

〔美〕C·C·福斯特著 谢咏珪译

微型计算机 实时控制程序 设计入门

微型计算机实时控制 程序设计入门

〔美〕C. C. 福斯特 著
谢 詠 珪 译

北京师范大学出版社

微型计算机实时控制程序设计入门

〔美〕C.C.福斯特 著

谢 咏 珪 译

*

北京师范大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

煤炭印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：8 字数：164千

1984年7月第一版 1984年7月第一次印刷

印数：1—25,000

统一书号：13243·47 定价：0.98元

内 容 简 介

本书是美国麻省州立大学计算机科学系的一本教材，内容包括了微型计算机实时控制的基本问题：输入输出接口，中断系统，采样定理，数字滤波，闭环控制以及多路传输等。各部分既有通俗的理论叙述，又有生动具体的例子和实验练习，写得非常实用。本书适合做大学（非控制专业）或中专相应课程的教材，也适合各个领域对微型机控制应用感兴趣的科技人员作入门参考书。

序 言

如果你打算把数字计算机与实际联系起来，就必然要涉及到本书所讨论的一系列问题。我们对这些问题着眼于通盘的研究，而并不想给出解决各种具体问题的“药方”。你读完本书并完成了所述的实验后，就能对许多原先不了解的事物具备一种鉴识能力。具有这种能力的部分理由是我们将考虑足够的课题，它们能构成在电气工程或计算机科学中成熟的应用程序的基本部分。我们将研究简单中断及分级中断。将用不到10页的篇幅来讨论信号标志，其中包括一些插图（而一位著名的作者在这方面花费了将近80页）。书中将叙述各种端口、外围接口适配器（PIA）及定时器，这些都是中央处理器（CPU）与外界连接的标准硬件。我们将涉及模数和数模转换器、采样定理以及数字滤波器，其中每个课题本身都可能要花费大半学期的时间。

进行了上述内容后，我们将着手于闭环控制系统——基本反馈，微分和积分控制，非线性伺服机构及开关式系统。并且，还将涉及最优控制系统和自适应控制系统。

最后，我们将研究各种形式的多路传输、总线、通信以及分布式计算机系统。

显然（无须作过多的说明），要想用一本厚度不到10英寸的书来详细讲述所有这些内容是不可能的。那么我们将做些什么呢？我们将向你介绍一些课题，这些课题是作为一个计算机方面的行家所必不可少的。即使你从未在其他地方读过这些内容，当有人谈到“时分多路传输”或“比例控制”

时，你就不会一无所知了。

我们精简这些课题的一种方法是省略大部分数学内容。但在滤波器和反馈控制的讨论中，还不得不涉及某些微分方程，我们力图使它只作为课文的辅助而不是中心，你可以跳过这些内容而不会有太大损失。为了保持对数学的省略，我们甚至回避了所有对复数的使用。我们感到，不到十分之一的学生会从包含这些数学内容中得到益处，而不到百分之一的计算机爱好者会具有跟得上这些数学内容的能力和基础。

我们在麻省州立大学教这门“实时控制程序设计”课程已经两遍了，本书是经验的总结。这门课程是作为计算机科学的第三门课程，为二年级或三年级开设的，前两门课程是FORTRAN语言和汇编语言程序设计。本课程是为计算机科学专业的学生设置的，他们中的多数将会遇到的大概也就是这些课题。某些人会热衷于这个或那个课题，并在随后的几年中继续从事它，但多数人恐怕会在翻到最后一页时松一口气，并且祈求再也不必听到这方面的内容。

计算机爱好者也许比正规场合下的学生更需要这本书。因为就我们所知，把这些课题在较为实用的水平上加以论述的其他书籍的确很难找到。任何好的科技图书馆都有好几书架摆满了有关这些课题的各种书籍，但遗憾的是这些课本多数是不太容易理解的。

C. C. 福斯特

麻萨诸塞州，阿姆赫斯特

1981年5月

译者序

本书是美国麻省州立大学计算机科学系“实时控制程序设计”课程的教材。内容涉及微型计算机实时控制的基本问题：I/O接口、中断系统、采样定理、数字滤波、闭环控制、PID控制、最优和自适应控制、多路传输以及分布式计算机系统等。每一部分既有通俗的理论叙述，又有实验练习，既有软件，又有硬件，写得非常实用。

全书需要的预备知识不多，只要你对微型机（主要是单板机）的工作原理及汇编语言有个初步的了解，就可学习本书。不论你手头的微型机是何种型号，顺序学习书中的内容，进行书中的实验练习，定能较快地跨入微型机实时控制的大门。即使你暂时还没有可用的微型机，仔细揣摩书中的实验，也必将受益不浅。

本书书名原有一个副标题：被忽视的课题。译者在与福斯特等教授的交谈中了解到它的含义是：一、美国的微型计算机事业虽然发达，但与迅猛发展的商业应用（如电子游戏等）相比，工业技术等领域的实时控制应用是个被忽视的课题；二、微型机实时控制要求用户兼有硬件和软件的知识，这方面人才的培养在美国是有所忽视的。目前，我国的微型计算机应用事业正处于起步阶段，上述情况是值得借鉴的。

