

电力电缆动态载流 及路径探测技术

祝 贺 著



科学出版社

电力电缆动态载流及路径 探测技术

祝贺 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍电力电缆动态载流及路径探测技术。全书共 13 章, 主要内容包括直埋敷设方式电缆热电耦合模型校验、双回土壤直埋敷设电缆群热电耦合特性分析、外热源作用下电缆暂态载流量数学模型及校验、外热源作用下电缆稳态载流量仿真研究、外热源作用下电缆实时载流量仿真研究、外热源作用下电缆沟敷设电缆通风增容研究、无线长自由电缆回波的时域方程与时域仿真、掩埋电缆回波的频域方程与频域仿真、海底电缆路径精测回波试验及特征分析、电力电缆路径检测系统的理论研究与分析、电力电缆路径检测系统的硬件设计、电力电缆路径检测系统的软件设计、系统的组装调试及现场实测。

本书可作为电力系统及其自动化专业研究生的学习资料, 也可供电气工程相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电缆动态载流及路径探测技术/祝贺著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059606-2

I. ①电… II. ①祝… III. ①电力电缆—载流量—教材
IV. ①TM247

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第263759号

责任编辑: 吴凡洁 王楠楠 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 199 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

电力电缆具有架空输电线路不可替代的特质，使得电力电缆越来越多地应用到电力企业生产实际。电力电缆运行特性趋于复杂化和敷设情况的不明显化已给电力电缆运行、检测带来重大影响。

为解决上述问题，本书着重介绍在复杂敷设环境下电力电缆动态载流量数学模型及其求解方法、增容措施；海底电缆精测回波试验及运行特征；电力电缆路径检测理论、检测系统软硬件设计等内容。本书理论性强，作者在多年教学、科研工作中，结合实际工程需求，注重理论联系实际，力求用简洁的数学物理方法求解实际工程问题，尽量避开烦冗的公式推导和数据分析。

本书撰写时依据我国现行的标准、规范，结合吉林省输电工程安全与新技术实验室近年来的科研成果，并融合了作者的教学及科研经验。

本书写作过程中得到硕士研究生严俊韬、刘程、何旭、李映桥、于博文、刘豪、李柄坤等的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者予以批评指正。

作 者

2018年8月于东北电力大学

目 录

前言

第 1 章 直埋敷设方式电缆热电耦合模型校验	1
1.1 高压电力电缆的结构及各项敷设参数	1
1.2 水平排列电力电缆载流量解析计算	2
1.2.1 电缆内部热量传递方式	2
1.2.2 导体交流电阻的计算	3
1.2.3 电缆绝缘损耗计算	4
1.2.4 电缆金属护套的损耗计算	5
1.2.5 热阻的计算	6
1.2.6 水平排列单芯电缆载流量求解	7
1.3 单根电缆热电耦合特性仿真分析	7
1.4 单回水平排列电缆热电耦合特性仿真分析	10
1.5 多回土壤直埋敷设电缆群热电耦合模型准确性校验	14
第 2 章 双回土壤直埋敷设电缆群热电耦合特性分析	16
2.1 双回土壤直埋敷设电缆上下一字排列热电耦合特性分析	16
2.2 双回土壤直埋敷设电缆水平一字排列热电耦合特性分析	19
2.3 双回土壤直埋敷设电缆水平三角形排列热电耦合特性分析	21
2.4 土壤直埋敷设载流量影响因素分析	24
2.4.1 空气温度变化对电缆载流量的影响	24
2.4.2 土壤热阻系数对电缆载流量的影响	25
2.4.3 土壤温度对电缆载流量的影响	25
2.4.4 埋设深度对电缆载流量的影响	26
2.4.5 敷设间距对电缆载流量的影响	27
第 3 章 外热源作用下电缆暂态载流量数学模型及校验	29
3.1 电缆暂态热路模型及求解	29
3.1.1 建立电缆暂态热路模型	29
3.1.2 简化电缆暂态热路模型	30
3.1.3 求解简化后的电缆热路模型	31

