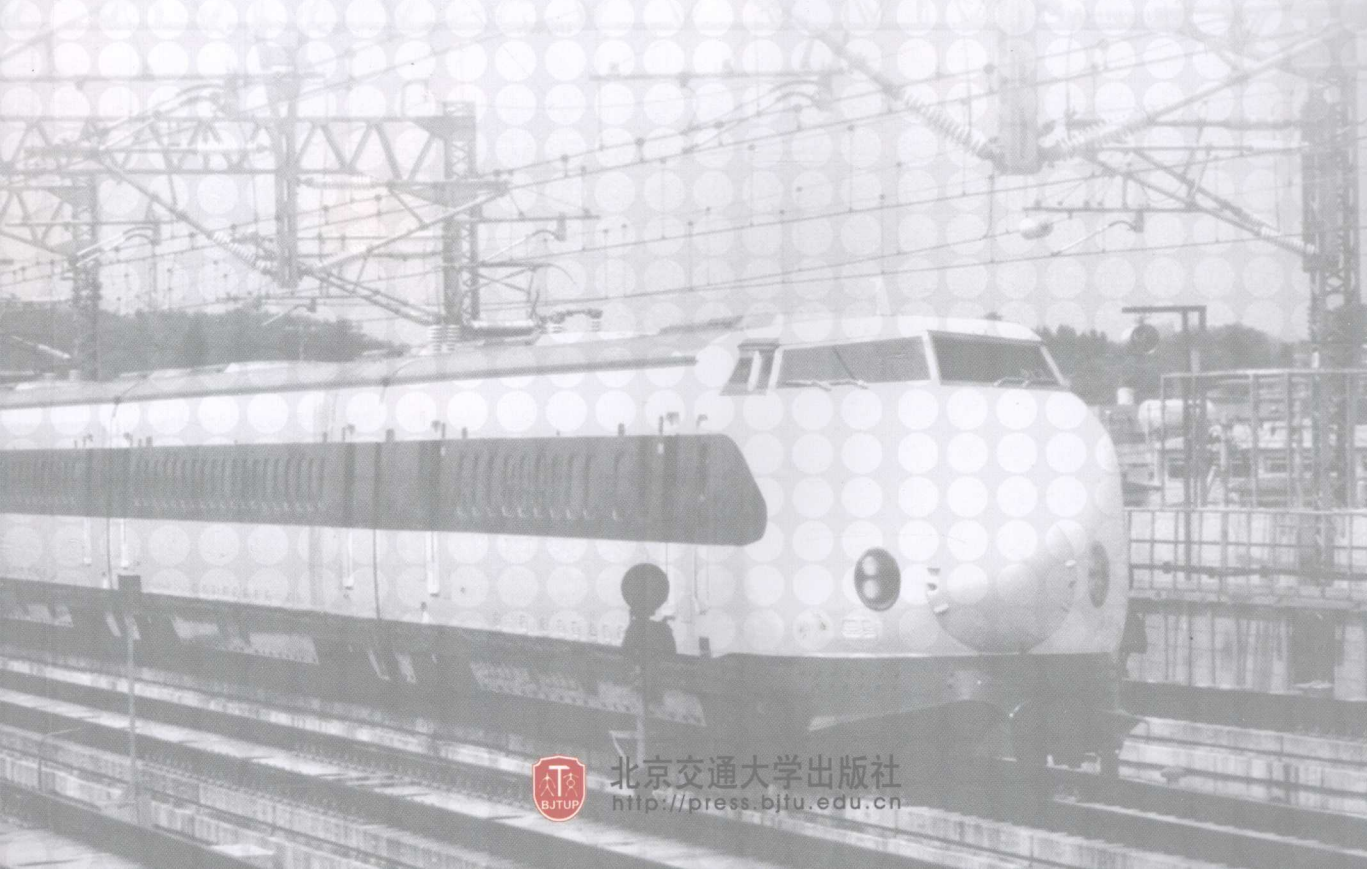


TIEDAODIANWANG GUODIANYA FENXIYUFANGHU

# 铁道电网过电压 分析与防护

电网、暂态、防雷与接地

刘明光 编著



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

# 铁道电网过电压分析与防护

——电网、暂态、防雷与接地

刘明光 编著

清华大学出版社

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书结合我国铁道供电的实际情况,介绍牵引供电系统结构及工作原理,贯通线和自闭线的供电方式及运行,集中参数和分布参数电路的电磁暂态计算方法,雷电过电压机理和计算,防雷装置与避雷器参数,接地装置与接地参数的计算和测试方法;分析钢轨电位和铁道走廊内的地电位升高;讨论接触网的耐雷水平和雷击跳闸率计算;研究接触网防雷措施和避雷器应用;以及牵引变电所防雷计算与防雷性能的评价方法。

本书内容丰富翔实,许多资料和算例取自实际工程,既强调理论也注重实用,反映了最新的有关标准、规程、科研成果和现场经验。可作为电气工程与自动化专业的铁道电气化方向、电气工程方向的教材或相关专业的参考书,也可供铁道电气工程设计、科研、建设和运营管理的有关技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

