

电力系统 接地技术

何金良 曾 嵘 / 著



科学出版社

www.sciencep.com

电力系统接地技术

何金良 曾 嵘 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

发变电站的接地系统是维护电力系统安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全的根本保障和重要措施。目前接地技术已发展成为一门与电气工程、电气安全、电磁场理论、数值计算方法、地质勘探及测量技术相关的交叉学科。本书系统介绍了接地技术相关的理论基础及技术知识,内容包括接地技术基础知识、安全接地设计基础、发变电站接地、接地故障电流分析、接地系统数值计算、GIS的接地、输电线路接地、直流接地、土壤电阻率测量及分析、接地电阻测量、接地降阻材料、接地系统的模拟试验、接地系统的腐蚀及防护、监控系统的接地等,共分15章。本书着重阐明接地有关的基本概念、基本原理和设计、计算、分析方法及工程应用,反映了国内外在接地技术领域的最新研究成果及相关的接地标准的内容。

本书可作为高等学校电气工程专业研究生和本科生相关课程的教材和教学参考书,以及电力行业和其他相关行业的工程技术和设计人员的专业培训教材和工作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统接地技术/何金良,曾嵘著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-017761-2

I. 电… II. ①何…②曾… III. 电力系统:接地系统 IV. TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088618号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:张小霞

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄华斌

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>

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年2月第一次印刷 印张:39 1/2

印数:1—3 000 字数:745 000

定 价 : 82.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

电气工程建造伊始,电气装置的接地系统就与电气装置的一、二次回路和电气设备不可分割地相互依存。随着大容量、远距离的高压、超高压和特高压电网的相继出现,系统接地短路电流愈来愈大,发变电站接地网上的电位升变得越来越高。无疑,这对保障人身和一次设备以及抗干扰能力较低的电子监控装置安全的发变电站的接地系统提出了更高和更新的要求。

回顾新中国建国初期,自主研究的电气工程接地技术几乎是一片空白。在接地工程设计方面,由于对多层、复杂地质结构土壤认知的不足,以及计算手段的匮乏,常常出现接地工程施工之后,实测的接地装置的接地电阻与设计值大相径庭。加之对于接地电阻这一技术参数认识的片面,往往花费大量财力物力来追求其数值的降低,同样由于对土壤复杂性了解不够,结果降阻效果不佳,致使工程存在隐患。同时由于缺少土壤对接地装置腐蚀的了解,使得接地装置的寿命与地面电气装置的寿命明显失调。这既造成了资源的浪费也酿成了电力系统事故的滋生,给国民经济造成了损失。

随着科学技术的进步和国内外学者的研究,电气工程接地技术今天已有了长足的进展。电气工程接地的标准,也由从前全面照搬国外的状态,逐步充实了符合国情、符合实际的科学技术内容。目前电气工程接地技术已成为涉及电气工程、电气安全、电化学、地质勘探、电磁场与数值计算等学科相关的交叉学科,取得了很大的进步。

该书作者何金良先生,1994年获清华大学授予的工学博士学位,现为清华大学电机系教授、博士生导师。该书另一位作者曾嵘先生,1999年获清华大学授予的工学博士学位,现为清华大学电机系副教授,博士生导师。二位作者多年来从事高电压和接地技术的教学、科研和指导接地工程等工作。何金良教授、曾嵘副教授及其学术团队较全面系统地开展了电气工程接地技术的研究,将传统的接地技术研究加以科学化和量化。其工作涉及接地系统电气参数数值分析及优化设计、土壤结构参数分析、高土壤电阻率地区的降阻技术、接地电阻科学测量、接地网的腐蚀诊断及接地装置冲击特性等多方面课题。发表与接地相关的研究论文100余篇,其中在IEEE等国际著名刊物上发表相关的研究论文26篇。在电气工程接地技术方面有所创新并有相当的建树。他们主要的成果有:

与他人合作提出爆破接地技术降低变电站接地电阻的新方法,在多个变电站成功应用,国际著名接地专家Dawalibi认为该技术是目前国际上最有效的降阻技术之一。该技术已写入美国俄亥俄大学出版的教材。

