

内 容 提 要

本书对 CMOS 集成电路作了较为全面的介绍。内容包括三部分：首先讨论 CMOS 电路的设计理论，作了设计举例。其次介绍 CMOS 电路的各种生产工艺，并加以比较。最后介绍 CMOS 电路基本参数的测试原理和电路使用。

本书结构严谨，文笔较为流畅简练，适宜于从事研制、生产以及应用 CMOS 电路的工程技术人员阅读，也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

CMOS 集 成 电 路

史常忻 编著

*

江苏科学技术出版社
江苏省新华书店发行
南京人民印刷厂印刷

1979年6月第1版
1979年6月第1次印刷
印数：1—29,000册

书号：15196·011 定价：0.70 元

CMOS 集成电路

史常忻 编著

江苏科学技术出版社

603.55

前 言

CMOS 集成电路即互补型金属-氧化物-半导体集成电路，具有功耗低、抗干扰能力强和速度快的特点，是一种性能优异的集成电路。所以，近年来在一般逻辑电路、大规模存储器以及微处理机、电子手表等领域中均得到了广泛的应用，发展很快。

本书是在教学、科研和生产实践的基础上编写而成的。全书分五章：第一章概述 CMOS 集成电路的特点和发展。第二章讨论 CMOS 集成电路的基本工作原理。其中着重于对 CMOS 电路中的基本电路——倒相器（包括多输入端门）和传输门——的深入分析，以期使读者获得设计复杂 CMOS 电路的基本理论，此为本书的主要内容。第三章介绍 CMOS 电路的各种生产工艺。第四章和第五章对 CMOS 电路各基本参数的意义和测试原理，以及在使用 CMOS 电路时应注意的问题作了介绍。

很多同志对编写此书给予了协助。南京工学院半导体研究室童勤义、詹娟和茅盘松等同志对本书提出不少宝贵意见，赵文霞同志帮助进行制图校勘工作，谨以致谢。

编 者

一九七八年十一月

目 录

第一章 CMOS 电路的发展和特点

第二章 CMOS 电路设计理论

§ 2.1 引言	11
§ 2.2 MOS 绝缘栅场效应晶体管	11
§ 2.3 CMOS 倒相器	15
§ 2.3.1 直流传输特性	18
§ 2.3.2 直流转移特性	24
§ 2.3.3 直流噪音容限	25
§ 2.3.4 瞬态特性	35
§ 2.3.5 功耗	46
§ 2.4 多输入端门	50
§ 2.5 传输门	57
§ 2.5.1 单沟道传输门的分析	59
§ 2.5.2 CMOS 传输门	66
§ 2.6 设计举例	82
§ 2.6.1 二输入端与非门设计	82
§ 2.6.2 D 型触发器设计	88
§ 2.7 强负载门设计介绍	96
§ 2.8 版图设计	104

第三章 CMOS 电路工艺

§ 3.1 引言	108
§ 3.2 标准工艺	110
§ 3.3 离子注入工艺	115

§ 3.3.1	形成P阱	116
§ 3.3.2	调整阈电压	118
§ 3.3.3	实现自对准	120
§ 3.4	硅栅工艺	122
§ 3.5	复合栅工艺	127
§ 3.6	SOS工艺	131

第四章 CMOS 电路的基本参数

§ 4.1	引言	136
§ 4.2	静态参数	136
§ 4.2.1	输出高电平和输出低电平	136
§ 4.2.2	最小输入高电平和最大输入低电平	138
§ 4.2.3	直流噪音容限	139
§ 4.2.4	输入阻抗	141
§ 4.2.5	输出驱动电流	142
§ 4.2.6	静态功耗	145
§ 4.3	动态参数	146
§ 4.3.1	各时间参数的定义和测试	146
§ 4.3.2	最高工作频率和最大时钟频率	150
§ 4.3.3	最大时钟上升(下降)时间	151
§ 4.3.4	输入电容	152
§ 4.3.5	动态功耗	153
§ 4.4	门电路的直流特性	153
§ 4.4.1	传输特性	154
§ 4.4.2	转移特性	156
§ 4.4.3	对电路内部MOS晶体管的测试	159
§ 4.5	传输门测量	162
§ 4.5.1	传输特性	162
§ 4.5.2	通导电阻	163