本书可作为大学（非控制专业）或中专相应课程的教材，也可供各个领域对微型机控制应用感兴趣的科技人员作入门参考书。

清华大学自动化系王选民和江泽同二位同志非常仔细地

审校了全书，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

限于译者水平，译文中还可能有不少漏误之处，恳切地希望得到批评指正。

译 者

1983年8月

于北京师范大学无线电电子学系

目 录

第一章 基本中断	1
查询	1
单中断	8
练习1-1 单中断 产品包装站模拟	14
程序说明	17
程序设计提示	17
边沿与电平的比较	19
清除中断	20
消除开关抖动	22
可清除中断	24
练习1-2 消除抖动开关及可清除中断	25
双中断	27
练习1-3 双中断	31
第二章 端口	32
外设连接	32
识别你的代号	34
输入输出端口	36
单次定时器	38
重复计数器	38
事件计数器	39
练习2-1 单次定时器用作重复计数器	40
串行端口	40
练习2-2 串行输出	42
外围接口适配器 (PIA)	42

PIA中断线	45
练习2-3 外围接口适配器 (PIA)	48
练习2-4 I_{2A} 代替 I_{1B}	49
第三章 多级中断	50
中断嵌套	50
练习3-1 两级嵌套中断	53
程序设计提示	54
屏蔽中断	55
练习3-2 可屏蔽四级中断系统	58
分级中断	59
矢量中断	60
第四章 速率匹配	63
信号标志	63
练习4-1 生产者—缓冲器—消费者	65
程序设计提示	65
信号联络	67
键盘	68
打印机	73
IEEE-488总线	74
第五章 回声和回响	78
回声	78
有限而快速的乘法	83
输出—数模转换	85
模数转换	91
练习5-1 模数及数模转换 回声和回响	93
第六章 采样定理	96
频闪中止效应	97
观察它的另一种方法	98

正弦波采样	101
练习 6-1 采样定理、混迭现象	103
非正弦输入	105
第七章 数字滤波器及其他滤波器	107
低通滤波器	107
练习7-1 低通数字滤波器	116
双重滤波	119
高通滤波器	122
带通滤波器	125
练习7-2 带通数字滤波器	126
脉冲响应	126
第八章 闭环	131
某些术语的定义	139
简单伺服机构的分析	142
二阶伺服	145
练习8-1 伺服机构。力矩—电压曲线	148
练习8-2 闭环控制系统	151
第九章 各种形式的控制	154
微分反馈	154
练习9-1 微分反馈	156
比例—微分控制	156
练习9-2 PD (比例—微分)控制	156
积分控制	157
练习9-3 积分控制	159
练习9-4 PID (比例—积分—微分) 控制	159
开关式控制 (BANG-BANG CONTROL)	159
练习9-5 开关式控制	160
第十章 最优控制和自适应控制	161

相平面	161
八种特性	164
开关式伺服的再研究	168
最优控制	170
练习10-1 测量转换曲线	172
练习10-2 闭环 最优控制	173
自适应控制	174
练习10-3 自适应最优控制	175
复杂的自适应	176
第十一章 登月舱	178
伺服电动机	178
步进电机	179
火箭	180
位置的直接测量	181
速度测量	184
运动方程	184
与驾驶员的联系	185
练习11-1 登月舱模拟	186
第十二章 有限路径的通信	187
单通道控制	188
调幅 (AM)	189
调频 (FM)	190
脉冲宽度调制 (PDM)	193
脉冲编码调制 (PCM)	197
多路传输 (MULTIPLEXING)	198
频分多路传输	198
时分多路传输	200
分道多路传输	200

总线组织	200
多总线结构	201
环形网络	202
星形网络	203
公共总线	204
单一主导者 (One Master)	204
无主导公共总线	205
练习12-1 总线控制	207
音乐大师	208
舞台监督	210
演奏者	211
指挥	213
合并指挥	214
共用端口	217
直接存储器存取	222
附录 1 我们的模型计算机的说明	224
附录 2 作者简介	227
索引	228

第一章 基本中断

本章将介绍一些方法，使计算机在执行某件任务的同时能很快地响应外界其他事件。在许多实际场合中，存在着必须由计算机监视的好几个外部事件，这样，在计算机基于前一些事件作必要的计算时，如果又检测到某种特定格式的信号，它就会作出一定的反应。

查询

让我们首先从一个极简单的情况着手（虽然它完全可以不采用计算机）。假设XYZ制造公司生产一种产品，并把每144个这种产品包装成箱。我们的任务是对通过装配线终点的产品数目计数，并且每当144个产品通过后响一次铃提醒包装工人在装配线末端换一个箱子。图1-1简要地表示了这种情形。每当一个产品通过，开关闭合，计算机检测到这一闭合（我们将在后面看到计算机是如何检测的），并把“箱中产品”这个计数加1。当计数达到144，计算机将使铃响并把

