

教育部特色专业教材  
北京市特色专业教材

# 电气 安全工程

DIANQI ANQUAN GONGCHENG

梁慧敏 张 奇 白春华 主编

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

教育部特色专业教材  
北京市特色专业教材

# 电气安全工程

梁慧敏 张 奇 白春华 主编

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书以电气为范围,以安全为中心,研究各种电气事故的规律、事故机理和相关的安全理论、技术措施及管理方法。本书共十章,主要内容有电气安全基础、直接接触电击防护、间接接触电击防护、电气线路安全、电气设备安全、电气防火防爆、雷电防护、静电防护、电磁防护和电气安全管理。

本书主要用作大专院校的专业教材或教学参考书,还可供有关研究人员、工程技术人员和技术管理人员自学和查阅之用。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

电气安全工程/梁慧敏,张奇,白春华主编. —北京:北京理工大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-5640-3000-1

I. ①电… II. ①梁…②张…③白… III. ①电气设备-安全技术-高等学校-教材 IV. ①TM08

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第011014号

---

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/21

字 数/486千字

版 次/2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷

印 数/1~3000册

定 价/38.00元

责任校对/张沁萍

责任印制/边心超

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

PREFACE

电气安全是安全领域中与电气相关联的科学技术及管理工程，具有涉及范围广、技术发展迅速的特点。

电气安全在工程技术方面的任务是完善和研发电气安全技术方法，以求建立完整的电气安全体系，并注重开发先进的自动化技术和电气检测、监测技术在安全领域的应用。在管理科学方面的任务是逐步提高相关人员的电气安全水平，逐步实现电气安全标准化，引进系统工程的方法，提高电气安全管理的科学性。本书侧重电气技术方面，以电气安全方法和电气危险因素为主线，介绍预防电气事故的各种理论和工程方法。

2006年国防科技工业通过科技人才需求调查表明，安全工程专业为国防科技工业人才紧缺专业。国防科技工业急需大量具有国防科技工业背景的安全技术与管理人才，这为安全工程专业教育的发展提供了机遇。国防科技工业系统中易燃易爆、有毒有害危险化学品的科研、生产、经营和存储单位非常多，易燃易爆场所条件下的特种设施和用电设备多，电气事故风险概率高，危险性大。本教材根据编者对国防科技工业安全生产特点的理解，兼顾本科教学学时的实际需要，在多年教学讲义的基础上编写而成。

本书共十章，第四、六、七、八、九章由梁慧敏编写，第二、三、五章由张奇编写，第一、十章由白春华编写，于国柱、马秋菊等参与了校对工作。

本书主要用作大学本科安全工程专业的专业教材，并可作为各类电气安全教学人员的教学参考书，还可供从事电气工作的工程技术人员和技术管理人员自学和查阅之用。

在编书过程中，编者参阅了大量相关资料、教材和专著，编者在此对所有参阅文献的作者表示衷心感谢。

由于编著者水平所限，书中不当乃至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

CONTENTS

<b>第一章 电气安全基础</b> .....	1
<b>第一节 电气事故</b> .....	1
一、电气事故的类型.....	1
二、电气事故的特点.....	5
三、触电事故的分布规律.....	6
<b>第二节 电击效应</b> .....	8
一、人体阻抗的组成.....	8
二、电击伤害的机理.....	10
三、电击效应的影响因素.....	12
<b>第三节 触电急救</b> .....	20
一、脱离电源.....	20
二、现场救护.....	21
三、电伤的处理.....	24
<b>复习思考题</b> .....	25
<b>第二章 直接接触电击防护</b> .....	26
<b>第一节 电击事故的防护准则及措施</b> .....	26
一、防止电击事故的基本原则和概念.....	26
二、防止电击事故的措施.....	27
<b>第二节 绝缘</b> .....	27
一、绝缘材料的电气性能.....	28
二、绝缘的破坏.....	31
三、绝缘检测.....	35
<b>第三节 屏护和间距</b> .....	40
一、屏护.....	40
二、间距.....	41
<b>第四节 双重绝缘和加强绝缘</b> .....	46
一、双重绝缘和加强绝缘的结构.....	46
二、双重绝缘和加强绝缘的安全条件.....	47
三、不导电环境.....	48
<b>第五节 特低电压</b> .....	48
一、特低电压的限值和额定值.....	48
二、特低电压防护的类型及安全条件.....	50

