

E.C

普通高校应用型本科电子与计算机系列规划教材

模拟电路 分析与设计

张辉 王鲁云 主编

Analogue
Circuit
Analysis and
Design



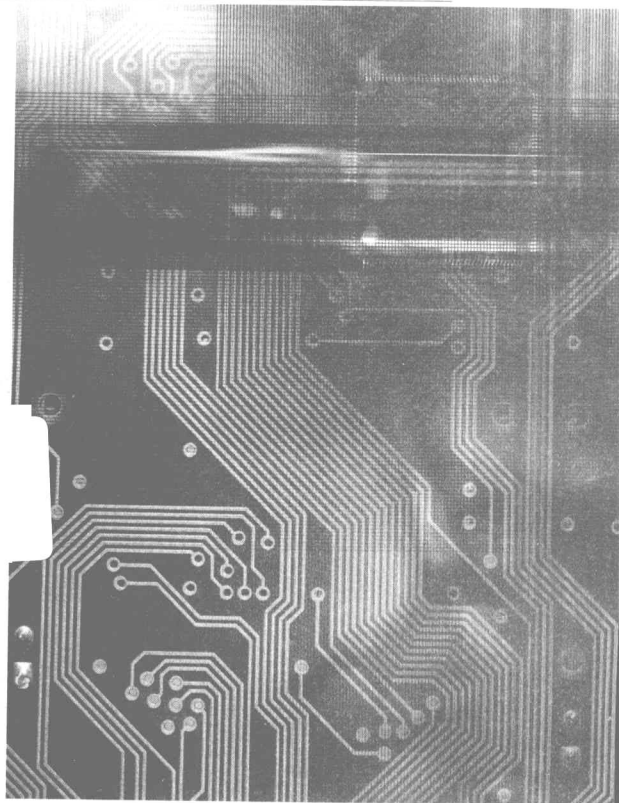
大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

校应用型本科电子与计算机系列规划教材

模拟电路 分析与设计

张辉 王鲁云 主编
李美花 于海霞 编者

Analogue
Circuit
Analysis and
Design



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路分析与设计 / 张辉, 王鲁云主编. — 大连:
大连理工大学出版社, 2010
ISBN 978-7-5611-5424-3

I. ①模… II. ①张… ②王… III. ①模拟电路—电
路分析—高等学校—教材②模拟电路—电路设计—高等学
校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 033468 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84707310

E-mail:dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

· 大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×240mm 印张:19.5 字数:426 千字
2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑:王颖鑫

责任校对:知 轩

封面设计:季 强

ISBN 978-7-5611-5424-3

定价:38.50 元

出版说明

随着普通高等教育规模逐年扩大,我国高等教育已迅速进入大众化教育阶段,并成为全世界在校大学生规模最大的国家。在新时期,社会不但需要高校培养主要从事较高层次理论研究、设计和开发的学术型人才,而且更需要培养主要从事技术性和实用性工作的应用型人才。当前,许多用人单位对大学毕业生提出了专业脱离实际、上手慢、不好用的问题。因此,努力提高高校应用型本科人才培养质量,突出应用型本科人才培养特色,是一项意义重大的高等教育改革。在这项改革中,课程的教学改革是基础和关键,而对专业课程的传统教学内容进行改革,则显得尤为重要。

在大连理工大学的支持下,大连理工大学城市学院作为一所新型的独立学院,自建院时起就在各专业积极进行应用型人才培养模式改革,并以课程教学改革为主线,积极进行课程教学内容和教学方法的改革,通过多年来的课程教学改革实践,收到了比较好的效果。为了总结大连理工大学城市学院多年来在培养应用型人才中课程教学改革的实践成果和经验,大连理工大学出版社专门组织编写了这套电子与计算机类专业课程系列规划教材。

