



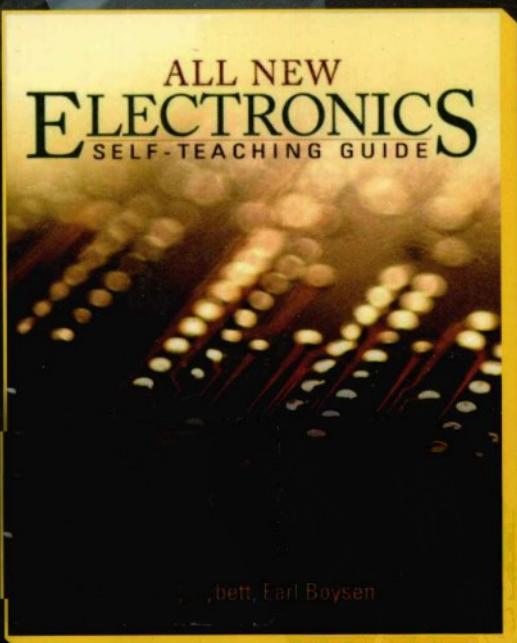
图灵电子与电气工程丛书



电子技术自学指南 (第3版)

All New Electronics Self-Teaching Guide
Third Edition

[美] Harry Kybett 著
Earl Boysen 等译
张鼎 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

电子技术自学指南 (第3版)

近30年来，本书的前两版一直都是电子技术爱好者心目中的经典教材。第3版不仅增加了一些新技术的内容，而且在可读性方面也有较大提高。你只需具备欧姆定律和电流等电子学基础知识和中学的代数水平，就能通过自学本书掌握电子电路的核心知识。此外，本书独特的“问答式”叙述方式、与知识点紧密结合的实验以及每章末的自测题能让你轻松把握学习节奏。

通过学习本书，你将能够

- 轻松掌握电子电路的相关数值计算，更深刻地理解电子电路原理。
- 掌握设计直流电路和交流电路所需的概念和公式。
- 了解现代电子的核心元器件——晶体管的工作原理。
- 计算将晶体管用作开关或放大器的电路中的电流值、电压值和电阻值。
- 找到通过过滤电子信号来降低噪声或增强信号的方法。
- 探索适用于振荡器和电源电压的概念和公式，其中包括设计振荡器和电源电压的分部流程。
- 理解电流、电压，以及用来确定电路中所需组件的原理和公式。

Earl Boysen 资深电子工程师，维护着两个技术类网站www.buildinggadgets.com和www.understandingnano.com。他还与人合著过*Electronics For Dummies*、*Electronics Projects For Dummies*和*Nanotechnology For Dummies*，这三本书均由Wiley出版社出版。

Harry Kybett（已故）本书第1版和第2版的作者，曾担任哥伦比亚电影公司工程运作部总监，为广播行业建造了很多工作室和视频系统，并为索尼美国公司制作了培训程序。



www.wiley.com

图灵网站：<http://www.turingbook.com> 热线：(010) 51095186
反馈/投稿/推荐信箱：contact@turingbook.com
有奖勘误：debug@turingbook.com

分类建议 电子技术/电路基础

人民邮电出版社网址 www.ptpress.com.cn



ISBN 978-7-115-24062-0



ISBN 978-7-115-24062-0

定价：49.00元

TURING

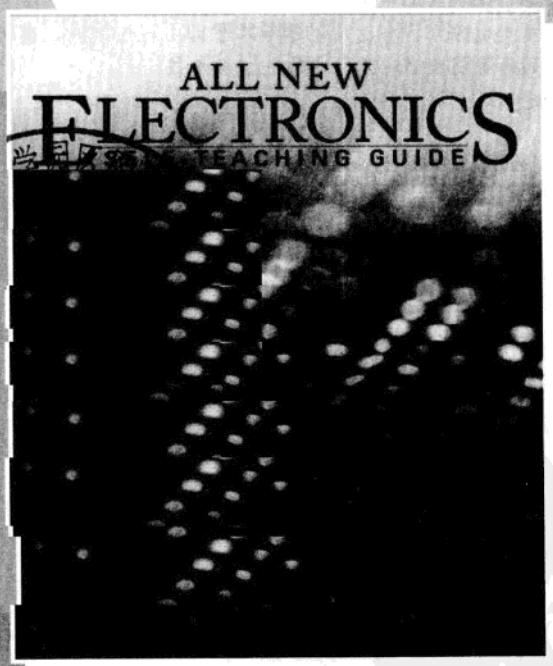
图灵电子与电气工程丛书

电子技术自学指南

(第3版)

All New Electronics Self-Teaching Guide
Third Edition

[美] Harry Kybett 著
Earl Boysen 等译
张 鼎 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电子技术自学指南 : 第3版 / (美) 基佩特
(Kybett, H.) , (美) 博伊森 (Boysen, E.) 著 ; 张鼎等
译. — 北京 : 人民邮电出版社, 2010.12
(图灵电子与电气工程丛书)
书名原文: All New Electronics Self-Teaching
Guide, Third Edition
ISBN 978-7-115-24062-0

I. ①电… II. ①基… ②博… ③张… III. ①电子技术—指南 IV. ①TN-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第202623号

内 容 提 要

本书是一本介绍电子技术关键知识的自学指南。书中采用“问答式”讲述技术要点，内容实用，组织结构新颖，可读性强，能引导读者循序渐进地掌握电子技术领域的基础知识、基本电路和基本设计方法。主要内容包括：直流电路、二极管和晶体管、交流电路和交流信号处理、谐振电路、放大器、振荡器、变压器以及电源电路等。

本书是理想的电子技术入门书籍。全书不含艰涩难懂的半导体物理和复杂的数学推导，读者只需要具备基本电路知识和中学的数学水平即可轻松读懂。本书既可作为高中生和电子爱好者的自学教材，也可作为高等院校信息类专业师生的参考书。

图灵电子与电气工程丛书 电子技术自学指南 (第3版)

-
- ◆ 著 [美] Harry Kybett, Earl Boysen
 - 译 张 鼎 等
 - 责任编辑 朱 巍
 - 执行编辑 罗词亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 18.25
 - 字数: 443千字 2010年12月第1版
 - 印数: 1~3 000册 2010年12月北京第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2009-6936号
 - ISBN 978-7-115-24062-0
-

定价: 49.00元

读者服务热线: (010)51095186 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

版 权 声 明

Original edition, entitled *All New Electronics Self-Teaching Guide, Third Edition*, by Harry Kybett and Earl Boysen, ISBN 978-0-470-28961-7, published by Wiley Publishing, Inc.

Copyright © 2008 by Wiley Publishing, Inc., All rights reserved. This translation published under License.

Simplified Chinese translation edition published by POSTS & TELECOM PRESS Copyright © 2010.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权人民邮电出版社独家出版。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。



译者序

当今世界正处于信息时代，作为信息领域核心技术之一的电子技术，已经渗透到我们生活和工作的各个方面。家用电器、通信器材、交通工具、仪器仪表及工业设备中都包含有各种电子电路。特别是大规模集成电路的普及，全面更新了电子技术理论：新兴的微电子学发展迅猛，而与电子管甚至晶体管相关的模拟电子技术则基本已遭淘汰。

为了适应电子技术的发展，近年来，国内的电子技术类教材正遵循“精简模拟电子技术、侧重集成电路技术”的思路不断革新。例如新兴的集成模拟电子技术教材，在继承传统模拟技术关键理论的同时，突出以集成模拟器件为核心介绍实用电路，剖析电路原理、讲解电路设计方法，代表了模拟电子技术类教材的改革方向。本书与这类教材的定位相当。

作为一本电子技术入门书，本书在内容选材及组织上都突出了易读性、实用性和新颖性的特点。比如：在素材选择方面，讲解晶体管时不涉及详细的工作机理，而强调晶体管的开关特性，这为今后学习数字电子技术打下了良好基础；讲解放大器电路时，在介绍了最简单的单晶体管放大电路后，不纠缠于复杂的多级多管晶体管放大电路，转而讨论实用的集成运算放大器电路。在内容组织方面，本书采用了独具特色的“问答式”叙述方式，先借用问题引导读者探索新知识点，而后在解答过程中阐述基本原理、计算公式及设计方法等。这使读者在学习过程中能体会到明显的层次感和成就感，非常适合于自学。希望读者阅读本书后能在学习电子技术的道路上迈出坚实的一步。

本书主要由张鼎负责翻译。Be Flying 工作室负责人肖国尊对本书的翻译和出版做了大量的协调和规范工作，特别是译者的选择、翻译思想的指导、进度和质量的把关方面，在此表示衷心感谢。同时欢迎各位光顾 Be Flying 工作室博客 http://blog.csdn.net/be_flying 及其所译图书介绍页面 <http://www.china-pub.com/main/sale/renwu/luminary.asp?id=64>。



致 谢

首先要感谢本书第一作者 Harry Kybett，他多年前就写了这本书的初版，我很荣幸能够更新这部电子技术领域中的经典著作。然后要感谢 Carol Long 介绍我参与该项目，感谢 Kevin Shafer 对本书所做的项目管理工作。感谢 Rex Miller 所做的出色的技术编辑工作，感谢 Mildred Sanchez 对本书初稿进行了拼写和语法检查。感谢 Wiley 出版社的工作人员，特别是 Liz Britten，她一丝不苟地绘制了本书的所有插图，还有 Eric Charbonneau，他控制整个项目的总体进度。最后，感谢我的妻子 Nancy Muir，她鼓励并支持我写完了本书。

Earl Boysen



引言

现代电子技术的迅猛发展是显而易见的。如今市场上应用了电子技术的各种商品要么在1960年以前根本就不存在，要么在如今的标准看来显得过于简陋。这方面的例子在现代化的家用电器中就有很多，比如尺寸很小但是功能强大的袖珍计算器、个人电脑、MP3播放器、DVD机以及数码相机。随着现代电子技术在制造工艺以及电子产品本身中的可用性和应用性的不断增强，众多新兴工业应运而生，传统工业也已改头换面。

现代电子技术的基础是晶体管及其衍生物——集成电路（IC）和微处理器。它们淘汰了很多传统电子技术理论，革新了实践，并且导致整个电子技术领域出现数条新的探索道路。本书将帮助你踏上这些道路并迈开旅程的第一步。

本书内容

电子技术的传统教学方法常常令人费解。很多学生学完后留下的印象就是，电子技术的核心神秘而且晦涩难懂，如同巫术一般。其实并非如此。事实上，尽管我们生活的很多方面已经变得难以置信地复杂，但是通过在工作中和作为业余爱好对电子技术的学习与实践，电子技术已经变得出奇地简单。本书的优点是简明扼要，只涉及实际需要的部分现代电子技术知识。

本书适合于那些已初步掌握电子技术概念，并希望掌握最常见的分立电路中元件工作机制的读者。本书各章着重讲述那些广泛用于很多常见电子设备的电路，以及在使用电子技术时所需的极少数重要原理。

本书的组织结构和讲述方法与其他的电子技术书籍完全不同，它采用“问答”的方式将你带入简单而恰当的实验中。本书以易于理解的方式引导你逐步完成每个示例的计算，而所需的数学知识不会超出第一年学代数的水平。此外，本书省略了在其他书籍中常见的关于半导体物理的内容，因为在学习电子技术的初期并不需要这些知识。

电子技术是一门十分简单的技术，任何人只要稍加努力就能理解。本书将着重介绍如何运用电子技术中为数不多的几个基本原理，它们是现代电子技术实践的基础。掌握本书讨论的这些由分立元件构成的电路以及适用的计算方法，不仅在设计和搭建电路时有用，而且还有助于使用IC。这是因为IC也使用小元件，如晶体管、二极管、电容和电阻等，它们也和分立元件一样，遵从相同的规则工作。（那些极小尺寸的IC元件还要遵从一些特殊的规则。）

本书结构

本书由一系列的问答组成。先提出问题，促使你仔细思考某个概念或者过程；而后给出答

案，以便你随时检查学习的进度和掌握情况。本书各章的具体内容如下。

- 第1章对学习直流(DC)电路所需的基本概念、元件以及计算知识进行复习和前测。
- 第2章将介绍如何在直流电路中使用二极管、二极管的主要特点以及用来确定二极管的电流、电压和功率的相关计算等知识。
- 第3章将介绍晶体管及其在电路中的应用知识，还将研究BJT(Bipolar Junction Transistor，双极型晶体管，简称三极管)以及JFET(Junction Field Effect Transistor，结型场效应管)的电流控制问题。
- 第4章将研究晶体管最简单且最广泛的应用——开关。除了要学习如何设计晶体管电路来驱动特定的负载之外，还将比较JFET和BJT的开关动作。
- 第5章将介绍与交流(AC)电路有关的基本概念和公式，将研究如何在交流电路中使用电阻和电容，并且学习相关的计算。
- 第6章研究电阻、电容和电感是如何用于高通滤波器和低通滤波器来实现传导或者阻断高于或者低于一定频率的交流信号的。
- 第7章研究如何在带通滤波器电路和带阻滤波器电路中使用电容、电感和电阻，以实现传导或者阻断以该电路谐振频率为中心的一段频带上的交流信号，并学习如何计算这些电路的谐振频率和带宽。本章还将介绍如何将谐振电路用于(实现)振荡器。
- 第8章将研究如何用晶体管放大器放大电信号。除了将研究设计三极管放大器的基本步骤之外，还将研究如何在放大器电路中使用JFET和运算放大器(下文简称运放)。
- 第9章介绍振荡器，这是一种能产生连续的交流输出信号的电路。将学习振荡器是如何工作的，并掌握设计和搭建振荡器的步骤。
- 第10章将学习变压器是如何将交流电压转换为更高或者更低的电压的。你将学习到变压器如何实现这一转换，并学会如何计算其输出电压。
- 第11章将弄清楚电源是如何利用一个由变压器、二极管、电容以及电阻所组成的电路将交流电转换为直流电的，还将学习如何计算产生指定直流输出电压的电源电路所需元件的大小。
- 第12章让你通过一套最终自测题来检查自己对本书所述内容的理解情况，这套题能评估出你已掌握的全部的电子技术知识。

此外，本书还提供了以下附录以便参考。

- 附录A给出了关键的电子术语及其定义。
- 附录B提供了一套常用符号和缩写的简易参考。
- 附录C列出了电子技术中的常用符号及其对应的值。
- 附录D列出了最常用的电阻——碳化合物电阻(碳膜电阻)的标准阻值。
- 附录E提供了一些有用的参考资源，包括网站、书籍和杂志。
- 附录F是一个常用公式的速查表，表中的章节和问题序号给出了对应公式在本书中首次出现的位置。
- 附录G列出了本书使用的原理图符号。在本附录中可以快速查阅到本书问题中使用的原理图符号。

本书约定

一旦开始学习电子技术，你就会发现不同的书的术语和所画的电路有所不同。这里给出你应该事先了解的本书的两个约定。

- 在本书的论述中，用 V 代表电源，而不同于其他书所采用的 E。
- 在本书的所有电路图中，相交线表示电气上互连。（有些书则在相交线上加圆点表示互连。）如果在相交处出现半圆，则表示它们此处不互连，如图 9-5 所示。

本书用法

本书假定你已经掌握了基本的电子技术知识，比如欧姆定律和电流。如果阅读过电子技术的教科书或者上过这方面的课，又或者从事过电子技术方面的工作，那么你应该已经拥有了一定的预备知识。如果上述经历都没有，那么最好先读一本这方面的书籍，比如 *Electronics for Dummies* (Indianapolis: Wiley, 2005)，以获得阅读本书所必需的背景知识。你还可以去作者的网站 www.BuildingGadgets.com，通过 Tutorial 链接可以找到一些有用的电子技术方面的在线课程。此外，在第 1 章和第 5 章，你可以测试自己的知识，并且复习必需的电子技术基础知识。

请注意，你应当按顺序阅读本书的各章，因为后面的内容往往和前面各章介绍的概念和技巧有关。

本书采用了自学式结构，你能够按照自己的节奏轻松地学习。所有内容被分成带编号的节依次讲述，这些节被称作问题（Problem）。每个问题都引出一些新的内容，并要求你解答所提出的问题或者尝试一个实验。为了最有效地学习，你应当先用纸遮住答案，独立解答每一个问题，然后再对答案。如果做错了，更正后再继续解答下面的问题。如果连续答错很多题，则应该回头复习前面的各节，否则就可能无法读懂后续内容。

要尽力完成所有的实验。这些实验都很简单，并能帮助你巩固所学的内容。如果没有实验设备来开展实验，那么即便只是通读实验内容，也会帮助你更好地理解所演示的概念。

当读到一章的结尾时，应利用自测题评估学习情况。如果做错了题，就应该重新复习该章正文中对应的内容。在本书的最后，还有一套最终自测题，它能评估你对本书中全部知识的掌握情况。

请按照你自己的节奏阅读本书。既可以自学，也可以配合课程来学习。如果是自学，那么可以把它当作电子技术的入门书，而不是一门完整的课程。为此，本书结尾列出了一些进一步学习的建议和一些在线资源。此外，本书的结尾还有符号和缩写表供参考和复习。

接下来，就请做好准备，开始学习电子技术吧！

目 录

第 1 章 直流电路知识复习和前测	1
1.1 电流	1
1.2 欧姆定律	3
1.3 电阻的串联	4
1.4 电阻的并联	5
1.5 功率	6
1.6 微电流	7
1.7 伏-安特性曲线	9
1.8 分压器	10
1.9 分流器	12
1.10 开关	14
1.11 直流电路中的电容	16
1.12 小结	20
1.13 直流电路知识前测	22
第 2 章 二极管	25
2.1 认识二极管	25
2.2 二极管实验	29
2.3 二极管的击穿	39
2.4 齐纳二极管	41
2.5 小结	46
2.6 自测题	47
第 3 章 晶体管概述	50
3.1 认识晶体管	50
3.2 晶体管实验	61
3.3 结型场效应管	68
3.4 小结	71
3.5 自测题	71
第 4 章 晶体管开关	74
4.1 晶体管的导通	74
4.2 晶体管的关断	79
4.3 为何将晶体管用作开关	81
4.4 三晶体管开关	87
4.5 交错基极开关	90
4.6 结型场效应管的导通与关断	94
4.7 结型场效应管实验	94
4.8 小结	97
4.9 自测题	97
第 5 章 交流电路知识前测与复习	101
5.1 信号发生器	101
5.2 交流电路中的电阻	105
5.3 交流电路中的电容	106
5.4 交流电路中的电感	108
5.5 谐振	109
5.6 小结	110
5.7 自测题	111
第 6 章 电子技术中的交流信号	113
6.1 交流电路中的电容	113
6.2 电容器和电阻串联	114
6.3 高通滤波器实验	119
6.4 RC 电路中的相移	123
6.5 电容和电阻并联	127
6.6 交流电路中的电感	130
6.7 RL 电路中的相移	135
6.8 小结	136
6.9 自测题	137
第 7 章 谐振电路	141
7.1 电容和电感串联	141
7.2 输出曲线	148
7.3 振荡器概述	159
7.4 小结	161

7.5 自测题	162	第 10 章 变压器	227
第 8 章 晶体管放大器	165	10.1 变压器基础	227
8.1 学习晶体管放大器	165	10.2 通信电路中的变压器	233
8.2 稳定的放大器	173	10.3 小结与应用	237
8.3 偏置	176	10.4 自测题	237
8.4 射极跟随器	182		
8.5 放大器分析	186	第 11 章 电源电路	239
8.6 结型场效应管放大器	189	11.1 交流电路中的二极管能产生脉动 的直流信号	239
8.7 运算放大器	196	11.2 平稳直流（平滑脉冲直流信号）	247
8.8 小结	198	11.3 小结	259
8.9 自测题	199	11.4 自测题	259
第 9 章 振荡器	202	第 12 章 结束语与最终自测	262
9.1 认识振荡器	202	12.1 总结	262
9.2 反馈	209	12.2 最终自测题	263
9.3 考毕兹振荡器	213		
9.4 哈特利振荡器	216	附录 A 术语表	272
9.5 阿姆斯特朗振荡器	218	附录 B 符号和缩写表	274
9.6 实用的振荡器设计	218	附录 C 10 的幂次方和工程前缀	275
9.6.1 简单的振荡器设计过程	219	附录 D 标准碳化合物电阻值	276
9.6.2 可选实验	221	附录 E 补充资源	277
9.7 振荡器故障分析检查表	221	附录 F 参考公式	279
9.8 小结与应用	225	附录 G 本书使用的原理图符号	281
9.9 自测题	225		



直流电路知识复习和前测

在学习电子技术之前应先掌握电子学的基本知识。本章就是对电子技术中用到的相关直流(DC) 电路知识的复习和前测。这里绝不是罗列整个直流电路理论，而只涉及那些关系到基本电子技术本质的主题。本章将复习以下内容：

- 电流
- 电势和电压
- 欧姆定律
- 电阻的串联与并联
- 功率
- 微电流
- 伏-安特性曲线
- 基尔霍夫电压和电流定律
- 分压器与分流器
- 开关
- 电容的充电与放电
- 电容的串联与并联

1.1 电流

1 电气和电子设备需要电流才能工作。

问题

什么是电流？

答案

电荷的流动被称为电流。这种电荷通常由带负电的电子组成。然而，在半导体中，也有带正电的载流子，它们被称为空穴(hole)。

2 产生电流的方法有很多种。

问题

请写出至少 3 种产生电子流(或电流)的方法。

答案

下面列出了一些最常见的产生电流的方法。

磁场法——在磁场中旋转的导线中能产生感生电子。比如水力、风力或者蒸汽驱动的发电机，以及汽车里的风扇。

化学法——利用化学品和电极之间发生的化学反应来产生电子（比如电池）。

光伏法——当光照射到半导体晶体上时产生电子（比如太阳能电池）。

还有一些不常用的产生电流的方法，如下所示。

热学法——利用热电偶的结间温差产生电子。太空飞船上的发电机就使用热学法发电，它使用放射性物质作为燃料。

电化学反应——利用氢气、氧气和电极间的电化学反应产生电荷（燃料电池）。

压电法——利用压电物质的机械形变产生电荷。比如，安装在鞋跟上的压电材料能在人走动时点亮LED。

3 本书的大部分简单示例都采用电池作为电压源。电池能为电路提供电势差，从而产生电流。电流就是电荷的流动。对电池来说，流动的电荷就是电子，它们能从电子过剩的一端流向电子匮乏的一端。任何连接到电池两端的完整电路都会出现这样的情况。正是这些电荷的差别导致电池中出现电势差，而电子则不断地在平衡这种差别。

由于电子带负电荷，所以它们实际上是从电池的负极流向正极。我们称该方向为电子流的方向。然而，大多数教科书里都采用电流的方向，它和电子流的方向正好相反。可称之为常规的电流方向或者简称为电流方向。本书的所有电路都采用常规的电流方向。

在后面将看到，很多半导体器件都有一个带箭头的符号，用来指示常规的电流方向。

问题

A. 请画出图 1-1 中的电流方向。电池符号里已经注明了极性。

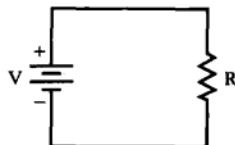


图 1-1

B. 什么表明存在电势差？

C. 电势差会导致什么情况？

D. 如果电池反接会出现什么情况？

答案

A. 参见图1-2。

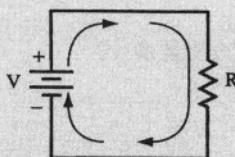


图 1-2

- B. 电池符号表明电路两端有电势差（也称为电压）。
- C. 如果接有如图1-1所示的完整电路，那么就会产生电流。
- D. 电流会沿反方向流动。

1.2 欧姆定律

4 欧姆定律阐明了电压、电流和电阻之间的基本关系。

问题

欧姆定律的代数表达式是什么？

答案

$$V = I \times R$$

这是电子学中最基本的公式，一定要牢牢记住它。请注意，有些电子学书籍中将欧姆定律表示为 $E = IR$ 。 E 和 V 都代表电压，而本书自始至终都采用 V 。此外，在该公式中，电阻与电流成反比。请注意，在给定的电压下，电阻越大，则产生的电流就越小。

5 请运用欧姆定律求解以下问题。

问题

以下每组电阻和电流对应的电压分别是多少？

- | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|
| A. $R = 20\Omega$ | $I = 0.5A$ | $V =$ _____ |
| B. $R = 560\Omega$ | $I = 0.02A$ | $V =$ _____ |
| C. $R = 1\,000\Omega$ | $I = 0.01A$ | $V =$ _____ |
| D. $R = 20\Omega$ | $I = 1.5A$ | $V =$ _____ |

答案

- A. 10V B. 11.2V C. 10V D. 30V

6 请改写欧姆定律，然后计算电流值。

问题

以下每组电压和电阻对应的电流分别是多少?

A. $V = 1V$ $R = 2\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V = 2V$ $R = 10\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V = 10V$ $R = 3\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

D. $V = 120V$ $R = 100\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

- A. 0.5A B. 0.2A C. 3.3A D. 1.2A

7 请改写欧姆定律，然后计算电阻值。

问题

以下每组电压和电流对应的电阻分别是多少?

A. $V = 1V$ $I = 1A$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V = 2V$ $I = 0.5A$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V = 10V$ $I = 3A$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

D. $V = 50V$ $I = 20A$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

- A. 1Ω B. 4Ω C. 3.3Ω D. 2.5Ω

8 从上述例子可以看出，在任何情况下，只要已知两项就能求解出第三项。

问题

请问缺少的一项是多少?

- A. 已知 12V 和 10Ω ，请求出电流。
 B. 已知 24V 和 8A，请求出电阻。
 C. 已知 5A 和 75Ω ，请求出电压。

答案

- A. 1.2A B. 3Ω C. 375V

1.3 电阻的串联

9 电阻可以串联。图 1-3 就是两个串联的电阻。

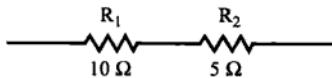


图 1-3

问题

它们的总电阻是多少？

答案

$$R_T = R_1 + R_2 = 10\Omega + 5\Omega = 15\Omega$$

总电阻通常被称为等效串联电阻 (equivalent series resistance)，记作 R_{eq}。

1.4 电阻的并联

10 电阻也可以并联，如图 1-4 所示。

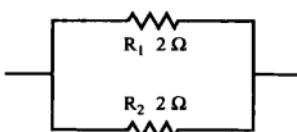


图 1-4

问题

图 1-4 的总电阻是多少？

答案

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

因此，R_T = 1Ω。

R_T通常被称为等效并联电阻 (equivalent parallel resistance)。

11 由问题 10 得出的这个简单公式可以扩展到很多个电阻并联的情况。

问题

3 个并联电阻的电阻计算公式是什么？

答案

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

通常看到的是如下形式：

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

12 在下列练习题中，两个电阻都是并联的。

问题

请问总电阻或者等效电阻是多少？

- | | | |
|-------------------------|----------------------|----------------------------------|
| A. $R_1 = 1\Omega$ | $R_2 = 1\Omega$ | $R_T = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| B. $R_1 = 1\,000\Omega$ | $R_2 = 500\Omega$ | $R_T = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| C. $R_1 = 3\,600\Omega$ | $R_2 = 1\,800\Omega$ | $R_T = \underline{\hspace{2cm}}$ |

答案

- A. 0.5Ω B. 333Ω C. $1\,200\Omega$

请注意， R_T 总是比并联电阻中阻值最小的一个还要小。

1.5 功率

13 当有电流流过电阻时，就会消耗电能（通常以热量的形式）。功率的单位是瓦特（W）。

问题

功率的计算公式是什么？

答案

计算功率的公式有3个：

$$P = VI \text{ 或 } P = I^2 R \text{ 或 } P = \frac{V^2}{R}$$

14 当已知电压和电流时，可以利用问题13中的第一个公式计算功率。

问题

已知电压和电流如下，请问电阻上的功率分别是多少？

- | | | |
|---------------|-----------|--------------------------------|
| A. $V = 10V$ | $I = 3A$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| B. $V = 100V$ | $I = 5A$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| C. $V = 120V$ | $I = 10A$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |

答案

- A. 30W B. 500W即0.5kW C. 1 200W即1.2kW

15 当已知电流和电阻时，可以利用问题 13 中的第二个公式计算功率。

问题

已知电阻和电流如下，请问电阻上的功率是多少？

- | | | |
|--------------------|----------------|--------------------------------|
| A. $R = 20\Omega$ | $I = 0.5A$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| B. $R = 560\Omega$ | $I = 0.02A$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| C. $V = 1V$ | $R = 2\Omega$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| D. $V = 2V$ | $R = 10\Omega$ | $P = \underline{\hspace{2cm}}$ |

答案

- A. 5W B. 0.224W C. 0.5W D. 0.4W

16 电子设备中所用的电阻通常都是依照电阻值和额定功率制成的标准值。附录 D 列出了标准电阻阻值表。通常，当电路需要某个阻值的电阻时，你只能选择最接近的标准值。本书中就有一些这样的例子。

选择电阻时必须考虑额定功率。决不能让电路中的电阻的实际功率超出其额定值。

问题

如果碳膜电阻的标准额定功率为 1/4W、1/2W、1W 和 2W，那么应该为问题 15 中给出的电阻选择多大的额定功率？

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| A. 5W <input type="text"/> | B. 0.224W <input type="text"/> |
| C. 0.5W <input type="text"/> | D. 0.4W <input type="text"/> |

答案

- A. 5W（或者更大） B. 1/4W（或者更大）
 C. 1/2W（或者更大） D. 1/2W（或者更大）

大多数电路都使用低额定功率的碳膜电阻。如果需要更高的额定功率（比如问题 A 中需要 5W），可以使用其他类型的电阻。

1.6 微电流

17 尽管重型工业设备中使用的电流远大于 1A，但是大多数电路需要的电流都不足 1A。

问题

A. 1mA代表多少安培？ B. 1μA代表多少安培？

答案

A. 1mA等于千分之一安培（即 $1/1\ 000\text{A}$ 亦即 0.001A ）。

B. 1μA等于百万分之一安培（即 $1/1\ 000\ 000\text{A}$ 亦即 $0.000\ 001\text{A}$ ）。

18 在电子学中，电阻值往往会很大。比如，数千欧姆甚至数兆欧姆。

问题

A. $\text{k}\Omega$ 代表多大的电阻？ B. $\text{M}\Omega$ 代表多大的电阻？

答案

A. $\text{k}\Omega$ 中，k代表千，Ω代表欧姆。因此， $1\ \text{k}\Omega = 1\ 000\Omega$ ， $2\ \text{k}\Omega = 2\ 000\Omega$ ， $5.6\ \text{k}\Omega = 5\ 600\Omega$ 。

B. $\text{M}\Omega$ 中，M代表兆，Ω代表欧姆。因此， $1\ \text{M}\Omega = 1\ 000\ 000\Omega$ ， $2.2\ \text{M}\Omega = 2\ 200\ 000\Omega$ 。

