



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ANQUAN YONGDIAN

安全用电

(第二版)

洪雪燕 林建军 王富勇 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology

自动控制原理	张建民
电工基础	王世才
电路分析及磁路	韩肖宁
电子技术实训教材	高安芹
模拟电子技术	方舒燕
模拟电子技术基础 (第二版)	郑晓峰
电机与拖动	刘景峰
电力系统	杜文学
发电厂变电所电气设备	刘宝贵
发电厂变电站电气设备	肖艳萍
供用电网络及设备 (第二版)	李 俊
供用电设备	夏国明
电气设备及运行维护	刘增良
供用电工程	杜文学
工厂电器与供电 (第二版)	胡光甲
供用电网络继电保护	马丽英
继电保护及自动装置检验与调试	杨利水
电力供需分析	张伟昌
用电检查	吴新辉
安全用电 (第二版)	洪雪燕
电气运行技术与管理	杨志辉

ISBN 978-7-5083-7894-7



9 787508 378947 >

定价: 21.60元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ANQUAN YONGDIAN

安全用电

(第二版)

洪雪燕 林建军 王富勇 编
郑鹏鹏 彭雪花 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

本书内容明了、结构合理、理论紧密联系实际，充分体现了职业教育的特点和规律。全书共八章，主要包括：人身触电的防护、电气设备安全、电气火灾及防火防爆、过电压防护、电气设备绝缘、绝缘预防性试验、电气工作的安全措施、用户事故管理及调查分析等。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业的教材，也可作为电力及相关行业的培训用书，还可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

安全用电 / 洪雪燕，林建军，王富勇编. —2 版. —北京：中国电力出版社，2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5083 - 7894 - 7

I. 安… II. ①洪…②林…③王… III. 用电管理—安全技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 149321 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 [http: //jc. cepp. com. cn](http://jc.cepp.com.cn)）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2008 年 12 月第二版 2008 年 12 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 329 千字

定价 21.60 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

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

《安全用电》是电力技术专业的主要课程。通过本课程的学习，可使学生明确安全用电的概念及规程制度，掌握防触电技术，学会使用和试验安全用具，掌握设备安全用电技术，掌握触电急救及其他急救方法和学会分析、处理用电事故等。

本书内容编排尽量贯彻“少而精”、“理论联系实际”的原则。主要特点有：

（1）针对职业教育的特点，本教材从拓展学生思维能力、培养动手能力、增强就业能力入手，遵循学生的认知规律，更新了原来教材中的陈旧内容，调整知识结构，加强实践性内容。

（2）重视学科的条理性、实践性，教材内容全面围绕现场应用、实践需求，合理取舍章节，内容安排更加合理。

（3）注重内容的可操作性和规范性，涉及实际操作，明确讲清楚具体步骤，做到内容明了、步骤清晰、重点突出、便于记忆。

（4）体现教材的新知识、新技术、新工艺、新方法，引入新标准、新符号。

（5）引入现场事故的案例分析，做到专业教材生动化、形象化。

全书共分八章，第一、四、七章由林建军编写，第二、三、八章由王富勇编写，第五、六章及绪论由洪雪燕编写。全书由洪雪燕统稿。

本书由福建省晋江电力公司高级工程师郑鹏鹏、彭雪花主审。审稿过程中，主审提出了很多宝贵意见并提供了许多现场最新技术的资料，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，教材中疏漏难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言	
绪论	1
习题	4
第一章 人身触电的防护	5
第一节 电流的人体效应	5
第二节 触电形式及触电规律	11
第三节 直接接触的危险性分析	14
第四节 防止人身触电的技术措施	16
第五节 保护接地	19
第六节 保护接零	23
第七节 低压配电系统的接地型式	26
第八节 接地装置	30
第九节 漏电保护器	39
第十节 触电急救	48
小结	51
习题	52
第二章 电气设备安全	54
第一节 电气设备安全的基本要求	54
第二节 变压器	56
第三节 高压开关	61
第四节 电力电容器	63
第五节 电力线路	67
第六节 电动机	72
第七节 变配电所的运行维护	74
小结	78
习题	78
第三章 电气火灾及防火防爆	80
第一节 燃烧爆炸与消防的基本知识	80
第二节 电气火灾与爆炸的原因	84
第三节 电气火灾与爆炸的预防	86
第四节 电气火灾的扑救	90
第五节 静电安全	93
小结	98
习题	99
第四章 过电压防护	100
第一节 波过程的一般知识	100