铁道电网过电压分析与防护/刘明光编著. —北京:北京交通大学出版社,2009.4

ISBN 978-7-81123-535-7

I. 铁… II. 刘… III. 电气化铁道-牵引变电所-供电-过电压保护-高等学校-教材  
IV. U224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 065704 号

责任编辑:郭东青 特邀编辑:宋望溪

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:23.75 字数:591千字

版 次:2009年5月第1版 2009年5月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-535-7/U·32

印 数:1~1000册 定价:36.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

# 前 言

本书获得了北京交通大学教材出版基金的资助。

铁道供电是现代铁道行车的重要基础设施，过电压防护技术对铁道供电系统的设计、投资、安全运行和维护管理都会产生极大的影响。高速客运专线和重载列车的发展，对铁道供电的安全可靠性要求越来越高，也促进了铁道电网的过电压分析与防护研究。电网中的过电压包括大气过电压和内部过电压，本书仅涉及大气过电压的分析与防护，内部过电压问题将在另外一册书中分析。

本书是对北京交通大学电气工程学科的博士生、硕士生及本科生讲授铁道电网及防雷接地等课程和从事相关科研的基础上编写的。在内容上力求反映我国铁道供电技术的发展，有关资料取自实际工程和相关的科学研究成果，引用了最新的技术标准及规程，参阅了国内外的大量参考文献。在此，对这些文献的作者表示感谢。

在编写过程中，博士研究生宁涛、徐志强、李娜、王松、杨罡、屈志坚，硕士研究生刘靖、张纪伟、谢天卉、袁志鹏、宋丹、张东亮、阿地（DJOSSOU ADEYEMI AMON）、庄秋月、薛福成、陈意龙等对文字的整理、校对、绘图做了许多工作，在此，表示感谢。

