



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

主编 郭连考

电工技术实习

Diangong Jishu Shixi



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电工技术实习

主编 郭连考



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书为指导学生电工实习而编写。主要介绍了安全用电的基本方法和要求,以及用电设备保护接地与保护接零的基本知识和操作方法;常用电工测量仪表、电工工具、电工材料等的结构特性及其应用方法;内外线电工的工艺要求和实施方法、常用光源及安装要求;PLC 编程方法;变频器的使用方法,为使实习指导教师能根据不同专业的要求选用实习内容,方便教师和学生实习,本书还附实训项目作为参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电工技术实习 / 郭连考主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6578 - 2

I. ①电… II. ①郭… III. ①电工技术—实习—高等学校—教材 IV. ①TM - 45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 186852 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 / 北京兆成印刷有限责任公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 389 千字

版 次 / 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 5500 册

定 价 / 32.00 元

责任编辑 / 胡 静

王玲玲

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书根据高等学校工科专业“电工电子”课程的教学基本要求，结合作者多年指导学生电工实习教学经验编写而成。本书在注重电学基础知识叙述的同时，强化训练学生掌握电工的基本操作、安装、调试方法和技巧，理论联系实际，培养学生独立思考问题的能力和科学思维方法，达到提高学生动手能力和增强工程知识的目的。本书可作为工科院校电类或非电类大学生“电工电子实习”课程的教材，还可作为课程设计、毕业设计的教学参考书，以及工程技术人员进行电工电子产品制作的参考书。

本书由郭连考统稿；第一章安全用电、第二章常用电气安全标准由徐明娜编写；第三章电工常用工具及仪表、第四章电工基本操作技能由韩文颖编写；第五章电气照明、第八章 PLC 由臧琛编写；第六章电机、第七章变频器由孙万利编写；第九章电气设备维护和检修，实训项目由李文军编写。本书在出版过程中得到北京理工大学出版社的大力支持和帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处敬请广大读者批评指正，作者不胜感激。

编 者

目 录

第一章 安全用电	(1)
第一节 供用电基本知识	(1)
一、电力系统	(1)
二、配电系统	(2)
第二节 安全用电基本知识	(4)
一、安全用电	(4)
二、电气事故	(5)
三、安全用电基本知识	(6)
第三节 触电急救	(12)
一、触电急救措施	(12)
二、触电急救方法	(13)
第四节 安全用电技术措施	(15)
一、预防直接接触电的措施	(15)
二、预防间接接触电的措施	(16)
第五节 电工安全用具	(20)
一、绝缘安全用具	(20)
二、一般防护安全用具	(21)
第六节 电气火灾	(21)
一、电气火灾的原因	(21)
二、电气火灾的防护措施	(22)
三、电气火灾的扑救	(23)
第七节 电气设备安全运行措施	(23)
第二章 常用电气安全标准	(25)
第一节 电气安全标准	(25)
一、电气基础标准	(25)
二、电气安全标准	(28)
第二节 电气控制线路的绘制原则、图形及文字符号	(30)
一、电气控制系统图中的图形符号和文字符号	(30)
二、电气控制系统图	(33)
第三章 电工常用工具及仪表	(39)
第一节 电工常用工具	(39)
一、电工常用通用用具	(39)

二、电工常用登高用具	(44)
三、电工常用绝缘用具	(45)
四、电工专用工具	(46)
五、其他用具	(51)
第二节 电工常用仪表	(51)
一、电流的测量	(51)
二、电压的测量	(52)
三、电磁系电流表和电压表	(58)
四、整流系和数字式交流电流表和电压表	(59)
五、万用表	(61)
六、电阻的测量仪表	(64)
七、绝缘电阻表(兆欧表)	(69)
八、功率表	(70)
九、感应系电能表	(73)
十、电子示波器	(76)
第四章 电工基本操作技能	(87)
第一节 识图的基本操作技能	(87)
一、识图的基础知识	(87)
二、电气原理图识图步骤和方法	(90)
三、电气接线图识图步骤和方法	(94)
四、电气图识图实训项目	(97)
第二节 导线连接基本技能	(99)
一、导线连接的基础知识	(99)
二、工具及材料	(103)
三、导线连接的步骤	(104)
第三节 登杆操作	(107)
一、登杆工具	(107)
二、登杆作业安全用具	(108)
三、登杆操作步骤	(109)
四、登杆操作注意事项	(111)
第四节 室内布线	(112)
一、室内布线的基本要求和规则	(112)
二、塑料护套线配线	(113)
三、线管配线	(116)
四、绝缘子配线与槽板配线	(121)
第五节 电缆的敷设	(123)
一、直接埋地敷设	(123)
二、在电缆沟及隧道内敷设	(126)
三、在排管内敷设	(128)