解决了多层土壤结构参数反演及多层土壤中接地系统电气参数计算的难题。提出的接地系统科学设计概念应用于近百项变电站接地工程的设计,包括青藏铁路110kV供电工程变电站的接地设计、750kV和1000kV变电站的接地系统设计。数值计算与

已建工程实测结果误差在 10% 以内。

通过对季节因素影响变电站接地系统安全性的研究,澄清了有关季节系数的概念。系统研究了永冻土地区变电站接地系统的设计技术。

通过研究提出了接地系统腐蚀诊断的原理及方法。该成果已获得国家发明专利。

对多种接地装置在雷电冲击电流作用下冲击特性的研究结果,已纳入电力行业标准——DL/T621—1997《交流电气装置的接地》。

此外,还采用基于数值分析及变频测量技术的短电流极测量变电站接地电阻的新方法,既做到精确测量,同时又降低了测量人员的劳动强度。

上述作者们创新的科研成果已纳入《电力系统接地技术》一书。同时本书也汇集了国内外学者在电气工程接地技术方面的成果、国内外接地标准相应的内容和大量实用技术以及许多接地工程的案例。笔者阅后,深感资讯颇丰,获益匪浅。

作者们撰写的这本专著,为我国电气工程的设计和运行工程师、科研人员和高等学校电气工程专业的学人等提供了一本具有翔实的基础理论、自主创新的科研成果和众多实用工程技术内容的接地技术专著。相信本书的出版发行必将推动电力系统接地学术的进一步发展,也是对我国电气工程科技进步的一个贡献。

科学探索之路漫漫,其修远兮。最后希望两位年轻的学者再接再厉。祝愿今后有更多的学术成果问世。

中国电力科学研究院 杜澍春

2006年12月15日于北京

前 言

发变电站的接地系统是维护电力系统安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全的根本保障和重要措施。调查表明,我国曾发生多起由于接地系统的接地电阻未达到要求所导致的事故或事故的扩大。这种事故不仅经济损失巨大:根据统计,每发生一次事故的直接经济损失都在几百到数千万元,而且对于社会造成更严重的间接经济损失。

近年来,由于电力系统容量的迅速扩大、入地短路电流的大幅升高、先进监控设备抗干扰能力的减弱,为了保证电力系统的安全可靠运行,电力运行和设计部门更加注重接地技术。

随着计算机技术的发展,自 20 世纪 80 年代以来,包括矩量法、边界元法、复镜像法、基数镜像法、纯数值计算方法在内的各种数值技术应用到接地系统电气参数分析中,促进了接地系统电气参数分析软件的发展。目前,接地技术已发展成为一门与电气工程、电气安全、电磁场理论、数值计算方法、地质勘探及测量技术等学科相关的交叉学科。

接地技术的发展有三个趋势:一是从过去的只注重接地电阻,转向更重视与人身安全相关的接触电压和跨步电压;二是接地系统的设计从过去的基于均匀土壤模型和经验公式的简单设计,转向基于分层土壤模型的数值化设计;三是接地系统的降阻从过去的采用扩大地网面积,转向采用基于了解土壤分层结构的、有的放矢的深垂直接地极。

全书共 15 章,涉及接地技术的各个方面。主要内容包括接地技术基础知识、安全接地设计基础、发变电站接地、发变电站接地故障电流、接地系统数值计算、GIS 的接地、输电线路接地、直流接地、土壤电阻率测量及分析、接地电阻测量、接地降阻材料、接地系统的模拟试验、接地系统的腐蚀及防护、监控系统的接地等。

本书是清华大学电机工程与应用电子技术系多年来接地技术研究工作的总结。已毕业的博士生曾嵘、孙为民、高延庆、郭剑,已毕业的硕士生李思芸、胡军、张波、潘溪渊、丁强锋、袁锦平等的研究作为本书的完成做出了贡献。全书由何金良教授统一规划和主持撰写,第 9 章初稿由曹林编写,其余各章由何金良教授和曾嵘副教授编写。作者希望尽可能反映接地技术的发展,但难免挂一漏万,希望读者多提宝贵建议和批评。另外我们在编写过程中参考了大量的国内外相关论文及书籍,已列入每章的参考文献中,作者对他们表示诚挚的谢意,但参考文献也难免有疏漏,敬请谅解。

