



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案和视频资源下载

www.cmpedu.com



电子工艺实训基础

主编 孙蓓 白蕾



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



非外借

普通高等教育电气信息类规划教材

电子工艺实训基础

主 编 孙 蓓 白 蕾

副主编 王华盛 肖 鹏 张志义

机械工业出版社

电子制造领域要求技术人员掌握前沿的工艺技术知识,还要具备丰富的专业实践经验。本书通过理论分析和技能训练,让学生了解制造电子产品的工艺流程和工艺方法。

本书强调了安全用电知识,介绍了常用电子元器件基础,重点分析了焊接工艺技术,讲解了印制电路板的设计与制作工艺,说明了产品装配和调试工艺方法,明确了电子技术文件内容,实践了小型电子产品制作,补充了常用电子仪器仪表的使用方法。

学生通过电子元器件检测、手工制版、手工焊接、丝网印刷、手工贴片、装配与调试等技术环节的学习和实践,可以全面学习通孔插装(THT)和表面贴装(SMT)工艺相关知识,熟练掌握电子工艺的关键技能,以备在今后的创新实践中应用。

本书可作为工科大专院校专业实训和职业培训教材,也可作为电子工艺工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子工艺实训基础/孙蓓,白蕾主编. —北京:机械工业出版社,2017.7
普通高等教育电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-57072-1

I. ①电… II. ①孙… ②白… III. ①电子技术-高等学校-教材
IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第131188号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:时 静

责任校对:张艳霞

责任印制:常天培

涿州市星河印刷有限公司印刷

2017年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·310千字

0001-2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-57072-1

定价:35.00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

服务咨询热线:(010)88379833

读者购书热线:(010)88379649

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

随着电子技术的发展，电子工艺技术逐渐成为一门理论性和实践性较强的新学科。为培养电子技术应用型工程人才，除了使其掌握必要的理论知识，还要有针对性地设置电子工艺技术方面的课程。通过学习实践，使学生具备对电子产品进行设计、制作、安装、调试、技术管理的能力。本书是为工科院校学生参加《电子工艺实习》而编写的教程。它是教学参考书，又是指导实践的实用资料；既是工艺技术的入门向导，又是创新实践的启蒙。

本书有如下特点：

1. 涉及面广。介绍电子工艺主要知识，包括安全用电、电子元器件、焊接工艺、印制电路板的设计与制作工艺、安装工艺、调试工艺、技术文件等。
2. 实用性强。通过对小型电子产品的装配实习，着重介绍并训练的实用技术包括：常用电子元器件基础与应用、手工焊接技术与工具材料、工业焊接技术与无铅焊接、印制电路板的设计与制作工艺、电子产品装配与调试工艺。
3. 新颖性。增加了表面安装（SMT）技术基础与产品制作工艺实习、手工制作电路板实践教学环节、电子技术文件与工艺管理、常用仪器仪表使用技术。

本书中元器件的符号未使用国家标准，而是与本书所涉及的 Protel 99 SE 软件和实际产品保持一致，以便读者对照和阅读。

本书第1~3章由孙蓓编写，第5章由张志义编写，第7、8章由白蕾编写，第4章和第6章中第6节由王华盛编写，第9章和第6章中第1~5节由肖鹏编写；孙蓓拟定编写提纲，并负责全书定稿工作。郑文岗和孙长健负责全书的插图绘制。

