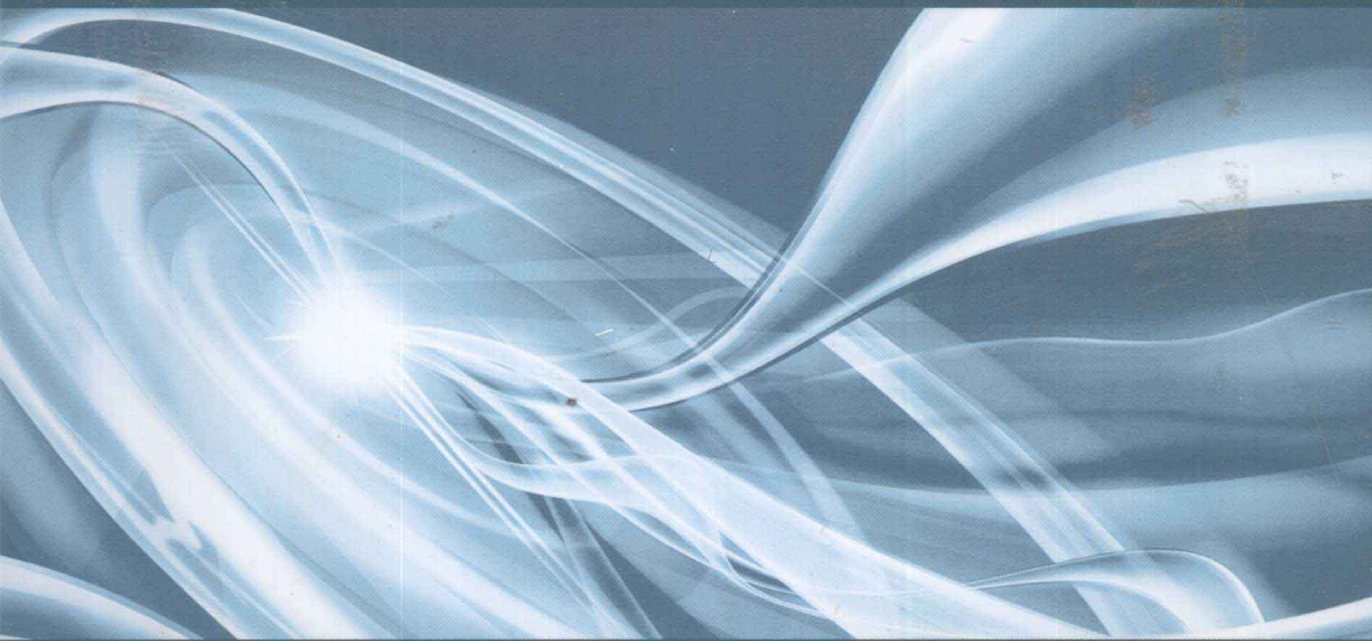




普通高等教育“十二五”规划教材



Grounding technology in power systems

# 电力系统接地技术

杜松怀 主 编

张筱慧 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

Grounding technology in power systems

# 电力系统接地技术

主 编 杜松怀  
副主编 张筱慧  
编 写 王淑平 刘庆时  
主 审 李澍森



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书共分10章，主要内容包括触电危害与安全电压，电气设备接地、接零和触电防护，大地和水的电阻率，接地装置工频接地电阻计算，冲击接地电阻计算，接地装置设计要求，接地装置设计、安装与维护，建筑物及电力运行控制设施防雷保护接地，接地装置特性参数和土壤电阻率测量。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业本科高年级学生和研究生的教材，也可供工程技术人员或电力研究人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统接地技术 / 杜松怀主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1768-0

I. ①电… II. ①杜… III. ①电力系统—接地保护装置—高等学校—教材 IV. ①TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 105511 号

中国电力出版社出版、发行

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

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 12.625印张 306千字  
定价 21.50元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

接地工程设计的优劣，对人身和电气设备的安全有着重要的影响。如果接地措施不当，将会导致事故甚至是重大事故的发生。近年来，由于接地装置设计不合理、运行方式和维护不当，甚至缺少接地防护等原因而导致的人身伤亡、电气火灾、剩余电流动作保护装置无法投运等现象频繁发生，带来了巨大经济损失，也给广大人民群众的生命和财产安全造成巨大威胁。因此，无论是专业的电力工作者还是普通的电力用户，掌握接地技术方面的知识都是十分必要的。

本书是在《接地技术》（杜松怀，中国农业出版社，1995年）的基础上，按照最新国家标准、规程和规范修订、补充而成。本书的编写突出了实用性，强调理论紧密联系实际，力求使读者在掌握接地技术基本理论的同时，能够独立分析和解决接地的设计、计算及测量等问题。

本书由中国农业大学杜松怀教授主编，张筱慧副教授担任副主编。北京市电力公司刘庆时、王淑平高级工程师参加编写，国网电力科学研究院李澍森教授级高级工程师担任主审，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，谨请批评指正。

