



国家电工电子教学基地、国家电工电子实验教学示范中心系列教材
北京市精品课程教材



电子技术 (模拟部分)

Dianzi Jishu Moni Bufen

◎ 主 编 刘 颖



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



国家电工电子教学基地、国家电工电子实验教学示范中
北京市精品课程教材

电子技术

(模拟部分)

主 编 刘 颖



北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 要

本书为北京交通大学国家电工电子教学基地和国家电工电子实验教学示范中心课程建设的系列教材之一。作者在多年教学实践基础上,根据相关专业的教学需求和学习特点,编写此书。

本书第1章主要介绍了电子技术相关概念,以及学生在学习本教材后可实现的典型实用电路;第2章介绍了二极管及其典型应用;第3章介绍了晶体三极管及其基本放大电路;第4章介绍了场效应管及其基本放大电路;第5章介绍了基于三极管、场效应管各种基本放大电路的级联电路的分析方法;第6章介绍了集成电路的组成、特性及集成运放的典型运算电路;第7章介绍了负反馈对分立元件放大电路、集成运放电路性能的影响及电路性能的分析方法;第8章对电压比较器、滤波器、信号发生器、直流电源等典型功能应用电路进行了分析计算,对教材中介绍的功能电路进行了仿真实验。本书每章均提供了各种类型的习题,每章习题均有参考答案。

本书适合作为高等院校计算机、生物医学、机械工程等电子信息相关专业的教学参考教材,也可作为电子技术相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术.模拟部分/刘颖主编.--北京:北京邮电大学出版社,2013.1

ISBN 978-7-5635-3325-1

I. ①电… II. ①刘… III. ①模拟电路—电子技术 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 283446 号

书 名	电子技术(模拟部分)
主 编	刘 颖
策 划 人	唐咸荣 韩 霞
责任编辑	韩 霞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×960 mm 1/16
印 张	22.5
字 数	487 千字
版 次	2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-3325-1

定价: 45.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书为北京交通大学国家电工电子教学基地和国家电工电子实验教学示范中心课程建设的系列教材之一。

目前电子技术已广泛应用于各个领域,不仅通信工程专业、自动化专业、电子科学技术专业等开设“模拟电子技术”、“数字电子技术”、“通信电子线路”等电子技术相关课程,计算机、生物医学、机械控制、交通运输等专业也陆续开设了电子技术相关课程。作者在总结多年实践教学工作经验的基础上,针对计算机科学与技术等电子信息类相关专业电子技术课程中模拟部分内容的教学需求,编写此书。希望能够为计算机、生物医学等相关专业的电子技术课程的教学工作带来方便。本教材的编写力求从模拟电子电路的实际应用出发,以介绍半导体器件的外特性及其典型功能应用电路为主,尽量避免过多的关于半导体物理器件内部结构的介绍,减少学生对于模拟电子技术课程学习的畏难情绪。

本教材力求做到通俗易懂、循序渐进。从第1章的电子技术概念、特点和生活中典型实用电路案例的介绍开始,到第2章、第3章、第4章关于二极管、三极管和场效应管三个半导体核心元件的特性、工作原理及其典型功能电路的介绍,到第5章、第6章关于集成放大电路的组成、特性和级联电路的分析,以及第7章中关于负反馈对分立元件放大电路、集成运放电路性能影响的分析方法,到最后第8章对电压比较器、滤波器、信号发生器、直流电源等典型功能应用电路的分析、设计方法的介绍及仿真实验,希望学习者能够感受到模拟电子技术的魅力所在,激发学习者的学习兴趣,使学生能够较好地掌握模拟电子技术中典型功能电路的设计、分析方法,在未来的工作实践中熟练应用。

本教材在每章最后提供了章节主要内容小结,便于学生对课程中每章内容的总结、提炼。教材每章均有大量的习题,有填空题、判断题、简答题、选择填空题、分析计算和设计等类型题目,题型多样化,且在难度上有一定的层次。本教材为各章习题提供了参考答案,为学习者进行自我测试提供了便利。

