力电缆有限元载流量实时计算 .....      | 193 |
| <b>第9章 电力电缆群温度场和载流量计算软件</b> .....   | 194 |
| 参数文献 .....                          | 200 |

# 第 0 章 绪 论

## 0.1 载流量的定义

高压电力传送主要有两种传输方式：地下电力电缆和架空线路。过去，国内主要采用架空线路，而最近二十年来，由于城市建设速度加快，城市建设与电力建设的矛盾也日益加剧，特别表现在输电线走廊与城市规划的配合方面。城市建设会影响到电网的建设和运行，而电网建设又会影响到城市的容貌。

为了解决城市建设与电力建设的矛盾，现在电力电缆的敷设方式逐步由架空敷设转向地下敷设，且越来越趋向于密集敷设。地下电力电缆与架空线路相比，虽然具有成本高、投资大，尤其是维修不方便的缺点，但其具有运行可靠、不易受外界影响、不需架设电杆、不占地面等优点，特别是在有腐蚀性气体和易燃、易爆场所，不宜架设架空线路时，只能敷设地下电力电缆。

地下电力电缆的敷设方式主要有土壤直埋、排管、沟槽和隧道等四种方式，在排管、沟槽和隧道敷设方式下，电力电缆往往是多个回路电力电缆密集敷设在一起。密集敷设使得多个电力电缆回路间的电磁耦合和热相互作用更加强烈，电力电缆温度场和载流量计算变得更加困难。如果载流量偏大，造成线芯工作温度超过容许值，绝缘寿命就会比预期缩短。表 0-1 给出了两种绝缘电力电缆使用寿命与载流量的关系<sup>[1-3]</sup>。

表 0-1 电力电缆载流量偏大对使用寿命的影响

| 电力电缆绝缘类型    | 聚氯乙烯(PVC) |        | 交联聚乙烯(XLPE) |        |
|-------------|-----------|--------|-------------|--------|
|             | 载流量偏大值/%  | 12     | 18          | 6.5    |
| 超过容许工作温度值/% | 5.5       | 9      | 8           | 15     |
| 电力电缆寿命减少程度  | 减半        | 减为 1/4 | 减半          | 减为 1/4 |

同时，当电力电缆长期过负荷时，会导致绝缘层加速老化，当绝缘介质严重受损时，就会使电力电缆单相或相间形成短路，甚至引发火灾。

美国对 1965 年—1975 年间发生的 3282 次火灾事故的分析，电线电力电缆火灾事故占 30.5%，直接经济损失达 4000 万美元。日本曾向钢铁、石油化工、造纸等工厂企业调查，有 78% 的单位发生过电力电缆着火，其中危险程度大的事故占 40%。我国在 1972 年—1982 年间，发电厂、变电站、供电隧道中，因电力电缆着火延燃造成的火灾在 60 次以上，直接经济损失达数千万元，间接经济损失约 50 亿元。统计表明，外界火源引起的电力电缆火灾占总数的 75.8%，电力电缆绝缘损坏引起的电力电缆火灾占总数的 24.2%。虽然因电力电缆自身原因引起的火灾所占比例较小，但电力电缆常以电力电缆隧道(沟)、电力电缆夹层、竖井等方式敷设，而电力电缆隧道多为地下建筑，初始火灾不易



被发现，因此，在电力电缆隧道里电力电缆内部原因引起的火灾更具危险性<sup>[4-6]</sup>。

因此，IEC(国际电工委员会)对电力电缆载流量有严格的定义，即电力电缆载流量应满足：在该电流作用下，电力电缆线芯的工作温度不超过电力电缆绝缘耐热寿命容许的温度值，且符合导体连接可靠性的要求。通常，电力电缆寿命期望值约 30 年，由此可以确定不同绝缘类型电力电缆的容许持续工作最高温度，以 XLPE(交联聚乙烯)电力电缆为例，长期容许持续工作最高温度为 90℃。

受限于电力电缆复杂的散热环境，以及线路走廊随空间和时间多变的影响因素，电力电缆的载流量往往难以准确评估。如果评估载流量较小，线芯铜材和铝材将得不到充分利用，导致线路投资的加大和不必要的浪费。表 0-2 给出了载流量降低对电力电缆投资的影响。