19 下列练习在晶体管电路中经常用到。本例中，电阻两端的电压为6V，要求流过电阻的电流为5mA。

问题

该用的多大的电阻，对应的功耗又是多少？

$$R = \underline{\hspace{2cm}} \quad P = \underline{\hspace{2cm}}$$

答案

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6\text{V}}{5\ \text{mA}} = \frac{6}{0.005} = 1\ 200\Omega = 1.2\text{k}\Omega$$

$$P = V \times I = 6 \times 0.005 = 0.030\text{W} = 30\text{mW}$$

20 现在，请试着完成下面的两个简单示例。

问题

缺少的量是多大？

A. 已知电压为50V、电流为10mA，请求出电阻。

B. 已知电压为1V、电阻为1MΩ，请求出电流。

答案

A. $5\text{k}\Omega$ B. $1\mu\text{A}$

1.7 伏-安特性曲线

21 将电阻上的压降和流过电阻的电流绘成图，就得到了伏-安特性曲线（V-I 曲线）。

请设想一个简单的电路：电池两端接 $1\text{k}\Omega$ 的电阻。

问题

- 如果使用 10V 电池，请求出对应的电流值。
- 如果使用 1V 电池，请求出对应的电流值。
- 如果使用 20V 电池，请求出对应的电流值。

答案

- A. 10mA B. 1mA C. 20mA

22 请在图 1-5 上描出问题 21 中各组电压和电流对应的点，然后将它们连起来。

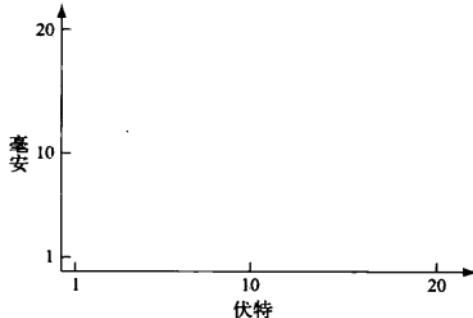


图 1-5

答案

你应该能画出如图1-6所示的一条直线。

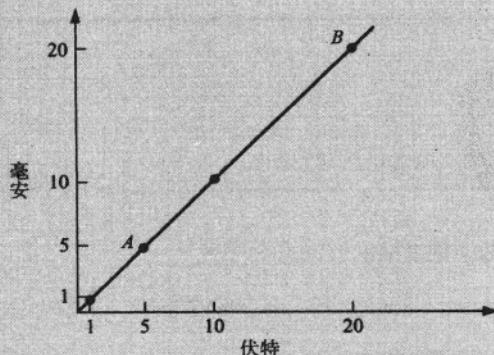


图 1-6

有时需要计算图中直线的斜率。为此，可选择两个点，并分别记作A和B。

对于A点， $V = 5\text{V}$, $I = 5\text{mA}$

对于B点， $V = 20\text{V}$, $I = 20\text{mA}$

斜率可由下式计算得到：

$$\text{斜率} = \frac{V_B - V_A}{I_B - I_A} = \frac{20\text{V} - 5\text{V}}{20\text{ mA} - 5\text{ mA}} = \frac{15\text{V}}{15\text{ mA}} = \frac{15\text{V}}{0.015\text{A}} = 1\text{k}\Omega$$

换句话说，该直线的斜率就等于电阻。

稍后，还将学到其他元件的V-I曲线。它们的用途广泛，并且往往不是直线。

1.8 分压器

23 图 1-7 所示的电路称作分压器 (voltage divider)。它是整个电子学领域很多重要的理论和实用知识的基础。

该电路的作用是产生一个可控的输出电压 (V_o)，电压大小由两个电阻和输入电压决定。请注意 V_o 就是 R_2 上的压降 (voltage drop)。

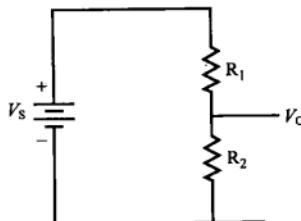


图 1-7

问题

V_o 的计算公式是什么？

答案

$$V_o = V_s \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

请注意 $R_1 + R_2 = R_T$ ，这是该电路的总电阻。

24 下面用一个简单的示例来演示该公式的用法。

问题

对于图 1-8 所示电路， V_o 等于多少？

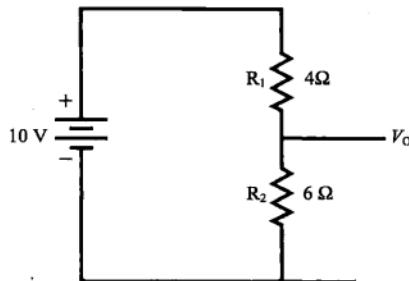


图 1-8

答案

$$\begin{aligned}V_o &= V_s \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\&= 10 \times \frac{6}{4+6} \\&= 10 \times \frac{6}{10} \\&= 6V\end{aligned}$$

25 现在，请尝试解答以下问题。

问题

下面每组电压和电阻对应的输出电压是多少？

- | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
| A. $V_s = 1V$ | $R_1 = 1\Omega$ | $R_2 = 1\Omega$ | $V_o = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| B. $V_s = 6V$ | $R_1 = 4\Omega$ | $R_2 = 2\Omega$ | $V_o = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| C. $V_s = 10V$ | $R_1 = 3.3k\Omega$ | $R_2 = 5.6k\Omega$ | $V_o = \underline{\hspace{2cm}}$ |
| D. $V_s = 28V$ | $R_1 = 22k\Omega$ | $R_2 = 6.2k\Omega$ | $V_o = \underline{\hspace{2cm}}$ |

答案

- A. 0.5V B. 2V C. 6.3V D. 6.16V

26 分压器的输出电压总是低于输入电压。它通常用于为电路中的不同元件提供特定的电压。请使用分压器计算公式解答下列问题。

问题

- A. 问题 25 D 中， $22k\Omega$ 的电阻上的压降是多少？
 B. 如果将上述压降加上 $6.2k\Omega$ 的电阻上的压降，那么得到的总电压又是多少？

答案

- A. 21.84V B. 28V

请注意，这两个电阻上的压降之和就等于电源电压。这是基尔霍夫电压定律（KVL）的一个示例，它表明施加在电路上的电压必等于电路上的压降和。在本书中，经常会不注明引用就使用KVL。

此外还要注意，电阻上的压降与电阻值成正比。因此，串连电路中阻值较大的电阻上的压降也更大。

1.9 分流器

- 27** 在图 1-9 所示电路中，两个并联电阻将电流分成了两部分。

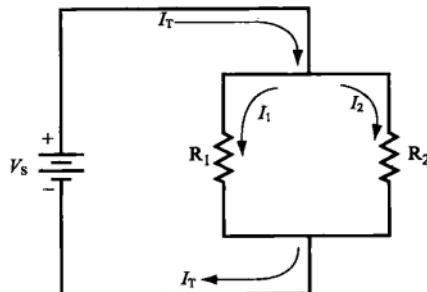


图 1-9

I_T 被分成了 I_1 和 I_2 ，而这两部分之和等于 I_T 。

问题

根据上述电路，下列关系式中哪些是正确的？

- A. $V_s = R_1 I_1$ B. $V_s = R_2 I_2$
 C. $R_1 I_1 = R_2 I_2$ D. $I_1 / I_2 = R_2 / R_1$

答案

都正确。

- 28** 当求解分流问题时，请遵照下列步骤。

(1) 列出电阻和电流比。

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1$$

(2) 改写成由 I_1 表示 I_2 的形式：

$$I_2 = I_1 \times \frac{R_1}{R_2}$$

(3) 根据 $I_T = I_1 + I_2$, 将 I_T 写成仅用 I_1 表示的形式。

(4) 求出 I_1 。

(5) 求出 I_2 。

问题

图 1-10 中给出了两个并联电阻的阻值以及流过该电路的总电流。请求出流过每个分流电阻上的电流。

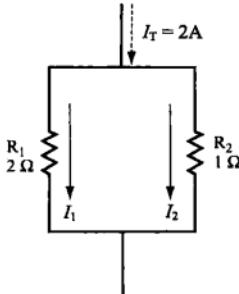


图 1-10

答案

求解步骤如下：

$$(1) I_1/I_2 = R_2/R_1 = 1/2$$

$$(2) I_2 = 2I_1$$

$$(3) I_T = I_1 + I_2 = I_1 + 2I_1 = 3I_1$$

$$(4) I_1 = I_T/3 = 2/3 \text{ A}$$

$$(5) I_2 = 2I_1 = 4/3 \text{ A}$$

29 下面, 请试着解答以下问题。每道小题都给出了总电流和两个电阻的阻值, 请求出 I_1 和 I_2 。

问题

A. $I_T = 30\text{mA}$, $R_1 = 12\text{k}\Omega$, $R_2 = 6\text{k}\Omega$

B. $I_T = 133\text{mA}$, $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 3\text{k}\Omega$

C. I_1 加上 I_2 得到的是什么电流?

答案

A. $I_1 = 10\text{mA}$, $I_2 = 20\text{mA}$

B. $I_1 = 100\text{mA}$, $I_2 = 33\text{mA}$

C. 它们的和等于流过该电路的总电流。

请注意问题C其实就是基尔霍夫电流定律 (KCL) 的一个示例。该定律可以简单地表述为：流入电路某个节点的总电流等于流出该节点的电流之和。在后面几章中还将大量使用该定律。KVL和KCL共同构成了电路分析中很多常用技术和分析方法的基础。

此外，请注意流过电阻的电流与电阻的阻值成反比。因此，如果并联电路中一个电阻比另一个的阻值大，那么流过大电阻的电流就更小。这可以通过检查本问题的答案来验证。

30 还可以用下列方程计算流过二分支并联电路中某个电阻的电流。

$$I_1 = \frac{I_T R_2}{R_1 + R_2}$$

问题

请写出 I_2 的计算公式。

请使用这些公式检查前一个问题的答案。

答案

$$I_2 = \frac{I_T R_1}{R_1 + R_2}$$

请注意，流过二分支电路其中一个分支的电流等于总电流乘以另一支路的电阻值再除以两个分支电阻值之和。这个公式很好记！

1.10 开关

31 机械开关是一种连通或者切断电路的器件。最常用的开关就是电源开关，可用于打开或关闭某个设备。开关还可以允许或者阻止某个信号从一处传递至另一处，或者将某个信号传递至多个目的地中的某一个。

本书将介绍两种开关。一种是简单的开关型开关，也称为单刀单掷 (single pole single throw) 开关。另一种是单刀双掷 (single pole double throw) 开关。图 1-11 给出了这两种开关的符号。



图 1-11

关于开关有两个要点必须掌握。

- 闭合（即 ON）的开关上流过了电路中的全部电流。开关两端没有压降。
- 断开（即 OFF）的开关上没有电流流过。开关两端承受了整个电路的电压。

图 1-12 所示的电路里有一个闭合的开关。

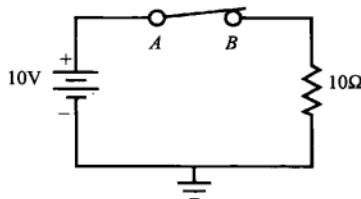


图 1-12

问题

- A. 流过开关的电流是多少？
- B. A点和B点的对地电压是多少？
- C. 开关上的压降是多少？

答案

- A. $\frac{10V}{10\Omega} = 1A$
- B. $V_A = V_B = 10V$
- C. 0V（由于开关两端的电压相等，所以开关上的压降为零）

32 图 1-13 所示电路中包含一个断开的开关。

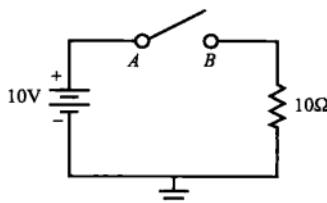


图 1-13

问题

- A. A点和B点的电压是多少？
- B. 流过开关的电流是多少？
- C. 开关上的压降是多少？

答案

- A. $V_A = 10V$; $V_B = 0V$
- B. 由于开关是断开的，因此没有电流流过。
- C. 10V。如果开关是断开的，A点和电池正极的电压相等，而B点则和电池的负极电压相等。

33 图 1-14 所示电路中包含一个单刀双掷开关。开关的位置决定了灯泡 A 和灯泡 B 哪个被点亮。

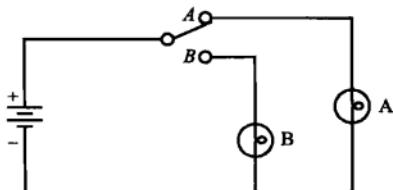


图 1-14

问题

- A. 在图中所示位置时，哪个灯泡被点亮？
- B. 两个灯泡能同时被点亮吗？

答案

- A. 灯泡A。
- B. 不能，其中必定有一个是熄灭的。

1.11 直流电路中的电容

34 电子技术中电容应用很广。交流（AC）电路和直流（DC）电路中都会用到。电容在直流电子技术中的主要用途是先被充电，然后保持电荷，最后在适当的时候释放电荷。

图 1-15 中所示电容在开关闭合时将被充电。

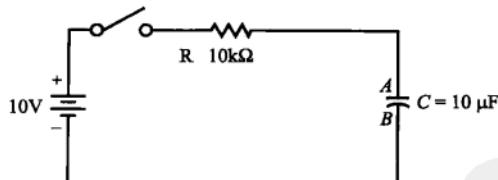


图 1-15

问题

该电容将被充电到多高的电压？

答案

它将被充到10V。电容将被充到当它所在位置开路时的端电压。

35 需要多久才能充到该电压？对于很多实际应用来说，这是个极为关键的问题。为了找出答案，必须了解电路的时间常数（ τ ）。

问题

- A. 电路的时间常数的计算公式是什么？
- B. 图 1-15 所示电路的时间常数是多少？
- C. 需要多久才能将电容充到 10V？
- D. 单位时间常数内，电容能被充到多高的电压？

答案

- A. $\tau = R \times C$
- B. $\tau = 10\text{k}\Omega \times 10\mu\text{F} = 10\ 000\Omega \times 0.000\ 01\text{F} = 0.1\text{s}$ 。（计算时电阻值的单位取为欧姆，而将电容值的单位取为法拉。）
- C. 大约需要 5 个时间常数，即 0.5s。
- D. 大约是最终电压的 63%，即大约 6.3V。

36 直到开关闭合后，电容才能被充电。在电容开始充电前或者放电结束后，其两极板上的电压相等。

问题

- A. 图 1-15 中，在开关闭合前，电容极板 A 和 B 上的电压是多少？
- B. 当开关闭合后，极板 A 上的电压如何变化？
- C. 极板 B 上的电压又是如何变化的？
- D. 一个时间常数后，极板 A 上的电压变为多少？

答案

- A. 如果电容已经彻底放电，那么两个极板上的电压均为 0V。
- B. 将增大，直至 10V。
- C. 保持为 0V。
- D. 大约 6.3V。

37 图 1-16 所示的电容充电图显示出电容两端电压到达所施加电压的一定百分比所需的时间常数的个数。

问题

- A. 这种曲线的名称是什么？
- B. 它有何用途？

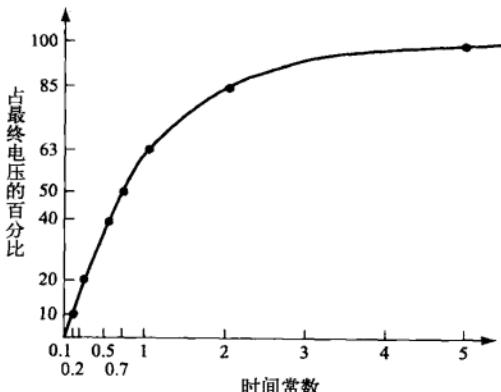


图 1-16

答案

- A. 这叫作指数型曲线。
 B. 它可用于计算电容在给定时间内能充到多高的电压。

38 在下面的例子中，电容和电阻串联。请计算该电路的时间常数及电容充满所需的时间。如果用 10V 电池供电，那么经过 1 个时间常数时电容的电压是多少？

问题

- A. $R = 1\text{k}\Omega$ $C = 1\,000\mu\text{F}$
 B. $R = 330\text{k}\Omega$ $C = 0.05\mu\text{F}$

答案

- A. $\tau = 1\text{s}$ ；充电时间为 5s ； $V_C = 6.3\text{V}$
 B. $\tau = 16.5\text{ms}$ ；充电时间为 82.5ms ； $V_C = 6.3\text{V}$ 。（ms 代表毫秒。）

39 图 1-17 所示电路采用了双掷开关为电容提供了放电通道。

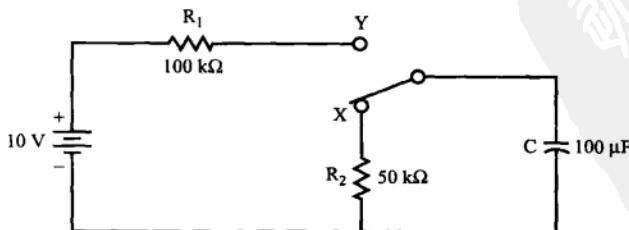


图 1-17

问题

- A. 当开关位于 X 端时，电容每个极板上的电压是多少？
 B. 当开关移到 Y 端时，电容开始充电。请问充电的时间常数是多少？
 C. 电容充满需要多长时间？

答案

- A. 0V B. $\tau = R \times C = 100\text{k}\Omega \times 100\mu\text{F} = 10\text{s}$ C. 大约 50s

40 假设图 1-17 中的开关在电容充满后又被移到 X 端。

问题

- A. 电容的放电时间常数是多少？
 B. 电容彻底放电需要多长时间？

答案

- A. $\tau = R \times C = 50\text{k}\Omega \times 100\mu\text{F} = 5\text{s}$ (电容通过 $50\text{k}\Omega$ 电阻放电)
 B. 大约 25s

照相机闪光灯的供电电路就是电容先存储电荷再根据需要放电的例子。当你等待闪光灯充电时，照相机就用它的电池对电容充电。一旦电容被充饱它就保持电荷，直至你按下快门按钮，使电容放电，从而点亮闪光灯。

41 电容也可以并联，如图 1-18 所示。

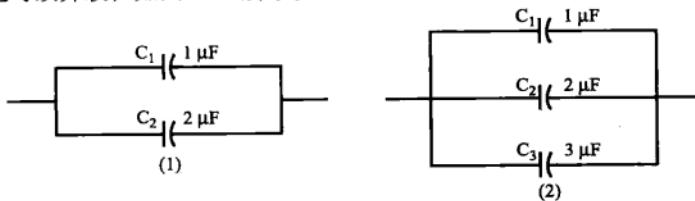


图 1-18

问题

- A. 总电容的计算公式是什么？
 B. 电路 1 的总电容是多少？
 C. 电流 2 的总电容是多少？

答案

- A. $C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N$ B. $C_T = 1 + 2 = 3\mu\text{F}$ C. $C_T = 1 + 2 + 3 = 6\mu\text{F}$
 换句话说，总电容等于各个电容之和。

42 电容也可以串联，如图 1-19 所示。

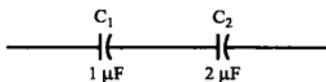


图 1-19

问题

- A. 总电容的计算公式是什么？
- B. 在图 1-19 中，总电容等于多少？

答案

$$\text{A. } \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

$$\text{B. } \frac{1}{C_T} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} = 1\frac{1}{2} = \frac{3}{2}; \text{ 即 } C_T = \frac{2}{3}$$

43 在下列例子中，电容都是串联的。请求出总电容。

问题

- A. $C_1 = 10\mu\text{F}$ $C_2 = 5\mu\text{F}$
- B. $C_1 = 220\mu\text{F}$ $C_2 = 330\mu\text{F}$ $C_3 = 470\mu\text{F}$
- C. $C_1 = 0.33\mu\text{F}$ $C_2 = 0.47\mu\text{F}$ $C_3 = 0.68\mu\text{F}$

答案

- A. $3.3\mu\text{F}$
- B. $103.06\mu\text{F}$
- C. $0.15\mu\text{F}$

1.12 小结

本章复习了一些在学习电子技术前需要掌握的简单理论。下面是对这些理论的总结。

- 基本电路包括（电压）源、负载（电阻）以及通路（导体或者导线）。
- 电压代表电荷差。
- 如果电路构成回路，那么回路中就会有电子流动，这被称为电流。电阻会阻碍电流的流动。
- 欧姆定律描述了电压（V）、电流（I）和电阻（R）的关系：

$$V = I \times R$$

- 电阻可以串联，此时只需将各个电阻的阻值相加就能得到总电阻值。

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

- 电阻可以并联，此时可以利用下面的公式计算总电阻：

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_N}$$

或者

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_N}}$$

- 电源输出的功率可由下面的公式计算：

$$P = VI$$

- 电阻的功耗可以下面的公式计算：

$$P = I^2 R$$

或者

$$P = \frac{V^2}{R}$$

- 如果已知施加在串联电阻两端的总电压 V_s , 那么可以用下面的公式计算其中某个电阻两端的电压：

$$V_1 = \frac{V_s R_1}{R_T}$$

- 如果已知两个并联电阻的总电流，那么可以利用分流计算公式计算其中一个电阻上的电流：

$$I_1 = \frac{I_T R_2}{R_1 + R_2}$$

- 基尔霍夫电压定律 (KVL) 描述了串联电路中各部分压降与总电压的关系。

$$V_s = V_1 + V_2 + \cdots + V_N$$

- 基尔霍夫电流定律 (KCL) 描述了电路中某个节点处的电流，即流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。对于简单的并联电路，则可以用如下公式描述，其中 I_T 代表流入的总电流。

$$I_T = I_1 + I_2 + \cdots + I_N$$

- 电路的开关是一种可以控制电流流动的器件，而在很多情况下，允许电流流动。

- 电容可以储存电路中的电荷。电容的电流或者电压可以受控地改变。电路的时间常数可由下面的公式求出：

$$\tau = R \times C$$

- 在 RC 电路中，在第一个时间常数时，电容的电流和电压值可以达到终值的 63%。在第 5 个时间常数时，将达到终值。

- 并联电容的总电容等于各电容之和。

$$C_T = C_1 + C_2 + \cdots + C_N$$

- 串联电容的总电容可以按照与并联电阻类似的方法求解。

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

或

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}}$$

1.13 直流电路知识前测

下列题目和问题将测试你对本章所讲述的基本理论知识的掌握情况。你需要单独准备一张空白纸用于计算。做完后，请用后面提供的答案核对你的答案。你会发现很多问题都有多种解法。

问题(1)~问题(5)使用图 1-20 所示电路。请根据题中给出的值计算未知量。

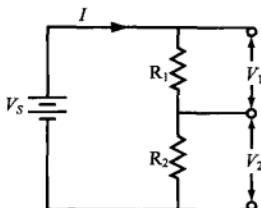


图 1-20

(1) $R_1 = 12\Omega$, $R_2 = 36\Omega$, $V_s = 24V$

$R_T = \underline{\hspace{2cm}}$, $I = \underline{\hspace{2cm}}$

(2) $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 3k\Omega$, $I = 5mA$

$V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_s = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) $R_1 = 12k\Omega$, $R_2 = 8k\Omega$, $V_s = 24V$

$V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(4) $V_s = 36V$, $I = 250mA$, $V_1 = 6V$

$R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(5) 现在, 请回到问题(1), 求出每个电阻的功耗以及电源输出的总功率。

$P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_T = \underline{\hspace{2cm}}$

问题(6)~问题(8)使用图 1-21 所示电路。请根据题中给出的值计算未知量。

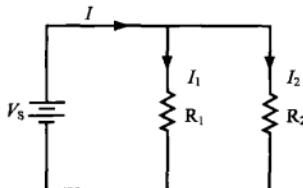


图 1-21

(6) $R_1 = 6\text{k}\Omega$, $R_2 = 12\text{k}\Omega$, $V_s = 20\text{V}$

$R_T = \underline{\hspace{2cm}}$, $I = \underline{\hspace{2cm}}$

(7) $I = 2\text{A}$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 30\Omega$

$I_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(8) $V_s = 12\text{V}$, $I = 300\text{mA}$, $R_1 = 50\Omega$

$R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

(9) 如果 220Ω 电阻的功率等级是 $1/4\text{W}$, 那么它允许流过的最大电流是多少?(10) RC 串联电路中, 电阻值为 $1\text{k}\Omega$, 施加的电压为 3V , 时间常数为 $60\mu\text{s}$ 。A. 所需的 C 值是多少?B. 开关闭合后 $60\mu\text{s}$ 时, 电容两端电压是多少?

C. 电容何时才能充满?

(11) 在图 1-22 所示电路中, 当开关位于位置 1 时, 时间常数等于 4.8ms 。A. 电阻 R_1 是多大?

B. 电容充满时的电压是多少? 需要多少时间才能充满?

C. 电容充满后, 开关转向位置 2。请问放电时间常数是多少, 电容多久才能彻底放完电?

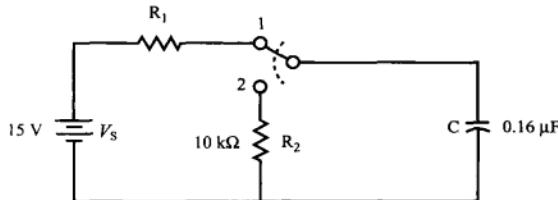


图 1-22

(12) 下面有 3 个电容可供选择:

$C_1 = 8\mu\text{F}$; $C_2 = 4\mu\text{F}$; $C_3 = 12\mu\text{F}$;

A. 如果这 3 个电容并联, 那么总电容 C_T 是多少?B. 如果这 3 个电容串联, 那么总电容 C_T 是多少?C. 如果 C_2 和 C_3 并联后再与 C_1 串联, 那么总电容 C_T 是多少?

直流电路知识前测答案

如果你的答案和下面给出的答案不同, 请先复习圆括号内注明的问题, 然后再继续学习下一章。如果你仍然对这些概念不清楚, 请访问网址 www.BuildingGadgets.com 并学习那里列出的 DC tutorials。

下面假设你已经掌握了欧姆定律, 因此没有列出问题 4。

(1)	$R_T = 48\Omega$, $I = 0.5\text{A}$	(问题9)
(2)	$V_1 = 5\text{V}$, $V_2 = 15\text{V}$, $V_s = 20\text{V}$	(问题23和问题26)
(3)	$V_1 = 14.4\text{V}$, $V_2 = 9.6\text{V}$	(问题23和问题26)
(4)	$R_2 = 120\Omega$	(问题9和问题23)

(续)

(5)	$P_1 = 3\text{W}, P_2 = 9\text{W}, P_T = 12\text{W}$	(问题9和问题13)
(6)	$R_T = 4\text{k}\Omega, I = 5\text{mA}$	(问题10)
(7)	$I_1 = 1.5\text{A}, I_2 = 0.5\text{A}$	(问题28和问题29)
(8)	$R_2 = 200\Omega, P_1 = 2.88\text{W}$	(问题10和问题13)
(9)	$I_{\text{MAX}} = 33.7\text{mA}$	(问题13、问题15和问题16)
(10)	A. $C = 0.06\mu\text{F}$ B. $V_C = 1.9\text{V}$ C. $T = 300\mu\text{s}$	(问题34和问题35) (问题34~问题38)
(11)	A. $R_1 = 30\text{k}\Omega$ B. $V_C = 15\text{V}, T = 24\text{ms}$ C. $\tau = 1.6\text{ms}, T = 8.0\text{ms}$	(问题35、问题39和问题40) (问题39~问题40)
(12)	A. $24\mu\text{F}$ B. $2.18\mu\text{F}$ C. $5.33\mu\text{F}$	(问题41和问题42) (问题42~问题43)



二极管

二极管的主要特性就是单向导电。历史上，第一枚真空管就是二极管，它也被称为整流器(rectifier)。现代的二极管是一种半导体器件，使用老式真空管的地方都可以改用这种新器件，并且新器件具有尺寸更小、使用更容易、价格更低等优点。

半导体是一种结晶材料，根据条件的不同，这种材料可以用作导体（允许电流流动）或者绝缘体（阻止电流流动）。随着技术的发展，目前已经能够定制半导体晶格相邻区的电特性，从而制造出尺寸极小的二极管、晶体管以及集成电路。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 指明直流电路中二极管的用法；
- 确定电路中的二极管是正向偏置（导通）或是反向偏置（截止）；
- 识别二极管的伏-安特性曲线图；
- 确定硅或者锗二极管的拐点电压；
- 计算二极管的电流和功耗；
- 掌握二极管击穿的定义；
- 区分齐纳二极管和其他类型的二极管；
- 确定何时能认为二极管是“理想的”。

2.1 认识二极管

■ 硅和锗都是制造二极管、晶体管以及集成电路的半导体材料。半导体材料被提炼到极高的纯度，随后，再添加一定数量的特殊杂质（该过程被称为掺杂）。根据半导体晶格区内杂质的不同，可以形成 N 型区或者 P 型区。除了电子以外（电子是负电荷载流子，能在普通导体中传递电荷），半导体材料还包含被称为空穴的正电荷载流子。N 型区加入的杂质能增加载流电子的数量，而 P 型区加入的杂质则能增加载流空穴的数量。

当半导体芯片中的一个 N 型掺杂区与一个 P 型掺杂区紧邻，就会形成二极管结（常被称为 PN 结）。硅和锗都能形成二极管结。但是，硅材料与锗材料之间无法形成 PN 结。

问题

图 2-1 中哪张图显示的是 PN 结？

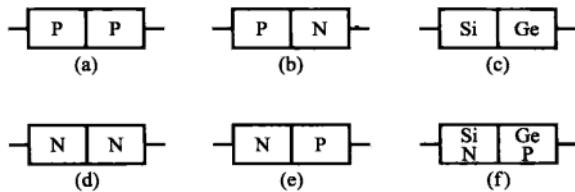


图 2-1

答案

图(b)和图(e)。

- 2** 在二极管中，P型材料被称为阳极（anode），N型材料被称为阴极（cathode）。

问题

请识别图 2-2 所示的二极管的哪部分是 P 型材料，哪部分是 N 型材料。

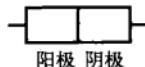


图 2-2

答案

阳极是P型材料，阴极是N型材料。

- 3** 二极管很有用，因为电流在 PN 结中只能单向流动。图 2-3 显示了电流的方向。

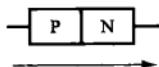


图 2-3

图 2-4 给出了二极管的电路符号。箭头方向指向电流的方向。尽管这里标示出了阳极和阴极，但是在电路图中通常不作标示。

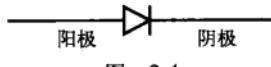


图 2-4

问题

在二极管中，电流是从阳极流向阴极还是从阴极流向阳极？

答案

电流从阳极流向阴极。

- 4** 在图 2-5 所示电路中，箭头所示方向为电流的方向。

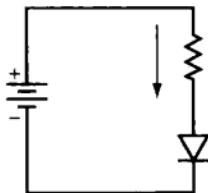


图 2-5

问题

- A. 二极管的连接方向是否能成功地使电流流动？
B. 请注意电池和二极管的连接方式。阳极的电压比阴极的高还是低？

答案

- A. 是。
B. 阳极与电池的正极相连，阴极与电池的负极相连。因此，阳极的电压比阴极的高。

- 5** 若二极管接入电路后能使电流流动，那么二极管就处于正偏（forward biased）状态。正偏二极管的阳极电压比阴极的高，因此二极管上有电流流过。请检查图 2-6 所示电路中电池与二极管的接法。