为了给使用本教材的主讲教师提供工作方便,作者提供基于本教材的电子教案,对于教材中的典型功能电路的仿真,均提供相关文件,希望以此分享北京交通

大学模拟电子技术课程组的教学工作成果。

本书由刘颖担任主编,参加编写的人员还有张海涛、刘宗良。另外,本教材在编写过程中,课程组的任希老师、曾涛老师、黄亮老师提供了大量的编写素材和宝贵建议。在此,作者向所有关心、支持和帮助过本书编写、修改、校对、出版、发行工作的人们表示最真诚的谢意。

由于作者能力和水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎大家多加指正。

编 者

2012 年 10 月于北京交通大学红果园

作者电子邮箱:liuying@bjtu.edu.cn

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电子技术概念	1
1.1.1 电信号	1
1.1.2 电子技术和电子电路	2
1.2 电子电路设计	3
1.2.1 电子电路系统简介	3
1.2.2 电子系统设计原则	5
1.2.3 电子系统设计流程	6
1.3 电子电路的设计软件介绍	7
本章主要内容小结	8
习题	8
第 2 章 二极管及其典型应用	9
2.1 二极管特性	9
2.1.1 二极管符号及其特性	9
2.1.2 二极管等效模型	11
2.2 二极管工作原理	16
2.2.1 半导体基础知识	16
2.2.2 PN 结及其特性	20
2.3 二极管结构与类型	26
2.3.1 二极管结构	26
2.3.2 二极管类型	28
2.4 二极管典型应用电路	28
2.4.1 二极管整流电路	28
2.4.2 二极管稳压电路	30

2.4.3 二极管限幅电路	33
2.4.4 二极管钳位电路	33
2.5 二极管主要参数	34
2.6 常用二极管元件介绍	35
2.6.1 二极管的命名方法	35
2.6.2 常用半导体二极管及其特性参数	36
本章主要内容小结	39
习题	40
第3章 晶体三极管及其放大电路	44
3.1 晶体三极管结构及其特性	44
3.1.1 三极管结构及符号	44
3.1.2 三极管的电流放大原理	45
3.1.3 三极管的输入输出特性	50
3.1.4 三极管的主要特性参数	52
3.1.5 温度对三极管特性及参数的影响	54
3.2 三极管放大电路工作原理	55
3.2.1 三极管放大电路组成	55
3.2.2 放大电路工作原理	57
3.3 共射组态放大电路静态(直流)分析方法	61
3.3.1 三极管直流模型	62
3.3.2 等效电路法	63
3.3.3 图解法	63
3.4 共射组态放大电路动态(交流)分析方法	65
3.4.1 三极管交流模型	65
3.4.2 等效电路法	69
3.4.3 图解法	76
3.5 共集组态放大电路分析	81
3.5.1 共集 CC 组态放大组成	81
3.5.2 共集 CC 组态放大电路分析	82
3.6 共基组态放大电路分析	86
3.6.1 共基组态放大电路组成	86

3.6.2 共基组态放大电路分析	87
3.7 三种组态放大电路比较	88
3.8 差分放大电路	89
3.8.1 零点漂移	89
3.8.2 差分放大电路的组成	90
3.8.3 差分放大电路的性能分析	92
3.9 功率放大电路	101
3.9.1 功率放大电路概述	102
3.9.2 乙类互补对称功率放大电路	107
3.9.3 甲乙类互补对称功率放大电路	112
3.9.4 复合管	115
3.10 常用三极管元件介绍	117
本章主要内容小结	118
习题	119
第4章 场效应管及其放大电路	138
4.1 场效应管结构及其特性	138
4.1.1 场效应管概念及分类	138
4.1.2 结型场效应管符号、特性及工作原理	138
4.1.3 绝缘栅型场效应管符号、特性及工作原理	144
4.1.4 场效应管主要参数	150
4.1.5 场效应管(FET)与双极结型晶体管(BJT)的比较	151
4.2 场效应管放大电路工作原理	152
4.2.1 场效应管放大电路组成	152
4.2.2 放大电路工作原理	154
4.3 场效应管放大电路静态分析方法	155
4.3.1 场效应管的直流模型	155
4.3.2 场效应管的直流偏置电路及静态分析	156
4.4 场效应管放大电路动态分析方法	158
4.4.1 场效应管交流模型	158
4.4.2 共源放大电路分析	159
4.4.3 共漏放大电路分析	160