§ 4.5.3	截止电阻	165
§ 4.5.4	串扰	165
§ 4.5.5	频率响应	166
§ 4.5.6	延迟时间	168
§ 4.5.7	电容	169
§ 4.5.8	功耗	171
§ 4.6	极限参数	172
§ 4.6.1	电源电压	172
§ 4.6.2	输入电压和输入电流	173
§ 4.6.3	工作温度和存贮温度	174

第五章 逻辑设计中的CMOS 电路

§ 5.1	引言	175
§ 5.2	输入保护	175
§ 5.2.1	单二极管保护电路	175
§ 5.2.2	电阻二极管保护电路	181
§ 5.3	不使用的输入端和输入端的扩展	186
§ 5.4	门的并联使用	188
§ 5.4.1	多输入端门的输入端并联	188
§ 5.4.2	门和倒相器的并联	189
§ 5.5	CMOS电路与其他类型电路的接口	189
§ 5.6	三态输出	198

第一章 CMOS电路的发展和特点

互补金属-氧化物-半导体集成电路，简称 CMOS 电路，是集成电路中于六十年代后期才发展起来的后起之秀。大家知道，半导体场效应概念虽然早在三十年代初期就已经提了出来。但是由于当时对半导体表面的认识不足和实际工艺控制不良，所以真正的场效应器件一直未能付诸实现。只有到了六十年代，随着平面型晶体管的发展，以及人们对于半导体表面性质认识的深化，特别是具有优良性能的热生长二氧化硅薄膜的成功生长，才导致 MOS 绝缘栅场效应晶体管和 MOS 集成电路的问世。

互补型 MOS 集成电路，也早在1963年首先由万勒斯 (F.M.Wanlass) 和萨 (C.T.Sah) 在国际固体电路会议上提出。他们发表了题为“使用场效应金属氧化物半导体三极管的毫微瓦逻辑”的文章。他们的工作表明，采用硅平面工艺制成的一对增强型的 P 沟道和 N 沟道互补 MOS 场效应晶体管可以组成一个基本倒相器。如图1·1所示。上方为一个 N 沟道 MOS 场效应晶体管，下方为一个 P 沟道场效应晶体管。他们用由这种倒相器组成的三级环形振荡器测量了电路的延迟时间。指出这样的逻辑电路具有极低的静态功耗，高的输入阻抗和较快的工作速度。同时还指出用互补电路形式组成其他逻辑电路，如或非门、置位复位触发器的可能性。他们的工作为 CMOS 集成电路奠定了基础。但是因为要在同一硅片上制作两种沟道的 MOS 场效应晶体管，又都要保证增强型工作，

