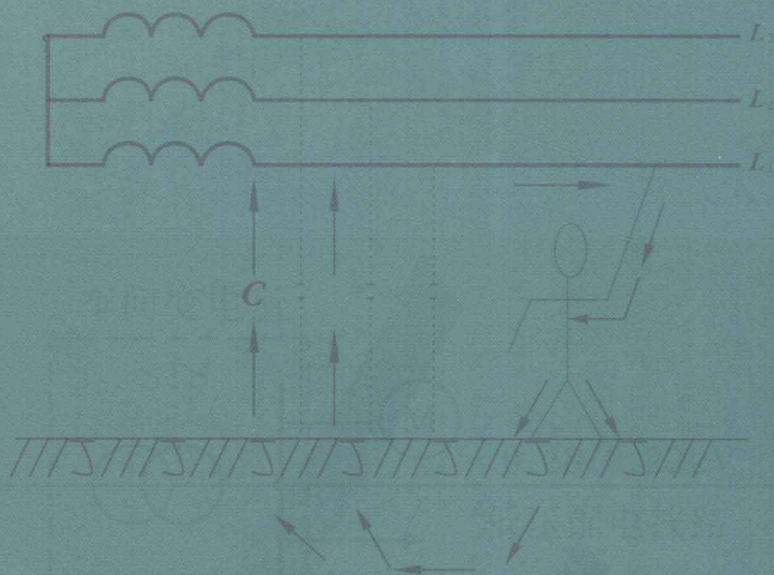


DIAN QI AN QUAN

# 电气安全

李刚 主编



# 电 气 安 全

李 刚 主 编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李 刚 2011

图书在版编目 (CIP) 数据

电气安全 / 李刚主编. — 沈阳: 东北大学出版社, 2011. 11  
ISBN 978-7-5517-0053-5

I. ①电… II. ①李… III. ①电气安全 IV. ①TM08

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 227386 号

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress. com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12.25

字 数: 314 千字

出版时间: 2011 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 任彦斌 潘佳宁

封面设计: 刘江旸

责任校对: 叶 子

责任出版: 唐敏志

---

ISBN 978-7-5517-0053-5

定 价: 30.00 元

# 前 言

电能是人类改造自然界的主要能源。电能 在转换、输送和使用的过程中因意外释放会引起触电，导致人身伤亡事故，还会成为火源引发火灾或爆炸事故。目前我国每年消耗的电能约 2 万亿千瓦时，随着国民经济的快速发展，对电能的需求还会进一步增加，随之而来的电气安全事故也会更加严峻。因此，学习和了解电气安全的基本原理，掌握预防电气安全事故的专业知识是安全专业学生及相关工作人员的一项重要任务。

本书从预防电气引起的触电、火灾爆炸、设备损坏事故的目的出发，较系统地阐述了人员触电、保护接地与保护接零、供电线路、继电保护、电气防火防爆、静电防护和防雷技术的有关原理和方法，并简要介绍了电气安全的管理措施。

本书理论联系实际，深入浅出，既可作为高等学校安全工程专业的教材，也可作为有关安全技术人员和安全管理人员的自学和培训教材。

本书在编写过程中，陈宝智教授、孙熙教授对内容的设置提出了宝贵意见。苑春苗博士，硕士研究生付林志、平洋、黄德政、李玉峰参加了部分章节的编写和资料收集，在此，一并致以诚挚的谢意。另外，对所引用文献、资料的作者也表示衷心的感谢。

由于本人学识所限，书中难免有疏漏、不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2011 年 8 月