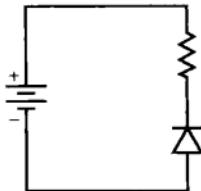


图 2-6

问题

二极管是正偏吗？请说明理由。

答案

不是正偏。二极管的阴极与电池的正极相接而阳极与电池的负极相接，因此阴极的电压比阳极的电压高。

6 当阴极所接电压高于阳极时，二极管不能导通。此时，二极管处于反偏（reverse biased）状态。

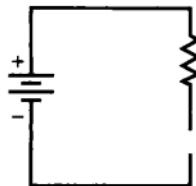


图 2-7

问题

请在图 2-7 所示电路中画出反偏的二极管。

答案

如图2-8所示。

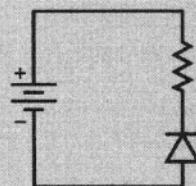


图 2-8

7 在很多电路中，二极管常被看作理想二极管，以便简化计算。理想二极管正偏时压降为零，反偏时电流为零。

问题

根据你已掌握的基本电学知识，还有哪些元件在某种条件下两端的压降等于零，而在相反的条件下导通电流也为零？

答案

机械开关。当开关闭合时，开关两端的压降为零；当开关断开时，导通电流为零。

8 理想的正偏二极管可以看作闭合的开关。它两端无压降，但是其中又有电流流过。

理想的反偏二极管可以看作断开的开关。其中无电流，而两端的电压等于供电电压。

问题

图 2-9 中哪个开关相当于理想的正偏二极管？

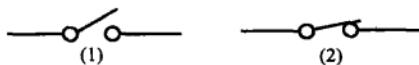


图 2-9

答案

开关(2)是闭合的开关，作用相当于理想的正偏二极管，允许电流流过，且开关两端无压降。

2.2 二极管实验

9 如果有条件做电子实验，那么你可能希望完成下列问题中所描述的简单实验。如果这是你初次做实验，那么请在老师或者其他熟悉电子实验的人的帮助下进行。

如果没有条件开展电子实验，那么也不要跳过本练习。请通读实验并尝试着画出或者想象出实验结果，这有时被称为“空想”实验。尽管做真实的实验肯定更好，但是你也能从这种“空想”实验中学到很多。对于后面各章的实验，建议也如此进行。

本实验的目标是绘制伏-安特性曲线（也称为特性曲线），它描述了通过二极管的电流是如何随二极管两端的电压的变化而变化的。从图 2-10 所示的二极管的伏-安特性曲线可以看出，如果在二极管上施加的电压很小，那么二极管中没有电流流过。但是，一旦施加的电压超过了一定的值，电流就会迅速增大。

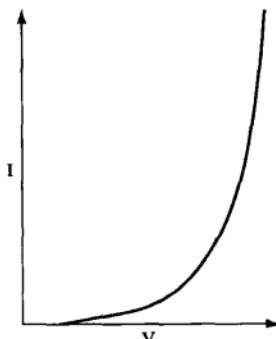


图 2-10

在进行本实验时，你将获得以下经验：

- 进行一个简单的电子实验；
- 测量电压和电流；
- 绘制电压和电流曲线。

请搭建如图 2-11 所示的电路。带圆圈的 A 和 V 分别代表安培计和电压表。安培计用于测量电流，而电压表用于测量电路中的电压。

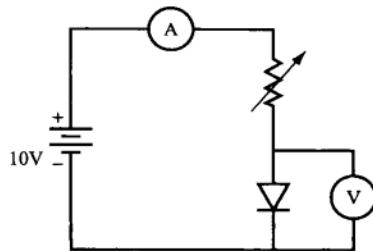


图 2-11

还可以用两块万用表测量电流或者电压。由于在本实验中需要逐步改变电阻值，所以请使用一个 $1M\Omega$ 的电位计，并且在每次调整电阻后重新测量电阻值。如果没有 $1M\Omega$ 的电位计，但是有一组阻值从数百欧姆到一兆欧姆的电阻，那么可以每次更换电阻。请仔细对照电路和电路图，特别是电池和二极管的方向。

检查完电路后，就请按以下步骤进行。

(1) 将 R 设置为最大值，并在下表中记录。

(2) 闭合开关, 测量 I 和 V 。将值记录在表格中。

(3) 略微减小 R 值, 得到不同的 I 值。

(4) 再次测量并记录 I 和 V 。

(5) 重复上述步骤，次数越多越好。直到某个点， V 突然不再增大，而 I 却迅速增大。立即停止。

注意 如果 V 已经非常大了（超过 3V 或 4V）而 I 依然很小，那说明二极管接反了。请更正后重新实验。

(6) 利用图 2-12 中的空白区域, 将表格中记录的数据绘成点。于是得到一幅类似于图 2-10 的曲线。

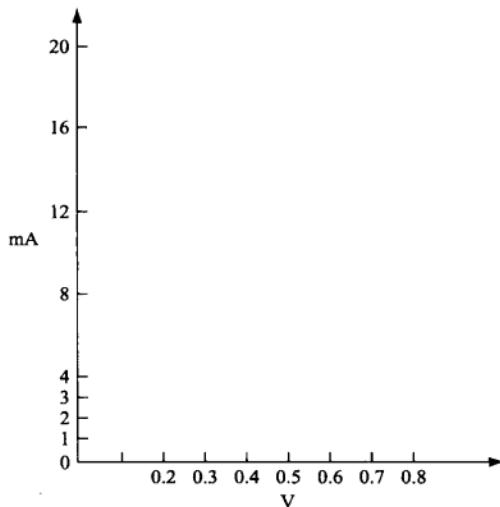


图 2-12

10 对商用二极管 1N4 001 的测量结果如下表所示。

R (Ω)	V (V)	I (mA)
1M Ω	0.30	0.02
220k Ω	0.40	0.05
68k Ω	0.46	0.14
33k Ω	0.50	0.26
15k Ω	0.52	0.50
10k Ω	0.55	0.80
6.8k Ω	0.56	1.20
4.7k Ω	0.60	2.00
3.3k Ω	0.62	2.80
2.2k Ω	0.64	4.20
1.5k Ω	0.65	5.50
1.0k Ω	0.67	8.40
680 Ω	0.70	12.00
470 Ω	0.70	18.00
330 Ω	0.71	23.00

进一步减小 R 值，电压只会略微增加，而电流则变得很大。

图 2-13 是利用上表中所测数据得到的伏-安特性曲线。

图 2-14 重绘了该伏-安特性曲线，并在其中标记出 3 个关键区域。

最关键的区域被称为拐点区 (knee region)。这不是一个严格定义的转换点，而是曲线中的一段狭窄区域，在该区域内二极管的电阻由大迅速变小。

图中还绘出了理想曲线作为比较。

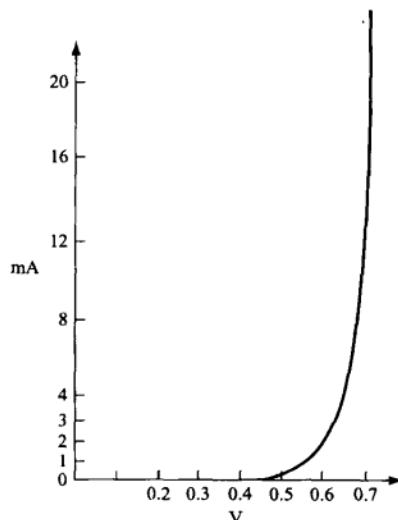


图 2-13

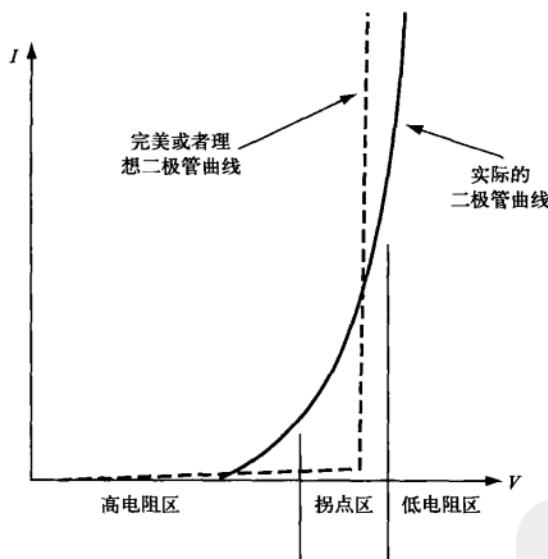


图 2-14

对于本问题中所使用的二极管，其拐点电压约为 0.7V，这是硅二极管的典型值。这意味着（实验测得的数据可以验证这一点）当电压低于 0.7V 时，二极管的电阻很大，并致使流过它的电流很小。这个特征拐点电压有时也被称为阈值电压 (threshold voltage)。如果使用的是锗二极管，那么拐点电压约为 0.3V。

问题

你所使用的二极管的拐点电压有多大?

答案

如果使用的是硅二极管,那么拐点电压约为0.7V;如果使用的是锗二极管,那么约为0.3V。

II 拐点电压也被称为极限电压 (limiting voltage)。也就是说,它是二极管的最大前向压降。

问题

- A. 硅二极管和锗二极管,哪个的极限电压更高?
- B. 在极限电压或者拐点电压处,二极管的电阻如何变化?

答案

- A. 硅二极管,其极限电压为0.7V,比锗二极管的0.3V更高。
- B. 电阻由大变小。

注意 在后面很多章都会用到拐点电压,它等于二极管正偏时 PN 结上的压降。

I2 参见图 2-14 中的电阻区部分。

问题

当二极管两端电压保持在拐点处时,电流如何变化?

答案

电流迅速增大。

I3 对于任何二极管来说,其拐点电压并不严格等于 0.7V 或者 0.3V,而是略有变化。在实际中使用二极管时(即使用的是非理想二极管),可做以下两个假设:

- 二极管的压降等于 0.7V 或者 0.3V;
- 通过在二极管上串连一个合适的电阻可以防止二极管过流。

问题

- A. 这里为何要指明是非理想二极管?
- B. 要用大电阻还是小电阻来防止过流?

答案

- A. 所有二极管都是非理想的，0.3和0.7都是近似值。事实上，在后面的问题中，将假设二极管导通时管压降为0V。该假设表明，一旦在二极管两端施加的电压超过0V，那么电流就像流入一个理想的电阻一样（即理想二极管伏-安特性曲线上的拐点电压等于0V）。
- B. 通常都使用大电阻。但是，实际的电阻值可由所施加的电压和二极管所能承受的最大电流计算得出。

14 请按照下面问题中的步骤计算图 2-15 所示电路中流过二极管的电流。

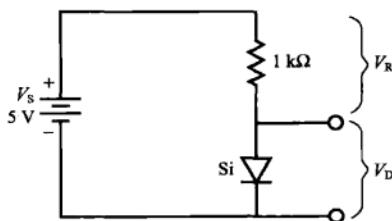


图 2-15

问题

- A. 二极管上的压降已知。硅二极管为0.7V，而锗二极管为0.3V。（二极管旁的“Si”表明它是硅管。）请写出二极管上的压降。 $V_D = \underline{\hspace{2cm}}$
- B. 求出电阻上的压降。这可以由 $V_R = V_S - V_D$ 得到。该公式是由KVL推导出的，KVL在第1章介绍过。 $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$
- C. 请根据 $I = V_R/R$ 计算出流过电阻的电流。 $I = \underline{\hspace{2cm}}$
- D. 最后，求出流过二极管的电流。 $I = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

你应该已经得出以下结果了。

A. 0.7V

B. $V_R = V_S - V_D = 5V - 0.7V = 4.3V$

C. $I = \frac{V_R}{R} = \frac{4.3V}{1k\Omega} = 4.3mA$

D. 4.3mA（在串连电路中，流过每个元件的电流都相等）

15 实际中，当电池电压为10V或者更高时，二极管上的压降通常被认为是0V而不是0.7V。这里假设所用的二极管是理想二极管，其拐点电压等于0V而不是某个大于零的阈值。后面还将讨论到，该假设常用于电子设计中。

问题

A. 请计算图 2-16 所示电路中流过硅二极管的电流。

$$V_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_R = V_S - V_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I = \frac{V_R}{R} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

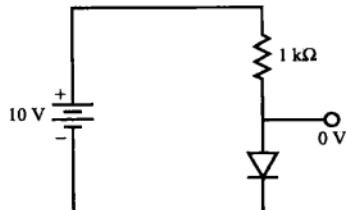
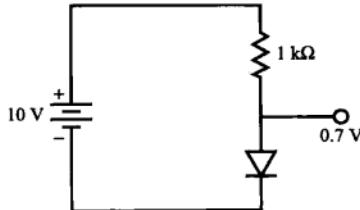


图 2-16

B. 请计算图 2-16 所示电路中流过理想二极管的电流。

$$V_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_R = V_S - V_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I = \frac{V_R}{R} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_D = \underline{\hspace{2cm}}$$

答案

A. 0.7V; 9.3V; 9.3mA; 9.3mA

B. 0V; 10V; 10mA; 10mA

16 问题 15 所求得的两个电流值之差小于总电流的 10%，即 0.7mA 小于 10mA 的 10%。很多电子元件的额定值都允许有 $\pm 5\%$ 的偏差。这意味着 1kΩ的电阻允许的实际阻值范围是 $950 \sim 1050 \Omega$ ，因此流过电阻的电流也会有 $\pm 5\%$ 的偏差。

由于元件阻值的微小变化，所以计算时常常要进行简化，只要简化后的结果偏差不超出 10% 即可。因此，当供电电压大于或等于 10V 时，二极管都被认为是理想的。

问题

A. 请检查图 2-17 所示的电路。能否假设该二极管是理想的?

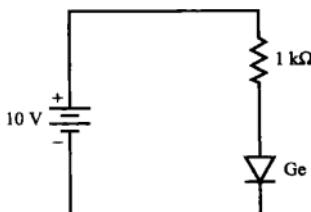


图 2-17

B. 计算流过二极管的电流。

答案

A. 能，可以将它看作理想二极管。

$$B. I = 10\text{mA}$$

17 当二极管中有电流流过时，二极管就会像电阻那样发热并产生功耗。电阻的功率计算公式为 $P = V \times I$ 。该公式同样适用于计算二极管的功耗。为了计算出二极管的功耗，必须首先如前所述计算出二极管的电流。对于硅二极管来说，尽管在计算电流时认为压降是 0V，但是该公式中的压降可以假设为 0.7V。

例如，硅二极管中流过的电流为 100mA，请确定该二极管的功耗有多大。

$$P = 0.7\text{V} \times 100\text{mA} = 70\text{mW}$$

问题

假设流过硅二极管的电流为 2A，请问该二极管的功耗有多大?

答案

$$P = 0.7\text{V} \times 2\text{A} = 1.4\text{W}$$

18 二极管可以制成具有一定功耗的形式，并且在生产商的规格书中将其标记为最大额定功率。

假设硅二极管的最大额定功率为 2W，请问它允许通过的最大电流有多少?

$$P = V \times I$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{V} \\ &= \frac{2\text{W}}{0.7\text{V}} \\ &= 2.86\text{A} \text{ (保留两位有效数字)} \end{aligned}$$

只要通入电路的电流不超过该值，那么二极管就不会因过热而烧毁。

问题

假设锗二极管的最大额定功率为 3W，那么它允许的最大安全电流是多少？

答案

$$I = \frac{3\text{W}}{0.3\text{V}} = 10\text{A}$$

19 请解答以下示例的问题。

问题

- A. 3W 的硅二极管能否承受问题 18 中计算出的锗二极管的电流？
- B. 该硅二极管的安全电流是多大？

答案

A. 不能，10A 电流将导致功耗达到 7W，这会烧毁硅二极管。

B. $I = \frac{3}{0.7} = 4.3\text{A}$

任何小于该值的电流都是安全的。

20 下面的几个示例都是求解流过二极管的电流。所用的电路参见图 2-18。

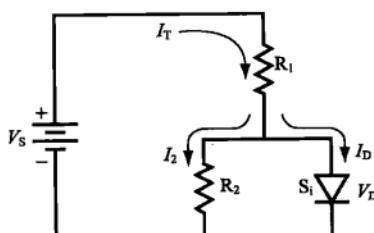


图 2-18

来自电池的总电流流过电阻 R_1 ，然后分成 I_2 和 I_D 。 I_2 流过 R_2 ，而 I_D 流过二极管。

问题

- A. 请求出 I_T 、 I_2 和 I_D 的关系？
- B. V_D 的值是多少？

答案

A. 根据KCL, $I_T = I_2 + I_D$

B. $V_D = 0.7V$

21 为了求出 I_D , 必须按照以下步骤进行, 因为没有其他方法能直接求出 I_D 。

(1) 求出 I_2 。利用 $V_D = R_2 \times I_2$ 求解。

(2) 求出 V_R 。为此, 可利用 $V_R = V_S - V_D$ (再次使用 KVL) 求解。

(3) 求出流过 R_1 的电流 I_T 。利用 $V_R = I_T \times R_1$ 求解。

(4) 求出 I_D 。为此, 可利用 $I_T = I_2 + I_D$ (再次使用 KCL) 求解。

为了求出图 2-19 所示电路中的 I_D , 可以按照上述步骤进行, 并检查答案。

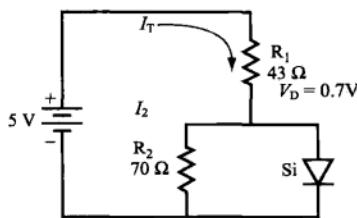


图 2-19

问题

A. $I_2 =$

B. $V_R =$

C. $I_T =$

D. $I_D =$

答案

A. $I_2 = \frac{V_D}{R_2} = \frac{0.7V}{70\Omega} = \frac{0.7V}{70\Omega} = 0.01A = 10mA$

B. $V_R = V_S - V_D = 5V - 0.7V = 4.3V$

C. $I_T = \frac{V_R}{R_1} = \frac{4.3V}{43\Omega} = 0.1A = 100mA$

D. $I_D = I_T - I_2 = 100mA - 10mA = 90mA$

22 对于本问题, 请参考问题 21 的答案。

问题

问题 21 中的二极管的功耗有多大?

答案

$$P = V_D \times I_D = 0.7V \times 90mA = 63mW$$

23 为了求出图 2-20 所示电路中二极管的电流，请依次解答以下问题。

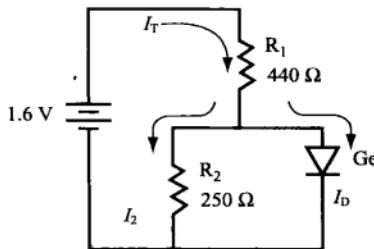


图 2-20

问题

A. $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $I_T = \underline{\hspace{2cm}}$ D. $I_D = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $I_2 = \frac{0.3}{250} = 1.2mA$ B. $V_R = V_s - V_D = 1.6 - 0.3 = 1.3V$

C. $I_T = \frac{V_R}{R_1} = \frac{1.3}{440} = 3mA$ D. $I_D = I_T - I_2 = 1.8mA$

如果打算休息一会儿，这里是个不错的停歇点。

2.3 二极管的击穿

24 前面提到，如果实验电路无法正常工作，那么有可能是二极管接反了。如果在电路中反接二极管（如图 2-21 右图所示），那么二极管中几乎没有电流流过。事实上，该电流非常小，以至于可以说没有电流。反接二极管的伏-安特性曲线如图 2-21 左图所示。

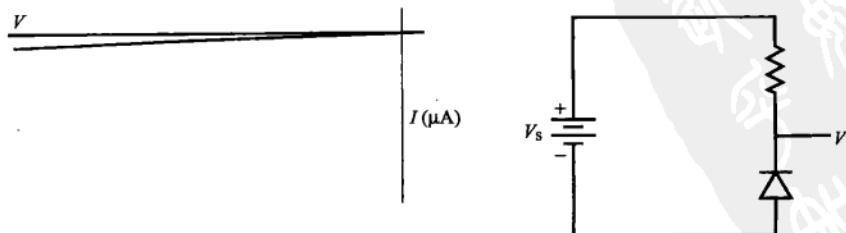


图 2-21

理想二极管的伏-安特性曲线在所有电压情况下电流都为零。但是对于实际的二极管，当电压达到二极管“击穿”点时，二极管中就会有很大的电流流过。二极管击穿时的伏-安特性曲线如图 2-22 所示。



图 2-22

如果继续保持这样的状态，那么二极管就会烧毁。你可以通过电阻限制电流来防止二极管烧毁，即使在击穿电压下也是如此。

问题

图 2-23 所示电路中的二极管在 100V 时会被击穿，击穿时能够安全地通过 1A 电流而不发生过热。请计算将电流限制在 1A 时所需电阻的阻值。

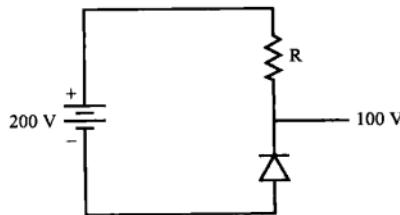


图 2-23

答案

$$V_R = V_S - V_D = 200V - 100V = 100V$$

由于流过的电流为 1A，因此有

$$R = \frac{V_R}{I} = \frac{100V}{1A} = 100\Omega$$

25 所有的二极管在反接时，如果被施加的电压过大，都会发生击穿。击穿电压与二极管的生产过程有关，不同类型二极管的击穿电压也不同。生产商的数据手册中会给出该电压值。

击穿并非灾难性的过程，也不会损坏二极管。如果去除所施加的反压，那么二极管将恢复并且正常工作。只要限制电流以防止二极管被烧毁，就能安全地反复做此实验。

无论二极管使用多少次，它的击穿电压始终不变。

击穿电压通常被称作 PIV (Peak Inverse Voltage, 峰值逆向电压) 或者 PRV (Peak Reverse Voltage, 峰值反向电压)。下面是一些常见二极管的 PIV 值。

二极管	PIV 值
1N4001	50V
1N4002	100V
1N4003	200V
1N4004	400V
1N4005	600V
1N4006	800V

问题

- A. 过大的电流和过大的电压，哪个会永久性地损坏二极管？
- B. 击穿和烧毁，哪个对二极管更有害？

答案

- A. 过大的电流。如果限制电流，那么过大的电压对二极管无害。
- B. 烧毁。击穿并不一定有害，特别是在电流受限时。

2.4 齐纳二极管

26 二极管还能制造成比上述二极管在更低、更精确的电压下发生击穿。这种二极管被称为齐纳二极管 (zener diode)，这个名字源于它们表现出的“齐纳效应”——具有一种特别的击穿电压。在齐纳电压处，齐纳二极管中会流过并维持一定的小电流，以保持二极管工作于齐纳点。在大多数情况下，所需电流只有数毫安。图 2-24 是齐纳二极管的符号和简单的应用电路。

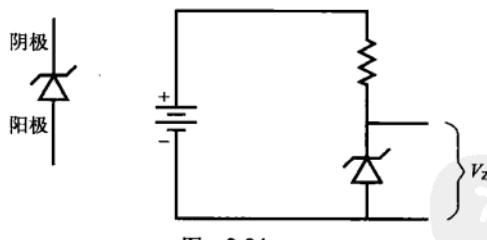


图 2-24

在该电路中，电池决定所施加的电压。齐纳二极管决定管子两端的压降（记为 V_z ）。电阻决定流过管子的电流大小。齐纳二极管常用于使电路的某点维持固定的电压。

问题

- 为什么用齐纳二极管而不是普通二极管来维持固定的电压？

答案

因为齐纳二极管的击穿电压很精确。

27 看看某个需要维持固定电压的应用电路（比如，由直流发电机驱动的灯泡）。在本例中，当发电机全速运转时，输出电压为 50V。当运转速度较慢时，输出电压能降至 35V。如果希望用该发电机点亮一个 20V 的灯泡，并假设灯泡的驱动电流为 1.5A，那么对应的电路如图 2-25 所示。

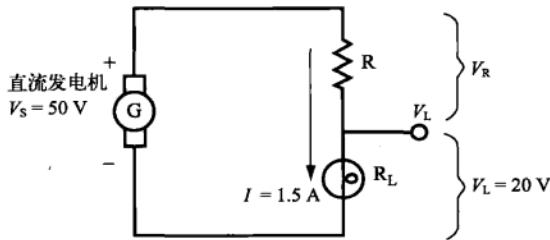


图 2-25

你需要选择合适的电阻值。通过下面的步骤可以计算出合适的电阻值。

(1) 计算灯泡的电阻 R_L 。所需公式为

$$R_L = \frac{V_L}{I}$$

(2) 计算 V_R 。所需公式为 $V_S = V_R + V_L$ 。

(3) 计算 R 。所需公式为

$$R = \frac{V_R}{I}$$

问题

请根据上述步骤写出答案。

A. $R_L = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $R = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $R_L = \frac{20V}{1.5A} = 13.33 \Omega$

B. $V_R = 50V - 20V = 30V$

C. $R = \frac{50V - 20V}{1.5A} = \frac{30V}{1.5A} = 20 \Omega$

28 如图 2-26 所示，现在假设使用问题 27 计算出的 20Ω的电阻，并且发电机的输出电压为 35V。这类似于电池变旧时的情况。电池电压下降，并因电压不够高而无法产生合适的电流。

这将导致灯泡变暗，甚至不发光。但是请注意，灯泡电阻并没有改变。

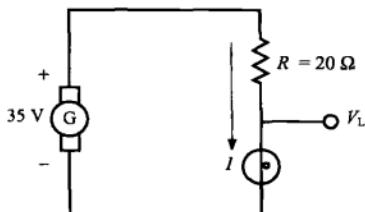


图 2-26

问题

- A. 请用下述公式计算出总电流。

$$I_T = \frac{V_s}{R + R_L}$$

- B. 请计算灯泡上的压降。所需公式为

$$V_L = I_T \times R_L$$

- C. 电压和电流增大了吗？

答案

A. $I_T = \frac{35V}{20\Omega + 13.3\Omega} = \frac{35V}{33.3\Omega} = 1.05A$

B. $V_L = 1.05A \times 13.3\Omega = 14V$

C. 电压和电流都有所下降。

29 在很多应用中，不允许灯泡（或其他元件）两端的电压下降。利用齐纳二极管就能防止电压下降，具体参见图 2-27 所示电路。

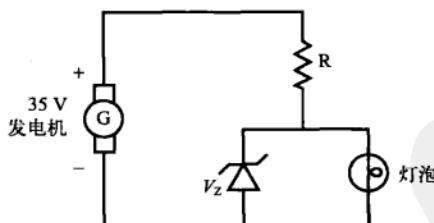


图 2-27

如果选用 20V 的齐纳二极管（即二极管两端的电压为 20V），那么无论发电机的输出电压如何变化（当然还要保证发电机的输出电压高于 20V），灯泡两端的电压总保持为 20V。

问题

已知灯泡两端的电压是固定值，而发电机的输出电压会下降。

- 流过灯泡的电流如何变化？
- 流过齐纳二极管的电流如何变化？

答案

- 由于灯泡两端的电压保持不变，因此电流也为常数。
- 由于总电流下降，因此流过齐纳二极管的电流也减小了。

30 为了使电路中灯泡两端的电压始终保持为 20V，必须选择合适的 R 值。该电阻值应允许流过灯泡所需的 1.5A 电流，再加上为保持二极管工作在齐纳电压所需的少量电流。为此，应考虑“最坏”的情况。（“最坏”情况设计是电子技术中的惯例。它能保证设备在最恶劣的条件下也能工作。）这里的最坏情况发生在发电机输出电压只有 35V 时。图 2-28 显示出该电路的电流通道。

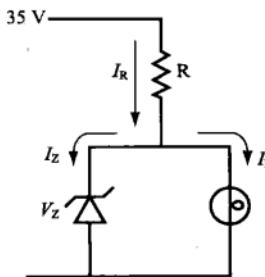


图 2-28

先计算允许灯泡流过 1.5A 电流所需的 R 值。流过齐纳二极管的电流有多大？可以选择你喜欢的任意值，只需保证它大于数毫安并且齐纳二极管不会烧毁即可。本例中，假设齐纳二极管的电流 I_Z 为 0.5A。

问题

- 流过 R 的总电流是多少？
- 计算 R 值。

答案

$$\text{A. } I_R = I_L + I_Z = 1.5\text{A} + 0.5\text{A} = 2\text{A}$$

$$\text{B. } R = \frac{V_s - V_z}{I_R} = \frac{35\text{V} - 20\text{V}}{2\text{A}} = 7.5\Omega$$

I_Z 不同，得到的 R 值也不同。

31 下面请看当发电机输出电压为 50V 的情况，具体参见图 2-29。

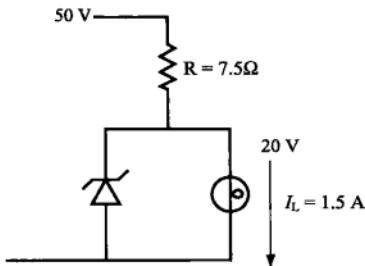


图 2-29

由于灯泡两端的电压仍为 20V，因此流过的电流也只有 1.5A。但是总电流和齐纳二极管上的电流都会改变。

问题

- A. 请计算流过 R 的总电流。
- B. 请计算流过齐纳二极管的电流。

答案

$$\text{A. } I_R = \frac{V_s - V_z}{R} = \frac{50 - 20}{7.5} = 4\text{A}$$

$$\text{B. } I_z = I_R - I_L = 4 - 1.5 = 2.5\text{A}$$

32 尽管灯泡电压和电流保持不变，但是总电流和流过齐纳二极管的电流都改变了。

问题

- A. I_T (I_R) 如何变化？
- B. I_z 如何变化？

答案

A. I_T 增大了 2A。

B. I_z 增大了 2A。

注意， I_T 的增加量全部流向齐纳二极管而不流过灯泡。

33 齐纳二极管的功耗随着发电机输出电压的变化而改变。

问题

- A. 计算发电机输出电压为 35V 时的功耗。
 B. 计算发电机输出电压为 50V 时的功耗。

答案

A. $P_Z = V \times I = 20V \times 0.5A = 10W$
 B. $P_Z = V \times I = 20V \times 2.5A = 50W$

如果齐纳二极管的额定功率为 50W 甚至更大，那么它就不会被烧毁。

34 基于图 2-30 解答以下问题。

问题

对于图 2-30 所示电路，在所给的灯泡的额定电流和额定电压下，齐纳二极管该选择多大的额定功率？

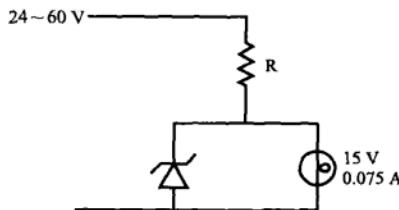


图 2-30

答案

假设齐纳二极管在 24V 时的电流为 0.5A：

$$R = \frac{9}{0.575} = 15.7\Omega$$

60V 时：

$$I_R = \frac{45}{15.7} = 2.87A; \text{ 因此 } I_Z \approx 2.8A$$

$$P_Z = 15V \times 2.8A = 42W$$

2.5 小结

半导体二极管在现代电子电路中应用十分广泛。其主要优点有

□ 外型尺寸小。

- 如果使用得当，非常可靠耐用。你应该还记得过高的反偏电压或者正偏电流都可能损害或者损坏二极管。
- 二极管只有两个连接端，因此非常易于使用。
- 价格低。
- 可应用于各种电子电路，从简单的直流控制到收音机和电视电路等。
- 能制成满足很宽的电压和功率需求的系列产品。
- 专用二极管（本章未涉及）具有其他元件所没有的功能。
- 最后，你将在第3章看到，二极管是晶体管的一部分。

