

普通高等教育“十二五”规划教材
工程创新型电子信息类精品教材

实用数字电子技术基础

潘松 陈龙 黄继业 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

作为全新的实用型数字电子技术教材，本书借鉴了目前国外知名高校同类教材的选材和教学理念，将传统手工数字技术与现代自动化数字技术的基础知识和工程理论有机融合，使读者能十分流畅地实现从学习传统数字技术基础知识向现代数字技术的平滑过渡及大幅跨越！

本教材突破了传统教学模式的局限，将目标定位于使学生在数字电子技术的基础理论（包括 VerilogHDL

前 言

随着数字电子技术的飞速发展和应用领域的延伸扩张，仅仅在 30 多年前尚未曾有过的
大量学科纷纷出现在高等教育的课程设置中。如 DSP 技术、SoC 设计、EDA 技术、计算机
结构与设计、网络技术、数字通信、嵌入式系统等。这其中许多被列为当今的核心科技学科
和自主型关键技术的重要组成部分，引领着未来电子技术和科技的发展方向。在这飞速发展的技术环

教科书都因摩尔定律而缩短了它的适用期”。

这无疑会在读者中产生许多误导，例如会误将过时的手工技术、分析方法和设计流程当成现代数字技术基础知识去应用；或将逻辑化简误当做系统优化的目标去追求；或将逻辑功能手工分析方法误认为这就是现代数字系统的时序分析方法；甚至会将这些教材中仅适合于低速小规模条件下的数字知识当成一般数字技术误用到高速大规模逻辑设计中。

至于将 IEEE/ANSI 曾于 1984 年制定的，并很快在国际上淘汰的逻辑图形符号标准，一直在我国教科书中作为“国家标准”沿用至今，则是另一明证。其实这种早已过时的所谓国标符号，早于 20 世纪 80 年代后期的数字技术业界就升级至 ANSI/IEEE—1991 标准 (Distinctive shape Symbols)。其结果是，迫使已完成现在的数字电路课程学习的学生，不得不重新学习和熟悉 ANSI/IEEE—1991 标准的逻辑符号，才能面对实用的电子工程技术。

(3) 脱离工程实际

教材中充斥着偏离工程实际的伪命题和伪技术。例如，当今的 TTL 74LS 系列器件原本可毫无问题地与 CMOS 器件相互接口，甚至 3.3V I/O 电平的器件也能可靠地接口 TTL 和 CMOS 器件，然而教材中无不推荐使用诸如要加上拉电阻、三极管电路或是插入专用驱动器件(如 40109)等多种所谓“接口技术”，来解决这些无中生有脱离实际的“电平不匹配”命题；或者介绍要用 3 个 CMOS 驱动 1 个 TTL 器件之类的夸张“技术”；再如对于毛刺脉冲的解决方案，工程上原本应该选择时序电路，然而书中却罗列了许多脱离实际甚至错误的方法，如改变逻辑结构的“冗余技术”、端口接电容的滤波技术等；更有甚者，单纯地介绍只要获得对应的反馈逻辑函数，就能通过控制通用逻辑器件的清零或置数端，构建成指定进制的计数器。却从不提及或讨论，以此类方法设计的逻辑系统在外围温度或电磁环境等因素发生变化时，控制逻辑信号是否会出现毛刺脉冲，从而提前启动清零或置数。例如，74LS161 理论上的十二进制计数设计很可能由于外部因素而变成八进制计数器！

(4) 知识体系的结构性缺陷

传统教材知识体系的结构性缺陷主要表现在以下 3 个方面：

① 知识体系不具备以此及彼的可推广性和一般性。例如无法将逻辑电路的分析方法应用到实际工程上，因为现在只做时序仿真；又如给出的设计时序电路的经典 5 步骤其实只适用于简单电路(如模 7 计数器等)设计，根本无法推广到更实用的诸如模 70、模 700 乃至模 7000 等多变量的同类计数器的设计，从而约束了学生的创造力和实践技能的培养。