三、SELV 和 PELV 的安全电源及回路配置 .....	50
第六节 剩余电流保护 .....	51
一、剩余电流动作保护装置的原理 .....	52
二、剩余电流动作保护装置的分类 .....	54
三、剩余电流动作保护装置的主要技术参数 .....	55
四、剩余电流动作保护装置的应用 .....	57
五、剩余电流动作保护的分级保护方式 .....	60
第七节 电气隔离 .....	62
一、电气隔离的安全原理 .....	62
二、电气隔离的安全条件 .....	62
三、等电位联结 .....	63
复习思考题 .....	65
第三章 间接接触电击防护 .....	66
第一节 电气接地 .....	66
第二节 IT 系统 .....	69
一、IT 系统的安全原理 .....	69
二、IT 系统的接地电阻 .....	72
三、IT 系统的过电压防护 .....	73
四、IT 系统的应用范围 .....	74
五、IT 系统的绝缘监视 .....	75
第三节 TT 系统 .....	77
一、工作接地 .....	77
二、TT 系统的安全原理 .....	78
三、TT 系统的应用范围 .....	79
第四节 TN 系统 .....	80
一、TN 系统的安全原理 .....	81
二、TN 系统的分类 .....	81
三、TN 系统的安全要求 .....	81
四、TN 系统的应用范围 .....	87
五、相 - 零线回路检测 .....	87
第五节 保护导体 .....	89
一、保护导体的组成 .....	89
二、保护导体的截面积 .....	90
三、保护导体的安装 .....	91
第六节 接地装置 .....	91
一、接地体 .....	92
二、接地线 .....	93
三、接地装置的设计 .....	94
四、接地装置的安装 .....	102

五、接地电阻测量和维护	106
复习思考题	108
<b>第四章 电气线路安全</b>	<b>109</b>
<b>第一节 工业企业供配电</b>	<b>109</b>
一、电力系统构成	109
二、工业企业供电	111
三、工业企业配电	113
<b>第二节 电气线路的种类及特点</b>	<b>116</b>
一、架空线路	116
二、电缆线路	124
三、室内配电线路	128
<b>第三节 负荷计算</b>	<b>131</b>
一、设备功率的确定	131
二、负荷计算的方法	132
<b>第四节 电气线路安全条件</b>	<b>136</b>
一、导电能力	137
二、机械强度	144
三、导线连接	146
四、线路敷设	148
五、线路管理	149
复习思考题	149
<b>第五章 电气设备安全</b>	<b>150</b>
<b>第一节 电气设备安全分类</b>	<b>150</b>
一、电气设备的用电环境类型	150
二、电气设备外壳防护等级	151
三、电气设备防触电保护分类	154
<b>第二节 常用电气设备安全</b>	<b>155</b>
一、电动机	155
二、单相电气设备	162
<b>第三节 低压保护电器</b>	<b>168</b>
一、低压保护电器的功能	168
二、自动断电保护电器	169
三、隔离保护电器	177
<b>第四节 变配电设备安全</b>	<b>179</b>
一、变配电所设备	180
二、电力变压器	182
三、互感器	188
四、高压电器设备	190
五、电力电容器	195



复习思考题	198
<b>第六章 电气防火防爆</b>	199
第一节 电气装置运行状态及电气引燃源	199
一、电气装置运行状态	199
二、电气引燃源	200
第二节 危险物质和危险环境	203
一、危险物质	203
二、危险环境	206
第三节 防爆电气设备和防爆电气线路	209
一、防爆电气设备	209
二、防爆电气线路	216
第四节 电气防火和灭火	220
一、电气防火防爆措施	220
二、消防供电	221
三、电气灭火	222
复习思考题	223
<b>第七章 雷电防护</b>	225
第一节 雷电的种类及危害	225
一、雷电的产生机理和特点	225
二、雷电的种类	225
三、雷电参数	228
四、雷电的危害	231
第二节 雷电防护措施	232
一、防雷建筑物的分类	232
二、雷击次数和建筑物等效面积的计算	234
三、防雷装置	235
四、防雷技术措施	248
复习思考题	254
<b>第八章 静电防护</b>	256
第一节 静电的产生	256
一、静电的产生机理	256
二、静电产生的影响因素	262
三、静电的消散	265
第二节 静电的危害及静电参数测量	267
一、静电的危害	267
二、静电参数的测量	269
第三节 静电防护措施	271
一、基本静电防护措施	271
二、固体物料防静电措施	276



