

# 数字集成电路 分析和设计

〔美〕 D.A.霍奇斯 H.G.杰克逊 著

章开和 邱友瑾 黄宜平 译

国防工业出版社

# 数字集成电路分析和设计

〔美〕 D.A. 霍奇斯 著  
H.G. 杰克逊

章开和 邱友瑾 黄宜平 译

## 内 容 简 介

这是一本数字集成电路分析和设计、应用方面的教科书，它较为完整而系统地介绍了数字集成电路的基础理论和设计方面的实际知识。

全书共十章，第一章介绍了数字电路和逻辑设计的基础知识；第二、三章介绍了MOS器件的物理基础及其小规模集成电路；第四至七章介绍了双极型二极管、三极管的物理基础及其双极型小规模集成电路；第八章介绍采用不同工艺技术实现的再生逻辑电路；最后第九、十章则介绍了大规模和超大规模集成电路中的存储器和随机逻辑电路的设计基础。书中还给出了许多已求解的例题，且在多数章节中附有练习题和演示实验，以及每章后均有小结和习题等，这些都很适于教学需要和有助于读者掌握运用。

本书可作为高等院校相关专业的重要教学参考书，亦可供从事半导体器件物理、数字集成电路的设计、应用等科技人员参考。

### ANALYSIS AND DESIGN OF DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS

David A. Hodges

Horace G. Jackson

McGraw-Hill Book Company 1983.

\*

### 数字集成电路分析和设计

(美) D. A. 霍奇斯 著  
H. G. 杰克逊

章开和 邱友瑾 黄宜平 译

责任编辑 林秀权

\*

国防工业出版社出版发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

北京卫顺排版厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印张15 1/2 397千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷 印数0,001—3,480册

ISBN 7-118-00359-X/TN70 定价：7.75元

## 译 者 序

数字集成电路是当代计算机技术和其它数字技术和数字系统的最重要的基础。自六十年代初，集成电路发明以来的二十多年中，集成电路技术的发展日新月异，从事集成电路设计和应用的技术队伍正在不断扩大。为此，迫切需要有一本由浅入深，由早期的小规模和中规模集成电路到现在的大规模和超大规模集成电路的比较完整而系统的教科书或参考资料。本书就是在这种形势下写成的。

作者以坚实的理论知识和丰富的实践经验为基础，本书融会半导体器件物理，数字集成电路的线路设计和版图设计以及先进的计算机辅助电路分析技术为一体，既描述了数字集成电路的基础理论，又介绍了实际的设计和应用方面的知识。

本书第一章介绍了数字电路和逻辑设计的基础知识；第二章、第三章介绍了MOS器件物理基础以及MOS小规模集成电路；第四章至第七章介绍了双极型二极管、三极管的物理基础和由此构成的双极型小规模集成电路；第八章介绍了采用不同工艺技术实现的再生逻辑电路；第九章和第十章则介绍了大规模和超大规模集成电路中的存储器和随机逻辑电路的设计基础。

本书由章开和、邱友瑾和黄宜平等同志翻译，并由章开和同志负责全书的审校工作。

错谬之处欢迎读者批评指正。

# 前 言

这是一本数字集成电路分析和设计方面的教科书。尽管书中大部分篇幅是介绍数字集成电路的内部设计，但我们相信它对数字集成电路的用户也有很大帮助。在实践中，我们体会到数字集成电路的设计和应用是密切相关的，这两方面的知识对于设计者和用户都很重要。集成电路的用户远多于设计者，但是经验表明，对用户来说，懂得集成电路设计方面的实际知识是非常有益的。当用户必须从相互竞争的多种集成电路中作一选择以满足特殊需要时，尤其能体会这种益处。如存在电噪声干扰或电源电压变化时，了解了集成电路的结构，才能正确比较各种不同设计产品的优点。掌握了集成电路内部的工作原理，用户才能更好地理解产品说明书中给出的参数的意义，并更好地估计集成电路技术的进步可能带来的影响。

本书给出了许多已求解的例题，用以说明分析和设计的原理，同时阐述了数字集成电路的一些实际知识。在多数章节的主要内容后均附有练习题（书末附有答案），这样使学生能够自己确定他已经了解这一节的内容，然后再继续后面的学习。在每章结尾，我们提出了一些概括全章内容的习题，这些习题的解答见《题解指南》。