3.2	建立外热源作用下电缆暂态载流量数学模型	34
3.2.1	建立外热源热场数学模型	34
3.2.2	求解外热源热场数学模型	35
3.2.3	计算电缆沟内空气温度	36
3.2.4	外热源作用下电缆暂态载流量数学模型	36
3.3	验证数学模型的正确性	37
第4章	外热源作用下电缆稳态载流量仿真研究	40
4.1	电力电缆稳态载流量解析计算	40
4.1.1	计算电缆导体交流电阻	40
4.1.2	计算电缆绝缘损耗	41
4.1.3	计算电缆金属护套的损耗	42
4.1.4	计算电缆本体热阻及外部热阻	43
4.1.5	求解电缆稳态载流量	44
4.2	建立外热源干扰下电缆三维仿真模型及计算	45
4.2.1	确定模型假设条件	45
4.2.2	建立电缆三维仿真模型	45
4.2.3	确定边界条件及划分网格	47
4.2.4	求解外热源作用下电缆载流量	49
4.3	外热源作用下电缆载流量仿真分析及模型验证	50
4.3.1	仿真结果分析	50
4.3.2	模型验证	52
4.4	分析外热源对电缆导体温度的影响	52
4.4.1	外热源功率对电缆导体温度的影响	52
4.4.2	外热源距离对电力电缆导体温度的影响	53
4.5	分析外热源对电缆载流量的影响	54
4.5.1	外热源功率对电缆载流量的影响	55
4.5.2	外热源距离对电缆载流量的影响	55
第5章	外热源作用下电缆实时载流量仿真研究	57
5.1	建立外热源作用下电缆暂态温度场模型及计算	57
5.1.1	建立电缆暂态温度场模型	57
5.1.2	利用 Crank-Nicolson 差分格式求解暂态温度	58
5.2	分析外热源作用下电缆实时载流量计算结果及模型验证	59
5.3	外热源功率作用下电缆实时导体温度的研究分析	64

5.4 外热源距离作用下电缆实时导体温度的研究分析	67
第 6 章 外热源作用下电缆沟敷设电缆通风增容研究	71
6.1 建立通风电缆沟耦合场仿真模型	71
6.1.1 基本假定	71
6.1.2 建立通风电缆沟耦合场仿真模型	71
6.1.3 确定边界条件及划分网格	72
6.2 外热源作用下电缆沟耦合特性计算及校验	73
6.2.1 外热源作用下电缆沟耦合特性计算	73
6.2.2 外热源作用下电缆沟耦合特性校验	73
6.3 不同通风工况下电缆运行特性及增容建议	77
6.3.1 分析不同通风工况下电缆温度计算结果	78
6.3.2 分析不同通风工况下电缆载流量计算结果	80
6.3.3 外热源作用下电缆沟内通风增容建议	82
第 7 章 无限长自由电缆回波的时域方程与时域仿真	83
7.1 简化海底电缆结构	83
7.2 建立无限长自由电缆几何模型	83
7.3 建立与计算无限长自由电缆回波的时域方程	84
7.4 建立无限长自由电缆时域仿真模型及结果分析	88
7.4.1 基本假设	88
7.4.2 确定计算场域边界条件及网格划分	88
7.4.3 仿真结果分析	90
第 8 章 掩埋电缆回波的频域方程与频域仿真	93
8.1 建立掩埋电缆回波的频域方程	93
8.2 建立掩埋电缆频域仿真模型及结果分析	95
8.2.1 定义频域仿真模型和场域边界条件	95
8.2.2 仿真结果分析	96
第 9 章 海底电缆路径精测回波试验及特征分析	102
9.1 试验计划	102
9.1.1 考察并选择试验场地	102
9.1.2 连接仪器并分配任务	102
9.2 试验过程	105
9.3 试验结果分析	106

9.3.1	沉积物对电缆声学波形的影响	106
9.3.2	掠射角对电缆声学波形的影响	107
9.3.3	深度对电缆声学波形的影响	108
9.3.4	频率对电缆声学波形的影响	109
9.3.5	结构对电缆声学图像的影响	110
9.3.6	深度对电缆声学图像的影响	112
9.3.7	掠射角对电缆声学图像的影响	113
第 10 章	电力电缆路径检测系统的理论研究与分析	116
10.1	建立等效模型求解磁场强度	116
10.1.1	建立地下电缆空间等效模型	116
10.1.2	电磁法求解时变磁场强度	117
10.2	电磁感应法识别电缆路径	118
10.2.1	计算电缆磁场强度分量	118
10.2.2	极值法确定电缆位置	119
10.3	磁场强度信号的采集与传输	121
10.3.1	注入信号的耦合方式	121
10.3.2	接收信号的场强处理	122
10.4	传输线法计算电缆的交变电流	123
10.5	双线圈法测定埋地电缆深度	125
第 11 章	电力电缆路径检测系统的硬件设计	128
11.1	硬件设计原则及整体功能实现	128
11.1.1	硬件设计基本原则及方法	128
11.1.2	硬件部分整体功能实现	129
11.2	核心控制模块设计	130
11.2.1	系统核心处理器的选取	130
11.2.2	STM32F103CET6 模块设计	131
11.3	电磁处理模块电路设计	131
11.3.1	脉冲激励电路设计	132
11.3.2	地平衡处理电路设计	132
11.3.3	电磁信号处理电路设计	133
11.3.4	复位预警电路设计	133
11.4	通信模块电路设计	136
11.4.1	GPS 控制电路设计	136
11.4.2	存储电路设计	136