所有在使用的半导体二极管都基于这样一个事实：它们只能单向导电。二极管常用于以下场合：

- 防止电路元件受到电压尖峰的冲击；
- 将交流变为直流；
- 保护敏感元件免受高压尖峰；
- 构建高速开关；
- 对无线电信号整流。

2.6 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

- (1) 请绘出二极管的符号，并标明每个端口。
- (2) 制造二极管需要使用什么半导体材料？
- (3) 请绘出一个包含电池、电阻和正偏二极管的电路。
- (4) 流过反偏的理想二极管的电流是多少？
- (5) 请绘出正偏二极管的典型伏-安特性曲线，并标明拐点电压。
- (6) 硅型二极管的拐点电压是多少？锗型二极管呢？
- (7) 在图2-31所示电路中， $V_s = 10V$ ， $R = 100\Omega$ 。请求出流过二极管的电流，假设使用的是理想二极管。

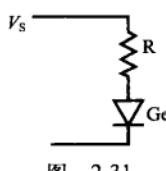


图 2-31

- (8) 请利用下列一组值重新计算问题(7)： $V_s = 3V$ ， $R = 1k\Omega$ 。
- (9) 请计算图2-32所示电路中流过二极管的电流，其中

$$V_s = 10V$$

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 1k\Omega$$

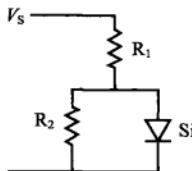


图 2-32

(10) 请计算图 2-33 所示电路中流过齐纳二极管的电流，其中

$$V_s = 20V$$

$$V_z = 10V$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 1k\Omega$$

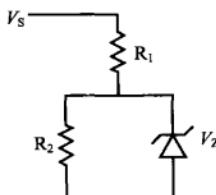


图 2-33

(11) 如果将问题(10) 中的电源电压增大至 45V，那么流过齐纳二极管的电流是多少？

(12) 问题(10) 和问题(11) 中二极管的最大功耗是多少？

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

(1) 参见图2-34

(问题3)

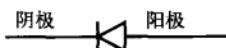


图 2-34

(2) 锗和硅

(问题1)

(3) 参见图2-35

(问题4)

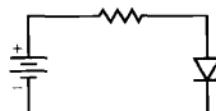


图 2-35

(4) 流过二极管的电流为零

(问题6)

(5) 参见图2-36

(问题9和问题10)

(续)

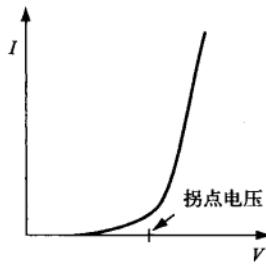


图 2-36

(6)	$S_i = 0.7V$, $Ge = 0.3V$ (都是近似值)	(问题10)
(7)	$I_D = 100mA$	(问题14)
(8)	由于 $V_S = 3V$, 所以不能忽略二极管上的压降。因此, $I_D = 2.7mA$	(问题14)
(9)	此时可以忽略 V_D 。因此, $I_D = 0.3mA$ 。如果不忽略 V_D , 那么 $I_D = 0.23mA$	(问题21)
(10)	$I_Z = 5mA$	(问题31)
(11)	$I_Z = 30mA$	(问题31)
(12)	当 I_Z 达到峰值 $30mA$ 时, 功耗最大。因此 $P_Z(MAX) = 0.30W$	(问题33)



晶体管概述

晶体管无疑是最重要的现代电子元件，自从 1948 年问世以来，它已对电子技术和日常生活产生了巨大而深远的影响。

本章将晶体管作为一种电子元件来介绍，其功能类似于机械开关，并且事实上，它在很多现代电子设备中就是被当作开关来使用的。晶体管能传导或阻断电流——而这正是机械开关的作用。

电子电路中常见的晶体管有 BJT (Bipolar Junction Transistor, 双极型晶体管)、JFET (Junction Field Effect Transistor, 结型场效应管) 以及 MOSFET (Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor, 金属氧化硅场效应管)，其中最常用的是 BJT。本章(以及第 4 章和第 8 章)将介绍 BJT 结和 JFET 结，以及它们是如何被应用于电子电路的。MOSFET 和 JFET 的功能类似，因此本书不介绍 MOSFET。

本章的一个实验能帮助你建立简易的单晶体管开关电路。你能轻松地在家用工作台上搭建该电路。你应当抽时间准备所需的元件，亲自动手搭建并运行电路。

第 4 章，将继续学习基于晶体管的开关电路设计和使用。第 8 章，将学习如何将晶体管作为放大器来使用。在放大器模式下，晶体管的输出是输入信号的放大形式，由于很多电子信号都需要放大，因此该功能十分有用。这些章组合在一起，就构成了晶体管的导论内容，其中包括晶体管有哪些功能以及如何在基本的电子电路中使用晶体管等。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 描述 BJT 的基本构造；
- 描述 JFET 的基本构造；
- 指明 BJT 的基极电流与集电极电流的关系；
- 指明 JFET 的门级电压与漏极电流的关系；
- 计算 BJT 的电流增益；
- 比较晶体管和简单的机械开关。

3.1 认识晶体管

1 图 3-1 所示为一些普通晶体管的外壳（也称为封装）。外壳能保护构建晶体管的半导体芯片，并提供引脚以便与其他元件相连。该图标示出了每个晶体管的引脚名称以及如何根据封装设计来区分它们。晶体管可以直接焊接到电路中、插入管座或者插入面包板。当焊接时，必须特别小心，因为晶体管可能会因过热而损坏。在焊点与晶体管外壳之间的引脚上安装散热夹能减小发生过热的几率。如果使用管座，那么可以焊好管座后再插入晶体管，从而避免晶体管受热。

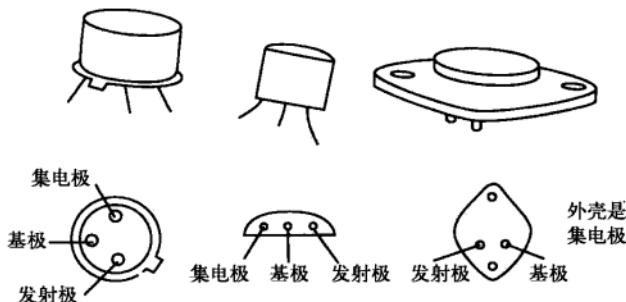


图 3-1

问题

- A. 大多数的晶体管有多少引脚?
- B. 哪种晶体管只有两个引脚, 第三个引脚由谁代替?
- C. 晶体管的 3 个引脚或者连接脚的名称是什么?
- D. 将晶体管焊接到电路时为何要小心?

答案

- A. 3个。
- B. 由外壳代替, 图3-1中最右侧的那幅图就是这种情况。(这种外壳用于功率型晶体管。)
- C. 发射极、基极和集电极。
- D. 过热能损坏晶体管。

2 可以从功能上将 BJT 看作两个背靠背相连的二极管, 如图 3-2 所示。

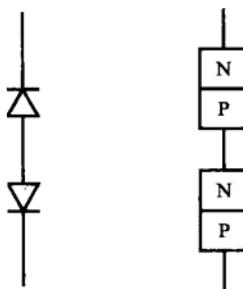


图 3-2

然而, 在制造过程中, 有一个重要的修改。并不是像图 3-2 那样有两个独立的 P 区, 而是只有一个非常薄的 P 区, 参见图 3-3。

问题

图 3-3 中的晶体管和两个背靠背相连的二极管, 哪个的 P 区更厚?

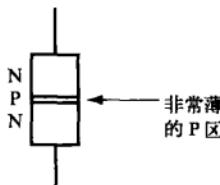


图 3-3

答案

两个背靠背相连的二极管的P区更厚。晶体管的P区非常薄。

- 3** 由于两个背靠背相连的二极管共享两个厚 P 区，所以它们的特性与晶体管不同。而其中的原因则涉及半导体物理知识，因此本书不作介绍。

问题

为什么两个背靠背相连的二极管的功能与晶体管不同？

答案

晶体管的P区薄，而两个二极管共享的P区厚。

- 4** 晶体管的 3 个端口（基极、发射极和集电极）如图 3-4 所示连接。

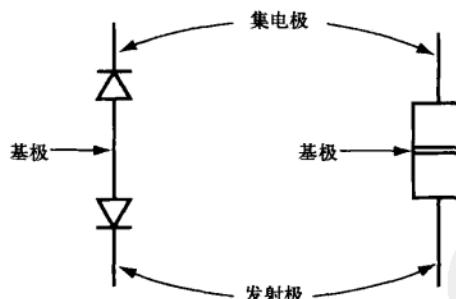


图 3-4

当我们把晶体管比作两个二极管时，是指基-射极二极管（base-emitter diode）和基-集极二极管（base-collector diode）。

电路图中的晶体管的符号如图 3-5 所示，同时给出两个二极管和 PN 结作为比较。根据半导体材料的分布形式，这里给出的是 NPN 型晶体管。

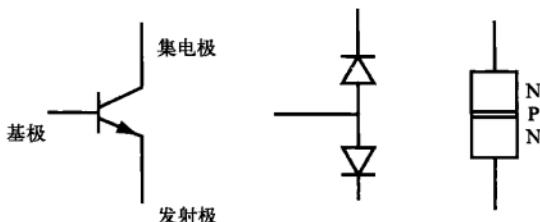


图 3-5

问题

晶体管的哪个端口有箭头？

答案

发射极。

5 当然也可以制成 PNP 型晶体管，具体参见图 3-6。

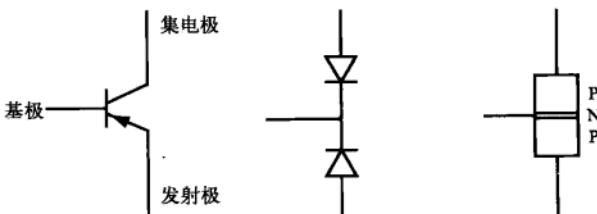


图 3-6

NPN 型和 PNP 型晶体管都可以由硅或者锗材料制成。

问题

- 请绘出 NPN 型和 PNP 型晶体管的电路符号（请分别画在两张纸上）。
- 下列符号表示的晶体管中，哪个可能是硅型晶体管？
- 硅和锗能共同组成晶体管吗？

答案

- A. 参见图3-7。



图 3-7

- B. 两个都可能是硅型晶体管。（两个也都可能是锗型晶体管。）

C. 目前所有的商用晶体管中都没有硅和锗混合型的。然而，研究人员正在尝试开发一种超快型晶体管，它就同时包含硅和锗材料。

6 请看看本问题和下面几个问题中使用 NPN 型晶体管的简单示例。

如果电池与 NPN 型晶体管连成图 3-8 所示电路，那么就会有图示方向的电流流动。

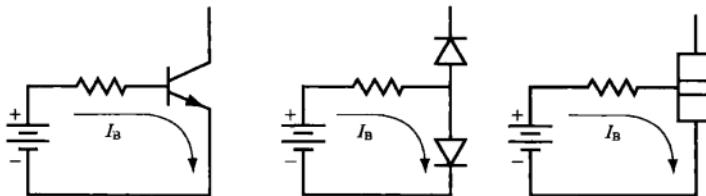


图 3-8

流过基-射级二极管的电流被称作基极电流 (base current)，用 I_B 表示。

问题

如果电池反接，那么还有基极电流吗？请说明理由。

答案

由于二极管反偏，所以没有基极电流。

7 请利用第 2 章介绍的知识计算图 3-9 所示电路中的基极电流。

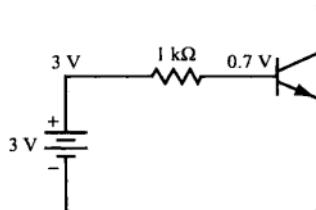


图 3-9

问题

求出图 3-9 所示电路中的基极电流。(提示：不要忘记基-射级二极管间的 0.7V 压降。)

答案

你给出的答案应该是类似这样的：

$$I_B = \frac{V_S - 0.7V}{R} = \frac{3 - 0.7}{1k\Omega} = \frac{2.3V}{1k\Omega} = 2.3mA$$

8 对于图 3-10 所示电路，电池电压 10V 远大于二极管的压降 0.7V，因此可以将基-射级二极管看作理想二极管，于是可以假设压降为 0V。

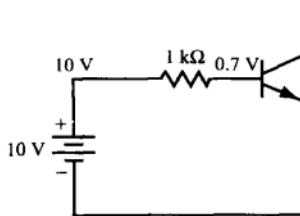


图 3-10

问题

请计算基极电流。

答案

$$I_B = \frac{10 - 0}{1\text{k}\Omega} = \frac{10}{1\text{k}\Omega} = 10\text{mA}$$

9 请看图 3-11 所示的电路。

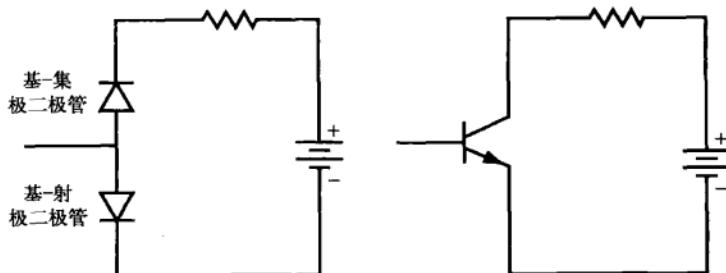


图 3-11

问题

该电路中有电流流动吗？为什么？

答案

没有电流流动。因为基-集极二极管反偏。

10 请检查图 3-12 所示电路。注意在电路的基极和集电极端都接有电池。

当电路的基极和集电极端都接有电池时，电路中的电流就反应出晶体管的关键特性。该特性有时被称为晶体管动作 (transistor action) ——如果晶体管的基极电流在流动，那么集电极电流也在流动。

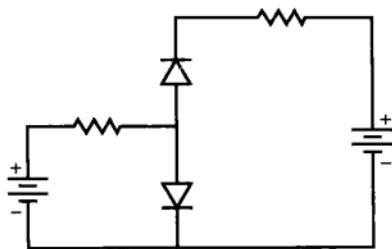


图 3-12

请检查图 3-13 所示的电流通道。

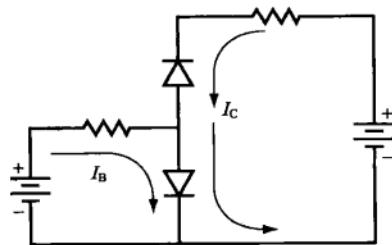


图 3-13

问题

- A. 哪些电流流过基-集极二极管？
- B. 哪些电流流过基-射极二极管？
- C. 哪些电流引起其他电流的流动？

答案

- A. I_C (集电极电流)。
- B. I_B 和 I_C 。注意它们都流过基-射极二极管。
- C. 基极电流引起集电极电流的流动。

图3-14中从集电极到基极的虚线通路没有电流流动。

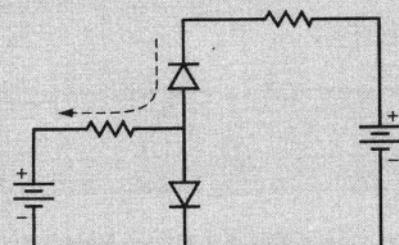


图 3-14

II 到目前为止，学习的都是 NPN 型三极管。PNP 型三极管与 NPN 型三极管的工作原理

类似，也可以应用于上述电路。

但是，这两种器件有一个重要的区别，具体参见图 3-15。PNP 型晶体管对应的两个二极管的朝向与 NPN 型晶体管的恰好相反。

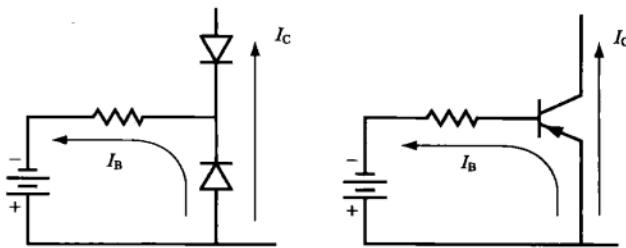


图 3-15

问题

请比较图 3-15 和图 3-13。这两个电路在下述几个方面有何区别？

- A. 电池的连接方式；
- B. 电流。

答案

- A. 电池极性相反；
- B. 电流方向也相反。

12 如图 3-16 所示，电池必须如此连接，才能使基于 PNP 晶体管的电路同时产生基极电流和集电极电流。

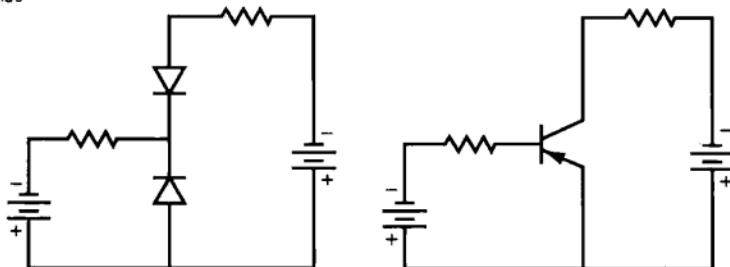


图 3-16

问题

电流是何种方向——是顺时针还是逆时针？

答案

- 基极电流是逆时针的。
- 集电极电流是顺时针的。

正如前面提到的，NPN型和PNP型三极管的工作原理类似：基极电流引起集电极电流的流动。而使用PNP型和NPN型三极管的唯一重要差别是供电电压的极性相反（对于电路的基极部分和集电极部分而言）。为了避免混淆，本书接下来的部分都使用NPN型三极管。

13 考虑图3-17所示电路。它仅使用一个电池同时为电路的基极部分和集电极部分供电。图中还标示出了基极电流的通路。

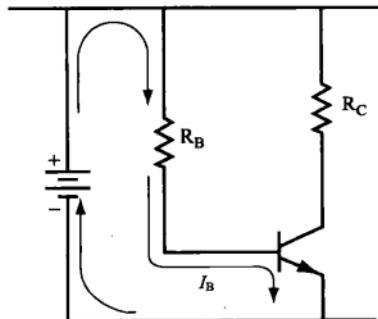


图 3-17

问题

- 请写出基极电流流过的元件。
- 基极电流流入晶体管的哪个端口？
- 基极电流由晶体管的哪个端口流出？
- 基极电流没有流过晶体管的哪个端口？

答案

- 电池、电阻R_B以及晶体管
- 基极
- 发射极
- 集电极

14 请回忆晶体管的关键物理特性。

问题

当电路的基极电流如图3-17所示时，将引起哪些电流，引起的电流会流过哪些元件？

答案

集电极电流会流过电阻R_C和晶体管。

15 在图3-18中，箭头指示出电流中集电极电流的通路。

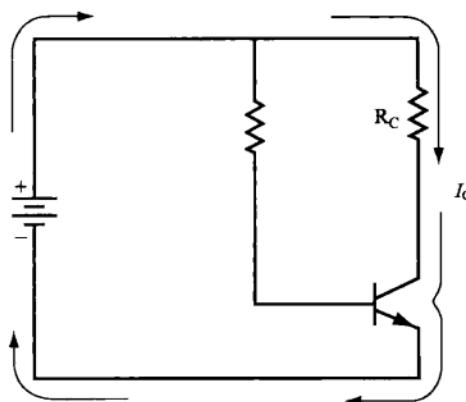


图 3-18

问题

- A. 请列出集电极电流流过的元件清单。
 B. 是谁引起了集电极电流的流动？

答案

- A. 电阻 R_C 、晶体管和电池。
 B. 基极电流。（如果基极电流不流动，那么集电极电流也不流动。）

16 晶体管的属性之一是集电极电流与基极电流之比为常数。集电极电流通常远大于基极电流。这两个电流之比被称为晶体管的电流增益（current gain），用符号 β （贝塔）表示。 β 值的典型范围是 10~300。

问题

- A. 集电极电流与基极电流之比叫什么？
 B. 代表该比值的符号是什么？
 C. 基极电流和集电极电流哪个大？
 D. 回顾问题 13 的电路， R_B 和 R_C 中的电流哪个大？

答案

- A. 电流增益
 B. β
 C. 集电极电流更大。
 D. R_C 中的电流更大，因为这是集电极电流。

注意 这里介绍的 β 在生产商提供的指标手册中被表示为 h_{FE} 。从技术上讲，它代表静态或者直流 β 。本章统称为 β 。关于晶体管参数的基本讨论在很多教科书中都有，因此这里不再赘述。

17 计算电流增益的数学公式如下：

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

其中

I_B 为基极电流

I_C 为集电极电流

计算 β 的公式还可以改写成 $I_C = \beta I_B$ 。由此可以看出，如果基极电流为零，那么集电极电流也为零。此外，基极电流越大，集电极电流也越大。这就是所谓“基极电流控制集电极电流”的原因。

问题

假设基极电流等于 1mA，集电极电流等于 150mA。该晶体管的电流增益是多少？

答案

150

18 电流增益是晶体管的物理特性。你既可以从生产商发布的数据手册中找到该值，也可以通过实验测定该值。

通常，不同型号的晶体管的 β 值也不同，而相同型号的三极管的 β 值彼此很接近。

在使用三极管时最常进行的计算是在已知 β 和集电极或基极电流的情况下确定另一电流的大小。

例如，假设晶体管的集电极电流为 500mA，并且已知 β 值等于 100。请求出基极电流。为此，请使用下列公式：

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{500\text{mA}}{100} = 5\text{mA}$$

问题

请计算下列值

- A. $I_C = 2\text{A}$, $\beta = 20$ 。计算 I_B 。
- B. $I_B = 1\text{mA}$, $\beta = 100$ 。计算 I_C 。
- C. $I_B = 10\mu\text{A}$, $\beta = 250$ 。计算 I_C 。
- D. $I_B = 0.1\text{mA}$, $I_C = 7.5\text{mA}$ 。计算 β 。

答案

- A. 0.1A即100mA B. 100mA C. 2 500 μ A即2.5mA D. 75

19 本问题可作为本章第一部分的小结。你应当能够回答所有的问题。请单独取一张纸用作画图和计算。

问题

- A. 请绘出一张三极管电路图，其中包括一个 NPN 型晶体管、一个基极电阻、一个集电极电阻以及一个电池，其中电池同时为基极和集电极供电。请绘出 I_B 和 I_C 的通道。
- B. 哪个电流控制另一个电流？
- C. I_B 和 I_C 哪个更大？
- D. $I_B = 6\mu A$, $\beta = 250$ 。请求出 I_C 。
- E. $I_C = 300\mu A$, $\beta = 50$ 。请求出 I_B 。

答案

- A. 参见图3-17和图3-18。
- B. I_B （基极电流）控制 I_C （集电极电流）。
- C. I_C
- D. 1.5mA
- E. 6mA

3.2 晶体管实验

20 下列实验的目标是通过测量几组基极电流和对应的集电极电流值求出晶体管的 β 值，即用集电极电流值除以基极电流值得到 β 值。根据各组测量电流值求出的 β 值应几乎完全相等。这表明了晶体管的 β 值是常数。

搭建好电路后，就可以测量每组电流对应的集电极电压了。这（通过实验）演示出了一些在后续问题中将介绍的要点。实验时，请观察随着集电极电流的不断增大，集电极电压 V_C 是如何下降至 0V 的。

如果没有实验设备来搭建电路和进行测量，那么通读本实验即可。如果有了实验设备，那么还需要以下仪器和电源。

- 一个 9V 晶体管收音机电池（或者一台实验电源）。
- 一块万用表，并设置于至少能测量 100 μ A 的电流档。
- 一块万用表，并设置于至少能测量 10mA 的电流档。
- 一块万用表，并设置于至少能测量 10V 的电压档。
- 一台分阻箱，或者一个 $1M\Omega$ 的电位计，或者是下表列出的各种电阻，此外还需要一块万用表来测量每次调节后的电阻值。

R_B	R_B	R_B	R_B
$1M\Omega$	$270k\Omega$	$180k\Omega$	$120k\Omega$
$680k\Omega$	$220k\Omega$	$160k\Omega$	$110k\Omega$
$470k\Omega$	$200k\Omega$	$150k\Omega$	$100k\Omega$
$330k\Omega$			

- 一个 $1k\Omega$ 电阻。
 - 一个晶体管，最好是 NPN 型的。
 - 一块面包板。

本实验可以采用几乎所有的商用晶体管。本书给出的测量结果是基于晶体管 2 N3643 的。如果只有 PNP 型晶体管，那么请将电池反接，并仍按照所述步骤处理即可。

请在面包板上搭建图 3-19 所述电路。利用面包板，不仅能轻松地连接电路上的元件，还能在完成测试后拆掉它们，这样，今后搭建其他电路时还能使用这些元件和面包板。

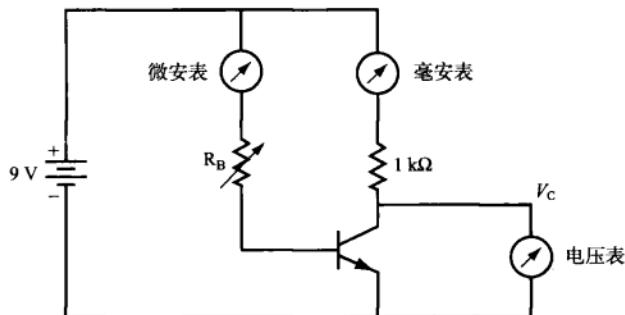


图 3-19

按照下列步骤，将测量值记录在下面的空白表格中。

- (1) 将 R_B 设为最大值。
 - (2) 测量并记录 I_B 。
 - (3) 测量并记录 I_C 。

(4) 测量并记录 V_C 。如果发射极与地或者电源负极相接，那么该电压可取自集电极-发射极引脚，此时该电压也被称为集-射极电压 (V_{CE})。

(5) 将 R_B 值降低至足够小，以产生不同的 I_B 读数。

(6) 测量并记录新的 R_B 、 I_B 、 I_C 和 V_C 值。

(7) 再次减小 R_B ，并得到新的 I_B 值。

(8) 再次测量并记录新的 R_B 、 I_B 、 I_C 和 V_C 值。

(9) 重复第(7)~(8)步，直至 $V_C = 0V$ 。

(10) 进一步减小 R_B 还能增大 I_B ，但是已不影响 I_C 或者 V_C 的值。

检查表格中的数据，确保得到一致的结果。然后请将测量值和下面所示数据做比较。

R_B	I_B	I_C	V_C	β
1MΩ	9μA	0.9mA	8.1V	100
680kΩ	13μA	1.3mA	7.7V	100
470kΩ	19μA	1.9mA	7.1V	100
330kΩ	27.3μA	2.8mA	6.2V	103
270kΩ	33.3μA	3.3mA	5.7V	99
220kΩ	40μA	4.1mA	5.0V	103
200kΩ	45μA	4.5mA	4.5V	100
180kΩ	50μA	5mA	4.0V	100
160kΩ	56μA	5.6mA	3.4V	100
150kΩ	60μA	6mA	3V	100
120kΩ	75μA	7.5mA	1.5V	100
110kΩ	82μA	8.0mA	1.0V	98
100kΩ	90μA	9mA	0.3V	100

这里看到的测量值都是通过仔细的实验测得的，实验中使用了精密电阻和一只商用的 2N3643 晶体管。如果采用普通的误差为±5%的电阻以及随机选取的晶体管，则可能得到不同的结果。如果你的结果不如这里的精确，也没关系。

根据每组测量结果计算出的 β 值等于或者非常接近于 100，这与生产商提供的指标 $\beta = 100$ 相吻合。

根据实验中测得的 I_B 值和对应的 I_C 值，就能计算出 β 值 ($\beta = I_C/I_B$)。计算结果可能稍有不同，但是都与平均值很接近。（极小或者极大的 I_B 值可能产生完全不同的 β 值。这里请忽略这些情况。）你得到的 β 值是否一致呢？它与生产商提供的指标是否接近呢？

21 实验中，要测量集电极的电压 (V_C) 并且记录测量值。现在，请考虑当无法测量时，该如何确定集电极的电压。

利用图 3-20 所示电路中的参数值完成以下步骤。

(1) 确定 I_C 。

(2) 确定集电极电阻 R_C 上的压降。记为 V_R 。

(3) 从供电电压中减去 V_R ，计算出集电极电压。

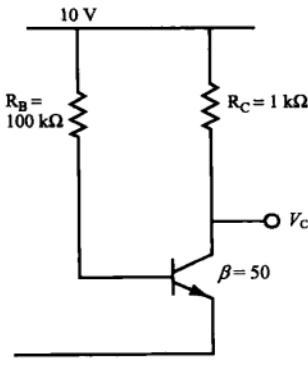


图 3-20

以下是第一步。

(1) 为了求出 I_C , 必须首先求出 I_B 。

$$I_B = \frac{10V}{100k\Omega} = 0.1mA$$

$$I_C = \beta \times I_B = 50 \times 0.1mA = 5mA$$

然后, 完成接下来的两步。

问题

(2) $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

(2) 求 V_R :

$$V_R = R_C \times I_C = 1k\Omega \times 5mA = 5V$$

(3) 求 V_C :

$$V_C = V_S - V_R = 10V - 5V = 5V$$

22 当 $\beta = 75$ 时, 求出图 3-20 所示电路中的参数值。

问题

计算以下参数:

A. $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $I_B = \frac{10V}{100k\Omega} = 0.1mA$

PDG

- A. $I_C = 75 \times 0.1\text{mA} = 7.5\text{mA}$
 B. $V_R = 1\text{k}\Omega \times 7.5\text{mA} = 7.5\text{V}$
 C. $V_C = 10\text{V} - 7.5\text{V} = 2.5\text{V}$

23 当 $\beta = 75$ 、 $R_B = 250\text{k}\Omega$ 时，求出同一电路中的参数值。

问题

计算以下参数：

A. $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $I_B = \frac{10\text{V}}{250\text{k}\Omega} = \frac{1}{25}\text{mA}$

$I_C = 75 \times \frac{1}{25}\text{mA} = 3\text{mA}$

B. $V_R = 1\text{k}\Omega \times 3\text{mA} = 3\text{V}$

C. $V_C = 10\text{V} - 3\text{V} = 7\text{V}$

24 从前面的问题可知，通过选择具有合适 β 值的晶体管，或者选择合适的 R_B 值，就能将 V_C 设为任意值。

现在，请考虑图 3-21 所示的示例。目标是求出 V_C 。请使用问题 21 列出的步骤完成。

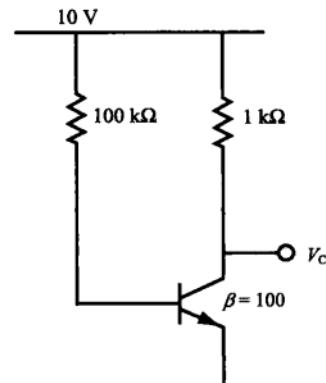


图 3-21

问题

计算以下参数：

A. $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

你的计算结果应该如下所示：

A. $I_B = \frac{10V}{100k\Omega} = 0.1mA$

$I_C = 100 \times 0.1mA = 10mA$

B. $V_R = 1k\Omega \times 10mA = 10V$

C. $V_C = 10V - 10V = 0V$

这里，基极电流足够大，以至于在给定的集电极电阻和供电电压下，集电极电压为 0V，并且集电极电流达到最大值。这种状态被称为饱和（saturation）。

25 请看图 3-22 所示的两个电路并且比较图示点的电压 V_C 。

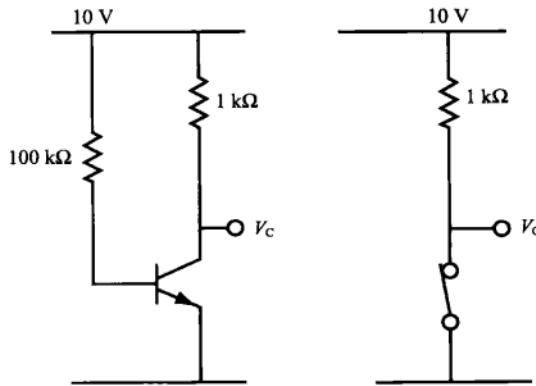


图 3-22

考虑晶体管的基极电流和集电极电流都足够大，以至于集电极电压为 0V。显然，这可以看成闭合的机械开关。正如开关位于状态 ON，而晶体管此时被称作“导通”，记为 ON。

问题

- A. 导通的晶体管可以看成什么？
- B. 导通晶体管的集电极电压是多少？

答案

- A. 闭合的机械开关
- B. 0V

26 下面，请比较图 3-23 所示的两个电路。

由于基极电路被断开（即不闭合），所以没有基极电流流动。

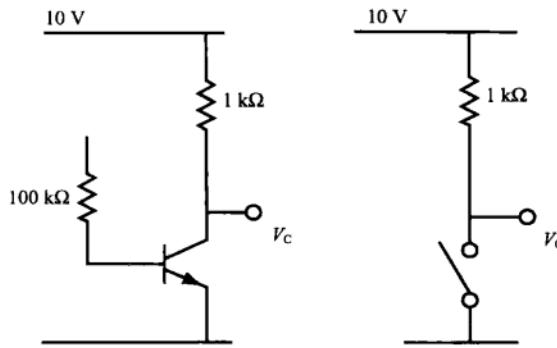


图 3-23

问题

- A. 基极电流是多少?
 B. 集电极电压是多少?
 C. 在机械开关电路中, V_C 点的电压是多少?