这套电子与计算机系列规划教材是由大连理工大学校部教师和城市学院教师共同编写完成的,他们都具有丰富的教学经验和较高的学术水平,以及比较丰富的专业实践经历,尤其更有在城市学院多年课程教学改革实践中积累的丰富教学经验,因此,这套教材可以说是应用型本科教学改革实践的丰硕成果。

这套教材的主要特色有两点,一是面向学生,二是联系实际,并体现在如下几方面:

以技术为基础 教材的编写主要建立在技术这个基点上,而不是理论的分析 and 研究,对于必需的理论,一般只给出或应用其结论,突出专业技术的学习。

以应用为目的 应用型人才培养理所应当要以应用为目的,在教材中突出专业技术的实际应用,使学生真正能够掌握专业技术之应用的真谛。专业课程也只有真正结合应用实际进行讲授,才能使学生真正理解和掌握。

内容安排突出重点 一门课程的教学内容很多,但基本的知识、概念是最主要的。抓住基本概念、基本公式、基本方法,围绕基本,提炼内容,突出重点,强化学生对基本知识的学习和掌握。

尽量降低学习难度 一本教材如果脱离学生的学习实际,那么教学的效果是不会理想的。内容循序渐进,前后衔接,推新温故,表述通俗易懂,深入浅出,是这套教材的编写原则。

这套教材是本社组织的第一套面向高校应用型本科教学的专业课程系列教材,希望这套教材能为应用型本科专业教学发挥积极的作用,同时请各位读者提出宝贵的意见。

联系电话:0411-84708947

信箱:yhl-0032029@163.com

大连理工大学出版社

2009年3月

前 言

电子技术是研究电子器件和电子电路工作原理及其应用的一门科学,可分为模拟电子技术和数字电子技术。模拟电子技术是高等院校理工科学生必修的专业基础课程,它研究的主要内容是用电子器件和电子电路对模拟信号进行放大、运算、各种变换等方面的处理。

本书是编者在多年模拟电子技术课程教学的基础上,结合当前模拟电子技术发展及实际应用和课程教学的需要编写而成的,力求内容完整、结构合理、重点突出。本书在内容安排上有如下特点:

- (1) 突出放大电路的概念,以放大电路的研究和应用为主线,贯穿全文。
- (2) 理论联系实际,理论讲解简洁明了,以实际应用为中心。
- (3) 更多地从学生学习的角度考虑,符合学习的客观规律。附录中提供了本课程所需要的电路知识,便于学生参考。

全书共 10 章:绪论、二极管、三极管、场效应管、集成运算放大电路、信号运算电路、功率放大电路、负反馈、信号的处理与产生电路和电源。

教师可根据专业、学时及教学基本要求,对本教材的内容进行选择使用。

参加本书编写工作的有:张辉(第 1、8、10 章和附录)、王鲁云(第 2、3、5 章)、李美花(第 4、6 章)、于海霞(第 7、9 章)。全书由张辉统稿并最后定稿。

因编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,请读者不吝指正。

编 者

2010 年 2 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电子学简介	1
1.2 模拟电路和数字电路	2
1.3 模拟电子技术的发展现状与趋势	3
1.4 模拟电子技术课程介绍	4
1.5 学习方法	6
1.5.1 掌握科学的学习方法	6
1.5.2 模拟电子技术的学习方法	7
第 2 章 半导体二极管及其基本电路	8
2.1 半导体基本知识	8
2.1.1 导体、绝缘体和半导体.....	8
2.1.2 半导体材料	9
2.1.3 PN 结	11
2.2 半导体二极管.....	12
2.2.1 二极管的构成与符号.....	12
2.2.2 二极管的伏安特性曲线.....	13
2.2.3 二极管的主要参数.....	14
2.3 二极管电路的分析方法及运用.....	15
2.3.1 二极管的几种模型分析法.....	15
2.3.2 二极管几种分析模型法的应用举例.....	18
2.4 二极管电路的应用.....	19
2.4.1 半波整流电路.....	19
2.4.2 桥式整流电路.....	20
2.4.3 电源保护电路.....	21
2.4.4 限幅器电路.....	22
2.4.5 续流保护电路.....	23

