



面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

数字电子技术基础

(第六版)

清华大学电子学教研组 编

主 编 阎石

修订者 阎石 王红

高等教育出版社



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

数字电子技术基础

SHUZI DIANZI JISHU JICHU

(第六版)

清华大学电子学教研组 编

主 编 阎石

修订者 阎石 王红

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是为高等学校开设数字电子技术基础课程编写的教材。书中全面、系统地介绍了数字电子技术的基础知识。新版教材是在原书第五版的基础上修订而成的。

全书由数制和码制、逻辑代数基础、门电路、组合逻辑电路、半导体存储电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形电路、数—模和模—数转换等八章和附录组成。在修订后的教材里,将原来可编程逻辑器件和硬件描述语言两章的内容纳入到了组合逻辑电路和附录当中。同时,在各章中还配有丰富的例题、思考题和习题。

本书自第一版发行以来,经历了五次修订。其中第二版获国家教委优秀教材一等奖,第三版获国家优秀教材奖,第四版获北京市高等教育教学成果一等奖,第五版获北京市精品教材奖并被评为北京高等教育经典教材。

本书可作为高等院校电气类、电子信息类、自动化类、仪器仪表类各专业的教材,也可供其他理工科专业选用或供社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/阎石,王红编;清华大学电子
学教研组编.——6版.——北京:高等教育出版社,
2016.4

ISBN 978-7-04-044493-3

I. ①数… II. ①阎… ②王… ③清… III. ①数字电
路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 308741 号

策划编辑 欧阳舟 责任编辑 韩颖 封面设计 李卫青 版式设计 童丹
插图绘制 黄建英 责任校对 刘娟娟 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	高教社(天津)印务有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	31.75	版 次	1981 年 7 月第 1 版
字 数	770 千字		2016 年 4 月第 6 版
购书热线	010-58581118	印 次	2016 年 4 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	49.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 44493-00

作者声明

未经本书作者和高等教育出版社许可,任何单位和个人均不得以任何形式将《数字电子技术基础》(第六版)中的习题解答后出版,不得翻印或在出版物中选编、摘录本书的内容;否则,将依照《中华人民共和国著作权法》追究法律责任。

第六版前言

《数字电子技术基础》第六版是在原书第五版的基础上修订而成的。为了适应数字电子技术的不断发展和应用水平的不断提高,主要从以下几方面对原教材作了修订。

一、在基本保持原有理论体系的情况下,对体系结构作了较大调整。将原来“触发器”和“半导体存储器”两章的主要内容合并为现在的“第五章 半导体存储电路”,同时取消了原有的“可编程逻辑器件”和“硬件描述语言”两章。这样就将原来十一章的内容整合成了现在的八章。

二、大幅度地压缩和删减了对集成电路内部结构的详细介绍,以及某些不重要的或者陈旧的内容,例如触发器电路结构中一些不常见的类型、存储电路中各种双极型存储单元、I²L 电路、各种 PLD 器件内部结构的详细介绍、Multisim 的使用等。

PLD 最主要的特点在于它的“可编程”特性。鉴于其内部包含的各种基本逻辑单元、各种逻辑模块电路以及可编程互联单元等在其他章节中均有详细介绍,所以把 PLD 可以看作是一种规模更大的通用逻辑模块电路,既可以用它作组合逻辑电路的通用模块使用,也可用作时序逻辑电路的通用模块使用。因此,在组合逻辑电路和时序逻辑电路中引入 PLD 作为可编程的通用逻辑模块以后,就不再将 PLD 的内容单独写成一章了。而且,PLD 作为一种工业产品,不仅种类和型号繁杂,而且还在不断升级换代。因此,对各种类型 PLD 器件的内部电路结构逐一作详细介绍就显得不十分重要了。

在第四章中引入 PLD 的同时,也引进了硬件描述语言的基本概念。目前常用的硬件描述语言无论是 VHDL 还是 Verilog,都有全面、严格的语法和规定,本书中不可能作全面、系统的详细介绍。需要深入了解和使用这些硬件描述语言时,可以参阅有关书籍或登录相关网站获取所需资料。为此,在修订后的教材中就不再将硬件描述语言的介绍单列为一章了。

三、根据目前数字电子技术的发展和应用情况,适量地补充了部分内容。其中包括第八章中的流水线型 A/D 转换器、 Σ - Δ 型 A/D 转换器、第五章中的动态存储器工作原理、第三章中低压 CMOS 系列的介绍等。