编 者

2011年5月

## 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 接地基本概念.....	1
第二节 电力系统中性点接地方式.....	4
第三节 接地分类.....	5
<b>第二章 触电危害与安全电压</b> .....	7
第一节 电击生理现象及人体电阻.....	7
第二节 安全电压.....	17
第三节 人体触电原因及防止触电措施.....	21
第四节 触电急救.....	24
<b>第三章 电气设备接地、接零和触电防护</b> .....	29
第一节 低压配电系统接地方式.....	29
第二节 电气设备保护接地.....	30
第三节 低压电气设备保护接零.....	34
第四节 等电位连接.....	38
第五节 剩余电流动作保护装置.....	39
<b>第四章 大地和水的电阻率</b> .....	59
第一节 大地电阻率.....	59
第二节 水电阻率.....	62
<b>第五章 接地装置工频接地电阻计算</b> .....	65
第一节 单个接地极的接地电阻.....	65
第二节 组合接地极的接地电阻.....	69
第三节 自然接地极的接地电阻.....	75
第四节 土壤电阻率取值.....	79
第五节 土壤电阻率不均匀时人工接地极接地电阻计算.....	80
<b>第六章 冲击接地电阻计算</b> .....	87
第一节 冲击接地基本概念.....	87
第二节 集中接地极冲击接地电阻计算.....	88
第三节 伸长接地极和接地网冲击接地阻抗效应.....	92
第四节 冲击电位分布及其防护.....	93
<b>第七章 接地装置设计要求</b> .....	95
第一节 接地电阻允许值.....	95
第二节 均衡电位接地.....	98

第三节	网状接地装置均压和分流计算	100
第四节	接地导体选择与热稳定校验	108
<b>第八章</b>	<b>接地装置设计、安装与维护</b>	<b>114</b>
第一节	发电厂、变电站接地网设计	114
第二节	小型接地装置设计	116
第三节	高压直流系统接地装置	120
第四节	人工降低接地电阻措施	127
第五节	接地装置防腐蚀措施	133
第六节	接地装置的安装、施工与维护	136
<b>第九章</b>	<b>建筑物及电力运行控制设施防雷保护接地</b>	<b>151</b>
第一节	高层建筑物防雷保护接地	151
第二节	微波通信站防雷保护接地	159
第三节	计算机系统防雷保护接地	164
第四节	调度自动化设备防雷保护接地	168
第五节	电力系统微机控制设备屏蔽接地	171
<b>第十章</b>	<b>接地装置特性参数和土壤电阻率测量</b>	<b>173</b>
第一节	接地电阻测量方法	173
第二节	大型接地网接地阻抗测量	181
第三节	地表电位分布、接触电位差和跨步电位差测量	185
第四节	接地装置电气完整性测试	188
第五节	土壤电阻率测量	189
<b>参考文献</b>		<b>195</b>



## 第一章 绪 论

在电力系统中，由于正常运行、防雷的需要和为了保障人身、设备的安全，将电力系统及其电气设备的某些部分与埋入大地中的金属导体相连接，这就是接地。接地技术就是研究接地的原理、方法及其实施，如何避免和减轻人身伤亡事故，保证人身和设备安全而发展起来的科学技术，它对电力系统的安全运行有着重要的影响。近年来，发生过许多由于接地不良或接地措施不当而引起的重大事故，因而接地问题受到人们的普遍重视。

本书系统地阐述了接地的基本概念，人体触电的原因、危害和触电急救，高低压电力设备的接地与接零，发电厂、变电站的均衡电位接地和防雷接地，接地电阻和土壤电阻率的测量等，介绍了接地的工程设计方法并配有设计和计算示例。

### 第一节 接地基本概念

#### 一、接地极、接地线和接地装置

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

电力设备或杆塔的接地螺栓与接地极或中性线（由电力变压器接地中性点引出的线）连接用的金属导体，称为接地线。

接地极和接地线的总和，称为接地装置。

#### 二、电气上的“地”、地中扩散电流及对地电压

##### 1. 电气上的“地”

通常，人们取大地（地球）的电位为零，作为其他带电体电位高低的参考点。实际上，当电流经接地极流入大地时，接地极对地有电压。按照零电位点的定义，在距离接地极或接地短路点无穷远处电位才为零，那里才是理论上的电气“地”。然而，在距离接地极或接地短路点足够远的地方（例如，当接地极面积不大时，有 20m 左右的距离），电位已趋近于零。工程上将电位趋于零的地方叫做电气上的“地”，如图 1-1 所示。

##### 2. 地中扩散电流

经接地装置流入大地的电流称为地中扩散电流，也称入地电流。当这个电流为工频电流时，称为工频扩散电流（以后如不特别说明，均指工频电流）；当这个电流为冲击电流时，称为冲击扩散电流。

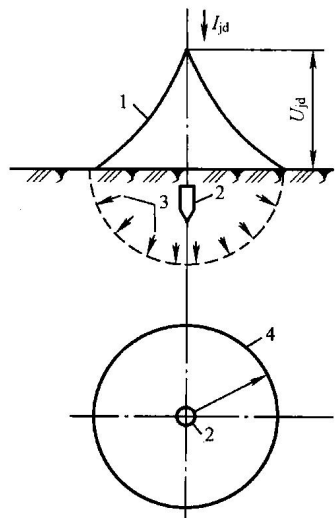


图 1-1 电气上的“地”和对地电压

1—对地电压曲线；2—接地极；  
3—散流电场；4—零位面

根据电磁场原理，当导电介质中存在恒定的电场时，由于介质的导电性，将在导电介质中形成一恒定的电流场，通常用电流密度矢量  $\delta$  来描述。电场中某点电流密度矢量  $\delta$  的大小规定为：通过垂直于该点正电荷运动方向的微小面元的电流与该微小面元面积之比，当面元面积趋于零时的极限，即