第二节	雷电的一般知识	104
第三节	防雷装置	108
第四节	电力设施的防雷	116
* 第五节	建筑物的防雷	123
第六节	人身的防雷	128
第七节	内部过电压简介	128
小结	.....	133
习题	.....	135
第五章	电气设备绝缘	136
第一节	介质的极化、电导和损耗	136
第二节	气体放电	142
第三节	液体、固体介质的击穿	150
第四节	电介质的其他性能	153
第五节	组合绝缘的电气性能	155
小结	.....	156
习题	.....	157
第六章	绝缘预防性试验	158
第一节	绝缘电阻和吸收比测量	158
第二节	泄漏电流测量	161
第三节	介质损失角正切值测量	163
第四节	耐压试验	167
* 第五节	局部放电测试简介	172
第六节	绝缘油试验	174
* 第七节	变压器绝缘试验	176
* 第八节	电力电缆试验	179
第九节	绝缘在线监测	183
小结	.....	185
习题	.....	186
第七章	电气工作的安全措施	188
第一节	保证电气工作安全的组织措施	188
第二节	保证电气工作安全的技术措施	189
第三节	电气安全用具	194
小结	.....	200
习题	.....	200
第八章	用户事故管理及调查分析	201
第一节	用户事故及其分类	201
第二节	用户事故报告及调查	203
第三节	用户事故分析	207
小结	.....	209
习题	.....	209
参考文献	.....	210

绪 论

电能相对于其他能源具有许多优点,它易于转换成其他形式的能量;传输方便,利用高压线路就可把电能从能源集中地方便、快捷、经济地送到负荷中心;利用电能更容易实现自动化,提高产品质量和生产效益。随着经济的发展,国民经济各行业对能源的需求日益迫切,电力工业作为能源工业的主力受到极大重视,在发达国家的能源消费比例中,电能占一半多。

电能虽有很多优点,但也有缺点,如果电气设备质量不合格、安装不恰当、使用不合理、维修不及时,尤其是电气工作人员缺乏必要的电气安全知识时,不仅会造成电能浪费,而且会发生电气事故。发生电气事故时,会产生强大的电流和电动力,并伴随着强大的弧光和高温、高热,不仅会损坏电气设备造成停电、停产,而且会造成人身触电伤亡、电气火灾,甚至影响电力系统运行或导致电网大面积停电,涉及千家万户,使国民经济遭受严重损失。所以一提到“电”,人们总是同时联想到火灾、危险。据统计,1990~1998年电气火灾发生11万多起,电气火灾年均起数占火灾年均总起数的27.5%,经济损失约35亿元,年均损失占总损失的37.3%。电气火灾的增长势头快,损失大;恶性、特大型火灾多,有些甚至令人触目惊心。

电能还有一重要特点,即不能大规模储存,所以产、供、销同时完成,并随时处于平衡。电能的这一特点决定了电能的发、供、用必须有极高的可靠性和连续性,任何一个环节发生事故,都可能带来连锁反应,造成人身伤亡、设备损坏或大面积停电。例如,2004年3月,某地区的供电所管辖的线路,由于偷伐林木,树枝压在10kV线路上,造成线路短路,引发森林火灾,烧毁森林100多亩,10kV电杆损坏两支。所幸由于保护动作,无人员伤亡,但维修线路、烧毁森林给国家造成直接经济损失几十万元,另造成该10kV线路停电6个多小时,多家国有煤矿、乡镇企业停产,间接损失无法估算。

一、电气事故

电气事故从劳动保护的角度出发,可分为触电事故、雷电事故、静电事故、电磁场伤害事故、电气系统故障危害事故。

1. 触电事故

触电事故的发生多数是由于人直接碰到了带电体,或者接触到因绝缘损坏而漏电的设备,或者是站在发生接地故障点的周围,或者电容器放电。

2. 雷电事故

雷电是大气中雷电荷对地放电的一种现象,具有电流大、电压高的特点,一旦击中人或设备,都会造成致命的打击。

3. 静电事故

静电现象是一种常见的带电现象,如雷电或电容器残留电荷、摩擦带电等。在生产 and 生活中,一些不同物质间相互接触和分离或互相摩擦就会产生静电。例如生产工艺中的挤压、切割、搅拌、喷溅、流动和过滤,以及生活中的行走、起立、穿脱衣服等都会产生静电。