② 仅罗列枝节性知识，没有将这些知识上升为一般性理论和实践依据。例如，罗列了各种时序电路应用模块(如各类计数器)，给出了诸如状态变量、状态图、状态表等重要概念，却始终没有迈上“一切同步时序电路都是状态机的特殊形式”的关键台阶。所导致的后果是，多数学习者除了仅能完成基于笔头的“书面实践”外，无法再向前多跨一步。

其实这种教学安排违背了人的基本认识规律。人类对自然的认识规律就是从特殊到一般，再从一般回到特殊的过程；而人对自然的能动作用则体现在后一阶段。如果教学中只罗列各类计数器的类型和设计，却不将学习的认识推向更高更一般的层次，即状态机的设计与应用(国外许多知名同类教材都介绍状态机的设计)，无疑是舍本求末之举。

③ 缺乏前后呼应的一致性。尽管教材都安排了存储器、模数、数模等实用器件的介绍，但都仅仅限于对它们的结构和原理的介绍，却不介绍它们的实用方法，更没有相关的实验安排，完全违背了技术基础类教材的基本要求。一般而言，对于后文安排的实例性项目(如 ADC0809)，理应利用前文给出的有关逻辑电路的分析与设计知识，给读者展示使用这些器

件的技术，乃至综合应用方法，这本是冠以“技术基础”教材的分内责任。然而遗憾的是，A/D、D/A、ROM、RAM 这些在数字技术中极其重要的内容却仅停留在结构原理的介绍上，与主干内容亦呈游离状态，使得本来以推介“技术”为目标的教科书沦为器件说明书。其原因只有一个，即混淆了技术基础和应用等核心知识的介绍！其实，一些即使加入了 EDA

练来消化它们，学习效果自然大打折扣。而这些课程又多数与未来的就业或可能的深造关系密切。实际上，这种时代变化的关键且应让让到。当今且数字技术和系统集成的时代。对于

底层电路结构和脉冲电路(只是放在最后一章)的介绍,最大限度地降低对前期基础知识的依赖(如高等数学、模拟电子线路)及对此课程的学习门槛。在学习和实践过程中允许保留无关大局的疑问和不解,因为这可留待在后续相关课程中带着问题来学习和解惑,同时也鼓励并安排学生从课本以外的资料中寻求答案,解决问题,开拓视野。事实上,现在多数国外同类教材都不对门电路的结构做深入说明,至多介绍器件的电气特性。因为在现代电子系统设计中,对于深入底层结构的理解与否并不会影响系统集成的设计水平,更何况,后续的电路分析和模拟电子线路课程能做很好的补充。这一安排的另一好处是,大幅减少了教学课时数,这有利于将更多的课时数让位于实验与工程设计训练。

(3) 信息透明,保持知识结构的合理性和新颖性

鉴于电子技术类知识的强烈时效性,凡有必要处,都将毫不掩饰地指明教材中相关内容的历史背景和适用范围,随时说明这些内容属于阶段过渡性质的还是既定的学习目标,哪些理论和技术适应于低速小规模条件,哪些方法或器件仅在历史上是常用的;清晰说明手工技术与现代自动技术间、数字系统的传统分析方法与现代分析方法间的区别等,使读者能及时调整自己的关注重心。尽管本教材中也大量介绍了传统(手工)数字技术的内容,但这只是为最终目标服务的,即引导读者基于新的数字技术理念,在全新的软硬件平台上强化数字技术基础知识的学习效果。此外,根据前面章节给出的具有更一般意义的知识,在存储器(第9章)和模数、数模(第10章)章节中安排了许多针对性强的应用实例和相关的自主创新型综合实践项目,这种安排在传统教材中是不存在的,但却是必不可少的。

加拿大多伦多大学数字电路教材《Fundamentals of Digital Logic》作者 Stephen Brown 说:“虽然现代设计人员已经不再使用手工设计技术了,但手工设计可以让学生直观地了解数字电路是如何工作的。可以让学生深入了解自动化设计技术的优点”。但他同时指出其教材的重点是介绍自动设计技术,这与本教材的结构安排是吻合的。