作者水平有限，书中难免存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

作 者  
2009 年 4 月

# 目 录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 绪论                | 1  |
| 0.1 铁道供电          | 1  |
| 0.2 过电压与绝缘水平      | 1  |
| 0.3 过电压类型         | 2  |
| 0.4 铁道电网中的过电压     | 3  |
| 0.4.1 雷电过电压       | 4  |
| 0.4.2 工频过电压       | 4  |
| 0.4.3 感应过电压       | 4  |
| 0.4.4 操作过电压       | 4  |
| 0.4.5 谐振过电压       | 4  |
| 0.4.6 电力机车诱发过电压   | 5  |
| 0.5 过电压研究方法       | 5  |
| 0.5.1 解析计算        | 5  |
| 0.5.2 物理模拟        | 5  |
| 0.5.3 计算机仿真       | 6  |
| 0.5.4 现场测量        | 6  |
| 0.6 过电压防护与绝缘配合    | 6  |
| 0.7 本书内容          | 7  |
| 第1章 铁道供电及设施       | 8  |
| 1.1 概述            | 8  |
| 1.2 牵引供电系统        | 9  |
| 1.2.1 系统结构        | 9  |
| 1.2.2 系统的基本设施     | 9  |
| 1.2.3 系统的工作特点     | 10 |
| 1.3 牵引变电所         | 11 |
| 1.3.1 单相接线变电所     | 11 |
| 1.3.2 三相接线变电所     | 15 |
| 1.3.3 平衡接线变电所     | 18 |
| 1.4 牵引网           | 27 |
| 1.4.1 馈线、轨道及回流线   | 27 |
| 1.4.2 接触网工作特点及其要求 | 28 |
| 1.4.3 接触网结构       | 29 |
| 1.4.4 接触网导线参数     | 32 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1.4.5 牵引网阻抗 .....             | 34 |
| 1.4.6 接触网中电流分布 .....          | 36 |
| 1.4.7 接触网的绝缘距离 .....          | 37 |
| 1.4.8 高速接触网设计新概念 .....        | 37 |
| 1.5 牵引供电方式 .....              | 39 |
| 1.5.1 外部电源供电方式 .....          | 40 |
| 1.5.2 单边供电与越区供电 .....         | 42 |
| 1.5.3 双边供电方式 .....            | 42 |
| 1.5.4 直接供电方式 .....            | 42 |
| 1.5.5 带回流线的直接供电方式 .....       | 43 |
| 1.5.6 经吸流变压器供电的方式 .....       | 45 |
| 1.5.7 经自耦变压器供电的方式 .....       | 48 |
| 1.5.8 同轴电力电缆供电方式 .....        | 49 |
| 1.5.9 牵引供电的分段 .....           | 50 |
| 1.5.10 牵引供电的换相 .....          | 51 |
| 1.6 开闭所与分区所 .....             | 51 |
| 1.6.1 开闭所 .....               | 52 |
| 1.6.2 分区所 .....               | 53 |
| 1.6.3 自耦变压器所 .....            | 53 |
| 1.6.4 吸流变压器 .....             | 54 |
| 1.7 无功补偿与网压补偿 .....           | 54 |
| 1.7.1 牵引供电系统的谐波与功率因数 .....    | 54 |
| 1.7.2 无功功率的补偿 .....           | 58 |
| 1.7.3 接触网的网压补偿 .....          | 59 |
| 1.7.4 接触网的网压自动调整 .....        | 60 |
| 1.8 电力机车及特性 .....             | 61 |
| 1.8.1 电传动方式 .....             | 63 |
| 1.8.2 列车动力配置方式 .....          | 64 |
| 1.8.3 交-直传动方式的电力机车 .....      | 66 |
| 1.8.4 交-直-交传动方式的动车组 .....     | 70 |
| 1.9 贯通线与自闭线供电 .....           | 70 |
| 1.9.1 贯通线 .....               | 70 |
| 1.9.2 轨道电路与自闭线 .....          | 74 |
| 1.9.3 贯通线、自闭线的电压等级与相互关系 ..... | 74 |
| 1.9.4 贯通线、自闭线的电源 .....        | 76 |
| 1.9.5 贯通线、自闭线的架设 .....        | 77 |
| 1.9.6 贯通线、自闭线的运行 .....        | 79 |
| 1.9.7 贯通线、自闭线的特点 .....        |    |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.10 高速铁路供变电工程简介 .....                                                 | 80  |
| 1.10.1 工程概况 .....                                                      | 80  |
| 1.10.2 牵引供电系统及变电所 .....                                                | 81  |
| 1.10.3 接触网 .....                                                       | 84  |
| 1.10.4 电力供电系统 .....                                                    | 85  |
| 第2章 电路暂态分析基础 .....                                                     | 88  |
| 2.1 基本概念 .....                                                         | 88  |
| 2.1.1 暂态过程的初始值 .....                                                   | 88  |
| 2.1.2 动态电路时域分析方法 .....                                                 | 89  |
| 2.1.3 $n$ 阶常微分方程及其解 .....                                              | 89  |
| 2.1.4 动态电路的激励与响应 .....                                                 | 91  |
| 2.1.5 暂态过程中过电压的估计 .....                                                | 92  |
| 2.2 一阶电路的暂态过程 .....                                                    | 92  |
| 2.2.1 R、L 电路接通交流电源 .....                                               | 92  |
| 2.2.2 R、C 电路接通交流电源 .....                                               | 93  |
| 2.2.3 一阶电路响应的三要素法 .....                                                | 94  |
| 2.3 二阶电路的暂态过程 .....                                                    | 95  |
| 2.3.1 当 $\alpha > \omega_0$ , 即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时的暂态过程 ..... | 95  |
| 2.3.2 当 $\alpha < \omega_0$ , 即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时的暂态过程 ..... | 97  |
| 2.3.3 抑制暂态过程振荡的讨论 .....                                                | 99  |
| 2.4 任意激励和高阶电路的暂态求解方法 .....                                             | 100 |
| 2.4.1 杜阿美尔积分法 .....                                                    | 100 |
| 2.4.2 卷积积分法 .....                                                      | 101 |
| 2.4.3 拉普拉斯积分变换法 .....                                                  | 102 |
| 2.4.4 状态变量法 .....                                                      | 104 |
| 2.5 非线性电路暂态求解方法 .....                                                  | 107 |
| 2.5.1 非线性电阻和非线性电感 .....                                                | 108 |
| 2.5.2 直接积分法 .....                                                      | 108 |
| 2.5.3 分段线性化方法 .....                                                    | 109 |
| 2.5.4 数值算法 .....                                                       | 111 |
| 第3章 分布参数电路的波过程 .....                                                   | 113 |
| 3.1 波动方程与行波 .....                                                      | 113 |
| 3.1.1 波动方程 .....                                                       | 113 |
| 3.1.2 行波 .....                                                         | 116 |
| 3.1.3 波阻抗的特点 .....                                                     | 117 |
| 3.2 行波的折射与反射 .....                                                     | 120 |
| 3.2.1 线路末端开路 .....                                                     | 121 |