其工艺难度比单沟道电路大得多。所以直到六十年代末期才由美国无线电公司生产出CMOS集成电路供应市场。

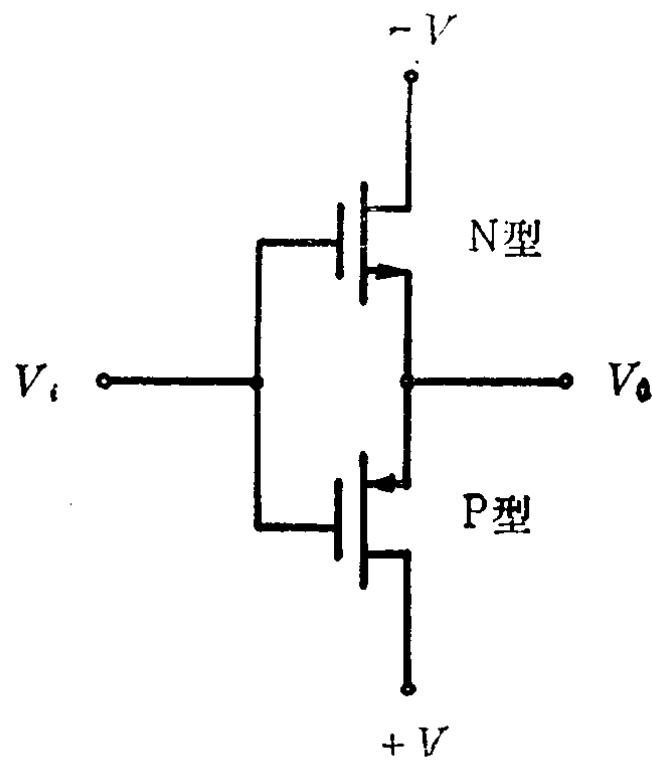


图 1·1

一旦CMOS集成电路在电子领域中崭露头角，由于它本身的优异性能，立刻受到人们的极大重视，发展极为迅速。美国、日本等国家的各主要半导体厂家竞相生产。电路产量成倍增长，电路品种日新月异，电路规模逐步加大。例如1973年在美国半导体通用逻辑电路的生产中，CMOS电路仅占第四位，次于TTL电路，ECL电路和DTL电路。但是自1975年以来，它就大大地超过了ECL和DTL电路而跃居第二位。不仅取代了速度慢、功耗大的PMOS电路，而且也压倒了除去TTL电路以外的一切双极型电路。表1—1中给出美国各类半导体逻辑电路(不包括存贮器和微处理机)

近年来的发展情况。可以看出，CMOS电路至今仍然保持着蓬勃发展的趋势。

表1—1

单位：百万美元

电路类型	75年	76年	77年	80年
DTL	36.8	35.1	33.7	29.0
TTL	260	349	410	435
STTL	33.5	60.0	90.5	165
ECL	31.8	33.3	51.0	68.0
CMOS	60.0	103	143	225

几年来CMOS电路的品种和参量指标也不断提高。例如美国无线电公司的CD4000系列已从几十种发展到一百多种。其中增加了高速系列和许多中、大规模电路。电源电压的范围也由3~18伏扩大到3~20伏。美国国家半导体公司生产了74C系列的CMOS电路产品，它是与TTL电路的7400系列具有相同的管脚排列，因而可以直接取代之。此外费尔查德公司发展了等平面工艺的CMOS电路，哈里斯公司研制了介质隔离的CMOS电路产品，均使电路性能不断提高。特别是用SOS工艺制成的CMOS1024位的随机存取存储器以及CMOS微处理机进入市场，标志着CMOS电路已经进入了大规模电路的领域。

为了进一步提高CMOS电路的集成度，各厂家也正从事一些新工艺方案和新线路形式的研究。例如美国无线电公司的闭合CMOS逻辑(C²L)，飞利浦公司应用局部氧化工艺于CMOS电路(Locmos)，都可以大大减小隔离面积，使集成度

进一步提高。东芝公司的动态时钟CMOS电路(C²MOS),也可以减小器件的数目。

我国 CMOS 集成电路在七十年代初已有单位从事研制和生产。四机部主持的全国 CMOS 电路品种优选和联合设计定型工作,更加促进了 CMOS 电路的发展。目前生产的单位已经普及全国,品种也大为增加。

CMOS 电路的发展如此迅速是与它本身具有的优良性能分不开的。CMOS 电路与其他类型逻辑电路的比较在表 1—2 中给出。

表1—2

逻辑类型	直流功耗 (毫瓦/门)	门 延 (毫微秒)	直流噪容 (伏)	逻辑摆幅 (伏)
DTL	11	30	1	2.8
TTL	10	13	1	3.3
TTL(低耗)	1	35	1	3.3
HTL	30	85	7.5	13
ECL	25	2	0.27	0.9
CMOS(5伏)	0.005微瓦/门	45	2.2	5
CMOS(10伏)	0.01微瓦/门	16	4.5	10
CMOS(15伏)	0.15微瓦/门	12	6.7	15
CMOS/SOS (10伏)	0.05微微瓦/门	2	4.5	10