# 目 录

<b>第 1 章 电气事故概述</b> .....	<b>1</b>
1.1 引 言 .....	1
1.2 电气事故 .....	1
1.2.1 电气事故的特征 .....	1
1.2.2 电气事故的类型 .....	2
1.2.3 触电事故的分布规律 .....	3
<b>第 2 章 人体触电事故及防护</b> .....	<b>5</b>
2.1 电流对人体的作用 .....	5
2.1.1 人体阻抗 .....	5
2.1.2 电流对人体的作用 .....	6
2.1.3 电流对人体的伤害分类 .....	7
2.1.4 人体触电形式 .....	8
2.2 触电预防技术措施 .....	9
2.2.1 加强绝缘 .....	9
2.2.2 屏护和间距 .....	12
2.2.3 安全特低电压 .....	13
2.2.4 电气隔离 .....	14
2.2.5 剩余电流动作保护 .....	15
2.3 触电急救 .....	19
2.3.1 脱离电源 .....	19
2.3.2 现场急救方法 .....	20
<b>第 3 章 接地与接零</b> .....	<b>22</b>
3.1 接地的基本概念 .....	22
3.2 中性点接地与不接地系统 .....	24
3.3 保护接地系统 .....	27
3.3.1 保护接地系统的原理 .....	27
3.3.2 保护接地系统的应用范围 .....	29
3.4 保护接零系统 .....	32
3.4.1 保护接零系统的原理 .....	32
3.4.2 保护接零系统的分类 .....	33

3.4.3	保护接零的作用和条件	34
3.4.4	重复接地	34
3.5	接地装置和接零装置	36
3.5.1	接地体	36
3.5.2	接地线和接零线	37
3.5.3	接地、接零装置的安全要求	38
3.5.4	接地装置的运行和维护	39
3.6	接地和接零计算	41
3.6.1	接地电阻	41
3.6.2	接地电阻计算	41
3.7	接地和接零的测量	44
3.7.1	接地电阻的测量	44
3.7.2	土壤电阻率的测量	45
3.7.3	相-零线回路检测	46
<b>第4章</b>	<b>供配电系统</b>	<b>49</b>
4.1	概述	49
4.1.1	电力系统	49
4.1.2	供配电系统	51
4.1.3	电力系统的特点与电能质量	52
4.2	电力负荷分级及供电要求	53
4.2.1	电力负荷的分级	53
4.2.2	供电要求	53
4.3	工业企业供、配电	54
4.3.1	工业企业供电	54
4.3.2	工业企业配电	54
4.3.3	变、配电所	57
4.4	供配电系统常见的电气设备	60
4.4.1	电弧的产生及灭弧方法	60
4.4.2	电气设备选择的一般原则	63
4.4.3	变压器	65
4.4.4	高压开关	68
4.4.5	高压熔断器	72
4.4.6	互感器	74
4.5	低压保护电器	78
4.5.1	低压刀开关	78
4.5.2	低压负荷开关	78
4.5.3	低压断路器	79
4.5.4	低压熔断器	81

---

<b>第5章 电气线路安全</b> .....	<b>83</b>
5.1 导线选择原则 .....	83
5.1.1 按长时允许电流选择导线截面 .....	84
5.1.2 按允许电压损失选择导线截面 .....	85
5.1.3 按经济电流密度选择导线截面 .....	87
5.1.4 按机械强度选择导线和电缆截面 .....	88
5.2 架空线 .....	89
5.2.1 架空线组成 .....	89
5.2.2 架空线路的事故类型及预防措施 .....	91
5.3 电 缆 .....	92
5.3.1 电缆的组成 .....	92
5.3.2 电缆线路故障及预防措施 .....	93
5.4 室内配线 .....	94
5.4.1 室内配线的基本要求 .....	94
5.4.2 室内配线的常见事故 .....	95
5.4.3 室内配线的安全管理 .....	95
<b>第6章 继电保护</b> .....	<b>97</b>
6.1 继电保护原理 .....	97
6.1.1 继电保护的作用 .....	97
6.1.2 继电保护的基本原理 .....	97
6.1.3 对继电保护装置的基本要求 .....	98
6.1.4 继电保护装置和继电器的分类 .....	99
6.1.5 电磁型继电器 .....	100
6.2 继电保护接线方式 .....	103
6.2.1 电流互感器的极性和电流方向 .....	103
6.2.2 电流保护装置的接线方式 .....	103
6.2.3 定时限过电流保护 .....	104
6.2.4 电流速断保护 .....	106
6.3 变压器保护 .....	107
6.3.1 瓦斯保护 .....	108
6.3.2 纵联差动保护 .....	109
6.3.3 电流速断保护 .....	109
6.4 电动机保护 .....	110
6.4.1 电动机过流及过负荷保护 .....	110
6.4.2 电动机的低压保护 .....	111
<b>第7章 电气防火防爆</b> .....	<b>112</b>
7.1 电气引燃原因 .....	112