答案

- A. 没有电流。
 B. 由于没有电流流过 $1\text{k}\Omega$ 电阻, 所以电阻两端无压降, 集电极电压为 10V 。
 C. 10V , 因为 $1\text{k}\Omega$ 电阻上无电流流过。

27 从问题 26 可以明显看出, 集电极电流为零的晶体管类似于一个断开的机械开关。为此, 晶体管在集电极电流为零且集电极电压等于供电电压时被称为“关断”, 记为 OFF。

问题

关断的晶体管的两个主要特性是什么?

答案

集电极电流为零, 集电极电压等于供电电压。

28 下面, 请计算图 3-24 所示电路中的参数, 并且将计算结果与问题 26 和问题 27 的做比较。这里的目标还是求 V_C 。

问题

计算以下参数:

A. $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$ I_C = $\underline{\hspace{2cm}}$ B. $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$

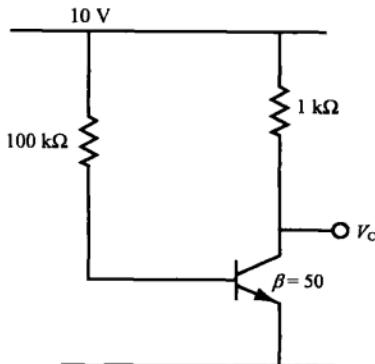


图 3-24

答案

A. $I_B = \frac{10V}{100k\Omega} = 0.1mA$

$I_C = 50 \times 0.1mA = 5mA$

B. $V_R = 1k\Omega \times 5mA = 5V$

C. $V_C = 10V - 5V = 5V$

注意 本问题中的输出电压恰等于供电电压的一半。该状态在第8章介绍的交流电子技术中非常重要。

3.3 结型场效应管

到目前为止，仅介绍了晶体管中的双极型晶体管（BJT）。还有一种常用的晶体管是结型场效应管（JFET）。JFET 和 BJT 一样，也被广泛应用于开关和放大应用中。当电路需要高输入阻抗时，由于 BJT 的输入阻抗比 JFET 的相对要小，所以使用 JFET 更合适。和 BJT 一样，JFET 也是三端器件。其 3 个端口分别叫做源极、漏极和门级。它们的功能分别类似于发射极、集电极和基极。

问题

- A. JFET 有多少个端口，它们的名称分别是什么？
- B. JFET 的哪个端口的功能与 BJT 的基极类似？

答案

- A. 3个，分别叫源极、漏极和门级。
 B. 门级的控制功能与BJT的基极类似。

30 普通的 JFET 包括一种含有沟道的半导体材料，该沟道由两种不同类型的半导体材料组成。如果沟道是 N 型材料，那么就称之为 N 沟道 JFET；如果沟道是 P 型材料，则称之为 P 沟道 JFET。图 3-25 给出了 N 型和 P 型材料的基本布局以及它们的电路符号。门级电压控制着流过漏极和源极的电流，它通过控制沟道的有效宽度来改变流过电流的大小。因此，门级电压扮演着控制漏极电流的角色，就像 BJT 的基极电压控制着集电极电流一样。

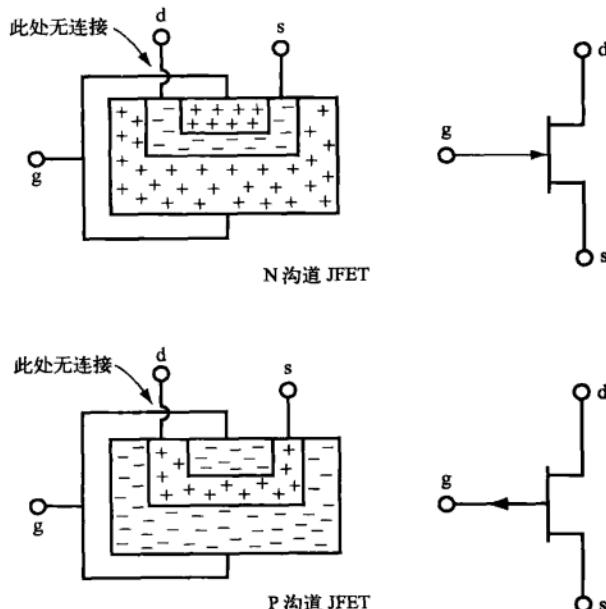


图 3-25

问题

- A. 哪种 JFET 采用电子作为漏极电流的主要载流子？
 B. JFET 工作时，改变门级电压会有何影响？

答案

- A. N 沟道 JFET。因为 N 型材料使用电子作为主要载流子。
 B. 将改变漏极电流。因为门级电压控制着沟道的宽度。

31 为了使 N 沟道 JFET 工作，要在漏极施加一个相对于源极的正电压。这样才能使电流流

过沟道。如果门级电压为0V，那么JFET处于导通(ON)状态，并且漏极电流达到安全工作时允许的最大值。当门级电压为负值时，漏极电流会减小，直至JFET达到关断(OFF)状态，此时漏极电流为零。图3-26显示了N沟道JFET的典型偏置电流。对于P沟道JFET而言，则要翻转偏置电压的极性。

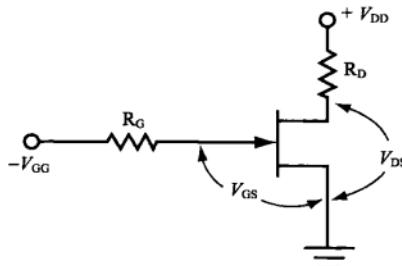


图 3-26

问题 •

JFET的导通-关断条件与BJT比起来如何？

答案

当门级电压为0V时JFET就导通，而BJT则要在基极施加一定的电压才能导通。当对门级施加一定的电压后，JFET才能关断，而BJT则在基极电压为0时就关断。JFET是“常通”型器件，而BJT是“常断”型器件。因此可以将JFET(像BJT一样)当作开关来使用。

32 对于图3-26所示的JFET而言，当门级至源极的电压为0V(即 $V_{GS}=0$)时，漏极电流最大值(或者称为饱和值)。这意味着N沟道电阻达最小值，大约为 $5\sim 200\Omega$ 。如果 R_D 远大于此值，那么N沟道电阻 r_{DS} 就可以忽略不计。

问题

- A. 此时相当于何种开关状态，对应的漏极至源极电压(V_{DS})是多少？
- B. 随着门级至源极电压变得越来越负，N沟道的电阻值越来越大，直至JFET关断。当JFET达到关断点时，沟道电阻可以认为是无限大。此时又像何种开关状态，对应的漏极至源极电压是多少？
- C. JFET在电流饱和和电流切断这两个极端条件下的表现像什么？

答案

- A. 闭合的开关， $V_{DS}=0V$ 或者极小的值。
- B. 断开的开关， $V_{DS}=V_{DD}$ 。
- C. 可变电阻。

3.4 小结

此时，最好能比较一下这两种晶体管与机械开关的特性，总结为下表。

开 关	BJT	JFET
关断或者开路		
无电流	无集电极电流	无漏极电流
两端承受全部的电压	集电极和发射极两端承受全部的供电电压	漏极和源极两端承受全部的供电电压
导通或者闭合		
全部的电流	全部的电路电流	全部的电路电流
两端无电压	集电极至发射极电压为0V	漏极至源极电压为0V

在数字电子技术中用术语导通和关断来描述你刚接触到的晶体管的两种状态。它们和很多电子电路中使用的机械开关类似。在第4章，还将更加深入地学习有关晶体管开关的知识。这是理解数字电子技术的第一步。在第8章，将学习晶体管被偏置到导通和关断这两种状态之间时的工作方式。此时，可以将晶体管看成可变电阻，并且当作放大器使用。

3.5 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

- (1) 请画出NPN型和PNP型双极型晶体管的符号。并标出晶体管的各极。
- (2) 请在图3-27中画出基极电流和集电极电流的通路。

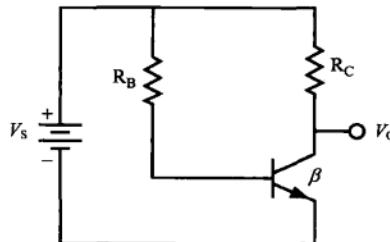


图 3-27

- (3) 引起集电极电流的流动的原因是什么？
- (4) 术语电流增益的含义是什么？它的符号是什么？它的计算公式是什么？请使用图3-27所示电路回答问题(5)~问题(10)。
- (5) 假设图中采用硅晶体管。令 $R_B = 27k\Omega$, $V_s = 3V$ 。请求出 I_B 。
- (6) 如果 $R_B = 220k\Omega$, $V_s = 10V$ 。请求出 I_B 。
- (7) 请计算 $R_B = 100k\Omega$, $V_s = 10V$, $R_C = 1k\Omega$ 且 $\beta = 50$ 时的 V_o 。
- (8) 请计算 $R_B = 200k\Omega$, $V_s = 10V$, $R_C = 1k\Omega$ 且 $\beta = 50$ 时的 V_o 。
- (9) 请计算 $R_B = 47k\Omega$, $V_s = 10V$, $R_C = 500\Omega$ 且 $\beta = 65$ 时的 V_o 。

- (10) 请计算 $R_B = 68k\Omega$, $V_S = 10V$, $R_C = 820\Omega$ 且 $\beta = 75$ 时的 V_O 。
- (11) 请画出两种结型场效应管的符号，并标出各极。
- (12) 是什么控制着流过 JFET 和 BJT 的电流？
- (13) 请在图 3-28 所示的 JFET 的共源电路中标出合适的电源极性，并画出漏极电流的流动通道。
- (14) BJT 要有基极电流才能导通，为什么 JFET 导通时不需要门级电流？

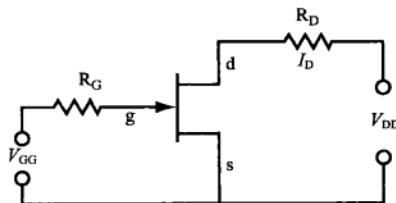


图 3-28

- (15) 请根据图 3-29 所示电路回答下列问题。

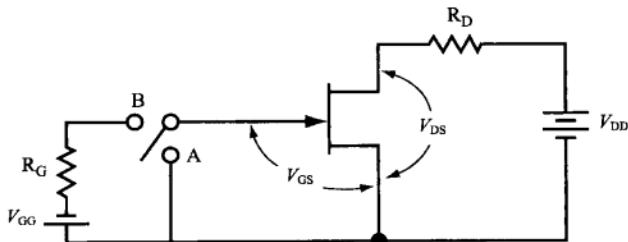


图 3-29

- A. 如果开关位于位置 A，那么漏极电流有多大，为什么？
- B. 如果开关位于位置 B，并且门级电压足以关断 JFET，那么漏极电流有多大，为什么？
- C. 在上述两种情况下，漏极至源极的电压分别是多少？

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

(1)

参见图3-30

(问题4、问题5)

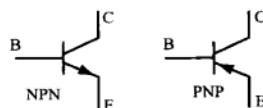


图 3-30

(2)

参见图3-31

(问题13、问题15)

(续)

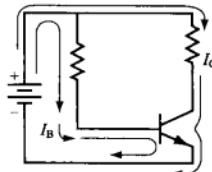


图 3-31

(3) 基极电流 (问题15)

(4) 电流增益等于集电极电流与基极电流之比, 用符号 β 表示, $\beta = I_C/I_B$ (问题16、问题17)

(5) $I_B = \frac{V_S - 0.7}{R_B} = \frac{3V - 0.7V}{27k\Omega} = \frac{2.3V}{27k\Omega} = 85\mu A$ (问题7)

(6) $I_B = \frac{10V}{220k\Omega} = 45.45\mu A$ (问题7)

(7) 5V (问题21~问题24)

(8) 7.5V (问题21~问题24)

(9) 3.1V (问题21~问题24)

(10) 1V (问题21~问题24)

(11) 参见图3-32 (问题30)

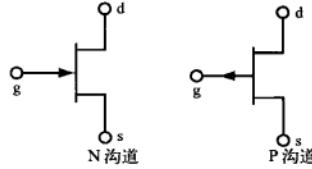


图 3-32

(12) 门级电压控制着漏极电流的流动, 就像BJT的基极电压控制着集电极电流一样 (问题30)

(13) 参见图3-33 (问题31)

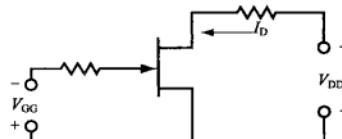


图 3-33

(14) JFET是高阻抗型器件, 因此门级电路中未画电流。BJT是具有相对较低阻抗的器件, 因此需要基极电流才能工作 (问题29)

(15) A. 漏极电流达最大值。此时, 由于可以忽略JFET上的压降, 因此漏极电流等于 V_{DD}/R_D 。门级电压为0V, 因此沟道电阻很小, 接近于 0Ω (问题32)

B. 漏极电流为0A, 因为此时的沟道电阻无穷大(非常大), 沟道中电子无法流动

C. 在位置A时, V_{DS} 约为0V。在位置B时, $V_{DS} = V_{DD}$

晶体管开关

晶体管随处可见，在日常生活中我们会不可避免地遇到它们。比如，几乎所有的工业控制，甚至 MP3 播放器、收录机和电视机等都可能把晶体管当作开关使用。

在第 3 章中，我们已经看到晶体管是如何像开关那样导通（ON）和关断（OFF）的。计算机是基于布尔代数工作的，它只用到两个逻辑状态——真（TRUE）和假（FALSE）。这两个状态可以很容易地用晶体管的导通和关断所产生的电信号来表示。因此，计算机中大量使用晶体管开关。事实上，微处理器（计算机的大脑）的逻辑部分就是完全由晶体管开关组成的。

本章将介绍晶体管（特别是 BJT）最简单且广泛的应用——开关。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 计算适当的基极电阻，使晶体管导通或关断；
- 解释某个晶体管是如何使另一个晶体管导通或关断的；
- 计算简单晶体管开关电路中的各种电流和电阻值；
- 计算包含两个晶体管的开关电路中的各种电阻和电流值；
- 比较 JFET 和 BJT 的开关动作。

4.1 晶体管的导通

首先用图 4-1 所示的简单电路解释如何使晶体管导通。在第 3 章， R_B 是已知的，那时的任务是计算集电极电流和电压值。而现在的任务恰好相反：已知流过 R_C 的电流，要求出能使晶体管导通，进而允许集电极电流流动的 R_B 值。

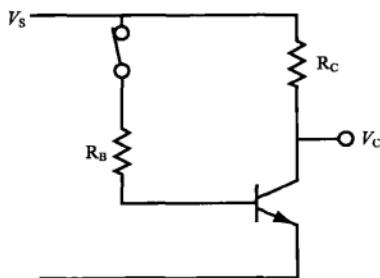


图 4-1

问题

为了求出 R_B ，必须先知道哪些电流值？

答案

基极电流和集电极电流。

2 在本问题的电路中, 灯泡可以作为集电极电阻。此时, R_C (灯泡的电阻) 相当于负载 (load), 而 I_C (流过灯泡的电流) 被称为负载电流 (load current)。

问题

- A. 负载电流等于基极电流还是集电极电流?
- B. 问题 1 中讨论的集电极电流的路径是怎样的? 请在电路中画出该路径。

答案

- A. 集电极电流。
- B. 参见图4-2。请注意, 该图中的电阻符号已替换为白炽灯泡的符号。

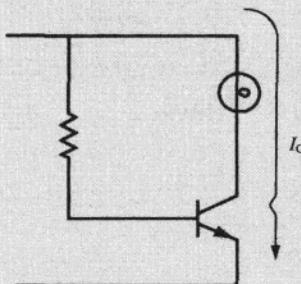


图 4-2

3 由于晶体管开关在功能上等效于闭合的 (CLOSED) 开关, 因此其集电极电压必然等于发射极电压。在此条件下, 晶体管被认为是导通的 (ON)。

问题

- A. 当晶体管导通时, 集电极电压有多大?
- B. 导通的 (ON) 晶体管像什么元件?

答案

- A. 它和集电极电压相等, 在本电路中等于0V。
- B. 闭合的机械开关。

注意 在实际应用中, 晶体管的集电极与发射极之间存在很小的压降。这就是饱和电压, 它是晶体管在最大程度地导通时的最小压降。在本章的讨论中认为该压降可以忽略, 因此, 将集电极电压记为 0V。对于高性能的开关晶体管, 这一假设是合理的。

4 图 4-3 所示电路中，用电阻为 240Ω 的灯泡代替了电阻 R_C 。

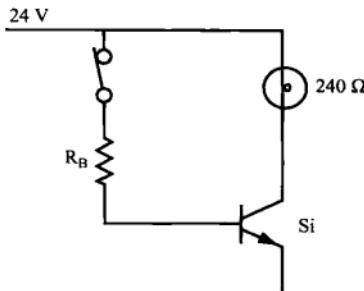


图 4-3

图中给出了供电电压和集电极电阻。已知这两个值，再根据欧姆定律就能计算出负载电流（也称为集电极电流）：

$$I_L = I_C = \frac{V_s}{R_C} = \frac{24V}{240\Omega} = 100mA$$

因此，流过晶体管的集电极电流达 $100mA$ ，并且全部用来点亮灯泡。正如在第 3 章看到的那样，只有当基极有电流时，集电极才有电流。

问题

- A. 为什么需要基极电流？
- B. 如何产生基极电流？

答案

- A. 这是为了使集电极电流流动，以点亮灯泡。
- B. 闭合基极电路的机械开关即可。

5 还能计算出基极电流的大小。假设 $\beta=100$ （通常，可以从所使用的晶体管的生产商提供的数据手册中查到该值）。

问题

基极电流 I_B 有多大？

答案

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{100mA}{100} = 1mA$$

6 已知基极电流的方向如图 4-4 所示。基极电流能像在正偏二极管中那样流过晶体管的基-射结。

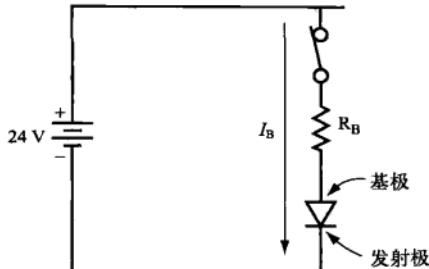


图 4-4

问题

- A. 基-射极二极管上的压降是多少?
- B. R_B 上的压降是多少?

答案

- A. 0.7V, 因为这是硅晶体管。
- B. 如果忽略0.7V, 就是24V; 如果不忽略, 则是23.3V。

7 下一步是计算 R_B 。流过 R_B 的电流为基极电流 I_B , 并且你已在问题 6 中计算出了电阻两端的电压。

问题

计算 R_B 。

答案

$$R_B = \frac{23.3V}{1mA} = 23\ 300\Omega$$

最终的电路如图 4-5 所示, 其中包括计算出来的电流值和电阻值。

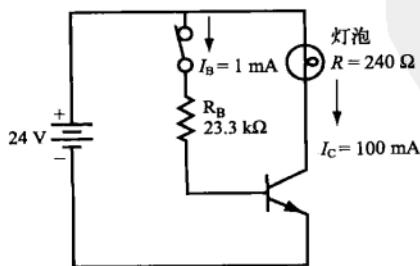


图 4-5

8 请根据下列步骤计算晶体管导通时所需的 I_B 和 R_B 值。

- (1) 确定所需的集电极电流。
- (2) 确定 β 值。
- (3) 根据步骤(1)和步骤(2)的结果计算所需的 I_B 。
- (4) 计算所需的 R_B 。
- (5) 画出最终的电路。

下面，假设 $V_S = 28V$ ，所用的灯泡需要 $50mA$ 电流， $\beta = 75$ 。

问题

- A.** 计算 I_B 。
B. 确定 R_B 。

答案

A. 已知集电极电流和 β 。因此

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{50mA}{75} = 0.667mA$$

B. $R_B = \frac{28V}{0.667mA} = 42k\Omega$

计算时忽略了 V_{BE} 。

9 下面，假设 $V_S = 9V$ ，所用的灯泡需要 $50mA$ 电流， $\beta = 75$ 。

问题

计算 R_B 。

答案

$$R_B = 31.1k\Omega$$

计算时考虑了 V_{BE} 。

10 实际中，如果供电电压远大于基-射结上的压降 $0.7V$ ，那么就可以忽略这 $0.7V$ 压降，并假设供电电压全部都施加在基极电阻 R_B 上，从而简化运算。(大多数电阻的精度只有 $\pm 5\%$ 。)但是，如果供电电压小于 $10V$ ，那么就不能忽略基-射结上的这 $0.7V$ 压降。

问题

计算下列问题的 R_B ，如果可以的话，就忽略基-射结上的压降。

- A.** 电压为 $10V$ ，灯泡电流为 $10mA$ 。 $\beta = 100$ 。
B. 电压为 $5V$ ，灯泡电流为 $100mA$ 。 $\beta = 50$ 。

答案

A. $I_B = \frac{10\text{mA}}{100} = 0.1\text{mA}$

$$R_B = \frac{10\text{V}}{0.1\text{mA}} = 100\text{k}\Omega$$

B. $I_B = \frac{100\text{mA}}{50} = 2\text{mA}$

$$R_B = \frac{5\text{V} - 0.7\text{V}}{2\text{mA}} = \frac{4.3\text{V}}{2\text{mA}} = 2.15\text{k}\Omega$$

4.2 晶体管的关断

11 到目前为止，已经研究完了晶体管的导通问题，其功能就像闭合的机械开关。下面将学习晶体管的关断问题，其功能就像断开的机械开关。如果晶体管是断开的，那么就没有电流流过负载（即集电极电流为零）。

问题

- A. 当开关断开时，其两端电压是相同的还是不同的？
- B. 当开关断开时，开关上是否有电流流过？
- C. 对于关断的晶体管来说，其功能就像断开的开关，此时需要多大的基极电流？

答案

A. 开关两端的电压不同，一端等于供电电压，另一端等于地电压。

B. 没有。

C. 当基极电流为零时，晶体管就被关断。

12 可以肯定的是，当图 4-6 所示电路的机械开关断开时，基极电流为零。

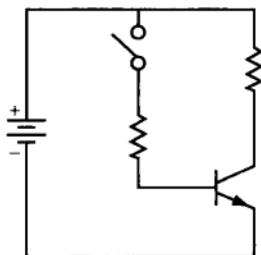


图 4-6

当基极未接供电电压时，为了确保晶体管保持关断，可以在电路中增加一个电阻（如图 4-7 中的 R_2 ）。通过该电阻，晶体管的基极就与地即 0V 相接。因此，基极不可能出现电流。

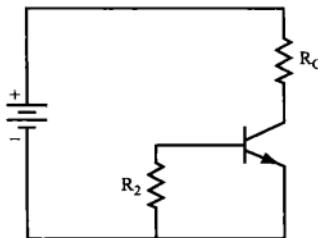


图 4-7

问题

- A. 为什么没有电流从电源流向基-射结?
- B. 从集电极流向基极的电流有多大?
- C. 为什么没有电流从集电极流向基极然后又通过 R_2 流向地呢?
- D. 为什么安装 R_2 后晶体管基极的电压为 0V?

答案

- A. 由于没有从电源至基-射结的电流通路, 所以没有电流。
- B. 根本没有电流。
- C. 晶体管的内部结构决定了不可能有该电流, 因为集-基结其实相当于反偏二极管。
- D. 由于没有电流流过 R_2 , 因此 R_2 上无压降, 由此可知晶体管的基极相当于接地 (0V)。

13 由于 R_2 上没有电流流过, 所以可选的电阻阻值范围很大。实际中, 通常选择 R_2 阻值为 $1k\Omega \sim 1M\Omega$ 。

问题

下列哪些电阻可使晶体管关断? 1Ω , $2k\Omega$, $10k\Omega$, $50k\Omega$, $100k\Omega$, $250k\Omega$, $500k\Omega$ 。

答案

除了 1Ω 外, 其他都可以。因为其他电阻值都位于 $1k\Omega \sim 1M\Omega$ 范围内。

14 图 4-8 所示电路同时用到 R_1 和 R_2 。请注意该电路包含一个双掷开关, 可以利用它来打开或关断晶体管。

问题

- A. 如图 4-8 所示状态, 晶体管是导通的还是关断的?
- B. 在位置 A 还是位置 B 时, 集电极电流为 0A?

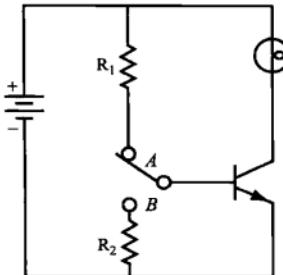


图 4-8

答案

- A. 导通。由于基-射极正偏，所以存在基极电流。
 B. 位置B即基极接地时。此时没有基极电流，因此晶体管关断。

4.3 为何将晶体管用作开关

15 可以将晶体管当作开关来使用，以实现简单的控制，比如打开或者关闭电灯。尽管这通常是由机械开关实现的，但有时也用晶体管实现。

下面的示例可以说明在电路中使用晶体管作为开关的优点。

- **示例 1**——假设不得不将电灯放置于危险环境中，比如放射室。显然，电灯的控制开关应置于安全的地方。你可以通过位于放射室外的开关来闭合或断开晶体管开关。
- **示例 2**——如果开关控制的设备需要大电流，那么该电流必然要流过开关和灯泡间的导线中。由于晶体管开关可以用低压和小电流来闭合或断开，所以可以接一个机械开关来闭合或断开晶体管开关，从而利用通有低压小电流的导线来控制更大的电流。如果机械开关与被控设备相距较远，那么使用低压导线还能节省时间和成本。
- **示例 3**——控制导线中的大电流的主要困难在于，相邻导线间会出现感生干扰。这对通信设备（比如无线电接收机）来说就是灾难。为了避免出现这种情况，可以使用晶体管远程控制大电流，从而减小位于无线电接收机处的开关所需的电流。
- **示例 4**——在移动设备中（比如无线电遥控飞机），常使用晶体管开关以降低所需的功耗、重量和体积。

问题

上述示例中的哪些特点促使了要采用晶体管开关？

答案

晶体管的开关动作直接受控于电信号，该电信号也由基本电路中的机械开关产生。这给设计带来了很大的灵活性，并能实现简单的电子控制。此外，晶体管开关还具有安全、干扰小、可远程控制以及设计成本更低等优点。

16 下列关于晶体管开关的示例反应了使用晶体管的其他原因。

- **示例 1**——晶体管的导通和关断时间可以精确地控制，而机械开关则不是很精确。这个特性在某些应用中极为重要，比如摄影时，需要对底片曝光或者照亮某个物体一段精确的时间。在这类应用中，晶体管比其他器件更精确，可控性更好。
- **示例 2**——晶体管可以在 1 s 中导通或关断数百万次，并能够使用很多年。事实上，晶体管是迄今已知的寿命最长、最可靠的元件，而机械开关通常使用数千次后就会失效。
- **示例 3**——大多数工业控制设备产生的信号都是数字的。这些控制信号都是简单的高、低电平，它们都是控制晶体管开关的理想信号。
- **示例 4**——现代制造技术在极大程度上将晶体管小型化了，如今可以在单个硅芯片上制造出很多个（甚至多达数百万个）小型晶体管。含有晶体管（以及其他电子元件）的硅芯片被称为集成电路（Integrated Circuit, IC）。IC 的外型扁平，并具有黑色塑料外壳。如今几乎所有批量生产的电子设备中都包含 IC，这也是电子设备越来越小、越来越轻的原因。

问题

除了前一个问题提到的，本问题的各示例中又展示出晶体管的哪些特性？

答案

晶体管可以精确控制，能高速运行，可靠、长寿命、小尺寸、低功耗、批量生产成本低，尺寸极小。

17 本问题要考虑如何利用一个晶体管导通或关断另一个晶体管，并用第二个晶体管控制灯泡或者其他负载。（这个问题在 4.4 节还将展开讨论。）

如果需要控制多个大电流负载，那么可以用一个开关同时控制多个晶体管。

问题

A. 增加开关后，流过主开关的电流比流过负载的电流大还是小？

B. 你认为增加的晶体管会对下列方面有何影响？

- (1) 安全性
- (2) 操作的方便性
- (3) 操作的效率和平滑性

答案

A. 流过主开关的电流比流过负载的小。

B. (1) 安全性增加，可以在危险环境之外操作。

(2) 可以在控制台上将开关放在一起，或者其他便于操作的地方，而不必将开关放在被控对象所在的位置。

(3) 一个开关可以启动很多东西，比如电视台或者剧院的灯光主控制台。

18 本问题将检查你对问题 15~问题 17 中所涉及概念的理解情况。

问题

请指出下列哪些是使用晶体管作为开关的有利因素。

- A. 为了打开/关闭位于危险或者难以到达的环境的设备
- B. 为了控制极小电流或者极低电压
- C. 为了减小可能引入通信或者其他电路的电气噪声
- D. 为了增加控制开关的数量
- E. 为了使用比机械开关更快、更可靠的设备

答案

A、C和E。

19 很多类型的电子电路都包含多个开关晶体管。在这类电路中，其中一个晶体管用于控制其他晶体管的导通和关断。为了说明它是如何工作的，将再次研究以灯泡为负载、以机械开关为激励元件的电路。图 4-9 所示电路就用了两个晶体管来控制灯泡的亮灭。

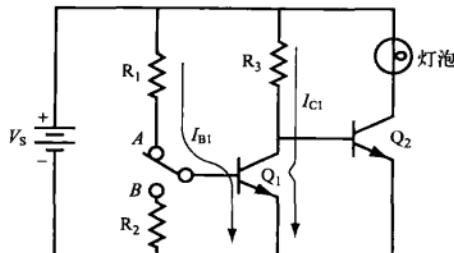


图 4-9

当开关位于位置 *A* 时， Q_1 的基-射结正偏。因此，基极电流 (I_{B1}) 将流过 R_1 以及 Q_1 的基-射极二极管，从而使晶体管导通。这将导致集电极电流 (I_{C1}) 流过 Q_1 再到地，因此集电极电压降至 0V，就好像 Q_1 是闭合的开关一样。由于 Q_2 的基极与 Q_1 的集电极相连，所以 Q_2 的基极电压也降至 0V。这就能确保 Q_2 关断，灯泡熄灭。

现在，将开关拨至位置 *B*，正如图 4-10 所示。 Q_1 的基极与地相接（即为 0V）， Q_1 关断。因此，没有集电极电流流过 Q_1 。 Q_2 的基极有正电压，于是 Q_2 的射-基结正偏。这样就有电流流过 R_3 和 Q_2 的射-基结，因此 Q_2 导通，其集电极电流 (I_{C2}) 流过灯泡并使之发光。

在阅读了有关电路工作原理的描述后，请试着回答下列问题。首先假设开关位于位置 *A*，如图 4-9 所示。

问题

- A. I_{B1} 对 Q_1 有何影响？

B. Q_1 导通对下列各项有何影响?

- (1) 对集电极电流 I_{C1} 。
- (2) 对集电极电压 V_{C1} 。

C. 改变前面问题涉及的 V_{C1} 对下列各项有何影响?

- (1) Q_2 的基极电压。
- (2) 晶体管 Q_2 (即它是导通还是关断的)。

D. 流过 R_3 的电流去哪儿了?

E. 本电路中的灯泡是亮还是灭?

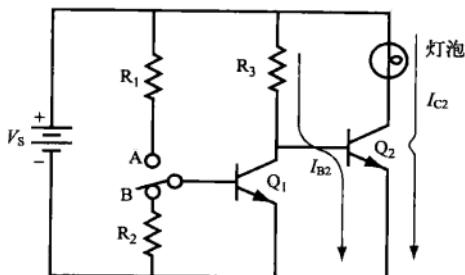


图 4-10

答案

- A. I_{B1} 与 V_s (如果是硅晶体管, 那么就是 0.7V) 成正比, 它能使 Q_1 导通。
- B. (1) I_{C1} 流动; (2) V_{C1} 降至 0V。
- C. (1) Q_2 的基极降至 0V; (2) Q_2 关断。
- D. I_{C1} 流经 Q_1 至地。
- E. 灭。

20 下面, 假设开关位于位置 B, 如图 4-10 所示, 请回答下列问题。

问题

- A. 有多少 I_{B1} 流入 Q_1 ?
- B. Q_1 是导通的还是关断的?
- C. 哪个电流流过 R_3 ?
- D. Q_2 是导通的还是关断的?
- E. 本电路中的灯泡是亮还是灭?

