



电气信息学科创新人才培养系列

电子电路

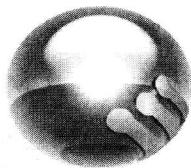
分析与设计

◎ 瞿安连 编著

电子设计专家倾心策划与撰写
创新实践教学与人才培养模式



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



电气信息学科创新人才培养系列

电子电路

分析与设计

● 瞿安连 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

本书以电子技术的最新进展为蓝本讨论了电子电路的基本原理,以及分析与设计方法,并介绍了多种类型集成电路的工作原理、使用方法和典型应用电路。

全书共分7章:电子技术简论,元器件及其模型,基本放大电路,CMOS逻辑电路基础,信号产生电路,模拟集成电路应用,模拟与数字接口电路。

本书内容丰富,深入浅出,实用性强,既有理论基础知识,又有大量电路实例,可供大专院校师生作为电子技术课程的教学参考读物,或作为科技工作者自学进修现代电子技术的教材,亦可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路——分析与设计/瞿安连 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2010年4月
ISBN 978-7-5609-5699-2

I. 电… II. 瞿… III. ①电子电路-电路设计-教材 ②电子电路-电路分析-教材 IV. TH710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169445 号

电子电路——分析与设计

瞿安连 编著

责任编辑:沈旭日

封面设计:刘 卉

责任校对:周 娟

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:19.5

字数:450 000

版次:2010年4月第1版

印次:2010年4月第1次印刷

定价:29.80元

ISBN 978-7-5609-5699-2/TH·207

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前言 Preface



由于物理学的重大突破,电子技术在 20 世纪取得了惊人的进步,特别是近 50 年来,微电子技术和其他高新技术的飞速发展,已使工业、农业、科技和国防领域,以及人们的社会生活发生了令人惊叹的变革。如今,电子技术的应用几乎无处不在,生活中的各种家用电器、通信设备,工作中的办公用品、现代化的生产设备……无不用到电子技术。即使在一个似乎与电子技术无关的生物学实验室中,也能看到许多电子设备。

本书将讨论一些常用基本电路的分析与设计方法,并列举一些集成电路的应用实例。所涉及的基本电路,现在大多数已有小规模和中规模集成电路产品。这些基本电路也是构成各种功能完善的大规模集成电路的基本电路模块。当今世界集成电路日益更新,新产品层出不穷,读者在掌握基本电子电路的工作原理、主要特性,以及电路之间的互联匹配等基本知识之后,就可以对已有电子设备的电路进行分析;也可以根据要求,通过阅读厂家提供的器件产品手册,以最少量的集成电路芯片,设计出性能可靠、成本低廉的应用电子电路,乃至构成某种功能完善的电子系统。

本书可作为大专院校“电子技术”课程的教学参考读物,亦可作为相关专业工程技术人员进修的教材和参考书。书中内容既包含理论知识,又包含电路实例,成书之前的手稿曾作为华中科技大学全校公共选修课的讲义。笔者作为高校教师和《电子技术基础》全国通用教材的编写者之一,从来主张学生不应只读一本教材,多接触一些不同风格的著作,对知识的掌握和素质的培养是十分有益的。

本书在写作中注意了以下几点。

1. 注重原理分析

本书用了较大篇幅研究各种基本电路的工作原理,并在讨论中不回避必要的数学推导,如场效应管模型、小信号条件、基本差分电路原理及 Cascode 等电路的分析。对这些问题的掌握,将有助于理解不同集成电路的输入、输出特性,正确运用它们构成性能优良的电子系统。只有深入分析电路内部原理,才有可能应用它们做出创新性工作。此外,由于集成电路制造工艺的发展和设计方法及设计工具的进步,越来越多的电路和系统设计工程师可能在将来的某一天也会涉及集成电路本身的设计,所以笔者认为未雨绸缪,深入了解新型集成电路内部结构原理和分析方法是有益的。

2. 强调工程应用

为使读者尽快掌握电子技术应用,每一种基本电路都是先从原理出发,并在量化分析的基础上推导模型简化和工程近似的方法,然后给出应用电路实例。在介绍典型集成电路时,特别注重于输入、输出特性介绍,这也是为了便于在工程设计中解决各集成电路之间的互连匹配问题。全书包含一些电子系统和电路的分析、设计实例,其中很大部分来自笔者 40 多年来从事电子工程设计、科研、教学的成功经验;有些来自研究工作中阅读的国内外文献,以及在维修各

类电子仪器和装置时了解的电路;还有一些则摘自国外著名器件公司在网站上提供的应用电路。这些风格迥异的电路也许只需稍作修改就能应用到读者自己的电子设计中去。希望本书能在电子技术理论学习和应用实践之间起到桥梁作用。

3. 力求反映电子技术的新进展

本书把目前发展最快、应用最广泛的 MOS 电路(包括模拟和数字电路)置于突出位置,并予以详细讨论。在运放及其应用、反馈稳定性分析、基本逻辑电路,以及 D/A 转换和 A/D 转换电路等方面引入了国外文献中较新的理念和思想,笔者也根据自己的研究成果和工作经验提出了一些见解。本书所遴选的集成电路,很多是近年来的新产品。

感谢 Texas Instruments、Analog Devices Inc.、Maxim、Intersil 等公司在各自网站上提供了集成电路产品的详细数据和技术支持文件。特别感谢德州仪器半导体技术(上海)有限公司黄争工程师提供的“信号链应用笔记”,其中包含的 150 多篇 Texas Instruments 的工程师撰写的论文,为本书提供了丰富的资料和素材。

