

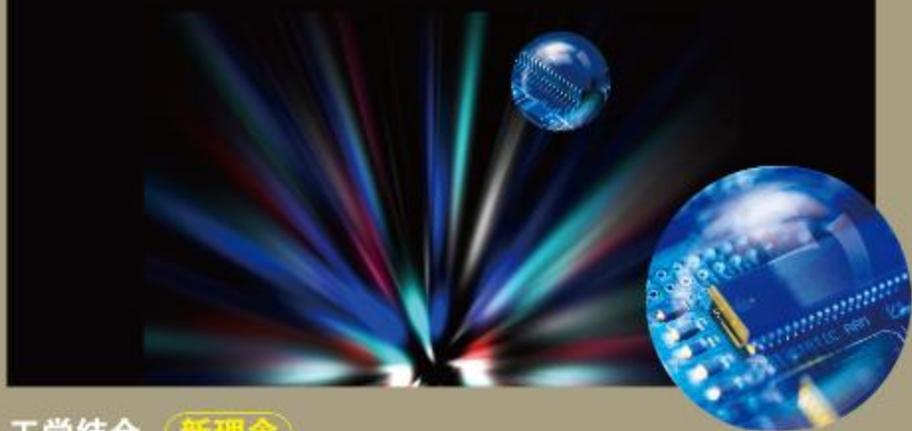


“十四五”职业教育国家规划教材

模拟电子技术 应用 第2版

Analog Electronic Technology
Application

主 编 肖义军



工学结合 **新理念**

考核评价 **新模式**

课程思政 **新案例**

技能竞赛 **新指导**



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

give as a present

赠送电子教案



“十四五”职业教育国家规划教材

模拟电子技术应用

第2版

主 编 肖义军

副主编 郑志刚 罗 凯

参 编 朱世民 杨 楚 孙长发

主 审 谭立新

工学结合：新理念

考核评价：新模式

课程思政：新案例

技能竞赛：新指导



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术应用 / 肖义军主编. —2 版. —长沙:
中南大学出版社, 2022. 8(2024. 5 重印)

ISBN 978-7-5487-4838-0

I. ①模… II. ①肖… III. ①模拟电路—电子技术
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 031534 号

模拟电子技术应用

MONI DIANZI JISHU YINGYONG

主编 肖义军

□出版人 林绵优

□责任编辑 胡小锋

□责任印制 唐曦

□出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731-88876770

传真: 0731-88710482

□印装 湖南天闻新华印务有限公司

□开本 880 mm×1230 mm 1/16 □印张 13 □字数 316 千字

□版次 2022 年 8 月第 2 版 □印次 2024 年 5 月第 2 次印刷

□书号 ISBN 978-7-5487-4838-0

□定价 45.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

第二版前言

为了深入贯彻党的二十大精神和全国教育大会精神，落实《国家职业教育改革实施方案》(国发[2019]4号)和《职业院校教材管理办法》(教材[2019]3号)有关要求，深化职业教育“三教”改革，使教材适应新的职业教育教学改革方向，更贴近教学的实际需要，对该教材进行了修订。

本次修订依据教育部颁布的“中等职业学校电子技术基础与技能教学大纲”，并参照了有关国家职业技能标准和行业职业技能鉴定规范，也充分吸收了使用学校一线教师反馈意见和建议；同时通过二维码增加了拓展栏目，内容包括走进科学家、走进大国工匠，读者通过扫描二维码了解为我国社会主义建设作出突出贡献的科学家、大国工匠的精彩人生。

本书编写时努力体现以全面素质教育为基础、以就业为导向、以职业能力为本位、以学生为主体的职业教育教学理念；坚持“做中学、做中教”的职业教育教学特色，积极探索理论和实践相结合的教学模式，适应项目化教学新型教学方法实施的需要；将模拟电子技术的基础理论与技能知识进行归纳梳理，融合成五个典型实践项目。

根据中等职业学校学生的知识水平、认知特点以及职业技能培训要求，本书融合的五五个典型实践项目均采用项目描述、知识准备、任务实现、考核评价、拓展提高和同步练习等六个环节的体例结构，打破传统的学科体系，以项目为导引，以任务为驱动，遵循“以能力培养为核心，以技能训练为主线，以理论知识为支撑”，较好地处理了理论与实践的关系，主题鲜明，重点突出，体现了“够用、适用、管用”的思想。变学科知识本位为职业能力本

位，融理论知识于项目实践，注重学生动手能力的培养，达到理实合一、交互渗透、逐渐递进的教学效果，突出了工学结合与职业素质的培养，满足学生职业生涯发展的需要。

建议本课程的教学课时数为 124 课时，各项目参考学时见下表。

内容	课时
项目 1: 智能小夜灯的制作	30
项目 2: 迷你小功放的制作	38
项目 3: 简易金属探测器的制作	20
项目 4: 可控硅调光台灯的制作	16
项目 5: 多功能直流稳压电源的制作	16
机动	4
合计	124

由于编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，热诚欢迎广大读者批评指正，提出宝贵的意见和建议(QQ: 249260921)，以便进一步完善教材。

编者

2022 年 2 月

第一版前言

根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、国务院印发的《关于加快发展现代职业教育的决定》等文件提出的教材建设要求，及《中等职业学校专业教学标准(试行)》(2014)要求职业教育科学化、标准化、规范化等，以及习近平总书记专门对职业教育工作作出的重要指示，编写了这本《模拟电子技术应用》。

本书是基于“知行合一”理念的中等职业学校电子类专业创新教材。编写时以项目模块重新构建知识体系结构，书中内容都是以典型产品为载体设计的活动来进行的，围绕工作任务、工作现场来组织教学内容，在任务的引领下学习理论，实现理论教学与实践教学融通合一、能力培养与工作岗位对接合一、实习实训与顶岗工作学做合一。

本书紧紧围绕课程目标重构知识体系结构，项目内容按照项目描述、学习目标、知识准备、任务实现、考核评价、拓展提高这六个环节来组织编写。编写中坚持以工作为本位、以职业实践能力培养为主线、以项目为载体的总体要求。每个项目的学习都以典型电子产品为载体设计的活动来进行的，打破传统的学科体系，紧紧围绕工作任务来选择和组织课程内容，在任务的引领下学习理论知识，让学生在实践活动中掌握理论知识，实现理论与实践的一体化，提高岗位的职业能力。

本书的特点：

1. 教材中各项目及项目内容按照循序渐进、由易到难、先感性再抽象的递进关系安排，所选案例、任务、项目贴近学生学情，又注重了知识的趣味性、实用性和可操作性，遵循了中职学生的认知规律。

2. 教学内容浅显易懂，理论内容以“够用、实用”为原则，增强了实践性教学内容。实践性教学内容占总课时的50%左右，使学生既有一定的理论知识，又有更多的实践机会。

3. 全书共安排了五个项目任务，重点关注如何综合运用所获得的理论知识、操作知识来完成工作任务。通过“完整性活动”，学生可获得有工作意义的“产品”或者“作品”，这样，不仅可以增强学生对教学内容的直观感，而且有利于增强学生的工作热情和学习兴趣，

达到让学生通过完成具体项目来构建相关理论知识，并发展职业能力的目的。

建议本课程的教学课时数为 110 课时，各项目参考学时见下表。

内容	课时
项目 1: 智能小夜灯的制作	26
项目 2: 迷你小功放的制作	34
项目 3: 无线话筒的制作	14
项目 4: 调光台灯的制作	16
项目 5: 多功能直流稳压电源的制作	14
机动	6
合计	110

由于编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，热诚欢迎广大读者批评指正，提出宝贵的意见和建议(QQ: 249260921)，以便进一步完善教材。

编者

2017 年 6 月

目 录

Contents

项目 1 智能小夜灯的制作	1	项目 2 迷你小功放的制作	53
1.1 项目描述	1	2.1 项目描述	53
1.2 知识准备	2	2.2 知识准备	54
1.2.1 电阻器	2	2.2.1 晶体三极管	54
1.2.2 技能实训	8	2.2.2 技能实训	63
1.2.3 电容器	9	2.2.3 三极管放大器	64
1.2.4 技能实训	13	2.2.4 技能训练	72
1.2.5 电感器	14	2.2.5 集成运算放大器	74
1.2.6 半导体二极管	16	2.2.6 技能训练	86
1.2.7 技能实训	28	2.2.7 低频功率放大器	88
1.2.8 二极管整流及电容滤波电路	29	2.2.8 技能实训	95
1.2.9 技能实训	38	2.3 任务实现	96
1.3 任务实现	40	2.3.1 认识电路组成	96
1.3.1 认识电路组成	40	2.3.2 认识电路工作过程	98
1.3.2 认识电路工作过程	41	2.3.3 电路仿真	98
1.3.3 电路仿真	41	2.3.4 元器件的识别与检测	100
1.3.4 元器件的识别与检测	42	2.3.5 电路安装	102
1.3.5 电路安装	43	2.3.6 电路调试与检测	103
1.3.6 电路调试与检测	44	2.4 考核评价	104
1.4 考核评价	45	2.5 拓展提高	105
1.5 拓展提高	46	2.6 同步练习	106
1.6 同步练习	46		

项目 3 简易金属探测器的制作	112		
3.1 项目描述	112		
3.2 知识准备	113		
3.2.1 振荡的基本知识	113		
3.2.2 LC 振荡器	115		
3.2.3 技能实训	121		
3.2.4 RC 振荡器	123		
3.2.5 石英晶体振荡器	125		
3.3 任务实现	126		
3.3.1 认识电路组成	126		
3.3.2 认识电路工作过程	127		
3.3.3 电路仿真	128		
3.3.4 元器件的识别与检测	129		
3.3.5 电路安装	130		
3.3.6 电路调试与检测	131		
3.4 考核评价	131		
3.5 拓展提高	133		
3.6 同步练习	133		
项目 4 可控硅调光台灯的制作	137		
4.1 项目描述	137		
4.2 知识准备	138		
4.2.1 可控硅	138		
4.2.2 技能实训	142		
4.2.3 可控硅触发电路	143		
4.2.4 可控硅整流电路	145		
4.3 任务实现	148		
4.3.1 认识电路组成	148		
4.3.2 认识电路工作过程	149		
4.3.3 电路仿真	149		
4.3.4 元器件的识别与检测	150		
4.3.5 电路安装	151		
4.3.6 电路调试与检测	152		
4.4 考核评价	153		
4.5 拓展提高	154		
4.6 同步练习	154		
项目 5 多功能直流稳压电源的制作	156		
5.1 项目描述	156		
5.2 知识准备	157		
5.2.1 晶体管直流稳压电源	157		
5.2.2 技能实训	161		
5.2.3 三端集成稳压器	162		
5.3 任务实现	167		
5.3.1 认识电路组成	167		
5.3.2 认识电路工作过程	168		
5.3.3 电路仿真	169		
5.3.4 元器件的识别与检测	170		
5.3.5 电路安装	171		
5.3.6 电路调试与检测	172		
5.4 考核评价	172		
5.5 拓展提高	174		
5.6 同步练习	174		
附 录	178		
附录 1 世界半导体器件型号的命名方法	178		
附录 2 插件元器件手工锡焊技巧	181		
附录 3 贴片元器件手工锡焊技巧	186		
附录 4 Multisim 14.0 使用简介	190		
参考文献	200		

项目 1

智能小夜灯的制作



走进大国工匠——胡双钱

1.1 项目描述

本项目介绍的智能小夜灯(图 1-1),是采用阻容降压、桥式整流、电容滤波、二极管稳压等电路将 220 V 交流电变换成 LED 工作所需要的直流电,通过光敏电阻对光照的检测来控制电子开关,实现 LED 灯白天自动熄灭,夜晚自动点亮。通过本项目的学习与实践,可以让读者获得如下知识和技能:

1. 会识别和检测电阻器、电容器和电感器;
2. 掌握晶体二极管的符号、特性和参数;
3. 会识别和检测晶体二极管;
4. 掌握整流滤波电路的组成及工作原理;
5. 会计算常用整流电路输出电压的大小;
6. 会根据实际整流电路的要求选择整流二极管和滤波电容;
7. 掌握稳压、发光、光电、变容等特殊二极管的符号、特性和作用;
8. 会使用 NI Multisim 14.0 仿真软件对电路进行仿真实验;
9. 会安装、调试和检测智能小夜灯电路;
10. 具有一定的电子产品装接、检测和维修能力。

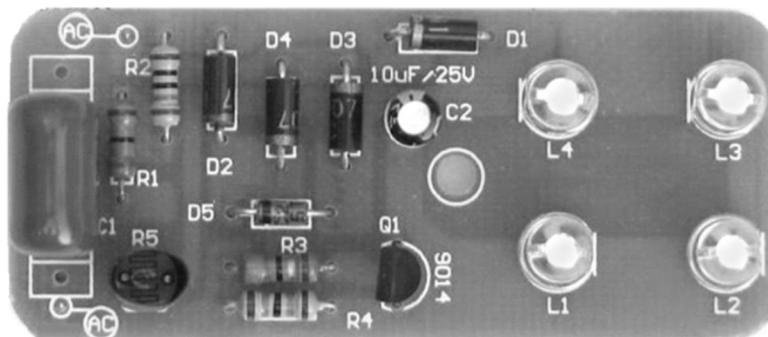


图 1-1 智能小夜灯

1.2 知识准备

要完成以上要求的智能小夜灯的制作，需要具备以下一些相关知识和技能，下面分别进行阐述。

1.2.1 电阻器

任务导引

电阻器简称电阻，是电子电路中不可缺少的元件之一，其作用是阻碍电子的运动，即控制电流的大小。电阻在电路中的作用主要有缓冲电流、充当负载、分压、分流和保护等。那么，我们如何从外形识别电阻？电阻的主要参数有哪些？电阻如何选用和检测呢？

一、认识电阻器

1. 普通电阻器

电阻器用字母 R 表示，图形符号如图 1-2(a) 所示；图 1-2(b) 为色环电阻实物，色环电阻体上面色环用于标识电阻的阻值和误差精度，目前常用的有四色环和五色环两种标识方法，其中五色环的精度比较高；图 1-2(c) 为贴片电阻实物，目前常见的封装形式为 0602 和 0805，其标称阻值直接标注在电阻的表面，如“R050”表示 0.05Ω ，“204”表示 $20 \times 10^4 \Omega$ ($200 \text{ k}\Omega$)；图 1-2(d) 为大功率线绕电阻实物。



图 1-2 普通电阻的图形符号及实物

2. 特殊电阻器

图 1-3 所示为部分特殊电阻的实物及图形符号；图 1-3(a) 为光敏电阻实物及图形符号，光敏电阻在电路中通常用字母“ R_L ”来表示。光敏电阻的顶部有一个受光面，可以感受外界光线的强弱：当光线较弱时，其阻值很大，光线变强后，阻值迅速减小。利用光敏电阻的这个特性可以制作各种光控电路或光控灯；图 1-3(b) 为热敏电阻实物及图形符号，热敏电阻在电路中通常用字母“ R_T ”来表示，分为正温度系数(PTC)和负温度系数(NTC)两大类，常用于各种温度控制电路中；图 1-3(c) 为压敏电阻实物及图形符号，它在电路中常用字母“ R_V ”表示。压敏电阻通常用于各种保护电路，当其两端电压低于标称电压时，其阻值接近无穷大，当其两端电压超过标称电压时，其阻值迅速减小，起到保护后续电路的作用；图 1-3(d) 为水泥电阻实物，水泥电阻是一种陶瓷绝缘功率型线绕电阻，按照其功率可以分为 2 W、3 W、5 W、7 W、8 W、10 W、15 W、20 W、30 W 和 40 W 等规格，水泥电阻具有功率大、阻值稳定、阻燃性强等特点，而且在电路过电流情况下迅速熔断，起到保护电路的作用；图 1-3(e)、(f) 为排阻实物及图形符号，将多个相同阻值的电阻集成在一起就成了“排阻”，排阻体积小，安装方便，排阻标称值与误差等级的表示方法与普通电阻相同，“10”表示有效数字，“2”表示倍率，“102”表示 $10 \times 10^2 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$ ，即排阻中每只电阻的阻值为 1 k Ω 。

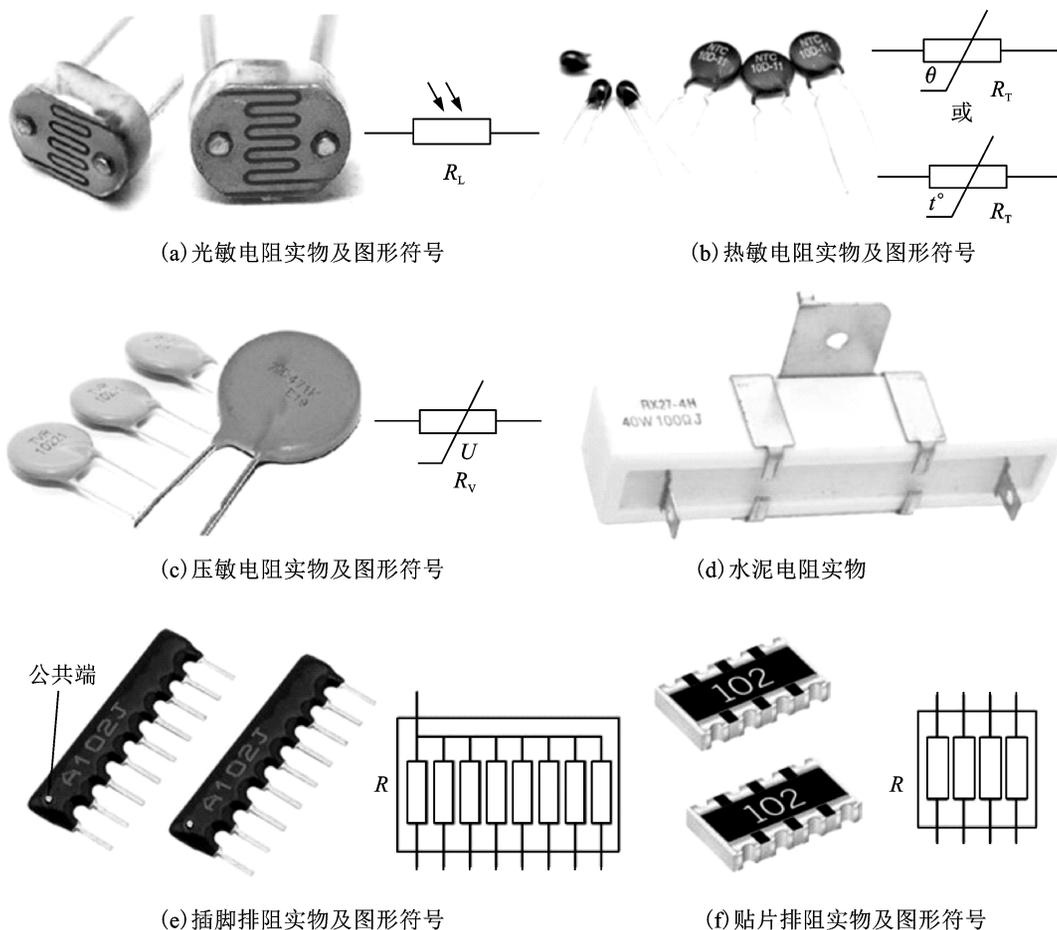


图 1-3 部分特殊电阻的实物及图形符号

二、电阻器的主要参数

1. 标称阻值与允许偏差

电阻器的标称阻值与允许偏差均标注在电阻器表面，标注方法有直标法、文字符号法、数码法和色标法等四种。

(1) 直标法

直标法是在电阻器表面用阿拉伯数字和单位符号直接标出参数，如图 1-4 所示；图 1-4(a) 表示标称阻值为 $2\text{ k}\Omega$ 、额定功率为 4 W 的线绕电阻器；图 1-4(b) 表示标称阻值为 $1.2\text{ k}\Omega$ 、允许偏差为 $\pm 10\%$ 、额定功率为 0.5 W 的碳膜电阻器。



