

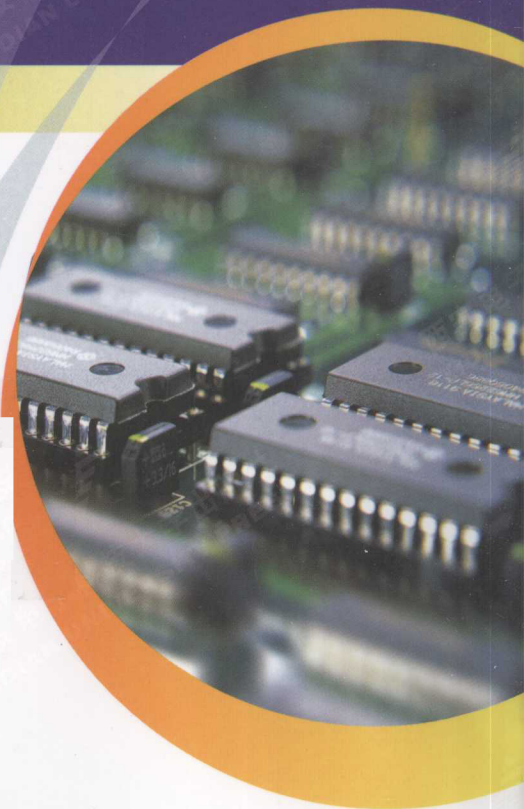


高等学校信息工程类专业规划教材

电子工艺实训教程

(第二版)

宁 铎 马令坤 编著
郝鹏飞 孟彦京



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业规划教材

电子工艺实训教程

(第二版)

宁 铎 马令坤

郝鹏飞 孟彦京

编著

西安电子科技大学出版社

2010

内 容 简 介

本书以基本电子工艺知识和电子装配基本技术为主,对电子产品制造过程及典型工艺作了全面介绍。在理论与实践的结合上强调了实践性。全书共8章,内容分别为安全用电、焊接技术、电子元器件、印制电路板的设计与制作、准备工艺及装配、调试工艺基础、电子技术文件、电子小产品安装调试案例等。

本书内容充实,可读性强,兼有实用性、资料性和先进性。

本书既可作为理工科学生参加电子工艺实习与训练的教材,亦可作为电子科技创新实践、课程设计、毕业实践等活动的实用指导书,同时还可供职业教育、技术培训及有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子工艺实训教程 / 宁铎等编著. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社, 2010.3

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2397 - 9

I. 电... II. 宁... III. 电子技术—高等学校—教材 IV.TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 014763 号

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2010年3月第2版 2010年3月第6次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 14.875

字 数 345千字

印 数 16001~19000册

定 价 22.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2397 - 9/TN · 0554

XDUP 2689002-6

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

第二版前言

社会的进步,经济的发展都依赖于技术的不断提高。高等工程教育肩负着培养高级工程技术人员使命,工程技术人员培养方向和培养质量将决定未来经济的发展速度和社会的进步程度。我国的高等工程教育目前仍存在着工程教育的过度学术化现象,特别是在飞速发展的电子技术领域,学习与应用的矛盾更为突出。目前人才市场上用人单位一般把具有实际工作经历作为招聘工程技术人才的必要或优先条件之一,就充分说明了这一点。因此,我们必须在工科学生的培养上紧密结合工程实际,注重加强学生的工程素质和创新精神培养,为国家建设提供高素质的工程技术人员。

本书第二版是在广泛听取不同院校的使用后的反馈意见,并考虑到实际的教学环节和内容的完整性对第一版的内容作了增加和删减。主要有以下改进:

1. 在第4章增加了“Multisim 仿真软件简介”一节,在第8章增加了“HX108-2 AM 收音机安装调试实例”。

2. 为了突出实际工艺要点,并考虑到实际授课情况,本版对许多章节的内容进行了删减,包括对第5章中的连接工艺、第7章中有关产品工艺文件的分类细节及工艺文件的完整性等内容进行了调整,同时还删除了附录A、B。

