

建筑电气系列教材

# 建筑电气安全技术

黄民德 郭福雁 主编

85-43  
5



天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

# 建筑电气安全技术

黄民德 郭福雁 主编

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

本书主要讨论电气事故、供配电系统和建筑物的雷击防护等电气安全问题,重点围绕建筑电气环境的安全问题进行了阐述。全书分为三章,第一章主要论述电气安全的基本知识,第二章主要论述建筑供配电系统的电气安全防护,第三章主要论述建筑物的雷击防护。

本书可作为建筑电气专业(或专业方向)和安全工程专业的教科书,也可作为相关专业教学及培训等参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

建筑电气安全技术/黄民德,郭福雁编著. —天津:天津大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-5618-2526-6

I.建... II.①黄... ②郭... III.房屋建筑设备:电气设备—安全技术 IV.TU85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 132511 号

出版发行 天津大学出版社  
出版人 杨欢  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网 址 www.tjup.com  
短信网址 发送“天大”至 916088  
印 刷 迁安万隆印刷有限责任公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 10.5  
字 数 256 千  
版 次 2007 年 8 月第 1 版  
印 次 2007 年 8 月第 1 次  
印 数 1 - 4 000  
定 价 20.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 建筑电气系列教材 编写委员会

主任:吴爱国

副主任:孟庆龙 王东林 黄民德

委员:王萍 王绍红 王东林 温海水 迟长春

苏钢 龚威 沈迺文 孟庆龙 黄民德

靖大为 郭福雁 季中 王赢 张志刚

杨国庆 崔同泰 曾永捷 孙绍国

秘书:胡林芳 陈建辉

# 前 言

人类在认识和改造自然的过程中创造了辉煌的文明,但文明的代价也是巨大的,这就是一直与这一过程相伴随的对人类自身的危害及对人类生存环境的破坏。随着近代科学技术的迅猛发展,这种负面效应更是急剧上升,其涉及面之广几乎渗透到每一个技术领域,程度之严重已威胁到人类自身的存在。这有悖于人类认识和改造自然的初衷。作为现代社会一个极为重要的技术领域,电气工程领域的情况也不例外,它所产生的负面效应也是广泛而深刻的,电气安全问题就是这种负面效应的一个重要组成部分。

作为一种物理现象,“电”被人们利用的途径主要有两条:一是被用作为能源,二是被用作为信息的载体。因此,电气安全问题是电力、通信、计算机、自动控制等诸多领域所共同面临的问题,这使得它具有了广泛性和基础性的特征。同时,电气安全又涉及材料的选用、设备制造、设计施工及运行维护等诸多环节,这又使它具有了系统性和综合性的特征。再者,电气安全问题通常发生在人们预期以外的电磁过程中,如雷击、静电、宇宙电磁辐射等,这些自然现象也时刻影响着人类的正常活动,自然界的这些电磁现象可能造成很大的危害。这使得它具有随机性和统计性的特征。

在发达国家,社会对电气安全问题极为重视,尤其是对涉及用户人身安全和公共环境安全的问题,更是予以严格规范。在我国,过去由于观念和体制上的原因,对电气安全问题更多地侧重于电网本身的安全和生产过程的劳动保护,而对一般民用场所的电气安全问题和电气环境安全问题较为忽视,以致电击伤害和电气火灾等事故的发生率长期居高不下,单位用电量的电击伤亡事故更是比发达国家高出数十倍。最近 20 年来,我国在学习国际先进技术、借鉴采用国际先进技术标准等方面做了大量工作,在电气安全的工程实践上有了很大的进展,但与发达国家相比,差距仍然很大。由于我国经济持续、快速地发展,我国城市居民家庭的电气化水平迅速提高,住宅和其他民用建筑的建设蓬勃发展,使得电气安全问题显得十分现实和迫切。因此,将电气安全问题作为电气工程一个重要的专业方向进行研究,消除长期以来对电气安全问题的模糊认识,以科学的态度去认识它,用工程的手段去应对它,是一项十分有意义的重要工作。

本书是建筑电气技术系列教材之一,主要供电气工程专业和安全工程专业的本科学生使用,也可供相关专业的学生和工程技术人员参考。

本书共分三章,第一章由王悦编写,第二章由黄民德和迟长春编写,第三章由郭福雁编写,全书由黄民德指导,并由郭福雁统稿。天津大学吴爱国教授、王萍教授,天津建筑设计院王东林总工程师对本书的内容提出了宝贵意见,在书稿编写过程中还得到了何雨、吴火军、余晓金等同志的大力支持,在此一并表示感谢。