2.4.6 半功率控制电路	23
2.5 特殊二极管	23
2.5.1 齐纳二极管	23
2.5.2 变容二极管	26
2.5.3 发光二极管	27
2.5.4 其他特殊二极管	28
小 结	28
习 题	29
第3章 三极管及其放大电路	33
3.1 三极管及其特性	33
3.1.1 三极管	33
3.1.2 三极管的电流关系和基本电路形态	35
3.1.3 三极管的三种工作状态	37
3.1.4 三极管的特性曲线	40
3.1.5 三极管的主要参数	42
3.2 放大电路概述	45
3.2.1 放大电路的基本概念	45
3.2.2 放大电路的主要技术指标	46
3.3 基本共发射极放大电路	48
3.3.1 基本共发射极放大电路的组成	48
3.3.2 放大电路的直流通路和交流通路	50
3.3.3 基本共发射极放大电路的工作原理	51
3.3.4 基本共发射极放大电路的功率分析	52
3.4 放大电路的分析方法	53
3.4.1 放大电路的静态分析	53
3.4.2 放大电路的动态分析	54
3.4.3 放大电路的图解分析法	58
3.5 放大电路静态工作点稳定的问题	62
3.5.1 温度对静态工作点的影响	63
3.5.2 分压式偏置Q点稳定电路	63
3.6 放大电路的三种基本组态	69
3.6.1 共集电极放大电路——射极输出器	69
3.6.2 共基极放大电路	72
3.6.3 三种放大电路性能的比较	73

3.7 多级放大电路	75
3.7.1 多级放大电路的级间耦合方式	76
3.7.2 多级放大电路的分析和计算	80
3.7.3 组合放大电路	81
3.8 放大电路的频率特性	84
3.8.1 电路的频率特性	84
3.8.2 放大电路的频率特性	90
3.8.3 改善放大电路的频率特性	98
3.8.4 多级放大器频率特性	99
小 结	100
习 题	101
第 4 章 场效应管及其放大电路	109
4.1 金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)	109
4.1.1 N 沟道增强型 MOSFET 的结构	109
4.1.2 N 沟道增强型 MOSFET 的工作原理	110
4.1.3 N 沟道增强型 MOSFET 的特性曲线	111
4.1.4 N 沟道耗尽型 MOSFET	112
4.1.5 P 沟道 MOSFET	113
4.1.6 MOSFET 主要参数	114
4.2 结型场效应管(JFET)	115
4.2.1 PN 结型 FET 的结构	115
4.2.2 PN 结型 FET 的工作原理	116
4.2.3 PN 结型 FET 的特性曲线和参数	118
4.3 场效应管放大电路	120
4.3.1 共源极放大电路	120
4.3.2 共漏极放大电路	124
4.3.3 共栅极放大电路	125
4.3.4 场效应管放大电路的频率特性	127
4.3.5 场效应管放大电路与三极管放大电路的比较	128
小 结	128
习 题	129
第 5 章 集成运算放大器	134
5.1 概 述	134
5.2 差分放大器	135

5.2.1	基本差分放大器	135
5.2.2	差分放大器电路的改进及分析	138
5.2.3	恒流源差分放大器	141
5.3	恒流源电路	142
5.3.1	镜像电流源	142
5.3.2	比例电流源	144
5.3.3	微电流源	144
5.3.4	改进型电流源	144
5.3.5	电流源电路用作有源负载	145
5.4	集成运算放大器	145
5.4.1	简单的集成运算放大器	145
5.4.2	通用型集成运算放大器介绍	148
5.4.3	集成运算放大器的主要参数	150
5.4.4	集成运算放大器的电路模型	155
	小 结	157
	习 题	158
第 6 章	功率放大电路	163
6.1	功率放大电路概述	163
6.1.1	功放电路的主要技术指标	163
6.1.2	功放电路的分类及其特点	163
6.1.3	功放电路中晶体管的选择	164
6.2	甲类功放电路	165
6.3	乙类双电源互补功放电路	166
6.3.1	电路组成	166
6.3.2	工作原理	166
6.3.3	主要技术指标的计算	167
6.3.4	对功率管极限参数的要求	169
6.4	甲乙类互补功放电路	169
6.4.1	甲乙类双电源互补对称功放电路	170
6.4.2	甲乙类单电源互补对称功放电路	171
6.4.3	采用复合管(达林顿管)互补功率放大电路	171
6.5	集成功率放大器	172
6.5.1	典型集成功放 LM386	172
6.5.2	集成功放的主要性能指标	175