可以看出, CMOS 电路的静态功耗极低,动态功耗比例于工作频率。其逻辑摆幅大,抗干扰能力很强,特别适宜于噪音环境恶劣条件下工作。它的工作速度也较快,一般工艺的 CMOS 电路比单沟道的 MOS 电路要快,而 SOS 工艺的

CMOS 电路可以与双极型的 TTL 电路媲美，但功耗要低几个数量级。此外，CMOS电路的工作电源电压范围很宽，只需要单一电源工作，对电源的稳定度要求不高，便于与其他类型逻辑电路接口。

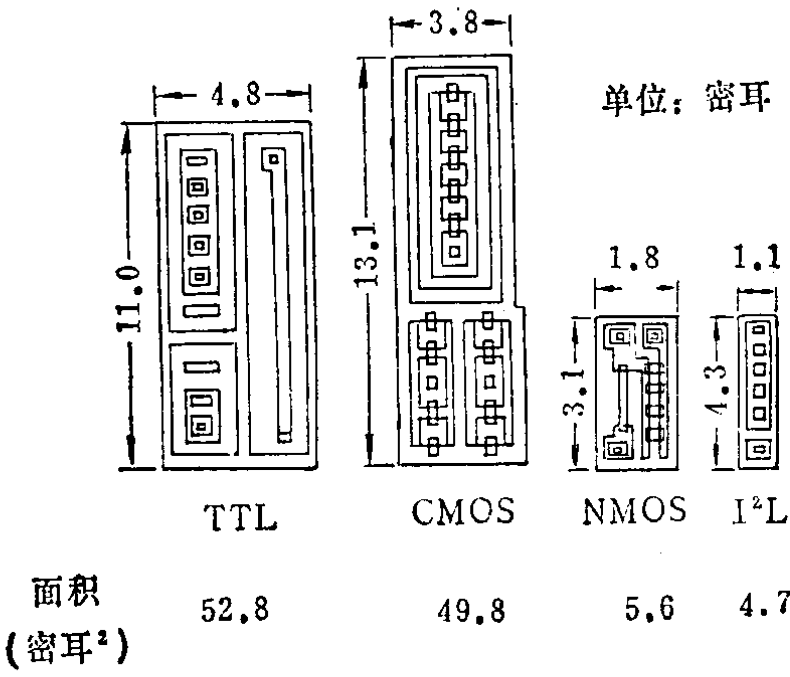


图 1·2

但是因为CMOS电路隔离工艺采用的隔离环占用面积较大，影响其集成度的提高。图 1·2 中给出CMOS电路与其他电路版图尺寸的比较。所以改进CMOS电路的隔离工艺以提高集成度，是它的一个主要问题。由于CMOS电路的工艺难度较高，成本较贵。故初期发展的 CMOS 电路大多局限应用于低功耗的特殊领域中，如宇航电子仪器和电子手表等。但是随着工艺水平的不断提高，CMOS电路的成本也在逐步下降。目前功能和集成度与 TTL 电路相当的 CMOS 电路，其

成本已接近或略低于 TTL 电路了，这为 CMOS 电路的广泛应用开辟了极好的前景。

为了了解 CMOS 逻辑电路的工作特性，下面介绍几种基本的 CMOS 电路。图 1·3 中给出的是 CMOS 倒相器(非门)。它是由一支 P 沟道 MOS 管和 N 沟道 MOS 管串联而成。当输入端为高电平(电源电位 V_{DD})时，N 管通导，P 管截止，所以输出为低电平(地电位)。当输入为低电平时因为 P 管通导，N 管截止，所以输出为高电平。