四、架空敷设	(128)
第六节 线路设备固定件的埋设	(130)
一、墙孔的开凿	(130)
一、木楔的埋设	(131)
二、膨胀栓的埋设	(131)
三、角钢支架的埋设	(132)
五、开脚螺栓和拉线耳环的埋设	(134)
六、手动葫芦	(134)
七、麻绳	(135)
八、钢丝绳	(136)
第七节 插座及开关的选择与安装	(137)
一、电源插座的选择、布置与安装	(137)
二、闭路电视分配器及插座的安装	(141)
三、电话机出线插座的安装	(142)
四、开关的选择与安装	(143)
第五章 电气照明	(145)
第一节 照明基础知识	(145)
一、常用术语	(145)
二、常用电气符号	(146)
第二节 照明系统的设计步骤	(146)
一、确定照明类型	(146)
二、照度选择和计算	(147)
三、照明节能	(149)
四、照明性质	(150)
五、照明质量	(152)
第三节 照明系统与安装	(153)
一、白炽灯	(153)
二、卤素灯	(156)
三、荧光灯	(157)
四、高压气体放电 (HID) 灯	(160)
五、LED 灯具	(161)
第六章 电机	(162)
第一节 直流电机	(162)
一、直流电动机的工作原理	(162)
二、直流电机的分类	(163)
三、直流电动机的启动	(163)
四、直流电动机的反转	(164)
第二节 交流电机	(164)
一、三相异步电动机的结构	(164)

二、三相异步电动机的绕组	(166)
三、三相异步电动机的分类	(167)
四、三相异步电动机的启动	(168)
五、三相异步电动机的调速	(169)
六、三相异步电动机的制动	(170)
第三节 低压电器	(171)
一、低压电器的分类	(171)
二、低压电器结构	(172)
三、低压开关	(173)
四、熔断器	(175)
五、接触器	(176)
六、继电器	(180)
第四节 电气控制图的绘制规则和常用符号	(182)
一、电气图的分类	(182)
二、电气图的图形符号和文字符号	(183)
三、电气原理图的绘制规则	(184)
第五节 电气控制线路的故障诊断方法	(184)
一、电气控制线路的故障	(184)
二、电气控制线路故障的分析方法	(185)
第六节 基本电气控制单元线路	(187)
一、点动控制线路	(187)
二、连续运转控制线路	(187)
三、接触器互锁正反转控制线路	(188)
第七章 变频器	(189)
第一节 变频器简介（发展历史、现状、前景和功能）	(189)
一、变频器的发展	(189)
二、我国变频器技术的发展及应用概况	(190)
第二节 变频器的分类及工作原理	(191)
一、变频器的分类	(191)
二、变频器的工作原理简介	(192)
第三节 变频器主电路的构成	(192)
一、整流电路	(193)
二、直流中间电路	(193)
三、逆变电路	(194)
第四节 富士变频器 FRN0.4G11S-4CX 简介	(194)
一、认识富士变频器 FREN0.4G11S-4CX	(194)
第五节 变频器使用实训练习	(198)
第六节 变频器初学者必须了解的一些问题	(202)

