

嵌入式硬件系统设计与开发系列

嵌入式硬件系统设计与开发系列

电路设计技术

王道宪摇主编

贺名臣摇刘伟摇编著

内容简介

本书首先概述了电子线路发展的历史与未来,主要是数字逻辑电路设计的原理、方法和应用。并着重论述中大规模集成电路及寄存器、计数器、译码器等可编程逻辑器件的原理、编程和应用实例。书中有许多在实际应用中取得成功的例子可启发读者把学到的基础知识用于解决实际问题。紧接着指出了硬件描述语言(VHDL)在设计数字电路中所起的作用,并系统概要地讲解了VHDL的语法要点。在此基础上,本书以VHDL为工具,介绍了几种描述电路的方法与技巧,列举了几个典型电路的描述实例,分别讲解了在电路设计和程序实现方面的技巧。书中还对VHDL每个例子的详细程序作了详细论述,最后一章介绍了许多应用性极强的例子作为全书的结尾。

本书是VHDL用于数字电路设计的中高级读本,可作为大专院校计算机、微电子学和半导体专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为数字集成电路芯片设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路设计技术 王道宪主编 北京:国防工业出版社, 2000

(嵌入式硬件系统设计与开发系列)

陈丹鼻苑 吴惠 吴建刚 怨

Ⅰ. 援... Ⅱ. 王... Ⅲ. ①电子电路 ②原电路设计 ③硬件描述语言, VHDL ④程序设计 Ⅳ. ①... ②... ③...

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第...号

(北京市海淀区紫竹院南路...号)

(邮政编码...)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本... 印张... 千字

...年...月第...版...年...月北京第...次印刷

印数...册...定价...元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前摇摇言

数字系统和数字电路设备已广泛应用于社会各个领域,使各种仪器设备获得众多的功能,满足智能化的要求,因此电子技术领域的工程师和技术员必须掌握数字电子系统的基础知识。

数字电子技术在早期的分立元件和 20 世纪 50 年代后的小规模集成电路(SSI)时,逻辑设计的简化理论发挥了重要作用。70 年代以后,中规模集成电路(MSI)和大规模集成电路(LSI)相继研制成功,提高了电路的性能,降低了成本,但设计方法却大部分还是探索性和经验性的。

目前,大规模和超大规模的可编程逻辑器件得到了越来越广泛的实际应用,它们的设计采用的是计算机辅助设计技术,使电子系统的研制时间大大缩短,特别是系统可编程逻辑器件,可以在不改变硬件设置的情况下,在现场对系统进行组态,并可实现电子系统的遥控升级。

集成电路技术和计算机辅助技术的迅猛发展改变了电子系统的传统设计方法,使电子设计自动化(EDA)和电子系统设计自动化(ESDA)成为现代电子系统设计和制造中的主要技术手段,也使电子系统的设计从传统的单纯硬件设计方法变成为计算机软硬件协同设计的方法,由此可设计制造出实现各种功能的专用集成电路(ASIC)。

随着电子技术的发展,芯片的复杂程度越来越高,数万门乃至数百万门的电路设计已很普遍。仅仅依靠原理图输入方式已经不能满足设计人员的要求,于是采用硬件描述语言(HDL)的设计方式就应运而生。设计工作从行为、功能级开始,并向着设计的高层次发展。这样就出现了第三代 EDA 技术,其特点就是高层次设计的自动化(EDA,ESDA,ESDA)。随着电子技术的发展,芯片的复杂程度越来越高,数万门乃至数百万门的电路设计已很普遍。仅仅依靠原理图输入方式已经不能满足设计人员的要求,于是采用硬件描述语言(HDL)的设计方式就应运而生。设计工作从行为、功能级开始,并向着设计的高层次发展。这样就出现了第三代 EDA 技术,其特点就是高层次设计的自动化(EDA,ESDA,ESDA)。

第三代 EDA 系统中除了引入硬件描述语言——VHDL 语言,还引入了行为综合和逻辑综合工具。采用较高的抽象层次进行设计,并按层次方法进行管理,这样就能大大提高处理复杂设计的能力,缩短设计周期。综合优化工具的采用使芯片的品质获得了优化,因此第三代 EDA 系统得到了迅速的推广。

本书假定读者都已经了解数字硬件设计的基本知识,并熟悉如 C 语言等高级编程语言。对 VHDL 有初步了解的读者,阅读本书的效果将更好。阅读本书的某些章节时,必须先分别对 8051 单片机、SPI、I2C 总线操作和 CAN 总线操作有充分的了解。

本书是 VHDL 用于数字电路设计的中高级读本,实用性强是本书的一个鲜明特色。书中通过大量的实例介绍了该语言的基本内容和结构,这些实例不仅对读者掌握语言本身和建模方法有很大的帮助,而且对实际数字系统设计也有帮助。本书中使用普通的术语介绍语言的语法和语义,而没有使用语言正式定义的专业术语。本书试图对语言进行完整的讨论,但只限于讨论语言中对无论是简单还是复杂设备建模的最有用和常用的特

IV

性。仅通过阅读来学习 交互语言和数字电路设计是不够的。

熟练和精湛技术是现代电子工程师进行电子系统和电子工程设计必须掌握的技术。

为了适应电子系统设计技术的发展和培养电子科技人才的需要 ,本书对原数字逻辑电路方面的内容作了较大的改变 ,除了讲述必要的数字逻辑设计原理的基础知识外 ,对小规模电路的内容作了精简 ,加强了中大规模组件方面的内容 ,特别是对在系统可编程逻辑器件的编程及使用作了较详细的介绍 ,使读者能掌握具体技术。