图 1-4 直标法

(2) 文字符号法

文字符号法是采用阿拉伯数字和文字符号两者有规律的组合来表示电阻的标称值，其允许偏差用文字符号来表示，如图 1-5 所示。图 1-5(a) 表示阻值为 $3.6\text{ k}\Omega$ ，偏差为 $\pm 5\%$ ；图 1-5(b) 表示阻值为 $6.2\text{ }\Omega$ ，偏差为 $\pm 10\%$ 。允许偏差与字母对照关系：D 表示 $\pm 0.5\%$ ，F 表示 $\pm 1\%$ ，J 表示 $\pm 5\%$ ，K 表示 $\pm 10\%$ ，M 表示 $\pm 20\%$ 。

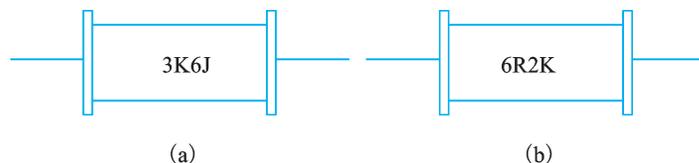


图 1-5 文字符号法

(3) 数码法

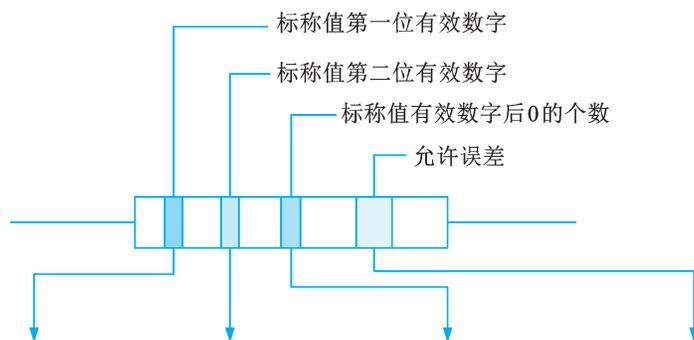
数码法是采用三位阿拉伯数字表示电阻的标称阻值，前两位表示阻值的有效数字，第三位表示有效数字后面零的个数，常见于贴片电阻或微调电位器上。例如，100 表示 $10\text{ }\Omega$ ，102 表示 $1\text{ k}\Omega$ 。当阻值小于 $10\text{ }\Omega$ 时，以 $\times R \times$ 表示，将 R 看作小数点，例如，8R2 表示 $8.2\text{ }\Omega$ 。

(4) 色标法

色标法是用不同颜色的色带或色点在电阻器表面标出标称阻值和允许偏差，目前通常采用四色环和五色环标识。

①四色环电阻中各色环的含义见表 1-1。

表 1-1 四色环电阻中各色环的含义



颜色	第一位有效值	第二位有效值	倍率	允许偏差
黑	0	0	10^0	—
棕	1	1	10^1	—
红	2	2	10^2	—
橙	3	3	10^3	—
黄	4	4	10^4	—
绿	5	5	10^5	—
蓝	6	6	10^6	—
紫	7	7	10^7	—
灰	8	8	10^8	—
白	9	9	10^9	-20% ~ 50%
金	—	—	10^{-1}	±5%
银	—	—	10^{-2}	±10%
无色	—	—	—	±20%

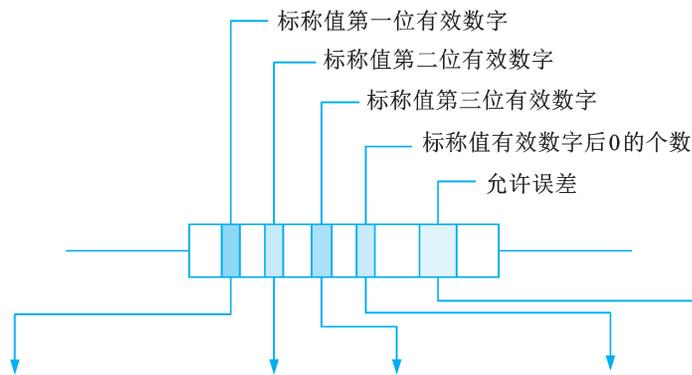
②五色环电阻中各色环的含义见表 1-2。

2. 额定功率

额定功率也是电阻器的一个常用参数。在规定的大气压力(650~800 mmHg)和特定的环境温度范围内,电阻器长期连续工作并能满足规定的性能要求时,所允许耗散的最大功率称为电阻器的额定功率。

电阻器的额定功率采用标准化的额定功率系列值。其中线绕电阻器的额定功率系列为:3 W、4 W、8 W、10 W、16 W、25 W、40 W、50 W、75 W、100 W、150 W、250 W、500 W。非线绕电阻器的额定功率系列为:0.05 W、0.125 W、0.25 W、0.5 W、1 W、2 W、5 W。通常小于 1W 的电阻器在电路图中不标出额定功率值。大于 1W 的电阻器用阿拉伯数字加单位表示,如 10 W。

表 1-2 五色环电阻中各色环的含义



颜色	第一位有效值	第二位有效值	第三位有效值	倍率	允许偏差
黑	0	0	0	10^0	—
棕	1	1	1	10^1	$\pm 1\%$
红	2	2	2	10^2	$\pm 2\%$
橙	3	3	3	10^3	—
黄	4	4	4	10^4	—
绿	5	5	5	10^5	$\pm 0.5\%$
蓝	6	6	6	10^6	$\pm 0.25\%$
紫	7	7	7	10^7	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	8	10^8	—
白	9	9	9	10^9	—
金	—	—	10^{-1}	—	—
银	—	—	10^{-2}	—	—

在电路图中表示电阻器额定功率的图形符号如图 1-6 所示。

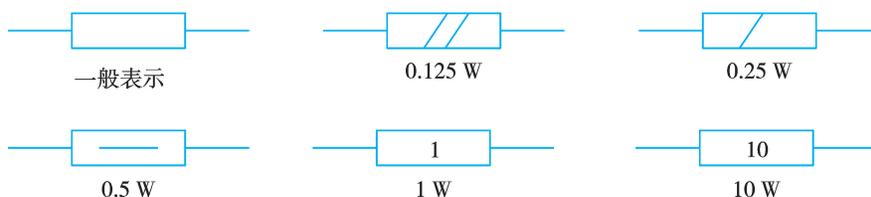


图 1-6 电阻器额定功率符号

三、电阻器选用与检测

1. 选用常识

根据电子设备的技术指标和电路的具体要求选用电阻的型号和误差等级；额定功率应大于实际消耗功率的 1 倍或 2 倍；高频电路应选用金属膜电阻、金属氧化膜电阻等高频电阻；低

频电路选用线绕电阻、碳膜电阻；功率放大电路、偏置电路、取样电路应选温度系数小的电阻器；更换损坏的电阻器时，最好用同类型、同规格、同阻值的电阻器，如无合适阻值和功率的电阻，可以考虑代换，其原则是：额定功率大的可以代替额定功率小的，精度高的可以代替精度低的，金属膜电阻器可以代替碳膜电阻器。

2. 电阻器检测方法

(1) 机械万用表检测方法

①选择挡位。应根据被测电阻标称值的大小来选择量程，尽量使指针落到刻度的中段位置。例如，被测电阻为 $100\ \Omega$ ，选择 $R \times 10$ 挡。

②欧姆调零。将红、黑两表笔短接，观察指针是否指向“ $0\ \Omega$ ”处，若不指向“ $0\ \Omega$ ”处，需调节欧姆调零旋钮进行欧姆调零，如图 1-7 所示。

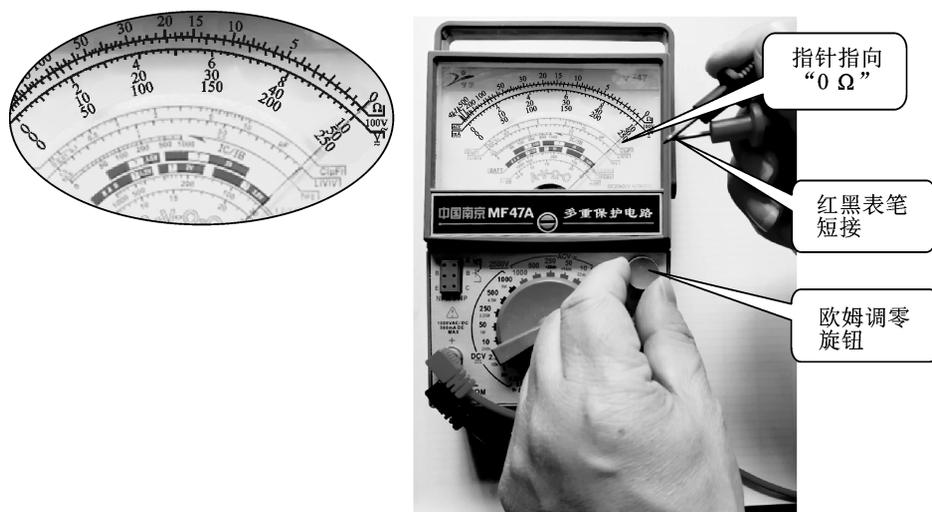


图 1-7 欧姆调零

③测量。将电阻器接入红、黑两表笔之间进行检测，如图 1-8 所示，注意双手不要同时触及两表笔和电阻两端，否则人体将作为电阻并入测量，产生测量误差。

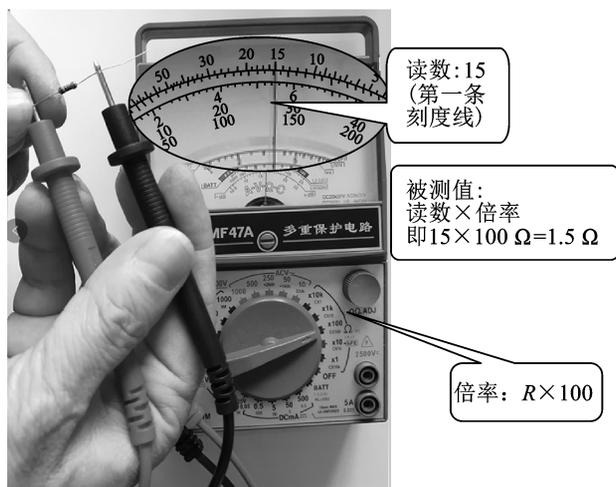


图 1-8 万用表测电阻两端阻值

注意：若第②步欧姆调零实在无法调到零，也可调到一个具体数值，第③步测量后的读数减去该数值再乘以倍率即可。

(2) 数字万用表检测方法

①选择挡位。数字万用表电阻挡如图 1-9 所示，应根据被测电阻标称值的大小来选择量程，注意每个挡位只能测量比量程小的电阻。例如，标称值为 $2\text{ k}\Omega$ 的电阻，就不能选择 2 k 挡进行测量，因电阻本身有误差，实际阻值也可能稍大于 $2\text{ k}\Omega$ ，而无法正常显示，要选择比 2 k 挡大的 20 k 挡测量才能正常显示。



图 1-9 数字万用表电阻挡

②将电阻器接入红、黑两表笔之间，注意双手不要同时触及两表笔和电阻两端，否则人体将作为电阻并入测量，产生测量误差。此时屏幕显示值即为电阻的实际阻值。

1.2.2 技能实训

色环电阻的识读与检测

1. 电阻的识读

(1)制作色环电阻板若干块，每块可放置色环电阻 20 只，由学生识读，标出该板各色环电阻的标称阻值和误差，并互相交换，反复练习，提高识读速度。

(2)制作不同类型的一边为电阻器实物，另一边为含有阻值大小和误差等级标注的电阻板若干块。每块放置不同阻值的电阻 20 只，标注 40 条，由学生通过找“朋友”的方式给每个电阻器找到对应的标注，并互相交换，反复练习，提高识读速度。

2. 用万用表测量电阻

(1)选用有色环、有数值标注的不同阻值电阻若干个，学生通过万用表进行测量，验证参数，达到测量快速、准确的要求。

(2)选用无色环、无数值标注的不同阻值电阻若干个，学生通过万用表进行测量，达到测量快速、准确的要求。

3. 技能大比拼

(1)完成表 1-3 中“根据色环写出阻值”“根据阻值写出色环”栏的内容，看谁用的时间短且正确率高。

(2)随机抽出正常色环电阻或直标电阻若干，给定 1 分钟进行识读，看谁识读得多且正确率高，将结果记入表 1-3 中。

(3)将正常电阻与有质量问题的电阻进行混合，随机抽出若干，给定 1 分钟进行质量检测，看谁测得多且正确率高，将结果记入表 1-3 中。

表 1-3 电阻器识读、测量表

由色环写出阻值(不含误差)				由阻值写出色环(不含误差)			
色环	阻值	色环	阻值	阻值	色环	阻值	色环
棕黑黑		棕黑红		0.5 Ω		2.7 kΩ	
红黄黑		绿棕棕		1 Ω		3 kΩ	
橙橙黑		棕黑绿		36 Ω		5.6 kΩ	
黄紫橙		蓝灰橙		220 Ω		6.8 kΩ	
灰红红		黄紫棕		470 Ω		8.2 kΩ	
白棕黄		红紫黄		750 Ω		24 kΩ	
黄紫棕		紫绿棕		1 kΩ		47 kΩ	
橙黑棕		棕黑橙		1.2 kΩ		39 kΩ	
紫绿红		橙橙橙		1.8 kΩ		100 kΩ	
白棕棕		红红红		2 kΩ		150 kΩ	
1 分钟内识读电阻数(只)				注: 20 只满分, 错一只扣 5 分			
1 分钟内测量电阻数(只)				注: 20 只满分, 错一只扣 5 分			

1.2.3 电容器

任务导引

电容器又称作电容, 是组成电路的基本元件之一, 在电路中起着储存电荷的作用, 它具有隔直流通交流、阻低频通高频的特性, 因此常用于电源滤波、交流耦合、去耦、旁路、振荡和定时等电路中。那么, 我们如何从外形识别电容? 电容的主要参数有哪些? 电容又应如何选用和检测呢?

一、认识电容器

1. 电解电容器

电容器用字母 C 表示, 电解电容器图形符号如图 1-10(a) 所示。图 1-10(b) 为铝电解电容器实物, 外面包有一层塑料薄膜, 里面为铝壳, 其极性标识是在电容体一侧标有“-”, 表示为负极, 另一侧就为正极; 图 1-10(c) 为贴片铝电解电容器实物, 有标记的一端为负极; 图 1-10(d) 为贴片钽电解电容器实物, 有标记的一端为正极, 与贴片铝电解电容器正好相反。

2. 瓷介电容器

图 1-11(a) 为无极性电容器图形符号。图 1-11(b) 为瓷片电容器实物, 一般为片状, 其标称值直接标注在外壳上; 图 1-11(c) 为独石电容器实物, 独石电容器又称为多层陶瓷电容器; 图 1-11(d) 为贴片陶瓷电容器实物。

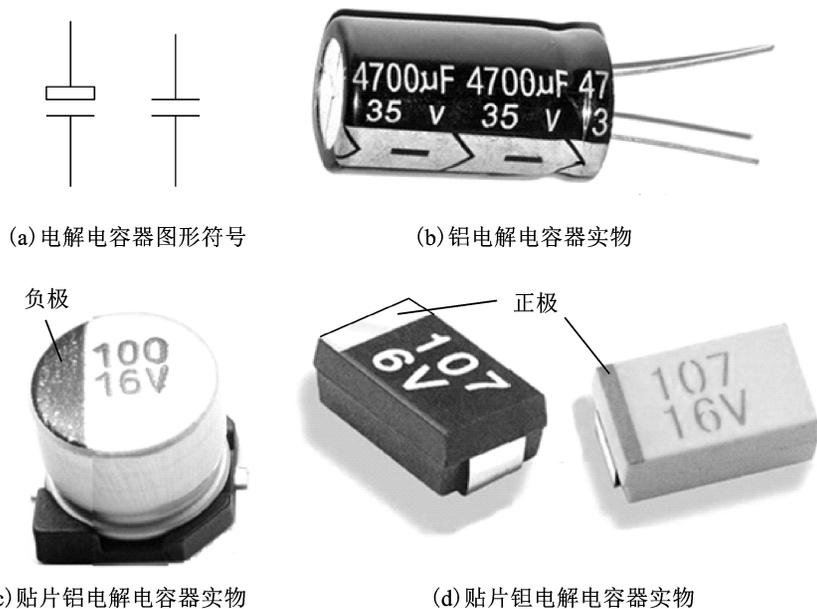


图 1-10 电解电容器符号及实物

3. 薄膜电容器

薄膜电容器实物如图 1-12 所示，图 1-12(a) 为涤纶电容器实物，外形扁平；图 1-12(b) 为 CBB 电容器实物，CBB 电容器为聚丙烯电容器。

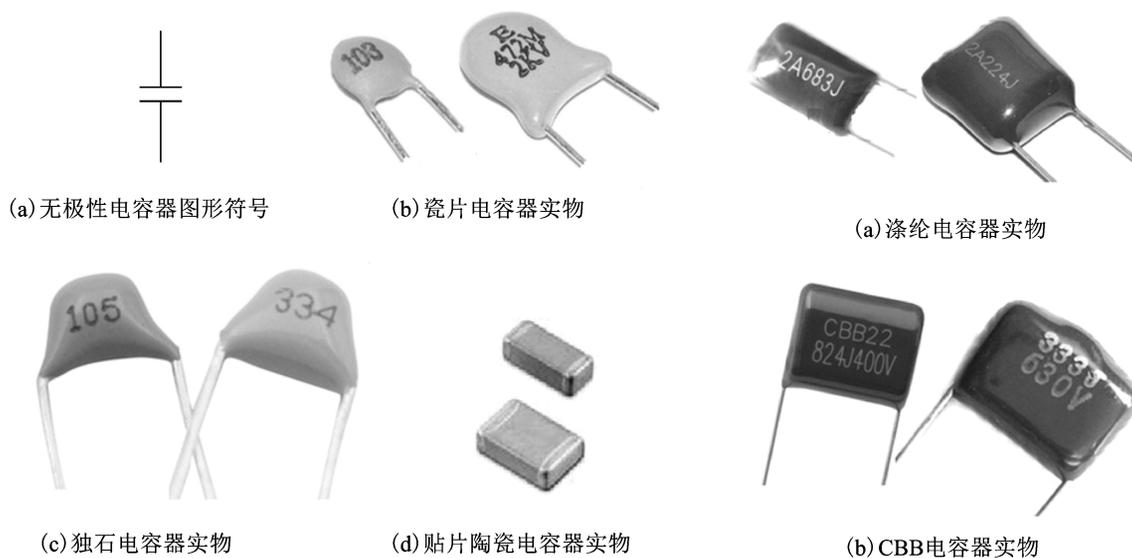


图 1-11 瓷介电容器符号及实物

图 1-12 薄膜电容器符号及实物

二、电容器的主要参数

1. 标称容量与允许偏差

电容器的容量标注法有如下五种：

(1) 直标法。直标法是将标称容量及偏差直接标在电容体上，如： $0.22 \mu\text{F} \pm 10\%$ 、 $220 \mu\text{F} \pm 0.5\%$ ；若是零点零几，常把整数位的“0”省去，如： $.01 \mu\text{F}$ 表示 $0.01 \mu\text{F}$ 。有些电容器也采用“R”表示小数点，如： $R47 \mu\text{F}$ 表示 $0.47 \mu\text{F}$ 。

