

杜松怀 编

接地技术

中国农业出版社

AD12/03

接 地 技 术

杜松怀 编

96 电力 (3)

蔡文斌

中国农业出版社

¥5

(京)新登字060号

接 地 技 术

杜松怀 编

* * *

责任编辑 马光霞

中国农业出版社出版 (北京市朝阳区农展馆北路2号)
新华书店北京发行所发行 中国农业出版社印刷厂印刷

787×1092mm32开本 6.25印张 135千字

1995年5月第1版 1995年5月北京第1次印刷

印数 1—2,000册 定价 9.50元

ISBN 7-109-03859-9/TM·23

前 言

接地工程设计的优劣，对人身和设备的安全有着重要的影响。如果接地措施不当，将会导致事故甚至是重大事故的发生。因此，有关技术人员掌握电力系统的接地技术是十分必要的。

本书是在多年教学实践的基础上，参阅有关文献，依据设计规程并结合生产实践编写而成的，可作为电力系统及其自动化等专业的选修课教材，在编写过程中，突出实用性，力求使读者在掌握接地基本理论的同时，能够独立分析和解决接地的设计计算及测量等问题。全书共七章，分别介绍了电击的生理现象、安全防护、大地和水两种接地媒质的电学性质、高低压电气设备的接地、接零和触电防护，工频和冲击接地电阻的计算及要求、接地网或小型接地装置的设计、计算步骤、接地施工中的常见问题以及接地电阻和土壤电阻率的测量等。

北京农业工程大学郭喜庆教授仔细审阅了书稿，有关电厂和单位的一些同志为本书提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，谨请批评指正。

作 者

1994年12月

目 录

绪论	1
一、接地体、接地线和接地装置	1
二、电气上的“地”、地中扩散电流及对地电压	2
三、扩散电阻和接地电阻	4
四、接地及其分类	5
五、接触电势和跨步电势	7
第一章 触电危害与安全电压	8
第一节 电击的生理现象及人体电阻	8
一、感知电流、反应电流和摆脱电流	8
二、心室颤动	10
三、影响触电伤害程度的因素	16
四、人体电阻	18
第二节 安全电压	21
一、安全电压的规定	22
二、特低电压	23
第三节 人体触电的原因及防止触电的措施	26
一、人体触电的原因	26
二、防止触电的安全措施	29
第四节 触电急救	29
一、及时使触电者脱离电源	29
二、救护	30

三、人工呼吸	31
第二章 电气设备的接地、接零和触电防护	33
第一节 低压配电系统的接地方式	33
一、 <i>TT</i> 接地方式	33
二、 <i>TN</i> 接地方式	34
三、 <i>IT</i> 接地方式	35
第二节 电气设备的保护接地	35
一、高压电气设备的保护接地	35
二、低压电气设备的保护接地	37
第三节 低压电气设备的保护接零	41
一、保护接零的作用	41
二、保护接零存在的问题	42
第四节 低压漏电保安器	47
一、漏电保安器的分类	47
二、漏电保安器的工作原理	49
三、 <i>TT</i> 接地方式中漏电保安器的典型接线	54
四、 <i>TN</i> 接地方式中 <i>rcd</i> 的典型接线	56
五、触电保安器的选用	58
六、触电保安器的安装场所	62
第三章 大地和水的电阻率	64
第一节 大地的电阻率	64
一、大地的电学性质	64
二、大地的电阻率及其影响因素	66
第二节 水的电阻率	71
一、地下水	71
二、河水	71
三、库水（湖水）	73

第四章 接地装置的工频接地电阻计算	74
第一节 单个接地极的接地电阻	74
一、与地面齐平的半球接地体的接地电阻	75
二、管形垂直接地体的接地电阻	78
三、圆盘或平板电极的接地电阻	79
四、单根水平接地体的接地电阻	80
第二节 组合接地体的接地电阻	80
一、电流屏蔽作用及其影响	80
二、各种形状水平接地体的接地电阻	81
三、水平接地电极和垂直接地电极的组合接地体的接地电阻	82
四、发、变电站网状接地体的接地电阻	83
五、水下接地网的接地电阻	87
第三节 自然接地体的接地电阻	89
一、概述	89
二、常见自然接地体电阻的计算	90
第四节 土壤电阻率的取值	96
一、季节变化的影响	97
二、土壤不均匀性的影响	97
第五节 地电阻率不均匀时的人工接地体接地电阻 的计算	99
一、双层土壤中接地电阻的实用计算公式	99
二、土壤水平方向不均匀时的接地电阻计算	109
第五章 冲击接地电阻的计算	111
第一节 概述	111
一、影响冲击接地电阻的主要因素	112
二、冲击计算用土壤电阻率的季节修正系数 ψ	113

