

# 轨道交通供电系统的 防雷与接地

■ 吴广宁 曹晓斌 李瑞芳 著



科学出版社

# 轨道交通供电系统的 防雷与接地

吴广宁 曹晓斌 李瑞芳 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书对轨道交通供电系统防雷与接地技术的基本原理、分析方法及工程计算进行了全面系统的阐述,内容涵盖了电气化铁路、输电线路及地铁站的防雷与接地技术。全书分为两篇 12 章,介绍了雷电机理和架空线路雷击特性,阐述了接地网的测量方法、地网接地电阻的计算、导体优化布置方法;研究了架空线路的雷击计算方法,并在此基础上研究了青藏铁路高原冻土环境下的防雷与接地;分析了钢轨电位的形成机理和影响因素,介绍了牵引网的接地与回流及地铁站接地系统。本书重点阐明防雷与接地技术的分析计算,内容包括防雷与接地领域最新的研究成果。

本书理论方法先进,工程分析计算翔实,适合从事电力系统和铁路系统防雷与接地研究的科研人员,以及防雷与接地设计及其相关行业的工程技术人员阅读,也可作为高等学校电气工程等专业教师及研究生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

轨道交通供电系统的防雷与接地/吴广宁,曹晓斌,李瑞芳著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031489-5

I. 轨… II. ①吴… ②曹… ③李… III. ①电气化铁道-供电系统-防雷 ②电气化铁道-供电系统-接地保护装置 IV. U223.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 110743 号

责任编辑: 裴 育/责任校对: 刘小梅

责任印制: 赵 博/封面设计: 耕者设计工作室

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>

西燕印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 24 插页: 2

印数: 1—2 500 字数: 461 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 序 一

我国地幅辽阔，人员与物资分布地域性差异非常大，铁路运输具有输送量大、成本低以及不受气候影响等特点，已成为主要的交通运输方式。为满足快速增长的客运需求，我国规划建设“四纵四横”客运专线，并大量建设城际客运系统以连通经济发达、人口稠密地区。到2020年，我国铁路营运里程将达到12万公里以上，客运专线将达到5万公里以上，连接所有省会城市和50万人口以上城市，覆盖90%以上人口。牵引供电系统是电气化铁路的能源传输系统，是列车运行的动力基础，其安全可靠性是轨道交通系统运行的重要保证。

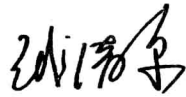
牵引供电系统绝缘水平低，容易发生雷击跳闸，但由于牵引供电系统结构显著不同于电力系统，特别是接触网无后备，雷击引起接触网设备损坏将直接导致列车失电而中断运输，因此不能照搬电力系统已有的研究成果。同样，牵引供电系统接地方式也具有鲜明的特点，钢轨与大地是牵引供电系统的重要回流途径，钢轨回流电流过大可能造成钢轨电位升高，威胁沿线设备和检修人员安全。随着高速/重载铁路的快速发展，有针对性地进行轨道交通系统防雷与接地技术的研究已迫在眉睫。

西南交通大学高电压工程与绝缘技术实验室在轨道交通防雷与接地技术领域的科研能力居于国内先进水平，拥有一支实力雄厚的科研团队，依托学校在轨道交通领域的技术优势，参与了多个世界瞩目的电气化铁路重大科研及工程项目，包括：有神奇天路之称的我国第一条高原铁路——青藏铁路；最高试验时速达到486.1公里，比直升机更快的京沪高速铁路；年运量超过4亿吨的我国最大重载铁路——大秦铁路；我国首条无砟轨道试验线——遂渝高速铁路；世界首条时速在300公里以上的运营线路——京津城际高速铁路和世界首条时速350公里运营线——武广高速铁路等。该团队研究了青藏铁路高原冻土环境下的防雷与接地技术；完成了遂渝高速铁路无砟轨道试验线的综合接地的测试；解决了京津城际等高速试验线和大秦、朔黄等重载铁路在防雷与接地方面的重大问题，取得了显著的研究成果。