在每章末都有小结，目的是帮助学生复习，重点掌握每章中提出的各种基本概念。

从第二章到第八章的每章结尾处介绍了两到三个演示实验或在实验室进行的实验，旨在促进对课程的理解和记忆，并且显示设计理论和实验结果相吻合的程度。这些演示实验可以安排在讲课时进行。在加利福尼亚大学贝克莱分校，作为本课程要求之一，学生每周要花三小时做这些实验。我们发现，学生在自己完成这些实验的过程中得益很大，当然实验最好放在讲课以后进行。我

们相信，在工程学中，仅有理论是不够的。

采用本教科书的电机工程系三、四年级的学生应具备电子电路的基础，并了解逻辑设计的基本单元。学习过半导体器件课程的学生会发现他们可以相当快地学完第二、第四和第五章的内容；但是，这部分内容是不能省略的，因为这里强调的重点是可直接测量的电特性、器件的电路性质和用于电路模拟的器件模型参数；与之相反，许多半导体器件课程是把重点放在半导体能带结构和载流子输运现象上面的。

如果一学期为十五周，每周三小时讲课，三小时实验，则除第三和第七章各需要两星期时间外，其它部分可按照每周一章的速度完成。如果一学期为十周，则只能完成前八章。

以下为逐章的内容概要。

### **第一章 数字电子学引论**

本章简要地复习了逻辑函数和布尔恒等式的重要概念，介绍了集成电路制造技术的要点，对复杂程度不同的集成电路，包括超大规模集成电路下了定义。接着，介绍了数字电路的基本性质，并且讨论了理想逻辑元件的静态输入-输出特性。同时，定义了噪声容限和传输延迟时间等数字电路的重要特性。作为一种工具，计算机在电路分析和设计中日益增长的作用受到了注意。最后，我们介绍了可编程逻辑阵列，用以作为数字集成电路设计中的一个实例。

### **第二章 金属氧化物半导体(MOS)晶体管**

在本章的引论中，可以看到MOS场效应管对数字集成电路的巨大影响。接着我们简要地讨论了MOS场效应管的某些物理性质及器件的制造工艺。然后，详细分析了MOS晶体管的静态和动态特性，叙述了SPICE程序中的MOS晶体管模型以及测量给定器件的模型参数的方法。

### **第三章 MOS反相器和门电路**

这一章是MOS场效应晶体管数字电路的核心。我们首先讨论了简单的MOS场效应管反相器的静态特性，这里，重点是讨论

在不同的负载情况下，NMOS反相器的电压传输特性，即 $V_{OL}$ 和 $V_{OH}$ 的关系。接着分析了它们的动态特性，即开关时间。然后阐述了CMOS反相器的静态和动态特性，并根据静态和动态特性讨论了简单的NMOS和CMOS门电路的分析和设计方法。用于SPICE程序的电路模型和模拟方法，动态逻辑技术以及MOS电路中很重要的按比例缩小技术等也在本章进行了讨论。

#### 第四章 半导体二极管

现在，将内容从单极型电路转到双极型电路。首先，简要地讨论了 $pn$ 结型二极管的某些物理性质，包括平衡势垒和耗尽区电荷。然后导出了二极管在正向偏置和反向偏置时的 $I-V$ 特性，同时讨论了这些公式的温度效应。通过对二极管开关时间的分析，得出了 $pn$ 结的动态特性。为了实际应用，讨论了集成电路中采用的各种形式二极管的性质，然后介绍了肖特基势垒二极管，讨论了其静态和动态特性。本章还包括二极管的SPICE模型和模型参数的测量方法。最后简述了 $pn$ 结的电压击穿效应。

#### 第五章 双极型结型晶体管

按第四章的顺序，在简述了晶体管的工作原理后，导出了双极型晶体管的基本静态方程。接着讨论了晶体管的各种工作模式，并导出了它们的简化方程。双极型晶体管的SPICE模型和模型参数的测量方法也作了介绍。