第二节	集中接地体冲击接地电阻的计算	114
一、	单独集中接地体的冲击接地电阻计算	114
二、	复合接地体的冲击接地电阻计算	117
第六章	接地装置的设计、安装与维护	120
第一节	接地电阻的允许值	120
一、	工频接地电阻的允许值	120
二、	防雷接地装置接地电阻的允许值	122
三、	架空线路接地电阻的规定	124
第二节	均衡电位接地	125
一、	均衡电位接地的概念	125
二、	接触电势和跨步电势的允许值	127
第三节	地网的均压和分流计算	129
一、	接地网的均压计算	130
二、	接地网的分流计算	134
第四节	接地导体的选择及截面热稳定校验	142
一、	接地导体的选择	142
二、	接地导体截面热稳定校验	144
第五节	发、变电站接地网的设计	145
一、	均压网的设计要点	145
二、	均压网的设计步骤	147
第六节	小型接地装置设计	149
一、	小型接地装置布置的一般形式	149
二、	小型接地装置设计	150
第七节	人工降低接地电阻的措施	154
一、	敷设引外接地体	154
二、	深埋式接地	155
三、	填充电阻率较低的物质	156
四、	敷设水下接地网	160

第八节 接地装置的安装、施工与维护	161
一、接地装置的安装与施工	161
二、接地装置的维护	170
第七章 接地电阻和土壤电阻率测量	173
第一节 接地电阻的测量方法	173
一、电压电流表法	173
二、接地电阻测量仪	180
第二节 接地网接地电阻测量	183
一、远离法测量	183
二、补偿法测量	184
第三节 土壤电阻率测量	185
一、等距四极法	185
二、不等距四极法	188
三、土壤电阻率的测量步骤	188
参考文献	189

绪 论

在电力系统中，由于正常运行、防雷的需要和为了保障人身、设备的安全，将电力系统及其电气设备的某些部分与埋入大地中的金属导体相连接，这就是接地。接地技术就是研究接地的原理、方法及其实施，如何避免和减轻人身伤亡事故，保证人身和设备安全而发展起来的一门科学技术，它对电力系统的安全运行有着重要的影响。近年来，系统中发生过许多由于接地不良或接地措施不当而引发的重大事故，从而接地问题受到人们的普遍重视。本书系统地阐述了人体触电的原因、危害和触电急救，高低压电力设备的接地与接零，发电厂、变电站的均衡电位接地和防雷接地以及接地电阻和土壤电阻率的测量等，介绍了接地的工程设计方法并配有设计和计算示例。致于弱电系统中的接地及抗干扰技术请参阅其他有关书籍。

为了叙述上的方便，现将接地技术中的一些基本概念介绍如下：

一、接地体、接地线和接地装置

埋入地中并直接与大地接触的金属导体，称为接地体。兼作接地体用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑物的基础、金属管道和设备等称为自然接地体。

电力设备或杆塔的接地螺栓与接地体或零线（由电力变压器接地中性点引出的线）连接用的金属导件，称为接地线。

接地体和接地线的总和，称为接地装置。

二、电气上的“地”、地中扩散电流及对地电压

1. 电气上的“地”。通常，人们取大地（地球）的电位为零，作为其他带电体电位高低的参考点。实际上，当电流经接地体流入大地时，接地体对地有电压，但在距离接地体或接地短路点20m左右的地方，电位已趋近于零。这电位趋于零的地方就叫做电气上的“地”，如图1所示。

2. 地中扩散电流。经接地装置流入大地的电流叫地中扩散电流，也称入地电流。当这个电流为工频电流时，称为工频扩散电流*；当为冲击电流时，称为冲击扩散电流。由电磁场原理，当导电媒质中存在有恒定的电场时，由于媒质的导电性，将在导电媒质中形成一恒定的电流场，通常用电流密度矢量 δ 来描述。电场中某点电流密度矢量 δ 的大小规定为：通过垂直于该点正电荷运动方向的微小面元的电流，与该微小面元面积之比，当面元

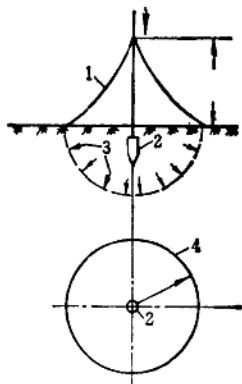


图1 “地”和对地电压
1. 对地电压曲线 2. 接地体
3. 散流电场 4. 零位面

* 以后如不说明，均指工频电流。

面积趋于零时的极限，即

$$\delta = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta s} = \frac{dI}{ds} \quad (1)$$