本书作为高等学校的专业课教材,希望使用的教师提出宝贵意见,希望读者不吝批评和指正。

编者

2007 年 6 月

# 目 录

第一章 概论 .....	( 1 )
第一节 电气事故 .....	( 1 )
一、电气事故的类型 .....	( 1 )
二、电气事故的特征 .....	( 3 )
三、触电事故的规律 .....	( 4 )
四、触电防护措施 .....	( 5 )
五、用电安全的基本要求 .....	( 5 )
第二节 电流的人体效应和安全电压 .....	( 7 )
一、电流通过人体时的效应 .....	( 7 )
二、人体允许电流 .....	( 11 )
三、安全电压 .....	( 11 )
第三节 电气绝缘 .....	( 11 )
一、绝缘材料的电气性能 .....	( 11 )
二、按保护功能区分的绝缘形式 .....	( 13 )
三、绝缘的破坏 .....	( 15 )
四、绝缘检测和绝缘试验 .....	( 17 )
第四节 电气设备外壳的防护等级 .....	( 18 )
一、外壳与外壳防护的概念 .....	( 18 )
二、外壳防护等级的代号及划分代号 .....	( 19 )
思考题 .....	( 20 )
第二章 供配电系统的电气安全防护 .....	( 21 )
第一节 电气系统接地概述 .....	( 21 )
一、安全接地概述 .....	( 21 )
二、安全接地的类型 .....	( 22 )
三、电子设备接地概述 .....	( 25 )
第二节 特殊环境下对电力装置的要求 .....	( 26 )
一、爆炸性气体环境 .....	( 26 )
二、爆炸性粉尘环境 .....	( 34 )
三、火灾危险环境 .....	( 38 )
四、其他特殊环境下对电力装置的要求 .....	( 40 )
第三节 低压系统电击防护 .....	( 44 )
一、IT 系统的间接电击防护 .....	( 44 )
二、TT 系统的间接电击防护 .....	( 47 )
三、TN 系统的间接电击防护 .....	( 51 )

四、剩余电流保护器	(56)
五、电气隔离	(63)
六、安全电压	(64)
第四节 建筑物的电击防护	(64)
一、非导电场所	(64)
二、等电位联结	(65)
思考题	(74)
<b>第三章 建筑物的雷击防护</b>	<b>(75)</b>
第一节 概述	(75)
一、雷电的形成	(75)
二、雷电参数	(78)
三、雷电的危害	(85)
第二节 防雷设施	(86)
一、避雷针与避雷线	(86)
二、避雷带与避雷网	(87)
三、避雷针与避雷线的保护范围计算	(88)
四、避雷器	(90)
五、信息系统的防雷保护器件	(93)
第三节 建筑物防雷	(96)
一、建筑物的防雷分类	(96)
二、建筑物防雷击的主要保护措施	(97)
第四节 室内信息系统的雷电防护	(99)
一、防雷区	(100)
二、屏蔽	(100)
三、均压	(103)
四、箝位	(106)
五、智能建筑雷电防护设计方案	(111)
思考题	(115)
附录 A 《民用建筑电气设计规范》——低压配电相关部分	(116)
附录 B 《民用建筑电气设计规范》——民用建筑物防雷	(122)
附录 C 《民用建筑电气设计规范》——接地和特殊场所的安全防护	(135)
附录 D 全国主要城市雷暴日数	(150)
附录 E 浴盆和淋浴盆(间)区域的划分	(152)
附录 F 游泳池和戏水池区域的划分	(155)
附录 G 喷水池区域的划分	(156)
<b>参考文献</b>	<b>(157)</b>

# 第一章 概 论

## 第一节 电气事故

电能的开发和应用给人类的生产和生活带来了巨大的变革,大大促进了社会的进步和文明。在现代社会中,电能已被广泛应用于工农业生产和人民生活等各个领域。然而,在用电的同时,如果对电能可能产生的危害认识不足,控制和管理不当,防护措施不力,那么在电能的传递和转换的过程中,将会发生异常情况,造成电气事故。

### 一、电气事故的类型

根据能量转移的观点,电气事故是由于电能非正常地作用于人体或系统造成的。根据电能的不同作用形式,可将电气事故分为触电事故、静电危害事故、雷电灾害事故、电磁场危害和电气系统故障危害事故等。

#### 1. 触电事故

##### (1) 电击

这是电流通过人体,刺激肌体组织,使肌肉非自主地发生痉挛性收缩而造成的伤害,严重时破坏人的心脏、肺、神经系统的正常工作,形成危及生命的伤害。

电击对人体的效应是由通过的电流决定的,而电流对人体的伤害程度是与通过人体电流的强度、种类、持续时间、通过途径及人体状况等多种因素有关。

按照人体触及带电体的方式,电击可分为以下几种情况。

1) 单相触电 这是指人体接触到地面或其他接地导体的同时,人体另一部位触及某一相带电体所引起的电击。发生电击时,所触及的带电体为正常运行的带电体,称为直接接触电击。而当电气设备发生事故(例如绝缘损坏,造成设备外壳意外带电的情况下),人体触及意外带电体所发生的电击称为间接接触电击。根据国内外的统计资料,单相触电事故占全部触电事故的70%以上。因此,防止触电事故的技术措施应将单相触电作为重点。

2) 两相触电 这是指人体的两个部位同时触及两相带电体引起的电击。在此情况下,人体所承受的电压为三相系统中的线电压,因电压相对较大,危险性也较大。

3) 跨步电压触电 这是指人站立或行走时两脚之间的电压(即跨步电压)引起的电击。跨步电压是当带电体接地后电流自接地的带电体流入地下时,在接地点周围的土壤中产生的电位差形成的。