静电放电的最大威胁是可能引起火灾或爆炸事故，也可能造成对人体的伤害。

4. 电磁场伤害事故

电磁场的能量对人体造成的伤害，亦即电磁场伤害。在高频电磁场的作用下，人体因吸收辐射能量，各器官会受到不同程度的伤害，从而引起各种疾病。除高频电磁场外，超高压的高强度工频电磁场也会对人体造成一定的伤害。

5. 电气系统故障危害事故

电气系统故障危害事故是由于电气设备发生事故和电路发生事故而产生的。断线、短路、接地、误合闸、误跳闸、电气设备或电气元器件损坏、电子设备受电磁干扰而发生误动作等都属于电路故障。系统中电力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) 火灾和爆炸事故。电力线路、开关、熔断器、插座、照明器具、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，由于电气事故引起的占有很大的比例。

(2) 异常带电事故。电气系统中，正常不带电的部分因电路故障而带电，可导致触电事故。

(3) 异常停电事故。在某些特殊场合，异常停电会造成设备损坏和人身伤亡。例如煤矿通风机因骤然停电而停机，将导致井下瓦斯、煤尘积聚，会引发爆炸和人身伤亡事故；医院手术室可能因异常停电而被迫停止手术，失去抢救病人的时机；异常停电还可能影响电子计算机的正常工作，造成难以挽回的损失。

电气事故常见的主要原因有：误操作、电气设备绝缘损坏、工作系统不合理、保护设备（如熔断器、继电器、断路器等）不合理、接地不合理、粗心大意和自以为是、设备缺陷、维护与测试不良、外力破坏等。

二、安全用电

所谓安全用电，指在保证人身及设备安全的前提下，正确地使用电能及为此目的而采取的科学措施和手段。

电气安全包括人身安全与设备安全两方面。人身安全指在从事电气工作的过程中人员的安全；设备安全指电气设备及相关其他设备（包括建筑）的安全。

保证用电安全的基本要素包括：

(1) 电气绝缘。保持配电线路和电气设备的绝缘良好，是保证人身安全和电气设备正常运行的最基本要素。电气绝缘的性能是否良好，可通过测量其绝缘电阻、耐压强度、泄漏电流和介质损耗等参数来衡量。

(2) 安全距离。电气安全距离，是指人体、物体等接近带电体而不发生危险的安全可靠距离。通常，在配电线路和变配电装置附近工作时，应考虑线路安全距离、变配电装置安全距离、检修安全距离和操作安全距离等。

(3) 安全载流量。导体的安全载流量，是指允许持续通过导体内部的电流量。持续通过导体的电流如果超过安全载流量，导体的发热将超过允许值，导致绝缘损坏，甚至引起漏电和发生火灾。因此，根据导体的安全载流量确定导体截面和选择设备是十分重要的。

(4) 标志。明显、准确、统一的标志是保证用电安全的重要因素。标志一般有颜色标志、标示牌标志和型号标志等。颜色标志表示不同性质、不同用途的导线；标示牌标志一般

作为危险场所的标志；型号标志作为设备特殊结构的标志。

通常电气设备或线路均处于正常状态下所发生的事故，多数是由于违反《电力安全工作规程》等管理性原因造成的。可见，为了确保电气安全，必须采取包括技术和组织管理等多方面的措施。《电力安全工作规程》的主要内容都是过去千千万万从事高电压工作的人们辛勤劳动的经验总结。这些宝贵的经验是客观规律的反映，其中还包含着不少前人血的教训。这些安全工作规程和规章制度包括一系列保证安全生产的技术措施、组织措施以及各项作业的具体安全技术要求，从事电力工作的人们只有熟悉、掌握，并自觉遵守这些规程和规定，才能保证工作安全，避免生命受到威胁。

三、我国电气安全研究现状

我国目前的电气安全水平与发达国家相比，还存在着较大的差距，电气安全理论研究和实际应用的发展也较缓慢。近几年来，我国平均 1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 电触电死亡 1 人，是发达国家的 20~30 倍。特别是近年来，一些特殊行业对电气安全问题重视不够，使电气事故频发。因此，提高我国的电气安全水平已是当务之急。

我国电气安全标准化技术委员会为了搞好电气安全工作，全面系统地解决各种电气安全问题，编制了电气安全标准体系。我国的《电气设备安全规范》是国家质检总局下达、组织制定的强制性安全规范。《电气设备安全规范》的适用范围包括发、输、配、储存、测量、监督、控制、调节、转换和消费电能的产品，以及通信技术领域中与其组成一体的交流 50~1500V 及直流电压 75~1500V 之间的所有电气装置和电气设备的安全技术要求。

