

接地技术

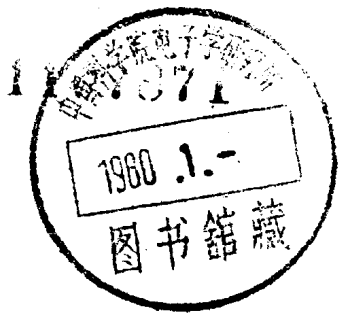
曾永林

水利电力出版社

73.2711
652

接地技术

曾永林



水利电力出版社

接 地 技 术

曾 永 林

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10 $\frac{1}{2}$ 印张 230千字
1979年10月第一版 1979年10月北京第一次印刷

印数 00001—58580册 每册 0.85元

书号 15143·3490

DS93/02
内 容 提 要

本书共四篇(十四章)。第一篇接地电阻；第二篇均衡电位接地；第三篇反击过电压及保护；第四篇接地电阻的测量。

本书可供电力部门工程技术人员从事接地工程设计、施工和运行工作的参考，也可供其它部门从事防雷接地工作的人员参考。

前 言

自从《电力设备接地设计技术规程》SDJ8-76（试行）由水利电力部颁发出版以来，对于促进电能的安全生产，起了积极的作用。为了更好地在接地工程中理解和执行规程，特别是在高电阻率地区进行接地设计时，能够结合接地工程的具体情况，做到安全可靠、技术先进、经济合理，根据接地规程的原则，本书具体地阐明了接地的方法和内容。

在编写本书时，作者注意到：

1. 尽可能反映我国在接地技术方面的先进水平；
2. 着重于接地工程的实际应用，同时也对接地的基本概念作必要的阐述；
3. 本书强调技术结论或设计要点，以便于在接地工程中应用。

本书主要是作为从事电力工程工作的技术人员接地技术参考书，也可以供其它部门从事防雷接地工作的同志参考。

书稿在编写过程中，曾得到湖南省水利电力勘测设计院、湖南省沙田水力发电厂、湖南省电力中心试验研究所等单位的大力支持，为书稿提供了许多现场实践和试验资料；武汉水利电力学院解广润同志曾给予多次指导；北京电力设计院刘继同志和武汉水利电力学院胡世雄同志审阅了全部书稿，并提出了许多正确的修改意见，对于他们的辛勤劳动，作者表示感谢。

本书虽用个人名义署名，但实际上书中所涉及到的内容，是有关单位从事接地工程设计、科研、施工和运行的科技人员、高等院校的教师以及工人同志的劳动成果。作者仅在均衡电位接地、接地网的冲击接地计算、反击过电压以及接地电阻测量的异常等方面，提出了一些见解。限于水平，难免有错误和不妥之处，如蒙读者指正，请随时将意见寄湖南省水利电力勘测设计院。

作 者

1978年9月12日于长沙

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 接 地 电 阻

第一章 大地的电学性质	5
第一节 地的两种电性	5
第二节 地的电阻率	11
第三节 水的电阻率	19
第二章 工频接地电阻	22
第一节 接地电阻的物理概念	22
第二节 地电阻率均匀时的接地电阻	30
第三节 地电阻率非均匀时的接地电阻	43
第四节 人工改善地电阻率的接地电阻	47
第五节 水下接地网的接地电阻	66
第六节 深埋接地体的接地电阻	72
第七节 自然接地体的接地电阻	77
第三章 冲击接地电阻	86
第一节 冲击接地电阻的物理概念	86
第二节 波速、波阻和冲击接地电阻的估算方法	95
第三节 冲击电位分布	106
第四节 水平接地体上的波过程	111
第五节 引外接地	117

第二篇 均 衡 电 位 接 地

第四章 概述	120
--------------	-----

第一节	问题的提出	120
第二节	对接地电位升高的限制及均衡电位接地的采用	122
第五章	均压	125
第一节	接触电势和跨步电势	125
第二节	近似计算方法	128
第三节	模拟实验方法	136
第四节	均压接地网的设计要点	138
第五节	计算示例	145
第六章	分流	147
第一节	概述	147
第二节	接地短路发生在接地网内	150
第三节	接地短路发生在接地网外	155
第四节	分流系数的计算要点	158
第五节	计算示例	161
第七章	限流	166
第一节	电击引起的病理生理	166
第二节	人体允许的接触电势和跨步电势	175
第三节	电击时对通过人体能量的限制	179
第四节	限流的设计要点	187
第五节	计算示例	188
第八章	接地电阻值	189
第一节	接地电阻值的一般规定	189
第二节	按接触电势和跨步电势确定的接地电阻值	191
第三节	计算示例	192