个人的知识是很有限的,本书肯定存在谬误和不足,笔者期待着读者的批评与指正,并热切期望能有机会进行深入交流。

瞿安连

2009 年 12 月于华中科技大学

目录

Content



第1章 电子技术简论	(1)
1.1 电子系统与信号.....	(1)
1.1.1 电子电路与系统.....	(1)
1.1.2 信号及其表达.....	(3)
1.1.3 本书所使用的符号.....	(5)
1.1.4 模拟信号和数字信号.....	(6)
1.2 电路的基本定律和定理.....	(9)
1.2.1 直流电路.....	(9)
1.2.2 广义欧姆定律.....	(11)
1.2.3 RLC 电路.....	(13)
1.3 电子电路的分析与设计.....	(16)
1.3.1 电子电路的分析.....	(17)
1.3.2 电子电路的设计.....	(18)
第2章 元器件及其模型	(25)
2.1 元件.....	(25)
2.1.1 电路分析中的元件.....	(25)
2.1.2 实际的元件.....	(27)
2.2 半导体二极管.....	(35)
2.2.1 二极管的主要特性.....	(35)
2.2.2 二极管的模型.....	(40)
2.2.3 特殊性能的二极管.....	(46)
2.3 场效应晶体管.....	(49)
2.3.1 N沟道增强型MOS场效应管的结构和特性.....	(50)
2.3.2 其他类型场效应管的结构和特性.....	(56)
2.3.3 场效应管的模型.....	(58)
2.4 双极结型晶体管.....	(63)
2.4.1 双极结型晶体管的结构和特性.....	(63)
2.4.2 双极结型晶体管的模型.....	(66)
2.5 集成电路的制造工艺和电路特点.....	(69)
第3章 基本放大电路	(73)
3.1 放大电路基础.....	(73)
3.1.1 放大电路模型.....	(73)
3.1.2 放大电路的主要性能指标.....	(75)

3.2	单晶体管放大电路	(79)
3.2.1	共源极(CS)和共射极(CE)放大电路	(79)
3.2.2	共栅极(CG)和共基极(CB)放大电路	(82)
3.2.3	共漏极(CD)和共集电极(CC)放大电路	(86)
3.2.4	单管放大电路三种组态的特点	(90)
3.3	模拟集成电路中常见的基本电路	(90)
3.3.1	Cascode 放大电路	(90)
3.3.2	复合结构放大电路	(95)
3.3.3	电流源电路	(97)
3.3.4	场效应管基本差分放大电路	(100)
3.3.5	双极结型晶体管基本差分放大电路	(105)
3.3.6	改进的差分放大电路	(106)
3.3.7	输出电路	(110)
3.4	集成运算放大器	(112)
3.4.1	集成运算放大器的内部电路	(113)
3.4.2	运算放大器应用电路的基本构型	(117)
3.5	反馈放大电路原理	(119)
3.5.1	反馈的基本概念	(120)
3.5.2	四种负反馈放大电路组态	(123)
3.5.3	负反馈对放大电路性能的影响	(130)
3.6	反馈放大电路的稳定性	(133)
3.6.1	反馈放大电路的波特图	(133)
3.6.2	反馈放大电路的稳定	(134)
3.6.3	放大电路自激的解决方法	(138)
第4章	CMOS 逻辑电路基础	(140)
4.1	开关电路	(140)
4.1.1	机械开关电路	(140)
4.1.2	互补开关电路	(142)
4.1.3	MOS 场效应管开关电路	(143)
4.2	CMOS 逻辑集成电路的结构和原理	(144)
4.2.1	CMOS 逻辑集成电路的一般结构	(144)
4.2.2	基本 CMOS 逻辑电路	(146)
4.2.3	CMOS 输入电路	(152)
4.2.4	CMOS 输出电路	(153)
4.3	CMOS 逻辑集成电路应用中的实际问题	(158)
4.3.1	通用逻辑集成电路的产品系列	(158)
4.3.2	低压 CMOS 通用逻辑系列的典型电路	(159)
4.3.3	CMOS 逻辑集成电路的几项重要参数	(161)
4.3.4	CMOS 逻辑集成电路的对外接口	(163)
第5章	信号产生电路	(167)

5.1 正弦波振荡电路	(167)
5.1.1 正弦波振荡电路基础	(167)
5.1.2 RC 正弦波振荡电路	(169)
5.1.3 LC 正弦波振荡电路	(173)
5.2 非正弦波产生电路	(180)
5.2.1 比较器	(180)
5.2.2 矩形波产生电路	(182)
5.2.3 三角波和锯齿波产生电路	(183)
第 6 章 模拟集成电路应用	(186)
6.1 测量放大电路	(186)
6.1.1 仪表放大器	(186)
6.1.2 隔离放大器	(190)
6.1.3 对数放大器	(194)
6.1.4 D 类低频功率放大器	(199)
6.2 信号运算处理电路	(203)
6.2.1 基本运算电路	(203)
6.2.2 模拟计算电路	(208)
6.2.3 变跨导乘法器	(213)
6.3 有源滤波电路	(222)
6.3.1 滤波电路基础	(222)
6.3.2 巴特沃斯低通滤波电路	(225)
6.3.3 切比雪夫和贝塞尔低通滤波电路	(230)
6.3.4 高通滤波电路	(234)
6.3.5 带通滤波电路	(236)
6.3.6 带阻滤波电路	(238)
6.3.7 全通恒时延滤波电路	(239)
6.3.8 基于双二次函数的状态变量滤波电路	(240)
6.4 电源电路	(245)
6.4.1 线性稳压电路	(246)
6.4.2 直流变换电路	(250)
6.4.3 隔离电源	(258)
第 7 章 模拟与数字接口电路	(260)
7.1 D/A 转换器	(260)
7.1.1 D/A 转换电路的基本原理	(260)
7.1.2 D/A 转换器的主要参数	(261)
7.1.3 串联电阻拓扑 D/A 转换器	(263)
7.1.4 倒 T 形电阻拓扑 D/A 转换器	(267)
7.1.5 电容拓扑 D/A 转换器	(272)
7.1.6 D/A 转换器的应用	(274)
7.2 直接比较型 A/D 转换器	(278)