三、液体物料防静电措施·····	277
四、气体物料防静电措施·····	279
复习思考题·····	280
<b>第九章 电磁防护</b> ·····	<b>281</b>
第一节 电磁辐射的特点及危害·····	281
一、电磁辐射的产生·····	281
二、电磁辐射的分类·····	283
三、电磁辐射参数·····	284
四、电磁辐射的危害·····	285
第二节 电磁辐射安全标准·····	289
一、电磁场安全卫生标准·····	289
二、电火工品的电磁场安全标准·····	291
三、电磁辐射测量·····	292
第三节 电磁防护措施·····	294
一、电磁屏蔽·····	295
二、电磁接地·····	297
三、电磁吸收·····	298
四、滤波技术·····	299
复习思考题·····	300
<b>第十章 电气安全管理</b> ·····	<b>301</b>
第一节 电气安全组织管理·····	301
一、规章制度·····	301
二、管理机构和人员·····	302
三、安全资料·····	303
四、安全检查·····	304
五、安全教育·····	304
第二节 电工安全用具·····	304
一、绝缘安全用具·····	304
二、携带式电压指示器和电流指示器·····	306
三、登高安全用具·····	307
四、临时接地线、遮栏和标示牌·····	308
五、安全用具的使用和试验·····	309
第三节 电气检修安全措施·····	311
一、电气检修安全管理制度·····	311
二、检修技术管理措施·····	316
第四节 电气安全分析和评价·····	318
一、事故树分析·····	318
二、安全评价·····	320
复习思考题·····	321
<b>参考文献</b> ·····	<b>322</b>

# »» 第一章

## 电气安全基础

### 学习目标

1. 掌握电气事故的种类。
2. 掌握电流对人体作用的相关知识。
3. 了解触电急救的基本方法。

电能是国民经济的重要能源。随着现代化的发展，电能已被广泛应用于工农业生产、人民生活、国防军事、航空航天等各个领域，在国民经济和国家安全中发挥着越来越重要的作用。近年来，我国的用电量大幅度增加，但电气安全技术的研究和应用并不同步。据有关安全生产管理部门统计，在全国工矿企业因工事故死亡人数中，触电死亡人数约占10%。当前，技术先进的国家每使用大约30亿度电死亡1人，而我国每使用大约1亿度电死亡1人。与发达国家相比，全民电气安全意识和电气安全水平亟待提高。

本书从预防电气事故的理念出发，以电气运行管理为研究对象，根据已知的电气运行状况和电气事故资料，揭示电气事故的发生原因、电气危险因素，探讨电气安全技术措施和管理措施。

### 第一节 电气事故

电气安全工程的任务是研究各种电气事故的机理、构成、规律、特点及其防范措施，及如何正确、合理地使用电气装置以获得安全高效的劳动条件。掌握电气事故的特点和规律，对做好电气安全工作具有重要意义。

#### 一、电气事故的类型

电气事故是电能非正常地作用于人体或系统而造成的安全事故。按照灾害形式，电气事故可分为人身事故、设备事故、火灾事故和爆炸事故等。按照电路情况，电气事故可分为短路事故、断路事故、接地事故和漏电事故等。按照电能的不同作用形式，电气事故可分为触电伤害事故、电气系统故障事故、电气火灾爆炸事故、雷电危害事故、静电危害事故和电磁场危害事故等。

##### 1. 触电伤害事故

触电伤害事故是电流通过人体时，由电能造成的人体伤害事故。触电事故可分为电击和电伤两大类。

### (1) 电击

电击是电流通过人体，刺激机体组织，使肌肉非自主地发生痉挛性收缩而造成的生理伤害，严重时破坏人体的心脏、肺部、神经系统的正常工作，甚至危及生命。绝大部分触电事故是电击造成的。人身触及带电体、漏电设备以及雷击、静电、电容器放电等，都可能导致电击。电击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。