本书在编写过程中参阅了国内外的教材和文献，在此谨表谢意！

由于水平有限，书中定有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016年12月

目 录

前言

第1章 安全用电	1
1.1 触电及其对人体的危害	1
1.1.1 触电的概念	1
1.1.2 触电对人体的危害	1
1.1.3 产生触电的因素	1
1.1.4 安全电压	2
1.2 触电原因及防护	2
1.2.1 触电原因	2
1.2.2 防止触电	4
1.2.3 触电急救	4
1.3 设备安全用电	5
1.3.1 设备通电前检查	5
1.3.2 设备使用异常的处理	6
1.4 电子焊装操作安全	6
1.4.1 防止机械损伤	6
1.4.2 防止烫伤	6
1.5 用电安全技术	7
1.5.1 接地和接零保护	7
1.5.2 漏电保护开关	9
第2章 常用电子元器件	10
2.1 电阻器	10
2.1.1 电阻器和电位器的型号命名方法	10
2.1.2 电阻器的主要参数及标志方法	11
2.1.3 电阻器的种类、结构及性能特点	13
2.1.4 电位器	15
2.2 电容器	16
2.2.1 电容器的型号命名方法	16
2.2.2 电容器的主要参数及标志方法	18
2.2.3 电容器的种类、结构及性能特点	19

2.2.4 可变电容器	20
2.3 电感器和变压器	21
2.3.1 电感器的型号命名方法	21
2.3.2 电感器的主要参数及标志方法	22
2.3.3 电感器的种类、结构及性能特点	23
2.3.4 变压器	24
2.4 半导体分立器件	24
2.4.1 半导体分立器件的命名与分类	24
2.4.2 常用半导体器件	26
2.5 集成电路	31
2.5.1 集成电路的种类	31
2.5.2 集成电路的外形封装和引脚识别	31
2.6 表面安装元器件	32
2.6.1 无源器件 (SMC)	32
2.6.2 有源器件 (SMD)	35
2.7 其他电路元器件	37
2.7.1 电声器件	37
2.7.2 开关	39
2.7.3 继电器	40
第3章 焊接工艺	42
3.1 焊接基础知识	42
3.1.1 焊接的分类	42
3.1.2 焊接的方法	42
3.1.3 锡焊机理	43
3.2 焊接工具与材料	43
3.2.1 焊接工具	43
3.2.2 焊接材料	46
3.3 手工焊接工艺	50
3.3.1 焊前准备	50
3.3.2 手工焊接分类	51
3.3.3 焊点的质量要求	51
3.3.4 焊接要领	52
3.3.5 焊接步骤	53
3.3.6 印制电路板的焊接	55
3.3.7 几种典型器件的焊接方法	56
3.3.8 拆焊	57
3.3.9 焊接质量检查	59

3.4 工业焊接	60
3.4.1 浸焊	61
3.4.2 波峰焊	62
3.5 表面安装	62
3.5.1 表面安装技术的特点	63
3.5.2 表面安装材料	63
3.5.3 表面安装工艺	64
3.6 无锡焊接	67
3.6.1 压接	67
3.6.2 绕接	67
3.6.3 穿刺	68
第4章 印制电路板的设计与制作工艺	69
4.1 印制电路板的基础知识	69
4.1.1 印制电路板材料与类型	69
4.1.2 印制电路板设计前的准备	69
4.2 印制电路板的设计	71
4.2.1 印制电路板设计的基础	71
4.2.2 印制电路板设计的要求	76
4.2.3 印制电路板设计的技巧	78
4.2.4 印制电路板设计的过程和方法	83
4.3 印制电路板的制作工艺	86
4.3.1 印制电路板制作工艺的简介	86
4.3.2 印制电路板的雕刻制作工艺	88
4.3.3 手工制作印制电路板工艺	90
4.4 计算机辅助设计印制电路板	91
4.4.1 Protel 99 SE 简介	92
4.4.2 电路原理图的设计	92
4.4.3 PCB 电路图的设计	95
4.4.4 印制电路板软件的发展	97
第5章 准备与装配工艺基础	98
5.1 元器件引线成形	98
5.1.1 元器件引线成形的技术要求	98
5.1.2 成形方法	99
5.2 导线与电缆加工	99
5.2.1 绝缘导线的加工	99
5.2.2 屏蔽导线端头的加工	100
5.2.3 电缆加工	103