希望此书的出版对推动我国集成电路设计水平的提高有所促进 ,对高等学校的教学和课程改革有所帮助。由于作者水平有限 ,加之时间仓促 ,书中难免存在错误和不足 ,敬请广大读者予以批评指正。

编著者摇摇摇
圆圆年 圆圆月摇摇

第 1 章 绪 论

1.1 数字电路的分类、特点及设计方法

1.1.1 数字电路的分类

数字电路与数字电子技术广泛地应用于电视、雷达、通信、电子计算机、自动控制、航天等科学技术各个领域，因此，“数字电路与数字电子技术”已成为高等院校无线电技术、电子工程、计算机技术、自动控制等专业的主要技术基础课之一。电子电路的工作信号，可分为模拟信号和数字信号两大类。

模拟信号在时间上和数值上的变化是连续的，而数字信号在时间上和数值上的变化都是离散的，信号的变化只发生在一系列离散的瞬间，并且信号的数值是一些离散的电平值（高电平或低电平）。数字信号是用一系列离散的数量来表示某个实际变化的过程。

用数字信号完成对数字量进行算术运算和逻辑运算的电路称为数字电路，或数字系统。由于它具有逻辑运算和逻辑处理功能，所以又称数字逻辑电路。数字逻辑电路按功能大致可以分为以下两类。

1. 组合逻辑电路

简称组合电路，它由最基本的逻辑门电路组合而成。组合电路的特点是：输出值只与当时的输入值有关，即输出唯一地由当时的输入值决定。电路没有记忆功能，输出状态随着输入状态的变化而变化。它类似于电阻性电路。

如课程中介绍的加法器、译码器、编码器、数据选择器等都是用最基本的逻辑门按一定的逻辑功能组合而成的电路。组合电路的基本组成单元是各种基本逻辑门。

2. 时序逻辑电路

简称时序电路，它是由最基本的逻辑门电路加上反馈逻辑回路（输出到输入）或器件组合而成的电路，与组合电路最本质的区别在于时序电路具有记忆功能。时序电路的特点是：输出不仅取决于当时的输入值，而且还与电路过去的状态有关。它类似于含储能元件的电感或电容的电路。

如课程中介绍的触发器、锁存器、计数器、移位寄存器、储存器等电路，都是时序电路的典型器件。时序电路是由最基本的触发器电路和组合电路所构成的。

近年来随着半导体技术和材料科学领域各种相关技术的飞速发展，以及集成电路制造工艺日新月异的进步，数字电路已经成为现代电子技术的极其重要的组成部分。与数字电路相关的应用技术，如电子计算机、数字仪器、数字通信、数控装置、雷达、电视等也迅猛发展起来。数字电路的发展不仅推动了计算机的普及和应用，而且还带动了其他领域电子技术的腾飞，了解数字电路的功能和应用，以便对它进行合理的选择和正确的运用，这是数字时代技术人员应具有的基本素质。所以，数字电路是计算机及其相关

应用专业的一门必修的专业基础核心课程。

当前数字化为前沿课题，数字化给我们的生活带来了更大的方便，信息数字化的作用尤为重要，信息数字化的好处有：

- (1) 便于传输(可能实现“无失真”传输——通过检错和纠错编码)；
- (2) 便于储存(大容量存储器技术的发展)；
- (3) 便于信息的处理(用计算机)；
- (4) 数字系统比模拟系统更容易达到需要的精度；
- (5) 便于保密(用数字加密技术)；
- (6) 便于工业化高质量地大批量生产，可达到产品的高可靠性和高度一致性；
- (7) 便于电子设备的小型化，微型化，产品越来越小。

数字化应用于一切信息领域：

- (1) 通信领域；
- (2) 自动控制/机器人(ROBOT)；
- (3) 遥控，遥测，遥感；
- (4) 商业，服务业；
- (5) 家用电器：数码相机摄像机，HDTV，DVD，数字广播节目及家庭自动化。

1.1.2 数字电路的特点

数字电路之所以能得到越来越广泛的应用，是和它具有的特点分不开的。

1. 同时具有算术运算和逻辑运算功能

数字电路是以二进制逻辑代数为基础，使用二进制数字信号，既能进行算术运算又能方便地进行逻辑运算(与、或、非、判断、比较、处理等)，因此极其适合于运算、比较、存储、传输、控制、决策等应用。相比而言，如果采用模拟系统完成同样的功能，从数学运算到电路实现所需要的设备较数字系统要复杂得多。

2. 实现简单，系统可靠

以二进制作为基础的数字逻辑电路，简单可靠，准确性高。因为在数字系统中，信号只有两个基本的离散量——“0”和“1”。对应逻辑代数二进制数的“0”和“1”状态，“0”和“1”可以表示任何事物的两个对立面(有、无，高、低，是、否，好、坏等等)。再用这两个最基本的状态组合，可以表达客观事物间的任何复杂关系，并能进行推理、运算。在物理电路中，它们对应着半导体二极管、三极管电子元件的导通和截止这两个不同的开关状态，所以，工作速度快，抗干扰能力强，在传递、加工和处理信息时不易出错，增加了系统的可靠性和准确性。

3. 集成度高，功能实现容易

集成度高，体积小，功耗低是数字电路突出的优点之一。电路的设计、维修、维护灵活方便，随着集成电路技术的高速发展，数字逻辑电路的集成度越来越高，集成电路块的功能随着小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)的发展也从元件级、器件级、部件级、板卡级上升到系统级。电路的设计组成只需采用一些标准的集成电路块单元连接而成。对于非标准的特殊电路还可以使用可程序逻辑阵列电路，通过编程的方法实现任意的逻辑功能。