11.5 输入输出模块电路设计	137
11.5.1 扬声器电路设计	137
11.5.2 键盘接口及指示灯电路设计	138
11.5.3 LCD 电路设计	139
11.6 其他辅助电路设计	139
11.6.1 电源电路设计	139
11.6.2 固定频率音频信号输出控制电路设计	140
11.6.3 时钟及复位电路设计	141
第 12 章 电力电缆路径检测系统的软件设计	142
12.1 软件设计原则及整体功能实现	142
12.1.1 软件设计基本原则及方法	142
12.1.2 软件系统的整体功能实现	142
12.2 系统控制核心模块设计	143
12.2.1 GPS 与 UART 通信模块设计	143
12.2.2 多通道数据采集程序设计	144
12.2.3 电缆埋藏深度和电流检测模块设计	145
12.3 辅助模块设计	146
12.3.1 FLASH 读写程序设计	146
12.3.2 液晶显示界面设计	147
第 13 章 系统的组装调试及现场实测	149
13.1 系统组装调试	149
13.2 不同工况下的系统现场实测及数据结果比对	150
13.2.1 直埋于土壤植被下的电缆路径现场实测	150
13.2.2 城市道路设施下的电缆路径现场实测	152
13.2.3 电缆沟内的电缆路径现场实测	154
13.3 整体试验结果综合分析	155
参考文献	158

第1章 直埋敷设方式电缆热电耦合模型校验

以所选取的高压电力电缆为例，本章在简单介绍此电缆的结构和敷设方式的基础上，对单根、单回、多回土壤直埋敷设方式的电缆进行热电耦合仿真计算，并与 IEC(国际电工委员会)算法进行对比，而且依据 IEC 理论计算单回土壤直埋敷设电缆的载流量数值，从而验证耦合模型的准确性。

1.1 高压电力电缆的结构及各项敷设参数

对比分析各种绝缘性能电缆，可发现交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆具有可塑性高、受热形变小、持续高温作用下耐拉和抗腐蚀能力强等优点。因此 XLPE 电缆目前广泛应用于各电压等级的输电线路中。常用的 XLPE 电缆分单芯和多芯两种，其中 110kV 及以上电压等级的输电线路多采用单芯电力电缆；10kV 和 35kV 电压等级的输电线路多采用多芯电力电缆。

本书主要研究对象为 8.7/15kV YJV 1×400 的 XLPE 单芯电力电缆，其结构如图 1-1 所示。电缆结构从外到内分别为外护套、金属屏蔽层、绝缘层、导体。其中绝缘层的作用是阻止缆芯导体与地面之间发生电荷移动。金属屏蔽层主要用来防止水进入绝缘层。外护套主要用来承受外界机械力，使电缆免受外力破坏，并且外护套常采用聚乙烯材料。

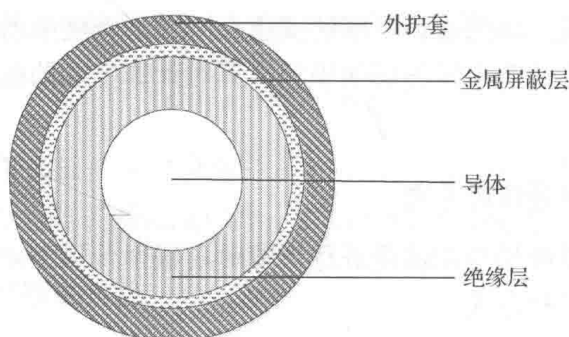


图 1-1 单芯电力电缆截面图

本章的热电耦合模型针对单根和单回两种工况下的直埋敷设方式电缆进

行仿真研究，其电缆的结构尺寸和导热系数如表 1-1 所示，电缆的电特性参数如表 1-2 所示。

表 1-1 电缆的结构尺寸和导热系数

结构名称	半径(厚度)/mm	导热系数/(W/(m·K))
导体	11.9	400
绝缘层	5.9	0.2857
金属屏蔽层	0.3	160
外护套	2.3	0.1667

