

控制用小计算机讲座

(概要和硬件部分)

重庆工业自动化仪表研究所

一九七四年十一月

毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

说 明

这一讲座是一九七一年至一九七二年期间在日本期刊《オートメーション》上发表的，包括概要和硬件部分五讲，软件部分五讲，应用部分六讲。其中第一、二、三讲译文曾刊载于本所出版的《工业自动化仪表》一九七三年第一、三、四各期中。这里把经过订正的这三讲，加上第四、五两讲，合起来印成一个单行本，以方便读者阅读参考。

由于译者水平有限，译文中定有不妥之处，请广大读者给予指正。

控制用小计算机讲座

(概要和硬件部分)

目 录

第一讲 特点、系统构成和规格

- (一) 控制用小计算机的特点..... (1)
- (二) 系统的构成和规格..... (3)

第二讲 硬件的基础知识

- (一) 数字信息的表示法..... (7)
- (二) 布尔代数..... (8)
- (三) 逻辑元件和逻辑符号..... (9)
- (四) 集成电路..... (11)
- (五) 磁心存储器..... (12)

第三讲 中央处理装置

- (一) 中央处理装置的动作原理..... (16)
- (二) 字的构成..... (19)
- (三) 指令系统..... (20)
- (四) 存储部分..... (21)
- (五) 运算部分..... (22)
- (六) 优先中断..... (22)
- (七) 输入输出控制..... (24)
- (八) 其他控制用功能..... (25)

第四讲 流程输入输出设备*

- (一) 输入输出信息的种类..... (26)
- (二) 控制部分的构成和功能..... (27)
- (三) 处理输入输出信号用的设备..... (31)

第五讲 外部设备

- (一) 外部设备概述..... (38)
- (二) 代表性外部设备的功能和原理..... (41)

* 流程输入输出设备在这里虽然单独作为一讲，但它也是控制用计算机外部设备中的一类设备（参见图1.3）——译者注

控制用小计算机讲座

第一讲* 特点、系统构成和规格

以控制生产流程为目的的计算机在日本使用已经十年。开始设置时,它的处理内容也象巡回检测装置那样,是以流程参数的监视、记录或简单的计算为主。在硬件和软件发展的同时,要求有高度处理能力和高可靠性的应用(如在顺序控制、最佳控制、直接数字控制的场合)也在增多。另外,控制用计算机在各种系统中作为一个组成部分使用有更加普遍的倾向。在这样的背景下,价格便宜、使用方便的控制用小计算机的需要,今后必将急速地增加,这是可以预见的。

本讲座中,首先讲述控制用小计算机的概要,再依次地讲述硬件、软件和应用等方面的知识。

(一) 控制用小计算机的特点

与通用计算机相比,控制用计算机具有后述的特点。

图1.1为说明控制用计算机系统的概念用框图。如图所示,从控制对象来的温度、压力、流量等流程信号,经过流程输入输出设备(P I/O)被送到中央处理装置(CPU)。中央处理装置的功能是根据目的对送来的信息进行加工、运算,再

根据需要向控制对象反馈或送至输出设备。利用此反馈信号,例如,可进行开闭对象上的阀门、通断顺序控制用继电器等操作。为了对整个系统操作或监视,设置有操作员控制台(以下简称操作台)作为机器和操作人员之间的人机接口设备。

由于控制用计算机在本质上是以联机运用和实时处理为前提,因此与通用计算机作比较时,首先要强调之点是:

(1) 可靠性要高

控制对象一投入运行,在控制对象本身停止运行以前要求计算机能连续工作。由于设置的环境条件多种多样,还要求计算机能承受大的温度范围(例如 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$)、震动、腐蚀、高湿度等苛刻条件。此外,象在直接数字控制等利用计算机的输出信号直接控制执行器的场合,计算机如果发生故障,会给控制对象造成重大的

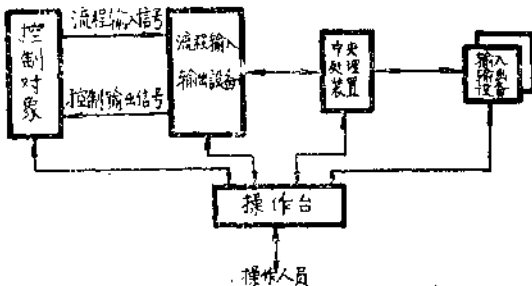


图1.1 控制用计算机系统框图

* 第一讲摘译自日刊《オートメーション》
1971年第5号,第90页~第94页。

损害,因此,不仅平均故障间隔时间(MTBF)要长,还必须具有自动检查,系统的故障安全、危害减小和后备等功能,使系统的运转率(有用性)高。

(2) 应能进行在时间上有严格

限制的处理

为了要对付控制对象发生不正常的事态并保持许多数据的同时性,在某一限定的时间内如不能完成处理工作,就要丧失进行这项处理工作的价值。图1.2(a)表明这种特性。与此相反,在通用计算机方面,如图1.2(b)所示,计算机处理的主体,是一些虽然经过了一定时间,比较起来,还没有失去处理价值的工作。这并不是说控制用计算机的处理速度,总是要比通用计算机快,而是意味着针对响应性两者在硬件和软件的结构上有所不同。因此,在控制用计算机方面,需要充实中断处理功能和实时控制用管理程序等。

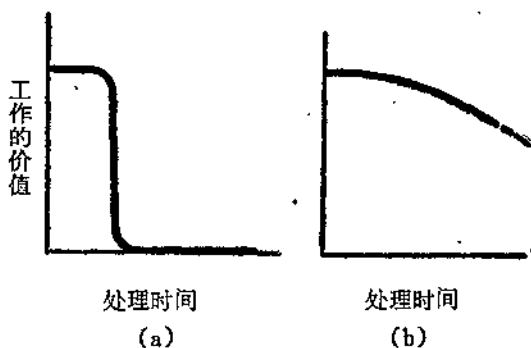


图1.2 用计算机处理工作的特性

(3) 须配备流程输入输出设备

控制对象有许多模拟信号(温度、压力、流量等)和数字信号(阀门的开闭、顺序的改变等)要送入计算机。反过来,计算机要送出显示、印字、控制用的模拟和数字信号。流程用输入输出设备的作用就是把这些信号在控制对象和中央处理装置之间进行信息处理(巡回采样、放

大、模-数转换和数-模转换等),这类输入输出设备可以说是控制用计算机所独有的。

(4) 应使操作人员能对信息进 行总管

为了对计算机和控制对象综合构成的整个控制系统进行监视和运行操作,须要使用操作台作为操作人员的人-机通信的手段。操作台是一种把各种显示器、操作开关等按人机工程原理配置的设备。作为系统工程的结果,它的规格根据不同的用途而定。

其次,小计算机的“小”是从许多因素考虑的,如价格、字的构成、指令系统、运算速度、存储容量、输入输出设备规格等。详细的情况今后将依次说明,这里只作概括的叙述。

小计算机的一般性能(指决定性能各因素的平均值)虽然搞得比中、大型机为低,但是在某些特定项目上有的却也可以很高。例如,从处理能力(每单位时间能够处理的工作量)和处理周期(从提出处理要求到给出结果的时间)来看,小计算机和中、大型机相比,一般说来,它的处理能力小,但它的处理周期短(可是,在某种场合,中断处理时间等虽然短,但一加上浮点等复杂的运算就会变长。)。另一方面,按照格罗施(Grosch)定律 $P = KM^2$ (式中, P : 处理能力, M : 投资金额, K : 系数),可得性能和成本的关系(P/M)为: $P/M = KM$, 即 P/M 与投资金额成比例。这意味说计算机“型”越大越好。可是在实际上,小计算机却具有实时响应性好、能构成绝对金额小的系统等独有的优点。

表1.1中归纳了小计算机的这些优点。

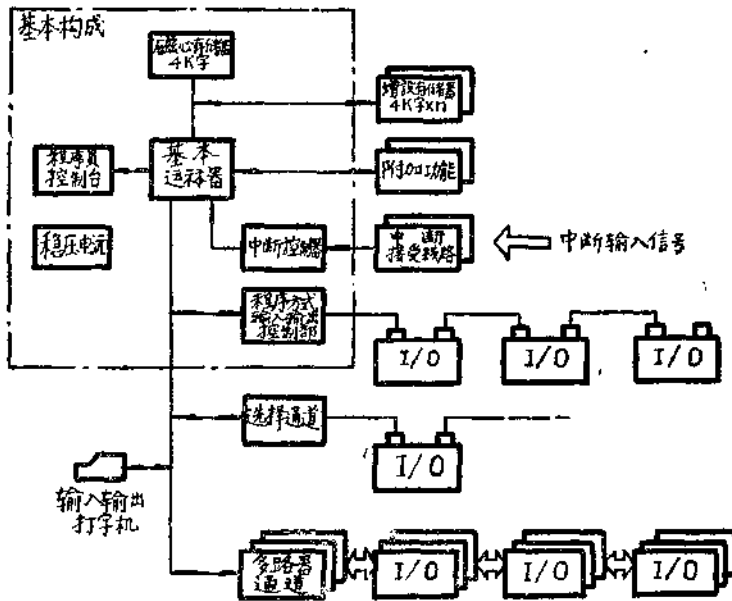
表1.1 小计算机的优点

用 途 项 目	联机控制 和数据制表	科学技术用 成批处理	用 途 项 目	联机控制 和数据制表	科学技术用 成批处理
设置费用小	○	○	扩展性		
响应性/有用性	○	○	输入输出	—	○
利用冗长性提高可靠性	○	—	存储容量	○	○
尺寸、重量、体积和功耗小	○	—	软件的应用		
可工作的环境条件广	○	—	容易的程序	○	○
运行经济性			增加功能的可能性		
培训费用少	○	○	远程成批处理终端	—	○
使用方法简单	○	○	分时用终端	—	○
能适应用户需要	○	—	直接计算机接口	○	—

(二) 系统的构成和规格

图1.3为系统构成的代表例子。图上虚线内是基本构成部分，通常搞成如照片2（略去）所示的形式。这部分虽然有时单独设置，但多数场合搞成如照片3（略

去）所示，与别的部分（例如流程输入输出设备等）一同设置在一个机柜中。在实际系统中，就象这样地根据应用和各种外部设备相连接。表1.2是各种应用的例子。最后，在表1.3中列出对控制用小计算机要求的规格。



输入输出设备 (I/O) :

纸带读取机和凿孔机
磁鼓存储设备
流程输入输出设备
打字机
阴极射线管显示设备
磁带存储设备
卡片读取机和凿孔机
行式印字机
通信控制设备
计算机连系设备等

图1.3 控制用小计算机系统构成举例

表1.2 系统构成举例

大 类	项 目	系 统 构 成 举 例				
		CPU 核心	辅助存储器 容量	数字量输入	模拟量输入	数字量输出
电	火力发电厂数据记录装置	16K字	1	64K字	200	58
		16K字	1	128K字	500	200
	火力发电厂顺序控制和监视装置	16K字	1	256K字	500	300
力	超高压变电所自动操作记录装置	16K字	1	64K字	100	500
	自动配电装置	16K字	1	128K字	50	200
	轧机自动厚度控制	16K字	1	—	30	50
钢	轧机直接数字控制	8K字	1	—	30	50
	轧机控制	32K字	1	512K字	60	130
	森式轧机直接数字控制	16K字	1	28K字	20	50
铁	钢铁厂生产和管理	16K字	1	128K字	16	150
	均热炉	16K字	1	128K字	16	100
		8K字	1	32K字	100	100
化	石油精炼炼区控制装置	32K字	1	512K字	800	200(脉冲输入100)
	石油精炼非炼区管理系统	16K字	1	256K字	40	300(脉冲输入80)
	聚乙烯聚合装置控制	16K字	1	128K字	250	2
工	成批聚合流程控制	16K字	1	64K字	200	300
	烧碱电解流程控制	16K字	1	64K字	400	200
	化工装置直接数字控制	32K字	1	—	500	25
— 般	水泥	8K字	1	64K字	100	20
	汽车制造厂生产管理	32K字	1	256K字	—	—
	造船用自动制图	16K字	1	—	—	—

续 表

大 类	项 目	系 统 结 构 成 举 例						
		CPU 磁心	CIO	辅助存 储器	模拟量 输入	数字量 输入	模拟量 输出	数字量 输出
一 段	数控群管理	8K字	1	64K字	—	400	—	400
	仓库控制	16K字	1	384K字	—	50	—	25
	建筑物总括监视控制装置	8K字	1	64K字	60	400	—	800
	电梯群管理	8K字	1	—	—	15	—	74
	净水厂控制	8K字	1	64K字	50	100	10	150
	发动机试验装置	16K字	1	128K字	30	100	—	—
		2台打字机						
		1台CRT、4台打字机、1台L/R*						
		1台CRT、3台记录打字机、1台纸带穿孔机						
		3台打字机						
		1台X-Y绘图机、1台模拟记录仪、10台打字机						

CPU: Central Processing Unit

中央处理装置

CIO: Console Input and Output Device

控制台输入输出设备 (如美国商品 “Datawriter”)

CLC: Central Logic Control

中央逻辑控制设备

PTP: Paper Tape Punch

纸带穿孔机

CP: Card Punch

卡片穿孔机

CR: Card Reader

卡片读取机

KSR: Keyboard Send/Receive

收发键盘 (电传打字机)

M/T: Magnetic Tape

磁带设备

CRT: Cathode Ray Tube

阴极射线管显示设备

TTY: Teletypewriter

电传打字机

(上列略语原词是译者加注的, 仅供参考)

* L/R 可能为 L/P (行式印字机) 之误——译者注

表1.3

对控制用小计算机要求的规格

价	格: 4K字磁心存储器的中央处理装置和输入输出打字机售价 500万 日元左右
可 靠	性: 平均故障间隔时间: 4000小时 (中央处理装置) 运转率: 99.5%以上 工作温度范围: 0~40°C 以上 (输入输出设备不在内)
字	长: 十六个二进制位以上
磁 心 存 储	器: 循环时间 (存储周期): 2 微秒以上 最大容量: 16K字以上 奇偶校验: 有
运 算 速	度: 加减运算20微秒以上 (按用户需要也应提供乘除运算电路)
编 址 方	式: 间接地址, 可以变址修改
优 先 中	断: 应为多级
输 入 输 出 控	制: 标准装置为程序控制方式 (按用户需要也应提供通道方式), 应规定标准接口
停 电 保	护: 有
实 时 定 时	器: 有
辅 助 存 储	器: 可连接
其 他 计 算	机: 可结合使用
软	件: 汇编语言和更高级的语言, 有实时管理程序
输 入 输 出 设	备: 可与生产流程用输入输出设备、阴极射线管显示设备等连接

第二讲 硬件的基础知识

小计算机硬件的基础知识包括 (1) 逻辑设计的基础——二值逻辑数学 (布尔代数), (2) 电路元件 (特别是集成电路)、磁心存储器、电源装置等的电路技术, (3) 组装技术等等。本讲仅就布尔代数、逻辑元件、集成电路和磁心存储器几个方面进行解说。

(一) 数字信息的表示法

1. 数的二进位计数制**表示法

在日常使用的十进位计数制中, 数是以10的幂之和表示的 (各幂先给以 $0 \sim 9$ 的加权), 例如

$$9563_{10} = 9 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 3 \times 10^0$$

由此, 可以写出 r 进位计数制的数的表示形式如下:

$$a_m a_{m-1} \cdots a_0_r = a_m \times r^m + a_{m-1} \times r^{m-1} + \cdots + a_0 \times r^0$$

这里, $a_m, a_{m-1}, \cdots, a_0$ 是用 $0 \sim (r-1)$ 之间的数字表示的权, 把 r 叫做该数系进位的基数。

在上述十进位计数制表示法例子中 $r=10$ 。通常, 由于下述理由, 在计算机技术中取 $r=2$, 即采用二进位计数制表示法。

(1) “权” 只用 “1” 和 “0” 两个数字, 容易与物理现象对应 (例如, 电位的高低、电流的通断)。

(2) 数的运算简单。十进位制数进行乘法运算需要一百个公式, 而二进位

制数只要 $0 \times 0 = 0$ 、 $0 \times 1 = 0$ 、 $1 \times 0 = 0$ 、 $1 \times 1 = 1$ 四个公式就行。

(3) 能使用布尔代数。

(4) 计算机用的部件数少。用 r 进位计数制时, m 位能表示的数有 r^m 个。为了区别 r 进位计数制 m 位的状态, 部件数和 $r \times m$ 成比例 (例如, 为了区别十进位计数制的一位, 需要十个手指)。从而, 在以 $r \times m = k$ (常数) 为条件的基础上可以计算出能使 $F(r) = r^m (r > 0)$ 为最大值的 r 值 ($r = e \doteq 2.7$)。基数 r 取自然数时, r 的最佳解为 2 或 3。

在用二进位计数制表示数的场合, 把这种数的每一位叫做 “bit”。“bit” 是英文词 “binary digit” 的一种缩写。

2. 正负数的表示法

(1) 补数表示法

n 位二进位制数 A 的补数 B 是用下式作为定义的:

$$A + B = 2^n$$

负数用 “绝对值相等的正数的补数” 表示的方法叫做补数表示法。

$$\text{例) } +5_{10} = 0101_2$$

$$-5_{10} = 1011_2$$

(2) 绝对值表示法

这种方法是把表示数的大小的绝对值和表示正负的一 bit 符号组合起来的表示

* 第二讲摘译自日刊《オートメーション》1971年第6号, 第100页~第104页。

** 可简称为二进制。

方法。

3. 字符的表示法

字母数字、符号、日语中的假名等用

7 或 8 bit的代码表示。代表性的 代码有 ISO、EBCDIK等，在小计算机方面多采用表2.1所示的ASCII代码。

表2.1 ASCII代码表

位号				b7	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
				b6	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1
				b5	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
b4	b3	b2	b1												
0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P						
0	0	0	1	SOH	DC1	1	1	A	Q	a	q				
0	0	1	0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r				
0	0	1	1	ETX	DC3	"	3	C	S	c	s				
0	1	0	0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t				
0	1	0	1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u				
0	1	1	0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v				
0	1	1	1	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w				
1	0	0	0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x				
1	0	0	1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y				
1	0	1	0	LF	SUB	"	:	J	Z	j	z				
1	0	1	1	VT	ESC	+	;	K	[	k	{				
1	1	0	0	FF	FS	,	<	L	\	l					
1	1	0	1	CR	GS	-	=	M	]	m	}				
1	1	1	0	SO	RS	.	>	N	^①	n	~				
1	1	1	1	SI	US	/	?	O	—	o	DEL				

注：ASCII是“美国标准信息交换代码”的略语

(二) 布尔代数

对于变数X，对应真伪两值进行逻辑运算的场合，使用布尔代数。利用布尔代数来规定bit间的逻辑加、逻辑乘和一bit的逻辑否定三者的定义，并用这些基本运算来表现bit的一切组合。

1. 逻辑加(OR)

首先，假定A、B分别对应于一bit。在这种情况下，若A、B之中至少有一方为“1”，则把A、B作为输入时，输出C也为“1”。把这种关系叫做A和B的逻辑加。表2.2列出A、B、C的一切组合。把这个表叫做逻辑加的真值表。

2. 逻辑乘(AND)

A、B两方都为“1”时，输出C才

为“1”的这种关系叫做A、B的逻辑乘。表2.3为其真值表。

3. 逻辑否定(NOT)

“1”的否定为“0”，“0”的否定为“1”，其真值表见表2.4。

表2.2 逻辑加真值表

A	B	C(=A+B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

表2.3 逻辑乘真值表

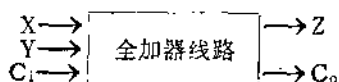
A	B	$C(=A \cdot B)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

表2.4 逻辑否定真值表

A	$C(=\bar{A})$
0	1
1	0

4. 全加器线路的逻辑式

图2.1(a)是一个接受输入X、Y、 C_i ，给出输出Z、 C_o 的线路的例子。如果对bit输入X、Y、 C_i 进行加法运算时，输出为运算结果Z和进位 C_o ，则真值表如图2.1(b)。从这个真值表，可以得到图2.1



(a)

X	Y	C_i	Z	C_o
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1

(b) 真值表

$$Z = X \cdot \bar{Y} \cdot \bar{C}_i + \bar{X} \cdot Y \cdot \bar{C}_i + \bar{X} \cdot \bar{Y} \cdot C_i + X \cdot Y \cdot C_i$$

$$C_o = X \cdot Y \cdot \bar{C}_i + X \cdot \bar{Y} \cdot C_i + \bar{X} \cdot Y \cdot C_i + X \cdot Y \cdot C_i$$

(c) 逻辑式

图2.1 全加器线路

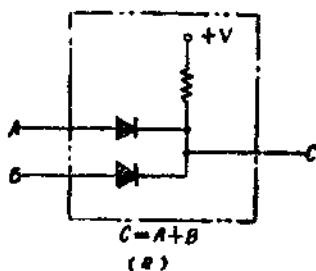
(c)的逻辑式。根据逻辑式(c)可以看出通过AND、OR、NOT线路的组合能够实现得到输出Z、 C_o 的结果。

(三) 逻辑元件和逻辑符号

逻辑元件有两类：决定线路元件和寄存线路元件。

1. 决定线路元件

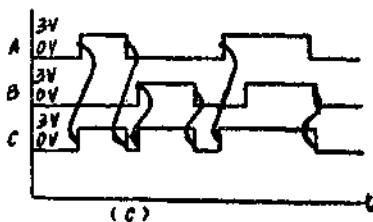
它是对一bit以上的输入信号进行逻辑运算(OR、AND、NOT)的元件。基本的元件示于图2.2~2.4。这些元件的特征是：如果输入A、B被确定，输出C也就一义地确定下来。



(a)

A	B	C
0V	0V	0V
0	3	3
3	0	3
3	3	3

(b)



(c)

图2.2 逻辑加元件(OR)

2. 寄存线路元件

基本线路示于图2.5。它是具有一bit以上寄存能力的元件，即使输入A、B的值是确定的，输出C的值也不是一义地确

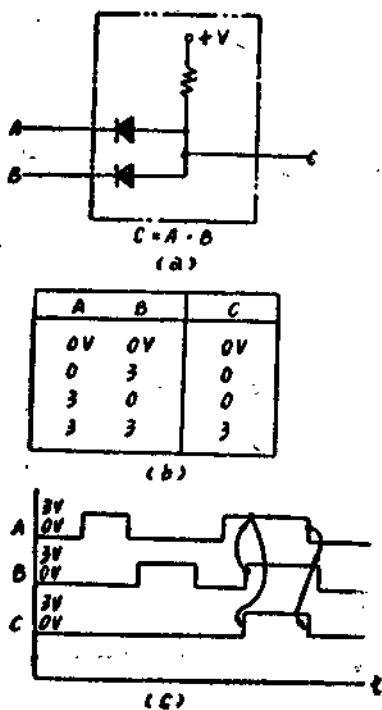


图2.3 逻辑乘元件 (AND)

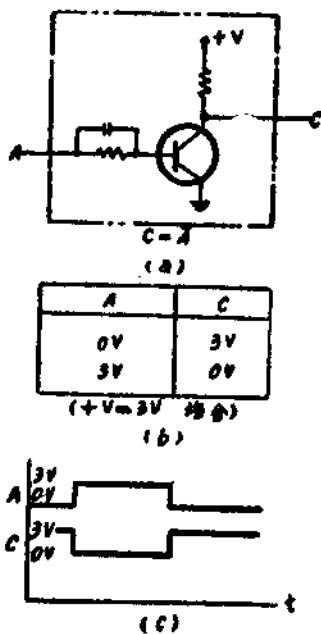


图2.4 逻辑否定元件 (NOT)

定的。例如图2.5,即使去掉输入A、B,

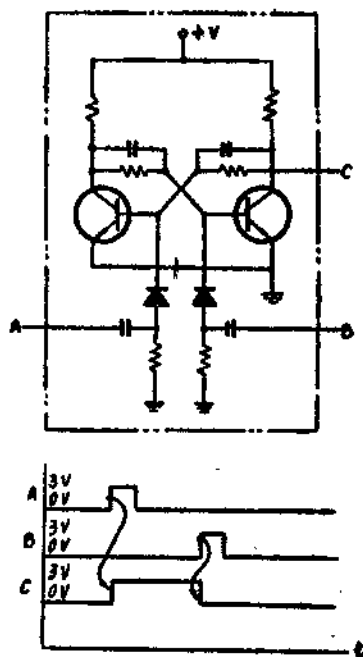


图2.5 寄存元件

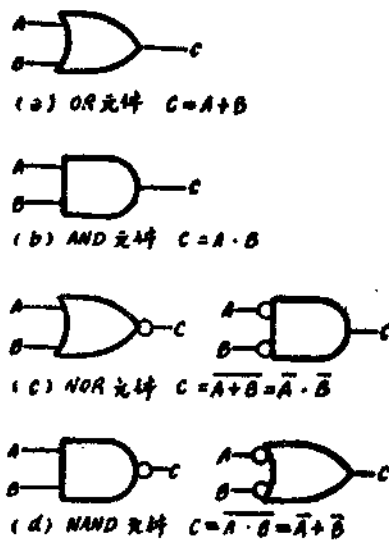


图2.6 逻辑符号举例

输出C仍保持输入A、B存在时的状态。

3. 用逻辑符号表示元件的方法

由于数字计算机使用的是二进逻辑,因此,即使不深究各元件的详细动作原

理，只要知道逻辑元件输入、输出端有无信号，或者电压高低的状态，就能够知道逻辑线路的功能。所以，代替图2.2(a)、图2.3(a)、图2.4(a)所示的线路图而使用表示出它们的逻辑功能的逻辑符号。图2.6示在MIL-STD-806B中规定的逻辑符号。图2.7是把前述全加器线路的逻辑式用逻辑符号来表示的逻辑图（ C_0 式经过化简——译者注）。图2.1(a)中逻辑单元的内容就是图2.7中所表示出来的那些元件。

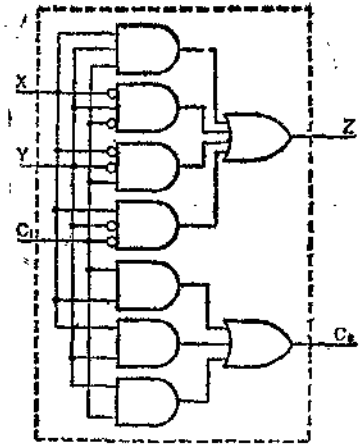


图2.7 全加器线路逻辑图

(四) 集成电路

1. 集成电路(IC)的分类

集成电路按制造方法的分类见表2.5。

集成电路按集成度则可分为以下三类：

类：

① 小规模集成电路 (SSI) 每一

集成片包含 2 ~ 4 个元件。

② 中规模集成电路 (MSI) 每一集成片包含几十个元件。

③ 大规模集成电路 (LSI) 每一集成片包含100个以上元件。

表2.5 集成电路按制造方法的分类

集 成 电 路	制 造 方 法
薄膜集成电路	构成电路的晶体管、二极管、电阻、电容等元件，以及元件相互间的连接线全部是通过把 1μ 以下厚的金属或金属氧化物等薄膜堆积起来而制成。
混合集成电路	兼用半导体技术和薄膜技术制成。
半导体集成电路	在一个或一个以上的半导体材料片上，先制成电气上相互绝缘的晶体管、二极管、电阻等电路元件，再在材料片表面搞出元件间的连接线。

2. 逻辑集成电路

现在作为逻辑元件使用的集成电路的种类和特征示于表2.6。在小计算机中使用最多的逻辑集成电路是TTL和DTL。这是因为这些集成电路：

- ① 动作速度比较高(10~30毫微秒)
- ② 价格低
- ③ 噪声容限大(约0.4伏~1伏)

④ 功耗小

⑤ 负载能力强

在要求比TTL、DTL动作速度高的场合，则使用CTL、CML(1~3毫微秒)或HTTL、STTL(3~6毫微秒)。MOSTL具有低功耗、高集成度等特点，因此能作为制造LSI的元件。

表2.6 逻辑集成电路的种类

项目 种类	信号迟后	噪声 容限	扇出	功耗
RTL	40 毫微秒	1.0伏	5	2毫瓦
DTL	20 "	0.9 "	6	12 "
TTL	10 "	0.8 "	12	15 "
CTL	3 "	—	15	60 "
CML	1.1~3 "	0.2 "	15	80 "
MOSTL	20~100 "	4 "	∞	1 "

RTL
电阻-晶体管逻辑

DTL
二极管-晶体管逻辑

TTL
晶体管-晶体管逻辑

CTL
互补晶体管逻辑

CML
电流方式逻辑

MOSTL
金属氧化物半导体晶体
管逻辑

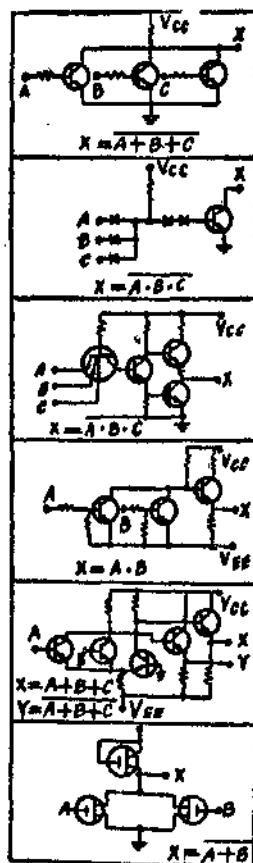


表 2.6 中各种逻辑集成电路图
(原文中CML电路图和逻辑式不一
致, 制版时未予改动——译者)

(五) 磁心存储器

存储器是用以存储数据和程序等的设备, 可作如图2.8的分类。

首先可以分为读写数据比较容易的读写存储器 (R/wM) 和写入数据后不易改变的只读存储器 (ROM)。存储器之中, 把中央处理装置里的为执行程序所需要的存储器叫做主存储器。主存储器的条件是:

- ① 能高速读写,
- ② 可靠性高,
- ③ 在停电等事故情况下, 信息不变,
- ④ 价格低

等等。作为硬件使用磁心、集成电路、磁性薄膜等各种存储器。现在, 使用最多的是磁心存储器。

1. 磁心存储器的特点

主要的方式和特点示于表2.7。表中的循环时间(读出一字和再写入所需时间)和存储容量是从经济性考虑的实用值。此外, 如3D4W中的D和W是英文词“Dimension”和“Wire”的第一个字母, 分别表示选择磁心的选择度和在一个环状磁心内通过的导线数。

2. 存储原理

存储是这样一回事: 使用具有图2.9所示磁滞回线矩形特性好的环状磁心, 用磁心内磁力线的方向规定数据的“1”和“0”。写入和读出是利用在穿过磁心的导线上流过电流实现的。根据导线的数目、电流的流动方向、读出信号的取出方法等, 有表2.7所示的各种方式。

3. 3度4线 (3D4W) 方式的工作原理