

21 世纪电子电气工程师系列

接地技术与 接地系统

双色

〔日〕 川瀬太郎 著

ART 21
电子电气工程师

科学出版社

OHM 社

21 世纪电子电气工程师系列

接地技术与 接地系统

〔日〕川濑太郎 著
冯允平 译



科学出版社 OHM 社
2001 北京

NAK-63/15

图字:01-2000-3674 号

Original Japanese edition

Genba no Secchi Gijyutsu to Secchi System

by Tarou Kawase

Copyright © 1993 by Tarou Kawase

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

現場の接地技術と接地システム

川瀬太郎 オーム社 1999年第1版第6刷

图书在版编目(CIP)数据

接地技术与接地系统/[日]川瀬太郎著;冯允平译.-北京:科学出版社,2001
(21世纪电子电气工程师系列)

ISBN 7-03-009532-4

I. 接… II. ①川… ②冯… III. 电力系统-接地系统 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 038911 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

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

2001 年 8 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2001 年 8 月第一次印刷 印张:4

印数:1—5 000 字数:117 000

定 价:11.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

译者的话

日本千叶大学川濑太郎教授的专著《接地技术与接地系统》(現場の接地技術と接地システム),1993年问世以来至1999年已第六次印刷。该书在日本国内颇受电力技术和电子与电脑技术等领域广大科技工作者的欢迎。

该书内容丰富,作者系统全面地总结了多年来有关接地技术的研究成果。全书共分三部分,即接地的基础理论、接地系统和应用。基础部分涵盖了电力与电子设备接地技术的所有基础内容,讲述了接地的历史,接地电阻与性质,各种接地电极接地电阻的计算方法,避雷设备,医院的接地,各种接地施工的细则,接地的管理,接地电阻的测量方法等。接地系统部分讲述了触电事故的机理,接地系统与非接地系统,接地方式,触电与人体特性的关系,触电电流的安全界限,各种环境与电气安全,电气机器的分级,地络保护等;应用部分讲述了接地的模拟实验法,静电、电脑的接地,接地材料,大地参数的推定法等。书中还介绍了日本的有关指导性标准,可供我国技术人员参考。

该书对电力部门、电子设备使用部门、建筑部门的接地设计、施工及安全用电等极有参考实用价值。由于本书内容新颖、紧密结合实际,从大学生、研究生到科技工作者都会从中获得收益。希望中译本有助于我国有关科技工作者了解国外相关接地技术的情况及其进展,并供实际工作中借鉴或参考。

前 言

当 1977 年(昭和 52 年)由欧姆社推出的拙作《地络保护和接地技术》(地絡保護と接地技術)问世的时候,有幸得到社会的欢迎与好评,至最近已超乎想象地多次印刷。

从《地络保护和接地技术》出版到现在,已经过了 15 年多,这期间环绕接地问题的社会环境已大大变化。如从前,接地是电力设备的接地所使用的专门话题。但是,最近已变为电子机器用的接地问题较多。

在这样的变化了的形势中,国内外信息技术的飞速发展,特别是智能化大厦的出现,产生了对接地技术的新的关心。众所周知,在智能化大厦内有各种各样的电子机器,其间电力用、电话用、数据用的配线纵横交错,这必然发生电磁感应干扰(Electromagnetic interference: EMI)和电磁环境问题(Electromagnetic compatibility: EMC)。现在,与之相关的种种故障可以说是在不断增加。

就是 EMI 或是 EMC 也出现和接地密切相关的问题,而笔者 1977 年的著作中没有把这些问题中的接地技术提出来讲述。因这样的背景,电子技术人员工作者产生了对接地技术的新的关心。不管怎么样,我们欢迎各部门的技术工作者来关心接地技术。

不论是电力设备用还是电子机器用,接地技术的基础是共同的。不管是什么部门,如处理接地问题,首先必须直接从基础来检查。拙著《地络保护和接地技术》是从“电力用”的接地观点来写的,而有趣的是这方面从电子技术人员那里得到的反响意外地多。现在,接地关系到的问题是它在哪里发生,而且要启发研究领域的人们去真正关心接地问题。

就像经过了 15 年,什么样的书都会变旧一样。接地有时已“不时髦”了,潜在的变化在缓慢进行着,而简单来说书的结构也要变动。因此,应欧姆社的再次提议,针对前著作了全面的修订,书名也作了相应修改。

在出版时,首先应该想到,接地是由前人长期不懈努力累积而成的技术,我们在向这些前人的努力表示感谢的同时,有把这个技术继承发展的责

任。如果了解了某个国家关于接地的标准及规程的配备情况,即可观察到那个国家的社会基础设施的配备程度。这种说法也未必言过其实。如果本书使这样认识的人数增加,那是作者之万幸。

最后,对为本书的出版给予多方帮助与鼓励的欧姆社(OHMSHA)的各位致以深深的感谢。

著 者



接地技术与 接地系统

内 容 简 介

“21世纪电子电气工程师系列”是企业技术/管理干部知识更新用新型教科书。丛书特点是重视理论联系实际，用现象说明原理。反映该专业领域最新进展，通过产品与技术模型揭示学科基础知识。丛书各册执笔者均是在国际知名企业中长期从事技术、教育工作的专家。书中举例及例题均源于他们多年的工作实践。

本书涵盖了电力与电子设备接地技术的所有有关基础，讲述了接地技术的发展，接地电阻与性质，各种接地电极接地电阻的计算方法，避雷设备，医院电器设备的接地，各种接地施工的细则，接地的管理，接地电阻的测量方法等。

本书可作为企业工程技术人员培训专用教科书，也可供高等学校相关专业及高、中级职业学校相关专业师生学习参考。

著者简介

川瀬太郎

1959年 千叶大学工学部电气工程专业
毕业

1966年 东京大学研究生院工学研究专
业博士毕业
获工学博士

现 在 千叶大学工学部电气工程专业
教授
(社) 电气设备学会会长

译者简介

冯允平

1959年 交通大学电机工程系毕业

1984年~1985年

英国 University of Strathclyde
访问学者

现 在 西安交通大学电机系高电压技
术专业教授, 博士生导师



北京东方科龙图文制作有限公司 制作
www.okbook.com.cn

目 录

第 1 章 接地的基础

1.1	接地的历史	1
1.2	各种各样的接地	4
1.3	什么叫接地	8
1.4	接地电阻的定义	9
1.5	接地电阻的一般性质	10
1.6	大地电阻率的知识	12
1.7	半球状接地电极的接地电阻	13
1.8	接地电极的电阻区域	15
1.9	由接地电流引起大地电位上升	16
1.10	全球状接地电极	17
1.11	全空间问题和半空间问题	19
1.12	接地电阻和静电电容	20
1.13	叠加原理和镜像法——埋设深度的影响	21
1.14	并联接地和集合效应	22
1.15	旋转椭圆柱体接地电极(扁平)	23
1.16	旋转椭圆柱体接地电极(扁长)	24
1.17	棒状电极——等值半径	25
1.18	圆板电极	27
1.19	埋设地线	27
1.20	网状接地电极	32
1.21	结构体接地电极	35
1.22	避雷设备的接地	37

1.23	医院的接地	43
1.24	各种接地施工的细则	49
1.25	接地的共用和独立	53
1.26	接地的管理	57
1.27	接地电阻的测量方法	61
1.28	大地电阻率的测量方法	64

第 2 章 接地系统

2.1	什么是地络保护	71
2.2	触电事故的机理	74
2.3	接地系统和非接地系统	75
2.4	室内配线的接地方式	78
2.5	电气设备技术标准中有关接地的条款	80
2.6	电源侧接地和负荷侧接地	85
2.7	人体特性	86
2.8	环境和危险	89
2.9	各种环境和电气安全	90
2.10	电气机器的分级	91
2.11	二重绝缘机器	94
2.12	附有接地极的插座	96
2.13	漏电断路器的登场	97
2.14	漏电断路器和接地	97
2.15	漏电火灾和地络保护	98
2.16	电弧地络及其对策	99

第 3 章 应 用

3.1	接地的模拟实验法	101
3.2	静电接地	104

3.3	大地参数的推定法	106
3.4	电脑的接地	109
3.5	接地的材料	111
3.6	接地阻抗	112

第 1 章 接地的基础

1.1 接地的历史

接地是在电气设备和大地之间实现确实的电气连接。一看似乎这是简单的技术,实际是非常不容易的事。如深入探究接地,可知它是非常深奥的技术。

接地技术在英式英语中称为 **earthing**,美式英语中称为 **grounding**。

接地的历史可从避雷针开始。

富兰克林在 1753 年进行了有名的举钉的实验。而后,翌年即 1754 年他设计了避雷针,很多朋友们主动设置了他的避雷针,这样,用避雷针防雷电灾害有确实的效果为世人认可,并在全世界得到推广。

富兰克林发明的最初的避雷针,如图 1.1 所示,即把铁棒接合并立在建筑物上,其下端埋入地中,恰好相当于现在的所谓接地电极。因为避雷针是把雷电的能量安全释放入大地的设备,它的足部与大地确保被短接是必要的,这样就产生了接地技术。

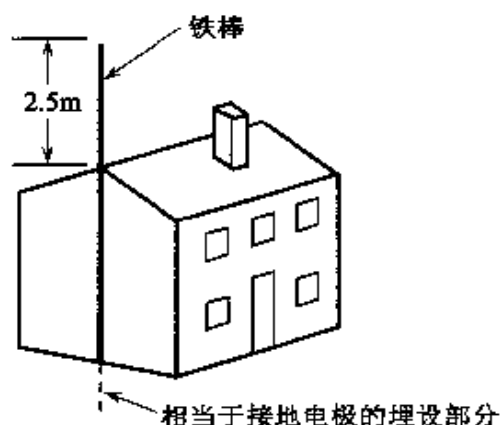


图 1.1 富兰克林的避雷针和世界上最早的接地

次于避雷针有必要接地的是有线电信,有线电信由莫尔斯于 1835 年实现了实用化。

有线电信必须把二根往复电线架起来,但实际如图 1.2 所示,即只将 1 根发出信号的电线架起来,而利用大地返回信号,把这叫作**大地归路(earth return)**。幸运的是,因大地有通电流的性质,所以用大地作归路是可行的。

如图 1.2 所示,在实现大地归路时,发信点及受信点必须接地。这个接地,是把大地组成为电路的一部分的接地,有人把这称为**机能的接地**。

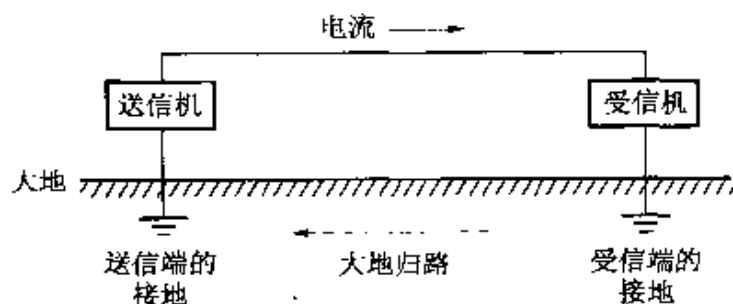


图 1.2 莫尔斯有线通信电路——大地归路的采用

1876 年,贝尔研究成功了电话,立刻,电话用的架空线网在广泛的大地上覆盖起来。当然,这些线路更加会受到雷的直接或间接的攻击,向线路直接落雷的场合不用说,即使在线路附近落雷的场合,线路亦受到影响,被称为雷电冲击电压的陡波前冲击波在线路上疾走。最坏的情况,这雷电冲击电压到达住宅内的电话机,带来各式各样的灾害。

所以在电话网便有**避雷器**登场,图 1.3 是现在的电话保安器。现在用二个避雷器与保险丝接在一起,因为电话线已不采用大地归路,必须对各线路接入避雷器。

可是,避雷器亦与避雷针一样是为了把雷电能量释放入大地的设备,所以,一定要把各避雷器的一端接地。这样,只从电话机数就可知是进入了接地要求的时代。由此可见,电话的接地,比其后发达起来的电力用的接地的历史更早。电话技术工作者对接地的关心因称作**电力线——通信线间的感应干扰**的新的问题的发生而加深,如有名的贝尔电话研究所(Bell Telephone Laboratories, Inc.)进行了接地体系的研究。

1882 年开始的纽约的世界上最初的配电,1887 年(明治 20 年)开始的东京的日本国最初的配电是由直流发电机供给的直流三线式(与现在的单

相三线式类似),都不在中性点接地。

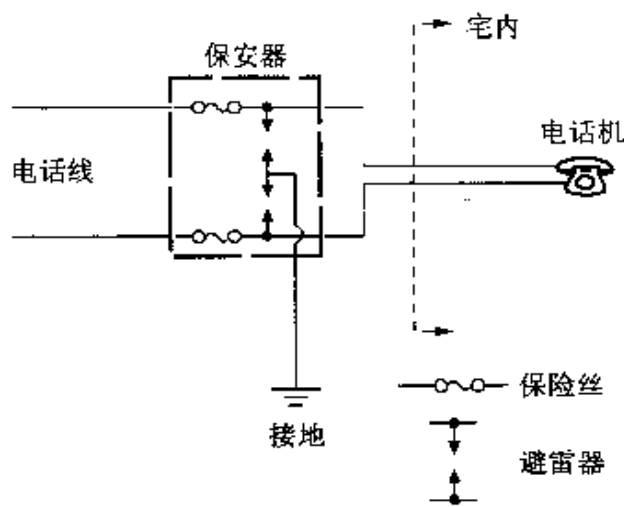


图 1.3 电话的保安器

日本的交流配电是 1889 年(明治 22 年)在大阪以 1kV 电压开始,东京稍迟以 2kV 及 3kV 电压开始。

但是,初始时期的变压器二次侧是不接地的,是作为非接地方式供电的。所谓非接地方式是在配电用变压器的二次侧以下,电路哪里也不与大地连接的方式。

在这非接地方式中,如变压器的一次-二次间的绝缘破坏,一次侧的高电压会照原样侵入到二次侧,把二次侧电路的电位搞得异常的高,这是有危险的。将其称作高低压混触事故(图 1.4)。

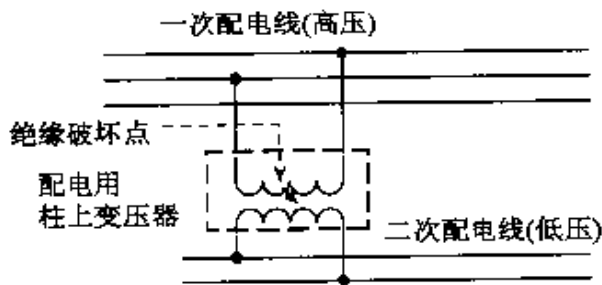


图 1.4 高低压混触事故

这种混触事故在世界各国都有发生。不只产生触电事故,亦发生火灾

事故。所以,作为对策,把变压器二次侧的电路实行接地。即是从非接地方式向接地方式(图 1.5)转换。现在,不只是日本而且在全世界,低压配电系统都采用接地方式。如把变压器二次侧保持平常接地,就能防止二次侧电路的电位异常上升。

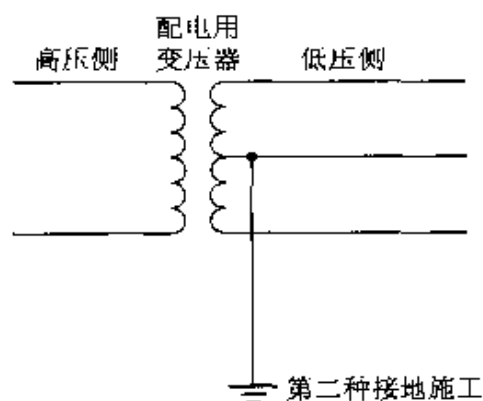


图 1.5 接地方式的配电系统

如以电气设备制定技术标准的省令(通商产业省令,以下称作电技)来区别,配电用变压器二次侧电路的接地可称为**第二种接地施工**。另外,亦有依然采用非接地方式的特殊系统,如医院的集中治疗室(ICU)的配线和游泳池有的电气设备的配线,至于为什么这种配线要采用非接地方式,其理由在后面解释。

总之,一般的交流配电因接地方式的转换,电力用的接地实施的效果问题,作为电力技术上的重要命题引人注目。

1.2 各种各样的接地

前节以时间系列回忆了接地技术的发展。本节将概述现在的各种接地技术。

首先是机器接地,即对连接在低压系统的电气机械器具的金属外箱或铁台等实施接地,在我们身边的例子有电气洗濯机的接地(图 1.6),这种接地称作箱壳或筐体接地。机器接地的特征是在那个非充电部分(指不通电的部分)接地,有接地点。

其次是系统接地。在前节介绍了配电用变压器的二次侧电路的接地,即这相当于第二种接地施工。在这里,所谓电路是指配线与机器平时有电流流过的部分,也可称为充电部分。在电技标准中,电路原则上与大地绝缘称为电路的绝缘原则被贯彻。但是,在第二种接地施工中为了把电路与大地连接,就是说与电路的绝缘原则是相反的。不用说,在电技标准中把第二种接地施工的接地点是排除在电路的绝缘原则之外的。

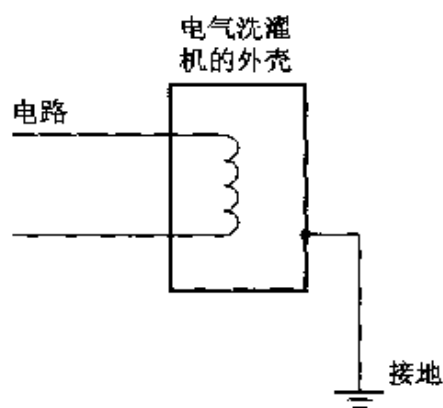


图 1.6 电气洗濯机的接地
——机器接地的例子

历史最长的是避雷针的接地。在避雷针直接落雷,即有被直击雷直击的可能性。一被直击雷直击,担心避雷针上有波幅为 10kA 、持续时间为几十微秒的电流波通过。在对避雷针接地设计时,必须考虑这些条件。

与雷电有关的还有避雷器(arrester)的接地。避雷器是为对付由直击雷或感应雷(线路附近落雷的场合)在线路上发生的雷电冲击电压为目的。因为雷电冲击电压在线路上行进中衰减,应按避雷器安装位置(屋外或屋侧或屋内)不同而考虑变化避雷器的接地。又因为在避雷器上持有平时电路的对地电压,这个电压的高低也是选定避雷器及在设置上的重要条件。

对于自然界的雷及由其引起的雷电冲击电压称作外雷,与此对应的在内部产生的被称作内雷。所谓内雷,意味着电力系统中因接入的断路器等在操作时发生过渡的急剧上升的波(冲击波)。为迎接高度信息社会,利用半导体的虚弱体质的电子设备已在我们身边飞速增加。那样,不仅外雷而且对内雷而言,机器亦有防护的必要。所谓冲击电压吸收器从其扮演的角色来看,这相当于避雷器的亲属。因而,冲击电压吸收器就不是与接地无关的。

把大地作为组成回路一部分的机能接地例子,已经在前面谈到过有线电信回路。作为机能接地的另外一个例子是电气防腐蚀回路(图1.7)。另外,被期待作为21世纪输电方式的直流输电系统(图1.8)中有采用大地归路的计划,因此机能接地成为必要。机能的接地的特征为,接地电极上平时有负荷电流流过。在有水分的地中埋设的接地电极因常有电流流过,必定引起电气化学现象。特别是直流的场合因非常易引起这种现象,在对接地电极设计时必须充分注意。

可是,如采用大地归路,必须要用机能的接地。也就是大地归路和接地有不可分的关系。在这里,作为有关事项,应把称为准大地归路状态作如下介绍。

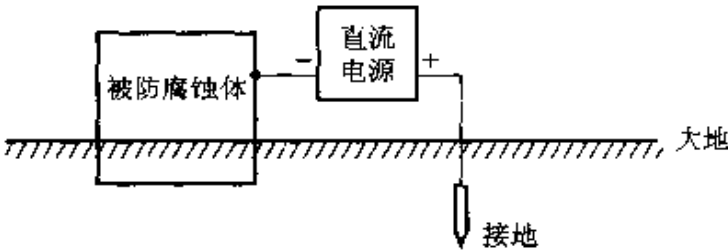


图 1.7 电气防腐蚀回路

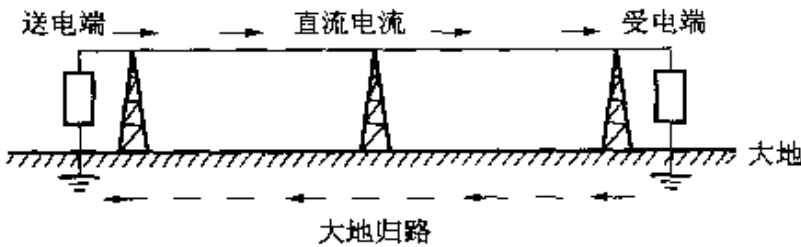


图 1.8 直流输电系统

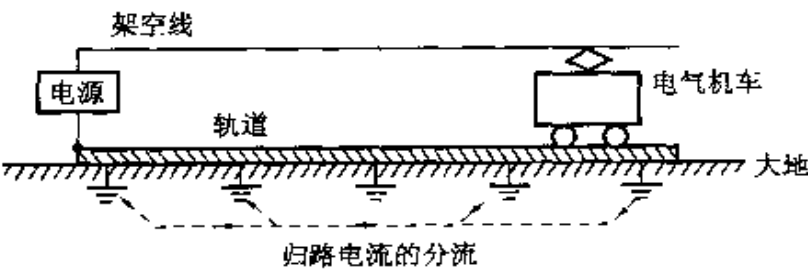


图 1.9 轨道归路——准大地归路

不管是交流还是直流,电气铁道中典型回路的归路是使用轨道(铁路)(图 1.9),但是,铁道的轨道是不与大地绝缘的。从而,铁道的轨道自然发生被多重接地。所以,并行于轨道归路的真的大地归路亦可能是同时起作用的。通常大部分的电流经轨道返回,而因条件一部分电流会向大地分流,因此把这称为准大地归路。

对以上的机能接地来说,在接地电极上有负荷电流流过,可以说,这是

动的机能的接地。与此对应,有静的机能的接地。

作为大地的重要机能,有电位的稳定性。与地球上的所有人工的设备相比较,地球的尺寸可看作是无限大,因而,作为导体球的地球几乎持有无限大的电容,多少次充电它的电位亦不会上升。

对电脑和高灵敏计测装置来讲,信号是以电压的形式来接收的场合较多,无论是模拟信号还是数字信号,在接受电压信号的时候稳定的电位基准点是不可缺少的,提供的这个基准点,就是静的机能的接地(图 1.10)。作为在地球上生活的我们,就不必再去找比地球还稳定的电位基准点。

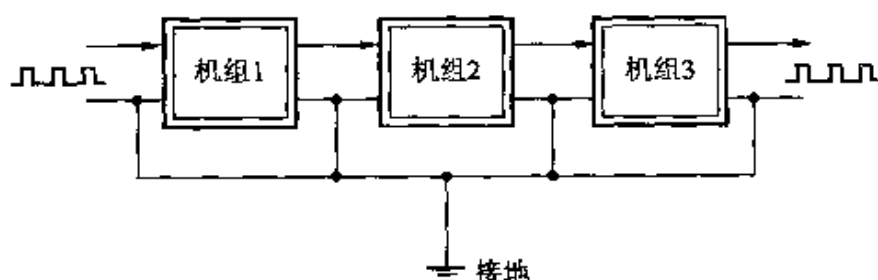


图 1.10 稳定电位基准点的提供——静的机能的接地

问题是对如汽车那样的移动体,飞机、火箭、人造卫星等飞行体的场合,不用说,这些场合不能与真的大地进行固定的接地。在那儿,像这种场合,如车体或机体那样,可把其中最大的导体作接地。把这称为身体地(body earth),是把身体作为模拟的大地来替代真的大地。

可是,即使是真的大地或模拟的大地,可以说,上述的电位稳定性至坏亦只是轻微改变且稳定的。需要注意的是,如考虑瞬时现象,电位就绝不是一样的,而时时刻刻在变化。这里要区分接地的各种故障的原因,同时介绍产生抑制故障的各种方法。

如已经指出的,地球有巨大的电容器的机能,或者说地球是可以吸收大量电荷的器皿。然而,地球是作为无用的电荷抛弃的场所较多,事实上以这为目的被大大利用着。避雷针和避雷器便是典型的例子。

近年来,各种电子装置的电源的输入部位盛行接入线路过滤器(图 1.11)。这个线路过滤器是为了不让通入电源线的无用的噪音进入电子装置。把电源的各线与大地间接入电容器,噪音就逸入大地。因此,在各线路滤波器中线路滤波器用的接地是必要的。

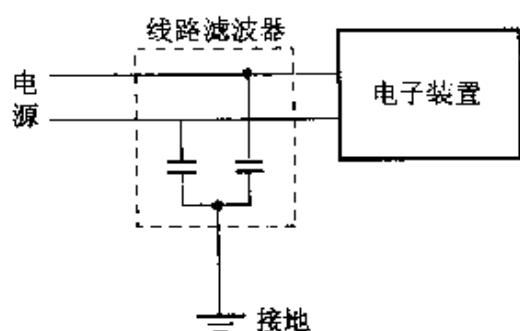


图 1.11 线路滤波器

汽车的车体由轮胎与大地绝缘。所以，在汽车车体上会蓄积因行进中摩擦产生的静电。进入石油炼油厂场内的油罐车在进入场内之前要将车体接地一段时间，把蓄积的静电电荷放掉（图 1.12）。这就是静电用的接地。在集成电路（IC）、大规模集成电路（LSI）的工厂，静电是大敌，当然在要求不蓄积静电的地方就有必要用静电用的接地。

电用的接地。

最后，有天线的接地，这是机能的接地。相关的有屏蔽装置的接地和电子镜头的接地等。这些装置接地是为了把无用的电磁波的能量释放入大地。

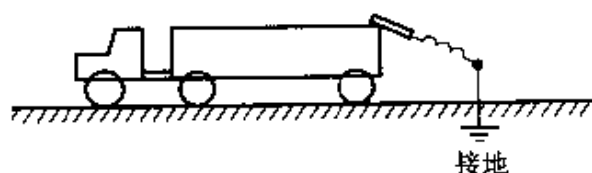


图 1.12 油罐车和静电用接地（在入场前停车且接上接地端子把静电电荷放掉）

1.3 什么叫接地

图 1.13 表示接地的概念图。

被接地的设备有电力设备、通信设备、电脑、避雷设备、电气防腐蚀设备等各种各样的设备。进行接地的目的有的是为了安全，也有是为通信清楚，利用把大地作为回路的一部分也是接地。

为了接地的目的，作接地时，必须装设大地的电气端子。在接地时这个端子起作用的是接地电极，普通它是使用被埋在地中的导体。被接地设备和接地电极连接的电线称为接地线。

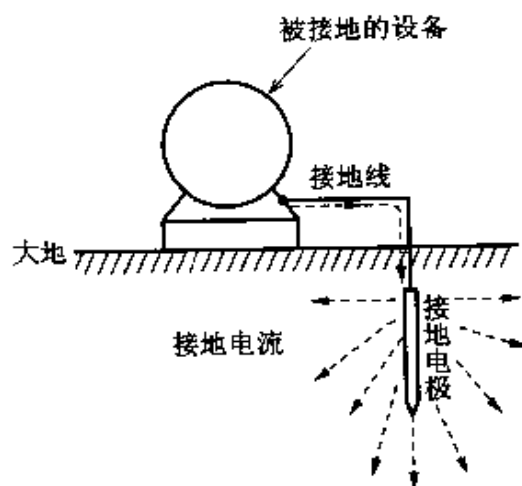


图 1.13 接地的概念图

从被接地设备经接地线、接地电极流向大地的电流叫做接地电流。

在接地时,与大地连接是否良好的指示是接地电阻,接地电阻较低,便实现了和大地的良好连接。

1.4 接地电阻的定义

接地电阻在理论上可按如下定义。

当有一个接地电极,现在有接地电流 $I[\text{A}]$ 流入这个电极[图 1.14 (a)]。在接地电极一流入接地电流,接地电极的电位就比接地电流流入前升高 $E[\text{V}]$ [同图(b)]。这时,把 $E/I[\Omega]$ 作为那个接地电极的接地电阻。

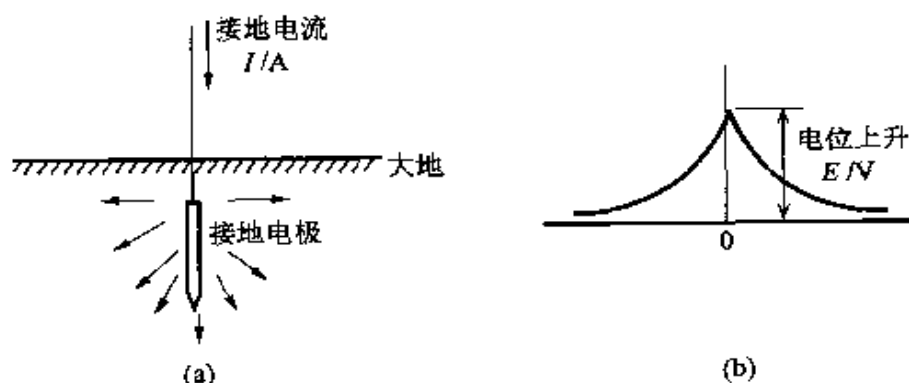


图 1.14 接地阻抗的定义

这个定义有两个附带条件。

(1) 为了在接地电极流出接地电流,当然必须把一根接地电极打入大地。而在有二根接地电极并在电极之间接入电源时就会流过接地电流(图 1.15)。把这第二个电极叫做归路电极,定义接地电阻时,归路电极要打在十分远的地方,使它对主接地电极的影响可忽视。另外,电源取直流时,由直流电流产生的电化学现象可被忽视。

(2) 接地电极的电位升,是以无限远方作基准测量的,定义无限远方可说是很难的。主要是要测量出不因接地电流引起电位变动的点,即与通电前的状态不变的地方。如图 1.16 所示,把电位测量的基准点太靠近接地电极,基准点的电位就由接地电流引起若干(ΔE)上升,这就引入了电位升测量的误差。

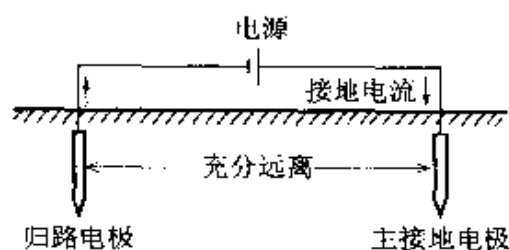


图 1.15 归路电极

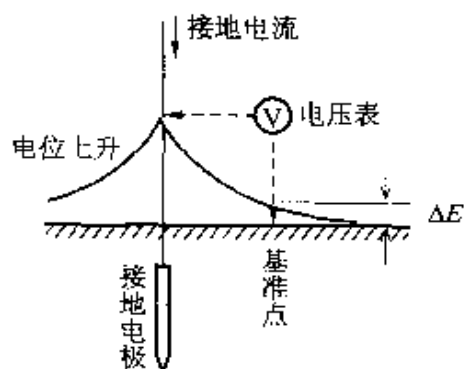


图 1.16 把电位测定的基准点一靠近接地电极时,引入误差 ΔE

1.5 接地电阻的一般性质

接地电阻具体的由以下三个构成要素组成:

- ① 接地线的电阻及接地电极自身的电阻;
- ② 接地电极的表面及与其接触的土地之间的接触电阻;
- ③ 电极周围大地的电阻。

以上三个构成要素之中③是最重要的。接地电阻的主要部分是把电极包围的大地的电阻。

通过大地的电导,因为断面积非常大,它的电阻小到可以考虑能被忽视的程度。确切的说,离接地电极相当远时,因电流通路的断面积变得非常大,只要土壤的导电性不是相当恶劣,它的电阻便小到能被忽视的程度。