7.1.1	危险温度 .....	112
7.1.2	电热器具和照明灯具的热表面 .....	114
7.1.3	电火花和电弧 .....	114
7.2	燃爆危险环境 .....	115
7.2.1	危险物质 .....	115
7.2.2	危险物质的分级分组 .....	115
7.2.3	爆炸性气体环境 .....	118
7.2.4	爆炸性粉尘环境 .....	121
7.2.5	火灾危险环境 .....	122
7.3	防爆电气设备和防爆电气线路 .....	122
7.3.1	防爆电气设备 .....	122
7.3.2	防爆电气线路 .....	127
7.4	电气防火防爆措施 .....	131
7.4.1	消除或减少爆炸性混合物 .....	131
7.4.2	隔离和间距 .....	132
7.4.3	消除引燃源 .....	133
7.4.4	爆炸危险环境接地和接零 .....	133
7.4.5	消防供电 .....	134
7.4.6	电气灭火 .....	134
<b>第8章</b>	<b>防静电技术 .....</b>	<b>136</b>
8.1	静电概述 .....	136
8.2	静电的产生 .....	136
8.2.1	固体静电 .....	136
8.2.2	液体静电 .....	139
8.2.3	气体静电 .....	141
8.3	人体静电 .....	141
8.4	静电参数 .....	142
8.5	静电的危害 .....	145
8.6	静电的控制和预防 .....	148
8.6.1	静电的消散 .....	148
8.6.2	静电的预防措施 .....	150
<b>第9章</b>	<b>防雷技术 .....</b>	<b>157</b>
9.1	雷电及其危害 .....	157
9.1.1	雷电现象 .....	157
9.1.2	雷电的种类 .....	157
9.1.3	雷电参数 .....	158
9.1.4	雷电的危害 .....	160



---

9.2 防雷装置 .....	161
9.2.1 接闪器 .....	161
9.2.2 避雷器 .....	165
9.2.3 消雷器 .....	167
9.2.4 引下线 .....	167
9.2.5 接地装置 .....	168
9.3 防雷措施 .....	169
9.3.1 建筑物的防雷 .....	169
9.3.2 电气设备防雷 .....	173
9.3.3 人身防雷 .....	174
<b>第10章 电气安全管理 .....</b>	<b>175</b>
10.1 电气事故的统计及分析 .....	175
10.1.1 电气事故统计和规律分析 .....	175
10.1.2 故障树分析 .....	176
10.2 电气安全的组织管理 .....	177
10.2.1 管理机构 .....	177
10.2.2 安全检查 .....	182
10.2.3 安全教育 .....	182
10.2.4 安全资料 .....	183
<b>参考文献 .....</b>	<b>184</b>

# 第 1 章 电气事故概述

## 1.1 引言

我国目前发电设备的总装机容量约 7 亿千瓦，随着国民经济的发展，对电力的需求还会不断增长。而发电、输变电及用电过程都存在人员触电、设备损坏的潜在风险。

有关资料统计，我国每消耗 1.5 亿度电就会导致 1 人触电死亡；而美国、日本等发达国家约每使用 20 亿~40 亿度电才导致 1 人触电死亡。因触电导致的死亡人数占我国意外伤害事故总数的 5% 左右。

