

普通高校“十三五”规划教材

电工电子 工程实训 技术

主编 李凤祥

副主编 任明炜

参编 曾艳明 孙智权



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高校“十三五”实训规划教材

电工电子工程实训技术

主 编 李凤祥

副主编 任明炜

参 编 曾艳明 孙智权

主 审 朱伟兴

机械工业出版社

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。随着科学技术的发展,电工电子技术的应用日新月异,日益渗透到其他学科领域,并促进其发展。由于新器件、新方法的不断出现,“电工学”课程教学内容在不断丰富和更新,所以,“电工学”的工程实训内容和方法也应作相应的更新和改革。

学生的实践能力是高等工科院校学生培养的重要内容之一。结合当前“电工学”课程体系、内容和方法上的改革和目前“电工学”实训技术的实际水平,系统、科学地培养学生的实践能力和创新能力显得尤为重要。

本书是“电工学”课程的实习用书,结合了“电工学”课程教学改革进程和非电类本科学生的电工电子实践环节。本书在加强电工电子技术基本理论的基础上,引入了切合实际的实践项目。使得学生通过电工电子技术的实践项目练习,在工程应用能力上打下扎实的基础。读者对象为高等院校电气工程专业在校师生。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子工程实训技术 / 李凤祥主编. —北京: 机械工业出版社, 2016.8

ISBN 978-7-111-54508-8

I. ①电… II. ①李… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 183779 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 朱 历

责任编辑: 陈大立 封面设计: 付海明

责任校对: 胡 颖 责任印制: 陈大立

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张·375 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54508-8

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。随着科学技术的发展，电工电子技术的应用日新月异，日益渗透到其他学科领域，并促进其发展。由于新器件、新方法的不断出现，“电工学”课程教学内容在不断丰富和更新，所以，“电工学”实训内容和方法也应作相应的更新和改革。

学生的实践能力是高等工科院校学生培养的重要内容之一。结合当前“电工学”课程体系、内容和方法上的改革和目前“电工学”实训技术的实际水平，系统、科学地培养学生的实践能力和创新能力显得尤为重要。

本书在编写上充分考虑学生的学习特点和 21 世纪人才的培养要求，具有以下特点：

(1) 层次性、实用性强。在内容安排上由浅入深、循序渐进，在加强基础的同时，侧重实用性，以提高学生的学习兴趣和能力，满足不同专业、不同层次的需要。

(2) 叙述详略得当。对一些理论课上学过的内容、原理叙述从略。结合实际需要，详细介绍了常用元器件、电工工具及电子仪器仪表的基础知识和使用方法，目的是强化培养学生的动手能力。

(3) 注重先进性。将 Altium 电子绘图技术引入实训项目，目的是使学生掌握并应用现代电子技术手段，跟上现代电子技术的发展。

(4) 实训项目安排由浅入深，注重实际需要。

本书分为基础和实训两部分：第 1 章至第 5 章为基础篇，由任明炜副教授、曾艳明高级工程师、孙智权工程师编写；第 6 章、第 7 章为实训篇，由李凤祥教授编写。全稿由朱伟兴教授主审。

由于编者水平有限，不足或错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 7 月于江苏大学

目 录

前言

第 1 章 安全用电	1
1.1 电力系统常识	1
1.1.1 发电	1
1.1.2 输电	2
1.1.3 变电	2
1.1.4 配电	3
1.1.5 用电	6
1.2 安全用电与触电急救	6
1.2.1 安全用电常识	6
1.2.2 触电与急救常识	9
1.3 避雷与静电防护	14
1.3.1 人体避雷常识	14
1.3.2 静电防护常识	15
第 2 章 仪器仪表、电工工具和电工材料	17
2.1 常用仪器仪表和使用方法	17
2.1.1 电子仪器仪表及其使用方法	17
2.1.2 电工仪器仪表及其使用方法	22
2.2 电工工具和使用方法	32
2.2.1 通用电工工具及使用方法	32
2.2.2 专用电工工具及使用方法	36
2.3 常用电工材料	37
2.3.1 导电材料	37
2.3.2 绝缘材料	39
2.3.3 导磁材料	44
第 3 章 常用电子元器件	46
3.1 分立元件	46
3.1.1 电阻和电位器	46
3.1.2 电感	54
3.1.3 电容器	58
3.1.4 分立半导体器件	65
3.2 集成电路	72
3.2.1 集成电路的命名与分类	72
3.2.2 集成电路的选用	74

