

# 电力系统

# 接地技术手册

王洪泽 杨丹 王梦云 编著

DIANLI XITONG  
JIEDI JISHU SHOUCHE



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电力系统 接地技术手册

王洪泽 杨丹 王梦云 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书搜集了国内外接地技术方面的科研成果和工程实用经验。全书共十二章。主要内容包括：接地起源及其发展简史，接地基本原理，均匀土壤接地电阻计算法，不均匀土壤接地电阻计算法，接触电位差和跨步电位差计算法，土壤电阻率及其测量，接地电阻测量，接触电压和跨步电压的测量，工频接地网的设计，防雷接地，接地装置腐蚀与防腐及接地网降阻方法。

本书实用性强，给出了大量接地计算公式及其应用实例。

此书可供电力行业从事接地设计、施工、试验检测、运行维护以及工程技术管理的人员使用，也可供其他行业从事电气工程和防雷接地工程的技术人员参考，还可供电力专业的大专院校的教师、博士生和研究生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统接地技术手册/王洪泽, 杨丹, 王梦云编著.  
北京: 中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-6084-3

I. 电… II. ①王…②杨…③王… III. 电力系统-接地保护-技术手册 IV. TM77-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 150116 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售



\*

2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 437 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
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



# 前 言

电力系统接地技术手册

接地是电力系统中不可缺少的电气安全技术。接地是否合理，不仅影响电力系统的正常运行，而且也影响电气设备和人身的安全。

目前，世界已进入电子信息时代，信息网络星罗棋布，已在各行各业中获得广泛的应用。而且，信息网络的安全稳定运行已受到人们的日益关注，因为雷电等自然灾害可能会造成信息网络工作瘫痪，甚至引起设备损坏和火灾。对于雷电等自然灾害除了采用接地之外，目前还没有更行之有效的手段。仅从这一点就可以看出接地的重要性。

本书系统地阐述了接地技术的基本原理，接地参数的计算方法，接地金属的腐蚀与防腐蚀的方法，各种降低接地电阻的方法，发电厂、变电站和配电系统接地以及建筑物防雷接地工程设计和检测的方法等，此外还介绍了国内外的接地新技术和工程实用经验。

本书可供电力行业从事接地设计、施工、试验检测、运行维护以及工程技术管理的人员使用，也可供其他行业从事电气工程和防雷接地工程的技术人员参考，还可供电力专业的大专院校的教师、博士生和研究生参考。

全书共计十二章：第一章的第一节和第二节由王梦云女士编写，第二章的第一节至第十章的第二节由王洪泽教授级高级工程师编写，第十一章的第一节至第十二章的第二节由杨丹高级工程师编写。

本书在编写过程中，得到了广西南宁迪祥雷防雷工程有限责任公司的大力支持，蒋璧徽女士和陆碧华女士打印了全部书稿，在此表示感谢。

在书稿编写过程中，参考并引用了国内外一些书籍、刊物、文献和资料，在此也向有关国内外大专院校、研究和出版单位及作者表示由衷的谢意。

由于水平有限，对接地技术这门学科理解欠深，书中谬误或欠妥之处在所难免，恳请读者不吝指正，以便再版时改正。

**王洪泽**

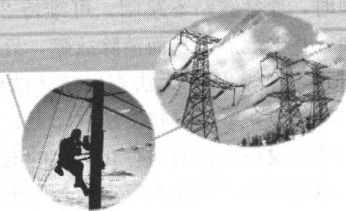
2007年5月于广西南宁市



# 目 录

前言	
<b>第一章 概论</b> .....	1
第一节 接地起源及其发展简史 .....	1
第二节 对接地技术的认识 .....	3
<b>第二章 接地基本原理</b> .....	4
第一节 接地基本概念 .....	4
第二节 接地计算基本原理 .....	6
第三节 接地电阻理论公式 .....	15
第四节 接地电阻实用公式导出方法 .....	17
第五节 互电阻公式及其应用 .....	23
<b>第三章 均匀土壤接地电阻算法</b> .....	30
第一节 水平电极接地电阻计算 .....	30
第二节 垂直电极接地电阻计算 .....	33
第三节 水平地网接地电阻计算 .....	38
第四节 复合接地极与复合接地网接地电阻计算 .....	41
第五节 利用系数法和集合系数法计算 并联电极接地电阻 .....	47
第六节 自然接地体接地电阻计算 .....	51
<b>第四章 不均匀土壤接地电阻算法</b> .....	56
第一节 两层土壤中垂直电极接地电阻计算 .....	56
第二节 两层土壤中水平电极接地电阻计算 .....	61
第三节 两层土壤中水平地网接地电阻计算 .....	67
第四节 两层土壤中复合地网接地电阻计算 .....	74
第五节 三层土壤接地电阻计算 .....	80
<b>第五章 接触电位差和跨步电位差算法</b> .....	89
第一节 均匀土壤接触与跨步电位差计算 .....	89
第二节 两层土壤地网最大接触电位差和 最大跨步电位差计算 .....	98
<b>第六章 土壤电阻率及其测量</b> .....	104
第一节 土壤电阻率概论 .....	104
第二节 土壤电阻率测量 .....	109
<b>第七章 接地电阻测量</b> .....	116
第一节 均匀土壤接地电阻测量原理 .....	116
第二节 地网接地电阻工程实用测量法 .....	126
第三节 大接地网接地电阻的抗干扰测量法 .....	131
<b>第八章 接触电压和跨步电压的测量</b> .....	140
第一节 基本原理与方法 .....	140
第二节 接触电压和跨步电压工程 实用测量法 .....	141
<b>第九章 工频接地网的设计</b> .....	142
第一节 设计接地网的基本要求和 设计标准 .....	142
第二节 等间距接地网设计方法 .....	148
第三节 不等间距接地网设计方法 .....	153
第四节 发电厂接地网设计 .....	157
第五节 110kV 及以上变电站接地网设计 .....	166
第六节 66kV 及以下变电站接地网设计 .....	171
第七节 配电站接地网设计 .....	174
第八节 零地电位接地网设计原理 及其应用 .....	178
<b>第十章 防雷接地</b> .....	180
第一节 冲击接地电阻概论 .....	180
第二节 雷电冲击接地电阻计算 .....	182
<b>第十一章 接地装置腐蚀与防腐</b> .....	192
第一节 金属腐蚀及防腐概论 .....	192
第二节 阴极保护原理及其设计 .....	194
<b>第十二章 接地网降阻方法</b> .....	201
第一节 接地网降阻原理与方法 .....	201
第二节 电解离子接地列阵降低接地电阻 .....	204
<b>参考文献</b> .....	209

# 第一章 概 论



## 第一节 接地起源及其发展简史

### 一、接地起源

接地的起源,据清华大学虞昊教授的研究,最早提出接地的是美国科学家B·富兰克林(Franklin)。富兰克林于1750年给英国皇家学会P·柯灵逊(Collinson)的信中阐述了他已完成的岗亭避雷针吸引天电的试验,该试验进行了接地。P·柯灵逊公布了富兰克林的试验成果,引起了欧洲电学研究者极大的重视,并先后进行了众多的类似富兰克林的岗亭避雷针接地吸引天电的试验。富兰克林接地的目的,是为了给闪电一个进入大地的顺畅自如的通道,以消散雷电流的巨大能量。那时尚未建立电压、电流强度和电阻的相关概念,因为欧姆定律是在其后70多年的1825年才提出来的。

1844年,S·F·B·摩尔斯(Morse)完成有线电报试验研究,并很快为欧、美各国所采用。该项技术要在两地传输信号,并利用大地作回路,送信机和受信机两端均需接地。1876年,A·G·贝尔(Bell)发明电话,两条电话线都架空布置。架空电话线网迅速发展,布满大地上空,但很快遭到了雷击,因此使用了电话避雷器,其一端接地。避雷器与避雷针的作用原理相似,是为了把架空网上的闪电能量泄散入大地,以保护电话设备。贝尔电话公司的研究所还开始了接地电极作用的研究,其目的主要是研究接地的抗干扰作用问题。