电气事故还会引起火灾、爆炸，造成重大财产损失甚至重大人身伤亡事故。1989 年我国大型储油基地黄岛油库因雷电引发油罐内原油、重油发生沸溢、爆喷，导致 19 人（其中消防人员 13 人）死亡，直接经济损失达 3540 万元。

因此，我国无论是电气安全技术水平还是管理水平都亟待提高。

## 1.2 电气事故

电气事故是电气安全工程主要研究和管理的对象，掌握电气事故的特点和事故的分类情况，对做好电气安全工作具有重要的意义。

### 1.2.1 电气事故的特征

众所周知，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，如果对电可能产生的危害认识不足，控制和管理不当，防护措施不利，在电能的传递和转换过程中，将会发生异常情况，造成电气事故。电气事故具有以下特点。

#### (1) 电气事故危害严重

电气事故的发生伴随着危害和损失，严重的电气事故不仅会带来重大的经济损失，甚至还可能造成人员的伤亡。发生事故时，电能直接作用于人体，会造成电击；电能转换为热能作用于人体，会造成烧伤或烫伤；电能脱离正常的通道，会形成漏电、接地或短路，构成火灾、爆炸的起因。

随着电能的广泛利用，社会生产和人们日常生活对电能形成了越来越强的依赖，一旦发生大规模停电事故，危害波及面广，会对工农业生产、交通运输乃至居民生活等带来严重影响。人员密集场所一旦发生异常停电事故，有时会引发危及公共安全的恶性事件，形成群死群伤的恶性事故。

#### (2) 电气事故类型多

电气事故并不仅仅局限在用电领域的触电、设备和线路故障等，在一些非用电场所，电

能的释放也会造成灾害或伤害。例如，雷电、静电和电磁场危害等，都属于电气事故的范畴。

### (3) 电气事故危险直观识别难

由于电既看不见、听不到，又嗅不着，其本身不具备为人们直观识别的特征。由电所引发的危险不易为人们所察觉和识别。诸如儿童攀爬高压电气设施，维修电工误入带电间隔等形成触电的恶性事故时有发生。

### (4) 电气事故概念较为抽象

电气事故的概念较为抽象，事故致因机理和对策措施分析涉及电气工程理论，给电气事故的防范教育和安全措施落实带来了一定的难度。

### (5) 电气事故防护研究综合性强

电气事故的发生涉及许多学科。研究电气事故，不仅要研究电学，还要与力学、化学、生物学、医学等许多学科的知识综合起来一同研究。此外，在电气事故的预防上，既有技术上的措施，又有管理上的措施，这两方面缺一不可。一般来说，电气事故的根本原因是安全组织措施不健全和安全技术措施不完善。实践表明，即使有完善的安全技术措施，如果没有相适应的安全组织措施，仍然会发生电气事故。因此，必须重视防止电气事故的综合措施的实施。

电气事故是有规律性的，且其规律是可以被人们认识和掌握的。在电气事故中，大量的事故都具有重复性和频发性。无法预料、不可抗拒的事故毕竟是极少数。人们在长期的生产和生活实践中，已经积累了预防和消除电气事故的丰富经验，各种技术措施、各种安全操作规程及有关电气安全规章制度，都是这些经验和成果的体现，只要依照客观规律办事，不断完善电气安全技术措施和管理措施，电气事故是可以避免的。

## 1.2.2 电气事故的类型

根据能量转移论的观点，电气事故是由于电能非正常地作用于人体或其他系统所造成的。根据电能的不同作用形式，可将电气事故分为触电事故、电气火灾爆炸事故、静电危害事故、雷电灾害事故、射频电磁场危害和电气系统故障事故等。

### (1) 触电事故

触电事故是由电流形式的能量造成的事故。人身触电是经常发生的一种电气事故，当电流流过人体，人体直接接受局外电能时，人将受到不同程度的伤害，这种伤害叫做电击。当电流转换成其他形式的能量作用于人体时，人也将受到不同形式的伤害，这类伤害统称电伤。