按照人体触及带电体的方式，电击可分为单相触电、两相触电和跨步电压触电等。

① 单相触电是指人体接触到地面或其他接地体的同时，人体另一部位触及带电体的某一相所引起的电击，如图 1-1 所示。根据统计资料，单相触电事故占全部触电事故的 70% 以上。因此，防止单相触电事故是触电防护技术措施的重点。

② 两相触电是指人体的两个部位同时触及两相带电体所引起的电击，如图 1-2 所示。在此情况下，人体所承受的电压为三相电力系统中的线电压，其电压值高于单相触电时的相电压，危险性也较大。

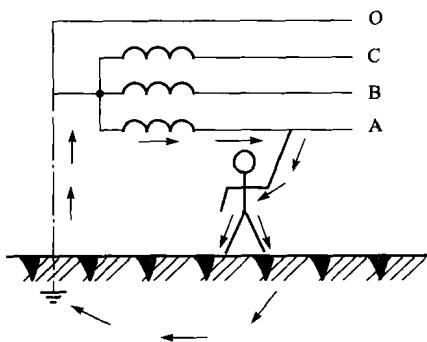


图 1-1 单相触电示意图

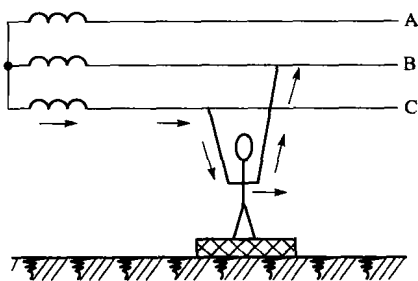


图 1-2 两相触电示意图

③ 跨步电压触电是指人体站立或行走在带电体的接地点附近时，由人体两脚之间的电位差引起的电击，如图 1-3 所示。高压故障接地处或大电流（如雷电）流经的接地装置附近都可能出现较高的跨步电压。因为跨步电压本身不大，而且通过人体重要组织的电流分量较小，跨步电压直接电击的危险性一般不大，但可能造成跌倒等二次伤害。

### (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。能够形成电伤的电流通常比较大。电伤属于局部伤害，多见于机体的外部，往往在机体表面留下明显的伤痕，其危险程度决定于受伤面积、受伤深度、受伤部位等。人体皮肤变化与电流密度和通电时间的关系如图 1-4 所示。

电伤包括电烧伤、电烙印、皮肤金属化、机械性损伤、电光眼等多种伤害。统计资料表明：电伤事故约占触电事故的 75%，其中电烧伤约占总数的 40%，电烙印约占 7%，皮肤金属化约占 3%，机械性损伤约占 0.5%，电光眼约占 1.5%，综合性电伤约占 23%。