式中， δ ——电流密度矢量的大小 (A/m^2)，

ds ——垂直于正电荷运动方向的微小面元的面积 (m^2)，

ΔI ——通过微小面元的电流 (A)。

电流密度矢量的方向为该点正电荷运动方向，即该点电场强度矢量 \vec{E} 的方向 (图 2)。电流密度矢量 δ 与电场强度 \vec{E} 之间的关系为：

$$\delta = \gamma \vec{E}$$

式中， γ ——媒质的电导率 (s/m)，
它决定于导电媒质的物理性质，

\vec{E} ——合成电场强度
(V/m)。

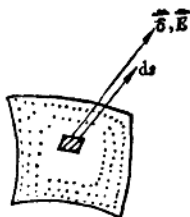


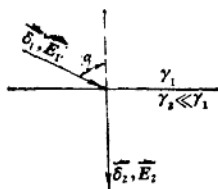
图 2 电流密度矢量 δ 与
电场强度矢量 \vec{E}

如果我们已知某一截面 s 上各点的电流密度，则由 (1) 式可求得通过该截面的电流为：

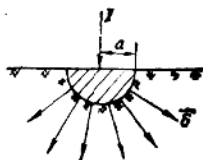
$$I = \int \delta \cdot ds \quad (3)$$

这时，当电流由电导率大的媒质区域流向交界面时，不管其与界面的交角如何，离交界面而进入电导率小的媒质区域的电流密度线几乎与界面垂直 (图 3)。

3. 大接地短路电流系统与小接地短路电流系统。额定电压 $1kV$ 及以上、单相接地电流或同点两相接地时入地电流大于 $500A$ 的系统叫大接地短路电流系统， $500A$ 及以下的称为小接地短路电流系统。



(a) 电流由电导率大的媒质流入电导率小的媒质



(b) 均匀土壤中的半球形接地电极

图 3 入地电流的扩散规律

4. 对地电压。电流经接地体在地中流散时，在地面上形成电位分布，出现电位梯度，且在接地体处电位最高。我们把电气设备的接地部分（如接地外壳、接地线、接地体等）与零电位的大地之间的电位差称为电气设备接地部分的对地电压。如果用曲线来表示接地体及其周围各点的对地电压，则称这种曲线为对地电压曲线。根据理论分析，接地体的对地电压曲线具有双曲线的特点，如图 1 所示。离开接地体，对地电压曲线逐渐变平，即曲线的陡度逐渐减小。通常，设备接地处的电位不超过 10V ，但当有电流通过接地体流入地中时，设备接地处的电位可能很大。例如，在大接地短路电流系统中，接地电位可能达 2kV 及以上，出现雷击时，由于雷电流幅值很大，有时可达数十至数百千安，接地体的瞬时电位可达到数十万伏。

三、扩散电阻和接地电阻

电流自接地体的周围向大地扩散时大地呈现的电阻，叫做接地体的扩散电阻。接地装置的接地电阻等于接地体（或

自然接地体)和接地线的自身电阻、接地体与土的接触电阻以及接地体扩散电阻之和。由于接地体和接地线本身的电阻很小,接触电阻亦很小,可以忽略不计,因此,一般认为扩散电阻就是接地电阻。接地电阻的数值等于接地装置对地电压与通过接地体流入地中电流的比值。以图1的接地装置为例,其接地电阻 R_{jd} 为:

$$R_{jd} = U_{jd} / I_{jd} \quad (4)$$

按通过接地体流入地中冲击电流求得的接地电阻,称为冲击接地电阻,用 R_{ek} 表示,通常用它来衡量防雷接地的效果。按通过接地体流入地中工频电流求得的电阻,称为工频接地电阻。接地电阻的实际值需要在接地装置敷设完毕后通过实测得出。

四、接地及其分类

电力设备、杆塔或过电压保护装置用接地线与接地体连接,称为接地。也可以说,接地就是把设备的某一部分通过接地装置同大地连接起来。接地可分为正常接地和非人为的故障接地两类。正常接地又有工作接地和安全接地之分。工作接地是指在电力系统中运行需要的接地,有两种情况:一是利用大地作导线的接地,在正常情况下有电流通过,如直流工作接地、弱电工作接地和两线一地制供电系统中的接地等;二是为了维持系统安全运行而设的接地,在正常情况下只有很小的不平衡电流甚至没有电流流过,如110kV以上高压系统中性点的工作接地、三相四线制380/220V系统变压器中性点的工作接地等。安全接地主要包括防止触电或反击的保护接地、防雷接地(或称过电压保护接地)、防静电接地和屏蔽接地四种。