《轨道交通供电系统的防雷与接地》一书以该团队的最新研究成果为基础，系统阐述了轨道交通供电系统防雷与接地技术体系，首次提出了用衰减系数表征钢轨电流、电压的分布表征，并给出了衰减系数的在线测量方法；建立了接触网耐雷性能评估模型，首次实现了对接触网各种防雷措施效果的量化评估。该书还融合了国内外学者在轨道交通供电系统防雷与接地技术方面的成果，包括了防雷

接地标准相关内容和大量工程案例，对我国高速/重载电气化铁路轨道交通供电系统的防雷与接地工程的建设具有重要的参考价值。

最后，相信该书的出版必将推动我国轨道交通供电系统防雷与接地技术的进一步发展，并对我国轨道交通事业的建设起到很好的推动作用。



中国工程院院士

2011年4月于成都

## 序 二

电力系统是国民经济发展的重要支柱，为满足能源日益增加的需求，输电系统向超、特高压方向快速发展，国家电网的发展方向是建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强智能电网。雷击是威胁输电系统安全的重要因素，调查表明一半以上的输电线路跳闸事故是由于雷击造成，而接地系统达不到要求将导致事故范围扩大。近年来，随着电力系统容量的迅速扩大，超、特高压输电线路的不断增加，以及先进监控电子设备的大量采用，为了保证供电系统的安全运行，电力设计、运行部门需要更加关注防雷与接地技术。

在我国西部地区，变电站与换流站建设在群山环抱之中，输电线路纵横于崇山峻岭之间，复杂的地质结构与极高的土壤电阻率为变电站的设计工程师设下了一道又一道难关，而复杂地形下输电线路的准确计算以及耐雷水平的评估是一个世界级难题。西南交通大学高电压工程与绝缘技术实验室的科研团队不畏困难，开展了我国第一个 $\pm 800\text{kV}$ 特高压换流站的接地系统研究；结合青藏高原铁路工程建设，研究了多年冻土区域输电线路的防雷与接地技术；以我国雷电活动最严重的广东省为代表，研究了超重雷区输电线路防雷技术；攻克了复杂地质条件下土壤参数的测量及特大型地网接地参数的计算等难题。首次提出了三维电气几何模型，解决了传统电气几何模型无法反映导线弧垂以及地面地形对雷电参数的影响这一不足之处；建立了单档距雷电统计方法，实现了雷电活动与线路杆塔以及档距的对应关系；提出了山区不同地形条件下雷击跳闸率的计算公式，提高了计算精度；发现了双层土壤与均匀土壤中地网参数的函数关系，提出了垂直双层与水平双层土壤中地网接地参数的计算方法；建立了双地网等效模型，解决了采用深井或双地网接地时的计算问题。这些成果为防雷与接地技术的进一步研究奠定了理论基础，部分成果已作为行业标准被设计院采用。

经过12年的艰辛探索，该团队取得了丰硕的成果，获得四川省科技进步奖一等奖、中国铁道学会科学技术奖一等奖等省部级科技成果奖共4项；近5年来公开发表防雷与接地相关论文80余篇，申请发明专利10余项，上述研究成果均纳入《轨道交通供电系统的防雷与接地》一书。该书理论与实际相结合，既有缜密的理论分析和仿真研究，又有实验验证，尤其是包含大量的工程实例分析，使得全书既保持了相当高的理论水平，又具有很强的工

