

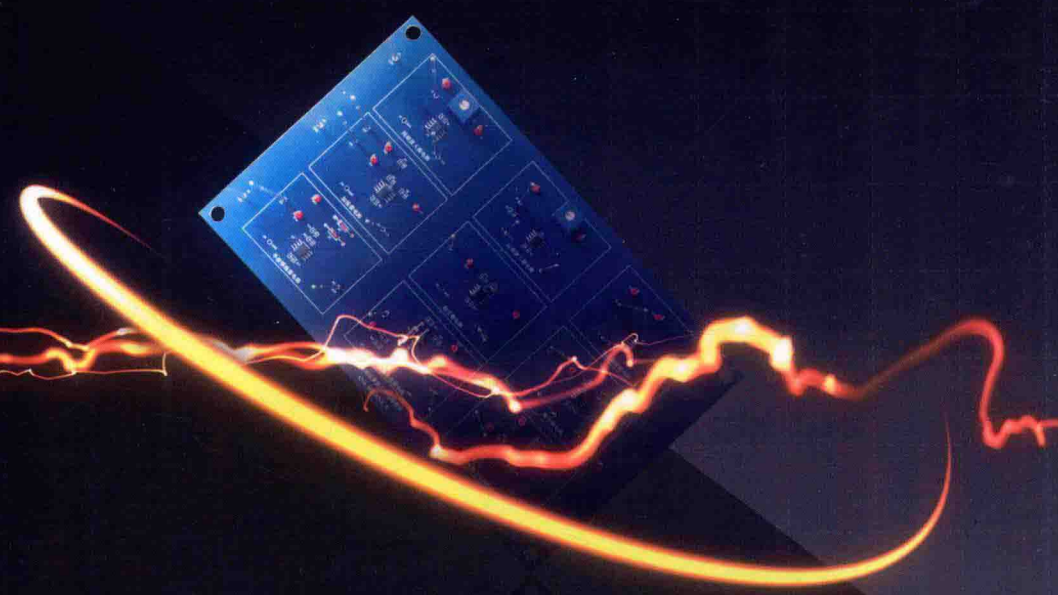
学习资源
见书中
学习说明

电子系统EDA新技术丛书

模拟电子系统设计指南 (实践篇)

从半导体、分立元件到TI集成电路
的分析与实现

◎ 何 宾 王中正 编著 ◎ 王学伟 主审



★ 通过RIGOL测试仪器对实际硬件电路的测试，
以及与SPICE仿真工具的仿真结果比较，
进一步深入理解模拟电子系统设计理论知识。



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子系统 EDA 新技术丛书

模拟电子系统设计指南 (实践篇)

从半导体、分立元件到 TI 集成电路
的分析与实现

何 宾 王中正 编著
王学伟 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是《模拟电子系统设计指南（基础篇）：从半导体、分立元件到 TI 集成电路的分析与实现》一书的实践篇，重点在于介绍模拟电子系统中典型单元硬件电路的设计、实现和验证方法。本书共分为 14 章，包括构建模拟电子系统的基本知识、SPICE 仿真工具、测试仪器的原理、信号时域和频域表示、二极管电路设计与验证、双极结型晶体管电路设计与验证、金属氧化物场效应晶体管电路设计与验证、集成运算放大器电路设计与验证、集成差动放大器电路设计与验证、有源滤波器电路设计与验证、功率放大器电路设计与验证、振荡器电路设计与验证、电源管理器电路设计与验证、模拟电路自动测试系统的构建。

本书的特色是以典型的电子设计自动化工具（Electronics Design Automation, EDA）所包含的 SPICE 作为设计实际模拟硬件电路的指导，并通过各种测试仪器对实际硬件电路的测量，比较理论和实际之间的差别，引导读者深入理解和思考实际模拟电路的设计问题，并加深对模拟电子技术理论知识的理解。本书适合从事模拟系统设计的工程师使用，可作为 TI 集成电路设计工程师的参考书，同时也可作为高等学校模拟电子技术基础课程的实践教学用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

模拟电子系统设计指南·实践篇·从半导体、分立元件到 TI 集成电路的分析与实现/何宾，王中正编著. —北京：电子工业出版社，2017. 10

（电子系统 EDA 新技术丛书）

ISBN 978-7-121-32700-1

I. ①模… II. ①何… ②王… III. ①电子系统—系统设计—指南 IV. ①TN02-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 228224 号

策划编辑：王敬栋

责任编辑：底 波

印 刷：三河市华成印务有限公司

装 订：三河市华成印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：19.25 字数：517.7 千字

版 次：2017 年 10 月第 1 版

印 次：2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价：68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：88254590, wangjd@phei.com.cn。

前 言

本书是《模拟电子系统设计指南（基础篇）：从半导体、分立元件到 TI 集成电路的分析与实现》一书的配套实践用书。模拟电子系统的设计能力取决于对相关理论知识理解的深度和广度，对理论知识的理解仅从书本上学习是远远不够的，需要通过大量的 SPICE 电路软件仿真，以及构建和测试实际硬件电路来积累大家通常所说的“设计经验”。

在编写本书的过程中，本人的学生参与了大量模拟硬件电路的构建、测试和验证工作，而他们在大学刚开始学习模拟电子技术时，感觉特别抽象，理解起来很困难，导致他们不知道学习模拟电子技术这门课程的目的所在，当然这也是国内大学教师和学生普遍的共识。本人在编写这本书的 6 个月的时间里，通过给学生布置书上所提供的这些设计题目，引导他们有针对性地从中重新学习模拟电子技术知识，而不是像原来一样仅仅从书本上学习。

