



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校电子信息与电气学科特色教材

模拟电路实验

李 宁 主编

唐锦成 郭东亮 陈曼娜 编

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校电子信息与电气学科特色教材

模拟电路实验

李 宁 主编

唐锦成 郭东亮 陈曼娜 编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。其内容包括对实验过程、测量误差及数据处理、基本电量测量方法的介绍,实验室常用的示波器、函数发生器、直流稳压电源、晶体管特性图示仪、万用表等电子仪器的原理及使用方法,15个可选的从分立元件到集成电路的模拟电路实验和1个综合设计题,以及实验常见问题和常用电子元器件介绍。

在本书实验内容的前半部分中可以选择合适的几个电路单元构建起一个音频放大器;后半部分中同样可以选择合适的电路单元构建一个波形发生器。这两个电路系统的构建使得进行模拟电路实践基础训练的同时突出了模拟电路的实用性,强调了实验的目的性和系统性。任课教师可根据实际情况灵活选用。

本书的读者对象是高等学校电气信息类各专业的学生以及从事电子技术研发的工程技术人员,亦可供物理、微电子、计算机等相关专业的学生参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路实验/李宁主编;唐锦成,郭东亮,陈曼娜编. —北京:清华大学出版社,2011.6

(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-24883-5

I. ①模… II. ①李… ②唐… ③郭… ④陈… III. ①模拟电路—实验—高等学校—教材 IV. ①TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033266 号

责任编辑:赵从棉

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjjc@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:10 字 数:233 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版 印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:19.00 元

产品编号:021625-01

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才,是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求,等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成



为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

前言

关于本书

《模拟电路实验》与《模拟电路》理论教材相辅相成,是电气信息、计算机工程、应用物理等专业的学生进行电子工程初步训练的重要实践课程。

本书分为四篇。第一篇为绪论,介绍实验过程、测量误差及数据处理、基本电量的测量方法;第二篇为常用电子仪器的原理与应用,介绍实验室常用的示波器、函数发生器、直流稳压电源、晶体管特性图示仪、万用表等仪器的使用方法;第三篇为模拟电路实验部分,涵盖了从分立元件到集成电路的基本功能电路的分析、设计和调试;第四篇为附录,包括实验常见问题和常用电子元器件介绍。

本书是在分析、比较国内外一些优秀高校的同类实验教材基础上,借鉴和吸收了他们的长处而编写的。我们的意图是提倡学习的独立自主性,指导大家从简单到复杂、从分立到集成、从电路到系统、从分析到综合地对模拟电路进行分析、设计和调试,希望能培养大家提出问题、分析问题、解决问题的能力。这种思想从以下几个方面体现在实验的设计当中。

(1) 本书没有通常的实验原理介绍,因为这些读者已经了解或者可以在许多教科书中得到。每个实验只有明确的阅读任务和相关的思考题。较为全面地构建起和实验有关的知识内容,对问题进行预先思考,无疑有助于读者对实验电路的设计和理解,加快做实验的过程。

(2) 实验内容中夹杂着一些有针对性的问题。这些问题中有的要求读者复习以前的知识;有的引导读者去仔细观察和探讨实验现象;有的进一步考查读者对隐藏在现象背后的内容的理解程度;还有的则要求读者将实验现象与理论估计进行比较。这样做的好处是使大家养成边动手边思考的好习惯。思考和动手同时进行,互相促进,从而加强实验的意义和效果。

(3) 在本书的实验内容中,实验2~实验7是由分立元件组成的电路单元,读者可以从中选择几个合适的单元在实验8中耦合起来构建一个音频放大器;同样地,读者也可以利用这之后的电路单元实验构建起一个波形发生器。从这两个功能电路系统的构建中,可以看到模拟电路的实际应用价值。