表 1-2 电缆的电特性参数

结构名称	电导率/(S/m)	相对介电常数
导体	5.998×10^7	1
绝缘层	1×10^{-15}	2.5
金属屏蔽层	3.774×10^7	2.4
外护套	1×10^{-16}	8

1.2 水平排列电力电缆载流量解析计算

电缆载流量大小直接取决于电缆缆芯温度，电缆缆芯温度主要取决于通过电缆的电流及其散热环境，电缆的电流取决于用户需求及调度人员的控制。因此，另外一个重要因素就是散热环境。电缆各层不同的损耗直接影响电缆的导热效果，周围敷设环境的变化会严重影响电缆的散热条件。因此电缆内部的传热方式及电缆各层的损耗计算对计算电缆的载流量大小有着至关重要的作用。

1.2.1 电缆内部热量传递方式

在对电缆的温度场与载流量进行计算时，根据传热学知识，将电缆的热量传递分为以下三种方式。

1) 热对流

热对流是指流体与流体或流体与固体之间存在温差，从而导致流体发生相对移动，产生热量传递的现象。当冷空气流经电缆绝缘层表面时，由于空气具有黏性力作用，紧贴电缆绝缘层表面的空气不流动，热量以固体导热的

方式进行传递；距离电缆表面较远的空气以主流速度运动，也就是与电缆绝缘层发生对流换热。因此，电缆与其表面上方的空气有热对流和热传导两种传热方式。

针对直埋和通风电缆沟两种敷设方式的电缆，热对流又包含自然对流和强制对流两种。不同流体密度与温度导致的是空气的自然对流，在通风电缆沟内鼓风机的强制压力导致的是强制对流。

根据对流换热基本方程，传递的热量 q 与流体和固体表面的温差成正比：

$$q = h\Delta t, \quad \Phi = Ah\Delta t \quad (1-1)$$

式中， h 为电缆表面传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)； Δt 为电缆表面与空气的温差，取正值； Φ 为通过电缆面积 A 的热流量 (W)。

2) 热传导

热传导即电缆表面和空气接触部分因为存在温差而发生的热量从高温区向低温区传递的现象。根据傅里叶定律，热流密度与热量传递方向的变化率成正比：

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1-2)$$

式中，负号表示热量传递的方向； λ 为电缆表面的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

3) 热辐射

物体因自身的温度而具有向外发射能量的本领，这种热量传递的方式称为热辐射，且物体辐射的能量随温度的升高而增大。因此电缆的热量传递包含热辐射方式，根据热辐射定律，电缆表现的辐射能 Φ 计算公式为

$$\Phi = \varepsilon' A \sigma (T^4 - T_1^4) \quad (1-3)$$

式中， ε' 为电缆表面物质的发射率， $\varepsilon' \leq 1$ ； A 为电缆的表面积 (m^2)； σ 为玻尔兹曼常量； T 为电缆表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)； T_1 为周围空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.2.2 导体交流电阻的计算

因为以 XLPE 电力电缆为例进行计算，依据 IEC 60287 标准，所以缆芯导体在最高工作温度 (90°C) 下单位长度的交流电阻由式 (1-4) 给出：

$$R = R'(1 + Y_s + Y_p) \quad (1-4)$$

式中, R' 为最高工作温度下单位长度导体的直流电阻 (Ω/m); Y_s 为趋肤效应因数; Y_p 为邻近效应因数。

导体在最高工作温度下单位长度的直流电阻为

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(T - 20)] \quad (1-5)$$

式中, R_0 为 20°C 时单位长度导体的直流电阻 (Ω/m); α_{20} 为 20°C 时材料的温度系数; T 为导体的最高工作温度 ($^\circ\text{C}$)。

趋肤效应因数 Y_s 由式 (1-6) 计算:

$$Y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (1-6)$$

式中, $x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s$, f 为电源频率 (Hz), k_s 为导体干燥浸渍与否的系数,

取值为 $1\Omega/(\text{m} \cdot \text{Hz})$ 。代入求得 $x_s^2 = 3.482$, 代入式 (1-6) 得 $Y_s = 0.06$ 。

邻近效应因数 Y_p 与电力电缆缆芯数和根数有关, 这里针对三根单芯电力电缆水平排列的方式进行计算, 其邻近效应因数 Y_p 为

$$Y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (1-7)$$

式中, d_c 为导体直径 (mm); s 为各导体轴心之间的距离 (mm); $x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$, 对于该类型的电缆, k_p 取值为 $1\Omega/(\text{m} \cdot \text{Hz})$ 。