在本书的编写过程中,重庆大学陈先禄教授提出了很多宝贵意见,并将其讲义《接

地》中的一些内容供作者参考。我国著名过电压及防雷接地专家、中国电力科学研究院杜澍春教授级高级工程师审阅了全稿,提出了许多改进意见,并欣然为本书作序。另外还有很多业界同仁为本书的出版提供了资料及意见,在此一并致以诚挚的谢意。

本书的一些研究工作是在国家自然科学基金项目“变电站接地网腐蚀和断点的诊断理论与方法(59677016)”、“永冻地区土壤的冲击击穿机理及接地装置的冲击特性研究(50407002)”及国家杰出青年科学基金“高电压与绝缘(50425721)”的资助下完成的,特此致谢!

著 者

2006年12月于清华园

目 录

序

前言

第 1 章 接地技术基础知识	1
1.1 接地装置及其功能	1
1.1.1 接地的概念	1
1.1.2 接地分类	1
1.1.3 接地的目的	3
1.2 土壤的地电特性	5
1.2.1 土壤电阻率	5
1.2.2 影响土壤电阻率的因素	7
1.2.3 岩土的电介常数及其影响因素	12
1.3 地中电流分布特性	16
1.3.1 地中恒定电流场的基本性质	16
1.3.2 分层土壤界面处电流场	18
1.3.3 均匀土壤中心点源产生的电流场	19
1.3.4 水平分层土壤中心点源的电位分布	23
1.3.5 垂直分层土壤中心点源的地面电场分布	26
参考文献	27
第 2 章 接地电阻	28
2.1 接地电阻的定义及其特性	28
2.1.1 接地电阻的定义	28
2.1.2 接地电阻与电容的关系	29
2.1.3 接地体间的屏蔽效应	29
2.2 常用接地装置的接地电阻	30
2.2.1 基本形状接地装置的接地电阻	30
2.2.2 半椭圆形接地体的接地电阻	32
2.2.3 水平带状接地体的接地电阻	33
2.2.4 水平板状接地体的接地电阻	33
2.3 计算接地电阻的等效表面积方法	34
2.4 接地装置的利用系数	35
2.4.1 多根垂直接地体组成的接地装置的利用系数	35
2.4.2 水平接地体和垂直接地体组成的接地装置的利用系数	39

2.5	不均匀土壤中接地装置的接地电阻	40
2.5.1	双层土壤中的接地装置的接地电阻	40
2.5.2	用拉普拉斯方程求多层土壤时点源产生的互电阻	43
2.5.3	计算两层水平和垂直分层土壤中接地体接地电阻的图解法	44
2.6	发变电站接地系统接地电阻	47
2.6.1	发变电站接地装置结构	47
2.6.2	对发变电站接地系统接地电阻的要求	48
2.6.3	发变电站接地系统接地电阻的计算	49
2.6.4	不均匀土壤中接地系统接地电阻的计算	51
2.7	发变电站的接地电阻与接地阻抗	54
	参考文献	57
第3章	安全接地设计基础	58
3.1	人体允许电流	58
3.1.1	人体的允许电流极限	58
3.1.2	多次电击及快速切除故障	63
3.1.3	直流对人体允许电流的影响	64
3.1.4	频率对人体允许耐受电流的影响	64
3.2	人体的电阻	66
3.3	人体电击时的等效电路	69
3.3.1	通过人体的电流路径	69
3.3.2	电击事故的主要类型	70
3.3.3	电击时的等效电路模型	71
3.4	人体安全电压及容许电位差	72
3.4.1	人体安全电压	72
3.4.2	人体允许电位差	73
3.5	大地表层土壤电阻率对安全的影响	75
3.6	持续接地电流的作用	78
	参考文献	78
第4章	发变电站接地	80
4.1	发变电站接地的目的	80
4.1.1	发变电站接地的目的	80
4.1.2	设计目标	81
4.1.3	发电站接地的特殊性	82
4.2	发变电站接地系统设计	83
4.2.1	发变电站接地系统结构	83
4.2.2	接地系统设计的要求	84
4.2.3	接地网设计的主要参数	84