保护接地是一种技术上的安全措施，它是把在故障情况下可能呈现危险的对地电压的金属部分同大地紧密地连接起来。例如，电力设备的金属外壳、钢筋混凝土电杆和金属杆塔，由于绝缘损坏等原因有可能带电，为了防止这种电压危及人身安全而设的接地就称为保护接地。保护接地和工作接地见图4。其中工作接地有电力变压器的中性点接地、电压互感器的高压侧中性点接地和避雷器接地等；保护接地有变压器外壳、电压互感器外壳、油开关外壳和支持绝缘子支架等的接地。

过电压保护接地是指为了限制过电压危险影响而设的接地（如避雷针、避雷器和避雷线等防雷设备的接地）。在电力网中，有时也把避雷器等接地叫做工作接地（如图4）。

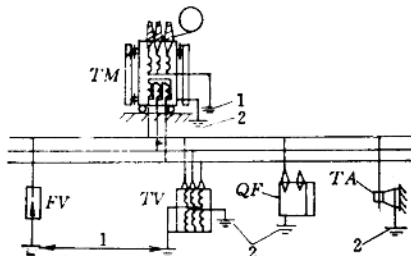


图4 保护接地与工作接地

1.工作接地 2.保护接地

防静电接地是指易燃油、天然气贮罐和管道等，为了防止静电危险影响而设的接地。屏蔽接地一般指诸如隔离变压器、交流器等为了阻隔原、副边的电气联系，并保证人身和设备安全而设的接地。防静电接地和屏蔽接地本书将不作详细介绍。

故障接地是指带电体与大地间的意外的连接，如电气设

备的碰壳短路、电力线路的接地等。

五、接触电势和跨步电势

如前所述，电流自接地体经周围土壤流散时，会在接地体附近的土壤中产生压降并形成一定的地表电位分布。在地面上离设备水平距离为0.8m处与沿设备外壳、架构或墙壁离地面的垂直距离1.8m处两点间的电位差称为接触电势，人体接触该两点时所承受的电压称为接触电压，如图5 (a) 所示。图中 $U = IR$ 为接地体的接地电位（即对地电压，也可用 E_w 表示）。

地面上水平距离为0.8m的两点间的电位差，称为跨步电势。人体两脚接触该两点时所承受的电压，称为跨步电压，如图5 (b) 所示。

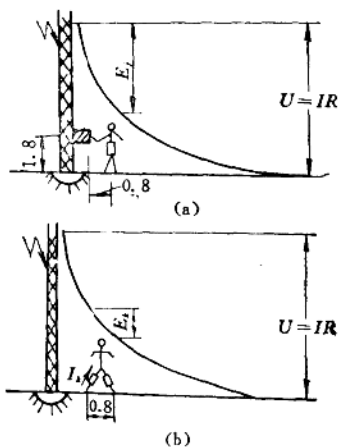


图5 接地体的接触电势和跨步电势

(a)接触电势 E_c ；(b)跨步电势 E_s 。

第一章 触电危害与安全电压

第一节 电击的生理现象及人体电阻

人体触电时，根据当时的环境状况和触电电流的大小等因素，会造成程度不同的伤害。轻者产生电伤，重者则会产生电击。电伤是指人体外表局部直接或间接地受到电流的伤害。电伤的形式有灼（烧）伤、电烙印、皮肤金属化等。灼（烧）伤是由电流（电弧）的热效应引起的，电烙印是因为化学效应和机械效应引起的，皮肤金属化则是由于被电流熔化的金属微粒渗入皮肤表层所引起的，它是电伤中最轻微的一种伤害。电击是指电流通过人体内部时，人体的内部器官（如心脏等）受到的伤害，它是最危险的触电伤害。

一、感知电流、反应电流和摆脱电流

（一）感知电流 能够引起人的感觉的最小电流称为感知电流。以手握带电导体，给人通以某一电流值，直流情形下能感到手心轻微发热，交流情形下因神经受到刺激而感觉轻微刺痛为基准。不同的人、不同性别，感知电流的值也不同。一般地，成年男性的平均感知电流（工频）约为1.1mA，成年女性则为0.7mA，国际电工委员会IEC479—1号文件认定的感知电流值为0.5mA（与通电时间无关）。

感知电流与电流的频率有关。频率增加，感知电流也会