仿真模型中 $s=250\text{mm}$, 代入式 (1-7) 求得 $Y_p = 3.14 \times 10^{-3}$ 。将求得的 Y_s 与 Y_p 代入式 (1-4) 中求得该型号电缆单位长度的交流电阻 $R = 3.837 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ 。

1.2.3 电缆绝缘损耗计算

依据 IEC 60287 标准, 绝缘损耗与电缆电压有关, 每相中单位长度的绝缘损耗可由式 (1-8) 计算:

$$W_d = \omega c U_0^2 \tan \delta \quad (1-8)$$

式中, U_0 为电缆相电压(V); $\tan \delta$ 为绝缘损耗因数(取值为 0.001, 取自《电线电缆手册》); c 为单位长度电缆的电容; ω 为电源角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

单位电缆导体电容可由式(1-9)求出:

$$c = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} \times 10^{-9} \quad (1-9)$$

式中, ε 为绝缘材料的介电常数($\varepsilon=2.3$, 取自于《电线电缆手册》); D_i 为绝缘层直径(mm); d_c 为导体直径(mm)。

根据已知参数值, 代入式(1-9), 求得 $c = 1.843 \times 10^{-10}$ F/m, 代入式(1-8)求得单位长度的绝缘损耗 $W_d = 0.237$ W/m。

1.2.4 电缆金属护套的损耗计算

依据 IEC 60287 标准, 金属护套的功率损耗包括环流损耗 λ_1' 和涡流损耗 λ_1'' , 所以总损耗为

$$\lambda_T = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (1-10)$$

首先计算单位长度金属(铝)护套的电阻 R_s , 已知 20℃ 铝的电阻率 $\rho_s = 2.84 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 电阻的温度系数 $\alpha_s = 0.00403$, 护套工作温度为 90℃。则通过式(1-10)求得工作温度下单位长度铝护套的电阻 $R_s = 6.587 \times 10^{-5} \Omega/m$ 。

其次, 当三根单芯电缆水平排列时, 电缆导体轴间距离 $s=0.25$ m, 金属护套的直径 $d=0.06$ m, 外侧电缆护套与另外两根电缆的导体之间的互抗可由式(1-11)求出:

$$X_m = 200 \times 10^{-7} \pi \ln 2 (\Omega / m) \quad (1-11)$$

相邻两个单芯电缆单位长度护套的电抗可由式(1-12)求出:

$$X = 200 \times 10^{-7} \pi \ln \left(2 \frac{s}{d} \right) (\Omega / m) \quad (1-12)$$

三根电缆水平排列, 中间一根与两侧的电力电缆间距相等, 不换位, 金属护套两端互连时损耗最大的那根电缆(即载有滞后相的外侧电力电缆)的损

耗因数可由式(1-13)求出:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (1-13)$$

超前相电力电缆的损耗因数由式(1-14)求出:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (1-14)$$

中间相电力电缆的损耗因数由式(1-15)求出:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad (1-15)$$

且 $Q = X - X_m / 3$, $P = X + X_m$ 。求得 $\lambda'_{11} = 1.607$, $\lambda'_{12} = 1.173$, $\lambda'_{1m} = 1.185$ 。其中, 中间相电缆最热, 取 $\lambda' = \lambda'_{1m} = 1.185$, 且 $\lambda'' = 0$, 即涡流损耗忽略不计。

1.2.5 热阻的计算

依据 IEC 60287 标准, 对电缆各层热阻进行计算。

1) 绝缘热阻的计算

对于单芯电力电缆, 即一根导体与金属护套之间的绝缘热阻 R_1 由式(1-16)计算:

$$R_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (1-16)$$

式中, ρ_{T1} 为绝缘材料的热阻系数 ($K \cdot m/W$); t_1 为导体和金属护套之间的绝缘厚度 (mm); d_c 为导体直径 (mm)。取 $\rho_{T1} = 3.5 K \cdot m/W$, 代入式(1-16), 求得 $T_1 = 0.55 K \cdot m/W$ 。

2) 外护套热阻计算

外护套一般是同心圆结构, 外护套热阻 R_3 由式(1-17)计算:

$$R_3 = \frac{\rho_{T3}}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right) \quad (1-17)$$