4. 电子电路——分析与设计

7.2.1	A/D 转换器的基本原理	(278)
7.2.2	A/D 转换器的主要参数	(280)
7.2.3	分级比较型和逐次渐近型 A/D 转换器	(281)
7.2.4	电荷再分配型 A/D 转换器	(284)
7.3	积分型 A/D 转换器	(291)
7.3.1	双积分型 A/D 转换器	(291)
7.3.2	V-F 转换型 A/D 转换器	(296)
7.4	单片数据采集系统	(299)
7.4.1	单片数据采集系统 MAX127	(299)
7.4.2	单片数据采集系统 LM12458	(300)
7.5	模拟与数字接口电路的电路板布线	(301)
参考文献		(304)

第 1 章 电子技术简论



1.1 电子系统与信号

1.1.1 电子电路与系统

电子电路通常是指由电阻器、电容器、电感器、开关、晶体管和集成电路等电子元器件按一定原理相互连接,实现某种功能的电路实体。为了便于研究和生产,需要把具体电子电路用一些符号表达出来,画成工程用图,即所谓的电路图。由于本书仅限于在书面上讨论电子元器件构成的电子电路,所以简称为电路,电路图有时也简称为电路。

所谓系统就是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成,具有特定功能的整体。在现代科学技术中,系统的含义相当广泛,包括各种物理系统和非物理系统,如电力系统、机械系统、社会系统、金融系统……由不同种类、不同功能的电路构成的具有特定功能的仪器、设备,则称为电子系统。集成电路的高度发展,有可能使传统意义上的一个电子系统集成在单个芯片上。例如,目前有很多单个芯片构成的数据采集系统产品,其芯片内部往往包括多路模拟开关、可编程放大电路、取样-保持电路、A/D 转换电路、数字信号传输与控制电路等多种功能电路,并且已相互连接成为一个单片电子系统。对于电子系统设计者来说,只需从芯片生产厂家提供的产品手册中粗略了解这些单片系统的工作原理与功能、结构,而重点关心的应是芯片各引脚的功能和输入、输出特性,即芯片的“外特性”,以便实现各芯片之间电路的互连。这时的单个芯片系统是更复杂的电子系统的一个子系统,而子系统内部则应当作黑盒子(即不必细究其内部电路的结构)来处理。这样来看单片系统只不过是功能更为完善的电子系统的一部分电路。因此,在现代电子电路分析与设计中,“电子系统”和“电路”两个名词意义的界线并不十分明确。对于一个复杂电路,从实现某一功能的整体角度观察问题时,往往称它为“电子系统”,而在分析或设计具体电路,确定芯片的连线和外部元件参数时,又称它为“电路”。

在许多情况下,电子系统必须与其他物理系统结合,才能构成完整的实用系统。例如,人们常见的 DVD 系统,光盘上记录的声音和图像信号是通过激光传感系统转化为电信号的,而光盘的同步旋转和激光探头的移动则是通过电子系统控制的精密机械系统实现的。

下面以图 1.1.1 所示的光导纤维控制塔(简称拉丝塔)为例,说明电子系统在现代工业生产设备中的作用和地位。光导纤维由于其信息传输容量大、抗干扰性能强、成本低廉等优势,目前已广泛用于通信网络,现在已进入“最后 1 公里”,实现了光纤入户。拉丝塔是光纤生产的主要设备之一,它可以 1 000 m/min 以上的速度,一次将直径 20~90 mm、长约 1 m 的石英预制棒连续拉制为直径 125 μm 、长数百公里的通信光纤,是一种高效率、低成本、高度自动化的生产设备。图 1.1.1 右边以方框标出的都是电子系统。由图可以看出,整个拉丝塔是由各个