5.2.4	光缆的加工及其与连接器的连接	103
5.3	电子设备组装工艺	108
5.3.1	电子设备组装的内容和方法	108
5.3.2	组装工艺技术的发展	109
5.3.3	整机装配工艺过程	110
5.4	印制电路板的插装	112
5.4.1	印制电路板装配工艺	112
5.4.2	印制电路板组装工艺流程	114
5.5	连接工艺和整机总装工艺	115
5.5.1	连接工艺	115
5.5.2	整机总装	117
第6章	调试工艺	119
6.1	调试工作内容	119
6.2	调试工艺过程	120
6.2.1	调试工作遵循的一般规律	120
6.2.2	调试的一般工作过程	120
6.2.3	小型电子产品或单元电路板的调试步骤	121
6.3	静态测试与调整	121
6.3.1	静态测试内容	121
6.3.2	电路调整方法	122
6.4	动态测试与调整	123
6.4.1	测试电路动态工作电压	123
6.4.2	测量电路重要波形及其幅度和频率	123
6.4.3	频率特征的测试与调整	123
6.5	调试与检测仪器	124
6.5.1	仪器的选择与配置	124
6.5.2	仪器的使用	125
6.6	故障检测方法	127
6.6.1	观察法	127
6.6.2	测量法	128
6.6.3	跟踪法	130
6.6.4	替换法	132
6.6.5	比较法	132
第7章	电子技术文件	134
7.1	概述	134
7.1.1	应用领域	134
7.1.2	基本要求	134

7.1.3	分类及特点	135
7.2	产品技术文件	136
7.2.1	产品技术文件的特点	136
7.2.2	设计文件	137
7.2.3	工艺文件	138
7.3	电子工程图简介	139
7.3.1	图形符号	139
7.3.2	原理图	141
7.3.3	工艺图	145
7.4	电子技术文件计算机处理系统简介	147
第8章	电子实习产品	149
8.1	HX108-2A 型超外差式收音机	149
8.1.1	调幅收音机的工作原理	149
8.1.2	调幅收音机的装配工艺	153
8.1.3	整机调试	158
8.1.4	常见问题	160
8.1.5	故障检修指南	160
8.2	调频 (FM) 收音机	162
8.2.1	调频收音机的工作原理	162
8.2.2	调频收音机的装配工艺	164
8.2.3	调试与检测	168
第9章	常用电子仪器仪表的使用	170
9.1	YB1052 型高频信号发生器	170
9.1.1	概述	170
9.1.2	操作说明	170
9.2	YB4325 型示波器	171
9.2.1	面板控制键作用说明	171
9.2.2	操作方法	175
9.3	VC980 系列数字万用表	181
9.3.1	概述	181
9.3.2	安全事项	182
9.3.3	面板图说明	182
9.3.4	直流电压测量	182
9.3.5	交流电压测量	183
9.3.6	直流电流测量	183
9.3.7	交流电流测量	183
9.3.8	电阻测量	184

9.3.9 电容测量	184
9.3.10 晶体管 hFE	185
9.3.11 二极管及通断测试	185
9.3.12 频率测量	185
9.3.13 数据保持/背光的开启与关闭	185
9.3.14 自动开/关机	185
9.4 电容测试仪	185
9.4.1 外形结构	186
9.4.2 操作说明	187
9.5 集成电路测试仪	191
9.5.1 操作部件介绍	192
9.5.2 操作说明	193
参考文献	199

第1章 安全用电

本章主要介绍安全用电的基本知识。

安全是人类生存的基本需求之一，用电安全则是现代人不可避免的安身立业的基本常识。电气事故是现代社会不可忽视的灾害之一。安全用电涉及广泛，本章安全用电的讨论只是针对一般工作生活环境而言，即使一般环境，也只是就最基本最常见的用电安全问题进行讨论。