第三篇 反击过电压及保护

第九章	概述	195
第一节	反击过电压产生的物理原因	195
第二节	反击过电压的基本类型	201

第三节	高层建筑接地的特点和要求	205
第四节	反击过电压试验采用的电流幅值和波形	208
第十章	工频反击过电压	214
第一节	接地网的工频电位	214
第二节	阀型避雷器受到的反击过电压	218
第三节	低压线路隔离接地电位的措施	220
第四节	电信线路的保护措施	222
第五节	管道和铁路轨道隔离接地电位的措施	224
第六节	沿电缆沟敷设接地线的作用	225
第十一章	冲击反击过电压	231
第一节	雷击独立避雷针、线引起的反击过电压	231
第二节	雷击厂房时发电机和变压器受到的反击过电压	237
第三节	避雷器接地线引起的反击过电压	249
第四节	低压电器受到的反击过电压	254
第五节	晶体管装置受到的反击过电压	257

第四篇 接地电阻的测量

第十二章	测量方法	268
第一节	接地电阻测量的基本原理	268
第二节	电流极和电压极的位置	271
第三节	地中电流的分布	276
第四节	地电阻率的测量	284
第十三章	测量的异常	288
第一节	地电阻率不均匀引起的异常	288
第二节	地的集肤效应引起的异常	295
第三节	激发极化效应引起的异常	301
第四节	地中自然电场和人工电场的干扰	306
第十四章	现场测量实践	309
第一节	互换原理的实践证明	309

第二节	0.618 布极测量法引起的误差	311
第三节	增加测距 S_{XB} 接地电阻测量值的变化规律	313
第四节	不同的引流点测量接地电阻的差异	314
第五节	带和不带架空地线测量的差别	314
第六节	地下水管对测量接地电阻的影响	316
第七节	地中电场的干扰	316
第八节	互感电势引起的误差	317
第九节	测量仪器	318
第十节	路面结构层电阻率的测量	321
参考文献	323

绪 论

从本质上讲，接地的目的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，从而将设备接地处固定为所允许的接地电位。接地电位的大小，除与电流的幅值和波形有关外，还和接地体的几何尺寸以及地的电性参数有关。

由于地中自然电场和人工电场的影响，设备接地处的电位常常不是等于零。但通常不会超过10伏。当有电流通过接地体流入地中时，设备接地处的电位会相当高。在大接地短路电流系统中，接地电位可能达2000伏及以上。在雷击时，接地体的瞬时电位可能达到数十万伏的数量级。由于接地体的电位升高，会使设备受到反击过电压的作用，设备有可能因此而被击穿或引起误动作。电流离开接地体在地中流散时，还会在地面上出现电位梯度。人体站在这样的地面上，有可能受到接触电势和跨步电势引起的电击伤害。因此，对保护接地而言，并不意味着只要将设备的金属外壳接地，就能保证安全，还应当注意到设备接地处可能存在着足够危险的接地电位升高。

在工频的情况下，采用静电场的理论，利用传导电流和位移电流在地中分布的相似性，电容和接地电阻互为倒数的关系，就能进行接地计算。在冲击的情况下，采用电路的行波原理，也能够近似地进行计算，并且可以用试验方法来校正计算的结果。

深入研究接地工程后可以发现，接地技术不是一门精密

的科学，因为接地体的几何形状比较复杂；对地面下的地层结构，也没有必要为了接地的技术要求，而花费太大的代价做详尽的了解；人体触电时，造成电击伤害的原因也比较多；在使用“导线—大地”回路测量接地电阻时，交流电在地中的分布范围可能相当大，在这种情况下，磁场的作用达到不能忽略的程度，足以影响地中电流的分布，地中电流受到的阻力，除了原来的接地电阻外，需要再加上一个与频率等有关的阻抗分量；由于地的层状或剖面结构，都会影响地中电流的分布，即使被测接地体和电流极间的距离为有限值，对于以不同的距离、不同的方向测量出的接地电阻亦不相同；倘若在地中电流通过的范围内，存在一个可被极化的矿体，地的视电阻率就不是常数，而是随电流频率的增加而减小，随频率的减小而增加，因而测量出的接地电阻值随频率而变化，这些测量中的异常现象，常常造成测量结果和理论计算不相符合。

由于上面这些原因，应当避免两种极端：一种是只考虑了理论上的完备，而使接地计算相当烦琐，脱离了工程实践的需要；另一种是只简单地规定一个接地电阻值作为保护接地的标准，而忽视了对地面电位分布的研究和相应采取的安全措施。