近 20 年来，我国的用电安全水平得到了大幅度的提高，尽管我国的用电量迅速增加，供电区域迅速扩大，但每年触电死亡人数的绝对值却呈下降趋势。特别是近年来，随着双重绝缘、电气隔离、漏电保护等防触电新技术的应用，对于减少触电事故已经取得了明显的效果。我国在农村推广使用漏电保护器后，触电死亡减少了 1/2。双重绝缘设备的开发和推广，对控制和减少手持电动工具、家用电器的触电事故也起了很大的作用。电气隔离是应用高绝缘隔离变压器将接地配电网转换为小容量不接地配电网，隔断明显的故障电流回路的安全方法，这一办法有待进一步推广。对于其他新兴的防触电技术措施，如不导电环境、防触电本质安全型电气装置等方面也有待继续开发和探讨。

我国是一个用电相对落后的国家，用电状况又十分复杂，发展也不平衡。同时，随着各国不同电气设备的引进，随着科学技术的发展，必将出现新的电气安全问题。因此，必须研究触电领域里的新问题。其中，包括安全标准、安全规范、安全教育、安全管理等软科学课题的研究，也包括大量的不同用电装置、不同用电环境、不同用电条件、不同用电要求下防触电的技术性课题的研究。

四、安全用电课程的内容

本课程主要是研究电气事故的发生及防止措施。第一章的内容，让读者了解人身触电的一些基本常识，掌握人身触电电流的计算方法，知道防止人身触电的主要技术措施，尤其是理解保护接地、保护接零及保护器的工作原理及应注意的事项。此外，读者还可了解到 IEC 对低压供电系统接地型的分类及特点。最后介绍了触电时的脱离电源方法，触电急救方法。第二章通过主要电气设备的常见故障及原因分析，介绍这些设备的安全要求及运行维护。通过第三章的学习，力求使读者了解燃烧爆炸及消防基本知识，从设计安装、运行维护和安全管理等诸方面弄懂影响电气设备安全的主要因素，掌握主要电气设备运行故障分析，

特别是燃烧爆炸原因、防火防爆和火灾扑救措施，以保证设备、系统和人身安全。通过第四章的学习，可以了解雷电的产生、掌握各种防雷设备的原理、结构；认识雷电对供电系统、建筑物及人身的危害，掌握相应的防护措施；了解内部过电压的基本知识。绝缘是电气设备的基本组成部分，绝缘的故障是电气事故的主要原因之一，第五章介绍各种绝缘材料的电气性能、击穿过程，从而让读者了解绝缘实质，并为第六章的绝缘预防性试验打好基础。第六章的内容是电气设备绝缘预防性试验，通过试验了解绝缘状况，揭露绝缘中隐藏的缺陷，防止设备在运行中击穿。第七章力求让读者熟悉电气工作安全的组织和技术措施，学会正确使用和维护电气安全用具。第八章介绍了用户事故的分类、事故报告、事故调查分析和事故管理。

习 题

- 0-1 电能有何特点？
- 0-2 电气事故主要有哪些形式？
- 0-3 我国电气安全现状如何？
- 0-4 发生电气事故的原因主要有哪些？
- 0-5 何谓安全用电？影响电气安全的因素主要有哪些？
- 0-6 安全用电课程的主要内容是什么？

第一章 人身触电的防护

在日新月异的现代社会中,不论走到哪里,电总是伴随着你。衣、食、住、行、学习、工作、娱乐,从早到晚都在用着它。各种各样的家用电器更是犹如雨后春笋涌入千家万户。可是电有二重性,它为你服务,也会给人们带来新的灾害——触电伤亡,各种惨案常有发生。所以,现代化的生活迫切需要有人身触电的防护知识,预防人身触电就成为安全用电工作的主要内容之一。

第一节 电流的人体效应

电流通过人体,会引起人体的生理反应及机体的损伤。有关电流人体效应的理论和数据对于制定防触电技术的标准、鉴定安全型电气设备、设计安全措施、分析安全事故、评价安全水平等是必不可少的。

一、电流对人体的作用

电流对人体有两种类型的伤害,即电击和电伤。

(一) 电击

电击是电流通过人体内部,破坏人的心脏、肺部及神经系统,直至危及人的生命。实际证明,绝大部分的触电事故都是由电击造成的。

触电者如长时间不能脱离电源,即使流经人体的电流较小或没有通过要害部位,也会使触电者晕倒、失去知觉、窒息和死亡。电流通过控制呼吸的神经中枢时,将引起呼吸中止;较大的电流通过心脏区域时,将使心跳停止,通过中枢神经系统时会使其受到致命的损伤。