## (2)电伤

这是电流的热效应、化学效应、机械效应等对人体所造成的伤害。此伤害多见于肌体的外部,往往在肌体表面留下伤痕。能够形成电伤的电流通常比较大。

电伤属于局部伤害,危险程度决定于受伤面积、受伤深度、受伤部位等。

电伤包括电烧伤、电烙印、皮肤金属化、机械损伤、电光眼等。

## 2.静电危害事故

静电危害事故是由静电电荷或静电场能量引起的。在生产工艺过程中以及操作人员的操作过程中,某些材料的相对运动、接触与分离等原因导致了相对静止的正电荷和负电荷的积累,即产生了静电。由此产生的静电的能量不大,不会直接对人造成致命伤害。但是,其电压可能高达数十千伏乃至数百千伏,发生放电,产生放电火花。静电危害事故主要有以下几个方面:

①在有爆炸和火灾危险的场所,静电放电火花会成为可燃性物质的点火源,造成爆炸和火灾事故;

②人体因受到静电电击的刺激,可能引发二次事故,如坠落、跌伤等,此外,对静电电击的恐惧心理还会降低工作效率;

③某些生产过程中,静电的物理现象会妨碍生产,导致产品质量不良和电子设备损坏,造成生产故障,乃至停工。

## 3.雷电灾害事故

雷电是大气中的一种放电现象。雷电放电具有电流大、电压高的特点。其能量释放出来可能形成极大的破坏力。其破坏作用主要有以下几个方面:

①直击雷放电、二次放电、雷电流的热量会引发火灾和爆炸;

②雷电的直接击中、金属导体的二次放电、跨步电压的作用及火灾与爆炸的间接作用,均会造成人员伤亡;

③强大的雷电流、高电压可导致电气设备击穿或烧毁;

④发电机、变压器、电力线路等遭受雷击,可导致大规模停电事故,雷击可直接毁坏建筑物、构筑物。

## 4.射频电磁场危害

射频指无线电波的频率或者相应的电磁振荡频率,泛指 100 kHz 以上的频率。射频伤害是由电磁场的能量造成的。射频电磁场的危害如下。

在射频电磁场作用下,人体会吸收辐射能量并受到不同程度的伤害。过量的辐射可引起中枢神经系统的机能障碍,出现神经衰弱症候群等临床症状;可造成植物神经紊乱,出现心率或血压异常,如心动过缓、血压下降或心动过速、血压升高等;可引起眼睛损伤,造成晶体浑浊,严重时导致白内障;可使睾丸功能失常,造成暂时或永久性的不育症,并可能使后代产生疾患;可造成皮肤表层灼伤或深度灼伤等。

在高强度的射频电磁场作用下,可能产生感应放电,会造成电引爆器件意外引爆。感应放电对具有爆炸、火灾危险的场所来说是一个不容忽视的危险因素。此外,受电磁场作用感应出的电压较高时,会给人以明显的电击。

## 5.电气系统故障危害

电气系统故障危害是由于电能输送、分配、转换过程中失去控制而产生的。断线、短路、

异常接地、漏电、误合闸、误掉闸、电气设备或电气元件损坏、电子设备受电磁干扰而发生误动作等都属于电路故障。电力系统中线路或电气设备的故障也会导致人员伤亡及重大财产损失。电气系统故障危害主要体现在以下几方面。

### (1)引起火灾和爆炸

线路、开关、熔断器、插座、照明器具、电热器具、电动机等均可能引起火灾和爆炸；电力变压器、多油断路器等电气设备不仅有较大的火灾危险，还有爆炸的危险。在火灾和爆炸事故中，电气火灾和爆炸事故占有很大的比例。就引起火灾的原因而言，电气原因仅次于一般明火而位居第二。

### (2)异常带电

电力系统中，原本不带电的部分因电路故障而异常带电，可导致触电事故。例如：电气设备因绝缘不良产生漏电，使金属外壳带电；高压电路故障接地时，在接地处附近呈现较高的跨步电压，形成触电的危险条件。

### (3)异常停电

在某些特定场合，异常停电会造成设备损坏和人身伤亡。例如，正在浇注钢水的吊车，因骤然停电而失控，导致钢水洒出，引起人身伤亡事故；医院手术室可能因异常停电而被迫停止手术，无法正常施救而危及病人生命；排出有毒气体的风机因异常停电而停转，致使有毒气体超过允许浓度而危及人身安全等；公共场所发生异常停电，会引起妨碍公共安全事故；异常停电还可能引起电子计算机系统的故障，造成难以挽回的损失。

## 二、电气事故的特征

电气事故的第一个特点是非直观性。由于电既看不到、听不到，又嗅不着，本身不具备人们直观所识别的特征，因此潜在危险就不易为人们所察觉。比如，若水容器出现破裂，水就会漏出，直观上就可知道容器出现了破损，但若电气设备的绝缘发生了破坏，有电压加在设备外壳上，这时凭人的感观是无法知道设备已经漏电，这就给触电事故的发生创造了条件。