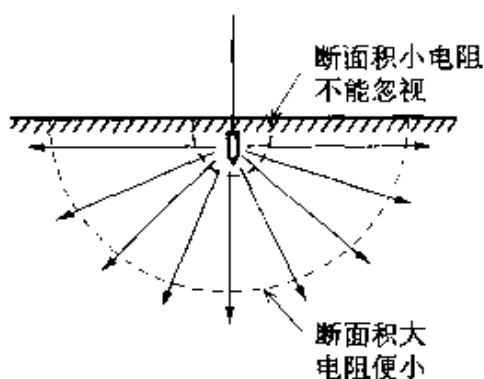


图 1.17 电流通路的断面积和电阻的关系

但是,在接地电阻附近,因为电流从大小有限的接地电极流出,电流通路的断面积被束缚,对接地电流便有一定量的电阻(图 1.17)。

影响接地电阻要素中最重要的是接地电极周围大地的电阻率。大地电阻率的重要性可说是大地通电的总纲。影响接地电阻的要因中次于大地电阻率的重要的是接地电极的形状和尺寸。

如某个接地电极的形状和尺寸是确定

的,它的电极的接地电阻就可按下式表示:

$$R = \rho \cdot f \text{ (形状, 尺寸)}$$

式中, R 是接地电阻, ρ 是大地电阻率, f (形状, 尺寸) 是与电极形状和尺寸有关的函数。另外, 在上式中, 电极周围的大地至无限远方的电阻率是一定的。

由上式可以明了, 接地电阻与大地电阻率成比例。也就是同一形状, 同一尺寸电极的场合, 如大地电阻率低便容易得到低的接地电阻。

另外, 函数 f 在电极的形状不清楚时不能确定。在电极的形状一定、大小如图 1.18 所示作相似变化的场合, 接地电阻可以下式表示:

$$R = k \frac{\rho}{l}$$

式中, l 是表示电极规模的特征尺寸, k 是由形状确定的系数。 l 在如图 1.18 所示是半球状电极的半径, 是代表电极边缘规模的长度。 k 在同一电极形状时是不变的系数, 是无量纲的。

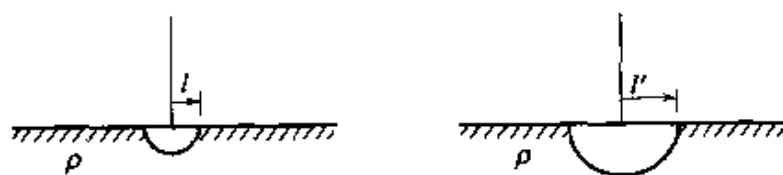


图 1.18 在接地电极形状一定而大小作相似变化的场合

由上式, 在大地电阻率一定的场合, 如形状变化, 接地电阻会明显变大变小。这个法则, 是对接地电极设计上的重要的指针, 亦是由模型电极来对接地电阻推算之际起支配作用的原理。

1.6 大地电阻率的知识

接地电极的接地电阻,与那个施工进行地点的大地电阻率成比例。大地电阻率低的地点,易得到低的接地电阻。因而,当接地电极设计和施工时,知道施工地点的大地电阻率这是非常重要的事。几乎所有的土地,如它完全干燥,就不通电,它是绝缘物。但是,自然界的土地很少是完全干燥的,一定会含有某些水分。

那末,土地一含水,它的电阻率便大幅度下降而变成导体。一般情况,含水分多的土壤电阻率低。但是如说土地为导体那它是比金属坏得多的导体,莫如把它说成是半导体。图 1.19 中表示了各种物质电阻率的排位图。相对于铜的电阻率约为 $10^{-8} \Omega \cdot m$,土地的电阻率为 $10^2 \Omega \cdot m$,两者之间有 10G 距离。

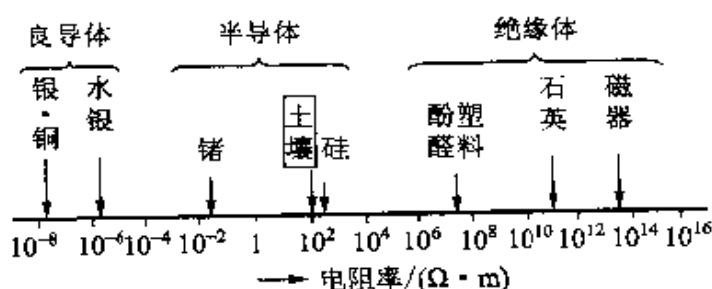


图 1.19 各种物质电阻率的排位图(常温)

当设计接地电极时,电极自身的电阻几乎不是要考虑的问题,因为金属的电阻率与周围大地比是非常低的。

表 1.1 土壤的温度和电阻率

温度	大地电阻率	比率
20℃	72	1.0
10℃	99	1.4
0℃	130	19
0℃(冰)	300	42
-5℃(冰)	790	110
-15℃	3300	459

对土壤电阻有很大的影响的要因除水分之外是温度。表 1.1 是表示由温度引起土壤电阻率的变化和变动的比率,温度从 20~ -15℃变化的场合,由表中看出,同一土地中电阻率随温度可增加 459 倍,这是因水(含冰)的电阻率会由温度引起敏锐的变化。

自然界的土壤电阻率因含水率和温

度受各种各样因素的支配,而且在不断变化。它是因天气、季节而相应变化的,一般是夏天低,冬天高。

对有关特定种类的土壤,要明确表示它的电阻率是有困难的。我们不能说出“粘土有多少 $\Omega \cdot \text{m}$ 的电阻率”。原因是,即使相同的粘土,因地点和时间不同,电阻率是不同的。要正确知道大地电阻率,在现场对它测量是捷径。即把已知长度和直径的接地棒一根打入地中测量它的接地电阻,电阻率值可由电阻值按接地电阻公式(后述)进行逆算得出。

在表 1.2 中,表示大地按电阻率的分类,大地电阻率超过 $1000\Omega \cdot \text{m}$ 是高电阻率地带,在这样的场所接地施工便变得非常困难。

大地一般呈层状结构,电阻率会因地层不同而大幅变化。因而,大地电阻率多数随深度变化。大地决不是均质的,而是非常不均质的。

表 1.2 大地按电阻率分类

分 类	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	特 征
低电阻率地带	$\rho < 1000$	常在土壤中含有充分的水分的河口或沿海的低地
中电阻率地带	$100 \leq \rho < 1000$	获得地下水不感到困难的内陆的平原部分
高电阻率地带	$1000 \leq \rho$	较缺少水的丘陵地带,山脉,高原

1.7 半球状接地电极的接地电阻

如图 1.20 所示,半径为 $r[\text{m}]$ 的半球状接地电极被埋设在地表面下,周围的大地至无限远方是均质等方向性的,它的电阻率为 $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ 。

这样,如假定半球状接地电极的接地电阻为 $R[\Omega]$,它可表示如下:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} [\Omega]$$

此式按下面那样被导出。

现在,接地电流一流入这个半球状接地电极,如果归路电极在十分远的地方,这个接地电

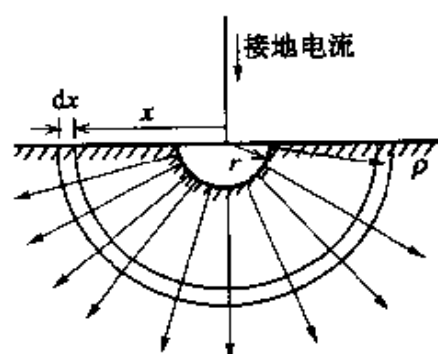


图 1.20 半球状接地电极

流从半球状接地电极以放射状扩散流向地中。

在地中,假定一个与半球状接地电极同心的半径为 x 的半球,再假定一个在地中与半球电极同心的、半径为 $x+dx$ 的半球。那样,在地中可切出内径为 x 厚度为 dx 的碗状部分。

接地电流由此碗的内面向外面流出。因而,如此碗的电阻值为 dR

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}$$

即,把碗当作是电阻率为 ρ 的材料作成的长度为 dx 、断面积为 $2\pi x^2$ 的电阻体。 $2\pi x^2$ 是半球体的表面积。

这样的电阻体可考虑是从半球状接地电极的表面($x=r$)到无限远方($x \rightarrow \infty$)串联的。因而,接地电阻 R 等于把 dR 从 $x=r$ 到 ∞ 积分的值。

$$R = \int_{x=r}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

关于半球状接地电极的接地电阻,亦能由别的方法求出完全相同的结果。

把流入半球状接地电极的接地电流取作 $I[A]$,归路电极取在十分远的地方,此接地电流 $I[A]$ 从半球状电极向地中呈放射状扩散。

离半球状电极中心的距离 x 的地中的点的电流密度取作 i ,即

$$i = \frac{I}{2\pi x^2}$$

如同一点的电场为 E ,由 $E = \rho i$ 的关系,有

$$E = \frac{\rho I}{2\pi x^2}$$

半球状接地电极的电位 V 在把无限远方取为零电位的场合

$$V = - \int_{x=\infty}^r E dx = - \frac{\rho I}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

无限远方作为基准的接地电极的电位上升值因与那时的接地电流成比例,可求出接电阻,因而

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

另外,把无限远方作基准,关于半球电极的电位上升值可得出如下的重要的公式:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

1.8 接地电极的电阻区域

如前节指出的,如假定离半球状接地电极中心距离 x 的地点有厚度为 dx 的碗状的电阻为 dR ,它可按式表示:

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}$$

现在,如假定离电极中心的距离至 r_1 ,被包含在地中的电阻为 R_1 (图 1.21)。

$$R_1 = \int_{x=r}^{r_1} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^{r_1} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

这亦如已经求出的,半球状接地电阻 R 为

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

所以,取 R_1 和 R 之比 α 为

$$\alpha = \frac{R_1}{R} \times 100 = \left(1 - \frac{r}{r_1} \right) \times 100 [\%]$$

表 1.3 列出的是基于上式以 r_1 和 α 的关系计算的结果。 r_1 是以 r 的倍数表示。把 r_1 和 α 的关系图形化即如图 1.22 所示。

从表 1.3 和图 1.22 看出,随离电极的距离 r_1 增加,在全电阻 R 之中,到达 r_1 的地中电阻 R_1 会顺序增加。电阻的增加,开始比较快速,至电极半径二倍的距离 ($r_1 = 2r$) 已包含有全电阻的一半 (50%)。之后增加的程度按顺序变小。严格的讲,距离不到无限大,就不包含全部电阻。

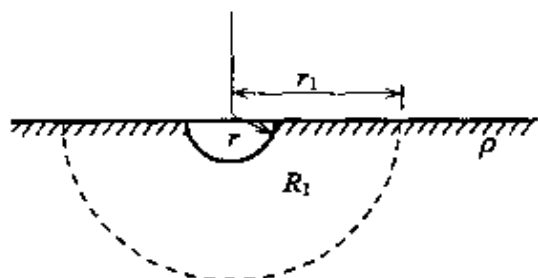


图 1.21 电阻区域的导出

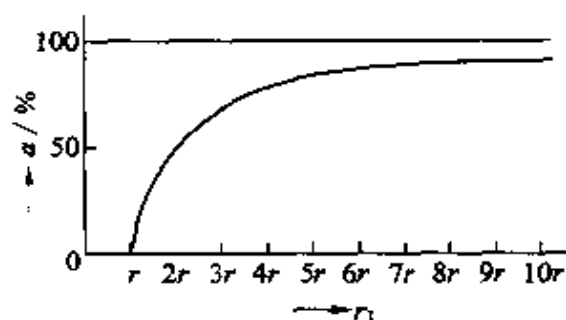


图 1.22 r_1 和 α 的关系

表 1.3 r_1 和 α 的关系

r_1	$\alpha/\%$	$\Delta\alpha/\%$
r	0	
$2r$	50	50
$3r$	67	17
$4r$	75	8
$5r$	80	5
$6r$	83	3
$7r$	86	3
$8r$	88	2
$9r$	89	1
$10r$	90	1
$20r$	95	

 $\Delta\alpha$ 是 α 的增量

但是,实用中,因为接地电阻的大部分是包含在电极附近的。把那个部分的地表面称为电阻区域。半球状接地电极的场合,如电阻区域包含全电阻的 50%,电阻区域为到达 $2r$ 的区域。同样,如达到全电阻的 90%,电阻区域为至 $10r$ 的区域。

以上是半球状电极的例子,而对其它形状的电极大致是相同的。其它形状电极的场合,利用后述的“等值半径”较好。

1.9 由接地电流引起大地电位上升

当接地电流一流入接地电极,不只是接地电极,而且其附近的大地的电位分布亦改变。在安全上重要的是地表面的电位。

如已经指出的,离半球电极中心距离 x 的地方有电阻要素 dR ,可按下式表示:

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}$$

因而,由距离 x 的点到达无限远方的所包含的全电阻如假定为 R_x (参照图 1.23),它可由 dR 式从 x 至 ∞ 积分求得:

$$R_x = \int_x^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left[-\frac{1}{x} \right]_x^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi x}$$

如 x 点的电位为 V_x (以无限远方为基准),它可由 R_x 与接地电流乘积得出:

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x}$$

地表面的电位分布如图 1.24 所示。在 V_x 式中如取 $x=r$,便得出半球状电极自身的电位 V ,即

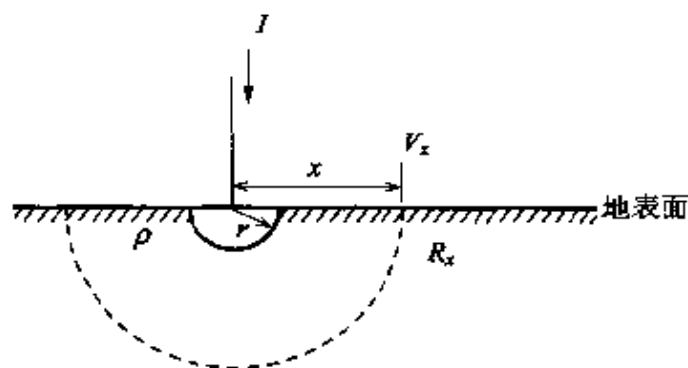


图 1.23 大地电位上升的计算

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

上式与求半球状接地电极接地电阻时求得的结果是一致的。

由图 1.24 知道,大地电位以与离接地电极的距离成反比例下降。中央的平坦部分是存在接地电极的部分。如人在地面以跨步 Δx 立着,两足之间便可能有电压 ΔV ,把这个值称为跨步电压。

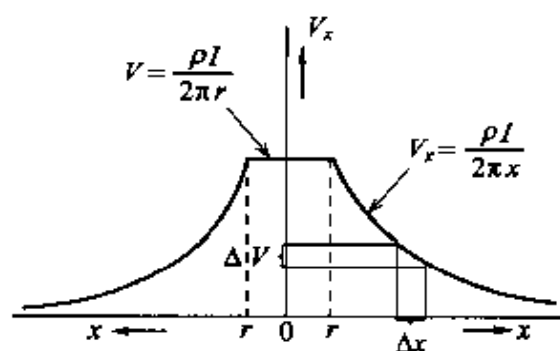


图 1.24 由接地电流引起大地电位上升

在接地电极中,可因各种各样的原因有接地电流流入,如室外的输配电线便有雷击电流流入,如是在室内电气设备接着的接地电极上,在发生接地事故时便有接地电流流入。

偶然在接地电极上有接地电流流入之际,担心在接地电极附近立着的人会因为跨步电压触电。这里,比电位更重要的莫如电位梯度,它可把电位微分求得:

$$\frac{dV_x}{dx} = -\frac{\rho I}{2\pi x^2}$$

由上式知道,电位梯度与离电极的距离 x 的平方成反比,即电位梯度在靠近电极的地方最大,随离电极距离增大而急速降低。在理论上,不到无限远方电位梯度不降至零。但是实际上,如到达一定程度的距离,几乎无电位梯度的危险性。以电极为中心,把危险的电位梯度发生的范围称作禁止区域。也就是因进入这个区域内是危险的,是禁止进入的区域。

禁止区域的大小,因这个地点的大地电阻率及接地电流而变化。因电位梯度与 ρ 成比例,大地电阻率高的地点来说禁止区域便大。同样,因电位梯度也与 I 成比例,发生的接地电流大禁止区域范围也变大。

假定接地电流由直击雷引起,因有非常大的电流,禁止区域亦变得相当大。又最近因变电所接地故障电流变大,因此禁止区域也变得相当大。

1.10 全球状接地电极

如图 1.25 那样,半径 r [m] 的全球状接地电极被埋入地中深处,地表面

及归路电极设在十分远的地方。

那样,由全球接地电极流出的接地电流在所有方向以放射状扩散。电极周围的大地是均质等方向性的,它的电阻率取作 $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ 。

如全球电极的接地电阻为 $R[\Omega]$, 它可按式表示:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} [\Omega]$$

这个式子可由以下的方法导出。

如图 1.25,在地中设定一与全球状接地电极同心的半径为 x 的全球,而且在地中设定一与全球电极同心的半径为 $x+dx$ 的全球。那样,在地中可切

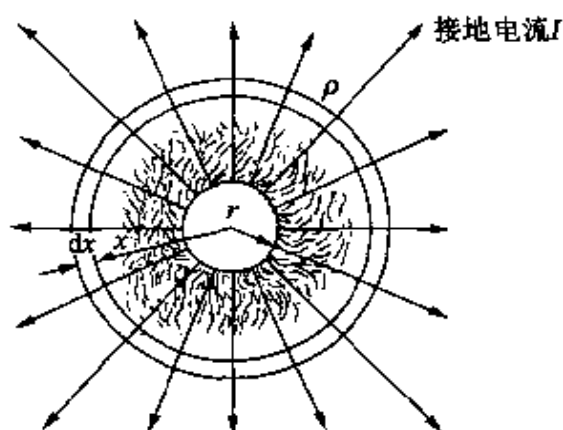


图 1.25 全球状接地电极

取出内径为 x ,厚度为 dx 的球壳状的部分。

接地电流从这个球壳的内面向外面流出,因而,这个球壳的电阻值为 dR

$$dR = \rho \frac{dx}{4\pi x^2}$$

如果考虑把这电阻元,从全球状接地电极的表面($x=r$)到无限远方($x \rightarrow \infty$)串接,因此,全球状接地电极的接地电阻 R 是等于把接地电阻元由 $x=r$ 到 ∞ 积分的值。

$$R = \int_{x=r}^{\infty} dR = \frac{\rho}{4\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{4\pi r}$$

这就是上述的全球电极的接地电阻。

关于全球电极的接地电阻,可由别的方法求出完全相同的结果。另一种考虑的方法与半球电极的场合是相同的。

即把从全球状接地电极往地中流出的接地电流取为 $I[\text{A}]$,设地表面及归路电极在充分远的地方,这个接地电流 $I[\text{A}]$ 从电极向地中以放射状扩散。

取离全球电极中心距离为 x 的地中的点的电流密度 i 为

$$i = \frac{I}{4\pi x^2}$$

假设同一点的电场为 E ,由 $E = \rho i$ 的关系得

$$E = \frac{\rho I}{4\pi x^2}$$

全球状接地电极的电位 V , 把无限远方取作零电位的场合:

$$V = - \int_{x \rightarrow \infty}^r E dx = - \frac{\rho I}{4\pi} \int_{\infty}^r \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{4\pi r}$$

把以无限远方为基准的接地电极的电位上升值除以接地电流求出接地电阻。因而

$$R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

如前面指出的, 离全球电极中心距离 x 的地方电阻元 dR 可按下式表示:

$$dR = \rho \frac{dx}{4\pi x^2}$$

因而, 如从距离 x 的地方至无限远方范围内所包含的全电阻为 R_x , 它可由 dR 从 x 至 ∞ 积分求得:

$$R_x = \int_x^{\infty} dR = \frac{\rho}{4\pi} \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{4\pi x}$$

假定 x 点的电位为 V_x , 它可由 R_x 与接地电流 I 相乘得出:

$$V_x = \frac{\rho I}{4\pi x}$$

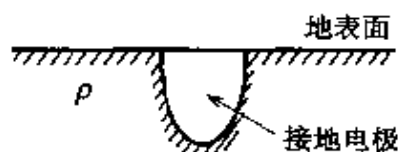
这就是地中的电位分布。

1.11 全空间问题和半空间问题

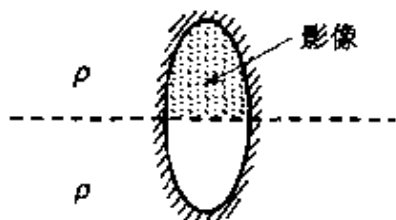
像半球状接地电极的场合, 可把地表面作为全空间平分的界面, 地表面下被充满电阻率为 ρ 的媒质。把这样的问题称作半空间问题。

与此对应, 像全球电极的场合, 全球电极被深埋入地中, 可忽视地表面的影响。那样的问题称作全空间问题。在全空间问题中, 认为在空间所有方向至无限远方都被充满电阻率为 ρ 的媒质。

现在, 像半球状电极的场合, 设在地表面下埋设任意形状尺寸的接地电极[图 1.26(a)]。这是一个半空间问题, 要求出它的接地电阻 R 。周围的大地电阻率为 ρ 。



(a) 半空间问题: 接地电阻 R



(b) 全空间问题: 接地电阻 $R' = \frac{R}{2}$

图 1.26 全空间问题和半空间问题

以下,就上述问题方面,把与地表面下接地电极对称的部分追加为接地电极[图 1.26(b)]。这部分便与在后述的镜像法中的镜像相当。而且,把全空间填满电阻率 ρ 的媒质。与镜像一体化的接地电极的接地电阻取作 R' 。这就是全空间问题。

通常, R' 是 R 的一半,即

$$R' = \frac{R}{2}$$

理由是因为在全空间问题中,接地电流通过的断面积对应于半空间问题的两倍。

1.12 接地电阻和静电电容

如图 1.27 所示,任意形状尺寸的接地电极埋设在均质等方向性的大地(电阻率为 ρ) 中,设它的接地电阻为 R 。

现在,就以图中那样的电极形状尺寸而言,设周围的媒质是介电常数为 ϵ 的绝缘物,那样电极便持有静电电容 C 。

这个场合, R 和 C 之间有以下式所示的一定关系:

$$R = \frac{\epsilon \rho}{C}$$

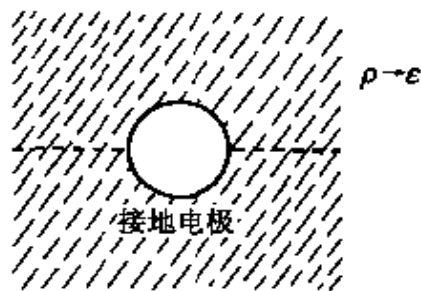


图 1.27 接地电阻和静电电容

因而,如已知电极的电容 C ,由上式可求出接地电阻 R ,这是全空间接地电阻。

以全球为例说明如下。

在介电常数为 ϵ 的媒质中,半径为 r 的全球的电容 C 可由电磁场理论给出下式:

$$C = 4\pi\epsilon r$$

在电阻率为 ρ 的导电媒质中, 半径为 r 的全球的接地电阻 R 便可由这个电容求出:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

这个结果与前述别的方法求出的全球的接地电阻是一致的。

1.13 叠加原理和镜像法——埋设深度的影响

如图 1.28 所示, 设在离地表面 d [m] 的深处, 埋设了半径为 r [m] 的全球电极, 周围的大地是均质等方向性的, 设它的电阻率为 ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]。

如已经求出的那样, 全球电极被埋设在离地表面十分深 ($d \rightarrow \infty$) 的地方, 这可用全空间问题来求解, 接地电阻 R 可按下式求得:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

与此对照, 埋设深度 d 为零的场合, 便与在地表面下埋设半球电极时相同, 因而接地电阻 R' 等于下式:

$$R' = \frac{\rho}{2\pi r}$$

埋设深度 d 在从 0 到 ∞ 之间的场合, 预计接地电阻可取 R' 和 R 的中间的值。要严密的计算接地电阻来说是较困难的, 但使用叠加原理和镜像法可作出大概的估计。

如图 1.28 所示, 导入离地表面上高 d [m]、半径 r [m] 的第二个全球电极, 把全部空间充满电阻率为 ρ 的媒质。第二个电极相当于镜像法中的镜像, 以下把第一接地电极称作主接地电极。

认为从两个接地电极各自向地中流入电流 I [A]。就由导入镜像替代了地表面的影响。

如图 1.28 所示, 取离两极的中心距离为 x 、 x' 的地中的点 p , 它的电位取作 V_p , 使用叠加原理 V_p 可以表示如下:

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} \right)$$

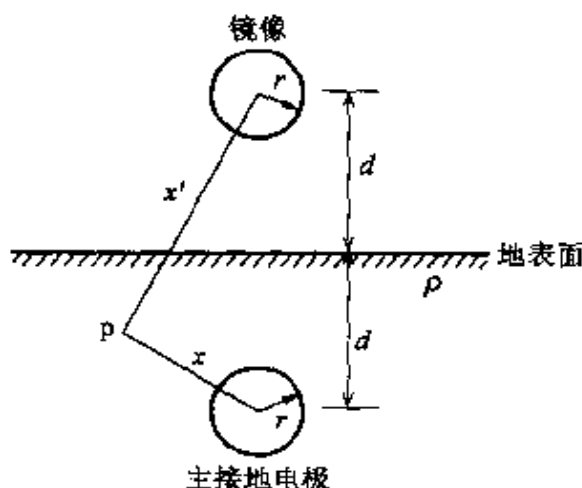


图 1.28 埋设深度的影响

表 1.4 由 d/r 引起接地电阻的变化——埋设深度的影响

d/r	$1 + \frac{r}{2d}$
2	1.250
5	1.100
10	1.050
15	1.033
20	1.025
25	1.020
30	1.017
35	1.014
40	1.013

取 p 点在主电极的表面, 则它的电位按下式确定:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2d} \right)$$

式中, 设 $2d \gg r$, 因而, 主接地电极的接地电阻 R 可决定如下:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2d} \right)$$

在上式中, 如 $d \rightarrow \infty$, 便成为在全空间问题的接地电阻。因而, 由上式括号中的第二项, 可考虑主电极在靠近地表面时接

地电阻值上升。它的上升程度由 r 与 d 的比决定。

表 1.4 中, 列出了由 d/r 引起接地电阻的变化。

1.14 并联接地和集合效应

如图 1.29 所示, 作多个接地电极施工, 把它们并联连接起来, 把这称作并联接地。

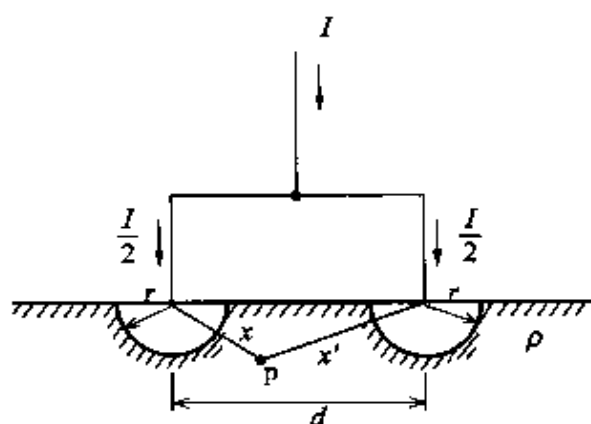


图 1.29 并联接地

例如, 在有 2 个电阻值为 $R(\Omega)$ 的集中参数电阻并联连接的场合, 由电阻并联的公式可得合成电阻为 $R/2[\Omega]$ 。

接地的场合,在有 2 个接地电阻值为 $R(\Omega)$ 的接地电极并联连接时,合成接地电阻值不一定是 $R/2[\Omega]$ 。通常,合成接地电阻值比 $R/2[\Omega]$ 大一些。

这里,当接地电极间的间隔变狭,接地电阻超出程度便变大,把这称为集合效应。

图 1.29 表示了由 2 个半球状接地电极来说明集合效应,各接地电极的半径为 r ,接地电极的间隔为 d ,设接地电极周围的大地的电阻率为 ρ 。

设流入该接地电极系统的全接地电流为 I ,流入各接地电极的电流是 $I/2$ 。假定在地中任意点 p ,它离各接地电极的距离为 x, x' 。如 p 点的电位为 V_p ,由叠加原理:

$$V_p = \frac{\rho \left(\frac{I}{2} \right)}{2\pi x} + \frac{\rho \left(\frac{I}{2} \right)}{2\pi x'}$$

如把 p 点设在某一半球电极的表面,接地电极系统的电位 V 确定为

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d} \right)$$

所以,该接地系统的接地电阻 R 可由下式求出:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{d} \right)$$

式中,设 $d \gg r$ 。上式括号内第二项表示集合效应。集合效应由 d/r 引起变化。在表 1.5 中表示了 d/r 与集合效应的关系。

表 1.5 由 d/r 引起集合效应的变化

d/r	$1 + \frac{r}{d}$
2	1.500
5	1.200
10	1.100
20	1.050
40	1.025
50	1.020
100	1.010

1.15 旋转椭圆体接地电极(扁平)

接地电阻可在理论上严密地求出的接地电极还有旋转椭圆体接地电极。其它形状的接地电极的接地电阻公式可相应由旋转椭圆体的公式导出。因而,虽然实际并不使用此电极形状,但旋转椭圆电极与球状电极一同作为接地电阻的理论体系化中的把手。

如图 1.30 所示,椭圆中有长径和短径,在长径上有椭圆中的 2 个焦点 (F_1, F_2)。椭圆上点 P 至两焦点的距离之和是一定的。

那末,由椭圆作成旋转椭圆体时,因可以取长径为轴作旋转或取短径为轴作旋转,会切出不同的形状。取椭圆的短径为轴旋转得出的立体称为扁平旋转椭圆体。

在此,可用全空间问题处理,设周围的大地在全部方向上至无限远方的电阻率为 ρ 。

在扁平旋转椭圆体,作旋转轴的短径的长度为 $2l$,那个椭圆的长径的长度取 $2r, l < r$ 。

设椭圆的焦点间距离为 $2a$ 。

$$a = \sqrt{r^2 - l^2}$$

设椭圆的离心率为 e ,即

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{l}{r}\right)^2}$$

设扁平旋转椭圆体的接地电阻为 R ,它等于下式:

$$R = \frac{\rho}{4\pi a} \operatorname{arccot}\left(\frac{l}{a}\right) [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

扁平旋转椭圆体的接地电阻 R 也可表示如下:

$$R = \frac{\rho}{4\pi er} \operatorname{arcsine} [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

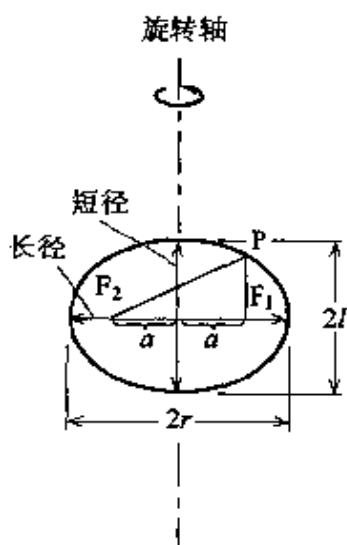


图 1.30 扁平旋转椭圆体

1.16 旋转椭圆体接地电极(扁长)

如图 1.31 所示,取椭圆的长径为轴旋转得出的立体称作扁长旋转椭圆体。

在扁长旋转椭圆体,作旋转轴的长径的长度为 $2l$,那个椭圆的短径的长度取作 $2r$ (图 1.31)。对扁长旋转椭圆体来说, $r < l$ 。

扁长椭圆旋转体的场合,设椭圆焦点间的距离为 $2a$,即 a 为

$$a = \sqrt{l^2 - r^2}$$

椭圆的离心率为 e ,即

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2}$$

这里与扁平的情况相同,可用全空间问题处理,设周围的大地在全部方向上至无限远方电阻率为 ρ 。

如设扁长旋转椭圆体的接地电阻为 R ,它等于下式:

$$R = \frac{\rho}{4\pi a} \ln\left(\frac{a+l}{r}\right) [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

或者,接地电阻 R 可表示如下:

$$R = \frac{\rho}{4\pi e l} \ln \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

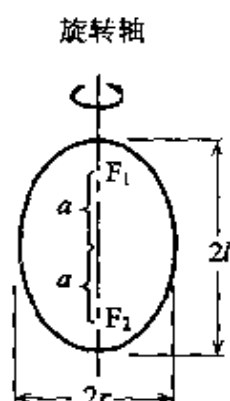


图 1.31 扁长旋转椭圆体

1.17 棒状电极——等值半径

1.17.1 作为扁长旋转椭圆体

在扁长旋转椭圆体,考虑 $r \ll l$ 的场合,焦点间距离的一半 a 为 $a \approx l$ 。即,扁长椭圆体成为长 $2l$ 、直径 $2r$ 的细棒(图1.32),焦点在它的两端。

棒状电极的接地电阻 R 由扁长旋转椭圆体的接地电阻公式得出:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{2l}{r} [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

上式在 $r \rightarrow 0$ 时成为 ∞ ,即棒状电极变细(长度取作一定),它的接地电阻便变高。

如图 1.33 所示,由地表面打入深度达 l ,半径为 r 的棒状电极的接地电阻 R ,可作为半空间问题:



图 1.32 棒状电极 ($r \ll l$)

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} [\Omega] \quad (\text{半空间})$$