(2) 数字表示法。数字表示法是只标数字不标单位的直接表示法。采用此法的仅限 pF 和 μF 两种。如：电容体上标志“3”“47”“6800”“0.01”分别表示 3 pF、47 pF、6800 pF、0.01 μF 。对电解电容器如标志“1”“47”“220”则分别表示 1 μF 、47 μF 和 220 μF 。

(3) 数字字母法。数字字母法是将容量的整数部分写在容量单位标志字母的前面，容量的小数部分写在容量单位标志字母的后面。如：1.5 pF、6800 pF、4.7 μF 、1500 μF 分别写成 1p5、6n8、4 μ 7、1m5。

(4) 数码法。数码法一般用三位数字表示电容器容量大小，其单位为 pF。其中第一、第二位为有效值数字，第三位表示倍数，即表示有效值后“零”的个数。如：“103”表示 10×10^3 pF (0.01 μF)、“224”表示 22×10^4 pF (0.22 μF)。

(5) 色标法。色标法是采用颜色来表示参数，其表示方法与电阻器使用颜色表示参数相同，其容量单位为 pF。对于立式电容器，色环顺序从上而下，沿引脚方向排列。如果某个色环的宽度等于标准宽度的 2 或 3 倍，则表示相同颜色的 2 个或 3 个色环。有时小型电解电容器的工作电压也采用色标，如：6.3 V 用棕色，10 V 用红色，16 V 用灰色，而且标志在引线根部。

电容器的容量偏差分别用 D ($\pm 5\%$)、F ($\pm 10\%$)、G ($\pm 2\%$)、K ($\pm 10\%$)、M ($\pm 20\%$) 和 N ($\pm 30\%$) 表示。

2. 额定直流工作电压(耐压)

电容器的耐压是表示电容器接入电路后，能长期连续可靠地工作，不被击穿时所能承受的最大直流电压。使用时绝对不允许超过这个耐压值，否则，电容器就要被损坏或被击穿，甚至电容器本身会爆裂。

如果电容器用于交流电路中，其交流电的最大值不能超过电容器额定的直流工作电压值，否则，电容器就要被损坏或被击穿，甚至电容器本身会爆裂。

三、电容器选用与检测

1. 选用常识

(1) 根据实际电路要求选择合适类型的电容器。如：用于高频电路中的电容器，应选用介质损耗小及频率特性好的涤纶电容、陶瓷电容、云母电容；用于电源滤波、退耦应选用电解电容。

(2) 对电容容量的确定要符合电容器容量标称系列规定。电子产品在批量生产时，应选用电容器容量标称系列中的电容，以确保有稳定的货源，避免出现所选用的电容无法购买到。如在整流滤波电路中，根据计算得出滤波电容为 3100 μF ，此容量在标称系列中不存在，故应在电容器容量标称系列中选一个相近的值，如 3300 μF 。

(3) 选择电容器耐压时要留有余量。为确保电子产品能长期稳定工作，能适应正常电压的波动，在选择电容器的额定工作电压时要留有 20%~30% 的余量，个别电路工作电压波动较大时，还须有更大的安全裕量。

2. 电容器的检测方法

(1) 用机械万用表测量电解电容

① 选择万用表挡位。针对电容的不同容量选用合适的量程。一般情况下，1~47 μF 间的

电容,可用 $R \times 1k$ 挡测量,大于 $47 \mu F$ 的电容可用 $R \times 100$ 挡测量。

②测量。将万用表红表笔接电解电容的负(或正)极,黑表笔接正(或负)极,在刚接触的瞬间,万用表指针即向右偏转较大偏度(对于同一电阻挡,容量越大,摆幅越大),接着指针逐渐向左回转,直到停在某一位置。此时的阻值便是电解电容的正向(或反向)漏电阻,正向漏电阻略大于反向漏电阻。电解电容的漏电阻一般应在几百千欧以上,否则,将不能正常使用。在测试中,若正向、反向均无充电的现象,即万用表指针不动,则说明电解电容的容量消失或内部断路;如果所测阻值很小或为零,说明电容漏电大或已击穿损坏,不能再使用。测量方法如图 1-13 所示。

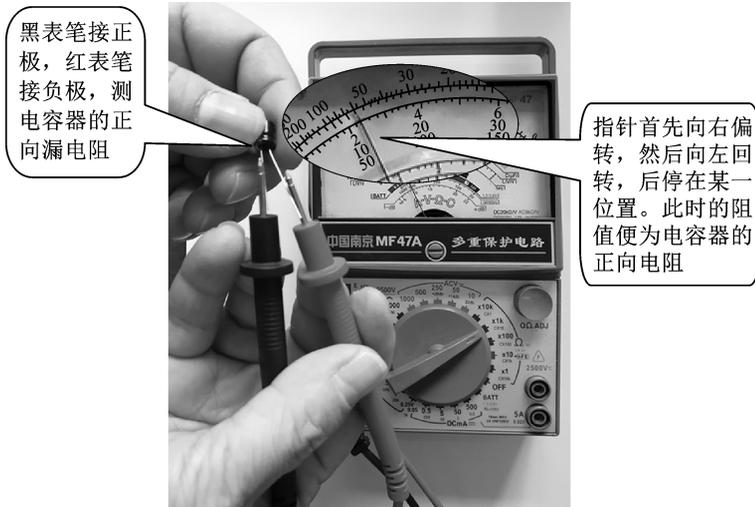


图 1-13 电解电容器质量的检测

③判别极性。对于正、负极标志不明或无法识别的电解电容器,可利用上述测量漏电阻的方法加以判别,即先任意测一下漏电阻,记住其大小,然后交换表笔再测出一个阻值。两次测量中阻值大的那一次便是正向接法,即黑表笔接的是正极,红表笔接的是负极。

④估测容量。使用万用表电阻挡,测量电容的原理是给电解电容进行正、反向充电,指针的摆动幅度的大小正比于电容器容量,可据此估测出电解电容的容量。

(2)用机械万用表测量无极性电容

无极性电容的容量一般比较小,用机械万用表进行测量时,只能定性地检查其是否有漏电、内部短路或击穿现象。测量时,选用万用表 $R \times 10 k$ 挡,将两表笔分别任意接电容的两个引脚,阻值应为无穷大。若测出阻值(指针向右摆动)为零,则说明电容漏电损坏或内部击穿。若无极性电容的容量较大($0.01 \mu F$ 以上),则指针会发生轻微的偏转,可用万用表的 $R \times 10 k$ 挡直接测试电容器有无充电过程以及有无内部短路或漏电,并根据指针向右摆动的幅度大小来估计出电容器容量的大小。

(3)用数字万用表检测电容

某些数字式万用表具有测量电容容量的挡位,如图 1-14 所示,其量程分为 $2 \mu F$ 、 $20 \mu F$ 和 $200 \mu F$ 三挡。测量时选择合适量程,将已放电的电容两引脚直接插入面板上的电容测量插孔中,屏幕显示值即为该电容器的容量,根据显示值与标称值之间的差别即可判断电容器的质量。



图 1-14 数字式万用表电容挡

1.2.4 技能实训

电容器的识读与检测

1. 电容器类型和参数的识读

准备不同类型、不同参数的电容器若干,由学生识读类型和标称参数,反复练习,提高识读速度。

2. 用万用表测量电容器

(1) 选用正常电容器若干,学生借助万用表进行质量测量,达到测量快速、准确的要求。

(2) 选用标志不清或质量存在问题的电容器若干,学生借助万用表进行质量测量,达到测量快速、准确判别的要求。

3. 技能大比拼

(1) 完成表 1-4 中根据标值写出电容容量的内容,看谁用的时间短且正确率高。

(2) 随机抽出正常电容器若干,给定 1 分钟进行识读,看谁识读得多且正确率高,将结果记入表 1-4 中。

(3) 将正常电容与有质量问题的电容进行混合,随机抽出若干,给定 1 分钟进行质量检测,看谁测得多且正确率高,将结果记入表 1-4 中。

表 1-4 电容器识读、测量表

标值	容量	标值	容量	标值	容量
2.7		10000		2p2	
3.3		0.01		1n	
6.8		0.015		6n8	
20		0.022		10n	
27		0.033		22n	
200		0.068		100 n	
300		0.22		103	
1000		0.47		104	
68000		p33		224	
1 分钟内识读电容数(只)				注: 20 只满分, 错一只扣 5 分	
1 分钟内测量电容数(只)				注: 20 只满分, 错一只扣 5 分	

1.2.5 电感器

● 任务导引

电感器又称作电感，也是构成电路的基本元件，在电路中可阻隔交流电的通过，具有通低频、阻高频的特性，在交流电路中常用于扼流、降压、谐振等作用。那么，我们如何从外形识别电感？电感的主要参数有哪些？电感又应如何检测呢？

一、认识电感器

电感器用字母 L 表示，图形符号如图 1-15(a) 所示。图 1-15(b) 为空心线圈电感实物，常用于高频电路中，调整其线圈的形状与间距就可以调整其电感量的大小；图 1-15(c) 为磁环电感实物，通常用作滤波器，用于各种电源的低噪、滤波电路；图 1-15(d) 为色码电感，外形与电阻相似，区别是电感两端圆锥状，适应频率为 10 kHz~200 MHz 的各种电路中；图 1-15(e) 为立式电感，主要用于电源、通信设备等电子电路中；图 1-15(f) 为铁芯线圈电感，常与电容器组成滤波电路；图 1-15(g) 为贴片电感，主要用于手机等集成度要求较高的电路中。



图 1-15 电感器图形符号及实物

二、电感器的主要参数

电感的标注方法目前有直标法和色标法两种。

1. 直标法

直标法是指将电感的主要参数,如电感量、误差值、最大工作电流等参数用文字直接标在电感器的外壳上。其中,最大工作电流常用字母 A、B、C、D、E 等标注,标注字母和电流对应关系如表 1-5 所示。

表 1-5 电感器最大工作电流的标注字母

标注字母	A	B	C	D	E
最大工作电流/mA	50	150	300	700	1600

小型固定电感的误差等级有 I、II、III 三级, I 级为 $\pm 5\%$, II 级为 $\pm 10\%$, III 级为 $\pm 20\%$ 。对体积较大的电感,其电感量、误差等级及标称电流一般在外壳上直接标注,如电感外壳上标有 22 μH 、A、II 的字样,表示电感量 22 μH 、标称电流 50 mA、误差为 $\pm 10\%$ 。

在贴片小电感中,也可用 N 表示 nH 的小数点,用 R 表示 μH 的小数点。如 4N7 表示 4.7 nH, 4R7 表示 4.7 μH 。

2. 色标法

色标法是指在电感的外壳涂上各种不同颜色的环,用来标注其主要参数,主要有四色环电感和五色环电感两种。其数字与颜色的对应关系和前面学习的色环电阻标注方法相同,单位为微亨(μH)。

三、电感器选用与检测

1. 选用常识

(1) 选用电感器时,首先应考虑其性能参数(电感量、额定电流值、品质因数等参数)及其外形结构是否符合要求。

(2) 小型固定电感器与色码电感器、色环电感器之间,只要电感量、额定电流值相同,外形尺寸相近,一般都可以直接代换使用。

(3) 对于专用设备中的线圈,应尽可能选用同型号、同规格的产品。

2. 电感器的检测方法

一般采用机械万用表或数字万用表电阻挡测量电感线圈的阻值来判断其好坏,即检测电感是否有短路、断路或绝缘不良等情况。一般电感线圈的直流电阻很小(零点几欧姆),低频扼流圈的电感量大,其线圈的匝数相对较多,因此直流电阻相对较大(几百至几千欧姆)。当测得的电阻为无穷大时,表明线圈内部或引出端已经断线;如果测得的低频扼流圈电阻为零,则说明内部短路。万用表电阻挡只能对电感器的通断或是否存在短路进行判断,电感量的大小必须借助专用仪器,在此不讲述。

1.2.6 半导体二极管

任务导引

二极管是用半导体材料制成的一种电子器件，其核心是一个PN结，基本特性是单向导电性，广泛应用于各种电子设备中。那么，二极管结构是怎样的？它具有怎样的导电特性？主要参数和作用有哪些？使用时我们又应如何选用和检测呢？

一、半导体的基本知识

自然界中的物质，按照导电能力的不同，可分为导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)等。完全纯净的半导体称为本征半导体。在纯净的半导体中，掺入适量的杂质，会使半导体的导电能力显著增强。人们正是通过掺入某些特定的杂质元素，精确地控制半导体的导电能力，制造成各种性质、用途的半导体器件。几乎所有的半导体器件(如二极管和三极管、场效应管、晶闸管以及集成电路等)都是采用掺有特定杂质的半导体制作而成的。

用得最多的半导体是四价元素硅和锗，在纯净的半导体中掺入极微量的其他元素后所得到的半导体称为杂质半导体，其类型有P型半导体和N型半导体两种。掺杂过程是在高温炉中进行的，将特定元素和纯净半导体材料一起蒸发，这一过程受到严格控制。

在纯净的半导体硅或锗中掺入适量的五价磷元素(或其他五价元素)，可形成带负电的自由电子(又称多数载流子)参与导电，故被称为电子型半导体，简称N型半导体。

在纯净的半导体硅或锗中掺入适量的三价硼元素(或其他三价元素)，可形成带正电的空穴(又称多数载流子)参与导电，故被称为空穴型半导体，简称P型半导体。

二、二极管结构、图形符号及分类

二极管是最简单的半导体器件，将P型半导体和N型半导体结合在一起，在结合处会形成一个特殊的薄层，即PN结，一个PN结可以制作一只二极管。

1. 二极管的结构

普通二极管由一个PN结加上两根电极引线做成管芯，从P区引出的电极作为正极，从N区引出的电极作为负极，并且用塑料、玻璃或金属等材料作为管壳封装起来，这样就构成了二极管，如图1-16所示。二极管一般采用两种方式进行电极的极性标识。体积较小时，在其中的一端用一个色环来表示负极，无色环一端就是正极；体积较大时，常在壳体上印有标明正极和负极的符号，如图1-17(b)所示。

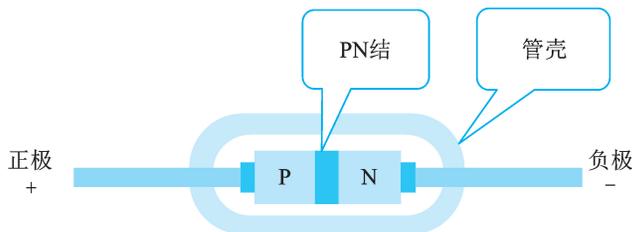


图 1-16 二极管基本结构

2. 二极管的图形符号

图 1-17(b)所示的各类二极管广泛应用于各类电子产品中,图形符号如图 1-17(a)所示,图形符号中用箭头形象地表示了二极管正向电流流通的方向,箭头的一边代表正极,用“+”号表示,另一边代表负极,用“-”号表示;文字符号用字母“VD”表示。

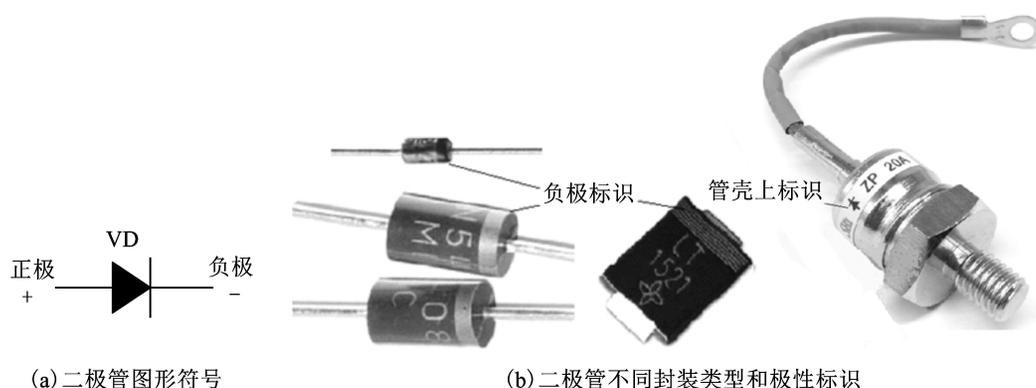


图 1-17 二极管图形符号及极性标识

3. 二极管的分类

二极管按用途分为开关、稳压、整流、检波、光电、发光、变容、阻尼等二极管;按结构分为面接触型和点接触型二极管;按制作材料分为硅二极管和锗二极管。

三、二极管的单向导电特性

1. 二极管的单向导电特性

● 做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件,按图 1-18 所示电路调入对应器件并连接好电路,运行仿真软件,分别闭合和断开开关 S_1 、 S_2 ,观察 X_1 、 X_2 两个指示灯的亮灭情况,将结果填入表 1-6。

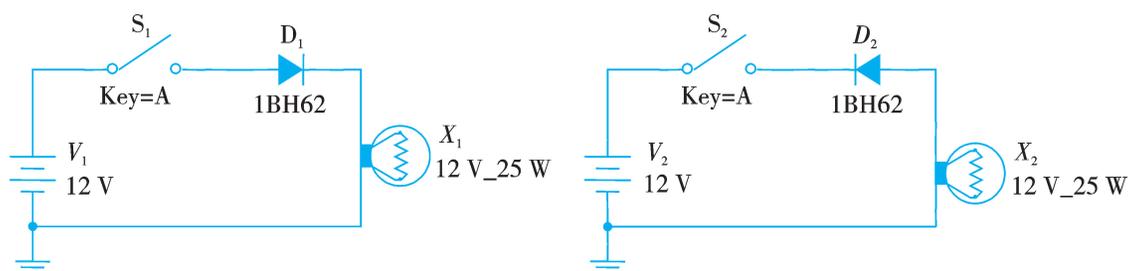


图 1-18 二极管导电特性仿真实验电路

表 1-6 二极管导电特性仿真实验记录表

S_1	X_1	二极管工作状态	S_2	X_2	二极管工作状态
断开			断开		
闭合			闭合		

通过以上仿真实验,我们发现:当 S_1 断开时,指示灯 X_1 熄灭;当 S_1 闭合时,指示灯 X_1 点亮。当 S_2 断开时,指示灯 X_2 熄灭;当 S_2 闭合时,指示灯 X_2 同样熄灭。

可以说明:

(1) 二极管加正向电压导通

将二极管的正极接电路中的高电位,负极接低电位,称为正向偏置(正偏)。此时二极管内部呈现较小的电阻,有较大的电流通过,二极管的这种状态称为正向导通状态。

(2) 二极管加反向电压截止

将二极管的正极接电路中的低电位,负极接高电位,称为反向偏置(反偏)。此时二极管内部呈现很大的电阻,几乎没有电流通过,二极管的这种状态称为反向截止状态。

2. 二极管的特性曲线

二极管的导电性能由加在二极管两端电压和流过的电流来决定,这两者之间的关系称为二极管的伏安特性。

(1) 正向特性

● 做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件,按图 1-19 所示电路调入对应器件并连接电路,运行仿真软件,闭合开关 S_1 ,改变电位器 R_1 的百分比,将电压表(V_1)和电流表(A_1)测得的结果填入表 1-7。

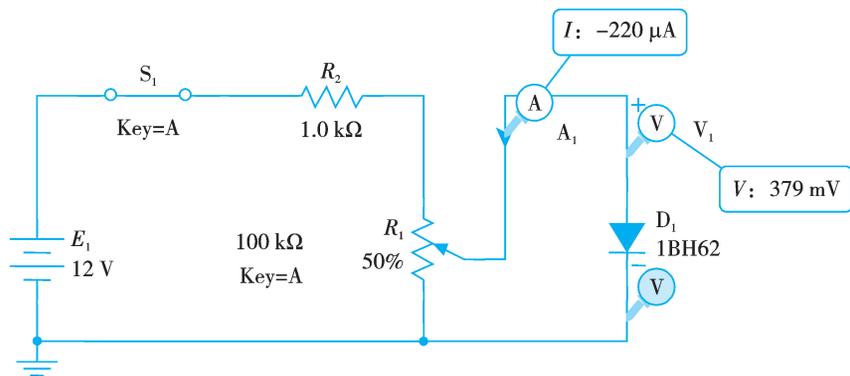


图 1-19 二极管正向特性仿真电路

表 1-7 二极管正向特性曲线仿真实验记录表

R_1 百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
电流表(A_1)										
电压表(V_1)										