1.1 触电及其对人体的危害

1.1.1 触电的概念

触电是指当人体触及带电体承受过高的电压而导致死亡或局部受伤的现象。

1.1.2 触电对人体的危害

触电对人体的危害主要有电伤和电击两种。

1. 电伤

电伤是指由于电流的热效应、机械和化学效应造成人体触电部位的外部伤痕，包括电烧伤、皮肤金属化、机械损伤、电光眼。

2. 电击

电击是由于电流通过人体内部，影响呼吸、心脏和神经系统，造成人体内部组织损伤乃至死亡的触电事故。人体触及带电的导体、漏电设备的外壳，以及由于雷击或电容器放电等都可能導致电击。

1.1.3 产生触电的因素

1. 电流的大小

人体内是存在生物电流的，一定强度的电流不会对人造成损伤，电疗仪器就是利用电流刺激达到治疗目的的。通过人体的电流越大，引起的生理反应越明显，致命的危险性就越大。

通过人体的电流，交流电在 15 ~ 20 mA 以下，直流电在 30 mA 以下，一般对人体的危害较轻，超过上述数值，对人体就会造成危险。

2. 电流的种类

电流的种类不同，对人体的损伤也不同。直流电一般引起电伤，而交流电则是与电击同时发生，特别是 40 ~ 100 Hz 交流电对人体最危险。日常使用的工频市电（我国为 50 Hz）正是在这个危险的频段内。当交流电频率达到 20000 Hz 时对人体危害很小，用于理疗的一些仪器就采用这个频段。

3. 电流的作用时间

电流通过人体的时间越长伤害越大。可以用电流与时间的乘积（也称电击强度）来表示电流对人体的危害。触电保护器的一个主要指标就是额定断开时间与电流的乘积小于

30 mA · s。实际产品可以小于 3 mA · s，故可有效防止触电事故。

1.1.4 安全电压

安全交流电压在任何情况下有效值不得超过 50 V，我国规定的安全交流电压系列有 36 V、24 V、12 V 等。直流安全电压为 72 V，我国规定的安全直流电压系列是 42 V、36 V、24 V、12 V、6 V。安全电压是对人体皮肤干燥时而言的。因为通过人体电流的大小，主要取决于施加于人体的电压和人体本身的电阻。人体电阻包括皮肤电阻和体内电阻，其中皮肤电阻随外界条件不同有较大变化，一般干燥的皮肤电阻约在 100 kΩ 以上，但随皮肤的湿度加大，电阻会减少，甚至会减小到 1 kΩ 以下，所以，倘若人体出汗，又用湿手接触 36 V 的电压时，同样会受到电击，此时安全电压也不安全了。

1.2 触电原因及防护

电击的危害是由于人体同电源接触，或者是高压电场通过人体放电造成的。后者在一般电子设备中较少遇到。常发生的电击是在 220 V 交流电源上，其中有设备本身的不安全因素，也有自己的错误操作以及缺乏安全知识等因素。

1.2.1 触电原因

1. 直接接触及电源

没有人糊涂到用手去摸 220 V 的电源插座或裸露电线。但实际上由于存在各种不为人所注意的途径，还是有人触到了电源而产生电击。下面的几个例子就在人们不注意的地方隐藏着危险。

- 1) 电源线破损。经常使用的电器，如电烙铁、台灯等的塑料电源线，因无意中被割破或被烙铁烫伤塑料绝缘层而裸露金属导线，手碰该处就会引起触电。
- 2) 拆装螺口灯头时，手指触及灯泡螺纹引起触电。
- 3) 调整仪器时，电源开关断开，但未拔下插头，开关上部分接点带电。

2. 错误使用设备

在电子仪器调试或电路实验中，往往使用多种电气设备组成所需电路。如果不充分了解每种设备的电路接线情况，有可能将 220 V 电源线引入到人们认为安全的地方，造成触电的危险。图 1-1a、b 所示是错误使用自耦调压器的方法，这是一个曾经发生事故的实例，其中，图 1-1a 为印制电路板等实际操作图，图 1-1b 为其等效电路原理图。图 1-1c 给出了正确使用自耦调压器的电路原理图。