(4) 电路仿真软件作为课程的有机部分自始至终贯穿在整个实验教学过程中。作为“软实验室”而言,电路仿真软件在时间和空间上的优势是不言而喻的。所以读者应该熟悉电路仿真程序,如 PSpice 等。

(5) 本书实验内容的前半部分,步骤相对详细和清晰,并附有记录数据的实验表格。而后半部分倾向于设计,有些甚至让读者自己计划方法步骤来完成实验。目的在于首先让读者养成一个良好的实验习惯,包括使用实验仪器、熟悉正确的实验步骤、会画规范的实验表格、能分析实验结果等,之后的重点就是由读者自己来考虑解决问题的有效办法。

关于实验报告的撰写

读者在完成实验的过程中不仅仅是学习模拟电路的设计和调试技术,还要将学到和感悟到的知识、自己的想法,以及得到的结论表现在一份组织得很好的实验报告中。

因此,实验课后的工作主要是撰写实验报告。写好实验报告十分重要,它不仅是完成一项实验工作所不可缺少的一个组成部分,还是今后写好技术报告或科技论文的基础。

一份完整的实验报告应该由实验题目,实验目的,实验仪器,实验原理、方法与步骤,实验数据处理及误差分析,总结和问题讨论等部分构成。

其中,实验原理、方法与步骤部分是报告的重点之一。要简明扼要地写出本次实验是什么内容,根据什么原理、采用何种方法来实现的。简而言之就是:做什么?怎么做?

实验数据处理及误差分析部分是报告的重点之二。报告上要有原始数据,以及读者对数据的处理(比如,有效数字)。对于这一过程要有实事求是的科学态度。如果数据不对,要分析原因,如测量过程、测量仪器或者测量态度等,不要轻率修改。要知道很多新的发现往往就是出现在这种习惯上认为是错误的的数据之中。很多情况下,实验数据需要绘制大量的图表、曲线,这是说明问题的一种很好的表达方式。图不需要很完美,但应该清晰地标注出坐标轴的物理量符号、单位和刻度值,波形的最大值和最小值、分段点所在等。另外,这门课强调模拟电路的直觉和模型,所以,作出大量的近似是合理的,记住 $\pi \approx e \approx 3$ 是工程近似的首选。

对于总结和问题讨论部分,读者可以对这个实验进行总结,可以就实验结果、实验内容及实现方法等有关问题提出自己的见解和建议。

最后,要注意的是,报告要有适当的描述和较为详细的解释以使得其他的电子工程师理解你所做的事情,而不能简单到只有那些此前做过这一特定实验的人才能理解。

“听到的事情会忘记;看到的事情或许能记住;但亲身经历过的事情将终生不忘”。本书借助于电路图、元器件、各种电子仪器、计算机仿真软件等来帮助读者观察电子电路中正在发生什么。我们鼓励读者积极地参与进去以便体验电子学的奇妙之处,并将这种体验以及学到的知识应用到今后的生活和工作当中。带着我们祝你成功的美好期望开始你的电子电路实验之旅吧!

编者

2011年4月于中山大学

目 录

第一篇 绪 论

第 1 章 电路的设计、安装与调试	3
1.1 模拟电路实验的特点	3
1.2 实验电路的设计	4
1.3 实验电路的安装	4
1.4 实验电路的调试	5
第 2 章 实验误差分析及数据处理	7
2.1 实验误差分析	7
2.2 有效数字	11
2.3 实验数据处理	13
第 3 章 基本电量的测量方法	15
3.1 电压的测量	15
3.2 电路输入输出电阻的测量	18
3.3 频率和频率特性的测量	18

第二篇 常用电子仪器的原理与使用

第 4 章 示波器	25
4.1 通用示波器的组成及工作原理	25
4.2 CS-4135 型双踪示波器简介	32
第 5 章 函数发生器	40
5.1 面板操作键及功能说明	40
5.2 使用方法	41
5.3 主要技术参数	42
第 6 章 直流稳压电源	43
6.1 直流稳压电源的组成及技术指标	43
6.2 DF1731SC2AT 型直流稳压、稳流电源	44