4.4.4 共栅放大电路分析	162
4.5 场效应管电路应用	163
本章主要内容小结	166
习题	167
第5章 级联放大电路	173
5.1 多级放大电路的耦合方式	173
5.1.1 阻容耦合	174
5.1.2 变压器耦合	174
5.1.3 光电耦合	175
5.1.4 直接耦合	176
5.2 多级放大电路的动态分析方法	177
5.2.1 级联放大电路的分级模型	177
5.2.2 输入电阻法	179
5.2.3 开路电压法	181
本章主要内容小结	186
习题	186
第6章 集成运放及其典型应用	194
6.1 模拟集成运算放大器概述	194
6.1.1 集成电路简介	194
6.1.2 集成运放的组成	195
6.1.3 集成运放主要参数	198
6.1.4 集成运放芯片简介	202
6.2 理想运算放大器	203
6.2.1 集成运放的电路模型及其特性	203
6.2.2 理想运算放大器的主要性能指标	205
6.2.3 理想运算放大器的线性与非线性工作状态	205
6.3 集成运放在运算电路中的应用	207
6.3.1 反相比例运算电路	208
6.3.2 同相比例运算电路	209
6.3.3 加法运算电路	211
6.3.4 减法运算电路	213

6.3.5 积分运算电路	215
6.3.6 微分运算电路	216
本章主要内容小结	218
习题	218
第7章 负反馈放大电路	224
7.1 反馈的基本概念	224
7.1.1 反馈的定义	224
7.1.2 反馈的分类	225
7.1.3 反馈类型的判别方法	227
7.2 负反馈放大电路的表达式	233
7.2.1 反馈放大电路的一般表达式	233
7.2.2 电压串联负反馈放大电路	235
7.2.3 电压并联负反馈放大电路	236
7.2.4 电流串联负反馈放大电路	238
7.2.5 电流并联负反馈放大电路	240
7.3 负反馈对放大电路性能的影响	242
7.3.1 负反馈对静态工作点的影响	242
7.3.2 负反馈对增益的影响	244
7.3.3 负反馈对通频带的影响	244
7.3.4 负反馈对非线性失真的影响	246
7.3.5 负反馈对输入阻抗的影响	248
7.3.6 负反馈对输出阻抗影响	250
7.4 负反馈放大电路分析方法	253
7.4.1 等效电路法	253
7.4.2 深度负反馈放大电路增益的近似计算	254
7.5 放大电路的自激振荡及其消除方法	259
7.5.1 自激振荡产生的原因	259
7.5.2 自激振荡的消除方法	261
本章主要内容小结	264
习题	265
第8章 典型功能电路设计及仿真调试	273
8.1 电压比较器	273

8.1.1 电压比较器的概念	273
8.1.2 单门限比较器	274
8.1.3 迟滞比较器	277
8.1.4 窗口比较器	281
8.2 滤波器	282
8.2.1 滤波器的概念及分类	282
8.2.2 低通滤波器	283
8.2.3 高通滤波器	288
8.2.4 带通和带阻滤波器	291
8.3 信号发生器	292
8.3.1 RC 正弦波振荡器	292
8.3.2 矩形波发生电路	297
8.3.3 三角波发生电路	303
8.4 直流电源	308
8.4.1 常用直流电源电路	308
8.4.2 稳压电路	315
本章主要内容小结	322
习题	322
习题参考答案	332
参考文献	348



第1章 绪论



1.1 电子技术概念

1.1.1 电信号

信号是消息的载体,从广义上讲,它包含光信号、声信号和电信号等。电信号是指随时间而变化的电压 u 或电流 i ,如温度、气体中二氧化碳密度、压力、流量、语音都可以通过传感器件将相关参数转换为电信号来描述,如 $u = f_1(t)$ 或 $i = f_2(t)$ 。在现代信息社会,信息可以通过电信号进行信息传输、信息交换、信息存储、信息提取,因此电信号相关处理技术得到了广泛的应用。本教材主要介绍电信号的放大、滤波等基本处理方法,并将电信号简称为信号。