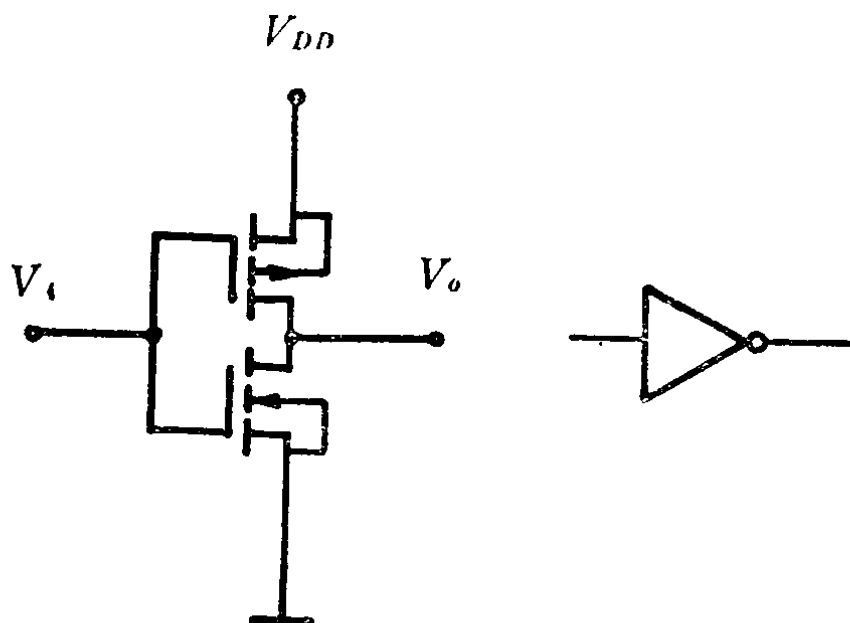


图 1·3

图1·4中是一个 CMOS 传输门。其中上方的 P 沟道 MOS 管的衬底接电源 V_{DD} ，下方的 N 沟道 MOS 管的衬底接地。它们的栅分别由一对互补的控制电压控制。当控制电压 V_C 为高电平时， $\overline{V}_C$ 为低电平。这时 P 管和 N 管同时通导，传输

门打开，输入端和输出端接通。当控制电压 V_C 为低电平时， $\overline{V_C}$ 为高电平，两支管子同时截止，传输门关闭。因而它起着电子开关的作用。