电气事故的第二个特征是途径广。比如电击伤害，大的方面可分为直接电击与间接电击，再细分下去，有设备漏电产生的电击，也有带电体接触到电气装置以外的导体（如水管等）而发生的电击，还有可能因 PE 线断线造成设备外壳带电而发生电击。再比如雷电危害，可能因闪电产生的机械能损坏建筑物，也可能因闪电的热能引发火灾，还可能因雷电流下泄产生的电磁感应过电压损坏设备或产生火花击穿，或者接地体散流场产生跨步电压造成电击伤害等。由于供电系统所处环境复杂，电气危害产生和传递的途径也极为多样，这就使得对电气危害的防护十分困难和复杂，需要周密、细致和全面地考虑。

电气事故的第三个特征是能量范围广，能量谱密度分布也多种多样。大的如雷电能量，雷电流可达数百千安，且高频和直流成分大；小的如电击电流，以工频电流为主，电流仅为毫安级。对于大能量的危害，合理控制能量的泄放是主要的防护手段，因此泄放能量的能力大小是保护设施的重要指标；而对小能量的危害，能否灵敏地感知这种危害是防护的关键，因此保护设施的灵敏性又成了重要的技术指标。

电气事故的第四个特征是作用时间长短不一。短者如雷电过程，持续时间仅为微秒级；长者如导线间的间歇性电弧短路，通常要持续数分钟至数小时才会引发火灾；而电气设备的轻度过载，持续时间可达若干年，使绝缘的寿命缩短，最终才因绝缘损坏而产生漏电、短路或火灾。

对不同持续时间的电气危害,保护设施的响应速度和方式也应有所不同。

电气事故的第五个特征是不同的危害之间的关联性。如绝缘损坏导致短路,而短路又可能引发绝缘燃烧;又如建筑物防雷装置可极大地减小雷击产生的破坏,但雷电流在防雷装置中通过时又可能产生反击、感应过电压、低压配电系统中性点电位升高等新的危害。因此,电气危害的防护应该是全面的,不能只顾一点而不及其余。

### 三、触电事故的规律

大量的统计资料表明,触电事故的分布是具有规律性的。触电事故的分布规律为制定安全措施,最大限度地减少触电事故发生率提供了有效依据。根据国内外的触电事故统计资料分析,触电事故的分布具有如下规律。

#### 1. 触电事故季节性明显

一年之中,二、三季度是事故多发期,尤其在6~9月份最为集中。其原因主要是这段时间正值炎热季节,人体穿着单薄且皮肤多汗,相应增大了触电的危险性。另外,这段时间潮湿多雨,电气设备的绝缘性能有所降低。再有,这段时间许多地区处于农忙季节,用电量增加,农村触电事故也随之增加。

#### 2. 低压设备触电事故多

低压触电事故远多于高压触电事故,其原因主要是低压设备远多于高压设备,而且,缺乏电气安全知识的人员多是与低压设备接触。因此,应将低压设备作为防止触电事故的重点。

#### 3. 便携式设备和移动式设备触电事故多

这主要是因为这些设备经常移动,工作条件较差,容易发生故障。另外在使用时需要手紧握进行操作。

#### 4. 电气连接部位触电事故多

电气连接部位机械牢固性较差,电气可靠性也较低,这是电气系统的薄弱环节,较易出现故障。

#### 5. 农村触电事故多

这主要是因为农村用电条件较差、设备简陋、技术水平低、管理不严、电气安全知识缺乏等。

#### 6. 冶金、矿业、建筑、机械行业触电事故多

这些行业存在工作现场环境复杂、潮湿、高温、移动式设备和便携式设备多和现场金属设备多等不利因素,使触电事故相对较多。

#### 7. 青年、中年人以及非电工人员触电事故多

这主要是因为这些人员是设备操作人员的主体,他们直接接触电气设备,部分人还缺乏电气安全的知识。

#### 8. 误操作事故多

这主要是由于防止误操作的技术措施和管理措施不完备造成的。

触电事故的分布规律并不是一成不变的,在一定条件下,也会发生变化。例如,对电气操作人员来说,高压触电事故反而比低压触电事故多。因为,通过在低压系统推广漏电保护装置,使低压触电事故大大减少,从而使低压触电事故与高压触电事故的比例发生变化。上述规律对于电气安全检查、电气安全工作计划、实施电气安全措施以及电气设备的设计、安装和管

理等工作提供了重要的依据。

## 四、触电防护措施

### 1. 直接接触防护

直接接触是指人体与正常工作中的裸露带电部分直接接触而遭受电击。主要防护措施如下：

①将裸露带电部分包以适合的绝缘物质。

②设置遮拦或外护物,以防止人体与裸露带电部分接触。

③设置阻挡物,以防止人体无意识地触及裸露带电部分。阻挡物可不用钥匙或工具就能移动,但必须固定住,以防无意识地移动。这一措施只适用于专业人员。

④将裸露带电部分置于人的伸臂范围以外。伸臂范围的规定距离如图 1-1 所示。图中 S 为人的站立面,当人站立处前方有阻挡物时,伸臂范围应从阻挡物算起。从 S 面算起的向上的伸臂范围为 2.5 m,在常有人手持长或大的物体的场所,伸臂范围尚应适当加大。