电子工艺实习是以学生自己动手,掌握一定操作技能和制作一两种电子产品为特色的又一个教学环节。它既不同于培养劳动观念的公益劳动,又不同于让学生自由发挥的科技创新活动;它既是基本技能和工艺知识的入门向导,又是创新实践的开始和创新精神的启蒙。要构筑这样一个基础扎实、充满活力的实践平台,仅靠课堂讲授和动手训练是不够的,需要有一本既能指导学生实习,又能开阔眼界;既是教学参考书,又是实践指导实用资料的书籍。正是在这种背景下我们编写了本教材。

本书在内容编排上打破传统学科体系,主要考虑教学实践和工艺实践的要求。在内容选取上考虑到我国电子科技及生产技术的国情及各行业应用电子技术的差异,在高新技术与传统技术,规模生产与研制开发,机械化、自动化与手工操作等方面统筹兼顾,合理安排,使本书既是电子工艺基础训练的教材,又是从事电子技术实践和创新的实用指导书。另外,之所以选择“202 收音机安装调试实例”和“HX108-2 AM 收音机安装调试实例”作

为电子小产品安装调试案例，是因为这两种收音机不但在结构上有普通电子元件和 SMT 工艺的焊接技术，而且其性能和外观也深受学生的欢迎。

使用本教材的实训教学课时安排一般为 2 周时间，其中课堂授课时间约占 1/4；而第 1、7 章及其他章节部分内容拟以自学为主，具体要依学时及训练内容等实际情况决定。

由于编者时间及水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者
2010 年 1 月

目 录

第1章 安全用电.....	1
1.1 人身安全.....	1
1.2 设备安全.....	4
1.3 电气火灾.....	6
1.4 用电安全技术简介.....	6
1.5 电子装接操作安全.....	11
1.6 触电急救与电气消防.....	13
第2章 焊接技术.....	14
2.1 焊接的基础知识.....	14
2.2 焊接工具与材料.....	16
2.2.1 电烙铁.....	16
2.2.2 焊料.....	18
2.2.3 助焊剂.....	21
2.2.4 阻焊剂.....	22
2.3 手工焊接工艺.....	22
2.3.1 焊接准备.....	23
2.3.2 手工焊接.....	24
2.3.3 手工焊接的分类.....	28
2.3.4 印制电路板的手工焊接.....	29
2.3.5 几种易损元器件的焊接.....	30
2.3.6 焊接缺陷分析.....	32
2.3.7 焊接后的清洗.....	36
2.3.8 拆焊技术.....	36
2.4 浸焊与波峰焊.....	38
2.4.1 浸焊.....	38
2.4.2 波峰焊.....	39
2.4.3 组焊射流法.....	43
2.5 表面安装技术.....	44
2.5.1 表面安装技术的概念.....	44
2.5.2 表面安装技术工艺流程.....	44
2.5.3 几种 SMT 工艺简介.....	46
2.6 无锡焊接技术.....	47
2.6.1 接触焊接.....	47

2.6.2 熔焊.....	49
第3章 电子元器件.....	52
3.1 电阻器.....	52
3.1.1 电阻器和电位器的型号命名方法.....	52
3.1.2 电阻器的主要参数及标志方法.....	55
3.1.3 电阻器的种类、结构及性能特点.....	58
3.1.4 敏感电阻器.....	60
3.1.5 电位器.....	61
3.1.6 电阻器的选用及注意事项.....	64
3.2 电容器.....	64
3.2.1 电容器的型号命名方法.....	64
3.2.2 电容器的主要参数及标志方法.....	66
3.2.3 电容器的种类、结构及性能特点.....	67
3.2.4 可变电容器.....	69
3.2.5 电容器的选用及注意事项.....	70
3.3 电感器和变压器.....	70
3.3.1 电感器的型号命名方法.....	70
3.3.2 电感器的主要参数及标志方法.....	72
3.3.3 电感器的种类、结构及性能特点.....	73
3.3.4 变压器.....	74
3.3.5 电感器、变压器的选用及注意事项.....	75
3.4 半导体分立器件.....	75
3.4.1 半导体分立器件的型号命名方法.....	75
3.4.2 二极管.....	76
3.4.3 三极管.....	77
3.5 集成电路.....	81
3.5.1 集成电路的型号命名方法.....	81
3.5.2 集成电路的引脚识别及性能检测.....	84
3.5.3 集成电路的种类及选用.....	87
3.5.4 音乐及语音集成电路.....	88
3.6 其他电路元器件.....	92
3.6.1 电声器件.....	92
3.6.2 开关及继电器.....	94
3.6.3 接插件.....	98
3.7 电子元器件一般选用原则.....	99
第4章 印制电路板的设计与制作.....	102
4.1 印制电路板的基础知识.....	102
4.1.1 印制电路板.....	102
4.1.2 印制电路板设计前的准备.....	104