$$\delta = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS} \quad (1-1)$$

式中  $\delta$ ——电流密度矢量的大小， $A/m^2$ ；

$\Delta S$ ——垂直于正电荷运动方向的微小面元的面积， $m^2$ ；

$\Delta I$ ——通过微小面元的电流， $A$ 。

电流密度矢量的方向为该点正电荷运动方向，即该点电场强度矢量  $E$  的方向，如图 1-2 所示。

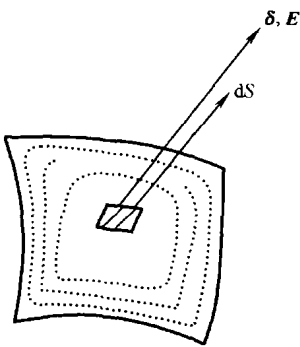


图 1-2 电流密度矢量  $\delta$  与电场强度矢量  $E$

电流密度矢量  $\delta$  与电场强度  $E$  之间的关系为

$$\delta = \gamma E \quad (1-2)$$

式中  $\gamma$ ——介质的电导率， $S/m$ ，它取决于导电介质的物理性质；

$E$ ——合成电场强度， $V/m$ 。

如果已知某一截面  $S$  上各点的电流密度，则由式 (1-1) 可求得通过该截面的电流为

$$I = \int_S \delta \cdot dS \quad (1-3)$$

此时，当电流由电导率大的介质区域流向界面时，不管其与界面的交角如何，离界面而进入电导率小的介质区域的电流密度线几乎与界面垂直，如图 1-3 所示。

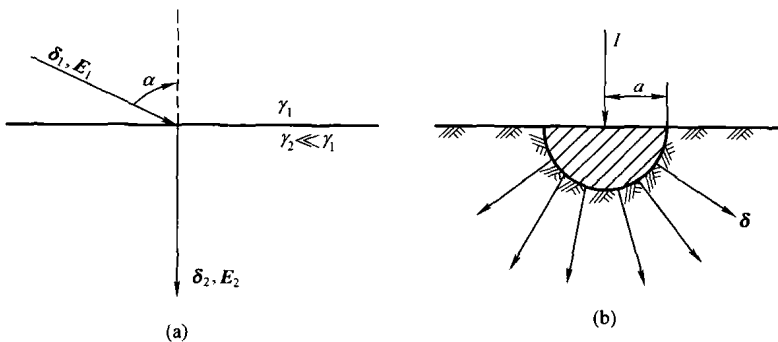


图 1-3 入地电流的扩散规律

(a) 电流由电导率大的介质流入电导率小的介质；(b) 均匀土壤中的半球形接地电极

### 3. 对地电压

电流经接地极在地中流散时，在地面上形成电位分布，出现电位梯度，且在接地极处电位最高。我们把电气设备的接地部分（如接地外壳、接地线、接地极等）与零电位的大地之间的电位差称为电气设备接地部分的对地电压。如果用曲线来表示接地极及其周围各点的对地电压，则称这种曲线为对地电压曲线。



根据理论分析, 接地极的对地电压曲线具有双曲线的特点, 如图 1-1 所示。离开接地极, 对地电压曲线逐渐变平, 即曲线的陡度逐渐减小。通常, 设备接地处的电位不超过 10V, 但当有电流通过接地极流入地中时, 设备接地处的电位可能很高。例如, 在大接地短路电流系统中, 接地电位可能达 2kV 及以上; 出现雷击时, 由于雷电流幅值很大, 有时可达数十至数百千安, 接地极的瞬时电位可达到数百千伏。

### 三、扩散电阻和接地电阻

电流自接地极的周围向大地扩散时大地呈现的电阻, 叫做接地极的扩散电阻。接地装置的接地电阻等于接地极 (或自然接地极) 和接地线的自身电阻、接地极与土壤的接触电阻、入地电流在土壤中的扩散电阻三者之和。由于接地极和接地线自身的电阻很小, 接触电阻也很小, 可以忽略不计, 因此, 一般认为扩散电阻就是接地电阻。接地电阻在数值上等于接地装置对地电压与通过接地极流入地中电流的比值。以图 1-1 为例, 接地电阻  $R_{jd}$  为

$$R_{jd} = U_{jd}/I_{jd} \quad (1-4)$$

按通过接地极流入地中的冲击电流求得的接地电阻, 称为冲击接地电阻, 用  $R_{ch}$  表示, 通常用它来衡量防雷接地的效果。按通过接地极流入地中的工频电流求得的电阻, 称为工频接地电阻。接地电阻的实际值需要在接地装置敷设完毕后通过实测才能得到。

### 四、接触电位差和跨步电位差

如前所述, 电流自接地极经周围土壤流散时, 会在接地极附近的土壤中产生压降并形成一定的地表电位分布。在地面上距设备的水平距离 1.0m 处与沿设备外壳、架构或墙壁距地面的垂直距离 1.8m 处两点间的电位差称为接触电位差, 人体接触这两点时所承受的电压称为接触电压, 如图 1-4 (a) 所示。图 1-4 (a) 中接地极的接地电位即对地电压, 用  $E_w$  表示。