|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.2.2 | 线路末端短路                  | 122 |
| 3.2.3 | 线路末端接有电阻                | 122 |
| 3.2.4 | 直流电压合闸于末端开路的有限长线路       | 123 |
| 3.2.5 | 直流电压合闸于末端接地的有限长线路       | 124 |
| 3.2.6 | 线路中电阻的投入与切除             | 125 |
| 3.2.7 | 有限长电缆段插入无限长线路中的波过程(网格法) | 128 |
| 3.2.8 | 集中参数元件与无损线的互换           | 130 |
| 3.3   | 折射波计算的等值电路              | 131 |
| 3.3.1 | 等值电路                    | 131 |
| 3.3.2 | 行波从一条线路折射到多条线路中         | 132 |
| 3.3.3 | 多条线路上的行波汇集              | 133 |
| 3.3.4 | 行波通过串联电感                | 134 |
| 3.3.5 | 行波通过并联电容                | 135 |
| 3.4   | 波过程计算的特性线方法             | 136 |
| 3.4.1 | 基本原理                    | 139 |
| 3.4.2 | 特性线法应用                  | 141 |
| 3.5   | 平行多导线中的波过程              | 141 |
| 3.5.1 | 静电耦合基本原理                | 144 |
| 3.5.2 | 平行导线间静电耦合及应用            | 147 |
| 3.6   | 线路上行波的衰减与变形             | 147 |
| 3.6.1 | 行波衰减与变形的原因              | 147 |
| 3.6.2 | 冲击电晕对波过程的影响             | 148 |
| 3.6.3 | 电晕对行波衰减和变形的影响           | 151 |
| 3.7   | 单相绕组中的波过程               | 151 |
| 3.7.1 | 单相绕组模型及其解               | 154 |
| 3.7.2 | 绕组中的初始电压分布              | 156 |
| 3.7.3 | 绕组中的稳态电压分布              | 156 |
| 3.7.4 | 绕组中的电压振荡                | 156 |
| 3.7.5 | 变压器绕组中的过电压防护            | 158 |
| 3.8   | 三相绕组中的波过程               | 158 |
| 3.8.1 | 中性点直接接地方式               | 159 |
| 3.8.2 | 中性点不接地方式                | 159 |
| 3.8.3 | 三角形接线方式                 | 160 |
| 3.8.4 | 行波在绕组之间的传播              | 161 |
| 3.9   | 波过程的数值计算                | 162 |
| 3.9.1 | 无损单相线路的等值电路             | 164 |
| 3.9.2 | 集中参数元件的等值电路             | 167 |
| 3.9.3 | 有损线路的等值电路               | 168 |
| 3.9.4 | 开关操作的处理                 | 168 |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 3.9.5 结点电压及求解                 | 169        |
| 3.9.6 电磁暂态计算程序简介              | 172        |
| <b>第4章 雷云放电与大气过电压</b>         | <b>173</b> |
| 4.1 雷云放电及特点                   | 173        |
| 4.1.1 雷云及电荷分布                 | 173        |
| 4.1.2 雷云放电                    | 174        |
| 4.1.3 雷电活动特征                  | 175        |
| 4.1.4 雷击危害                    | 175        |
| 4.1.5 雷击的选择性                  | 175        |
| 4.1.6 球雷                      | 176        |
| 4.2 雷电参数                      | 176        |
| 4.2.1 雷电日与雷电小时                | 176        |
| 4.2.2 地面落雷密度                  | 177        |
| 4.2.3 雷电通道的波阻抗                | 177        |
| 4.2.4 雷电流极性与幅值                | 178        |
| 4.2.5 雷电流的波头时间、波长及陡度          | 179        |
| 4.2.6 防雷计算中的雷电流波形             | 180        |
| 4.2.7 雷电的多重放电                 | 181        |
| 4.2.8 雷电的放电能量与功率              | 181        |
| 4.3 直接雷击过电压                   | 182        |
| 4.3.1 雷电直击一端接地的有限长导体          | 182        |
| 4.3.2 雷电直击无限长导线               | 185        |
| 4.4 感应雷电过电压                   | 185        |
| 4.4.1 静电感应分量                  | 186        |
| 4.4.2 电磁感应分量                  | 186        |
| 4.4.3 架空导线上出现的雷电感应过电压计算       | 187        |
| 4.4.4 雷击一端接地的导体对附近金属构件产生的感应电压 | 191        |
| <b>第5章 雷电防护装置</b>             | <b>195</b> |
| 5.1 直击雷防护原理及装置                | 195        |
| 5.1.1 直击雷防护原理                 | 195        |
| 5.1.2 避雷针及其保护范围               | 196        |
| 5.1.3 采用折线法确定避雷针的保护范围         | 197        |
| 5.1.4 采用滚球法确定避雷针的保护范围         | 200        |
| 5.1.5 避雷线及保护范围                | 201        |
| 5.1.6 其他直击雷防护方法               | 203        |
| 5.1.7 雷电定位系统简介                | 204        |
| 5.2 雷电行波防护                    | 205        |
| 5.2.1 避雷器工作原理                 | 205        |
| 5.2.2 避雷器的电气特性要求              | 205        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.2.3 电磁脉冲防护 .....        | 207 |
| 5.3 避雷器结构及特性 .....        | 207 |
| 5.3.1 保护间隙 .....          | 207 |
| 5.3.2 管型避雷器 .....         | 208 |
| 5.3.3 阀型避雷器 .....         | 209 |
| 5.3.4 磁吹避雷器 .....         | 212 |
| 5.3.5 金属氧化物避雷器 .....      | 212 |
| 5.3.6 电涌保护器 .....         | 215 |
| 5.4 避雷器的电气参数 .....        | 216 |
| 5.4.1 保护间隙 .....          | 217 |
| 5.4.2 管型避雷器 .....         | 218 |