电信号可以从不同的角度进行不同的分类。例如,根据信号是否具有随机性,将信号分为随机信号和确定性信号;根据信号是否具有周期性,将信号分为周期信号和非周期信号;根据信号随时间变化的连续性,将信号分为连续时间信号和离散时间信号;根据信号幅度的连续性,将信号分为模拟信号和数字信号。电子技术中通常将信号分为模拟信号和数字信号。

模拟信号一般是指幅度连续的信号,时间可连续也可不连续,自然界中大多数表示信息的物理量都是模拟量,转换成电信号就是模拟信号,如温度、气体中 CO_2 密度、压力、语音都是模拟信号,因为信号幅度连续,如图 1.1.1 所示。

数字信号是指幅度离散的信号,通常数字信号在时间上也离散,如计算机总线信号、莫尔斯发报机发出信号等均是数字信号,信号幅度只有高电平和低电平两个状态,或称为逻辑“1”和逻辑“0”信号,如图 1.1.2 所示。

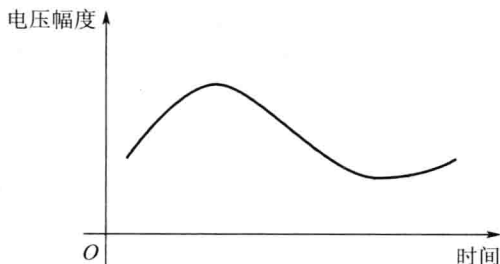


图 1.1.1 模拟信号波形

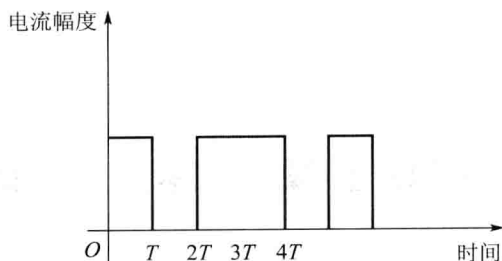


图 1.1.2 数字信号波形

1.1.2 电子技术和电子电路

1. 电子技术概念

电子技术就是研究电子元器件、电子电路系统设计、分析及制造的工程实用技术。电子技术主要由模拟电子技术和数字电子技术两部分组成。模拟电子技术主要研究处理模拟信号的电子技术;数字电子技术主要研究处理数字信号的电子技术。

模拟电子技术又分为低频电子技术和高频电子技术,本教材主要介绍低频电子技术中电子元器件组成、性能及工作原理,电子电路系统分析、设计的基本方法。关于电子元器件制造的相关技术将在后续课程中介绍,如“模拟集成电路设计”、“数字集成电路设计”等。

2. 电子电路概念

通常把由电阻、电容、电感、二极管、三极管、场效应管、集成电路等电子元器件组成并具有一定功能的电路称为电子电路,简称为电路。

电阻、电容、电感称为无源元件,无源元件的特点就是在电子电路中无需外加适合的电源即可有效工作。

二极管、三极管、场效应管称为有源元件,有源元件的特点就是在电子电路中必须外加适合的电源电压或电流后方可有效工作。就是因为这个外加电源的存在,所以称为有源元件。有源元件是电子电路的核心,一切放大电路、振荡电路、调制电路、解调电路等都离不开有源元件。

电子电路的分析与设计,如放大电路、运算电路、滤波电路、信号发生电路、直流电源电路是本教材介绍的重点内容,这些功能电路也是模拟电子电路中最基本的单元。在上述所有的功能电路中,几乎都含有放大电路,因此放大电路是模拟电子技术的重中之重,是模拟电子电路的基础。



1.2 电子电路设计

1.2.1 电子电路系统简介

在电子技术迅猛发展的今天,电子电路的应用在日常生活中无处不在,小到门铃、收音机、DVD 播放机、电话机等,大到全球定位系统 GPS(Global Positioning Systems) 和我国的北斗卫星导航系统、雷达、导航系统、宇宙通信等。