地面上水平距离为 1.0m 的两点间的电位差, 称为跨步电位差。人体两脚接触该两点时所承受的电压, 称为跨步电压, 如图 1-4 (b) 所示。

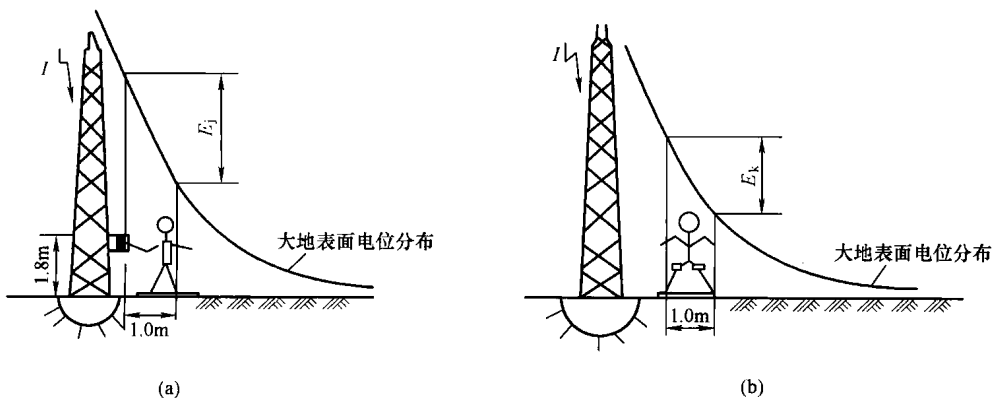


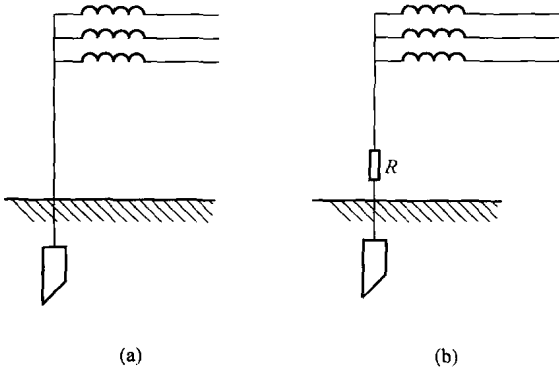
图 1-4 接地极的接触电位差和跨步电位差

(a) 接触电位差  $E_j$ ; (b) 跨步电位差  $E_k$

## 第二节 电力系统中性点接地方式

### 一、中性点有效接地

中性点有效接地包括中性点直接接地和中性点经小电阻接地两种方式，如图 1-5 所示。



(a) (b)

图 1-5 中性点有效接地系统

(a) 中性点直接接地；(b) 中性点经小电阻接地

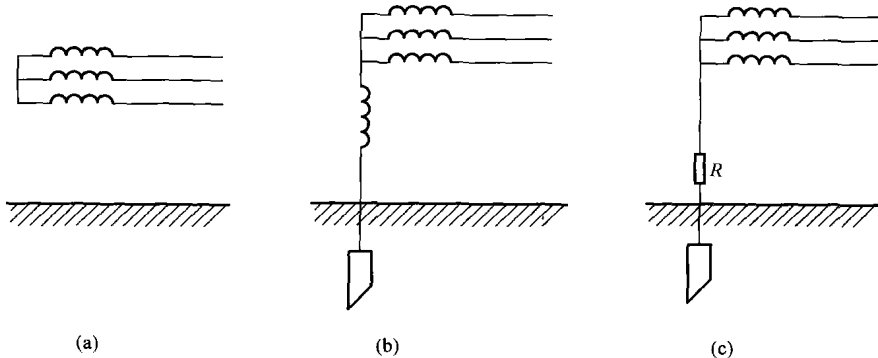
110kV 及以上的电力系统，考虑降低设备绝缘水平、简化继电保护装置，大都采用中性点直接接地的方式。380/220V 低压配电系统，为了保证用电安全，通常采用中性点直接接地的三相五线制或三相四线制供电方式。近年来，有部分中压配电网采用中性点经小电阻接地的供电方式。

110kV 及以上的电力系统采用中性点直接接地方式，作用有两个：①将单相接地故障转化为单相短路，由数值较大的短路电流启动继电保护装置动作，可靠、灵敏、迅速地将单相故障切除；②降低整个

电网和电气设备的对地绝缘水平继而降低投资。380/220V 三相五线制或三相四线制供电系统中，中性点直接接地的主要目的是保证用电安全。在这种供电方式下，一旦发生单相短路或漏电事故，较大的短路电流可以触发继电保护装置或剩余电流保护装置动作，迅速切断电源。中性点经小电阻接地时，接地电阻的阻值的确定必须综合考虑间隙性弧光接地过电压倍数、继电保护灵敏度、通信线路干扰、接触电位差和跨步电位差等因素，同时一般要将单相接地故障电流控制在 100~1000A。

### 二、中性点非有效接地

中性点非有效接地又称中性点非直接接地，包括中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点经大电阻接地三种形式，如图 1-6 所示。中性点经大电阻接地的系统，应满足  $R_0 \leq X_{C0}$  ( $R_0$  为系统等效零序电阻， $X_{C0}$  为系统每相的对地分布容抗) 的要求，以限制由于间隙性电弧接地故障产生的瞬态过电压，同时将电力系统的单相接地故障电流控制在 10A 以内。



(a) (b) (c)

图 1-6 中性点非有效接地系统

(a) 中性点不接地；(b) 中性点经消弧线圈接地；(c) 中性点经大电阻接地

我国 66、35、20、10、3~6kV 电压等级的中压配电网普遍采用中性点非有效接地方式。在这类系统中，当发生单相接地故障时，因接地电流不大，燃弧可能性较小，因此允许电网带故障继续运行一段时间（1~2h），进而显著提高供电的可靠性。