#### 第六章 双极型晶体管反相器

第六章和第七章是双极型数字集成电路的核心内容。本章一开始讨论了简单的双极型反相器的静态特性，亦即电压传输特性。由此我们得到了噪声容限并导出了扇出方程。采用电荷控制模型，我们描述了反相器的动态特性。然后对每一种晶体管的工作模式，导出了它们的电荷控制方程的简化形式，并把这些方程用到计算双极型反相器开关时间的实例中。用同样的方式，我们讨论了肖特基钳位反相器的静态和动态特性。最后，对人工分析和用SPICE计算机模拟的结果作了比较。

## 第七章 双极型数字门电路

本章详细研究了集成数字门电路的主要类型,即 RTL、DTL、TTL、ECL和 $I^2L$ 。特别强调了TTL、ECL和 $I^2L$ 的最新发展,并详细讨论了它们的静态和动态特性。

## 第八章 再生逻辑电路

在第八章,我们把注意力从纯粹的组合电路转到了时序电路。在叙述了简单的双稳态电路的基本工作原理之后,借助于逻辑图我们讨论了SR门锁触发器,JK和D型触发器的性质。然后,实例说明了如何用MOS和双极型技术来实现这些再生电路,特别是如何用NMOS、CMOS、TTL、ECL和 $I^2L$ 来实现这些电路。本章还包括了斯密特触发器,单稳态电路和多谐振荡器电路的内容,以及用CMOS和双极技术实现这些电路的实例。

## 第九章 半导体存储器

第九章进入了大规模集成电路(LSI)的领域。这里介绍了MOS和双极型只读存储器( $ROM_s$ )。详细讨论了存储器阵列中的单元及外围电路。本章也讨论了MOS场效应管和双极型电路构成的静态随机存取存储器( $SRAM_s$ ),广泛用于动态随机存取存储器( $DRAM_s$ )中的三管(3T)和单管(1T)存储单元,以及有关标准动态随机存取存储器应用的材料。最后,本章简要介绍了串链器件和电荷耦合器件(CCD)串行存储器。

## 第十章 大规模(LSI)和超大规模(VLSI)集成电路设计

第十章包括了几个更为先进的课题。我们讨论了用CMOS和双极型技术构成门阵列电路的优缺点,门阵列是半定制数字集成电路设计中非常流行的一种。对于更复杂电路设计中采用的标准元胞设计方法和可编逻辑阵列设计方法,我们也作了介绍。本章末是关于VLSI电路设计的一些实例。

我们感谢许多学生和同事作出的各种评价和建议,这有助于我们编写这本教科书。斯坦福大学的R.达顿(Robert Dutton)和L.刘因(Lanny Lewyn)教授给了我们非常大的帮助,他们对好几章都作了详细的建议。我们特别要感谢加利福尼亚大学贝



## VI

克莱分校的D.O.佩德森 (Donald O. Pederson) 教授, 他对本书的结构和内容起了很大的影响, 并且一直给予我们建设性的批评和鼓励。我们也要感谢B.富勒 (Bettye Fuller) 和D.辛普森 (Doris Simpson) 女士, 她们帮助打印了部分手稿。

D. A. 霍奇斯 (David A. Hodges)  
H. G. 杰克逊 (Horace G. Jackson)

## 目 录

物理常数 .....	1
第一章 数字电子学导论 .....	2
1.0 引言 .....	2
1.1 逻辑函数 .....	3
1.2 卡诺图 .....	7
1.3 集成电路制造工艺; 集成度 .....	13
1.4 数字电路的特性 .....	21
1.5 理想数字逻辑电路 .....	23
1.6 噪声和噪声容限的定义 .....	23
1.7 瞬态特性定义 .....	25
1.8 数字电路的计算机辅助设计 .....	27
1.9 二极管逻辑和可编程序逻辑阵列 (PLA) .....	29
1.10 小结 .....	35
参考资料 .....	36
习题 .....	36
第二章 金属-氧化物-半导体 (MOS) 晶体管 .....	39
2.0 引言 .....	39
2.1 各种不同的MOS工艺 .....	39
2.2 MOS晶体管的结构和原理 .....	41
2.3 MOS晶体管的阈值电压 .....	46
2.4 电流-电压特性 .....	53
2.5 MOS晶体管的电容 .....	57
2.6 电路分析中的MOS晶体管模型 .....	59
2.7 MOS晶体管的局限性 .....	64
2.8 小结 .....	68
参考资料 .....	68