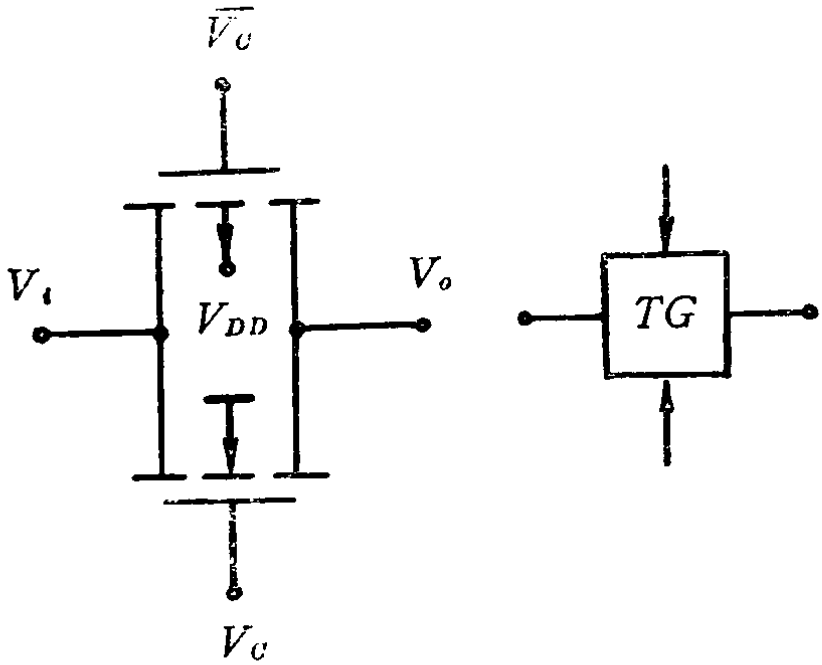


图 1·4

图1·5中是一个或非门。两支串联的P沟道 MOS 管 (P_1 和 P_2) 起负载管的作用，两支并联的N沟道 MOS 管 (N_1 和 N_2) 起输入管的作用。当 A 端为高电平， B 端为低电平时， P_1 管和 N_2 管截止， P_2 管和 N_1 管导通。输出端 C 为低电平。当 A 端为低电平和 B 端为高电平时，因为 N_2 管通导， P_2 管截止，输出也是低电平。 A 和 B 端同时为高电平时，输出也是低电平。只有在 A 和 B 端同时为低电平时，因为这时 P_1 和 P_2 管同时通导， N_1 和 N_2 管同时截止，所以输出为高电平。我们以高电平为逻辑“1”，低电平为逻辑“0”，即正逻辑，则这就是或非门的功能。类似的分析可知，图1·6 中的线路是 CMOS 与非门。图中右方表示它们的逻辑符号。