答案

- A. 根本没有
- B. 关断
- C. I_{B2}
- D. 导通
- E. 亮

21 请参阅图 4-9 和图 4-10 中的电路。下面，假设供电电压为 10V，请回答下列问题。

问题

- A. 流过 R_3 的电流是否被 Q_1 和 Q_2 分流？请解释原因。
- B. 开关在不同位置时， Q_2 的集电极电压分别是多大？
- C. 开关在不同位置时， Q_1 的集电极电压分别是多大？

答案

- A. 没有。如果 Q_1 导通，那么所有电流都流经 Q_1 至地，并成为集电极电流。如果 Q_1 关断，那么所有电流都流过 Q_2 的基极，并成为基极电流。
- B. 在位置 A 时，由于 Q_2 是关断的，所以其集电极电压等于 10V。
在位置 B 时，由于 Q_2 是导通的，所以其集电极电压等于 0V。
- C. 在位置 A 时，由于 Q_1 是导通的，所以其集电极电压等于 0V。
在位置 B 时，由于 Q_2 的基极与 Q_1 的集电极并联，所以 Q_1 的集电极电压等于 Q_2 的正偏基-射结上的压降。正偏基-射结上的压降不会升至 10V，而如果 Q_2 是硅材料制成的，最高不超过 0.7V。

22 下面请计算电路中的 R_1 、 R_2 和 R_3 。该过程与前面的类似，但是必须将其拓展至计算第二个晶体管。与问题 8 中采用的步骤类似，请按照下列步骤计算 R_1 、 R_2 和 R_3 。

- (1) 确定负载电流 I_{C2} 。
 - (2) 确定 Q_2 的 β ，记为 β_2 。
 - (3) 利用公式 $I_{B2} = I_{C2}/\beta_2$ 计算 Q_2 的 I_{B2} 。
 - (4) 利用公式 $R_3 = V_S/I_{B2}$ 计算产生该基极电流所需的 R_3 。
 - (5) 当 Q_1 导通时， R_3 还是 Q_1 的负载。因此， Q_1 的集电极电流 (I_{C1}) 与第(3)步计算出的 Q_2 的基极电流相等。
 - (6) 确定 Q_1 的 β 值 β_1 。
 - (7) 利用公式 $I_{B1} = I_{C1}/\beta_1$ 计算 Q_1 的基极电流。
 - (8) 利用 $R_1 = V_S/I_{B1}$ 求出 R_1 。
 - (9) 选择 R_2 。为了方便起见，令 $R_2 = R_1$ 。
- 继续使用图 4-11 所示电路。取值如下：
- 10V 灯泡上流过 1A 电流，因此 $V_S = 10V$ ， $I_{C2} = 1A$ ；
 - $\beta_2 = 20$ ， $\beta_1 = 100$ 。
 - 忽略晶体管上的压降。

问题

计算下列值。

- A. 按照第(3)步计算出 I_{B2} 。

- B. 按照第(4)步计算出 R_3 。
- C. 按照第(5)步计算 Q_1 导通时的负载电流。
- D. 求出 Q_1 的基极电流。
- E. 按照第(8)步求出 R_1 。
- F. 选择合适的 R_2 。

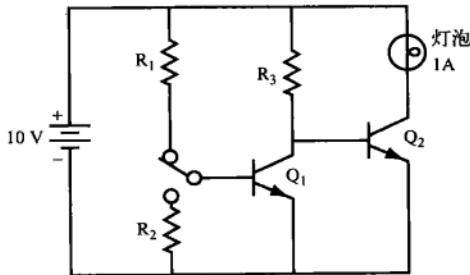


图 4-11

答案

根据前面的步骤计算结果如下。

A. (1) $I_{C2} = 1A$ 。

(2) $\beta_2 = 20$ (已知)。这是能够承受1A电流的晶体管的典型值。

(3) $I_{B2} = \frac{1A}{20} = 50mA$

B. (4) $R_3 = \frac{10V}{50mA} = 200\Omega$

请注意，这里忽略了基-射结间的0.7V压降。

C. (5) $I_{C1} = I_{B2} = 50mA$

D. (6) $\beta_1 = 100$

(7) $I_{B1} = \frac{50mA}{100} = 0.5mA$

E. (8) $R_1 = \frac{10V}{0.5mA} = 20k\Omega$

再次忽略了基-射结间的0.7V压降。

F. (9) 方便起见， R_2 可取为与 R_1 相等的值 ($20k\Omega$)。这样可以减少电路中的元件种类。元件的种类越少，需要记住的元件型号也越少。当然，可以选择 $1k\Omega$ ~ $1M\Omega$ 范围内的任意值。

23 请采用相同的步骤并利用图 4-11 所示的相同电路求解本示例。假设使用的是 28V 灯泡，其通电电流为 560mA， $\beta_2 = 10$ 且 $\beta_1 = 100$ 。

问题

计算下列值：

A. $I_{B2} =$ _____

B. $R_3 =$ _____

C. $I_{C1} =$ _____

D. $I_{B1} =$ _____

E. $R_1 =$ _____

F. $R_2 =$ _____

答案

A. 56mA

B. 500Ω

C. 56mA

D. 0.56mA

E. $50k\Omega$

F. 可选 $50k\Omega$

4.4 三晶体管开关

24 图 4-12 所示电路采用 3 个晶体管来导通或关断负载。在该电路中 Q_1 用于控制 Q_2 , Q_2 又用于控制 Q_3 。计算过程与前面几个问题类似，只是需要多加几步以处理第三个晶体管。请利用本电路回答以下问题。

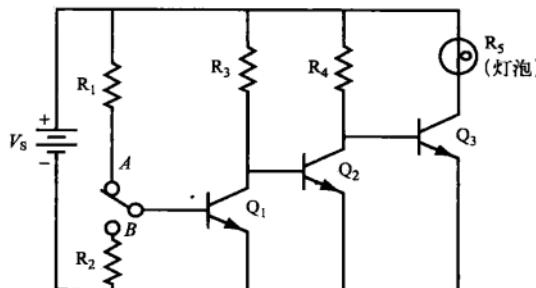


图 4-12

问题

如果开关位于位置 A：

A. Q_1 是导通还是关断的？

B. Q_2 是导通还是关断的？

C. 经过 R_4 的电流流向何处？

D. Q_3 是导通还是关断的？

答案

A. 导通

B. 关断

C. 流入 Q_3 的基极

D. 导通

25 下面请使用与问题 24 相同的电路求解本题。

问题

如果开关位于位置 B：

- A. Q_1 是导通还是关断的？
- B. Q_2 是导通还是关断的？
- C. 经过 R_4 的电流流向何处？
- D. Q_3 是导通还是关断的？
- E. 开关位于何处可以点亮灯泡？
- F. 三晶体管开关电路中的开关的通/断位置与双晶体管开关电路中的开关的通/断位置有何不同？

答案

A. 关断 B. 导通 C. 通过 Q_2 至地 D. 关断 E. 位置 A

F. 位置相反。因此，如果某一个电路能用两个晶体管控制灯泡，那么另一个电路也能用三个晶体管控制灯泡，拨动控制电路的开关，就能决定点亮哪个灯泡（或者其他负载）。

26 请利用求解问题 22 的双晶体管开关时所用的公式求解本题。计算步骤也是类似的，只是增加了几步，如下所示。

- (1) 确定负载电流。这通常是已知的。
- (2) 确定 Q_3 的电流增益。记为 β_3 ，这通常也是已知的。
- (3) 利用公式 $I_{B3} = I_{C3}/\beta_3$ 计算 I_{B3} 。
- (4) 利用公式 $R_4 = V_S/I_{B3}$ 计算 I_{B3} 。
- (5) 假设 $I_{C2} = I_{B3}$ 。
- (6) 确定 β_2 。这也是已知量。
- (7) 利用公式 $I_{B2} = I_{C2}/\beta_2$ 计算 I_{B2} 。
- (8) 利用公式 $R_3 = V_S/I_{B2}$ 计算 R_3 。
- (9) 假设 $I_{C1} = I_{B2}$ 。
- (10) 找出 β_1 。
- (11) 利用公式 $I_{B1} = I_{C1}/\beta_1$ 计算 I_{B1} 。
- (12) 利用公式 $R_1 = V_S/I_{B1}$ 计算 R_1 。
- (13) 选择 R_2 。

本例采用 10V 灯泡，其工作电流为 10A。假设晶体管生产商提供的数据手册中给出的电流增益分别为 $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 50$, $\beta_3 = 20$ 。请按照步骤，检查计算得到的每一步的答案。

问题

请计算：

- A. $I_{B3} =$ _____
 B. $R_4 =$ _____
 C. $I_{B2} =$ _____
 D. $R_3 =$ _____
 E. $I_{B1} =$ _____
 F. $R_1 =$ _____
 G. $R_2 =$ _____

答案

各步骤的答案分别为

A. (1) 已知负载电流为10A。

(2) 已知 β_3 为20。

$$(3) I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta_3} = \frac{10A}{20} = 0.5A = 500mA$$

$$B. (4) R_4 = \frac{10V}{500mA} = 20\Omega$$

C. (5) $I_{C2} = I_{B3} = 500mA$

(6) 已知 β_2 为50。

$$(7) I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{500mA}{50} = 10mA$$

$$D. (8) R_3 = \frac{10V}{10mA} = 1k\Omega$$

E. (9) $I_{C1} = I_{B2} = 10mA$

(10) 已知 β_1 为100。

$$(11) I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{10mA}{100} = 0.1mA$$

$$F. (12) R_1 = \frac{10V}{0.1mA} = 100k\Omega$$

G. (13) R_2 也可选为100kΩ。

27 在相同电路条件下, 请确定当采用75V灯泡且工作电流为6A时的参数。假设 $\beta_3 = 30$, $\beta_2 = 100$, $\beta_1 = 120$ 。

问题

请根据问题26中的步骤计算下列值:

- A. $I_{B3} =$ _____
 B. $R_4 =$ _____
 C. $I_{B2} =$ _____

D. $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$

E. $I_{B1} = \underline{\hspace{2cm}}$

F. $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

G. $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. 200mA B. 375Ω C. 2mA D. $37.5k\Omega$

E. $16.7\mu A$ F. $4.5M\Omega$ G. 选择 $R_2 = 1M\Omega$

4.5 交错基极开关

28 在晶体管开关电路的示例中，实际的开关过程是由位于第一个晶体管基极处的小机械开关完成的。该开关有3个端口，可以从位置A移动到位置B。（这是一个单刀双掷开关。）该开关并不像普通的ON-OFF开关那样定义了ON和OFF位置。

问题

为什么本例中不能使用普通的双端口ON-OFF开关？

答案

如图4-12所示，ON-OFF开关要么是断开的要么就是闭合的，它无法在位置A和位置B之间切换。

29 如果将 R_1 、 R_2 和开关接成图 4-13 所示的电路，那么就可以使用普通的双端口 ON-OFF 开关。（这是一个单刀双掷开关。）

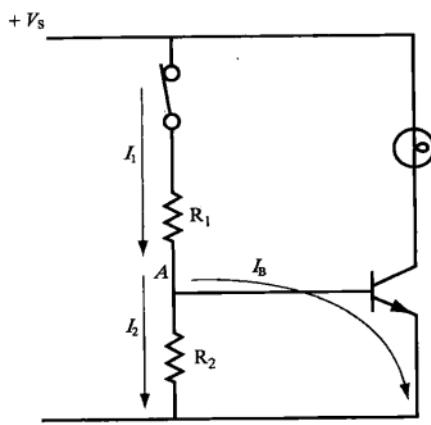


图 4-13

问题

- A. 当开关断开时, Q_1 是导通的 (ON) 还是关断的 (OFF) ?
 B. 当开关闭合时, 灯泡是亮的 (ON) 还是灭的 (OFF) ?

答案

- A. 关断的 (OFF) B. 亮的 (ON)

30 当开关闭合时, 电流将流过 R_1 。然而, 在图 4-13 所示的 A 点, 电流被分为两个通路。一条是基极电流 I_B , 另一个记为 I_2 。

问题

如何计算总电流 I_1 ?

答案

$$I_1 = I_B + I_2$$

31 接下来的问题是选择 R_1 和 R_2 , 使得当电流被分流后, 有足够的基极电流使 Q_1 导通 (ON)。

问题

举一个简单的例子。假设负载是 10V 灯泡, 其工作电流为 100mA, $\beta = 100$ 。请计算所需要的基极电流。

答案

$$I_B = \frac{100\text{mA}}{100} = 1\text{mA}$$

32 当 I_1 流过 R_1 后, 必须分成两部分, 其中一部分成为 I_B , 大小为 1mA, 其余部分成为 I_2 。这里的难点是 I_1 和 I_2 的取值都不唯一。换句话说, 可以指定它们为任意值。唯一的约束是都要保证有 1mA 电流流入 Q_1 的基极。

这两个值可以任意选取。根据实际经验, 通常取 I_2 为 I_B 的 10 倍。这样能确保电路可靠地工作, 并容易计算。

$$I_2 = 10I_B$$

$$I_1 = 11I_B$$

问题

在问题 31 中, 已经确定 $I_B = 1\text{mA}$ 。请问 I_2 等于多少?

答案

$$I_2 = 10 \text{mA}$$

33 下面就可以计算出 R_2 。 R_2 上的电压等于 Q_1 的基—射结上的压降。假设本电路采用硅晶体管，那么该压降等于 0.7V。

问题

A. R_2 等于多少？

B. R_1 等于多少？

答案

A. $R_2 = \frac{0.7 \text{V}}{10 \text{mA}} = 70 \Omega$

B. $R_2 = \frac{10 \text{V} - 0.7 \text{V}}{11 \text{mA}} = \frac{9.3 \text{V}}{11 \text{mA}} \approx 800 \Omega$

此时可以忽略 0.7V，从而得到 $R_1 = 910 \Omega$ 。

34 问题 33 计算出的电阻值能保证晶体管导通，并有 100mA 电流 (I_C) 流过灯泡和晶体管上，从而点亮灯泡。标上参数的电路图如图 4-14 所示。

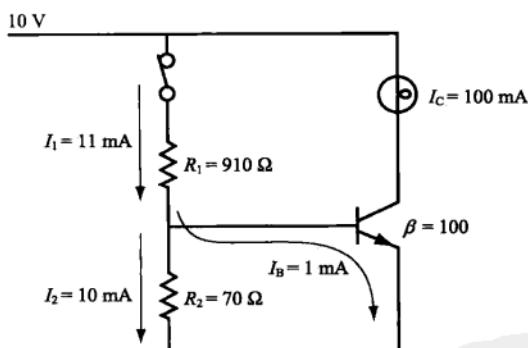


图 4-14

问题

对于下列每个灯泡，采用与上述问题相同的计算过程，得出 R_1 和 R_2 的值。

A. 28V 灯泡工作电流 56mA。 $\beta = 100$ 。

B. 12V 灯泡工作电流 140mA。 $\beta = 50$ 。

答案

A. $I_B = \frac{56\text{mA}}{100} = 0.56\text{mA}$

$$I_2 = 5.6\text{mA}$$

$$R_2 = \frac{0.7\text{V}}{5.6\text{mA}} = 125\Omega$$

$$R_1 = \frac{28\text{V}}{6.16\text{mA}} = 4.5\text{k}\Omega$$

B. $R_2 = 25\Omega$

$$R_1 = 400\Omega$$

35 任意选取使得 I_2 为 I_B 的 10 倍显然值得商榷，甚至会遭到怀疑和反对。晶体管并非精密器件，它们彼此间都有差异。通常，即使是相同型号的晶体管，但由于在元件生产时的公差变化，也会导致各元件的 β 值不同。这就给晶体管电路的设计与分析带来一定的误差。事实上，如果真的遵守严格的数学规则，那么就会把事情复杂化。实际上，人们已经总结了很多“经验”来帮助做出必要的假设。可用这些经验得出简单的公式，用它们就能算出可用的元件值，以便在设计的电路中使用。

选取 $I_2 = 10I_B$ 就是个经验公式。难道这是使电路工作的唯一选择吗？当然不是。几乎所有能使 I_2 至少是 I_B 的 5 倍的取值都能使该电路工作，但是最好选 10 倍，理由有 3 条：

- 这是一个很好的实用选择，它能使电路工作；
- 能简化数学运算；
- 不太复杂，避免了不必要的计算。

问题

在问题 32 中， $I_B = 1\text{mA}$ ， $I_2 = 10\text{mA}$ 。请问 I_2 取下列哪些值也能使电路有效地工作？

- A. 5mA B. 8mA C. 175mA D. 6.738mA E. 1mA

答案

可选择 A、B 和 D。C 选项的值太大，而 E 选项的值太小，都不是明智的选择。

36 在继续学习本章前，请回答下列问题作为复习。

问题

- A. 晶体管开关和机械开关哪个更快？
- B. 哪个能更加精确地控制？
- C. 哪个更易于远程操作？
- D. 哪个更可靠？
- E. 哪个寿命更长？



答案

A. 晶体管更快 B. 晶体管 C. 晶体管 D. 晶体管

E. 由于晶体管不包含移动装置，因此工作寿命比机械开关长得多。机械开关在操作数千次后就会失效，而晶体管则能每秒开关数百万次，并持续工作很多年。

4.6 结型场效应管的导通与关断

37 下面几个问题讨论如何将结型场效应管（JFET）当作开关使用。你可能需要重读本书第3章的问题29~问题32，来复习JFET的相关知识。

JFET可看作“常闭”型器件，因为即使在其输入端（称为门级）施加0V，它也能导通，并且有电流流过晶体管。当在门级施加一定电压时，由于漏极至源极沟道的电阻增大，器件的导通电流就减小。此时，随着门级电压的增加，沟道电阻可能变得很大以至于器件“切断”电流的流动。

问题

- A. JFET的3个端口分别叫什么名字，哪个端口控制器件的运行？
 B. 怎样才能导通或关断JFET？

答案

- A. 漏极、源极和门级，其中门级是控制端。
 B. 当门级电压为0V时（与源极的电位相等），JFET导通。当门级至源极的电压差较大时，JFET关断。

4.7 结型场效应管实验

38 下面实验的目标是，根据图4-15所示电路，确定JFET完全导通时的漏极电流以及完全关断JFET所需的门极电压。通过调整电位计能改变门极电压（即门极与源极间的电压差 V_{GS} ），并测量出对应的从漏极流往源极的电流(I_D)。当JFET关断时， I_D 等于零，当JFET完全导通时， I_D 达到其最大值（记为 I_{DSS} ）。

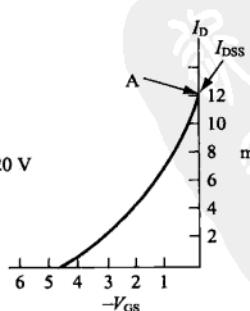
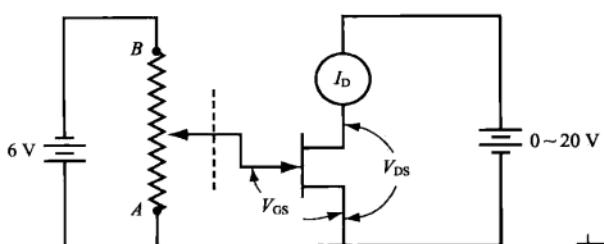


图 4-15

你需要以下设备和电源：

- 1 块 6V 电池；
- 1 块 12V 电池（或者实验室电源）；
- 1 块测量电流的万用表；
- 1 块测量电压的万用表；
- 1 个 JFET 管；
- 1 个电位计（任何阻值的电位计都可以，但是最好使用 $10\text{ k}\Omega$ 的电位计）；
- 1 块面包板。

如果没有条件搭建电路并测量，那么请通读本实验。

请依照下列步骤完成本实验。

(1) 在面包板上搭建图 4-15 所示电路，将漏极电路的供电电压设为 12V。

(2) 将电位计设置为 0Ω ，读取 V_{GS} 和 I_D 的读数，并记录在下表中。

V_{GS}	I_D	V_{GS}	I_D

(3) 增大电位计的电阻，再次读取 V_{GS} 和 I_D 的读数并记录。重复此步骤，直至 I_D 下降为 0mA 。

(4) 在图 4-15 右图中绘出记录的点，其中纵坐标为 I_D ，横坐标为 V_{GS} 。通过这些点绘出曲线。

将电位计调至 A 点 (0Ω)，此时门极至源极的电压为零 ($V_{GS} = 0$)。JFET 的漏极至源极的电流达到最大值，该电流被称为饱和电流 (I_{DSS})。

在图 4-15 右图中，A 点代表饱和点。该图显示出 JFET 的传递曲线，这是 JFET 数据手册中的特征曲线之一。

注意 如果用实验室电源为漏极电路供电，那么请将电源的输出电压设置为 12V。饱和曲线的特征之一是当 V_{GS} 等于零时，晶体管完全导通，只要 V_{DS} 稍大于零，那么流过管子的电流就不会下降。如果有可调电源，那么就从 12V 开始调整，确定出 V_{DS} 达到何值时 I_D 开始下降。当减小电源电压时请始终观察 I_D 的值，直至看到 I_D 开始下降。

问题

请利用上述传递曲线，回答下列问题。

- A. 当 $V_{GS} = 0$ 时，漏极电流是多少？
- B. 为何该电流被称为漏极饱和电流？
- C. 图中所示的门极至源极的关断电压是多少？
- D. 为何被称为关断电压？

答案

- A. 图中所示为12mA。
 B. 饱和用于表示电流已达到最大值。
 C. 图中近似为-4.2V。
 D. 被称为关断电压的原因是此时对应的漏极电流为0A。

39 下面请看图 4-16 所示电路。假设 JFET 的传输特性如图 4-15 中的曲线所示。

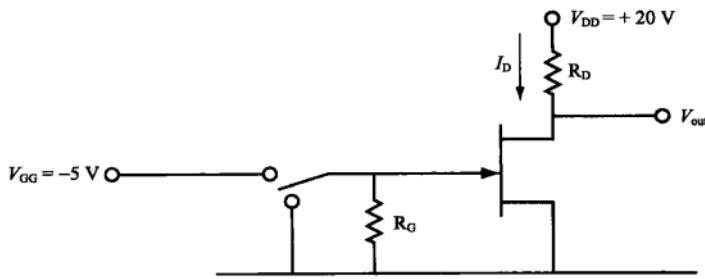


图 4-16

当门极与地相连时，漏极电流达到 12mA。假设漏极至源极电阻可以忽略，请利用下列公式计算所需的 R_D 。

$$R_D = \frac{V_{DD}}{I_{DSS}}$$

如果知道漏极至源极的电压，那么可以在计算时考虑它。

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_{DSS}}$$

问题

曲线中 A 点的 I_{DSS} 所对应的 R_D 值是多少？

答案

$$R_D = \frac{20V}{12mA} = 1.67k\Omega$$

40 对于图 4-16 所示的 JFET 电路，假设当 I_D 达饱和值时 $V_{DS} = 1V$ 。

问题

- A. 所需的 R_D 值是多少？
 B. 饱和时漏极至源极的等效电阻 r_{DS} 是多少？

答案

$$A. R_D = \frac{20V - 1V}{12mA} = 1583\Omega$$

$$B. r_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_{DSS}} = \frac{1V}{12mA} = 83\Omega$$

注意 从计算结果可以得出 R_D 是 r_{DS} 的 19 倍。因此，忽略 V_{DS} 并假设 $r_{DS}=0$ 并不会明显影响 R_D 的值。 R_D 的理论值 $1.67k\Omega$ 只比上述计算结果 1583Ω 大 5%。

41 下面将研究 JFET 的关断。从图 4-15 所示曲线中可以看出，所需的关断电压为 $-4.2V$ 。令门极至源极电压为 $-5V$ 就能确保 JFET 处于“关断”状态。电阻 R_G 的作用是确保在翻转开关改变门极电压过程中，门极接地。这里使用 $1M\Omega$ 的大电阻能防止门极电源出现明显的电流。

问题

当门极电位为 $-5V$ 时，漏极电流和对应的输出电压是多少？

答案

$$I_D = 0A, V_{out} = V_{DS} = 20V, \text{ 即等于 } V_{DD}.$$

4.8 小结

本章学习了晶体管开关以及计算晶体管开关电路中的电阻值的方法。

- 我们以灯泡负载为例，因为灯泡能够可视化地演示开关动作。本章的所有电路都可以在面包板上实现，得到的电压和电流测量值也与书中的非常接近。
- 你还未学习完有关晶体管开关的所有内容。比如，你还不知道如何计算晶体管在不烧毁的情况下能通过的最大电流、能承受的最大电压以及开关速度。上述信息可以从晶体管各自的数据手册中得到，因此本书不作介绍。
- 当将 JFET 用作开关时，其开关速度不如 BJT 快，但是其输入阻抗大，因此也有一定优点，比如 JFET 工作时无需从控制电路获取电流。相反地，BJT 则因为输入阻抗较小，所以要从控制电路获取一定的电流。

4.9 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

对于前 3 个问题，请参阅图 4-17。目标是求出能使晶体管导通的 R_B 值。正如你所知道的，

电阻都被制成了“标准值”。当求出精确值后，请根据附录 D 找出最接近的标准电阻值。

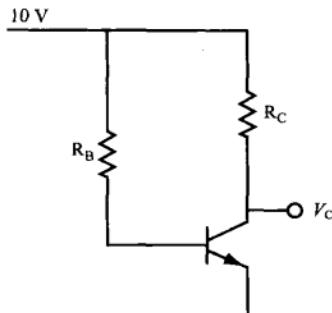


图 4-17

$$(1) R_C = 1\Omega, \beta = 100, R_B = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$(2) R_C = 4.7k\Omega, \beta = 50, R_B = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$(3) R_C = 22k\Omega, \beta = 75, R_B = \underline{\hspace{2cm}}$$

求解决问题(4)~问题(6)时，请参阅图 4-18。请求出 R_3 、 R_2 和 R_1 ，确保在开关位于相应位置时 Q_2 能导通或关断。请按照规定的顺序求出各电阻值。求出精确值后，请选择最接近的标准电阻值。

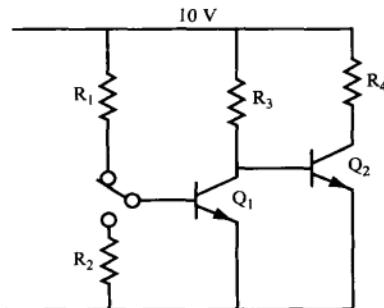


图 4-18

注意 你应当意识到，如果在解题过程中舍入，或者对最终结果舍入，就会得到稍微不同的结果。

$$(4) R_4 = 100\Omega, \beta_1 = 100, \beta_2 = 20.$$

$$(5) R_4 = 10\Omega, \beta_1 = 50, \beta_2 = 20.$$

$$(6) R_4 = 250\Omega, \beta_1 = 75, \beta_2 = 75.$$

问题(7)~问题(9)，请求出图 4-19 所示电路中的电阻值，以确保开关位于对应位置时， Q_3 能导通或关断。然后选择最接近的标准电阻值。

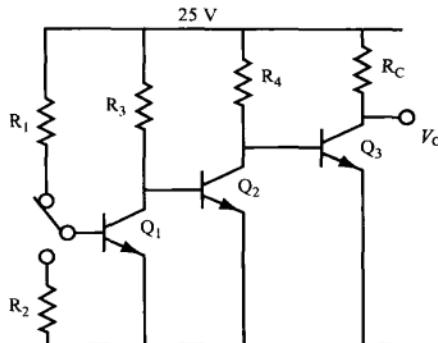


图 4-19

$$(7) R_C = 10\Omega, \beta_3 = 20, \beta_2 = 50, \beta_1 = 100.$$

$$(8) R_C = 28\Omega, \beta_3 = 10, \beta_2 = 75, \beta_1 = 75.$$

$$(9) R_C = 1\Omega, \beta_3 = 10, \beta_2 = 50, \beta_1 = 75.$$

请根据图 4-20 所示电路求解问题(10) ~ 问题(12)。请求出 R_1 和 R_2 ，确保当开关闭合时晶体管导通，当开关断开时晶体管关断。

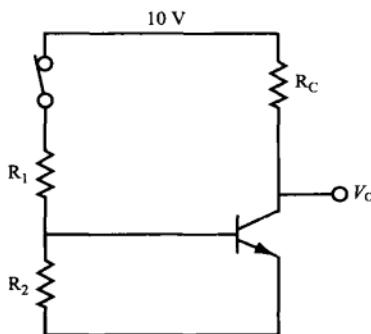


图 4-20

$$(10) R_C = 1k\Omega, \beta = 100.$$

$$(11) R_C = 22k\Omega, \beta = 75.$$

$$(12) R_C = 100\Omega, \beta = 30.$$

(13) N 沟道 JFET 的传输曲线具有如下特性。当 $V_{GS} = 0V$ 时，饱和电流 I_{DSS} 为 $10.5mA$ ，关断电压为 $-3.8V$ 。假设漏极供电电压为 $20V$ 时，请设计偏置电路使得 JFET 能从导通态切换至关断态。