19世纪90年代,电力工业迅速发展,为了安全而提出了输电线路各种安全接地的措施,包括电气设备外壳接地。电气设备外壳接地主要目的是为了人身安全。例如,最初发电厂送电到用户要经过配电变压器降压,其二次侧的低压输电线对地是绝缘的(变压器二次侧中性点不接地)。但在运行中配电变压器一、二次侧之间的绝缘常发生损坏事故,导致一次侧的高电压窜入二次侧的低压线路。这类事故常造成人身触电伤亡事故,甚至引起火灾。因此,各国都实施配电

变压器二次侧中性点接地措施。这时接地点有可能出现大电流入地,使入地点的地面电位升高,并沿其周围地面出现较大的电位梯度,使得行人在接地点附近行走时遭跨步电位差的伤害。为了减少跨步电位差,就必须降低接地点周围地面的电位梯度,即降低地面单位长度土壤的电压降。要做到这点,最有效的方法就是降低接地电极的地电位升(IR),由此出现了接地电阻这个新概念。它与电学中导体的电阻的物理概念是完全不相同的。电学中导体的电阻指的是导体自身的有效电阻,而接地技术中接地电极的接地电阻主要是指接地电极周围土体的电阻。

### 二、接地及其安全标准发展简史

20世纪50年代以前,各国供电网主要采用中性点绝缘和高阻抗补偿系统。接地装置主要以单根或多根垂直接地极为主,水平直线主要起连接各种垂直接地极的作用。这种接地系统称为小电流接地系统。

20世纪50年代初期,接地装置的结构发生了重大变化。首先在美国实施了高电压电力变压器中性点直接接地系统,电网变成大接地电流系统。变电站接地网由以往传统的各自独立的接地系统变成统一的接地网。这样的接地网在变电站围墙内形成埋深较浅的闭合回路。最初考虑到经济性,只在手动操作的电气设备附近埋设水平电极以降低接触电压和跨步电压。在这些地方埋设锯齿形、歪曲形金属导体形成局部网,埋深0.15~0.3m,占地面积1.2m×1.2m,并与周围主环形网相连接。在重要的变电站,这种均压水平导体,甚至遍布变电站围墙内的整个场地。

德国、法国及其他欧洲国家当时不赞同美国的接地方法,仍坚持采用电力变压器中性点对地绝缘或中性点经消弧线圈补偿接地的电网。这属于小接地电流系统。其缺点是当电网输电线路一相接地时,或变电站内一相导线接地时,电气设备与其接地部分将出现危险的高电位。为人身安全起见,规定了在单相接地时接地装置的最高电位值。接地装置的最高地电位规定不超过125V(不规定接地电阻),容许出现的接触电压不超过65V。



这种中性点不接地或经消弧线圈接地系统的主要缺点是无法设置接地切断保护, 这样, 当发生单相接地时, 通常线路不跳闸, 可维持 2h 的故障运行, 以便查找接地点, 从而消除故障, 只有当在规定的运行时间, 例如 2h 仍无法查出接地故障地点时, 才人工拉闸停电, 继续寻找接地故障点。这样的规定容许在接地的设备上长时间存在一定的电位。此外, 小电流接地电网的缺点除人身安全外 (不能设置接地保护迅速切断电源), 还对电网向更高电压等级的发展不利, 例如对 110kV 电网的发展的经济性影响很大。因为 110kV 变压器中性点必须具有高绝缘水平, 造价增大。如果中性点接地, 就可以降低造价 (可降低变压器中性点绝缘水平)。

因此, 1954 年, 欧洲的瑞典首先采用美国的中性点接地方式。并规定地网的接地电位不超过 2000V。之后, 其他欧洲国家也相继实施了美国电网的接地方式。

1954 年, 美国 IEEE (美国电气和电子工程师学会) 委员会报告, 建议把接地电阻值作为接地装置安全效果的依据。推荐采用下列接地网接地电阻值: 对小发电厂和变电站 1~2Ω; 对配电站 5~10Ω。

前苏联接地安全标准的基础是接地电阻值。在大接地电流系统中接地网的接地电阻值不应超过 0.5Ω; 在小接地电流系统中接地装置与电压为 1kV 以下的电气设备共用时, 要求接地电阻  $R \leq 125/I$  (Ω), 接地装置仅用于 1kV 以上的电气设备时, 要求接地电阻  $R \leq 250/I$  (Ω), 其中  $I$  为接地故障电流, 单位为 A。

前苏联规程不要求验算地网接触电压和跨步电压的理由如下: 经验证明, 这些值的规定是极其困难的, 这是由于接触条件, 接地的特性, 接地网的电位分布, 接触的地点, 接触的持续时间等有很大的差别。接地网运行中的长期实际经验表明, 有可能用接地装置的接地电阻值的计算来代替接触与跨步电压的计算。因此在最不利情况下, 从理论观点来看是有缺点的, 但从实际观点来看, 可得到完全满意的解决。长期运行经验表明, 在前苏联还没有因为从实际问题出发的接地导则推荐的接地电阻安全标准的缺点而引起不幸的事故。

前苏联的接地安全标准规定接地电阻值的本质是规定接地电位, 因为其地电位值比较低, 因此满足接地电阻安全标准, 一般都能保证人身和设备的安全。但从理论上讲, 不验算接触电压和跨步电压始终是一个缺点。

1976 年, 美国接地导则只提出对接触电压和跨

步电压的规定, 对大接地电流系统, 美国接地导则的计算实例允许地电位为 10kV, 接地电阻为 10Ω。但导则没有明确规定地电位的上限值。对于小型配电变电站, 接地电阻要求 1~5Ω, 视当地条件而定。当实现 5Ω 有困难时, 可以放宽, 但接地电阻值不大于 25Ω。

美国新标准的优点是接地网经济效益好, 可节省大量的钢材。但从理论上讲, 也有缺点。这就是当变电站地网电位为 10kV 时, 变电站中对地绝缘的通信线、低压线及其设备的绝缘击穿强度是否也达到了 10kV 的问题。1961 年德国著名学者 Berger 已建议应对 16kV 及以上的变电站供电的低压回路应当在变电站场地内具有试验电压为 10kV 的绝缘。这不仅相对于配电变压器的内绝缘, 而且也相对于低压导线对地绝缘以及避雷器的击穿损坏电压等。但是, 提高低压电气设备的绝缘水平, 必然增加制造成本和产品价格。

从这个意义上讲, 美国的接地安全标准与前苏联的一样, 从理论上讲也是有缺点的。因此, 许多国家都不照搬美国的地电位安全标准 (地电位 10kV)。

例如, 加拿大学者和法国的学者并不完全赞成美国的接地安全标准, 仍规定地电位极限值。加拿大水电委员会, 规定大接地电流系统中, 地网的电位极限值为 5000V, 在经济上投资无困难的情况下, 该值还可以下降至 3000V (比 5000V 更安全)。当有快速切除的接地保护和场地铺有碎石层, 保证脚下有较高的过渡电阻的情况下, 允许的接触电压为 1000~1500V。

中国规程的接地安全标准, 在 1976 年以前是以地网的接地电阻值为基础, 基本上套用前苏联的标准。SDJ 8—1976《电力设备接地设计技术规程》作了两点改变, 一是规定大接地电流系统中地网电位的极限值为 2000V, 且  $R \leq 2000/I$  (Ω)。但同时规定接地电流大于 4000A 时,  $R \leq 0.5\Omega$ , 并认为  $R = 0.5\Omega$  合理; 二是引入接触电压和跨步电压的验算。尽管如此, 接地电阻值仍然是主要指标。

DL/T 621—1997《交流电气装置的接地》对接地电阻值要求更严格, 要求  $R = 2000/I$  (Ω), 当  $I > 4000A$  时, 去掉了  $R = 0.5\Omega$  合格的规定。