在他们完成本人所布置的这些设计题目的过程中，首先要参考本人编写的《模拟电子系统设计指南（基础篇）：从半导体、分立元件到 TI 集成电路的分析与实现》中相关的模拟电路理论知识，然后使用 SPICE 对要搭建的模拟硬件电路从不同的角度进行初步可行性验证，最后在面包板/万能板上构建实际的硬件电路，并通过测试仪器从时域（包含 $X - Y$ ）和频域两个不同的角度研究信号与模拟电子系统各个单元之间的内在关系。经过这个训练过程，他们从以前感觉模拟电子技术是最难学最不喜欢学的课程，到如今转变为对模拟电子技术内在所表现出深层次“魅力”的浓厚兴趣。并且，现在他们可以从整体上将所学习的各门相关专业课程知识点有机地联系在一起。由此可见，实践/实验在模拟电子课程教与学中的重要作用。

全书分为 14 章，以二极管、BJT、MOSFET、集成运算放大器、功率放大器、电源管理器为主线，将模拟电子课程中所需要掌握的重要知识点通过实验进行了系统化融合。本人的学生王中正负责本书第 5 ~ 10 章实验内容的设计和验证，徐佳负责本书第 6 ~ 7 章实验内容的设计和验证，唐思怡负责本书第 11 ~ 14 章实验内容的设计和验证。此外，汤宗美负责本书教学课件的制作。本人完成对全书的文字整理、实验结构的确认及审阅工作。本书由王学伟主审。

在编写本书的过程中，TI 大学计划提供了芯片和经费资助；NI 大学计划提供了正版 Multisim Designer 14.0 工具的授权；RIGOL 公司大学计划提供了程控电源、信号发生器、数字示波器、频谱分析仪、数字万用表和电子负载。正是由于这些公司的鼎力支持和帮助，使得我能够高质量地完成本书的编写工作，在此向他们的支持表示衷心的感谢。通过本书的编写，使得教育界和产业界能够更紧密地合作，并可以全方位地帮助教育界的老师将最新的模拟电子设计软件工具和硬件平台介绍给广大的学生，同时也为产业界培养更多能够从事相关工作的工程技术人员，这是一种双赢的合作。

最后，感谢电子工业出版社各位编辑对本书出版给予的帮助和支持，由于本人水平有限，书中难免出现不足之处，请读者不吝指出，帮助本人进一步完善本书的内容。

何 宾

2017 年 4 月于北京



学习说明

Study Shows

1. 本书配套教学资源，为读者提供学习服务

书中所提供的配套设计案例、教学课件和公开教学视频，可以通过作者的维基网站获取。

<http://www.edawiki.com>

2. 本书作者联络方式，为读者解答学习过程中遇到的问题

何宾的电子邮箱：hb@gpnewtech.com

3. 本书配套硬件及仪器设备购买事宜由北京汇众新特科技有限公司负责，为企业和教师提供配套的硬件设备

北京汇众新特科技有限公司网站：<http://www.gpnewtech.com>

市场及服务支持热线：010-83139076 010-83139176

4. 课程的培训事宜由北京汇众新特科技有限公司负责，为企业和教师提供相关的培训课程服务

北京汇众新特科技有限公司网站：<http://www.gpnewtech.com>

市场及服务支持热线：010-83139076 010-83139176

电子邮箱：hb@gpnewtech.com

5. 作者的微信公众号



6. 方便读者学习交流，作者建立了微信交流群，扫描二维码邀请加入



目 录

第 1 章 构建模拟电子系统的基本知识	(1)	3.1.2 示波器分类	(36)
1.1 电阻	(1)	3.1.3 数字示波器的基本原理	(37)
1.1.1 轴向引线型电阻	(1)	3.1.4 性能参数	(38)
1.1.2 电阻网络	(4)	3.1.5 时基显示模式	(46)
1.1.3 贴片式电阻元件的封装	(5)	3.2 信号发生器原理	(46)
1.2 电容	(6)	3.2.1 信号发生器的功能	(46)
1.2.1 功能	(6)	3.2.2 信号发生器的分类	(47)
1.2.2 有极性电容	(6)	3.2.3 工作原理	(47)
1.2.3 无极性电容	(8)	3.2.4 性能参数	(48)
1.2.4 聚苯乙烯电容	(8)	3.3 线性直流电源的原理	(50)
1.2.5 真实的电容值	(8)	3.3.1 工作原理	(50)
1.2.6 电容的寄生效应	(9)	3.3.2 工作模式	(50)
1.2.7 寄生电容	(11)	3.3.3 性能参数	(51)
1.2.8 不同类型电容比较	(13)	3.3.4 扩展应用	(51)
1.3 面包板	(14)	3.4 数字万用表的原理	(52)
1.3.1 面包板的结构和功能	(14)	3.4.1 工作原理	(52)
1.3.2 面包板的寄生电容	(15)	3.4.2 性能参数	(53)
第 2 章 SPICE 仿真工具	(17)	3.5 频谱分析仪	(53)
2.1 Multisim Live 特性及应用	(17)	3.5.1 信号的时域和频域表示	(54)
2.1.1 登录 Multisim Live	(17)	3.5.2 频谱分析仪的用途	(55)
2.1.2 Multisim Live 设计流程	(18)	3.5.3 频谱分析仪的种类	(55)
2.2 TINA 仿真工具特性及应用	(24)	3.5.4 性能参数	(57)
2.2.1 下载和安装 TINA 仿真工具	(24)	3.6 直流电子负载	(60)
2.2.2 TI TINA 设计流程	(25)	3.6.1 电子负载的工作模式	(60)
第 3 章 测试仪器的原理	(34)	3.6.2 性能参数	(62)
3.1 数字示波器的原理	(34)	第 4 章 信号时域和频域表示	(64)
3.1.1 信号的基本概念	(34)	4.1 实验目的	(64)
		4.2 实验材料及仪器	(64)