① 电烧伤是电流热效应造成的、最常见的电伤，大部分事故发生在电气维修人员身上。电烧伤可分为电流灼伤和电弧烧伤两类。

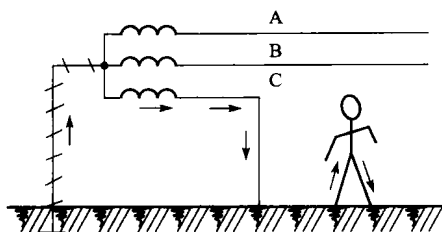


图 1-3 跨步电压触电示意图

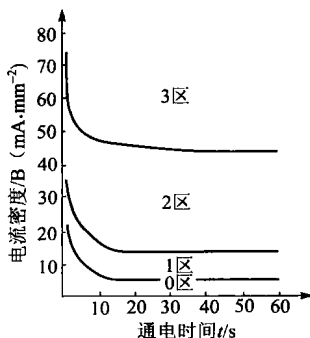


图 1-4 人体皮肤变化与电流密度和通电时间的关系图

0区—无变化；1区—皮肤发红；2区—出现电流痕迹；3区—皮肤碳化

电流灼伤是电流通过人体时，因电能转换成的热能引起的伤害。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，因而在皮肤与带电体接触部位产生的热量就较多，皮肤受到的灼伤比体内严重得多。电灼伤的后果是皮肤发红、起泡、组织烧焦并坏死、肌肉和神经坏死、骨髓受伤。治疗中多数需要截肢，严重的导致死亡。电流越大、通电时间越长、电流途径上的电阻越大，则电流灼伤越严重。数百毫安的电流就可造成灼伤，数百安的电流则会形成严重的灼伤。在高频电流下，皮肤电容会产生旁路作用，可能会发生皮肤仅有轻度灼伤而内部组织却被严重灼伤的情况。由于人体接近高压带电体时会发生击穿放电，所以电流灼伤一般发生在低压电气设备或低压线路上。

电弧烧伤是由弧光放电造成的烧伤。弧光放电时电流能量很大，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。电弧烧伤是最常见、最严重的电伤。电弧烧伤分为直接电弧烧伤和间接电弧烧伤。电弧发生在带电体与人体之间，有电流通过人体的烧伤称为直接电弧烧伤。电弧发生在人体附近对人体形成的烧伤，以及被熔化溅落的金属烫伤称为间接电弧烧伤。直接电弧烧伤一般与电击同时发生。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，拉开带负荷的裸露闸刀开关时，产生的电弧会烧伤操作者的手部和面部；当开启式熔断器熔断时，炽热的金属微粒飞溅出来会造成灼伤；因误操作引起短路也会导致电弧烧伤等。在高压系统中，误操作会产生强烈的电弧，造成严重的烧伤；人体过分接近带电体，其间距小于放电距离时，会产生强烈的弧光放电，造成电弧烧伤，严重时会造成死亡。

② 电烙印是指电流化学效应和机械效应产生的电伤，通常在人体和带电部分接触良好的情况下才会发生。电烙印的后果是皮肤表面留下和所接触的带电部分形状相似的圆形或椭圆形的肿块痕迹，有明显的边缘，皮肤颜色呈灰色或淡黄色，受伤皮肤硬化失去弹性，表皮坏死，形成永久性斑痕，造成局部麻木或失去知觉。

③ 皮肤金属化是在高温电弧的作用下，金属熔化、气化，金属微粒飞溅并渗透到皮肤表层所造成的电伤，多与电弧烧伤同时发生。皮肤金属化的后果是皮肤变得粗糙、硬化。根据人体表面渗入的不同金属，皮肤呈现不同的颜色。皮肤金属化伤害是局部性的，金属化的皮肤经过一段时间后会逐渐剥落，不会永久存在而造成终身痛苦。

④ 机械性损伤是电流作用于人体时，由于中枢神经反射、肌肉产生非自主的剧烈收缩、

体内液体汽化等作用而导致的机体组织伤害。机械性损伤的后果有肌腱、皮肤、血管、神经组织断裂以及关节脱位乃至骨折等。

⑤ 电光眼是弧光放电时辐射的红外线、可见光、紫外线对眼睛的伤害。电光眼表现为角膜和结膜发炎，有时需要数日才能恢复视力。在短暂照射的情况下，引起电光眼的主要原因是紫外线。

另外，电击、电伤还可能造成神经伤害，例如触电人员感到难受，全身倦怠，甚至出现狂躁易怒、惊吓等症状。

## 2. 电气系统故障事故

电气系统故障事故是电能输送、分配、转换过程中失去控制而产生的、会导致人员伤亡及重大财产损失的事故。例如，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。电气系统故障危害主要体现在两方面：

### (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，可导致触电事故和设备损毁事故的发生。例如，电气设备因绝缘不良使其金属外壳带电，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。

### (2) 异常停电

由于某些大型电气设备或线路故障，造成公用电网系统波动，甚至电网解裂的重大事故。例如，大型起重吊装设施触及系统高压电网，造成接地或短路事故，引起系统变电站掉闸，区域供电停止，甚至系统电网瘫痪；或者用户出现重大短路事故，使部分地区电压大幅度下降，用电设备无法正常使用，甚至烧毁。