与世界各国的接地安全标准比较, 中国的地电位安全标准 2000V 是保守的。造成了大量钢材的浪费, 是不经济的。它本质上仍是以接地电阻为硬指标, 接触电压和跨步电压的验算只是个计算的辅助指标, 对地网设计的合格与否不起重要作用。这是中国接地安全标准从理论上讲的矛盾, 同时也是它的最大缺点,

有待进一步研究和改进。

## 第二节 对接地技术的认识

接地技术作为一门新兴的边缘学科，主要是建立在电学理论基础之上的。这门学科的兴起及其发展与电学比较，晚了近90年。

1964年，英国物理学家G·F·泰格（Tagg）指出：“当我与一些工程师谈及接地技术这方面的问题时，我感到吃惊的是熟悉这门学科的人似乎并不多。但是，仅从安全观点来看，这门学科是很重要的。”

1981年，美国学者G·夏里克（Sharik）指出：“接地技术不能列为一门精密的科学，在很大程度上它是一种理论科学、实践经验和个人心得的复合技术。”

日本学者高桥建彦指出：“与其说接地是理论，倒不如说是一种在现场必须反复进行实践的技术。这是因为大地的电气特性有许多不确定的因素，不能用一句话简单地地下结论，并且在很多场合不能纸上谈兵，只通过理论计算就得出结论。接地是越想深究其问题就越是深奥的技术，不是能轻易解决的一门学问。”

关于接地技术，还应当注意到日本千叶大学教授川濑太郎的一段论述：“乍一看接地似乎很简单，但实际上它涉及领域很广，在实践及理论方面也非常深奥。因此，有理由说，精通了接地技术的人就是一流的电气技术人员。”

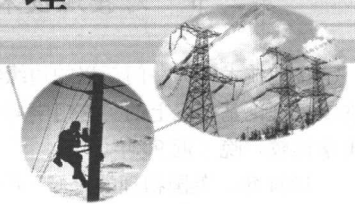
关于接地技术的重要性和实用性，日本学者高桥建彦有一段精辟的论述。他指出：人们在生活起居各方面享受着电带来的方便，甚至可以说人类离开了电，生活就比较困难。在要求电力、电子、通信设备安全而且稳定运行的现代，接地技术已经不只是在现场从事实际工作的人员所关心的事情，就是从设备业主到设计技术人员也都充分认识到它的重要性。接地作为一门学问，正在进入使其体系化的时代。

关于接地技术的发展和研究动向，中国学者也有一些论述。例如，武汉水利电力大学解广润教授指出：“电力系统接地技术是电工学术活动中十分活跃的一个分支，而且电子计算机的应用以及模拟技术的改进，也促进了接地技术研究的深入。进行接地计算除了需要电流场的基础外，还需要有波过程和电磁场的基础。由于计算的复杂，除了某些简单几何形状的电极的接地计算可以用解析法求解外，在地网形状复杂或大地结构复杂时，很难得出解析解。计算机数值分析给复杂条件下的接地计算创造了条件。然而为方便起见，工程实际中往往希望有较为简单的计算公式，因此根据计算机数值计算的大量结果拟合出各种复杂条件下的接地计算的实用公式是一个值得进行的工作。”

关于接地技术未来的展望，美国学者G·夏里克信心百倍地指出：“既然我们能研究成功十分复杂的电子电路，例如数字交换系统、高级计算机系统和空间技术，那么也必定能使接地技术成为科学的一个重要部分，而不再是一个不可捉摸的领域。”



## 第二章 接地基本原理



### 第一节 接地基本概念

接地的含义是为电路或系统提供一个参考的等电位点或面。如果接地指的是接大地，则这个参考点或面就是大地电位。接地的另一个含义从原理上看是为电流流入大地提供一条低电阻（或低阻抗）路径。从工程实用观点来看就是在线路或电气设备发生接地故障时为故障电流流回电源提供一条低电阻（或低阻抗）路径。

因此，接地就是把电气系统、电路或设备与大地连接，或者与范围广泛且能用来代替大地的等效金属导体连接（例如电子设备金属底座等）。其目的在于确定与之相连接的导体电位并使之大致维持在大地电位或维持在代替大地的等效金属导体的电位，以便传导电流来往于大地或等效金属导体之间。

接地是一种有目的永久或临时性的导电连接，通过这种连接而使电路或设备变成为接地的。

#### 一、接地

在电力系统中接地通常指的是接大地即将电力系统或电气设备的某一金属部分经金属接地线连接到接地电极上，称为接地。

电力系统中的接地，通常是指中性点或相线上某点的金属部分。而电气设备的接地通常情况下是指不带电的金属导体（一般为金属外壳或底座）。此外，不属于电气设备的导体即电气设备外的导体，例如，金属水管、风管、输油管及建筑物的金属构件经金属接地线与接地电极相连接，也称为接地。

接地的目的主要是防止人身触电伤亡、保证电力系统正常运行、保护输电线路和变配电设备以及用设备绝缘免遭损坏；预防火灾、防止雷击损坏设备和防止静电放电的危害等。

接地的作用主要是利用接地极把故障电流或雷电流快速自如地泄放进大地土壤中，以达到保护人身安全和电气设备安全的目的。

接地按其作用可分为功能性接地和保护性接地两

大类。

#### 1. 功能性接地

功能性接地可分为工作接地、逻辑接地、信号接地和屏蔽接地4种。

(1) 工作接地。为保证电力系统的正常运行，在电力系统中的适当地点进行的接地，称为工作接地。在交流系统中，适当的接地点一般为电气设备，例如变压器的中性点；在直流系统中还包括相线接地。

(2) 逻辑接地。电子设备为了获得稳定的参考电位，将电子设备中的适当金属部件，如金属底座等作为参考零电位，把需要获得零电位的电子器件接于该金属部件上，如金属底座等，这种接地称为逻辑接地。该基准电位不一定与大地相连接，所以它不一定是大地的零电位。

(3) 信号接地。为保证信号具有稳定的基准电位而设置的接地，称为信号接地。

(4) 屏蔽接地。将设备的金属外壳或金属网接地，以保护金属壳内或金属网内的电子设备不受外部的电磁干扰；或者使金属壳内或金属网内的电子设备不对外部电子设备引起干扰。这种接地称为屏蔽接地。法拉第笼就是最好的屏蔽设备。

#### 2. 保护性接地

保护性接地可分为保护接地、防雷接地、防静电接地和防电腐蚀接地4种。

(1) 保护接地。为防止电气设备绝缘损坏而使人身遭受触电危险，将与电气设备绝缘的金属外壳或构架与接地极做良好的连接，称为保护接地。接低压保护线（PE线）或接保护中性线（PEN线），也称为保护接地。停电检修时所采取的临时接地，也属于保护接地。

(2) 防雷接地。将雷电流导入大地，防止雷电伤人和财产受到损失而采用的接地，称为防雷接地。

(3) 防静电接地。将静电荷引入大地，防止由于静电积累对人体和设备受到损伤的接地，称为防静电接地。而油罐汽车后面拖地的铁链子也属于防静电

接地。

(4) 防电腐蚀接地。在地下埋设金属体作为牺牲阳极以达到保护与之连接的金属体，如输油金属管道等，称为防电蚀接地。牺牲阳极保护阴极的称为阴极保护。

## 二、接地四要素

一般地说，电力系统中构成接地必须满足如下四个条件：被接地体、接地线、接地电极和大地，如图 2-1 所示。被接地体、接地线、接地电极和大地构成接地四要素。

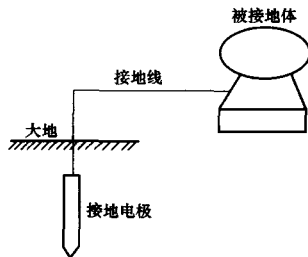


图 2-1 接地系统的构成四要素

### 1. 被接地体

被接地体可以是电气设备和电子设备的不带电的金属外壳，也可以是各种机械，如电动机的金属机座，也可以是变压器中性点，或低压用电线路的保护线（PE 线）或保护中性线（PEN 线）等。