根据表 1-7 记录的数据在坐标纸上用描点的方法,画出电压和电流之间关系的图像。(特别说明:为使曲线更连贯,可将电位器 R_1 改变的百分比减小,增加点的个数)

由上述仿真实验和采用描点法作出的二极管伏安特性曲线可知：

当二极管两端所加的正向电压由零开始增大时，在正向电压比较小的范围内，正向电流很小，二极管呈现很大的电阻。如图 1-20 中 OA 段，通常把这个范围称为死区，相应的电压叫死区电压。硅二极管的死区电压约为 0.5 V ，锗二极管的死区电压为 $0.1\sim 0.2\text{ V}$ 。外加电压超过死区电压以后，正向电流迅速增加，这时二极管处于正向导通状态。如图中 AB 段，此时管子两端电压降变化不大，硅管为 $0.6\sim 0.7\text{ V}$ ，锗管为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ ，此电压为二极管的导通电压降，可作为判断二极管是否正常工作的依据。

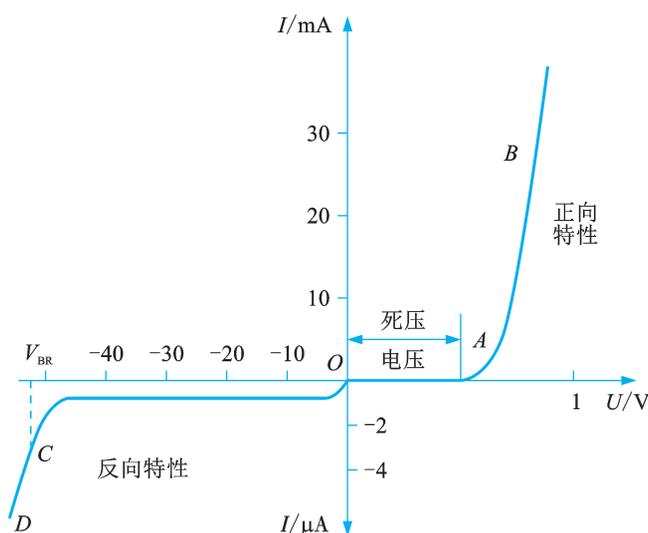


图 1-20 二极管伏安特性曲线分析

(2) 反向特性

做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，按图 1-21 所示电路调入对应器件并连接电路，运行仿真软件，闭合开关 S_1 ，改变电位器 R_1 的百分比，将电压表 (V_1) 和电流表 (A_1) 测得的结果填入表 1-8。

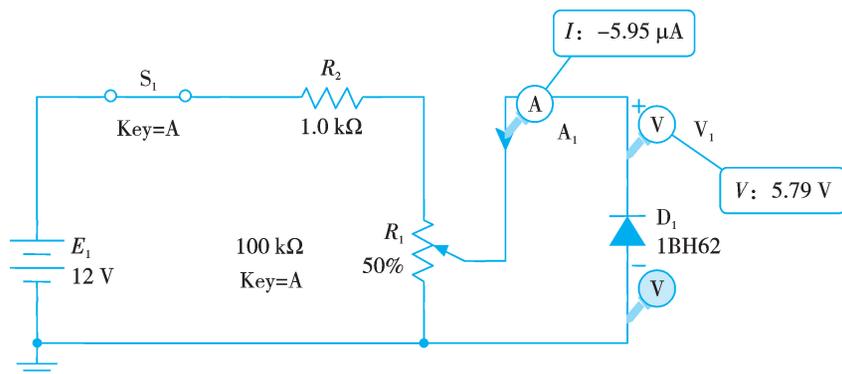


图 1-21 二极管反向特性仿真电路

表 1-8 二极管反向特性曲线仿真实验记录表

R_1 百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
电流表(A_1)										
电压表(V_1)										

根据表 1-8 记录的数据在坐标纸上用描点的方法，画出电压和电流之间关系的图像。(特别说明：为体现反向击穿情况，可通过增大电源 E_1 电压的大小来实现)

由上述仿真实验和采用描点法作出的二极管伏安特性曲线可知：

当给二极管加反向电压时，形成的反向电流是很小的，而且在很大范围内基本不随反向电压的变化而变化，即保持恒定，如图 1-20 中 OC 段。

如反向电压不断增大，当大到一定数值时，反向电流会突然增大，如图 1-20 中 CD 段，这种现象称为反向击穿，相应的电压叫反向击穿电压。正常使用二极管时，是不允许出现这种现象的。

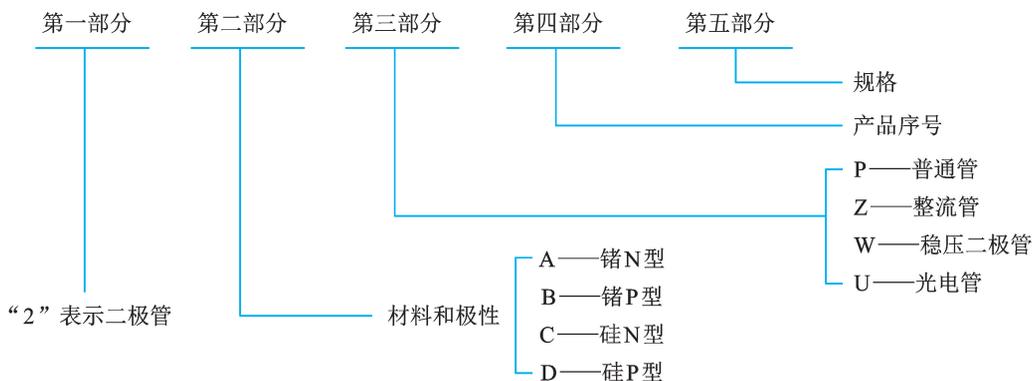
不同的材料、不同的结构和不同的工艺制成的二极管，其伏安特性有一定差别，但伏安特性曲线的形状基本相似。

从二极管伏安特性曲线可以看出，二极管的电压与电流变化不呈线性关系，也就是说二极管的内阻不是常数，所以二极管属于非线性器件。

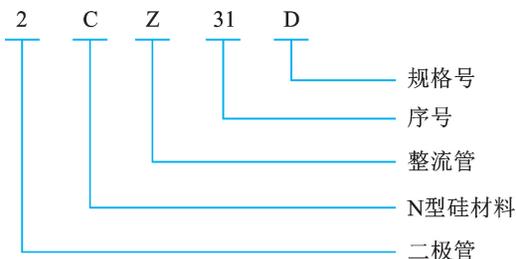
四、二极管的型号和主要参数

1. 二极管的型号

国产二极管型号命名规定由五部分组成(国外产品依各国标准而确定，需要对应查阅相关资料)，意义如下(部分二极管无第五部分)：



示例：2CZ31D 表示 N 型硅材料整流二极管。



国外型号的二极管,常以“1N”或“1S”开头,如 1N4812、1N4001、1S1885 等,“N”表示该器件是美国电子工业协会注册产品,“S”则表示该器件是日本电子工业协会注册产品。现将 1N4812 型号意义说明如下:



2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流 I_{FM} 通常称为额定工作电流,是二极管长期连续工作时,允许通过二极管的最大正向电流值。因为电流通过二极管时就要发热,如果正向电流超过此值,二极管就会有烧坏的危险,通常为几微安至几百毫安。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压 U_{RM} 通常称为额定工作电压,是二极管在正常工作时所能承受的最大反向工作电压值(也称耐压)。为了确保二极管安全工作,通常取反向击穿电压的一半作 U_{RM} ,工作实际值不能超过此值。

五、特殊二极管

1. 稳压二极管

(1) 稳压二极管的图形符号

稳压二极管又称齐纳二极管,是一种用于稳压(或限压)、工作于反向击穿状态的二极管。其文字符号用 V 或 VZ 表示,稳压二极管的种类很多,图 1-22(a)所示为常用稳压二极管的实物,图 1-22(b)所示为稳压二极管的图形符号。



图 1-22 稳压二极管实物及图形符号

(2) 稳压二极管的伏安特性

稳压二极管的伏安特性曲线如图 1-23 所示,从图中可以看出,当反向电压达到 U_z 时,反向电流突然剧增,稳压二极管处于击穿状态,此后,电流在很大范围内变化,其两端电压基本保持不变(稳压区)。如果把击穿电流通过电阻限制在一定的范围内,管子就可以长时间在反

向击穿状态下稳定工作，而且，稳压二极管的反向击穿特性是可逆的，即去掉反向电压，稳压二极管又恢复常态。可见，稳压二极管能稳定电压正是利用其反向击穿后电流剧变，而两端电压几乎不变的特性来实现的。

稳压二极管的击穿电压值就是稳压值。稳压二极管主要用于基准电源电路、辅助电源电路及恒压源电路。稳压二极管的类型很多，主要有 2CW、2DW 系列，如 2CW15，其稳定电压为 7.0~8.5 V。从晶体管手册可以查到常用稳压二极管的技术参数和使用资料。

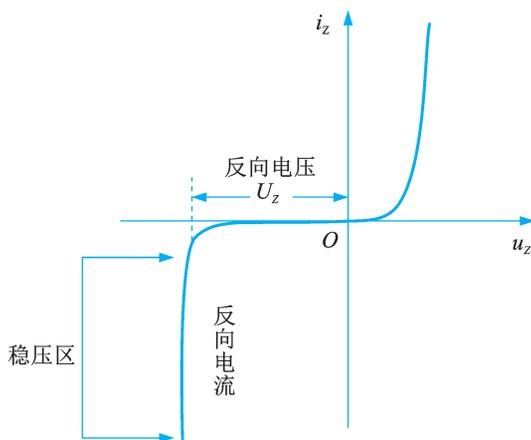


图 1-23 稳压二极管的伏安特性曲线

(3) 稳压二极管稳压电路

① 电路结构及特点

图 1-24 为稳压二极管稳压电路。其优点是电路十分简单，安装容易，也可以供要求不高的负载使用；缺点是电路输出电流受稳压二极管最大稳定电流的限制，不能适应负载较大电流的需要。

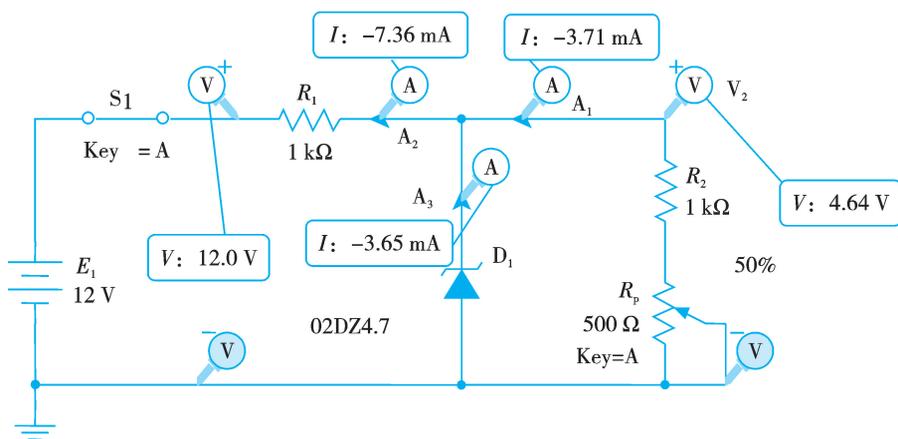


图 1-24 稳压二极管稳压电路

② 稳压原理

● 做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，按图 1-24 所示电路调入相应器件并连接好电路，用电压表(V_1)监测输入电压，电压表(V_2)监测输出电压，电流表(A_1)监测输出电流，电流表(A_2)监测输入电流，电流表(A_3)监测稳压二极管电流，分输入电压变化和负载变化(R_2 和 R_p 串联后总电阻)两种情况进行仿真实验，将测得的结果填入表 1-9。

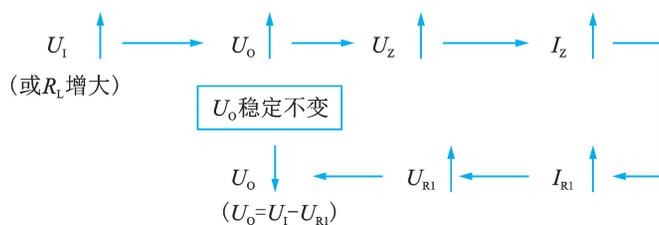
表 1-9 稳压二极管稳压电路仿真实验记录表

输入电压/V	12	13	14	15	16	17	18	19	20	备注
电压表(V_2)										R_p 调到 50%位置
电流表(A_1)										
电流表(A_2)										
电流表(A_3)										
R_p 百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	备注
电压表(V_2)										输入电压 固定为 15 V
电流表(A_1)										
电流表(A_2)										
电流表(A_3)										

由上述仿真实验数据可知:

当输入电压 U_1 升高或负载 R_L (R_2 和 R_{p2} 串联后总电阻) 阻值变大(负载减轻)时, 将造成输出电压 U_o 随之上升。那么稳压二极管的反向电压 U_z 也会上升, 从而引起稳压电流 I_z 急剧加大, 流过 R_1 的电流 I_{R1} 也加大, 导致其上的电压降上升, 使输出电压 U_o 下降, 从而实现输出电压稳定不变。

上述分析也可用如下推导表示



同理, 输入电压 U_1 降低或负载 R_L 阻值变小(负载加重)时, 输出电压 U_o 也能稳定不变。

2. 发光二极管(LED)

(1) 发光二极管的图形符号

发光二极管与普通二极管一样也是由 PN 结构成的, 同样具有单向导电性。发光二极管工作在正偏置状态, 其图形符号如图 1-25(a) 所示。



(a) 发光二极管图形符号

(b) 发光二极管实物

图 1-25 发光二极管图形符号及实物

(2) 发光二极管的基本特性

发光二极管是采用磷化镓或砷化镓等半导体材料制成的，是直接将电能转换成光能的发光器件。发光二极管的发光颜色和它本身外壳的颜色相同，但也有透明色的发光二极管，能发出红色、黄色、绿色、白色等可见光。还有三色变色发光二极管和人眼看不见的红外线发光二极管，其实物如图 1-25(b) 所示。它们被广泛运用于电路的状态显示、信息显示、装饰工程、照明等领域。

通常，一般发光二极管通过 10 mA 电流时，就可发出强度令人满意的光线，高强度的发光二极管只需 5 mA 左右电流即可。电流通过发光二极管时，发光二极管两端有一个“管压降”，根据制造材料的不同，通常管压降在 1.7~3.5 V 之间。如红色发光二极管的管压降为 1.7 V 左右，黄色的为 1.8 V 左右，绿色的为 2 V 左右，蓝色的为 3.5 V 左右。

(3) 发光二极管的典型应用

发光二极管可以用直流、交流和脉冲电源点亮，它属于电流控制型半导体器件，使用时需串联一合适的限流电阻，以避免电流超过发光二极管的允许值，造成它的寿命缩短甚至烧毁。

发光二极管用作交流电源指示灯的电路如图 1-26 所示，二极管 VD 与发光二极管 VL 并联。开关 S 接通时 VL 发光，可作为工作指示灯，此时 VD 两端的反向电压只有 1.7 V 左右，可选用 1N4001 等低压二极管。

用发光二极管来判断电源极性的电路如图 1-27 所示。VL1 和 VL2 采用两只不同颜色的发光二极管，它们的正、负极相对并联，再与限流电阻串联构成测量电路。如果两只管子同时发光，则所测得电源为交流电，如果只有一只管子发光，可根据发光二极管的颜色判断出电压的极性，R 的阻值根据 U_1 的大小来选择，应将流过发光二极管的电流限制在 1~4 mA 范围内。

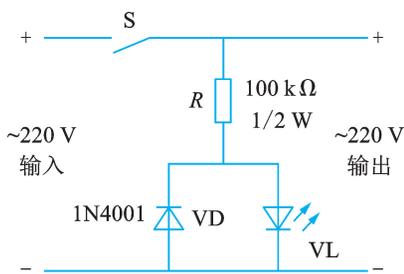


图 1-26 发光二极管用作电源指示灯

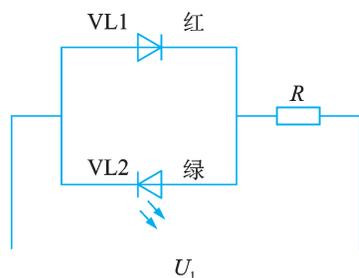


图 1-27 发光二极管判断电源极性

3. 光电二极管

光电二极管是一种能将接收到的光信号转换成电信号输出的二极管，又称光敏二极管，其基本特性是在光的照射下产生光电流。光电二极管也具有和普通二极管一样的单向导电性，它广泛用于制造各种光敏传感器、光电控制器等，其实物如图 1-28(a) 所示。

(1) 光电二极管的图形符号

光电二极管的图形符号及文字符号如图 1-28(b) 所示。

(2) 光电二极管的基本特性

光电二极管是在反向电压作用下工作的，它的正极接较低的电位，负极接较高的电位。没有光照时，反向电流极其微弱，称为暗电流；有光照时，反向电流迅速增大到几十微安，称



图 1-28 光电二极管

为亮电流。光的强度越大，反向电流也越大。光的变化引起光电二极管电流变化，该电流流经负载，产生输出电压 U_0 ，如图 1-29 所示。这就可以把光信号转换成电信号，成为光电传感器件。

4. 变容二极管

(1) 变容二极管图形符号

变容二极管与稳压二极管一样，工作于反向偏置状态。其实物如图 1-30(a) 所示，图形符号及文字符号如图 1-30(b) 所示。

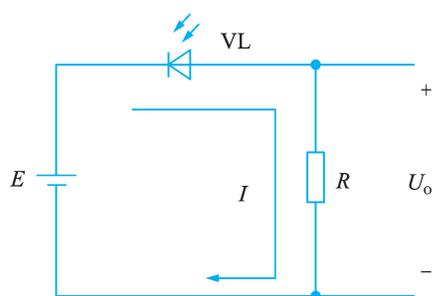


图 1-29 光电二极管工作电路

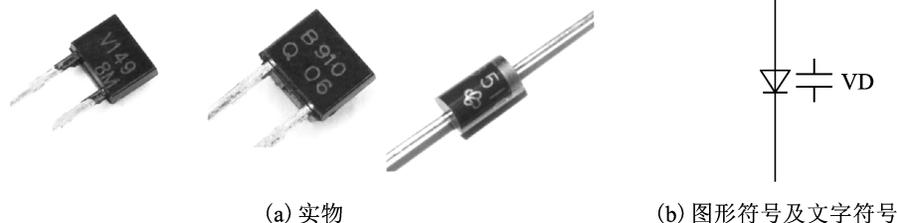


图 1-30 变容二极管

(2) 变容二极管的基本特性

变容二极管是在反向电压作用下工作的，当给变容二极管施加反向电压时，由于 PN 结展宽而呈现电容特性，其两个电极之间的 PN 结电容大小随加到变容二极管两端反向电压大小的改变而变化（反向电压增大电容量减小，反向电压减小电容量增大），其特性相当于一个可以通过电压控制的自动微调电容器。

变容二极管的电容量为皮法 (pF) 级，最大电容与最小电容之比约为 5 : 1，如 2CB14 型变容二极管，当反向电压在 3~25 V 之间变化时，其结电容在 20~30 pF 之间变化。它主要在高频电路中用作自动调谐、调频、调相等，例如在电视接收机的调谐回路中作可变电容。