图 1.2.1 所示的光控报警器,电路中光敏电阻的阻值随着照射光强度的变化而变化,当光线暗到一定程度时,蜂鸣器 R_L 开始进行声音报警,从而达到光线强度控制报警的目的。图中 T_1 、 T_2 为三极管符号,关于三极管的工作原理及电路设计将在本教材的第 3、第 5、第 7 章中详细介绍。

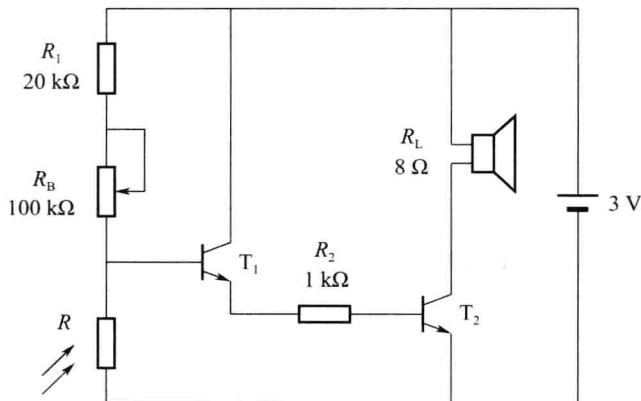
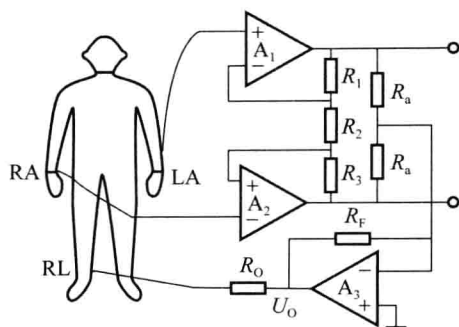


图 1.2.1 光控报警器

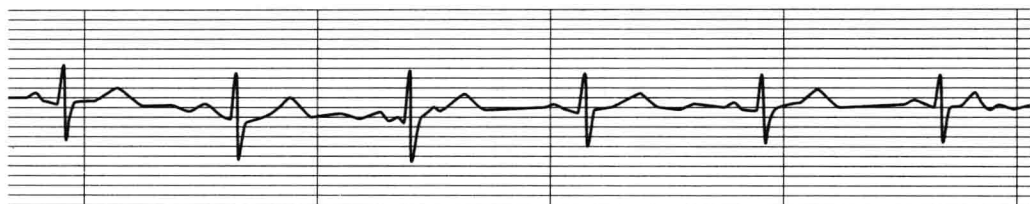
图 1.2.2 所示为心电图测试电路及测试波形。在做心电图时需要采集身体的心电信号,但是采集出来的心电信号不仅频率低,而且幅度非常小(通常只有几十毫伏),因此采集的信号放大之后才能在示波器上显示,并进行有效的信息处理。电路中使用了三个集成运算放大器,运放的工作原理及典型应用将在本教材的第 6、第 7、第 8 章节中详细介绍。

图 1.2.3 所示为一个简单的扩音系统电路图,图中音频信号通过话筒转化为电信号,经过放大后通过扬声器以声波方式输出,图中电位器 R_3 用于调节音量。

图 1.2.4 为目前典型的有频道设置存储功能的收音机电路结构框图。电路中有高频放大、中频放大和音频放大共三个放大器,有高频滤波、中频滤波两个滤波器,还有一个本地振荡器。