3.2.3	集成电路应用须知	75
3.3	常用电力电子器件	76
3.3.1	电力二极管	76
3.3.2	晶闸管	79
3.3.3	单结晶体管	85
3.3.4	全控型器件	85
第4章	常用低压电器和设备	95
4.1	低压电器	95
4.1.1	主令电器	95
4.1.2	隔离电器	97
4.1.3	保护开关	100
4.1.4	控制电器	104
4.2	变压器	110
4.2.1	变压器的基本结构与分类	110
4.2.2	单相变压器	113
4.2.3	三相变压器	115
4.2.4	特殊用途变压器	122
4.3	电动机	133
4.3.1	交流异步电动机	133
4.3.2	交流同步电机	143
4.3.3	直流电机	146
4.3.4	其他电机	153
4.3.5	电动机的运行和维护	155
第5章	电气图的绘制与设计	157
5.1	电气图的绘制与阅读	157
5.1.1	电气图分类	157
5.1.2	电气图的绘制	159
5.1.3	电气图的阅读	164
5.2	电子原理图和印制板图的设计	167
	训练一: 绘制模拟电路原理图	170
	训练二: 设计原理图元件库	178
	训练三: 绘制层次原理图	182
	训练四: 封装库的构建	185
	训练五: 绘制 PCB 图	192
第6章	电工技术技能训练	196
6.1	电气布线	196
6.1.1	照明线路	196
6.1.2	动力线路	198
6.1.3	低压配电箱	199

6.2	机床电气控制电路	200
6.2.1	继电-接触器控制电路	200
6.2.2	可编程序控制器及其控制电路	203
6.3	电工技术实训	219
6.3.1	配电箱及荧光灯照明电路的组装	219
6.3.2	用于机床的三相异步电动机控制系统设计与组装	220
第7章	电子技术技能训练	221
7.1	电子工艺和基本常识	221
7.1.1	印制电路板制作工艺	221
7.1.2	电子元器件的焊接	230
7.2	电子技术实训	233
7.2.1	晶体管收音机	233
7.2.2	555 振荡报警器	235
7.2.3	声控门铃	235
7.2.4	电子抢答器	236
7.2.5	电动自行车控制器	237
7.2.6	充电器	241

第 1 章 安全用电

1.1 电力系统常识

随着电力事业的飞速发展,电能的应用极为普及,电灯发光、电动机转动、电炉发热以及电视机那无比美妙的动画和声响效果,都离不开电能。电能一般来自于发电厂的发电机。发电厂要建立在能源丰富的地方,如火力发电厂要建立在燃料资源丰富的地方,水力发电厂要建立在有大的水位落差的地方,风力发电厂要建立在一年四季风力强劲的地方,光伏发电厂要建在阳光充足的地方。发电厂距离大城市和用电的负荷中心很远,这就必须设法将电能进行远距离的输送。由于电压等级越高,电能输送的距离越远,所以由发电机发出的电能一般又需经过升压变压器将电压升高。电压升高后的电能再经过输电线路进行远距离的输送。当到达用电负荷中心后再进行配电,而配电又分为高压配电和低压配电,最后将电能送到人们所使用的各种电器和电气设备中。也就是说,由发电、变电、输电、配电和用电这五个环节所组成的电能生产、变换、输送、分配和消费的整体,就称为电力系统。在电力系统中,这五个环节应环环相扣,时时平衡,缺一不可,且几乎是在同一时刻完成的。在电力系统中,除发电和用电这两个环节以外的部分,具有变电、输电和配电三个环节的整体称为电力网,电力网又简称为电网。电力网是连接发电厂和用户的中间环节,是传送和分配电能的装置。电力网由不同电压等级的输配电线路和变电所组成,按其功能的不同可分为输电网和配电网两大部分。输电网是由 35 kV 及以上的输电线路和与其连接的变电所组成,是电力系统的主要网络,其作用是将电能输送到各个地区的配电网或直接送给大型企业用户。而配电网则由 10 kV 及以下的配电线路和配电变压器所组成,其作用是将电能馈送至各类电能的用户。

1.1.1 发电

电力系统是指由电力线路将发电厂、变配电所和电力用户联系起来,形成发电(电的生产)、送电、变电、配电和用电的一个整体。电能一般是由发电厂的发电机所产生的,经过升压变压器升压后,再由输电线路输送至区域变电所,经区域变电所降压后,再供给各用户使用。

通常人们将除发电厂(发电设备)之外的电力输送系统称为电力网。电力网又分为输电网和配电网两部分。输电网(又叫主网架)是指以高电压或超高压将

发电厂、变电所或变电所之间连接起来的输电网络。配电网是指直接送到用户的输电网络。

利用发电动力装置将位能（水的落差）、热能（煤、油、天然气等）、核能、风能（风力）、地热能、海洋能（潮汐）和太阳能等一次能源转换为二次能源（电能），用来满足各种各样的电器与电气设备的需要，就称为发电。具体发电的场所称为发电厂。简单地说，发电厂就是生产电能的工厂。发电厂的电压范围一般为 $3.15\sim 20\text{ kV}$ 。根据发电厂的容量大小及其供电的范围，可分为区域性发电厂、地方性发电厂和自备电厂等。