| 5.4.3 阀型避雷器 .....         | 218 |
| 5.4.4 金属氧化物避雷器 .....      | 221 |
| 5.4.5 电涌保护器 .....         | 224 |
| 5.5 避雷器的运行监测 .....        | 225 |
| 5.5.1 MOA 避雷器运行监测 .....   | 225 |
| 5.5.2 避雷器计数器 .....        | 227 |
| 5.5.3 避雷器放电电流记录器 .....    | 228 |
| 第6章 接地及其装置 .....          | 229 |
| 6.1 接地与安全 .....           | 229 |
| 6.1.1 接地基本概念 .....        | 229 |
| 6.1.2 接地类型 .....          | 230 |
| 6.1.3 接地的电气安全 .....       | 232 |
| 6.2 土壤电阻率与接地电阻要求 .....    | 234 |
| 6.2.1 常见的土壤电阻率 .....      | 235 |
| 6.2.2 接地电阻的基本要求 .....     | 237 |
| 6.3 接地电阻与跨步电压计算 .....     | 237 |
| 6.3.1 与地面平齐的垂直接地体 .....   | 238 |
| 6.3.2 埋入地面下的垂直接地体 .....   | 240 |
| 6.3.3 多根垂直接地体的并联 .....    | 240 |
| 6.3.4 水平接地体 .....         | 241 |
| 6.3.5 不同形状的水平接地体 .....    | 242 |
| 6.3.6 垂直接地体与水平接地体组合 ..... | 243 |
| 6.3.7 接地网 .....           | 244 |
| 6.3.8 接触电势与跨步电压 .....     | 246 |
| 6.4 双层土壤中的接地电阻计算 .....    | 247 |
| 6.4.1 双层土壤上层中的垂直接地体 ..... | 247 |
| 6.4.2 双层土壤中的垂直接地体 .....   | 249 |
| 6.4.3 埋入双层土壤中的垂直接地体 ..... | 250 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 6.5 接地网的数值计算 .....          | 251 |
| 6.5.1 计算模型 .....            | 252 |
| 6.5.2 场中任意点的电位计算 .....      | 253 |
| 6.5.3 电阻系数的计算 .....         | 255 |
| 6.5.4 接地网导体分段的划分 .....      | 257 |
| 6.5.5 接地网参数计算 .....         | 257 |
| 6.5.6 CDEGS 软件简介 .....      | 257 |
| 6.6 降低接地电阻与改善地面电位分布 .....   | 258 |
| 6.6.1 增加接地体长度,扩大接地网面积 ..... | 259 |
| 6.6.2 利用自然接地体 .....         | 259 |
| 6.6.3 局部换土及土壤处理 .....       | 259 |
| 6.6.4 应用降阻剂 .....           | 261 |
| 6.6.5 深埋与深井接地 .....         | 262 |
| 6.6.6 爆破灌浆接地 .....          | 262 |
| 6.6.7 利用污水 .....            | 263 |
| 6.6.8 利用河流等自然条件延伸接地体 .....  | 263 |
| 6.6.9 冻土地区的接地改善 .....       | 263 |
| 6.6.10 改善接地网的地面电位分布 .....   | 264 |
| 6.6.11 减小通过接地网的电流 .....     | 264 |
| 6.7 接地装置的发热与防腐蚀 .....       | 266 |
| 6.7.1 接地装置材料的选择 .....       | 266 |
| 6.7.2 接地体的发热 .....          | 266 |
| 6.7.3 接地线的发热 .....          | 268 |
| 6.7.4 接地装置的腐蚀 .....         | 269 |
| 6.7.5 金属体的腐蚀程度表征 .....      | 270 |
| 6.7.6 接地装置防腐措施 .....        | 270 |
| 6.8 钢轨电位升高 .....            | 271 |
| 6.8.1 钢轨电位升高的机理与特征 .....    | 271 |
| 6.8.2 钢轨电位升高的危害 .....       | 275 |
| 6.8.3 钢轨电位升高的防护措施 .....     | 276 |
| 6.9 铁道走廊内的地电位升高 .....       | 277 |
| 6.9.1 铁道走廊地电位升高机理 .....     | 277 |
| 6.9.2 传导电位的分析计算 .....       | 278 |
| 6.10 接地参数的测试 .....          | 281 |
| 6.10.1 接地电阻测试仪 .....        | 281 |
| 6.10.2 接地电阻测试 .....         | 282 |
| 6.10.3 接触电压和地面电位分布测试 .....  | 285 |
| 6.10.4 土壤电阻率测试 .....        | 286 |
| 6.10.5 地电位分布的模拟测试 .....     | 287 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第7章 供电线路的雷电防护</b>       | 289 |
| 7.1 概述                     | 289 |
| 7.2 架空线路落雷估计与评价指标          | 290 |
| 7.2.1 线路上落雷次数估计            | 290 |
| 7.2.2 击线率、击杆率与建弧率          | 292 |
| 7.2.3 线路的耐雷水平和雷击跳闸率        | 293 |
| 7.2.4 地面落雷引起线路跳闸的估计        | 294 |
| 7.2.5 线路雷击跳闸率计算的蒙特卡洛法简介    | 296 |
| 7.3 接触网的耐雷水平与跳闸率计算         | 296 |
| 7.3.1 感应雷过电压及耐雷水平          | 297 |
| 7.3.2 雷电直击接触网的耐雷水平         | 298 |
| 7.3.3 雷电直击架空地线             | 299 |
| 7.3.4 雷击独立接地的支柱顶部          | 301 |
| 7.3.5 雷击有架空地线的支柱顶部         | 302 |
| 7.3.6 雷击跳闸率                | 306 |
| 7.4 贯通线自闭线的耐雷水平与跳闸率计算      | 310 |
| 7.4.1 线路的耐雷水平              | 310 |
| 7.4.2 线路的雷击跳闸率             | 311 |
| 7.5 电缆线段的雷电过电压分析与防护        | 313 |
| 7.5.1 雷电波对电缆主绝缘的危害与防护      | 313 |
| 7.5.2 雷电波对单芯电缆护层绝缘的危害与防护   | 315 |
| 7.6 接触网的防雷措施               | 318 |
| 7.6.1 防雷特点                 | 318 |
| 7.6.2 防雷保护措施               | 319 |
| 7.7 接触网上的避雷器应用             | 321 |
| 7.7.1 接触网上安装避雷器的原因、要求与位置选择 | 321 |
| 7.7.2 接触网用避雷器              | 322 |
| 7.7.3 接触网上避雷器的保护范围估计       | 323 |
| 7.7.4 对接触网上避雷器作用的评估        | 324 |
| 7.8 贯通线与自闭线的防雷措施           | 325 |
| 7.8.1 防雷特点                 | 325 |
| 7.8.2 防雷保护措施               | 326 |
| <b>第8章 变电所的雷电防护</b>        | 330 |
| 8.1 概述                     | 330 |
| 8.2 变电所的直击雷防护              | 331 |
| 8.2.1 变电所落雷次数估计            | 331 |
| 8.2.2 避雷针设置方式              | 332 |
| 8.2.3 加强变电所电子设备防护          | 333 |
| 8.3 变电所雷电侵入波分析             | 333 |