表 0-2 电力电缆截面按载流量较小的值选择时对投资的影响

| 电压和绝缘类型      | 1kV 聚氯乙烯(PVC) | 6kV 交联聚乙烯(XLPE) |
|--------------|---------------|-----------------|
| 载流量偏低程度/%    | 17            | 12.6            |
| 电力电缆投资增大程度/% | 24.5          | 17.2            |

## 0.2 载流量影响因素

影响电力电缆的温度场和载流量的因素比较多，例如电力电缆结构、敷设方式、排列方式、接地方式以及环境条件等。

三芯电力电缆多用于 35kV 以下电力电缆，受结构限制，载流量一般都偏小。单芯电力电缆多用于 110kV 以上电力电缆，有“一”字形和三角形排列两种方式，载流量较大。综合考虑电力电缆的结构形式、敷设方式、排列方式和接地方式及环境条件，影响电力电缆的温度场和载流量的发热和散热条件如图 0-1 所示。

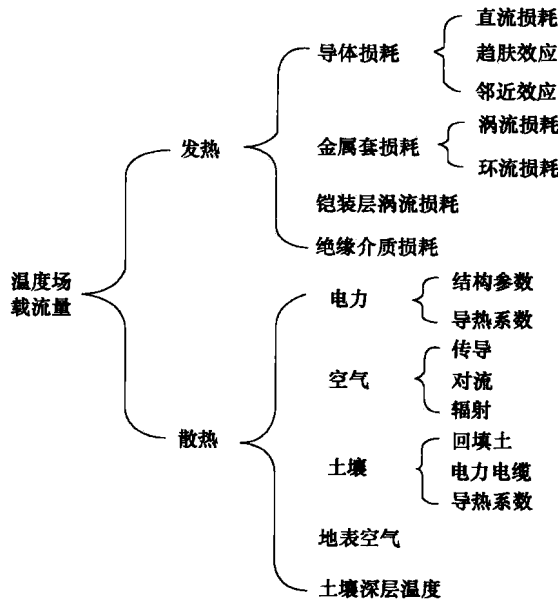


图 0-1 影响电力电缆群温度场和载流量的因素

电力电缆的热源主要包括缆芯导体损耗、金属套损耗、铠装层损耗和绝缘层介质损耗。缆芯导体损耗包括直流损耗和由交变电流引起的涡流损耗，涡流损耗也可以用邻近效应和趋肤效应表示。金属套内的损耗与其接地方式密切相关，当电力电缆金属单端接地时，金属套内只有涡流损耗，且损耗较小；当电力电缆金属套双端接地时，金属套内受缆芯交变电流的影响产生环流，有时环流损耗甚至大于缆芯导体损耗，即双端接地时的金属套损耗包括环流损耗和涡流损耗；当电力电缆金属套采用互连交叉接地时，整个线路金属套的感应电势之和近似为0，可以按单端接地只考虑涡流损耗。铠装层损耗主要是涡流损耗。介质损耗是指由交变电压作用在绝缘层上的交变充电电流引起的损耗。

电力电缆群的散热与散热方式、散热路径中的各媒质的属性及边界条件有关。对于土壤直埋电力电缆群，散热路径包括电力电缆本体、土壤两种媒质，边界条件为地表空气温度，散热方式主要有固体热传导和地表的热对流；对于排管和沟槽敷设方式，散热路径包括电力电缆本体、电力电缆外表面和管道内表面间空气和土壤等媒质，边界条件为地表空气温度，散热方式主要包括固体热传导、空气的热对流和热辐射、地表的热对流；对于隧道敷设方式，散热路径包括电力电缆本体、电力电缆外表面和隧道内表面间空气和土壤等媒质，主要散热方式有固体热传导、空气的热对流和热辐射。

电力电缆群的温度场和载流量计算不仅与电力电缆的敷设方式、排列方式、接地方式及电力电缆结构相关，而且受到地表空气、土壤深层温度、外部热源和水分迁移的影响，是一个涉及热—电磁耦合，三种传热方式共轭存在的复杂条件下的计算过程。