# X

演示实验 .....	69
习题 .....	71
第三章 MOS反相器和门电路 .....	74
3.0 引言 .....	74
3.1 静态 NMOS 反相器分析 .....	76
3.2 用晶体管作为负载器件 .....	81
3.3 电路的版图和电容 .....	94
3.4 开关时间分析和功耗-时延积 .....	104
3.5 互补 MOS (CMOS) 反相器分析 .....	108
3.6 NMOS 门电路 .....	115
3.7 CMOS 门电路 .....	117
3.8 动态逻辑电路 .....	121
3.9 MOS电路中的按比例缩小技术 .....	126
3.10 小结 .....	128
参考资料 .....	129
演示实验 .....	130
习题 .....	131
第四章 半导体二极管 .....	138
4.0 引言 .....	138
4.1 pn 结型二极管 .....	140
4.2 平衡势垒 .....	141
4.3 耗尽区电荷 .....	146
4.4 正向偏置 pn 结 .....	152
4.5 反向偏置 pn 结 .....	157
4.6 二极管开关过程 .....	158
4.7 二极管结构 .....	164
4.8 电路模拟中的二极管模型 .....	168
4.9 肖特基势垒二极管 .....	172
4.10 温度效应 .....	175
4.11 二极管击穿 .....	177
4.12 小结 .....	178
参考资料 .....	179

演示实验 .....	179
习题 .....	181
<b>第五章 双极型结型晶体管</b> .....	<b>186</b>
5.0 双极型结型晶体管 .....	186
5.1 晶体管的正向有源工作方式 .....	186
5.2 端电流 .....	194
5.3 工作方式 .....	196
5.4 用于电路模拟程序的BJT模型 .....	203
5.5 小结 .....	210
参考资料 .....	211
演示实验 .....	211
习题 .....	214
<b>第六章 双极型晶体管反相器</b> .....	<b>217</b>
6.0 引言 .....	217
6.1 静态特性 .....	218
6.2 电荷控制分析 .....	224
6.3 BJT反相器开关时间 .....	248
6.4 肖特基钳位反相器 .....	258
6.5 和 SPICE 的比较 .....	260
6.6 小结 .....	264
参考资料 .....	265
演示实验 .....	265
习题 .....	267
<b>第七章 双极型数字门电路</b> .....	<b>271</b>
7.0 引言 .....	271
7.1 电阻-晶体管逻辑 .....	273
7.2 二极管-晶体管逻辑 .....	275
7.3 晶体管-晶体管逻辑 .....	279
7.4 发射极耦合逻辑 .....	297
7.5 集成注入逻辑 .....	310
7.6 集成肖特基逻辑 .....	319
7.7 界面电路 .....	321

## Ⅱ

7.8 小结	327
参考资料	327
演示实验	328
习题	329
第八章 再生逻辑电路	335
8.0 引言	335
8.1 基本的双稳态电路	336
8.2 SR 锁存器	338
8.3 JK 触发器	340
8.4 D 触发器	344
8.5 TTL 电路	345
8.6 ECL 电路	348
8.7 I <sup>2</sup> L 电路	352
8.8 NMOS 电路	354
8.9 CMOS 电路	358
8.10 触发器电路小结	361
8.11 斯密特触发器	362
8.12 多谐振荡器电路	367
8.13 集成电路定时器	376
8.14 小结	381
参考资料	382
演示实验	382
习题	383
第九章 半导体存储器	391
9.0 引言和定义	391
9.1 只读存储器	396
9.2 静态读写存储器	412
9.3 动态读写存储器	421
9.4 串行存储器	430
9.5 小结	433
参考资料	434
习题	434

第十章 大规模和超大规模集成电路设计 .....	437
10.0 引言 .....	437
10.1 门阵列设计方法 .....	438
10.2 标准元胞设计方法 .....	444
10.3 可编程逻辑阵列 (PLA) .....	445
10.4 微处理器和微型计算机 .....	447
10.5 VLSI电路的设计 .....	448
10.6 小结 .....	460
参考资料 .....	461
习题 .....	462
练习答案 .....	463

# 物理常数

(以半导体电子学中常用的单位)