### (2) 电气火灾爆炸

电气火灾爆炸是由电气引燃源引起的火灾和爆炸。电气装置在运行中产生的危险温度、电火花和电弧是电气引燃源的主要形式。在火灾和爆炸事故中，电气火灾爆炸事故占有很大的比例。随着人民生活水平不断提高，种类繁多的家用电器陆续进入居民家庭，与此同时，电气火灾也呈现上升趋势，从我国一些大城市的火灾事故统计可知，就引起火灾的原因而言，电气原因已经稳居首位。

### (3) 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。由此产生的静电其能量不大,不会直接使人致命。但是,其电压可能高达数十千伏乃至数百千伏,会发生放电,产生放电火花。

#### (4) 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,其能量释放出来会形成极大的破坏力。雷电破坏作用主要有以下几个方面。

① 直击雷放电、二次放电会引起火灾和爆炸。

② 雷电直接击中、金属导体二次放电、跨步电压及火灾与爆炸的间接作用,均会造成人员的伤亡。

③ 强大的雷电流、高电压可导致电气设备击穿或烧毁。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。雷击还可直接毁坏建筑物、构筑物。

#### (5) 射频电磁场危害

射频泛指频率在100kHz以上的无线电波或者相应的电磁振荡。射频伤害是由电磁场的能量造成的。射频电磁场的危害主要有如下两点。

① 在射频电磁场作用下,人体因吸收过量的辐射可引起中枢神经系统的机能障碍;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、高血压等;可造成皮肤表层灼伤或深度灼伤等。

② 在高强度的射频电磁场作用下,可能产生感应放电,会造成电引爆器件发生意外引爆。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。

#### (6) 电气系统故障事故

电气系统事故是由于电能输送、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均属于电气系统故障,在一定条件下,电气系统故障会引发电气系统事故。电气系统事故主要体现在以下两方面。

① 异常带电。电气系统中,原本不带电的部分因电路故障而异常带电,可导致触电事故发生。例如:电气设备因绝缘不良产生漏电,使其金属外壳带电;高压电路故障接地时,在接地处附近呈现出较高的跨步电压,形成有触电危险的条件。

② 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。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,无法正常施救而危及病人生命;排放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;公共场所发生异常停电,会引起妨碍公共安全的事,等等。

### 1.2.3 触电事故的分布规律

大量的统计资料表明,触电事故的分布是有规律性的。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的依据。根据国内外的触电事故统计分析,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月最为集中。其原因主要是这段时间正值炎热季节,人体衣着单薄且皮肤多汗,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。实践中，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，应当将低压方面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。因为这些设备经常移动，工作条件较差，容易发生故障。另外，在使用时需用手紧握进行操作，也增大了触电的风险。

④ 电气连接部位触电事故多。在电气连接部位机械牢固性较差，电气可靠性也较低，是电气系统的薄弱环节，较易出现故障。

⑤ 农村触电事故多。因为农村用电条件相对较差，电气安全技术装备和管理制度相对薄弱，人员又缺乏电气安全知识。

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，移动式设备和携带式设备多，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，部分人员还缺乏必要的电气安全的知识。

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，在一定的条件下，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。而且，通过在低压系统安装剩余电流动作保护装置，能使低压触电事故大大降低，低压触电事故与高压触电事故的比例也就发生了变化。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。

## 第2章 人体触电事故及防护

### 2.1 电流对人体的作用

电流通过人体，会引起人体的生理反应及机体的损坏。有关电流对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，设计电气安全措施，分析电气事故，评价安全水平等是必不可少的。