### 0.3 载流量计算方法综述

目前，电力电缆载流量的确定有解析计算、数值计算和试验等三种方法。

解析计算主要是基于 IEC-60287(国内相对应的标准是 JB/T 10181—2000)和 N-M 理论，适用于简单电力电缆系统和边界条件，具有载流量直接计算的优点。数值计算主要有有限差分法和有限元法，可以模拟实际的边界条件，适用于比较复杂的电力电缆系统，但载流量的计算需要迭代完成。根据实际敷设情况，载流量也可以通过试验确定，但试验费用偏高，且不具有通用性。随着隧道、排管等敷设方式的普及，电力电缆线路越来越趋向于密集敷设，边界条件越来越复杂，数值计算与试验方法相结合，开始大量应用于电力电缆线路的温度场和载流量计算中。

地下电力电缆温度场和载流量的计算是由 A.E.Kennely 于 1893 年提出的。J.H.Neher 和 M.H.Mcgrath 在 20 世纪 50—60 年代对这个理论进行了发展和完善<sup>[7-9]</sup>。目前，国际上通用的计算电力电缆载流量的方法主要是依据 IEC-60287(稳态额定载流量)、IEC-60853(暂态载流量)和 N-M 理论，这些方法都是建立在 Kennely 假设(地面是等温面、电力电缆表面是等温面、叠加原理适用)的基础上将三维电力电缆敷设的模型简化为一维热路模型，然后进行温度场和载流量计算<sup>[10-14]</sup>。根据 IEC 标准，国内外研究人员编制了相应的载流量计算软件<sup>[15-19]</sup>。

N-M 理论、IEC-60287 和 IEC-60853 都是建立在解析和经验的基础上，而实际敷设情

况是千变万化的，这就造成了 N-M 理论、IEC-60287 和 IEC-60853 在很多场合下的局限性。如：

(1) IEC-60287 仅给出了单回路电力电缆的趋肤效应和邻近效应计算公式，而实际常常多个回路电力电缆以集群方式敷设在一起，回路间的电磁耦合更加强烈，对电力电缆导体和金属套的交流电阻及涡流损耗和环流损耗的影响等都不能忽略。

(2) 标准是在给定电力电缆导体和金属套温度的基础上确定两者的电阻率，然后计算损耗，而实际中不同位置电力电缆的导体和金属套温度往往不同(如图 0-2 所示三相“一”字形排列单芯电力电缆温度场分布<sup>[20]</sup>)，导致电阻率不同、损耗不同，反过来又造成电力电缆的导体和金属套温度的不同，即温度场计算实际上是一个电磁场和热场的耦合计算问题。

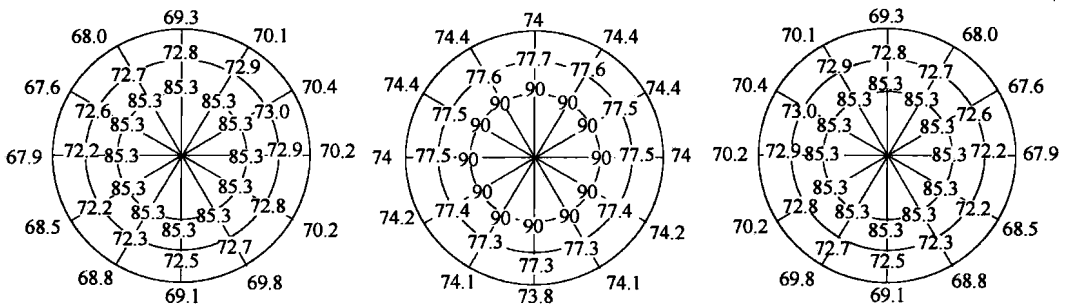


图 0-2 电力电缆温度示意图

(3) 标准中给定的绝缘介质损耗计算是建立在固定的相对介电系数和损耗因数数值的基础上的。由于不同电力电缆温度不同，即最热电力电缆导体温度可能达到 90℃，而其他电力电缆温度低于绝缘耐受温度，不同电力电缆绝缘的相对介电系数和损耗因数值是不同的，绝缘介质损耗应采用耦合的方法计算<sup>[21,22]</sup>。