6.5.3 桥式功率放大器	176
6.6 功率器件	176
6.6.1 功率管的二次击穿和散热问题	176
6.6.2 VMOSFET 与 DMOSFET 功率管	179
小 结	180
习 题	180
第 7 章 信号运算电路	185
7.1 比例运算电路	185
7.1.1 同相运算电路	185
7.1.2 反相运算电路	187
7.1.3 差分比例运算电路	188
7.2 求和运算电路	190
7.2.1 反相输入求和运算电路	190
7.2.2 同相输入求和运算电路	191
7.2.3 双端输入求和运算电路	191
7.3 积分和微分运算电路	192
7.3.1 积分运算电路	192
7.3.2 微分运算电路	194
7.4 运算放大器线性实用电路	195
7.4.1 电流-电压变换器和电压-电流变换器	195
7.4.2 数据放大器	197
7.4.3 接地阻抗模拟变换器	198
7.4.4 绝对值电路	199
7.4.5 二极管限幅电路	200
小 结	202
习 题	202
第 8 章 反 馈	207
8.1 反馈的基本概念	207
8.1.1 反馈的概念	207
8.1.2 反馈的基本方程式	207
8.2 反馈的分类及判断方法	208
8.2.1 反馈的分类	208
8.2.2 串联反馈和并联反馈的判断	209
8.2.3 负反馈和正反馈的判断	209

8.2.4	电压反馈和电流反馈的判断	210
8.2.5	交流反馈和直流反馈	210
8.3	反馈放大电路的分析	210
8.3.1	电压串联负反馈	210
8.3.2	电压并联负反馈	212
8.3.3	电流串联负反馈	213
8.3.4	电流并联负反馈	213
8.4	负反馈对放大电路性能的影响	214
8.4.1	负反馈对增益的影响	214
8.4.2	负反馈对输入电阻的影响	214
8.4.3	负反馈对输出电阻的影响	215
8.4.4	负反馈对通频带的影响	216
8.4.5	负反馈对非线性失真的影响	217
8.4.6	负反馈对噪声、干扰和温漂的影响	218
小 结	218
习 题	219
第 9 章	信号处理与产生电路	222
9.1	有源滤波器	222
9.1.1	有源低通滤波器	223
9.1.2	有源高通滤波器	227
9.1.3	有源带通滤波器	228
9.1.4	几种典型的滤波器	230
9.2	集成模拟乘法器	231
9.2.1	集成模拟乘法器的基本原理	232
9.2.2	集成模拟乘法器	233
9.2.3	集成模拟乘法器构成的运算电路	234
9.3	振荡器	235
9.3.1	正弦波振荡电路	236
9.3.2	RC 振荡电路	237
9.3.3	LC 正弦波振荡电路	240
9.3.4	非正弦波振荡电路	244
9.3.5	函数发生器	249
小 结	251
习 题	252