四、在脉冲产生和整形电路中,有些多年沿用的电路名称不甚合理,容易引起概念混淆。在本次修订过程中,对这些电路名称作了调整。例如“施密特触发器”、“单稳态触发器”中都含有“触发器”字样,而“触发器”一词已经在存储电路中作为双稳态存储单元电路的名称使用了。“施密特触发器”、“单稳态触发器”和“触发器”不仅各具有不同的工作特性,而且它们的英文名称原本就不同。在修订后的教材中,只将双稳态存储单元电路叫做“触发器”,而在其他电路名称中将不再出现“触发器”字样。

本次修订工作中,第四章和第六章的修订由王红完成,阎石负责其余部分的修订和全书的统

II 第六版前言

稿工作。北京大学王志军教授不辞辛劳地仔细审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的意见和建议,谨向他致以最诚挚的谢意。同时,也向所有支持和帮助本书修订出版工作的同志们表示衷心感谢。

修订后的教材中难免还有疏漏、不妥、甚至错误之处,恳求读者给予批评指正。

阎 石
2014年10月

第一版前言

这套教材是参照高等学校工科基础课电工、无线电类教材会议在 1977 年 11 月制定的“电子技术基础”(自动化类)编写大纲和各兄弟院校后来对该大纲提出的修改意见编写的,以《模拟电子技术基础》和《数字电子技术基础》两书出版。本书是其数字电子技术基础部分。全书共有九章,分为上、下两册。上册包括门电路、数字电路的逻辑分析、组合逻辑电路、时序逻辑电路及脉冲波形的产生和整形等五章。这是数字电路的基本部分。下册包括金属-氧化物-半导体集成电路、数模和模数转换、数字电路中的若干实际问题以及综合读图练习等四章,作为选讲部分。在安排教学内容时,可以视具体要求和学时的多少,作必要的增删。

在处理不断出现的新器件和基本内容的矛盾时,我们采取的措施是:以小规模和大规模集成电路为主来组织内容,并适当介绍大规模集成电路;而在基本数字脉冲单元方面,则仍以分立元件为主。

考虑到目前的数字电子技术课程多半安排在模拟电子技术课程之后,所以在用到模拟电路中的有关内容时,就直接作为结论加以引用了。

本书是由清华大学电子学教研组的同志们集体编写的,其中第一章由金国芬、阎石执笔,第二章由余孟尝执笔,第三章由赵佩芹执笔,第四、六章由许道荣执笔,第五章由李大义执笔,第七章由周明德执笔,第八章由吴年予执笔,第九章由赵佩芹、张乃国执笔,阎石同志担任主编。全部编写工作都是在教研组主任童诗白教授亲自组织与具体指导下完成的。

在本教材的整理和定稿过程中,承许多兄弟院校的老师对征求意见稿提出宝贵意见。审稿会上,在主审单位西安交通大学沈尚贤教授的主持下,华中工学院、南京工学院、浙江大学、山东工学院、昆明工学院、东北工学院、合肥工业大学、贵州工学院、上海交通大学、天津大学、华北电力学院、哈尔滨工业大学、吉林工业大学、大连工学院、重庆大学、湖南大学、太原工学院、华南工学院、同济大学、成都科技大学等兄弟院校的老师仔细阅读了原稿,指出许多错误和欠妥之处。在评审和复审过程中,又经沈尚贤教授和西安交通大学电子学教研室胡瑞雯、林雪亮、古新生等同志写出详细的修改意见,在此谨致以诚挚的谢意。

由于我们对先进的数字电子技术了解不够,本教材又缺乏一定的教学实践,虽然已经根据兄弟院校老师们的意见对征求意见稿作了修改,但必然还存在不少缺点和错误,殷切期望各方面的读者能给予批评和指正。

编者

1981年1月

第二版说明

本书原分上、下两册出版。考虑到教学上的方便,同时考虑到第八章(电子电路中元器件的选择和抗干扰问题)和第九章(数字电路应用举例)的内容不在教学大纲的要求之内,因此决定将第一至第七章及附录合印成一册出版。

编者
1984年9月

第三版序

自《数字电子技术基础》(第一版)出版至今,已经过去七年了。由于电子技术及其应用又有了很大的发展,同时国家教育委员会主持制定了电子技术基础课程的教学基本要求,因而对原书进行全面的修订就势在必行了。

修订工作主要是针对以下几个方面进行的:

从内容上,进一步削减了分立元件电路和讲述集成电路内部结构及其详细工作过程的内容,增强了 CMOS 电路和中、大规模集成电路应用的比重。同时,还适当介绍了一些近年来迅速发展起来的新型器件和电路,如高速 CMOS 电路、半定制集成电路等。