4.3 实验原理	(64)	5.6.1 实验目的	(88)
第5章 二极管电路设计与验证	(73)	5.6.2 实验材料及仪器	(88)
5.1 二极管 I/V 曲线测量	(73)	5.6.3 电路设计原理	(88)
5.1.1 实验目的	(73)	5.6.4 硬件测试电路	(89)
5.1.2 实验材料及仪器	(73)	5.6.5 测试结果分析	(89)
5.1.3 电路设计原理	(73)	5.7 可变衰减器设计和验证	(91)
5.1.4 硬件测试电路	(74)	5.7.1 实验目的	(91)
5.1.5 测试结果分析	(75)	5.7.2 实验材料及仪器	(91)
5.2 半波整流电路设计和验证	(75)	5.7.3 电路设计原理	(91)
5.2.1 实验目的	(75)	5.7.4 硬件测试电路	(93)
5.2.2 实验材料及仪器	(76)	5.7.5 测试结果分析	(93)
5.2.3 电路设计原理	(76)	第6章 双极结型晶体管电路设计与	
5.2.4 硬件测试电路	(76)	验证	(96)
5.2.5 测试结果分析	(77)	6.1 BJT 用作二极管	(96)
5.3 全波整流电路设计和验证	(78)	6.1.1 实验目的	(96)
5.3.1 实验目的	(78)	6.1.2 实验材料及仪器	(96)
5.3.2 实验材料及仪器	(78)	6.1.3 电路设计原理	(96)
5.3.3 电路设计原理	(78)	6.1.4 硬件测试电路	(97)
5.3.4 硬件测试电路	(79)	6.1.5 测试结果分析	(98)
5.3.5 测试结果分析	(80)	6.2 BJT 输出特性曲线测量	(99)
5.4 桥式整流电路设计和验证	(80)	6.2.1 实验目的	(99)
5.4.1 实验目的	(80)	6.2.2 实验材料及仪器	(99)
5.4.2 实验材料及仪器	(81)	6.2.3 电路设计原理	(99)
5.4.3 电路设计原理	(81)	6.2.4 阶梯波信号产生方法	(101)
5.4.4 硬件测试电路	(82)	6.2.5 硬件测试电路	(103)
5.4.5 测试结果分析	(82)	6.2.6 测试结果分析	(105)
5.5 限幅电路设计和验证	(83)	6.3 BJT 共射极放大电路设计和	
5.5.1 实验目的	(83)	验证	(107)
5.5.2 实验材料及仪器	(83)	6.3.1 实验目的	(107)
5.5.3 电路设计原理	(83)	6.3.2 实验材料及仪器	(107)
5.5.4 硬件测试电路	(84)	6.3.3 电路设计原理	(107)
5.5.5 测试结果分析	(85)	6.3.4 硬件测试电路	(109)
5.6 交流耦合和直流恢复电路设计和		6.3.5 测试结果分析	(109)
验证	(87)	6.4 BJT 镜像电流源设计和	

验证	(110)	6.9.3 电路设计原理	(126)
6.4.1 实验目的	(110)	6.9.4 硬件测试电路	(127)
6.4.2 实验材料及仪器	(111)	6.9.5 测试结果分析	(128)
6.4.3 电路设计原理	(111)	6.10 差模输入差分放大器电路设计	
6.4.4 硬件测试电路	(111)	和验证	(129)
6.4.5 测试结果分析	(112)	6.10.1 实验目的	(129)
6.5 基极电流补偿镜像电流源设计和		6.10.2 实验材料及仪器	(129)
验证	(113)	6.10.3 电路设计原理	(129)
6.5.1 实验目的	(113)	6.10.4 硬件测试电路	(130)
6.5.2 实验材料及仪器	(113)	6.10.5 测试结果分析	(132)
6.5.3 电路设计原理	(113)	6.11 共模输入差分放大器电路设计	
6.5.4 硬件测试电路	(114)	和验证	(133)
6.5.5 测试结果分析	(115)	6.11.1 实验目的	(133)
6.6 零增益放大器设计和验证 ..	(116)	6.11.2 实验材料及仪器	(133)
6.6.1 实验目的	(116)	6.11.3 电路设计原理	(134)
6.6.2 实验材料及仪器	(116)	6.11.4 硬件测试电路	(134)
6.6.3 电路设计原理	(116)	6.11.5 测试结果分析	(135)
6.6.4 硬件测试电路	(117)	第7章 金属氧化物场效应晶体管电路	
6.6.5 测试结果分析	(118)	设计与验证	(137)
6.7 稳压电流源设计和验证	(118)	7.1 MOS 用作二极管电路测试 ..	(137)
6.7.1 实验目的	(119)	7.1.1 实验目的	(137)
6.7.2 实验材料及仪器	(119)	7.1.2 实验材料及仪器	(137)
6.7.3 电路设计原理	(119)	7.1.3 电路设计原理	(137)
6.7.4 硬件测试电路	(120)	7.1.4 硬件测试电路	(139)
6.7.5 测试结果分析	(120)	7.1.5 测试结果分析	(139)
6.8 并联整流器设计和验证	(121)	7.2 MOS 输出曲线测量	(140)
6.8.1 实验目的	(121)	7.2.1 实验目的	(141)
6.8.2 实验材料及仪器	(121)	7.2.2 实验材料及仪器	(141)
6.8.3 电路设计原理	(121)	7.2.3 电路设计原理	(141)
6.8.4 硬件测试电路	(123)	7.2.4 硬件测试电路	(142)
6.8.5 测试结果分析	(124)	7.2.5 测试结果分析	(143)
6.9 射极跟随器设计和验证	(126)	7.3 MOS 转移特性曲线测量	(145)
6.9.1 实验目的	(126)	7.3.1 实验目的	(145)
6.9.2 实验材料及仪器	(126)	7.3.2 实验材料及仪器	(145)