程实用性。

宝剑锋从磨砺出，梅花香自苦寒来。最后希望该书作者及课题组再接再厉、矢志不渝，祝愿今后有更多的学术成果问世。



中国工程院院士  
2011年4月于重庆

# 前 言

能源与交通是国家经济发展的命脉，我国东西部经济发展不平衡，能源和物资供需地域差异很大，电气化铁路具有运输量大、无污染、成本低、不受气候影响等特点，已成为主要的交通运输方式。牵引供电系统是轨道交通的能源传输系统，其电压等级低，容易遭受雷击；特别是接触网无后备，如果雷击引起接触网设备损坏，将直接导致列车失电而中断运输。轨道交通的高速/重载化提高了牵引负荷，增大了车辆的运行密度，对轨道交通系统的防雷与接地技术提出了更高的要求。

轨道交通供电系统由进线电源、牵引变电所、接触网以及钢轨与回流线组成。其防雷与接地技术不仅包括输电线路与变电所等传统部分的内容，还存在以下两大特点：①接触网可靠性要求高、结构远比输电线路复杂，包括区间、站场以及锚段关节等特有的结构，其雷电过电压传输与衰减过程有别于输电线路，其耐雷性能的分析、评估不能沿用相同电压等级的配网标准；②大地是牵引电流回流的主要通路，高速铁路接触网的综合地线沿着线路两侧敷设，宽度仅十几米，但其将沿线数百甚至上千公里的所有车站、区间连接到一起，作为一种新的接地方式，其性能和测量方式与传统接地系统存在很大的差异。因此，阐述传统防雷与接地技术的书籍已不能满足实际需要，对上述领域的最新研究成果进行系统阐述已迫在眉睫。作者希望通过本书的出版能弥补该方面的不足，同时促进与同行专家的交流，对该领域的专业人士有借鉴作用。

本书内容侧重于理论与实际相结合，包括新的研究方法、实验手段、计算模型、测量技术及工程措施等内容。全书分为两篇 12 章，第一篇介绍了作者在防雷与接地原理方面的研究成果，包括雷电放电机理及路径的选择性实验模型，架空线路单档距雷电参数统计分析方法，三维电气几何模型等；研究并给出了接地网参数的测量方法，不同土壤与地网结构接地参数的实用计算方法，以及接地网的优化设计方法。第二篇介绍了输电系统防雷与接地的研究成果，实现了复杂地形地貌区间输电线路雷击跳闸率计算和易击段的区分；系统阐述了接触网过电压机理与防护措施；同时介绍了钢轨电位产生机理，提出用衰减系数表征钢轨电流、电压的分布以及实时在线测量方法；此外，本篇还包括青藏铁路以及地铁枢纽站防雷与接地技术的研究成果。作者希望本书可以帮助读者掌握轨道交通以及电力系统防雷与接地的专业知识，为读者开展防雷与接地技术的进一步研究提供参考。本书内容的研究与撰写过程中参考了国内外相关论文及书籍，并已列入每



章的参考文献中，对此作者表示诚挚的谢意。

本书是课题组多年研究工作的成果，吴广宁教授统一规划与主持撰写，曹晓斌、周利军、李瑞芳、高国强、刘君、高波参与了本书的撰写。另外，付龙海、张雪原、朱军、张丽丽、张军、盛进路、李增、任晓娜、李生林、周炜明、樊春雷、王云飞、邓明丽、马御棠、苏杰、赵紫辉、张敏、党冬、高峰、熊万亮等也参与了相关项目研究与总结工作。

我国著名的电气化轨道交通专家钱清泉院士、过电压与防雷接地技术专家孙才新院士对本书的撰写提供了指导和帮助，并欣然为本书作序；铁道部运输局王保国、王祖峰、周伟，铁道部科技司李强，铁道第一勘察设计院李晋、王灏、王建文，铁道第二勘察设计院唐元方、陈纪刚，铁道第四勘察设计院戚广枫、温建民、曾钦源、宁建斌，广州铁路集团公司余志坚、卓建洪，大秦铁路有限公司孙禹文，太原铁路局大西供电段吕玉恒，中国电力顾问集团有限公司胡劲松，西南电力设计院陶俊培、黄晓明、余波，广东省电力公司顾温国、陈青恒等为本书相关研究项目的开展提供了指导与帮助，在此表示由衷的谢意。另外，很多业界同仁为本书提供了资料及意见，在此一并致以诚挚的感谢。