实践证明，我国有许多建设在高电阻率地区的发电厂和变电所，它们的接地电阻都远大于0.5欧姆。但并没有发生过因接触电势和跨步电势引起的电击伤害。重要原因之一，是因为在这些工程的接地设计中采用了均衡电位接地的方法。有一些工程还采用了隔离接地电位等防止反击过电压的保护措施。

采用均衡电位接地这个名词，是为了有别于所谓等电位

接地。因为在接地工程中是做不出一个理想的“法拉弟等电位笼子”的。例如：一个 40×40 平方米的接地网，埋深0.6米，接地体的直径 $\phi 20$ 毫米，网孔576个，也只能够将工频的接触系数降低到13%。一座钢筋混凝土的建筑物，并不等于是一个完全封闭了的空心导体，因而不能有效地屏蔽电磁场，在雷电流流过建筑物的钢筋入地时，在建筑物的内部仍然存在着很强的电磁场。引进或引出建筑物的电缆或电线，以及建筑物内部设备之间的电缆或电线，都会受到电磁场的作用而产生感应电势。雷电流或工频短路电流还在导线上造成电阻压降，感应电势和电阻压降有时造成与导线连接的设备的反击过电压。因此，认为只要将建筑物的钢筋接地后就是一个“等电位笼子”的说法，是没有理论和实践依据的。反击过电压的另一重要原因，是高电位通过电容耦合到其它地方去。

广义言之，均衡电位接地是指，不同用途和不同电压等级的电力设备、电信设备（除另有规定者和独立避雷针、线外），都使用一个总的自然和人工接地体，接地电阻符合其中最小值的要求，并采用加强分流和均压网来均衡电位以及对电缆或电线采用屏蔽和多点接地等措施。在大接地短路电流系统中，它还具体地包括了均压、分流和限流三个重要的组成部分。

我国的《电力设备接地设计技术规程》（试行），根据从实践中总结出来的新的接地方法，重新规定了在大接地短路电流系统中发电厂和变电所允许的接地电阻值，从而使我国的接地技术水平大大提高了一步。此外，在我国，在高电阻率地区降低接地电阻方面，取得了水下接地网、深埋接地体以及用置换方法改善地电阻率等较为成功的经验；在测量方

面，对大型接地装置接地电阻的模型和现场测量进行了广泛的研究；在现场测量发电厂的冲击接地电阻和反击过电压等方面，也取得了一定的成果。

本书分为四篇。

第一篇接地电阻。简要地叙述了接地技术所涉及到的大地的电学性质和接地电阻的物理概念。提出了一个以减小接地电阻为目的的接地网的设计要点。较为详细的叙述了降低接地电阻的方法和工程实例。

第二篇均衡电位接地。介绍了在大接地短路电流系统中发电厂和变电所的接地电阻允许值的计算方法。在一定程度上，可以说是对《电力设备接地设计技术规程》（试行）的补充和说明。各章附有工程计算示例和现场试验结果。对均压、分流和限流三种措施都提出了具体的设计要点。对于一个尚不了解人体触电时引起的病理生理的读者来说，看一看本篇第七章第一节的内容，会增加一些安全用电的知识。

第三篇反击过电压及保护。这一篇是接地技术的新内容。第九章对反击过电压产生的机理作了一些探讨性的叙述。但需要说明：对反击过电压的研究，目前还停留在现场试验和模拟实验阶段，还没有建立起一个比较完备的理论系统。本篇给出了许多现场反击试验和模拟实验的结果以及反击过电压的保护措施。对接地工程的设计和施工具有一定的参考价值。

第四篇接地电阻的测量。本篇还不能向读者推荐一个满意的测量方法，这还有待于今后在实践中继续研究。本篇从定性方面分析了各种测量规律和测量异常。在最后一章中，叙述了现场测量实践。可以作为测量接地电阻和分析测量结果时的参考。

第一篇 接 地 电 阻

第一章 大地的电学性质

第一节 地的两种电性

接地电流在地中的分布状况,除和电流的频率有关外,还决定于大地的电学性质。只有基本上掌握了接地处地的电学性质和电性参数这些原始资料后,才能做出一个正确的接地设计来。

从电工原理可以知道:通过接地体流入地中的总电流是由传导电流和位移电流两部分组成的。判断地是导体或是半导体还是介电质,决定于地中同一点的传导电流密度和位移电流密度的比值。对于正弦电流,将麦克斯韦第一方程式应用于各向同性的大地介质,即磁场强度的旋度等于传导电流密度和位移电流密度的向量和,