式中, t_3 为外护套厚度 (mm); D'_a 为外护套外径 (mm)。取 $\rho_{T3} = 6 K \cdot m/W$, 代

入式(1-17), 求得 $R_3 = 0.174 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

3) 土壤中敷设电缆外部热阻计算

对于等间距、水平排列且损耗相等的三根单芯电力电缆, 可根据式(1-18)计算其热阻 T_4 :

$$R_4 = \frac{\rho_{T4}}{2\pi} \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (1-18)$$

式中, ρ_{T4} 为土壤的热阻系数 ($\text{K} \cdot \text{m/W}$); L 为电缆的埋深 (mm); s_1 为相邻电缆之间的轴心距离 (mm)。 $u = 2L / D_e = 46.729$ (D_e 为电缆外径), 代入式(1-18)中求得 $R_4 = 1.311 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

1.2.6 水平排列单芯电缆载流量求解

依据 IEC 60287 标准, 电缆载流量计算公式如下:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T_c - W_d(0.5R_1 + R_3 + R_4)}{R[R_1 + (1 + \lambda_1)(R_3 + R_4)]}} \quad (1-19)$$

式中, ΔT_c 为电缆导体允许最高温度与周围媒介温度的差值。

针对 8.7/15kV YJV 1×400 的 XLPE 单芯水平排列直埋敷设电力电缆, 式(1-19)中各项参数均已求出, 当缆芯达到最高工作温度 90℃ 时, 将各项参数代入式(1-19)求得 $I = 912.37 \text{ A}$ 。

1.3 单根电缆热电耦合特性仿真分析

为验证电缆热电耦合模型的正确性与准确性, 本节以 8.7/15kV YJV 1×400 的 XLPE 单芯电缆为例, 在电缆表面温度为 43.5℃ 的条件下, 仿真分析单芯电缆温度场分布与载流量, 因为敷设条件简单、单一, 所以应用 IEC 算法校验单根电缆热电耦合仿真计算结果。

建立单芯电缆热电耦合模型, 给电缆设置初始电流 700A, 并在 Z 轴方向加耦合电压。金属屏蔽层一端接入大地, 无换流存在, 设置成开路状态。电缆网格剖分如图 1-2 所示。

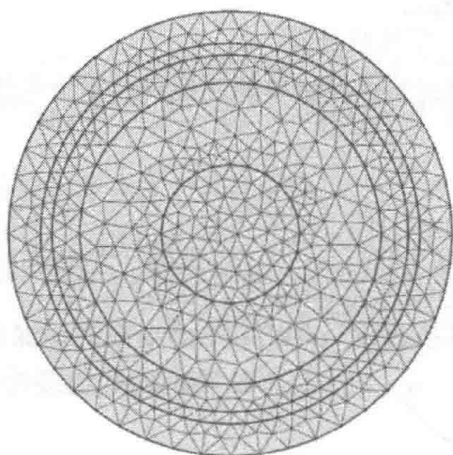


图 1-2 单根电缆网格剖分示意图

图 1-3 为电缆缆芯到电缆外表面径向温度变化曲线图,图 1-4 为电缆温度场分布云图。从图 1-3、图 1-4 可以看出,电缆缆芯温度最高为 61.63°C ,从缆芯到电缆表面温度逐渐下降,且距离缆芯越远,温度下降越快,值越低。这正好验证了缆芯是焦耳热的主要来源,所以缆芯温度值最高。

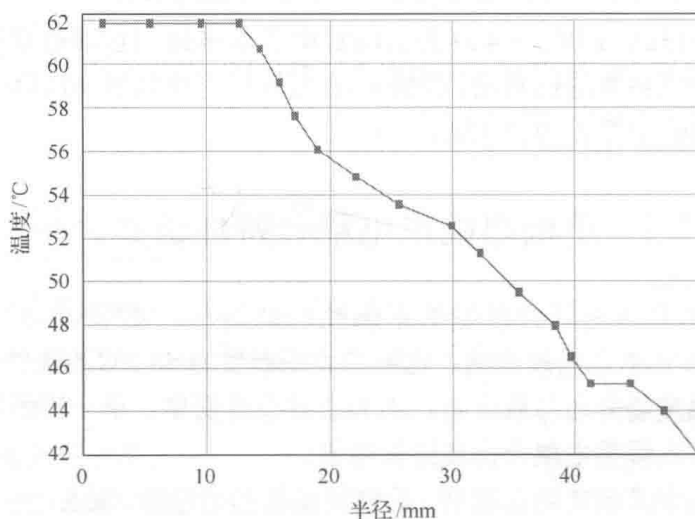


图 1-3 电缆径向温度变化曲线