区域性发电厂大多兴建在水利资源丰富的江河流域或煤矿蕴藏量较大的地方。这类发电厂的容量大，距离用电负荷中心较远，需要通过超高压输电线路远距离输电。兴建大容量的区域发电厂可以经济合理地利用国家的动力资源。地方性发电厂一般是中小型电厂，往往建在用户附近。而自备电厂则建在大型厂矿的内部作为自备电源，它可以对大型厂矿企业和电力系统起到后备和保护作用。地方性发电厂和自备电厂基本上都是火力发电厂，一般采用热电联合生产的形式，即除了发电以外，还需要向用户供热，这种发电厂称为热电厂。

1.1.2 输电

由于发电厂与用电负荷中心一般相距很远，将发电厂发出的电能通过升压变压器升压（变电）至 $35\sim 500\text{ kV}$ 或更高电压后，在高压架空输电线路上进行远距离的输送，直至用电负荷中心的全过程称为输电。输电是电力系统的重要组成部分，它使得电能的开发和利用超越了地域的限制。很长的输电线路有可能经过不同的气候、不同的海拔，也有可能跨越大山、跨越河流或湖泊、跨越道路或桥梁，有时条件十分恶劣。但电能与其他能源的输送方式相比，具有效益高，损耗小，污染少，且易于调节和控制等特点。另外，高压输电线路还可以将不同地点的发电厂连接起来，构成大规模的联合电力系统，以使得电能的质量进一步提高，同时起到互相支援、互为补充的作用。输电已成为现代社会的能源大动脉。

按照输送电流的性质可分为交流输电和直流输电两种。目前较为广泛应用的是交流输电，但近年来直流输电也越来越受到人们的重视。按照输电线路的结构来分有架空线路和直埋敷设两种形式。

1.1.3 变电

变电指变换电压等级，它可分为升压和降压两种。升压是将较低等级的电压升到较高等级的电压，反之为降压。变电通常由变电站（所）来完成，相应地可分为升压变电站（所）和降压变电站（所）。

变电所是接受电能、变换电压和分配电能的枢纽，是发电厂和用户间的重要环节。变电所一般由电力变压器、室内外配电装置、继电保护、自动装置以及监控系统等组成。当仅有配电装置用来接受电能和分配电能，无须变压器进行电压的变换时，则称为配电所或开闭站。

变电所有升压和降压之分。升压变电所通常与发电厂连接在一起，在发电厂的电气部分安装有升压变压器。由于电压较低，发电厂的发电机所发出的电能远远不能满足输电的要求。为了实现远距离输电的目的，一般采用升压变压器将较低的电压升为

高电压（电压等级越高，输电的效率越高，输送的距离越远），即将发电机发出的低电压通过升压变压器升高为 35~500 kV 及以上的电压等级作为输电电压。而降压变电所一般设在用电负荷中心，将高压电能适当降压后，供给用户使用。

由于供电范围的不同，变电所可分为一次（枢纽）变电所和二次变电所。工厂企业的变电所可分为总降压变电所（中央变电所）和车间变电所。一次变电所简称一次变，它是由 110 kV 以上的主要网络受电，将电压降低到 35~110 kV，供给一个较大区域的用户。一次变通常采用双绕组变压器，也有些采用三绕组变压器，将高电压降为两种不同的电压，并与相应电压级别的网络连接起来。一次变的供电范围较大，是系统与发电厂连接的枢纽，故有时也称其为枢纽变电所。二次变电所多由 35~110 kV 网络一次变受电，有些也由地方性发电厂直接受电。将 35~110 kV 电压降为 6~10 kV 之后向一般为数千米范围的用户供电。

总降压变电所是对工厂企业供电的枢纽，故又称为中央变电所，它与二次变电所的情况基本相同，也是由一次变单独引出的 35~110 kV 网络直接受电，经电力变压器降压至 3~10 kV 对工厂企业内部供电。对于中小型企业，可一个或多个企业共设一个总降压变电所。车间变电所是从总降压变电所引出的 6~10 kV 厂区高压配电线路受电，将电压降到 380/220 V 对各类用电设备供电。

1.1.4 配电

通过高压输电线路的远距离输送，在到达用电负荷中心后，就需要将电能分别配送至各个用户，这一分配过程称为配电。配电又分为高压配电和低压配电。

高压配电的电压通常是指 3 kV、6 kV、10 kV 和 35 kV 电压等级的配电。通过综合的技术经济指标分析，以 10 kV 电压等级作为配电电压较为合理。但是当用户有大量的 6 kV 高压电动机时，可采用 6 kV 作为配电电压；当有大量的 3 kV 高压电动机时，目前一般也采用 10 kV 作为配电电压，因为 3 kV 作为配电电压不太经济；如果用户距离上级变电站较远时，传统上采用 35 kV 电压等级作为配电电压。随着我国电力工业的迅速发展，用电量急剧增加，从技术经济指标分析，将逐步取消 35 kV 电压等级。同时也考虑将 10 kV 电压等级提高为 20 kV。