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} \dot{E} + j\omega\epsilon \dot{E} \quad (1-1)$$

(1-1)式右端的第一项是传导电流密度

$$\delta_c = \frac{1}{\rho} \dot{E} \quad (1-2)$$

第二项是位移电流密度

$$\delta_a = j\omega\epsilon \dot{E} \quad (1-3)$$

δ_a 对 δ_c 相差 90° 。从(1-1)式还可以看出,电阻率 ρ 和介电系数 ϵ 是地的两种主要电性参数。 ρ 和 ϵ 以及电流的角频

率，决定了地中任一点的交变电流的分布。传导电流密度和位移电流密度绝对值之比为：

$$K = \frac{\delta_c}{\delta_d} = \frac{1}{\omega \varepsilon \rho} \quad (1-4)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ —— 电流角频率 (秒⁻¹)；

$$\varepsilon = \varepsilon_r \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{—— 介电系数(法/米)；}$$

ε_r —— 相对介电系数；

ρ —— 电阻率 (欧·米)。

地中电流的这两个分量，虽然可以同时存在于地的任一点上，但在接地技术所研究的范围内，常常遇到其中一个分量远大于另一个分量，使之有可能单独对其中一个分量进行研究，从而使问题大大简化。由(1-4)式，当 $K > 10$ (即 $\delta_c > 10\delta_d$)，可以不计位移电流地近似为导体；当 $K < 0.1$ (即 $\delta_c < 0.1\delta_d$)，可以不计传导电流地近似为介电质；当 $10 > K > 0.1$ (即 $10\delta_d > \delta_c > 0.1\delta_d$)，地既是导体又是介电质。在大多数情况下，地的相对介电系数不超出 $50 > \varepsilon_r > 5$ 的范围。利用这些值，由(1-4)式可以计算出在 ρ 和 f 为何值时，地可近似认为是导体或是介电质。计算结果示于图 1-1 上^①。由图上可以知道：当接地电流是低频 ($f < 1000$ 赫芝) 电流时，在 $\rho < 10^5$ 欧·米的条件下，可以忽略不计位移电流的影响，只考虑传导电流就行了。因此，在研究工频接地时，可以把地看成是导体。在冲击接地时，在一般电阻率地区，也只考虑传导电流的作用就行了。只有在很高的电阻率地区，才需要计入位移电流的影响。例如： $\rho = 1000$ 欧·米，

① 参考文献[1]，19页。

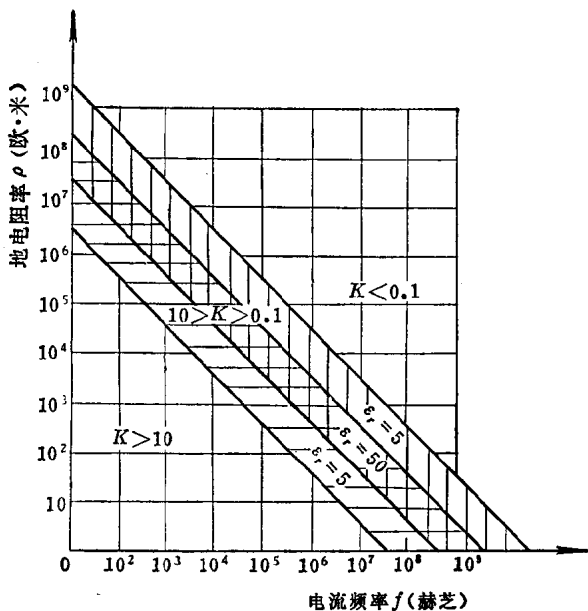


图 1-1 地电性的区分图

$\epsilon_r = 9$ ，取雷电流波头为半余弦形，波头时间 3 微秒，故雷电流波头的等值角频率为 $\omega = \frac{\pi}{3} \times 10^6$ (秒⁻¹)。由 (1-4) 式得到： $K = 12$ ，即传导电流为位移电流的 12 倍。实际上在一般雷电流等值频率，电阻率 2000 欧·米的情况下，都可以不计位移电流即电容效应的影响。此时，对于水平伸长接地体，可以忽略波动过程而使计算大大简化。

上面的计算，都是认为电阻率和相对介电系数是常数。然而和一般的印象相反，地的两种电性参数都与频率有关，特别是地的电阻率在高频情况下将会显著减小。在变频激发极化物探中发现，用不同频率的电流测量出的视电阻率是不