造成触电死亡的最常见原因是由于出现心室颤动,较小的电流就能产生心室颤动。

成年人心脏收缩与舒张交替变化的搏动周期约为 0.75s 左右,而每个搏动周期之间又约有 0.1s 的间歇时间,心脏传导组织的细胞在无外来刺激的条件下能自动地有节律地发出电信号,使心脏不停地跳动,这种性能我们称之为自律性。当人体触电以后,外来的大电流使正常的信号受到破坏,心脏的正常搏动必然会受到影响。触电电流和通电时间如超过某一极限值时,心脏的正常工作就要受到扰乱,不能再进行强力的收缩,而将要发生心肌颤动,这就称为心室颤动。

那么,多大的电流能引起人体心室颤动呢?人们通过对动物进行的大量试验,发现了许多重要的规律,并获得了大量的数据。

实验证明:①心室颤动电流与动物的体重或心脏重量成正比;②通电时间如比心脏搏动周期长时,将使引起心室颤动的电流值急剧下降;③心室颤动电流和触电的能量有关。假定触电者的体重为 50kg(典型体重),则大致可以用下面的触电致死公式来表达,即

$$I = \frac{(116 \sim 185)}{\sqrt{t}} \quad (\text{mA}) \quad (1-1)$$

其中, $t = 8.3 \times 10^{-3} \sim 5\text{s}$ 。

变换式 (1-1)，得触电能量公式为

$$I^2 t = 0.0135 \sim 0.0342 \quad (\text{A}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-2)$$

式 (1-2) 表明，发生心室颤动的允许限度是由触电能量所决定的。当 $I^2 t$ 小于上述数值时，发生心室颤动的几率小于 0.5%，或者说，对于一个正常的成年人来说，是不会产生心室颤动的。

(二) 电伤

所谓电伤是指由电流的热效应、化学效应或机械效应等对人体所造成的伤害。电伤多见于对人体外部造成的局部伤害，如电弧烧伤、电烙印、皮肤金属化、机械损伤、电光眼等多种伤害。在高压触电事故中，电伤与电击两种伤害往往同时发生。

电烧伤是最为常见的电伤，大部分触电事故都含有电烧伤成分。电烧伤可分为电流灼伤和电弧烧伤。电流灼伤是人体同带电体接触，电流通过人体时，因电能转换成的热能所引起的伤害。由于人体与带电体的接触面积一般都不大，且皮肤电阻又比较高，因而产生在皮肤与带电体接触部位的热量就较多，因此，使皮肤受到比体内严重得多的灼伤。电流愈大、通电时间愈长、电流途径上的电阻愈大，则电流灼伤愈严重。由于接近高压带电体时会发生击穿放电，因此，电流灼伤一般发生在低压电气设备上，因电压较低，形成电流灼伤的电流不太大，但数百毫安的电流即可造成灼伤，数安的电流则会形成严重的灼伤。在高频电流下，因皮肤电容的旁路作用，有可能发生皮肤仅有轻度灼伤而内部组织却被严重灼伤的情况。

电弧烧伤是由弧光放电造成的烧伤，也是最常见、最严重的电伤。弧光放电时电流很大能量也很大，电弧温度高达数千摄氏度，可造成大面积的深度烧伤，严重时能将肌体组织烘干、烧焦。电弧烧伤既可以发生在高压系统，也可以发生在低压系统。在低压系统中，带负荷（特别是感性负荷）拉开裸露的刀开关时，产生的电弧可能烧伤人的手部和面部；线路短路，跌落式熔断器的熔丝熔断时，炽热的金属微粒飞溅出来也可能造成灼伤；因误操作引起短路也可能导致电弧烧伤人体等。在高压系统中，由于误操作会产生强烈电弧，把人严重烧伤，人体过分接近带电体，其间距小于放电距离时，会直接产生强烈电弧对人放电，造成电弧烧伤，严重时会同电弧烧伤而死亡。

电烙印是电流通过人体后，由于电流的化学效应或机械效应的作用，在皮肤表面接触部位留下与接触带电体形状相似的斑痕，同烙印一般，叫做电烙印。斑痕处皮肤呈现硬变，表层坏死，失去知觉。此外，金属微粒因某种化学原因渗入皮肤，可使皮肤变得粗糙而坚硬，导致皮肤金属化，形成所谓“皮肤金属化”。电烙印和皮肤金属化都会对人体造成局部伤害。