(a) 心电信号放大器



(b) 心电图

图 1.2.2 心电图测试电路及测试波形

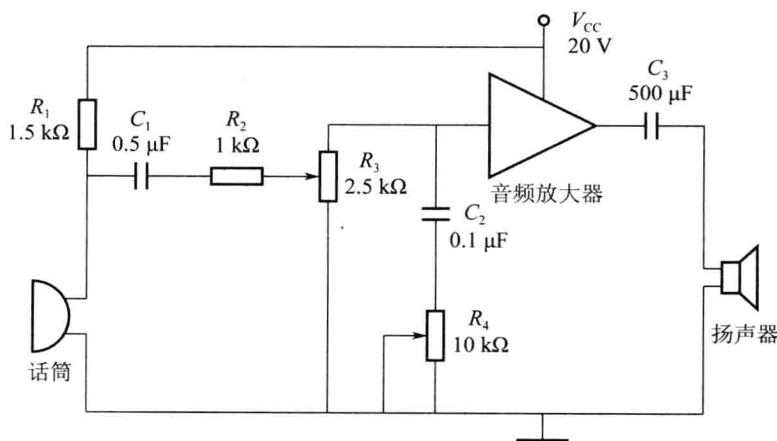


图 1.2.3 扩音系统电路图

这些放大器、滤波器、振荡器的设计方法将在本教材中详细介绍。

电路中的混频器、检波电路将在高频电子电路(或通信电子线路)中详细介绍;电路中的键盘、液晶显示、频率合成器、数字存储器、数字控制器将在数字电子技术中详细介绍。

以上介绍的几个例子都属于模拟电子系统。模拟电子系统的组成用图 1.2.5 所示系统框图来描述,主要由信号的提取、信号预处理、信号的加工和信号的执行四部分组成。对于实际系

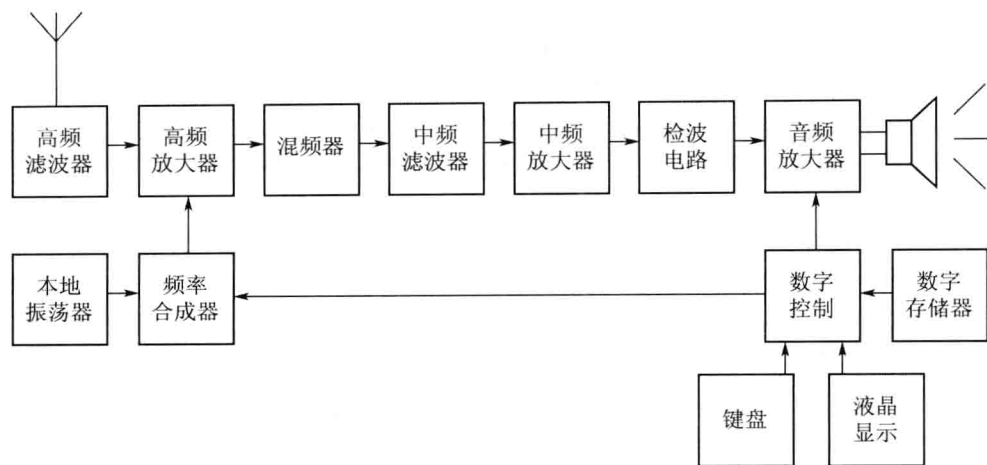


图 1.2.4 AM 收音机电路结构框图

统,信号的提取主要通过传感器或接收机,传感器或接收机输出的信号幅度通常都非常小,且噪声很大,且易受干扰,因此需要进行预处理。预处理是根据实际情况进行隔离、滤波、阻抗变换等方法将信号分离出来并进行放大,以满足信号加工处理时的幅度要求。信号加工主要是指信号的运算、比较等不同的加工过程;最后信号的执行是通过功率放大电路驱动负载,或者经过数模转换变为计算机可以接收的信号。



图 1.2.5 模拟电子系统框图

显然,利用模拟电子电路中的放大、滤波等功能电路可以设计收音机接收电路,还可以设计通信系统电路、数字信号处理电路、医学信号处理电路、控制系统电路、计算机系统等复杂电路。在信息化社会的今天,一个大型的电子电路系统中模拟电子电路和数字电子电路并存。通常数字电路和数字信息处理单元可能占有较大的比重,如数字传输、数字储存、数字分析处理等,而模拟电子电路主要用于系统接口处模拟信源信号的采集、放大、处理,如将麦克风输出的微弱语音信号进行放大处理、数字合成的语音信号放大后经过扬声器输出。在一个电子系统中,虽然模拟电路在系统中的比例可能不是很大,但是对于系统性能的保障至关重要,且由于模拟电子电路的设计、调试具有一定的难度,其分析、设计工作极具有挑战性。