为什么电气设备上的非载流的金属外壳需要接地？原因之一是为了在电气设备的对地绝缘损坏的状态下，限制设备的对地电压；原因之二是为了给故障电流建立有效的接地回路，从而触发过电流保护装置；原因之三是为了把设备上的泄漏电流或静电引导到大地中去。

### 2. 接地线

电气设备、设施的接地装置端子与接地极相互连接用的金属导体，称为接地线。

接地线与接地电极连接在一起的组合体称为接地装置。当接地线的另一端与被接地体连接起来之后，这样，由被接地体、接地装置、大地彼此相连接，就构成了一个接地回路。在这种条件下，才可以说被接地体已“接地”。

由此可知，“接地”这个概念是针对被接地体而言的，只有接地装置与任何一个金属性被接地体相互连接并构成一个整体之后才能形成接地。

### 3. 接地电极

在电学中，“电极”是指“电源端或汇流端”。在电池中，电极是指电流通路的正极和负极。在接地技术中，接地电极就像是在大地上设置的接线端子，该

接线端子称为接地电极，简称接地极。它看起来只有一个端子，实际上它也有两个端子，通常假设其另一个端子在无限远处。

由以上分析可知，所谓接地极可定义为：接地极就是埋入大地中并与大地紧密接触的金属导体。它是故障电流（含雷电流）进入大地的通路。

此外，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、金属管道和设备等称为自然接地极，也称自然接地体。

人工埋入大地中的专用接地金属导体称为人工接地极，也称人工接地体。

接地极的主要作用如下：

(1) 保持与大地的良好接触，以使与其相连接的电气设备的非载流金属部分保持大地电位。

(2) 为雷电流、线路或设备接地故障电流提供低电阻（或低阻抗）散流通道，将大量电流迅速地消散到大地中。

(3) 通过接地极把电气设备外壳上集聚的泄漏电荷或静电电荷引导入大地中。

(4) 在故障状态下，若供电系统的中线（已接地）连接到配电箱上时，其作用就是把故障电流引导到过电流保护装置上。若过电流保护装置能启动，就可以切断故障电源。

### 4. 大地

在接地四要素中，归纳起来，大地的作用主要有两点：一是作参考等电位面（正常情况为零电位面）；另一个是起导电和储存电荷的作用。

把大地当作一个巨大的储电器，就像把海洋当成巨大的储水器一样。大量的雨水和融冰水聚集起来，形成江河，流入大海中。由于海洋是巨大的储水器，再多的河水流入大海，大海也总是不可能装满。地上的电荷和电流，只要通过接地线与大地接通，电流总是要流入大地储电器中，由于大地很大，再多的电流也能储存起来，并且是等电位的。

大地测量学把海洋表面当作高度的参考面即零高度面，以确定大地各处的高度。接地技术把大地表面当作零电位面作为比较大地上带电体对地电压的参考值。两者的目的都是一样的，但所包含的物理意义则不相同。

## 三、大地假说

如果说接地技术这门学科的理论基础是电学的话，那么，大地就是接地技术这门学科的物质基础。为了建立接地技术这门学科，学者们对大地提出了三大假说，即大地导体无限大假说，大地零电位假说和

大地土壤均匀性假说。

### 1. 大地导体无限大假说

假设大地是一个非常大的导体：导体  $L$  的长度非常大，延伸至无限远处，即  $L \rightarrow \infty$ ；导体截面积  $S$  非常大，延伸至无限远处，即  $S \rightarrow \infty$ ；因此，大地的体积  $V$  也非常大，延伸至无限远处，即  $V \rightarrow \infty$ 。

为什么要假设大地是无穷大的呢？答案是为了数学分析的需要。例如，一个与地平面平齐的半球接地电极，其接地电阻可用下列积分求出

$$R = \int_r^{\infty} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2-1)$$

式中： $r$  为半球的半径。这个半径为  $r$  的半球接地电阻值  $R$  延伸至无穷远处是由上述积分证明的。

假若埋在大地中的半球电极，其半空间介质（大地土壤）不是无穷大的，就不能满足积分的边界条件，换言之，就不能积分。当然，也就不可能得出半球电极的接地电阻  $R = \rho/2\pi r$ 。

### 2. 大地零电位假说

假设大地的电位为零，并且大地是等电位体即其任一点处的电位都为零。

这样一来，由于已知大地的参考电位为零，因此，大地上空或经绝缘置于大地上的带电体的电位  $U$  对于大地而言也就是该带电体对大地的电位差  $V$ ，即

$$V = U - 0 = U \quad (2-2)$$

换言之，大地上带电体的电位也就是该带电体的对地电压。因此，基于式 (2-2)，在接地技术中将欧姆定律写成  $R = U/I$ ，就不能认定是错的，而是可以认同的。

### 3. 大地土壤均匀性假说

大地土壤结构和导电特性在各个方向上是不相同的，换句话说，虽然就某个局部范围内土壤结构可能大致相同，但就整个大地而言，土壤特性是不相同的，或者说土壤电阻率是不相同的。但是，为了解决标准的均匀土壤条件下接地参数的实用计算问题，学者们仍然假设大地土壤处处都是均匀的。这一假设可以大大地简化在均匀土壤条件下接地参数的计算。由此可见，均匀土壤条件下的接地计算方法是建立在理想化的大地均匀土壤模型之上的。

工程应用中，关于土壤均匀性的定义，美国标准 ANSI IEEE 80—1986 是这样描述的：“当土壤电阻率在侧面上及深度达到无穷大时保持恒定，就认为土壤是均匀的。”

美国的一些学者及工程技术界人士指出，这个定

义在工程实用中难以操作和判断，因为无穷大是一个抽象的数学概念，从定量上难以确定。因此，美国有关设计标准又作出了补充说明，指出若土壤接地网对角线长度的 3~5 倍距离（在地网边缘测得）内实测的土壤电阻率变化不大时，可认为该区域内的土壤基本上是均匀的。

这个补充说明得到了美国学者和工程技术界人士的广泛认可，也得到了世界各国接地学者和工程技术界人士的认同。

## 第二节 接地计算基本原理

### 一、基本假设

这里阐述的接地计算基本原理是建立在如下四个基本假设条件之上的：

- (1) 地中电流是直流的，接地电阻指的是直流电阻。
- (2) 大地无穷大，并且大地土壤是均匀性的。
- (3) 大地是导体，而且大地电位是零电位。
- (4) 接地极通过直流电流，它不随时间的变化而变化。

### 二、场和路分析方法

场的分析方法，其特点是以分布的观点观察、分析和求解的问题域。其理论基础是麦克斯韦方程组，内容是求解边值问题。

路的分析方法，其特点是以集中的观点观察、分析和求解的问题域。其理论基础是以基尔霍夫定律和欧姆定律为代表的经典理论。对恒定电流电路而言，欧姆定律是此种状态下最基本而又最重要的描述方程。

然而，单纯场的分析方法或路的分析方法都有其局限性，特别是场的分析方法，往往十分繁琐，因此，又出现了场路结合的方法，这样就可以在很大程度上改善解决问题的广度和深度。一般地说，用场的方法建立等效电路参数，形成等效子电路，再用路的方法进行稳态或瞬态仿真计算。当然，这也会涉及计算机数值分析问题。应当指出，如果有可能把场的问题转化为路的问题，则问题的解决将大为简化。这也是最受工程技术界人士欢迎的一种方法。

接地计算问题是个地中电流场问题，研究接地问题的学者总是尽可能地将场的问题转化为路的问题，再作分析计算。实践证明，这样研究问题的方法，不仅能满足接地工程实用计算的要求，而且也促进了接地技术这门边缘学科的发展。因为这样可以用电学中