鉴于原书中各章的习题与内容配合得不够紧密,而且新版教材的内容又改动很大,所以这次更换了绝大部分的习题。另外,为便于读者自行检查学习效果,每章除思考题与习题之外还增加了自我检验题,并在全书的最后给出了这些题目的答案。自我检验题所涉及的内容都是各章的基本概念、基本原理和基本的分析、设计方法。

从体系上,在基本沿用原书体系的基础上,作了一些局部调整。首先调换了第一、二章的先后次序。因为门电路一章的分量比较重,概念和难点比较集中,而逻辑代数基础的内容很容易为学生所接受,所以将两章的次序对调符合由浅入深的原则。其次,把原来的第四章分成了触发器和时序逻辑电路两章,这样既解决了原来第四章篇幅过大的问题,同时又不影响教材体系的系统性和完整性。再次,考虑到大规模集成电路往往是既包含组合逻辑电路又包含时序逻辑电路的数字系统,所以把大规模集成电路的内容也单独列成了一章。这样,就形成了新版教材的九章体系。

从要求上,正文部分基本上按基本要求编写,略有超出。一部分虽属比较重要但已超出基本要求的内容写在每章的附录中。这些内容既可供那些学时较多、要求较高的院校作为课堂讲授的选讲内容,又可供学生作为自学的阅读材料。

本书是与童诗白主编的《模拟电子技术基础》(第二版)配套的教材,同时又有相对的独立性。如果将这两本教材配合使用,那么既可以先讲模拟部分、后讲数字部分,也可以先讲数字部分、后讲模拟部分。在先讲数字电路时,只要预先讲过《模拟电子技术基础》(第二版)的第一章即可转入本书的讲授。为了使两学期的学时平衡,可将第八章 A/D、D/A 转换的内容移到第二学期的模拟部分之后再讲。

第三版的修订工作全部由阎石完成。修订工作得到了童诗白教授的悉心指导。

西安交通大学沈尚贤教授、张庆男副教授、古新生副教授和林雪亮副教授在百忙中仔细地审阅了全部书稿并提出了许多宝贵的意见。多年来,我们的教材工作得到了沈尚贤教授和西安交通大学电子学教研室各位老师的热情关怀和大力支持,在本书出版之际,谨向他们致以最诚挚的

II 第三版序

谢意。

许多兄弟院校的师生为本书的修订工作提出过积极的建议和殷切的期望。在收集资料的过程中,得到了上海元件五厂、国营七四九厂、北京半导体器件三厂、上海无线电十四厂、国营四四三五厂有关同志的热情支持,在此一并向他们表示感谢。

新版教材中一定还有不少缺点和不足之处,恳请各界读者给予批评指正。

编者

1988年5月

第四版前言

本书是在《数字电子技术基础》第三版的基础上,按照国家教育委员会高等工业学校电子技术课程教学指导小组于1993年修订的“电子技术基础课程教学基本要求”重新修订而成的。

自《数字电子技术基础》第三版发行以来,数字电子技术的研究和应用又取得了新的进展,其中尤以可编程逻辑器件的广泛应用令世人瞩目。由于可编程逻辑器件等新型器件仍然是制作在硅片上的半导体器件,所以过去用于分析半导体器件工作原理的理论基础对这些新器件也仍然适用。同时,原书中讲授的基本逻辑单元的工作原理以及组合逻辑电路和时序逻辑电路的基本概念、分析方法、设计方法也是使用这些新器件时必须具备的理论基础。

鉴于上述情况,第四版教材在基本保持原书理论体系的基础上,以较大篇幅增补了可编程逻辑器件的内容,单独写成为第八章。将原来的第七章“大规模集成电路”改成“半导体存储器”,仅限于讨论半导体存储器的有关内容。另外,还补充了压控振荡器、快闪存储器等内容,并对自我检测题、思考题和习题作了修改和补充。关于可编程逻辑器件开发工具及其应用的内容准备安排到实验课中结合实际操作讲解,故未在新版教材中作具体介绍。

考虑到许多院校在安排教学计划时都有先上数字电路、后上模拟电路的要求,这次修订时适当增加了半导体二极管、三极管和理想运算放大器基本知识的内容,这样无论是否已经学过模拟电子技术基础,都可以选用这本书作为数字电子技术基础课程的教材。

目录中注有“*”号的部分是建议作为选讲的内容。在学时较少或要求不高的情况下,建议首先删减这些内容。删去这些内容不会影响理论体系的完整性和内容的连贯性。

此次修订工作全部由阎石教授完成。北京工业大学陆培新教授不辞辛苦地认真审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见。从本书初版的编写到历次的修订,一直得到童诗白教授的热情支持和悉心指导。作者谨向他们表示衷心的感谢。借此机会也向所有关心、支持和帮助过本书编写、修改、出版、发行工作的同志们致以诚挚的谢意。