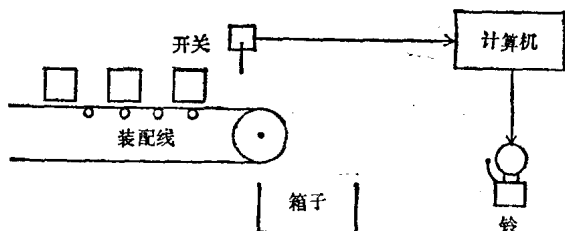


图 1-1 产品装配线计数器

计数复位到零以重新开始计数。图1-2表示了完成这个任务的一个程序。这个程序是用叫做“FOSSOL”的语言写的，这种语言并不存在于任何实际计算机中，而是我们特意造出来的，它具有为了讨论本书中各种例子和问题所需要的特性。附录中列出了它的指令组以及我们的模型计算机的简要说明。

INIT,	LDAIM	0	
	STA	COUNT	计数器清0.
LOOP,	INPUT	SWITCH	0 = 断开, 1 = 闭合.
	BZA	LOOP	等待开关闭合.
	LDA	COUNT	
	ADDIM	1	
	STA	COUNT	计数加1.
	SUBIM	144	
	BMA	LOOP	箱子满了吗?
	LDAIM	1	
	OUTPUT	BELL	满了, 响铃.
	LDAIM	0	
	STA	COUNT	计数复0.
	LDAIM	0	
	STA	BELL	停止响铃.
	JMP	LOOP	重复.

图 1-2 产品计数器的FOSSOL程序

* * *

等效的指令

下面列出了FOSSOL、6502和Z-80三者中近似等效的指令。通常还有另外的或更好的方法来达到同样的结果。在不存在单条等效指令的地方，我们用了两条指令来做同样的工作。

FOSSOL 6502

LDA *a* LDA *a*
 LDX *a* LDX *a*
 LSP *a* LDX *a* TXS
 ADD *a* CLC ADC *a*
 SUB *a* SEC SBC *a*
 AND *a* AND *a*
 IOR *a* ORA *a*
 STA *a* STA *a*
 INC *a* INC *a*
 DEC *a* DEC *a*
 JMP *a* JMP *a*
 JSR *a* JSR *a*
 BZA *a* BEQ *a*
 BPA *a* BPL *a*
 BNA *a* BNE *a*
 BMA *a* BMI *a*
 INPUT *a* LDA *a*
 OUTPUT *a* STA *a*
 SEI SEI
 CLI CLI
 RTS RTS
 RTI RTI
 HLT —
 INX INX
 ASR LSR ($m \geq 0$)
 TXA TXA
 TAX TAX
 PUSHA PHA
 PUSHX TXA PHA

Z-80

LD A, (*a*)
 LD IX, (*a*)
 LD HL, (*a*) LD SP, HL
 LD HL, *a* ADD A, (HL)
 LD HL, *a* SUB (HL)
 LD HL, *a* AND (HL)
 LD HL, *a* OR (HL)
 LD (*a*), A
 LD HL, *a* INC (HL)
 LD HL, *a* DEC (HL)
 JP *a*
 CALL *a*
 JP Z, *a*
 JP P, *a*
 JP NZ, *a*
 JP M, *a*
 IN A, (*a*)
 OUT (*a*), A
 DI
 EI
 RET
 RETI
 HALT
 INC IX
 SRA A
 LD A, IX*
 LD IX, A*
 LD IX, A PUSH IX*
 PUSH IX

POPA	PLA	POP	IX	LD	A,IX*
POPX	PLA TAX	POP	IX		

对于6502及Z-80的产品计数器程序

作为一个例子，我们把图1-2的 FOSSOL 程序译成实际计算机语言。假定SWITCH 是一个输入端口，而BELL是一个输出端口。我们把计数保存在变址寄存器X中。

6502		Z-80
INIT, LDXIM 0		INIT, LD IX,0
LOOP, LDA SWITCH	LOOP, IN	A,(SWITCH)
BEQ LOOP	JP	Z,LOOP
INX	INC	IX
CPX 144	LD	A,IX
BMI LOOP	CP	144
LDAIM 1	JP	M,LOOP
STA BELL	LD	A,1
LDAIM 0	OUT	(BELL),A
STA BELL	LD	A,0
JMP INIT	OUT	(BELL),A
COUNT, .BYT 0	JP	INIT
	COUNT, .BYT 0	
	*	*

图1-2的程序实际上存在好些问题：我们假定了开关只闭合一段短时间——足够长，使我们能检测到开关的闭合，但又不能太长，以致于连续两次检测到这个闭合。我们又假

- 由于Z-80中A和IX的位数不同，这两条传送指令并不存在，这几处的对应是牵强的。下面的程序中也有类似问题。

—译者注—