7.3.3	电路设计原理	(145)	7.8.2	实验材料及仪器	(164)
7.3.4	硬件测试电路	(147)	7.8.3	电路设计原理	(165)
7.3.5	测试结果分析	(148)	7.8.4	硬件测试电路	(166)
7.4	MOS 共源极放大电路设计和 验证	(152)	7.8.5	测试结果分析	(167)
7.4.1	实验目的	(152)	7.9	共模输入差分放大器电路设计和 验证	(168)
7.4.2	实验材料及仪器	(153)	7.9.1	实验目的	(168)
7.4.3	电路设计原理	(153)	7.9.2	实验材料及仪器	(168)
7.4.4	硬件测试电路	(153)	7.9.3	电路设计原理	(168)
7.4.5	测试结果分析	(154)	7.9.4	硬件测试电路	(169)
7.5	MOS 镜像电流源电路设计和 验证	(156)	7.9.5	测试结果分析	(170)
7.5.1	实验目的	(156)	第 8 章 集成运算放大器电路设计与 验证		(171)
7.5.2	实验材料及仪器	(156)	8.1	同相放大器电路设计和 验证	(171)
7.5.3	电路设计原理	(156)	8.1.1	实验目的	(171)
7.5.4	硬件测试电路	(157)	8.1.2	实验材料及仪器	(171)
7.5.5	测试结果分析	(158)	8.1.3	电路设计原理	(171)
7.6	零增益放大器电路设计和 验证	(158)	8.1.4	硬件测试电路	(172)
7.6.1	实验目的	(159)	8.1.5	测试结果分析	(173)
7.6.2	实验材料及仪器	(159)	8.2	反相放大器电路设计和 验证	(174)
7.6.3	电路设计原理	(159)	8.2.1	实验目的	(174)
7.6.4	硬件测试电路	(160)	8.2.2	实验材料及仪器	(174)
7.6.5	测试结果分析	(161)	8.2.3	电路设计原理	(174)
7.7	源极跟随器电路设计和 验证	(161)	8.2.4	硬件测试电路	(175)
7.7.1	实验目的	(161)	8.2.5	测试结果分析	(176)
7.7.2	实验材料及仪器	(162)	8.3	电压跟随器电路设计和 验证	(177)
7.7.3	电路设计原理	(162)	8.3.1	实验目的	(177)
7.7.4	硬件测试电路	(163)	8.3.2	实验材料及仪器	(177)
7.7.5	测试结果分析	(163)	8.3.3	电路设计原理	(177)
7.8	差模输入差分放大器电路设计和 验证	(164)	8.3.4	硬件测试电路	(178)
7.8.1	实验目的	(164)	8.3.5	测试结果分析	(179)

8.4	加法器电路设计和验证	.....	(180)	8.9.1	实验目的	.....	(195)
8.4.1	实验目的	.....	(180)	8.9.2	实验材料及仪器	.....	(195)
8.4.2	实验材料及仪器	.....	(180)	8.9.3	电路设计原理	.....	(195)
8.4.3	电路设计原理	.....	(180)	8.9.4	硬件测试电路	.....	(196)
8.4.4	硬件测试电路	.....	(181)	8.9.5	测试结果分析	.....	(197)
8.4.5	测试结果分析	.....	(182)	第9章 集成差动放大器电路设计与验证			
8.5	积分器电路设计和验证	.....	(183)	验证			
8.5.1	实验目的	.....	(183)	9.1	应变力测量电路设计和验证	.....	(199)
8.5.2	实验材料及仪器	.....	(183)	9.1.1	实验目的	.....	(199)
8.5.3	电路设计原理	.....	(183)	9.1.2	实验材料及仪器	.....	(199)
8.5.4	硬件测试电路	.....	(184)	9.1.3	应变片原理	.....	(199)
8.5.5	测试结果分析	.....	(185)	9.1.4	电路设计原理	.....	(201)
8.6	微分器电路设计和验证	.....	(186)	9.1.5	硬件测试电路	.....	(202)
8.6.1	实验目的	.....	(186)	9.1.6	测试结果分析	.....	(203)
8.6.2	实验材料及仪器	.....	(186)	9.2	热电阻测量电路设计和验证	.....	(205)
8.6.3	电路设计原理	.....	(186)	9.2.1	实验目的	.....	(205)
8.6.4	硬件测试电路	.....	(187)	9.2.2	实验材料及仪器	.....	(205)
8.6.5	测试结果分析	.....	(188)	9.2.3	温度传感器原理	.....	(206)
8.7	半波整流器电路设计和验证	.....	(189)	9.2.4	电路设计原理	.....	(206)
8.7.1	实验目的	.....	(189)	9.2.5	硬件测试电路	.....	(206)
8.7.2	实验材料及仪器	.....	(189)	9.2.6	测试结果分析	.....	(207)
8.7.3	电路设计原理	.....	(189)	第10章 有源滤波器电路设计与验证			
8.7.4	硬件测试电路	.....	(190)	验证			
8.7.5	测试结果分析	.....	(191)	10.1	一阶有源低通滤波器电路设计和验证	.....	(210)
8.8	全波整流器电路设计和验证	.....	(192)	10.1.1	实验目的	.....	(210)
8.8.1	实验目的	.....	(192)	10.1.2	实验材料及仪器	.....	(210)
8.8.2	实验材料及仪器	.....	(192)	10.1.3	电路设计原理	.....	(210)
8.8.3	电路设计原理	.....	(192)	10.1.4	硬件测试电路	.....	(212)
8.8.4	硬件测试电路	.....	(192)	10.1.5	测试结果分析	.....	(213)
8.8.5	测试结果分析	.....	(194)	10.2	一阶有源高通滤波器电路设计和验证	.....	(218)
8.9	单电源同相放大器电路设计和验证	.....	(195)				

10.2.1	实验目的	(218)	11.1.5	测试结果分析	(249)
10.2.2	实验材料及仪器	(218)	11.2	AB类功率输出放大器电路设计	
10.2.3	电路设计原理	(219)		和验证(一)	(250)
10.2.4	硬件测试电路	(220)	11.2.1	实验目的	(251)
10.2.5	测试结果分析	(221)	11.2.2	实验材料及仪器	(251)
10.3	一阶有源带通滤波器电路设计		11.2.3	电路设计原理	(251)
	和验证	(225)	11.2.4	硬件测试电路	(252)
10.3.1	实验目的	(225)	11.2.5	测试结果分析	(253)
10.3.2	实验材料及仪器	(226)	11.3	AB类功率输出放大器电路设计	
10.3.3	电路设计原理	(226)		和验证(二)	(254)
10.3.4	硬件测试电路	(228)	11.3.1	实验目的	(255)
10.3.5	测试结果分析	(229)	11.3.2	实验材料及仪器	(255)
10.4	一阶有源带阻滤波器电路设计		11.3.3	电路设计原理	(255)
	和验证	(232)	11.3.4	硬件测试电路	(256)
10.4.1	实验目的	(232)	11.3.5	测试结果分析	(257)
10.4.2	实验材料及仪器	(232)	第12章	振荡器电路设计与验证	(259)
10.4.3	电路设计原理	(232)	12.1	移相振荡器电路设计和	
10.4.4	硬件测试电路	(234)		验证	(259)
10.4.5	测试结果分析	(235)	12.1.1	实验目的	(259)
10.5	二阶有源低通滤波器电路设计		12.1.2	实验材料及仪器	(259)
	和验证	(241)	12.1.3	电路设计原理	(259)
10.5.1	实验目的	(241)	12.1.4	硬件测试电路	(261)
10.5.2	实验材料及仪器	(241)	12.1.5	测试结果分析	(262)
10.5.3	电路设计原理	(242)	12.2	文氏桥振荡器电路设计和	
10.5.4	硬件测试电路	(243)		验证	(262)
10.5.5	测试结果分析	(244)	12.2.1	实验目的	(263)
第11章	功率放大器电路设计与		12.2.2	实验材料及仪器	(263)
	验证	(247)	12.2.3	电路设计原理	(263)
11.1	B类功率放大器电路设计和		12.2.4	硬件测试电路	(265)
	验证	(247)	12.2.5	测试结果分析	(266)
11.1.1	实验目的	(247)	第13章	电源管理器电路设计与	
11.1.2	实验材料及仪器	(247)		验证	(267)
11.1.3	电路设计原理	(247)	13.1	线性电源电路设计和	
11.1.4	硬件测试电路	(248)		验证	(267)

13.1.1	实验目的	(267)	13.3.1	实验目的	(285)
13.1.2	实验材料及仪器	(267)	13.3.2	实验材料和仪器	(285)
13.1.3	电路设计原理	(267)	13.3.3	电路设计原理	(285)
13.1.4	硬件测试电路	(271)	13.3.4	硬件测试电路	(286)
13.1.5	测试结果分析	(271)	13.3.5	测试结果分析	(287)
13.2	降压型开关电源设计与 验证	(275)	第 14 章 模拟电路自动测试系统的 构建		(291)
13.2.1	实验目的	(275)	14.1	实验目的	(291)
13.2.2	实验材料和仪器	(276)	14.2	实验材料及仪器	(291)
13.2.3	电路设计原理	(276)	14.3	设计原理	(291)
13.2.4	硬件测试电路	(279)	14.3.1	测试仪器通过网络与上位机 连接	(291)
13.2.5	测试结果分析	(279)	14.3.2	自动测试过程的实现	(294)
13.3	升压型开关电源设计与 验证	(284)			