的一些经典理论公式来解决接地的一些计算问题，从而获得事半功倍的效果。

### 三、基尔霍夫 (Kirchoff) 定律

在电学中基尔霍夫定律有两个：一个是基尔霍夫电流定律，另一个是基尔霍夫电压定律。

#### 1. 基尔霍夫电流定律

对电路中任一点而言，在任一瞬间流入节点的所有电流之和等于从该节点流出的电流之和，称为基尔霍夫电流定律。其数学表达式为

$$\sum_{i=1}^n I_i = I \quad (2-3)$$

式中： $I_i$  为恒定电流，其中  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

注意：式 (2-3) 中，电流  $I_i$  是有方向性的。电学中一般规定的参考方向是：背向节点的电流为正号，指向节点的为负号。但在接地技术中习惯上正好相反。现举一个实例来说明基尔霍夫电流定律在接地计算中的应用。设有一埋入大地中的半球电极，流入半球电极的电流为  $I$ ，流出半球电极的电流分别为  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ ，如图 2-2 所示。

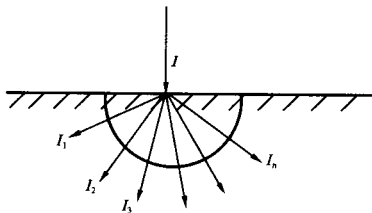


图 2-2 半球电极的电流分布示意图

在接地技术中，习惯上把进入接地极的电流  $I$  当作正号，而流出接地极的电流视为负号，因此，根据基尔霍夫电流定律即式 (2-3)，可得半球电极图 2-2 中的电流表达式为

$$I - \sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (2-4)$$

式 (2-4) 就是基尔霍夫电流定律用于单个接地极时的数学表达式，是式 (2-3) 在接地技术中应用的实例。

#### 2. 基尔霍夫电压定律

在任一瞬间，电路中任一回路的各支路电压的代数和为零，称为基尔霍夫电压定律。基尔霍夫电压定律的数学表达式为

$$\sum_{i=1}^n u_i = 0 \quad (2-5)$$

式中： $i$  为任一回路中电压的编号。

电压是有方向的，一般沿任一选择的方向为正，反之为负。

### 四、欧姆 (Ohm) 定律

上述“一、”中的四个基本假设条件为恒定电流电路中的欧姆定律用于接地回路接地电阻的计算创造了条件。但是，如图 2-2 所示，通过接地极的电流分别为  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ ，这时就必须根据基尔霍夫电流定律即根据式 (2-4) 得出

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2-6)$$

再注意到接地极通过电流  $I$  时所引起地电位升高为  $U$ ，其对于大地无限远点的电压  $V = U - 0 = U$ ，这样接地极的接地电阻  $R$  就可用欧姆定律求出

$$R = \frac{V}{I} = \frac{U}{I} \quad (2-7)$$

式中： $U$  为接地极的地电位 (升)， $V$ ； $I$  为通过接地极的电流， $A$ ； $R$  为接地极的接地电阻， $\Omega$ 。

由式 (2-7) 可知，接地极的接地电阻  $R$  在数量上等于接地极的电位 (升)  $U$  对通过接地极的电流  $I$  的比值。式 (2-7) 是接地技术中欧姆定律的基本表达式。

### 五、导体电阻公式

由电学可知，金属导体的电阻  $R$  与其截面积  $S$  及其长度  $L$  的关系式为

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (2-8)$$

其微分形式可化为

$$dR = \frac{\rho}{S} dx \quad (2-9)$$

式中： $dR$  是电阻的微小单元； $dx$  为长度的微分单元； $\rho$  为土壤电阻率。

式 (2-8) 与欧姆定律的表达式 (2-7) 是有联系的，它们可共同组合，从而导出欧姆定律的微分形式。但在接地计算中，往往总是单独使用式 (2-8) 或式 (2-9) 来计算接地极的接地电阻。

### 六、叠加原理

当线性电路中有两个及以上独立电源时，任一支路的响应 (电流或电压) 等于各独立电源作用下，分别在该支路上所产生的响应 (电流或电压) 的代数和，称为叠加原理。

应用叠加原理时应注意下列问题：

(1) 叠加原理只适用于线性电路，而且只适用于电流和电压。

(2) 让某一独立电源单独作用时，其余独立电源的激励应等于零，即将其余的理想电压源代之以短路 ( $U_i = 0$ )，其余的理想电流源代之以开路 ( $I_i = 0$ )；

而所有元件的参数和连接方式不变。

(3) 用叠加原理分析电路时, 各分电流或分电压的参考方向可以任意选择; 但最后必须以总电流或总电压的参考方向为准来确定各分电流和分电压的正、负。当分电流或分电压的参考方向与总电流或总电压的参考方向一致时取正, 反之取负。

(4) 用叠加原理分析电路时, 视具体情况和需要, 可将每个电源单独作用, 也可将部分电源作为一组单独作用。

在接地计算中, 独立电源通常是电流源, 因为接地是电流场问题。

### 七、静电比拟法

接地的地中电流所形成的电场是恒定电场, 它不随时间而变化, 因此, 它与静电场有相似之处。因为一般土壤(无岩石时)的平均土壤电阻率  $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ , 而纯铜的电阻率  $\rho = 1.75 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  (温度为  $20^\circ\text{C}$  时), 即土壤的平均电阻率为纯铜的 57 亿倍。由于金属的电阻率比土壤的电阻率小得多, 所以, 可以认为金属接地极自身的电阻可以忽略, 而其电压降也可忽略。这样一来, 就可以认为接地电极与土壤界面上的电流密度矢量或电流线垂直于界面。这与静电场电位移矢量或电位垂直于电极表面的情况相似。这表明接地的电流场与静电场具有相似性, 即具备可比拟的条件。

由于接地的电流场与静电场这两种场都是在电极以外的区域, 其电位函数都符合拉普拉斯方程。假如接地的电流场和静电场又有同样的边界条件, 则根据唯一性定理, 两者的解就应当有相似的形式。

以上分析就是接地的电流场和静电场可比拟的理论依据。下面从定量上分析电流场和静电场的相似关系。

根据高斯定理可知, 穿过任一闭合表面的电位移矢量等于包围在此表面所限定的空间内的电荷  $Q$ , 即

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{s} = Q \quad (2-10)$$

又有欧姆定律的微分形式

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{s} = \oint \gamma \vec{E} \cdot d\vec{s} = I \quad (2-11)$$

$$\text{由电容定义} \quad C = Q/U \quad (2-12)$$

$$\text{由电阻定义} \quad R = U/I \quad (2-13)$$

式(2-12)和式(2-13)联合求解, 消去  $U$ , 可得

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{Q}{I} \quad (2-14)$$

将式(2-10)和式(2-11)代入式(2-14), 可得

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{\oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{s}}{\oint \gamma \vec{E} \cdot d\vec{s}} \quad (2-15)$$

当大地土壤电导率  $\gamma = 1/\rho$  相同时(各向同性), 则式(2-15)可改写成下列形式

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{\epsilon \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}}{\gamma \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}} = \frac{1}{C} \cdot \frac{\epsilon}{\gamma} = \frac{\epsilon \rho}{C} \quad (2-16)$$

其中  $\epsilon = \frac{\epsilon_0}{4\pi \times 9 \times 10^4}$

式中:  $R$  为接地极的接地电阻,  $\Omega$ ;  $C$  为接地极的电容,  $\text{F}$ ;  $\rho$  为土壤电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $\epsilon$  为大地介电系数,  $\text{F/m}$ ;  $\epsilon_0$  为大地相对介电系数。

由式(2-16)可看出, 接地极的接地电阻与其电容成反比, 比例系数  $\rho$  和  $\epsilon$  决定于大地土壤电特性。式(2-16)说明地中传导电流和位移电流具有相似性, 而利用此特性可使接地电阻的计算大为简化, 因为可以利用静电学中电极的电容公式来直接计算接地电极的接地电阻。