第八章 PLC	(207)
第一节 PLC 概述	(207)
第二节 西门子 LOGO! 系列 PLC	(208)
一、基本组成	(209)
二、LOGO! 编程方法	(211)
第三节 三菱 FX2N 系列 PLC	(220)
一、FX2N 系列编程元件	(220)
二、FX2N 指令系统	(222)
三、梯形图程序设计	(227)
第九章 电气设备维护检修	(228)
第一节 电工实训台维护及故障检修	(228)
一、电工实训台的日常维护	(228)
二、电工实训台常见故障处理方法	(229)
第二节 CA6140 车床电气故障检修	(231)
一、控制电气线路原理	(231)
二、常见故障检修	(233)
第三节 常用电路电器元件的维护检修	(234)
一、电气故障的特点	(234)
二、电气故障检修的一般方法	(235)
三、几种常用低压电器故障的检修实例	(235)
四、电动机的维护检修	(241)
实训项目	(245)
实训项目一	(245)
一、实训目的	(245)
二、实训主要元件及器材	(245)
三、实训内容	(245)
四、安装注意事项及相关说明	(246)
实训项目二	(247)
一、实训目的	(247)
二、实训主要元件及器材	(247)
三、实训内容	(247)
实训项目三	(253)
一、实训目的	(253)
二、实训主要元件及器材	(253)
三、实训内容	(253)
附 录 变频器基本连接图	(258)
参考文献	(259)

第一章

安全用电

从爱迪生发明电灯开始，电就走进了千家万户，它与我们的生活紧密相连，为我们带来了光明与财富。电能推动了社会的进步与发展，在国民经济和人们生活中发挥着重要作用。

如今，从工业用电到我们家庭中的照明、取暖以及各种电器设备，可以说现代人的生活已经离不开电了。但如果电能使用不当，又会发生触电、烧伤、火灾等事故，不仅损坏用电设备，甚至还会危及生命。那么，如何安全操作和使用电能呢？

第一节 供用电基本知识

一、电力系统

电力系统由电能的生产、传输、分配和消耗四个部分组成，即通常所说的发电、输电、变电和配电。首先发电机将一次能源转化为电能，电能通过变压器和电力线路输送、分配给用户，最终经用电设备转化为用户所需的其他形式的能量。电力系统组成如图 1-1 所示。

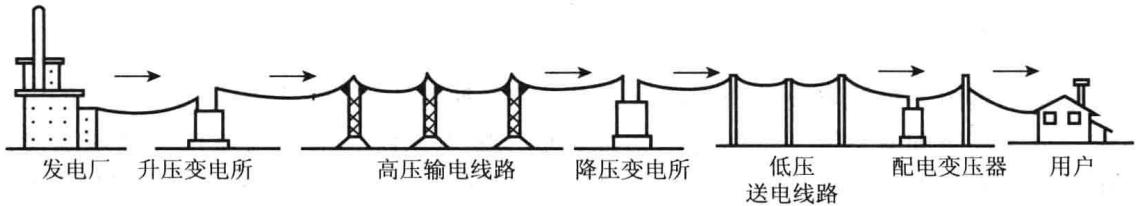


图 1-1 电力系统的组成

1. 电能的生产

电能的生产即发电，它是由各种形式的发电厂来实现的。发电厂的种类很多，一般根据它所利用能源的不同分为火力发电厂、水力发电厂和原子能发电厂。此外，还有风力发电厂、潮汐发电厂、太阳能发电厂、地热发电厂和等离子发电厂等。目前，我国的电能生产以火力发电、水力发电和原子能发电为主，风力发电也在大规模的应用中。

火力发电通常以煤或油为燃料，由锅炉产生蒸汽，以高压高温蒸汽驱动汽轮机，再由汽轮机带动发电机发电。

水力发电利用自然水力资源作为动力，通过水岸或筑坝截流的方式提高水位。水流的位能驱动水轮机，由水轮机带动发电机发电。

原子能发电由核燃料在反应堆中的裂变反应所产生的热能，产生高压高温蒸汽，由汽轮机带动发电机发电。原子能发电又称核发电。

风力发电利用风力带动风车叶片旋转，通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机

发电。

世界上由发电厂提供的电力,大多数是交流电。我国交流电频率为 50Hz,称为工频。

2. 电能的输送

电能的输送又称输电。输电网是由若干输电线路组成的将许多电源点与许多供电点连接起来的网络系统。输电的距离越长,输送容量越大,则要求输电电压越高。输电过程中,先将发电机组发出的 6~10kV 电压经升压变压器变为 35~500kV 高压,通过输电线将电能传送到各用户,再利用降压变压器将 35kV 高压变为 6~10kV。