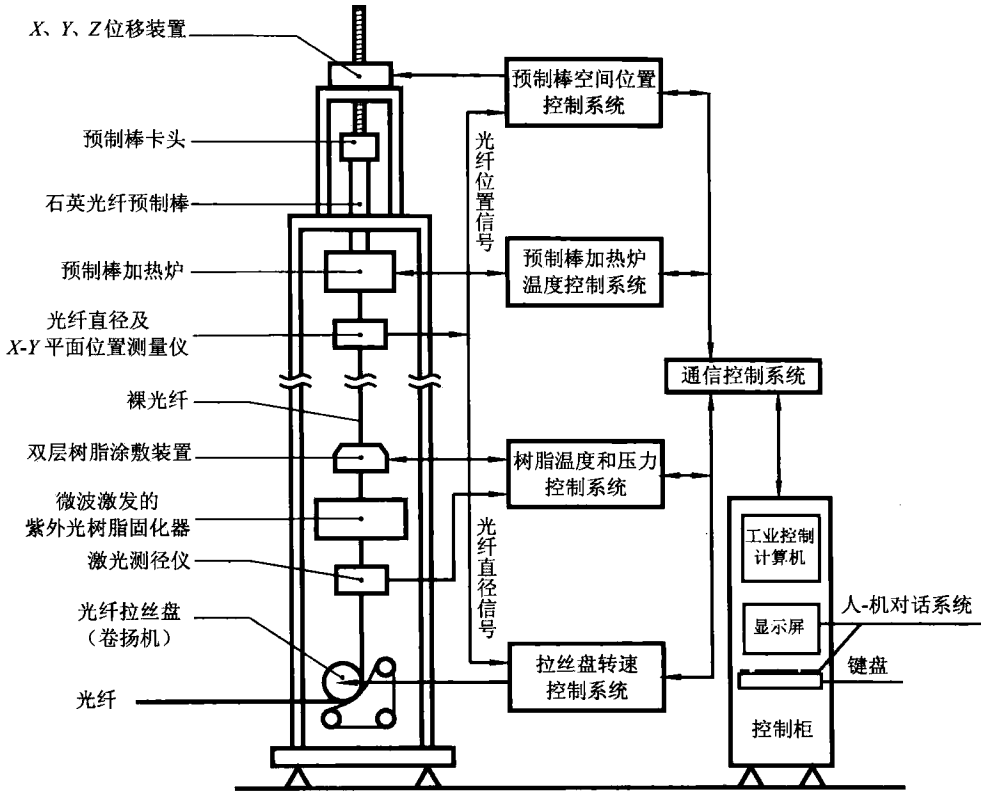


图 1.1.1 拉丝塔控制系统示意图

电子系统与机械、动力、热工、光学等多种物理系统组合而成的。各电子系统经通信系统与一台工业控制计算机相连，生产者通过计算机键盘和显示屏实现人-机对话，完成对生产过程的调控和监视。

在这类系统中，各种非电子的物理系统，或者作为测量敏感装置，或者作为被控制的伺服设备。虽然电子系统只是整个系统的子系统，但它经常起着核心作用，担负着对信号进行控制和驱动的功能。这是因为信号在电子系统中比在其他物理系统中更易于实现复杂的分析、处理与变换，控制也更为灵活。

为了进一步了解电子系统的一般组成结构，图 1.1.2 以拉丝塔中光纤预制棒加热炉温度控制系统为例，给出它的电子系统结构方框图。图中，虚线框内是一台可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC)，它是一种可根据不同需求灵活配置组合部件和控制程序的典型电子系统，是工业上常用的控制设备。加热炉的功能是把石英预制棒下部尖端加

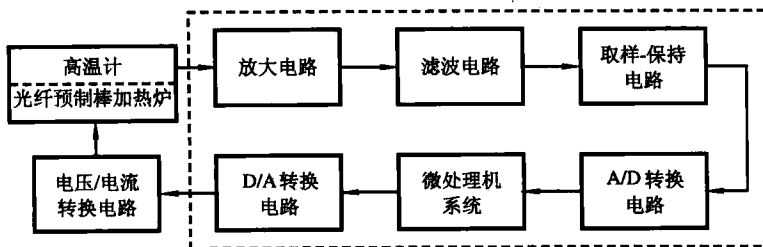


图 1.1.2 石英预制棒加热炉温度控制系统方框图

热至 2200 °C 左右的某一固定温度(主要取决于光纤的拉制速度),使棒的尖端处于熔融状态,在光纤的重力和拉丝塔下部拉丝盘的作用下拉制成光纤。显然,保持加热炉内温度的稳定对保证光纤直径的准确性至关重要。外界因素,如气温、炉外的冷却水温、电源电压等发生微小波动,都会使预制棒尖端的温度偏离预置值而波动,其变化曲线可能如图 1.1.3 所示。在图 1.1.2 所示的系统中,将加热炉中的高温计作为传感器,把预制棒尖端温度的变化转换为微弱的电压变化,该电压信号经放大、滤波,送入取样-保持电路,经 A/D 转换电路把信号转换为与温度变化相应的数字编码送入微处理机系统。后者可根据加热炉的热力学模型和适当的控制模型对温度信号进行处理,得到相应的控制数据。该数据经 D/A 转换电路转换为相应的模拟电压信号,以驱动电压/电流转换电路,输出强大的加热电流,从而实现对加热炉的温度控制,使预制棒尖端稳定在预置温度上。很明显,这是一个热力学系统与电子系统相结合的控制系统,驱动系统工作的是温度信号,在电子系统中贯穿始终的也是对温度信号的各种处理与变换。