第1章 构建模拟电子系统的基本知识

本章介绍构建模拟电子电路（系统）需要的一些基础知识，包括电阻、电容、面包板等内容。

1.1 电 阻

本节首先介绍在实验室中常用的分立/轴向引线型电阻，然后，比较不同类型电阻的成本和性能。

1.1.1 轴向引线型电阻

3种最通用的轴向引线型电阻，包括合成碳/碳膜电阻、金属膜电阻和绕线电阻。

1. 合成碳/碳膜电阻

通常，在通用电路中使用这种电阻，通用电路对初始精度及温度变化引起的电路稳定性要求并不苛刻。典型的应用包括：用作集电极或发射极的负载；在晶体管/FET偏置网络中，作为充电电容的放电路径；在数字逻辑电路中，作为上拉或下拉。

碳膜电阻精度较低，为了理解电阻值系统，以10%精度的电阻为例，如果第一个电阻值是100Ω，就没有必要做105Ω，因为100Ω的电阻精度是90~110Ω，所以第二个有意义的电阻值是120Ω，阻值精度范围为110~130Ω。用这个方法类推，从100~1000Ω的电阻值为100Ω、120Ω、150Ω、180Ω、220Ω、270Ω和330Ω等。

国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）定义了一个标准电阻值系统，这个标准电阻值系统包括7种不同精度的电阻系列。精度从低到高分别为E3、E6、E12、E24、E48、E96、E192。这个标准电阻值系统中的标准电阻阻值是按照等比数列的形式选择的，且每10倍程的阻值数量是相同的。比如说，E6系列100~1000Ω之间有6个不同的电阻值，1~10kΩ之间也是同样有6个电阻值，并且后面每组中的阻值都是前组中对应阻值的10倍。因此，如果给出了100~1000Ω之间的标准阻值，其他阻值都可以很容易地计算出来。IEC给出的公式：

$$Y(n) = \text{Round}[100 \times e^{(\frac{n-1}{N}) \ln 10}] \quad (1.1)$$

式中，Round表示对计算结果进行四舍五入处理； n 表示在标准系列中的第 n 个标准电阻值； N 为7个电阻系列的值中一个，3、6、12、24、48、96或192； $Y(n)$ 为第 n 个标准电阻值所对应的具体电阻值。因此，电阻的排列服从准对数的关系。额定功耗范围1/8~2W之间。典型的、常使用的为1/4~1/2W，精度为5%和10%的电阻。

对于10~100Ω之间的电阻，在不同精度（0.1%、0.25%、0.5%、1%、2%、5%和10%）下的排列方式，如表1.1所示。

表 1.1 不同精度下, 10~100Ω 电阻的排列顺序

0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5% 10%
10.0	10.0	10	14.7	14.7		21.5	21.5		31.6	31.6		46.4	46.4		68.1	68.1	68
10.1			14.9			21.8			32.0			47.0		47	69.0		
10.2	10.2		15.0	15.0	15	22.1	22.1	22	32.4	32.4		47.5	47.5		69.8	69.8	
10.4			15.2			22.3			32.8			48.1			70.6		
10.5	10.5		15.4	15.4		22.6	22.6		33.2	33.2	33	48.7	48.7		71.5	71.5	
10.6			15.6			22.9			33.6			49.3			72.3		
10.7	10.7		15.8	15.8		23.2	23.2		34.0	34.0		49.9	49.9		73.2	73.2	
10.9			16.0		16	23.4			34.4			50.5			74.1		
11.0	11.0	11	16.2	16.2		23.7	23.7		34.8	34.8		51.1	51.1	51	75.0	75.0	75
11.1			16.4			24.0		24	35.2			51.7			75.9		
11.3	11.3		16.5	16.5		24.3	24.3		35.7	35.7		52.3	52.3		76.8	76.8	
11.4			16.7			24.6			36.1		36	53.0			77.7		
11.5	11.5		16.9	16.9		24.9	24.9		36.5	36.5		53.6	53.6		78.7	78.7	
11.7			17.2			25.2			37.0			54.2			79.6		
11.8	11.8		17.4	17.4		25.5	25.5		37.4	37.4		54.9	54.9		80.6	80.6	
12.0		12	17.6			25.8			37.9			55.6			81.6		
12.1	12.1		17.8	17.8		26.1	26.1		38.3	38.3		56.2	56.2	56	82.5	82.5	82
12.3			18.0		18	26.4			38.8			56.9			83.5		
12.4	12.4		18.2	18.2		26.7	26.7		39.2	39.2	39	57.6	57.6		84.5	84.5	
12.6			18.4			27.1		27	39.7			58.3			85.6		
12.7	12.7		18.7	18.7		27.4	27.4		40.2	40.2		59.0	59.0		86.6	86.6	
12.9			18.9			27.7			40.7			59.7			87.6		
13.0	13.0	13	19.1	19.1		28.0	28.0		41.2	41.2		60.4	60.4		88.7	88.7	
13.2			19.3			28.4			41.7			61.2			89.8		
13.3	13.3		19.6	19.6		28.7	28.7		42.2	42.2		61.9	61.9	62	90.9	90.9	91
13.5			19.8			29.1			42.7			62.6			92.0		
13.7	13.7		20.0	20.0	20	29.4	29.4		43.2	43.2	43	63.4	63.4		93.1	93.1	
13.8			20.3			29.8			43.7			64.2			94.2		
14.0	14.0		20.5	20.5		30.1	30.1	30	44.2	44.2		64.9	64.9		95.3	95.3	
14.2			20.8			30.5			44.8			65.7			96.5		
14.3	14.3		21.0	21.0		30.9	30.9		45.3	45.3		66.5	66.5		97.6	97.6	
14.5			21.3			31.2			45.9			67.3			98.8		