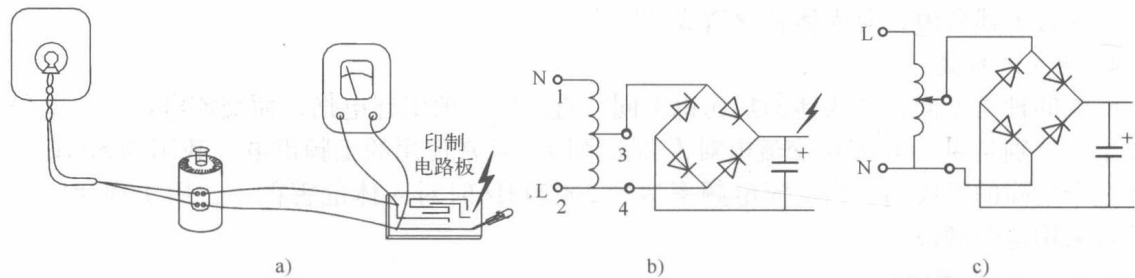


图 1-1 自耦调压器的使用

a) 错误使用自耦调压器示意图 b) 错误使用自耦调压器电路原理图 c) 正确使用自耦调压器电路原理图

图 1-1 中，操作者试图用调压器来改变输入电压，试验稳压电源板在输入交流电压变化时的电路特性。电路接通时并没有异常现象，万用表测得电压为十几伏，但在调整中用手碰电路板上元器件时，却发生电击。其原因只要画出等效电路原理图就很清楚了，因为两芯的插头很容易将端点 2 接到电源相线上，这样虽然用万用表测得 3、4 端电压为十几伏，但 4 端有对地 220 V 的高电压，一旦碰到同它相接的元器件或印制导线等，就免不了触电。因此，决不可从自耦变压器输出端取得安全低压。

预防的办法很简单，只要采用三芯插头，使自耦变压器的公共点 2 接到工作零线上即可。

3. 金属外壳带电

电气设备的金属外壳如果带电，操作者就很容易触电，这种情况在电击事故中占很大比例。

金属外壳带电有种种原因，常发生的情况有以下几种。

- 1) 电源线虚焊，造成在运输、使用过程中开焊脱落，搭接在金属件上而同外壳连通。
- 2) 工艺不良，产品本身带隐患。例如，用金属压片固定电源线，压片有尖棱或毛刺，容易在压紧或振动时损坏导线绝缘层。
- 3) 接线螺钉松动，造成电源线脱落。
- 4) 设备长期使用不检修，导线绝缘老化开裂，碰到外壳尖角处，形成通路。
- 5) 错误接线，有人在更换外壳，接保护零线设备插头、插座时，错误连接，如图 1-2b 所示。结果造成外壳直接接到电源相线上（注意：此时设备运行是正常的，不容易引起人们的注意）。正确的接线法如图 1-2a 所示。

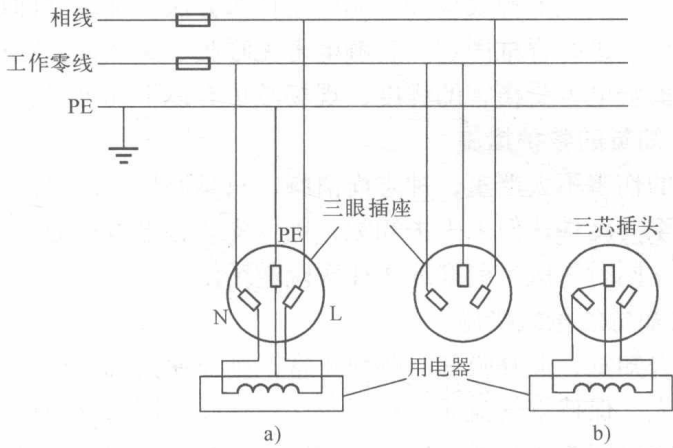


图 1-2 三芯插头与三眼座的接法
a) 正确接法 b) 错误接法

4. 电容器放电

电容器能够存储电能。一个充了电的电容器，具有同充电电源相同的电压，所存储电能同电容器容量有关。断开电源后，电能可以存储相当长的时间。电容器同样可以产生电击，尤其是高电压、大容量电容器，可以造成严重的甚至致命的电击。工作电压较高（>50 V），或者电容量较大（>10 μF ）的电容器，测试前一定要先放电。