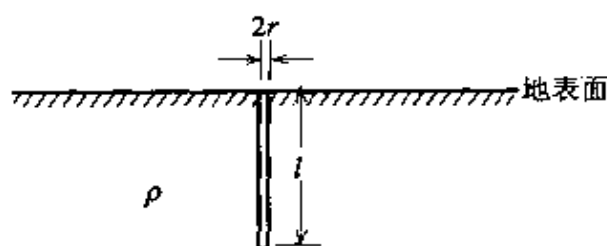


图 1.33 棒状电极(半空间)

把与棒状电极(半空间)接地电阻相等的半球状接地电极的半径称为棒状电极的等值半径。设这个等值半径为 $\mathcal{R}$, 由半球状电极的接地电阻公式:

$$\frac{\rho}{2\pi\mathcal{R}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}$$

可得出棒状电极的等值半径:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\ln \frac{2l}{r}} [\text{m}] \quad (\text{半空间})$$

● 1.17.2 均匀电流法

又, 考虑长度 $2l$ 、直径 $2r$ 的细棒, 取 $r \ll l$ 。作为全空间问题, 设在电极的周围至无限远方都被充满电阻率为 ρ 的媒质。

接地电流由棒状电极向周围媒质流入的场合, 按棒的不同部位电流密度是不同的。例如, 在棒的端部和中央部位电流密度不同。可是, 因这样考虑作解析是麻烦的, 把沿棒状电极的电流密度取作一定值来求接地电阻, 这就是均匀电流法。与此对应, 把求棒状导体的静电电容的方法称为均匀电荷法。当然, 这是近似法。

在这个场合, 可得出在棒状电极各个部位的电位不同的结果, 那末, 在求接地电阻时, 采用电位的平均值。这样一来, 如求接地电阻, 可得出以下的计算式:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \left[\ln \frac{2l}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right\} + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right]$$

取 $r \ll l$, 可把上式简化为

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

如图 1.33 所示, 由地表面打入深度至 l 、半径为 r 的棒状电极的接地电

阻 R , 作为半空间问题

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) [\Omega] \quad (\text{半空间})$$

这个场合的等值半径可取作 $\mathcal{R}$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\ln \frac{4l}{r} - 1} [\text{m}] \quad (\text{半空间})$$

1.18 圆板电极

在扁平旋转椭圆体, 取 $l=0$, 就成半径为 r 、厚度为零的圆板电极 (图 1.34)。

这个场合, 焦点间距离的一半 a 等于 r , 即焦点在圆板的外缘位置。椭圆的离心率 e 是 1。

$\arcsin 1 = \pi/2$, 因而, 由扁平旋转椭圆体的接地电阻公式, 圆板的接地电阻 R 为

$$R = \frac{\rho}{8r} [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

如图 1.35, 在地表面以水平布置的圆板电极的场合, 它的接地电阻可作半空间问题, 可以下式表示:

$$R = \frac{\rho}{4r} [\Omega] \quad (\text{半空间})$$

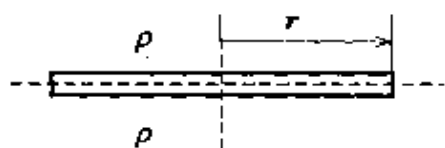


图 1.34 圆板电极

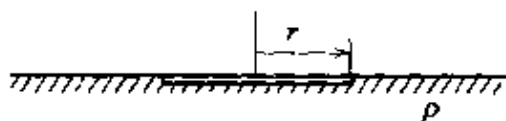


图 1.35 圆板电极(半空间)

1.19 埋设地线

棒状电极作为接地电极是便利与经济的形状。然而, 在现实中, 因各种各样的原因而不使用棒状电极。例如, 在地中浅处存在大岩石的场合等。

这种场合,必须考虑其它形状的接地电极。

埋设地线,在现时被广泛采用,所谓埋设地线,如图 1.36 所示,是把裸电线在浅处水平埋设作接地电极的方法。

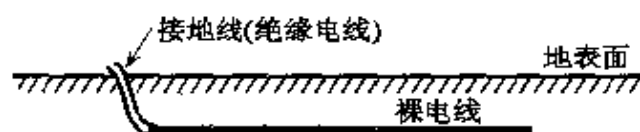


图 1.36 埋设地线

● 1.19.1 作为扁长旋转椭圆体

在离地表面十分深埋设的地线的接地电阻,可与棒状电极的全空间接地电阻同一办法考虑,即由扁长旋转椭圆体公式:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r} [\Omega]$$

式中, l : 埋设地线的全长[m], r : 埋设地线的半径[m]。

地表面对靠近的地方的影响,如图 1.37 所示,把全空间充满电阻率 ρ 的媒质,可考虑在埋设地线的上方相隔 $2d$ [m]处的镜像(参照 1.13 节的镜像法),它相当于第二根地线。设 d 为地线的埋设深度。

在地表面下 d [m]埋设的地线的接地电阻 R ,受到第二地线的影响,变为如下式:

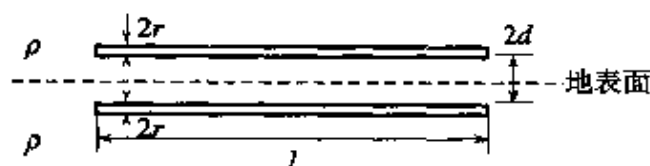


图 1.37 埋设地线和镜像

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r} + \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{2d} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{2rd} [\Omega]$$

在英国标准中(CP1013:1965, Earthing),埋设地线的接地电阻采用本式计算。

● 1.19.2 均匀电流法

在离地表面充分深埋设的埋设地线的接地电阻,可与棒状电极的全

空间接地电阻相同的计算方法考虑。由均匀电流法引出的接地电阻公式：

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) [\Omega]$$

式中, l : 埋设地线的全长[m]; r : 埋设地线的半径[m]。

地表面对靠近的地方的影响与前相同, 可按镜像法(图 1.37)考虑。

地表面下 d [m] 埋设的埋设地线的接地电阻受第二地线(镜像)的影响。变为如下面所示：

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l}{d} - 1 \right) = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l^2}{rd} - 2 \right) [\Omega]$$

式中设 $d \ll l$ 。

● 1.19.3 星形地线

在接地施工得不到充分用地的场合, 可如图 1.38(a)那样把埋设地线曲折成直角进行施工。又, 埋设地线亦可如图 1.38(b)~(e)作星形施工。

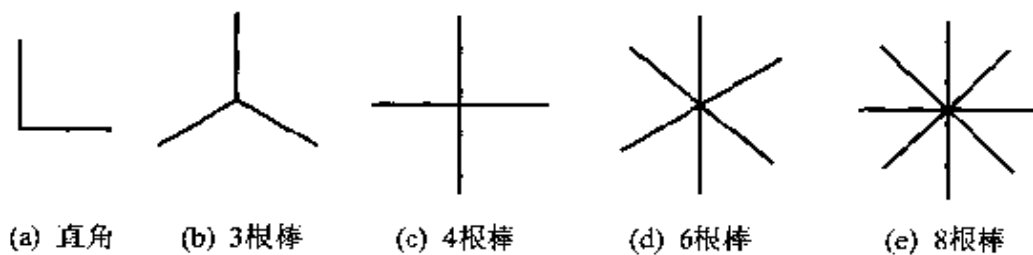


图 1.38 星形埋设地线

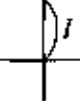
把图 1.38(a)~(e)形状埋设地线的接地电阻的计算式汇总示于表 1.6。

把全长 100m 的导线作成各种形状埋设的场合的接地电阻汇总示于表 1.7。这里, 假设大地电阻率为 $100\Omega \cdot m$, 埋设深度为 1m, 导线的半径为 0.004m, 及假定导线的全长一定。计算结果可看出按一直线埋设的场合得到最最低的电阻, 而形状变化得愈复杂, 接地电阻会变得愈高。

表 1.8 是把周长固定为 $100\pi^{1)}$ m, 埋设深度为 1m, 电线的半径为 0.004m, 这个场合, 形状变得愈复杂, 接地电阻变得愈低。然而, 那样相应使用的电线也变长, 这是要注意的。

1) 原书中周长固定为 100m, 按图示应为 $100\pi m$ 。——译者注

表 1.6 各种形状埋设地线的接地电阻的计算式

直角		$\frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{d} - 0.2373 + 0.4292 \frac{d}{l} + 0.4140 \frac{d^2}{l^2} - 0.6784 \frac{d^4}{l^4} \right)$
3 根棒		$\frac{\rho}{6\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{d} + 1.071 - 0.418 \frac{d}{l} + 0.952 \frac{d^2}{l^2} - 0.864 \frac{d^4}{l^4} \right)$
4 根棒		$\frac{\rho}{8\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{d} + 2.912 - 2.142 \frac{d}{l} + 2.580 \frac{d^2}{l^2} - 2.320 \frac{d^4}{l^4} \right)$
6 根棒		$\frac{\rho}{12\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{d} + 6.851 - 6.256 \frac{d}{l} + 7.032 \frac{d^2}{l^2} - 7.84 \frac{d^4}{l^4} \right)$
8 根棒		$\frac{\rho}{16\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{d} + 10.98 - 11.02 \frac{d}{l} + 13.04 \frac{d^2}{l^2} - 18.72 \frac{d^4}{l^4} \right)$

l : 1 边的长度[m]; ρ : 大地电阻率[$\Omega \cdot m$]; r : 地线的半径[m]; d : 埋设深度[m]

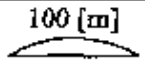
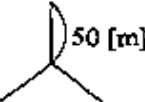
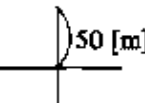
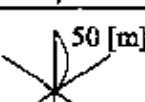
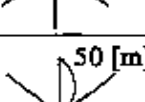
表 1.7 把全长 100m 的电线作成各种形状的埋设地线时的接地电阻

形状	一边的长度 l/m	接地电阻值 $/\Omega$
直线	$l=100$	2.140
直角	$l=\frac{100}{2}$	2.198
星形 3 根棒	$l=\frac{100}{3}$	2.274
星形 4 根棒	$l=\frac{100}{4}$	2.464
星形 6 根棒	$l=\frac{100}{6}$	2.919
星形 8 根棒	$l=\frac{100}{8}$	3.413

$\rho=100\Omega \cdot m, d=1m$

$r=0.004m$

表 1.8 把周长固定为 $100\pi m$ 的场合的各种形状的埋设地线的接地电阻

形状和尺寸	接地电阻值 $/\Omega$	电线全长 $/m$
直线 	2.140	100
星形 3 根棒 	1.602	150
星形 4 根棒 	1.346	200
星形 6 根棒 	1.102	300
星形 8 根棒 	0.987	400

$\rho=100\Omega \cdot m, d=1m$

$r=0.004m$

● 1. 19. 4 环状地线

以圆周形埋设地线作施工的就是环状地线。设圆周的直径为 $D[\text{m}]$ 。地线的半径为 r (图 1. 39)。设 $r \ll D$ 。

在十分深处埋设的环状地线的接地电阻,可由静电电容按下式求出:

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4D}{r} [\Omega] \quad (\text{全空间})$$

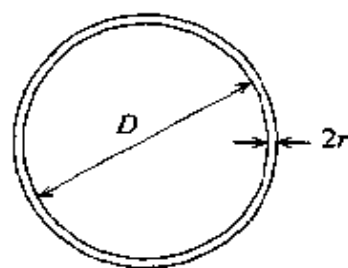


图 1. 39 环状地线

在地表面下 $d[\text{m}]$ 埋设的环状地线的接地电阻,加上镜像的影响变为如下的计算式:

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{4D}{r} + \ln \frac{4D}{2d} \right) = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{rd} [\Omega]$$

非常浅埋设的环状地线的场合,它的接地电阻取作半空间电阻,是全空间电阻的二倍。

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{r} [\Omega] \quad (\text{半空间})$$

● 1. 19. 5 埋设地线引起大地电位上升

如图 1. 40 所示,考虑埋设地线的剖面。设定埋设地线的深度为 $d[\text{m}]$,沿地表面为 x 轴。考虑 x 轴的原点在埋设地线的正上方。

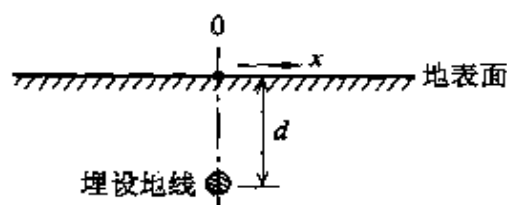


图 1. 40 埋设地线(剖面方向)

埋设地线取直线状,从它单位长度向周围流出 $I[\text{A/m}]$ 的电流,又设周围大地的电阻率为 $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ 。这时,如设沿地表面产生的电位为 $V(x)$,它可由下面的计算式表示:

$$V(x) = \frac{\rho I}{2\pi} \ln \frac{d^2}{d^2 + x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \ln \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{d}\right)^2} [\text{V}]$$

式中,在 $x=0$ 处,取 $V(0)=0$ 。图 1.41 表示电位上升的侧面图。

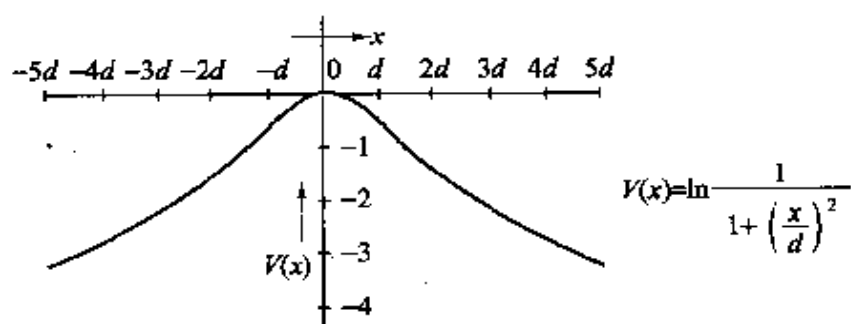


图 1.41 由直线状埋设地线引起地表面电位上升的侧面图

1.20 网状接地电极

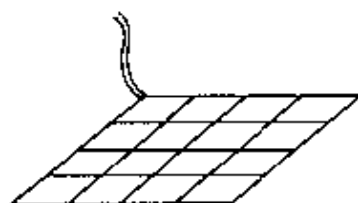


图 1.42 网状(mesh 状)接地电极

把多根埋设地线相互连接成格子状可构成大的接地电极,这样的电极就是网状(mesh 状)电极(图 1.42)。在必须取较低接地电阻的电站或变电所采用网状电极。要精密预测网状电极的接地电阻是很困难的。

● 1.20.1 等值半径的导出

首先,忽略网状接地电极的详细构造,着眼于接地电极所占有的最大面积。由网状电极周边的导体围成的面积取作 $A[\text{m}^2]$ 。如把与这有同一面积的圆板的半径取作为 $r[\text{m}]$ 。

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} [\text{m}]$$

把这作为网状接地电极的等值半径。这个场合网状电极不限于圆形。而由形状引起接地电阻的变化在这里是不过问的。

● 1.20.2 埋设深度的分类

把从地表面至网状电极的深度如图 1.43 可分为三种类型。总之,网状

电极取水平方向,即与地表面平行埋设,设埋设深度为 d [m]。

(1) $r \ll d$ 的场合 图 1.43(a)的场合,与网状电极的大小比较是埋设得十分深的场合,这个场合,网状电极上下两面的接地效果被充分利用。因而利用圆板的全空间接地电阻公式,网状接地电极的接地电阻,

$$R = \frac{\rho}{8r} = \frac{\rho}{8} \sqrt{\frac{\pi}{A}} [\Omega]$$

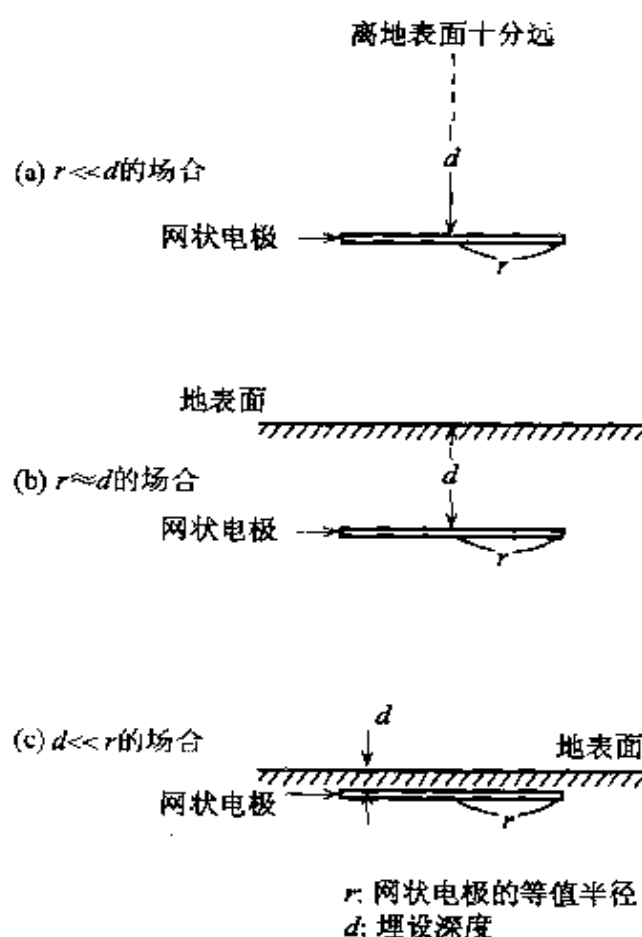


图 1.43 网状电极埋设深度的分类

(2) $r \approx d$ 的场合 见图 1.43(b),埋设电极的埋设位置靠近地表面,网状电极的上表面不能充分地发挥接地效果。其结果,接地电阻比全空间接地电阻高,它的增加部分可确定是由镜像引起的。网状接地电极的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8 \times 2d} = \frac{\rho}{8r} \left(1 + \frac{r}{2d} \right) [\Omega]$$

式中, r 是电极的等值半径,第 2 项是由镜像引起的增加分量。

(3) $d \ll r$ 的场合 如图 1.43(c), 是网状电极的埋设位置成为非常靠近地表面的场合。这个场合, 只是网状电极的下表面的接地效果被利用。因而, 利用圆板的半空间接地电阻公式, 网状接地电极的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{4r} = \frac{\rho}{4\sqrt{\frac{\pi}{A}}} [\Omega]$$

式中, r 是电极的等值半径。

● 1.20.3 网数和网系数

至此, 我们一直忽视网状电极的详细结构, 而只注意了它占有的最大面积。关于网状接地电极, 即使最大面积相同, 在形状等不同的场合的接地电阻的变化程度等, 有很多研究课题。

在那些课题之中, 在网状接地电极的特征方面, 实用上亦重要的是对网数和网系数的掌握。

按图 1.44 来说明网数和网系数。把网电极所占面积取正方形, 把仅仅在沿这个正方形的周边埋设导体成为接地电极的场合作为网数 1, 即取网孔数为 1, 假如把这个电极内侧中追加十字形线状电极, 便变成 4 个网孔, 便将网数取作 4。而且, 如在各网的内侧再追加十字形线状电极, 网数便为 16。这样, 如依此在各网中追加十字形电极, 最终电极成正方形板。

网电极的接地电阻可用网系数以下式表示:

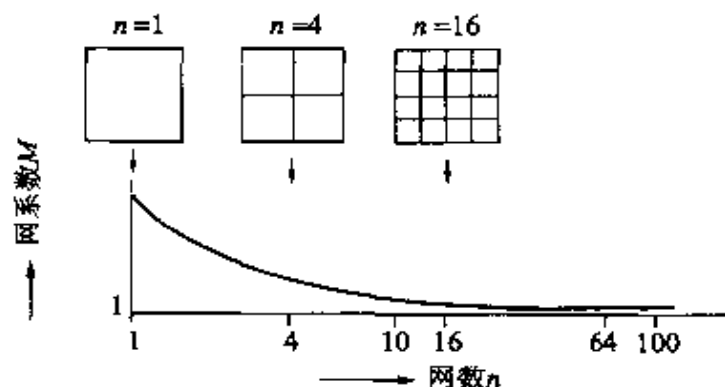


图 1.44 网数和网系数

$$R = M \times [\text{网数为} \infty \text{时的板状电极的接地电阻}]$$

限定周边的导体形成的正方形的大小不变, 那末正方板电极 (即网数为 ∞) 的接地电阻为最低。而且, 如使网数变少, 接地电阻便变高, 在网数为 1 时

接地电阻成为最高。网系数 M 可表示如下：

$$M = \frac{\text{网数有限时的接地电阻}}{\text{网数无限大时的接地电阻}}$$

图 1.44 表示了网系数和网数的关系。设导体的大小一定，网数 n 无限大时，即因是板状电极，它的接地电阻为最低。通常的情况是 $M > 1$ 。网状电极设计之际，可把 $n \rightarrow \infty$ 作为板状电极来预测接地电阻。对 n 为有限的实际的网电极时，它不可能降低至最低接地电阻以下。 n 变大因材料费及施工费急增，故不能把 n 取得极端大。

要精密求出 M 和 n 的关系是非常困难的。亦因周边导体的形状不同，这个图形关系会有若干不同。不过，有可能作更多的设想。

$n=1$ 时， M 得最大值。利用圆板和圆环电极的接地电阻公式， M 的最大值 $M_{\max}$ 的概略值可如下计算：

$$M_{\max} = \frac{2}{\pi^2} \ln \frac{8r}{r'}$$

式中， r 是网电极的等值半径， r' 是所用导体的半径。

由上式可知，网系数的最大值可由电极的等值半径 r 和所用导体的半径 r' 之比来推算。表 1.9 是在各种 r/r' 值时计算得出的 $M_{\max}$ 值。

表 1.9 r/r' 和 $M_{\max}$

r/r'	$M_{\max}$
10^2	1.355
10^3	1.821
10^4	2.288
10^5	2.754
10^6	3.221
10^7	3.588
10^8	4.154

1.21

结构体接地电极

在电气设备技术标准的第 21 条第 3 项，保持与大地之间的电阻值在 2Ω 值以下的建筑物的钢骨架或其它的金属体可作为机械器具的铁台或金属制作外壳施設非接地式高压电路实施第一种接地施工、或作为在非接地式高压电路和低压电路结合的变压器的低压电路实施第二种接地施工的接地电极。

另外，日本工业规程“建筑物等的避雷设备(避雷针)”中，对被保护物为钢骨架造、钢筋混凝土造、钢骨架钢筋混凝土造建筑物，如被保护物的基础的接地电阻为 5Ω 以下，避雷设备的专门接地电极可考虑省略。对钢骨架造、钢筋混凝土造、钢骨架钢筋混凝土造的建筑物来说，那个建筑结构体的

接地电阻比接地棒、接地板等按通常接地施工所得出的接地电阻还要低。这由实测数据明确(表 1.10)。

表 1.10 各种建筑物的结构体接地电阻实测例

建筑物名	层数	地下基础面积 /m ² 括号内为总面积	结 构	测量年月	测量方法	结构体 接地电阻
外务省厅楼	地下 2 层 地上 8 层	4 663 (27 604)	钢筋钢筋 混凝土造	1962 年 6 月	携带用接地 电阻测量器	第 1 点 0.2Ω 第 2 点 0.2Ω
总理府厅楼	地下 1 层 地上 7 层	3 239 (21 431)	钢筋 混凝土造	1962 年 6 月	"	第 1 点 0.000Ω 第 2 点 0.2Ω 第 3 点 0.2Ω
新阶旅馆	地下 3 层 地上 17 层 塔屋 3 层	9 470 (102 500)	钢筋钢筋 混凝土造 钢筋造	1966 年 12 月	电位降法 (交流 50Hz)	0.31Ω
东京 电业会馆	地下 1 层 地上 4 层	480 (1 767)	钢筋 混凝土造	1969 年 3 月	"	0.6Ω
千叶大学 工学部 电气学科	一部地下 1 层 地上 4 层	576 (2 354)	钢筋 混凝土造	1972 年 1 月	"	1.04Ω
大阪合同厅 楼第 3 号馆	地下 3 层 地上 15 层	3 405 (39 579)	钢筋钢筋 混凝土造	1971 年 8 月	电位降法 (交流 60Hz)	0.21Ω
迎宾馆	地下 1 层 地上 2 层	5 260 (15 355)	钢筋 砖造	1972 年 3 月	"	0.35Ω
东亚不动 产新桥大楼	地下 3 层 地上 15 层	4 742 (52 015)	钢筋钢筋 混凝土造	1971 年 10 月	"	0.01Ω

在这里,所谓建筑结构体是指以钢骨架或钢筋混凝土建造的建筑躯体,为什么建筑结构体的接地电阻较低?

那是因为建筑结构体的基础与大地接触的面积非常之大,但是,即使建筑物的基础较大,钢骨架或钢筋与大地不是理所当然直接接触的,会出现有无混凝土介于其间的疑问。

混凝土乍看如硬石头,但它比普通岩石吸湿性大,在湿润状态电阻率相当低。表 1.11 表示混凝土的吸水率和电阻率。湿的混凝土的电阻率比普通土壤的电阻率还低。因而,在建筑物的基础混凝土的电阻率相当低,亦比周围土壤的电阻率低一点,所以即使存在混凝土,建筑结构体的接地电阻较低。

这里成为问题的是建筑结构体的接地电阻的测量方法,要把像建筑结构体那样大规模的接地体的接地电阻测量正确是非常困难的。携带用的简便的接地电阻测定器,不能得出精度高的值。可是至今,大视角的电位降法(参照 1.27 节接地电阻的测量方法)何时可行还不知道。

建筑结构体的接地电阻可由它建造地点的大地电阻率及建筑物的大小来大概确定,因而,可不进行测量。由大地电阻率和建筑面积可以来推定结构体的接地电阻,这将放在 1.22 节避雷设备的接地中讲述。

在美国电气施工规程(NEC)中对混凝土包着的接地电极(Concrete Encased Electrode)的使用是认可的,如图 1.45 所示,是一种结构体的接地。但是,在混凝土底座中埋设裸铜线(长 6m 以上,断面积 21mm^2 以上)。

表 1.11 混凝土的配合与吸水率、电阻率

配合比例 水泥:砂:砂砾	吸水率 /%	电阻率 /($\Omega \cdot \text{m}$)
1:3:6	4.9	80
1:2:4	6.2	51.6
1:3:6	13.9	47.2
1:2:6	16.1	37.9

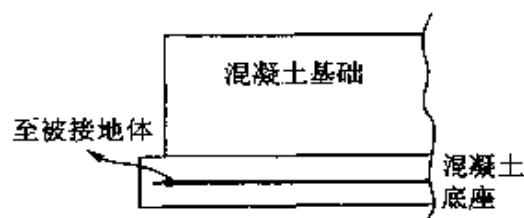


图 1.45 混凝土包着的接地电极

1.22 避雷设备的接地

1.22.1 雷 害

建筑物等的避雷设备的作用是把附近落雷确实引进避雷设备方向,把雷击电流安全流入大地,因而保护了建筑物等不遭受雷害。

雷云是由各种气象条件下发生强上升气流时出现的,而且,雷云中的电荷分布如图 1.46 所示。上部为正电荷,下部为负电荷。因而在雷云的正下方附近的大地表面被感应出正的电荷。

落雷是云的底部的负电荷与地上的正电荷之间产生的放电现象。由许多实测数据求出的雷电流的平均特性,波峰值是约 30kA ,持续时间是数十 μs 。

在全世界每年由雷杀死的人据说有约 6000 人。雷害,可分为以下四个

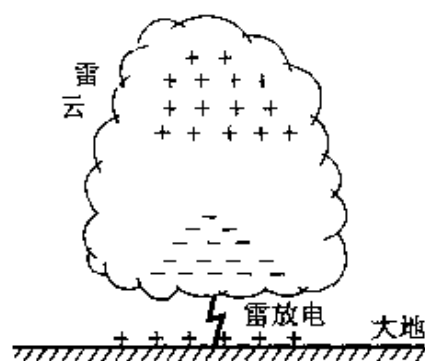


图 1.46 雷云和雷电

方面。

(1) **由落雷引起山火事故** 在森林落雷引起山火事故,使宝贵的森林资源化为灰烬。美国和加拿大是这种雷害的高峰区。

(2) **建筑物的毁坏** 在建筑物落雷引起火灾,在东京消防厅管内 1974 年度由雷引起的火灾有 59 起,其中直击雷 23 起,间接雷 36 起。在土地广阔的美国,在孤立的农家落雷发生火灾的例子较多。也有并未引起火灾但由雷电流引起急剧的热膨胀使建筑物的一部分损坏的情况。由落雷引起贵重的文化财产受损也是不少见的。

(3) **电力和通信等公共服务中断** (夏季午后)雷云一过,必然使这个地区停电及电车停开,电车信号中断的例子较多。由于雷雨突然袭来,急于回家的上班族就只能以步代车了。

(4) **人身及家畜的被害** 在日本每年平均有 32 人被打死。最近引人注目的是在高尔夫球场被害的。家畜的被害也不能忽视,在美国可以说家畜死亡事故的 80% 是雷害引起的。

● 1.22.2 需要避雷设备的建筑物、工作物

对一般建筑物、工作物,按建筑标准法有需设置如下述那样的避雷设备的义务。避雷设备是由建筑标准法施行命令按日本工业规程(JIS A 4201)来确定的。

① 建筑物的高度超过 20m 的部分。

② 烟囱、广告塔、高架水槽、壁壁等的工作物及升降机、水箱、飞行塔等的工作物高度超过 20m 的部分。

● 1.22.3 避雷设备的三个部分

避雷设备由三个部分组成:

① 吸引雷电并在此受到直接雷击的突出的针或屋脊上的导体,把这称为**受雷部**;

② 引导雷电流由受雷部至大地的**避雷导线**;

③ 为雷击电流流入大地的**接地极**。

为了避雷设备作出充分的功能,必须对这三个部分都作合适的设计、施工。

● 1.22.4 避雷设备的接地电阻

关于避雷设备的接地电阻,在 JIS A4201 规定为 10Ω 以下。又多个接地电极并联连接的只取总接地电阻 10Ω 是不充分的,所以又规定各接地电极在单独存在的场合的接地电阻必须在 50Ω 以下。

总之,希望避雷设备的接地电阻能尽量低。现在,当 10Ω 的接地电极有 30kA 的雷击电流流入,接地电极的电位就上升 300kV 。这样高的电压一发生,对在附近埋设的气体管道或水管会引起二次的放电(把这称为逆闪络)。又因为与接地电极连接着的避雷导线和受雷部的电位亦上升,对在附近的电力线和电话线亦有发生逆闪络的危险。

在接地电极一流入雷击电流,在接地极近傍的大地发生很大的电位梯度,因而,在接地电极附近立着的人会因跨步电压有触电的危险。

所有这些故障,如接地电极的接地电阻充分低就能避免。

● 1.22.5 接地极

避雷设备的接地极与一个以上下引导线(避雷导线的一部,从被保护物的顶部至接地极间的几乎垂直的部分)连接。

接地极是长 1.5m 以上,外径 12mm 以上的镀熔融锌钢棒、涂铜钢棒、铜棒、镀熔融锌配管用炭素钢钢管(厚度 2mm 以上)、不锈钢管(SUS304,厚 1mm 以上)。又可使用侧面面积 0.35m^2 以上的镀熔融锌钢板(厚度 2mm 以上)、铜板(厚度 1.4mm 以上)或与这些有相同接地效果的金属体。

但是,不能使用铝或其它此类易腐蚀的材料。

接地极埋设在地下的深度在 0.5m 以上。

在一条下引导线上把二个以上接地极并联连接的场合,二个接地极间的间隔原则上取 2m 以上,它们与在地下 0.5m 以上深度处断面积为 22mm^2 以上的裸铜线连接。但是,在连接铜线不担心受到显著的机械的撞击那样的施设的场合,不取地下 0.5m 以上深度较好。

