

电力系统接地网特性参数 测量与应用

李 谦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013028436

TM7
96

电力系统接地网特性参数 测量与应用

李 谦 编著



TM7
96



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1634903

013038432

内 容 提 要

接地网是维护电力系统安全可靠运行、保障人员安全的重要措施,其特性参数的正确测试是长期困扰基层试验人员的问题。本书通过丰富的测试案例,就接地网特性参数测试方法的适用性、影响测试结果准确性的各种因素、现场测试中存在的主要问题以及如何提高测量准确性等问题进行了详细论述,对当今接地测试技术发展的观念和趋势也有所涉及。

本书共分为11章,内容涵盖变电站接地网接地电阻、地线分流、跨步电压和接触电压、场区地表电位梯度、电气完整性、杆塔接地电阻和土壤电阻率等特性参数现场测试项目。以测试实例的介绍为特点,理论与实际结合紧密,图文并茂,具有较强的实操性,较为全面地介绍了国内接地网特性参数的实用测试技术。

本书可供电力行业基层专业技术人员、试验班组人员和实习人员使用,可作为高等学校电气工程专业在校本科生和研究生的教学参考书,也可作为教科书补充材料、工作参考用书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统接地网特性参数测量与应用 / 李谦编著. —北京:中国电力出版社, 2013.3

ISBN 978-7-5123-4010-7

I. ①电… II. ①李… III. ①电力系统—接地网—参数测量 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第019729号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013年3月第一版 2013年3月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 14.5印张 335千字
印数0001—3000册 定价70.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



序

接地是维护电力系统安全可靠运行、保障人员和设备安全的根本保证和重要措施，看似简单，却蕴含了深厚的理论和庞杂的工程技术。

随着我国国民经济持续高速发展，电网规模扩大，电压等级也从超高压提升到了特高压。我国电网的系统容量和接地短路电流水平越来越高，对电力系统接地安全性的要求也更高；另外，我国电网正朝着数字化、自动化和智能化方向发展，各种以监控、测量、保护等为目的的弱电设备广为应用，对接地网的可靠性及接地技术提出了诸多新的要求。接地技术的发展也要与时俱进，不断地提升和创新。

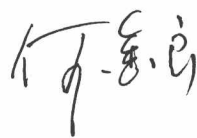
接地网特性参数的准确测量是接地网设计、建设、验收和运行维护全过程管理的重要一环。接地网具有隐蔽工程的特点，空间和大地环境存在各种影响因素，加上现场测试时诸多限制条件，使得接地网特性参数的现场准确测量较难实现。从这个意义上，接地网特性参数与其他电网设备参数测量有较大的区别，由此容易造成较多认识误区，甚至对接地网接地电阻的唯一性产生怀疑，产生接地电阻测量是一项较为随意试验的误解。另外，接地网测试水平和规范化程度因地区差异而参差不齐，这种现状阻碍了接地技术的发展，对电力系统接地网全过程管理工作带来不利的影响。

目前，介绍接地测量技术的论著和规程标准，多着重于测量原理和测量方法的论述，大多缺乏现场实测的可操作性，而指导基层试验人员正确、规范开展接地网特性参数实测的论著则是一个空白，缺少一本充当教科书与现场测试之间的桥梁角色、面向基层试验人员的接地特性参数测量的著作。

李谦博士主要从事接地专业工作，以严谨的治学态度，将理论密切联系实践，长期耕耘于广东电网生产第一线。专注现场接地测试实践经验的积累。近十多年来，伴随着国内最大省级电网——广东电网的高速发展，李谦博士参与了大量的接地网投产交接验收、运行变电站的检测维护和状态评估现场试验实践，针对广东省的各种土壤特点，解决了诸多难度较大的接地网特性参数现场测试难题，积累了大量的接地现场测试实践经验。另外，李谦博士参加了 GB 50169—2006《电气装置安装工程 接地装置施工及验收规范》和 DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》的编写工作，并

主持了广东电网多个接地技术相关的科研项目，并将接地网测量领域的创新性研究成果成功应用于接地网测试实践。长期的理论研究和工程实践为本书的编写积累了丰富的素材，使得本书内容层次清晰，能全面地反映和满足基层现场试验人员的需求。