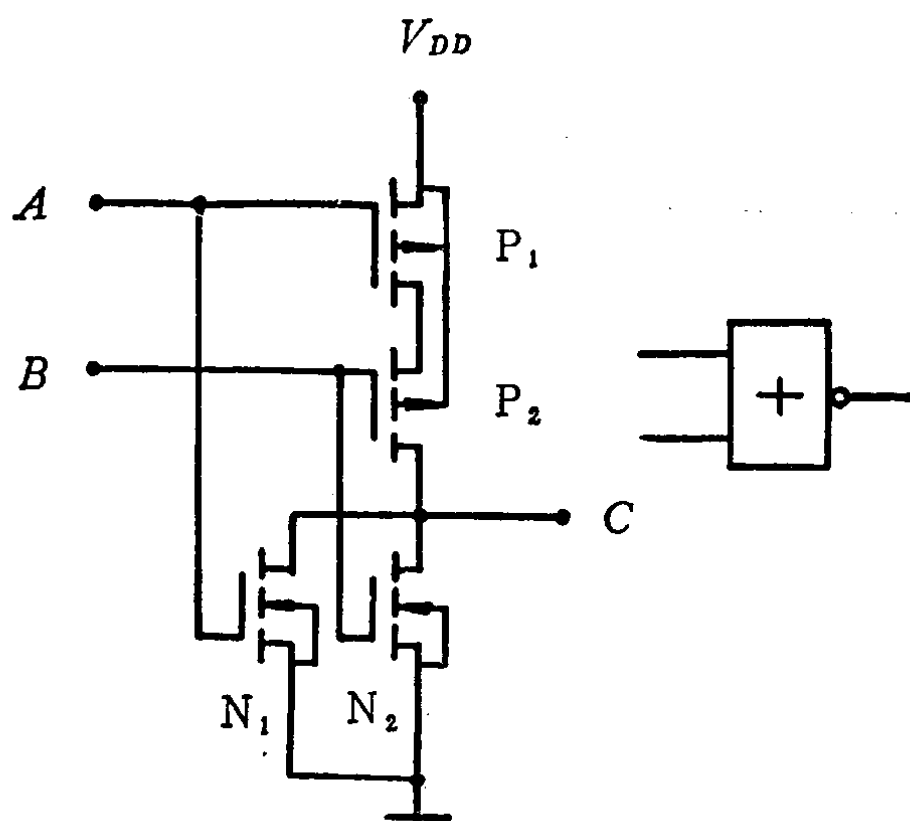


图 1·5

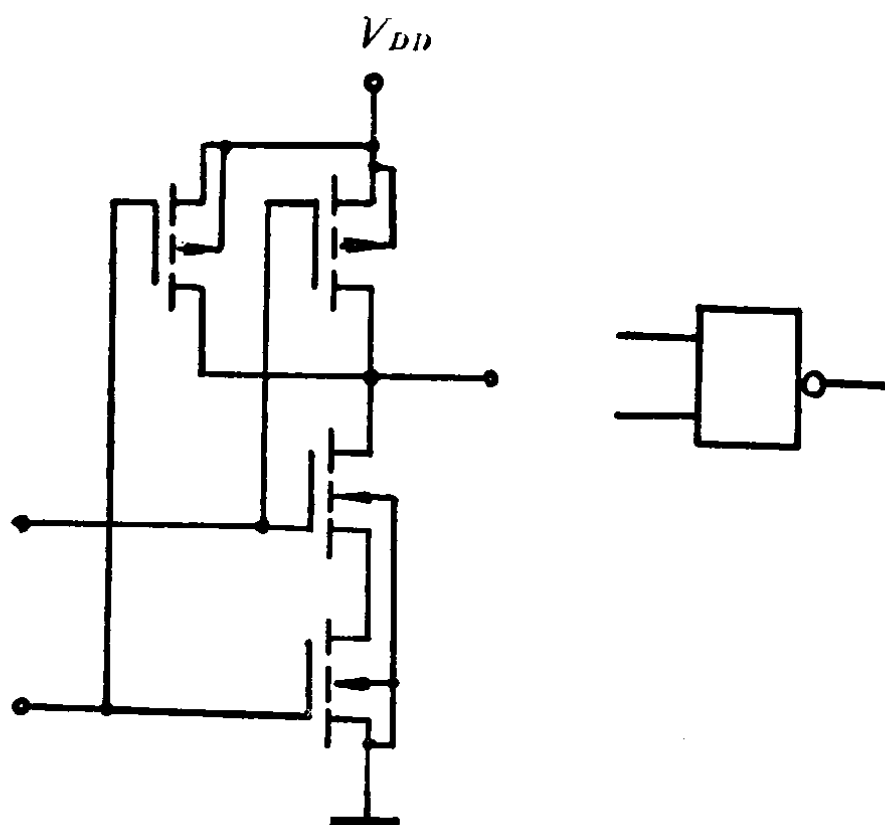


图 1·6

CMOS 的 D 型触发器如图1.7中所示。它是一种主从结构的触发器，主要部分由四个或非门和四个传输门组成。其传输门是受时钟脉冲 CP 控制。当负时钟来到，传输门 TG_1 打开， D 端的信号进入主触发器寄存在 A 点。当正时钟脉冲来到时传输门 TG_3 打开， A 点的信号再通过从触发器输出。经过两次倒相之后输出与原来 D 端相同的信号。置 0 端 R 和置 1 端 S ，在工作时均接低电位。当 R 和 S 分别接高电位时，将使输出端 Q 置 0 或置 1。