机械损伤多数是由于电流作用于人体，使肌肉产生非自主的剧烈收缩所造成的。其损伤包括肌腿、皮肤、血管、神经组织断裂及关节脱位乃至骨折等。

电光眼表现为角膜和结膜发炎。弧光放电时辐射的红外线、可见光、紫外线都会损伤眼睛。在短暂照射的情况下，引起电光眼的主要原因是紫外线。

二、影响触电危险程度的因素

实际证明，绝大部分的触电事故是由电击造成的。影响电击伤害严重程度的因素主要有以下几方面。

(一) 通过人体的电流

通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显，引起心室颤动所需的时间越短，致命的

危险就愈大。但人们所感兴趣的是量的概念，即多大的电流能引起人体什么样的反应，为此对于工频电流，按照不同电流强度通过人体时的生理反应，可将作用于人体的电流分为感知电流、反应电流、摆脱电流和心室颤动电流等。

(1) 感知电流。感知电流是指在一定概率下，可引起人的感觉的最小电流。通过对人身直接进行的大量试验表明，对于不同的人、不同的性别，感知电流是不相同的。例如取其平均值，则成年男性的平均感知电流约为 1.1mA（有效值，下同），成年女性的平均感知电流约为 0.7mA 左右。

(2) 反应电流。反应电流是指在一定概率下，可引起意外的不自主反应的最小电流。这种预料不到的电流作用，可能导致高空摔跌或其他不幸。因此反应电流可能会给工作人员带来危险，而感知电流则不会造成什么后果。在数值上反应电流一般略大于感知电流。

(3) 摆脱电流。摆脱电流是指在一定概率下人触电后，在不需要任何外来帮助的情况下能自主摆脱电源的最小电流。通常规定正常成年男子的允许摆脱电流值为 16mA，正常成年女子为 10mA。

(4) 室颤电流。室颤电流是指触电后引起心室颤动概率大于 5% 的极限电流。由于心室颤动几乎终将导致死亡，因此，可以认为室颤电流即致命电流。引起心室颤动的机理，前面已经介绍，即心室颤动电流和人体体重、触电时间及触电能量等有关，在式（1-1）中，已综合考虑了心室颤动电流和以上诸因素的关系，故可用该式作为确定心室颤动电流的主要依据。大量的试验研究资料表明，当电流大于 30mA 时才有发生心室颤动的危险，因此可把 30mA 作为心室颤动电流的又一极限值。

不同电流对人体的影响见表 1-1。美国电气安全基金会给出的电流（60Hz）对人体影响的一组数据见表 1-2。

表 1-1 不同电流对人体的影响

电 流 (mA)	交 流 电 (50Hz)	直 流 电
0.6~1.5	开始有感觉，手指有麻感	无感觉
2~3	手指有强烈麻刺，颤抖	无感觉
5~7	手指痉挛	感觉痒、刺痛、灼热
8~10	手部剧痛，勉强可以摆脱带电体	热感增强
20~25	手迅速麻痹，不能摆脱带电体，剧痛，呼吸困难	手部轻微痉挛
50~80	呼吸麻痹，心室开始颤动	手部痉挛，呼吸困难
90~100	呼吸麻痹，持续 3s 或更长时间则心脏麻痹，心室颤动	呼吸麻痹
300 及以上	作用时间 0.1s 以上，呼吸和心脏麻痹，肌体组织遭到电流的热破坏	

表 1-2 美国电气安全基金会给出的电流（60Hz）对人体的影响

电 流 (mA)	0.5~3	3~10	10~40	30~75	100~200	200~500	1500 及以上
人体反应 (60Hz 交流电)	开始有热、 麻刺感	开始疼痛、 肌肉收缩	不能摆脱 带电体	呼吸系统 停止	心室纤维 颤动	心脏麻 痹	肌体组织和 器官烧伤

(二) 触电时间

研究表明，触电的时间越长，越容易引起心室颤动，危险性就越大，其主要原因有

三个:

(1) 能量的积聚。由式 (1-1)、式 (1-2) 可知, 触电的时间越长, 能量积累越多, 引起心室颤动电流减小, 使危险性增加。

(2) 与易损期重合的可能性增大。在心脏搏动周期中, 只有相应于心电图上约 0.2s 的 T 波 (特别是 T 波前半部) 这一特定时间是对电流最敏感的。该特定时间即易损期。电流持续时间越长, 与易损期重合的可能性越大, 电击的危险性就越大; 当电流持续时间在 0.2s 以下时, 重合易损期的可能性较小, 电击危险性也较小。