限于作者的水平和条件，书中不妥之处在所难免，恳请批评指正。

作 者

2011年2月于西南交通大学

# 目 录

序一  
序二  
前言

## 第一篇 防雷与接地的原理

<b>第 1 章 电气化轨道交通发展概况</b> .....	3
1.1 电气化铁路的发展概况 .....	3
1.1.1 电气化铁路的发展历史 .....	3
1.1.2 高速铁路的发展概况 .....	4
1.1.3 我国高速铁路的发展规划 .....	9
1.2 城市轨道交通的发展概况 .....	11
1.2.1 城市轨道交通行业特点 .....	11
1.2.2 世界城市轨道交通的发展概况 .....	12
1.2.3 我国城市轨道交通的发展概况 .....	15
1.3 防雷与接地技术的重要意义 .....	19
参考文献 .....	21
<b>第 2 章 雷电机理及其参数统计法</b> .....	22
2.1 雷电机理及其参数 .....	22
2.1.1 雷电机理 .....	22
2.1.2 雷电参数 .....	24
2.1.3 雷电流波形参数估计 .....	27
2.2 雷电参数的监测统计 .....	35
2.2.1 雷电参数的监测方法 .....	35
2.2.2 区域雷电参数统计 .....	37
2.2.3 架空线路走廊的雷电参数统计 .....	42
2.3 火花放电通道选择性实验 .....	45
2.3.1 实验装置介绍 .....	46
2.3.2 火花放电选择性分析 .....	47
参考文献 .....	50

<b>第3章 架空线路雷击特性</b> .....	52
3.1 反击计算方法分析 .....	52
3.1.1 反击的规程分析法 .....	53
3.1.2 反击的 PSCAD 仿真分析法 .....	57
3.1.3 反击耐雷水平的影响因素 .....	59
3.2 绕击计算方法分析 .....	61
3.2.1 电气几何模型的三维拓展 .....	62
3.2.2 输电线路绕击率的三维分析 .....	63
3.3 避雷器在输电线路防雷中的应用 .....	65
3.3.1 避雷器安装方式 .....	66
3.3.2 避雷器的保护范围 .....	68
3.3.3 避雷器放电电流和能量 .....	69
参考文献 .....	70
<b>第4章 接地网的测量方法</b> .....	72
4.1 地电参数 .....	72
4.1.1 土壤电阻率及影响因素 .....	72
4.1.2 特殊土壤 .....	77
4.1.3 异质土壤的影响 .....	82
4.2 土壤电阻率的测量 .....	86
4.2.1 均匀土壤电阻率的测量 .....	88
4.2.2 不均匀土壤电阻率的测量 .....	91
4.2.3 CSAMT 技术的应用 .....	97
4.2.4 土壤参数的数值分析 .....	100
4.3 地网接地电阻的测量 .....	103
4.3.1 接地电阻的测量原理及方法 .....	103
4.3.2 影响接地参数测试的因素 .....	114
4.3.3 变频数字式接地电阻测量装置 .....	117
参考文献 .....	122
<b>第5章 接地降阻的方法及其原理</b> .....	123
5.1 外引地网的降阻效果分析 .....	124
5.1.1 双地网接地电阻计算 .....	124
5.1.2 双地网降阻效果分析 .....	126
5.1.3 双地网降阻效果在工程中的应用 .....	129
5.2 深井接地的降阻效果分析 .....	133
5.2.1 深井接地电阻的计算方法 .....	133