⑤装设漏电保护器作为后备保护,其额定动作电流为 30 mA。它只能作为上述①~④项防直接接触保护措施的后备措施,不能代替上述措施。

### 2. 间接触电防护

因绝缘损坏,致使相线与 PE 线、外露可导电部分、装置外可导电部分以及大地间的短路称为接地故障。这时原来不带电压的电气装置外露,可导电部分或装置外可导电部分将呈现故障电压。人体与之接触而招致的电击称为间接触电。其主要的防护措施如下:

①用自动切断电源的保护(包括漏电电流动作保护),并辅以总等电位联结;

②使工作人员不致同时触及两个不同电位点的保护;

③使用双重绝缘或者加强绝缘的保护;

④用不接地的局部等电位联结的保护;

⑤采用电气隔离。

## 五、用电安全的基本要求

①电气装置在使用前,应确认其已经国家指定的检验机构检验合格或认可。

②电气装置在使用前,应确认其符合相应环境要求和使用等级要求。

③电气装置在使用前,应认真阅读产品使用说明书,了解使用可能出现的危险以及相应的预防措施,并按产品使用说明书的要求正确使用。

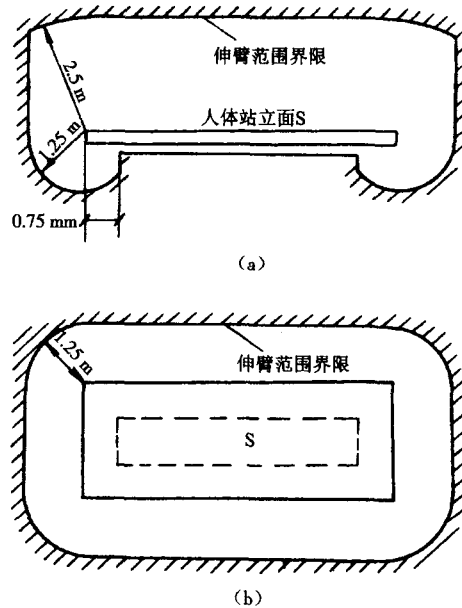


图 1-1 伸臂范围的规定距离  
(a)俯视图 (b)仰视图

④用电单位或个人应掌握所使用的电气装置的额定容量、保护方式和要求、保护装置的整定值和保护元件的规格,不得擅自更改电气装置或延长电气线路,不得擅自增大电气装置的额定容量,不得任意改动保护装置的整定值和保护元件的规格。

⑤任何电气装置都不应超负荷运行或带故障使用。

⑥用电设备和电气线路的周围应留有足够的安全通道和工作空间。电气装置附近不应堆放易燃、易爆和腐蚀性物品。禁止在架空线上放置或悬挂物品。

⑦电力线路必须具有足够的绝缘强度、机械强度和导电能力并应定期检查。禁止使用绝缘老化或失去绝缘性能的电力线路。

⑧软电缆或软线中的绿/黄双色线在任何情况下只能用作保护线。

⑨移动使用的配电箱(板)应采用完整的、带保护线的多股铜芯橡皮护套软电缆或护套软线作电源线,同时应装设漏电保护器。

⑩插头与插座应按规定正确接线,插座的保护接地极在任何情况下都必须单独与保护线可靠连接。严禁在插头(座)内将保护接地极与工作中性线连接在一起。

⑪在儿童活动的场所,不应使用低位置插座,否则应采取防护措施。

⑫在浴室、蒸汽房、游泳池等潮湿场所内,不应使用可移动插座。

⑬在使用移动式的Ⅰ类设备时,应先确认其金属外壳或构架已可靠接地,使用带保护接地极的插座,同时宜装设漏电保护器,禁止使用无保护线插头插座。

⑭正常使用时会产生飞溅火花、灼热飞屑或外壳表面温度较高的用电设备,应远离易燃物品或采取相应的密闭、隔离措施。

⑮手提式和局部照明灯具应选用安全电压或双重绝缘结构。在使用螺口灯头时,灯头螺纹端应接至电源的工作中性线。

⑯用电设备在暂停或停止使用、发生故障或遇突然停电时,均应及时切断电源,必要时应采取相应技术措施。

⑰当保护装置动作或熔断器的熔体熔断后,应先查明原因、排除故障,在确认电气装置已恢复正常后,才能重新接通电源、继续使用。更换熔体时不应任意改变熔断器熔体的规格或用导线代替。