4.2 印制电路板的排版设计	107
4.2.1 印制电路板的设计原则	107
4.2.2 印制电路板干扰的产生及抑制	114
4.2.3 元器件排列方式	116
4.2.4 焊盘及孔的设计	118
4.2.5 印制导线设计	120
4.2.6 草图设计	122
4.3 印制电路板制造工艺	125
4.4 计算机辅助设计印制电路	128
4.4.1 Protel 99 电路设计简介	128
4.4.2 电路原理图设计	129
4.4.3 印制电路图设计	133
4.5 Multisim 仿真软件简介	136
4.5.1 Multisim 概貌	137
4.5.2 Multisim 电路仿真应用实例	139
第 5 章 准备工艺及装配	143
5.1 元器件成形	143
5.2 导线与电缆加工	144
5.2.1 绝缘导线的加工	144
5.2.2 屏蔽导线端头的加工	147
5.2.3 加工整机的“线扎”	149
5.2.4 电缆加工	152
5.3 电子设备组装工艺	153
5.3.1 电子设备组装的内容和方法	153
5.3.2 组装工艺技术的发展	155
5.3.3 整机装配工艺过程	157
5.3.4 电子元器件的布局	158
5.4 印制电路板的插装	158
5.4.1 印制电路板装配工艺	159
5.4.2 印制电路板组装工艺流程	161
5.5 连接工艺和整机总装工艺	162
5.5.1 连接工艺	162
5.5.2 整机总装	163
5.6 整机总装质量的检验	164
第 6 章 调试工艺基础	166
6.1 调试工艺过程	166
6.2 静态测试与调整	168
6.3 动态测试与调整	170
6.4 整机性能测试与调整	171

6.5 调试与检测仪器	171
6.5.1 仪器选择与配置	172
6.5.2 仪器的使用	173
6.6 调试与检测安全	175
6.7 故障检测方法	176
6.7.1 观察法	177
6.7.2 测量法	177
6.7.3 跟踪法	180
6.7.4 替换法	182
6.7.5 比较法	183
第7章 电子技术文件	185
7.1 电子技术文件概述	185
7.1.1 两类不同应用领域	185
7.1.2 基本要求	185
7.1.3 分类及特点	186
7.2 产品技术文件	187
7.2.1 产品技术文件的特点	187
7.2.2 设计文件	188
7.2.3 工艺文件	189
7.3 图形符号及说明	189
7.4 原理图简介	191
7.4.1 系统图	191
7.4.2 电路图	192
7.4.3 逻辑图	195
7.4.4 流程图	196
7.4.5 功能表图	197
7.4.6 图形符号灵活运用	198
7.5 工艺图简介	199
7.6 电子技术文件计算机处理系统简介	205
第8章 电子小产品安装调试案例	208
8.1 202 收音机安装调试实例	209
8.1.1 工作原理	209
8.1.2 202 收音机显示及控制电路	211
8.1.3 202 收音机整机装配	213
8.1.4 202 收音机调试工艺	214
8.1.5 202 收音机装配流程	215
8.2 HX108-2 AM 收音机安装调试实例	216
8.2.1 工作原理	216
8.2.2 整机装配	218

8.2.3 整机调试	221
8.3 收音机常见故障检修	222
8.3.1 完全无声的故障	223
8.3.2 有“沙沙”噪声无电台信号的故障	224
8.3.3 声音小、灵敏度低的故障	224
8.3.4 啸叫声的故障	224
8.3.5 声音失真的故障	226
参考文献	227