接地极或埋设地线应尽可能离气体管道 1.5m 以上。

● 1.22.6 埋设地线的利用

对于在大地电阻率特别高的地点,不能简单得到所称 10Ω 接地电阻。在 JIS 中认为这种情况时可如图 1.47 那样利用埋设地线。

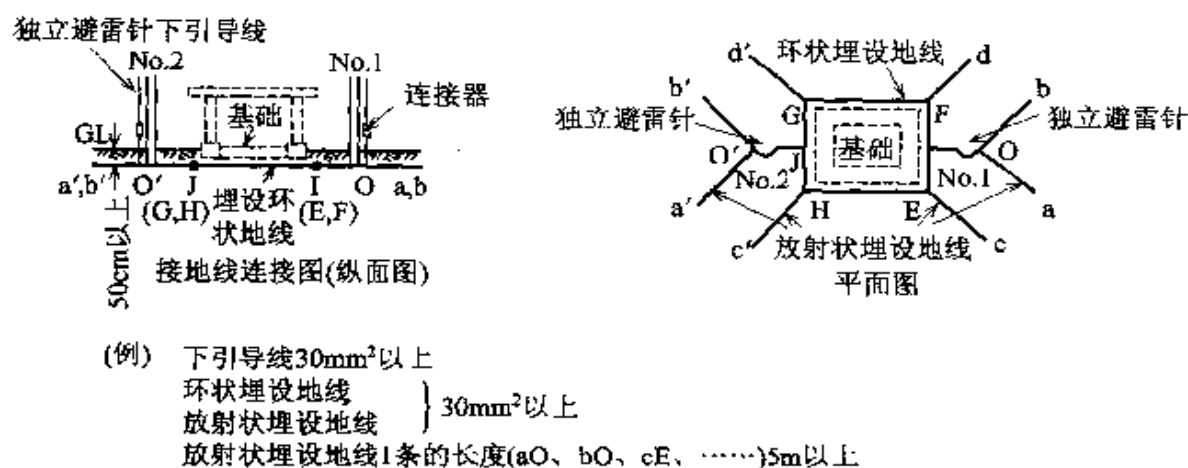


图 1.47 埋设地线的利用

埋设地线是在一条下引导线处,用长度为 5m 以上与避雷导线有相同截面积的铜线 4 条以上,从被保护物成放射状埋设在地下 0.5m 以上深度处,而且与沿被保护物的外周以同样深度埋设的环状埋设地线并联连接,以此来代替接地极。

● 1.22.7 对于被保护物为钢骨架造、钢筋混凝土造、钢骨架钢筋混凝土造的建筑物的避雷设备

(1) **钢骨架的建筑物** 在避雷设备标准 JIS 中,对柱及梁是钢骨架的建筑物可用钢骨架作为受雷部,但是,屋基或小房使用金属以外材料的建筑物除外。又钢骨架的建筑物亦可把钢骨架作为避雷导线。但是,在全钢骨架上要用断面积为 30mm^2 以上的铜线连接接至 2 个以上的接地极。

(2) **钢筋混凝土造的建筑物** 对柱及梁是钢筋混凝土造的建筑物,可用二根以上主钢筋来代替下引导线。但是,这些钢筋要用断面积为 30mm^2 以上的铜线与二个接地极连接。

(3) **钢骨架钢筋混凝土造的建筑物** 对柱及梁是钢骨架钢筋混凝土造的建筑物,可用钢骨架代替下引导线。但是,钢骨架要用断面积为 30mm^2

以上的铜线与二个接地极连接。

在以上的钢骨架造、钢筋混凝土造、钢骨架钢筋混凝土造的建筑物,建筑物的基础的接地电阻为 5Ω 以下的场合,可把接地极省略,规定可利用基础作接地极。总之,可断定是结构体接地。

一般情况,建筑物的基础深埋在地中,因与大地接触面积大,它的接地电阻极低(参照表 1.10)。在德国的规程中列出,钢筋混凝土的基础 1m^3 被埋在地下时的接地电阻与把 2 根长度为 3m 的棒电极并列打入至根部有几乎相同的值。

● 1.22.8 基础的接地电阻的推定法

在此成问题的是建筑物的基础的接地电阻在 5Ω 以下,这是如何确认的?要正确测定建筑物基础那样大规模接地体的接地电阻是非常困难的。简易的接地电阻计不能得到精度高的值。所谓大视角电位降法何时可行还难以确定。

建筑物基础的接地电阻可由建筑物和大地的接触面积及建筑物建设地点大地的电阻率来大致确定。那样可代替测量建筑物基础的接地电阻。由建筑物地下部分总的表面积和大地电阻率来推定建筑物基础的接地电阻,它的顺序如下进行。

(1) 大地电阻率的测量 有大地电阻率测量器的场合,可用这测量建设地点的大地电阻率。大地电阻率测量器,通常是基于文纳(Wenner)四电极法来测量大地电阻率,那个场合作电极布置如图 1.48 所示。

在无大地电阻率测量器的场合,在建设地点打入接地棒,测量出它的接地电阻后逆算出大地电阻率。那个场合,打入如图 1.49 所示的测量用辅助电极。参照接地电阻的测量法(1.27 节)及大地电阻率的逆算法(1.28 节)。

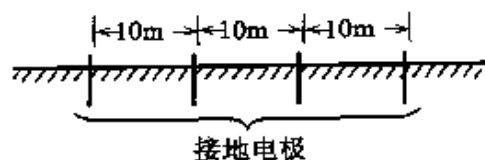


图 1.48 为测量大地电阻率的电极布置

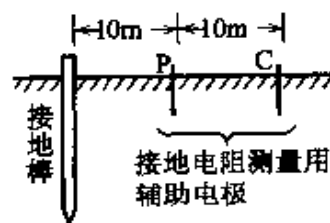


图 1.49 接地电阻的测量

大地电阻率是在挖掘前即在挖掘后的地表面附有 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 建筑面积处测定一点。计算所测数据的算术平均值。

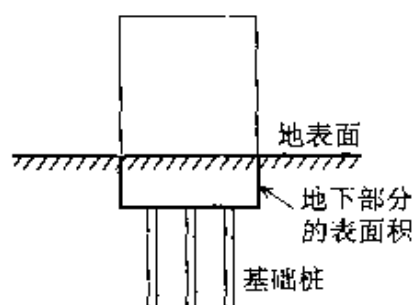


图 1.50 建筑物的地下部分

(2) 建筑物地下部分的总表面积的算定
算定建筑物和大地接触部分的总表面积,这是把建筑物的地下部分的底面积及侧面的面积全部加起来的面积。但是,基础桩等的表面积除外(参照图 1.50)。

(3) 按判定曲线判定 按以上的手续,可决定大地电阻率 $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ 和表面积 $A[\text{m}^2]$, 所以由图 1.51 可判定接地极能否省略。亦即,按图 1.51 的判定曲线,如 ρ 和 A 的交点在可省略的区域,可省略接地极。如果 ρ 和 A 的交点在不可省略的区域,就不能省略接地极。

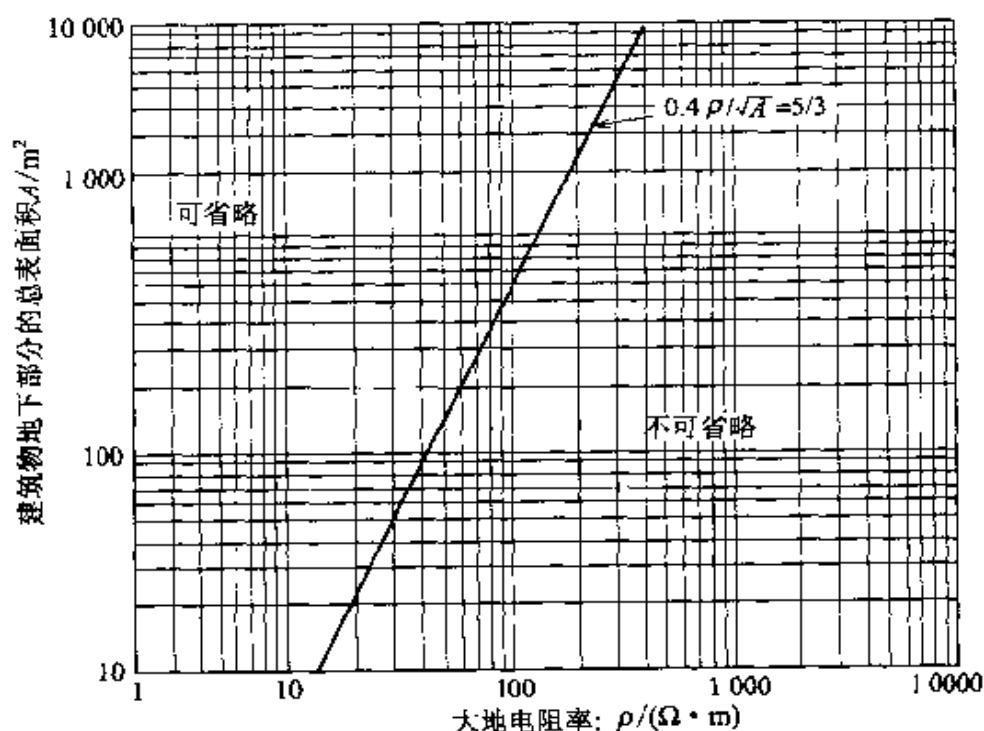


图 1.51 接地极省略判定曲线

(4) 判定曲线的根据 如把建筑物地下部分的总表面积作为有相同表面积的半径为 r 的半球的面积,由

$$2\pi r^2 = A, r = \sqrt{\frac{A}{2\pi}}$$

由在电阻率为 ρ 的大地埋设的半球状电极的接地电阻的相关公式,基础的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{\sqrt{2\pi A}} \approx \frac{0.4\rho}{\sqrt{A}}$$

因建筑物的地下部分的形状不一定是半球状的,严格来讲半球状电极的公式是不适用的,但作为概算是充分的。那末,如按接地电阻在 5Ω 以下便允许省略接地电极,

$$\frac{0.4\rho}{\sqrt{A}} \leq 5$$

对图 1.51 来说,取安全系数为 3,便把

$$\frac{0.4\rho}{\sqrt{A}} \leq \frac{5}{3}$$

取为区域分界。

● 1.22.9 避雷导线和接地极的连接

避雷导线和接地极的连接必须如下进行:

- ① 连接部的电阻不能比被连接导体中电阻较高一方的导体自身的并与连接部相同长度的电阻高。
- ② 连接部的引张强度为被连接导体中弱方导体的引张强度的 80% 以上。
- ③ 异种金属连接の場合,要求在连接部分不产生电气的腐蚀。

1.23 医院的接地

● 1.23.1 医院的特殊性

对最近的医院来说,正应用多种医用电器(以下称作 ME 机器),ME 机器的普及对医院的电气设备提出了新的要求。

首先,因向 ME 机器停止供电会有生命危险,要求供电有更高的可靠性。

其次,要有 ME 机器的安全对策,对此当然要谋求在 ME 机器自身强化绝缘等方面的对策,但对电气设备的接地等有必要引起特别的注意。

● 1.23.2 重度休克和轻度休克

为防止在医院触电,使用特别的用语。

重度休克(macroshock):在通常触电的情况,电流从身体表面流入又从身体表面流出的场合。

轻度休克(microshock):电流流入点与流出点中电流较小的一方接触心脏血管,或在离心脏很近距离处的触电。

● 1.23.3 关于医院接地的用语

近年来,相继制定了关于电气设备方面的 JIST1022“医院电气设备的安全标准”,关于 ME 机器的 JIST1001“医用电气机器的安全通则”,JIST1002“医用电气机器的安全性试验方法通则”。

JIST1022 中示意的医用接地方式的概念图示于图 1.52。

若干用语的意义如下述:

保护接地 对露出的导电性部分施行接地。

等电位接地 对露出的导电性部分或系统外导电性部分为使它成为等位面,在电气上连接为一点,把这点施行接地。

露出导电性部分 不充电部分在故障时有充电的危险,人可能接触的电气机械器具的导电性部分。

系统外导电性部分 不是构成电气设备部分的导电性部分,但有传达大地的电位等危险的东西(指建筑物金属窗框、给水管、基础的金属框架等)。

接地干线 从接地极至医用接地中心的分支排的接地线。

接地分支线 以医用插座及医用接地端子的接地导线及由露出导电性部分或系统外导电性部分的接地线,向医用接地中心集合起来的导线。

医用接地中心体 为把接地分支线集合起来连接到接地干线,由分支排、主导线、试验端子等构成的医用接地中心体。

医用接地中心 包含容纳医用接地中心体的外箱的总称。

医用接地端子 为把接地分支线和接地编码连接的端子组。

接地编码 在医用电气机器等为施行保护接地或等电位接地的单一编码。

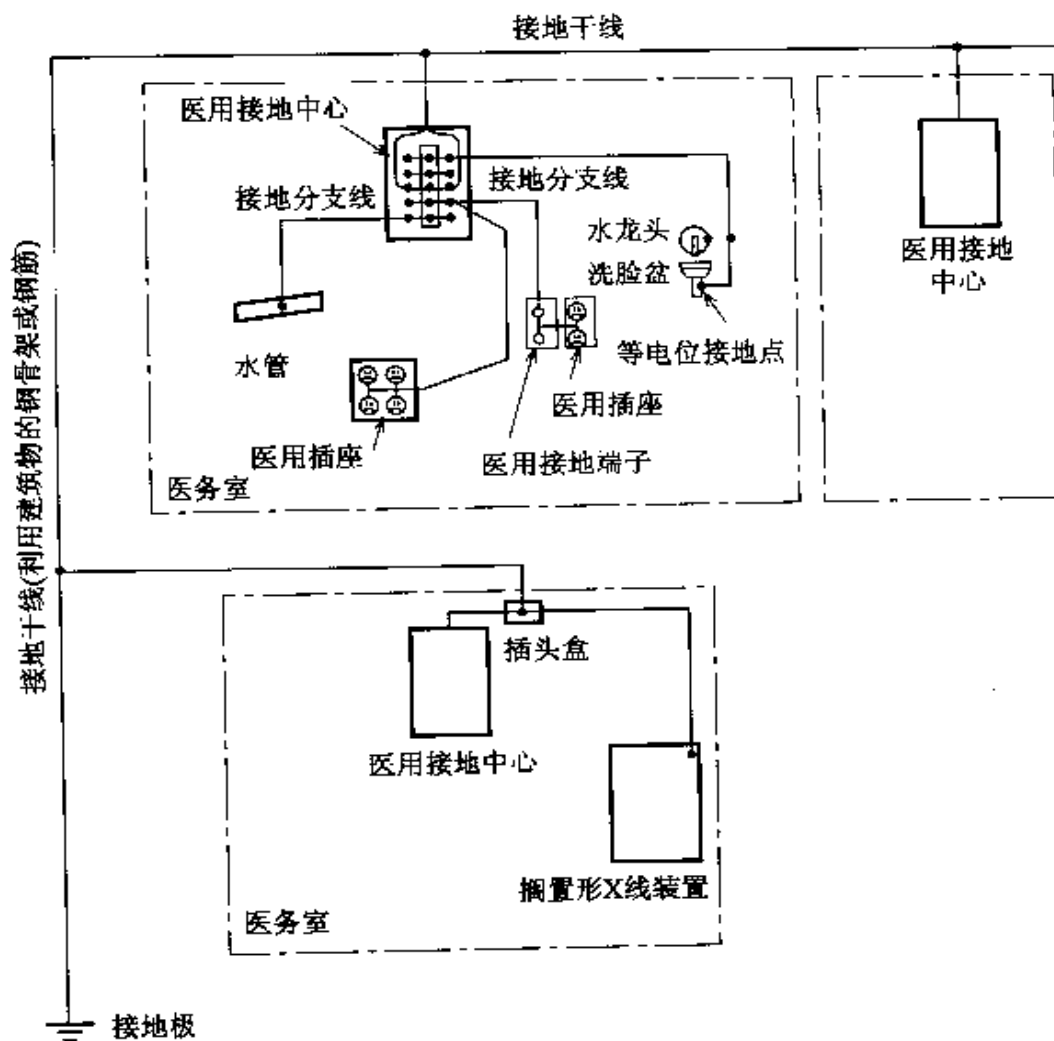


图 1.52 医用接地方式的概念图

● 1.23.4 医学接地方式

- ① 在使用医用电器的医务室内,应设置为了保护接地的设备。
- ② 在体内非常接近心脏的地方或直接把医用电器的电极等插入至心脏进行医疗的医务室内,应设置为了等电位接地的设备。对医务室适用的接地方式的例子参考表示于表 1.12。

表 1.12 医用接地方式、非接地配线方式及紧急电源的适用例

医务室 ¹⁾	医用接地方式		非接地 配线方式	紧急电源 ²⁾		
	保护接地	等电位接地		一般	特别	瞬时特别
胸部手术室	○	○	○	○	△	○
胸部手术以外的手术室	○	△	○	○	△	○
理疗室(恢复室)	○	△	△	○	△	—
ICU(集中治疗室)	○	○	△	○	△	—
CCU(冠状动脉疾病集中治疗室)	○	○	△	○	△	—
重症病室	○	△	△	○	△	—
心功能总检查室	○	○	○	○	×	△
心血管 X 线造影室	○	○	○	○	△	△
分娩室	○	△	△	○	×	△
生理检查室	○	△	×	△	×	—
内视镜室	○	△	×	△	×	—
X 线检查室	○	×	×	△	×	—
阵痛室	○	×	×	△	×	—
一般病室	○	×	×	△	×	—
诊 室	○	—	—	△	—	—
体检检查室	○	—	—	△	—	—

记号的意义：○：必须设置；△：希望设置；×：可不设置；—：不应该设置

(注)1) 这个表中的室名是例子。

2) 紧急电源对医务室以外的电气设备也适用。

1.23.5 保护接地

① 在每个医务室内应设置医用插座和医用接地端子。

② 医用插座及医用接地端子的接地用导线应由接地分支线分别直接连接在医用接地中心的主导线上。

③ 接地分支线是公称面积为 5.5mm^2 以上 600V 乙烯绝缘电线，绝缘体的颜色应使用绿/黄或绿色。

④ 医用插座的接地触头也即医用接地端子的端子部，它和医用接地中心间的电阻按无负荷交流电压为 6V 以下流过 10~25A 电流以电压降法测量时，应在 0.1Ω 以下。

⑤ X 线装置等搁置型医用电气机器的保护接地，它露出的导电性部分使用公称面积符合表 1.13 的 600V 乙烯绝缘电线绝缘体的颜色为绿/黄或绿色的接地线，并按下述那样连接起来。

• 接地线的公称断面积为 5.5mm^2 的场合，接地线把装置设备直接连接向设在医务室的医用接地中心主导线。

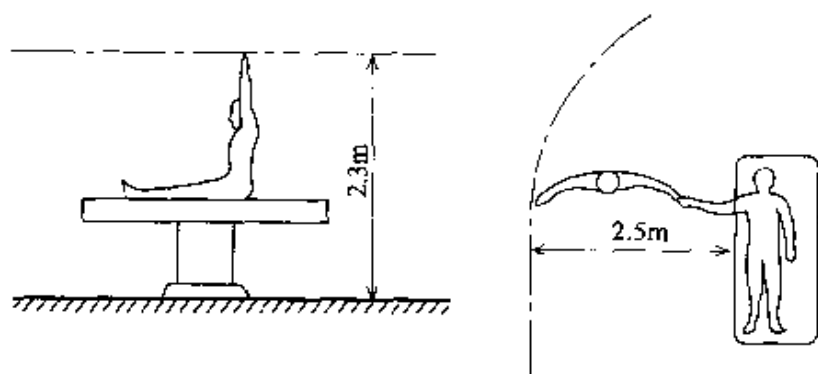


图 1.53 等电位接地的范围

③ 持有导电性床的手术室等地方,导电性床下敷设的铜条或金属网等,原则上它应与医用接地中心连接。

● 1.23.7 接地干线

① 当在钢骨架造、钢筋混凝土造及钢骨架钢筋混凝土造的建筑物内,从接地极至医务室场地的接地干线,可使用建筑物的钢骨架或二根以上的主钢筋。

② 建筑物的钢骨架或钢筋以外的接地干线,可使用公称面积 14mm^2 以上 600V 乙烯绝缘电线,绝缘体的颜色为绿/黄或绿色。

③ 当在钢骨架造、钢筋混凝土造及钢骨架钢筋混凝土造的建筑物内,有二个以上的医务室连接至医用接地中心的横穿接地干线,接地干线应与建筑物的钢骨架或二根以上的主钢筋有二个以上连接点。

④ 把接地干线连接至接地中心的场合,应把医用接地中心体的导线 2 根一捆捆在一起使用。

● 1.23.8 接地线

① 在钢骨架造、钢筋混凝土造及钢骨架钢筋混凝土造的建筑物内,可把那个建筑结构体的地下部分作接地极使用。

② 在钢骨架造、钢筋混凝土造及钢骨架混凝土造的建筑物以外,把专用的接地极打入或埋设地下的场合,应用电镀锌钢棒、涂铜钢棒、铜棒、电镀锌钢管、不锈钢钢管、涂碳钢棒、铜板等,并尽可能选择在无水分、气体、酸等腐蚀作用危险的场所埋设或打入地中。

③ 对医用接地方式用的接地电阻,原则上要求取 10Ω 以下。在取 10Ω 以下有困难场合,在医务室作等电位接地配线,接地电阻值能要求取 100Ω 以下。

④ 使用建筑物的建筑结构体的地下部分作接地电极的接地电阻,可按附录(和避雷器的场合相同)给出的方法计算。

1.24 各种接地施工的细则

在电技标准中接地施工被定为第一种、第二种、第三种及特别第三种接地施工等四种类型(第 18 条)。在本节,将介绍有关这些接地施工的详细的事项。

1.24.1 接地线尺寸的规定

接地线的尺寸在电技标准第 19 条(各种接地施工的细则)中,规定了在各种接地施工中接地线的最小尺寸,那样规定的尺寸可认为能安全通过故障时的电流(表 1.14)。

表 1.14 接地线的最小尺寸(电技标准第 19 条)(软铜线)

接地施工的种类	接地线的尺寸
第一种接地施工	直径 2.6mm
第二种接地施工	直径 4mm(对高压电路又在第 142 条第一项中规定把特别高压架空线路的电路和低压电路由变压器结合的场所取直径 2.6mm)
第三种接地施工及特别第三种接地施工	直径 1.6mm

接地线的选定有必要从机械强度、耐腐蚀性及电流容量三点来考虑,特别是在接地线有故障电流流过的场合,在电源侧的过流断路器动作之前接地线熔断了的场合,对绝缘被破坏的机器继续送电成为对机器外箱充电的状态,就不能完成接地施工的目的,所以选定接地线的尺寸时有重视电流容量的必要。

为此,在用线规程中接地线是与在电源侧设置的过电流断路器的动作

特性有关的,应按要求选定接地线的尺寸。对各种接地施工所用的接地线的尺寸规定如表 1.15~表 1.17。

● 1.24.2 求取接地线尺寸的计算式

用线规程的附录 1~6 阐述如下:

(1) 接地线的温升 铜线流过短时间电流时的温升一般以下式给出:

$$\theta = 0.008 \left(\frac{I}{A} \right)^2 t$$

式中, θ 为铜线的温度[°C]; I 为电流[A]; A 为铜线的断面积[mm²]; t 为通电时间[s]。

表 1.15 第三种及特别第三种接地施工的接地线的尺寸

在接地的机械器具的金属制外壳、配管等的低压电路的电源侧设置的过电流断路器中的最小的额定电流的容量	接地线的尺寸				
	一般的场合		在移动使用的机械器具设置接地的场合,要求必要的可动性使用单芯或统包绝缘双芯电线的场合		
	铜	铝	单芯线的尺寸	把双芯线作接地线使用的场合其中一芯的尺寸	
20A 以下	1.6mm 以上 2mm ² 以上	2.6mm 以上	1.25mm ² 以上	0.75mm ² 以上	
30A 以下	1.6mm 以上 2mm ² 以上	2.6mm 以上	2mm ² 以上	1.25mm ² 以上	
50A 以下	2.0mm 以上 3.5mm ² 以上	2.6mm 以上	3.5mm ² 以上	2mm ² 以上	
100A 以下	2.6mm 以上 5.5mm ² 以上	3.2mm 以上	5.5mm ² 以上	3.5mm ² 以上	
150A 以下	8mm ² 以上	14mm ² 以上	8mm ² 以上	5.5mm ² 以上	
200A 以下	14mm ² 以上	22mm ² 以上	14mm ² 以上	5.5mm ² 以上	
400A 以下	22mm ² 以上	38mm ² 以上	22mm ² 以上	14mm ² 以上	
600A 以下	38mm ² 以上	60mm ² 以上	38mm ² 以上	22mm ² 以上	
800A 以下	60mm ² 以上	80mm ² 以上	50mm ² 以上	30mm ² 以上	
1 000A 以下	60mm ² 以上	100mm ² 以上	60mm ² 以上	30mm ² 以上	
1 200A 以下	100mm ² 以上	125mm ² 以上	80mm ² 以上	38mm ² 以上	

(注 1)这个表中所说的过电流断路器,当设置在进线口又作分支用(开关包含兼作过电流断路器的场合)。不包含电磁开关那样的电动机的过负荷保护器。

(注 2)使用单芯绝缘或统包绝缘双芯电线的双芯线来说,两个芯的尺寸是相同的,表中表示双芯并联使用时的一个芯的面积。

(2) 计算条件 为了决定接地线尺寸,计算条件有如下几项:

- 流过接地线的故障电流值可为电源侧过电流断路器的额定电流的

20 倍。

- 过电流断路器在额定电流的 20 倍的电流下可在 0.1 秒以内遮断。
- 故障电流流过前接地线的温度可取 30℃。
- 故障电流流过时接地线的容许温度认为可取 150℃(因而,容许温升为 120℃)。

表 1 16 第二种接地施工的接地线的尺寸

变压器-相分容量			接地线的尺寸	
100V 级	200V 级	400V 级 500V 级	铜	铝
至 5kVA	至 10kVA	至 20kVA	2.6mm 以上	3.2mm 以上
10kVA	20kVA	40kVA	3.2mm 以上	14mm ² 以上
20kVA	40kVA	75kVA	14mm ² 以上	22mm ² 以上
40kVA	75kVA	150kVA	22mm ² 以上	38mm ² 以上
60kVA	125kVA	250kVA	38mm ² 以上	60mm ² 以上
75kVA	150kVA	300kVA	60mm ² 以上	80mm ² 以上
100kVA	200kVA	400kVA	60mm ² 以上	100mm ² 以上
125kVA	250kVA	500kVA	100mm ² 以上	125mm ² 以上

(注 1)关于该表算定的基础可参照附录 16。

(注 2)所谓变压器一相分容量指以下的值:

- (1) 三相变压器的场合,指额定容量的 1/3 的容量。
- (2) 单相变压器同容量的 Δ 结线或 Y 结线的场合,指其中一台单相变压器的额定容量。
- (3) 单相变压器 V 结线的场合。
 - 同容量的 V 结线的场合,指其中一台单相变压器的额定容量。
 - 异容量的 V 结线的场合,指较大容量的单相变压器的额定容量。

(注 3)低压侧以一个断路器保护的变压器是二个以上组合的场合,“变压器一相分容量”可取各变压器(注 2)容量的合计值。

(注 4)低压侧为多线式的场合,可把它的最大使用电压作为通用电压。

例如,单相三线式 100V、200V 的场合,把 200V 作为通用电压。

(3) 计算式 在前面的计算式中代入上述各条件成下式:

$$120 = 0.008 \left(\frac{20I_n}{A} \right)^2 \times 0.1$$

即

$$A = 0.052I_n$$

式中, I_n 为过电流断路器的额定电流。

● 1.24.3 接地线尺寸的考虑法则

关于第三种及特别第三种接地施工的接地线的尺寸,表 1.15 内的数值是由上式计算得出的。在表 1.15 中,接地线的尺寸按在电源侧装置的过电流断路器的额定电流选定。

第二种接地施工的接地线的尺寸如表 1.16 那样规定,这是按与第三种接地施工的场所同样的考虑方法来决定。

表 1.17 第一种接地施工的接地线的尺寸

第一种接地施工的接地线部分	接地线的种类	接地线的尺寸	
		铜	铝
在固定使用的电气机械器具实施接地施工的场所及移动使用的电气机械器具实施接地施工的场所,不必考虑可动性的场合		2.6mm 以上 (5.5mm ² 以上)	3.2mm 以上
在移动使用的电气机械器具实施接地施工的场所,必须考虑可动性的部分	三种氯丁二烯统包双芯电线,三种氯酸化聚乙烯统包双芯电线,四种氯丁二烯统包双芯电线,四种氯酸化聚乙烯统包电线或高压用的统包双芯电线的一芯或多芯统包电线,或高压用的统包多芯电线或高压用的统包双芯电线的屏蔽金属体或接地用金属线	8mm ² 以上	

注:这个表列出的是在非接地式高压电路连接电气机械器具场合的最低基准。

第一种接地施工的接地线的尺寸,按表 1.17 那样规定,这是指这个场合的最小电线的尺寸。

在电技标准第 19 条第 3 项,对于人有触及危险的第一种及第二种接地施工的接地线,从地下 75cm 到地表上 2m 的部分要用符合电气用品取缔法的合成树脂管(CD 管除外)覆盖,该接地线按规定使用绝缘电线(屋外用乙烯绝缘电线除外)、统包双芯电线、或通信用电线等以外的电线(图 1.54)。又把接地线沿钢柱及其它金属体设置的场合,应把接地极在地中离金属体 1m 以上距离处埋设。

在内线规程中,对第一种、第二种、第三种,特别第三种接地施工,原则

上使用绝缘电线,为防止接地线的误接,作为原则规定施以绿色的标志。

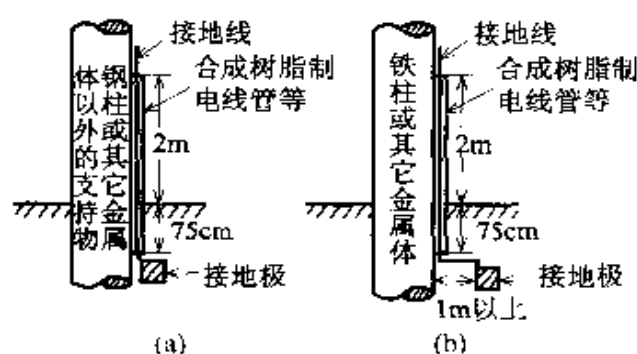


图 1.54 在人有触及危险的场所设置的接地线的设施

1.24.4 接地极

接地电阻因有涉及将来维持规定值的必要,接地极必须选用不会腐蚀那样的材料。又,接地线和接地极的连接也必须确实紧密接触。

在电技标准第 21 条(水管等接地极)及第 22 条(需要时的进线口的接地)亦对接地极有规定,在用线规程的 140-7 条(接地极)中,随着施設场所的选定作埋设或打入接地极,原则上应使用尺寸为下面的数值以上值的接地极。

- ① 铜板厚度在 0.7mm 以上,面积 900cm^2 (板)以上的接地极。
- ② 铜棒或涂铜钢棒,直径 8mm 以上长 0.9m 以上的接地极。
- ③ 用铁管、电镀锌铁气管或厚钢电线管,外径 25mm 以上长 0.9m 以上的接地极。
- ④ 电镀锌铁棒,直径 12mm 以上,长 0.9m 以上的接地极。
- ⑤ 涂铜钢板以厚度 1.6mm 以上,长 0.9m 以上面积为 250cm^2 (板)以上的接地极。
- ⑥ 涂碳钢棒钢芯的直径 8mm 以上,长 0.9m 以上的接地极。

1.25 接地的共用和独立

当有必要作接地的设备是多个的场合,把各个设备进行各自独立的接地施工呢? 还是把多个设备进行集中的共同使用的接地施工? 那是个由来

已久的问题,是重要的问题。

● 1.25.1 接地独立的意义

在讨论接地的共用和独立的问题中,首先必须明确接地独立的意义。

在有多个设备的场合,把各个个别进行的接地施工叫做独立接地(图 1.55),但理想的独立接地不能简单实现。所谓理想的独立接地,当有 2 个接地的场合(图 1.56),一个接地电极有一定的接地电流流入时,另一个接地电极绝不引起电位上升的情况。在理想的情况,两个接地电极不离开无限大的距离就不能完全独立。

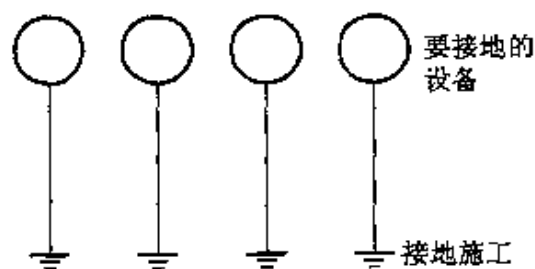


图 1.55 独立接地

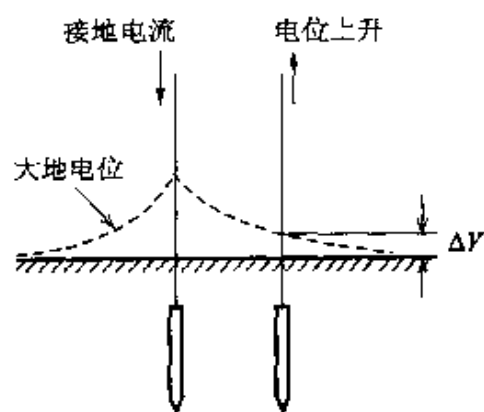


图 1.56 2 个接地电极的隔离

当然,实际上,如电位上升只在一定范围,可认为已圆满解决相互完全独立。那个隔离距离依存于以下三个要因:

- ① 发生的接地电流的最大值;
- ② 电位上升的容许值;
- ③ 那个地点的大地电阻率。

德国的 W. Schrank 提出二个接地电极如相互不离开 20m 以上就不能算完全独立(ETZ,70,Juli,1949)。或许,这是在估计会有相间接地闪络那样大的接地电流时的结论。

20m 的隔离距离作为现实问题是过严了,关于所有的接地电极,没有必要设想相间接地闪络那样大的接地电流。不仅仅是接地电流的大小,它的发生概率和持续时间都要一并考虑。

即使接地电流较小,而如那个地点的大地电阻率高,因电位上升变高,

就必须尽量把隔离距离加大。

● 1.25.2 接地共用的有利方面

把几个设备集中连接在共同的接地电极(不限于1个)的接地施工称为共用接地(图1.57)。一般的共用接地有以下那样的有利方面:

① 因多个接地电极并列连接,与独立接地的场合相比总接地电阻变低。

② 因接地电极的总数减少,与独立接地的场合相比较经济。

由于接地电阻变低又经济,没有比这个结构更好的了。但是(1)并列接地有所谓集合效应的问题,有关这个已在1.14节中叙述。在理论上讲,电极间隔不到达无限大,就必定有集合效应。当然,实际不必离得那样远。总之,要注意并联接地间隔变狭,它的效果就不大。

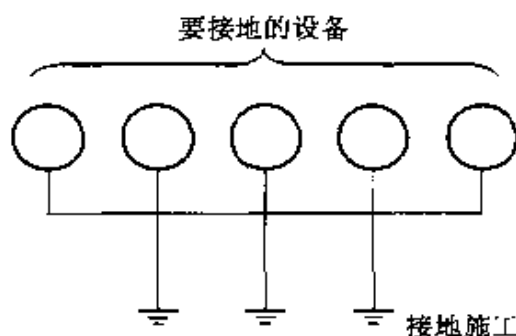


图 1.57 共用接地

● 1.25.3 接地共用的问题方面

以上讲述了共用接地的有利方面。但是,共用接地不仅有有利方面也有问题方面。共用接地的问题方面以一句话来说,有电位上升所波及的危险。

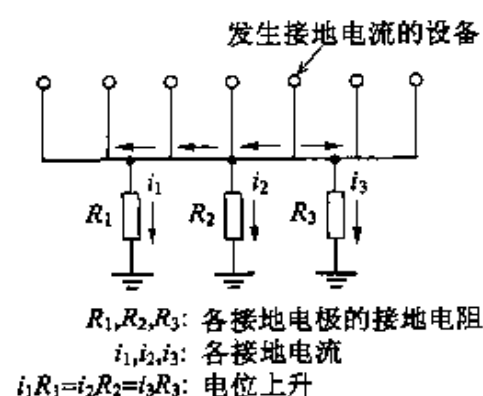


图 1.58 接地电位的上升

共用接地的场合,如共用接地的设备中由一个设备发生接地电流,它就向大地流出去(图1.58)。该场合因在各接地电极必定有接地电阻,接地点的电位便以欧姆定律上升。

如为独立接地,因接地电流引起电位上升只是对那个电极的事,不波及其它(当然,是作为理想的独立接地)。对于共用接地的场合,因接地电流引起的电位上升会波及到共用接地的全部设备。

因而,在共用接地场合,把由共用接地相互结合起来的一群设备,由下述的观点作检验是必要的。

(1) 发生的接地电流的性质 接地电流的大小、持续时间、发生概率有各式各样的情况。例如,避雷针、避雷器有可能发生大的接地电流,但它的持续时间较短及其发生概率不高。

对此,在第二种接地施工的接地电极,因在负荷机器的漏电流集中起来回流,有可能长时间持续成接地电流那样的电流(图 1.59)。

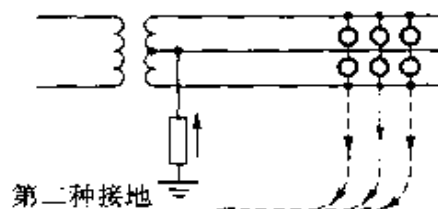


图 1.59 流向第二种接地的漏电流
(负荷的漏电流集中向第二种接地的回流)

(2) 电位上升对机器的影响 在负荷机器中,因接地线把电位升引入到设备中是特别讨厌的事,例如,在用电脑、医用电气设备、各种高灵敏度测量装置等场合。电脑的外围装置中,由接地线引入脉冲成为计算间差异的原因。医用电气设备的场合,接地电位上升会招致患者的触电事故。此外测量装置由接地线引入电压也成为输入干扰信号的原因。

如不考虑钱来考虑接地施工,把所有设备的接地作成个别的施工是最安全的。但是,现实中用作接地的费用是有限度的。因用地及其它客观条件要设置多个独立接地是不可能的。

归根到底,只对要求严格的设备作最小限度的独立接地,把其余全部用共用接地可以说是现实的。这个场合,把哪些作其余的,即把哪些组成共用接地各人有不同的见解。

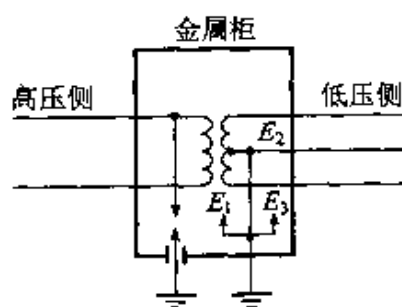


图 1.60 柜体的接地

如以柜式高压受电设备为例。从前,柜体的接地的连接是如图 1.60 那样进行的。

① 第一种、第二种、第三种接地作共用,也与金属箱连接。

② 避雷器作独立接地,且与金属箱绝缘。

这个方式,在避雷器放电的场合,有因雷放电电流引起接地电位上升得

很高的可能性,因担心设备损坏而仅把避雷器作独立的接地。确实,因作为接地电流来讲从避雷器有最最大的电流发生的可能性,把这作成独立的接地是无容置疑的。

在柜体形负荷机器绝缘降低时,就有漏电流发生,它回到全部第二种接地,而且使接地点的电位上升。那个接地电流不比雷电电流大但发生概率高,又长时间持续流动是危险的。

当第二种接地和第一种、第三种接地共用的时候,也和金属箱连接着,那些接地上的电位随着第二种接地电位上升。因而,例如柜体内作检查内部时检查员触及金属箱有触电的可能性。实际已发生那样的事故。为此,现在柜体的第二种接地已不采用与其它的接地共用,而作独立接地。如果这样,为防止触电事故,接地施工数就该增加一处。

1.26 接地的管理

在接地管理方面要考虑的问题有(1)接地电阻的变化及(2)接地电极在腐蚀。对问题(1)最好的手段是定期测量接地电阻,关于这个将在下节叙述。

本节中主要讨论问题(2)。

1.26.1 接地电极的条件

接地不是电线相互间那样同性质的材料的连接,接地是接地电极和称作大地的性质完全不同的材料的连接。这里,恒久的接地施工有困难的原因,要求接地电极所用的材料有种种严格的条件,对接地电极的材料要求的条件有:

- ① 因为被用作电气的端子,它自身的电阻应充分低。
- ② 接地电极在进行接地施工时,因被人力或机械力打入地中,应有充分的机械的强度。
- ③ 即使在含有水和空气的土壤中长期埋设,应不因腐蚀引起大的变化。
- ④ 即使与地中的结构物或埋设管路之类接触,应不因电池作用促进腐蚀。

⑤ 应是经济的。

以上各条件之中,近年关于腐蚀问题的(3)和(4)项条件正被受到重视,其第一个理由为,最近在海滨的填海地建设了许多联合企业,海滨的填海地是腐蚀环境中最严重的场所,对联合工厂附设的接地在安全的确保上因特别要求确实达到。

对接地电极特别注目腐蚀的第二个理由是最近在大都市都正充分利用地下,在地中油罐等的结构物或水管、电力电缆等的管路类被大量埋设,接地电极和这些结构物或管路类在地中接触的场所,形成电池,或者说担心引起电流的腐蚀。

近年,这样的接地电极的腐蚀又作为问题重新提出来,但金属的腐蚀现象因与金属侧和环境侧多个因素及两者的不均一性强烈的影响有关,对接地电极的耐久性的评价是非常复杂的问题。

● 1.26.2 接地电极由土壤腐蚀的特征

除有若干的例外,接地电极多数是以金属制造的,例外的是碳接地棒。接地电极采用单一金属制作,但合金或化合物也有被采用的。又把2种以上的材料组合起来的复合型较多,也有在表面涂刷异种金属作成。

那末,所谓腐蚀,以一句话来说是“金属受化学侵蚀的现象”。腐蚀按它的环境可像图1.61那样分类。湿蚀是由溶液作用的腐蚀,干蚀是在无水分环境中的腐蚀。

在土壤中因必定有水分,接地电极由土壤腐蚀是属于水溶液中的湿蚀。

在水溶液中金属的腐蚀有氧型腐蚀和氢型腐蚀。因接地电极被埋设在较浅的场所(地下不到10m),常用一定程度的氧供给。因而被考虑进行氧型腐蚀。

在表1.18中,列举出接地电极材料中含有的主要的元素及示出了那些元素在产生氧型腐蚀之际自由能量的变化。

自然界发生变化,自由能量由高的状态向低的状态移行,也就是,如热力学中的表现、自由能量向减少方向进行。

在表1.18中自由能量变化成负的值。这是表示腐蚀生成物比金属还稳定,即被作为接地电极使用的这些元素都按氧型腐蚀进行。因而这些金属元素生锈,不能变更本身命运。

表 1.18 自由能量的变化(氧型腐蚀)

金属	生成物	氧型腐蚀的自由能变化 /($\times 4.18\text{J/mol}$)
Fe	Fe_3O_4	-80 000
	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-58 500
	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	-80 000
Al	Al_2O_3	-377 000
	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-180 700
Cu	Cu_2O	-18 600
	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	-28 300
	CuO	-31 500

氧分压=0.21 大气压



图 1.61 腐蚀的分类

1.26.3 接地电极受土壤腐蚀的形态

表 1.19 海水中金属的自然电极电位
(饱和汞为基准)

高	不锈钢(18Cr-8 Ni-3 Mo)	-0.04
	不锈钢(18Cr-8 Ni)	-0.08
	铜	-0.17
	(标准氢电极) H_2/H^+	-0.24
	不锈钢(18Cr-8 Ni)活性	-0.28
	钢、铸铁	-0.45~0.65
低	铝	-0.78

金属在水溶液中湿蚀,在本质上是由电化学机理产生的金属的离子化反应。

金属成为离子呈溶解状倾向,在金属和液体的界面存在电位差,即可以用电极电位表示。金属在所处环境中实际显示的电位称为自然电极电位。把各种金属及合金的自然电极电位从高的值到低的值的顺序排

列称作自然电位列。表1.19表示在海水中各种金属及合金的自然电位列。

如把在自然电位列不同位置的二种金属组合起来,把卑方的金属作阳极,贵方的金属作阴极就形成电池,前者溶解。

接地电极受土壤腐蚀的形态,可分以下五种。

(1) 局部电池腐蚀(微电池腐蚀) 金属的表面决不是一样的,微观的观察,因不纯物、氧化物及其它皮膜、结晶结构的混乱等是非常不均一的状态。亦即,当在同一种金属上电极电位在各部分也全都不同的。便由各部分的电位差形成局部电池。腐蚀进行的是局部电池腐蚀。

(2) 浓淡电池腐蚀(宏观电池腐蚀) 在同一金属的不同的部分,溶液中盐类浓度或氧等溶存气体量不同的场合,在金属表面形成阳极部分和阴

极部分,阳极部分被腐蚀。最最重要的是通气的差异作为起因被形成氧浓淡电池(通气差电池)。

(3) 异种金属接触电池(电流的腐蚀) 异种金属结合起来形成宏观电池腐蚀的情况。

(4) 电蚀 埋设的金属体因某个原因从外部流入产生电流腐蚀的情况。

(5) 细菌腐蚀 埋设金属体的腐蚀因在土壤中生息的细菌而显著地促进。代表性的有硫酸盐还原细菌,在氧浓度低的 pH6~8 的黏土质土壤中最易繁殖嫌气性细菌。

● 1.26.4 接地电极的腐蚀环境

表 1.20 电话用接地的
接地电阻的分布

接地电阻/ Ω	比率/%
0~50	31.5
51~100	29.0
101~300	29.8
301~500	5.6
501~1000	3.2
1001 以上	0.9

按电公社(当时)的调查,对全国的电话用户保护器用的接地随机抽出 1554 处,测量了它们的接地电阻。所得结果如表 1.20 所示。由表 1.20 看出,全接地棒的约 1/3 是 0~50 Ω ,其次的 1/3 为 51~100 Ω ,最后的约 1/3 是在 101~300 Ω 。接地棒的长度取 0.5m,直径取 0.01m,由接地棒的接地电阻的关系式,可逆算出上述三个组的大地电阻率,其值如表 1.21 所示。

金属在土壤中被腐蚀与土壤的电阻率有关。关于管道那样水平放置的长的钢材的情况,电阻率和腐蚀程度的关系在美国和原苏联有表 1.22 那样的关系。

表 1.21 接地点大地电阻率的分布

编组	接地电阻值 / Ω	大地电阻率 /($\Omega \cdot m$)	比率
A	0~50	0~30	约 1/3
B	51~100	30~60	约 1/3
C	101~300	60~180	约 1/3

表 1.22 土壤电阻率和腐蚀性

电阻率/($\Omega \cdot m$)		腐蚀性
美国	原苏联	
60 以上	100 以上	弱
10~60	20~100	通常
1~10	5~20	强
0~1	0~5	非常强

把表 1.21 和表 1.22 比较可看出, A 组和 B 组的接地棒有比较强的腐蚀, C 组的接地棒的腐蚀较弱。

总之, 电话用户保护器用的接地棒之中, 有腐蚀问题的要占总数的 2/3。这个比率, 对其它一般的接地可能也是相同的。

1.27 接地电阻的测量方法

接地电阻的测量中, 有通常电阻测量中未见的特殊性, 如未对这个特殊性很好理解就进行测量, 即使使用优秀的仪器也会得出很大的误差。

1.27.1 电位降法

目前, 作为接地电阻的测量方法, 最最广泛采用的是电位降法(The fall of potential method)。图 1.62 表示电位降法的构成。在图中, E 是作为测量对象的接地电极。C、P 是测量用的辅助电极在离 E 适当的距离处打入, C 是电流电极, P 是电位电极。

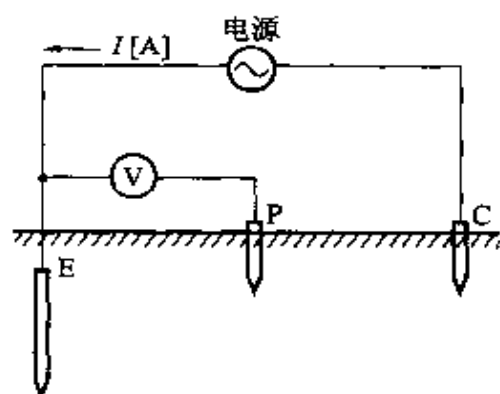


图 1.62 电位降法

在 EC 间接上电源就有电流流入大地。这个电流采用交流, 因为如用直流, 会产生电化学反应。又, 对交流的频率, 为易与电力系统的感应信号分离, 采用工频以外的频率。

如使用过高的交流频率, 导线的电感和电容有不好的影响。采用 1kHz 以下较好。

那末, 接着测量 EP 间的电位差。流入大地的电流为 $I[\text{A}]$, EP 间的电位差为 $V[\text{V}]$ 的场合, $V/I[\Omega]$ 就是接地电阻的测量值。

1.27.2 辅助电极的接地电阻

电位降法重要的特征是二个辅助电极的接地电阻不会影响测量值。

因辅助电极亦是接地的。当然有接地电阻。测量用的辅助电极长度及直径都较小, 又因接地施工是临时的东西, 它的接地电阻都较高。又, 它的值因测量地点和时间而变动。

电流电极 C 的接地电阻加入主回路中,会影响流入大地中电流的大小。但是,电流值变化时,因与它成比例的 EP 间的电位差亦变化,使测量结果 V/I 不变。

电位电极 P 的接地电阻加入电位差测量回路之中,因此作为电位差测量装置,如能尽量不在此回路提取电流,就能除去 P 电极的接地电阻的影响。

● 1.27.3 电位分布曲线

由以上的电位降法的说明可明白,电位降法的测量手续是照全接地电阻的定义那样进行的。手续是照定义那样,而在内容上有本质的差别,即是与辅助电极 C、P 打入的位置有关的。

在接地电阻的定义中,关于辅助电极进行了抽象的、理想的假定。作此定义容易,但是,接地电阻的测量是具体的问题。辅助电极必须放在离主电极有限的距离之内。如辅助电极打在有限的距离内,就容易产生误差。研究这个误差的一个手段是作成电位分布曲线。

把电位分布曲线的例子示于图 1.63。这些曲线是如下作出的。

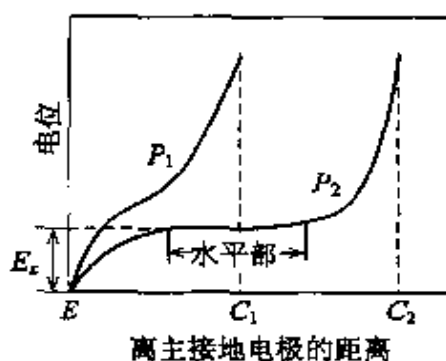


图 1.63 电位分布曲线

首先,在离主电极 E 一定距离的地点把电流电极 C 打入捣实。其次把接在 EC 连接线上的电位电极 P 移动,测量 EP 间的电位差。然后,把横轴取作 EP 间的距离,纵轴为电位差的测量值绘制出电位分布曲线。

图 1.63 是 EC 间的距离取作 E 至 C_1 、 C_2 两种场合描绘出的电位分布曲线 P_1 、 P_2 。在电位分布曲线 P_1 的中央无水平部分,电位分布曲线 P_2 有水平部分。

如把这倒过来说,当电位分布曲线的中央产生水平部分,可判定电流电极离主接地电极已充分远,双方电极已几乎无关。

因此,如把电位分布曲线水平部测定的电位差 E_x ,被除以那时的电流值,就可求出 E 的接地电阻。

● 1.27.4 电阻区域

为什么如主接地电极和电流电极远离,电位分布曲线发生水平部分,就

能判断双方电极无关系呢？要说明这个问题，引入称为电阻区域的概念是必要的。

说起来，接地电阻是包含在接地电极周围的大地之中的。所含接地电阻的量在接地电极的附近最多，离接地电极远的地方较少。那是因为在大地中电流经过路径的断面积急速扩大。

如理论上严密地讲，接地电阻包含在至无限远方的大地中。但是，作为实际问题，可考虑接地电阻的大部分是在以接地电极为中心的有限的范围内。

这样，以接地电极为中心，把包含大部分接地电阻的范围称为电阻区域（参照 1.8 节）。

● 1.27.5 电位分布与电阻区域

回到电位降法来讲。在电位降法，在主接地电极有它的电阻区域，在电流电极也有它的电阻区域。为正确测量接地电阻，两者的电阻区域必须互不交叠。

把电阻区域和电位分布的关系示于图 1.64。这个是孤立的电极的场合。由孤立的电极流出电流的场合，地表面的电位升只是在电阻区域范围内，不涉及到它以外的区域。

图 1.65 是在电位降法中 E 电极和 C 电极过近，双方的电阻区域有交叠的场合。这个场合，如同图(b)所示，E 电极和 C 电极的电位升合成的结果成为最终的电位分布曲线（粗线），在中央不产生水平部分。

与这相反，图 1.66 是 E 电极和 C 电极充分远离的场合。这个场合，两电极的电阻区域不交叠，结果在电位分布曲线的中央产生水平部分。

也就是说，如在电位分布曲线的中央产生水平部分，主接地电极和电流电极可看作是相互无关的。如在这个水平部分打入电位电极可得到精度好的测量值。

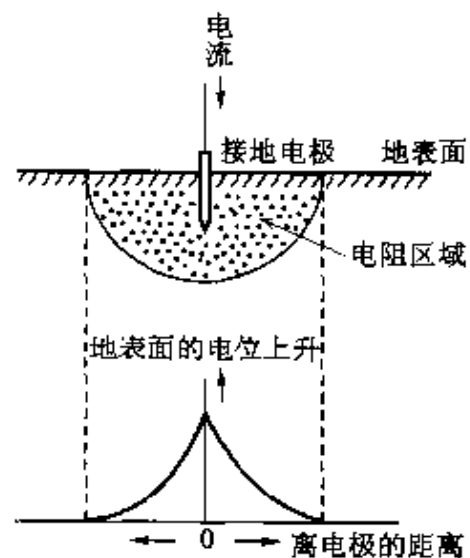


图 1.64 电阻区域和电位分布

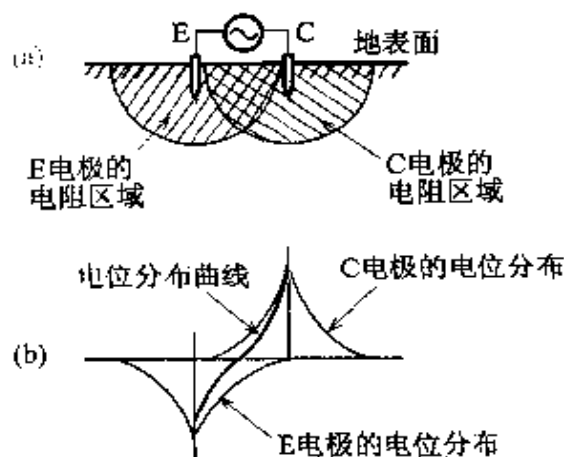


图 1.65 电阻区域交叠的场合

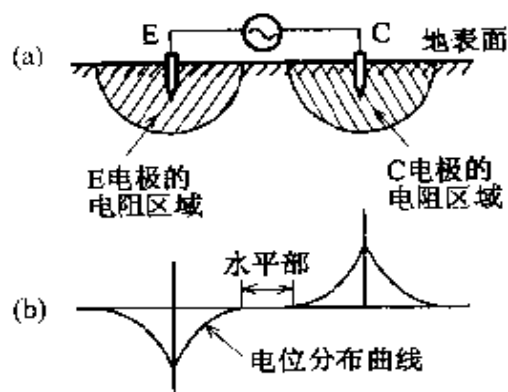


图 1.66 E 电极和 C 电极充分远离的场合

1.28 大地电阻率的测量方法

作为大地电阻率的测量方法,最广泛被采用的是被称作文纳四电极法的方法。这个方法是弗朗克·文纳(Frank Wenner)在 1915 年发表的方法。

1.28.1 文纳四电极法

文纳四电极法的电极配置示于图 1.67。把四个电极在一直线上等间隔打入地中。

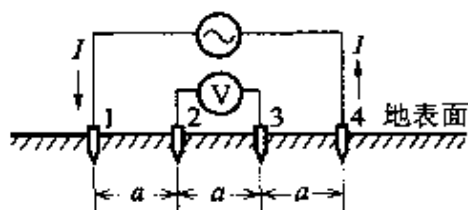


图 1.67 文纳四电极法

在电极 1 和 4 之间接上电源,电流流入大地。因而,测量电极 2 和 3 之间产生电位差。如把电位差的测量值被除以那个时候的通电电流值,可严格的求出电阻值 $R[\Omega]$ 。如把电极间隔取作 $a[m]$,由下式就可求出大地电阻率:

$$\rho = 2\pi a R$$

1.28.2 基本式的根据

以下将说明 ρ 的导出式的根据。

在图 1.68,把 4 个电极中的 1 个打入大地电阻率为 ρ 的大地中。

当这个电极上有电流 I 流入。这个电流从电极向周围的大地成放射状流出去,因而,如把离电极距离 r 的点的电流密度取作 i ,即

$$i = \frac{I}{2\pi r^2}$$

对电场 E 和电流密度 i 来说,有下式的关系:

$$E = \rho i$$

因而,离电极距离 r 的点的电场为

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

又,如离极距离 r 的点的电位为 V ,无限远点的电位取作零,则

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

回到图 1.67,由电极 1 流入的电流 I 引起电极 2 的电位可基于前式求出

$$V_{21} = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

又,由电极 1 流入的电流引起电极 3 的电位为

$$V_{31} = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

因而,电极 2 和 3 之间产生的电位差为

$$V_1 = V_{21} - V_{31} = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

另一方面,因从电极 4 流出的电流 I 引起电极 2 的电位为

$$V_{24} = \frac{-\rho I}{4\pi a}$$

又,因从电极 4 流出的电流 I 引起电极 3 的电位为

$$V_{34} = \frac{-\rho I}{2\pi a}$$

因而,电极 2 和 3 之间产生的电位差为

$$V_2 = V_{24} - V_{34} = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

电极 2 和 3 之间发生的电位差为取 V_1 和 V_2 的和

$$V = V_1 + V_2 = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

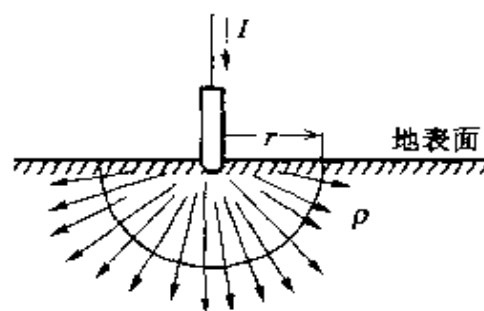


图 1.68 电流的分布

因而,

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} = 2\pi a R$$

也即是 ρ 的导出式。

● 1.28.3 电流渗透深度

在大地电阻率的测量中,测量用的电流在地中渗透的大致深度是多少?这是个重要的问题。一般来说,大地成层状结构,各层的电阻率是不同的。由文纳四电极法测量大地电阻率的场合,得出的是测量用电流渗透到达深度的电阻率的平均值。

电流未到达的层的电阻率是不知道的。在图 1.69,设从电极系统的中央的点 o 向深度方向为 z 轴。从电极 1 流入电流 I ,到达电极 4。考虑 z 轴上的电流密度的变化,当然 o 点的电流密度是最大的,随深度变大电流密度变小。如取 o 的电流密度为 i_0 , z 轴的电流密度为 i , i 和 i_0 之比服从下式的关系:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{z}{D}\right)^2\right\}^{3/2}}$$

D 是电极 1 和 o 点的距离。

基于上式,绘出 z/D 和 i/i_0 的关系成图 1.70。如 $z/D=2$ 即如 $z=2D$ 的深度,可看出电流密度已相当低。

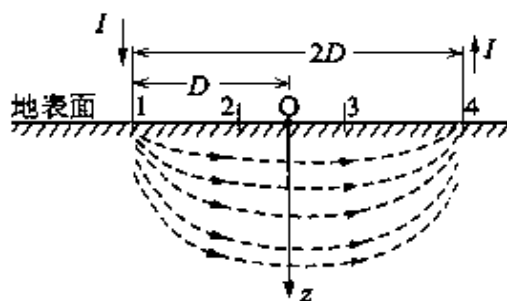


图 1.69 电流的渗透

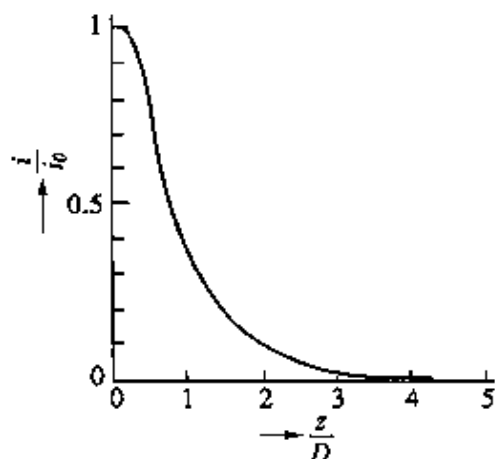


图 1.70 电流密度的变化

取大概的目标, 电流可渗透到电极 1、4 的间隔距离 ($=2D$) 的程度。

● 1.28.4 ρa 曲线

由前项的结论可明白, 文纳四电极法实施时, 如取大的电极间隔, 电流渗透的深度就变大。也就是, 可得到更深的地方与电阻率测量值的关系。利用这个事实, 开发了把电阻率沿深度方向的变化由地上推定的方法, 那就是由 ρa 曲线推定法。

文纳四电极法实施时, 把电极间隔 a 作各种变化测量同一地点的电阻率 ρ , 如图 1.71 那样对应于不同 a 时的 ρ 绘图, 这就是 ρa 曲线。

ρa 曲线的纵轴 ρ 不是地中各深度的电阻率。它是对应于电极间隔为 a 至一定深度 (约 $3a$) 的电阻率的平均值。

因而, 要从 ρa 曲线知道地中各深度的电阻率, 必须变换 ρa 曲线。

ρa 曲线变换的各种方法正在开发, 最广泛采用的方法是把实测求出的 ρa 曲线与理论求出的基准曲线作比较, 推定地中 ρ 的分布的方法。

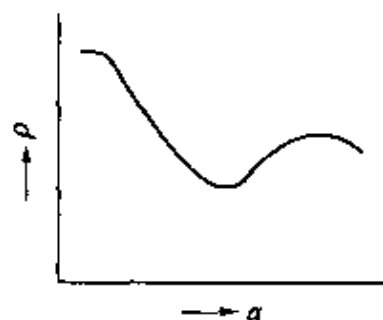


图 1.71 ρa 曲线

● 1.28.5 双层结构场合的基准曲线

如图 1.72 那样的是双层结构的场合, 从地表面至深度 h 电阻率取作 ρ_1 , 在它以下的电阻率取作 ρ_2 。

在这里, 定义被称为反射率 k 的量:

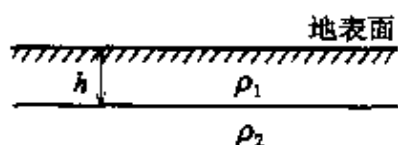


图 1.72 双层结构

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

k 对应于 ρ_1 和 ρ_2 的大小关系成正值或负值。在 $\rho_2 > \rho_1$ 的场合为正值, $\rho_2 < \rho_1$ 的场合成为负值。因而取 k 为 $+1$ 和 -1 间的值。在第 2 层的电阻率非常高的极限的场合, 即 $\rho_2 \rightarrow \infty$ 的场合, $k = +1$, 第 2 层的电阻率在最低的 0 的场合, $k = -1$ 。

如把 k 式变换为如下的式子:

$$k = \frac{\rho_2 - 1}{\rho_2 + 1}$$

即, k 只取决于 ρ_2 和 ρ_1 的比。表 1.23 表示对应于各种 ρ_2/ρ_1 的 k 的值。

在双层结构, 可以把对应于各种 k 值的 ρ_a 曲线在理论上描出, 把它示于图 1.73 和图 1.74。

图 1.73 是 k 为负的场所的 ρ_a 曲线。即与上层相比, 下层电阻率在较低的场所。

图 1.74 是 k 为正的场合的 ρ_a 曲线。即与上层相比, 下层电阻率在较高的场合。

另外, 在图 1.73 和图 1.74 两图中, 横轴是使用第一层的深度 h 和电极间隔 a 之比 h/a 。

表 1.23 ρ_2/ρ_1 和反射率 k

k	ρ_2/ρ_1	k	ρ_2/ρ_1
+1		-1.0	0
0.9	19.0	-0.9	0.0526
0.8	9.0	-0.8	0.1111
0.7	5.67	-0.7	0.1765
0.6	4.0	-0.6	0.2500
0.5	3.0	-0.5	0.3333
0.4	2.333	-0.4	0.4286
0.3	1.857	-0.3	0.5384
0.2	1.50	-0.2	0.6667
0.1	1.222	-0.1	0.8182
0	1.000		

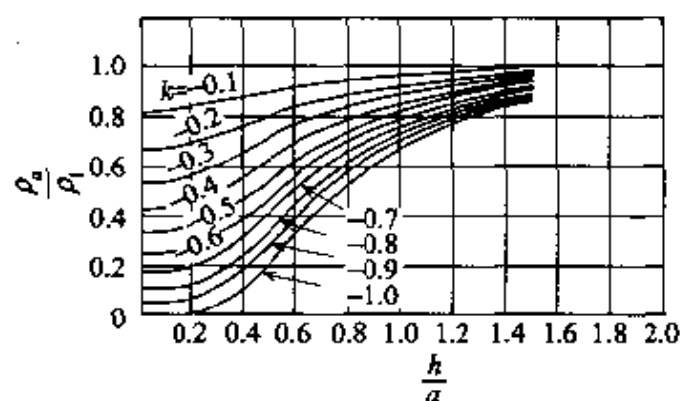


图 1.73 双层结构的基准曲线
(k 是负的场所)

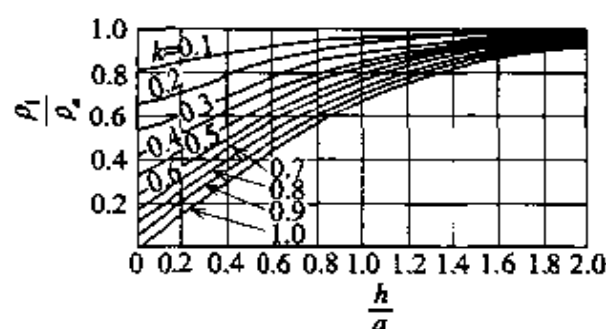


图 1.74 双层结构的基准曲线(k 是正的场所)

又,在图 1.73 中, ρ_a 是按文纳四电极法从地表面测量得出的综合的电阻率, ρ_1 是上层的电阻率。另外,在图 1.74 示出的计算关系上,纵轴成为 ρ_1/ρ_a 。

把实测得到的 ρ_a 曲线与这些基准曲线比较,就可推定地中电阻率的分布。

因按电阻率的调查可从地表面知道地中情况,即使在接地施工以外的领域,这也可有各种各样的应用,例如,这被用来推定地下水的存在,有趣的是在考古学方面的利用,可由测量电阻率来发现地下的古墓。

那末,在电气设备的安全对策中还有一个重要课题是对地闪络保护。

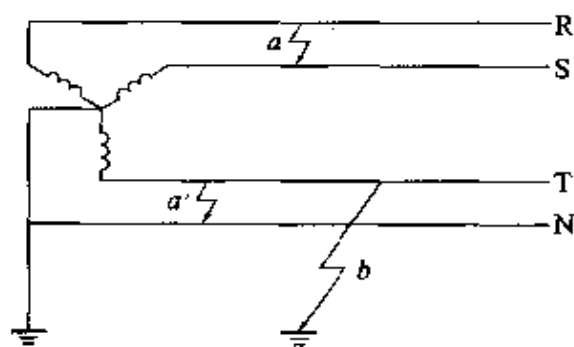
所谓对地闪络保护是什么呢?