我国的高压和超高压电力系统均不采用中性点非有效接地方式。因为从经济性角度考虑，在中性点非有效接地系统中，一旦出现单相接地故障，非故障相的对地电压将上升为线电压，导致电力线路和电气设备的绝缘长时间承受较高电压，大幅增加了绝缘投资。电压等级越高，绝缘投资增幅越快，电网投资的经济性越差。

### 三、大接地短路电流系统与小接地短路电流系统

额定电压 1kV 及以上、单相接地电流或同点两相接地时入地电流大于 500A 的系统，统称为大接地短路电流系统；上述电流小于或等于 500A 的系统，统称为小接地短路电流系统。

中性点直接接地的系统，单相短路电流一般都大于 500A；中性点非有效接地的系统，单相短路电流一般都小于 500A。

## 第三节 接 地 分 类

电力设备、杆塔或过电压保护装置用接地线与接地极连接，称为接地。也可以说，接地就是把设备的某一部分通过接地装置同大地连接起来。接地可分为正常接地和非人为的故障接地两类。正常接地又有工作接地和安全接地之分。电力系统的接地网具有工作接地、保护接地和防雷接地三项功能。

工作接地是指在电力系统中运行需要的接地，它是电网系统供电回路的必要组成部分。工作接地有两种情况：①利用大地作导线的接地，在正常情况下有电流通过，如直流工作接地、弱电工作接地等；②为了维持系统安全运行而设的接地，在正常情况下只有很小的不平衡电流甚至没有电流流过，如 110kV 以上高压系统中性点的工作接地、三相四线制 380/220V 系统变压器中性点的工作接地等。

安全接地也称保护接地，主要包括防止触电或反击的保护接地、防雷接地（或称过电压保护接地）、防静电接地和屏蔽接地四种。保护接地并非电网系统供电回路的一部分，而是一种技术上的安全措施，它是把在故障情况下可能呈现危险对地电压的金属部分同大地紧密地连接起来。例如，电力设备的金属外壳、钢筋混凝土电杆和金属杆塔，由于绝缘损坏等原因有可能带电，为了防止这种电压危及人身安全而设的接地就称为保护接地。保护接地与工作接地如图 1-7 所示，图中，工作接地有电力变压器的中性点接地、电压互感器的高压侧中性点接地和避雷器接地等；保护接地有变压器外壳、电压互感器外壳、油断路器外壳和支持绝缘子支架等的接地。

过电压保护接地是指为了限制过电压危险影响而设的接地（如避雷针、避雷器和避雷线等防雷设备的接地）。在电力网中，有时也把避雷器等接地叫做工作接地（见图 1-7）。

防静电接地是指易燃油、天然气储罐和管道等，为了防止静电危险影响而设的接地。屏蔽接地一般指诸如隔离变压器、变流器等为了阻隔一、二次侧的电气联系，并保证人身和设备安全而设的接地。防静电接地和屏蔽接地本书不作详细介绍。

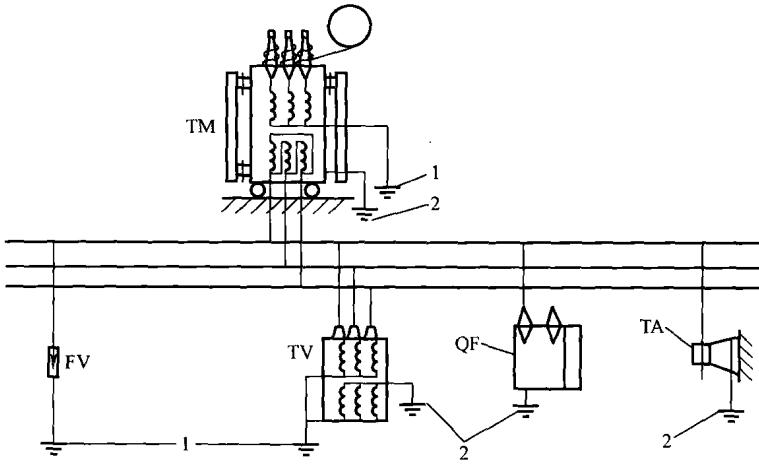


图 1-7 保护接地与工作接地

1—工作接地；2—保护接地

故障接地是指带电体与大地间的意外连接，如电气设备的碰壳短路、电力线路的接地等。

## 第二章 触电危害与安全电压

### 第一节 电击生理现象及人体电阻

人体触电可分为直接接触和间接触电两种。直接接触是指人员直接接触电气设备的正常带电导体而造成的触电。这种类型的触电，触电者受到的电击电压为电网的工作电压，危险性较大。间接触电是指因电气设备的内部绝缘故障造成的、正常情况下不带电的金属外壳等外露可导电部分带有危险电压，一旦人员触及故障设备的外露导电部分时所造成的触电。

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

#### 一、人体对电流的反应

电流的大小对人体的触电伤害起着至关重要的作用。在 220V 以下的低电压下，触电伤害主要是由电流引起的；在高电压下，触电伤害则是由电流和电压两个因素共同作用而引起的。