5.2.2	深井与地网之间的配合 .....	141
5.2.3	深井接地效果的影响因素 .....	143
5.3	接地模块及其降阻效果 .....	147
5.3.1	接地模块的组成及降阻原理 .....	147
5.3.2	接地模块降阻的影响因素 .....	152
	参考文献 .....	154
<b>第 6 章</b>	<b>地网接地电阻计算及其优化布置 .....</b>	<b>155</b>
6.1	水平双层土壤地网接地电阻的计算 .....	155
6.1.1	地网模型 .....	155
6.1.2	与均匀土壤中地网接地电阻的关系 .....	156
6.1.3	地网接地电阻计算公式 .....	157
6.2	垂直双层土壤地网接地电阻的计算 .....	161
6.2.1	地网模型 .....	161
6.2.2	与均匀土壤中地网接地电阻的关系 .....	162
6.2.3	地网接地电阻计算公式 .....	163
6.3	接地导体的优化布置 .....	166
6.3.1	接地网网孔数的确定 .....	167
6.3.2	地网均压带位置优化 .....	168
6.3.3	长方形地网的优化设计 .....	171
	参考文献 .....	172

## 第二篇 输电系统的防雷与接地

<b>第 7 章</b>	<b>输电线路雷击跳闸率计算 .....</b>	<b>177</b>
7.1	雷电流幅值分布概率 .....	177
7.1.1	行业标准给出的雷电流幅值概率 .....	177
7.1.2	国外的雷电流幅值概率公式 .....	179
7.1.3	实测的雷电流幅值概率 .....	182
7.2	雷电易击区段地形特点及跳闸率计算 .....	184
7.2.1	雷击区地形特点 .....	184
7.2.2	常规绕击跳闸率的计算 .....	185
7.2.3	地形与绕击跳闸率 .....	186
	参考文献 .....	188
<b>第 8 章</b>	<b>接触网线路的防雷 .....</b>	<b>190</b>
8.1	接触网直击雷过电压 .....	190
8.1.1	接触网直击雷过电压产生机理 .....	190

8.1.2	接触网直击雷仿真模型 .....	193
8.1.3	接触网直击耐雷水平 .....	197
8.2	接触网感应雷过电压 .....	202
8.2.1	接触网感应雷过电压 .....	202
8.2.2	悬式绝缘子的耐雷水平 .....	205
8.2.3	棒式绝缘子的耐雷水平 .....	208
8.3	接触网雷击跳闸率 .....	212
8.3.1	接触网雷击范围 .....	212
8.3.2	雷击跳闸率的计算方法 .....	213
8.3.3	不同供电方式接触网的雷击跳闸率 .....	215
8.4	接触网雷电防护措施 .....	216
8.4.1	接触网雷电防护方法 .....	216
8.4.2	避雷器的设置方法与效果 .....	218
8.4.3	避雷线的架设方法与效果 .....	221
	参考文献 .....	225
<b>第9章</b>	<b>钢轨电位与地电位</b> .....	<b>227</b>
9.1	钢轨电位形成机理及危害 .....	227
9.1.1	钢轨电压电流数学模型与表征参数 .....	227
9.1.2	钢轨电流及电位分布 .....	231
9.1.3	理论分析与试验 .....	249
9.1.4	钢轨电位对人员和设备的影响 .....	255
9.2	钢轨电位影响因素 .....	257
9.2.1	钢轨电位的等效电路 .....	257
9.2.2	衰减常数对钢轨电位的影响 .....	267
9.2.3	多辆机车运行对钢轨电位的影响 .....	269
9.2.4	钢轨电位限制措施 .....	272
	参考文献 .....	276
<b>第10章</b>	<b>牵引网的接地与回流</b> .....	<b>277</b>
10.1	牵引接地回流系统 .....	277
10.1.1	牵引接地回流系统的构成 .....	277
10.1.2	牵引接地回流系统的模型 .....	278
10.1.3	牵引回流系统的仿真与现场试验 .....	299
10.2	综合接地系统 .....	301
10.2.1	综合接地系统仿真模型 .....	301
10.2.2	综合接地系统的效果分析 .....	302