说明前我们把称作**电路**的词回忆一下,所谓电路在配线和电气机器中是指正常动作时电流流过的部分。例如,以配线来说,电线中的导体是电路,以电动机来说,其中的线卷和整流子或电刷是电路。电动机那样的电气机器的场合,把它的内部的电路可以称之为**充电部分**。

那末,所谓对地闪络是电路和大地间的绝缘变得异常的低,由电弧即导电性物质把两者连接起来,又在电线或电气机器的外部出现危险的电压,把这种电流流过的状态称作对地闪络。

由对地闪络流过的电流称作**对地闪络电流**。

那末,对地闪络是电气设备(包括电线及电气机器)的故障的一种,而电气设备的故障中有上面已讲过的称为**短路**的故障。短路和对地闪络有什么不相同的地方呢?那可用图 2.2 来说明。



a, a' 为短路, b 为对地闪络

图 2.2 短路和对地闪络的说明

所谓短路是指电路与电路之间低阻抗连接起来的状态。图 2.2 中的 a 和 a' 是短路。而图 2.2 中的 b 是对地闪络。

防止由对地闪络产生的各种故障的对策是**对地闪络保护**。对地闪络保护按它的目的又分为三类。

触电的防止,是为防止因发生对地闪络的电气设备引起人和家畜触电的对策。

漏电火灾的防止,是为防止因对地闪络引起可燃物着火成为火灾的对策。

所谓**电弧对地闪络对策**,是为防止因在对地闪络时产生的电弧引起设备机器损伤的对策。

为了进行对地闪络保护,有以下三个方法:

(1) **接地方式** 接地方式这取决于电气机械器具的金属制外壳或铁台等和大地作的连接,是在电路产生对地闪络时,不产生那些危险的电压那样连接的方式。

(2) **漏电断路方式** 这个方式是把对地闪络电流发生的信号用什么样

的方法检出来,由那个信号来遮断电路的方式[图 2.3(a)]。

另外,因有些负荷机器在无预兆时是不允许随意断开电路的。例如,冷却反应炉的送风机等。那样的场合,只检出对地闪络发生的信号而不断路[图 2.3(b)],代之以由声音(蜂鸣器)和光(指示灯)发出警报。把这称为漏电警报方式,是漏电遮断方式的一个变种。

(3) **过电流遮断方式** 所谓过电流遮断方式如图 2.4 所示。它是由对地闪络电流流入电路中的过电流保护器(熔断器或断路器)使它动作来遮断电路的方式。

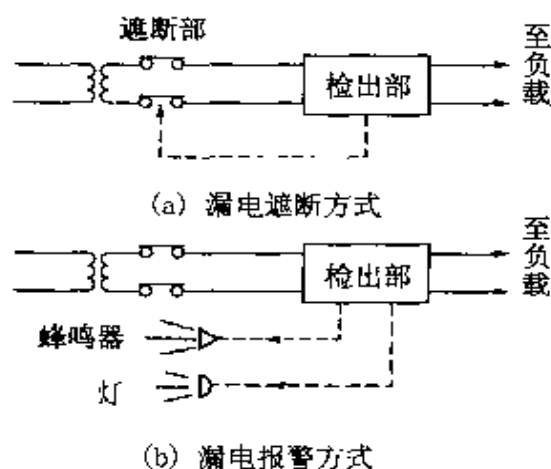


图 2.3 漏电遮断方式和漏电报警方式

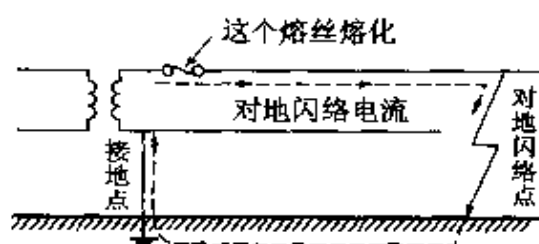


图 2.4 过电流遮断方式

在电路中接入过电流保护器,是由与原来一样的因短路或过负荷引起异常电流来保护电气设备。可以看出,这个过电流保护器亦兼作对地闪络保护用。不需特别接入对地闪络保护而实现对地闪络保护是这个方式的特征。

但是,对由对地闪络电流使过电流保护器动作来说,必须流过相当大的电流。那样,必须流过可与过负荷电流或短路电流匹敌的电流。对流过这样大的对地闪络电流来说,如从图 2.4 可明白,对地闪络点或接地点的电阻必定十分低。

在现实中,对地闪络点或接地点的电阻成那样低的是很少的。又因有配线的电阻,要流过能使过电流保护器动作程度大的对地闪络电流的机会是不多的,这是这个过电流遮断方式的缺点。

以上的三种方式是对地闪络保护的基本方式,但除这些以外还有若干

特殊的方式。这些特殊方式不是对地闪络保护的主流,仅仅适用于特殊的用度。

(1) **非接地方式** 如图 2.5,把变压器接入负荷与电源之间,变压器的二次侧的电路哪儿也不接地的方式。这个方式有即使发生对地闪络事故如一点对地闪络而并无大的对地闪络电流流过的特征。在医院等被采用。

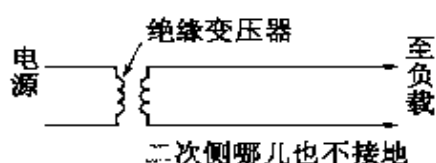


图 2.5 非接地方式

另外,接入的变压器在电源侧和负荷侧电气的方面因是要求隔离的,必然使用一次侧和二次侧线卷独立的两线卷变压器,不能使用自耦变压器。在非接地方式使用的变压器称为**绝缘变压器**。接地方式和非接地方式优劣的比较在 2.3 节中将详述。

(2) **超低电压方式** 进行对地闪络保护主要的目的之一是防止触电事故。为了防止触电事故,可使用接地,也可使用漏电断路器。但是,如把电源电压拼命地降低来防止触电事故也是一种方法。如电源电压很低就不会触电,这我们从即使触摸干电池不会触电的事实可以明白。对那个,至多少电压可不触电,都将在 2.9 节中作详细叙述。

(3) **二重绝缘机器** 说起来对地闪络保护之所以成为必要,是因电气机器的绝缘降低发生对地闪络引起的。如把电气机器自身的绝缘强化,就不会发生简单的对地闪络,对地闪络保护也就不必要了。这样以在电气机器方面进行地络事故的预防对策当然也是方向,其代表性的是二重绝缘机器的开发。这个方向从严格意义上来讲不能算入地络保护,而作为电气安全对策重要的项目在 2.11 节中叙述。

2.2 触电事故的机理

触电事故有各种各样的种类,可把这些整理分成以下两大类。

(1) **直接接触事故**[图 2.6(a)] 电气机器在运转时,可把带电的部分称为充电部分,可把不带电的部分称为非充电部分。直接触及电气机器充电部分的触电事故称为**直接接触事故**,也就是在线接触。

(2) **间接接触事故**[图 2.6(b)] 电气机器在正常运转时,不带电的金属部分可称为**非充电金属部分**。如电气机器的绝缘降低,从内部的充电部

分向外部的非充电金属部分电气泄漏,也就是漏电,是对地闪络。触及漏电的电气机器的非充电金属部分就触电。这个触电事故,有性能降低的绝缘物介于中间,由于与内部的充电部分成间接接触,被称为间接接触事故。

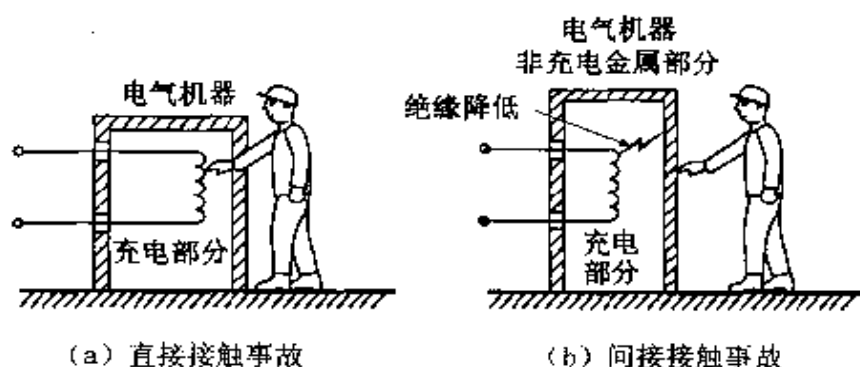


图 2.6 触电事故的分类

(1)直接接触事故是在电气机器无故障是正常运行时产生的事故。相反,(2)间接接触事故是电气机器在绝缘降低发生故障时产生的,电气机器正常运行时不产生这种事故。而且直接接触事故与间接接触事故是非常不同的。

如果说在实际事故中哪一种较多的话,那末间接接触事故要比直接接触事故远远为多。因为,通常电气机器在结构上不会让人直接触及充电部分,直接触电事故较少。相反,因谁都可能触及非充电金属部分,间接接触事故就容易产生。

2.3 接地系统和非接地系统

现在在一般的低压配电系统中,变压器二次侧的中性点是与大地连接着的(图 2.7),即组成接地系统。

另外,按电气设备技术标准,游泳池用水中照明等供电的回路中必定接入绝缘变压器(双线卷变压器),它的二次侧的电路一定是不接地的,即要求成非接地系统。

接地系统和非接地系统一定是很不同的。

(1) 人体通过电流的大小 非接地系统的场合,人即使和那个电路接

触,如果是一点接触,电流是经分布电容流向人体的(图 2.8)。如果系统的规模较小,分布电容也小,因而,在工频下不流过很大的人体通过电流。

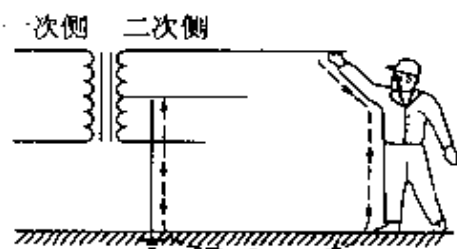


图 2.7 接地系统(一般的低压配电系统)

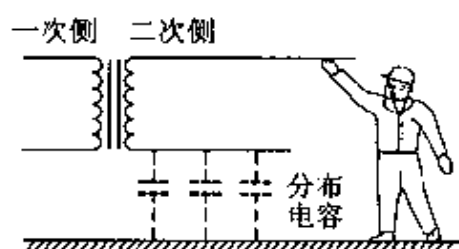


图 2.8 非接地系统

另一方面,在接地系统的场合,因变压器是接地着的,人体与电路接触即使一点接触也能成封闭回路,有可能因人体和大地的接触状态引起有危险的电流通过人体(图 2.7)。

(2) **异常电位的抑制** 非接地系统的弱点是在因某种原因使电路对地电位上升的场合,对这种上升不可能完全被抑制。使电路对地电位上升的原因是各种各样的,有高低压电路间的混触、雷电过电压、操作过电压、静电等。因各种原因,如在低压侧侵入高电压,就将破坏配线和机器、烧坏建筑物、发生触电死伤事故等。

原来低压配电系统是作成非接地系统的,但是在变压器屡次发生高低压混触事故,因它造成严重的灾害,然后才被改成接地系统的。也就是把在变压器二次侧的中性点接地,是为了把二次侧电路的电位异常上升抑制止。

(3) **接地系统间的相互干扰** 如果接地,就可抑制电路对地电位上升,但接地系统它亦有固有的弱点。

那是在有多个接地系统的场合,各自独立进行接地施工,因为把大地公共使用,可常有或大或小产生相互干扰的机会。

例如,如把二个接地系统的接地电极随意的靠近埋设,便由一个系统的接地电流引起电位上升,而有波及另一个健全系统的危险(图 2.9)。再者,如把结构上对大地不能绝缘的负载接上接地系统,负载电流的一部分,有长时向大地分流的可能性(图 2.10)。这亦是因电源和负载共有相同的大地产生的。

前面已经指出的,通过人体能完成闭合回路的事,也因人体和电气系统共有相同大地产生的。

这样,对接地系统来说,与别的系统通过大地的相互干扰必定是要常常担心的事。

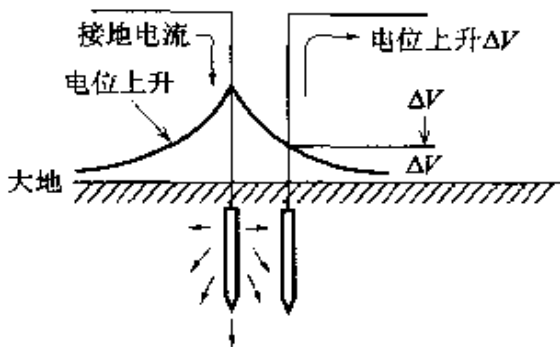


图 2.9 接地系统之间的相互干扰

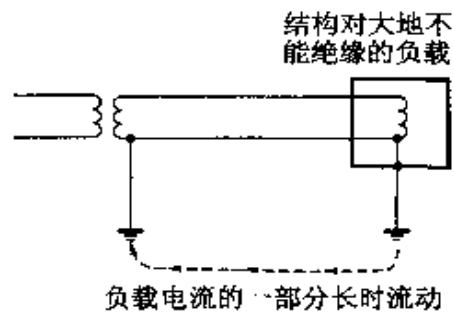


图 2.10 结构上对大地不能绝缘的负载未接上接地系统

这点,如在非接地系统把双线卷变压器接入电源和负载之间,它的二次侧有能几乎完全与其他系统“隔绝”的优点。当然,那是在变压器线卷间的电容耦合可忽视的情况下。

(4) **绝缘的维持** 以上,把接地系统和非接地系统作了比较性的叙述,而非接地系统有重大的缺点。

那是要把非接地系统长期持续健全地维持是困难的。作为非接地系统,如从别的表现来看,因是对大地绝缘的系统,而绝缘不管使用什么样的材料,考虑用什么样的结构,它随使用时间增加性能必然降低。

系统所处的环境也有厉害的影响,如接上很大的负载,绝缘降低得更加快速。又如系统的规模很大,如从全体去看管理不周到,草木鸟兽等容易受到伤害。

这样,如非接地系统它与大地之间的绝缘老化,那个系统就不再能称为非接地系统,而是一种接地系统。以非接地系统考虑的回路,而忽然之间又变成了接地系统,没有比这更危险的了。

总之,因为非接地系统要在本质上长期、持续维持它的健全性是困难的,它只能适用于负载轻、小规模的系统、及管理周到的专用电路。

(5) **对地闪络检出的难易** 非接地系统发生了对地闪络时,不会有大的对地闪络电流流动。因而,对地闪络的检出是困难的。

把以上叙述的接地系统和非接地系统的比较集中列在表 2.1 中。

表 2.1 接地系统和非接地系统的比较

接地系统	非接地系统
如接触电路就有大的人体通过电流流过的可能性	即使接触电路亦无大的人体通过电流流过
能抑制电路异常电位的上升	不能抑制电路异常电位上升
有通过大地与别的系统产生相互干扰的可能性	能比较完全的与其它系统分离
能适用于大规模系统	因绝缘的维持困难,只适用于小规模 of 专用系统
对地短路检出容易	对地短路检出困难

2.4 室内配线的接地方式

在前节中我们讨论了电路的接地或不接地。电路接地可称为系统接地。

表 2.2 接地的分类

接地	系统接地……电路接地
	机器接地……机器的非充电金属部分的接地

接地中除系统接地之外,还有一个重要的类别,那是负载机器的非充电部分的接地,把这称为机器接地(表 2.2)。

由系统接地和机器接地组合而产生室内配线接地方式各种各样的变化。我们以三相四线式配电系统为例介绍各种接地方式。

(1) 非接地方式 如图 2.11 所示,电路各处均不接地,不介意机器的外壳由使用场合接地,IEC(国际电气标准会议),称为 $I-T$ 方式。

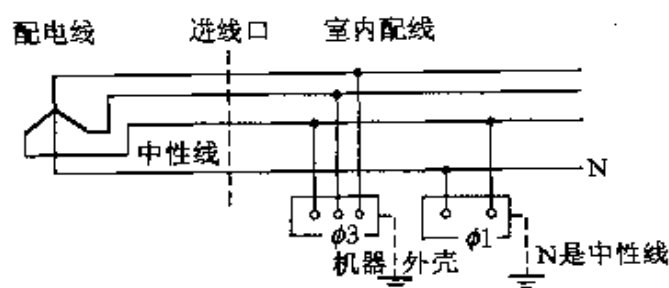


图 2.11 非接地方式(IEC 的 $I-T$ 方式)

(2) 各个保护接地方式 如图 2.12 所示,是把配电线路变压器的中性点接地,每个机器的外壳都接地的方式,IEC 称为 $T-T$ 方式。

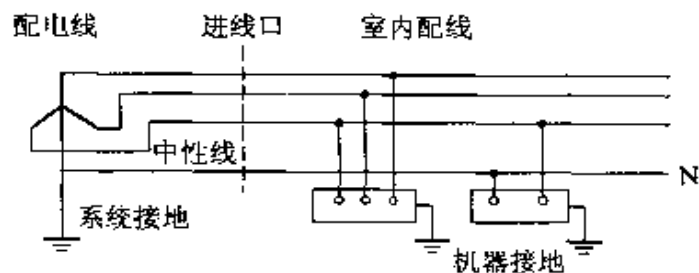


图 2.12 各个保护接地方式(IEC 的 T-T 方式)

(3) **保护接地线方式** 如图 2.13 所示,从电源侧把保护接地线引入室内,机器的接地全部连接在这个保护接地线上的方式。保护接地线即使多重接地也不介意。因为保护接地线是相当于第五根导线,这个接地方式可称为**第五线方式**,IEC 称为 T-N 方式。

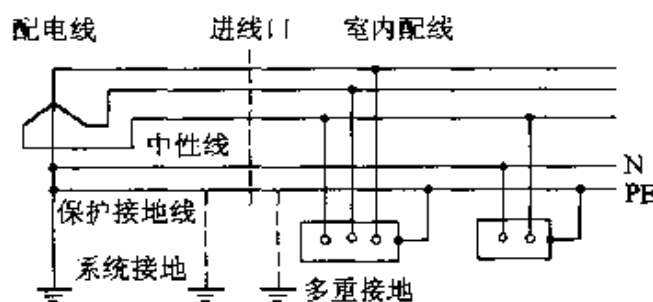


图 2.13 保护接地线方式(IEC 的 T-N 方式)

(4) **兼用方式** 如图 2.14 所示,把保护接地线 and 中性线以一根电线兼用的方式。保护接地线 and 中性线,如在图 2.13 知道,都连接在系统接地。因而,假如通常的状态,因为两者都与大地同电位,似乎即使兼用那样也不

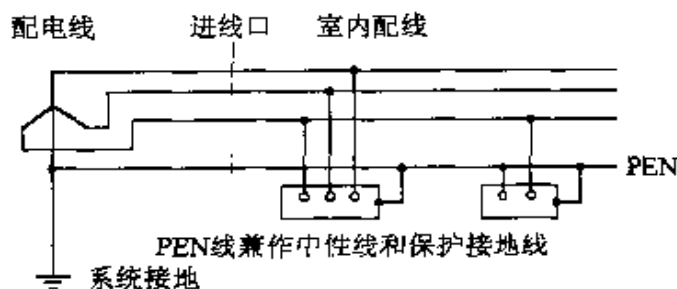


图 2.14 兼用方式

介意。如兼用因能节约一根电线在经济上亦是有好处的。但是,中性线和保护接地线各自持有不同的作用。中性线是电路,在负载三相间不平衡时在中性线就流过一部分电流。因而,如中性线和保护接地线兼用,在保护接地线上也可能有电流流过。

2.5 电气设备技术标准中有关接地的条款

日本国关于电气安全的根本法规是在电气设备技术标准中,这里对接地将作不很系统的介绍。

● 2.5.1 电路的绝缘——第 13 条

在电气设备技术标准中,贯彻着电路与大地绝缘的原则或电路的绝缘原则。这是被规定在第 13 条,即:

第 13 条 电路必须对大地绝缘

如果电路对大地不充分地被绝缘,因电流泄漏会发生触电或火灾的危险,也因此引起电力损失。但是,因各种各样的理由,有对大地不能绝缘的部分,那种部分必须保持在最小限度。在第 13 条,指定了一个一个那种部分,把它们排除在电路的绝缘原则之外。

● 2.5.2 接地施工的种类——第 18 条

对应于所谓第一种、第二种、第三种、特别第三种这四种接地施工的接地电阻值被规定在第 18 条,如表 2.3 所示。

对第一种、第三种、特别第三种接地施工欧姆数已被规定,而对第二种接地施工的接地电阻值不能一义的作出规定。

● 2.5.3 系统接地——第 23 条

在把高压电路(特别高压电路)和低压电路结合的变压器的中性点,进行第二种接地施工,把这个作为规定。这个规定,是日本国把低压系统作接地系统的基本的条文。换句话说,是关于系统接地的基本条文。另外,低压电路使用电压在 300V 以下的场合,在变压器中性点难以施行接地施工时,可以把低压侧的一个端子接地。

那末,因在第 23 条规定的接地是第二种接地施工,它的接地电阻必须按照表 2.3(第 18 条)的规定。

第二种接地施工的接地电阻值是在高压侧发生一线对地闪络,在它的电流流入接地电极那样最恶劣的场合,规定接地电极电位上升不能按 150V 以上那样来考虑(图 2.15)。

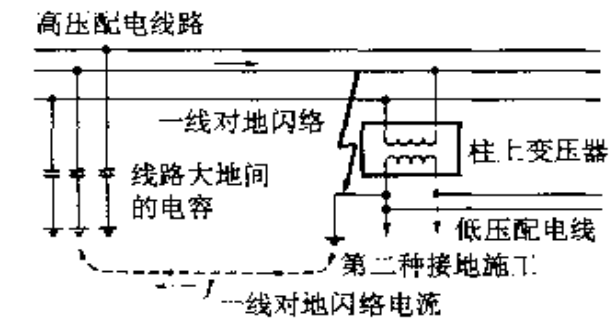


图 2.15 第二种接地电阻的决定方法

表 2.3 与接地施工种类相对应的接地电阻值(第 18 条)

接地施工的种类	接地电阻值
第一种接地施工	10Ω
第二种接地施工	以变压器的高压侧或特别高压侧的电路一线对地闪络电流的安[培]数除 150V(变压器高压侧的电路或使用电压在 35000V 以下的特别高压侧的电路,因与低压侧的电路混触,使低压侧电路的对地电压超过 150V。此时,设计在 1~2 秒以内自动地把高压电路或使用电压在 35000V 以下的特别高压电路遮断的装置时是 300V;设计在 1 秒以内自动地把高压电路或使用电压在 35000V 以下的特别高压电路遮断的装置时是 600V)得出的欧[姆]数
第三种接地施工	100Ω(在低压电路,当该电路在发生地络的场合,施設能在 0.5秒内自动遮断电路的装置时是 500Ω)
特别第三种接地施工	10Ω(在低压电路,当该电路在发生地络的场合,施設能在 0.5秒内自动遮断电路的装置时是 500Ω)

因为第二种接地施工低压侧电路连接在接地电极上,低压侧电路的电位异常上升受到抑制可说是明白的。那末由欧姆定律:

$$(\text{第二种接地的电位上升}[V]) = (\text{一线对地闪络电流}[A]) \times (\text{第二种接地电阻}[\Omega]) \leq 150[V]$$

$$\text{第二种接地电阻}[\Omega] \leq \frac{150[V]}{\text{一线对地闪络电流}[A]}$$

式中,一线对地闪络电流按关于规定电气设备技术标准细则的告示的第 11 条来计算。

● 2.5.4 机器接地——第 28 条

敷设的电路在机械器具的铁台及金属制外壳中,表 2.4 表示以机械器具的区分实施相应的接地施工,把这作为规定。本条文是关于机器接地的基本的条文。

表 2.4 机器接地的区分

机械器具的区分	接地施工
300V 以下低压用的器具	第三种接地施工
超过 300V 低压用的器具	特别第三种接地施工
高压用或特别高压用的器具	第一种接地施工

● 2.5.5 对地闪络遮断装置的设施——第 41 条

有金属制外壳使用电压超过 60V 的低电压的机械器具,施设在有人容易触及的危险的地方,该机械器具的供电电路中,必须设有当在电路发生地络时遮断电路的装置。

如把这个规定就那样应用,所有的低压电路都应安装漏电断路器,当然有例外的规定,主要的例外的规定如下所示。

- ① 机械器具在乾燥的地方设置时。
- ② 把对地电压 150V 以下的机械器具设置在没有水气的地方时。
- ③ 在机械器具实施第三种或特别第三种接地施工,其接地电阻值在 3Ω 以下时。
- ④ 设置二重绝缘结构的机械器具时。
- ⑤ 在电源侧设置绝缘变压器(二次电压限于 300V 以下),而且,把负载侧电路不接地时。

在以上的场合中不必设置漏电断路器。另外,在内线规程如表 2.5 那样列出了漏电断路器具体设置的例子。

那末,按第 41 条在电路中设置漏电断路器的场合,由第 18 条(表 2.3)第三种及特别第三种接地施工的接地电阻可放宽至 500Ω 。

漏电断路器有如表 2.6 所示的三种类别,以防止触电事故为目的而设置的漏电断路器用高灵敏度高速型是必要的。

但是,在机械器具的外壳施行接地施工的接地电阻值,在适合表 2.7 的场合,在漏电断路器的动作时间为 0.1 秒以内(高速型)的场合,可采用中灵敏度的漏电断路器(内线规程)。表 2.7 是如下进行计算的结果。

表 2.5 漏电断路器的设置例

机械器具的设置场所 电路的对地电压	室内		室外		室外	有水气的场所
	干燥的场所	湿气较多的场所	雨线内	雨线外		
150V 以下	—	—	—	□	□	○
超过 150V300V 以下	△	○	—	○	○	○

表中的记号的意义如下:

- :务必设置漏电断路器;
- △:在住宅中安装机械器具的场合,务必安装漏电断路器;
- :在住宅院内或面对道路的场所,放置室内空调机、展览箱、冰箱、自动售货机等装有电动机的机械器具的场合,务必安装漏电断路器。

表 2.6 漏电断路器的种类

区 别		额定灵敏度电流 /mA	动作时间
高灵敏度型	高速型	5,10,15,30	在额定灵敏度电流,0.1 秒以内
	时延型		在额定灵敏度电流,超过 0.1 秒在 2 秒以内
	反限时型		在额定灵敏度电流,超过 0.2 秒在 1 秒以内 在额定灵敏度电流的 1.4 倍的电流,超过 0.1 秒在 0.5 秒以内/额定灵敏度电流的 4.4 倍的电流,在 0.05 秒以内
中灵敏度型	高速型	50,100,200,	在额定灵敏度电流,0.1 秒以内
	时延型	300,500,1000	在额定灵敏度电流,超过 0.1 秒在 2 秒以内
低灵敏度型	高速型	3000,5000,	在额定灵敏度电流 0.1 秒以内
	时延型	10000,20000	在额定灵敏度电流,超过 0.1 秒在 2 秒以内

注:因漏电断路器的最小动作电流一般是额定灵敏度电流 50%以上的值,务必在选定时注意。

① 有水气的场所等电气的高危险度的场所

$$\text{接地电阻值}[\Omega] \leq \frac{25[V]}{\text{漏电断路器额定灵敏度电流}[A]}$$

② 其它场所

$$\text{接地电阻值}[\Omega] \leq \frac{50[\text{V}]}{\text{漏电断路器额定灵敏度电流}[\text{A}]}$$

但是,在①、②的场合,取最大值 500[Ω]。

表 2.7 保护接地电阻值

漏电断路器动作灵敏度 整定电流/mA	接地电阻值/Ω	
	有水气的场所等电气的 高度危险的场所	其它的场所
30	500	500
50	500	500
75	333	500
100	250	500
150	166	333
200	125	250
300	83	166
500	50	100
1 000	25	50

关于上述公式中采用 25V、50V 等值的根据望参照 2.9 节。

● 2.5.6 各种接地施工的细目——第 19 条

关于接地施工具体的施设方法的规定,详细情况已在 1.24 节中涉及。

● 2.5.7 游泳池用水中照明灯的安装——第 247 条

这是非接地系统的例子。对比赛用游泳池等人或跳入水中,或容易把

手等放入水中的场所的照明设施作出规定,其中重要的是规定在照明灯和电源之间接入绝缘变压器,它的二次侧电路不能接地(图 2.16)。还有,在绝缘变压器二次侧电路使用电压超过 30V 的场合,要把地络断路器义务附上。

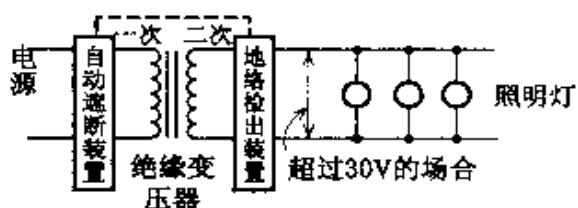


图 2.16 游泳池用水中照明灯的回路(超过 30V 的场合)

2.6 电源侧接地和负载侧接地

这里说的所谓电源侧接地,是电气设备技术标准中说的第二种接地施工,即在变压器的二次侧电路接地,把这亦称作系统接地。

另一方面,所谓负载侧接地,是指把接在低压电路的电气机械器具的金属外壳或铁台等施行接地,通常这是第三种接地施工。这是机器接地。

图 2.17 表示如在低电压机器发生地络事故的场合,电源侧接地和负载侧接地的关系。在低电压机器发生地络,可设想为电源侧电路和金属制外壳完全紧密连接起来的最严重的状态。

图 2.17 所示的场合,地络电流从低电压机器的外壳经由机器接地,经由大地、通过系统接地返回到电源。因此,当电源电压为 E_0 [V],机器接地的接地电阻为 R [Ω],系统接地的接地电阻取 R_0 [Ω]。那样,地络电流 I [A]就以下式给出:

$$I = \frac{E_0}{R + R_0} \text{ [A]}$$

如流过地络电流,在低电压机器的外壳有电压产生。如把那个电压取作 E [V],由欧姆定律,

$$E = IR = E_0 \frac{R}{R + R_0}$$

在这个状态,如人接触到低电压机器的外壳,最坏的场合,在人体上有可能加上 E [V]的电压。所以把 E 称为接触电压。

现在,取电源电压为 100V,系统接地电阻为 10Ω ,机器接地电阻取各种各样的值,由上式计算的接触电压列于表 2.8。

机器接地电阻为 100Ω ,即相当于第三种接地电阻,接触电压是 91V,与电源电压几乎相等。因此,机器接地几乎没有意义。

由上式可以明白,接触电压是把电源电压按 R 和 R_0 比例的情况分配的。因而,要接触电压比电源电压低得多,必须使 R 降低至 R_0 相同程度。

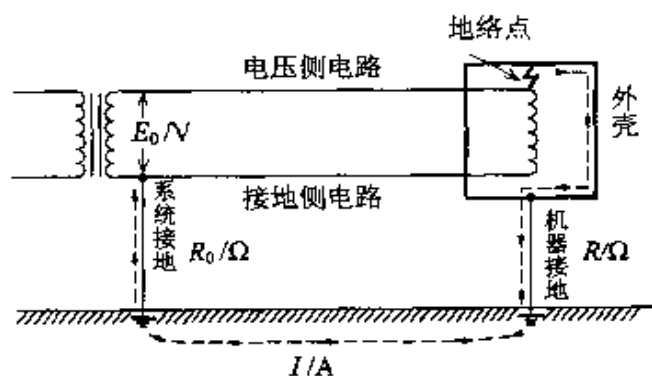


图 2.17 电源侧接地和负载侧接地的关系

如表 2.8 中可看到,如把 R 取 10Ω ,则接触电压为 $50V$ 。

系统接地,即第二种接地电阻往往非常低,这样低是把几个接地并联的结果。那样,如机器接地电阻不降低到与系统接地电阻相同程度,接触电压不会降低。

可是,要把机器接地电阻降低,这是相当不容易的。可以说,如果机器接地电阻就那样高的放置,防止触电就几乎无效。因此,这成为在低压电路的地络保护中引入漏电断路器的背景。

那末,接触电压至多少电压下没有触电问题呢?要决定这个,必须知道人体流过怎样的电流有危险。

表 2.8 机器接地和接触电压(电源电压 $100V$,系统接地 10Ω)

机器接地 R/Ω	接触电压 E/V	机器接地 R/Ω	接触电压 E/V
100	91	20	67
80	89	10	50
60	86	5	33
40	80	1	9

2.7 人体特性

所谓人的身体流过怎样的电流有危险的问题,是电气安全要考虑的基本问题。然而,这个问题是相当难解决的问题。第一,不能实验。听说在我们的先辈中,为了弄明白这个问题,曾采用把电流流过自己身体的危险的方法,我们应敬佩他们的勇气。

今日,在触电问题的研究中,采用以下两个手段:

- ① 动物实验。
- ② 事故数据的收集。

采用以上那样的手段,为了要取得触电现象研究的成果得花费时间。虽然如此,很多研究者经多年的努力,这个问题的解答已能明确。

(1) **电流基本量** 决定触电事故的危险程度的是电压?电流?还是电力?这是个重要的问题。这个问题的答案能因事故发生的各种各样的条件而变化。

然而,在触电事故占多数的由工频电源引起的事故的场合,人体二点间流过的电流是基本量。那样,可由人体通过电流(工频,有效值)的大小来决定触电事故危险的程度。

(2) 人体的二点间 触电事故的基本量是人体二点间流过的电流,那么人体的二点指的是哪点和哪点呢?