(4) 标准中对电力电缆间热效应的相互影响是建立在 Kennely 假设的基础上，利用镜像法进行计算，而实际中地表不是等温面，电力电缆表面也不是等温面(如图 0-2 所示)；地下深层温度不随地表及电力电缆发热变化，保持在一个恒定的温度；电力电缆周围往往有回填土，并非敷设于单一介质中<sup>[23-27]</sup>。因此电力电缆集群方式敷设时电力电缆间热效应的相互影响不能简单地按半无限大平面场利用镜像法进行叠加计算。

(5) 对于水分迁移的影响，标准是以电力电缆外皮温度是否超过 50℃为分界线。当电力电缆外皮温度低于 50℃时，不考虑水分迁移的影响；当电力电缆外皮温度超过 50℃时，引入一个干燥和潮湿土壤的热阻系数比。而实际中土壤仅仅在电力电缆附近呈现干燥现象，热阻系数从电力电缆到远离电力电缆区域逐渐变化，是一个水分迁移和热场的耦合问题<sup>[28-30]</sup>。

(6) 对于排管敷设、隧道敷设、沟槽敷设等方式，标准中给定的空气层热阻是根据经验总结的计算公式，而实际中存在空气自然对流、热辐射和热传导三种导热方式的共轭，涉及到流体力学、传热学等相关知识，需要耦合求解动量方程、能量方程和连续性方程来计算，简单的经验公式往往存在较大的误差。

(7) 对于电力电缆附近有外部热源(如热力管道)或局部穿过不利于热扩散区域等敷设

情况下<sup>[31-33]</sup>，标准中没有给定相应的计算公式。

(8) 当前电力部门需要进行负荷动态调整，而这需要实时了解线路周围的相关环境参数和导体温度，并据此确定载流量。标准中给定方法对此无能为力。

综上所述，IEC-60287、IEC-60853 和 N-M 理论是建立在一定假设条件下，以解析计算的方法对比较简单的敷设和排列方式给出对工程实际具有指导意义的载流量。随着复杂条件下密集排列电力电缆群的出现，电力电缆间电磁和热的相互作用更加强烈，其损耗和散热计算往往和多种因素有关，而且相差较大，因而不能简单按标准给定方法进行分析。此外，电力部门对电力电缆载流量的要求越来越精确，这就需要研究更加有效的方法来分析密集电力电缆群的电磁场和温度场分布，给出比较精确的电力电缆载流量。

鉴于此，国内外进行了四个方面的研究：对标准采用的热路模型进行改进；进行载流量试验；采用数值计算方法；针对一些特殊问题进行专门研究<sup>[34-69]</sup>。但都没有给出一种系统的方法，完整地解决上述问题。

近二十年，随着计算机技术的飞速发展，数值计算在温度场计算中的应用越来越广泛，作用也越来越突出。目前，计算电力电缆温度场的数值计算方法主要有有限差分法、边界元法和有限元法等。

### 1. 有限差分法

在物理场数值分析的计算方法中，有限差分法(FDM)是应用最早的一种。直到今天，它仍以其简单、直观的特点而被广泛应用着。有限差分法以差分原理为基础，它实质上是将物理场连续场域的问题变换为离散系统问题求解，也就是通过网格状离散化模型上各离散点的数值解来逼近连续场域的真实解。在有限差分法中，在区域内根据位置来改变网格的步长是很费时的，而且在接近曲线边界时，边界就不可能与节点相一致，由此引起的误差不能忽视。因此，有限差分法很难表示复杂的边界条件，不易处理复杂问题。文献[20, 47-49]采用有限差分法和坐标组合法相结合，计算了单一介质或多种介质的地下“一”字形排列电力电缆温度场分布和载流量。但对于三角形排列或多芯电力电缆，有限差分法仍然具有很大的局限性。

### 2. 边界元法

边界元法(BEM)与有限差分法相反，其所选择的函数满足区域内的支配方程，而后用这些函数去逼近边界条件。由于积分是在边界上进行的，采用此法可将三维问题化为二维问题、二维问题化为一维问题来处理，使其数值计算较为简单。此外，此法是直接建立在基本微分方程和边界条件基础上，不需要事先寻求任何泛函，适当变换后，还能解决随时间变化的物理场问题。文献[50]采用边界元法计算了地下电力电缆的温度场。但边界元法在求解边界近似解后，只能逐点计算内域点的近似解而得不到解析表达。同时，它所得到的代数方程组的系数矩阵不是稀疏矩阵，矩阵中所有元素都要用数值积分求出，增加了计算的时间。对于密集敷设电力电缆群，边界元法求解比较困难。