在某些特定场合，异常停电会造成人身伤亡，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群体性事故。

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。

## 3. 电气火灾爆炸事故

电气火灾爆炸事故是电气引燃源引发的火灾和爆炸事故。各种电气设备在使用过程中出现短路、散热不良或灭弧失效等问题时，可能产生高温、电火花或电弧放电等引燃源，引燃易燃、易爆物品，造成火灾爆炸事故。电力变压器、多油断路器等电气设备本身就有较大的火灾和爆炸危险。开关、熔断器、插座、照明器具、电热器具、电动机等也可能引起火灾和爆炸。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。随着电气设备在工农业生产和家庭生活中的广泛使用，电气引发的火灾比例大幅度增加，电气安全在防火防爆中的重要性日渐凸现。

## 4. 雷电灾害事故

雷电灾害事故是由雷电放电造成的事故。雷电放电具有电流大（数十千安至数百千安）、电压高（数百万伏至数千万伏）、温度高（可达两万摄氏度）的特点，释放出的能量可能造成极大的破坏力。雷电的破坏作用主要有以下方面：

(1) 雷击可直接毁坏建筑物、构筑物。

(2) 直击雷放电、二次放电、雷电波等会引起火灾和爆炸。

(3) 直击雷、感应雷、雷电波入侵、跨步电压的电击及其引起的火灾与爆炸，均会造成人员的伤亡。

(4) 强大的雷电流、高电压可导致电气设备击穿或烧毁。

#### 5. 静电危害事故

静电危害事故是由静电放电引起的事故。静电放电具有电压高（数万伏至数十万伏）、出现范围广等特点。在生产工艺过程中，材料的相对运动、接触与分离等原因均能产生静电。静电的能量不大，不会直接使人致命。静电危害事故主要有以下几个方面：

(1) 在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，可能引发坠落、跌伤等二次事故。此外，对静电电击的恐惧心理还对工作效率产生不利影响。

(3) 某些生产过程中，静电会降低生产效率，导致产品质量下降，电子设备损坏，甚至停工。

#### 6. 电磁场危害事故

电磁场危害即射频危害，是由电磁场能量造成的事故。射频电磁场的危害主要有：

(1) 人体在电磁场辐射下会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、高血压等；可引起眼睛损伤，造成晶体浑浊，严重时导致白内障；可使睾丸发生功能失常，造成暂时或永久的不育症，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。

(2) 高强度的电磁场会影响一些电磁敏感元器件的正常使用，电磁场产生感应放电时会造成电引爆器件意外动作。电磁感应放电对存在爆炸、火灾危险的场所来说是一个不容忽视的危险因素。

(3) 当受电磁场作用产生的感应电压较高时，人会感觉明显的电击。

## 二、电气事故的特点

在电能的生产、运输和使用过程中，如果对电能可能造成的危害重视不够，或技术落后、管理不当、防护不利，就会发生人身伤亡、设备损坏、火灾爆炸等灾害，造成电气事故。电气事故具有以下四大特点。

### 1. 电气事故危害严重

电气事故往往会产生重大的经济损失，甚至还可造成人员的伤亡。例如电能直接作用于人体时，会造成电击或电伤，严重时致人死亡；电能脱离正常的通道时，会形成漏电、接地或短路，成为火灾、爆炸的起因；冶炼高炉等大型设备异常停电时，可能产生大量次品；大规模停电时，可能在人员密集场所形成群死群伤事故，甚至导致城市交通、通信、航空等关系国计民生的系统瘫痪，损失无法估算。

### 2. 直观识别电气事故难度大

由于电看不见、听不见、嗅不着，本身不具备容易被人们直观识别的特征，比较抽象，所以电气事故不易被人们理解和察觉，才会发生诸如攀爬高压电气设施、静电引起煤气爆炸等事故。因此，落实电气安全措施，需要先提高人们的电气安全认知水平。

### 3. 发生电气事故的环境条件复杂

电气设备可能使用在各种复杂环境中，高温高压环境如火电厂的锅炉、汽轮机、压力容器和热力管道等，易燃易爆和有毒物品环境如燃煤、燃油、强酸、强碱、制氢、制氧系统，变压器油和电容器油，绝缘用橡胶等。电气事故的发生环境相当复杂，本身潜藏着很多不安全因素，危险性大，这些都构成了对人身安全的威胁。