---

|            |                              |     |
|------------|------------------------------|-----|
| 8.3.1      | 避雷器动作过程分析 .....              | 334 |
| 8.3.2      | 侵入雷电过电压分析 .....              | 335 |
| 8.4        | 避雷器的保护范围 .....               | 338 |
| 8.4.1      | 避雷器动作后的雷电作用 .....            | 338 |
| 8.4.2      | 避雷器的保护范围 .....               | 340 |
| 8.5        | 变电所雷电侵入波的防护 .....            | 343 |
| 8.5.1      | 110 kV 或 220 kV 侧进线段防护 ..... | 343 |
| 8.5.2      | 27.5 kV 侧馈线防护 .....          | 345 |
| 8.5.3      | 双绕组和三绕组变压器防护 .....           | 348 |
| 8.5.4      | 自耦变压器防护 .....                | 349 |
| 8.5.5      | 变压器中性点防护 .....               | 349 |
| 8.5.6      | GIS 变电所防护 .....              | 350 |
| 8.6        | 变电所防雷计算 .....                | 351 |
| 8.6.1      | 计算目的和内容 .....                | 351 |
| 8.6.2      | 建立计算模型 .....                 | 353 |
| 8.6.3      | 过电压计算 .....                  | 355 |
| 8.6.4      | 防雷计算中的若干问题讨论 .....           | 356 |
| 8.7        | 变电所防雷可靠性评估 .....             | 360 |
| 8.7.1      | 评估技术指标 .....                 | 360 |
| 8.7.2      | 危险波曲线及其比较 .....              | 361 |
| 8.7.3      | 可靠性评估指标的计算 .....             | 362 |
| 8.7.4      | 考虑随机性的雷害绝缘故障率计算方法简介 .....    | 363 |
| 参考文献 ..... |                              | 365 |

# 绪 论

## 0.1 铁道供电

我国物资周转和人员流动主要依靠铁道运输,可以形象地比喻:铁道是我国国民经济的动脉。铁道要跨过平原,穿越崇山峻岭,以及人烟稀少的高原和沙漠;铁道呈线状,沿铁道分布的车站和信号设备在组织和指挥列车运行中发挥的作用十分重要,必须保证沿途的车站通信、照明和信号灯等设施可靠供电;特别是电气化铁道和高速铁道,需要为运动的电力机车或动车组提供电能,工作方式非常特殊。一方面电力部门的供电网络不能够覆盖铁道全线,另一方面铁道运输行车有自身的规律和特点,需要铁道部门自己进行管理和维护,因此,铁道运输及装备需要专门的铁道电网和设施进行供电。

对于电气化铁道和高速铁道,采用 25 kV 接触网为电力机车或动车组提供工作电源。对于铁道沿线的车站、信号设备和照明设施,以及铁道沿线的生产生活等有关负荷,采用专用 10 kV 贯通线进行供电;对于车站之间的自动闭塞信号装置,采用专用 10 kV 自闭线进行供电。铁道电网及设施包括:①专门为电力机车或动车组供电的牵引变电所、开闭所、分区所、AT 所、接触网,及其相关的电气设备,通常称为牵引供电。②专门为铁道行车的信号、照明、检修生产等提供电源的配电所、电力线路及其电气设备,通常称为电力供电。