4.2.4	发变电站接地系统设计与施工程序	85
4.2.5	接地系统设计的基本指导原则	90
4.2.6	按电位梯度要求确定导体长度	90
4.2.7	发电站与变电站的内部连接	91
4.2.8	特殊条件下的接地设计	91
4.3	接地导体材料及截面积的选择	92
4.3.1	对接地导体材料及截面积的要求	92
4.3.2	用于接地导体的金属材料	94
4.3.3	按导体最高允许温度确定接地导体尺寸	96
4.3.4	根据接地故障保护确定接地导体尺寸	102
4.3.5	按机械可靠性确定接地导体尺寸	102
4.3.6	确定接地导体尺寸的腐蚀因素	103
4.4	发变电站接地的安全性	103
4.4.1	发变电站安全接地设计原则	103
4.4.2	计算接触电压和网孔电压的简单公式	104
4.4.3	计算发变电站接地网的网孔电压和跨步电压的 IEEE 公式	106
4.4.4	我国标准推荐的计算接触电压和跨步电压计算公式	108
4.4.5	转移电位	109
4.4.6	提高接地网安全性的措施	115
4.4.7	检验现有变电站的安全接地	118
4.5	发变电站辅助电气设施接地	118
4.5.1	电站辅助设施中性点接地	118
4.5.2	辅助设备的特殊接地要求	119
4.5.3	保护和控制接地	122
4.6	接地连接线及布置方式	122
4.6.1	接地连接线	122
4.6.2	与中性点地相连的公共设备接地线的接地	123
4.6.3	接于中性点地的单个设备接地连接线的接地方式	124
4.6.4	公共母线连接接地网且设备只采用唯一与接地网相连的安全接地方式	125
4.6.5	采用设备地和当地安全地的双重接地方式	126
4.6.6	接地引线对弱电设备干扰的控制	127
4.7	发电机和隔离相母线接地	127
4.7.1	发电机的接地方式	127
4.7.2	封闭相母线接地	129
4.8	降低发变电站接地系统接地电阻的方法	130
4.8.1	降低接地电阻的基本方法	130
4.8.2	采用长垂直接地极降低接地系统接地电阻	132
4.8.3	爆破接地技术	134

4.8.4 深水井接地技术	137
4.9 季节因素对接地网安全性能的影响	140
4.9.1 受季节影响的土壤层厚度对季节系数的影响	141
4.9.2 垂直接地极对季节系数的改善作用	142
4.10 接地网的暂态特性	144
4.10.1 接地系统暂态模型	144
4.10.2 接地系统暂态模型的检验	147
4.10.3 接地网的冲击特性	148
4.10.4 冲击电流作用下接地网的有效面积	158
参考文献	159
第5章 发变电站接地故障电流	162
5.1 发变电站接地故障	162
5.1.1 发变电站接地故障类型	162
5.1.2 确定流经发变电站最大接地故障电流的原则	162
5.1.3 最大接地故障电流位置	164
5.2 经接地系统流入大地的最大故障电流的计算	165
5.2.1 最大接地网入地故障电流	165
5.2.2 零序故障电流有效值	166
5.2.3 确定分流系数	167
5.2.4 确定衰减系数	167
5.2.5 确定校正规划系数	170
5.2.6 变电站接地电阻的影响	170
5.2.7 故障电阻的影响	171
5.2.8 架空地线与中性线的影响	171
5.2.9 直埋管道与电缆的影响	171
5.3 分流系数的简化计算	172
5.3.1 站内故障时的分流系数	172
5.3.2 站外故障时的分流系数	173
5.4 分流系数的数值计算	174
5.4.1 分流系数数值计算方法	174
5.4.2 计算分流系数的矩阵法	176
5.4.3 计算分流系数的迭代消元法	177
5.4.4 各种因素对分流系数的影响	180
5.5 接地系统内局部接地网的分流	185
5.5.1 不同计算方法导致的接地网电位升	186
5.5.2 计算局部接地网分流的合理方法	187
参考文献	188