1.2.2 防止触电

1. 安全措施

接通电源前要记住“四查而插”：查电源线有无破损；查插头有无外露金属或内部松动；查电源插头两极有无短路，同金属外壳有无通路；查设备所需电压值是否与供电电压相符。

最简单的方法是用万用表 $R \times 1k$ 或 $R \times 10k$ 档，在电源开关断开时，对于两芯插头，两个电极之间及它们与外壳之间电阻为无穷大，电源开关闭合时，两个电极与外壳均不通。

2. 安全操作

- 1) 检修电器和电路要拔下电源插头。
- 2) 不要湿手开关、插拔电源线。
- 3) 尽可能单手操作。
- 4) 不在疲劳状态从事电工作业。
- 5) 对大容量电容要放电后再对电路进行检修。

1.2.3 触电急救

发生触电事故时，千万不要惊慌失措，必须用最快的速度使触电者脱离电源。触电时间越长，对人体损害越严重，一两秒的迟缓都可能造成不可挽救的后果。触电者未脱离电源前本身就是带电体，同样会使抢救者触电。在移动触电者离开电源时，要保护自己不要受第二次电击伤害。首先要关闭电源，或用干燥的木棒、竹竿、橡胶圈等拨开电线，或者用衣服套住触电者的某个部位，将其从电源处移开。无论用什么方法，都应立即切断触电者身体与电源的接触。脱离电源后应进行脊椎固定，若触电者无呼吸、无脉搏，在送往医院的途中要积极进行心脏复苏。根据触电者受伤害的程度，现场救护有以下几种措施。

1. 触电者未失去知觉的救护措施

如果触电者所受的伤害不太严重，神志尚清醒，只是心悸、出冷汗、恶心、呕吐、四肢发麻、全身无力，甚至一度昏迷但未失去知觉，则可先让触电者在通风、暖和的地方静卧休息，并派人严密观察，同时请医生前来或送往医院救治。

2. 触电者已失去知觉的抢救措施

如果触电者已失去知觉，但呼吸和心跳尚正常，则应使其舒适地平卧着，解开衣服以利呼吸，四周不要围人，保持空气流通，冷天应注意保暖，同时立即请医生前来或送往医院诊治。若发现触电者呼吸困难或失常，应立即施行人工呼吸（见图 1-3）或胸外心脏按压。

3. 胸外按压

胸外按压是借助人力使触电者恢复心脏跳动的急救方法。操作要领是：让触电者仰面躺在平硬的地方，并解开其衣服，仰卧姿势与口对口人工呼吸法相同。右手的食指和中指沿触电者的右侧肋弓下缘向上，找到肋骨和胸骨接合处的中点。另一只手的掌根紧挨食指上缘，置于胸骨上，掌根处即为正确按压位置，如图 1-4 所示。