(3) 人体电阻下降。触电时间越长, 人体电阻因出汗等原因而降低, 使通过人体的电流进一步增加, 电击危险亦随之增加。

(三) 电流通过的途径

电流流经人体的途径, 对于触电的伤害程度影响甚大。电流通过心脏、脊椎和中枢神经等要害部位时, 触电的伤害最为严重。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。电流通过脊髓, 会使人截瘫, 电流通过头部会使人昏迷, 若电流较大, 会对大脑产生严重伤害而致死。一般来说, 以心脏伤害的危险性最大。因此流过心脏的电流越多, 电流路径越短的途径, 是电击危险性越大的途径。由此可见, 左手到前胸是最危险的电流途径。另外, 右手至前胸、单手至单 (双) 脚头到手和头到脚都是很危险的电流途径。从脚到脚一般危险性较小, 但不等于说没有危险。例如由于跨步电压而造成触电时, 开始电流仅通过两脚间, 触电后由于双足痉挛而摔倒, 此时电流就可能流经其他要害部位而造成严重后果。

电流途径与通过心脏电流的百分数见表 1-3。

表 1-3 电流途径与通过心脏电流的百分数

电流通过人体的途径	从一只手到另一只手	从左手到脚	从右手到脚	从一只脚到另一只脚
通过心脏电流的百分数 (%)	3.3	6.4	3.7	0.4

(四) 人体电阻

人体电阻有表面电阻和体积电阻之分。

表面电阻是沿着人体皮肤表面所呈现的电阻, 体积电阻是从皮肤到人体内部所构成的电阻。体积电阻和表面电阻都将对触电后果产生影响, 对电击来说, 体积电阻的影响最为显著, 表面电阻对触电后果的影响是比较复杂的, 当整个触电回路总的表面电阻较低时, 有可能产生抑制电击的积极影响, 反之, 当人体局部潮湿时, 特别是如果仅仅只有触及带电部分处的皮肤潮湿时, 那就会大大增加触电的危险性。这是因为人体局部潮湿, 对触电回路总的表面电阻值不产生很大的影响, 触电电流不会大量从人体表面分流, 而触电处皮肤潮湿, 将会使人体体积电阻下降, 以致使触电的危害性增大。

人体体积电阻是从皮肤到人体内部所构成的电阻, 即体积电阻是由皮肤电阻和体内电阻串联组成的。决定体积电阻值的主要因素是皮肤电阻。皮肤电阻随条件不同将在很大范围内变化, 使得人体电阻的变化幅度也很大。当人体皮肤处于干燥、洁净和无损伤的状态下时, 人体电阻可高达 40~100k Ω ; 而当皮肤处于潮湿状态如湿手、出汗或受到损伤时, 则人体电阻会降到 1000 Ω 左右; 如皮肤完全遭到破坏, 人体电阻将下降到 600~800 Ω 左右。必须注

意的是，这里所讲的皮肤电阻（下同）指的是皮肤沿体内方向的电阻值，与前述的表面电阻不应相混淆。

显然，人体电阻是表面电阻和体积电阻的并联值。

人体电阻除了和皮肤的状态有关外，还和触电的状况有关。当接触面积加大，接触压力增加时也会降低人体电阻；通过的电流加大，通电的时间加长，会增加发热出汗，或使皮肤炭化，也会降低人体电阻；接触电压增高，会击穿角质层，并增加机体电解，也会降低人体电阻。

另外，频率变化时，人体电阻将随频率的增加而降低，频率为 100kHz 时的人体电阻约为 50Hz 时的 50% 左右。

不同条件下的人体电阻见表 1-4。

表 1-4 不同条件下的人体电阻

接触电压 (V)	人体电阻 (Ω)			
	皮肤干燥	皮肤潮湿	皮肤湿润	皮肤浸入水中
10	7000	3500	1200	600
25	5000	2500	1000	500
50	4000	2000	875	440
100	3000	1500	770	375
250	1500	1000	650	325

- 注 1. 干燥场所的皮肤，电流途径为单手至双脚。
2. 潮湿场所的皮肤，电流途径为单手至双脚。
3. 有水蒸气、特别潮湿场所的皮肤，电流途径为双手至双脚。
4. 游泳池或浴池中的情况，基本为体内电阻。