(4) 有利于与其他重要后续课程构成创新能力教学课程体系

基础理论和技能的教学固然重要,但培养学生的自主学习能力,激发学生的创新思维,

面能得到同步收获，有能力提早进入大学生课外科技活动。本书以数字电路手工技术的介绍作为跨上进一步学习的台阶，以自动设计技术的学习为能力培养的手段，注重现代数字技术基本知识、理论和方法的介绍，注重工程能力、分析能力和实践能力的培养，全书构建了一个从介绍基础知识向创新能力培养逐级递进的学习和实践的阶梯。特别是介绍了状态机构建和数字系统自动设计软硬件后，为读者在这一领域自主设计能力的发挥和创新思路的验证提供了武器和实现平台。

(6) 以表格形式应用 HDL，优化学时安排

有不少同类教材意在当前数字电路课程陈旧内容过多的现状进行改革，增加了有关 HDL 和 EDA 软件应用的章节。然而对于 HDL 普通的讲授方法是十分费时费力的，其结果是，这些另加入的内容迫使原来的数字电路课程的课时数大增。然而在多数学校有限学时数的条件下，反倒影响了数字电路核心内容的教学，违背了这一教学改革的初衷。

本教材在推出广义译码器和计数器一般模型的基础上证明了：一般数字电路的最核心的功能模块是广义译码器，其实就是组合电路模块，而组合电路模块的表述和构建的关键就是一张真值表。即只要获得了表述组合电路功能的真值表，就能通过数字系统自动设计软件完成对应的组合电路的设计与测试。由此不难发现仅使用 HDL 的 case 语句来表述这个真值表，就能顺利解决 HDL 教学费时的问题。于是在教材中，对于 HDL 仅以“表格”方式利用极少数语句实现关键部件的设计，而完全不必费时地去专门学习 HDL 知识，从而聚焦重点知识，注重系统设计，着眼能力的培养，极大缩短了授课的学时数。

本教材推荐的授课课时数仅约 40 学时，实验课时则不少于 32 学时，验证性实验约 15%，其余为自主设计与创新型实验，且建议另外再增加配套的实践环节和实验课时数。读者在完成本书的学习及推荐的实验，以及以上提到的课程体系后，有理由相信已具备了参加大学生电子设计竞赛等课外科技活动的知识和实践能力，而这时最多刚完成二年级的学习！

对于本书配套的 PPT 教学课件、实验指导课件、实验源程序，以及 mif Maker 应用软件等资料的免费索取，可浏览电子工业出版社网址 www.hxedu.com.cn 或相关网址：www.kx-soc.com。

本书作者将积极探索，并努力实践卓越工程师人才培养背景下的数字技术系列课程(群)体系的改革，整合、创新相关课程的内容、教学模式和实验手段，并将陆续编写出版与本书配(定位、特色相同)的后续相关课程的教材。例如：将 EDA 技术(Verilog 版)与创新能力培养及工程实际紧密结合的《EDA 技术应用》、将现代 SoC 技术与传统单片机技术相结合的《单片机实用技术基础》、《SoPC 技术》、《基于 FPGA 的 DSP 技术》相关教材等。

作者 E-mail: pmr123@sina.cn，欢迎就数字技术基础的教学改革交流探讨。

作者
于杭州电子科技大学

本书文字符号说明

1. 本书的逻辑变量的文字符号，正文中原则上用斜体表示。

2. 本书多数示例的元件和电路都来自 Quartus II，甚至对示例电路功能说明的逻辑波形图都直接使用了时序仿真波形。这能更好地使初学者通过深入理解时序电路在数字技术初期发展过程中的分析方法与设计理念，而顺利地进入下一章的学习。