根据有关技术标准和规程的规定,电气设备的额定电压为 1000 V 及以上时属于高电压范畴,因此,铁道电网及设备是高压电网和高压设备。铁道专用变配电所、供电线路及其电气设备是重要的铁道行车设备,所带负荷属于一级负荷,一旦中断供电就可能造成铁道运输秩序混乱、行车设备损坏、人身伤亡,甚至造成重大的经济损失和社会影响。因此,要求铁道电网供电必须安全可靠。

## 0.2 过电压与绝缘水平

过电压,一般指电网中某处导线对地或者不同相位的导线之间,出现的超过系统最高工作电压峰值的任何波形的短时升高电压,其中导线对地过电压,称为相对地过电压;不同相位导线之间的过电压,称为相间过电压。此外,对于停电检修设备,由于空间电磁场的感应作用,可能在其上产生感应电压。感应电压虽然数值一般不超过其运行电压,但是,相对检修时希望停电检修设备的“工作状态”为零电位而言,感应电压可能大到足够造成检修人员触电伤亡。对于供电设备外壳和附近有关设施,为了防止漏电和电磁感应等,将它们进行接地,希望它们在正常工作时保持理想的大地零电位,但是,当供电系统发生接地故障时,接地电流引起地电位升高,在设备外壳和接地设施上产生数值较大的电压,导致本来认为是零电位的接地部位向设备放电(称为反击)。因此,从广义上讲,任何电气设备或设施上出现的超过其工作状态(包括检修停电工作状态)要求的短时电压升高,都属于过电压范畴。

绝缘水平,指电气设备能够承受电压的能力,它是通过对考核的电气设备施加国际电工委员会(International Electro-technical Commission, IEC)有关标准,或者国家标准(简称国标)中所规定的一定波形和幅值的试验电压值来确定。如果电气设备能够承受规定的试验电压且不发生闪络或击穿,就表明该设备具有规定的绝缘水平,否则,不具有规定的绝缘水平。为了考核电气设备在实际运行中可能受到的不同种类的过电压作用,绝缘水平分为:① 基准雷电冲击绝缘水平(Basic Lightning Impulse Insulation Level, BIL),也称雷电全波冲击绝缘水平,它模拟雷电过电压对电气设备绝缘进行考核(模拟雷电过电压作用时避雷器动作后对变压器绕组的匝间绝缘考核,采用截波冲击试验电压,称为截波冲击绝缘水平——作者注);② 基准操作冲击绝缘水平(Basic Switching Insulation Level, BSL 或 Switching Impulse Insulation Level, SIL),它模拟系统内部出现的操作过电压来考核电气设备的绝缘耐受能力;③ 基准工频绝缘水平(Basic Power Frequency Level, BPL),它模拟系统中出现的短时工频过电压及长期工作电压对电气设备的绝缘能力进行考核。有关研究表明,系统的标称电压在 300 kV 以上时,操作过电压大于雷电过电压,300 kV 以下时,雷电过电压大于操作过电压,因此,额定电压为 300 kV 以上的电气设备绝缘水平用 BSL 和 BPL 表示,额定电压为 300 kV 以下的绝缘水平用 BIL 和 BPL 表示。

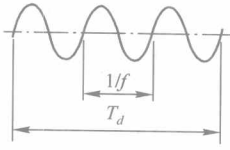
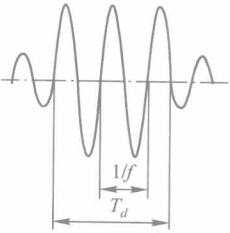
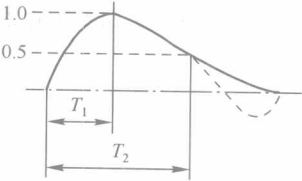
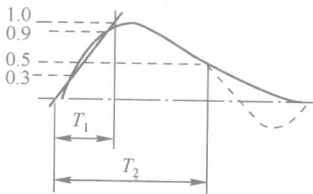
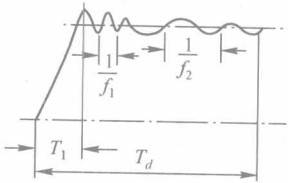
虽然过电压持续时间很短,但幅值很高,可能超过电气设备的绝缘水平,引起设备绝缘闪络或击穿,造成供电中断。电气设备及电网能否安全运行,取决于作用在电气设备上的电压高低和设备的绝缘水平。当作用在电气设备上的电压低于绝缘水平,设备就能安全运行;反之,高于绝缘水平,设备的绝缘就会被击穿损坏。铁道电网运行的安全可靠性的主要因素由以下三方面的因素决定:①机械稳定性,例如,接触网断线、倒杆。②电气设备的绝缘强度,例如,绝缘老化击穿。③系统中出现的过电压,例如,雷击或操作过电压引起电气设备放电。除了机械稳定性问题之外,只有各种电气设备的绝缘水平保持正常,系统中不出现过电压或者过电压被限制在允许水平,铁道电网才能够安全运行。电气设备和有关器件的绝缘水平可以通过检修来维护,必要时采用整体更换来保证绝缘水平。电网中出现的过电压幅值大小、持续时间长短、分布规律等,是影响铁道电网安全可靠运行的重要因素之一。工作电压是决定电气设备绝缘使用寿命的主要条件,过电压往往是电气设备发生绝缘事故的诱发因素,必须研究和限制铁道电网中的过电压。