1.2.2 电子系统设计原则

在电子设计过程中,不仅要考虑预期功能的实现和系统达到的性能指标,同时还要考虑系统的可测性和可靠性。可测性就是电子系统不仅要有合适的测试点,还要有自检电路和测试信号。可靠性是指电子系统具有一定抗干扰能力,在工作环境下能够稳定运行。另外,在电子系统

商用化的情况下,还要考虑性价比,即性能与价格比。

在电子系统设计时,应尽量做到以下几点。

(1) 必须满足系统的功能和性能指标的要求。

(2) 在满足系统的功能和性能指标要求的情况下,电路要尽量简单,集成电路能实现的不选用分离元件电路,大规模集成电路能实现的不选用小规模集成电路,同时性价比尽量满足用户要求。

(3) 具有电磁兼容特性。电磁兼容特性是指电子系统在一定的环境下,既能抵御外界磁场的干扰,又能较少地影响周围的环境。自然界的电磁变化和工业、生活中产生的电磁变化,对电子系统都会有不同程度的干扰;且电子系统本身又是其他电子系统的干扰源。在电子系统设计时,电磁兼容特性设计的重点是要研究周围电磁干扰的特征,以及如何采取必要的措施抑制干扰源或阻断干扰源的传播途径,保证系统稳定工作。

(4) 系统的调试应简单方便,生产工艺尽可能简单易行。

1.2.3 电子系统设计流程

通常一个复杂的电子系统的设计需要经过若干个步骤,如图 1.2.6 所示。每个单元的电路设计过程如图 1.2.7 所示。

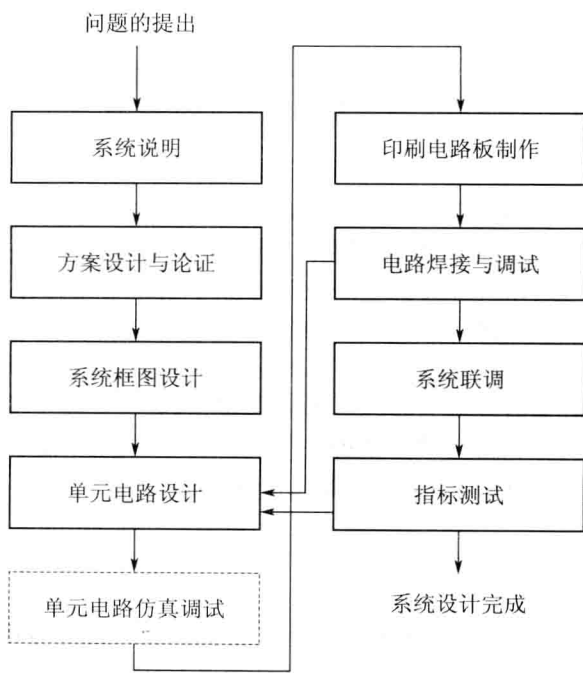


图 1.2.6 电子系统设计流程图

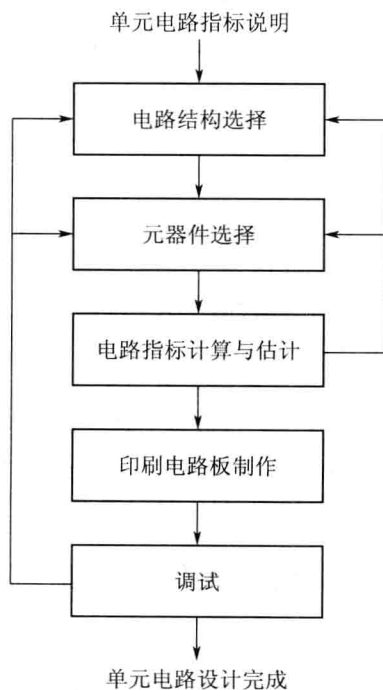


图 1.2.7 单元电路设计过程