因此，本书正文中文字符号的大小写、正斜体，以及带有下标的文字符号，与图中的表示，不完全统一。例如正文中 Q_D ，在图中，可能就是 QD。

3. 本书中，用于表示元件、部件、引脚、端口名称的文字符号，有时也不加区分地表示其所代表的逻辑状态。例如：灯 A，有时也同时代表灯 A 的逻辑状态；输出端 Q，有时也代表该端的输出信号。

目 录

第 1 章 数制与码制	(1)
1.1 模拟信号与数字信号	(1)
1.1.1 模拟信号与数字信号的概念	(1)
1.1.2 数字电路与模拟电路的区别	(1)
1.1.3 数字电路的特点	(2)
1.2 数制	(3)
1.2.1 十进制数表述方法	(3)
1.2.2 二进制数表述方法	(4)

2.3.1	逻辑门的器件类型与技术参数	(25)
2.3.2	集成电路门的技术参数	(26)
2.3.3	TTL 与 CMOS 集成电路的传统接口技术	(29)
2.3.4	器件的封装	(30)
2.4	辅助门电路	(31)
2.4.1	三态门	(31)
2.4.2	集电极开路门	(32)
	习题	(34)
	实验	(35)
第 3 章	逻辑函数	(37)
3.1	概述	(37)
3.2	逻辑代数的运算规则	(37)
3.3	逻辑函数的表述形式	(40)
3.4	逻辑函数的标准形式	(42)
3.5	逻辑代数化简方法	(45)
3.6	卡诺图化简法	(47)
3.6.1	与或表达式的卡诺图表示	(47)
3.6.2	与或表达式的卡诺图化简	(48)
3.6.3	或与表达式的卡诺图化简	(49)
3.6.4	含无关项逻辑函数的化简	(49)
3.6.5	多输出逻辑函数的化简	(50)
	习题	(51)
第 4 章	组合逻辑电路	(53)
4.1	组合逻辑电路手工分析	(53)
4.2	组合逻辑电路手工设计方法	(55)
4.3	编码器	(57)
4.3.1	二进制编码器	(57)
4.3.2	二-十进制编码器及其应用	(58)
4.4	译码器	(60)
4.4.1	二进制译码器	(61)
4.4.2	二-十进制译码器	(62)
4.4.3	用集成译码器实现逻辑函数	(62)
4.4.4	显示控制译码器	(63)
4.5	数据选择器与数据分配器	(65)
4.5.1	数据选择器	(65)
4.5.2	用数据选择器实现逻辑函数	(67)
4.5.3	数据分配器	(68)
4.6	加法器	(68)
4.7	比较器	(70)
4.8	广义译码器概念	(71)

4.9 可编程逻辑器件	(71)
4.9.1 PLD 概述	(72)
4.9.2 可编程逻辑器件的发展历程	(73)
4.9.3 可编程逻辑器件的分类	(73)

6.4.3 边沿 JK 触发器	(115)
6.5 触发器间的转换	(117)
6.6 基于触发器的滤波电路设计	(118)
6.7 延时电路的设计与测试	(121)
6.8 含触发器的 PLD 结构	(123)
6.8.1 通用可编程逻辑器件 GAL	(124)
6.8.2 复杂可编程逻辑器件	(127)
6.8.3 现场可编程门阵列	(130)