六、二极管的选用与检测方法

1. 二极管的选用常识

二极管的种类和规格很多，各有不同的应用场合，相互间一般不能代用。例如，检波二极管

一般都用 2AP 系列,若使用 2CZ 系列就会使检波效率降低。当然,什么事都不是绝对的,如某整流二极管损坏后,如找不到同规格的二极管,还是可以使用代用管,代换的原则是:高耐压(反向电压)管可以替换低耐压管,整流电流值大的二极管可以替换整流电流值小的二极管。

2. 二极管的检测方法

(1) 机械万用表测量普通二极管

①挡位的选择。对于一般的小功率二极管使用电阻挡的 $R \times 100$ 、 $R \times 1 \text{ k}$ 挡位,而不宜使用 $R \times 1$ 和 $R \times 10 \text{ k}$ 挡,前者由于万用表内阻最小,通过二极管的正向电流较大,可能烧毁二极管;后者由于万用表电池的电压较高,加在二极管两端的反向电压也较高,易击穿二极管;对于大功率二极管,可选择 $R \times 1$ 挡。

②测量。将黑表笔接二极管的正极,红表笔接二极管的负极,阻值一般在 $100 \sim 500 \Omega$ 之间,如图 1-31 所示。当红黑表笔对调后,阻值应在几百千欧以上,如图 1-32 所示。



图 1-31 二极管正向电阻测量示意图

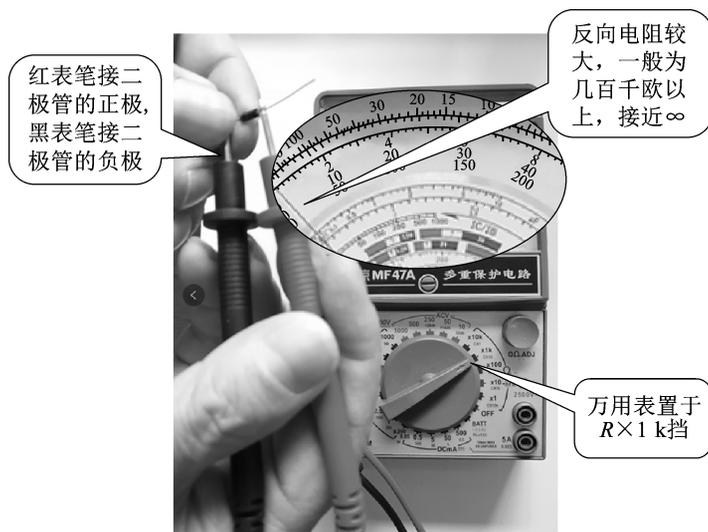


图 1-32 二极管反向电阻测量示意图

如果不知道二极管的正负极,也可用上述方法进行判断。测量过程中,万用表电阻挡显示的阻值很小时,即为二极管的正向电阻,黑表笔所接触的电极是二极管的正极,另一端为负极。如果显示的阻值很大,则红表笔相连的一端为正极,另一端为负极。

需提出的是,二极管的正向和反向电阻值会随检测万用表的量程($R \times 100$ 挡或 $R \times 1\text{ k}$ 挡)的不同而变化,这是正常现象,因为二极管是非线性器件。

(2) 机械万用表测量发光二极管

①挡位的选择。万用表挡位选择 $R \times 10\text{ k}$ 挡。

②测量。将黑表笔接发光二极管的正极,红表笔接发光二极管的负极,阻值一般在 $40\text{ k}\Omega$ 之内,如图 1-33 所示。当红黑表笔对调后,阻值应在几百千欧以上,如图 1-34 所示。

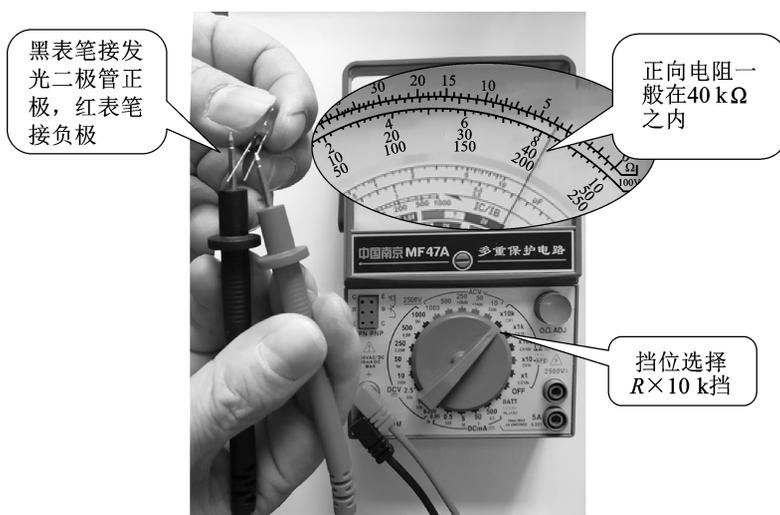


图 1-33 发光二极管正向电阻测量示意图

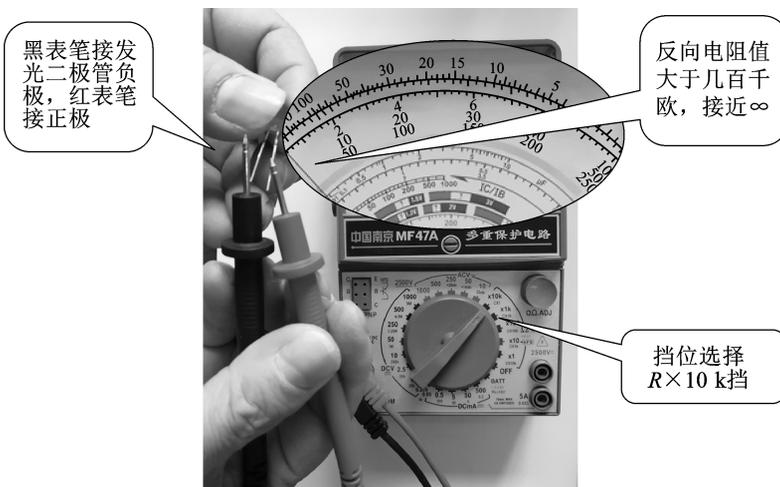


图 1-34 发光二极管反向电阻测量示意图

(3) 数字万用表测量二极管

①极性判别。将数字万用表置于二极管挡,如图 1-35 所示,两表笔分别接二极管的两个

电极,若显示屏显示“1”以下数字时,说明二极管正向导通,红表笔接的是正极,黑表笔接的是负极。此时显示的数字为二极管的正向压降,单位为V。若显示的数字为“1”,则说明二极管处于反向截止状态,红表笔接的是负极,黑表笔接的是正极(注意与机械表的差别)。

②判别硅管和锗管。红表笔接二极管正极,黑表笔接二极管负极,若显示屏显示电压为0.5~0.7V,说明被测管是硅管;若显示电压为0.1~0.3V,则被测管是锗管。



图 1-35 数字万用表二极管挡位

1.2.7 技能实训

二极管的识读与检测

1. 普通二极管的识别与检测

(1)准备普通二极管若干,通过外形及二极管上标称参数进行识读。

(2)准备正常和质量有问题的普通二极管若干,通过万用表进行检测,对质量进行判断。将检测结果填入表 1-10。

表 1-10 用万用表测试普通二极管

挡位	二极管型号	正向电阻	反向电阻	用途	质量
$R \times 100$	1N4007				
$R \times 1\text{ k}$					
$R \times 100$	1N4148				
$R \times 1\text{ k}$					
$R \times 100$	2AP9				
$R \times 1\text{ k}$					

2. 特殊二极管的识别与检测

(1) 准备特殊二极管若干，通过外形及二极管上标称参数进行识读。

(2) 准备正常和质量有问题的特殊二极管若干，通过万用表进行检测，对质量进行判断。将检测结果填入表 1-11。

表 1-11 用万用表测试特殊二极管

类型	二极管型号	正向电阻	反向电阻	用途	质量
发光二极管					
稳压二极管					
光电二极管					

注意：

① 测试发光二极管，应用 $R \times 10 \text{ k}$ 挡并调零。

② 测稳压二极管时，用 $R \times 1 \text{ k}$ 或 $R \times 10 \text{ k}$ 挡，分别测反向电阻。如果稳压值大于 9 V 就测不出来，另外查资料。

③ 测光电二极管时要遮住受光窗，接受光时，光线不能太强，否则会损坏二极管。

3. 技能大比拼

(1) 随机抽出各类正常二极管若干，给定 1 分钟进行参数识读，看谁识读得多且正确率高。

(2) 将正常二极管与有质量问题的二极管进行混合，随机抽出若干，给定 1 分钟进行质量检测，看谁测得多且正确率高。

1.2.8 二极管整流及电容滤波电路

任务导引

电子产品大多采用直流电源供电，而我们日常照明用电是交流电，那么采用怎样的电路可以将交流电变为直流电呢？能否应用前面我们学过的二极管来实现呢？

整流电路是直流电源的核心部分，它是利用二极管的单向导电性，将输入的交流电压转换为脉动的直流电压。脉动的直流电压还不能满足大多数电路的需要，因此在整流电路后面要加一个滤波电路，滤波电路的作用是将脉动的直流电压转变为平滑的直流电压。

一、半波整流电路

1. 电路组成

半波整流电路由电源变压器 T、整流二极管 VD 和用电负载 R_L 构成，如图 1-36(a) 所示，其电路通常由图 1-36(b) 所示的电路原理图来表示。

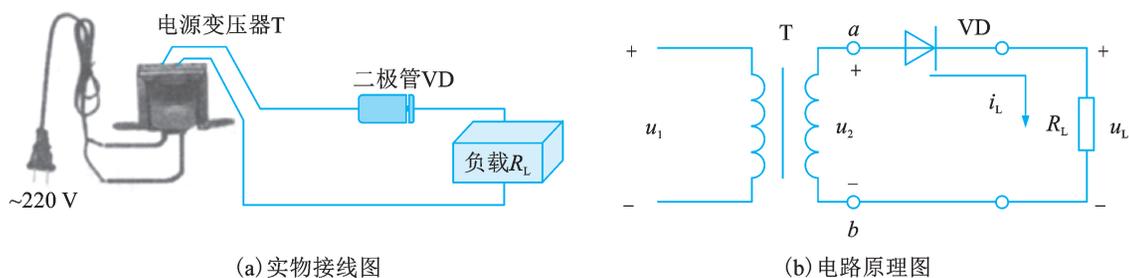


图 1-36 半波整流电路

2. 工作过程

● 做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，参考图 1-36(b) 所示电路调入器件并连接电路(负载取 $100\ \Omega$)，用电压表监测输入、输出电压，电流表监测负载电流，示波器监测输入与输出波形，运行仿真，将测得的数据及波形填入表 1-12。

表 1-12 半波整流电路仿真实验记录表

输入电压/V	输入电压波形	输出电压波形
输出电压/V		
输出电流/mA		

通过仿真实验，我们得到半波整流工作过程如下：

(1) 当电压 u_2 为正半周时， a 端电位高于 b 端电位，二极管 VD 正向偏置而导通，电流 i_L 由 a 端 \rightarrow VD \rightarrow R_L \rightarrow b 端，自上而下流过 R_L ，在 R_L 上得到一个极性为上“+”下“-”的电压 u_L 。若不计二极管的正向压降，此期间负载上的电压 $u_L = u_2$ ，波形如图 1-37 所示。

(2) 当 u_2 为负半周时， b 端电位高于 a 端电位，二极管 VD 反向偏置而截止，若不计二极管的反向漏电流，此期间无电流通过 R_L ，负载上的电压 $u_L = 0$ ，波形如图 1-37 所示。

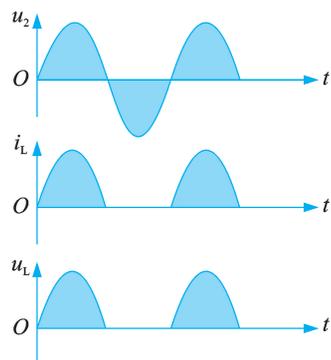


图 1-37 半波整流工作波形

由此可见,在交流电一个周期内,二极管有半个周期导通,另半个周期截止,在负载电阻 R_L 上的脉动直流电压波形是交流电压 u_2 的一半。故称半波整流。

输出电压的极性取决于二极管在电路中的连接方式,如将图 1-36 中二极管反接时,输出电压的极性也将变反。

3. 负载上的直流电压与直流电流的估算

(1) 负载上的直流电压 U_L

负载 R_L 上的半波脉动直流电压平均值可用直流电压表直接测得,也可按下式计算求出

$$U_L = 0.45U_2 \quad (1-1)$$

式中: U_2 为变压器二次电压有效值。

(2) 负载上的直流电流 I_L

流过负载 R_L 的直流电流为

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-2)$$

4. 整流二极管的选择

由图 1-36(b)可知,整流二极管与负载是串联的,所以流经二极管的电流 I_D (平均值)与负载上的直流电流 I_L 相等,故选用二极管时要求其

$$I_{FM} \geq I_D = I_L \quad (1-3)$$

二极管承受的最大反向工作电压是发生在 u_2 达到最大值时,即

$$U_{RM} \geq \sqrt{2}U_2 \quad (1-4)$$

根据最大整流电流和最高反向工作电压的计算值,查阅有关半导体器件手册,选用合适的二极管型号,使其额定值大于计算值。

【例 1.1】 有一直流负载,电阻为 $1.5 \text{ k}\Omega$,要求工作电流为 10 mA ,如果采用半波整流电路,试求电源变压器的二次电压,并选择适当的整流二极管。

解: 因为

$$U_L = R_L I_L = 1.5 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-3} \text{ V} = 15 \text{ V}$$

由 $U_L = 0.45U_2$, 变压器二次电压的有效值为

$$U_2 = \frac{U_L}{0.45} = \frac{15}{0.45} \text{ V} \approx 33 \text{ V}$$

二极管承受的最大反向工作电压为

$$\sqrt{2}U_2 = 1.41 \times 33 \text{ V} \approx 47 \text{ V}$$

根据求得的参数,查阅整流二极管参数手册,可选择 $I_{FM} = 100 \text{ mA}$, $U_{RM} = 50 \text{ V}$ 的 2CZ82B 型整流二极管,或选用符合条件的其他型号二极管,如 1N4001、1N4002 等。

二、全波整流电路

1. 电路组成

全波整流电路实质上是由两个半波整流电路组成的，如图 1-38(a) 所示。图中 T 为电源变压器，具有中心抽头，其作用是将电网上的交流电压变为 u_{2a} 和 u_{2b} 两个大小相等，对地电位正好相反的交流电压， VD_1 、 VD_2 为整流二极管， R_L 是要求供电的负载电阻。

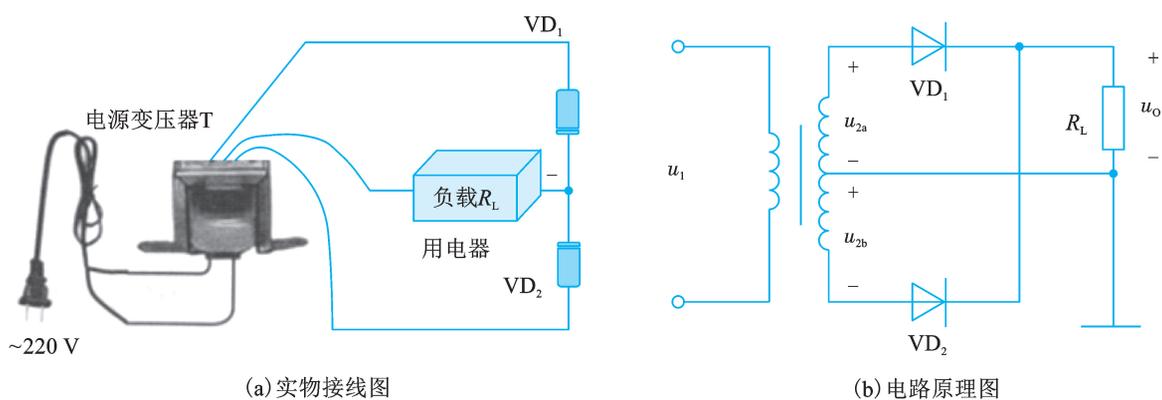


图 1-38 全波整流电路

2. 工作过程

做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，参考图 1-38(b) 所示电路调入器件并连接电路(负载取 $100\ \Omega$)，用电压表监测输入、输出电压，电流表监测各二极管和负载电流，示波器监测输入与输出波形，运行仿真，将测得的数据及波形填入表 1-13。

表 1-13 全波整流电路仿真实验记录表

输入电压/V	输入电压波形	输出电压波形
输出电压/V		
输出电流/mA		
二极管电流/mA		

通过仿真实验,我们得到全波整流电路工作过程如下:

(1)当变压器输入交流电压为正半周时,变压器次级感应电压 u_{2a} 对地为正半周, VD_1 因加正向电压而导通,电流 i_{VD1} 经负载 R_L 到地,输出电压 $u_o = u_{2a}$ 。而变压器次级感应 u_{2b} 对地为负半周, VD_2 因加反向电压而截止,次级感应 u_{2b} 无输出。其工作情况如图 1-39(a)所示。

(2)当变压器输入交流电压为负半周时,变压器次级感应电压 u_{2a} 对地为负半周, VD_1 因加反向电压而截止, u_{2b} 对地为正半周, VD_2 因加正向电压而导通,产生的电流 i_{VD2} 经负载 R_L 到地,输出电压 $u_o = u_{2b}$ 。因变压器次级是中心抽头,故有 $u_{2a} = u_{2b}$, $i_{VD1} = i_{VD2}$ 。其工作情况如图 1-39(b)所示。

当输入电压进入下一个周期时,又重复上述过程。在该电路中,交流电压的正、负半周中, VD_1 、 VD_2 轮流导通,在负载 R_L 上总是得到自上而下的单向脉动电流。与半波整流电路相比,它有效地利用了交流电的负半周,所以整流效率提高了一倍。全波整流电路工作波形如图 1-40 所示。