修订后的教材中一定还有许多不完善之处,殷切地期望读者给予批评和指正。

编者

1997年12月

第五版前言

本书第四版出版以来的8年间,数字电子技术的应用一直在继续向着广度和深度扩展。时至今日,“数字化”的浪潮几乎席卷了电子技术应用的一切领域。由于电子产品的更新周期日益缩短,新产品开发速度日益加快,因而对电子设计自动化(EDA)提出了更高的要求,也有力地促进了EDA技术的发展和普及。在数字集成电路方面,尽管电路的集成度仍然如摩尔定律(Moore's Law)所预言的那样,以每1~2年翻一番的速度增长,使电路的复杂程度越来越高、规模越来越大,但是它仍然没有走出“硅片”的范畴。因此,本门课程所讲的基本知识、基本理论和基本方法也没有发生根本性的改变。而在基本技能方面,则对使用EDA工具的能力提出了更高的要求。

2004年秋天在“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”的主持下,重新修订了“数字电子技术基础课程教学基本要求”。基本要求再次强调了本门课程的性质是“电子技术方面入门性质的技术基础课”,其任务在于“使学生获得数字电子技术方面的基本知识、基本理论和基本技能,为深入学习数字电子技术及其在专业中的应用打下基础”。

根据数字电子技术本身的发展状况和修订后的基本要求,在基本保持本书第四版原有内容、体系和风格的基础上,主要做了以下几方面的修改和补充:

一、将原来第一章“逻辑代数基础”中数制和编码的内容分离出来,单独编为第一章“数制和码制”,并补充了有关二进制补码运算原理的内容。

二、重新改写了第三章“门电路”和第五章“触发器”。在“门电路”一章里,将CMOS电路放在了更主要的位置。在“触发器”一章中,改为按触发方式将触发器分类讲授,更加强调外部特性而淡化内部的具体电路结构。

三、根据修订的基本要求,增加了第九章“硬件描述语言”,初步介绍了有关硬件描述语言的基本知识。同时,还在有些章节中增加了使用Multisim 7分析和仿真数字逻辑电路的简单内容。这里只是希望给读者一些初步的概念,因为真正掌握这两部分内容还必须通过后续课程的学习和实践应用才能达到。

四、在多数小结的末尾增加了复习思考题。删去了第四版中每章后面的自我检测题以及一些非基本的内容(如动态移位寄存器、非精密的压控振荡器、串行输入的D/A转换器、串行输出的A/D转换器等)。

五、采用了国际上流行的图形逻辑符号。其中基本运算和复合运算的符号采用了特定外形的图形符号。这种特定外形的图形符号已经补充到1991年修订的IEEE/ANSI(The Institute of Electrical and Electronics Engineers/American National Standards Institute,电气与电子工程师协会/美国国家标准化组织)标准中,而且与IEC(The International Electrotechnical Commission,国际电

II 第五版前言

工协会)的标准是兼容的。我国现行的图形逻辑符号国家标准(GB 4728.12—85)是参照修订前的IEEE和IEC标准制定的,尚未见做相应的修改。为便于教学,中、大规模集成电路的图形符号仍旧采用国外教材、技术资料和EDA软件中普遍使用的习惯画法,即示意性框图画法。

目录中注有“*”号的部分是建议作为选讲的内容。略去这些内容不影响理论体系的完整性和内容的连贯性。

在本次的修订工作中,王红执笔编写了第九章和第六章的6.6节、第十章的10.6节,其余章节的修改和编写工作全部由阎石完成。北京工业大学陆培新教授不辞辛劳地认真审阅了全部书稿,并提出了不少宝贵意见。许多教师和同学也热情地为本次修订工作提出了很好的意见和建议。作者谨向他们致以诚挚的谢意。

从本书初版的编写到历次的修订都得到了我的老师童诗白教授的悉心指导。如今童诗白教授已经离开了我们,作者以深切的怀念和感激之情铭记着老师的教诲,愿继续努力做好教材的编写和修订工作,以谢师恩。