1.1.3 数字电路与逻辑设计的基本方法

数字逻辑电路的理论基础是逻辑代数，逻辑代数最大的特点是二值代数，使用逻辑代数的二值变量和二值函数的概念来研究、分析和设计数字电路输入和输出之间的逻辑关系。对于一个给定的逻辑电路，研究它的逻辑功能，也就是对已知的逻辑电路，找出它的逻辑功能，并用逻辑函数来描述的工作，称为逻辑分析。根据给定的逻辑要求，先确定要完成的逻辑功能，再求出相应的逻辑电路，称为逻辑设计。逻辑分析和逻辑设计是互逆的。

研究数字逻辑电路，首先要理解和掌握逻辑代数的基本运算规则。在此基础上学会和掌握实用的分析和设计方法，培养具有处理实际电路问题的能力。

由于集成电路的高速发展，数字逻辑电路的设计已经标准化、模块化和系统化，因此在掌握逻辑代数的基本运算规则和分析设计方法的基础上，就可以选用成熟的已有基本模块来构成电路，寻求最好的设计，以满足全面的性能指标。经典的开关理论和最小化设计思想，仍然是分析和设计逻辑电路的基础，对于逻辑设计仍然具有十分重要的指导意义。

在学习时要注意在具体的数字电路与基本逻辑设计方法之间应以设计方法为主，在具体的设计步骤与所依据的基本原理和概念之间，应以原理和概念为主，在集成电路的内部工作原理与外部特性之间，应以外部特性为主，以便抓住重点。

1.2 脉冲和脉冲电路

脉冲 (Pulse) 这个词包含着脉动和短促的意思。在脉冲技术中，我们研究的是一些具有间断性和突发性特点的、短暂出现的周期或非周期的时间函数的电压或电流。图 1-1

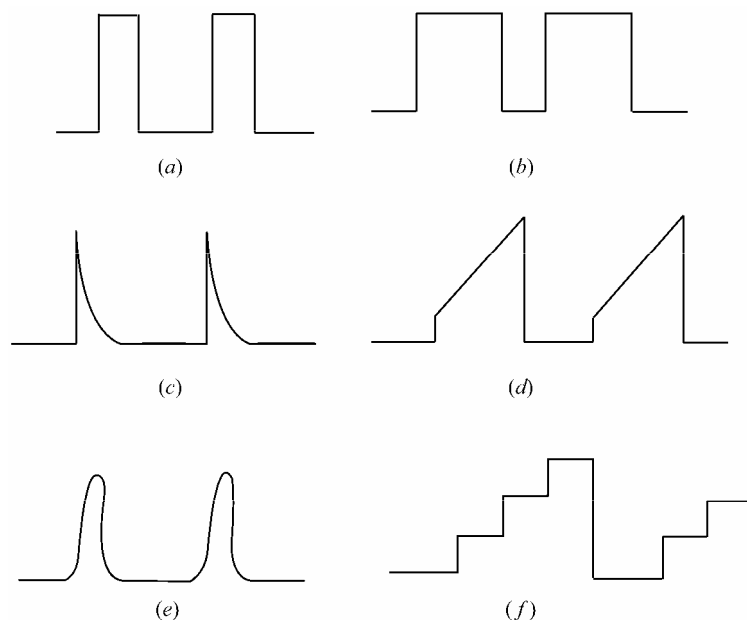


图 1-1 常见的脉冲波形

(a) 矩阵(窄脉冲); (b) 矩形(方波); (c) 指数(尖形); (d) 梯形; (e) 钟形; (f) 阶梯形。

示出了几种常见的脉冲波形：矩形波、尖顶波、锯齿波、钟行波、梯形波和阶梯波。下面举两个矩形脉冲的应用实例。

图 1-2(a)是一个发电报的简单装置，电键、电阻和电池串联。按下电键，电阻上电压 V_0 等于 E ；不按电键， V_0 等于 0。每按一个电键就可以产生一个脉冲，根据电文内容，不断忽长忽短地按动电键，就可以得到一系列幅度为 E 而宽度不同的矩形脉冲，如图 1-2(b) 所示。

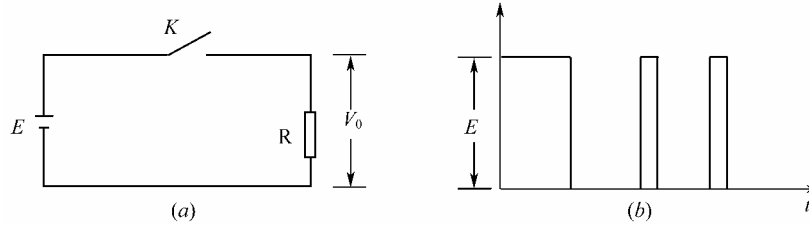


图 1-2 发报示意图

(a) 电路；(b) 所代表的电文。

1.3 数字信号和数字电路

人们在现实生活中遇到的许多物理量，如温度、压力、距离、时间等，一般都具有连续变化的特点。它们可以在一定范围内取任意实数值，称这类物理量为模拟量。在工程应用中，为了测量、传递和处理这些物理量，常把它们通过传感器转换成与之成比例的电压(或电流)。这些电信号表示和模拟了实际的物理量，故称之为模拟信号，其电压值(或电流值)在一定范围内是连续的变量。模拟信号所传送的内容称为模拟信息。处理模拟信号的电路称为模拟电路(Analog Circuit)。