这在开始时可先不讨论这个问题。触电死亡事故,如追究到底,其原因是心脏失去控制,和心脏关连的在身体上的各个部位都有一定的临界死亡危险度。然而,因触电事故发生的位置是不能预想的,那末仔细的去讨论也是徒劳的。

因此,所谓人体的二点间可认为是在四肢间,即包括两手两足为四点其中的任意二点间的意思。这个按触电事故的现实来看,实际上因在四肢间流过电流的情况是最多的,是合理的。

(3) 持续电流的安全界限 以人体通过电流决定危险度的时候,首先从持续电流来考虑。即是持续的一定电流流过人体的场合。

在表 2.9 列出了持续电流(工频、有效值)对人体的影响。这是小林勋收集国内外的数据作成的。

表 2.9 电流(工频、有效值)
对人体的影响

1mA	仅有感觉的程度
5mA	觉得相当痛
10mA	难以承受的痛苦
20mA	肌肉剧烈收缩使被害者不能自己从回路离开
50mA	相当危险
100mA	致命的

(4) 遮断时间的引入 最近,亦在低压电路装置漏电断路器,向能积极地进行地络保护的方向努力。即在发生地络电流时,直接把这个电流检测出来而遮断电路。

所以,即使在考虑人体通过电流危险度时,亦产生了要把遮断时间作为必要的考虑,即为了断定人体通过电流的危险度,要重视它的通过时间。如大的人体通过电流在短时间就会有危险,如小的通过电流即使长时间流过亦不会有危险。

基于这个考虑,德国的凯普恩把触电电流的安全界限如下式那样以电流和时间的乘积来表达

$$IT=\text{constant(常数)}$$

式中, I 是人体通过的电流[mA], T 是电流通过的时间[s]。

凯普恩进行各种研究后提出,作为人体通过电流的安全界限可取电流

时间乘积为 $50\text{mA} \cdot \text{s}$, 即

$$IT = 50\text{mA} \cdot \text{s}$$

把这作出图形就如图 2.18 的 A 线。以 A 线为界线, 右上方是危险范围, 左下方是安全范围。例如, 100mA 电流在人体流过 1 秒是危险的, 而在 0.1 秒遮断是安全的。

另外, 在凯普恩的曲线, 如人体通过电流在 50mA 以下, 安全界限与时间没有关系。

图 2.18 中的曲线 B 是把电流时间乘积取 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 的场合, 即

$$IT = 30\text{mA} \cdot \text{s}$$

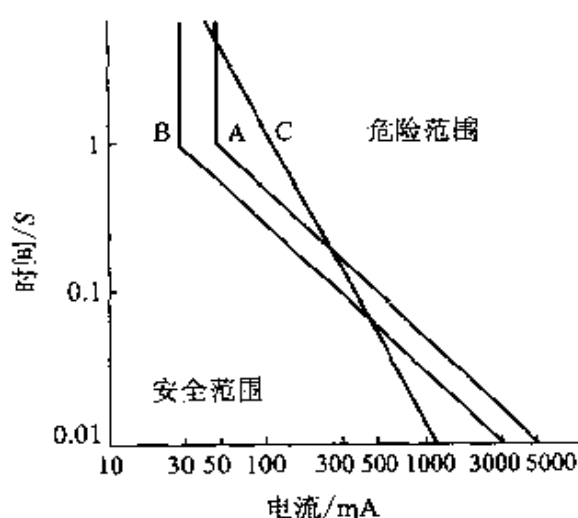


图 2.18 触电电流的安全界限

B 线比 A 线要高出 1.67 的安全系数。西欧各国在地络保护方面都把 B 线作为基础。

另一方面, 美国加州大学的塔歇尔教授提出, 触电电流的安全界限可如下式表达:

$$I^2 T = \text{constant} (\text{常数})$$

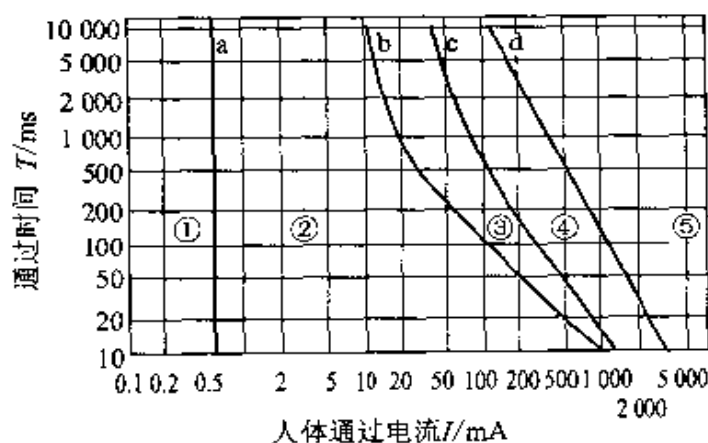
塔歇尔教授的公式是基于触电事故的危险度与电力成比例来考虑。教授从动物的实验数据等, 得出以下的数值表达式:

$$I = \frac{116}{\sqrt{T}} [\text{mA}]$$

T 是测出的时间 $[\text{s}]$ 。这是图 2.18 中的曲线 C。

(5) IEC 的安全界限 在当今的国际化时代, 对触电电流的安全界限因在各国家而不同来说是很不合适的。例如, 家用电器是日本国重要的输出商品, 而家用电器的触电防止对策因国家而不同是非常不方便的。

所以, 在 IEC (国际电气标准会议) 协议的结果, 决定了如图 2.19 那样的标准特性。在 IEC 特性中, 把 $I-T$ 平面分为五个领域。所谓心室颤动是由电流引起心脏的控制系统混乱而引起心脏痉挛, 一旦形成就无法得救。因而, 领域④, ⑤完全是危险范围。领域③完全可以看作是安全领域, 但是现在为了有一定的余度而把这里划入了危险领域, 把曲线 b 作为危险和安全的境界是世界趋势。



领域①无感觉；②无病理生理学的效应；③无室颤的危险；
④有室颤的危险；⑤引起室颤

图 2.19 能电电流的安全界限(IEC)

2.8 环境和危险

触电的危险性如在前节所述,是由通过人体的电流决定的。

一触电,尽管电流从外部向人体流入,如电流值小,仅有单刺激的感觉,把这个范围的电流称为**感觉电流**。

如人体通过电流的值变大,引起手足的肌肉收缩痉挛,被害者变成不能以自身的力量逃离危险,把这个范围内的电流称为**不随意电流**或**脱离界限电流**。

如人体通过电流再变大,心脏的肌肉即心肌开始颤抖的振动。把这个现象称为**心室颤动**,发生这个现象是致命的。把引起心室颤动的电流称为**心室颤动电流**。

在论述触电危险的情况,如知道人体电阻,就可把危险电流换算成为危险电压,由电压来考虑有方便的地方。

人体电阻由加在人体上的电压即所谓**接触电压**而变化,并随皮肤干、湿

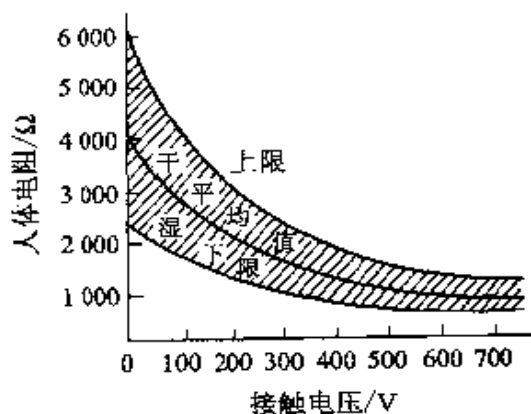


图 2.20 人体电阻和接触电压的关系
(由弗拉依培尔格提出)

的状态而变化。图 2.20 是由德国弗拉衣培尔格提出的人体电阻(通常状态)和接触电压的关系。在 50V 的接触电压下,人体电阻的下限约为 1700Ω。

如手足用水涂抹,皮肤表面的角质层的电阻变得非常小,几乎可看作人体内部电阻,人体内部电阻约为 500Ω。

这样,人体电阻因皮肤的干湿状态而大幅度变化。因而,人体表面的湿度越高,可通过人体的电流越大,并且更危险。

2.9

各种环境和电气安全

如在前节指出的那样,人体的电阻与皮肤的干湿状态有重要关系。因而,触电事故的样子因引起触电事故的环境而非常不同。

从防止触电的见解,把环境的状态分成的等级称为接触状态。由日本电气协会发表的“低压电路地络保护指针”中,把接触状态分为表 2.10 那样从第一种至第四种共四个种类,规定了各种类被容许的接触电压。

表 2.10 接触状态和容许接触电压

种 别	接触状态	容许接触电压
第一种	人体的大部分在水中的状态	2.5V 以下
第二种	人体显著沾湿的状态 人体的一部分常接触金属制电气机械装置或结构物的状态	25V 以下
第三种	在第 1、2 种以外的场合,通常如在人体加上接触电压,危险性高的状态	50V 以下
第四种	在第 1、2 种以外的场合,在通常的人体状态,如在人体加上接触电压,危险性低的状态 加上接触电压无危险的场合	不限制

第一种接触状态的电路是在浴缸、游泳池或有可能人们进出的水槽、池塘、沼泽田等地方中设施的电路。如假定在这样的环境发生触电的状态,以心室颤动电流为对象来讲,有招惹溺水死亡等 2 次灾害的危险。所以,把人体的容许通过电流考虑取不随意电流的最低值 5mA。另外,在第一种接触状态,人体皮肤表面因充分沾湿,取其电阻为 500Ω。如容许接触电压为 E

[V],由欧姆定律

$$E = 0.005[\text{A}] \times 500[\Omega] = 2.5\text{V}$$

所谓第二种接触状态是在浴缸、游泳池或有可能人们进出的水槽、池塘、沼泽田等的周边,或隧道施工现场等湿度高的场所。对人体的一部分常接触金属制的电气机械装置或结构物的状态,要考虑皮肤表面发汗的状态。对第二种接触状态来讲与第一种接触状态相同,人体电阻取 500Ω 。又,人体的容许通过电流取凯普恩的下限值 50mA (参照图 2.18)。所以,容许接触电压 E 为

$$E = 0.05[\text{A}] \times 500[\Omega] = 25\text{V}$$

第三种接触状态是在住宅、工厂、事务所等一般的场所。在这种场所中,手足的皮肤沾湿,或发汗都无危险,人体电阻可按照弗拉衣培尔格的曲线(图 2.20)来考虑。把接触电压取 50V ,在弗拉衣培尔格的曲线,人体电阻的下限是 1700Ω ,这时的人体通过电流可由欧姆定律计算

$$\text{人体通过电流} = \frac{50[\text{V}]}{1700\Omega} \approx 0.03[\text{A}] = 30\text{mA}$$

人体通过电流 30mA 等于在凯普恩曲线中有 1.67 安全系数的曲线(图 2.18 的曲线 B)的下限值。因而,在第三种接触状态,至 50V 接触电压是允许的。在一般的场所,容许接触电压至 $50 \sim 65\text{V}$ 程度在欧洲各国有多年的实绩。

以第四种接触状态为对象的电路,是人触及无危险的场所的电路,或者是在隐蔽的场所或高处施设的电路。在第四种状态,对接触电压无特别的限制,就不要说明了。

2.10 电气机器的分级

在 IEC(国际电气标准会议),把所有的电气机器从防止触电的观点出发作下面那样的分类。这个分类也被引入日本国的 JIS 中。

(1) **0 级机器** 读 Class zero 机器,如图 2.21(a)所示,所谓 0 级机器,是全体仅仅作为机能绝缘的机器。

这里,所谓机能绝缘,是维持这个机器机能必要的绝缘的意义。如无机能绝缘,电流就会向机器的外部流出,因为不是在所定的回路流过电流,机

器会失去机能。因而,在所有的电气机器机能绝缘是必要的事。

如图 2.21(b)那样,机能绝缘上因结构上的理由有必要加上金属层。而这个亦是 0 级绝缘。

(2) **0I 级机器** 如图 2.22(a)所示,所谓 0I 级机器,是全体只作为机能绝缘但从外部金属层引出地线的机器。因而,0I 级机器和 0 级机器不同,它可以把外部金属层接地。

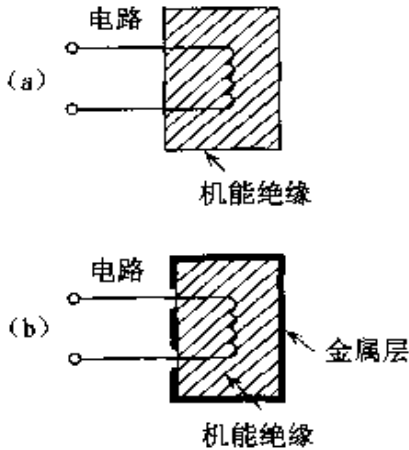


图 2.21 0 级机器

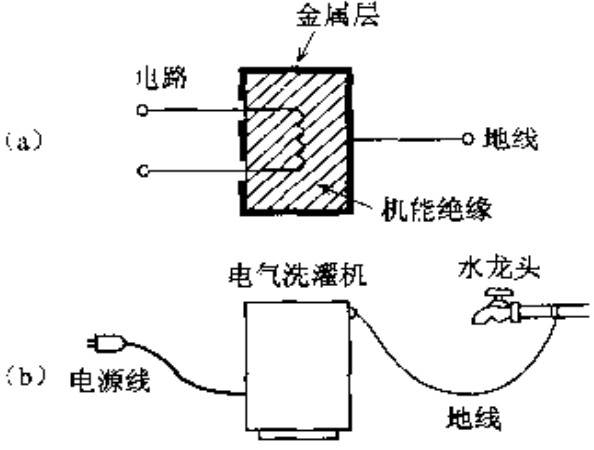


图 2.22 0I 级机器

对 0I 级机器来说,地线是与电源线分开的,即在电源插头中无接地极(地插销)必须把地线夹在例如水龙头等上面[图 2.22(b)]。

0I 级机器机能绝缘即使劣化,因外部金属层被接地,因此可防止触电事故。然而,0I 级机器的接地有二个大的弱点。

① 水管使用乙烯塑料管以来,不可再使用水管的笼头作接地。因此,在附近不能找到连接地线的接地端子。

② 因电源线与地线是分开的,地线的连接接地可能不彻底。因即使不连接地线接地,机器动作正常,就会忘掉地线与地的连接。

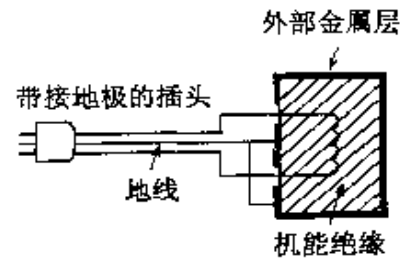


图 2.23 I 级机器

这样使用 0I 级机器,首先室内要装有接地端子,但以家用电器为例,对一般的用户不能期待有完善的接地。因而,0I 级机器防止触电的等级与 0 级机器差不多。

(3) **I 级机器** 如图 2.23 概念的表示那样,所谓 I 级机器在全体是机

能绝缘的目的,而从外部金属层拉出的地线是和电源线成为一体的。当然,I级机器的电源线可是三芯的。它的插头带有接地极(地插销)。

这个方式,消除了0I级机器的弱点。把插头插入插座的同时,就自动实施了外部金属层的接地,这是这个方式的一大特征。因而,I级机器防止触电的等级比0级机器和0I级机器要高一级。

I级机器的问题点是在插座侧即配线侧必须有准备接地的点。也就是因插头带接地极,在插座上必须有与插头对应的接地极。

(4) II级机器 I级机器防止触电是有效的,但是不一定所有的机器都能作成I级机器。在那样的场合,作为第二个方法是II级机器。回到在图2.21(b)的0级机器讲到的话。通常,电气机器因结构的理由多数持有外部金属层。那末,如0级机器机能绝缘劣化就有直接在外部金属层出现电压的危险。因此把外部金属层接地这就是I级机器。

提高安全的对策不限于接地,在金属层上面再加一层绝缘层(图2.24)也能提高安全度,即使机能绝缘劣化在金属层出现电压,人们亦可以直接触及。当然,如果这第二个绝缘层劣化亦产生危险,然而那个概率可以说是极其低的。

这个第二层绝缘,不是在机能上而是在保护上起必要的绝缘作用,被称为保护绝缘。在保护绝缘上即使再加金属层也不介意[图2.24(b)]。

所谓II级机器,这是那样持有机能绝缘和保护绝缘称作二重绝缘的机器,所以可把II级机器称作二重绝缘机器。

(5) III级机器 为了提高电气机器的安全,接地也好,二重绝缘也好,但是方法还不仅限于这些,还有第三个方法。

那就是采用超低电压。假使电气机器只有机能绝缘,即使机能绝缘降低,如电源电压很低就不会发生大的危险。

IEC把用超低压的机器称为III级机器。这里关键是那个超低电压的值,IEC把超低电压定为50V。

欧洲诸国有在50~65V接触电压防止事故的实绩。由这个实绩可知IEC采用50V的意图。

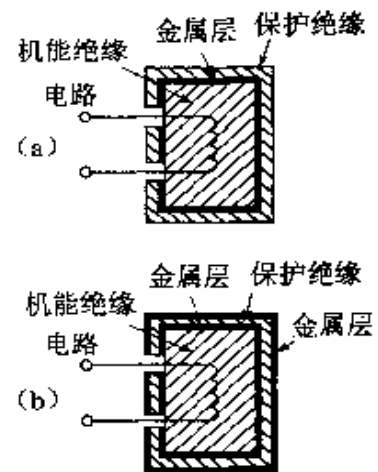


图 2.24 II级机器

2.11 二重绝缘机器

所谓二重绝缘机器,就是在前章中所述的Ⅱ级机器。电气机器为防止触电,可把机器的金属部分接地,而在所有的机器接地可能不一定做得到。另外,亦有些机器要一个个接地是有麻烦的。例如,一边移动一边使用的电动工具等,这样的机器作为防触电对策适合使用二重绝缘法。在日本,二重绝缘法的被引入这是近几年的事。作为二重绝缘法的一般基准,在JIS中被制定了“Ⅱ级电气机器绝缘结构的通则”(JIS C0702),将作部分介绍。

● 2.11.1 用语的意义(参照图 2.25)

(1) **机能绝缘** 机器本来的机能上必要的绝缘,对触电成为基础的保护物那样的绝缘。

(2) **机能绝缘部** 由机能绝缘,对充电部分绝缘的金属部。

(3) **保护绝缘** 机能绝缘被破坏时,能确实防止触电的在机能绝缘上被附加的独立的绝缘。

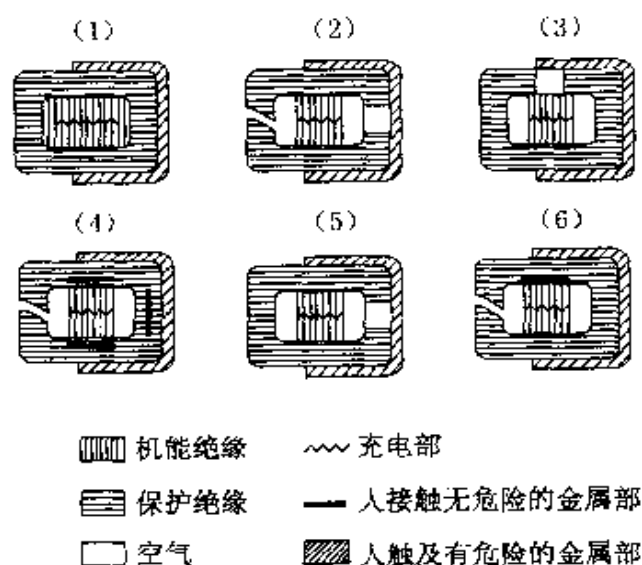


图 2.25 二重绝缘的基本结构

(4) **二重绝缘** 由机能绝缘和保护绝缘二个绝缘合成的绝缘。

(5) **强化绝缘** 当在通常能适用程度的二重绝缘还难以使用时,采用

在电气的机械的性能上为二重绝缘同等以上的强化了了的机能绝缘。

(6) II 级电气机器 全面地说因由二重绝缘或强化绝缘或者二重绝缘和强化绝缘合并使用,是不作接地的机器。

● 2.11.2 二重绝缘的基本结构

二重绝缘的基本结构可按表 2.11 中的 1 或它们的组合。一句话,二重绝缘是非常复杂的。按开口处的有无、空气的存在、人触及无危险的金属部分等如图 2.25 那样会有各种各样的种类。

表 2.11 二重绝缘的基本结构

区分	条 件	基本结构			图 2.25
		开口处	充电部和机能绝缘	机能绝缘和保护绝缘	
1	机能绝缘及保护绝缘中任一方劣化无扩展到另一方的危险,每种材料电气的机械的性质该取不同的。但是,当机能绝缘及保护绝缘能用相同材料的场合,任一方劣化应无扩展到另一方的危险,像互相隔离的东西。这个不限定	无	裸充电部在机器的内部决不露出,由机能绝缘将其完全包围着。	金属部不介在机能绝缘中间,而由保护绝缘包围着	(1)
2		有	裸充电部在部分机器的内部露出	充电部及人触及有危险的金属部不连接,金属部被埋入保护绝缘内	(2)
3		无			(3)
4		有			(4)
5	电气的故障或机械的破坏等的损伤即使在机能绝缘的内部发生,因金属部被保护,人触及无危险,但这种损伤必须无波及保护绝缘的危险	无		在机能绝缘和保护绝缘之间,无人触及有危险的金属部	(5)
6		有		在机能绝缘和保护绝缘之间设有金属部,不设置在裸充电部和保护绝缘内	(6)

● 2.11.3 II 级绝缘的表示

对 II 级机器应在容易见到的地方,用不容易消失的方法标出 II 级机的宗旨,或以回表示。

2.12 附有接地极的插座

埋设在地中的金属水管的接地电阻非常低,有效地作接地体的机能。这样,就不要再作接地极的施工,把自然发生接地体机能的東西称为**自然接地体**。相对于此,把以前提到的以接地为目的施工的接地电极等称为**人工接地体**。

可利用水管作为接地极这在电气设备技术标准中也是被认可的(第21条),但近年来,围绕水管接地发生了困难的情况。那是由水管使用**乙烯塑料管**开始的。乙烯塑料管是绝缘物。因而,如即使一部分水管使用乙烯塑料管,水管在电气上也会因此成为与地绝缘的。最近,乙烯塑料管的使用已变得相当广泛,按最近的情况正形成**乙烯塑料化**。

因这样的情况,水管作为接地体已完全不能信赖。在家庭等要利用手边接地端子时,如水管龙头在这样的情势下已不能使用,为确保电气安全必须采取别的手段。

首先考虑的是,对每个机器进行单独接地施工的方法。但是,一般公众对这个认为是不合适的。电子接收机等是很明显的例子,接地是非常不彻底的。又如高层建筑的电梯或高级公寓也有不可能作那样的接地施工的场所。



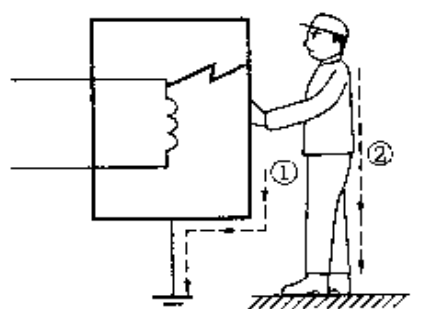
图 2.26 附带接地电极的插座

因此就考虑把接地在配电线侧准备的方向,在场院内的某一个地方进行正式的接地施工,由此至各接地插座配置接地线。当然,接地插座如图 2.26 那样成为附带接地极的插座。机器负载方面,对应于附带接地极的插座,使用 I 级机器那样,因 I 级机器有附有接地极的插头,插入附带接地

极的插座便自动的把非充电金属部分接地。这就解决了水管接地无效化的问题。

这个方法的问题是在配线侧进行接地施工时,因必须配线至各个插座,从而使费用增加。

如图 2.28 所示,因触及绝缘恶化了的电气机器的非充电部分而触电的场合,地络电流由两种成分组成。



① 漏电流 ② 人体通过电流

图 2.28 地络电流的构成

一是从非充电金属部分向大地直接流出去的电流,以下把这个称为漏电流。

二是从非充电金属部分通过人体向大地流出的电流,以下把这个称为人体通过电流。

如图 2.28 所示,因二个电流是由非充电金属部分向大地并行流出,有以下的关系:

地络电流=漏电流+人体通过电流

从来,在考虑防止触电时,把地络电流中的

人体通过电流加权,忽视了漏电流,即

地络电流 $\approx$ 人体通过电流

那样来考虑,即漏电断路器以人体通过电流使触头动作来考虑时,这个考虑方法有偏安全的意义。如果倒过来假定,如不能忽视漏电流的存在,它会由更小的人体通过电流使漏电断路器动作。

但是,电气机器绝缘降低的场合,如果外壳接地,人体接触前,有因漏电流引起漏电断路器动作的可能性。与以人体通过电流使触头动作相比,由漏电流使漏电断路器动作是合理的。因而,有漏电断路器亦要实施接地。

2.15 漏电火灾和地络保护

地络保护有以下三个目的:(1)防止触电,(2)防止漏电火灾,(3)作为电弧对地闪络对策。

在日本国低压电路的保护方面,受到近年来急剧需要增加漏电断路器的强烈影响。漏电断路器是以防止触电为目的,它的动作作得灵敏的较多。

对回路的末端是分支回路来说,以防止触电为目的的会敏锐地进行地络保护,但在馈电线和干线等上位系统进行敏锐的地络保护反而是有害的(图 2.29)。因为,到上位系统,在地络保护动作的场合,会因此使停电范围变大。

若从今日电气的使用状态来说,回路意外遮断会招惹显著的迷惑和混乱,由此引起人命有关事故时常发生。因此,上位系统把地络保护的目

转为防止漏电火灾或电弧对地闪络的对策，保护装置的灵敏度应作得较迟钝。

为了设定漏电火灾用地络保护装置的灵敏度，必须知道漏电火灾临界程度产生的地络电流的大小。这与建筑材料、施工方法、电气施工材料、配线方法等多种因素有关，是非常复杂的。

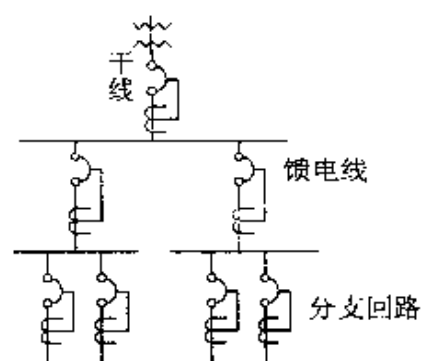


图 2.29 系统结构和地络保护

1955 年 10 月 1 日因新潟县厅的一部分起火，发生了延烧至民房又飞出火焰烧掉了 1235 栋房子的大火。这个大火的原因是由于外灯漏电因管道裂开，电流流向外壁的金属管网衬壁，所谓金属管网衬壁是木制涂灰泥的壁被用作铺金属管网衬底用的。此次火灾后，电气设备的金属部分对金属管网衬壁绝缘起来，把技术标准亦作了修改。因此这种火灾变少了。这是表示漏电火灾和建筑施工方法关系的代表性的例子。

现在，引起火灾的地络电流的最小值采用 1A，在日本国来说这样考虑是合理的。

2.16 电弧地络及其对策

地络保护第三个目的是防止由电弧地络引起电气设备的破坏。这里，所说的电气设备是指机器、配管、箱子、母线通道等。

电弧地络事故，普通作为先行的是以电弧短路事故为起端的。因此把两者总称为电弧事故。

电弧事故首先在美国成为问题。美国各都市的建筑或工厂不能忽视电弧事故的起因是出了死人的例子。这种事故在美国叫做“Burn-down”，如直译可叫做“烧光”。但是，这个场合，由可燃物燃烧使电气设备烧失，即不是一般火灾损失的意义。由电弧事故引起所谓烧光，是说因电弧事故的能量引起过度的损伤，电弧的能量是超乎想象的大，它的热量能把铜制的铝制的导体和铁板制的箱子熔化、蒸发，有机绝缘物化为气体。

作为电弧事故有名的例子是纽约一座大的公寓大楼的事故。这个事故中，电弧持续 1 小时，480/277V 配电盘完全被破坏，2 根 5000A 母线从头至

尾全熔化蒸发掉,化了几天时间才修复,而且其间约 1 万人地段的水道、照明、电梯都无法使用。在美国,几分钟至 20 分钟程度的事故有较多的报道,发生的场所有经各支线的电器设备、配电盘、母线、控制设备、电缆等。在日本国这种电弧事故还未见正式的技术报告,但实际上是有发生的。毕竟在日本国也多数是 400V 系统。

一般的短路事故,断路器直接动作,把短路回路从电源遮断分离。但是,电弧短路场合,继电器或者不动作,或因动作的时间增加,其间事故连续不断地扩大即发展为电弧地络。

今日的干线用断路器不流过 10 倍以上额定电流的短路电流时不瞬间动作(参照图 2.30)。这样就能减少不必要的遮断动作的可能性,提高电力供应的可靠性。又为了不因电动机等的起动电流引起动作,对几倍额定电流的过电流设定为在几十秒时延后动作。

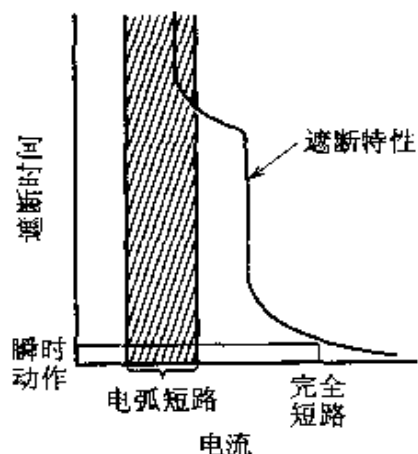


图 2.30 断路器的动作特性

如母线之间用金属挂接那样成完全短路事故会流过很大的短路电流,而电弧短路事故时因在电弧部分电流受限制不能流过像完全短路那样大的短路电流。因而,电弧短路时,如因电弧短路电流的大小,因场合情况断路器可不动作,或动作要增加很长的时间。