8.1.1	基于 74161 宏模块的计数器设计	(166)
8.1.2	进位控制电路改进	(168)
8.1.3	通过控制同步加载构建计数器	(168)
8.1.4	利用预置数据控制计数器进位	(169)
8.2	一般模型结构的任意进制计数器	(171)
8.2.1	基于一般模型的十进制计数器设计	(171)
8.2.2	含自启动电路的十进制计数器的设计	(172)
8.2.3	有限状态机讨论	(173)
8.3	任意进制异步控制型计数器设计	(173)
8.4	四位同步自动预置型计数器设计	(174)
8.5	基于 LPM 宏模块的计数器设计	(175)
8.6	步进电机控制电路设计	(177)
8.6.1	步进电机原理简介	(178)
8.6.2	步进电机单向旋转控制电路设计	(178)
8.6.3	步进电机双向旋转控制电路设计	(180)
8.7	序列检测器状态机设计	(180)
8.8	数字频率计设计	(181)
8.8.1	双十进制计数器设计	(182)
8.8.2	6 位十进制计数器设计	(183)
8.8.3	测频时序控制电路设计	(184)
8.8.4	顶层电路设计与测试	(185)
8.9	模型电饭煲控制电路设计	(185)
	实验	(187)
第 9 章	存储器及其应用	(189)
9.1	概述	(189)
9.2	RAM	(190)
9.2.1	RAM 的分类与结构特点	(190)
9.2.2	SRAM 的结构	(191)
9.2.3	DRAM 工作原理	(193)
9.2.4	SRAM 存储容量的扩展方法	(194)
9.3	ROM	(195)
9.3.1	ROM 的分类与结构	(195)
9.3.2	掩膜 ROM	(196)
9.3.3	可编程 ROM 结构原理	(196)
9.3.4	其他类型的存储器	(199)
9.4	FPGA 中的嵌入式存储器	(200)
9.5	存储器应用电路设计	(201)
9.5.1	利用 LPM_ROM 设计查表式乘法器	(201)
9.5.2	简易逻辑分析仪设计	(204)
9.5.3	乐曲演奏电路设计	(207)

习题	(210)
实验	(210)
第 10 章 A/D 与 D/A 转换器	(212)
10.1 概述	(212)
10.2 D/A 转换器	(212)
10.2.1 D/A 转换原理与结构	(213)
10.2.2 二进制权电阻网络型 D/A 转换器	(213)
10.2.3 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	(214)

第 1 章 数制与码制

本章重点介绍不同进制的数制、码制及其表达方式、运算方式，以及编码方式，这是数字技术中最基础的内容。首先介绍模拟信号与数字信号的基本概念和数字信号的特点；然后详细介绍一些常用的数制及其表述方法，以及不同数制间的转换与运算方法；最后介绍编码、码制的概念与不同的编码格式。

1.1 模拟信号与数字信号

在自然界中存在着各种各样的物理量，但就其特点和变化规律而言，主要可分为两大类。一类物理量在变化时间上和数量上都是离散的，这类物理量称为数字量。而另一类物理量在变化时间上和数量上都是连续的，这类物理量称为模拟量。在电子电路中，按照所处理的信号形式，可以将电路分为模拟电路和数字电路。模拟电路处理模拟信号，数字电路处理的是数字信号。

1.1.1 模拟信号与数字信号的概念

模拟(Analog)信号是指该信号的幅度量值随着时间的延续(变化)而发生连续变化的信号。例如，随着时间的延续，温度可变高或变低，速度可变快或变慢，声音可变强或变弱等。其特点是，它们的变化总是连续的，平滑的，且在任何一个极短的时间段内都不可能发生突变。如果利用传感器把它们转变为电信号，则这些电信号的幅度(电压或电流)也是随时间连续变化的。

用以传递、加工和处理模拟信号的电子电路被称为模拟电路。模拟电路的具体功能包括对模拟信号进行放大、滤波、运算与处理等。

数字(Digital)信号是指该信号的幅度量值随着时间的延续(变化)而发生不连续的，具有离散特性变化的信号。数字信号通常只有两种相互对立的状态，如开关的打开与关闭，导线的连接与断开，电压的高和低，信号的有和无等。用于处理数字信号的电路，如传送、存储、变换、算术运算和逻辑运算等电路称为数字电路。