##### （一）感知电流

能够引起人的感觉的最小电流称为感知电流。感知电流的大小与触电电流的频率有关。以手握带电导体，给人体通某一电流值，直流情形下能感到手心轻微发热，交流情形下因神经受到刺激而感觉轻微刺痛为基准。不同的人、不同性别，感知电流的值也不同。一般成年男性的平均感知电流（工频）约为 1.1mA，成年女性则为 0.7mA，国际电工委员会认定的感知电流值为 0.5mA（与通电时间无关）。感知电流一般不会对人体造成伤害。

##### （二）反应电流

引起预料不到的不自主反应的最小电流称为反应电流。这种预料不到的电流作用，可能导致高空摔落或其他危害，因而反应电流可能会给人身带来危险。反应电流的数值一般略大于感知电流，其大小与电极类型、电流波形及接触部位有关。

##### （三）摆脱电流

人触电后，在不需要任何外来帮助的情况下能够自行摆脱带电体的最大电流称为摆脱电流。摆脱电流是一项重要指标，正常人的摆脱电流值基本上是个常数，不会受重复试验所干扰。在能摆脱带电体所需的时间内，反复经受摆脱电流，人体可忍受触电反应而无严重的不良后果。也就是说，正常人可以经受摆脱电流的作用，故常把摆脱电流称为允许安全电流。

据试验，成年男性的平均摆脱电流约为 16mA，成年女性约为 10.5mA；而对应于

0.5%概率不能摆脱的电流值为：男子 9mA，女子 6mA。就数学特性而言，存在有限的概率，即使电流为零，理论上也将使某些人“黏结”在带电导体上。可见，重要的是应该从安全的角度考虑，确定一般人的摆脱电流的最小值。

国际电工委员会认定的摆脱电流值为 10mA，目前已被世界各国所公认。我国国家标准中规定，一般条件下，交流允许安全电流取 10mA，但对井下等某些特殊场合则取 6mA。可见，规定 10mA 的允许安全电流，可能导致部分触电者（男子约 1.5%，女子约 35%）不能依靠自己摆脱电流来保证安全。例如，在某些场合下，同样触及 100V 的带电导体，由于流入人体电流大小的不同，有的人只是受到轻微电击感觉身体麻木，而有的人则会被电死或电伤。这少部分人的安全程度与通电持续时间关系很大，应当按照持续安全电流的要求配置剩余电流保护装置予以保护。

在摆脱电流范围内，工频交流电触电后成年男性的生理反应情况见表 2-1。

表 2-1 工频交流电触电后成年男性的生理反应情况

电流强度 (mA)	生理现象
0~0.9	无感觉
0.9~3.5	感到麻木但非病态现象
3.5~4.5	有些不适的麻木痛楚，轻微痉挛，反射性的手指肌肉收缩
5.0~7.0	手感到有痛楚，且表面有痉挛
8.0~10.0	全手病态痉挛、收缩，且麻痹
11~12	肌肉收缩痉挛传至肩部，强烈疼痛（触电时间不超过 30s）
13~14	手全部自己抓紧，需用力才能放开带电体（触电时间不超过 30s）
15	手全部自己抓紧，不能放开带电体

#### （四）致命电流

在较短时间内，危及生命的最小电流称为致命电流，即引起心室颤动或窒息的电流。实验证明，电流对人体的伤害程度与触电电流的频率有关。事实上，直流电流、高频电流、冲击电流对人体都有伤害，但伤害程度要比工频电流轻。以直流电流为例，最小感知电流男性约为 5.2mA，女性约为 3.5mA；平均摆脱电流男性约为 76mA，女性约为 51mA。不同频率电流触电后人体的生理反应情况见表 2-2。

表 2-2 不同频率电流触电后人体的生理反应情况

生理反应情况	流经人体的电流 (mA)		
	直流	工频	1000Hz
感知有电流	—5	—1	—10
能自主摆脱，但伴随痛苦	<60	<10	<70
不能自主摆脱，痉挛，伴随痛苦	>60~65	>10~15	>70~75
强烈痉挛，伴随强烈痛苦	—90	—25	—95



## 二、心室颤动

### (一) 心室颤动现象

电流对人体的伤害可分为电伤和电击两大类，在很多场合下，电击和电伤往往是同时发生的，只是绝大多数触电死亡是由于电击所造成的。触电死亡的原因很多，目前的说法还不统一。一种说法认为，当电流通过人的机体时，伤害了呼吸中枢，造成呼吸终止导致死亡；另一种说法认为，电流伤害了神经系统而造成死亡；再一种说法认为，电流通过人体时破坏了心脏机能，致使心脏跳动停止而死亡；也有的认为，由于电流对人的呼吸中枢和管理心脏的脑神经造成伤害，使心脏正常的生理机能遭到破坏、呼吸停止，从而导致死亡。需要指出的是，触电者如果长时间不能脱离带电体，即使流经人体的电流较小甚至没有通过要害部位，也会使触电者晕倒、失去知觉、窒息而死亡。较大的电流还会产生深度烧伤，并足以使体温迅速上升而立即死亡。有时，严重的烧伤不致造成立即死亡，但可引起其他并发症，从而延缓死亡。

许多触电事故的统计资料表明，大部分触电死亡事故，尤其是低压触电死亡事故，是由于电流通过触电者心脏出现心室颤动（也称心室纤维性颤动）造成的。可以说，心室颤动是触电保护最重要的问题之一。

生物的肌肉运动，经常伴随有电的现象存在。当电刺激通过神经纤维传导给肌肉时，肌肉就要收缩，心肌的收缩运动也不例外。心脏类似一个“泵”，通过心肌的收缩和舒张，促进全身的血液循环。心脏是由左、右心房及左、右心室组成的一个中空器官（见图 2-1），它是机体两个血液循环系统（体循环和肺循环）的中心，是血流的动力装置。