数字量是离散的，只能按有限个或可数的量化单位(又称为增量、量化层)取值。例如，某一实际距离值为 2567.82326km 。若取量化单位为 1km ，则代表此距离的数字量为 2568km ；若取量化单位为 1m ，则数字量为 2567823m 。量化单位的选择，取决于我们所要求的精度。与数字量相对应的电信号为数字信号。数字信号所传送的内容称为数字信息。处理数字信号的电路称为数字电路(Digital Circuit)。

在进行信息传递和处理时，数字方式和模拟方式相比有下述优点。

(1) 精度和可靠性高 同一物理量可以用连续的模拟信号表示，也可以用离散的数字信号表示。用数字信号进行信息传送和处理，容易达到高精度和高可靠性。例如，当温度信息用模拟信号传送时，模拟信号的电压值正比于温度值。若要求精度为 $1/1000$ ，则必须要求传送途径上的干扰电压低于所传送信号的电压的 $1/1000$ 。在干扰严重的地方，这样的要求往往难以实现。若利用数字信号传送就容易达到这一精度要求。数字信号传输时，常采用二进制，也就是把所传送的数字量按照一定的规则编成一组脉冲序列。数字量的精度取决于量化单位的大小，进而决定了二进制数码的位数，即每组脉冲序列所能容纳的脉冲个数。数字量的大小取决于每组脉冲序列中各个脉冲的有无。只有当传送途中遇到相当大的干扰时，才能改变信号中脉冲的有无，破坏信息的内容。因而，采用

数字信号有较强的抗干扰能力，容易达到较高的精度。

(2) 使用灵活，易于器件标准化 随着半导体工艺的发展，数字电路器件的体积越来越小，集成度越来越高。今天，可以在一块硅片上制造几千个、几万个甚至几千万个元件，并可制造单片的数字计算机、单片的信号处理器等功能很强的标准化的通用器件，也可以由使用者定制专用的芯片。这些器件的出现，使得数字系统的体积小、重量轻、耗电省，并且提高了工作的可靠性。目前，数字电路广泛应用在军事、工业、商业、企业管理、交通运输、医疗保健和文化教育等各个领域，同时已进入到人们的日常生活中。

顺便指出，脉冲电路先于数字电路出现，数字电路在脉冲电路的发展中分化出来，并逐步成为独立的体系。脉冲电路和数字电路的研究方法有很大的差异。严格讲，脉冲电路应属于模拟电路的范畴，但脉冲电路和数字电路有紧密的联系。本书以数字电路为主，先介绍数字电路，最后再讨论脉冲电路。脉冲数字技术是一种实用技术，学习时应紧密结合实际。本书侧重于物理概念的阐述，避免冗长、繁琐的数学运算。书中采用了工程上使用的一些快速、简便的估算方法和图表法，它们都是十分重要的。一个最佳的电路设计，不仅要求电气性能好，还要考虑经济性、可靠性和便于实现。

1.4 电子系统设计

1.4.1 电子系统设计概述

随着 21 世纪的到来，现代社会将进入电子与信息时代。大到全球各大洲、小到每个家庭，无不与电子和信息产业相关，这就要求即将工作于电子和信息领域的学生要学会并掌握电子系统的设计与开发的方法。为此，首先应该知道什么是电子系统？它有什么特点？包括了哪些主要内容？电子系统有大小，大到航天飞机的测控系统，小到出租车计价器，它们都是电子系统可能的组成，如图 1-3 所示。

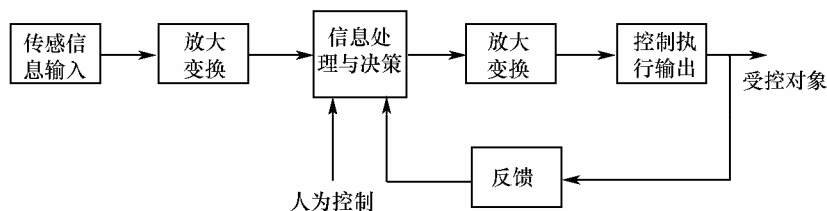


图 1-3 电子系统可能的组成框图之一

从组成来看，一个电子系统一般包括模拟系统——传感、高低频放大、模/数变换、数/模变换以及执行机构等；数字系统——信息处理、决策、控制。但是，对于软硬结合的电子系统而言，它的信息处理、决策与控制部分大部分可由含有 CPU 的微处理机(如单片机的)电子系统来实现。所以从组成来讲，一般可以把电子系统看成由 3 大部分组成：模拟子系统、数字子系统与微处理机子系统。之所以把以上 3 个部分称为 3 个子系统，是因为这些部分一般已不是 1~2 块简单模块电路可以实现的，它们本身也构成了一个有特定功能、相对完整的电路系统。实现电子系统的器件比较广泛，基本上包括了大部分

电子器件，它们是由中大规模或超大规模集成电路、专用集成电路、可编程器件以及不可缺少的少量分立元件和机电元件组成。

从电子系统的类型来讲，电子系统又可分为智能型与非智能型两种。顾名思义，非智能型那么电子系统是指那些功能简单或功能固定的电子系统，例如简单的巡回检测报警系统等。那么什么是智能型电子系统呢？至今还没见到过一个简单明确的权威论述。虽然如此，但我们仍可参照人类活动规律，找出智能型所应具有的特点，从而得出必要的结论。智能型的第一个特点是必须有记忆力，如果没有记忆力则根本不可能由此及彼地全面地进行分析；第二个特点是具有学习能力，能够学习各种知识，而且这些知识可运用于实践；第三个特点是易于接收信息、命令；第四个特点是具有分析、判断和决策能力；最后一个特点是可以控制或执行所作的决定。对照以上特点，显然纯硬件的电子系统是不可能被划在智能型范围内的，因为它的最大弱点是硬件与功能是一一对应的，增加一个功能必须增加一组硬件，改变功能必须改变电路结构，所以纯硬件结构不具有便于学习的能力，它不具有智能型的特点。只有带有 CPU 的微机(单片机)并配以必要的外围电路，从而构成软硬件结合的电子系统才具有智能型的特点。首先，它有存储单元及输入/输出接口，可以接收并记忆信息、数据、命令以及输出并控制决策的执行。其次，它善于并且便于学习，只要将合适的软件装入系统，人们不必改动系统结构就可使它具有某种新功能。有了记忆能力，它就可以进行一定的分析、判断，完成一些决策，从而具有智能型的特点。因此我们把以微机(单片机)为核心组成的软硬件结合的电子系统称为智能型电子系统。