### 3. 有限元法

有限元法(FEM)在原理上是有限差分法和变分法中里兹法的结合。它对表示物理场的微分方程的变分问题作离散化处理，将场域划分为有限小的单元，并使复杂的边界分段属于不同的单元，然后将整个场域上泛函的积分式展开成各单元上泛函积分式的总和。其中每个单元的顶点就是未知函数的取样点，它类似于差分法中的节点。各单元内试验

函数采用统一的函数形式(如多项式等),其待定系数取决于本单元各顶点上的函数取值。泛函极小值的条件是泛函对试验函数中各待定系数的偏导数等于零,据此列出差分近似的代数方程组,并直接计算节点函数值的数值解,再确定试验函数以表示各单元内函数的近似解。

有限元法的优点是适用于具有复杂边界形状或边界条件、含有复杂媒介的定解问题。此法不受场域边界形状的限制,且对第二类、第三类及不同媒介分界面的边界条件不必作单独处理。虽然其计算程序一般较繁杂,但各个环节易于标准化,可形成通用的计算程序,其结果有较好的计算精度。

综上所述,有限差分和边界元对于复杂排列方式下的电力电缆群和多芯电力电缆具有很大的局限性,而有限元可以处理复杂的边界条件,可以进行多场耦合计算,可以实现非线性场的计算,因此利用有限元分析密集电力电缆群的电磁场和温度场,进而计算载流量是一种有效的方法。

## 0.4 载流量计算中的多场耦合

在电力电缆温度场计算中,电力电缆温度场分布由电力电缆电磁损耗与环境条件决定,而电力电缆电磁损耗与介质磁导率和电阻率密切相关,电阻率和磁导率又与温度密切相关,因此电磁场计算和温度场计算是一个耦合的计算过程。

电力电缆的介质损耗与绝缘损耗因数密切相关,而绝缘损耗因数是温度的函数,因此介质损耗计算与温度场计算也是一个耦合的计算过程。

在排管、隧道和沟槽敷设方式下,电力电缆温度场计算包含传导、对流、辐射三种传热方式,需要对固体传热、辐射和自然对流三种传热方式进行耦合求解。

由此可见,电力电缆温度场计算包含上述三个耦合计算过程。在标准给定计算方法中,电磁场、介质损耗和载流量的计算是通过将导体温度设为  $90^{\circ}\text{C}$ ,然后计算各部分损耗,从而确定载流量。由于电力电缆群不同缆芯导体温度的分散性和温度场计算中温度预测的难度,计算的准确性受到很大程度的影响。鉴于此,国外对电力电缆载流量计算中电磁场和温度场的耦合进行了一定的研究。文献[70]综合各种影响因素对温度预测模型进行了改进,精度有了一定程度的提高;文献[71-73]采用数值分析的方法,通过间接耦合实现了电磁场和温度场的耦合计算,具有较高的精度。

本书针对气体区域的流体动力学方程进行分析,给出一种通用的求解方法,实现气体区域的连续性方程、动量方程和能量方程的耦合求解,最终给出了电力电缆的温度场分布和载流量计算方法。

## 0.5 在线监测与实时载流量

近年来,光纤测温技术逐步在电力电缆领域得到应用。通过对电力电缆表面或金属套温度进行在线监测,并据此推算电力电缆的导体温度,为电力系统调度人员确定电力电缆的实时载流量和剩余负荷能力提供了重要依据。其基本原理是通过分散布置在电力电缆外护层层外或金属套内的温度传感器,对运行中的电力电缆的外护套外表面或金属

套内表面的温度进行连续在线测量。利用测量得到的温度，结合由电力电缆的具体结构形式和材料的特性决定的电力电缆径向热传递特性，依据 IEC-60287 热路模型，反向推算出当前电力电缆导体的温度，然后根据导体的温度确定电力电缆的载流量<sup>[74-79]</sup>。