我国标准输电电压有 35kV、110kV、220kV、330kV 和 500kV 等。一般情况下,输送距离在 50km 以下,采用 35kV 电压;输电距离在 100km 左右,采用 110kV;输电距离在 2 000km 以上,采用 220kV 或更高的电压。

高压输电按照输电特点,通常又可分为特高压输电(1 000kV、 ± 800 kV-DC)、超高压输电(330kV、500kV、750kV、 ± 500 kV-DC)和高压输电(220kV)。我国目前多采用高压、超高压远距离输电,高压输电可以有效减小输电电流,从而减少电能损耗,保证输电质量。

3. 电能的分配

高压输电到用电点(如住宅、工厂)后,须经区域变电所将交流电的高压降为低压,再供给各用电点。电能提供给民用住宅的照明电压为交流 220V,提供给工厂车间的电压为交流 380/220V。

在工厂配电中,对车间动力用电和照明用电均采用分别配电的方式,即把动力配电线路与照明配电线路——分开,这样可避免因局部故障而影响整个车间生产的情况发生。

二、配电系统

配电系统是由多种配电设备和配电设施组成的变换电压和向终端用户分配电能的电力网络系统,分为高压配电系统、中压配电系统和低压配电系统。根据《城市电网规划设计导则》的规定,我国配电系统的电压等级,220kV 及其以上电压为输变电系统,35kV、63kV、110kV 为高压配电,6kV、10kV 为中压配电,220V、380V 为低压配电。

①高压配电网:由高压配电线路和配电变电站组成的向用户提供电能的配电网。高压配电网从上一级电源接收电能后,可以直接向高压用户供电,也可以向下一级中压(低压)配电网提供电源。

②中压配电网:由中压配电线路和配电室(配电变压器)组成的向用户提供电能的配电网。中压配电网从高压配电网接收电能,向中压用户或向各用电小区负荷中心的配电室(配电变压器)供电,在经过变压后向下一级低压配电网提供电源。

③低压配电网:由低压配电线路及其附属电气设备组成的向低压用户提供电能的配电网。低压配电网从中压(或高压)配电网接收电能,直接配送给各低压用户。低压配电网是电力系统的末端,分布广泛,几乎遍及建筑的每一角落,平常使用最多的是 380/220V。从安全用电等方面考虑,低压配电系统有三种接地形式,分别为 IT 系统、TT 系统、TN 系统。TN 系统又分为 TN-S 系统、TN-C 系统和 TN-C-S 系统三种形式。

1. IT 系统

IT 系统就是电源中性点不接地、用电设备外壳直接接地的系统,如图 1-2 所示。IT 系

统中，连接设备外壳可导电部分和接地体的导线，就是 PE 线。

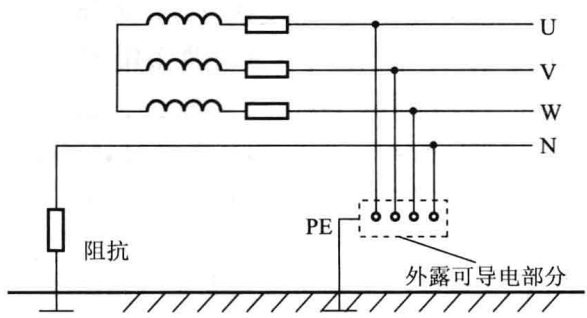


图 1-2 IT 系统

2. TT 系统

TT 系统就是电源中性点直接接地、用电设备外壳也直接接地的系统，如图 1-3 所示。通常将电源中性点的接地叫做工作接地，而设备外壳接地叫做保护接地。TT 系统中，这两个接地是相互独立的。设备接地可以是每一设备都有各自独立的接地装置，也可以若干设备共用一个接地装置。