根据电子系统的不同功能，大致有以下几种电子系统。

(1) 测控系统 大到航天器的飞行轨道控制系统,小到自动照相机快门系统以及工业生产控制等；

(2) 测量系统 电子及非电量的精密测量；

(3) 数据处理系统 例如语音、图像、雷达信息处理等；

(4) 通信系统 数字通信、微波通信等；

(5) 计算机系统 计算机本身就是一个电子系统，可以单台工作也可以多台连网。

(6) 家电系统 多媒体彩电、数字式视频光盘机等。

以上列举了众多的电子系统，它们的功能不同、规模不同、使用场合不同，因此对它们的要求也不同，从而衡量这些系统的指标也是不同的。衡量电子系统的指标可能有功能、工作范围、容量、精度、灵敏度、稳定性、可靠性、响应速度和使用场合、工作环境、供电方式、功耗、体积、重量等等。对不同系统而言，其要求也不相同。例如，航天器中的轨道控制系统的动态工作范围、精度、响应速度、可靠性、体积、重量、功耗、工作环境等必须重点考虑；通信系统则重视容量、灵敏度、稳定性、使用场合等；家电系统则主要考虑功能、稳定性、可靠性、成本及价格等，而对供电方式、精度、响应速度等指标不作过多考虑。系统设计人员应根据系统类型，功能要求，指标要求，细化出每个子系统的技术指标以便进行设计。在细化过程中，必须注意设计应尽量符合国家标准或部颁标准，有可能时还应符合国际标准，以便产品走向世界。在细化中还应注意系统的档次定位、技术含量恰当、符合发展潮流、性能价格比高等特点，以满足市场需求。

根据待设计的电子系统的特点以及使用的技术层次，可将电子系统设计分成 3 种类型：

(1) 新系统开发设计 开拓、研制一个崭新的电子系统，所有的部分技术、电路、器件有待于同期开发，属于创新、开拓、研制的设计类型；

(2) 新产品开发型设计 利用现有成熟技术、电路及器件，开发出满足市场需求的新产品、新设备。属于开发型的设计类型；

(3) 新技术应用型开发设计 介于以上两种类型之间，将新技术、新器件应用于电子系统的开发，将电子系统的性能提高到一个新的档次。

根据以上介绍的电子系统功能、应用范围以及设计类型可知，电子系统设计涉及的范围非常广，而且涉及的技术层次也大不相同。那么本书的内容将设定在什么范围呢？根据本书所设定的读者及使用范围，本书的内容将限定于设计一个实用的完整的小电子系统，诸如温控系统、信号产生器、出租车计价器等，属于新产品开发型设计类型，但不能过多涉及一些实际生产中的问题，只能集中篇幅给读者提供一个由单元电路、基本原理、实用器件到实用小系统的桥梁，使读者学会并掌握电子系统设计与开发的方法。

根据以上目的，同时根据电子系统的组成和器件的应用，本书内容包括：

(1) 电子系统的设计方法，包括各个子系统的设计方法，诸如数字子系统设计方法、模拟子系统设计方法以及微机(单片机)子系统设计方法；

(2) 应用新器件——可编程逻辑器件设计数字系统的方法；

(3) 电子系统可能涉及到的一些器件，诸如传感器、输入/输出设备、执行机构以及一些实用器件的特性及使用方法，但它的原理将不过多涉及；

(4) 若干实用性很强的设计举例贯穿于全书各章节，以供学习设计方法时参考；

(5) 电子系统的调试及实现方法，用以指导读者的实践活动。

1.4.2 电子系统设计方法

1. 电子系统设计过程

在大多数情况下，电子系统的设计采用自上而下(Top-down)的设计方法，根据用户要求进行设计。用户要求一般表示为无二义性的自然语言描述、硬件描述语言以及系统的总体技术指标等，以系统设计要求或系统说明书方式提供。有些资料把用户要求这个层次概括为功能级。设计人员首先根据对设计要求的理解及系统可能的工作方式、结构等知识构成系统总体框图。在构成总体框图时应不断地消化并理解用户要求，必要时要与用户磋商讨论，进一步明确一些可能存在的不明确的地方，补充确定一些设计要求中未曾列出的必要的技术要求、指标等。总体框图由若干个小框构成，每一个小框都是一个功能相对单一的子系统，例如存储器系统；数据处理系统；输入/输出系统等。同时，根据设计要求及指标规定，每个子系统的性能指标类似于把用户要求层次概括为功能级，可以把带有技术指标要求的系统总体框图概括为处理器级。然后设计人员应对总体框图中的每一个小框(子系统)的结构进行分析及设计。根据它在系统中的功能及指标构成该小框(子系统)的详细框图，要使详细框图中的每一个小框都落实到中大规模集成电路层次，同时规定一些关键器件的指标以保证该子系统的性能指标的实现。通常把这个