(五) 电流类型及频率

电流的频率除了会影响人体电阻外，还会对触电的伤害程度产生直接的影响。一般讲，直流的危险性比交流小。不同频率的电流对人体的危害也不一样。多数研究者认为，50～60Hz 的交流电是对人体伤害最严重的频率，当低于或高于以上频率范围时，其伤害程度就会显著减轻。

直流电的最小感知电流，对于男性约为 5.2mA，女性约为 3.5mA；平均摆脱电流，对于男性约为 76mA，女性约为 51mA；可能引起心室颤动的电流，通电时间 0.3s 时约为 1300mA，通电时间 3s 时约为 500mA。对直流电来说一般可取人体能忍耐的极限电流为 100mA。

在高频情况下，人体也能耐受较大的电流，当频率高到 1000Hz 时，其伤害程度比工频时将有明显减轻。因此，医生常用高频电流给病人理疗。

人体还能耐受很大的雷电冲击电流。数十至一百微秒的冲击电流使人能感受冲击的最小值为数十毫安以上。

各种频率下人的死亡率见表 1-5。

表 1-5 各种频率下人的死亡率

频率 (Hz)	10	25	50	60	80	100	120	200	500	1000
死亡率 (%)	21	70	95	91	42	34	31	22	14	11

(六) 人体状况

电流对人体的作用,女性较男性更为敏感,女性的感知电流和摆脱电流约比男性低三分之一。由于心室颤动电流约与体重成正比,因此小孩遭受电击较成人危险。另外身体的健康状况与精神状态正常与否,对于触电伤害后果有一定的影响,如患有心脏病、神经系统疾病、结核病等病症的人因电击引起的伤害程度要比正常人严重。

三、安全电流和安全电压

在讨论触电防护措施之前,首先应该关心安全电流和安全电压的问题,因为它和安全工作的关系极大。安全电压是制订安全措施和进行保安设计的依据,安全电压如果规定得过低,对人身安全虽有好处,但将增加投资甚至会造成不必要的浪费。反之,如果把安全电压定得过高,虽然能满足经济性的要求,但要对人身安全造成威胁。因此在保证安全的前提下尽可能地提高经济性是合理确定安全电压的原则。

事实上对触电后果产生直接影响的是触电电流而不是电压,如果假定安全电压指的是作用于人体的有效电压,而且取人体电阻为一定数值,这样一个安全电流值就和某一安全电压相对应。在实际使用中,大家所以习惯用安全电压来作为遵循的指标,这是由于在制订安全措施和进行保安设计时,使用安全电压往往比使用安全电流来得简便。

(一) 安全电流

触电的特定条件和场合不同,触电后的危险程度也不同,因此确定安全电流的原则及安全电流的大小也就各不相同。例如,在某些情况下,触电后电源的存在时间是十分短暂的,经过一定时限后即能自动消除,因此当人体触及该电源时,无论是否能自主摆脱,过一定时间后,都会因为触电电源自动消失而摆脱,因此使得触电的持续时间有一定的界限。而触电的后果又和电流的持续时间有密切的关系,这就使得在确定安全电流值时必须考虑触电时间长短的影响,大接地电流系统的接触电压和跨步电压引起的触电就属于这种情况。

在大多数情况下,触电电源不会自动消除,可不计及触电时间的影响。但还可能由于触电场合不同,而对触电后果产生影响。例如在有些场合下发生触电不会产生其他形式的伤害,即所谓二次灾害;而在某些情况下,则会发生二次灾害。能否造成二次灾害,以及造成二次灾害的危险程度的不同,都将对安全电流的确定产生影响。为此本文将根据上述不同情况,分别对安全电流值进行讨论。

1. 触电电源能自动消除

越来越多的事实证明,电击致命大多由于心室颤动引起。从这一观点出发,可把不致引起心室颤动,而为人所能忍受的极限电流,作为安全电流值。当触电电源能自动消除时,确定允许电流时应考虑触电持续时间的影响。式(1-1)表达了引起心室颤动的极限电流和触电持续时间关系,显然可以把该式作为触电电源能自动消除情况下的安全电流表示式,则

$$I \leq \frac{116}{\sqrt{t}} \quad (1-3)$$

式中 I ——安全电流, mA;

t ——触电持续时间, $t=0.01\sim0.5\text{s}$ 。

2. 触电电源不会自动消失,但无二次灾害

所谓二次灾害,系指触电以后引起的其他性质的伤害。例如游泳池、浴池等场所,发生触电后可能招致溺死。触电电源不会自动消失而又没有发生二次灾害的危险,这种情况下,