### 0.3 过电压类型

按照作用到电气设备上电压的幅值、波形和持续时间,可以分为:① 持续工频电压,其值不超过设备最高电压,持续时间等于设备设计的运行寿命。② 频率较低的暂时过电压,也称短时过电压,主要是系统单相接地引起的工频过电压、空载长线导致的工频电压升高和谐振过电压。暂时过电压的特征是频率与工频(或某次谐波)相等或接近,持续时间达数秒,甚至数分钟,稳定不衰减或衰减缓慢。③ 瞬态的缓波前过电压,主要是操作过电压,持续时间几毫秒至几十毫秒。④ 瞬态的快波前过电压,主要是雷电过电压,一般持续时间几十微秒。⑤ 瞬态的陡波前过电压,主要是 GIS (Gas-Insulated metal-enclosed Switchgear) 组合电气设备中的过电压,其波头时间为几个纳秒,持续时间几毫秒,过电压波形可能振荡,也可能不振荡,特征是持续时间极短,衰减很快。各种电压的典型波形如表 0-1 所示。



表 0-1 各种电压的典型波形

| 电 压 名 称                                     | 电 压 波 形                                                                             | 波 形 范 围                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 持续工频电压<br>(power-frequency voltage)         |    | $f = 50 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$<br>$T_d \geq 1 \text{ h}$                                                                                          |
| 暂时过电压<br>(temporary overvoltage)            |    | $10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$<br>$0.03 \text{ s} < T_d < 3600 \text{ s}$                                                                           |
| 缓波前(操作)过电压<br>(switching overvoltage)       |    | $20 \mu\text{s} < T_1 < 5000 \mu\text{s}$<br>$T_2 < 20 \text{ ms}$                                                                                        |
| 快波前(雷电)过电压<br>(lightning overvoltage)       |  | $0.1 \mu\text{s} < T_1 < 20 \mu\text{s}$<br>$T_2 < 300 \mu\text{s}$                                                                                       |
| 陡波前过电压<br>(very fast transient overvoltage) |  | $3 \text{ ns} < T_1 < 100 \text{ ns}$<br>$0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$<br>$30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$<br>$T_d \leq 3 \text{ ms}$ |

## 0.4 铁道电网中的过电压

根据电网中产生过电压的能量来源,可以将过电压分为大气过电压和内过电压。大气层中雷云放电对变配电所、电网及其相关设施产生的直击或因雷电感应而产生的过电压,称为大气过电压,也称雷电过电压。由于电网运行方式或参数突然变化而导致过渡过程,电网中能量重新分配而形成的过电压,称为内过电压。铁道电网中常见的过电压主要类型如图 0-1

所示。

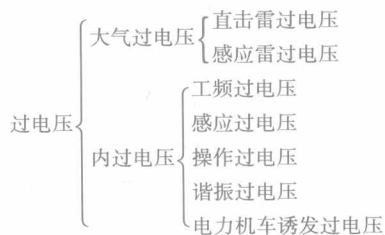


图 0-1 铁道电网常见过电压主要类型

#### 0.4.1 雷电过电压

如果雷电直击铁道电网的电气设备、线路或电气建筑物,雷电流在这些设备或设施上产生数值极大的过电压;雷电击于铁道电网及设施附近,由于空中强电磁场作用,铁道电网及设备受到感应而产生过电压。铁道电网位于旷野中,电气设备绝缘水平较低,直击和感应雷过电压都可能引起电气设备击穿和电气设施损坏。

#### 0.4.2 工频过电压

指系统中出现的频率等于或接近工频且超过系统最高工作电压的短时电压。铁道电网中主要是稳态工频过电压,包括空载(轻载)长线效应和单相接地引起的工频过电压,它们持续时间长,对电气设备绝缘危害很大。

#### 0.4.3 感应过电压

通过空间静电或电磁感应,导致相邻的停电或低压线路和设备上产生感应电压。对于临时停电的线路和设备,感应电压是一种广义的过电压。复线中检修接触网上会产生较高的感应电压,可能造成检修人员伤亡事故,必须予以重视。

#### 0.4.4 操作过电压

系统运行方式变化,如变压器投切等,使系统能量重新分配,暂态过程产生操作过电压。一般的操作过电压持续时间为毫秒数量级,围绕趋于稳定的工频电压上下振荡,幅值与电网结构、设备参数和初值等因素有关,具有随机性和统计规律。操作过电压发生概率大,幅值高,是影响铁道供电安全的主要原因之一。

#### 0.4.5 谐振过电压

指电网或部分电网的等值感抗与容抗相等或接近而发生谐振时产生的过电压。谐振过电压分线性或非线性谐振、高次或分频谐振,幅值变化范围很大,持续时间较长,直到系统发生新的操作,谐振条件被破坏时结束。诱发谐振的主要因素是供电线路断相、电磁式电压互感器饱