第1章 安全用电

安全是人类生存的基本需求之一，也是人类从事各种活动的基本保障。从家庭到办公室，从娱乐场所到工矿企业，从学校到公司，几乎没有不用电的场所。电是现代物质文明的基础，同时又是危害人类的肇事者之一，如同现代交通工具把速度和效率带给人类的同时，也让交通事故这个恶魔闯进现代文明一样，电气事故是现代社会不可忽视的灾害之一。

从使用电能开始，科技工作者就为减少、防止电气事故而不懈努力。长期实践中，人们总结积累了大量安全用电的经验。但是，人不能事事都去实践，特别是对安全事故而言。我们应该记取前人的经验教训，掌握必要的知识，防患于未然。

安全技术，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，至于特殊场合，例如高压、矿井等用电安全不在讨论之列。限于本书篇幅，即使一般环境，也只能就最基本最常见的用电安全问题进行讨论。

1.1 人身安全

1. 触电危害

触电对人体危害主要有电伤和电击两种。

1) 电伤

电伤是由于发生触电而导致的人体外表创伤，通常有以下三种：

(1) 灼伤。灼伤是指由于电的热效应而对人体皮肤、皮下组织、肌肉甚至神经产生的伤害(灼伤)。灼伤会引起皮肤发红、起泡、烧焦、坏死。

(2) 电烙印。电烙印是指由电流的机械和化学效应造成人体触电部位的外部伤痕，通常是皮肤表面的肿块。

(3) 皮肤金属化。这种化学效应是指由于带电体金属通过触电点蒸发进入人体造成的，局部皮肤呈现出相应金属的特殊颜色。

触电对人体造成的电伤一般是非致命的。

2) 电击

电流通过人体，严重干扰人体正常的生物电流，造成肌肉痉挛(抽筋)、神经紊乱，导致呼吸停止，心脏室性纤颤，严重危害生命。

3) 影响触电危险程度的因素

(1) 电流的大小。人体内是存在生物电流的，一定限度的电流不会对人造成损伤。一些电疗仪器就是利用电流刺激穴位来达到治疗目的的。电流对人体的作用如表 1-1 所示。

表 1-1 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，一般电疗仪器取此电流
3~10	感到痛苦，但可自行摆脱
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	产生心脏室性纤颤，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，体内造成电灼伤

(2) 电流的类型。电流的类型不同对人体的损伤也不同。直流电一般引起电伤，而交流电则电伤与电击同时发生，特别是 40~100 Hz 交流电对人体最危险。不幸的是人们日常使用的工频市电(我国为 50 Hz)正是在这个危险的频段。当交流电频率达到 20 000 Hz 时对人体危害很小，用于理疗的一些仪器采用的就是这个频段。

(3) 电流的作用时间。电流对人体的伤害同作用时间密切相关。可以用电流与时间乘积(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乘积小于 30 mA·s。实际产品可以达到小于 3 mA·s，故可有效防止触电事故。

(4) 人体电阻。人体是一个不确定的电阻。皮肤干燥时电阻可呈现 100 kΩ 以上，而一旦潮湿，电阻可降到 1 kΩ 以下。

人体还是一个非线性电阻，随着电压升高，电阻值减小。表 1-2 给出人体电阻值随电压的变化。

表 1-2 人体电阻值随电压的变化

电压/V	1.5	12	31	62	125	220	380	1000
电阻/kΩ	>100	16.5	11	6.24	3.5	2.2	1.47	0.64
电流/mA	忽略	0.8	2.8	10	35	100	268	1560