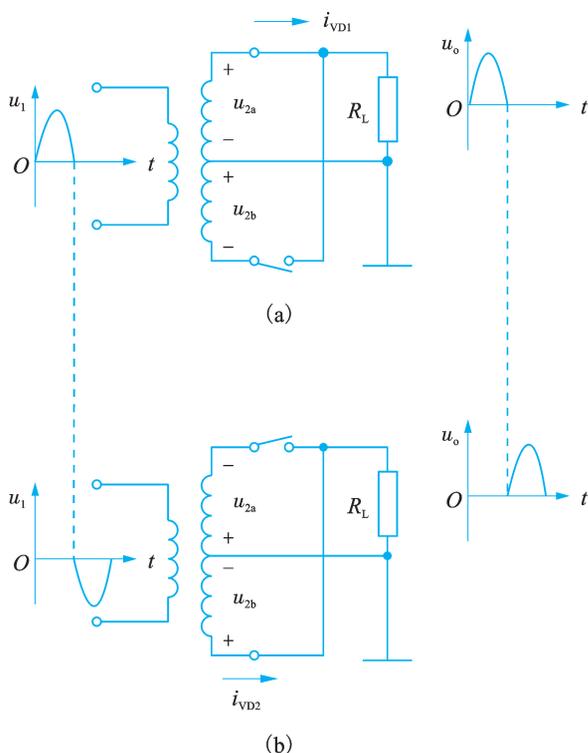


图 1-39 全波整流电路中的电流路径

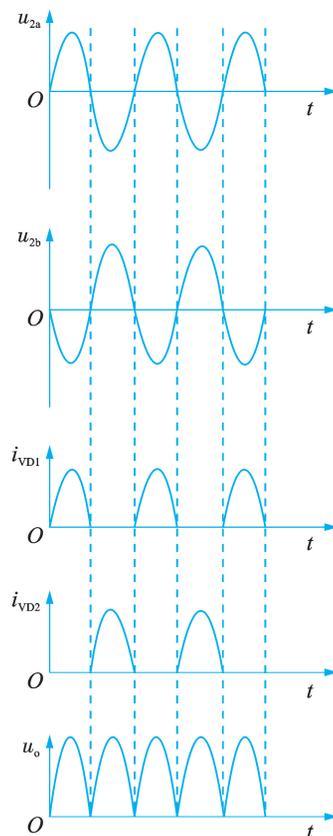


图 1-40 全波整流电路工作波形

3. 负载上的直流电压与直流电流的估算

从以上分析得知,全波整流电路中负载所获得的直流电压比半波整流电路提高了一倍。

(1)负载上的直流电压 U_L

$$U_L = 0.9U_2 \quad (1-5)$$

(2) 负载上的直流电流 I_L

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-6)$$

4. 整流二极管的选择

在全波整流电路中，每只二极管都是在交流电的半个周期内导通的，每只管子的平均电流是输出电流的二分之一，故选用二极管时要求其

$$I_{FM} \geq I_D = \frac{1}{2} I_L \quad (1-7)$$

二极管承受的最大反向工作电压是交流电压 u_{2a} 和 u_{2b} 叠加的峰值，所以选用二极管的最大反向工作电压为

$$U_{RM} \geq 2\sqrt{2}U_2 \quad (1-8)$$

三、桥式整流电路

1. 电路组成

桥式整流电路由电源变压器和 4 个同型号的二极管接成电桥形式而组成，桥路的一对角点接变压器的二次绕组，另一对角点接负载，如图 1-41(a) 所示。图中 T 为电源变压器，其作用是将电网上的交流电压变为整流电路要求的交流电压 u_2 ， $VD_1 \sim VD_4$ 为整流二极管， R_L 是要求供电的负载电阻。

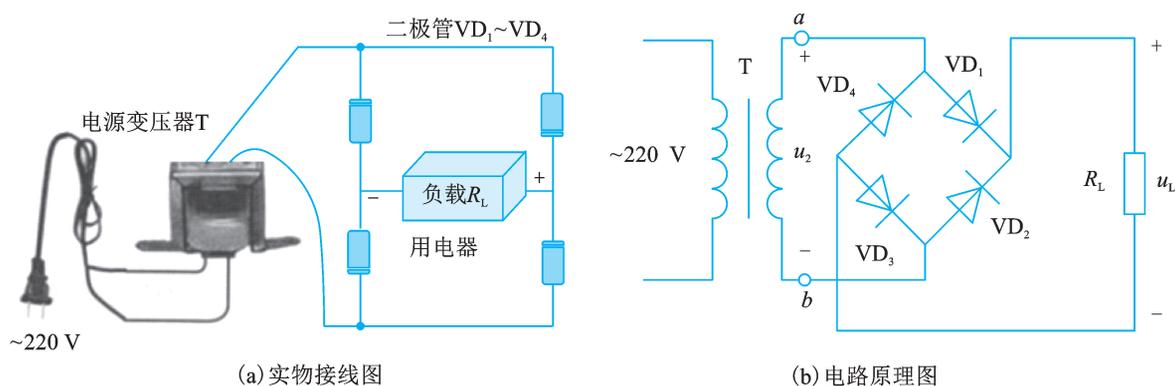


图 1-41 桥式整流电路

2. 工作过程

做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，参考图 1-41(b) 所示电路调入器件并连接电路（负载取 100Ω ），用电压表监测输入、输出电压，电流表监测各二极管和负载电流，示波器监测输入与输出波形，运行仿真，将测得的数据及波形填入表 1-14。

表 1-14 桥式整流电路仿真实验记录表

输入电压/V	输入电压波形	输出电压波形
输出电压/V		
输出电流/mA		
二极管电流/mA		

通过仿真实验,我们得到桥式整流电路工作过程如下:

(1)当电压 u_2 为正半周时,即 a 端为“+”、 b 端为“-”,这时 VD_1 、 VD_3 导通, VD_2 、 VD_4 截止,电流 i_{L1} 由 a 端 \rightarrow VD_1 $\rightarrow R_L$ \rightarrow VD_3 $\rightarrow b$ 端,如图 1-42(a)中虚线箭头所示。此电流流经负载 R_L 时,在 R_L 上形成了上“+”下“-”的输出电压。工作波形如图 1-43 所示。

(2)当 u_2 为负半周时,即 a 端为“-”、 b 端为“+”,这时 VD_2 、 VD_4 导通, VD_1 、 VD_3 截止,电流 i_{L2} 由 b 端 \rightarrow VD_2 $\rightarrow R_L$ \rightarrow VD_4 $\rightarrow a$ 端,如图 1-42(b)中虚线箭头所示。该电流经 R_L 的方向和 u_2 正半周时流向一致,同样在 R_L 上形成了上“+”下“-”的输出电压。工作波形如图 1-43 所示。

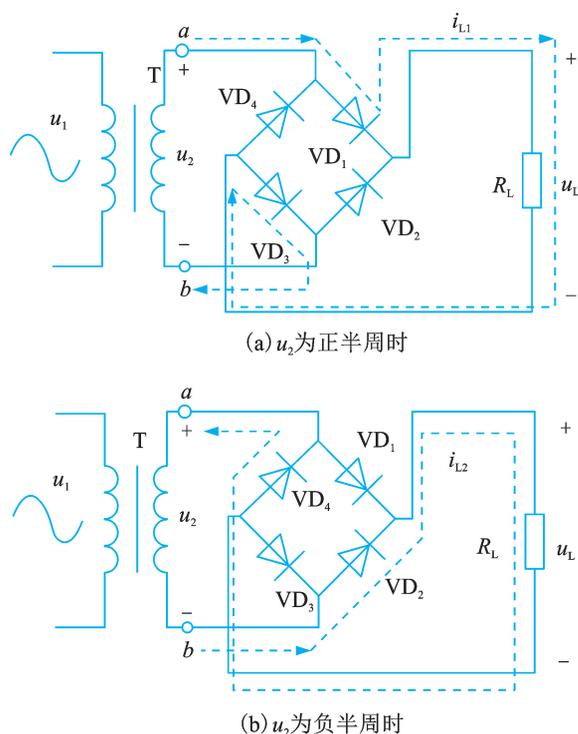


图 1-42 桥式整流电路中的电流路径

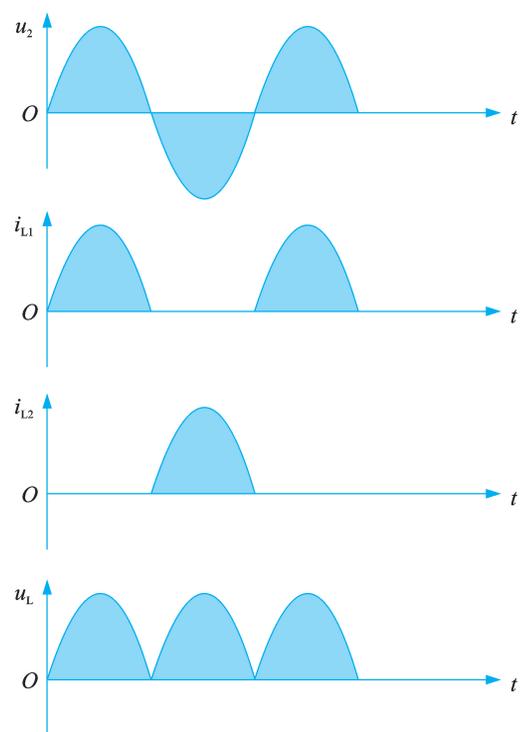


图 1-43 桥式整流电路工作波形

由此可见,无论 u_2 处于正半周还是负半周,都有电流分别流过两只二极管,并以相同方向流过负载 R_L ,是单方向的全波脉动波形。

3. 负载上的直流电压与直流电流的估算

从以上分析得知,桥式整流电路中负载所获得的直流电压与全波整流电路一样。

(1) 负载上的直流电压 U_L

$$U_L = 0.9U_2 \quad (1-9)$$

(2) 负载上的直流电流 I_L

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-10)$$

4. 整流二极管的选择

在桥式整流电路中,每只二极管都是在交流电的半个周期内导通的,每只管子的平均电流是输出电流的二分之一,故选用二极管时要求其

$$I_{FM} \geq I_D = \frac{1}{2} I_L \quad (1-11)$$

二极管承受的最大反向工作电压是交流电压 u_2 的峰值,所以选用二极管的最大反向工作电压为

$$U_{RM} \geq \sqrt{2} U_2 \quad (1-12)$$

【例 1.2】 有一直流负载需直流电压 6 V, 直流电流 0.4 A, 如果采用单相桥式整流电路, 试求电源变压器的二次电压, 并选择整流二极管的型号。

解: 由 $U_L = 0.9U_2$, 可得变压器二次电压的有效值为

$$U_2 = \frac{U_L}{0.9} = \frac{6}{0.9} \text{ V} \approx 6.7 \text{ V}$$

通过二极管的平均电流

$$I_D = \frac{1}{2} I_L = \frac{1}{2} \times 0.4 \text{ A} = 0.2 \text{ A} = 200 \text{ mA}$$

二极管承受的最高反向工作电压

$$\sqrt{2} U_2 = 9.4 \text{ V}$$

根据以上求得的参数, 查阅整流二极管参数手册, 可选择 $I_{FM} = 300 \text{ mA}$ 、 $U_{RM} = 10 \text{ V}$ 的 2CZ56A 型整流二极管, 或者选用符合条件的其他型号二极管, 如 1N4001 等。

四、电容滤波电路

1. 电路组成

电容滤波电路是使用最多也是最简单的滤波电路, 其结构是在整流电路的负载两端并联一较大容量的电解电容, 如图 1-44(a) 所示。利用电容两端电压不能突变, 在电容充、放电过程中使输出电压趋于平滑。

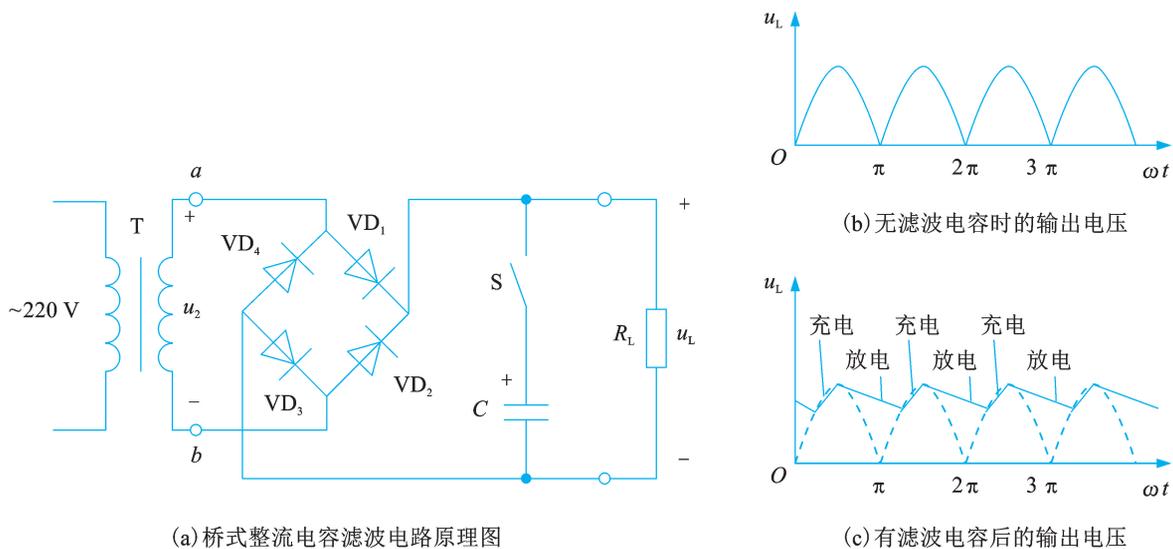


图 1-44 桥式整流电容滤波电路原理图

2. 工作过程

做中学、做中教

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，参考图 1-44(a) 所示电路调入器件并连接电路(负载取 $100\ \Omega$)，用电压表监测输入、输出电压，电流表监测各二极管和负载电流，示波器监测输入与输出波形，分开关 S 闭合和断开两种情况进行仿真，将测得的数据及波形填入表 1-15。

表 1-15 桥式整流电容滤波电路仿真实验记录表

	输入电压/V	输出电流/mA	输入电压波形	输出电压波形
开关 S 断开				
	输出电压/V	二极管电流/mA		
开关 S 闭合	输入电压/V	输出电流/mA		
	输出电压/V	二极管电流/mA		

通过仿真实验，我们得到电容滤波工作过程如下：

电容 C 接入电路，假设开始时电容上的电压为零，接通电源后 u_2 从零开始增大，整流输出的电压一方面向负载 R_L 供电，另一方面给电容 C 充电。当充电电压达到最大值 $\sqrt{2}U_2$ 后， u_2 开始下降，于是电容 C 开始通过负载电阻放电，维持负载两端电压缓慢下降，直到下一个整流电压波形的到来。当 u_2 大于电容端电压 u_c 时，电容又开始充电。如此循环下去，使输出电压的脉动成分减小，平均值增大，从而达到滤波的目的，负载上就得到了图 1-44(c) 所示的输出电压。

电解电容只能滤除低频波动，对于直流电源中的高频干扰噪声波，可以并联一个 $0.1\ \mu\text{F}$ 或 $0.01\ \mu\text{F}$ 的独石电容或者瓷片电容来滤除。

3. 输出直流电压的估算

整流电路接入滤波电容时,通常输出电压可按下面的经验公式估计:

半波整流电容滤波

$$U_L \approx U_2 \quad (1-13)$$

全波、桥式整流电容滤波

$$U_L \approx 1.2U_2 \quad (1-14)$$

半波、全波、桥式整流电容滤波空载时(负载 R_L 开路)

$$U_L \approx 1.4U_2 \quad (1-15)$$

即空载时输出电压值接近 u_2 的最大值。

【例 1.3】 一个桥式整流电容滤波电路,如图 1-44(a)所示。电源由 220 V、50 Hz 的交流电压经变压器降压供电,负载电阻 R_L 为 40 Ω ,输出直流电压为 20 V。求开关闭合时,变压器二次电压、滤波电容的耐压值和容量。

解: (1) 变压器二次电压按式(1-14)可得

$$U_2 = \frac{U_L}{1.2} \approx 17 \text{ V}$$

(2) 当负载空载时,电容承受最大电压,所以电容的耐压值为

$$U_{RM} \geq \sqrt{2}U_2 \approx 24 \text{ V}$$

电容的容量应满足 $R_L C = (3 \sim 5)T/2$,取 $R_L C = 2T$, $T = 1/f$,因此

$$C = \frac{2T}{R_L} = 1000 \mu\text{F}$$

可选用 1000 $\mu\text{F}/50 \text{ V}$ 的电解电容。

滤波电容的容量可根据负载电流的大小参考表 1-16 进行选择。

表 1-16 滤波电容的选择

输出电流 I_L	2 A	1 A	0.5~1 A	0.1~0.5 A	<100 mA	<50 mA
电容的容量 C	4700 μF	2200 μF	1000 μF	470 μF	200~500 μF	200 μF

注:此为桥式整流电容滤波, $U_L = 12 \sim 36 \text{ V}$ 时的参考值。

1.2.9 技能实训

单相整流滤波电路的安装与调试

1. 任务目标

- (1) 会根据图 1-45 所示电路原理图绘制电路安装布线图;
- (2) 会在通用印制电路板上搭接单相桥式整流滤波电路;
- (3) 能说明电路中各元器件的作用,并能检测元器件;
- (4) 能用万用表对电路进行电压和电流的测量;

(5)能用示波器观察单相桥式整流电路的输入、输出电压波形。测定其输入、输出电压间的量值关系；

(6)能用示波器观察电容滤波电路的工作效果，测定其输出电压的量值关系；

(7)提高电子产品装接、检测能力。

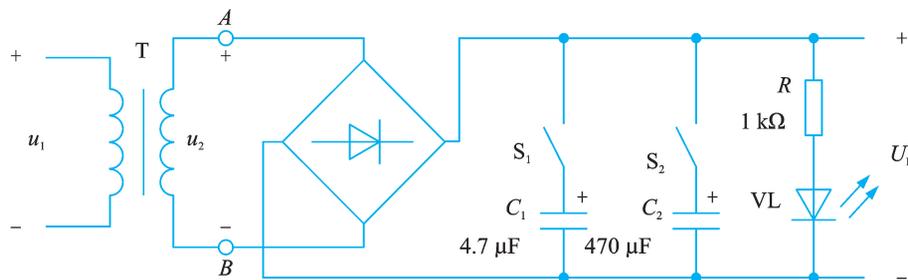


图 1-45 桥式整流、电容滤波电路原理图

2. 实施步骤

(1) 装调流程

绘制安装布线图→清点元器件→元器件检测→插装和焊接→通电前检查→通电测量→数据记录。

(2) 装调步骤

①先安装单相桥式整流电路，整流元件采用整流桥堆；

②在桥式整流电路工作正常的情况下，接入滤波电容。

注意：

电源变压器一次绕组的两个接线端与电源插头的连接处应用套管套住，再用绝缘胶布包住，以防止短路或触电。

3. 调试与记录

检查元器件安装正确无误后，才可以接通电源。测量时，先连线后接电源(或断开电源开关)，拆线、改线或检修时一定要先关电源；另外电源线不能接错，否则将可能损坏元器件。

(1) 整流电路测量(断开开关 S_1 、 S_2)

用数字万用表交流电压挡测量图 1-45 所示电路中的 A、B 端电压 u_2 ，再用直流电压挡测量直流输出电压 u_L ，将结果记录在表 1-17 中。

用示波器观察 u_2 和 u_L 的波形，并描绘在表 1-17 中。

表 1-17 桥式整流、电容滤波电路测试记录表

测试项目	变压器二次电压 u_2		输出电压 u_L	
	有效值/V	波形	平均值/V	波形
S_1 、 S_2 断开				
S_1 闭合， S_2 断开				
S_1 断开， S_2 闭合				

②整流、滤波电路测量

将开关 S_1 闭合, S_2 断开, 接滤波电容 C_1 , 用数字万用表测量输出电压, 并用示波器观察其波形, 并描绘在表 1-17 中。

将开关 S_1 断开, S_2 闭合, 接滤波电容 C_2 , 用数字万用表测量输出电压, 并用示波器观察其波形, 并描绘在表 1-17 中。

1.3 任务实现

1.3.1 认识电路组成

图 1-46 为智能小夜灯电路原理图。 R_1 、 C_1 构成阻容降压电路, R_2 为限流电阻, VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 构成桥式整流电路, VZ 为 24 V 稳压二极管, R_3 、 R_4 、 R_5 、 Q_1 构成电子开关控制电路, C_2 为滤波电容, LED_1 、 LED_2 、 LED_3 、 LED_4 为发光二极管。图 1-47 为智能小夜灯实物图。