修订后的第五版教材一定还会有许多不尽如人意之处,恳请读者批评指正。

阎 石
2005年岁末

本书中的文字符号及其说明

一、电压符号

- v_i 输入电压(相对于电路公共参考点的电压)
- V_{IH} 输入高电平
- V_{IL} 输入低电平
- v_o 输出电压(相对于电路公共参考点的电压)
- V_{OH} 输出高电平
- V_{OL} 输出低电平
- V_T 温度电压当量
- V_{CC} 电源电压(一般用于双极型半导体器件)
- $V_{CE(sat)}$ 三极管集电极与发射极间的饱和导通压降(一般用于双极型三极管)
- V_{DD} 电源电压(一般用于 MOS 器件)
- v_{BE} 三极管基极相对于发射极的电压
- v_{CE} 三极管集电极相对于发射极的电压
- v_{DS} MOS 管漏极相对于源极的电压
- v_{GS} MOS 管栅极相对于源极的电压
- V_{NA} 脉冲噪声电压幅值
- V_{NH} 输入高电平噪声容限
- V_{NL} 输入低电平噪声容限
- V_{TH} 门电路的阈值电压
- V_{T+} 施密特触发特性的正向阈值电压
- V_{T-} 施密特触发特性的负向阈值电压
- $V_{GS(th)N}$ N 沟道 MOS 管的开启电压
- $V_{GS(th)P}$ P 沟道 MOS 管的开启电压
- V_{REF} 参考电压(或基准电压)

二、电流符号

- $i_B(I_B)$ 基极电流瞬时值(直流量)
- I_{BS} 饱和基极电流
- $i_C(I_C)$ 集电极电流瞬时值(直流量)
- $i_D(I_D)$ 漏极电流瞬时值(直流量)
- i_i 输入电流

II 本书中的文字符号及其说明

I_{IH}	高电平输入电流
I_{IL}	低电平输入电流
$i_L(I_L)$	负载电流瞬时值(直流量)
i_O	输出电流
I_{OH}	高电平输出电流
I_{OL}	低电平输出电流
I_{CC}	电源(V_{CC})平均电流
I_{CCH}	输出为高电平时的电源电流
I_{CCL}	输出为低电平时的电源电流
I_{DD}	电源(V_{DD})平均电流

三、功率符号

P_C	CMOS 电路中负载电容充、放电功耗
P_D	CMOS 电路的动态功耗
P_S	CMOS 电路的静态功耗
P_T	CMOS 电路的瞬时导通功耗
P_{TOT}	CMOS 电路的总功耗

四、脉冲参数符号

f	周期性脉冲的重复频率
q	占空比
t_f	下降时间
t_h	保持时间
t_r	上升时间
t_{re}	恢复时间
t_{set}	建立时间
t_w	脉冲宽度
V_m	脉冲幅度

五、电阻、电容符号

C_{GD}	MOS 管栅极与漏极间的电容
C_{GS}	MOS 管栅极与源极间的电容
C_h	保持电容
C_i	输入电容
C_L	负载电容
$R_{CE(sat)}$	三极管集电极与发射极间的饱和导通电阻(一般用于双极型三极管)
R_i	输入电阻
R_L	负载电阻
R_o	输出电阻
R_{OFF}	器件截止时的内阻
R_{ON}	器件导通时的内阻

R_U 上拉电阻

六、器件及参数符号

A 放大器

A_v 放大器的电压放大倍数

C_{pd} CMOS 电路的功耗电容

D 二极管

FF 触发器

pd 延迟-功耗积

PLD 可编程逻辑器件

G 门

S 开关

T 三极管

T_N N 沟道 MOS 管

T_P P 沟道 MOS 管

TG 传输门

t_{pd} 平均传输延迟时间

t_{PHL} 输出由高电平变为低电平时的传输延迟时间

t_{PLH} 输出由低电平变为高电平时的传输延迟时间

七、其他符号

B 二进制

CLK 时钟

CS 片选

D 十进制

EN 允许(使能)

GND 接地端

H 十六进制

OE 输出允许(使能)

R/W' 读/写

Σ 求和

目录

绪论	1
第一章 数制和码制	4
1.1 概述	4
1.2 几种常用的数制	4
1.3 不同数制间的转换	6
1.4 二进制算术运算	9
1.4.1 二进制算术运算的特点	9
1.4.2 反码、补码和补码运算	10
1.5 几种常用的编码	13
本章小结	18
习题	18
第二章 逻辑代数基础	20
2.1 概述	20
2.2 逻辑代数中的三种基本运算	20
2.3 逻辑代数的基本公式和常用公式	24
2.3.1 基本公式	24
2.3.2 若干常用公式	25
2.4 逻辑代数的基本定理	27
2.4.1 代入定理	27
2.4.2 反演定理	27
2.4.3 对偶定理	28
2.5 逻辑函数及其描述方法	29
2.5.1 逻辑函数	29
2.5.2 逻辑函数的描述方法	29
2.5.3 逻辑函数的两种标准形式	34
2.6 逻辑函数的化简方法	37
2.6.1 公式化简法	37
2.6.2 卡诺图化简法	40