心脏上的一些特殊组织，如窦房结、室房结等，所组成的兴奋传导系统，能自动地、有节律地发生兴奋和传导兴奋。正常时，窦房结发生兴奋的能力最强，它是整个心脏的起步点（医学上称起搏点）。窦房结将兴奋沿传导系统先传入心房，引起左右心房的收缩，然后再传到心室，引起左右心室收缩。左心房收缩，将携带  $O_2$  的血液冲开房室瓣（二尖瓣）射入左心室内，接着左心室收缩，带  $O_2$  血液冲开主动脉瓣流入主动脉血管中，主动脉通过中小动脉、毛细血管流到身体的各个部位，进行  $O_2$  和  $CO_2$  的交换，然后汇合到静脉血管中（此时血管内血液携带较多的  $CO_2$ ），最后汇集到上下腔静脉流回右心房中，这一循环过程称为体循环。另外，右心房收缩，将携带  $CO_2$  的血液射入右心室，然后由右心室进入肺动脉流过肺部，在肺部进行  $CO_2$  和  $O_2$  的交换，再汇合到肺静脉中流入左心房，这一过程称为肺循环。体循环和肺循环不断地循环往复进行，使生命得以维持。如果心脏活动的起搏点受损或不在窦房结，则心脏的兴奋传导过程出现障碍，就会导致心律失常。心脏在收缩或舒张时，有微小的生物电产生，因此，在人体的各个部位在不同时刻由于血流量及血流速度的不同而形成不同的电位，任意两点（等位面上的点除外）

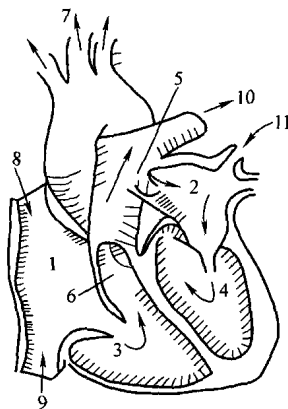


图 2-1 心脏剖面图

- 1—右心房；2—左心房；3—右心室；4—左心室；5—窦房结；6—室房结；7—主动脉；8—上腔静脉；9—下腔静脉；10—肺动脉；11—肺静脉

之间即会产生电位差。医学上的心电图（见图 2-2）就是依据这一电位差与时间的函数关系描述的波形图，可用来诊断心脏功能的好坏。图 2-2 中，平均电压为 1~1.6mV；心脏搏动周期  $T_H$  约为 0.75s，它是指从心室的第一次收缩，然后舒张，再到第二次收缩的时间，医学上也叫心率。

当人体触电以后，外来的大电流使正常的生物电信号受到破坏，心脏的搏动必然会发生变化。如果触电电流和通电时间超过某一极限值时，心脏的正常动作受到扰乱，不能再进行强烈的收缩而发生心肌振动，即所谓的心室颤动。在血液放出期内有一个相对较小的时段是易损期。在易损期内，心肌纤维处于兴奋的不均匀状态，如果受到足够幅度电流的刺激，心室纤维会发生颤动。心室颤动的结果使心脏失去正常的“泵血”功能，中断了向人体各部的输血，而且是首先中断了向心脏自身的供血，几分钟后敏感细胞因得不到养分供给开始麻痹。这种心室颤动很少能自然恢复。尽管现在可通过开胸直接对心脏按摩或用电冲击法进行治疗，但触电后如果已发生心室颤动，一般较难救活。图 2-3 示出了 X 点受电流刺激时对心电图和血压的影响曲线，此时发生心室纤维性颤动和血压降低，如电流足够大将导致死亡。

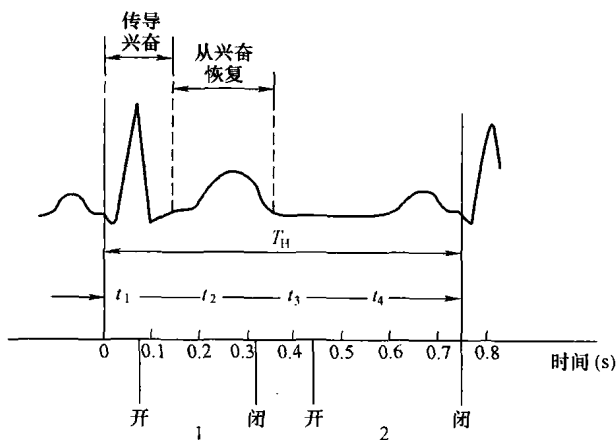


图 2-2 心电图

$t_1$ —收缩期； $t_2$ —血液放出期； $t_3$ —舒张期； $t_4$ —充满期；

1—半月瓣；2—房室瓣

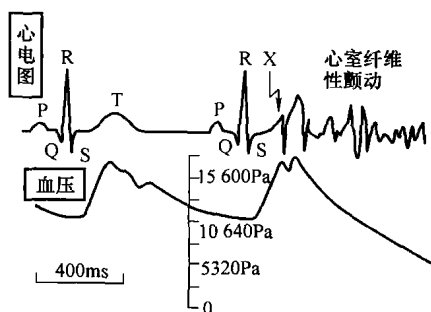


图 2-3 X 点受电流刺激时对心电图和血压的影响曲线

P—兴奋期；R—兴奋扩展期；T—兴奋复原期；

Q—扩展期开始点；S—复原期开始点；

X—电流刺激发生时刻

## (二) 心室颤动电流

触电后，引起心室颤动概率大于 0.5% 的最小电流称为心室颤动电流。确定心室颤动电流的大小不能直接用人体试验，通常是根椐动物试验得出的结果推算测得。尽管这种推算不很可靠，但至今仍被沿用。