第 7 章 半导体管特性图示仪	46
7.1 晶体管特性图示仪的工作原理	46
7.2 仪器的结构简介	50
7.3 仪器操作步骤	53
7.4 使用范例	54
第 8 章 万用表	63
8.1 模拟式万用表	63
8.2 数字式万用表	67

第三篇 模拟电路实验

实验 1 常用电子仪器的使用	75
1.1 实验目的	75
1.2 实验前的预习	75
1.3 实验仪器	76
1.4 实验内容	76
实验 2 晶体管放大电路	79
2.1 实验目的	79
2.2 实验前的预习	79
2.3 实验仪器	80
2.4 实验内容	80
实验 3 场效应管放大电路	82
3.1 实验目的	82
3.2 实验前的预习	82
3.3 实验仪器	83
3.4 实验内容	83
实验 4 多级放大电路的设计与调试	86
4.1 实验目的	86
4.2 实验前的预习	86
4.3 实验仪器	88
4.4 实验内容	88
实验 5 差动放大电路设计(I)	89
5.1 实验目的	89

5.2	实验前的预习	89
5.3	实验仪器	89
5.4	实验内容	89
实验 6	差动放大电路设计(II)	91
6.1	实验目的	91
6.2	实验前的预习	91
6.3	实验仪器	91
6.4	实验内容	91
实验 7	OCL 功率输出级电路设计	93
7.1	实验目的	93
7.2	实验前的预习	93
7.3	实验仪器	94
7.4	实验内容	94
实验 8	音频放大器	95
8.1	实验目的	95
8.2	实验前的预习	95
8.3	实验仪器	95
8.4	实验内容	96
实验 9	负反馈放大电路(I)	97
9.1	实验目的	97
9.2	实验前的预习	97
9.3	实验仪器	97
9.4	实验内容	98
实验 10	负反馈放大电路(II)	100
10.1	实验目的	100
10.2	实验前的预习	100
10.3	实验仪器	100
10.4	实验内容	100
实验 11	负反馈放大电路(III)	102
11.1	实验目的	102
11.2	实验前的预习	102
11.3	实验仪器	103
11.4	实验内容	103



实验 12 有源滤波电路的设计和调试	105
12.1 实验目的	105
12.2 实验前的预习	105
12.3 实验仪器	107
12.4 实验内容	107
实验 13 波形发生电路	109
13.1 实验目的	109
13.2 实验前的预习	109
13.3 实验仪器	110
13.4 实验内容	110
实验 14 压控低频振荡电路	111
14.1 实验目的	111
14.2 实验前的预习	111
14.3 实验仪器	115
14.4 实验内容	115
实验 15 阶梯波发生电路	117
15.1 实验目的	117
15.2 实验前的预习	117
15.3 实验仪器	119
15.4 实验内容	119
实验 16 设计课题	120
16.1 实验目的	120
16.2 实验前的预习	120
16.3 设计题目	120
16.4 设计课题实验报告要求	122

第四篇 附 录

附录 1 实验常见故障分析与排除	125
1.1 干扰与屏蔽	125
1.2 信号耦合与隔离	126
1.3 电路不能正常工作的处理	127
1.4 其他不正常的处理	127