低压配电的电压等级通常是指 380/220 V 和 660/380 V 电压等级的配电。在我国，传统上采用 380/220 V 的三相四线制的配电方式。这种配电方式可以供出光（照明）、力（动力）合一的混合负荷。但是随着用电量的不断增大，煤炭部门已经升压为 660/380 V，冶金和化工部门也正在进行测算。

1. 企业配电

（1）企业供配电系统 企业是指从事生产、运输和贸易等经济活动的部门，如工厂、矿山、铁路和公司等。企业供配电系统是指接受发电厂输入的电能，并进行检测、计量和变压等，然后向企业及其用电设备分配电能的系统。企业供配电系统包括企业内的变电所、所有高低压供配电线路及用电设备。其接线可分为：

1) 一次接线（主接线）。直接参与电能的输送与分配变压器等组成的接线，这个接线就是供配电系统的一次接线。一次接线上的设备称为一次设备，如变压器、高压断路器、隔离开关、电抗器、并联补偿电力电容器、电力电缆、送电线路和母线等。由这些设备构成的电路成为变电站的主电路，它是电能的输送路径。

2) 二次接线(二次回路)。为了保证供配电系统的安全、经济运行和操作管理上的方便,常在配电系统中装设各种辅助电气设备(二次设备),如电流互感器、电压互感器、测量仪表、继电保护装置和自动控制装置等,对一次设备进行监视、测量、保护和控制。把完成上述功能的二次设备之间互相连接的线路称为二次接线(二次回路)。

(2) 对企业供配电系统的要求 电能是社会生产和生活中最重要的能源和动力,现代企业更离不开电能。某个企业的供配电系统是指该企业所需要的电力电源从进入企业起到所有用电设备入端为止的整个电路,如图 1-1 所示。

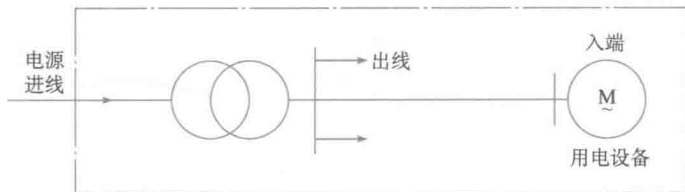


图 1-1 供配电系统示意图

为保证企业的正常生产和生活,企业供配电系统要满足以下基本要求:

1) 安全。安全是指在电能的供应、分配和使用中,应避免出现人身事故和设备事故,实现安全供电。

2) 可靠。可靠是指企业供电系统能够连续向企业中的用电设备供电,不得中断。若系统中的供电设备(如变压器)发生故障或检修,应由备用电源供电。

3) 优质。优质是指供电系统供给的电能质量应能满足企业的用电要求。传统的电能质量有三个主要指标:电压、频率和可靠性(不断电)。其中前两者是电能质量的重点考核指标。根据需要,目前又增加了谐波、三相不平衡度、电压波动和闪变。关于频率质量,在《供电营业规则》中规定:在电力系统正常状况下,供电频率的允许偏差:①电网装机容量在 300 万 kW 及以上的,为 ± 0.2 Hz;②电网装机容量在 300 万 kW 以下的,为 ± 0.5 Hz。在电力系统非正常状况下的供电频率允许偏差不应超过 ± 1.0 Hz。

4) 经济合理。经济是指供电系统的投资要少,运行费用要低,并尽可能地节约电能和有色金属消耗量。合理是指合理处理局部与全局、当前与长远等关系,既要照顾局部和当前利益,又要有全局观念,按照统筹兼顾、保证重点和择优供应的原则,做好企业供电工作。

综上所述,保证对用户不间断地供给充足、优质而又经济的电能,这就是对现代企业供电系统的基本要求。这些基本要求是相互联系的。在实际处理问题时,又往往是相互矛盾和相互制约的。因此,在考虑满足任何一项要求时,必须兼顾其他方面的要求。

(3) 供配电系统电压选择 企业供配电系统的供电电压应根据用电容量、用电设备特性、供电距离、供电线路的损耗、当地公共电网现状及其发展规划等因素,经技术经济比较后确定。一般规律是用电单位所需的功率大,供电电压等级应相应提高;供电距离长,宜提高供电电压等级,以降低线路电压损失;供电线路的回路数多,可降低供电电压等级;用电设备特性如负荷波动大,宜由容量大的电网供电,也就是要提高供电电压等级。上述规律仅是从用电角度进行分析而得到的,能否按此规律来选