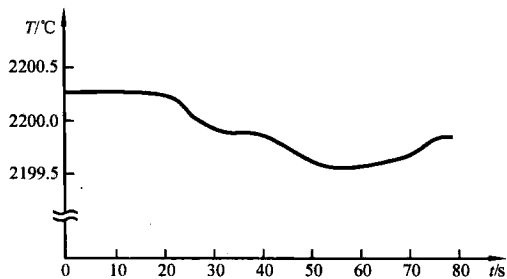


图 1.1.3 预制棒尖端温度的波动曲线

现代电子系统的复杂程度日趋加速,一个人要想知道系统内部的全部细节有时几乎是不可能的。这就要求人们在分析和设计电路时,更加注重研究系统的整体特性和信号通过系统的传输或变换特性。尤其在考虑电路的稳定性和工作可靠性时,更需要从系统的角度来分析问题,才能照顾到各种因素的影响。随着人们认识的深化,许多新技术、新思想渗透于电路分析与设计中,越来越多的电路问题上升到系统理论,可以用一般化的系统分析方法找到答案。另外,电子系统与其他物理系统的联系,也只有通过系统理论才能得到统一的解决。

从数学方法上看,系统的问题一般可分为线性和非线性两大类。电子系统严格说来都属于非线性系统。但非线性系统的分析方法十分繁复,一般需要借助计算机辅助分析(Computer Aided Analysis, CAA)或计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD),以数值解法求解或以迭代方法去逼近,在人工分析中则常采用图解法定性解决。事实上,对很多电路系统的分析,在一定条件下,采用线性方法近似已能满足一般工程要求,而研究线性系统已有很成熟的数学工具。对模拟线性系统,常用微分方程和拉普拉斯变换、傅里叶变换作为工具。而通过 A/D 转换后的等价数字信号,仍然可纳入线性系统分析的范畴,只不过信号在时间和数值上都作了离散化处理,应用差分方程和 Z 变换来分析并不十分复杂。需要注意的是,虽然采用线性方法可以大大简化系统的分析和设计过程,但总是有一定条件限制的。例如,一个放大器,在小信号条件下,用线性方法分析可能是相当准确的,而在大信号条件下,则可能因系统的非线性,使输出产生很大的信号失真。

本书不拟详细讨论系统分析理论和方法,在分析电路系统和信号时,有时仅用到系统分析的个别结论。

1.1.2 信号及其表达

在电路中,驱动电路工作的是信号(输入信号),在分析电路的工作原理时,贯彻始终的也是对信号的种种处理与变换,因此需要对信号的表达与特性作简要介绍。

一般地说,信号是信息的载体。例如,声音信号可以传达语言、音乐或其他信息,图像信号可以传达人类视觉系统所能接收的图像信息。图 1.1.3 所示的拉丝塔上石英预制棒尖端的温度随时间变化而变化的信号,是以波形表达温度变化信息的。

下面首先以正弦波电压信号为例说明信号的表达方式及其基本特性。图 1.1.4 以最直观的方式描述了正弦波电压幅值对时间的函数关系,其数学表达式为

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1.1.1)$$

式中, V_m 是正弦波的振幅; ω 为角频率, θ 为初相角。当 $\omega=0$ 时,为直流电压信号。当 V_m 、 ω 和 θ 均为已知常数时,信号中就不再含有任何未知信息,是最简单的信号。正因为如此,正弦波信号经常作为标准信号用来对模拟电子电路进行测试。

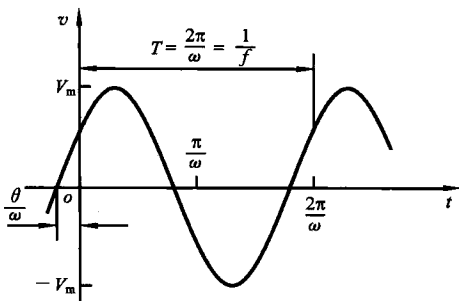


图 1.1.4 正弦电压波形

图 1.1.5 所示为周期性方波电压信号,它的时间函数表达式为

$$v(t) = \begin{cases} V_s & (n - \frac{1}{4})T \leq t < (n + \frac{1}{4})T \\ 0 & (n + \frac{1}{4})T \leq t < (n + \frac{3}{4})T \end{cases} \quad (1.1.2)$$

式中, V_s 为方波幅值; T 为周期; n 为从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整数。图 1.1.5 和式(1.1.2)中的电压 v 是时间 t 的函数,所以称为方波信号的时域表达方式。

任意周期函数只要满足狄利克雷条件都可以展开成傅里叶级数。方波信号的傅里叶级数表达式为

$$v(t) = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi} \left(\cos\omega_0 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \dots \right) \quad (1.1.3)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/T$; $V_s/2$ 是方波信号的直流分量。 $(2V_s/\pi) \cos\omega_0 t$ 称为该方波信号的基波,它的周期 $T = 2\pi/\omega_0$ 与方波本身的周期相同。式(1.1.3)中其余各项都是高次谐波分量,它们的角频率是基波角频率的整数倍。式(1.1.3)稍加变换也可写作

$$v(t) = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi} \left[\sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(3\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{5} \sin\left(5\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) + \dots \right] \quad (1.1.4)$$

于是,图 1.1.5 所示方波信号也可以表达为图 1.1.6 所示图形。其中,图(a)表达了直流项 ($\omega=0$) 和各正弦分量的振幅随角频率变化而变化的关系,称为方波信号的幅度谱;图(b)反映了各正弦分量的相位随角频率变化而变化的关系,称为相位谱;二者统称为方波信号的频谱。