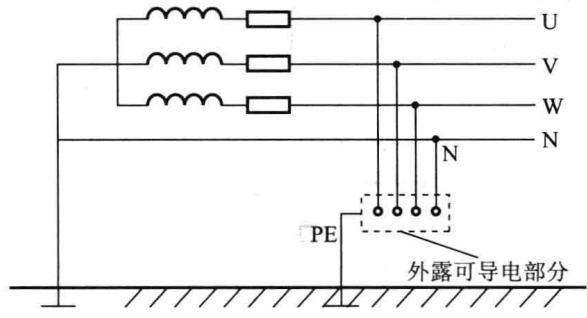


图 1-3 TT 系统

3. TN 系统

TN 系统即电源中性点直接接地、设备外壳等可导电部分与电源中性点有直接电气连接的系统，它有三种形式。

1) TN-S 系统

TN-S 系统如图 1-4 所示。图中中性线 N 与 TT 系统相同，在电源中性点工作接地，而用电设备外壳等可导电部分通过保护线 PE 连接到电源中性点上。在这种系统中，中性线 N 和保护线 PE 是分开的。TN-S 系统是我国现在应用最为广泛的一种系统（又称三相五线制），适用于新建楼宇，爆炸、火灾危险性较大或安全要求高的场所如科研院所、计算机中心、通信局站等。

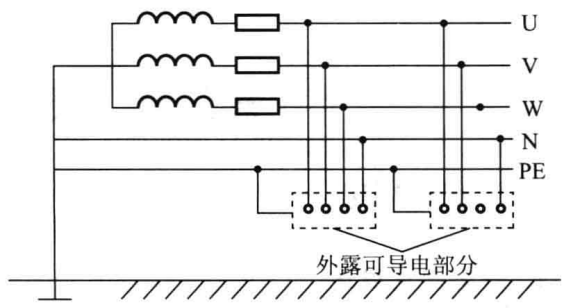


图 1-4 TN-S 系统

2) TN-C 系统

TN-C 系统如图 1-5 所示，它将 PE 线和 N 线的功能综合起来，保护中性线 PEN 同时具

有保护和中性线两者的功能。在用电设备处，PEN 线既连接到负荷中性点上，又连接到设备外壳等可导电部分。但要注意火线（L）与零线（N）要接对，否则外壳会带电。TN-C 现在已很少采用，尤其是在民用配电中已基本不允许采用 TN-C 系统。

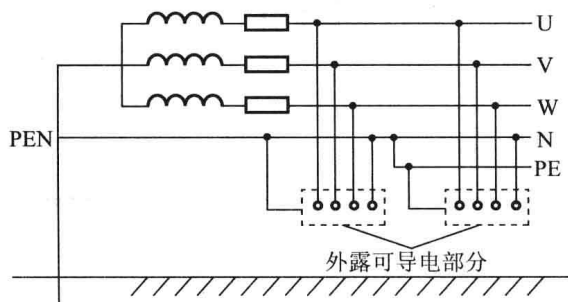


图 1-5 TN-C 系统

3) TN-C-S 系统

TN-C-S 系统是 TN-C 系统和 TN-S 系统的结合形式，如图 1-6 所示。TN-C-S 系统中，从电源出来的那一段采用 TN-C 系统，只能起传输作用，到用电负荷附近某一点处，将 PEN 线分开成单独的 N 线和 PE 线，从这一点开始，系统相当于 TN-S 系统。TN-C-S 系统也是一种现在应用比较广泛的系统。这里采用了重复接地的技术，此系统适用于厂内变电站、厂内低压配电场所及民用旧楼改造。