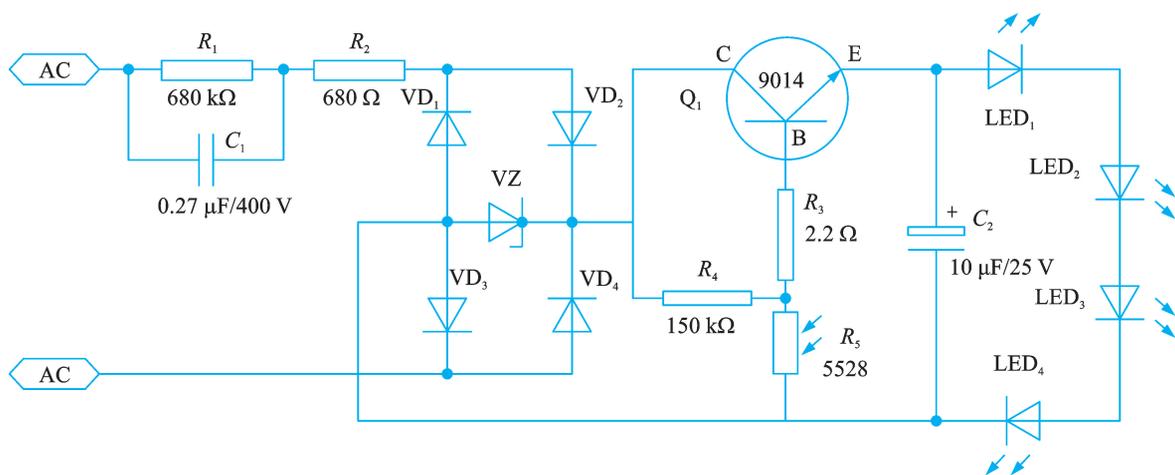


图 1-46 智能小夜灯电路原理图

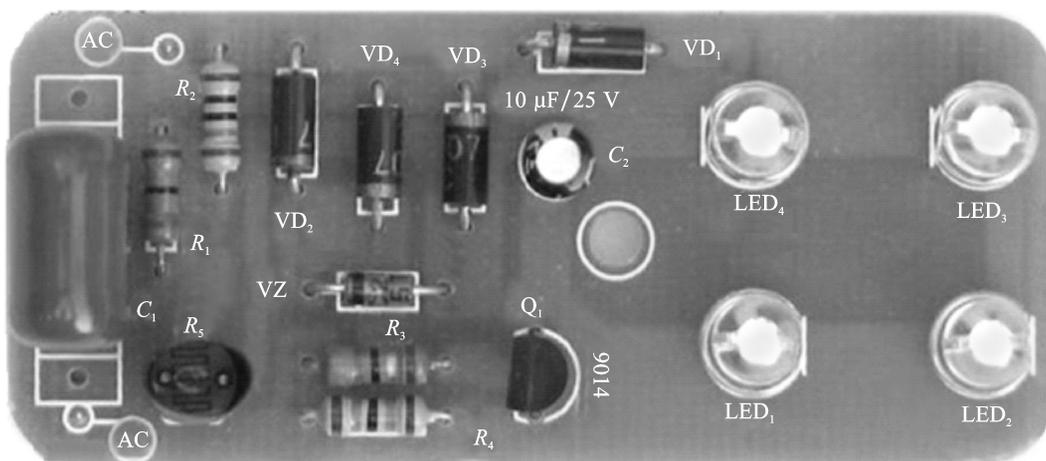


图 1-47 智能小夜灯实物图

1.3.2 认识电路工作过程

220 V 交流电通过 R_1 、 C_1 降压成 20 多伏的交流电；经限流电阻 R_2 后送到由 $VD_1 \sim VD_4$ 构成的桥式整流电路，整流后经 VZ 稳压，输出最大值为 24 V 的脉动直流电。

白天光线较强时，光敏电阻 R_5 呈低阻状态，24 V 直流电压经 R_4 、 R_5 分压后， R_5 两端电压趋于 0 V，此时三极管基极 B 电压约为 0 V， Q_1 截止， $LED_1 \sim LED_4$ 不发光。（三极管截止原理项目 2 分析）。

晚上光线变暗，光敏电阻 R_5 呈高阻状态，24 V 直流电压经 R_4 、 R_5 分压后再经 R_3 加到三极管基极 B， Q_1 导通，24 V 直流电经过 Q_1 降压、 C_2 滤波后向 $LED_1 \sim LED_4$ 供电， $LED_1 \sim LED_4$ 发光。（发光强度与三极管导通强度有关，三极管导通原理项目 2 分析）。

1.3.3 电路仿真

1. 绘制仿真电路

打开 NI Multisim 14.0 仿真软件，参考图 1-48 所示电路调入元器件，绘制仿真电路。因仿真软件中无光敏电阻，用 S_1 、 R_5 、 R_6 模拟代替图 1-46 所示电路中的光敏电阻， S_1 拨到左边模拟白天， S_1 拨到右边模拟晚上。

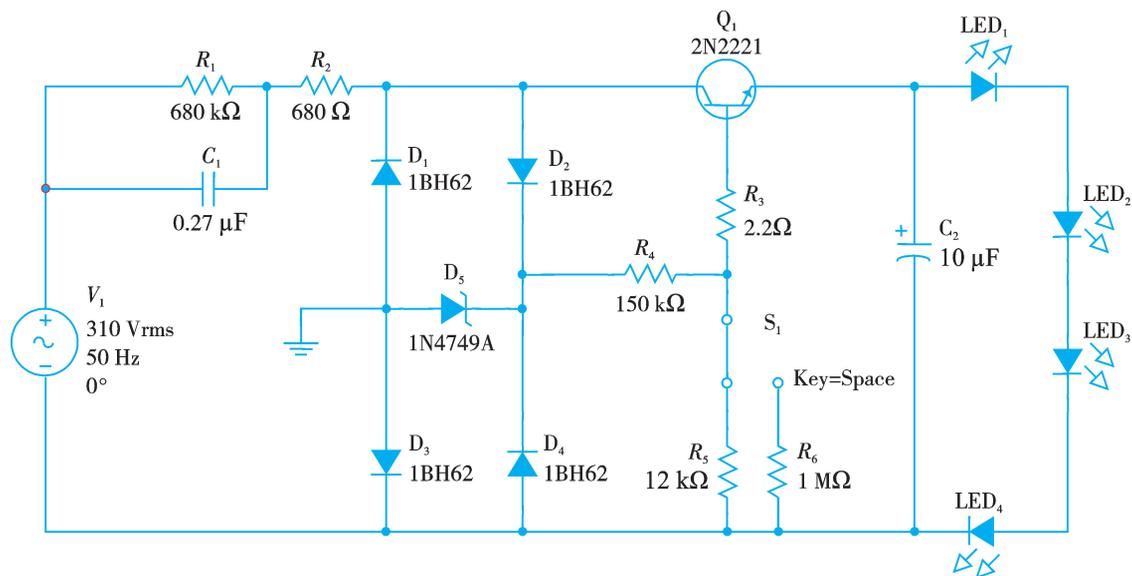


图 1-48 智能小夜灯仿真电路图

2. 调试仿真电路

运行仿真软件，拨动开关 S_1 ，看能否控制发光二极管亮与灭，如不能进行控制，对电路器件及连接进行检查，直到能正常控制亮灭为止。

3. 参数测量

借助仿真软件中电压表完成表 1-18 中各电压数据的测量，将测量结果填入表中。

表 1-18 智能小夜灯仿真关键点电压测量表

条件	整流前 交流电压	整流后 直流电压	三极管各极对地电压			各发光二极管 两端电压
			基极 B	发射极 E	集电极 C	
S ₁ 拨到左边						
S ₁ 拨到右边						

1.3.4 元器件的识别与检测

1. 元器件的选用

R₁~R₄ 选用 1/4W 金属膜电阻器或碳膜电阻器；R₅ 选用 5528 光敏电阻；C₁ 选用耐压为 400 V 以上 CBB 电容器；C₂ 选用 10 μF/25 V 电解电容器；VD₁~VD₄ 选用 1N4007 二极管，VZ 选用 1N4749A(稳压值为 24 V)稳压二极管；LED 选用 φ5 mm 发光二极管；Q₁ 选用 9014 三极管。元器件选用清单见表 1-19。

表 1-19 智能小夜灯元器件清单

序号	类型	标号	参数	数量	质量检测	备注
1	电阻器	R ₁	680 kΩ	1		
2	电阻器	R ₂	680 Ω	1		
3	电阻器	R ₃	2.2 Ω	1		
4	电阻器	R ₄	150 kΩ	1		
5	电阻器	R ₅	5528	1		亮和暗分别检测
6	电容器	C ₁	0.27 μF	1		
7	电容器	C ₂	10 μF/25 V	1		
8	整流二极管	VD ₁ ~VD ₄	1N4007	4		
9	稳压二极管	VZ	1N4749A	1		
10	发光二极管	LED	φ5 mm	1		
11	三极管	Q ₁	9014	1		加引脚图

2. 元器件的外形

元器件的外形如图 1-49 所示。

3. 元器件的检测

(1) 普通电阻器。根据电阻器色环估算电阻器的阻值，选择万用表电阻挡的合适量程，将万用表两表笔与电阻器两个引脚连接(注意：手不能同时接触电阻器两个引脚)，然后读数，看是否在允许范围内。将检测结果填入表 1-19。

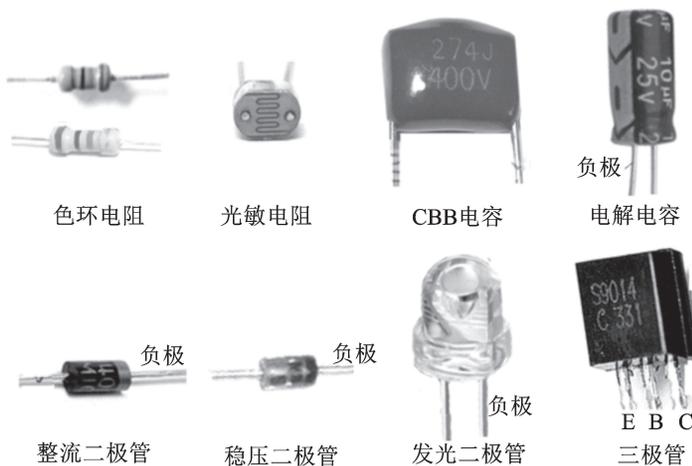


图 1-49 元器件外形图

(2) 光敏电阻器。用万用表两表笔分别接触光敏电阻两引脚，再用一黑纸片将光敏电阻的透光窗口遮住，此时万用表的读数很大或接近无穷大(5528 暗电阻一般为 $1\text{ M}\Omega$ 以上)。此值越大说明光敏电阻性能越好。若此值很小或接近为零，说明光敏电阻已烧穿损坏，不能再继续使用。

将一光源对准光敏电阻的透光窗口，此时万用表的阻值明显减小，此值越小说明光敏电阻性能越好(5528 亮电阻一般为 $10\sim 20\text{ k}\Omega$)。若此值很大甚至无穷大，表明光敏电阻内部开路损坏，也不能再继续使用。

将光敏电阻透光窗口对准入射光线，用小黑纸片在光敏电阻的遮光窗上部晃动，使其间断受光，此时万用表读数应随黑纸片的晃动而变化。如果万用表读数始终停在某一位置不随纸片晃动而变化，说明光敏电阻的光敏材料已经损坏。将检测情况填入表 1-19。

(3) 电容器。根据电容器标称参数，选择数字万用表电容挡的合适量程，将电容器插入万用表电容挡孔中，然后读数，看是否在允许范围内。将检测结果填入表 1-19。

(4) 二极管的检测。选择数字万用表二极管挡，万用表红表笔接二极管正极，黑表笔接负极，看读数是否为零点几，交换表笔，看读数是否为“1”；发光二极管看其是否微亮发光。将检测情况填入表 1-19。

(5) 三极管的检测。选择万用表二极管挡，任意假设一脚是 B 极，红表笔接 B 极，黑表笔分别接另两脚，能测得示值零点几时，则所假设的 B 极正确，且此三极管是 NPN 管；反之，黑表笔接 B 极能测得示值零点几，则是 PNP 管。将检测情况填入表 1-19。

1.3.5 电路安装

1. 识读电路板

根据电路板实物，参考电路原理图清理电路，查看电路板是否有短路或开路地方，熟悉各器件在电路板中的位置。智能小夜灯电路元器件布局如图 1-50 所示。

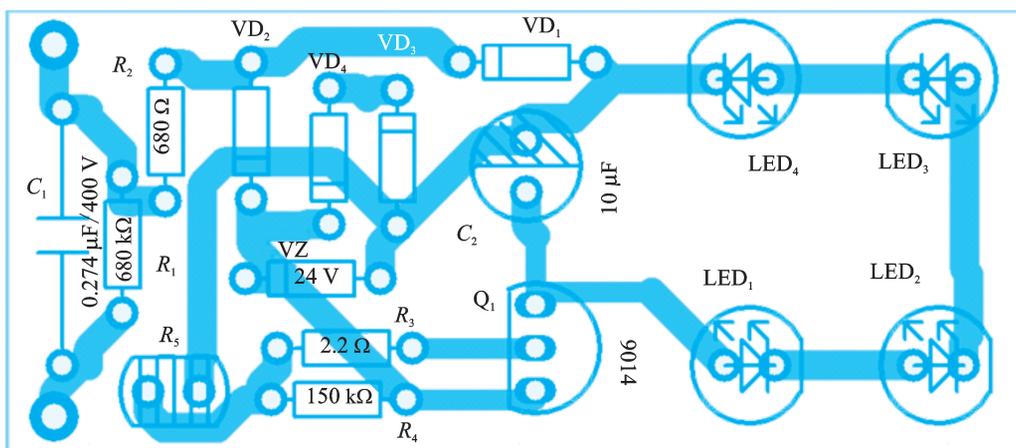


图 1-50 智能小夜灯电路元器件布局图

2. 安装原则

按先小件后大件、先较低的后较高的顺序安装，即按电阻器、整流二极管、电容器、三极管、发光二极管的顺序安装焊接。

3. 插件元器件焊接方法

- (1) 准备：将被焊件、电烙铁、焊锡丝、烙铁架等放置在便于操作的地方。
- (2) 加热被焊件：将烙铁头放置在被焊件的焊接点上，使接点升温。
- (3) 熔化焊料：将焊接点加热到一定温度后，用焊锡丝触到焊接处，熔化适量的焊料。焊锡丝应从烙铁头的对称侧加入，而不是直接加在烙铁头上。
- (4) 移开焊锡丝：当焊锡丝适量熔化后，迅速移开焊锡丝。
- (5) 移开烙铁：当焊接点上的焊料流散接近饱满，助焊剂尚未完全挥发，也就是焊接点上的温度最适当、焊锡最光亮、流动性最强的时刻，迅速拿开烙铁头。移开烙铁头的时机、方向和速度，决定着焊接点的焊接质量。正确的方法是先慢后快，烙铁头沿 45° 角方向移动，并在将要离开焊接点时快速往回一带，然后迅速离开焊接点。

4. 元器件安装

(1) 电阻器的安装：将电阻器按照电路板器件间距进行整形(注意：器件引线弯曲处要有圆弧形，其半径不得小于引线直径的两倍)；插入对应位置(注意：色标方向一致，以便目视识别)；焊接(注意：普通电阻应紧贴电路板插装焊接，光敏电阻应在离电路板 $4\sim 6\text{ mm}$ 处插装焊接)。

(2) 电容器的安装：将电容器按照电路板器件间距进行整形；插入对应位置(注意：无极性电容参数尽量朝外，以便目视识别)；焊接(注意：电解电容应紧贴电路板插装焊接，其他电容应在离电路板 $4\sim 6\text{ mm}$ 处插装焊接)。

(3) 二极管的安装：按照电路板器件间距进行整形，插入对应位置，整流二极管、稳压二极管应紧贴电路板插装焊接，发光二极管离电路板 $4\sim 6\text{ mm}$ 处插装焊接(注意极性，别搞错)。

(4) 三极管的安装：插入对应位置(注意：引脚方向，别搞错)；焊接(注意：离电路板 $4\sim 6\text{ mm}$ 处插装焊接，焊接时间不要过长)。

1.3.6 电路调试与检测

1. 电路调试

(1) 安装结束，检查焊点质量(重点检查是否有错焊、漏焊、虚假焊、短路)，检查元器件安装是否正确(重点检查二极管、三极管极性)，方可通电。

(2) 通电观察电路是否有异常现象(声响、冒烟)，如有应立即停止通电，查明原因。

(3) 通电后，在光敏电阻有光照情况下，发光二极管不发亮；用黑纸片遮盖光敏电阻，发光二极管应发亮。

2. 电路检测

通电情况下，按下列要求操作，用万用表检测关键点电压，完成表 1-20。

表 1-20 智能小夜灯关键点电压检测值

条件	整流前 交流电压	整流后 直流电压	三极管各极对地电压			各发光二极管 两端电压
			基极 B	发射极 E	集电极 C	
R_5 有光照						
R_5 无光照						

1.4 考核评价

智能小夜灯的制作评价标准见表 1-21。

表 1-21 智能小夜灯的制作评价标准

考核项目	评分点	分值	评分标准	得分
智能小夜灯的制作	电路识图	5	能正确理解电路的工作原理, 否则视情况扣 1~5 分	
	电路仿真	20	能使用仿真软件画出正确的仿真电路, 计 12 分, 有器件或连线错误, 每处扣 2 分; 能完成各项仿真测试, 计 8 分, 否则视情况扣 1~8 分	
	元器件成形、插装与排列	10	元器件成形不符合要求, 每处扣 1 分; 插装位置、极性错误, 每处扣 2 分; 元器件排列参差不齐, 标记方向混乱, 布局不合理, 扣 3~10 分	
	元件质量判定	15	正确识别元件, 每错一处扣 1 分, 扣完为止	
	焊接质量	20	有搭锡、假焊、虚焊、漏焊、焊盘脱落、桥接等现象, 每处扣 2 分; 出现毛刺、焊料过多、焊料过少、焊接点不光滑、引线过长等现象, 每处扣 2 分	
	电路调试	15	正确使用仪器仪表, 写出数据测试和分析报告, 计满分; 不能正确使用仪表测量每次扣 3 分, 数据测试错误每次扣 2 分, 分析报告不完整或错误视情况扣 1~5 分, 扣完为止	
	电路检修	15	通电工作正常, 记满分; 如有故障能进行排除, 也记满分, 不能排除, 视情况扣 3~15 分	
小计		100		
职业素养与操作规范考核	学习态度	20	不参与团队讨论, 不完成团队布置的任务, 抄袭作业或作品, 发现一次扣 2 分, 扣完为止	
	学习纪律	20	每缺课一次扣 5 分; 每迟到一次扣 2 分; 上课玩手机、玩游戏、睡觉, 发现一次扣 2 分, 扣完为止	
	团队精神	20	不服从团队的安排, 与团队成员间发生与学习无关的争吵, 发现团队成员做得不好或不到位或不会的地方不指出、不帮助, 团队或团队成员弄虚作假, 每发现一次扣 5 分, 扣完为止	
	操作规范	20	操作过程不符合安全操作规程, 仪器设备的使用不符合相关操作规程, 工具摆放不规范, 物料、器件摆放不规范, 工作台台面不清洁、不按规定要求摆放物品, 任务完成后不整理、清理工作台, 任务完成后不按要求清扫场地内卫生, 发现一项扣 2 分, 扣完为止。如出现触电、火灾、人身伤害、设备损坏等安全事故, 此项计 0 分	
	行为举止	20	着装不符合规定要求, 随地乱吐、乱涂、乱扔垃圾(食品袋、废纸、纸巾、饮料瓶)等, 语言不文明, 讲脏话, 每项扣 1~5 分, 扣完为止	
小计		100		

说明: 1. 本项目的项目考核、职业素养与操作规范考核按 10% 比例折算计入总分; 2. 根据全学期训练项目对应的理论知识在期末进行理论考核, 本项目占理论考核试卷的 20%, 期末理论考核成绩按 10% 折算计入总分。

1.5 拓展提高

并联型稳压电源的制作

并联型稳压电源电路原理图如图 1-51 所示。请根据电路原理图及所学知识，分析电路工作原理，查阅相关资料，列出所需元器件清单，自行采购相应器件，用万能板进行设计、组装、调试，项目完成后，撰写制作心得体会。