择供电电压,还要看企业所在地的电网能否方便和经济地提供所需要的电压。

企业供配电系统的供电电压有高压和低压两种。高压供电是指采用 6~10 kV 及以上的电压供电。对中小型企业一般采用 6~10 kV 供电电压。当 6 kV 用电设备的总容量较大,选用 6 kV 经济合理时,宜采用 6 kV 供电;对大型企业,宜采用 35~110 kV 供电电压,以节约电能和投资,并提高电能质量。低压供电是指采用 1 kV 及以下的电压供电,通常采用 380/220 V 的供电电压,在某些特殊场合宜采用 660 V 的供电电压。例如矿井下,因用电负荷往往离变电所较远,为保证远端负荷的电压水平,宜采用 660 V 供电电压。采用较高的电压供电,不仅可以减少线路的电压损耗,保证远端负荷的电压水平,而且能减小导线截面积和线路投资,增大供电半径,减少变电点,简化供配电系统。因此,提高供电电压有其明显的经济效益,同时也是节电的一项有效措施,这在世界上已成为一种发展趋势。

2. 民用配电

(1) 民用建筑供配电设计的基本要求 民用建筑供配电设计主要包括高压供配电系统、低压配电系统、动力照明干线系统、配电箱系统、电缆导线的敷设以及电气设备器材的选型和安装等,设计的基本要求是可靠、简洁、安全和选择性好。

1) 可靠性。根据用电负荷的等级,要求在各种运行方式下提高供电的连续性,保证可靠供电。

2) 简洁性。主接线力求简单明显,没有多余的电气设备,投入、切除某些设备或线路的操作方便,分合闸直观。这样既可避免误操作,又能提高系统运行的可靠性,同时处理事故也能简单迅速。简洁性还表现在具有适应发展的可能性。

3) 安全性。保证在进行一切操作时工作人员和设备的安全,以及能在安全条件下进行维护检修工作。电气设备均在额定电压、电流情况下工作,事故时能安全切断事故部分的供电。

4) 选择性。从不扩大事故范围的角度考虑,电气设备的选择性也是设计应考虑的问题,选择性一般从不同整定电流的配合及断路器脱扣时间配合加以设计,但选择性的提高势必使经济性降低,所以建议在重要回路设计时考虑选择性。

(2) 民用建筑供配电设计的原则。

1) 配电电压应采用 380/220 V。

2) 配电系统设计应根据工程规模、设备布局和负荷容量及性质等综合因素确定。

3) 配电系统应满足生产和使用所需的供电可靠性和电压质量要求;接线简单,并具有一定的灵活性;操作安全,检修方便。另外,还要考虑节省有色金属消耗、减少电能损耗。

4) 从变压器二次侧到用电设备之间的低压配电级数不宜超过三级,但对非重要负荷供电时,可超过三级。

5) 由公用电网引入建筑物内的电源线路,应在屋内靠近进线点和便于操作维护的地方装设电源开关和保护电器。若由本单位配变电所引入建筑物内的专用电源线路,可装设不带保护的隔离电器。

6) 在正常环境的车间或建筑物内,当大部分用电设备容量不是很大又无特殊要求时,宜采用树干式配电;当用电设备容量大,或负荷性质重要,或在很潮湿、有腐蚀

性环境的车间及建筑物内时，宜采用放射式配电。

7) 各级低压配电屏（箱）应根据发展的可能性留有适当的备用回路。

(3) 多层建筑低压配电一般应遵守的原则。

1) 应满足计量、维护管理、供电安全和可靠的要求，将照明与动力负荷分成不同配电系统。

2) 确定多层住宅低压配电系统及计量方式时，应与当地供电部门协商，一般可采用以下几种方式。

① 单元总配电箱设于首层，内设总计量表。各层配电箱内设分户表，总配电箱至各层配电箱宜采用树干式配电，各层配电箱至各用户采用放射式配电。

② 单元不设总计量表，只在分层配电箱内设分户表，其配电干线、支线的配电方式同上。

③ 分户计量表全部集中于首层（或中间层）电能表间内，配电支线采用放射式配电至各用户。

3) 多层住宅照明计量应一户一表。

(4) 高层建筑低压配电一般应遵循的原则。

1) 选择变压器时，一般选用 SCL 型环氧树脂干式变压器。

2) 将照明与电力负荷分成不同的配电系统；消防及其他防灾用电设施的配电宜自成体系。

3) 对于容量较大的集中负荷或重要负荷应放射式配电。

1.1.5 用电

电力系统各级电力网上用电设备所需功率的总和称为用电负荷，各级电力网上发电机组产生的功率总和称为总供电功率。电力系统要求总用电负荷与总供电功率保持平衡，以确保供电质量，避免或减少供电事故的发生。依据用电户性质的不同，用电负荷一般可分为三级，见表 1-1。