2. 触电原因

人体触电，主要原因有两种：直接或间接触带电体以及跨步电压。前者又可分为单极接触和双极接触。

1) 单极接触

一般工作和生活场所供电为 380 V/220 V 中性点接地系统，当处于地电位的人体接触带电体时，人体承受相电压如图 1.1 所示。

这种接触往往是人们粗心大意、忽视安全造成的。图 1.2 是几个发生触电事故的示例。

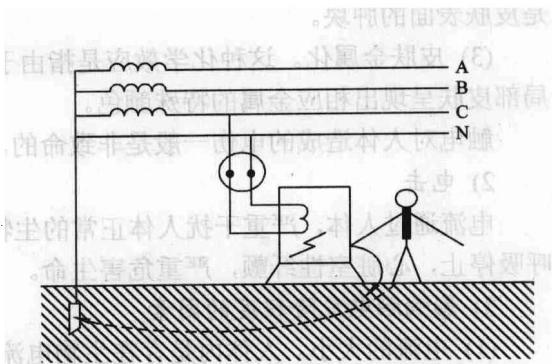


图 1.1 单极接触触电示意图

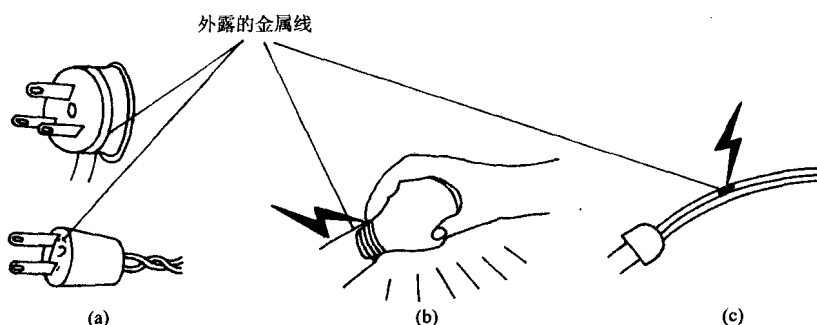


图 1.2 触电示例

(a) 安装错误; (b) 带电操作; (c) 导线绝缘损伤

图 1.3 所示为有人在实验室用调压器取得低电压做实验而发生触电。如果碰巧电源插座的零线插到调压器 2 端，则不会触电，当然这是侥幸的。

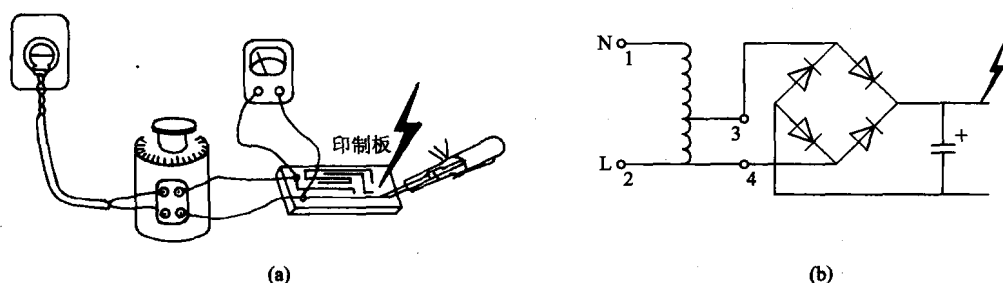


图 1.3 错误使用自耦调压器

(a) 错误使用自耦调压器; (b) 原理电路

2) 双极接触

人体同时接触电网的两根相线发生触电，如图 1.4 所示。这种接触电压高，大都是在带电工作时发生的，而且一般保护措施都不起作用，因而危险极大。

3) 静电接触

在检修电器或科研工作中有时发生电器设备已断开电源，但在接触设备某些部位时发生触电，这在有高压大容量电容器的情况下有一定危险。特别是质量好的电容器能长期储存电荷，容易被忽略。