现有方法没有考虑电力电缆表面温度的分散性，推算所得的电力电缆导体温度可能与实际导体温度差别较大。本书根据电力电缆群温度场分布特性，给出了基于有限元的迭代计算模型，计算电力电缆导体温度，预测电力电缆的实时载流量。

# 第 1 章 高压电力电缆结构和安装方式

## 1.1 高压电力电缆的发展概况

高压电力电缆始于 1908 年，英国建设了一条 20 kV 的电力电缆网，随后德国、法国、美国等依次建设了 30 kV、66 kV 和 132 kV 的电力电缆网。20 世纪 70 年代以前，电力电缆网主要采用充油电力电缆，随后出现了充气电力电缆、塑料电力电缆、超导电力电缆等多种形式的电力电缆。

由于塑料电力电缆在安装和经济方面具有突出的优点，目前国内外工业部门在低压系统上已基本已全部使用塑料电力电缆。因为聚氯乙烯(PVC)绝缘的介质损耗较大，且其导电离子随电场强度的增加而急剧上升，因此用于更高电压受到了限制。

随着塑料工业的发展，新的合成绝缘材料不断出现。聚乙烯与聚氯乙烯相比，交流击穿强度提高了 60%，其介质损耗则仅为聚氯乙烯的 1/200 左右，且聚乙烯的比重小，耐水和耐化学药品性能良好，适宜于大倾斜度或高落差的装置，安装敷设方便，接头和终端头结构简单，制造容易，维修方便，价格也较便宜。但是它的熔点太低，在机械应力作用下容易产生裂缝。

20 世纪 60 年代初期，发现了能够用高能辐照方法或化学方法对聚乙烯分子进行交联，使它的分子由原来的线型结构变成网状结构，即由热塑性变为热固性，从而提高了耐热性和热稳定性。这种经过交联后的聚乙烯称为交联聚乙烯(XLPE)。由于它具有优良的性能，因而适用于制造 6kV 以上较高电压等级的电力电缆。

交联聚乙烯热性能的主要特点是：软化点高、热变形小，在高温下机械强度大，抗热老化性能好。交联聚乙烯电力电缆的最高允许运行温度可达 90℃，而短路时的允许温度则高达 250℃，分别比聚乙烯电力电缆的高 20℃和 100℃，在同样的导体截面和敷设条件下，前者的载流能力比后者大得多。因此，交联聚乙烯电力电缆已经在 10kV、35 kV、110 kV、220 kV 等电压等级得到广泛使用。

## 1.2 交联聚乙烯电力电缆结构

交联聚乙烯电力电缆分为单芯和多芯两种结构，110 kV 和 220 kV 电压等级全部采用单芯电力电缆，10kV 和 35 kV 电压等级电力电缆常采用三芯电力电缆。

常见的单芯电力电缆结构如图 1-1 所示，多芯电力电缆结构如图 1-2 所示。

常用的电力电缆导体材料有铜和铝，虽然铝的价格大约是铜的一半，但铝的电阻率较大，流过相同负荷电流时，铝的截面积大约是铜的 1.5 倍，即铝芯电力电缆直径往往较大。因此现在铜芯电力电缆较多。