为了防止电弧事故受害,地络保护是最最适用的,即因为电弧短路必定是以电弧地络为发展方向,要在那个瞬间把回路遮断。具体的说,在干线装设地络继电器,由这个继电器的信号使断路器动作。

问题是这个地络保护的灵敏度应取哪样的程度。因地络保护是装设在干线部分的,不能取得那样灵敏。

在美国电气施工规程中,在有 1000A 以上电流容量的进线口,应义务装上电弧地络保护(230-95 条)。

第 3 章 应 用

3.1 接地的模拟实验法

设计接地电极时,复杂形状电极的场合,要导出计算公式是困难的。这时,采取推算接地电阻的便利的方法,有模拟实验法。

接地的模拟实验法如图 3.1 所示,是在水槽中心配置接地电极的缩尺模型进行测量的方法。

这个水槽模型实验法,早就有各种各样的研究分野,它代表性的应用分野有推定电容量和推定电位分布的称为电解槽模拟实验法。

水槽模拟实验中必要的东西有水槽,放入水槽中的媒质,模型接地电极、电源。

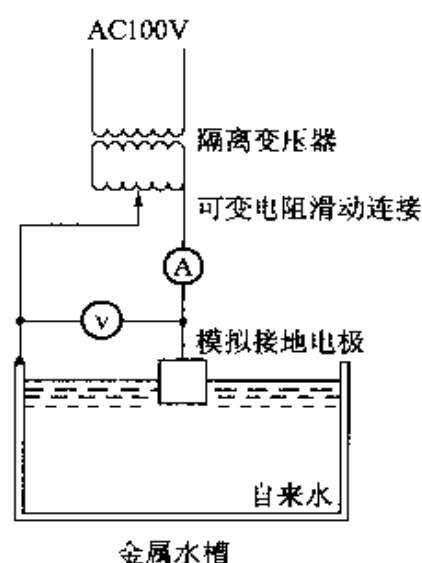


图 3.1 接地的模拟实验法

为了进行

接地的模拟实验,首先,必须作成与均质大地相似的环境。水槽模拟实验如图 3.1,以充满水的水槽模拟均质大地。

水槽如从测量精度的观点来看,则希望它大一点,水槽不必一定是用金属制造。然而,在接地模拟实验时,归路电极是必要的。因而,在使用合成树脂那样绝缘材料制作的容器的场合,其中必须放入半球状金属制网状电极作为归路电极(图 3.2)。这点,在金属制水槽中归路电极就可利用水槽来作,而

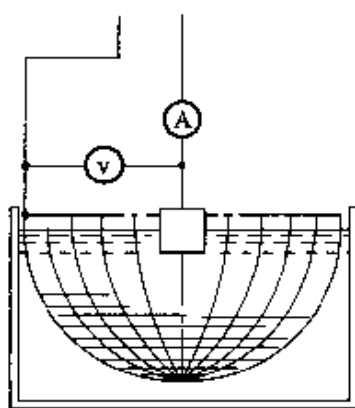


图 3.2 绝缘材料水槽的场合
(把半球状金属制网状
电极作归路电极)

把水槽的面积有效地使用会是有利的。

放入水槽中的媒质被考虑用电解质溶液,而实际上使用最方便的液体是自来水。自来水的电阻率随温度变化。为此,设置水温监测器监测温度,可按以前见过的图来推定电阻率。

作为电极材料,希望采用导电性高的材料,一般采用容易加工的铜、黄铜。这些电极在水槽中因被浸在水中,较小的模型时因水的表面张力使电极表面和水不能很好沾上,这样就会影响到测量结果,在使用之前,有必要把电极表面进行脱脂。

电源使用工频电源,为了与配电系统的接地隔开,必定把绝缘变压器接入。

所谓接地电阻是在电流流入接地电极时,把相对于无限远点的接地电极的电位升用注入电流除得到的商。

水槽模拟实验的场合,如图 3.1 所示,注入的电流的大小由电流计测量,模型接地电极的电位升由电压表测量。电压表的一个端子接在模型接地极上,另一端在金属水槽的场合接在水槽上,在绝缘材料的水槽时,接在归路电极上。

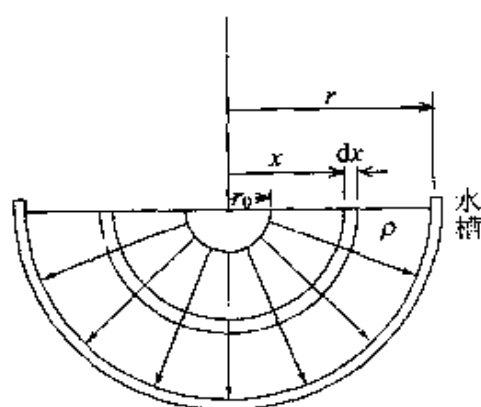


图 3.3 半球电极和半球水槽

接地电阻如严密地从理论上来说,应包含至无限远方的大地。然而,在水槽实验的场合,因要作无限大的水槽是不可能的,只能作有限大小的水槽。水槽的有限性引起误差,可按半球电极和半球水槽(图 3.3)作大概的研究。

如图 3.3 那样半球状接地电极(半径 r_0)的场合,注入电流以放射状流出,在离半球的中心距离为 r 的地方,假设有半径为 r 的半球面水槽,水的电阻率取作 ρ ,离

半球电极中心距离为 x 的地方,厚度 dx 部分的电阻为

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}$$

dR 与离电极距离 x 的二次方成反比。

离电极表面($x=r_0$)至无限远点($x \rightarrow \infty$)的 dR 积分的结果是半球电极真的接地电阻 R ,即

$$R = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left[-\frac{1}{x} \right]_{r_0}^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

使用半径为 r 的水槽作实验,因在水槽外侧的分布电阻 ΔR 被忽略,这对测量结果会引入误差。现在,把这个误差称为中途停止(中止)误差 ε [%],为把这计算,取 ΔR 与 R 之比,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \times 100 = \frac{r_0}{r} \times 100 [\%]$$

那末,误差 ε 由 r_0/r 决定。在各种 r 值时计算出的 ε 列于表 3.1, r 是以 r_0 的倍数表示。当 $r=10r_0$,即水槽的半径是模型半径的 10 倍时,误差 ε 是 10%。

当与模型比使用大的水槽,或相反,与水槽比模型作得小,误差变小。

表 3.1 水槽大小和中止误差
(r_0 :模型电极的半径)

水槽的半径 r	中止误差 ε [%]
$2r_0$	50
$5r_0$	25
$10r_0$	10
$20r_0$	5

把水槽作得过分大就过分了,相反,模型缩小也是有限的。因而,现实实验的场合,多多少少的中止误差是不能避免的。但是,接地电阻的推定精度由中止误差 ε 决定的事也不可避免,有改善推定精度的方法。

那样,在以半球电极实验的场合,因它的接地电阻的真值在理论上是不明白的,利用实验正确算出中止电阻分量 ΔR 是可能的。

这个 ΔR 由具体的实验条件(水槽的大小和形状)大致决定,几乎不受模型形状的影响。因为,由形状引起的接地电阻的变化是在电极的近傍发生,在远方的影响很少。因而,用半球之外的电极实验时,用半球时的 ΔR 对测量值有一定程度的修正。

下面讲述比例尺的换算法。如已在 1.5 节中讲过的那样,在电极的形状一定,大小作相似的变化场合,接地电阻 R 被表示如下:

$$R = k \frac{\rho}{l}$$

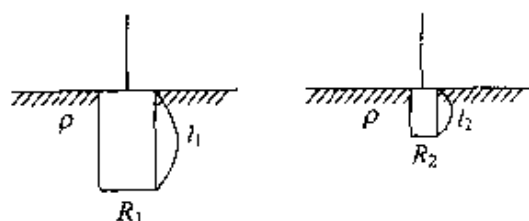


图 3.4 相似形电极(大地电阻率不变)

式中, l 是表示电极规模特征的尺寸, k 是由形状决定的系数。

如图 3.4 所示,把接地电极的形状固定起来在相似的它的尺寸取小的场合,大地电阻率取作不变时,接地电阻与接地电极尺寸成反

比例增高。即有下式的关系：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

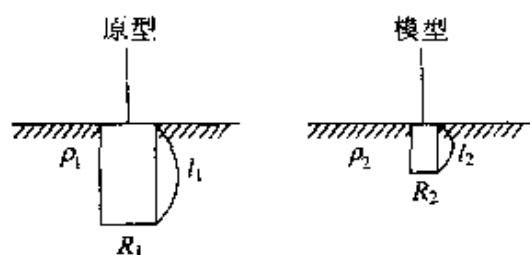


图 3.5 原型和模型

式中, R_1 代表长度为 l_1 的电极的接地电阻。 R_2 形状是相似的, 代表长度为 l_2 的电极的接地电阻。

现在, 如图 3.5 所示, 大地电阻率变化的场合变成如下那样:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

因此, 如 R_1 为原型电极的接地电阻, R_2 为模型电极的接地电阻, m 为缩尺率 ($= l_2/l_1$), ρ 为大地电阻率, ρ_m 为实验时用的煤质的电阻率,

$$R_1 = R_2 \frac{\rho}{\rho_m} m$$

由上式, 可从模型的接地电阻推定原型的接地电阻。

3.2 静电接地

因摩擦等发生的静电如在特定的部分异常地蓄积起来, 会引起各种灾害或故障, 为了把静电迅速地向大地放流就要接地。

最近, 化学纤维和塑料等容易产生静电的材料正在我们身边增加。另外, 内藏集成电路(IC)的电脑那样容易由静电引起损伤的装置也在我们周围多起来。

在图 3.6 中, 列出了由静电发生的灾害、故障的分类。

由静电引起灾害、故障的原因多数是由于对导体(金属)没有准备接地设备或对接地设备缺少管理。静电接地的对象是有静电发生或由静电感应产生带电的导体成为静电灾害、故障的原因并有危险的场合。

图 3.7 是表示静电接地的概念图。首先, 静电蓄积——即要有有“带电”可能性的导体(金属)。这个导体是对大地绝缘的导体。由于那个导体与大地间有静电电容, 即形成电容器。那末, 所谓带电即意味这个电容器充电。

这里说的对大地绝缘的导体, 是指和大地之间的绝缘电阻是所谓无限

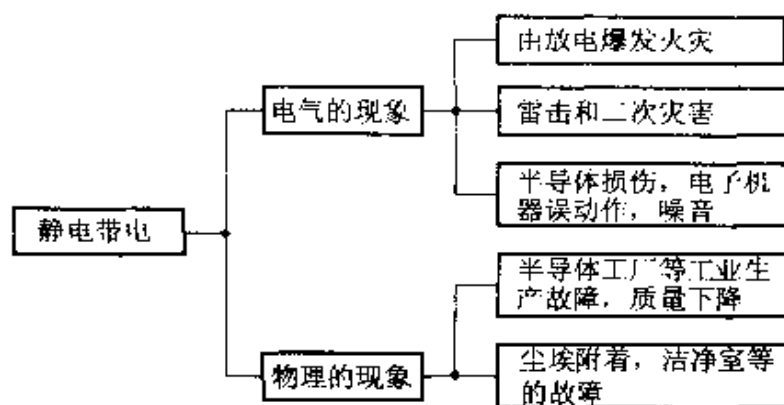


图 3.6 由静电现象产生的灾害、故障

大的理想的状态,实际上多数是有一定的泄漏电阻的,那样,通常是形成有漏电的不完善的电容器。

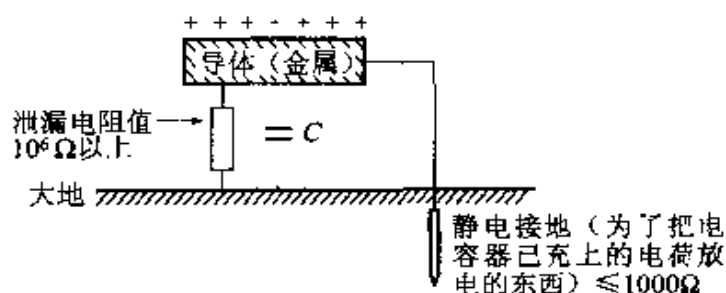


图 3.7 静电接地的概念图

所以,导体是否成为静电接地对象必须要有判断的基准。现行的规程中,以 $10^6\Omega$ 以上的泄漏电阻值(以 20cm^2 以下的电极接触导体测量)表示导体必须要有静电接地,而且它的接地电阻取 1000Ω 以下。

通常下面表示的导体可再作为防止带电的接地。

① 在所有避雷用、地络保护用、计算机用等为其它目的实施的接地的金属物体及和这些由熔接、螺栓等在机械上电气上半固接触的金属物体,它的泄漏电阻无论怎样的场合也在 1000Ω 以下的。

② 在地中埋设的金属结构物、金属安装管道,建筑物的钢骨、钢筋等及和这些由熔接、螺栓等在机械上电气上牢固接触的金属物体,其泄漏电阻在无论怎样的场合也在 1000Ω 以下的。

3.3 大地参数的推定法

石油和矿石或水等地下资源的开发、进行水坝或隧道等土木施工的场所,事前有必要知道那个土地的地下部分地质方面有关的情报。作为调查地质的方法,一般是用钻探法,但大的贷款费用也是件大事。因土地钻探深度也是有界限的。要潜入土中来说,即使用上现代技术,也不是容易的。

所以考虑出在地表来取得地球内部情报的方法。近年因电子仪器的发展、进步,在地表进行所谓电气探查变得兴旺起来。

电气探查是利用地球内部土或岩石的电气的性质,利用自然电位或人工加上电场,在地表测量与这个相伴的诸量,从那些数据来推定地球内部的结构或状态的方法。物理探查是利用弹性波、音波的方法,用得最多的地方是油田探矿。

规模小一点的,即使设计的部门,也有要知道地球内部情报的场合。这个土地分多少层地层,那些层的大地电阻率是多少 $\Omega \cdot \text{cm}$ 就是情报。

推定大地参数(在水平多层结构称呼为大地地层的厚度及它的电阻率)的方法有接地电阻逆算法、电气检层法、 ρa 曲线法等。接地电阻逆算法或电气检层法,实际上是把大地破坏取得的数据,但 ρa 曲线法是从在地表面推定大地参数,是所谓非破坏的方法,是为知道至地中深的地方的情报的最简单的方法。

● 3.3.1 接地电阻逆算法

有图 3.8 那样二个方法。一个如同图(a)那样,例如是把市场上买来的接地棒打入地中,由它的接地电阻逆算大地电阻率的所谓直接的方法。另一个如同图(b)所示,把棒状电极(大规模的场合为钻探电极)打入大地至要知道的地层,测定一定长度(l)时的电阻(R),作成 $R-l$ 曲线,这是多层问题由模拟推定的间接的方法。

(1) 直接的方法 正如 JIS A4201(建筑物等的避雷设备)所述,推定 ρ 最最容易的方法有下面的求法。

把直径为 d 的接地棒打入地中的长度至 l ,测定接地电阻,可由以下 R 的逆算式来求 ρ 。

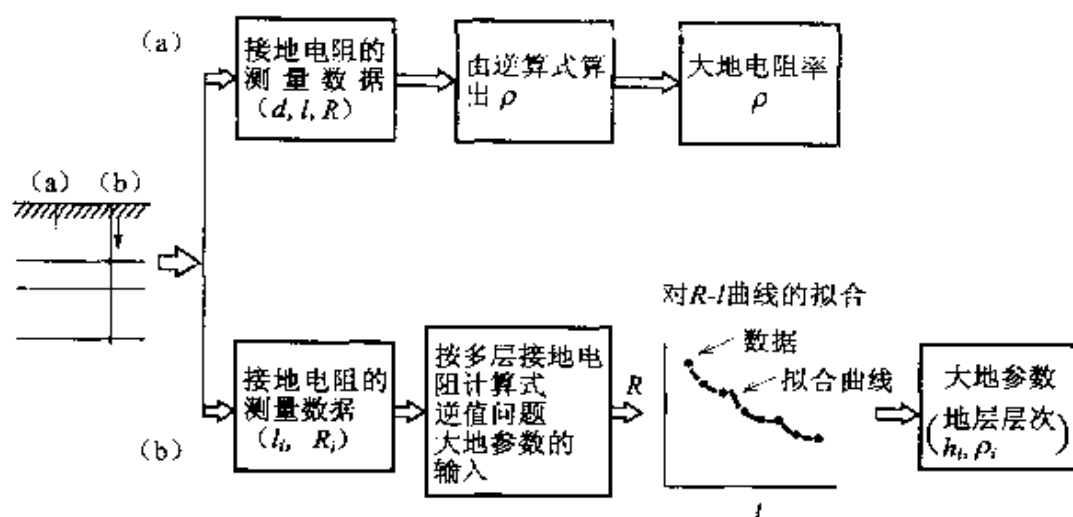


图 3.8 接地电阻逆算法

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)}$$

(2) 间接的方法 如由适用于多层大地的计算公式计算棒状电极的接地电阻,大地参数可由 $R-l$ 曲线变化的样子来明确。例如,大地分为五层结构的场合,由表 3.2 所示那样的大地参数计算的接地电阻成图 3.9 那样。

表 3.2 五层大地的大地参数

地 层	地层的厚度 /m	大地电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$					
		A	B	C	D	E	F
第 1 层	5	10	100	10	1000	500	500
第 2 层	10	100	10	50	500	50	50
第 3 层	20	10	100	100	100	100	1000
第 4 层	40	100	10	500	50	10	100
第 5 层		10	100	1000	10	100	10

大地参数之中,固定地层的厚度作成各层的 ρ 作变化的场合的 $R-l$ 曲线如图 3.9。

从图中的曲线 E、B 看出,因第五层次的 ρ 比第四层高,接地电阻降低的比率小,E 有若干高出,而这是受上层部分 ρ 较高的影响。曲线 C 是下层 ρ 高的场合,因而接地电阻几乎不减少。与那个相反,曲线 D 是下层 ρ 低的

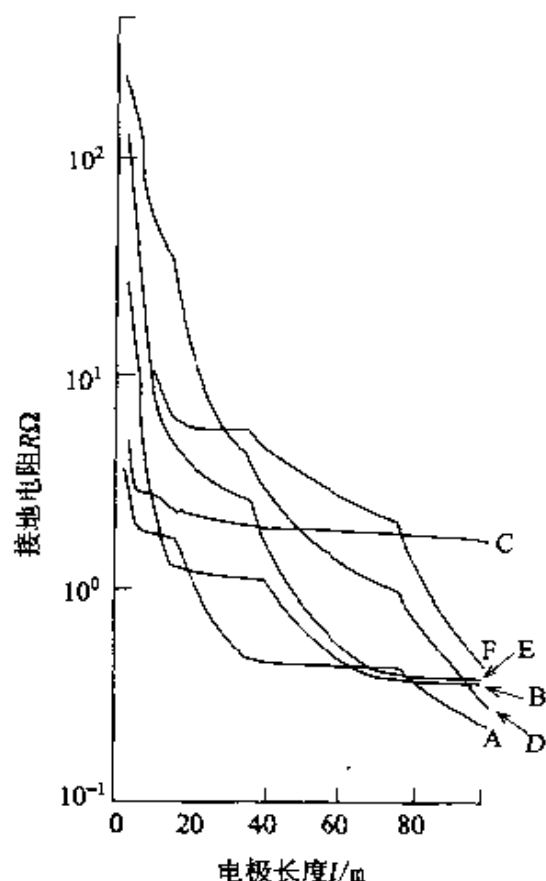


图 3.9 在五层大地的接地电阻

场合,接地电阻呈急剧减少的趋向。关于曲线 E、F,因为至第二层的大地参数是相同的, $R-l$ 曲线的样子亦相似,而从第三层起因 ρ 的大小不同,曲线的样子便有大的变化。

总之,可由大地参数得出 $R-l$ 曲线变化的样子已如所说,作为逆算问题可以实测得到的 $R-l$ 曲线为基础,以此进行多层问题的模拟使推定大地参数成为可能。

● 3.3.2 电气检层法

电气检层是在地质调查时必定要进行的项目,如把它的调查结果用于接地电阻的预测计算是方便的。电气检层法有诺莫尔法,拉泰拉尔法等各种方法。对于 Wenner 的四电极法是在地上的水平方向实施的,作为电气检层法的原则如图 3.10 所示是以垂直方向实行的。对这时的大地电阻率如能充分领会,可得出精细的大地的情报。那个检层用探头的大小因测量间隔而变。如每隔 1m 进行测量,把各测量数据可当作地层 1m 厚度的大地电阻率。这样,各层次的大地电阻率就可直接得出。

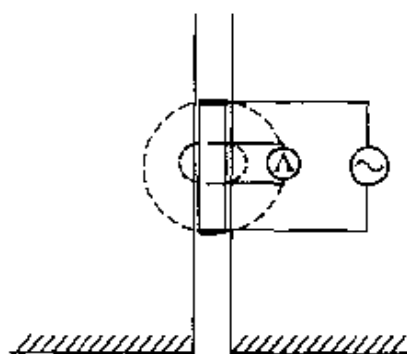


图 3.10 电气检层法的原理

● 3.3.3 ρa 曲线

ρa 曲线法如在 1.28 节介绍的那样,由 Wenner 四电极法得到的 ρ (大地电阻率)的值和 a (电极间隔)的关系表示在图中,把多个标准曲线及辅取曲线作对照,可推定大地参数。解释 ρa 曲线的方法有 Sundberg, Tagg 等的标准曲线对照法等。

最近的方法是假定把大地分为水平二层结构,三层以上的场合可归算到二层结构解释。这些对照必须要有经验。又,因不能实现对三层以上结构作成标准曲线,对三层以上的地层的解释可以说有很多困难。采用 Wenner 四电极法得出的 ρa 曲线进行大地参数的推定方法是简便的,它的有用性从来就被认可。但是,不能对应于三层以上多层大地。最近,看到利用电脑,对水平多层结构大地用 Wenner 的四电极法计算大地电阻率,作成多层大地的 ρa 曲线便成为可能。这样就可掌握各种各样大地参数的 ρa 曲线的特征。正在确立推定大地参数应用的方法。

3.4 电脑的接地

最近,在国内外,关于电脑接地的问题更加被受到注意,这可考虑有那样三个背景。

① 大小各式各样的局域网(LAN)被建设起来。LAN 是由多个电脑相互被结成数据回线的结果,所谓电脑网络的接地就成为新的问题。

② 电磁环境的恶化加速。“噪音污染”(noise pollution)问题已非常突出,天空中高频噪音飞来飞去,线路上高频噪音来来去去。为了保护电脑不受这些噪音的影响,迫切期待接地。

③ 现在的微处理器的动作电压降低为 5~12V,使用的时钟控制频率在个人电脑(PC 机)取 1~7MHz。中位机种电脑是取 10~30MHz。为了提高处理速度,动作电压会更加降低,时钟控制频率有变得更高的趋向,所以电脑受噪音的影响成为敏锐的问题。

尽管以上那样的形势,关于电脑接地却仍没有很快找到保护系列。其理由亦可由上述中推敲,电脑接地与 EMC(电磁环境问题)和 EMI(电磁感应干扰)有密切的关系,因为问题是非常复杂的。

关于电脑接地的议论屡次发生混乱,有关电脑接地的种类较多,以各自不同的目的有着十分不一样的认识。有关电脑设备接地有如下几种:

电源的系统接地(二种接地)

机器接地(箱、地线、通常三种接地)

信号基准用接地

线路过滤器用接地

过电压吸收器的接地

避雷器的接地

屏蔽的接地

在这些接地中,用在电脑方面有特征的,并且最最重要的是**信号基准用接地**,信号基准用接地是为供给电脑各机组信号的作基准电位(所谓**零电位**)的接地。那个电位一浮动,各机组基准电位就产生差异。电脑系统的动作就一步步改变。因而,基准用接地必须最慎重的办。以下,叙述关于信号基准用接地原则的内容。

(1) **独立接地** 信号基准用接地原则上不和其它种类的接地共用。说到理由那是为了不受到其它接地电位变动的影响。但是,如作独立接地,接地施工数增加,而且因必须得到独立的十分低的接地电阻,价格就高。另外,后述的结构体介入的合用的间接的共用一点接地除外。

(2) **与建筑结构体以最短距离连接** 作为信号基准用接地最最重要的是**电位的安全性**。理想的要做到不管什么时候怎么样时,至数十兆以上频率带域,接地系统到处电位仍是一定的。因此,在钢筋造、钢筋水泥造的建筑物,考虑到结构体接地的标准,把信号基准用接地取离最短距离的结构体。那时,要充分考虑相互连络的接地线不从空中的电磁波收到噪音,所以要取最短距离。

(3) **从一点接地转向金属网地板** 信号间连接的有多个电脑机组的场合,把供给各机组信号基准用接地线集中到一点后往下接地的一点接地是**历来被推荐的**(图 3.11)。最近在计算机室地面敷设金属网,由金属网向各机组供给基准电位的方式(图 3.12)登场了,费用有所增加,但这是合理的。另外,把金属网与建筑结构体也连接起来是有效果的。

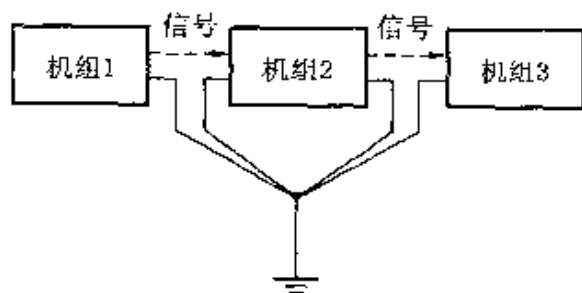


图 3.11 一点接地

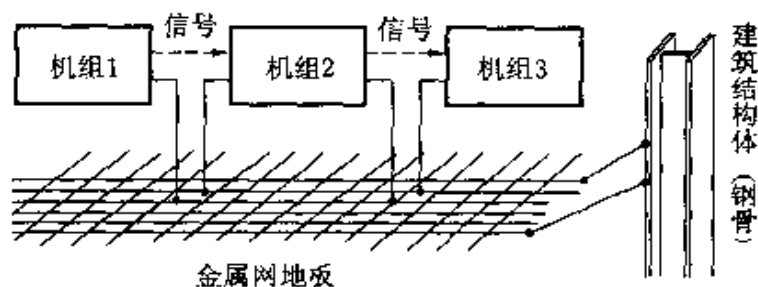


图 3.12 金属网地板

3.5 接地的材料

(1) **棒状电极** 一般的是用铜棒、涂铜钢棒,它的尺寸在单独使用的场合是直径 14mm,长度 1.5m。连接式的场合,把这个串联连接。涂铜的厚度是 0.5mm,1.0mm,应尽可能用厚的。特殊的有涂覆不锈钢钢棒(直径 14mm,长度 1.5m)涂炭钢棒(直径 16mm,长度 0.5m)。

(2) **钻孔电极** 钻孔,垂直的把电极埋设起来。考虑可施工性有把线状电极或细带状电极多根束起来埋设的施工方法。这个施工方法必须设计连接部分,这对有可能连续埋设几百米是便利的。但是,原则上钻孔电极应采用铜管。这个场合,管子连接部分的处理方法有焊接、螺栓连接,以保持必要的机械的强度。铜管的尺寸直径为 38~66mm,长度为 5m 左右,把这个串联连接起来使用。

(3) **线状电极** 有把线状电极就那样成为接地电极形态用作埋设地线(柱形)。另外,有布置成网状接地。相应于这些形态,故障对地闪络电流的电流分布是不同的,电流容量是由线状电极布设的形状决定的。一般情况,

接地线用的材料使用 JIS 规格产品。它的尺寸按电极规模用 60mm^2 , 100mm^2 的铜线。

(4) **板状电极** 一般是用铜制正方形板,它的尺寸是 $90\text{cm} \times 90\text{cm}$, $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ 。板的厚度有 1.5mm , 2.0mm 。因与其它电极相比板的表面积大,特别是在水平埋设的场合,能与土壤可靠紧密的捣实,而如果电极表面存在空气层就容易被腐蚀。

(5) **带状电极** 余下非一般的是在布设成环形接地形态的场合,从接地电阻及雷电冲击电阻的观点,采用带状电极比线状电极有效。材料采用 JIS 规格的铜条尺寸为厚度 1.4mm , 宽度 20mm , 30mm 。因材料成卷盘状可使用任意的长度。

3.6 接地阻抗

讨论到此,所谓接地电阻,那是在直流下的电阻。但是,实际上在接地回路流过的电流不限于直流。例如,把有代表性的接地电流雷放电电流作频谱分析,它有从直流至高频的宽广的成分。

因而,为了现实的理解接地现象,仅有对应于直流的接地电阻的知识是不足的,具有对于交流接地电阻——如较正确的应表示为“接地阻抗”的知识是必要的。但是,在国内外有关接地阻抗的文献极少。文献少的原因,是因为有关接地阻抗的理论及测量都是非常难的。关于接地阻抗的复杂性在下面叙述。

● 3.6.1 接地现象是连续媒质问题

为了讨论接地现象,如图 3.13 所示,必须把大地包含在回路之中。在

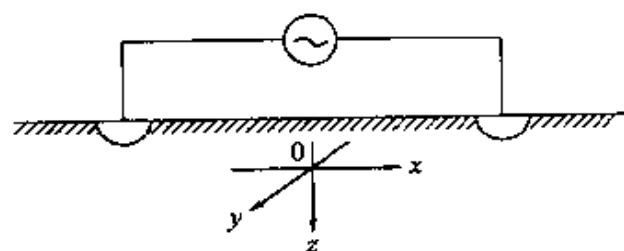


图 3.13 接地回路

图 3.13 的回路中,有特征的是地中部分,是由三维扩展的连续媒质形成的。连续媒质的场合,即使最简单的直流,必须考虑电流三维的分布。

那样,如频率变高,电流三维分布受到影响而变化。电路的地

上部分在频率不太高时可作集中参数电路来办,但地中部分来说就必须作为三维分布参数电路来办。

集中参数电路能用电路理论处理,但连续媒质中的电磁现象不可作为均等的。而且,在低频阶段,可把地上部分和地下部分分离开来办,而如变为更加高的频率,变得不能把地上和地下分离,变成必须求全体的解。总的来看,在连续媒质中接地现象在高频时的处理是非常困难的。

● 3.6.2 电磁场向地中的渗透深度

为了理解图 3.13 那样的接地电路高频电流时的举动,以大地中产生趋肤效应来考虑是容易明白的。

对直流来说不发生趋肤效应,而对交流发生趋肤效应,电流有向地表面集中的倾向。如换句话说,交流电流向地中渗透的深度可说是有限制的。

交流电流的渗透深度的大概值 l 以下式给出:

$$l \approx \frac{1}{\sqrt{\omega \sigma \mu}} [\text{m}]$$

式中, l 是大部分电流流过的深度。 $\omega = 2\pi f$, f 是频率 [Hz]。 σ 是大地的电导率,大地电阻率的倒数。 μ 是大地的导磁率。

ρ [Ω·m] 为大地电阻率,大地导磁率取真空的导磁率 $\mu_0 (=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]), 把上式整理为

$$l \approx 356 \times \sqrt{\frac{\rho}{f}} [\text{m}]$$

在表 3.3 中,表示按上式计算出的渗透率的深度。如大地电阻率变低或频率变高,交流电流向地中的渗透变浅。

表 3.3 交流电流向地中渗透的深度 l/m

频率 f 大地电阻率 ρ	50Hz	1kHz	1MHz	1GHz
1000Ω·m	1600m	356m	11.2m	0.36m
100Ω·m	500m	112m	3.56m	0.11m
10Ω·m	160m	35.6m	1.12m	0.036m
1Ω·m	50m	11.2m	0.36m	0.011m

在工频频率,大地归路电流的深度在日本国各地实测的结果示于表 3.4。各地域大地电阻率是不清楚的,而规程中的与表 3.3 中 50Hz 时的计算值很好一致。

表 3.4 在地中归路电流的深度(工频)

地 域	深 度/m
由火成岩构成的第三纪以前的山岳地带	900
由火成岩构成的第三纪的山地	600
新的地层的平地	300

(出处)电气学会编,送电工学(改订版),p100

从表 3.3 可看出,如电源频率为 MHz 带域以上,交流电流向地中的渗透为几米以下,因接地电极的长度亦最大限度是几米,两者是相同程度的。可以说,如电源频率在 MHz 带域以上,接地电阻受趋肤效应的影响开始显著,显示比直流时的电阻要高。

● 3.6.3 位移电流的发生

如频率变高,趋肤效应就更加严重,接地阻抗变高一方已如前述,不再多说。趋肤效应不能仅用准正常电磁场来考虑,而现实中如频率变高,就开始有位移电流流过。因位移电流由电源两端经过周围的空间流动的,这个频率带域,对接地电极的接地电阻现象方面就几乎不具有影响力。