附录 2 常用电子元器件介绍 129

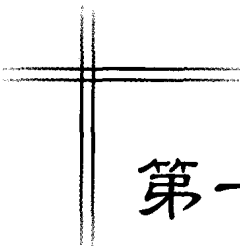
 2.1 电阻 129

 2.2 电容器 133

 2.3 电感器 136

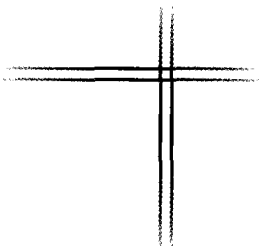
 2.4 半导体器件 137

致谢 145



第一篇

绪 论



这一篇主要介绍模拟电路的实验过程。包括电路的设计、安装和调试,实验数据的处理与误差分析,实验中电物理量的测量方法等。

第1章

电路的设计、安装与调试

模拟电路的分析方法是“定性分析、定量估算、仿真验证、实验调整”。由于在设计电路时,不一定能够考虑到各种影响电路的因素,所以最后对实际电路进行安装和调试,使其达到预期的技术指标和性能是非常重要的。事实上,任何一个好的设计方案都是经过仿真、安装、调试的反复修改才得以完善的。

1.1 模拟电路实验的特点

“模拟电路”是一门实践性很强的课程,具有工程特点。学习者通过它开始接触到实际的工程应用。对一个从事电子技术工作的科技人员来说,必要的硬件知识和实验能力是必须具备的基本功,也是发挥创新潜力的基础。但是,由于模拟电路涉及的方面较多,加上经验不足,所以,做模拟电路实验难免会出现各种各样的问题。因此,了解模拟电路的特点是很必要的。

(1) 电子器件(如半导体管、集成电路等)品种繁多,特性各异。在进行实验时,首先面临如何正确、合理地选择电子器件的问题。如果选用不当,则难以获得满意的实验结果,甚至造成电子器件的损坏。因此,必须对所用电子器件的性能有所了解。

(2) 模拟电子器件的分散性大,而电子元件(如电阻、电容等)也有较大的容差,这就使得实际电路与设计要求的有一定的差异,实验时就需要进行调试。调试电路所花费的精力有时甚至会超过制作电路所花费的精力。对于已调好的电路,若更换了某个元器件,也有个重新调试的问题。因此,掌握调试方法,积累调试经验是很重要的。

(3) 模拟电子器件的特性大多数都是非线性的。因此,在使用模拟电子器件时,有一个如何合理地选择与调整工作点以及如何使工作点稳定的问题。而工作点是由偏置电路确定的,因此偏置电路的设计与调整在模拟电路中占有极其重要的地位。另外,器件的非线性特性也使得模拟电子电路的设计难以精确,因此必须通过实验调试。

(4) 由于测试仪器的非理想特性(如信号源有一定的内阻、示波器等测试仪器输入阻抗不够高等),因此在测试时,测试仪器对被测电路的工作状态有影响。了解这种影响,选择合适的测试仪器和分析由此引起的测试误差,是模拟电路实验不可忽视的问题。

(5) 电子电路中的寄生参数(如分布电容、寄生电感等)和外界的电磁干扰,在一定条件下可能对电路的特性有重大影响,甚至因产生自激而使电路不能工作,这种情况在工作频率高时尤其容易发生。因此,在电路中合理布线、连接是相当重要的。

(6) 在复杂的电路中,各单元电路相互连接时,经常会遇到一个阻抗匹配问题。尽管各单元电路都能正常工作,若未能很好地匹配,则连接好的整体电路也可能不能正常工作。

1.2 实验电路的设计

很多情况下,我们要求根据给定的性能指标设计一个电路。一般的设计方法与步骤如下。

1. 任务分析、方案比较、确定总体方案

首先要综合理论知识,深入分析任务,并在此基础上考虑实现电路的途径。这就要求对电路的功能、性能、体积、成本等多方面做权衡比较,最后确定方案。

2. 划分各个相对独立模块,得到总体的原理框图

这一步要求根据电路的功能、总体指标,按信号从输入到输出的流向划分各个相对独立的模块,例如,收音机接收系统可划分成射频放大器、中频混频放大部分、检波器、音频放大器、话筒等部分;然后对各模块分配合适的性能指标,从而得到电路总的原理框图。