⑱当电气装置的绝缘或外壳损坏可能导致人体触及带电部分时,应立即停止使用,并及时修复或更换。

⑲禁止擅自设电网、电围栏或用电具捕鱼。

⑳露天使用的用电设备、配电装置应采取防雨、防雪、防雾和防尘的措施。

㉑禁止利用大地作工作中性线。

㉒禁止将暖气管、煤气管、自来水管道作为保护线使用。

㉓用电单位的自备发电装置应采取与供电电网隔离的措施,不得擅自并入电网。

㉔当发生人身触电事故时,应立即断开电源,使触电人员与带电部分脱离,并立即进行急救。在切断电源之前,禁止任何人直接接触及触电人员。

## 第二节 电流的人体效应和安全电压

### 一、电流通过人体时的效应

电对人的伤害主要是电流流经人体后产生的。因此,研究电流通过人体时所产生的效应,是电气安全方面的一个基础性课题。

经过各国科学家几十年的努力,目前在电流通过人体的效应研究方面已取得了显著的成果。本节着重阐述 15~100 Hz 交流电通过人体时的效应。专家们提出了三个不同性质的效应阈。一是“感觉阈”,即人对电流开始有所觉察;二是“摆脱阈”,即人对所握持的电极能自主摆脱;三是“室颤阈”,即会发生致命的心室纤维性颤动(以下简称室颤)。这三个效应阈阈值如下:“感觉阈”为 0.5 mA,与通电时间长短无关;“摆脱阈”约为 10 mA;“室颤阈”与通电时间密切相关,以曲线形式表示(图 1-2 曲线  $c$ )。

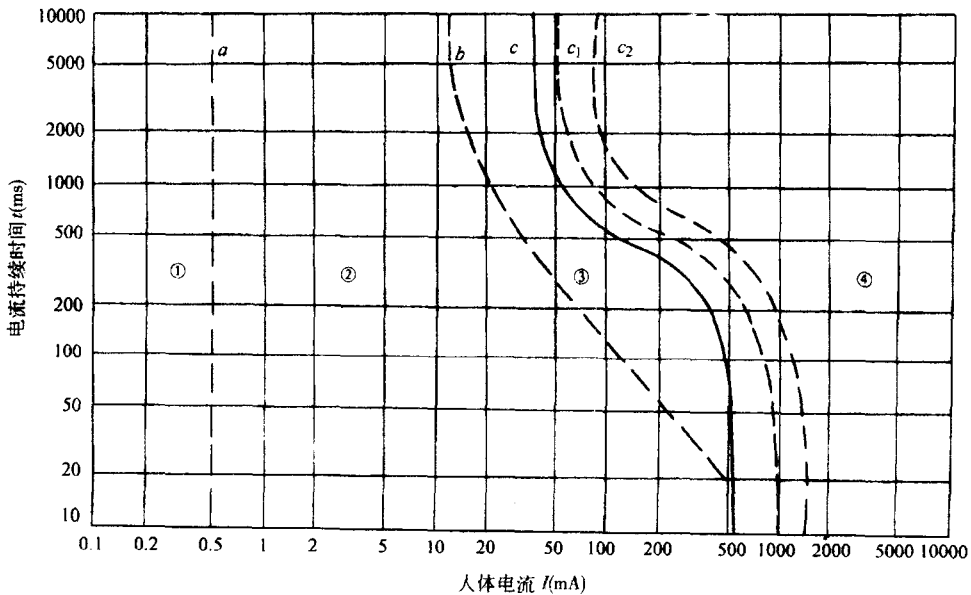


图 1-2 15~100 Hz 交流电流流过人体时的电流—时间—效应分区图

#### 1. 电流、通电时间与电流的效应关系

图 1-2 是 15~100 Hz 交流电通过人体时的电流—时间—效应分区图,它反映了电流、通电时间与电流的效应这三者的关系。图中分为四个区域:区域①是无效应区,在这个区域内人对电流通常无感觉,线条  $a$  即为“感觉阈”;区域②为无有害生理效应区,“摆脱阈”处在这个区域中;区域③为有病态生理效应而无器质性损伤的区域,但可能出现肌肉痉挛、呼吸困难和可逆性的心房纤维性颤动,随着电流和通电时间的增加,可引起非室颤的短暂的心脏停跳;区域④除了有区域③的病态生理效应外,还可能出现室颤。曲线  $c$  反映的就是“室颤阈”。曲线  $c$  与  $c_1$  之间的区域,室颤的发生概率约为 5%;曲线  $c_1$  与  $c_2$  之间的区域,室颤的发生概率约为

50% ;曲线  $c_2$  以右的区域,室颤的发生概率在 50% 以上。随着电流和通电时间的增加,可能出现心脏停跳、呼吸停止和严重灼伤。

图 1-2 中的曲线  $c$  呈现阶梯形,它反映的是国际上在这个领域里的最新研究成果,即室颤阈值与通电时间密切相关,而且以一个心跳周期(人的心跳周期约为 750 ms)为中心,呈现两个不同水平的“台阶”。通电时间短于一个心脏周期时,室颤阈值处于高水平台阶上,两个台阶之间差值较大。

流过人体的电流越大,人体的生理反应越明显,感觉越强烈,引起心室颤动所需要的时间越短,危险性越大。通常把流过人体的电流分为感知电流、摆脱电流和心室颤动电流。

### (1)感知电流

感知电流也叫感觉电流,是指人体开始有通电感觉的最小电流。感知电流流过人体时,对人体不会有伤害。试验表明,不同的人、不同性别的人感知电流是不同的。一般来说,成年男性的平均感知电流是:交流(工频)约为 1.1 mA;直流约为 5.2 mA。成年女性的平均感知电流是:交流(工频)约为 0.7 mA;直流约为 3.5 mA。