#### 2.1.1 人体阻抗

人体阻抗是定量分析人体电流的重要参数之一，也是处理许多电气安全问题所必须考虑的基本因素。

人体皮肤、肌肉、血液、细胞组织及其结合部等构成了含有电阻和电容的阻抗。人体各部分的电阻率从大到小依次为：皮肤、脂肪、骨骼、神经、肌肉、血液，即电阻率最大的是皮肤。因此，皮肤电阻在人体阻抗中占有很大的比例。

人体阻抗包括皮肤阻抗和体内阻抗，其等效电路如图 2-1 所示。

##### (1) 皮肤阻抗 $Z_p$

皮肤由外层的表皮和表皮下面的真皮组成。表皮没有血管和神经细胞，其最外层的角质层，电阻很大，在干燥和清洁的状态下，其电阻率可达  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 。真皮中分布着茂密的微血管网络、毛囊、汗腺和神经末梢等。

皮肤阻抗是指表皮阻抗，即皮肤上电极与真皮之间的阻抗，以皮肤电阻和皮肤电容并联来表示。皮肤电容是指皮肤上电极与真皮之间的电容。

皮肤阻抗值与接触电压、电流幅值、持续时间、频率、皮肤潮湿程度、接触面积和压力等因素有关。当接触电压小于 50V 时，皮肤阻抗随接触电压、温度、呼吸条件等因素影响有显著的变化，但其值还是比较高的；当接触电压在 50 ~ 100V 时，皮肤阻抗明显下降，当皮肤被击穿后，其阻抗可忽略不计。

##### (2) 体内阻抗 $Z_i$

体内阻抗是除去表皮之后的人体阻抗，虽然存在少量电容，但可以忽略不计。因此，体内阻抗基本上可以视为纯电阻。体内阻抗主要决定于电流途径。当接触面积过小，例如仅数平方毫米时，体内阻抗将会增大。

图 2-2 所示为不同电流途径的体内阻抗值，图中数值是用与手—手内阻抗比值的百分数表示的。无括号的数值为单手至所示部位的数值；括号内的数值为双手至相应部位的数值。

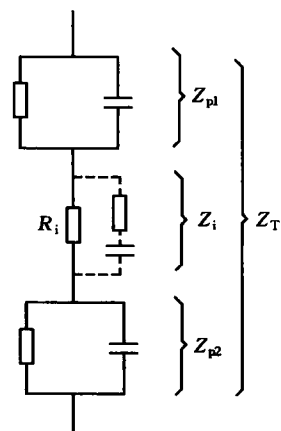


图 2-1 人体阻抗的等效电路  
 $Z_i$ —体内阻抗； $Z_{p1}$ 、 $Z_{p2}$ —皮肤阻抗； $Z_T$ —总阻抗

如电流途径为单手至双脚，数值将降至图上所标明的75%；如电流途径为双手至双脚，数值将降至图上所标明的50%。

### (3) 人体总阻抗 $Z_T$

人体总阻抗是包括皮肤阻抗及体内阻抗在内的全部阻抗。接触电压大致在 50V 以下时，由于皮肤阻抗的变化，人体阻抗也在很大的范围内变化；而在接触电压较高时，人体阻抗与皮肤阻抗关系不大。在皮肤被击穿后，近似等于体内阻抗。另外，由于存在皮肤电容，人体的直流电阻高于交流阻抗。

通电瞬间的人体电阻叫做人体初始电阻。在这一瞬间，人体各部分电容尚未充电，相当于短路状态。因此，人体初始电阻近似等于体内阻抗，其影响因素也与体内阻抗相同。根据试验，在电流途径从左手到右手或从单手到单脚、大接触面积的条件下，相应于 50% 概率的人体初始电阻为 500 $\Omega$ 。