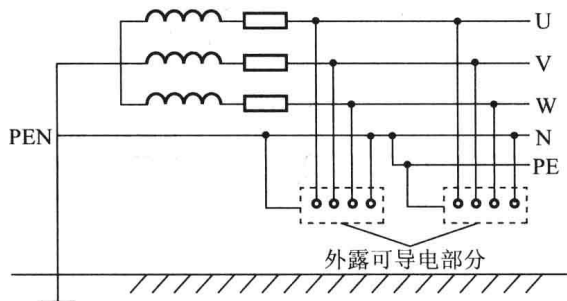


图 1-6 TN-C-S 系统

第二节 安全用电基本知识

一、安全用电

1. 安全用电概述

安全用电是一门研究如何预防用电事故及保障人身和设备安全的学问。安全用电包括供电系统安全、用电设备安全和人身安全三个方面，它们之间又是紧密联系的。供电系统的故障可能导致用电设备的损坏或人身伤亡事故，而用电设备的安全隐患和使用不当也会导致局部或大范围停电，引起人身伤亡，严重的会造成社会灾难。

- ①供电系统安全。发电、输电、变电和配电过程安全、可靠。
- ②用电设备安全。大型设备的正确操作、家用电器的正确使用。
- ③人身安全。掌握安全用电常识和技能，预防各种触电事故。

2. 安全用电意义

电作为一种能源,是人类不可缺少的伙伴,电能与我们的生活息息相关,但电能造福人类的同时,各种电气事故也给人们生活带来了灾难:在生活或工作中会发生触电、电击、烧伤、火灾导致呼吸窒息、生命垂危、设备损坏、财产损失,从而造成不可估量的经济损失和政治影响。因此,只有掌握好安全用电的知识与技能,我们才能在工作、生活中安全用电,让电更好地为人类服务。

3. 我国用电安全的现状

20世纪70年代中期,我国的用电安全理论研究和实际应用的发展比较缓慢,与世界发达国家的差距较大。我国每年人均占有的发电量仅为 $200\text{kW}\cdot\text{h}$,而每年平均触电死亡人数近6000人,触电事故比较严重。

近20年来,随着我国经济建设的蓬勃发展,用电安全水平也大幅度提高。居民用电量迅速增加的同时,每年触电死亡人数呈下降趋势发展,触电事故逐年减少。

4. 安全用电技术的发展趋势

绝缘、屏护、间距、接地和接零、安全电压等是传统的安全用电技术措施,这些方法是行之有效的,并且仍将在今后很长时期内占据重要地位。

目前,随着电子技术、检测技术、传感技术的发展和用电状况的变化,有些安全用电的传统方法正在不断地完善和更新,出现了功能齐全、性能良好、智能化的漏电保护器、双重绝缘设备、电气隔离等防触电新兴技术,使安全用电技术有了新的发展。新技术的应用对于减少触电事故已经取得了明显的效果:我国在建筑施工中、农村生产生活中推广使用漏电保护器后,触电死亡事故减少了 $1/2$;双重绝缘设备的开发和推广也为控制和减少手持电动工具、家用电器的触电事故起到了一定的作用。

在技术发展的同时,安全管理的内容也在不断完善,出现了健全的机构和规章制度,形成了安全保证体系,对保证电气系统的安全运行有着一定的积极作用。人们运用系统工程及反馈的理论建立安全信息网络,做到了超前预防及控制,使电气安全技术更完善、可靠、周密。

用电安全是一项综合性的工作,只有在不断完善用电安全措施的同时,加强安全管理,才能更好地保障供电系统、电气设备和人身安全。

二、电气事故

电气事故危害大、涉及领域广,是电气安全工程主要的研究和管理对象。熟悉电气事故的危害、特点和分类,对掌握好安全用电基本知识具有重要意义。

1. 电气事故的危害

电气事故的危害主要有两个方面:

- ①对系统自身的危害,如短路、过电压、绝缘老化等。
- ②对用电设备、环境和人员的危害,如触电、电气火灾、电压异常升高造成用电设备损坏等。

2. 电气事故的特点

- ①电气事故危害大。电气事故的发生常伴随着受伤、死亡、财产损失等。
- ②电气事故危险直观识别难。由于电本身不具备被人直观识别的特征,因此电引起的危险不易被人们察觉。