感知电流还与电流的频率有关,随着频率的增加,感知电流的数值也相应增加。例如,当频率从 50 Hz 增加到 5 000 Hz 时,成年男性的平均感知电流将从 1.1 mA 增加到 7 mA。

### (2)摆脱电流

摆脱电流是指人体触电后,在不需要任何外来帮助下能自主摆脱电源的最大电流。试验表明,在摆脱电流作用下,由于触电者能自行脱离电源,所以不会有触电的危险。成年男性的平均摆脱电流是:交流(工频)约为 16 mA;直流约为 76 mA。成年女性的平均摆脱电流是:交流(工频)约为 10.5 mA;直流约为 51 mA。

### (3)心室颤动电流

心室颤动电流是指人体触电后,引起心室颤动概率大于 5% 的极限电流。当触电时间小于 5 s 时,心室颤动电流的计算式为

$$I = \frac{165}{\sqrt{t}} \quad (1-1)$$

式中  $I$ ——心室颤动电流, mA;

$t$ ——触电持续时间, s, 取  $8.3 \times 10^{-3} \sim 5$  s。

当触电持续时间大于 5 s 时,以 30 mA 作为心室颤动的极限电流。这个数值是通过大量的试验结果得出来的。因为当流过人体的电流大于 30 mA 时,才会有发生心室颤动的危险。

## 2. 影响电流对人体伤害程度的其他因素

### (1)触电电压的高低

一般来说,当人体电阻一定时,触电电压越高,流过人体的电流越大,危险性也就越大。

### (2)人体电阻的大小

当触电电压一定时,人体电阻越小,流过人体的电流就越大,危险性也就越大。

可见,通过人体的电流大小不同,引起的人体生理反应也不同,而通过人体电流的大小,主要与接触电压和电流通路的阻抗有关。对于供配电系统来说,容易计算的反映电击危险性的电气参量在大多数情况下是接触电压,因此只有知道了人体阻抗,才能推算出流过人体的电流大小,从而正确地评估电击危险性,这就是研究人体阻抗的原因。

## 1° 人体阻抗的构成

人体阻抗由皮肤阻抗和人体内阻抗构成,其总阻抗呈阻容性,等效电路如图 1-3 所示。

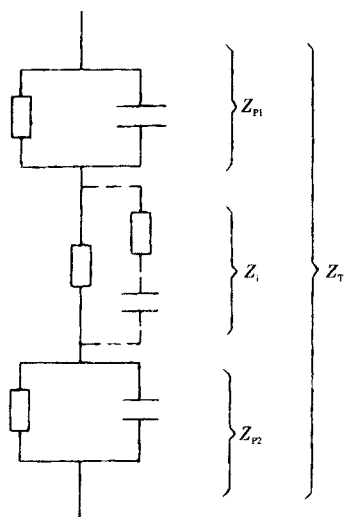
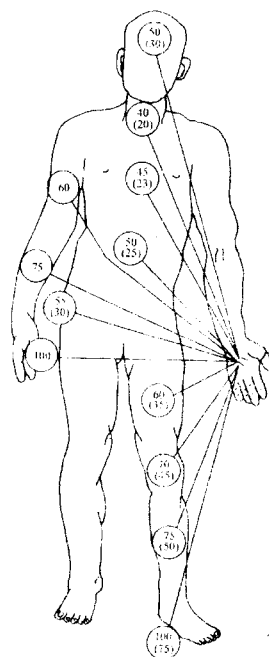


图 1-3 人体阻抗的等效电路  
 $Z_i$ —体内阻抗  $Z_{P1}, Z_{P2}$ —皮肤阻抗  
 $Z_T$ —总阻抗



注: 1.从一手到两脚的阻抗为手到手阻抗的75%,从两手到两脚的阻抗为手到手阻抗的50%。  
 2.这些百分数也可以作为人体总阻抗的近似值。

图 1-4 人体内阻抗随电流通路的变化

1) 皮肤阻抗  $Z_p$  皮肤可视为是由半绝缘层和许多小的导体(毛孔)组成的电阻电容网络。电流增加时皮肤阻抗会降低,皮肤阻抗也会随频率的增加而下降。皮肤阻抗与接触面积、湿度、是否受伤等因素关系较大。

2) 人体内阻抗  $Z_i$  人体内阻抗基本上是阻性的,数值由电流通路决定,接触表面积所占成分较小,但当接触表面积小至几平方毫米时,人体内阻抗就会增大。

各种电流通路的人体内阻抗如图 1-4 所示。其中数值表示各种电流通路的人体阻抗相当于从一只手到另一只手通路阻抗的百分数,无括号的数值是电流通路为从一只手到所测定部位的值,有括号的数值是电流通路为从两手至相应部位的值。