在皮肤干燥时，人体工频总阻抗一般可按 1000 ~ 3000 $\Omega$  考虑；潮湿的情况下，可按 500 ~ 800 $\Omega$  考虑。

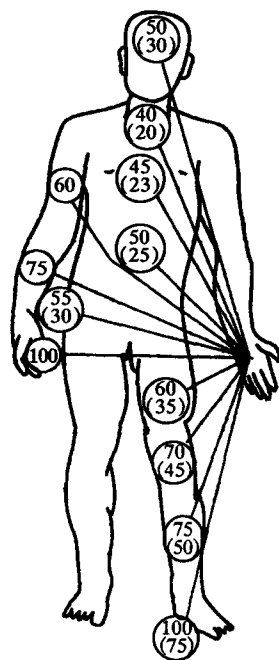


图 2-2 不同电流途径的体内阻抗值

## 2.1.2 电流对人体的作用

电流通过人体，会令人产生发麻、刺痛、压迫、打击等感觉，还会使人出现痉挛、血压升高、昏迷、心律不齐、窒息、心室颤动等症状，严重时导致死亡。

电流对人体伤害的程度与通过人体电流的大小、电流通过人体的持续时间、电流通过人体的途径、电流的种类等多种因素有关。而且，上述各个影响因素相互之间，尤其是电流大小与通电时间之间也有着密切的联系。

### (1) 伤害程度与电流大小的关系

通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显，伤害越严重。对于工频交流电，按通过人体的电流强度的不同以及人体呈现的反应不同，将作用于人体的电流划分为三级。

① 感知电流和感知阈值。感知电流是指电流流过人体时可引起感觉的最小电流。不同的人，感知电流值是不同的。就平均值(概率 50%)而言，成年男性感知电流约为 1.1mA(有效值，下同)；成年女性约为 0.7mA。相对于群体而言，感知电流的最小值称为感知阈值。感知阈值可按 0.5mA 考虑，并且与时间因素无关。感知电流一般不会对人体造成伤害，但可能因不自主反应而导致由高处跌落等二次事故。

② 摆脱电流和摆脱阈值。摆脱电流是指人在触电后能够自行摆脱带电体的最大电流。超过摆脱电流时，人体受刺激肌肉收缩或中枢神经失去对手的正常指挥作用，导致无法自主摆脱带电体。不同的人，摆脱电流值是有差异的。就平均值(概率 50%)而言，成年男性摆脱电流约为 16mA，成年女性约为 10.5mA，儿童的摆脱电流较成人要小。相对于正常群体而言，摆脱电流的最小值称为摆脱阈值。成年男性最小摆脱电流约为 9mA，成年女性最小摆脱电流约为 6mA，由此可见，摆脱阈值约为 10mA。

③ 室颤电流和室颤阈值。室颤电流是指引起心室颤动的最小电流。不同的人，室颤电流的大小是不同的。相对于正常群体而言，最小的室颤电流被定义为室颤阈值。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。室颤电流与电流持续时间关系密切。当电流持续时间超过心脏周期时，室颤电流仅为 50mA 左右；当电流持续时间小于心脏周期时，室颤电流为数百毫安。当电流持续时间小于 0.1s 时，只有电击发生在心脏易损期，500mA 以上乃至数安的电流才能够引起心室颤动。

#### (2) 伤害程度与电流持续时间的关系

通过人体电流的持续时间越长，越容易引起心室颤动，危险性就越大。这主要是因为以下几点。

① 能量积累。电流持续时间越长，能量积累越多，心室颤动电流减小，使危险性增加。

② 与心脏易损期重合的可能性增大。电流持续时间越长，与心脏易损期重合的可能性就越大，电击的危险性就越大。

③ 体电阻下降。电流持续时间越长，人体电阻因皮肤发热、出汗等原因而降低，使通过人体的电流进一步增加，危险性也随之增加。

#### (3) 伤害程度与电流途径的关系

电流总是从电阻最小的途径通过，所以触电情况不同，电流通过人体的主要途径也不同，其造成人体伤害的程度也不同。电流通过心脏、中枢神经和脊椎等要害部位时，电击的伤害最为严重。