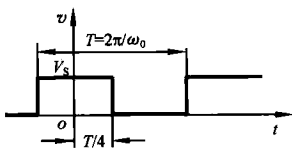


图 1.1.5 周期性方波电压信号

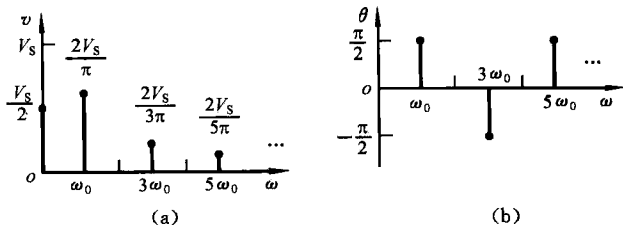


图 1.1.6 方波的频谱

像这样把一个信号分解为正弦信号的集合,得到其幅值(或有效值)随频率变化而变化的分布,称为信号的频谱分析,频谱是信号的频域表达方式。

从傅里叶级数特性可知,许多周期信号的频谱都是直流分量、基波分量,以及无穷多项高次谐波分量组成的,其幅度谱随着谐波次数的递增而逐渐减小,体现为相应分量的能量减小。如果只截取 $N\omega_0$ (N 为某一有限正值) 以下的信号组合,则可以得到原周期信号的近似波形, N 愈大,波形的误差愈小。

上述正弦信号和方波信号都是周期信号,在一个周期内包含了信号的全部信息,任何重复周期都没有新的信息出现。客观物理世界的信号远没有这样简单,如果从时间函数来看,往往很难直接用一个简单的表达式来描述,图 1.1.3 所示的波形就是非周期性的。运用傅里叶变换可将非周期信号表达为一连续频率函数形式的频谱,它包含了所有可能的频率成分($0 \leq \omega < +\infty$)。图 1.1.7 示意出了图 1.1.3 所示波形的幅度谱函数。实际物理世界的各种非周期信号,随角频率上升到一定程度,其幅度谱函数总趋势是衰减的。选择适当大小的 ω_c (截止角频率) 点,把高于 ω_c 的分量舍弃,由于这部分信号分量在信号总能量中所占比重很小,所以不会过多影响信号的特性。通常把保留的部分称为信号带宽。

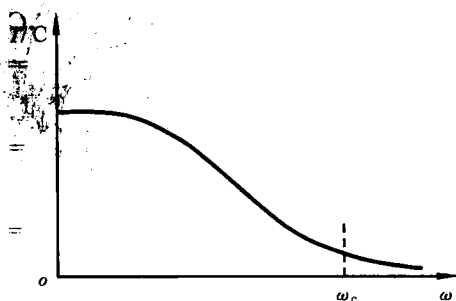


图 1.1.7 图 1.1.3 所示波形的幅度谱函数(示意图)

由上述分析可知,借助信号的频域表达方式可以更直观地得到某些被时域表达方式隐含而实际又十分有意义的参数。信号的频谱特性是电子系统有关频率特性的主要设计依据之一。

1.1.3 本书所使用的符号

为了表达电路中不同类型的物理量和单位,本书采用的符号系统尽量与电子学领域国际通行的标准一致。

① 全部变量使用斜体字母,如 I, R ; 与变量无关的名称和特定符号使用正体字母,如表示晶体三极管的 T , 特定常数 e, π , 三角函数符号 \cos ; 物理量的单位使用正体字母,如 V, Hz, Ω, ms 。

② 直流量用大写字母、大写下标表示,如 I_D, V_{DS}, P_L ; 直流电源电压用重复下标表示,如 V_{DD}, V_{SS} 。

③ 瞬时总量用小写字母、大写下标表示,如 i_D, v_{DS} 。

④ 正弦信号和均方根值(包括噪声)用大写字母、小写下标表示如 I_c, V_n ; 正弦信号的振幅或峰值亦使用大写字母、小写下标表示,但在下标尾部加标 m , 如 V_{dsm}, I_{dm} 。

⑤ 用相量法对电路进行正弦稳态分析时,电压、电流、电抗、增益亦使用大写字母、小写下标表示,如 V_{ds}, I_g, Z_i, A_v , 在易混淆或需要突出表达的地方则附变量 $j\omega$, 如 $A_v(j\omega)$; 以拉普拉斯变换用复频域法分析电路时遵循同样原则,如 V_o, A_v , 必要时附拉普拉斯算子 s (复频率变量), 如 $Z(s)$ 。

⑥ 有信息意义的变化分量用小写字母、小写下标表示,如 i_d, v_{ds} 。

下面举两个符号的实例加以说明。

一个正弦电流信号

$$i_d = I_{dm} \sin(2\pi ft + \theta)$$

其时间为 t , 频率为 f , 初始相角为 θ , 振幅为 I_{dm} , 它的均方根值为 I_d 。若它叠加在直流偏置电流 I_D 上, 则总电流

$$i_D = I_D + I_{dm} \sin(2\pi ft + \theta)$$

一个交流电流信号 i_{cgd} 通过电容 C_{gd} (见式(2.3.24)), 用相量法分析, 则表达为

$$I_{cgd} = -j\omega(1 + g_m r_{ds}) C_{gd} V_{gs}$$

若 V_{gs} 也是角频率的函数, 需强调变量 $j\omega$, 则表达为

$$I_{cgd}(j\omega) = -j\omega(1 + g_m r_{ds}) C_{gd} V_{gs}(j\omega)$$

用复频域法分析, 则为

$$I_{cgd}(s) = -s(1 + g_m r_{ds}) C_{gd} V_{gs}(s)$$

该式强调复频率 s 。

1.1.4 模拟信号和数字信号

模拟信号和数字信号在日常生活中并不鲜见, 例如图 1.1.8 中的温度计所指示的温度值是随气温变化而变化的, 如果把一天的温度变化绘成曲线, 于是得到图 1.1.9(a) 所示的连续变化时间函数波形。由图可见, 温度信号在时间上是连续推移的, 数值上也是连续变化的。像这种时间连续、数值连续的信号称为模拟信号。人们从自然界感知的许多物理量从宏观上看均是时间连续、数值连续的变量, 如图 1.1.1 所示的炉温、光纤直径、外涂敷树脂的压力和温度、拉丝盘转速等, 都是模拟信号。