另外，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，因雷电、静电和电磁场等引起的事故，也属于电气事故的范畴。

### 4. 预防电气事故的综合性强

电气事故的预防，既要有技术上的措施，又要有管理上的保证，这两方面是相辅相成的。在技术方面，预防电气事故是一项综合性学科，不仅涉及电学，还要同物理学、力学、化学、生物学、医学等的知识综合起来进行研究。在管理方面，预防电气事故主要是引进安全系统工程的理论和方法，健全和完善各种电气安全组织管理措施。大量电气事故表明，出现电气事故的主要原因是安全组织措施不健全和安全技术措施不完善。例如发生触电事故就既可能是技术失误，又可能是管理不到位，触电事故因果关系如图 1-5 所示。因此，预防电气事故需要综合、配套的技术和管理措施。

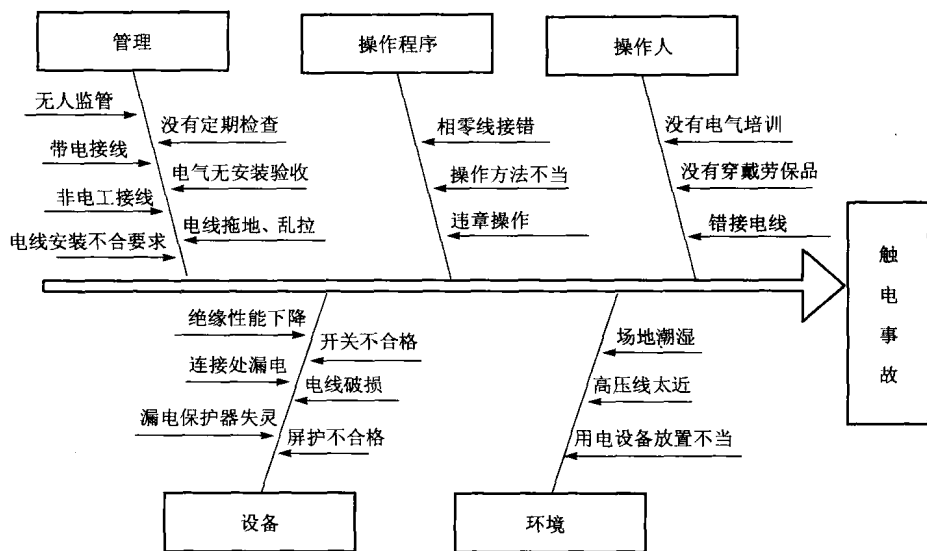


图 1-5 触电事故因果示意图

## 三、触电事故的分布规律

大量电气事故都具有规律性、重复性和频发性，无法预料、不可抗拒的电气事故是极少数。掌握触电事故的分布规律，能够制定有效的安全措施，最大限度地降低触电事故发生率。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

电气事故多发生在二、三季度，尤其在 6~9 月份最为集中。这一方面是因为天气炎热，人体裸露部分较多，皮肤多汗，人员触电危险性增大；另一方面是因为潮湿多雨，电气设备

的绝缘性能有所降低，增大了漏电的危险性；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. 冶金、矿业、建筑、机械行业触电事故多

这些行业属于潮湿、高温的工作环境，电气绝缘破坏速度快，移动式设备和携带式设备多，现场金属设备多等，容易出现漏电情况，使触电事故相对较多。

### 3. 农村触电事故多

我国的用电状况十分复杂，发展不平衡，农村用电普遍存在条件较差，设备简陋，技术水平低，管理不严，电气安全知识缺乏等问题，造成了农村触电事故的频发。

### 4. 青年、中年人以及非电工人员触电事故多

青年、中年人是设备操作人员的主体，接触电气设备机会多；部分人特别是非电工人员安全意识差、缺乏电气安全知识，造成了触电事故较多。

### 5. 低压设备触电事故多

低压触电事故远多于高压触电事故，其原因主要是低压电网分布广，低压设备数量多，人们接触低压设备的机会多。据资料统计，低压设备引起的触电事故占触电事故总数的80%以上。