### 1. 交流电流的电击效应及心室颤动电流

由费利斯 (L. P. Ferris) 等人在 1936 年提供的第一批对羊的电击试验数据、柯温霍文 (W. B. Kouwenhoven) 1959 年的第二批对犬的试验数据、基谢列夫 (A. P. Kiselev) 在 1963 年的第三批对犬的试验数据中发现，当电击时间比心脏搏动周期大时（羊的心脏搏动周期平均为 0.45s，犬为 0.3s），可引起心室纤维颤动的电流值急剧下降。对动物的大量试

验还表明，心室颤动电流与动物的体重及心脏质量成正比，费利斯对试验结果进行了统计，由此得出动物在通电 3s 开始发生心室颤动的触电电流平均值与体重之间的关系曲线（见图 2-4）。由此可以看出，电流对心脏的刺激作用与电流密度有关。

人体触电后，发生心室颤动的电流值同样与人的体重及电流作用于人体的时间有关。体重越重，发生心室颤动的电流值越大；电流作用的时间越长，发生心室颤动的电流值越小。图 2-5 所示为 3s 内心脏出现心室颤动的电流值与体重的关系曲线，该曲线对 99.5% 的人有效。图 2-6 所示为人体触及交流电时发生心室颤动的界限图，心室颤动电流曲线将整个坐标平面分为两个区域，曲线以上部分（阴影区）为发生心室颤动的区域，以下部分则为不发生心室颤动的区域，即该曲线为发生心室颤动的临界值。

由图 2-6 可知，当触电电流大于数百毫安时，会直接影响到心肌，此时通电时间的安全极限为 10ms，与心脏搏动周期相比，时间非常短。当电流为 50mA 至数百毫安，通电时间超过心脏搏动周期时，即会发生心室颤动。

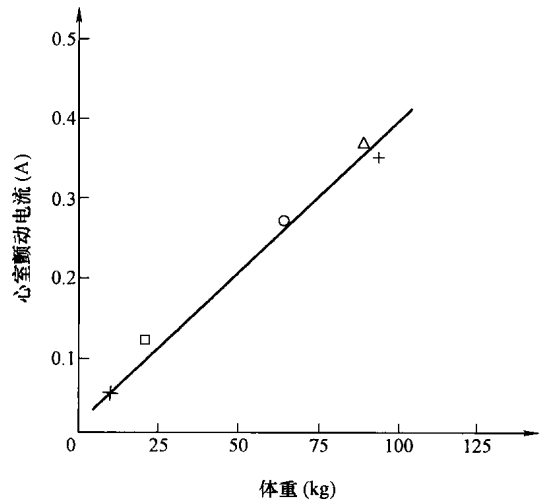


图 2-4 动物体重和心室颤动关系的试验

×兔；□犬；○羊；△小牛；+猪

注：通电时间 3s (60Hz)，通电路径为右前脚—左后脚。

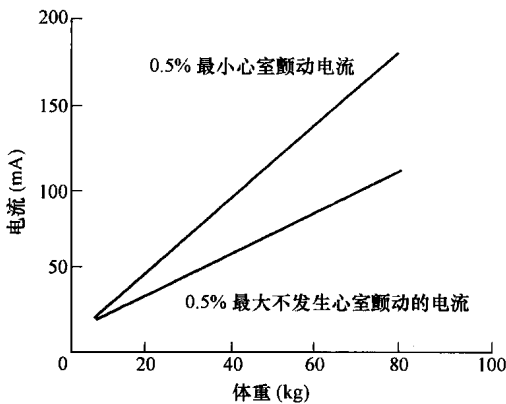


图 2-5 3s 内心脏出现心室颤动的电流值与体重的关系曲线

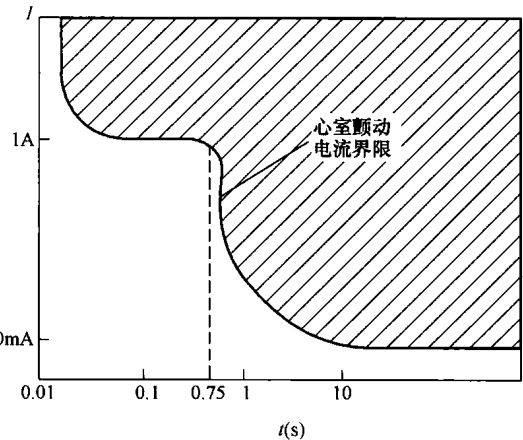


图 2-6 人体触及交流电时发生心室颤动的界限

对于 15~100Hz 的交流电流，感知电流值为 0.5mA，摆脱电流值为 10mA。当电流为 500mA、时间为 100ms 时，产生心室纤维性颤动的几率约为 14%。当流过人体的电流继续增加时，人体电流  $I_B$  与电流流过的持续时间  $t$  的关系如图 2-7 所示，该图是 1980 年国际电工委员会根据科研成果提供的电流通过人体影响曲线，按照电流从左手到双脚流过人体的效应绘制的。