表 1-1 用电负荷的三级分类

负荷分类	断电产生的后果	采取措施
一级	断电会引起人员伤亡，或造成重大的政治影响，或给国民经济造成重大损失，产生不良社会影响，如钢铁厂、石化企业、矿井和医院等	至少两个独立电源供电，重要的应配备备用电源，确保持续供电
二级	断电会造成产品的大量减产，大量原材料的报废，公共场所的正常秩序造成混乱，如化纤厂、生物制药厂、体育馆和医院等	一般由两个独立回路供电，提高供电持续性
三级	断电后造成的损失与影响不大	对电源无特殊需要，并允许在非正常情况下暂时停电

1.2 安全用电与触电急救

1.2.1 安全用电常识

(1) 人身安全

1) 人体电阻。人体电阻因人而异，基本上按表皮角质层电阻大小而定。影响人体电阻值的因素很多，皮肤状况（如皮肤厚薄、是否多汗、有无损伤和有无带电灰尘等）

和触电时与带电体的接触情况（如皮肤与带电体的接触面积、压力大小等）均会影响到人体电阻值的大小。一般情况下，人体电阻为 $1\sim 2\text{ k}\Omega$ 。

2) 与人身安全相关的电流。通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显，感觉越强烈，从而引起心室颤动所需的时间越短，致命的危险性越大。对工频交流电，按照通过人体的电流大小和人体呈现的不同状态可将其划分为下列三种。

① 感知电流。引起人体感知的最小电流称为感知电流。试验表明，成年男性平均感知电流有效值约为 1.1 mA ，成年女性约为 0.7 mA 。感知电流一般不会对人体造成伤害，但是电流增大时，感知增强，反应变大，可能造成坠落等间接事故。

② 摆脱电流。人触电后能自行摆脱电源的最大电流称为摆脱电流。一般男性的平均摆脱电流约为 16 mA ，成年女性为 10 mA ，儿童的摆脱电流较成年人小。摆脱电流是人体可以忍受而一般不会造成危险的电流。若通过人体的电流超过摆脱电流且时间过长，则会造成昏迷、窒息，甚至死亡。因此摆脱电源的能力随时间的延长而降低。

③ 致命电流。在较短时间内危及生命的最小电流称为致使电流。电流达到 50 mA 以上就会引起心室颤动，有生命危险； 100 mA 以上的电流足以致人死亡；而 30 mA 以下的电流通常不会有生命危险。

不同的电流对人体的影响，见表 1-2。

表 1-2 电流对人体的影响

电流/mA	交流电（50 Hz）		直流电
	通电时间	人体反应	人体反应
0~0.5	连续	无感觉	无感觉
0.5~5	连续	有麻痹，疼痛感，无痉挛	无感觉
5~10	数分钟内	痉挛，刺痛，但可摆脱电源	有针刺、压迫和灼热感
10~30	数分钟内	心跳不规则，呼吸困难	压痛，刺痛，灼热强烈
30~50	数秒至数分钟	心跳不规则，昏迷，强烈痉挛	感觉强烈，有刺痛
50~100	超过 3 s	心室颤动，呼吸麻痹，心脏因麻痹而停跳	剧痛，强烈痉挛，呼吸困难或麻痹

电流对人体的伤害与电流通过人体时间的长短有关。因人体发热出汗和电流对人体组织的电解作用，随着通电时间增加，人体电阻逐渐降低，通过人体电流增大，触电的危险性亦随之增加。

从避免心室颤动的观点出发，美国环境冲突解决机构 IECR（institute for environmental conflict resolution）根据研究结果，提出了安全电压和允许通电时间的关系，见表 1-3 所示。

表 1-3 安全电压与通电时间的关系

预期接触电压/V	<50	50	75	90	110	150	220	280
最大允许通电时间/s	∞	5	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.03

3) 电压的影响。当人体电阻一定时，作用于人体的电压越高，通过人体的电流越大。实际上通过人体的电流与作用于人体的电压并不成正比，这是因为随着作用于人

体电压的升高,人体电阻急剧下降,致使电流迅速增加,而对人体的伤害更为严重。

4) 个体特征。常用的 50~60 Hz 的工频交流电对人体的伤害程度最为严重。电源的频率偏离工频越远,对人体的伤害程度越轻。在直流和高频情况下,人体可以承受更大的电流,但高压高频电流对人体依然是十分危险的。

(2) 设备安全

1) 设备安装的要求。电气设备的金属外壳在正常情况下是不带电的,一旦绝缘结构损坏,外壳便会带电,人触及外壳就会触电。接地和接零是防止这类事故发生的有效措施。

① 工作接地。为保证电气设备在正常或发生事故情况下能可靠运行,将电路中的某一点通过接地装置与大地可靠地连接起来称为工作接地,如电源变压器的中性点接地、三相四线制系统中性线接地以及电压互感器和电流互感器二次侧某点接地等,如图 1-2 所示。实行工作接地后,当单相对地发生短路故障时,短路电流可使熔断器开路或自动断路器跳闸,从而切断电源,起到保护作用。