自测题答案

自测题中采用的计算过程代表了实际中的典型情况，即使有时算出的结果比较奇怪也很正常。因此，实际中都选择最接近的标准电阻。如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

(1)	$100k\Omega$	(问题8)
(2)	$235k\Omega$ 。请选择 $240k\Omega$ 的标准电阻	(问题8)
(3)	$1.65M\Omega$ 。请选择 $1.6M\Omega$ 的标准电阻	(问题8)
(4)	$R_3 = 2k\Omega$; $R_1 = 200k\Omega$; $R_2 = 200k\Omega$ 。请选择上述值的标准电阻	(问题22)
(5)	$R_3 = 200\Omega$; $R_1 = 10k\Omega$; $R_2 = 10k\Omega$ 。请选择上述值的标准电阻	(问题22)
(6)	$R_3 = 18.8k\Omega$ 。请选择 $18k\Omega$ 的标准电阻 $R_1 = 1.41M\Omega$ 。请选择 $1.5M\Omega$ 的标准电阻 R_2 取 $1M\Omega$	(问题22)
(7)	$R_4 = 200\Omega$; $R_3 = 10k\Omega$; $R_2 = 1M\Omega$; $R_1 = 1M\Omega$ 。请选择上述值的标准电阻	(问题26)
(8)	$R_4 = 280\Omega$ 。请选择 270Ω 的标准电阻 $R_3 = 21k\Omega$ 。请选择 $22k\Omega$ 的标准电阻 $R_2 = 1.56M\Omega$ 。请选择 $1.5M\Omega$ 或者 $1.6M\Omega$ 的标准电阻 $R_1 = 1.56M\Omega$ 。请选择 $1.5M\Omega$ 或者 $1.6M\Omega$ 的标准电阻	(问题26)
(9)	$R_4 = 10\Omega$ 。请选择 10Ω 的标准电阻 $R_3 = 500\Omega$ 。请选择 510Ω 的标准电阻 $R_2 = 37.5k\Omega$ 。请选择 $39k\Omega$ 的标准电阻 $R_1 = 37.5k\Omega$ 。请选择 $39k\Omega$ 的标准电阻	(问题26)
(10)	$R_2 = 700\Omega$ 。请选择 680Ω 或者 720Ω 的标准电阻 $R_1 = 8.45k\Omega$ 。请选择 $8.2k\Omega$ 的标准电阻 如果忽略 $0.7V$, 则得 $R_1 = 9.1k\Omega$	(问题31~问题33)
(11)	$R_2 = 11.7k\Omega$ 。请选择 $12k\Omega$ 的标准电阻 $R_1 = 141k\Omega$ 。请选择 $140k\Omega$ 或者 $150k\Omega$ 的标准电阻	(问题31~问题33)
(12)	$R_2 = 21\Omega$ 。请选择 22Ω 的标准电阻 $R_1 = 273\Omega$ 。请选择 270Ω 的标准电阻	(问题31~问题33)
(13)	利用图4-16所示电路。将门极电压设置为略低于 $-3.8V$, 如 $-4V$ 。令电阻 $R_G = 1M\Omega$, R_D 等于 $20V/40.5mA$, 计算得 $1.9k\Omega$ 。可以用一个 $1k\Omega$ 串联 910Ω 得到 $1.91k\Omega$ 的电阻	(问题39~问题41)



交流电路知识前测与复习

为了学好电子技术，需要先学习一些有关交流电路的基本知识。而为了掌握交流电路知识，必须先对正弦波有一个基本的了解。

正弦波（sine wave）是一种像海水波浪一样的波形。正弦波在电子技术中用于表示电压或电流的幅度增大或减小。在交流电子技术中，有些信号或者电源（比如墙壁插头上的交流电）都可以用正弦波表示。正弦波能表示电压是如何以每秒 60 周（即 60Hz）的频率先由 0V 变到正的最大值，然后回到 0V，再变到负的最大值。

乐器发出的声音也含有正弦波。将各种声音（比如管弦乐队中各种乐器发出的声音）合在一起，就得到很多不同频率正弦波的组合。

研究交流电路，首先就要研究基本正弦波的特性，然后考察电子电路如何产生或改变正弦波。

本章研究以下内容：

- 信号发生器
- 正弦波
- 峰-峰值电压和均方根（RMS）值电压
- 交流电路中的电阻
- 电容和感抗
- 谐振

5.1 信号发生器

在直流供电的电子电路中，电压源通常采用电池或者太阳能电池，它们能产生固定大小的电压，并通过导体向外提供固定大小的电流。

在交流供电的电子电路或者设备中，电压源通常是信号发生器（generator），它能产生规则的输出波形，比如正弦波。

问题

请画出一个周期的正弦波。

答案

参见图5-1。

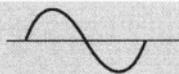


图 5-1

2 实验室的很多电子设备都能产生正弦波。为了方便讨论，这里用的信号发生器就是正弦波源。这些信号发生器允许你通过波动或者按下某个按钮来调整电压和频率。通常根据其产生正弦波的方法或者应用的不同，有各种各样的设备。目前最流行的信号发生器叫作函数信号发生器（function generator）。它能产生方波和三角波等各种函数波形。这些波形可用于测试电子电路。

图 5-2 所示的符号就代表信号发生器。请注意，交流正弦波信号源的符号内绘有一个周期的正弦波。



图 5-2

问题

- 实验室中最流行的用于产生波形的设备叫什么？
- 名词 AC 是什么意思？
- 信号发生器符号内绘有正弦波形代表什么信号源？

答案

- 函数信号发生器。
- 交流，与直流相对应。
- 信号发生器是正弦波信号源。

3 图 5-3 中给出了正弦波的关键参数。两个坐标轴分别是电压和时间。

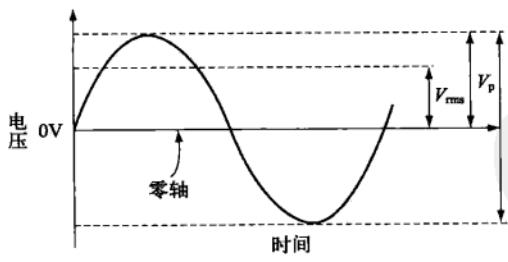


图 5-3

零轴（zero axis）是所有测量电压的参考点。

问题

- 零轴的作用是什么？

B. 通常选择哪个时间点作为测量时刻?

答案

A. 它是所有测量电压的参考点。

B. 时间测量可以在正弦波的任何点进行，但是通常选择在正弦波的过零点进行。

4 有 3 个最重要的电压或幅度测量值，分别是峰值 (peak, p)、峰峰值 (peak-to-peak, pp) 以及均方根值 (root mean square, rms) 电压。

下面的方程显示出正弦波电压的峰值、峰峰值以及均方根的关系。波形不同，对应的峰值、峰峰值以及均方根值电压也不同（比如方波）。

$$V_p = \sqrt{2} \times V_{rms}$$

$$V_{pp} = 2V_p = 2 \times \sqrt{2} \times V_{rms}$$

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{pp}}{2}$$

请注意：

$$\sqrt{2} = 1.414$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

问题

如果正弦波的峰峰值电压为 10V，请求出其均方根值电压。

答案

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{pp}}{2} = 0.707 \times \frac{10}{2} = 3.535V$$

5 请以正弦波为例，完成下列计算。

问题

如果均方根值电压为 2V，请求出峰峰值电压。

答案

$$V_{pp} = 2 \times \sqrt{2} \times V_{rms} = 2 \times 1.414 \times 2 = 5.656V$$

6 请以正弦波为例，完成下列计算。

问题

A. $V_{pp} = 220V$ 。求 V_{rms} 。

- B. $V_{\text{rms}} = 120\text{V}$ 。求 V_{pp} 。

答案

- A. 77.77V
 B. 340V (这是美国市电的供电电压; $340\text{V(pp)} = 120\text{V(rms)}$)

7 正弦波测量也有初始时刻。图 5-4 给出了一段完整的正弦波，称为 1 个周期。其他的测量都是单个周期的一部分或者整数倍。

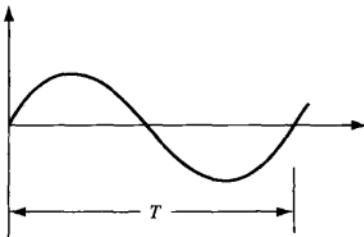


图 5-4

问题

- A. 完整的一段正弦波叫什么?
 B. 完整的一段正弦波对应的时间叫什么?
 C. 正弦波相对该时间的频率是多少?
 D. 频率的单位是什么?
 E. 如果某个正弦波的周期为 0.5ms ，那么其频率多多少？周期为 $40\mu\text{s}$ 的正弦波的频率是多少?
 F. 如果正弦波的频率为 60Hz ，那么其周期是多少？频率为 12.5kHz 或者 1MHz 的正弦波的周期分别是多少？

答案

- A. 单周期
 B. 周期，记为 T
 C. $f = 1/T$
 D. 频率的标准单位是赫兹 (Hz)。1 赫兹等于 1 周/秒
 E. $2\text{kHz}, 25\text{kHz}$
 F. $16.7\text{ms}, 80\mu\text{s}, 1\mu\text{s}$

- 8 请选择合适的答案。

问题

下列哪些可以代表交流电信号?

- A. 基本正弦波
- B. 很多不同频率和振幅的正弦波的混合
- C. 直线

答案

A和B

5.2 交流电路中的电阻

9 和直流电一样,交流电也能流过很多元件。比如,电阻与交流电的关系和它与直流电的关系一样。

问题

假设 10Ω 电阻两端接有 $10V(pp)$ 的交流信号。请问流过电阻的电流是多少?

答案

根据欧姆定律可得

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10V}{10 \Omega} = 1A(pp)$$

由于所给的电压值是峰峰值,因此得到的电流也是峰峰值。

10 20Ω 电阻两端接有 $10V(rms)$ 的交流信号。

问题

请求出电流值。

答案

$$I = \frac{10V}{20 \Omega} = 0.5A(rms)$$

由于所给的电压值是均方根值,因此得到的电流也是均方根值。

11 在图 5-5 所示的分压器电路两端施加 $10V(pp)$ 的交流信号。

问题

求出 V_{out} 。

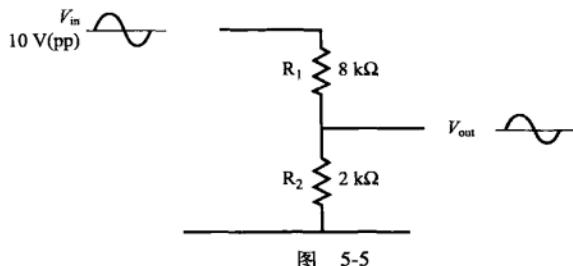


图 5-5

答案

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{2\text{k}\Omega}{8\text{k}\Omega + 2\text{k}\Omega} = 10 \times \frac{2}{10} = 2\text{V(pp)}$$

5.3 交流电路中的电容

12 电容会阻碍交流电的流动。

问题

- A. 阻碍电流流动的东西叫什么？
- B. 它与直流电路中的什么东西类似？

答案

- A. 电抗
- B. 电阻

13 和电阻一样，可以根据公式求出电抗。

问题

- A. 计算电抗的公式是什么？
- B. 公式中的每个符号分别代表什么？
- C. 随着信号频率的增加，电容的电抗如何变化？

答案

A. $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$

B. X_C 代表电容的电抗，单位是欧姆。

f 代表信号的频率，单位是赫兹。

C 代表电容的容值，单位是法拉。

C. 电容的电抗随着信号频率的增大而减小。

14 假设电容为 $1\mu\text{F}$, 信号频率为 1kHz 。

问题

请求出电容的电抗。(注意: $1/(2\pi)$ 近似等于 0.159 。)

答案

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$f = 1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$$

$$C = 1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$$

因此,

$$X_C = \frac{0.159}{10^3 \times 10^{-6}} = 160\Omega$$

15 下面请完成两组简单的计算。每组都要求解电容在 1kHz 时的电抗 X_{C1} 以及在指定频率处的电抗 X_{C2} 。

问题

请求出 X_{C1} 和 X_{C2} 。

- A. $C = 0.1\mu\text{F}$, $f = 100\text{Hz}$ 。
- B. $C = 100\mu\text{F}$, $f = 2\text{kHz}$ 。

答案

A. 在 1kHz 处, $X_{C1} = 1600\Omega$; 在 100Hz 处, $X_{C2} = 16000\Omega$ 。

B. 在 1kHz 处, $X_{C1} = 1.6\Omega$; 在 2kHz 处, $X_{C2} = 0.8\Omega$ 。

由电容和电阻串联而成的电路 (如图 5-6 所示), 其功能类似于分压器。

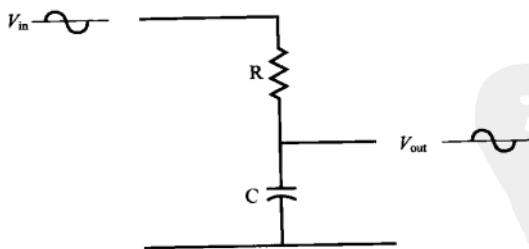


图 5-6

尽管该电路和使用两个电阻的分压器一样, 也能输出较低的电压, 但是这里要更复杂。如果用示波器查看输入和输出波形, 就会看到其中一个相对另一个略有移动。这两个波形被称为“异相位”(out of phase)。相位(phase)是理解某些电路工作原理的重要概念。在第 6 章, 将

学习到一些交流电路的相位关系。还将在学习放大器时遇到它。

5.4 交流电路中的电感

16 电感 (inductor) 是一种绕线线圈，通常在软铁上绕很多圈。有时，也绕在绝缘材料上。

问题

- A. 电感的交流电抗大还是小？为什么？
- B. 电感的直流电阻大还是小？
- C. 电感的交流电抗与直流电阻有什么关系？
- D. 电感的电抗计算公式是什么？

答案

- A. 电感的交流电抗 (X_L) 非常大，原因是线圈周围的电磁场会感应出与原电流相反方向的感生电流。
- B. 电感的直流电阻 (r) 通常非常小，等于线圈导线的电阻。
- C. 没有关系。
- D. $X_L = 2\pi fL$ ，其中 L 是电感量，单位是亨利。由该公式可知，电感的电抗会随着信号频率的增大而增大。

17 假设电感量等于 10 亨利 (H)，信号频率为 100Hz。

问题

请求出电抗值。

答案

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 100 \times 10 = 6280\Omega$$

18 下面请试着完成两道练习题。求出电感在 1kHz 时的电抗 X_{L1} 和在题目中给定频率下的电抗 X_{L2} 。

问题

- A. $L = 1\text{mH}$ (0.001H), $f = 10\text{kHz}$
- B. $L = 0.01\text{mH}$, $f = 5\text{MHz}$

答案

- A. $X_{L1} = 6.28 \times 10^3 \times 0.001 = 6.28\Omega$
- $X_{L2} = 6.28 \times 10 \times 10^3 \times 0.01 = 62.8\Omega$

B. $X_{L1} = 6.28 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-3} = 0.0628\Omega$

$X_{L2} = 6.28 \times 5 \times 10^6 \times 0.01 \times 10^{-3} = 314\Omega$

由电感和电阻串联组成的电路，其功能与电容和电阻串联组成的电路一样，也是分压器。输入和输出电压的关系也并非像阻性分压器那么简单。具体将在第6章讨论。

5.5 谐振

19 求解前面的问题表明：容抗随着频率的增加而减小，感抗随着频率的增加而增加。如果将一个电容和一个电感串联，那么就存在某个频率点使得二者的电抗相等。

问题

A. 该频率点叫什么？

B. 该频率点的计算公式是什么？可以通过令 $X_L = X_C$ 求出该频率。

答案

A. 谐振频率

B. $2\pi f L = 1/(2\pi f C)$ 。整理方程求解 f ，可以由下列公式得出谐振频率 (f_r)：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

20 如果将一个电容与一个电感并联，那么也存在谐振频率。并联谐振电路的分析比串联谐振电路更复杂。原因是电感总含有一定的内阻，这会使计算方程复杂化。然而，在一定条件下，分析过程可以简化。比如，如果电感的电抗是欧姆级的，并且大小是其自身内阻 (r) 的10倍以上，那么谐振频率就和电感与电容串联时的一样。这是一个常用的近似做法。

问题

对于下列电感，请确定其电抗是大于还是小于其内阻的10倍。谐振频率已知。

A. $f_r = 25\text{kHz}$, $L = 2\text{mH}$, $r = 20\Omega$

B. $f_r = 1\text{kHz}$, $L = 33.5\text{mH}$, $r = 30\Omega$

答案

A. $X_L = 314\Omega$ ，大于内阻 r 的10倍。

B. $X_L = 210\Omega$ ，小于内阻 r 的10倍。

注意 第7章将讨论串联和并联谐振电路。到时，将学到更多有用的技术和公式。

21 请求出下列电容和电感串联和并联时的谐振频率。假设 r 可以忽略不计。

问题

请确定 f_r 。

- A. $C = 1\mu\text{F}$, $L = 1\text{H}$
- B. $C = 0.2\mu\text{F}$, $L = 3.3\text{mH}$

答案

$$\text{A. } f_r = \frac{0.159}{\sqrt{10^{-6} \times 1}} = 160 \text{ Hz}$$

$$\text{B. } f_r = \frac{0.159}{\sqrt{3.3 \times 10^{-3} \times 0.2 \times 10^{-6}}} = 6.2 \text{ kHz}$$

22 下面, 请求解最后两个例题。

问题

请确定 f_r 。

- A. $C = 10\mu\text{F}$, $L = 1\text{H}$
- B. $C = 0.0033\mu\text{F}$, $L = 0.5\text{mH}$

答案

$$\text{A. } f_r = 50\text{Hz} \text{ (近似值)}$$

$$\text{B. } f_r = 124\text{kHz}$$

理解谐振对于学习某些电路（比如滤波器和振荡器电路）非常重要。

滤波器 (filter) 是一种能阻挡或者允许特定频带信号通过的电路。滤波器电路常见于收音机、电视机以及其他通信应用中。振荡器 (oscillator) 是一种无需输入信号就能产生连续输出信号的电路。有种振荡器能利用谐振电路产生纯正的正弦波。(在第 9 章将学习振荡器。)

5.6 小结

下面是本章介绍的概念。

- 正弦波在交流电路中应用广泛。
- 最常见的实验室用信号发生器是函数发生器。
- $V_p = \sqrt{2} \times V_{\text{rms}}$, $V_{\text{pp}} = 2\sqrt{2} \times V_{\text{rms}}$
- $f = 1/T$

□ $I_{\text{pp}} = \frac{V_{\text{pp}}}{R}$, $I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R}$

□ 容抗的计算公式为

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

□ 感抗的计算公式为

$$X_L = 2\pi f L$$

□ 谐振频率的计算公式为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

5.7 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后, 请用自测题后的参考答案核对你的答案。

(1) 将下列峰值或峰峰值转换为均方根值:

A. $V_p = 12V$, $V_{\text{rms}} = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V_p = 80mV$, $V_{\text{rms}} = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V_{\text{pp}} = 100V$, $V_{\text{rms}} = \underline{\hspace{2cm}}$

(2) 将下列均方根值转换为需要的值:

A. $V_{\text{rms}} = 120V$, $V_p = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V_{\text{rms}} = 100mV$, $V_p = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V_{\text{rms}} = 12V$, $V_{\text{pp}} = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) 根据已知量, 求周期或者频率:

A. $T = 16.7\text{ms}$, $f = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $f = 15\text{kHz}$, $T = \underline{\hspace{2cm}}$

(4) 对于图 5-7 所示电路, 请求出总电流和 R_2 上的电压 V_{out} 。

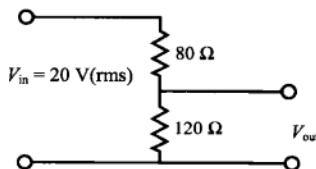


图 5-7

(5) 请求出下列元件的电抗:

A. $C = 0.16\mu\text{F}$, $f = 12\text{kHz}$, $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $L = 5\text{mH}$, $f = 30\text{kHz}$, $X_L = \underline{\hspace{2cm}}$

(6) 请求出能引起谐振的频率:

A. $C = 1\mu\text{F}$, $X_C = 200\Omega$, $f = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $L = 50\mu\text{H}$, $X_L = 320\Omega$, $f = \underline{\hspace{2cm}}$

(7) 如果问题(5)的A和B中的电容和电感串联, 那么其谐振频率是多少?

(8) 如果问题(6)的A和B中的电容和电感并联, 那么其谐振频率是多少? 需要做什么假设?

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同, 请先复习圆括号内注明的问题, 然后再继续学习下一章。

(1)	A.	8.5 V(rms)	(问题4~问题6)
	B.	56.6 V(rms)	
	C.	35.4 V(rms)	
(2)	A.	169.7V(p)	(问题4~问题6)
	B.	141.4mV(p)	
	C.	33.9 V(pp)	
(3)	A.	60Hz	(问题7)
	B.	66.7μs	
(4)		$I_T = 0.1\text{A(rms)}$	(问题9~问题11)
		$V_{\text{out}} = 12\text{V(rms)}$	
(5)	A.	82.9Ω	(问题14~问题17)
	B.	942.5Ω	
(6)	A.	795.8Ω	(问题14~问题17)
	B.	1.02kΩ	
(7)		5.63kHz	(问题19)
(8)		711.8Hz。假设电感器的内阻可以忽略不计	(问题20)



电子技术中的交流信号

大多数电子设备中都有专门处理交流（Alternating Current, AC）信号的电路。其中最常见的是滤波器电路（filter circuit），本章就要研究它。滤波器电路是由电阻和电容（RC）或者电阻和电感（RL）组成的。这些电路（及其对交流信号的作用）在通信、消费类电子以及工业控制中扮演着重要的角色。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 计算交流信号经 RC 高通滤波器电路后的输出电压；
- 计算交流信号经 RC 低通滤波器电路后的输出电压；
- 计算交流信号经 RL 高通滤波器电路后的输出电压；
- 计算交流信号经 RL 低通滤波器电路后的输出电压；
- 绘出交流或者交直流混合信号经滤波器电路后的输出波形；
- 计算简单的相位角和相位差。

6.1 交流电路中的电容

■ 交流信号是连续变化的，无论是单纯的正弦波还是由很多正弦波组成的复杂信号都是如此。如果将这种信号施加在电容的一个极板上，那么就会在另一个极板上感应出信号。为了直观地表示该过程，图 6-1 所示为交流信号“通过”电容的情况。

注意 与交流信号不同的是，直流信号会被电容阻断。此外，电容并非对交流信号短路。

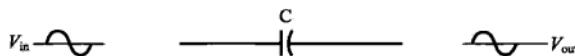


图 6-1

问题

- A. 电容对交流信号和直流信号的作用的主要区别是什么？
- B. 电容对交流信号呈短路还是开路作用？

答案

- A. 电容能传输交流信号，但是无法传输直流信号。
- B. 都不是。

2 通常，电容都在一定程度上阻碍交流信号。正如在第5章看到的，这种对电流的阻碍称为电容的电抗（reactance）。

电抗与电阻类似，但是电容的电抗会随信号频率的变化而改变。电容的电抗可由第5章介绍的公式计算出来。

问题

请写出电容电抗的计算公式。

答案

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

3 从该公式可以看出，电抗是随输入信号频率的变化而改变的。

问题

如果频率增加，电抗如何变化？

答案

电抗减小。

如果在求解前3个问题时遇到困难，请复习第5章的例题。

6.2 电容器和电阻串联

4 为简单起见，可认为此时所有的输入信号都是正弦波信号。图6-2所示电路显示了在电容上施加正弦波输入信号时的情况。

问题

如果输入是单纯的正弦波，那么输出是什么波形？

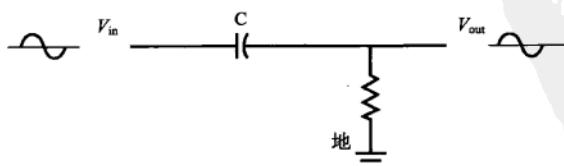


图 6-2

答案

也是单纯的正弦波。

5 输出正弦波的频率与输入正弦波的频率相等。电容并不改变信号的频率。但是，请记住，电容对交流信号的作用就像电阻，即它对交流电流的流动有一定的阻碍作用。阻碍的程度取决于电容的大小以及信号的频率。因此，输出正弦波的振幅要比输入的振幅小。

问题

将交流信号施加在一个类似于上面描述的简单电路上，其中电容的作用像什么？

答案

它对交流信号有阻碍作用，就像电阻一样。

6 如果将电容和电阻串联（如图 6-3 所示），那么电路的功能就像分压器。

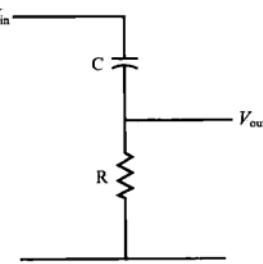


图 6-3

问题

请给出由两个电阻串联而成的分压器的输出电压的公式。

答案

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

7 可以计算由两个电阻串联组成的电路中，有电流流过的总电阻的大小。

问题

总电阻的计算公式是什么？

答案

$$R_T = R_1 + R_2$$

8 还能计算出由电容和电阻串联组成的电路中，阻碍电流流动的总阻抗（impedance）。其计算公式如下：

$$Z = \sqrt{X_C^2 + R^2}$$

其中

Z 为电路的阻抗，单位为欧姆

X_C 为电容的电抗，单位为欧姆

R 为电阻的阻值，单位为欧姆

问题

根据以下步骤计算图 6-4 所示电路的阻抗和流过电路的电流。

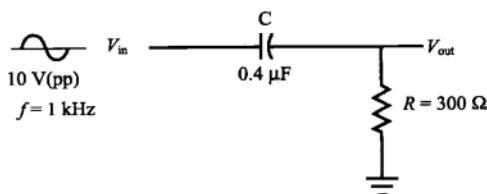


图 6-4

A. $X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \text{_____}$

B. $Z = \sqrt{X_C^2 + R^2} = \text{_____}$

C. $I = \frac{V}{Z} = \text{_____}$

答案

- A. 400Ω B. 500Ω C. 20mA(pp)

9 下面，请根据图 6-4 所示电路，利用所给参数值计算阻抗和电流。

问题

A. $C = 530\mu\text{F}$, $R = 12\Omega$, $V_{\text{in}} = 26\text{V(pp)}$, $f = 60\text{Hz}$

B. $C = 1.77\mu\text{F}$, $R = 12\Omega$, $V_{\text{in}} = 150\text{V(pp)}$, $f = 10\text{kHz}$

答案

- A. $Z = 13\Omega$, $I = 2\text{A (pp)}$ B. $Z = 15\Omega$, $I = 10\text{A (pp)}$

10 请根据与第 5 章问题 11 答案中的公式类似的公式计算图 6-5 所示电路的 V_{out} 。

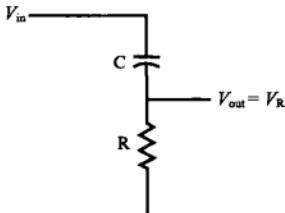


图 6-5

计算该电路的输出电压的公式如下：

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{R}{Z}$$

问题

请根据图 6-6 所示电路图中列出的元件值和输入信号的电压、频率值，计算该电路的输出电压。

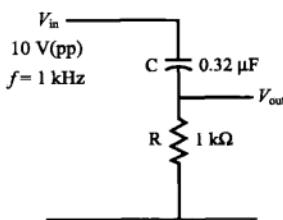


图 6-6

- A. 求出 X_C ；
- B. 求出 Z ；
- C. 利用该公式求出 V_{out} 。

答案

- A. $X_C = 500\Omega$ (舍入值)
- B. $Z = 1120\Omega$ (舍入值)
- C. $V_{\text{out}} = 8.9\text{V(pp)}$

11 下面，请根据所给的元件值、信号电压和频率求出图 6-5 所示电路中的 V_{out} 。

问题

- A. $C = 0.16\mu\text{F}$, $R = 1\text{k}\Omega$, $V_{\text{in}} = 10\text{V(pp)}$, $f = 1\text{kHz}$
- B. $C = 0.08\mu\text{F}$, $R = 1\text{k}\Omega$, $V_{\text{in}} = 10\text{V(pp)}$, $f = 1\text{kHz}$

答案

- A. $V_{\text{out}} = 7.1\text{V(pp)}$
- B. $V_{\text{out}} = 4.5\text{V(pp)}$

注意 今后，如果题目所给的值为峰峰值，那么就可以假设所需的答案是峰峰值。

12 问题 10 和问题 11 所示的分压器计算中，输出电压被衰减（attenuated）了。请比较问题 10 和问题 11 中的输入与输出电压。

问题

衰减是什么意思？

答案

减小振幅或幅值（即 V_{out} 比 V_{in} 小）。

13 当计算问题 10 和问题 11 中例题的 V_{out} 时，首先要求出 X_C 。然而， X_C 会随着频率的改变而改变，而电阻则始终为常数。因此，随着频率的变化，阻抗 Z 会改变，进而输出电压 V_{out} 的振幅也会改变。

如果绘出 V_{out} 相对频率的曲线图，那么将得到图 6-7 所示曲线。

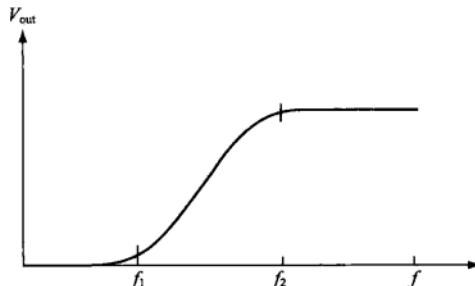


图 6-7

f_1 的频率（位于曲线开始上升处）和 f_2 的频率（位于曲线开始下降处）取决于电容和电阻的取值。

问题

请计算图 6-8 所示电路的输出电压，信号频率分别取 100Hz、1kHz、10kHz 和 100kHz。

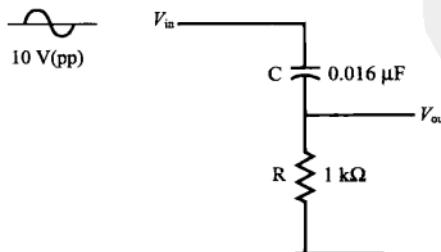


图 6-8

- A. 100Hz;
- B. 1kHz;
- C. 10kHz;
- D. 100kHz;