### 八、镜像法

#### 1. 物理概念及定义

镜像法是与空间联系在一起的。空间分“半空间”和“全空间”两种。静电学中分析问题时所使用的空间为全空间, 而分析接地问题时使用半空间。这是因为接地极是埋在半空间之内的。

全空间是指各方向均趋于无穷大。图 2-3 (a) 是指一个球处于三维全空间的情况, 整个空间充满了同一种介电物质。半空间, 顾名思义, 仅为全空间的一半。图 2-3 (b) 为半球电极埋于大地半空间内的情况, 下半空间充满的介质为土壤, 而上半空间充满的介质为空气。上下两个半空间的介质是不相同的。

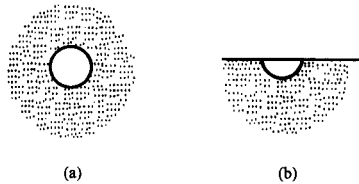


图 2-3 全空间与半空间

(a) 全空间; (b) 半空间

接地计算时, 对于处于半空间中的接地体, 如图

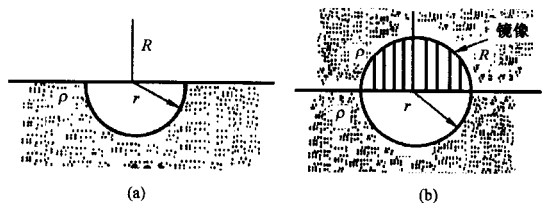


图 2-4 镜像法

(a) 半空间的场合; (b) 全空间的场合

2-4 (a) 所示, 其所处的土壤介质为  $\rho$ , 为了计算的需要, 将半球所处的空间增大一倍, 同时半球电极也增大一倍, 变成全球, 如图 2-4 (b) 所示, 这时, 由于半球变成全球, 上半空间的介质也变成  $\rho$ , 即整个全空间在球体周围都布满了同一介质  $\rho$ , 即变成了图 2-4 (b)。而图 2-4 (b) 与图 2-3 (a) 在性质和形式上都是一样的。

这种将接地电极及其半空间扩大为全空间, 并且把全空间看成同一介质的方法, 称为镜像法。

从图 2-4 (a) 和 (b) 可见, 将接地电极所处的半空间扩大为全空间时, 不光是充满同一介质的空间扩大了一倍, 而且接地电极的体积也扩大了一倍。

### 2. 镜像法的数学分析

以半球电极为例来分析接地电极在半空间的接地电阻与在全空间的接地电阻的关系。图 2-4 (a) 所示为半球电极在半空间的情况, 介质为土壤电阻率  $\rho$ , 设该半球电极的接地电阻为  $R$ ; 现在, 用镜像法把图 2-4 (a) 的半空间扩大为全空间, 并让全空间都充满介质  $\rho$ , 如图 2-4 (b) 所示。设全空间中球的接地电阻为  $R_0$ , 现在来分析  $R$  与  $R_0$  之间的数量关系。

由于将半球电极所处的半空间扩大为全空间时, 不但充满同一介质  $\rho$  的空间扩大了一倍, 而且接地电极的体积也扩大了一倍, 因此, 全空间中球的接地电阻  $R_0$  将比半空间中半球电极的接地电阻  $R$  小一半, 即有  $R_0 = 0.5R$ , 该式可改写成下列形式

$$R = 2R_0 \quad (2-17)$$

式中:  $R$  为半球电极在半空间中的接地电阻;  $R_0$  为同一个半径的球电极在全空间中的接地电阻。

显然, 如果已知球电极在全空间的接地电阻  $R_0$ , 则半球电极在半空间中的接地电阻  $R$  就可由式 (2-17) 求出。

请注意, 式 (2-17) 虽然是由半球接地电极导出的, 但它对其他形状的接地电极也是适用的, 它具有通用性的特点。

### 3. 镜像法公式的应用

仍用半球电极的接地电阻计算为例来说明镜像法公式 (2-17) 的应用问题。由静电学已知全空间中球电极的电容为

$$C = 4\pi\epsilon r \quad (2-18)$$

为了求出全空间中球电极的接地电阻  $R_0$ , 将式 (2-18) 代入“七、”中的式 (2-16), 可得

$$R_0 = \frac{\epsilon\rho}{C} = \frac{\epsilon\rho}{4\pi\epsilon r} = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (2-19)$$

为了确定半空间中半球电极的接地电阻  $R$ , 可将式 (2-19) 代入镜像法公式 (2-17) 中, 得半球电极的接地电阻为

$$R = 2R_0 = 2 \times \frac{\rho}{4\pi r} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2-20)$$

式 (2-20) 就是半球电极接地电阻的理论公式。

## 九、平均电位法

平均电位法是美国学者 H·B·德怀特 (Dwight) 于 1936 年提出的。应指出, 这里介绍的平均电位法是全空间的。

在阐述平均电位法的基本原理及其分析方法之前, 先阐述空间点电流源 (简称点源) 和线电流源 (简称线源) 磁场中点电位的计算问题。这是平均电位法的理论基础, 然后再阐述空间线源磁场中直线电位的计算问题。须知在接地计算中, 平均电位法研究和分析的对象就是线源磁场中线源以外直导体上电位的计算问题, 也包括线源的载流直导体自身电位的计算问题。

### 1. 点源磁场中的点电位

设空间有点源, 见图 2-5, 其电流为  $I$ , 在距离点源外的距离为  $D$  处有点  $a$ , 则当无穷大空间的介质

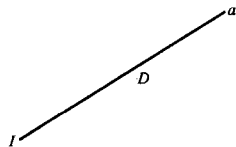


图 2-5 点源磁场中  $a$  点电位

为  $\rho$  时, 点电源磁场在点  $a$  引起的电位为

$$U_a = \frac{I\rho}{4\pi D} \quad (2-21)$$

由式 (2-21) 可计算全空间中两个点源的互电阻  $R_{12}$ , 即

$$R_{12} = \frac{\rho}{4\pi D} \quad (2-22)$$

### 2. 线源磁场中的点电位

设有一直线, 其长度为  $l$ , 通过的电流为  $I$ , 如图 2-6 (a) 所示。设直线上沿其长度的电流密度相同且电流密度  $\delta = I/l$  求距离直线  $D$  的  $a$  点处的电位  $U_a$ 。

在直线上取一微小单元  $dl$ , 注意到电位公式 (2-21), 直线上点源 ( $dl$  上的电源) 在直线外  $a$  点引起的电位为各微元  $dl$  在  $a$  点所引起的电位之代数和, 即对  $l$  全长的积分为

$$U_a = \frac{\rho}{4\pi} \int_l \frac{dl}{D} = \frac{I\rho}{4\pi l} \cdot \int_l \frac{dl}{D} \quad (2-23)$$



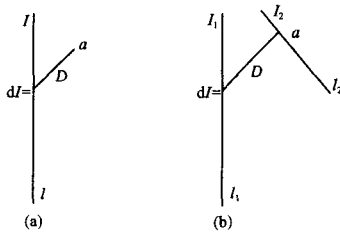


图 2-6 解释平均电位法的示意图

(a) 单条导线示意图; (b) 双条导线示意图

式中:  $U_a$  为线电流源在  $a$  点引起的电位,  $V$ ;  $\delta$  为线电流密度,  $A/m$ 。

线源  $l$  (或载流导体  $l$ ) 与  $a$  点的互电阻为

$$R_a = \frac{\rho}{4\pi l} \int_l \frac{dl}{D} \quad (2-24)$$

式 (2-23) 可计算线源在全空间的电位分布和任意两点之间的电位差, 而式 (2-24) 可计算线源在全空间任一点的互电阻。

### 3. 平均电位法

平均电位法是建立在如下 4 个假设条件之上的:

(1) 流经所有导线的电流密度相同即沿导线上的电流密度是常数 (实际上电流密度不是常数, 而是两端较大, 中间较小)。

(2) 电流集中在导线的中心轴线上。

(3) 忽略导体端部散流效应的影响。

(4) 第二个导体对第一个导体的感应电位等于前者磁场对后者磁场所有点引起电位数值上的平均值 (平均电位法由此得名)。

第 (4) 个假设, 实际上也就是平均电位法的定义。

设有两条细长导线, 长度分别为  $l_1$  和  $l_2$ , 通过的电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 如图 2-6 (b) 所示。

导线  $l_1$  的电流  $I_1$  在导线  $l_2$  上  $a$  点所引起的电位  $U_{a1}$  可由式 (2-23) 求出

$$U_{a1} = \frac{I_1 \rho}{4\pi l_1} \int_{l_1} \frac{dl_1}{D} \quad (2-25)$$

为了确定导线  $l_1$  上的电流  $I_1$  在导线  $l_2$  上引起的电位, 必须将感应导线  $l_2$  上所有的电位进行积分, 即

$$U_{a1} = \frac{I_1 \rho}{4\pi l_1} \int_{l_2} \int_{l_1} \frac{dl_1}{D} dl_2 \quad (2-26)$$

再将所得结果  $U_{a1}$ , 除以导线长度  $l_2$ , 即  $U_{a1}/l_2$ , 就可得出导线  $l_1$  中电流  $I_1$  在导线  $l_2$  上感应的电位  $U_{21}$ , 即

$$U_{21} = \frac{I_1 \rho}{4\pi l_1 l_2} \int_{l_2} \int_{l_1} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{D} \quad (2-27)$$

导线  $l_1$  和导线  $l_2$  之间的互电阻  $R_{21}$  (全空间互电阻) 可由接地的欧姆定律即式 (2-7) 求出

$$R_{21} = \frac{U_{21}}{I_1} = \frac{\rho}{4\pi l_1 l_2} \int_{l_2} \int_{l_1} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{D} \quad (2-28)$$

上式是两条导线在全空间任意位置时互电阻的一般表达式。计算接地电阻时应变换为半空间的互电阻。这时其值应增大一倍。

### 十、互电阻的互换原理

两个接地极之间彼此的互电阻是相等的, 因此可以互相交换, 这一互换原则, 称为互电阻的互换原理。

以图 2-6 (b) 中两条导线在无穷大空间内任意布置时的互电阻为例来加以说明。

导线  $l_1$  电流  $I_1$  对导线  $l_2$  所引起的互电阻  $R_{21}$  已由上节导出式 (2-28)。同理, 导线  $l_2$  电流  $I_2$  对导线  $l_1$  所引起的互电阻  $R_{12}$ , 也可用上述的平均电位法导出

$$R_{12} = \frac{\rho}{4\pi l_2 l_1} \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_2 \cdot dl_1}{D} \quad (2-29)$$

比较式 (2-28) 和式 (2-29) 两个重积分公式可知, 尽管两式中各参数在排列上有差异, 但实际上是彼此相等的, 即有

$$R_{21} = R_{12} \quad (2-30)$$

式 (2-30) 表明: 两个电极之间的互电阻具有互换性, 这就是互电阻的互换原理。式 (2-28) 和式 (2-29) 用于半空间时, 考虑镜像影响时,  $R_{12}$  和  $R_{21}$  的值应加大一倍。两个接地极的互电阻的互换原理看起来很简单, 但其实意义很大。例如, 在求解麦克斯韦方程组时, 利用两接地极的互电阻的互换原理, 互电阻的计算工作量就可以减少一半。

### 十一、中点电位法

首先要指出, 这里介绍的中点电位法是全空间的。

中点电位法应遵循下列三个假设条件: 1) 流经导线的电流密度相同即沿导线上的电流密度是常数; 2) 电流集中在导线的中心轴线上; 3) 忽略导体端部散流的影响。

换句话说, 中点电位法与平均电位法的前三个假设条件基本上是相同的。因此, 对于图 2-6 (a) 来说, 载流导线  $l$  之外空间任一点  $a$  的电位仅对  $l$  全长积分, 从而得出  $U_a$ , 即式 (2-31)

$$U_a = \frac{I \rho}{4\pi l} \int_l \frac{dl}{D} \quad (2-31)$$

对于图 2-6 (b) 的情况, 用中点法求导线  $l_1$  对导线  $l_2$  的互电阻时, 可以不对导线  $l_2$  沿全长积分,

而只取导线  $l_2$  中点的电位来代替导体  $l_2$  的电位。更具体地说, 对图 2-6 (b) 而言, 就是全导线  $l_2$  上的  $a$  点移至其中间的位置处。

由此可知, 中点电位法与平均电位法比较可减少一次积分运算即不进行二重积分, 所以它比平均电位法更简单, 而两种电位法的计算结果, 无论是计算互电阻或导线的自身电阻 (接地电阻), 通常相差不大。

关于中点电位法和平均电位法在接地电阻计算中的应用问题, 将留到后面的第四节中再做详细介绍。

## 十二、复杂接地极的麦克斯韦 (Maxwell) 方程组

应用中电流的磁场与静电场定律相似的原理, 可以进行复杂接地极接地电阻计算。具体方法是根据静电相似原理建立复杂接地极的麦克斯韦方程组为

$$\begin{aligned} U_1 &= R_{11} I_1 + R_{12} I_2 + \cdots + R_{1n} I_n \\ U_2 &= R_{21} I_1 + R_{22} I_2 + \cdots + R_{2n} I_n \\ &\dots\dots\dots \\ U_k &= R_{k1} I_1 + R_{k2} I_2 + \cdots + R_{kn} I_n \\ U_n &= R_{n1} I_1 + R_{n2} I_2 + \cdots + R_{nn} I_n \end{aligned} \quad (2-32)$$

式中:  $R_{kk}$  为接地极的自电阻 ( $k=i$  时) 和互电阻 ( $k \neq i$  时);  $I_i$  为各接地元件的电流 ( $i=1, 2, \dots, n$ ); 自然数  $k \leq n$ 。

根据互电阻的互换原理, 即式 (2-30), 两个互电阻  $R_{ki}$  与  $R_{ik}$  具有互换特性, 即

$$R_{ki} = R_{ik} (i \neq k \text{ 时}) \quad (2-33)$$

为了求解方程组 (2-32), 补充下列条件

$$U_1 = U_2 = \cdots = U_k \cdots = U_n = U \quad (2-34)$$

在接地计算中通常都忽略导体元件自身的电压降, 因此, 各接地元件并联时有  $U = U_k$ , 故条件式 (2-34) 成立。这就表明, 把  $n$  个接地元件的并联当成是等电位联结。

解方程组 (2-32), 可求出各接地元件中通过的电流  $I_i$ , 然后根据基尔霍夫定律求出总电流  $I$ , 并由方程组 (2-32) 求出电位  $U$ , 再由接地的欧姆定律式 (2-7) 求出  $n$  个并联接地元件的总接地电阻  $R$ 。通常实用计算中是任意假设一个  $U$  值, 然后解方程组 (2-32) 计算电流  $I_i$ , 最后计算  $R = U/I$ , 其中  $I = \sum_{i=1}^n I_i$ , 在这种情况下, 就不再计算  $U$  值。

这样,  $n$  个接地元件并联所构成的复杂接地极 (网) 接地电阻的计算问题, 就归结为各接地元件的自电阻和各相关元件互电阻的计算以及求解麦克斯韦方程组 (2-32) 的问题。