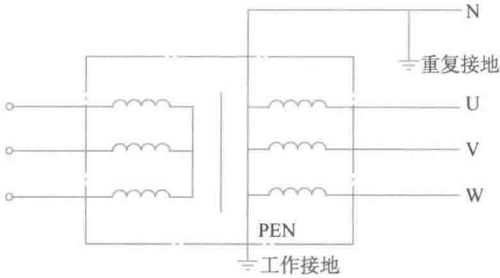


图 1-2 工作接地

② 保护接地。保护接地是指将电气设备在正常情况下不带电的金属外壳通过保护接地线与接地体相连。中性点不接地的电网中,保护接地如图 1-3 所示。采取了保护接地后,当一相绝缘结构损坏碰壳时,可使通过人体的电流很小,不会有危险。

③ 保护接零。

a. 三相四线制系统的保护接零。保护接零是将电气设备的金属外壳接到零线上,宜用于中性点接地的电网中,如图 1-4 所示。当一相绝缘结构损坏碰壳时,形成单相短路,使此相上的保护装置迅速动作,切断电源,从而避免触电的危险。为确保安全,

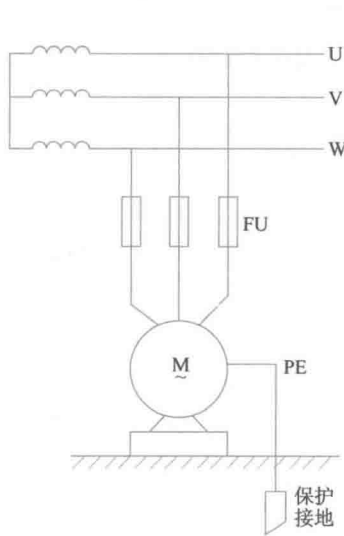


图 1-3 保护接地

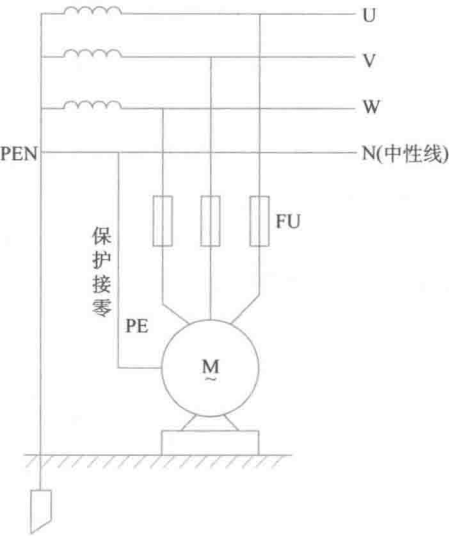


图 1-4 保护接零

零线和接零线必须连接牢固，开关和熔断器不允许装在零干线上，但引入室内的一根相线和一根零线上一一般都装有熔断器，以增加短路时熔断的机会。

b. 三相五线制系统的保护措施。为了改善和提高三相四线制低压电网的安全程度，提出了三相五线制接线方式，即增加一根保护零线（PE），而原三相四线中的零线称为工作零线（N），如图 1-5 所示。这种保护方式对于家用电器的保护接零特别重要，因为目前单相电源的进线（相线和中性线）都安装有熔断器，一旦熔断器熔断，此时的中性线（工作零线）就不能作为保护接零用了，所以要增加一根保护零线（PE）。这样工作零线只通过单相负荷的工作电流和三相不平衡电流，保护零线只作为保护接零使用，并通过短路电流。三相五线制大大加强了供电的安全性和可靠性，应积极推广。

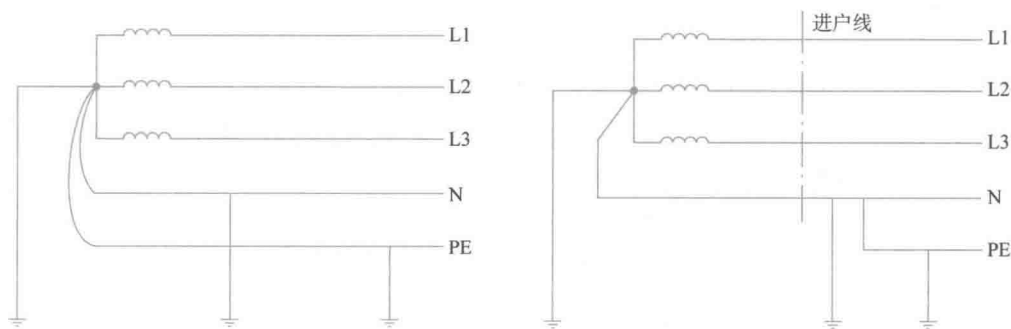


图 1-5 三相五线制系统的保护措施

2) 设备使用环境对电压的要求。凡是裸露的带电设备和移动的电气用具都应使用安全电压。安全电压是根据人体最小电阻和工频致命电流得出的对人体的最小危险电压。我国规定的安全电压有 42 V、36 V、24 V、12 V 和 6 V 五个等级，供不同场合选用。在一般建筑物中可使用 36 V 或 24 V；在特别危险的生产场地，如潮湿、有辐射性气体或有导电尘埃及能导电的地面和狭窄的工作场所等，则要用 12 V 和 6 V 的安全电压。安全电压的电源必须采用独立的双绕组隔离变压器，严禁使用自耦变压器。

1.2.2 触电与急救常识

1. 触电的种类与原因

(1) 触电的种类 按照触电事故的构成方式，触电事故可分为电击和电伤。

1) 电击。电击是电流对人体内部组织的伤害，是最危险的一种伤害，绝大多数（大约 85% 以上）的触电死亡事故都是由电击造成的。

2) 电伤。电伤是由电流的热效应、化学效应和机械效应等对人体造成的伤害。触电伤亡事故中，纯电伤性质的及带有电伤性质的约占 75%（电烧伤约占 40%）。尽管约 85% 以上的触电死亡事故是由电击造成的，但其中约 70% 含有电伤成分。对专业电工自身的安全而言，预防电伤具有更加重要的意义。

① 电烧伤。电烧伤是电流的热效应造成的伤害，分为电流灼伤和电弧烧伤。电流灼伤是人体与带电体接触，电流通过人体由电能转换成热能造成的伤害。电流灼伤一般发生在低压设备或低压线路上。

电弧烧伤是由弧光放电造成的伤害，分为直接电弧烧伤和间接电弧烧伤。前者是带电体与人体发生电弧，有电流流过人体的烧伤；后者是电弧发生在人体附近对人体

的烧伤，包含熔化了了的炽热金属溅出造成的烫伤。直接电弧烧伤是与电击同时发生的。电弧温度高达 8 000℃以上，可造成大面积、深度的烧伤，甚至烧焦、烧掉四肢及其他部位。大电流通过人体，也可能烘干、烧焦机体组织。高压电弧的烧伤较低压电弧严重，直流电弧的烧伤较工频交流电弧严重。发生直接电弧烧伤时，电流进、出口处的烧伤最为严重，体内也会受到烧伤。与电击不同的是，电弧烧伤会在人体表面留下明显痕迹。

② 皮肤金属化。皮肤金属化是在电弧高温的作用下，金属熔化、汽化后，金属微粒渗入皮肤，使皮肤粗糙而绷紧。皮肤金属化大多与电弧烧伤同时发生。

③ 电烙印。电烙印是在人体与带电体接触部位留下的永久性斑痕。斑痕处皮肤失去原有弹性、色泽，表皮坏死，失去知觉。

④ 机械性损伤。机械性损伤是电流作用于人体时，由于中枢神经反射和肌肉强烈收缩等作用导致的机体组织断裂、骨折等伤害。

⑤ 电光眼。电光眼是发生弧光放电时，由红外线、可见光和紫外线对眼睛造成的伤害。电光眼表现为角膜炎或结膜炎。

(2) 触电的原因 人体具有体电阻，是能够导电的，只要有足够的（大于 3 mA）电流流过就会对人体造成伤害，这就是触电。由于触电伤害根本无法预测，一旦发生触电伤害，后果会十分严重。

触电伤害的主要因素有以下几个方面。

1) 电流大小。流经人体电流的大小直接关系到人的生命安全。当电流小于 3 mA 时不会对人体造成伤害，人类利用安全电流的刺激作用制造医疗仪器就是最好的证明。电流对人体的作用见表 1-4。

表 1-4 电流对人体的作用

电流/mA	对人体的作用
<0.7	无感觉
1	有轻微感觉
1~3	有刺激感（电疗仪器一般取此电流）
3~10	有痛苦感，可自行摆脱
10~30	引起肌肉痉挛，短时间无危险，长时间有危险
30~50	强烈痉挛，时间超过 60 s 即有生命危险
50~250	产生心脏性纤颤，丧失知觉，严重危害生命
>250	短时间内（1 s 以上）造成心脏骤停，体内电灼伤

2) 人体电阻。人体电阻是一个不确定的电阻，它随人体皮肤的干燥程度的不同而不同。人体电阻还是一个非线性电阻，它随人体的电压变化而变化，见表 1-5。从表中可以看出，人体电阻的阻值随电压的升高而减小。

表 1-5 人体电阻的阻值随电压的变化

电压/V	12	31	62	125	220	380	1 000
电阻/kΩ	16.50	11.00	6.24	3.50	2.20	1.47	0.64
电流/mA	0.8	2.8	10.0	35.0	100.0	268.0	1 560.0