③电气事故涉及领域广。电气事故的发生并不仅仅局限于用电领域,在一些非用电场所,电能的释放也可能会引起事故和危害。

④电气事故的防护研究综合性强。电气事故的机理除了电学之外,还涉及力学、化学、生物学、医学等学科的理论知识,需要综合起来研究。

3. 电气事故的类型

电气事故根据电能的不同作用形式,可分为触电事故、静电危害事故、雷电灾害事故、射频电磁场危害事故和电路故障危害事故等;按发生灾害的形式,又可以分为人身事故、设备事故、电气火灾等。

1) 触电事故

触电事故是由电流的能量造成的。触电是指电流流经人体时对人体产生的生理和病理的伤害,这种伤害是多方面的。电流对人体伤害分为电击和电伤两种。

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。在生产和操作过程中,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,发生放电,产生放电火花,从而引发火灾事故。

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。雷电的破坏作用主要有:直击雷放电、二次放电,雷电流的热量引起火灾和爆炸。雷电的直接击中、金属导体的二次放电、跨步电压的作用均会造成人员的伤亡;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;雷击可直接毁坏建筑物、构筑物。

4) 射频电磁场危害事故

射频是指无线电波的频率或者相应的电磁振荡频率。射频伤害是由电磁场的能量造成的。在射频电磁场作用下,人体吸收辐射能量会受到不同程度的伤害。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。当受电磁场作用感应出的感应电压较高时,会给人以明显的电击。

5) 电路故障危害事故

电路故障危害是由于电能在输送、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、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路故障。系统中电气线路或电气设备的故障会引起火灾和爆炸,造成异常带电、异常停电,导致人员伤亡及重大财产损失。

三、安全用电基本知识

1. 电流对人体伤害的种类

电流对人体组织的危害作用表现为:电热作用、电离或电解作用、生物作用和机械作用。电流通过人体时,电流的热性质作用会引起肌体烧伤、炭化、产生电烙印及皮肤金属化现象;化学性质作用会使人体细胞由于电解而被破坏,使肌体内体液和其他组织发生分解,破坏各种组织结构和成分;生物性质作用会引起神经功能和肌肉功能紊乱,使神经组织受刺激兴奋、内

分泌失调；机械性质作用会使电能在体内转化为机械能引起损伤，如骨折、组织受伤。

根据伤害性质不同，触电可分为电击和电伤两种。

①电击是电流通过人体造成的内部器官在生理上的反应和病变。如刺痛、灼热感、痉挛、麻痹、昏迷、心室颤动或停跳、呼吸困难或停止等。电击是主要的触电事故，分为直接电击和间接电击。

②电伤是电流通过人体，由于电流的热效应、化学效应和机械效应对人体外部造成的伤害。如电灼伤、电烙印、皮肤金属化等现象。能够形成电伤的电流一般比较大，它属于局部伤害，其危险性取决于受伤面积、受伤深度和受伤部位。

电灼伤分为接触灼伤和电弧灼伤。接触灼伤处呈现黄色或褐黑色，可累及皮下组织、肌腱、肌肉和血管，甚至使骨骼呈碳化状态。电弧灼伤会使皮肤发红、起泡、组织烧焦、坏死。

电烙印发生在人体与带电体之间有良好的接触处部位。颜色呈灰黄色，往往造成局部麻木和失去知觉。

皮肤金属化是由于高温电弧使周围金属融化、蒸发并飞溅渗透到皮肤表面形成的伤害，一般无致命危险。

2. 电流对人体伤害程度的主要影响因素

电流对人体的伤害程度与通过人体的电流大小、电流持续时间、电流流经途径、电流频率、人体状况等因素有关。

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。对于工频交流电，根据通过人体电流大小和人体所呈现的不同状态，习惯上将触电电流分为：感知电流、摆脱电流和室颤电流三种。