### 6. 携带式设备和移动式设备触电事故多

携带式设备和移动式设备在使用时需用手紧握进行操作，且经常移动，工作条件较差，容易发生故障。

### 7. 电气连接部位触电事故多

电气连接部位机械牢固性较差，容易受到外力作用而松动，电气可靠性也较低，是电气系统的薄弱环节，较易出现故障。

### 8. 误操作事故多

由于长期、大量使用电气设备，有些人会产生麻痹大意的思想，违反操作规程，因错误操作发生触电事故。

触电事故的分布规律并不是一成不变的。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，在低压系统安装漏电保护装置的安全措施，使低压触电事故大大降低，使低压触电事故与高压触电事故的比例不断发生变化。

近20年来，我国的用电量迅速增加，供电区域迅速扩大，用电安全水平得到了大幅度的提高，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，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技术，这一技术有待进一步推广。对于其他新兴的防触电技术，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。

人们在长期的生产和生活实践中，已经积累了丰富的经验，给电气安全检查、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。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。



## 第二节 电击效应

电流通过人体时，会引起人体的生理反应及机体的损坏。国际电工委员会（英文缩写为 IEC）通过大量的试验研究和统计分析计算，定性和定量地描述了电流通过人体和动物躯体时出现的生理学和病理学效应，阐述了电击致伤、致死的原因。相关理论和数据对于制定防触电技术标准，鉴定安全型电气设备，设计安全措施，分析电气事故，评价安全水平等是必不可少的。

### 一、人体阻抗的组成

人体受到电击伤害的程度与人体阻抗密切相关，人体阻抗是由人体皮肤、血液、肌肉、

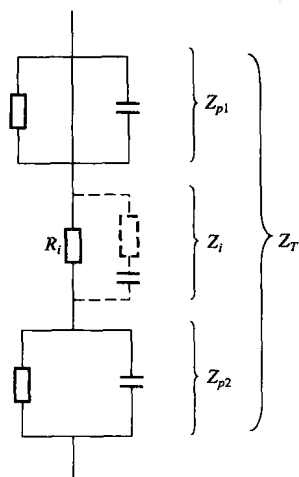


图 1-6 人体阻抗的等效电路图  
 $Z_i$ —体内阻抗； $Z_{p1}$ 、 $Z_{p2}$ —皮肤阻抗；  
 $Z_T$ —总阻抗

细胞组织及其结合部等构成了含有电阻和电容的阻抗，各部分的电阻率按依次降低的顺序排列为：皮肤、脂肪、骨骼、神经、肌肉、血液，其中皮肤电阻在人体阻抗中占有最大的比例。

人体阻抗包括皮肤阻抗和体内阻抗，其等效电路如图 1-6 所示。研究表明，人体阻抗为接触电压、频率、皮肤潮湿程度和接触面积的函数。

#### 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。皮肤阻抗是指表皮阻抗，即皮肤上电极与真皮之间的电阻抗，可视为由半绝缘层和许多的小导体（毛孔）组成的电阻和电容网络。皮肤电容是指皮肤上电极与真皮之间的电容。表皮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  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 。

皮肤阻抗值与接触电压、电流幅值和持续时间、频率、接触面积、施加压力、皮肤潮湿程度、皮肤的温度和种类等因素有关。当接触电压小于 50 V 时，皮肤阻抗随接触面积、温度、皮肤潮湿程度、呼吸急促程度等因素影响有显著的变化，其值比较高。当接触电压在 50 ~ 100 V 时，皮肤阻抗明显下降。当皮肤击穿或破损时，其阻抗可忽略不计。电流频率升高时，皮肤阻抗随之降低。

皮肤潮湿和出汗、带有导电的化学物质和导电的金属尘埃、皮肤破坏时，人体电阻急剧下降，如表 1-1 所示。因此，人们不应当用潮湿的、或有汗、有污渍的手去操作电气装置。

表 1-1 皮肤在不同状况下的人体电阻

接触电压/V	人体电阻/ $\Omega$			
	皮肤干燥	皮肤潮湿	皮肤湿润	皮肤浸入水中
10	7 000	3 500	1 200	600
25	5 000	2 500	1 000	500