---

10.2.3 综合接地系统的参数计算	308
参考文献	312
<b>第 11 章 青藏铁路高原冻土环境下的防雷与接地</b>	<b>313</b>
11.1 青藏铁路概述	313
11.2 铁路沿线雷暴活动与防雷	319
11.2.1 青藏铁路格拉段沿线雷暴活动特点	319
11.2.2 青藏铁路的防雷保护	323
11.3 青藏高原冻土区域接地网的降阻	324
11.3.1 青藏铁路的等效单层土壤结构	324
11.3.2 青藏铁路变电站立体接地网	327
11.4 基于人工智能的接地系统优化	335
11.4.1 人工智能算法	335
11.4.2 接地系统的智能优化	338
11.4.3 青藏铁路接地设计中的模糊规则	345
参考文献	353
<b>第 12 章 地铁站接地系统</b>	<b>355</b>
12.1 地铁地网组成	355
12.1.1 多层空间的土壤结构参数	355
12.1.2 多层接地网模型	358
12.2 多层地网性能分析	361
12.2.1 多个地网单独作用	361
12.2.2 多个地网共同作用	361
12.2.3 不同运行方式的效果	362
参考文献	366

# 第一篇 防雷与接地的原理





# 第 1 章 电气化轨道交通发展概况

## 1.1 电气化铁路的发展概况

### 1.1.1 电气化铁路的发展历史

电气化轨道交通是利用电能作为牵引原动力的轨道运输的总称。世界上第一条真正意义的电气化轨道诞生于 1879 年。当年 5 月 31 日，西门子公司和哈尔斯克公司在德国柏林举办的世贸会上联合推出了一条轨距 1m、全长 300m 的椭圆形“电气化轨道”，电力机车采用 2.2kW 串励式二级直流电机驱动，总质量 945kg；由 150V 外部直流电源经铺设在两条轨道中间的第三轨供电，走行轨作为电流回路；“列车”由 3 节敞开式“客车车厢”组成，每节“车厢”可乘坐 6 人；最高运行时速 13km。这条现在看起来非常小的“电气化轨道”，在 4 个月的展览期间取得了平均每天运送乘客 700 多人，共运送乘客 8 万多人的骄人业绩，成为现代电气化轨道交通的先驱。经过 130 多年的发展，最原始的电气化轨道交通现已发展成地铁、轻轨、电气化铁路、磁悬浮等多种方式。

由于两次世界大战的影响，电气化铁路在 20 世纪前半叶没有大的发展。20 世纪 50 年代后，随着工业发达国家急剧增长的运输任务的需要，各国开始了大规模的铁路建设，电气化铁路的建设速度不断加快。在 60 年代至 70 年代，平均每年修建 5000km 以上。到 70 年代末，工业发达的西欧各国、日本、苏联，以及东欧各国的主要干线铁路都实现了电气化。80 年代以后，一些发展中国家也加快了电气化铁路的建设步伐，其中以南非和我国的电气化铁路发展最快。南非在 1997 年、1998 年建设了 7898km 电气化铁路，平均每年建成约 4000km，创造了世界电气化铁路建设速度的历史记录。

目前，世界上共有 68 个国家和地区修建了电气化铁路，其中，欧洲有 38 个国家，亚洲有 12 个国家和地区，非洲有 7 个国家（主要集中在南非），美洲有 9 个国家，大洋洲有 2 个国家。拥有 10000km 以上电气化铁路的国家有：俄罗斯、德国、南非、日本、中国、法国、印度、波兰、意大利。我国第一条干线电气化铁路是宝成铁路。1961 年 8 月 15 日，宝鸡至凤州段建成通车。该段全长 93km，以三个马蹄形和一个螺旋形盘旋于秦岭的崇山峻岭之中，最小曲线半径 300m，最长隧道达 2360m，30‰的大坡道长达 20km，行车条件十分困难。