感知电流指人身能够感觉到的最小电流。成年男性平均感知电流大约为 1.1mA，女性为 0.7mA。感知电流不会对人体造成伤害，但电流增大时，人体反应强烈，可能造成坠落等间接事故。

摆脱电流指大于感知电流，人体触电后可以摆脱掉的最大电流。成年男性平均摆脱电流大约为 16mA，女性为 10mA；成年男性最小摆脱电流大约为 9mA，女性为 6mA，儿童较小。

室颤电流是指引起心室颤动的最小电流。由于心室颤动几乎将导致死亡，因此通常认为室颤电流即致命电流。当电流达到 90mA 以上，心脏会停止跳动。

工频交流电对人体的影响见表 1.1。

表 1.1 人体对电流大小的反应表

电流大小/mA	人体感觉特征
0.6 ~ 1.5	手指开始感觉发麻
2 ~ 3	手指感觉强烈发麻
5 ~ 7	手指肌肉感觉痉挛，手指灼热和刺痛
8 ~ 10	手摆脱电极已感到困难，指尖到手腕有剧痛感
20 ~ 25	手迅速麻痹，不能自动摆脱
50 ~ 80	呼吸困难，心房开始震颤，呼吸困难
90 ~ 100	呼吸麻痹，一定时间后心脏停搏，停止跳动

2) 伤害程度与电流作用于人体时间的关系

通过人体电流的持续时间越长，电流对人体产生的热伤害、化学伤害及生理伤害越严重。由于电流作用时间越长，作用于人体的能量累积越多，室颤电流减小，电流波峰与心脏脉动波峰重合的可能性增大，容易引起心室颤动，危险性就越大。

一般情况下，工频 15 ~ 20mA 以下、直流 50mA 以下电流，对人体是安全的。但如果电流通过人体时间很长，即使工频电流小到 8 ~ 10mA，也可能使人致命。这是因为通电时间越长，电流通过人体产生的热效应，使人体发热，人体组织的电解液成分增大，导致人体电阻降低，使通过人体的电流增大，触电的危险亦随之增加。

3) 伤害程度与电流流经途径的关系

电流通过头部可使人昏迷；通过脊髓可能导致瘫痪；通过心脏会造成心跳停止，血液循环中断；通过呼吸系统会造成窒息，通过中枢神经有关部分会引起中枢神经系统强烈失调而致残。实践证明，从左手到胸部是最危险的电流路径，从手到手和从手到脚也是很危险的电流路径，从左脚到右脚是危险性较小的电流路径。电流流经路径与通过人体心脏电流比例关系见表 1.2。

表 1.2 电流流经路径与通过人体心脏电流比例

电流通过人体途径	左手到脚	右手到脚	左手到右手	左脚到右脚
流经心脏电流占总电流比例/%	6.4	3.7	3.3	0.4

4) 伤害程度与电流频率的关系

不同频率的电流对人体影响也不同。通常频率在 50 ~ 60Hz 范围内的交流电对人体的危险性最大。其中 50Hz 的工频交流电，对设计电气设备比较合理，但这种频率的电流对人体触电伤害程度也最严重。低于或高于此频率段的电流对人体触电的伤害程度明显减轻。高频电流有时还可以用于治疗疾病。目前，医疗上采用 20 kHz 以上的交流小电流对人体进行理疗。各种频率电流导致死亡比例见表 1.3。

表 1.3 各种频率电流导致死亡比例

电流频率/Hz	10	25	50	60	80	100	120	200	500	1 000
死亡比例/%	21	70	95	91	43	34	31	22	14	11

5) 伤害程度与人体状况的关系

人体触电时，流过人体的电流在接触电压一定的情况下由人体电阻决定。人体电阻的大小不是固定不变的，它取决于众多因素。总的来讲，人体电阻主要由表面电阻和体积电阻构成，其中表面电阻起主要作用。一般认为，人体电阻在 1 000 ~ 2 000Ω 范围内变化。此外，人体电阻大小还取决于皮肤的干湿程度、粗糙度等。不同电压下人体电阻值见表 1.4。