层次概括为寄存器级。对于一个初级的电子系统设计人员而言,构成了寄存器级框图就等于初步完成了系统设计的理论部分。还应该说明的是:自上而下的设计方法是一个不断求精、逐步细化、分解的过程,但并不是单方向的。在下一级的构成及设计过程中可能会发现上一级的问题或不足,从而必须反过来对上一级的构成及设计加以修正。所以自上而下的设计过程是一个不断反复修正的过程,最后才能制定出可行的方案。完成了理论设计后,下一步的工作就是根据框图及要求,采购器件、设计印制电路板、装配、调试。如果在调试中发生问题还要修改部分设计及更换器件,以保证性能合乎要求。最后还应完成必需的设计报告、测试报告及各种文档资料的整理,才能完整地结束系统的设计过程。

如果还希望进一步提高结果的档次,例如用可编程器件实现部分电路或者直接设计成专用集成电路(ASIC),那么在获得了寄存器级框图后,设计人员还应用寄存器描述语言(当前通用 VHDL 语言)或软件规定的语言,对寄存器级框图进行描述,经过编译、仿真等操作后生成可编程器件或专用集成电路的版图,供集成电路厂家去生产专用集成电路。电子系统的理论设计过程可用图 1-4 表示。图 1-5 给出了某计算机(它也是电子系统)的理论设计过程示意图,图中还画出了线路设计一般不必涉及的门级及晶体管级。

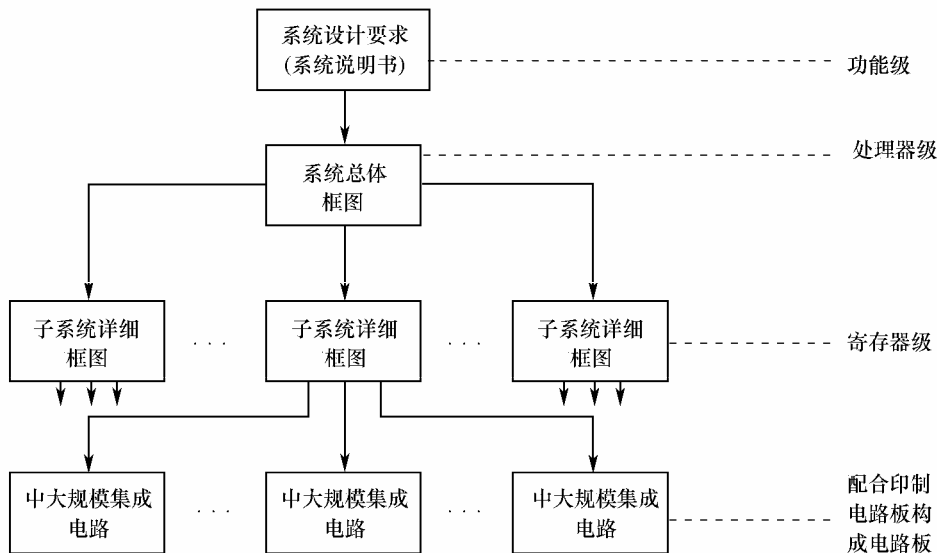


图 1-4 电子系统理论设计过程示意图

应该说明,图 1-4 和图 1-5 所示的系统设计过程实际上主要是数字子系统硬件的设计过程。一个智能型电子系统应包括有软、硬件两部分,同时还应有模拟子系统部分。对于一个智能型电子系统而言,在设计开始时就应该有一个软、硬件分工的安排,然后再分别进行硬件系统设计和软件设计。而有关模拟子系统的设计则应在系统设计的同时,根据模拟信号的特点,采用数据流法对模拟子系统的结构进行安排。因为在一个电子系统中,一般占主要部分的是数字子系统,模拟子系统只在信号的输入、输出等局部电路中起主要作用,而且总是根据模拟信号的流向及时对模拟信号的要求来安排模拟子

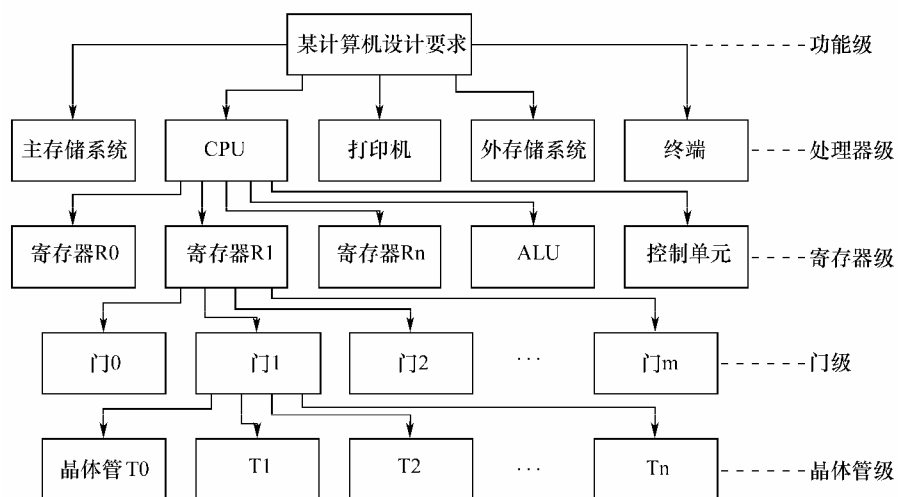


图 1-5 某计算机的理论设计过程框图

系统的各个环节。设计人员可用框图及技术指标来描述模拟子系统，然后再由硬件实现。但由于模拟集成电路的集成度较低、品种不齐、覆盖面不广，以致个别电路还必须用小规模电路或是分立元件来实现。因此在模拟子系统的框图中最后应落到硬件可以实现的层次，而不只限于集成电路。