碳类型的电阻温度系数较差, 典型值为 5000ppm/°C, 因此不适合在高精度的应用中使用, 在这些应用中, 要求温度对电阻值变化的影响很小。但是, 碳类型电阻的成本较低。

碳类型的电阻使用色环标识。典型的有 3 色环、4 色环、5 色环和 6 色环, 如图 1.1 所示。电阻色环的不同含义, 如表 1.2 所示。

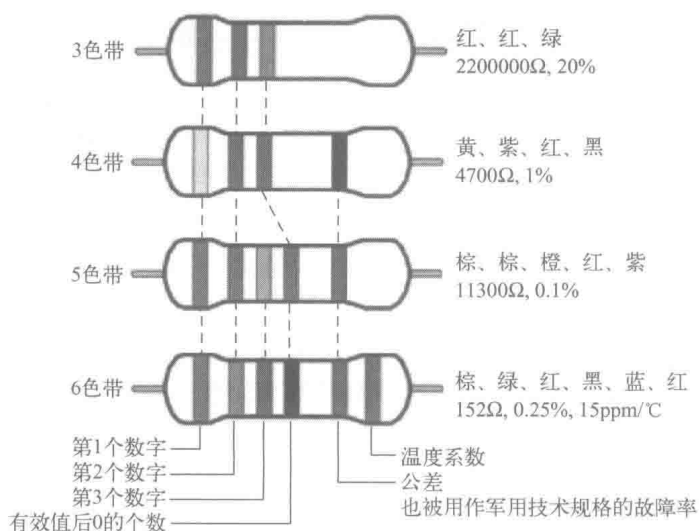


图 1.1 电阻色标

表 1.2 电阻色环的不同含义

颜 色	代表的数字	有效值后 0 的个数	公 差	温度系数 (ppm/℃)	故 障 率
黑色	0	0		250	
棕色	1	1	1%	100	1
红色	2	2	2%	50	0.1
橙色	3	3		15	0.01
黄色	4	4		25	0.001
绿色	5	5	0.5%	20	
蓝色	6	6	0.25%	10	
紫色	7	7	0.1%	5	
灰色	8	8	0.05%	1	
白色	9	9			
金色	无有效数字	-1	5%		
银色	无有效数字	-2	10%		
无色带	无有效数字	无有效数字	20%		

当使用 4 色环表示电阻时，颜色排列依次为黄色、紫色、橙色和银色，表示 4、7 和 3 个 0，即该电阻阻值为 47kΩ，公差为 10%。

2. 金属膜电阻

在高精度应用中，常使用金属膜电阻。在这些应用中，要求有较高的初始精度、低温度系数和低噪声。金属膜电阻的成分包括镍铬铁合金、氧化锡或氮化钽。典型的应用在下面的领域，包括电桥、RC 振荡器和有源滤波器，其初始精度范围在 0.1% ~ 1.0% 之间，且温度系数范围在 10 ~ 100ppm/℃ 之间。

3. 绕线电阻

绕线电阻的精度和稳定性更好 (0.05%，<10ppm/℃)。常用在下面的应用中，如调谐网络、高精度的衰减器电路。

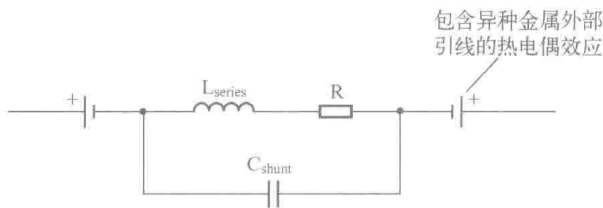


图 1.2 高频电阻模型

电阻的基材，以及长度和横截面的比值决定了在高频时，寄生 L 和 C 对电阻稳定性的影响程度。通常情况下，薄膜型电阻有很好的高频响应特性，大约在 100MHz 也可以保证它们的精度。碳类型电阻的频率大约为 1MHz 。绕线电阻所包含的电感最大，因此频率响应特性最差。

1.1.2 电阻网络

一个电阻网络是单个封装，在该封装内包含两个以上的电阻，如图 1.3 所示。这个封装包含很多引线，通过它构成电路的一部分。

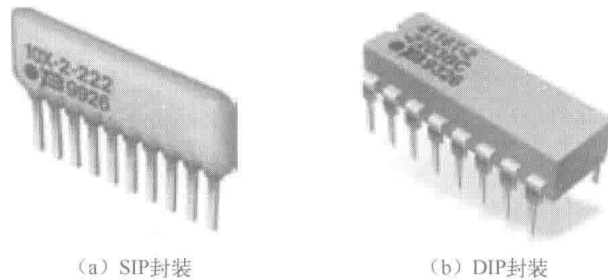


图 1.3 电阻网络的典型封装

通常，电阻网络有两种连接方式，即总线方式和隔离方式，如图 1.4 所示。总线排列方式用于上拉、下拉或总线端接。

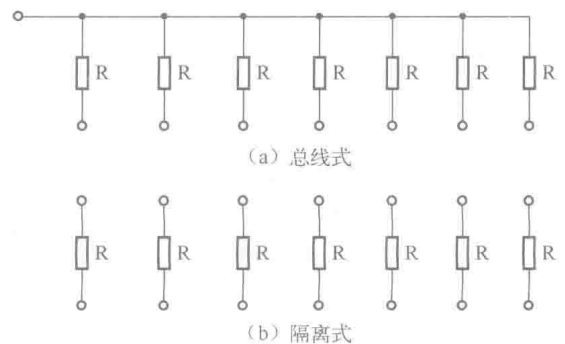


图 1.4 电阻网络的内部结构

除了体现在降低设计难度和设计成本外，电阻网络作为一个独立的实体，或者单片集成电路的一部分，通过激光微调，提供了很高的精度、紧温度系数（ TC ）匹配和良好的温度跟踪。用于分立网络的典型应用是在高精度的衰减器和增益设置级。薄膜网络也用在单片集成电路设计和仪表放大器。此外，薄膜网络还使用在 $R-2R$ 梯度网络结构的 $CMOS$ D/A 和 A/D 转换器中。

厚膜类型的电阻成本最低，有较好的匹配（ $<0.1\%$ ），但是温度系数（ $>100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）并不好。通过将阻性元素电镀到衬底材料（如玻璃或陶瓷），制造厚膜电阻。

薄膜网络有较好的价格，并提供了很好的匹配（ 0.01% ），以及良好的温度系数（ $<100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）。通过气相沉淀的方法，制造薄膜电阻。

1.1.3 贴片式电阻元件的封装

本节介绍贴片式单个电阻封装及贴片式排电阻封装。

1. 贴片式单个电阻封装

贴片电阻电容常见封装有9种，有英制和公制两种表示方式。英制表示方式是采用4位数字表示的EIA（美国电子工业协会）代码，前两位表示电阻或电容长度，后两位表示宽度，以英寸为单位。实际上，很少使用公制，公制代码也由4位数字表示，其单位为毫米，与英制类似。单个贴片电阻物理尺寸的标准，如图1.5所示。贴片式电阻的规格、尺寸和功率的对应关系，如表1.3所示。

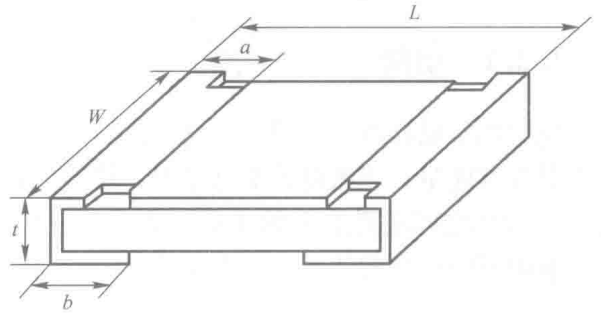


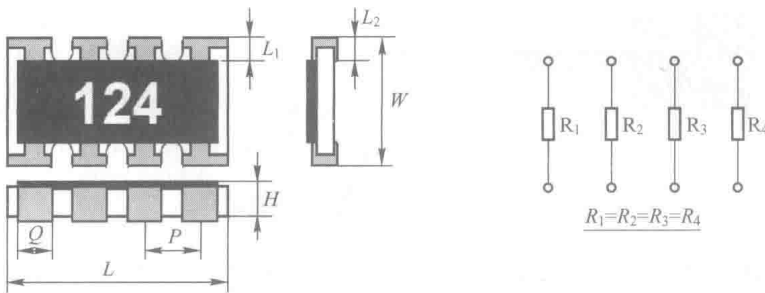
图 1.5 单个贴片电阻物理尺寸

表 1.3 贴片电阻封装规格、尺寸和功率的对应关系

英制代码 (inch)	公制代码 (mm)	长(L) (mm)	宽(W) (mm)	高(t) (mm)	a(mm)	b(mm)	额定功率 (W)	最大工作 电压 (V)
0201	0603	0.60 ± 0.05	0.30 ± 0.05	0.23 ± 0.05	0.10 ± 0.05	0.15 ± 0.05	1/20	25
0402	1005	1.00 ± 0.10	0.50 ± 0.10	0.30 ± 0.10	0.20 ± 0.10	0.25 ± 0.10	1/16	50
0603	1608	1.60 ± 0.15	0.80 ± 0.15	0.40 ± 0.10	0.30 ± 0.20	0.30 ± 0.20	1/10	50
0805	2012	2.00 ± 0.20	1.25 ± 0.15	0.50 ± 0.10	0.40 ± 0.20	0.40 ± 0.20	1/8	150
1206	3216	3.20 ± 0.20	1.60 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.20	0.50 ± 0.20	1/4	200
1210	3225	3.20 ± 0.20	2.50 ± 0.20	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.20	0.50 ± 0.20	1/3	200
1812	4832	4.50 ± 0.20	3.20 ± 0.20	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.20	0.50 ± 0.20	1/2	200
2010	5025	5.00 ± 0.20	2.50 ± 0.20	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.20	0.60 ± 0.20	3/4	200
2512	6432	6.40 ± 0.20	3.20 ± 0.20	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.20	0.60 ± 0.20	1	200

2. 贴片式排电阻封装

贴片式排电阻的引脚个数为偶数，如图1.6所示。它们没有公共端，并且内部电阻相互独立，常见的有4个电阻，故有8个引脚，即为电阻数的2倍，它经常用作限流电阻。



尺寸型号	L(mm)	M(mm)	H(mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	P(mm)	Q(mm)
0603	3.2 ± 0.2	1.6 ± 0.15	0.5 ± 0.1	0.30 ± 0.15	0.35max	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1

图 1.6 贴片式排电阻封装