利用心脏电流因数可以粗略估计不同电流途径下心室颤动的危险性。心脏电流因数是某一路径的心脏内电场强度与从左手到脚流过相同大小电流时的心脏内电场强度的比值。表 2-1 列出了各种电流途径的心脏电流因数。

表 2-1 各种电流途径的心脏电流因数

电流途径	心脏电流因数
左手—左脚、右脚或双脚	1.0
双手—双脚	1.0
左手—右手	0.4
右手—左脚、右脚或双脚	0.8
背—右手	0.3
背—左手	0.7
胸—右手	1.3
胸—左手	1.5
臀部—左手、右手或双手	0.7

例如，从左手到右手流过 150mA 电流，由表 2-1 可知，左手到右手的心脏电流因数为 0.4，因此，150mA 电流引起心室颤动的危险性与左手到双脚电流途径下 60mA 电流的危险性大致相同。

### 2.1.3 电流对人体的伤害分类

电流对人体的伤害可分为电击和电伤两大类。



### (1) 电 击

电击是电流通过人体，作用于人的心脏、中枢神经系统、肺部等影响其正常工作，严重时会造成危及生命的伤害。

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。

### (2) 电 伤

电伤是电流的热效应、化学效应、机械效应等对人体所造成的伤害。此伤害多见于机体的外部，往往在机体表面留下伤痕。能够形成电伤的电流通常比较大。电伤属于局部伤害，其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、机械损伤等多种伤害。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。在全部电烧伤的事故当中，大部分事故发生在电气维修作业时的电气作业人员身上。

电烙印是电流通过人体后，在皮肤表面接触部位留下与接触带电体形状相似的斑痕，如同烙印。斑痕处皮肤呈现硬变，表层坏死，失去知觉。

皮肤金属化是高温电弧使周围金属熔化、蒸发并飞溅渗透到皮肤表层内部所造成的。受伤部位呈现粗糙、张紧。

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。其损伤包括肌腱、皮肤、血管、神经组织断裂以及关节脱位甚至骨折等。

#### 2.1.4 人体触电形式

人体触电一般有与带电体直接接触触电、跨步电压触电、接触电压触电等形式。

人体直接接触带电导体造成的触电，称为直接接触触电。如果人体直接接触到电气设备或电力线路中一相带电导体，或者与高压系统中一相带电导体的距离小于该电压的放电距离造成对人体放电，电流将通过人体流入大地，这种触电称为单相触电，如图 2-3 所示。如果人体同时接触电气设备或线路中两相带电导体，或者在高压系统中，人体同时过分靠近两相导体而发生电弧放电，则电流将从一相导体通过人体流入另一相导体，这种触电现象称为两相触电，如图 2-4 所示。显然，发生两相触电危害更严重，因为这时作用于人体的电压是线电压。

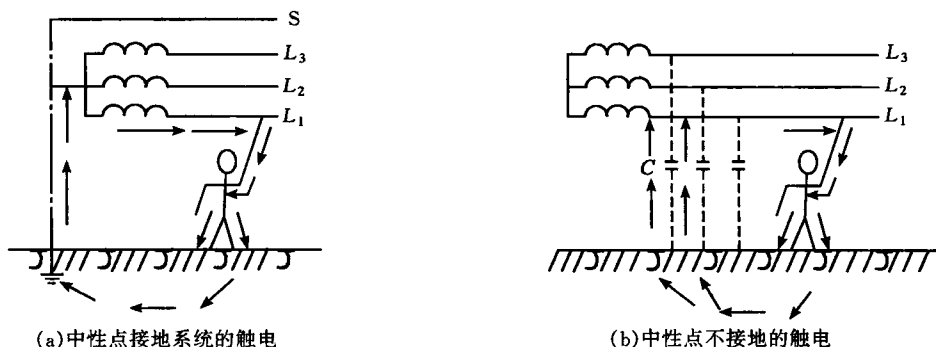


图 2-3 单相触电示意图