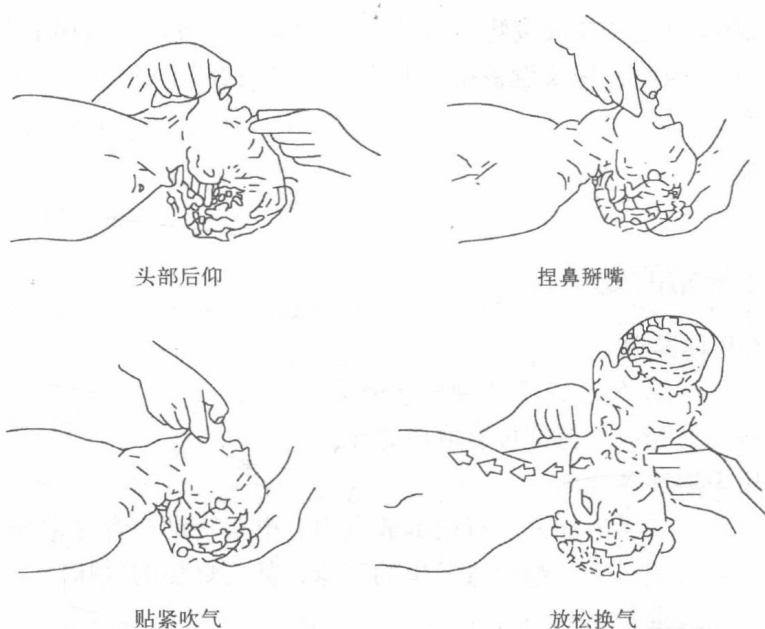


图 1-3 人工呼吸示意图

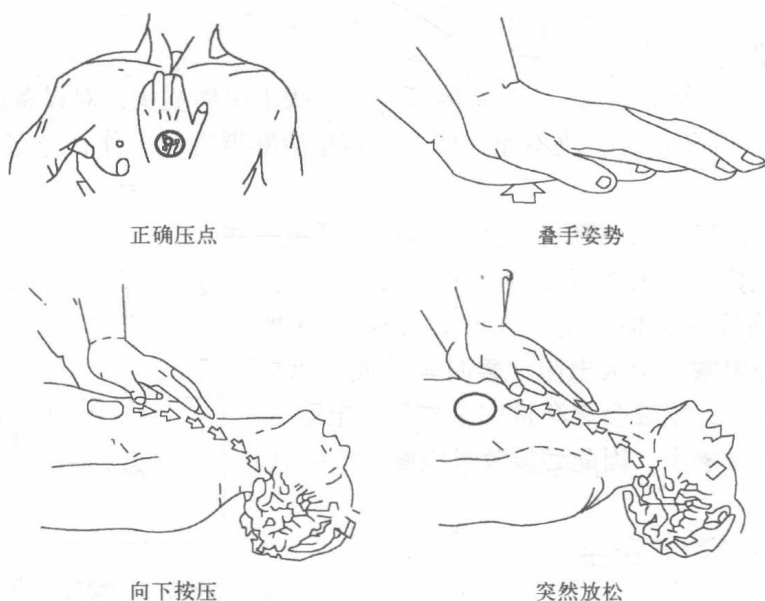


图 1-4 胸外按压示意图

1.3 设备安全用电

电气设备所使用的是交流电源，有三相 380 V 和单相 220 V。电气设备都有可能存在因绝缘损坏而漏电的问题。为了确保人身安全和电气设备不损坏，使用前应对电气设备进行检查，发现异常及时处理。

1.3.1 设备通电前检查

将用电设备接入电源，这个问题似乎很简单，其实不然。如果电路有问题，有的昂贵设

备，接上电源的一瞬间可能会变成废物；有的设备本身若有故障，会引起整个供电网异常，造成难以挽回的损失。因此，建议设备接电前应进行“三查”。

- 1) 查设备铭牌。
- 2) 查环境电源。
- 3) 查设备本身。

1.3.2 设备使用异常的处理

1. 可能发生的几种异常

用电设备在使用中可能发生以下几种异常情况：

- 1) 用手摸设备的外壳或手持部位有麻电感觉。
- 2) 开机或使用中熔断器烧断。
- 3) 出现异常声音，如噪声加大、有内部放电声、电机转动声音异常等。
- 4) 异味。最常见为塑料味、绝缘漆发出的气味，甚至烧焦的气味。
- 5) 机内打火，出现烟雾。
- 6) 仪表指示超范围。有些指示仪表数值突变，超出正常范围。