用式 (2-32) ~ 式 (2-34) 计算复杂接地极的接地电阻被认为是精确算法。

## 十三、麦克斯韦方程组的近似解法

当接地单元数  $n > 3$  时, 方程组 (2-32) 没有解析解, 通常须借助于计算机求解, 特别是当  $n$  值很大时。为此, 假设所有接地元件的电流密度相等。设  $\delta$  为电流密度, 则有  $\delta = I/L$ , 其中  $I$  为进入组合接地极 (网) 的总电流,  $L$  为所有接地元件的总长度。这样, 方程组 (2-32) 中注脚为  $k$  的电位单元可改写下列形式

$$U_k = \frac{I}{L} (R_{k1} l_1 + R_{k2} l_2 + \cdots + R_{kn} l_n) = \frac{I}{L} \sum_{i=1}^n R_{ki} l_i \quad (2-35)$$

式中:  $l_i$  为各接地元件的长度;  $L$  为  $n$  根元件的总长度,  $L = \sum_{i=1}^n l_i$ 。

注意到式 (2-34), 则方程组 (2-32) 可写成下列形式

$$U = \frac{I}{nL} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n R_{ki} l_i \quad (2-36)$$

根据接地的欧姆定律式 (2-7), 可得组合接地极 (网) 的总接地电阻为

$$R = \frac{1}{nL} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n R_{ki} l_i \quad (2-37)$$

这样, 复杂接地极 (网) 接地电阻  $R$  的计算问题, 由求解麦克斯韦方程组的问题, 变成了两次求和问题。这样求得的接地电阻值所引起的计算误差一般不超过 5%, 这是工程计算可以接受的。其优点是可减少计算的工作量。

## 十四、电流屏蔽效应

在电学中, 两个导体的电阻  $R_{10}$  和  $R_{20}$  并联时, 其并联接地电阻  $R_b$  可按下式计算

$$R_b = \frac{R_{10} R_{20}}{R_{10} + R_{20}} \quad (2-38)$$

$$\text{当 } R_{10} = R_{20} \text{ 时, 有 } R_b = \frac{1}{2} R_{10} = \frac{1}{2} R_{20} \quad (2-39)$$

在接地计算中, 两个接地极的接地电阻  $R_1$  和  $R_2$  的并联接地电阻可由麦克斯韦方程组和欧姆定律导出为

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} > \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-40)$$

当  $R_1 = R_2$  时, 由式 (2-40) 得

$$R = \frac{1}{2} (R_1 + R_{12}) = \frac{1}{2} (R_2 + R_{12}) > \frac{1}{2} R_1 = \frac{1}{2} R_2 \quad (2-41)$$

由式(2-40)和式(2-41)可知,接地极的并联接地电阻值 $R$ 不服从电学中电阻并联的原理,其计算值总是大于用电学方法求出的并联值。从式(2-41)可见,这是由于接地电阻并联值多出了一个互电阻 $R_{12}$ 的缘故。从物理意义上看,就是出现了电流屏蔽的缘故,这种现象称为电流屏蔽效应。

电流屏蔽效应是并联接地极的各散流电流出现彼此排挤的现象,如图2-7所示。

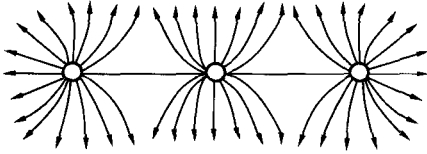


图2-7 多根接地极的电流屏蔽

各电极的距离越近,相互间电流的影响越大。由于各接地极的电流向大地散流时,在空间上电流互相排挤,谁都不可能像单独占用空间时那样自由顺畅地散流,前进中的阻力增大,因而接地电阻并联值增大。

从物理意义上看,屏蔽效应是由于电流通过各接地极时,各接地极周围附近的电场互相重叠而引起的。由于电场重叠,各接地极周围的电场都发生了畸变,电流密度也发生畸变,使得每个接地极散流的阻力增大即散流电阻(接地电阻)增大,所以并联时总的接地电阻增大。以两个接地极的并联为例,这增加的阻力就是互电阻 $R_{12}$ 或 $R_{21}$ 。很显然,在同一空间内的并联接地极越多,互电阻 $R_{ki}$ 就越多,阻力也就越大。尽管如此,但总的接地电阻 $R$ 始终是随并联接地极数量的增加而下降。在这一点上,它与电学中并联导体电阻的下降特性仍然是一致的,只是其下降特性曲线比电学中并联电阻的下降特性更缓慢些。

### 十五、利用系数法

单个接地极的接地电阻值往往达不到接地工程所要求的接地电阻值。因此,为了降低接地装置的接地电阻,通常采用两个或多个接地极并联。两个接地极并联时,其并联接地电阻可用式(2-40)作计算。三个接地极并联时,其并联接地电阻 $R$ 可用下列公式计算

$$R = \frac{1}{G} (R_1 R_2 R_3 + 2R_{21} R_{23} R_{31} - R_1 R_{23}^2 - R_2 R_{13}^2 - R_3 R_{12}^2) \quad (2-42)$$

$$\text{其中 } G = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3 - R_{21}^2 - R_{23}^2 - R_{31}^2 + 2(R_{21} R_{23} + R_{23} R_{13} + R_{21} R_{13} - R_1 R_{23} - R_2 R_{13} - R_3 R_{21})$$

式中: $R$ 为三个接地极的并联接地电阻; $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 为接地极的自电阻;其余为相关接地极的互电阻。

当并联接地极的数目 $n > 3$ 时,由麦克斯韦方程组(2-32)已无法导出解析公式,而必须借助于计算机解方程组(2-32)。

但无论是麦克斯韦方程组的精确解法或近似解法都是十分麻烦的。因此,为实用目的,学者们提出了一些简化算法,其中包括利用系数法。这种方法是苏联学者于20世纪30年代提出的,50年代在中国获得广泛应用。下面介绍利用系数法的基本原理。

忽略屏蔽效应影响即假设 $n$ 个并联接地极的互电阻 $R_{ki} = 0 (k \neq i)$ 时,这时 $n$ 个相同的接地极的理想并联接地电阻 $R_0$ 由下式计算

$$R_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} = \frac{R_1}{n} \quad (2-43)$$

式中: $R_i$ 为各接地极的自电阻即接地电阻; $R_1$ 为单个接地极的接地电阻。

考虑屏蔽效应影响即假设 $n$ 个并联接地极的互电阻 $R_{ki} \neq 0 (k \neq i)$ 时,这时 $n$ 个并联接地极的并联接地电阻为 $R$ , $R$ 为真实的并联接地电阻。

然后,设理想接地电阻 $R_0$ 对真实接地电阻 $R$ 的比值为 $\eta$ ,即

$$\eta = R_0 / R \quad (2-44)$$

最后,将比值 $\eta$ 定义为利用系数。因 $R_0 < R$ ,故利用系数 $\eta < 1$ 。将 $R_0 = R_1/n$ 代入式(2-44)得

$$\eta = \frac{R_1}{nR} \quad (2-45)$$

对于各种接地极,单个接地极的接地电阻 $R_1$ 由有关公式求出,当同样接地极多根并联布置时, $R$ 可由麦克斯韦方程组(2-32)和欧姆定律即式(2-7)求出,这样利用系数 $\eta$ 就可以求出。 $\eta$ 值可列表或画成曲线供工程技术人员使用。这时将式(2-45)改写成下列形式

$$R = \frac{R_1}{n\eta} \quad (2-46)$$

利用系数 $\eta$ 的特性:1)  $\eta$ 值始终小于1;2) 接地间的间距越小, $\eta$ 值变小;3) 间距变大时, $\eta$ 值变大,但总是小于1。

### 十六、集合系数法

集合系数和利用系数一样,是并联接地极的特征参数,从物理意义上看,都是为了计入电流屏蔽影响而人为引入的参数。从数学观点来看,集合系数与利用系数互为倒数关系。如果用 $\lambda$ 表示集合系数,则有

$$\lambda = 1/\eta \quad (2-47)$$

将 $\lambda$ 代入式(2-46)可得

$$R = \frac{R_1 \lambda}{n} \quad (2-48)$$