4) 跨步电压

在故障设备附近，例如电线断落在地上，在接地点周围存在电场，当人走进这一区域时，将因跨步电压而使人触电，如图 1.5 所示。

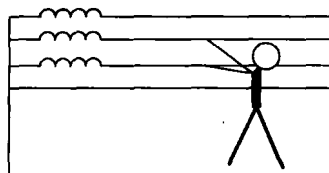


图 1.4 双极接触触电示意图

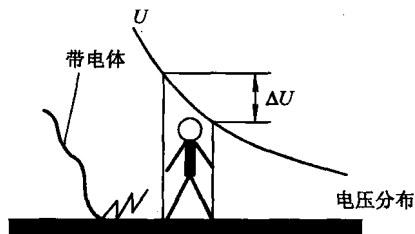


图 1.5 跨步电压使人触电

3. 防止触电

防止触电是安全用电的核心。没有任何一种措施或一种保护器是万无一失的。最保险的钥匙掌握在你手中，即安全意识和警惕性。以下几点是最基本最有效的安全措施。

1) 安全制度

在工厂企业、科研院所、实验室等用电单位，几乎无一例外地制定有各种各样的安全用电制度。这些制度绝大多数都是在科学分析基础上制定的，也有很多条文是在实际中总结出的经验，可以说很多制度条文是用惨痛的教训换来的。我们一定要记住：在你走进车间、实验室等一切用电场所时，千万不要忽略安全用电制度，不管这些制度粗看起来如何“不合理”，如何“妨碍”工作。

2) 安全措施

预防触电的措施很多，有关安全技术将在后面作为共同问题进行讨论，这里提出的几条措施都是最基本的安全保障。

(1) 对正常情况下带电的部分，一定要加绝缘防护，并且置于人不容易碰到的地方。例如输电线、配电盘、电源板等。

(2) 所有金属外壳的用电器及配电装置都应该装设保护接地或保护接零。对目前大多数工作生活用电系统而言是保护接零。

(3) 在所有使用市电场所装设漏电保护器。

(4) 随时检查所用电器插头、电线，发现破损老化及时更换。

(5) 手持电动工具尽量使用安全电压工作。我国规定常用安全电压为 36 V 或 24 V，特别危险场所用 12 V。

3) 安全操作

(1) 任何情况下检修电路和电器都要确保断开电源，仅仅断开设备上的开关是不够的，还要拔下插头。

(2) 不要湿手开关、插拔电器。

(3) 遇到不明情况的电线，先认为它是带电的。

(4) 尽量养成单手操作电工作业的习惯。

(5) 不在疲倦、带病等状态下从事电工作业。

(6) 遇到较大体积的电容器时要先行放电，再进行检修。

1.2 设备安全

设备安全是个庞大的题目。各行各业、各种不同设备都有其安全使用问题。我们这里讨论的，仅限于一般范围工作、学习、生活场所的用电仪器、设备及家用电器的安全使用。即使是这些设备，这里涉及的也是最基本的安全常识。

1. 设备接电前检查

将用电设备接入电源，这个问题似乎很简单，其实不然。有的数十万元昂贵设备，接上电源一瞬间变成废物；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。按国家标准，设备都应在醒目处有该设备要求电源电压、频率、容量的铭牌或标志。小型设备的说明也可能在说明书中。
- (2) 查环境电源。检查电压、容量是否与设备吻合。
- (3) 查设备本身。检查电源线是否完好，外壳是否可能带电。一般用万用表欧姆挡进行如图 1.6 所示的简单检测即可。

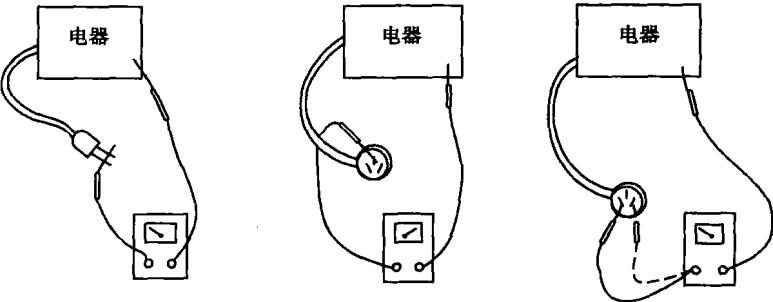


图 1.6 用万用表检查用电设备

2. 电器设备基本安全防护

所有使用交流电源的电器设备均存在绝缘损坏而漏电的问题。按电工标准将电器设备分为四类，各类电器设备特征及安全防护见表 1-3。

表 1-3 电器设备分类及基本安全防护

类型	主要特性	基本安全防护	使用范围及说明
O 型	一层绝缘，二线插头，金属外壳，且没有接地(零)线	用电环境为电气绝缘(绝缘电阻大于 50 kΩ)或采用隔离变压器	O 型为淘汰电器类型，但一部分旧电器仍在使用的
I 型	金属外壳接出一根线，采用三线插头	接零(地)保护三孔插座，保护零线可靠连接	较大型电器设备多为此类
II 型	绝缘外壳形成双重绝缘，采用二线插头	防止电线破损	小型电器设备
III 型	采用 8 V/36 V，24 V/12 V 低压电源的电器	使用符合电气绝缘要求的变压器	在恶劣环境中使用的电器及某些工具