## 2° 人体总阻抗及其特性

人体总阻抗由电流通路、接触电压、通电时间、频率、皮肤湿度、接触面积、施加压力和温度等因素共同确定。研究发现,当接触电压在 50 V 以下时,由于皮肤阻抗  $Z_p$  的变化很大(即使对同一个人也如此),人体总阻抗  $Z_T$  也同样有很大变化;随着接触电压的升高,人体总阻抗越来越不取决于皮肤阻抗;当皮肤被击穿破损后,人体总阻抗值接近于人体内阻抗  $Z_i$ 。

人体总阻抗呈阻容性。活人体阻抗与接触电压关系的统计值如图 1-5 所示。从图中可看出,当接触电压为 220 V 时,只有 5% 的人的人体阻抗小于 1 000  $\Omega$ ,而阻抗小于 2 125  $\Omega$  的人占受试总人数的 95%,即有 90% 的人体阻抗在 1 000 ~ 2 125  $\Omega$  之间。



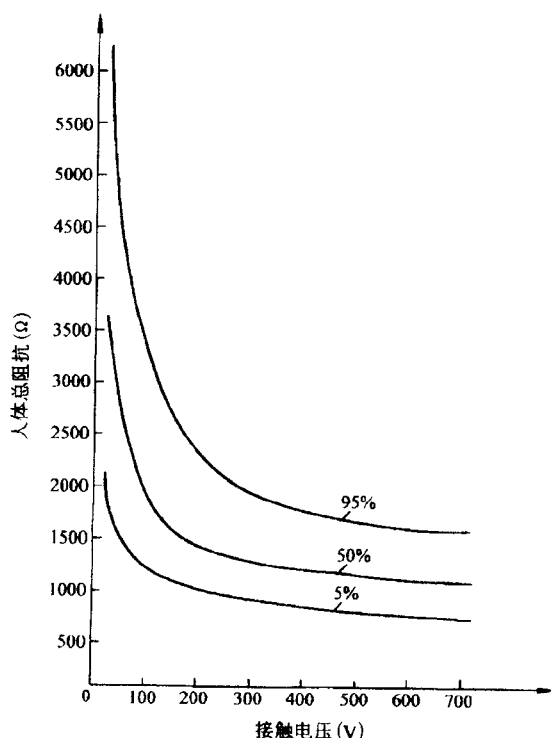


图 1-5 接触电压为 700 V 以下时适用于活体的人体总阻抗统计图

人体总阻抗值与频率呈负相关性,这可能是因为皮肤容抗随频率的增加而下降,从而导致总阻抗降低的缘故。

综上所述,在正常环境下人体总阻抗的典型值可取为  $1\ 000\ \Omega$ ,而在人体接触电压出现的瞬间,由于电容尚未充电(相当于短路),皮肤阻抗可忽略不计,这时的人体总阻抗称为初始电阻  $R_i$ ,  $R_i$  约等于人体内阻抗  $Z_i$ ,典型取值为  $500\ \Omega$ 。

### (3) 电流流过人体的途径

这对触电伤害程度影响很大。电流通过心脏,会引起心室颤动,较大的电流还会使心脏停止跳动。电流通过中枢神经或脊椎时,会引起有关的生理机能失调,如窒息致死等。电流通过脊椎时,会使人截瘫;电流通过头部时,会使人昏迷,若电流较大,则会对大脑产生严重伤害而致死。所以,从左手到胸部、从左手到右手、从颅顶到双脚是最危险的电流途径。从右脚到胸部、从右手到脚、从一只手到另一只手的电流途径也很危险。

从一只脚到另一只脚的电流途径,一般危险性较小,但不等于没有危险。例如跨步电压触电时,开始电流仅通过双脚,触电后由于双脚剧烈痉挛而摔倒,此时电流就会流经其他要害部位,同样会造成严重后果。另外,即使是双脚触电,也会有一部分电流流经心脏,同样会带来危险。当电流仅通过肌肉、肌腱时,即使造成严重的电灼伤甚至炭化,对生命也不会造成危险。

### (4) 电流的种类及频率的高低

试验表明,在同一电压作用下,当电流频率不同时,对人体的伤害程度也不相同。 $20\sim 400\ \text{Hz}$  交流电流的摆脱电流值最小,这就是说触电危险性较大,其中又以  $50\sim 60\ \text{Hz}$  工频电流的危险性最大。低于或高于上述频率范围时,危险性相对减小。频率在  $2\ 000\ \text{Hz}$  以上时,危险性反而降低。但高频电流比工频电流容易引起电灼伤,千万不可忽视。

直流电的触电危险性比交流电小,除了由于频率因数的影响外(直流电的频率为零),还因为交流电表示的是有效值,它的最大值是有效值的  $\sqrt{2}$  倍,而直流电的大小确是恒定不变的。例如  $220\ \text{V}$  交流电,它的最大值是  $311\ \text{V}$ ,而  $220\ \text{V}$  的直流电却始终为  $220\ \text{V}$ 。

### (5) 人体的状况

一般来说,当遭受同样的电击时,女性的伤害程度比男性重;小孩比成年人重;患有心脏病、精神病、结核病等病症或体弱多病的人比健康的人重;对喝醉酒、疲劳过度、出汗过多的人伤害较重。