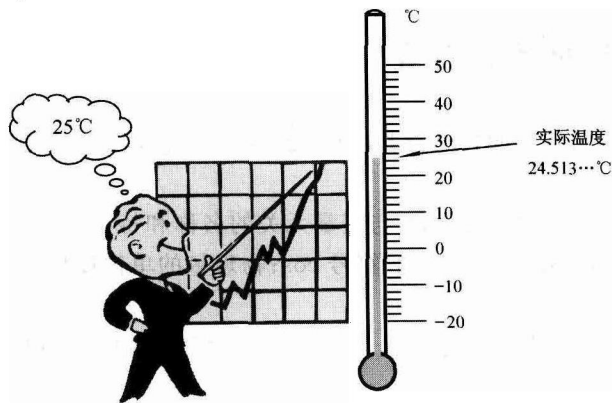


图 1.1.8 温度计上的模拟信号和数字信号

如果气温不是连续记录, 而是每隔两小时记录一次, 而且每次记录的是一个位数有限的数字, 如 25°C , 而此时的实际温度指示值可能略高于或略低于此值, 比如 $24.513\dots^\circ\text{C}$, 于是得到如图 1.1.9(b) 所示的一系列时间离散、数值离散的信号, 这种信号称为数字信号, 而每一次读取数据的过程称为取样。

上述温度信号是通过取样和人脑加工把模拟信号转化为数字信号的。电子系统把模拟信号转化为数字信号的过程与此类似, 图 1.1.2 已实际显示了这个过程。首先通过高温计把温度

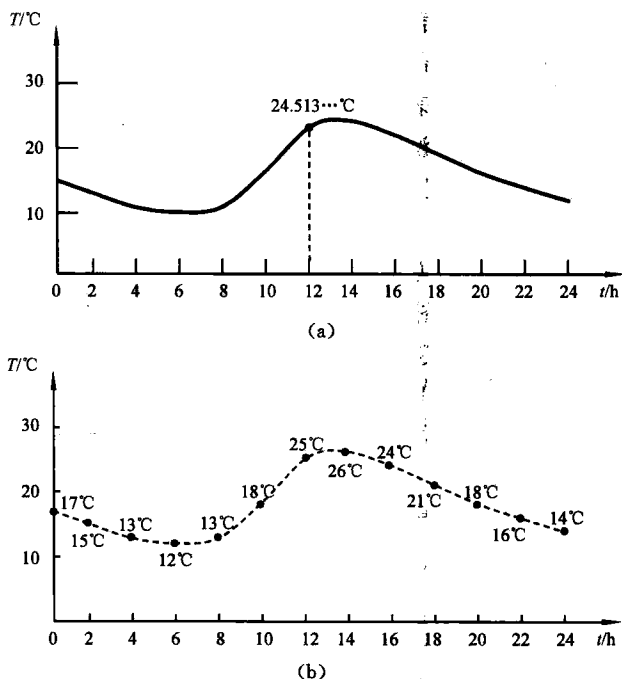


图 1.1.9 两种方式记录的温度

信号转换为电压信号,它直接模拟了图 1.1.3 所示的温度变化曲线。这个电信号是很微弱的,只有 mV 量级,如图 1.1.10(a) 下部所示,必须经放大电路将信号放大 1000 倍,达到如图 1.1.10(a) 上部所示的幅值才能作进一步处理。处理模拟信号的电路称为模拟电路,如图 1.1.2 所示的放大电路、滤波电路、电压/电流转换电路等均为模拟电路。

在信号分析中,按时间和幅值的连续性和离散性,把信号分为 4 种:①时间连续、数值连续信号;②时间离散、数值连续信号;③时间离散、数值离散信号;④时间连续、数值离散信号。图 1.1.2 所示的涉及了这 4 种信号的处理电路,其中反映温度的模拟信号即属于第①种信号。由于图中的微处理机系统是数字电路,无法直接处理模拟信号,所以需要模拟信号进行数字化转换,即离散化或量化处理。转换的第一步是取样,图 1.1.10(b) 是取样信号示意图。在 t_0, t_1, t_2, \dots 各时间点,取样电路捕捉经放大、滤波后的模拟信号幅值,得到时间离散而数值仍与模拟信号相应点一致的取样信号,即上述第②种时间离散、数值连续的信号。第二步是对取样信号的数字化转换,由图 1.1.2 所示的 A/D 转换电路实现,它将取样信号转换为与之成一定比例关系最接近的二进制整数。由于转换后的二进制数为整数,所以存在一定的量化误差。于是,得到图 1.1.10(c) 所示的时间离散、数值离散信号,即第③种信号。微处理机系统读入这种数字信号后,根据预设程序进行处理,输出的控制信号需要再转换为模拟形式,才能对炉温进行控制,这是由图 1.1.2 所示的 D/A 转换电路实现的,它的输出如图 1.1.10(d) 所示,是时间连续、数值离散的信号,即第④种信号。图中信号波形上的“台阶”对模拟输出来说是一种高频噪声,在某些应用中需要用模拟滤波电路将其滤除,形成真正的时间连续、数值连续的模拟信号。上述取样-保持电路、A/D 转换电路、D/A 转换电路一般都由模拟-数字混合集成电路构成。