2. 异常处理

异常情况处理办法如下：

- 1) 凡遇上述异常情况之一，应尽快断开电源，拔下电源插头，对设备进行检修。
 - 2) 对烧断熔断器的情况，决不允许换上大容量熔断器继续工作，一定要查清原因后再换上同规格熔断器。
 - 3) 及时记录异常现象及部位，避免检修时再通电查找。
 - 4) 对有麻木感觉但未造成触电的现象不可忽视。
- 这种情况往往是绝缘受损但未完全损坏，如图 1-5 所示，相当于电路中串联一个大电阻，暂时未造成严重后果，但随着时间推移，绝缘会逐渐被完全破坏，电阻 R_0 急剧减小，危险也会增大，因此必须及时检修。

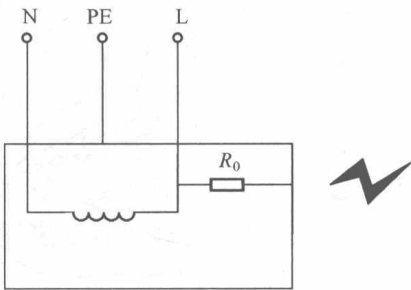


图 1-5 设备绝缘受损漏电示意图

1.4 电子焊装操作安全

电子焊装工作环境常用到电动工具（电烙铁、电钻、电热风机）、仪器设备和制作装置，所以应注意以下安全规则。

1.4.1 防止机械损伤

- 1) 不要戴手套或披长发操作钻床。
- 2) 用剪线钳剪元器件引线时，要让引线甩出方向朝着工作台或空地，以防伤及人和设备。
- 3) 用螺钉旋具拧螺钉时，另一只手不要握在螺钉旋具刀口方向。

1.4.2 防止烫伤

- 1) 不要用手触摸电烙铁、电热风枪或故障电路中的发热器件。

- 2) 烙铁头上多余焊锡不要乱甩。
- 3) 插拔电烙铁等电器的电源插头时不要手抓电源线，要手拿插头。
- 4) 不要接触熔化状态的焊锡或加热的溶液。

1.5 用电安全技术

实践证明，采用用电安全技术可以有效预防电气事故。已有的技术措施不断完善，新的技术不断涌现，需要人们了解并正确运用这些技术，不断提高安全用电的水平。

1.5.1 接地和接零保护

在低压配电系统中，有变压器中性点接地和不接地两种系统，相应的安全措施有接地保护和接零保护两种方式。

1. 接地

在中性点不接地的配电系统中，电气设备宜采用接地保护。这里的“接地”同电子电路中简称的“接地”（在电子电路中“接地”是指公共参考电位“零点”）不是一个概念，这里是真正的接大地。即将电气设备的某一部分与大地土壤作良好的电气连接，一般通过金属接地体并保证接地电阻小于 $4\ \Omega$ 。接地保护示意图如图 1-6 所示。如没有接地保护，则流过人体的电流为

$$I_r = \frac{U}{R_r + \frac{Z}{3}} \quad (1-1)$$

式中 I_r ——流过人体的电流；

U ——相电压；

R_r ——人体电阻；

Z ——相线对地阻抗。

当接上保护地线时，相当于给人体电阻并联一个接地电阻 R_g ，此时流过人体的电流为

$$I'_r = \frac{R_g}{R_g + R_r} I_r \quad (1-2)$$

由于 $R_g \ll R_r$ ，故可有效保护人身安全。

由此也可看出，接地电阻越小，保护越好，这就是为什么在接地保护中总强调接地电阻要小的缘故。

2. 接零保护

对变压器中性点接地系统（现在普遍采用电压为 380 V/220 V 的三相四线制电网）来说，采用外壳接地已不足以保证安全。参考图 1-6，因人体电阻 R_r 远大于设备接地电阻 R_g ，所以人体受到的电压就是相线与外壳短路时，外壳的对地电压 U_ϕ ，而 U_ϕ 取决于下式：

$$U_\phi \approx \frac{R_g}{R_0 + R_g} U \quad (1-3)$$

式中 R_0 ——工作接地的接地电阻；

R_g ——保护接地的接地电阻；