由于拥有许多优秀的特点，数字电路被广泛应用于计算机、通信、工程控制、测量仪器、信号处理和图像显示等方面。

1.1.2 数字电路与模拟电路的区别

与模拟信号不同，数字信号的确立具有一定的人为性。模拟信号比较直接地反映了自然界中真实的物理量的变化，而数字信号量则是通过人为的选择，比较间接地反映实际的物理量的变化。例如，在任一小段的时间段内，连续变化的电压值的取值具有无限多种，如果用计算机来直接处理这个电压模拟量显然是不可能的。因为再大的计算机内存也无法放下在此时间段内所发生的，而且是实际存在的无限多的电压值。因此必须将随这段时间变化的电压连续值离散化，变成有限数目的电压值，再用计算机能直接处理的数制数据(如二进制数)

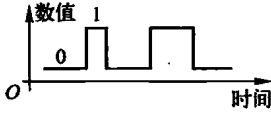
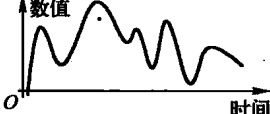
来表达这些离散的电压值。

数字电路也称逻辑电路，尽管它处理的数值通常用数码 1 和 0 来表示，但其含义根据不同的情况可以有不同的解释。例如，可以将 0 和 1 看成实际的数据，将由此构成的二进制数进行加减乘除的算术运算。但也可以用 1 和 0 来表示逻辑的“真”和“伪”，“是”和“否”的判断，因此可以通过对数据 1 和 0 的处理来实现对逻辑的电路运算(或称逻辑操作)；甚至还可以用 1 和 0 来表示数据的正负。显然所有这一切，普通的模拟电路及相关数据是难以实现的。

在数字电路中通常规定高电平(例如 $U \geq 2.7V$)为逻辑 1, 或数值 1; 低电平(例如 $U \leq 0.5V$)为逻辑 0, 或数值 0。这种表示法称为正逻辑。反之，若规定低电平(例如 $U \leq 0.5V$)为逻辑 1, 高电平(例如 $U \geq 2.7V$)为逻辑 0 的表示法称为负逻辑。上述的 2.7V 和 0.5V 通常称为判别高低电平(逻辑 1 或 0)的阈值。

表 1-1 给出了数字电路与模拟电路的主要区别。

表 1-1 数字电路与模拟电路的主要区别

电路类型	数字电路	模拟电路
研究内容	输入信号与输出信号间的逻辑关系	如何不失真地进行信号的处理
信号的特征	 <p>时间上离散，但在数值上是单位量的整数倍</p>	 <p>在时间上和数值上是连续变化的电信号</p>
分析方法	逻辑代数	图解法，等效电路，分析计算

1.1.3 数字电路的特点

数字电路主要采用二值逻辑(或二值数据)。数字电路的理论基础和数学工具是逻辑代数。在数字电路中的电子器件，如二极管、三极管和 MOS 管等主要工作在开关状态。即导通或截止两种状态之一。对电路中电压和电流的精确值要求并不高，只要电路能可靠地区分高、低电平即可。数字单元电路(门电路、触发器等)结构简单，便于集成化。数字电路功能的表示方法主要有真值表、卡诺图、逻辑表达式和波形图等。

在电路结构上，数字电路和模拟电路都是由晶体管、集成电路等电子组件所组成的。但与模拟电路相比，数字电路具有以下主要优点：

(1) 稳定性好，抗干扰能力强。在数字系统中，数字电路只需判别输入、输出信号是逻辑 1 还是逻辑 0，而无须知道它们所表示的电压或电流的精确值。只要噪声信号不超过高低电平的阈值，就不会影响逻辑状态，因而具有较好的稳定性和抗干扰能力。

(2) 容易设计，便于构成大规模集成电路。数字电路中的晶体管均工作在开关状态，只用“通”和“断”两种不同的状态来代表二值信息“1”和“0”。大多数数字电路都可以采用集成电路来系列化生产，成本低廉、使用方便，从而进一步促进了集成电路在数字电路中的广泛应用。

(3) 信息的处理能力强。数字系统能方便地与电子计算机连接，利用计算机强大功能进行数据处理，对输入的数字信号进行算术运算、逻辑运算，还可具有逻辑推理和判断的能力，并实现实时控制。