3. 设备使用异常的处理

用电设备在使用中可能发生以下几种异常情况：

- (1) 设备外壳或手持部位有麻电感觉。
- (2) 开机或使用中熔断丝烧断。
- (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，绝缘漆挥发出的气味，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。

异常情况的处理办法：

- (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) 对有麻电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 1.7 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，绝缘将会逐渐地被完全破坏，电阻 R_0 急剧减小，危险也会增大，因此必须及时检修。

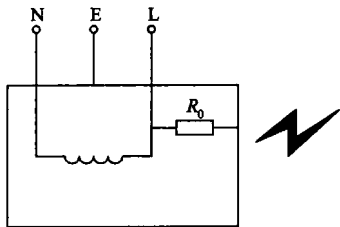


图 1.7 设备绝缘受损漏电示意图

1.3 电 气 火 灾

随着现代电气化日益发展，在火灾总数中，电气火灾所占比例不断上升，而且随着城市化进程，电气火灾损失的严重性也在上升，研究电气火灾原因及其预防意义重大。表 1-4 是有关电气火灾的基本分析。

表 1-4 电气火灾及预防

原 因	分 析	预 防
线路过载	输电线的绝缘材料大部分是可燃材料。过载则温度升高，引燃绝缘材料	(1) 使输电线路容量与负载相适应； (2) 不准超标更换熔断器； (3) 线路安装过载自动保护装置
线路或电器火花、电弧	由于电线断裂或绝缘损坏引起放电，可点燃本身绝缘材料及附近易燃材料、气体等	(1) 按标准接线，及时检修电路； (2) 加装自动保护
电热器具	电热器具使用不当，点燃附近可燃材料	正确使用，使用中有人监视
电器老化	电器超期服役，因绝缘材料老化，散热装置老化引起温度升高	停止使用超过安全期的产品
静电	在易燃、易爆场所，静电火花引起火灾	严格遵守易燃、易爆场所安全制度

1.4 用电安全技术简介

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，我们需要了解并正确运用这些技术，不断提高安全用电的水平。

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”是指接公共参考电位“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 $4\ \Omega$ 。接地保护原理如图 1.8 所示。如没有接地保护，则流过人体电流为

$$I_r = \frac{U}{R_r + \frac{Z}{3}}$$

式中， I_r 为流过人体电流， U 为相电压， R_r 为人体电阻， Z 为相线对地阻抗。当接上保护地线时，相当于给人体电阻并上一个接地电阻 R_g ，此时流过人体的电流为

$$I'_r = \frac{R_g}{R_g + R_r} I_r$$

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。

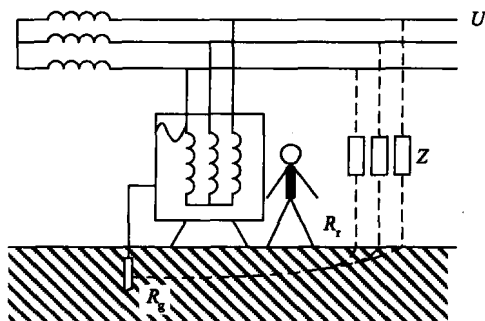


图 1.8 接地保护示意图

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 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 1.8，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_a ，而 U_a 取决于下式：

$$U_a \approx \frac{R_g}{R_0 + R_g} U$$

式中， R_0 为工作接地的接地电阻； R_g 为保护接地的接地电阻； U_a 为相电压。

如果 $R_0 = 4\ \Omega$ ， $R_g = 4\ \Omega$ ， $U = 220\ \text{V}$ ，则 $U_a \approx 110\ \text{V}$ ，这个电压对人来说是不安全的。因此，在这种系统中，应采用保护接零，即将金属外壳与电网零线相接。一旦相线碰到外壳