还应该说明的是以上全部设计过程都是手工设计过程(可编程器件及专用集成电路实现除外)，这也是目前小系统常用的设计方法，对初学者及简单用户来讲是有实用价值的，它是电子系统设计的基础知识，也是本书介绍的主要内容。

2. 现代电子系统的设计方法及工具

由于电子技术的飞速发展，集成电路和电子系统的复杂程度大概是每 6 年提高 10 倍，因此电子系统设计的复杂程度也在相应提高。简单的手工设计方法已无法满足现代电子系统设计的要求。因此许多软件公司纷纷研制采用自上而下设计方法的计算机辅助设计系统。在 20 世纪 70 年代中叶有了基于手工布局布线的第一代 ECAD 工具(计算机辅助设计)后，1981 年—1982 年出现了基于原理图设计仿真的第二代 EDA 系统(电子设计自动化)，到了 1987 年—1988 年又推出了基于 RTL(寄存器传输语言)的设计、仿真、逻辑综合的第三代 EDA 技术。时至今日，又是 10 多年过去了，电子系统的复杂程度又提高了 10 多倍，第三代 EDA 工具面临着以下 4 大难题。

(1) 功能验证需要花费大量时间 可能要花费半年左右时间才可能对实用的电子系统，诸如图像、信号处理、无线通信及网络应用方面的设计进行模拟验证。

(2) 控制系统的设计相当复杂 描述、设计、修改困难，而且非常容易出错，稍一不慎就会导致重新设计。

(3) 体系结构的优化代价太大 由于实现一个方案需经过大量时间的设计及验证，人们无法对多种方案进行优化选择。

(4) 理论设计与实际器件性能在时间延迟方面的严重不同 由于深亚微米($0.5\ \mu\text{m}$ 以下)的器件工艺导致理论设计与实际器件之间在时间延迟等方面相差很大，人们很难在设

设计阶段发现并解决。

为了解决以上难题,世界上各大软件公司纷纷推出新一代 EDA 设计软件,其中以新思公司(Synopsys)于近两年推出的高级 DSP 系统设计工具 Cossap 及行为级综合优化工具 Behavioral Compiler 最具有代表性。在数据处理以及一些通信领域中,以 Cossap 及 Behavioral Compiler 为代表的新一代 EDA 设计软件为设计人员提供了一个完整的系统设计环境,使人们摆脱了手工设计所带来的各种弊端。Cossap 软件的最基本的特点是实现系统级描述,人们只需要将系统的功能(行为)及算法用类似于 C 语言的程序写出原代码,在 Cossap 的框图编辑器环境中调用一些模块连同原代码即构成了一个完整的仿真环境并进行仿真,最后得到满足要求的行为级 VHDL 描述。这个描述相当于手工设计中的处理器“框图”。与此同时还得出软、硬件分配的安排,保证了系统的最佳配置。有了行为级的 VHDL 描述,再加上一些必要的约束条件一起送入 Behavioral Compiler 进行行为级综合,则可同时生成寄存器级的门级的 VHDL 描述,自动地完成了手工设计的第二步。人们通过修改约束条件可以得到不同结构的门级电路,为优化设计方案提供了方便。而且由于行为级的抽象层次较高,多种控制信号相对减少许多,很复杂的电路也可以一次仿真完成。所以行为级描述又具仿真速度快、结果精确的优点。图 1-6 给出了采用行为级设计软件的 $0.5\ \mu\text{m}$ 工艺芯片的设计流程图。由以上介绍可知,EDA 设计软件已经实现了真正的设计自动化,尽管目前还只限于数据处理、通信及多媒体领域。但可以预见,在不久的将来还会有更新、功能更全的设计软件出现,使得电子系统设计工作有进一步的飞跃。以上介绍的行为级设计软件都是数字系统的设计软件。由于模拟电路的复杂性,目前实用的模拟行为级模型刚刚开始建立,要达到数字系统设计的水平可能还要一定时间。

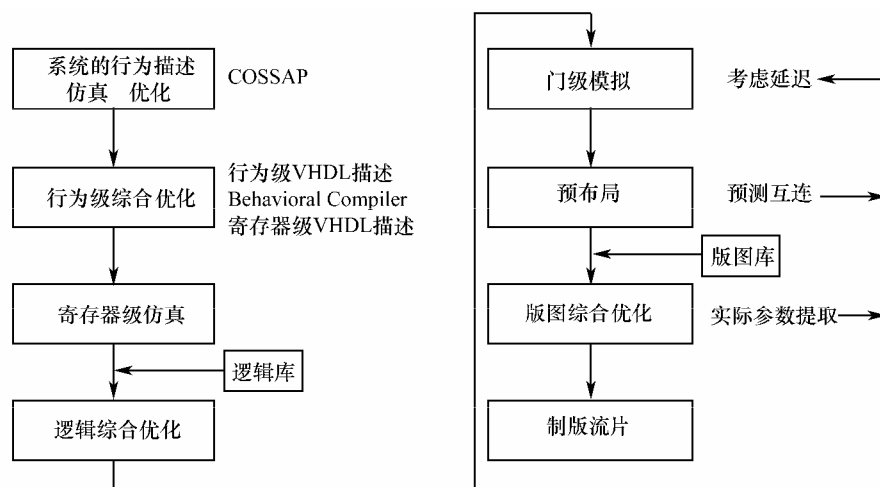


图 1-6 采用行为级设计软件的 $0.5\ \mu\text{m}$ 工艺芯片的设计流程图

电子设计自动化的广泛使用,使得设计者可以集中精力于系统的高层设计,诸如算法、功能等概念设计方面,而把大量的具体设计过程留给 EDA 软件去完成,改变了传统设计过多地依赖设计者的知识和经验,代之以定性化的系统级目标设计和由软件完成的量化的多层次设计计算。同时在 EDA 软件中集成了大量的成熟经验、算法及工具,保