3. 细化模块为具体的电路

在方框图结构的基础上再对每一功能模块进一步细化,给出具体的电路形式,选用合适的元器件,计算电路参数,检查是否达到设计指标。

4. 仿真验证电路

在计算机上利用仿真软件对电路进行验证,看电路是否达到了预期的要求。如果没有,则进一步修改设计,直到满意为止。

5. 实验调整电路

根据设计好的电路进行实际安装,反复调试,直到电路满足要求的性能指标。

1.3 实验电路的安装

根据原理图实现电路的安装,关键问题就是要将所需的元器件进行合理的连线和布局,这直接影响到电路的性能。一般的原则如下。

(1) 元件及连线的排列要整齐。一般按电路的顺序排列,多级电路要成直线布局。

(2) 布线要有步骤地进行,按信号的传输方向依次接线并使连线贴近实验板面,做到横平竖直。为查找方便,最好使用不同颜色的导线,如,正电源用红色导线,负电源用蓝色导线,地线用黑色导线,信号线用黄色导线等。

(3) 所有连线要尽可能短并避免在空间形成网状;集成电路上方不得有导线或元件跨越;不要使两条或多条连线相互平行或重叠在一起。这样有利于减小干扰和噪声。

(4) 最好在各电源的输入端和地之间并联一个几十微法的电容,这样可减小瞬变过程电流的影响。为了更有效地抑制电源中的高频分量,应在该电容两端再并联一个 $0.01 \sim 0.047 \mu\text{F}$ 的高频去耦电容。

1.4 实验电路的调试

调试包括测试和调整两个方面。测试是在电路安装后对其参数及工作状态进行测量,调整是在测试的基础上对电路参数进行修正。安装好电路之后,就要进入电路的调试阶段,这是一个测量、分析、判断、调整、再测量的反复过程。经过调试使得电路能够正常工作,特性指标能达到预定的要求。当设计一个电路得到了理想的仿真结果后,可以在电路图上标明各点的电位值及其他一些主要参考内容。

调试是一项细致的工作,既要熟悉电路的工作原理,又需要有一定的实践经验。由于电路的多样性和实际情况的复杂性,调试的一般原则是:先分段后联调,先静态后动态,先粗后细。

遵循这一原则,电路的一般测试步骤如下。

1. 通电前的直观检查

首先,仔细地根据设计的电路图检查安装的线路,看是否存在接错线、少接或多接线的情况。最好利用指针式万用表的“ $R \times 1$ ”挡或数字万用表的“ Ω ”挡帮助检查。

然后,直观检查元器件的安装情况。如,引脚之间有无短路;电路是否有公共地端;元件数值对不对;二极管、三极管引脚是否接错;电解电容的正负极有没有接反;等等。最后,还要注意考虑电源应该如何引入、极性怎样连接;信号的输入、输出端在哪里。

只有确认电路连接无误后,方可通电进行调试。

2. 通电观察

将调到规定输出值的电源接入电路,并进行观察。一旦有异常现象(如声响、过热、焦臭),立即关断电源。如无异常,则测量电源电压、各器件引脚电位,确认电路各部分工作正常。

3. 分块调试

交直流共存是模拟电路的一个特点,因此调试包括静态调试和动态调试。静态调试是在电路没有外加信号的情况下,测量电路各点的电位,从而判断电路的工作情况,发现损坏的元器件,调整电路参数,使电路达到良好的工作状态。动态调试是在静态调试的基础上,在电路的输入端接入交流信号,并循着信号的流向逐级检查各关键点的波形、考察其性能指标。

对于由简单电路组成的复杂电路,通常将其分成一个个功能模块(或基本单元电路)进行安装调试,这就是分块调试。分块调试可以按信号的流向,将前面调试过的模块的输出信号,作为后一模块的输入信号,逐步扩大调试范围。若各单元电路是级联的,也可以考虑先调试最后一级,然后依次调试前面各级。

4. 整机联调

分块调试之后就可实现整机联调。整机联调只需要观察动态结果,把电路通过测量仪