

数字集成电路CAD理论与方法

SHUZIJI CHENG DIAN LU CAD LILUN YU FANG FA

主编 张良震

顾问 陈润吾 (美)



安徽教育出版社

TN 431.2
3 5308

数字集成电路CAD

理论与方法

主编 张良震
顾问 陈润吾（美）

编写人 张良震 陈立东
吴文戈 柴晓冬

安徽教育出版社

数字集成电路CAD理论与方法

安徽教育出版社出版发行

(合肥市金寨路283号)

新华书店经销 安徽新华印刷厂印刷

*

开本850×1168 1/32 印张11.5 字数300,000

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数 2,000

ISBN7-5336-0960-3/G·1411

定价: 4.70元

前 言

历史的巨轮不断地前进，科技发展日泻千里，将使得21世纪成为一个知识爆炸、信息革命的科学昌明的时代。

集成电路与系统的出现，把微电子技术的应用推进到更广阔的领域，举凡地球的生存空间，诸如太空竞赛、星球探测，直到吾人经营建设，生活生计，无所不在，无不相关。随着时空差距的缩短与拉近，益促其快速和超大规模的发展，给工业生产和技术应用，全面而深远地带来了更大的冲击，导致了一场新的产业革命。

超大规模集成电路(VLSI)的诞生，将远比蒸汽机、无线电的发明，对产业所产生的影响要更加深远，盖以赖之生存和发展的光电技术有哪一个领域不与微电子技术骨肉相连、声息相通呢？若无集成电路的发展，电子科学技术的应用就不可能有今天如此伟大的成就！

数字集成电路的形成，是现代化电子设备的基石，其品质之优劣，直接关系到电子设备和电子技术应用的良好。因此，正确的设计和制造方法，才是最重要的课题。近年来，这方面的研究和教学工作、开发生产等方面真是轰轰烈烈，日新月异，但从出版的角度看，较为全面而系统地阐述数字集成电路设计理论和方法的著作，在国内确不多见。爰本斯旨，乃以学术研究为经，以实际研究作业为纬，本书系统、全面地阐述数字集成电路设计理论和方法，除了综合了国内外有关最新文献的报导，引用了许多同行专家公开发表的研究成果之外，着重报导了作者在国家自然科学基金资助的研究课题开展中，全体研究生所进行的工作以及作者在国内发表的论文及科学报告的主要内容，冀以一得

之愚，在电子科学技术滚滚的洪流中，尽一点绵薄之力！

本书所叙述的一些实际作业，美国圣荷西州立大学电子工程系主任陈润吾教授曾数次亲临指导，并提供了一批最新文献资料，本书共分九章，着重论述数字集成电路与系统计算机辅助设计理论和方法，为了使读者在设计研究方面有一个较为完整的了解，对数字系统本身以及ICCAD系统作了简介，还就算法复杂性问题的较全面的介绍，这些知识是任何一个设计人员所必须掌握的。本书既是一本专著，又可作为大专院校高年级学生或研究生的参考书，也可供广大科技工作者阅读。

本书第一章、第八章、第九章由安徽大学张良震教授编写；第二章、第四章、第六章、第七章由安徽大学陈立东讲师编写；第三章由徽州师专柴晓冬讲师编写；第五章由安徽大学吴文戈讲师编写；这几位年青讲师是近年先后毕业的硕士研究生，他们均直接受到国内外知名学者的教育，在集成电路CAD研究方面，作出了不少成绩，发表过多篇论文。本书所报导的实际工作成果，我们的研究生赵华安博士以及刘陈、陶亮、程正务、蒋建民、俞禾(博士生)、郑惠莉、郭卉、曹鲁寅、刘琼、方芳等同学均作了不少工作。全书由张良震教授统一审定。