在数字电子技术中,数字信号的概念不仅限于表示量值,已有所扩展:凡是在数字电路中运行的信号,都称为数字信号,其中包括编码信号和各种数字电路中实际运行的脉冲信号。

图 1.1.11 所示的是一组典型的数字信号,每个信号都是由高、低两种电平构成的:高电平为 3.3 V,低电平为 0 V。可以用高电平表示逻辑 1,低电平表示逻辑 0。这里的 1 和 0 没有数值大小的概念,只代表相对应的两个逻辑值,称为二值数字逻辑。

二值数字逻辑运用在电路上的方便之处是,可以用电子器件的开关特性实现图 1.1.11 所示的以高、低电平表达的逻辑 1 和逻辑 0 的状态变化。而一位二进制数也可以用二值数字逻辑电路中的 1 和 0 来表示,多个二值数字逻辑则可以表达数值或编码信号。

在研究数字电路时,经常关注的是信号之间的逻辑关系或编码,这时可忽略信号高、低电平的具体数值。例如,图 1.1.11 中 A、B、C 三个逻辑信号,当 A、B 两信号中有一个为逻辑 0,或两个均为逻辑 0 时,C 信号为逻辑 0;只有当 A、B 全为逻辑 1 时,C 才为逻辑 1。这是 A、B、C 三信号的逻辑关系。当然也可以把这组逻辑信号理解为顺序出现的 3 位二进制编码信号:000、001、010、111、000。可以规定,只要信号电压在 0~0.8 V 范围内,都认为是逻辑 0,而在 2.4~3.3 V 范围内,都是逻辑 1,至于具体电压数值则无关紧要。于是,在以波形表达数字信号时,可以画成图 1.1.11 所示的那样的理想形式,并可标注高、低电平的电压值,因为通常在一个数字系统中,多数电路均采用相同的逻辑电平标准。时间轴一般也可以不标。

如果用示波器观察数字电路的信号波形就会发现,数字信号远没有图 1.1.11 所示的那么理想。实际电路中运行的数字信号仍是时间连续、数值连续的物理量,只不过在研究它们的逻辑功能时忽略了它们的连续性而作了理想化处理。只要将示波器的时间轴展开得足够大,

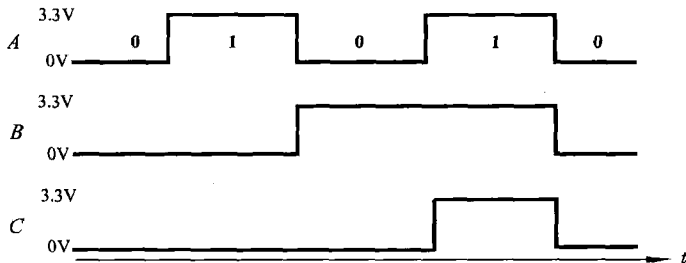


图 1.1.11 一组典型的数字信号

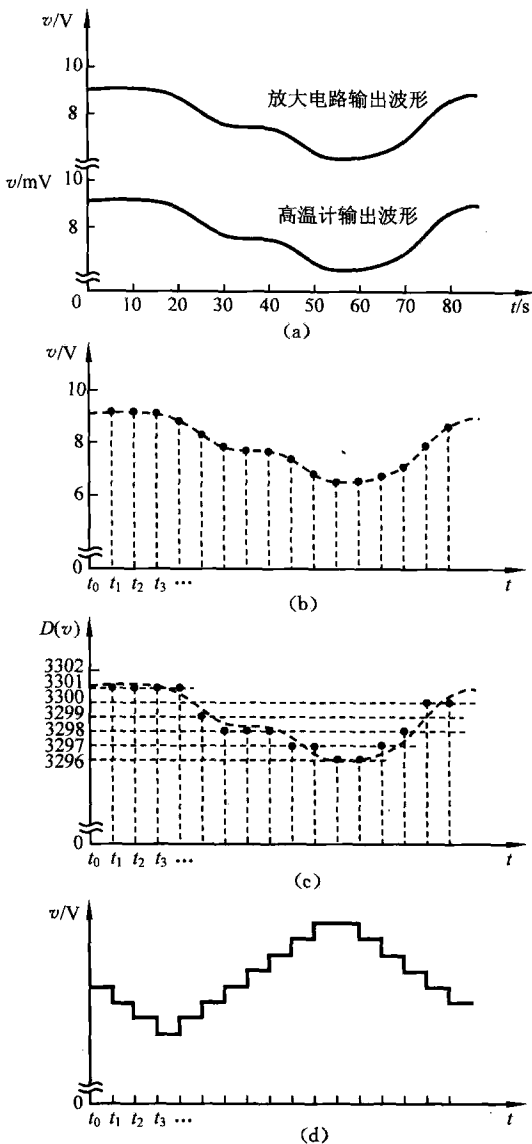


图 1.1.10 图 1.1.2 中各部分电路的输出