本书主要以广东电网公司电力科学研究院近十余年的接地参数现场测试工作为基础，参考国内外该领域的最新研究成果，着眼于现场实测，以实用性强作为本书的鲜明特色，以大量的现场测量实例的总结作为支撑，还提供常见测量错误及其分析，可作为相关标准和教科书的有益补充，达到与教科书和规程规范相辅相成的目的。接地网特性参数的准确测量是电力系统接地的基础，相信本书的出版发行必将推动电力系统接地技术的创新与提升。



2012年12月



前言

电力系统的发电厂、变电站和线路杆塔接地网除了为各种电气设备提供公共参考地，更重要的是，在系统发生接地故障或雷击设备时，起到快速有效地泄放故障电流或雷电流，改善接地网金属导体和场区地表地电位分布，保障故障状态下一、二次设备和人员安全的作用，是维护电力系统安全可靠运行、保障人员和设备安全的重要措施。接地网性能好坏将直接影响电力系统的稳定运行以及设备、人身的安全，接地网特性参数的准确测量是接地工作的基础，是接地网设计、建设和运行维护全过程管理的重要一环，其准确测量的重要意义是不言而喻的。

接地网隐蔽工程和不易准确测量的特点，在实践中造成较多认识误区，对现场接地电阻测量的唯一性产生怀疑，甚至出现接地电阻测量是一项随意的试验的误解，影响较为深远，如何通过特性参数的准确测量来反映接地网的真实运行状态，成为长期以来困扰接地技术工作者和试验人员的难题和挑战。

目前涉及接地测量技术的论著，多为教科书式介绍测量原理和影响因素，大多缺乏操作性。基层试验人员普遍反映：告诉接地特性参数测试是怎么回事的书很多，但教你实测怎么操作、怎么测量是正确和规范的、要注意什么问题等内容的书却很难找到。缺少一种能充当教科书与现场实测之间起桥梁角色、面向基层试验人员的接地特性参数测量的专门技术书。

编者从事接地网现场测试多年，在现场经常遇到基层试验人员提出关于接地网测试各方面的问题，对现场千差万别的情况，基层试验人员缺乏统一的认识，甚至概念不清晰，认为接地网测试是一项非常随意的试验项目。多年来，编者利用广东电网技术支持中心的良好平台，充分利用现场测试交流、举办培训班和专题会议等多种形式，致力于广东电网变电站接地网特性参数测试的规范化工作以及新测试技术的引进和推广工作，广东电网近年来接地网测试工作渐趋规范，整体测试水平得到较大提升，编者为能有幸在其中付出微不足道的努力而感到欣慰。

与此同时，编者多年来也跟踪接地网测试新技术的发展，关注和吸取国内同行的经验，尤其是异频测试和分流测量技术，以及近年较为热门的接地网状态评估技术，感觉有必要将平时积累的测试经验和体会进行归纳梳理，与同行们分享，希望起到抛砖引玉的作用，共同为规范行业的接地网特性参数测试工作，提升测试技术水平作应有的努力，顺应接地技术发展的趋势。

本书针对目前国内电力系统接地网的现状,在总结归纳主要接地测试理论上,结合现有的国家标准和行业规程,总结广东电网近十余年的测试经验,以大量的测试案例作为支撑材料,就接地网特性参数测试方法的工程应用,不同方法的适用性,影响测试结果准确性的各种因素,接地网测试中存在的主要问题,如何减少误差,提高测量准确性,以及测试作业的规范化等问题详细进行了论述。着重介绍了类工频小电流接地技术和分流测量及处理问题,同时提供广东电网的测试经验以期进行分享。

本书分为 11 章,先简单总结了接地网的作用、测试原理和方法,然后重点介绍了接地网电位升高和电流两个参量的准确测量。对于前者,论述了补偿法的局限性和适用场合,测量引线互感影响及其处理,推荐远离法,对电压极的布置和地网对角线长度的选取亦结合实例进行详述,对工频大电流法、异频法和接地电阻测试仪法适用场合进行评价,测试电流源的选择推荐优先选用异频法;对于后者,讨论了电流极的布置要求,测试电流的分流及其测量和处理,引申出分流测量的应用和城区变电站接地网接地电阻测量内容,通过对接地网接地电阻测量误差源及其抑制措施的归纳和讨论,提出提高接地网接地电阻测量准确性的现场实测的程序和步骤,结合广东电网的测试经验,提出了接地网接地特性参数现场规范化测量作业的要求。此外,对跨步电压和接触电压测量、场区地表电位梯度测量、电气完整性测试、输电线路杆塔接地电阻测量和土壤电阻率测量均分别提及,主要围绕测量中应注意的问题,尤其是钳表法的适用场合,安全限值和测量结果判断等方面,提供了实测案例。对接地网特性参数测试的最高形式,即接地网状态评估技术也进行了介绍。

希望本书能帮助基层技术人员和试验班组人员、实习人员和新入职的培训人员学习了解接地基本概念、基本原理和基础理论知识,熟悉接地网特性参数现场实测的方法、影响因素、规范化作业步骤和应注意的主要问题。对于高等院校电气工程专业的在校学生、研究生来说,可作为一本理解和巩固接地技术理论知识的参考书。

本书是对广东电网公司电力科学研究院近十余年的接地参数现场测试工作的总结,期间得到了广东电网公司的科技项目资金资助,部分工作在深圳、韶关、中山和佛山等供电局的参与和帮助下完成。本书的编写得到东北电力科学研究院王东焯高工,清华大学何金良教授、曾嵘教授、张波副教授,武汉大学文习山教授、潘卓洪博士,广东电网公司电力科学研究院何宏明副院长、郑晓光总工程师、高压所陈锐民所长、钟定珠教授级高工、彭向阳教授级高工,韶关供电局郑益民高工,苏州海沃科技有限公司葛凯高工,北京加华赛时有限公司付龙海博士、深圳市长科防雷接地技术有限公司陈光辉高工等的关心、指导和帮助。另外,彭向阳、饶章权、肖磊石和王锦永等对本书的编写也给予了大力支持,对他们的辛勤付出,编者表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存有不足之处,恳请广大读者多提宝贵建议。

编者

2012 年 12 月



目录

序
前言

1 绪论

- 1.1 接地网的作用/1
- 1.2 接地网主要特性参数及其测试意义/4
- 1.3 接地网特性参数的取值要求/6
- 1.4 发电厂和变电站接地网状态评估/8

2 接地电阻测量原理及常见方法

- 2.1 接地电阻的基本概念/10
- 2.2 接地电阻测量的基本原理/11
- 2.3 电位降法/12
- 2.4 补偿法/14
- 2.5 夹角法/17
- 2.6 远离法/18
- 2.7 本章小结/19

3 接地网电位升高的测量

- 3.1 一般要求/21
- 3.2 补偿法的局限性和适用场合/22
- 3.3 测量引线互感影响及其处理/30
- 3.4 远离法/39
- 3.5 短距测量/44
- 3.6 电压极的布置/45
- 3.7 接地网对角线长度的选取/54
- 3.8 本章小结/59

4 测试电流源的选择

- 4.1 接地电阻测试干扰源/61
- 4.2 工频大电流法/62
- 4.3 异频法/67
- 4.4 接地电阻测试仪法的评价及适用场合/79
- 4.5 本章小结/83

5 接地网入地电流的测量

- 5.1 电流极的布置要求/84
- 5.2 测试电流的分流/88
- 5.3 架空地线分流测量/91
- 5.4 分流测量的比对验证/97
- 5.5 分流测量实施及处理/113
- 5.6 分流测量在接地网降阻效果评价中的应用/129
- 5.7 城区变电站接地网接地电阻的测量/131
- 5.8 本章小结/140

6 输电线路杆塔接地网接地电阻测量

- 6.1 输电线路杆塔接地网接地电阻/141
- 6.2 输电线路杆塔接地网接地电阻的测量原理和方法/141
- 6.3 电流—电压法/142
- 6.4 钳表法/144
- 6.5 选择性补偿法/147
- 6.6 杆塔冲击接地特性和冲击接地阻抗/149
- 6.7 本章小结/150

7 如何提高接地网接地电阻测量准确性

- 7.1 接地网接地电阻的唯一性/151
- 7.2 接地网接地电阻测量误差源及其抑制措施/155
- 7.3 接地网接地电阻现场规范化测量作业/163
- 7.4 接地网交接验收试验存在的主要问题和应对措施/172
- 7.5 接地网接地电阻测试典型错误案例介绍/174
- 7.6 本章小结/178

8 跨步电压和接触电压测量

- 8.1 跨步电压和接触电压/180
- 8.2 跨步电压和接触电压测量原理和方法/180
- 8.3 跨步电压和接触电压安全限值和测量结果判断/183
- 8.4 跨步电压和接触电压测量案例/184
- 8.5 本章小结/196

9 接地网场区地表电位梯度测量

- 9.1 场区地表电位梯度/197
- 9.2 场区地表电位梯度测试原理和方法/197
- 9.3 场区地表电位梯度测量结果的判断/199
- 9.4 场区地表电位梯度测量案例/200
- 9.5 本章小结/202

10 接地网电气完整性测试

- 10.1 接地网电气完整性/204
- 10.2 接地网电气完整性测试测量原理和方法/204
- 10.3 接地网电气完整性测试结果判断/206
- 10.4 接地网电气完整性测试案例/207
- 10.5 本章小结/210

11 土壤电阻率测量

- 11.1 土壤电阻率/211
- 11.2 视在土壤电阻率测量原理和方法/211
- 11.3 站址土壤结构的反演/216
- 11.4 视在土壤电阻率测量和土壤结构反演案例/217
- 11.5 本章小结/221

参考文献/222

绪 论

1.1 接地网的作用

1.1.1 接地

在电力系统和建筑物中，为了正常运行和工作人员的人身安全的需要，常需将电力系统及电气设备的某些部分与大地做电气上的连接，使其对地保持一个低的电位差，这就构成了接地系统，即接地（grounding 或 earthing），它通常指将电力系统或建筑物电气装置、设施的某些导电部分，经接地线连接至接地极的工程。

接地的主要作用是防止人身遭受电击、设备和线路遭受损坏、预防火灾和防止雷击、防止静电损害和保障电力系统正常运行。从本质上讲，其目的就是为了在正常和事故以及雷击的情况下，利用大地作为接地电流回路的一个元件，从而限制设备接地处的接地电位。

按功能和目的不同，接地可分为工作接地、保护接地、雷电保护接地和防静电接地四种类型。

(1) 工作接地（working grounding），也叫系统接地，是指在电力系统电气装置中，为保证电力系统的正常运行需要所设的接地，如中性点直接接地或经其他装置接地等。

(2) 保护接地（protective grounding），也叫安全接地，是指电气装置的金属外壳、底座、配电装置的构架和线路杆塔等，由于绝缘损坏有可能带电，为防止其危及人身和设备的安全而设的接地。

(3) 雷电保护接地（lightning protective grounding），是指雷电保护装置，如避雷针、避雷线和避雷器，为了把雷电流泄放入地中，以消除过电压的危险影响而设的接地。

(4) 防静电接地（static protective grounding），是指为防止静电对易燃、易爆（如燃油、天然气储罐和管道）的危险作用而设的接地。

1.1.2 接地装置和接地网

接地装置（grounding connection）是实现电力系统或建筑物电气装置、设施接地的功能系统，是埋入地中的接地体和接地线的总称。

接地装置通常由以下三部分构成，包括接地极和接地线的总和。

- (1) 地上部分：每个电气设备与接地体的金属连线，即设备接地引下线或接地线。
- (2) 地表部分：变电站（电厂）土壤地表，即人体接触面。

(3) 地中部分：埋入地中并直接与大地（包括土壤、江、河、湖、井水）接触的金属导体，即接地体、接地极等。

接地极（grounding electrode）指埋入地中并直接与大地接触的金属导体，包括人工接地极和自然接地极两种形式。兼作接地极用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建（构）筑物的基础、金属管道和设备，称为自然接地极。人工接地极则一般分为水平接地极和垂直接地极，我国一般选用钢材质，在腐蚀比较严重地区或者室内变电站，选用铜材质有逐渐增多的趋势。水平接地体通常采用扁钢或圆钢，垂直接地体一般采用角钢。

接地线（grounding conductor）指电力设备应接地的部位与地下接地极之间的金属导体，也称为接地引下线，通常指电气装置、设施的接地端子与接地极连接用的金属导电部分。

接地网（grounding grid）是电力系统的发电厂、变电站和线路杆塔使用的，兼有泄流和均压作用的较大型的水平网状接地装置的统称，通常由水平接地体和垂直接地极组成，为了降阻需要，还包括深井接地极、电解离子接地极和接地模块等。

大型接地网（greatness grounding grid）或大型接地装置（greatness grounding connection）在本书指 110kV 及以上电压等级变电站的接地网，装机容量 200MW 以上的火电厂和水电厂的接地网，或者等效面积在 5000m² 以上的接地网。

集中接地装置（concentrated grounding connection）或集中接地网（concentrated grounding grid）指为加强对雷电流的散流作用，降低地面电位梯度而敷设的接地装置，通常用于输电线路杆塔，变电站的避雷针也有使用。一般由 3~5 根垂直接地极组成，在土壤电阻率较高的地区，则敷设 3~5 根放射形水平接地极。

接地装置与接地网的内涵基本相同，但前者的外延更广，由于电力系统的变电站接地装置主要呈现水平接地网的形式，因此长期以来习惯称为“接地网”，为尊重现场长期以来形成的习惯，方便现场的使用，除非特别指明，本书将“接地装置”的称谓统一为“接地网”。

1.1.3 接地网的作用

视使用场合不同，接地网起到各自不同的作用：

(1) 发电厂、变电站接地网的作用除了为各种电气设备提供公共参考地，更重要地，在接地故障状态下起到快速有效地泄放故障电流，改善接地网金属导体和场区地表地电位分布，保障故障状态下一、二次设备和人员安全的作用。

(2) 杆塔接地网用于防雷接地，目的是安全导泄强大的雷电流，使雷电流在短时间内迅速通过接地体流入大地，保证线路设备免遭雷击损坏，同时避免雷电波入侵变电站。

(3) 建筑物接地网的作用兼顾工作接地、保护接地、雷电保护接地和防静电接地等几个方面，与变电站接地网的区别是没有流经大的短路电流，而防雷接地网与杆塔接地网相似。

(4) 发电厂、变电站接地网对电力系统的安全、稳定运行有着极为重要的作用，属于过电压保护装置的范畴，其性能的好坏直接关系到人身、设备和电网的安全。

由于接地网的存在，系统发生接地短路故障时，强大的短路电流流经接地体使接地电极及周围的土壤发热，电流在接地体上的压降使接地体电位升高；另外，电流离开接地体在地中扩散时，在地面上出现的电位梯度会使人体遭受接触电压和跨步电压的作用；如接

地网接地电阻偏大，或短路电流水平偏高，地电位升高、接触电压和跨步电压可能危及设备和人员的安全。

据不完全统计，我国每年电网运行事故中有 30%是由于接地网的缺陷或不良引起，或间接导致已发生其他事故进一步扩大，严重影响了电网的安全和稳定运行，我国曾发生多起因接地网性能不良或接地网特性参数不满足运行要求而引起的恶性事故。

湖北省潜江变电站地处高土壤电阻率地区，采用各种办法降低接地电阻，结果接地电阻仍高达 1.5Ω 。1986 年 4 月 25 日，由于线路故障引入变电站，35kV 设备多处放电、燃烧，并发展为相间短路，同时高压窜入用电系统、通信系统及保护回路，造成 110kV 主变压器烧毁以及其他大量设备损坏，事故损失达 3000 万元。

1986 年，广西合山电厂由于接地网缺陷而引起接地事故，二次电缆端子排烧坏，二次设备烧毁，一台 100MW 的发电机损坏，最后导致全厂停电的重大事故，事故损失达 2000 万元。

1999 年 7 月 20 日，太原新店变电站发生特大全站停电事故，开始是发生较小的故障，但由于地网泄流能力差形成反击过电压损坏了直流电源系统，最后造成直流控制电源失效而不能及时切除故障，导致事故扩大。

江西分宜发电厂土壤电阻率较高，地网接地电阻为 0.69Ω ，开关场最大短路电流为 8kA，1984 年 7 月 31 日，在 110kV 倒闸运行操作中，I 母线 GW4-110 型隔离开关 B 相头部断落，甩到 II 母线同相隔离开关上，形成单相接地短路故障，短路电流 6.8kA，地电位升达 4.7kV，高压窜入电气、热工二次系统，引发全厂停电和 50MW 的 6 号汽轮机超速的严重事故，直接损失达 1300 万元。

1996 年 12 月 4 日，山东烟台 220kV 福山变电站 1 号主变压器由于 110kV 侧中性点接地不良，在 110kV 幸山线 A 相同期 TV 发生污闪时，大电流窜入二次，造成直流电源失效，保护拒动，引发全站停电事故，二次设备损坏严重。

事实上，类似以上由于接地网直接引起的电力系统事故较少，而由于接地网性能不良或特性参数不满足运行要求，在接地短路故障状态下，或者遭受雷击（雷直击站内避雷针或近区雷击）时，可能导致接地网局部电位和电位差异常升高，给一、二次设备和人员带来潜在威胁，更重要的，将可能因接地网电位过高、反击或电缆外护套环流使得二次系统绝缘遭到破坏，或造成强烈的电磁骚扰，或二次系统正常工作条件遭破坏，严重者可能导致监测、控制或保护设备误动或拒动而间接导致事故扩大，事故状态下站内和站外人员安全风险等隐性事故则普遍存在，可能带来巨大的经济损失和社会影响。

随着我国电网的高速发展，系统容量显著增加，入地短路电流水平持续升高；电力技术的日新月异，变电站自动化程度提高，带来了数字化电子设备和弱电子设备的普遍应用，数字化变电站如雨后春笋般涌现，其抗电磁骚扰能力和绝缘水平普遍较低，接地工作条件非常严格，电磁兼容问题日益突出；而与之不相适应的是，变电站和出线走廊的征地越来越困难，变电站和线路杆塔的土壤条件愈发恶劣，在这个大背景下，二次设备和微电子设备对接地网电位升高和场区压差等安全性指标的要求逐步提高，电网的稳定运行对接地网的安全可靠性提出了越来越严格的要求。

1.2 接地网主要特性参数及其测试意义

接地网的状况直接关系到电力系统的安全稳定运行，而接地网特性参数作为接地网性能好坏的宏观指标，对它的科学合理测试和准确评估则显得十分重要。

接地网特性参数(parameters of grounding connection)是反映接地网状况的参数，包括接地电阻、电气完整性、接触电位差、跨步电位差、场区地表电位梯度、转移电位以及接地故障时接地网电位升高和场区压差等参数和指标。

(1) 接地电阻(ground resistance)是反映接地网散流能力的宏观量化指标，是衡量接地网性能最基本的特性参数，指接地网的接地极或自然接地极对地电阻和接地线电阻的总和，其数值等于接地网对地电压与通过接地极流入地中电流的比值。

由于接地网参数中感性部分的存在，严格地说，应称为接地阻抗(ground impedance)，即接地网对远方电位零点的阻抗，数值上为接地网与远方电位零点间的电位差，与通过接地网流入地中的电流的比值。按冲击电流得到的接地阻抗称为冲击接地阻抗，由于输电线路杆塔接地网主要用于防雷接地，冲击接地阻抗主要表征其接地网特性；按通过接地极流入地中工频交流电流求得的接地阻抗称为工频接地阻抗，用来表征变电站接地网特性。本书凡未标明为冲击接地阻抗的，均指工频接地阻抗。

传统概念的接地电阻已被广泛接受和引用，而实际上它是有感抗分量的，对于面积较小的接地网，其电抗可以忽略，但对于220kV及以上变电站大型接地网，因其接地网面积较大，接地网本身的固有电抗 $j\omega L$ 数值上不可忽略，尤其是土壤电阻率较低地区的变电站，固有电抗 $j\omega L$ 所占比例更大一些。

例如，单根水平敷设的接地带， $\phi 20\text{mm}$ 的圆钢地极，感抗为 $0.28\Omega/\text{km}$ 。对于网格式形成的接地网，当面积一定时，其电抗和接地网形状有关，对于接地网面积为 10000m^2 ，其固有电抗值，正方形约为 0.006Ω ，基本上可以忽略，但对于 100000m^2 以上的接地网，其电抗值可达 0.07Ω ，就不能再忽略了。

国内外有将感性分量和阻性分量分别测试的研究和实践，从工程实际出发，这样的细分并没有太大意义，也无从使用，但概念上还是不应混淆，即通常所测到的是所谓的“模”，应称为接地阻抗。GB/T 17949.1—2000《接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量导则 第1部分：常规测量》中也是引用接地阻抗的定义。

“接地阻抗”是对接地网特性参数较为严谨的称谓，考虑到人们长期约定俗成的习惯，为了方便现场试验人员使用，兼顾现实中人们的习惯，除非特别指明，本书均采用“接地电阻”的称谓。

(2) 接地网的电气完整性(electric integrity of grounding connection)指接地网中应该接地的各种电气设备之间，接地网的各部分及与各设备之间的电气连接性，即直流电阻值，也称为电气导通性。

(3) 跨步电压或跨步电位差(step potential difference)指接地短路(故障)电流流过接地网时，人体两脚接触地面且两脚水平距离为1.0m处的两点间的电位差。

(4) 接触电压或接触电位差(touch potential difference)指接地短路(故障)电流流过

接地网时，人体两脚站在地面离设备水平距离为 1.0m 处与人手接触设备外壳、构架或墙壁离地面垂直距离 1.8m 处的两点间的电位差。

传统习惯上称为跨步电势和接触电势，但从定义和测试方法上看，称跨步电位差和接触电位差更准确，DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》也采用这个称谓。

(5) 场区地表电位梯度 (surface potential distribution) 指当接地短路电流或试验电流流过接地网时，被试接地网所在的场区地表面形成的电位梯度。

传统教科书上关于地表电位分布的定义，是指注入电流的电极附近地表电位的分布，测试的目的是检验系统发生短路接地时，短路点附近是否会出现伤及人身的跨步电势差。场区地表电位梯度测试的目的是通过测试曲线分析评估地下接地网的状况，测试方法也有所不同，是以整个场区为测试对象，而不是以短路点附近为对象。

(6) 转移电位 (diverting potential) 指当接地短路电流流过接地网时，由一端与接地网连接的金属导体传递的接地网对地电位。

基于接地网的重要性，在变电站和发电厂接地网设计中，对接地电阻、跨步电压和接触电压等特性参数值有严格规定，如果由于接地设计或施工不当，接地网不满足要求，泄流的作用便会大大削弱，接地网一旦发生故障，给电网、设备和人员的安全造成难以估算的损失。

接地网特性参数的现场测量，是接地网设计、建设和运行维护管理等全过程管理的重要环节，准确测量接地网特性参数可以达到以下目的：①通过测量接地电阻，了解接地网对故障电流和雷电流的泄流能力，是否满足运行和设计要求，并对计算值进行校核；②确定接地故障电流引起的地面电位升及在整个场区内电位变化，是否满足一、二次设备故障下安全运行的要求；③校核故障状态下跨步电压和接触电压水平，是否满足保障人员安全所设计的安全限值；④校核防雷保护接地网的有效性，是否满足设计和运行要求；⑤校核无线电发射机发射电路接地极的适用性；⑥取得建筑物防雷保护，建筑物内设备防雷保护有关人身安全所必需的设计数据。

长期以来，如何准确测量接地网特性参数值（主要是接地电阻、跨步电压和接触电压）一直都是困扰电力系统专业技术人员的技术难题。造成这种局面的原因有：①电网和变电站规模越来越大，带来接地网尺寸的增大，采用传统测量方法时放线长度将变得较长，如常规 220kV 变电站的放线长度就超过 1km，500kV 变电站则超过 2km，对于大型火电厂或水电站，接地网规模更大，放线长度甚至需达到 5~6km，对于如此长放线距离，如何制订合理的大型接地网的测试方案，尤其对于诸如山区或城市周围等某些地形条件不好的情形，以保证测量准确性，显得非常重要；②随着电网容量持续增大带来较强的工频和高频干扰，如电缆和金属管道等类似接地网延长线对接地网特性参数的测量带来了很大的干扰，难以保证测量结果的准确性。为此，需要通过对接地网特性参数测量进行研究和总结，解决传统测量方法上存在的一些的弊端，避免测量存在的认识误区，以提高接地网特性参数测量的科学性和正确性，对于提高接地网的健康水平，进而保障电网安全稳定运行具有重要意义。

1.3 接地网特性参数的取值要求

接地电阻、电气完整性、接触电压和跨步电压等作为接地网性能好坏宏观指标的接地网特性参数，GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》和 DL/T 621—1997 对其取值和安全限值均作了明确的规定。

1.3.1 接地电阻

1.3.1.1 有效接地系统和低电阻接地系统

有效接地系统和低电阻接地系统主要指 110kV 及以上变电站（换流站）和发电厂的大型接地网，是本书的重点。

(1) 接地电阻应符合式 (1-1) 要求

$$R \leq 2000 / I_G \quad (1-1)$$

式中 R ——考虑季节变化的最大接地电阻， Ω ；

I_G ——计算用经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值，A。

(2) 当接地网的接地电阻不符合式 (1-1) 要求时，可通过技术经济比较适当增大接地电阻。在符合 GB 50065—2011 第 4.3.3 条规定的前提下，接地网地电位升高可提高至 5kV。必要时，经专门计算，且采取的措施可确保人身安全和设备安全可靠运行时，地电位升高还可进一步提高。

接地电阻是接地网最重要的特性参数，但并不是唯一的、绝对的参数指标，它概要性地反映了接地网的状况，而且与接地网的面积和所在地的地质情况有密切的关系。长期以来人们对接地网的评价习惯只提接地电阻一项指标，认为只要接地电阻小于 0.5Ω 的接地网就是合格的，足以保证安全运行。因而在实际工作中，往往简单地追求这一指标，不惜任何代价，一定要把接地电阻降至 0.5Ω 以下。虽然 DL/T 621—1997 中取消了接地电阻小于 0.5Ω 的安全判据，近年来一些新的标准和文章也一直在宣贯和宣传着这样的思想：接地网的状况评估应综合考虑各项指标，绝对化地看待接地电阻一项指标是不可取的，但是片面强调接地电阻的想法和做法流传甚广，影响深远，不是一时能够转变纠正的。

对接地网的各项参数进行全面考核，根据各项指标综合判断接地网的状况，而不是像以往片面强调接地电阻或某一项指标，这是近年来国内外同行们的共识。接地电阻取值问题是一个系统工程，应按照 GB 50065—2011 和 DL/T 621—1997 等有关规范要求，综合变电站短路电流水平、地形地质状况、短路状态下接地网电位升高、场区电位差、对二次设备运行的影响、跨步电压、接触电压以及降阻技术经济分析等因素进行多维度评价，结合实际情况进行综合判断，以保证电力系统安全运行为中心出发点，辩证地处理实际问题。关于接地电阻值的探讨和研究还在继续，实践中应注意研究和积累经验。

1.3.1.2 不接地、谐振接地、谐振—低电阻接地和高电阻接地系统

接地电阻应符合式 (1-2) 要求，但应不大于 4Ω

$$R \leq \frac{120}{I_g} \quad (1-2)$$

式中 R ——考虑到季节变化的最大接地电阻, Ω ;

I_g ——计算用的接地网入地对称电流, A。

1.3.1.3 架空线路杆塔接地网

架空线路杆塔接地网主要指 110kV 及以上带架空避雷线的杆塔接地网, DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》要求, 线路杆塔的工频接地电阻不宜超过表 1-1 的数值。

表 1-1 有避雷线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 ($\Omega \cdot m$)	≤ 100	$> 100 \sim 500$	$> 500 \sim 1000$	$> 1000 \sim 2000$	> 2000
接地电阻 (Ω)	10	15	20	25	30

注 如土壤电阻率超过 $2000\Omega \cdot m$, 接地电阻很难降低到 30Ω 时, 可采用 6~8 根总长不超过 500m 的放射形接地体, 或采用连续伸长接地体, 接地电阻不受限制。

需要指出的是, 输电线路杆塔接地网主要是用于防雷接地, 应考察接地网的冲击暂态特性, 即冲击接地电阻, 由于目前冲击接地特性测量的技术成熟程度、测试设备实用化和判定标准等离现场实用还有一段距离, 工程实际中, 一般以工频接地电阻代替冲击接地电阻, 或者在工频接地电阻实测基础上, 考虑接地网的冲击接地系数进行修正。

1.3.2 跨步电压和接触电压

1.3.2.1 110kV 及以上有效接地系统和 6~35kV 低电阻接地系统发生单相接地或同点两相接地时, 发电厂和变电站接地网接触电压和跨步电压不应超过下列数值

$$U_t = \frac{174 + 0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (1-3)$$

$$U_s = \frac{174 + 0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (1-4)$$

式中 U_t ——接触电位差允许值,

U_s ——跨步电位差允许值, V;

ρ_s ——地表的电阻率, $\Omega \cdot m$;

C_s ——表层衰减系数;

t_s ——接地故障电流持续时间, s。 t_s 与接地网热稳定校验的短路等效持续时间 t_e 取相同值。

1.3.2.2 6~66kV 不接地、谐振接地、谐振—低电阻接地和高电阻接地的系统, 发生单相接地故障后, 当不迅速切除故障时, 发电厂和变电站接地网的接触电位差和跨步电位差不应超过下列数值

$$U_t = 50 + 0.05\rho_s C_s \quad (1-5)$$

$$U_s = 50 + 0.2\rho_s C_s \quad (1-6)$$

1.3.3 接地网电气完整性

运行中的发电厂、变电站(换流站)以及交、直流架空线路接地网应满足电气完整性要求, 接地极之间、接地极与接地线以及接地线与电气设备接地部位应整体连接良好, 运行中保持完整的电气通路, 严禁电气设备失地运行。