电子电荷	$q$	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
真空中的光速	$c$	$2.998 \times 10^{10} \text{cm/s}$
真空介电常数	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-14} \text{F/cm}$
自由电子质量	$m_0$	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
普朗克常数	$h$	$6.625 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ $4.135 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$
玻尔兹曼常数	$k$	$1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ $8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$
阿伏伽德罗常数	$A_0$	$6.022 \times 10^{23} \text{分子/克}$ 分子
热电压	$V_t = kT/q$	
华氏80.6度 (300K)		0.025860V
华氏68度 (293K)		0.025256V

# 第一章 数字电子学导论

## 1.0 引言

现代数字系统的设计要靠多方面工程专家的努力。首先要系统设计人员或系统结构人员确定最终的系统应具有什么特性，并准备提供详细的指标，由此来定义系统所有的输入、输出、环境条件、工作速度等等。逻辑设计人员把这些系统的指标转换成能满足总体要求的逻辑设计。在1.1节和1.2节中我们将简要回顾一下逻辑设计的某些基本原则。

电路设计人员的任务是设计出能够提供所需要的逻辑功能的电路。本书的主题是数字电路设计。当所设计的系统需要大量生产时，如何达到工作的高度可靠性及如何在价格和性能指标之间得到很好的协调等，都成为很重要的问题。下面的几章将深入讨论数字电路的设计方法，确定各种电路的指标。而在1.4和1.5节，引入了一些数字电路的基本性质，讨论了理想逻辑元件的特性。在1.6和1.7节中，定义了描述数字电路特性的技术术语。

现在，所有的数字系统基本上都是以集成电路技术为基础的。然而在设计中，可以有许多不同的方案，存在着很大的灵活性。例如，我们必须考虑，选用什么系列品种的电路，电路的集成度多大，以及采用可编程序的电路，还是采用具有固定逻辑功能的电路，等等。

各种集成电路工艺之间有很大的差别，而且集成电路工艺和器件方面的工程技术人员还在不断地对这些工艺进行改进。为了理解各种不同系列电路，如TTL、ECL、NMOS和CMOS的有关特点，就需要懂得一些集成电路的制造工艺。而为了使设计的产品有可能得到重大的改进，就更应该注意工艺演变的方向和速度。因此在1.3节中我们简要叙述了集成电路制造的基本技术，而



在以后各章将经常提到制造工艺对设计的影响。

在数字集成电路的分析和设计中，计算机辅助设计（CAD）是一个很重要的问题。1.8节简要地介绍了这个重要的课题，并且描述了这些现代化工具在数字电路研究中将要起的作用。而手工分析方法只是在比较不同结构，作快速近似计算时才用到。

对于一个好的系统设计，要求在系统特性、逻辑设计、电路设计、制造工艺各方面达到良好的平衡。由于不得不经常做一些折衷并且比较各种不同的方案，因此前面提到的各方面的专家，能具备各相关领域的知识是很重要的。

## 1.1 逻辑函数

在数字系统中信息都是用分立的形式（或称量化的、数字化的形式）表示的。最经常采用的是二进制的形式，即只允许有两个分立的状态，通常用 0 和 1 来代表它们。

二进制的逻辑设计虽然有点特殊，但是也有它独特的用处。例如，回答问题只能说“是”或“非”，从来不说“可能”。乔治·布尔（George Boole）（1815~1864）发明了一种专门用于二进制系统的代数运算。这种代数对于逻辑设计人员及电路设计人员都很有用，因此，熟悉这种代数对于分析和设计数字集成电路是很重要的。

表1.1中包含了布尔代数的三种基本运算。符号“ $\cdot$ ”表示逻辑“与”（AND）运算。然而在变量当中的“ $\cdot$ ”常常可以略去，就象表1.1所示。符号“ $+$ ”表示逻辑“或”（OR）运算。变量上加一横表示“非”（NOT）运算或者逻辑反相。因为一个变量只允许有两个状态，所以若  $A=0$  则  $\bar{A}=1$ 。

先看两个二进制变量  $A$  和  $B$  的“与”函数。图1.1(a)中有两种表示“与”函数的方法。一种是真值表方法，即对应于独立变量（ $A$ 和 $B$ ）的所有可能值，按秩序列表给出因变量（ $F$ ）的值。由于我们讨论的是二进制系统，当有  $N$  个独立变量时则有  $2^N$  种组合。只有当  $A=1$  和  $B=1$  时“与”的结果才是“真”（=1）。图1.1(a)