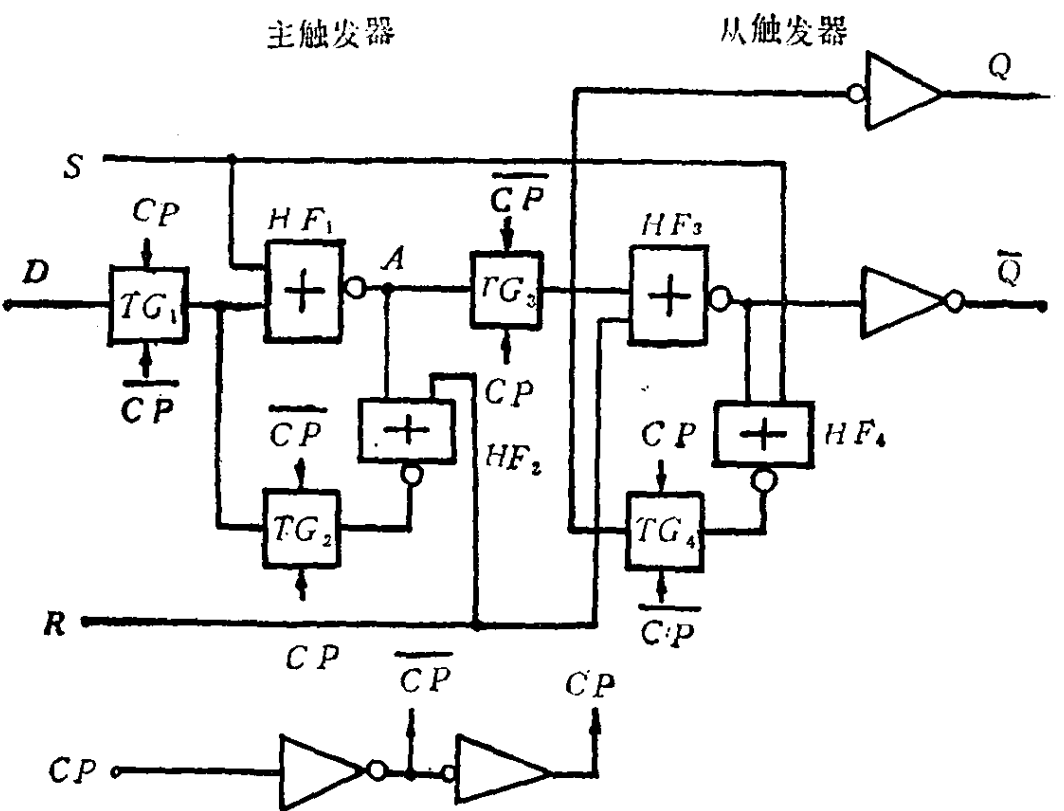


图 1.7

图1.8中表示的是一种动态电路。是CMOS动态移位寄存器。当正时钟脉冲到来时，传输门 TG_1 打开，信号通过倒

相器暂存在寄生电容 C_1' 上。当负时钟脉冲到来时，传输门 TG_2 打开，信号再通过倒相器输出到下一级。这样经过一个完整时钟脉后，信号右移一位。这种电路与上面介绍的电路不同之处是信号靠电容的暂存效应保持的。所以时钟频率不能过低，否则信号将因为漏电而消失。

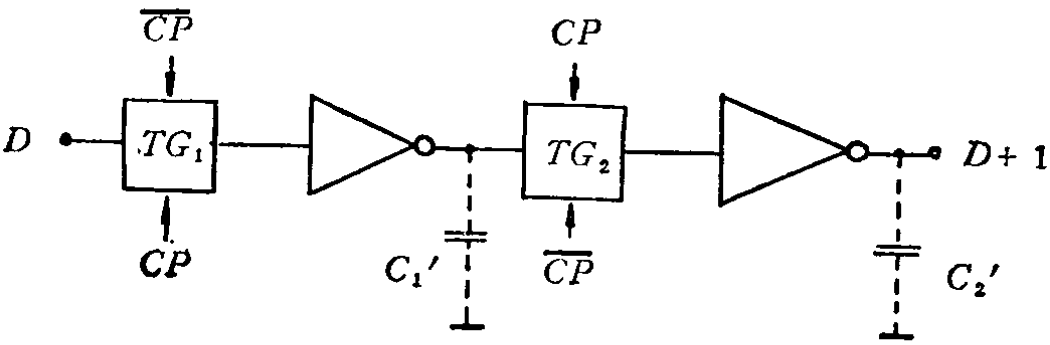


图 1·8

第二章 CMOS电路设计理论

§ 2.1 引言

正如第一章中所介绍的, CMOS 电路与其他类型的逻辑电路一样, 可以组成具有各种功能的、静态或动态的逻辑电路。例如, 门电路、触发器、计数器、译码器等等。但是, 尽管其功能复杂, 种类繁多, 但是它们的核心, 或者说其基本组成单元是两种最简单的电路: 倒相器和传输门。因此, 掌握倒相器和传输门的工作原理和特性, 不仅是了解 CMOS 电路工作的基础, 也是设计各种 CMOS 电路的必要知识。

本章首先介绍它们的工作原理和特性, 然后讨论其电路性能与器件参量之间的关系。多输入端门电路, 做为倒相器的推广也着重进行了讨论。

§ 2.2 MOS 绝缘栅场效应晶体管

MOS 晶体管是构成 CMOS 电路的基本器件, 需要熟悉它们的性能。对于 MOS 晶体管特性的分析, 已经有不少完善的工作, 可以参阅有关著作, 这里不予重复。我们只做一些归纳, 做为分析电路性质时所必需。

我们用图2.1中所规定的电流电压的方向, 根据工程实际中可以应用的简单模型, MOS晶体管的电流方程由下式给出,