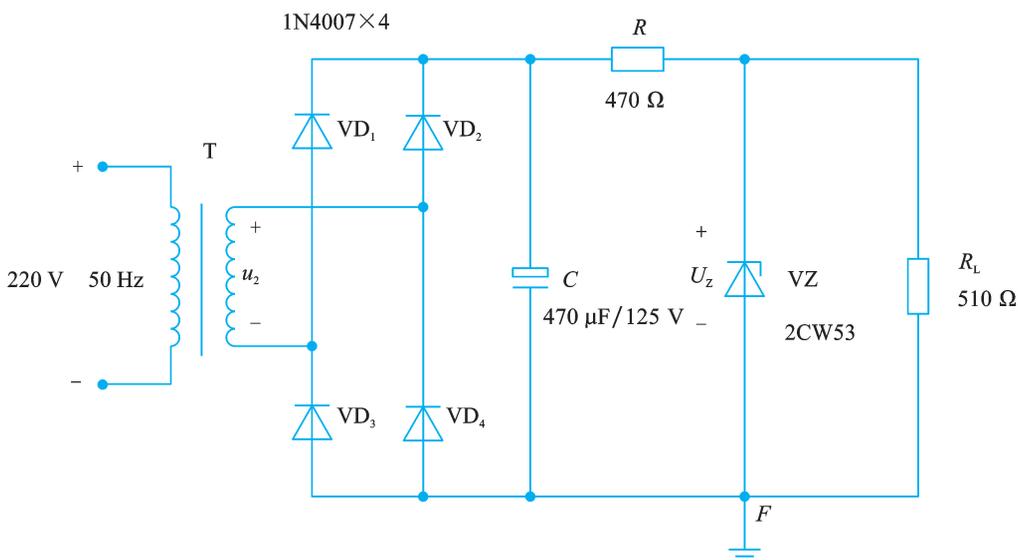


图 1-51 并联型稳压电源电路原理图

1.6 同步练习

一、填空题

1. 某四色环电阻色环为红黄棕金，则该电阻阻值为_____，误差为_____；色环为灰红红银，则该电阻阻值为_____，误差为_____。
2. 某电阻体上写有 2R4J 字样，则该电阻阻值为_____，误差为_____；写有 503M 字样，则该电阻阻值为_____，误差为_____。
3. 某电容体上写有 R47 字样，则该电容器容量为_____；1P5 的字样，则该电容器容量为_____；写有 103 字样，则该电容器容量为_____。
4. 某电感体上写有 4R7 字样，则该电感器电感量为_____；写有 1N5 字样，则该电感器电感量为_____。
5. 某电感体上写有标有 22 μH 、A、II 的字样，其中 22 μH 的含义是_____，A 的含义是_____，II 的含义是_____。

6. 二极管的单向导电特性是_____。
7. 稳压二极管正常工作时应加_____电压, 其两端电压由_____决定; 发光二极管接上_____电压时, 才能发光。
8. 稳压二极管能稳定电压是利用其_____击穿后_____剧变, 而两端_____几乎不变的特性来实现的。
9. 光电二极管是一种能将接收到的_____信号转换成_____信号输出的二极管, 又称光敏二极管, 其基本特性是在光的照射下产生_____。
10. 变容二极管与稳压二极管一样, 工作于_____偏置状态。反向电压增大电容量_____, 反向电压减小电容量_____。
11. 当在路测量二极管的正向压降为 0.3 V 时, 可以确定该管为_____二极管; 当在路测得二极管的正向压降为 0.7 V 时, 可以确定该管为_____二极管。
12. 单相半波整流和单相桥式整流相比, 脉动比较大的是_____, 整流效果好的是_____。
13. 在桥式整流电路中, 输出电压 $U_0 = 9\text{ V}$, 负载电流 I_0 为 1 A , 则二极管承受的反向电压 U_{RM} 为_____V。
14. 在整流滤波电路中, 电容器的接法是_____。
15. 电容滤波电路是利用了电容_____这一特性来平滑负载上电压脉动的, 整流电路中接入滤波电容使负载上电压_____, 纹波减小。

二、选择题

1. 如果用万用表测得二极管的正、反向电阻都很大, 则二极管()。
- A. 特性良好 B. 已被击穿 C. 内部开路 D. 功能正常
2. 二极管两端加正向电压时()。
- A. 立即导通 B. 超过击穿电压就导通
- C. 超过 0.2 V 就导通 D. 超过死区电压就导通
3. 在图 1-52 中, 二极管为硅管, 工作于正常导通状态的是()。



图 1-52

4. 由理想二极管组成的如图 1-53 所示两个电路中, 它们的输出电压分别是()。
- A. $U_{\text{R1}} = 0, U_{\text{R2}} = 0$ B. $U_{\text{R1}} = 8\text{ V}, U_{\text{R2}} = 8\text{ V}$ C. $U_{\text{R1}} = 8\text{ V}, U_{\text{R2}} = 0$ D. $U_{\text{R1}} = 0, U_{\text{R2}} = 8\text{ V}$

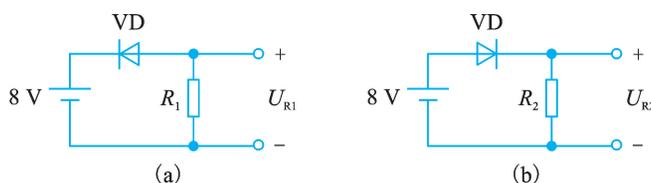


图 1-53

5. 下列二极管可用于稳压的是()。
- A. 2CW7 B. 2AK4 C. 2AP15
6. 在用指针式万用表测量二极管正向电阻时, 对于同一只二极管用不同的挡位测出的正向电阻值不同, 主要原因是()。
- A. 指针式万用表在不同挡位, 其内阻不同
B. 二极管有非线性的伏安特性 C. 被测二极管的质量差
7. 二极管的正极电位是 -10 V , 负极电位是 -5 V , 则该二极管处于()。
- A. 零偏 B. 反偏 C. 正偏
8. 下列稳压二极管、发光二极管、光电二极管和变容二极管使用说法正确的是()
- A. 都正向使用 B. 都反向使用
C. 稳压二极管、光电二极管和变容二极管反向使用, 发光二极管正向使用
D. 稳压二极管和变容二极管反向使用, 发光二极管和光电二极管正向使用
9. 下列对变容二极管和光电二极管描述正确的是()
- A. 变容二极管反向电压增大电容量减小, 反向电压减小电容量增大
B. 变容二极管反向电压增大电容量增大, 反向电压减小电容量减小
C. 光电二极管光照越强反向电流越小, 光照越弱反向电流越大
D. 光电二极管光照越强正向电流越大, 光照越弱反向电流越小
10. 桥式整流电路中, 已知 $U_2=10\text{ V}$, 若某一只二极管因虚焊造成开路, 则输出电压 U_0 为()。
- A. 12 V B. 9 V C. 4.5 V
11. 在桥式整流电路中:
- (1) 若 $U_2=20\text{ V}$, 则输出电压直流平均值 U_0 为()。
- A. 20 V B. 18 V C. 9 V
- (2) 桥式整流电路由四只二极管组成, 故流过每只二极管的电流为()。
- A. $I_0/4$ B. $I_0/2$ C. I_0
- (3) 每只二极管承受的最大反向电压 U_{RM} 为()。
- A. $\sqrt{2}U_2$ B. $\frac{\sqrt{2}}{2}U_2$ C. $2\sqrt{2}U_2$
12. 单相桥式整流电容滤波电路中, 在满足 $R_L C \geq (3 \sim 5)T/2$ 时, 负载电阻上的平均电压估算为()。
- A. $1.1U_2$ B. $0.9U_2$ C. $1.2U_2$ D. $0.45U_2$

三、分析题

1. 在图 1-54 所示电路中, 分别判断指示灯是亮还是不亮。

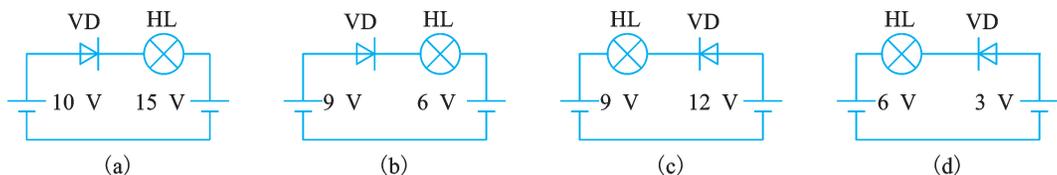


图 1-54

2. 二极管电路如图 1-55 所示, 判断图中二极管的状态是导通还是截止, 并确定输出电压 U_o (设二极管的导通电压可忽略不计)。

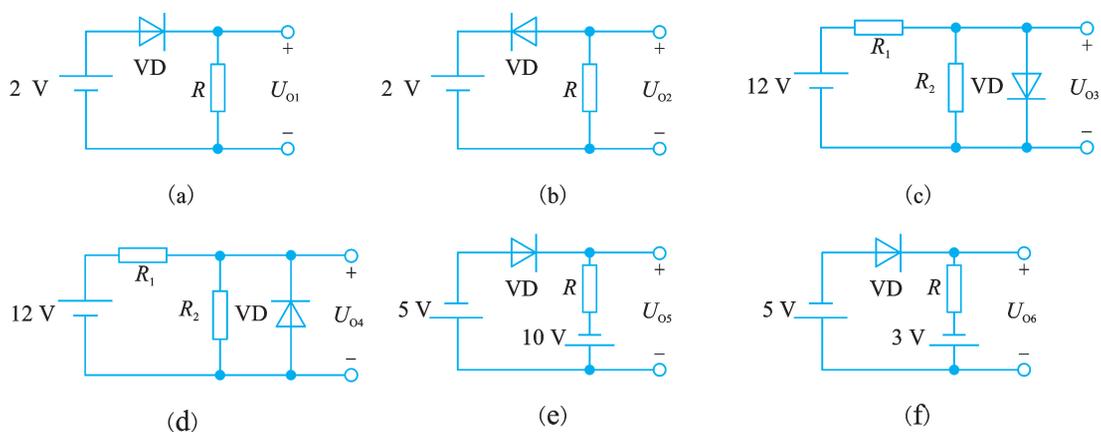


图 1-55

3. 用指针式万用表测量二极管的极性, 如图 1-56 所示。

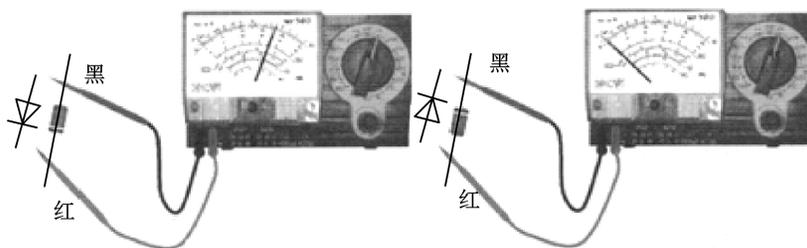


图 1-56

(1) 为什么在阻值小的情况下, 黑表笔接的一端必定为二极管正极, 红表笔接的一端必定为二极管的负极?

(2) 若将红、黑表笔对调后, 万用表的指示将如何?

(3) 若正、反向电阻均为无穷大, 二极管性能如何?

(4) 若正、反向电阻均为零, 二极管性能如何?

(5) 若正向和反向电阻值接近, 二极管性能又如何?

4. 试分析图 1-57 所示电路是如何进行电源极性判断的?

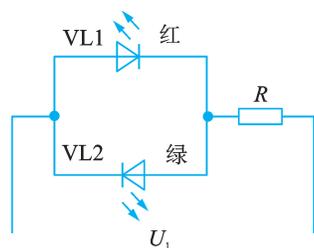


图 1-57

5. 电路如图 1-58 所示, 稳压管的稳定电压为 6 V, 最小稳定电流为 5 mA, 最大稳定电流为 25 mA。

- (1) 分别计算输入为 10 V、15 V、25 V 三种情况下输出电压值。
- (2) 若输入电压为 35 V 时负载开路, 则会出现什么现象? 为什么?

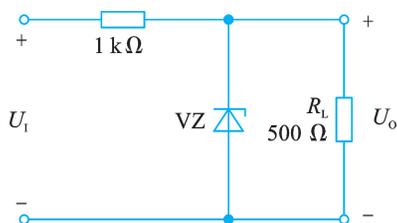


图 1-58

6. 在如图 1-59 所示的变压器中心抽头式全波整流电路中, 已知 $V_L = 54 \text{ V}$, $I_L = 2 \text{ A}$ 。求:

- (1) 电源变压器次级绕组电压 u_{2a} 、 u_{2b} ;
- (2) 整流二极管承受的最大反向电压 V_{RM} ;
- (3) 流过二极管的平均电流 I_V 。

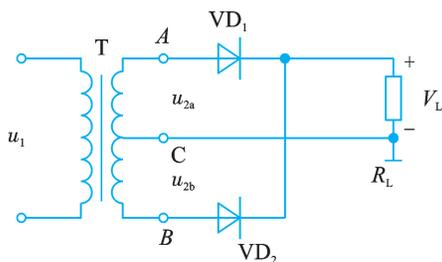


图 1-59

7. 画出图 1-60 所示电路中四只二极管和一只滤波电容(标出极性)。

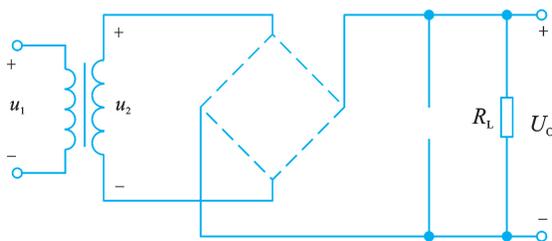


图 1-60

8. 在图 1-61 所示整流电路中, 若 $U_2 = 20 \text{ V}$, 要求:

- (1) 判别该电路是否为桥式整流电路, 说明理由。
- (2) 估算 U_o 。
- (3) 若 VD_2 脱焊断开, U_o 变为多少?

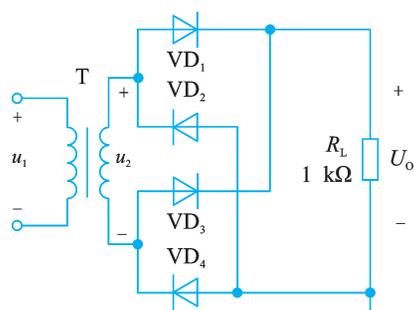


图 1-61

9. 全波整流电容滤波电路如图 1-62 所示。

(1) 在 u_{2a} 的正、负半周二极管导通情况如何？在 u_{2b} 的正、负半周二极管导通情况如何？

(2) 若 $u_{2a} = u_{2b} = 20\text{ V}$, $R_L = 100\ \Omega$, 则 U_o 和 I_o 各为多少？

(3) 当 $u_{2a} = u_{2b} = 20\text{ V}$ 时, 用万用表测得负载电压 U_o 分别为 9 V 、 18 V 、 20 V 和 24 V , 试分析电路是否正常, 如有故障, 故障可能是在什么地方？

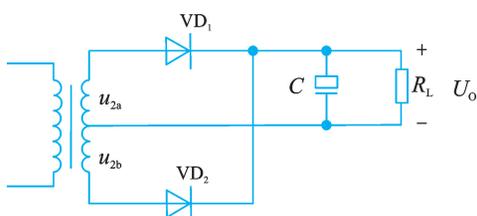


图 1-62

10. 桥式整流电容滤波电路如图 1-63 所示。

(1) 在 u_2 的正、负半周各有哪几只二极管导通？

(2) 若 $U_2 = 20\text{ V}$, $R_L = 100\ \Omega$, 则 U_o 和 I_o 各为多少？

(3) 当 $U_2 = 20\text{ V}$ 时, 用万用表测得负载电压 U_o 分别为 9 V 、 18 V 、 20 V 和 24 V , 试分析电路是否正常, 如有故障, 故障可能是在什么地方？

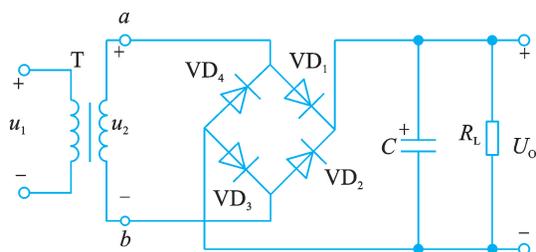


图 1-63

11. 桥式整流电容滤波电路中, 输出波形 u_L 出现图 1-64 所示的几种情况, 试分析故障原因。

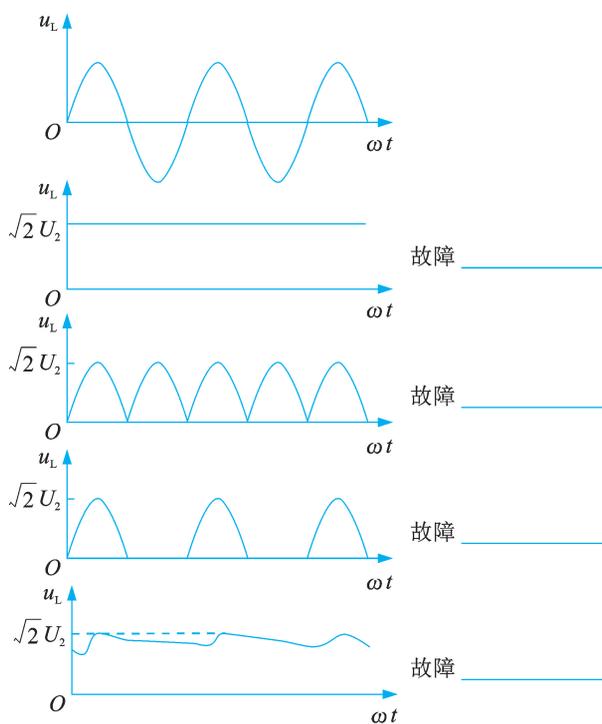


图 1-64

12. 有一稳压电源如图 1-65 所示, 发现有一组变压器内部开路。现只有二极管 1N4001 若干, 如何更改电路, 使原电路性能保持不变? 画出电路图。

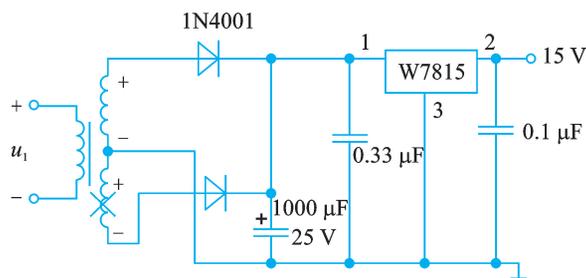


图 1-65

13. 已知某整流电路如图 1-66(a) 所示, 现发现电路中 A 点的波形如图 1-66(b) 所示, 其纹波频率为 50 Hz。

- (1) 试分析电路故障的具体原因。
- (2) 试用一种经济实用的方案排除故障。

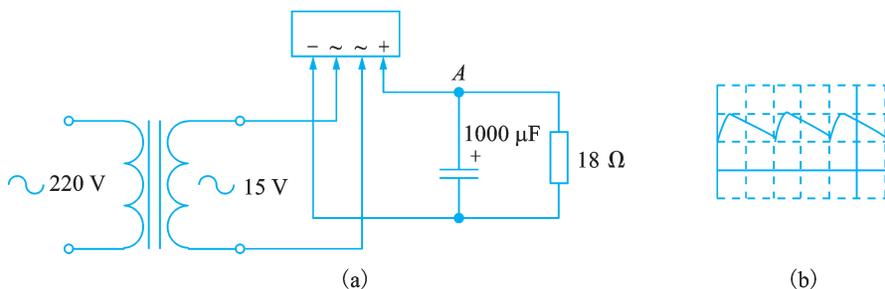


图 1-66