第 10 章 直流电源	255
10.1 整流电路	256
10.1.1 主要性能参数	256
10.1.2 单相整流电路	256
10.2 滤波电路	261
10.2.1 电容滤波电路	262
10.2.2 电感滤波电路	265
10.3 模拟稳压电源	266
10.3.1 稳压二极管稳压电路	266
10.3.2 串联型稳压电源	268
10.3.3 三端集成稳压器	271
10.4 开关稳压电源	273
10.4.1 开关稳压电源的工作原理	273
10.4.2 PWM 控制器(开关电源控制器)	275
小 结	279
习 题	279
附 录 电路基本理论	281
F1 电路与电路模型	281
F2 受控源	283
F3 基尔霍夫定律	284
F4 叠加原理	286
F5 戴维南定理	287
部分习题答案	288
本书常用符号表	295
参考文献	298

第 1 章 绪 论

本章简要回顾了电子学的发展进程,分析了模拟电子技术的现状与趋势,介绍了本课程的主要内容和学习方法。

1.1 电子学简介

通常所说的电子学领域是一个很宽的专业范围,包括音频系统、数字计算、通信系统、仪表器件和自动控制,这些专业中的每一个又都有自己的专业范围。然而,所有的电子专业有一个共同点:它们都使用电子器件——晶体管、二极管、集成电路和各种专用器件。利用这些器件的电子特性,可以构建电路,使得这些电路可以在各种不同的实际应用中产生有效的作用。电子学的快速发展得益于电子器件的发展。

尽管很多的电子器件在 19 世纪得到了很好的应用,但是直到 19 世纪末,由于托马斯·爱迪生、赫兹、马可尼和亚历山德在电子学的发明和贡献,无线电才被公认是电子学新纪元的标志。马可尼第一次发送无线电传输横越了大西洋,因此被认为是无线电之父。到发生泰坦尼克号悲剧的时候,无线电通信已经成为远距离通信最普遍的方式。到第一次世界大战结束时,无线电应用已经推广到了全球。

普遍认为,第一个电子器件是 Fleming 的电子管,即 J. A. Fleming 基于爱迪生电子流在真空中的传输工作的基础上发明的真空二极管。后来, Lee De Forest 发明了三极真空管,一个有电压放大功能的三脚真空管。Edwin Armstrong 在无线电通信上的贡献包括真空管振荡器和超外差式收音机,此收音机的原理一直沿用至今。

20 世纪 20 年代可以说是商业无线电通信的繁荣时期。即使在 20 世纪 30 年代的经济大萧条期,世界各地的人们还是享受到了多种无线电通信娱乐的多种形式:音乐、精彩表演和新闻。今天,1946~1964 年出生的人仍然记得祖父母家的那些落地式的无线电广播设备,那些设备的声音比多年以后充斥市场的现代化桌式无线电设备更好。在语音和音乐的无线电传输取得巨大成功之后,一件很自然的事情就是用无线电来传输图像。在 20 世纪 30 年代,RCA 发明了电视机,并且在 1939 年正式播放了富兰克林·罗斯福总统在摄像机前的画面。然而,第二次世界大战的爆发中断了电视广播,这种情况一直延续到战争结束。20 世纪 50 年代可以看做是电视广播新纪元的开始。

20 世纪 40 年代的真空管比 20 世纪 20 年代的真空管小,功耗更低并且效率更高,但是始终需要灯丝加热阴极来发射电子。在同一个时间,第一个不需要加热的电子器件出现了:

硒二极管。但是直到 1947 年,基于 Shockley、Bardeen 和贝尔电话实验室 Brattain 的研究成果,第一个晶体管诞生,标志着“固态纪元”的开始。然而,也许是由于真空管的巨大冲击,直到 20 世纪 50 年代后期晶体管无线电器件才得到推广。直到 20 世纪 60 年代,电视机才开始使用晶体管。

电路的小型化是跟着晶体管发展起来的。在 1959 年,德州仪器的 Jack Kilby 研制出了第一个集成电路。在一个很小的区域内,集成电路包括许多半导体器件,例如晶体管和二极管。在 1961 年,Fairchild 公司的 Robert Noyce 发明了第一个商业集成电路:运算放大器。今天,几乎每一个电子仪器都是用集成电路建造的,集成电路在一个相对低的功耗下能够高准确度和高稳定度进行运算。最显而易见的例子就是今天的具有高运算速度、低功耗的个人计算机。