第 6 章 发变电站接地系统接地参数的数值计算方法	190
6.1 发变电站接地系统接地参数的计算方法	190
6.1.1 采用经验公式计算接地系统参数	190
6.1.2 接地系统接地参数的数值计算方法	191
6.2 接地参数计算的叠加法及积分法	193
6.2.1 叠加法	193
6.2.2 积分法	195
6.2.3 双层土壤中接地系统在任一点产生的电位	197
6.2.4 接触电压和跨步电压	199
6.3 采用格林函数计算接地系统参数	199
6.3.1 格林函数计算接地参数的原理	199
6.3.2 采用镜像法计算自电阻和互电阻	200
6.3.3 采用复镜像法求解格林函数	203
6.4 计算接地系统电流分布的多步法	203
6.4.1 独立接地系统的电流分布计算	203
6.4.2 互联接地系统的电流分布计算	206
6.5 数值积分方法	208
6.5.1 接地系统不等电位时的计算模型	208
6.5.2 点电流源产生的电场分析	209
6.5.3 采用数值积分方法计算点电流源的格林函数	213
6.5.4 解析法求互阻系数存在的问题	215
6.5.5 数值积分法求解互阻系数	216
6.6 格林函数的计算机程序自动推导方法	217
6.6.1 获取解析式的方法	217
6.6.2 程序推导得到的格林函数表达式	220
6.6.3 多层土壤中的电流场计算	222
6.7 接地网的均压优化布置	222
6.7.1 不等间距布置的原理	223
6.7.2 不等间距布置接地网的规律	225
6.7.3 采用不等间距布置接地网时计算接地参数的经验公式	227
6.7.4 采用指数分布的不等间距布置规律	228
6.8 接地系统的数值设计	229
6.8.1 接地系统数值设计的步骤	229
6.8.2 水平接地网方案	230
6.8.3 水平接地网与垂直接地极相结合的方案分析	230
6.8.4 水平接地网与采用爆破接地技术的垂直接地极相结合的方案分析	231
6.8.5 接地系统的安全性能	232
参考文献	233

第 7 章 气体绝缘变电站(GIS)的接地技术	235
7.1 概述	235
7.2 母线外壳的环流和涡流	235
7.2.1 GIS 母线外壳的结构	235
7.2.2 环流和涡流	236
7.3 GIS 的典型故障	238
7.3.1 GIS 的典型故障类型	238
7.3.2 GIS 的内部故障	238
7.3.3 GIS 的外部故障	240
7.3.4 故障情况时外壳电流的计算示例	241
7.4 GIS 暂态接地电位升	243
7.4.1 GIS 暂态接地电位升	243
7.4.2 暂态接地电位升的特征及其危害	245
7.4.3 暂态接地电位升的计算方法	246
7.4.4 暂态接地电位升的电击风险	249
7.4.5 暂态接地电位升的限制措施	250
7.5 GIS 的金属-金属接触电压	251
7.5.1 GIS 的金属-金属接触电压	251
7.5.2 金属-金属接触时人体容许接触电压	252
7.5.3 GIS 金属-金属接触电压的极限判据	252
7.6 GIS 的接地	253
7.6.1 对 GIS 接地的要求	253
7.6.2 GIS 的安全接地	256
7.6.3 GIS 的基础接地	257
参考文献	257
第 8 章 输电线路杆塔接地	259
8.1 对输电线路杆塔接地装置的要求	259
8.1.1 对输电线路杆塔接地电阻的要求	260
8.1.2 杆塔接地装置接地电阻的季节系数	260
8.2 输电线路杆塔接地装置的结构	261
8.2.1 输电线路杆塔接地装置的基本结构	261
8.2.2 利用自然接地极作为杆塔接地装置	266
8.3 钢筋混凝土自然接地的特性	266
8.3.1 钢筋混凝土接地装置的作用	266
8.3.2 混凝土的吸湿性能	267
8.3.3 钢筋混凝土接地装置的通流能力	269
8.3.4 钢筋混凝土中的腐蚀	270

8.4	杆塔接地装置的接地电阻计算方法	272
8.4.1	外包混凝土的垂直接地极的接地电阻	272
8.4.2	装配式钢筋混凝土基础的接地电阻	273
8.4.3	不同结构的输电线路杆塔接地装置接地电阻的计算方法	274
8.4.4	利用系数	276
8.5	输电线路附近的跨步电压和接触电压	281
8.5.1	跨步电压和接触电压	281
8.5.2	跨步电压和接触电压触电事故的概率	282
8.6	输电线路的故障电流及杆塔附近的电位分布	284
8.6.1	输电线路的故障电流	284
8.6.2	输电线路杆塔附近大地的电位分布	285
8.6.3	降低电位分布的措施	287
8.7	输电线路杆塔接地装置冲击特性	289
8.7.1	土壤的击穿场强	290
8.7.2	土壤的电击穿机理	291
8.7.3	冲击接地电阻	293
8.7.4	接地极的冲击特性	294
8.7.5	各种因素对输电线路杆塔接地装置冲击接地电阻的影响	296
8.7.6	各种因素对接地装置冲击系数的影响	300
8.8	计算冲击系数的经验公式	302
8.9	接地极的冲击有效长度	304
	参考文献	308
第9章	直流接地技术	312
9.1	直流接地极的运行方式及技术要求	312
9.1.1	直流输电系统的运行方式	312
9.1.2	直流输电系统接地极的技术特点	315
9.1.3	直流接地极设计基本原则	316
9.2	直流接地极在大地回路中的电流和电位分布	317
9.2.1	大地为均匀土壤时直流电流的电流和电位分布	318
9.2.2	大地为不均匀土壤时直流电流的电流和电位分布	319
9.3	直流接地极的结构型式	325
9.3.1	浅层水平接地极	326
9.3.2	垂直接地极	330
9.3.3	岸边接地极	331
9.3.4	海水接地极	332
9.4	直流接地极设计	333
9.4.1	接地极的发热计算	333

9.4.2	直流接地极电极尺寸的确定	335
9.4.3	焦炭截面的确定	338
9.4.4	接地极馈电棒截面直径	339
9.4.5	接地极埋设深度	339
9.4.6	导流系统	340
9.5	直流接地极技术特性分析	340
9.5.1	主要设计要素分析	340
9.5.2	电极形状优化	342
9.6	接地极的腐蚀及防护	347
9.6.1	阳极的电腐蚀	347
9.6.2	直流接地极材料的选择	350
9.6.3	焦炭的保护作用	352
9.7	直流接地对附近管线的影响	355
9.7.1	地下金属管线电化腐蚀的机理	355
9.7.2	高压直流输电引起的地下金属管线腐蚀的防护措施	356
9.8	直流接地对交流系统的影响	358
9.8.1	流入中性点接地变压器的直流电流的计算	359
9.8.2	直流电流对中性点接地变压器的影响	359
9.8.3	变压器允许通过的直流电流	360
9.8.4	减小流入中性点接地变压器绕组直流电流的措施	362
	参考文献	364
第 10 章	土壤电阻率的测量及分析	367
10.1	概述	367
10.2	电阻率的测量方法	368
10.2.1	土壤试样分析法	368
10.2.2	电测深法	369
10.2.3	电磁测深法	372
10.2.4	电阻率测量数据与大地地质结构的相互关系	372
10.3	四电极法测量土壤电阻率	374
10.3.1	四电极法测量土壤电阻率的原理	374
10.3.2	深度电测法	376
10.3.3	四极法的电极布置	377
10.4	深度电测法的现场应用	380
10.4.1	深度电测法的现场测量技术	380
10.4.2	电极间距的选择	381
10.5	电阻率测量数据的分析方法	381
10.5.1	两层水平介质构成的大地的电测深曲线法	382
10.5.2	采用三极法测量时土壤参数的计算	386

10.5.3	两层土壤模型参数的数值计算	387
10.5.4	三层水平结构地质的电阻率测量数据分析	388
10.5.5	垂直分层地质结构的土壤电阻率	390
10.5.6	分析测量数据的经验方法	391
10.6	土壤电阻率分层结构数值分析	392
10.6.1	土壤电阻率分层结构数值分析理论基础	392
10.6.2	工程实际应用	394
	参考文献	394
第 11 章	接地电阻及电位分布的测量	396
11.1	接地电阻测量的目的	396
11.2	测量小型接地装置接地电阻的简单方法	396
11.2.1	两点法	396
11.2.2	三点法	397
11.3	三极法测量接地电阻的原理	397
11.3.1	三极法测量接地电阻的基本原理	397
11.3.2	远离法	399
11.3.3	电位极的补偿点	402
11.3.4	补偿法	403
11.3.5	接地网中心位置不确定时接地电阻的测量	410
11.4	用于三极法测量接地电阻的仪表	411
11.4.1	电压-电流表法	411
11.4.2	电流表-功率表法	411
11.4.3	比率计法	412
11.4.4	电桥法测工频接地电阻	413
11.4.5	电位计法测量工频接地电阻	414
11.4.6	单平衡变压器测接地电阻	415
11.4.7	ZC—8 接地电阻测试仪	416
11.4.8	接地电阻测量时对测量仪器的要求	417
11.5	影响三极法测量结果的因素	419
11.5.1	测量时的干扰信号	420
11.5.2	工频干扰的影响及消除	421
11.5.3	接地阻抗测量时测试信号的成分	422
11.5.4	测量时电压与电流引线之间的互感	422
11.5.5	土壤电阻率不均匀的影响	424
11.5.6	测量极距较短时接地电阻的测量	426
11.5.7	大地的集肤效应的影响	427
11.5.8	激发极化效应的影响	427

11.5.9	采用架空线路测量接地电阻存在的问题	428
11.5.10	电流极引线长度的影响	428
11.5.11	采用 GPS 精确定位测量电极位置	429
11.5.12	地下附近金属物体对测量结果的影响	430
11.6	四极法测量接地电阻	433
11.6.1	四极法测量接地电阻的原理	433
11.6.2	四极法消除测量引线间的互感的影响	434
11.6.3	四极法消除接地装置中干扰电流的影响	435
11.6.4	四极法测量接地电阻时存在的问题	436
11.6.5	改进的四极法	437
11.7	用于消除干扰的测量方法	439
11.7.1	大电流法	439
11.7.2	改变测量电源频率的方法	441
11.8	计算机辅助智能接地电阻测量系统	444
11.8.1	接地电阻测试整体方案	444
11.8.2	测试系统结构	445
11.8.3	测试系统的总体软件结构	446
11.9	电位分布的测量	448
11.9.1	等电位线	448
11.9.2	等电位线测定	448
11.9.3	跨步电压和接触电压测量	449
	参考文献	450
第 12 章	接地降阻材料	453
12.1	概述	453
12.2	接地降阻剂降低接地电阻的原理	454
12.3	接地降阻材料的主要成分	457
12.3.1	有机类接地降阻剂	457
12.3.2	无机类接地降阻剂	459
12.3.3	膨润土接地降阻剂	459
12.4	接地降阻剂必须满足的基本要求	460
12.4.1	接地降阻剂的安全性	460
12.4.2	接地降阻剂的导电性	460
12.4.3	接地降阻剂的长效性	461
12.4.4	接地降阻剂的腐蚀性	463
12.5	接地降阻剂的工频降阻性能	464
12.5.1	接地降阻剂的吸水性能	464
12.5.2	接地降阻剂的降阻效果	465
12.5.3	降阻剂的实际应用效果	466