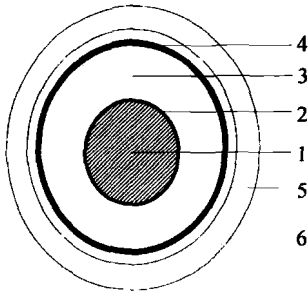


图 1-1 单芯交联聚乙烯电力电缆的结构

1—缆芯导体；2—半导体屏蔽层；3—交联聚乙烯绝缘层；  
4—半导体屏蔽层；5—金属屏蔽带；6—聚乙烯护套。

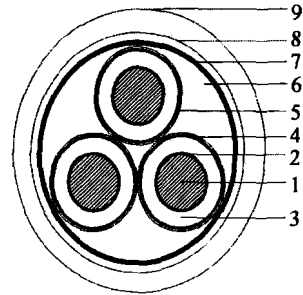


图 1-2 三芯交联聚乙烯电力电缆的结构

1—缆芯导体；2—半导体屏蔽层；3—交联聚乙烯绝缘层；  
4—半导体屏蔽层；5—金属屏蔽带；6—填料；  
7—包带；8—铠装；9—聚乙烯护套。

电力电缆线芯导体的结构形式有圆绞线、紧压圆绞线、分割圆线、空心绞线等多种形式，其中紧压圆绞线最常用，其结构形式如图 1-3 所示。

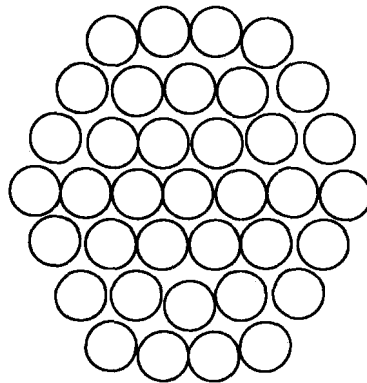


图 1-3 典型紧压圆绞线结构

绝缘层的目的是阻止缆芯导体与接地之间以及相邻缆芯导体间电荷的移动。绝缘层必须能够承受由工作电压和短时暂态电压产生的电场强度，而绝缘不失效引发短路故障。

金属屏蔽带通常由铝或铅构成，用来防止水分进入绝缘层。大电力电缆常采用铅作为金属屏蔽带，而铝护套通常采用皱纹状结构。出于安全考虑，金属屏蔽带最少在一点接地。铠装层和外护套主要用来保护电力电缆。铠装层由钢线或钢带构成，用来保护电力电缆免受外部机械力的破坏。外护套常采用聚乙烯材料。

### 1.3 电力电缆的安装方式

高压电力电缆主要有地下电力电缆和架空电力电缆两种敷设方式，其中地下电力电缆又分为土壤直埋、排管敷设、沟槽敷设和隧道敷设等几种主要方式。



### 1.3.1 土壤直埋电力电缆

最常用的地下电力电缆敷设方式是土壤直埋敷设方式。土壤直埋电力电缆往往埋于地表以下 0.7m~1m 之间，典型的单回路三相单芯电力电缆土壤直埋敷设方式如图 1-4 所示。

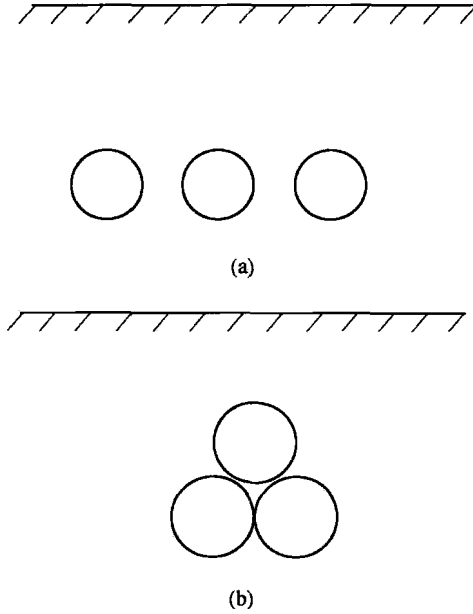


图 1-4 典型土壤直埋敷设方式  
(a) “一”字形排列；(b) 三角形排列。

当电力电缆表面的温度过高时，电力电缆周围土壤的水分将在温度梯度的作用下向远离电力电缆的方向扩散，从而在电力电缆周围形成一个干燥土壤的区域，这部分区域土壤的热阻将是正常土壤的 2.5 倍~4 倍，从而造成了电力电缆载流量的下降。为了防止载流量下降过多，目前常在电力电缆周围回填沙土，干燥沙土的热阻为正常土壤的 2 倍左右，由此确定的载流量比干燥土壤要大。有回填土的土壤直埋单回路“一”字形排列电力电缆敷设方式如图 1-5 所示。

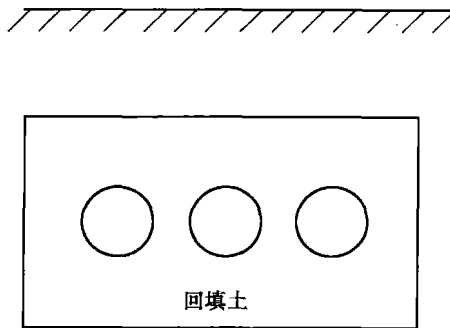


图 1-5 有回填土直埋电力电缆敷设方式