1.2 模拟电路和数字电路

电子电路中的信号分为模拟信号与数字信号两大类。模拟信号是指随时间连续变化的物理量,如电压、电流、温度和流量等,可以用计量仪器测量出某个时刻模拟量的瞬时值和有效值。数字信号是指随时间断续变化的信号。一般来说,数字信号是在两个稳定状态之间阶跃式变化的信号。模拟量和数字量之间可以转换,只要它们之间建立起一定的转换关系。例如,可以通过计算数字信号变化的次数来得到相应的模拟量,而不需要知道数字信号每次变化的具体大小。如果把数字信号看成是一种脉冲信号的话,只要计算脉冲的个数,或者研究脉冲之间的编排方式就可以了。

处理模拟信号电子电路是模拟电路,模拟电路研究各种模拟电子器件、模拟信号的变换、控制、测量和应用等内容。模拟电路主要有放大电路、振荡电路、运算电路、有源滤波电路、整流稳压电路、反馈电路、混频电路、调制解调电路等。

模拟电路具有如下特点:

①模拟电路处理的是连续变化的电信号,人们的日常生活、生产等活动与模拟信号的联系更加直接密切,所以模拟电子电路应用面十分广泛。

②模拟电路中的器件往往工作在放大状态,因而电路的灵敏度比较高,但也容易受到干扰信号的影响。

③在模拟与数字电子电路的复合系统中,需要在模拟信号—数字信号、数字信号—模拟信号间进行相互变换,其中少不了模拟电路,而且技术难点往往在模拟电路。

④许多模拟电路便于集成,可较大地降低成本,减小体积。

⑤模拟信号相对数字信号而言,不便于处理和存储。

处理数字信号电子电路是数字电路,数字电路研究各种逻辑器件、数字电路以及数字信号的变换、存储、测量和应用等内容。

数字电路具有如下特点:

①数字电路中的器件往往工作在开关(饱和和截止)状态,因而电路的稳定性好,可靠性高。

②电路只需识别信号的有无,这样就便于扩充数字的位数以获得较高的精度。

③数字信号便于处理和存储。

④数字电路便于集成,可大大降低成本,减小体积。数字电路的集成水平一般都高于模拟电路。

⑤便于采用数字计算机或微处理机来处理信息和参与控制。

上述特点使数字电路迅速发展,成为电子电路发展的主流,一些原来由模拟电路完成的工作,在一些新技术的支持下,用数字电路也可以实现。但模拟电路和数字电路二者不是对立的关系,而是相互依存的关系,不可能一种电路完全取代另一种电路,二者各有各的服务领域。

1.3 模拟电子技术的发展现状与趋势

虽然模拟和混合信号器件在本质上与数字器件有着很大的不同,但两者的发展趋势是保持一致的,即朝着更高的速度和性能方向发展。推动模拟和混合信号器件发展的主要动力是人们对更高的精度、线性以及更小失真的向往。同时,市场也在寻求操作功率更低且封装更小的产品。

旨在不断提高电路集成度的摩尔定律尽管不能直接适用于模拟领域,但在模拟和混合信号器件的许多领域中仍很重要。然而,对于操作性能更高的模拟和混合信号集成电路(IC)来说,其衡量标准与数字器件的测量标准大不相同。对模拟或混合信号器件而言,运行速度快未必标志着高性能。

一般而言,性能的提高与电路中有源器件的数量有直接关系。在模拟电路中集成数字功能可以使电路的性能接近理想水平,并实现模拟功能的线路内编程。但在非数字领域,必须在希望采用更多晶体管的需求与通过 Spice 工具模拟几百或几千个器件所需的时间这两者间进行权衡。