本书报导的一些实际工作以及在成书过程中得到了国际知名学者、美国圣它、卡勒拉大学工学院院长陈树柏教授、日本广岛大学科学部主任前田渡教授、日本京都大学梶谷洋司教授、上海交通大学林争辉教授、中国科学院研究生院左埏教授、上海机械学院赵永昌教授、同济大学熊德琰教授、中国科学技术大学庄镇泉教授、戴英侠教授、华东工学院余庆健教授、中国科学院半导体研究所庄文君研究员等，在各个不同方面的指导和支持，同时，作者在旅美定稿时，又得到了知名人士陈守璠老先生及其夫人的鼓励和鞭策，在此谨表示衷心的感谢！

在成书过程中，虽然我们尽了自己的努力，希望把本书的内容尽量充实，但集成电路设计理论和方法博大精深，以作者的微

薄之力，实难集其大成，书中一定有不少错漏之处，谨请诸位专家批评指正。

安徽大学电子工程与信息科学系教授 张良震

目 录

前言	1
第一章 数字系统	1
1.1 概述	1
1.2 作为一个贮存单元的触发器	4
一、时钟脉冲触发器	7
二、J-K触发器	8
三、D触发器	9
四、主从触发器	10
1.3 时序和时钟脉冲滞后	11
1.4 MSI复杂电路	14
一、移位寄存器	14
二、计数器	15
三、加法器	17
1.5 LSI复杂电路 I：存储器	21
一、只读存储器(ROM)	22
二、可编程只读存储器(PROM)	23
三、可重新编程只读存储器(REPROM)	24
四、随机存取存储器(RAM)	25
五、电荷耦合器件顺序存储	30
1.6 LSI复杂电路 II 可编程逻辑阵列	32
1.7 LSI复杂电路 III 微处理机和微型计算机	36
参考文献	37
第二章 电路的描述与描述语言	39
2.1 概述	39

2.2	连接关系的描述及其描述方法	42
一、	线图描述法	42
二、	偶图描述法	44
三、	数据结构	45
2.3	结构描述语言	47
一、	HSL功能概述	47
二、	HSL语言应用举例	50
2.4	功能描述语言	58
一、	DDL描述语言概述	59
二、	DDL语言应用举例	63
2.5	单元的图形描述	65
一、	单元的版图描述	66
二、	单元的拓扑描述	67
	参考文献	69
第三章	逻辑模拟	71
3.1	概述	71
3.2	逻辑模拟方式	74
一、	编译方式	74
二、	事件驱动方式	77
三、	时间流程和控制方式	82
3.3	逻辑模拟	84
一、	门级逻辑模拟	84
二、	多值模拟	92
3.4	故障模拟	100
一、	问题的提出	100
二、	故障模拟技术	101
三、	故障压缩	109
3.5	矢量过程上的快速逻辑模拟	120
一、	引言	120

二、矢量过程和逻辑模拟	122
三、组合电路的高速模拟	124
四、同步时序电路的高速模拟	131
参考文献	135
第四章 布局设计	136
4.1 概述	136
一、布图设计中的主要模式	136
二、布局问题的复杂性	138
三、布局设计的目标	139
4.2 积木块模式布局算法简介	139
4.3 网络划分与条块的形成	142
一、网络划分中的边割模型与网割模型	142
二、网络的最佳网割二划分算法	145
三、布局单元的扩充	150
四、条块的形成	151
五、对奇异形状单元的处理	154
4.4 块内单元的安置	155
一、图模型	155
二、最优“下料”算法	158
三、块内单元安置算法	160
4.5 布局改善	165
一、对不合理条块的处理	165
二、布局设计中连线长度的计算	167
三、块及其单元的方位选择	168
四、布局单元的恢复	170
参考文献	172
第五章 布线设计	177
5.1 概述	177
一、布线设计的目标	177

二、布线方法分类	177
5.2 通道划分与总体布线	178
一、布线区域的划分	178
二、总体布线	181
5.3 通道定序与环形通道约束问题	185
一、问题的提出	185
二、无环情况下的通道定序	186
三、一般情况下的通道定序	187
5.4 通道区布线算法	190
一、通道区布线的基本限制条件	190
二、几种平行边界两边通道区布线算法	193
三、二边不规则边界通道区布线算法	201
四、三边、四边、L型通道布线算法	209
5.5 通道布线的其它问题	215
一、基于整体优化考虑的通道区布线问题	215
二、布线过程中通道区的变形和消失问题	223
三、通孔优化问题	230
参考文献	231
第六章 LSI/VLSI的故障测试	235
6.1 概述	235
6.2 故障测试的概念与方法	236
一、故障模型的建立	236
二、故障模拟	237
三、测试生成	237
四、测试生成方法	238
五、响应分析	238
6.3 系统级的故障测试方法	239
一、测试图模型的建立	239
二、路径集的生成	242

三、测试方法	244
6.4 可测性设计	248
一、电路划分	249
二、自测试	251
三、内部测试	251
参考文献	257
第七章 一个典型的ICCAD系统ACT	260
7.1 概述	260
一、ICCAD系统的功能与基本结构	260
二、ICCAD系统的三种结构	262
三、ICCAD系统的硬件配置	264
四、ICCAD系统中的人机交互	265
7.2 ACT系统简介	266
7.3 ACT系统的硬件配置	269
7.4 ACT系统的命令环境	271
一、注册、注销及ACT基本命令	271
二、交互式命令	275
三、背景模式	276
四、变量模框区	276
7.5 ACT系统的文件管理	277
一、文件类型	278
二、文件的组织	279
三、进入目录	280
7.6 ACT系统命令和工具	282
一、ACT中主要的实用命令	282
二、设计获取工具	283
三、设计验证工具	284
四、布局与布线工具	285
五、符号掩膜设计工具	286

六、几何掩膜设计工具·····	287
七、功能验证与反馈工具·····	288
八、测试程序开发工具·····	289
参考文献 ·····	290
第八章 图论及算法复杂性 ·····	291
8.1 概述·····	291
8.2 图的基本知识·····	292
8.3 算法复杂性·····	300
8.4 数据库介绍和深度优先搜索·····	309
一、邻接矩阵和邻接目录·····	309
二、深度优先搜索·····	314
三、两个线性时间算法·····	318
参考文献 ·····	327
第九章 图论难题 ·····	329
9.1 概述·····	329
9.2 NP-完全性介绍·····	329
一、P类和NP类·····	330
二、NP-完全性和Cook定理·····	335
9.3 图论问题的NP-完全性·····	340
一、覆盖问题、独立集问题和完备子图问题·····	341
二、哈密顿路径和回路(货郎担问题)·····	343
三、图的着色问题·····	349
9.4 结论·····	355
参考文献 ·····	356

第一章 数字系统

1.1 概述

硅集成电路技术的最大影响应该说是数字电子线路方面，而数字电路与系统的发展，又推动了微电子技术的应用，从而推动了设计自动化(D.A)与计算机辅助设计(CAD)的发展。

在一个极小面积的硅芯片上，可以集成成千上万个等效的逻辑门，它强有力的逻辑功能改变了传统的电路与系统的结构。譬如：电子设备中微处理器已成为一个趋势，因为我们宁可用存贮程序的概念去完成各种计算，实现一些特定的功能，而不是采取硬性布线去实现逻辑功能，其优越性是显而易见的。

本章作为基础将简要介绍逻辑阵列和微处理器，因为一个电路设计工作者，对于电路本身的一些概念，是需要有一些基本认识的。

当今在很多场合，对于许多模拟信号处理正被采样和数字化模拟信号所取代，用数字信号处理器来处理数据流，数字滤波器的应用就是一例。

对于一个多端输入和输出的数字系统，设有一组输入量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 称为输入矢量 $\vec{X}$ ，一组输出量 $y_1, y_2, \dots, y_p$ 称为输出矢量 $\vec{Y}$ 。而一个无记忆系统，它的即时输出函数只是即时输入函数的函数

$$\vec{Y}(k) = f[\vec{X}(k)] \quad (1.1)$$

这是一般数字系统在常态下的一种特殊情形，如图1.1所示。

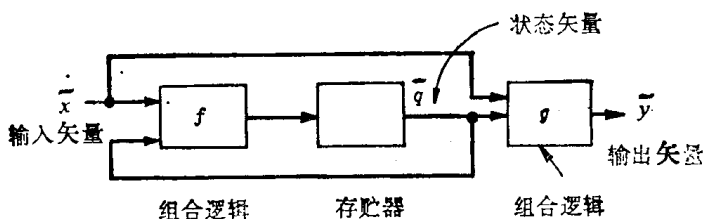


图1.1 常态下数字系统

一般系统的输出是一个即时输入激励连同先前输入和输出的函数。系统的先前内容被存贮在状态矢量 $\vec{q}$ ： $q_1, q_2, \dots, q_n$ 中，如果系统的现在输入状态是已知的，该状态矢量必须由系统先前存贮量来决定下一个状态和现在的输出状态。

系统由下述方程描述：

$$\begin{aligned}\vec{q}(k+1) &= g[\vec{q}(k), X(k)] \\ \vec{Y} &= f[\vec{q}(k), X(k)]\end{aligned}\quad (1.2)$$

这里 k 表示状态。

许多系统包含周期时钟，它只允许在一固定的瞬时时间变化，这就是常见的同步系统。而异步系统可以经历任何时间的状态变化(见图1.1)，通常的数字系统包含一个用来存贮状态矢量的存贮器和两个组合逻辑块，其中一块是使现在状态矢量和现在输入矢量产生现在输出矢量。另一块是使现在状态矢量和现在输入矢量产生下一时刻的状态矢量。这种一般电路系统的运算常被结构的约束所限制，我们可作五种类型的定义。

类型0电路：即前面所述的组合电路，没有存贮功能。

类型1电路：有存贮功能，但没有反馈或前向路径，这样

$$\vec{Y}(k+1) = f_s[X(k)] \quad (1.3)$$

即下一个时刻的输出可由以前输入矢量的组合变换而得到。该电路仅需要一个组合网络，它可以超前或接在状态矢量存贮器之后，类型1的一个记录是移位寄存器。

类型2电路：它的现在输出矢量和下一个状态矢量是由现在状态矢量所决定的。这样，类型2有状态矢量输出，下个状态有直接状态变化。类型2电路由方程(1.2)所描述，其中输入矢量 $\vec{X}=0$ ，计算器是其一例。

类型3电路：下一个状态矢量是现在状态和输入的函数，而输出仅与状态矢量有关。因此，它有“条件状态变换”和“状态输出”，同时对一固定输入矢量，其下一时刻状态是由此刻状态所决定。而类型3电路可被看作是具有几个可能的状态序列的类型2设备。其中一个由通过特定的输入矢量所选择，因此，状态3电路可以在交变状态序列之间选择，它们可以执行所有的算法。

类型4电路：具有条件状态变化和条件输出功能，它只能提供某些简化。

类型2、3、4是连续电路，其中下一时刻状态是这一时刻状态的函数。

虽然，在这里我们只讨论了数字系统的五个类型电路的一般概念，而并未涉及许多可能的物理器件，但在VLSI出现之前，数字系统被看作是离散的在印刷线路板安置门的小规模集成电路的连接，而现在是使数以万计的复杂的器件集成在一个很小面积的芯片上，完成各种功能和应用了。

譬如：标准的或随机的逻辑门的应用，充分利用硅片上可能利用的面积，去完成一个要求的系统函数的逻辑门被安置和互联在一个LSI芯片上，该芯片是经过设计布局而成的，用它来执行一些特定的运算。采用标准逻辑元件对电路设计来讲优越性是很多的，它常被用到高容量生产中。由于芯片面积的缩小亦将会降低生产成本，同时采用标准逻辑电路也是最佳的互换设计，因为它允许把系统较有效地进行划分，给工艺设计均带来方便。

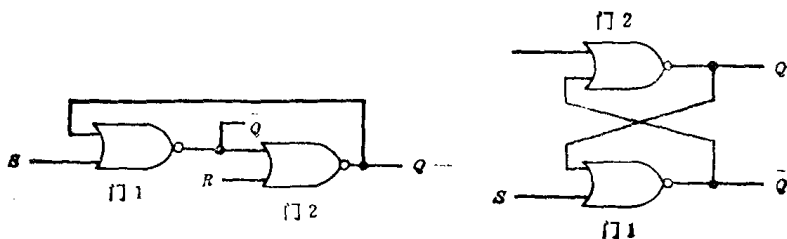
集成电路生产的高费用，推动了电路设计的理论和方法的发展。为了适应各种用户对于电路的要求，在电路制作的最后阶段，可由用户自己完成。

近年来，存储器技术也取得了很大的进展。1983年微处理器字长就已达到32位，静态RAM已达到256k，且已普遍用于计算机中。1984年日本的日立公司和电气公司分别研制出了1兆动态RAM，1985年日本东芝公司研制出了集成度为225万个元件的一兆位的动态RAM，共集成的元件数相当于目前已实用化的256k动态RAM的4倍。

存储技术在实现系统功能方面的应用，也很有效，如只读存储器(ROM)可被用来实现组合函数。可以用一个存储程序的计算机来完成描述系统功能的算法步骤。改变程序命令可以改变系统的功能状况，这个命令被存储在ROM中。总之，一个基本芯片可用在许多系统中，可以以较低的成本大量生产电路与系统。

1.2 作为一个存储单元的触发器

对一个顺序逻辑电路的要求，是它具有存储该系统先前条件的信息的能力。最通常的双稳态电路是双稳多谐振荡器，就是我们所讲的触发器。它是由两个反向逻辑门在一个正反馈回路中所构成的，如图1.2(a)所示。将该电路以常用的交叉耦合排列重整后得图1.2(b)。



(a) R-S触发器

(b) 交叉耦合排列

图1.2

虽然，或非门被应用在这种结构中，但也有用与非门来实现的。

触发器的输出端通常为 Q 和 $\overline{Q}$ ，设用 S 表示置位， R 表示复位。当置位端输入逻辑“1”时， Q 端也被驱动到1，同样，对于复位和 $\overline{Q}$ 输出情况如前。这是一个静态触发器，因为该电路一旦被驱动到一个特殊的状态，只要有电源供给，该电路的状态就一直被保持下来。其真值表由下式表示：

$$Q_{N+1} = S_N + Q_N \overline{R}_N \quad (1.4)$$

其中 $R_N S_N = 0$ ， R_N 、 S_N 分别表示在 t_N 时刻的复位、置位输入端。 R - S 触发器的真值表如表1-1所示。

表1-1 R-S触发器真值表

S	R	Q_N	$\overline{Q}_N$	Q_{N+1}	$\overline{Q}_{N+1}$
1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	Q_N	$\overline{Q}_N$
0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	Q_N	$\overline{Q}_N$
1	1	ϕ	ϕ		

从设零输入 S 和 R 可知，输出 Q_{N+1} 、 $\overline{Q}_{N+1}$ 与输入值相同，除了不定情况， $S=1$ ， $R=1$ 。另一方面，当 $R=S=0$ 时，由于反馈使输出值仍然不变，因此该电路记忆了先前的置位端和复位端发出的命令。

触发器是不能立刻改变状态的。再次分析图1.2(a)所示的电路，其中，逻辑门被认为是理想的，与一个传输滞后时间 T_b 相联系，见图1.3(a)。假设初始： $Q=0$ ， $\overline{Q}=1$ ， $S=R=0$ ，且 $t=0$ 时，输入被用来置位触发器，见图1.3(b)。