E. 请绘出 V_{out} 对 f 的点，并拟合出曲线。请用单独的一张纸绘图。

答案

A. $V_{\text{out}} = 0.1\text{V}$ B. $V_{\text{out}} = 1\text{V}$ C. $V_{\text{out}} = 7.1\text{V}$ D. $V_{\text{out}} = 10\text{V}$

E. 曲线如图6-9所示。

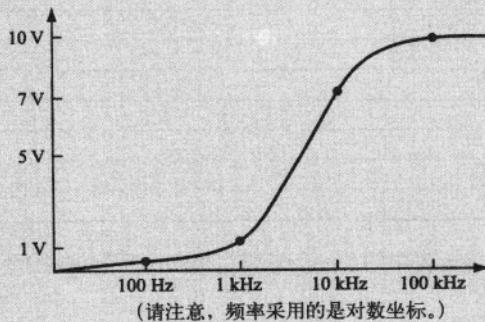


图 6-9

注意 从图中可以看出， V_{out} 在最高频率处等于 V_{in} ，而在最低频率处则近似等于零。这种电路由于能几乎不衰减地使高频信号通过，同时又能阻断低频信号，所以被称为高通电路（high pass circuit）。

6.3 高通滤波器实验

14 下列实验的目标是，确定在图 6-8 所示的高通滤波器电路中， V_{out} 是如何随输入信号频率的变化而改变的。需要计算出在每个频率下的 X 和 Z ，以便找出输出电压与阻抗的关系。

你需要以下设备和材料：

- 1 个 $1\text{k}\Omega$ 电阻；
- 1 个 $0.016\mu\text{F}$ 电容；
- 1 台函数信号发生器；
- 1 台示波器（也可以用万用表测量出均方根值以代替峰峰值）；
- 1 块面包板。

如果没有条件搭建电路并进行测量，那么通读本实验即可。

请按照以下步骤完成实验。

- (1) 在面包板上搭建图 6-8 所示的电路。
- (2) 将函数信号发生器设置为输出 10V(pp)、25Hz 的正弦波作为 V_{in} ，测量 V_{out} 并将结果记录在下表中。

f_{in}	X_C	Z	V_{out}
25Hz			
50Hz			
100Hz			
250Hz			
500Hz			
1kHz			
3kHz			
5kHz			
7kHz			
10kHz			
20kHz			
30kHz			
50kHz			
100kHz			

(3) 将 V_{in} 的频率增大为上表中的下一行取值，再次测量并记录 V_{in} 值。如此反复，直至完成表中的最后一行。

(4) 计算每行的 X_C 和 Z 值并填入表中。

(5) 绘出 V_{out} 对 f_{in} 的曲线，其中纵坐标是电压，横坐标是频率（采用对数坐标）。该曲线应该与图 6-9 所示曲线的形状相似，如果你绘出的曲线向左或者右略有偏移，那也没关系。

问题

引起曲线向左或向右移动的原因是什么？

答案

原因是你使用的电阻和电容可能和图 6-10 曲线所用的元件略有不同。电阻和电容值的变化是很正常的，标准元件都允许有一定的误差。

你测得的值应当与下表的值接近，所得曲线则应与图 6-10 类似。

f_{in}	X_C	Z	V_{out}
25Hz	400kΩ	400kΩ	0.025V
50Hz	200kΩ	200kΩ	0.05V
100Hz	100 kΩ	100 kΩ	0.1V
250Hz	40 kΩ	40 kΩ	0.25V
500Hz	20 kΩ	20 kΩ	0.5V
1kHz	10 kΩ	10 kΩ	1V
3kHz	3.3 kΩ	3.5 kΩ	2.9V
5kHz	2 kΩ	2.2 kΩ	4.47V

(续)

f_{in}	X_C	Z	V_{out}
7kHz	1.4 k Ω	1.7 k Ω	5.8V
10kHz	1 k Ω	1.414 k Ω	7.1V
20kHz	500 Ω	1.12k Ω	8.9V
30kHz	330 Ω	1.05k Ω	9.5V
50kHz	200 Ω	1.02k Ω	9.8V
100kHz	100 Ω	1k Ω	10V

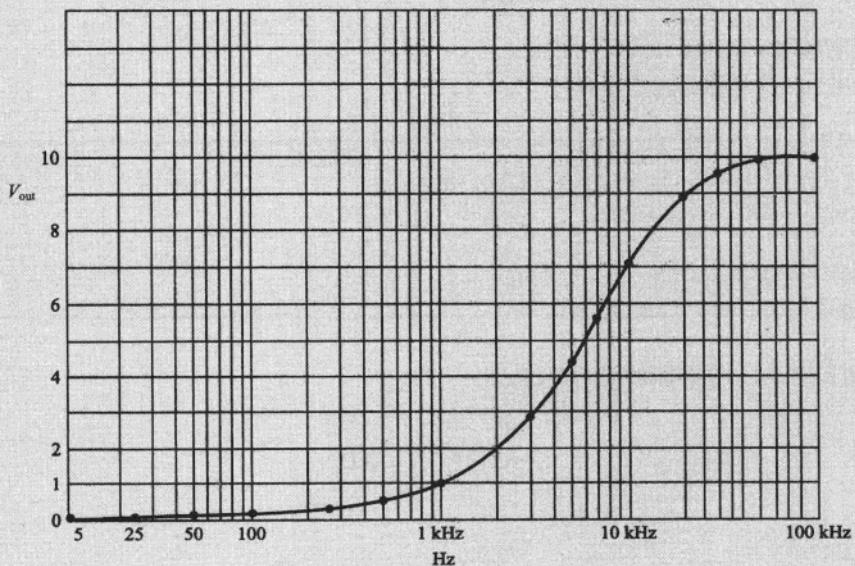


图 6-10

问题

是什么原因导致你的曲线比图 6-10 所示曲线向左或向右微移呢？

答案

原因是你使用的电阻和电容可能和图 6-10 曲线所用的元件略有不同。电阻和电容值的变化是很正常的，标准元件都允许有一定的误差。

15 图 6-11 所示电路可用于很多电子设备中。

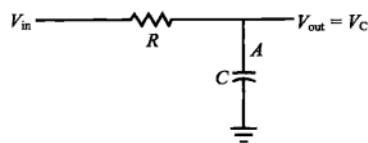


图 6-11

对于该电路，应当在电容两端而不是电阻两端（A点至地）测量输出电压。

该电路的阻抗与前面几个问题所用电路的阻抗相同。它也是个分压器，可以利用与前面问题中讨论高通滤波器时所用公式相类似的公式计算其输出电压。然而，通过交换电阻和电容的位置，可以得到图6-11所示电路。通过改变频率得出哪些频率点信号不会衰减而哪些频率点信号会衰减，这样就得到了一个新电路——低通滤波器。我们将在下面几个问题中研究其特性。

问题

- A. 该电路的阻抗计算公式是什么？
- B. 输出电压的计算公式是什么？

答案

A. $Z = \sqrt{X_C^2 + R^2}$

B. $V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{X_C}{Z}$

16 根据图6-11所示电路和下列参数值：

$$V_{\text{in}} = 10\text{V(pp)}, f = 2\text{kHz}$$

$$C = 0.1\mu\text{F}, R = 1\text{k}\Omega$$

问题

求出下列值：

A. $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $Z = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $V_{\text{out}} = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. 795Ω B. 1277Ω C. 6.24V

17 再次根据图6-11所示电路，回答下列问题。

问题

请根据问题16所给参数以及算出的阻抗值计算电阻两端的电压。

答案

$$V_R = V_{\text{in}} \times \frac{R}{Z} = 10 \times \frac{1000}{1277} = 7.83\text{V(pp)}$$

18 请根据问题 16 和问题 17 的信息解答本问题。

问题

根据电容和电阻两端的电压计算 V_{in} 的公式是什么？

答案

计算公式为

$$V_{in}^2 = V_C^2 + V_R^2$$

19 图 6-11 所示电路的 V_{out} 随着输入信号频率的变化而改变。图 6-12 显示出该电路的 V_{out} 与频率的关系。

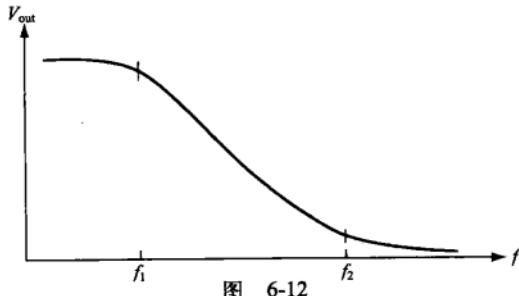


图 6-12

问题

决定 f_1 和 f_2 的参数是什么？

答案

电容值和电阻值。

注意 可以看出，图 6-12 中 V_{out} 在最低频率处很大，而在最高频率处几乎为零。这种电路可称为低通电路 (low pass circuit)，因为它能毫不衰减地使低频信号通过，同时又能阻断高频信号。

6.4 RC 电路中的相移

20 在图 6-13 所示的两个电路中，输出电压并不等于输入电压。

问题

如何区分这两幅图？

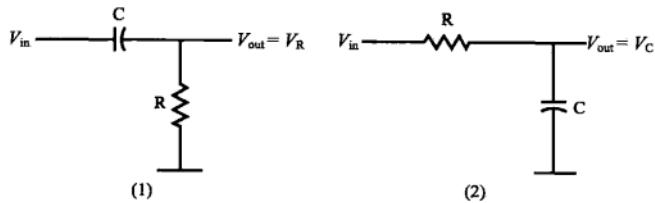


图 6-13

答案

根据对信号的衰减或减小来区分。衰减的程度取决于信号的频率。

21 电压的变化则以另一种方式在变化。电容两端电压的上升或下降频率与输入信号的频率相等，但是它们并不同时到达峰值，也不同时经过零点。这可以通过比较图 6-14 中的 V_{out} 曲线和 V_{in} 曲线看出来。

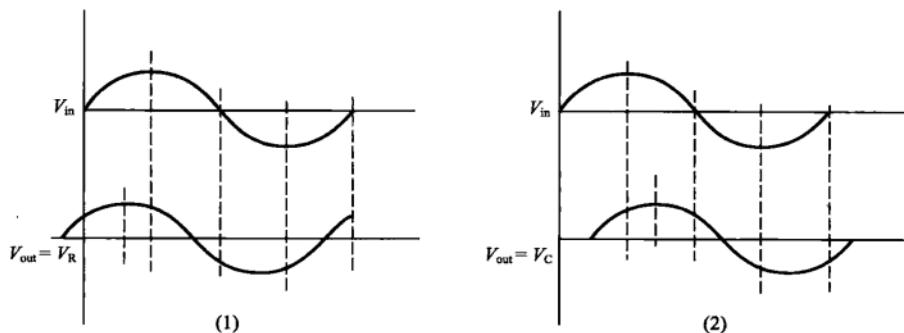


图 6-14

注意 图 6-14 中带编号的曲线图分别由图 6-13 对应编号的电路产生。

问题

- A. 检查图(1)。输出电压的峰值是向左还是向右错位了？
- B. 检查图(2)。输出电压的峰值是向左还是向右错位了？

答案

- A. 向左
- B. 向右

22 图 6-14 中图(1)的输出电压波形叫作超前输入电压波形 (lead the voltage waveform)，图(2)的输出波形叫作滞后输入波形 (lag the input waveform)。 V_{out} 超前或滞后 V_{in} 的大小用度数

来度量。正弦波峰值点与零电压点间相距 90° 。你可以据此来估计 V_{out} 超前或滞后 V_{in} 的度数。这两个波形的差叫作相移 (phase shift) 或者相差 (phase difference)。

问题

- 图中两个波形的相移近似为多少？
- 你认为相移的大小与信号的频率有关吗？
- RC 分压器中电容两端的电压能使输出电压产生超前还是滞后的相移？

答案

- 近似为 35° 。
- 由于电抗和阻抗的大小与频率有关，所以它与频率有关。
- 由图6-14中图(2)可知，产生的是滞后的相移。

23 通过电容的电流与电容两端的电压异相位 (out of phase)，电流超前电压 90° 。电阻上的电流和电压同相位，即它们没有相差。

图 6-15 显示出 RC 串联电路的向量图。 θ 是 V_R 超前 V_{in} 的相角。 ϕ 是 V_C 滞后 V_{in} 的相角。

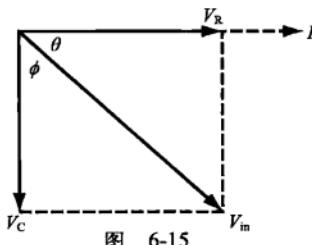


图 6-15

注意 尽管电阻上的电压与流过电阻的电流同相，但是它们都与所施加的总电压异相。

可以根据下列公式计算相角。

$$\tan \theta = \frac{V_C}{V_R} = \frac{1}{2\pi f R C} = \frac{X_C}{R}$$

比如，可如下计算当 160Hz 信号施加在 $3.9\text{k}\Omega$ 电阻串联 $0.1\mu\text{F}$ 电容的电路时的相角。

$$\tan \theta = \frac{1}{2 \times \pi \times 160 \times 3.9 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 2.564$$

通过计算 2.564 的反正切函数值，得出相角为 68.7° 。这意味着 V_R 超前 V_{in} 68.7° ，或者 V_C 滞后输入信号 21.3° 。

在电子技术中，图 6-15 被称为相角图 (phasor diagram)，但是涉及的数学运算与你可能较熟悉的向量图相同。

问题

根据本问题计算出的 θ 和 ϕ 值绘出相角图。请画在单独的一张纸上。

答案

参见图6-16。请注意，相角图显示出 V_C 的幅度大于 V_R 。

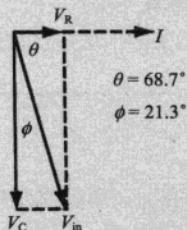


图 6-16

24 请利用图 6-17 所示参数值和输入信号求解下题。

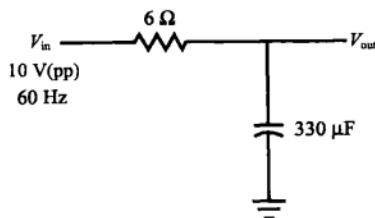


图 6-17

问题

- A. X_C ;
- B. Z ;
- C. V_{out} ;
- D. V_R ;
- E. 流过电路的电流的大小;
- F. 相角的大小。

答案

- A. $X_C = \frac{1}{2\pi f C} = 8\Omega$
- B. $Z = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\Omega$
- C. $V_{out} = V_C = V_{in} \times \frac{X_C}{Z} = 8V$

D. $V_R = V_{in} \times \frac{R}{Z} = 6V$

E. $I = \frac{V}{Z} = \frac{10V}{10\Omega} = 1A$

F. $\tan \theta = \frac{X_C}{R} = \frac{8\Omega}{6\Omega} = 1.33$

因此, $\theta = 55.13^\circ$

25 对于图 6-18 所示电路, 请计算下列参数。

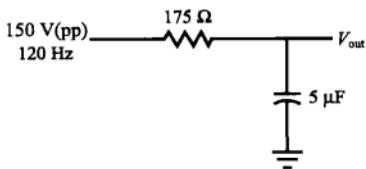


图 6-18

问题

- A. X_C ;
- B. Z ;
- C. V_{out} ;
- D. V_R ;
- E. 流过电路的电流的大小;
- F. 相角的大小。

答案

A. $X_C = 265\Omega$

B. $Z = \sqrt{175^2 + 265^2} = 317.57\Omega$

C. $V_C = 125V$

D. $V_R = 83V$

E. $I = 0.472A$

F. $\tan \theta = \frac{265\Omega}{175\Omega} = 1.5$

因此, $\theta = 56.56^\circ$

6.5 电容和电阻并联

26 图 6-19 所示电路是在问题 15 介绍的低通滤波器电路基础上的常见变化。

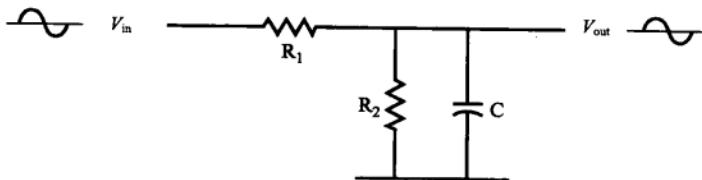


图 6-19

由于直流信号无法流过电容，所以该电路的功能和图 6-20 所示的直流信号处理电路类似。

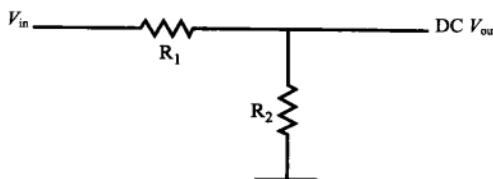


图 6-20

交流信号可以通过电容和 R_2 。你可以将该电路值的电容和电阻的并联看作阻值为 r 的电阻，其中 r 是 R_2 和 X_C 的并联等效电阻。具体如图 6-21 所示。

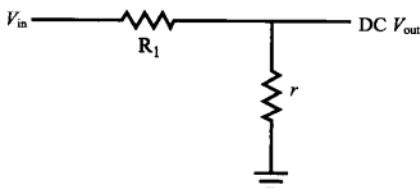


图 6-21

计算准确的并联等效电阻 (r) 非常复杂，并且超出了本书的范围。然而，为了演示该电路的作用，可以考虑 X_C 的大小仅为 R_2 的 $1/10$ 甚至更小的情况下，此时可以做大量简化。由于该电路能分别衰减交流和直流信号，所以应用广泛。

下面的示例将帮助说明这一点。对于下列电路，请分别计算交流和直流输出电压。

对于图 6-22 所示电路，可以根据下列问题中列出的步骤分别计算交流和直流电压。

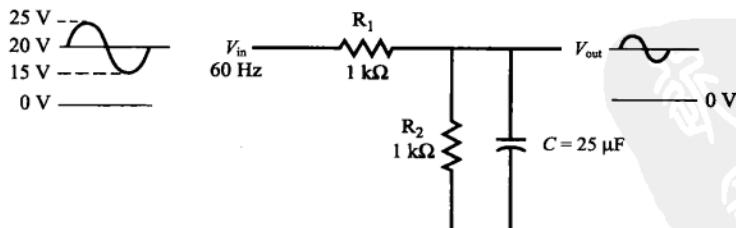


图 6-22

问题

- A. 请求出 X_C 。检查它是否小于 R_2 的 $1/10$ 。

- B.** 对于图 6-22 所示电路，请确定直流信号能流过哪个电路元件。然后利用分压器计算公式求出 DC V_{out} 。
- C.** 对于图 6-22 所示电路，请确定交流信号能流过哪个电路元件。然后利用分压器计算公式求出 AC V_{out} 。
- D.** 请比较交流和直流输入/输出电压。

答案

A. $X_C = 106\Omega$, $R_2 = 1\,000\Omega$, 因此 X_C 足够接近 R_2 的 $1/10$ 。

B. 图 6-23 是电路中有直流信号通过的部分。

$$V_{\text{out}} = 20 \times \frac{1\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega} = 10\text{V}$$

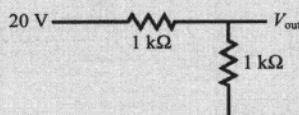


图 6-23

C. 图 6-24 是电路中有交流信号通过的部分。

$$V_{\text{out}} = 10 \times \frac{106}{\sqrt{1000^2 + 106^2}} = 1.05\text{V}$$

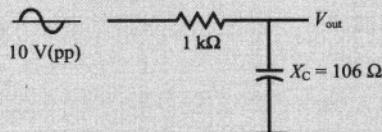


图 6-24

D. 图 6-25 的左侧是输入信号波形而右侧是输出信号波形。可以看出，直流电压波形已由 20V 降至 10V，而交流电压波形则从 10V 降至 1.05V。

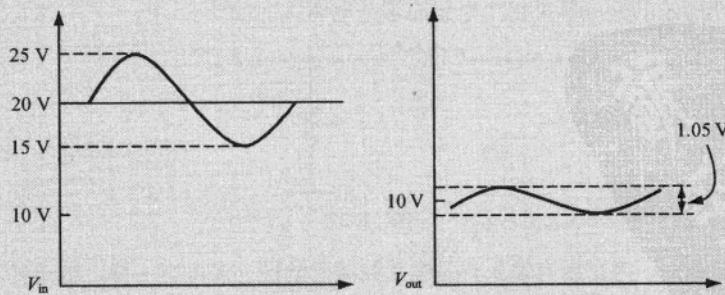


图 6-25

27 图 6-26 是问题 26 所讨论电路的两个版本，它们的区别是电容值或信号频率有变化。两种情况的输入电压都是 20V(pp)。请利用问题 26 所示的相同步骤求出并比较图 6-26 所示两个电路的输出电压和输入电压。

问题

(1) A. $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. DC $V_{out} = \underline{\hspace{2cm}}$
 C. AC $V_{out} = \underline{\hspace{2cm}}$ D. 衰减为: $\underline{\hspace{2cm}}$

(2) A. $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. DC $V_{out} = \underline{\hspace{2cm}}$
 C. AC $V_{out} = \underline{\hspace{2cm}}$ D. 衰减为: $\underline{\hspace{2cm}}$

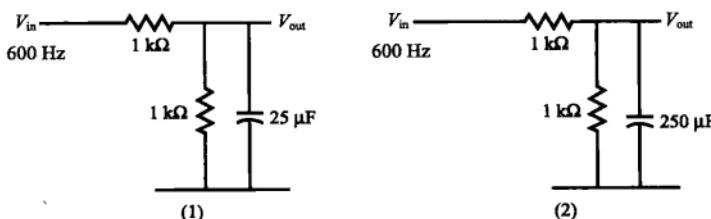


图 6-26

答案

- (1) A. $X_C = 10.6\Omega$ B. DC $V_{out} = 10V$ C. AC $V_{out} = 0.1V$
 D. 这里，直流衰减与问题26的示例相同，但是交流输出电压则因频率增高而减小。
 (2) A. $X_C = 10.6\Omega$ B. DC $V_{out} = 10V$ C. AC $V_{out} = 0.1V$
 D. 直流衰减还是不变，但是交流输出电压则因电容的增大而减小。

6.6 交流电路中的电感

28 图 6-27 所示的分压器采用了电感而不是电容。

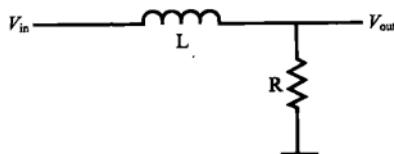


图 6-27

在前面的问题中，考虑所有输入都是纯正弦波的情况。和电容一样，电感并不能改变正弦波的频率，但是能减小输出电压的振幅。

如图 6-27 所示的简单电路也能阻碍电流的流动。

问题

- A. 阻碍电流的东西叫什么?
 B. 计算电感电抗的公式是什么?
 C. 请写出该电路阻碍电流的公式。

答案

- A. 阻抗 B. $X_L = 2\pi fL$ C. $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$

在很多情况下，电感的直流电阻非常小，因此可以假设其为 0Ω 。在下两个问题的计算中就可以做此假设。

29 利用分压公式计算图 6-28 所示电路的输出电压。

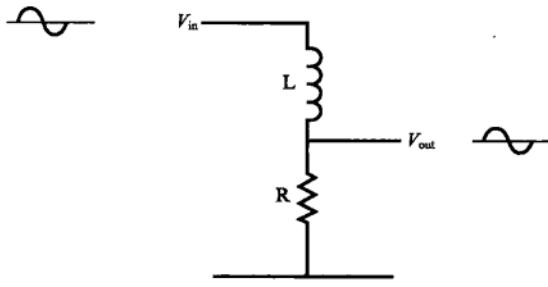


图 6-28

问题

V_{out} 的计算公式是什么？

答案

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R}{Z}$$

30 请求出图 6-29 所示电路的输出电压。

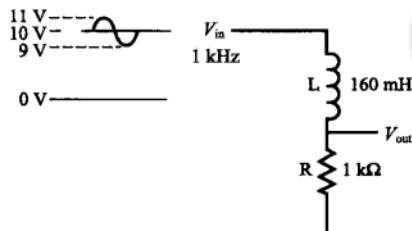


图 6-29

请按照下列问题所示的步骤进行计算。

问题

- A. 利用直流分压公式求出直流输出电压。DC $V_{\text{out}} = \underline{\hspace{10mm}}$
- B. 请求出电感的电抗。 $X_L = \underline{\hspace{10mm}}$
- C. 请求出交流阻抗。 $Z = \underline{\hspace{10mm}}$
- D. 请求出交流输出电压。AC $V_{\text{out}} = \underline{\hspace{10mm}}$
- E. 合并输出以求出实际输出。请画出输出波形并在图 6-30 的空白图中标记出波形的电压大小。



图 6-30

答案

- A. DC $V_{\text{out}} = 10V \times \frac{1k\Omega}{1k\Omega+0} = 10V$
- B. $X_L = 1k\Omega$ (近似值)
- C. $Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} = 1.414k\Omega$
- D. AC $V_{\text{out}} = 2V \times \frac{1k\Omega}{1.414k\Omega} = 1.414V(\text{pp})$
- E. 输出波形如图6-31所示。

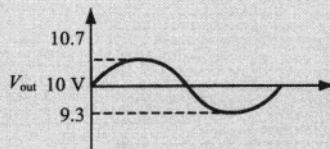


图 6-31

31 图 6-32 所示电路中，电感的直流电阻很大，在计算时必须考虑它。

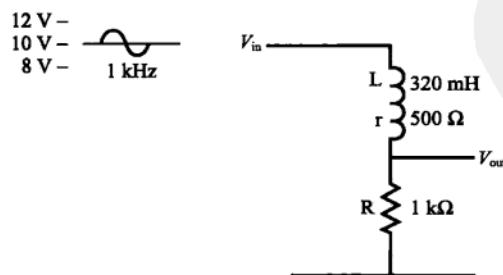


图 6-32

问题

对于图 6-32 所示电路，请利用问题 30 中列出的步骤计算直流和交流输出电压。

- A. DC $V_{\text{out}} = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $X_L = \underline{\hspace{2cm}}$
 C. $Z = \underline{\hspace{2cm}}$ D. AC $V_{\text{out}} = \underline{\hspace{2cm}}$

E. 请在图 6-33 所示的空白图上绘出输出波形并标出波形的电压大小。



图 6-33

答案

A. DC $V_{\text{out}} = 10V \times \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 500\Omega} = 6.67V$

注意 计算时已经将电感的500Ω直流电阻加在1kΩ的电阻上了。

B. $X_L = 2k\Omega$

C. $Z = \sqrt{1.5^2 + 2^2} = 2.5k\Omega$

注意 计算时已经将电感的500Ω直流电阻加在1kΩ的电阻上了。

D. AC $V_{\text{out}} = 1.6V(\text{pp})$

E. 参见图6-34。

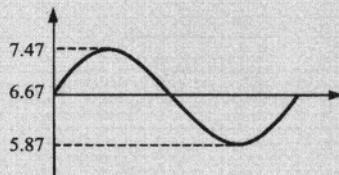


图 6-34

32 为了计算问题 30 和问题 31 中的 V_{out} ，先要计算 X_L 。然而，由于 X_L 会随输入信号频率的变化而变化，所以电路的阻抗和 V_{out} 的振幅也会随着输入信号频率的变化而变化。请在图 6-35 中绘出输出电压 V_{out} 与频率的关系曲线。

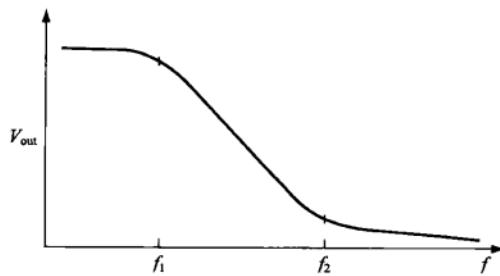


图 6-35

电感和电阻的大小决定了 V_{out} 在什么频率处开始下降 (f_1)，以及在什么频率处 (f_2) 变为零。

图 6-35 所示曲线表明，利用图 6-29 所示电路中的电感和电阻可以构成与问题 15~问题 19 中讨论的相类似的低通滤波器。

问题

什么值可以控制 f_1 和 f_2 ？

答案

电感值和电阻值。

3.3 还可以搭建图 6-36 所示的电路，其中输出电压等于电感上的压降。

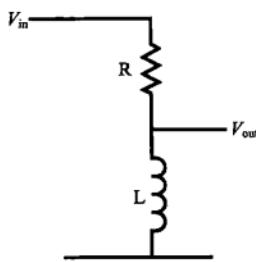


图 6-36

问题

A. 该用什么公式求解 V_{out} ？

B. 如果绘出输出电压与频率的关系图，那么你想象的曲线是何模样？请在单独的纸上画出该图。

答案

A. $V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{X_L}{Z}$

B. 参见图 6-37。

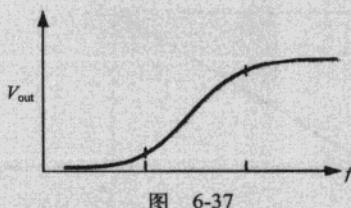


图 6-37

图 6-36 所示电路中的电感和电阻构成与问题 6~问题 13 中讨论的类似的高通滤波器电路，所得曲线参见图 6-37。

6.7 RL 电路中的相移

34 采用电感的滤波器电路（比如图 6-38 所示的电路）和采用电容的滤波器电路一样，也会在输出信号中会产生相移。通过比较图 6-38 所示电路下方的输入和输出波形可看出这两个电路的相移。

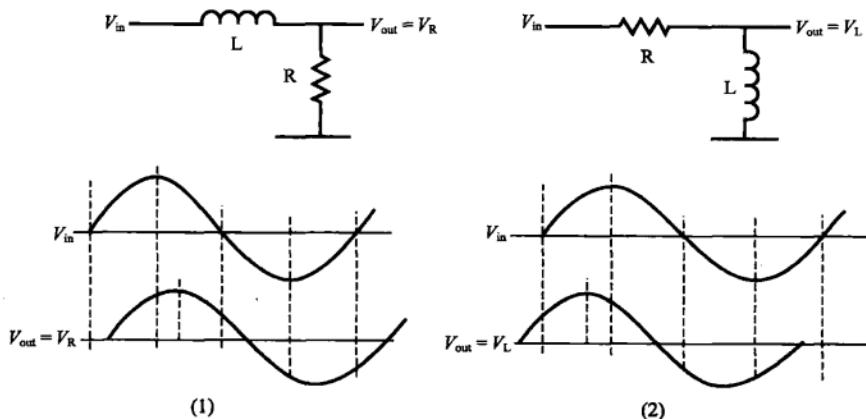


图 6-38

问题

哪个电路的输出电压超前于输入电压？

答案

图(1) 的输出电压滞后于输入电压，而图(2) 的输出电压则超前于输入电压。

35 图 6-39 是图 6-38 所示电路对应的向量图。流过电感的电流滞后于电感两端的电压 90° 。