证了设计的可靠性及水平，加速了设计速度，满足了日益复杂的设计需要。而且，由于EDA的广泛应用，使具有一定电路基础知识及计算机技术的人员经过培训即可胜任这项工作。由此可见，电子设计自动化是现代电子系统设计的基本手段，是走向市场、走向社会、走向国际的基本技能，不会使用电子设计自动化工具就无法适应现代信息与电子社会对电子设计人员的要求。由于条件限制，目前国内高校的电子类课程，特别是实验手段，不少学校还停留在传统的中、小规模集成电路的安装、焊接、调试等初级阶段，这与当前的电子和信息产业的发展现状极不适应，满足不了日益增长的需求。但可以预见，在不久的将来电子设计自动化将在广大本科生中得到推广，我国的本科毕业生将可以直接进入现代社会所需要的岗位上，实现教育与社会接轨。作为基础教育，本书是电子系统设计的基础篇，为当前广大高校在校生的电子系统设计课程及电子设计竞赛提供教材和资料，所以本书的设计方法将主要限于初级阶段。

第 2 章 数制与编码

计算机及数字设备中存在两种不同类型的运算：逻辑运算和算术运算。逻辑运算实际上是实现某种控制功能，而算术运算是对数据进行加工。算术运算的对象是数据，因此对数的基本特征和性质应有所了解。同时，数字设备中采用二进制数，因此在数字设备中的数、字母、符号等都要以特定的二进制码来表示——这就是二进制编码。所以本章将介绍一些数的基本知识及常用的编码。数字电路和计算机中数的表示形式决定了计算机的结构和性能。人机交流内部信号流程如图 2-1 所示。

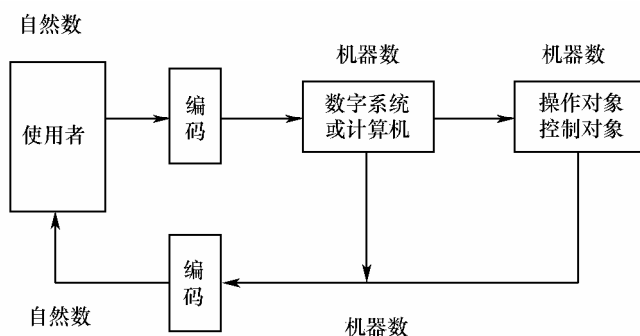


图 2-1 人机交流内部信号流程

数字系统、计算机系统都是一种能快速可靠地执行某种操作，实现某些功能的工具。人类的自然语言无法在机器内部运行，而机器高速运行输出的结果人类也无法直接判读。所以在人机接口处必须加以转换，以使两者之间得以沟通。

2.1 进位计数制

2.1.1 十进制

1. 进位计数制

它的概念描述为：把数划分为不同的位数，逐位累加，加到一定数量之后，再从零开始，同时向高位进位。进位计数制有三个要素：数符、进位规律和进位基数。

十进制是最常用的记数表示方式。我们研究的目的是要找出这种计数方式最基本的特征和它们的数学模型，以使用硬件或软件编程的方式来实现其运算功能、转换功能、存储方式。

记数符号为：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9(该进位制中可能用到的全部数码的个

数为 10)。

记数基数为：10。

进位方式：逢十进一。

十进制计数的表示方法有以下几种形式。

(1) 位置表示法 它是由数所在位置来确定数的大小，例如：数 1998.523 从左到右分别表示为

千位	百位	十位	个位	十分之一位	百分之一位	千分之一位
1	9	9	8	5	2	3

$$(N)_{10} = (K_{n-1}K_{n-2} \cdots K_1K_0 \cdot K_{-1}K_{-2} \cdots K_{-m})_{10}$$

(2) 多项式表示法(按权展开式) 例如：数 1998.523 表示为

$$1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 8 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-3}$$

$$(N)_{10} = (K_{n-1}(10)^{n-1} + K_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + K_1(10)^1 + K_0(10)^0 + K_{-1}(10)^{-1} + K_{-2}(10)^{-2} + \cdots + K_{-m}(10)^{-m})_{10}$$

(3) 和式表示法

$$(N)_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i (10)^i$$

式中 K_i ——0, 1, 2, 3, ..., 9 中的任意一个数码；

m ——正整数，表示小数的位数；

n ——正整数，表示整数的位数；

i ——第 i 位系数 K_i 的“权”，等号右边括号中的 10 表示进位制基数。

什么是进位基数呢？即计数制中每个数位所使用的数码符号的总数，它又被称为进位模数。我们经常把数用每位权值与该位的数码相乘展开。当某位的数码为“1”时所表征的数值即该位的权值。

例如我们把十六进制数 $N = (1FA3.B3)_H$ 按权展开式子为

$$N = 1 \times 16^3 + 15 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 3 \times 16^0 + 11 \times 16^{-1} + 3 \times 16^{-2}$$

2. 常用的进位计数制

我们用进位计数制的三要素来描述一下二进制、八进制、十进制和十六进制，如表 2-1 所示。

表 2-1 二进制、八进制、十进制和十六进制的描述

常用进制	英文表示符号	数码符号	进位规律	进位基数
二进制	B	0, 1	逢二进一	2
八进制	O	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	逢八进一	8
十进制	D	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	逢十进一	10
十六进制	H	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F	逢十六进一	16