模拟设计在电路拓扑结构(即内部元件的互连方式)和布局(即该设计的具体实现)之间总是有着紧密的关联。由于具体的器件级高精度模拟依赖于 Spice 型工具,模拟设计相比大多数其他测量方法而言不算很庞大。一个混合信号设计可能有多达 10 000 个晶体管,而大多数模拟功能块包含的有源器件不足几百个。由于模拟设计倾向于采用较大的几何尺寸以便获得更好的匹配,模拟工艺可能要比最新的数字工艺落后至少一代。

IC 制造商面临的挑战是开发出一种设计方案,使得为数不多的模拟 IC 设计师的能力得到最大限度的发挥。模拟 IC 设计师群体总是依托于那些对半导体器件物理特性有着充分的了解,并拥有设计下一代模拟 IC 所需的良好数学运算能力的工程师们。与自动化程度相当高的数字设计相比,模拟设计的工具和方法仍依靠设计师所具备的知识、经验和直觉。

虽然随着时间的推移,IC的集成度越来越高,但模拟和混合信号器件只是在局部上追随这一趋势。

供应商应对多功能需求的一种方法是把很多以前分立的器件集中到完整的模拟子系统中。这些模拟子系统包括完整的模拟信号处理放大器、滤波器和变换器,以及用于数字切换的接口和控制信号。在很多场合,子系统还包含一定的可编程性,以实现电路参数的调整,从而在操作时更好地完成对子系统的优化。

由于数字工艺仍在继续压缩已经很小的器件尺寸,所以电源也不得不相应的进行调整。电源电压的降低形成了两种不同的趋势。一种趋势是设计能够在更低电源电压下工作的新型模拟功能器件。采用低电源电压的后果是动态范围的缩减和噪声灵敏度的提高。对于一个采用专为低压数字功能器件而设计的单个公共电源的简化设计而言,牺牲的是模拟精度。虽然较低的电源电压有助于减少数字功能器件的功耗,但它对模拟部分的功耗有不良影响。

另一种相反的趋势是把所有的高性能模拟功能器件移到设计的一个单独的部分,并采用一个单独的模拟电源作为工作电源。由于允许模拟和数字部分几乎完全隔离,所以这种电源的分割使设计和电路布局变得容易起来。同时,这种分离也并没有因为需添置稳压器和电源滤波器而使电路板的占用空间增加过多。

系统级上的一个独特趋势是用户工程群中专门技能和知识的减少。人们没时间去获悉模拟部分的全部细节,于是便向模拟IC公司请教相关的专门知识。用户模拟知识的缺乏迫使这些公司必须对他们的器件进行高度集成,并希望这样能让用户使用起来容易一些。模拟IC公司通过把更多的功能单元(如实时时钟、数据变换器、复用器以及模拟信号链的其余部分)置于一个芯片上,并取消为数众多的模拟接口和设计工作的方法来向用户提供帮助。

1.4 模拟电子技术课程介绍

电子技术是研究电子器件和电子电路的工作原理及其应用的一门科学技术,是高等院校理工科学生必修的技术基础课程。

电子技术分为模拟电子技术和数字电子技术,模拟电子技术研究的主要内容是用电子器件和电子电路进行模拟信号变换、运算和处理的一门科学技术。模拟电子技术随着电子器件的快速发展而不断发展。

经历了第一代电子管、第二代半导体器件和第三代集成电路后,电子器件的发展更加日新月异,电子技术几乎深入到国民经济的所有行业,电子技术与其他技术的交叉融合,也产生了许多新兴学科。电子信息产业已经成为增长最快的产业之一。下面举一些比较有代表性的例子来加以说明。

模拟电子技术的发展向微型化、智能化、高精度、高灵敏度、高功率方面发展。目前集成电路的集成度已经达到一片芯片中集成的三极管数目可以达到上亿只,0.18 μm 的工艺已经成熟,正在向0.1 μm 进军。模拟集成电路的种类繁多,主要有: