

- 837624

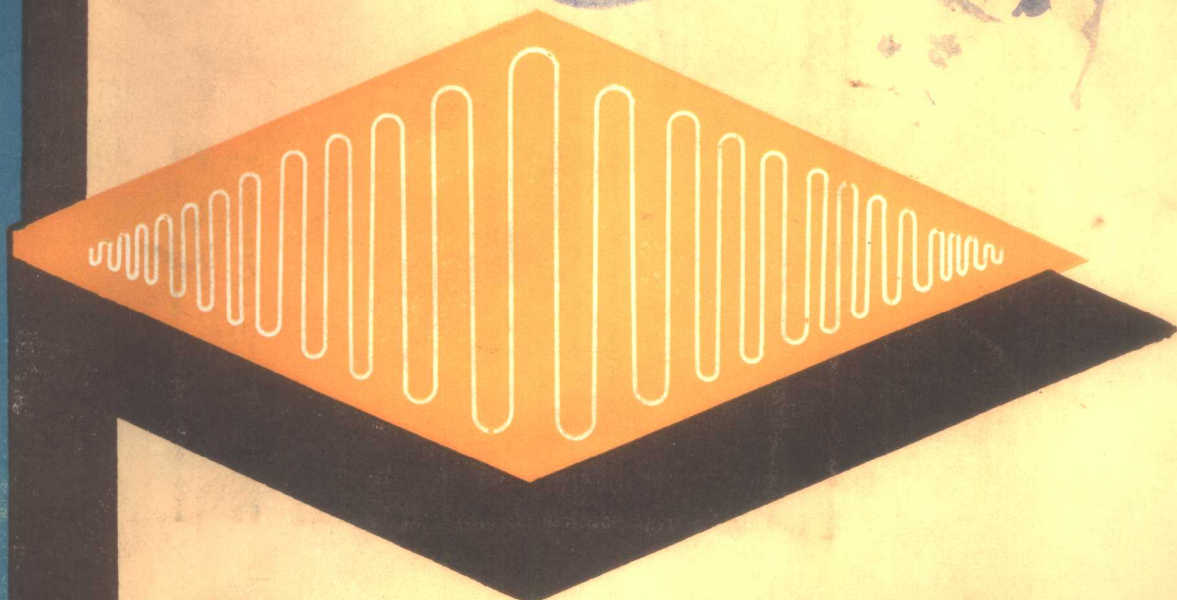
5087

7/2742

计算机 控制系统

[瑞典]K·J·奥斯特洛姆 B·威特马克 著

王晓陵 陈朗 朱克定 李殿璞 译



● 哈尔滨船舶工程学院出版社 ●

计 算 机 控 制 系 统

K. J. 奥斯特洛姆 B. 威特马克 著

王晓陵 陈 朗

朱克定 李殿璞

译

哈 尔 滨 船 舶 工 程 学 院 出 版 社

内 容 简 介

本书阐述计算机控制系统的理论和设计方法。共十五章：前六章主要介绍计算机控制发展概况和理论基础，包括采样理论、系统数学模型、离散时间系统分析及干扰信号模型；第七章至第十二章讨论计算机控制系统设计方法，包括连续时间系统设计与离散时间系统设计、应用系统状态空间模型和输入-输出模型的最优设计方法和极点配置设计方法；第十三章和第十四章介绍与自适应控制有关的内容，包括最小二乘辨识方法和自适应控制算法；第十五章讨论了计算机控制系统设计应注意的实际问题。

本书适于作为自动控制专业高年级本科生和研究生教材，也可供从事自动控制的科研人员及工程技术人员参考。

计 算 机 控 制 系 统

王晓陵 陈朗 朱克定 李殿璞 译

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
北京市新华书店发行
哈尔滨船舶工程学院印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张24.125 字数599千字

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数：1—3,000册

统一书号：15413·016 定价：4.00元

译 者 的 话

随着自动控制技术的发展,计算机控制已为越来越多的控制工程所采用。早期,人们将计算机控制系统看作是连续时间控制系统的数字实现。现在看来,这种观点是不足取的,这样构成控制系统将不能获得比连续时间控制系统更为优越的系统。还有,用连续时不变线性系统理论不能充分解释计算机控制系统中出现的许多实际问题,例如频率折叠现象等。实践证明,在某些场合,计算机控制可以优于连续控制。例如,能在短时间内准确达到稳定状态而实现无振荡控制。这就是说,计算机控制系统有其特有的规律。因此,需要建立相应的理论基础,并应用它来获得品质优良的控制系统。

本书是一本系统介绍计算机控制系统基本理论和设计方法的教科书。著者 K. J. 奥斯特洛姆 (K. J. Åström) 先生是瑞典隆德技术学院 (Lund Institute of Technology) 自动控制系教授。该书原稿曾经著者本人及一些大学,如美国麻省理工学院等作为教材使用,著者广泛汲取了各方面的意见,于1984年重新整理出版。书中概括了近年来的一些成果,内容丰富、新颖。我们深信著者的这本书将对控制技术领域产生广泛的影响。

为便于国内读者阅读,我们对原著中的疏漏之处作了必要的补正,并标以译注。还要指出,本书采用了“能达到性”概念,这是国内大多数控制文献中所未见的术语。就其定义来看,“能达到性”相当于普通所用的“完全能控性”概念。为保持原著的理论结构,我们对此未作改动。相信读者能正确理解本书提到的“能控性”和“能达到性”概念。

本书共十五章。王晓陵译前六章,李殿璞译第七章至第九章,陈朗译第十章至第十二章,朱克定译最后三章及附录。陈朗对全书作了总校。郭镇明同志在本书翻译过程中曾给予大力支持,并对译文提出不少宝贵意见,在此表示感谢。由于水平所限,译文中难免有不妥之处,希望读者批评指正。

译 者

1985年8月

前 言

在六十年代，控制工程师必须掌握模拟计算技术，因为模拟计算机不仅用于控制系统仿真，而且还是重要的计算工具。控制系统也采用了机械的、气动的和电子的模拟技术。

今天，数字计算机和微电子学的惊人成就正促使控制技术飞快发展。当初，数字计算机只是作为复杂过程控制系统的部件。现在，由于它体积小、价格低，在单个控制回路的调节器中也可以采用数字计算机。在一些领域，数字计算机的性能胜过它们的模拟伙伴，并且价格更便宜。

数字计算机还越来越多地作为控制系统的分析和设计工具。因此，控制工程师拥有比过去更加有效的工具。由于超大规模集成（VLSI）技术的进展，数字计算机仍在迅速发展。可望，在将来会有重大的技术突破。

这些进展不断地更新着控制系统的分析、设计和实施方法。最初，只不过是把早期的模拟设计转变成新技术。但现在，人们已认识到：挖掘新技术的全部潜力，会得到更大的效益。令人乐观的是：在最近30年里控制理论已取得重大进展。曾有一段时间，采用新理论导出的调节器很不现实，只有几个特殊场合——主要是航天或高级过程控制例外。由于微电子学的革命性进展，甚至在一些基础应用中也能实施高级调节器了。用日渐流行的交互设计方法及合理的代价进行分析和设计控制系统已成为可能。

本书旨在介绍与计算机控制系统分析和设计有关的控制理论，重点是基本概念和思路。假设在进行计算和仿真时可用带有合适软件的数字计算机，那么许多繁琐细节就可留给计算机去做。控制系统设计也只进行到以高级语言程序实施的地步。

下面介绍本书内容安排。计算机控制发展概况见第一章。同章还载有理论发展综述，以便读者对此有些概括了解（不了解历史的读者可反复阅读它）。

采样是计算机控制系统的一个基本特征，将在第二章中讨论。一些必要的数学模型分别在第三、四和六章中给出。第三章给出从计算机角度观察的模型，而第四章论述从过程角度观察的模型。如无干扰，就无控制问题可言；因此，寻找合适方法描述干扰特征是个重要任务，这将在第六章中完成。

第五章给出分析和仿真的主要方法。许多细节问题仅用分析方法很难解决，所以仿真有着重要的作用。在本书附录中介绍一种叫做 Simnon 的交互仿真语言，全书采用这种语言来编制程序。将这些程序翻译成其它仿真语言并不困难。由于出现了非常有效的仿真工具，所以仿真观念和技术迅速地发展。进行仿真一定要配合分析，因为分析能给出幅度数量级的估计值，以保证仿真结果合乎情理，同时，没有必要提供进行非常精确计算的手段，因为这可以由计算机轻而易举地完成。第七章~第十二章用来讨论设计问题。第七章是概论。第八章讨论模拟设计法的转译。第九章讨论确定性系统应用状态空间模型的极点配置设计问题。第十章应用输入-输出模型讨论同样的设计问题。第十一

章和第十二章讨论基于卡尔曼滤波、线性二次型和线性二次高斯控制的最优设计方法。第十一章采用状态空间模型，而第十二章采用输入-输出模型。

许多新设计方法的一个共同特点，是都需要过程模型及其干扰模型。第十三章讨论怎样才能获得这些模型。第十四章简要论述参数自适应控制系统。这可以看作是第九章~第十二章的设计方法与第十三章的递推辨识方法的结合。第十五章讨论实现计算机控制系统的各种问题。

在叙述控制问题时，采用连续时间形式给出所有模型和提出性能要求。这样做与物理过程联系紧，从而便于应用。应用状态空间技术的论述部分都适用于多变量系统；而使用多项式方法论述输入-输出模型的部分仅适用于单输入-单输出的场合。确定性的和随机的分析和设计问题均予讨论。

设计系统时，以几种观点看待同一个问题很有裨益。本书旨在为计算机控制系统设计奠定良好基础，有必要涉猎广泛的课题。本书在详尽论述与概要说明之间作了适当的平衡。然而要全面地讨论第六、十一、十二、十三和十四章的题目要占很大篇幅，各自都要写一整本书。

在采样数据理论中，时常用同一个符号 z 同时表示复变量和前移算子。我们发现，这常使学生困惑不解，因而改用符号 q 表示前移算子。这与连续时间系统中，以 s 作复变量，以 $p = d/dt$ 作微分算子的用法相似。记号 q^{-1} 用来表示后移算子。

本书可以有多种用途。第二、三、五、七、八、九、十和十五章及6.1~6.3节适于做本科生采样数据系统课的教材。第四、六、七和九~十五章的详尽论述可构成研究生计算机控制系统设计课程的核心。我们曾以第三、四、五、八、九、十、十三、十四和十五章为基础给工业界人士授课。在各种场合，我们都发现插入计算机仿真、辅导讲解和实验课很有益，与此有关的一些建议见习题部分。

致谢

在本书写作期间，我们有幸与许多人士有过愉快的交往。特别要感谢采样数据理论的老前辈朱莱 (E. I. Jury)。他耐心地阅读了几种稿本，给了很多启发和建议。还要感谢隆德技术学院的哈刚德 (Per Hagander)、Automatica 杂志的编辑阿克塞拜 (George Axelby) 和澳大利亚国立大学 (堪培拉) 的安德森 (Brian Anderson)。他们都提出过许多有益的批评。麻省理工学院的豪普特教授 (Paul Houpst)、科内尔的约翰逊教授 (Rick Johnson) 和麻省大学的埃利奥特教授 (Howard Elliot) 曾采用原稿进行教学。从他们那里，我们得到了很好的反馈。我们感谢许多对各种稿提出过有益评论的学生。最后，我们要向打印本书稿本的达内加德 (Eva Dagnegård) 和图斯金斯基 (Agneta Tuszyński) 及为本书绘制插图的奈尔松 (Doris Nilsson) 表示感谢。

K. J. 奥斯特洛姆
(Karl J. Åström)
B. 威特马克
(Björn Wittenmark)

目 录

第一章 计算机控制

1.1 引言	(1)
1.2 计算机技术	(2)
1.3 计算机控制理论	(5)
1.4 固有采样系统	(9)
1.5 理论发展史	(11)
1.6 参考文献	(13)

第二章 连续时间信号采样

2.1 引言	(16)
2.2 采样机理描述	(16)
2.3 采样定理	(17)
2.4 重构	(18)
2.5 混淆或频率折叠	(20)
2.6 采样周期选择的实际问题	(24)
2.7 小结	(25)
2.8 习题	(25)
2.9 参考文献	(26)

第三章 面向计算机的数学模型——离散时间系统

3.1 引言	(28)
3.2 连续时间、状态空间系统的采样	(28)
3.3 状态空间模型的变换	(36)
3.4 输入-输出模型	(38)
3.5 z 变换	(45)
3.6 极点和零点	(48)
3.7 采样速率的选择	(52)
3.8 习题	(53)
3.9 参考文献	(57)

第四章 面向过程的模型

4.1 引言	(59)
4.2 计算机控制系统	(59)
4.3 调制模型	(60)
4.4 频率响应	(65)

4.5	脉冲传递函数体系	(71)
4.6	多速率采样	(78)
4.7	习题	(80)
4.8	参考文献	(81)
第五章 离散时间系统分析		
5.1	引言	(82)
5.2	稳定性	(82)
5.3	能控性、能达到性和能观性	(91)
5.4	简单反馈回路的分析	(97)
5.5	习题	(104)
5.6	参考文献	(106)
第六章 干扰模型		
6.1	引言	(108)
6.2	减少干扰的影响	(108)
6.3	经典干扰模型	(110)
6.4	分段确定性干扰	(112)
6.5	干扰的随机模型	(114)
6.6	连续时间的随机过程	(130)
6.7	采样随机微分方程	(135)
6.8	结束语	(136)
6.9	习题	(136)
6.10	参考文献	(138)
第七章 设计概论		
7.1	引言	(140)
7.2	操作上的问题	(141)
7.3	构造原则	(143)
7.4	自上而下方法	(144)
7.5	自下而上方法	(146)
7.6	简单回路的设计	(148)
7.7	结束语	(150)
7.8	习题	(151)
7.9	参考文献	(151)
第八章 模拟设计的转译		
8.1	引言	(153)
8.2	可供选择的近似替代法	(153)
8.3	数字 PID 控制器	(158)
8.4	状态反馈再设计	(167)
8.5	频率响应设计法	(169)
8.6	结束语	(170)

8.7	习题	(170)
8.8	参考文献	(172)
第九章 状态空间设计法		
9.1	引言	(174)
9.2	用状态反馈和极点配置法解调节问题	(174)
9.3	观测器	(182)
9.4	输出反馈	(187)
9.5	随动问题	(189)
9.6	结束语	(192)
9.7	习题	(192)
9.8	参考文献	(194)
第十章 输入-输出模型极点配置设计		
10.1	引言	(195)
10.2	问题表述	(195)
10.3	解法	(197)
10.4	一个代数问题	(200)
10.5	设计步骤	(201)
10.6	对建模误差的灵敏度	(206)
10.7	与其它设计方法的关系	(208)
10.8	实用方面的问题	(211)
10.9	设计举例	(215)
10.10	结束语	(221)
10.11	习题	(221)
10.12	参考文献	(222)
第十一章 最优设计方法: 状态空间法		
11.1	引言	(224)
11.2	线性二次型控制	(228)
11.3	预报及滤波原理	(236)
11.4	线性二次型高斯控制	(241)
11.5	实用方面的问题	(243)
11.6	结束语	(244)
11.7	习题	(244)
11.8	参考文献	(247)
第十二章 最优设计方法: 输入-输出法		
12.1	引言	(249)
12.2	问题表述	(249)
12.3	最优预报	(253)
12.4	最小方差控制	(257)
12.5	LQG 控制	(264)

12.6 实用方面问题.....	(274)
12.7 结束语.....	(282)
12.8 习题.....	(282)
12.9 参考文献.....	(287)
第十三章 辨识	
13.1 引言.....	(289)
13.2 数学建模.....	(289)
13.3 系统辨识.....	(290)
13.4 最小二乘原理.....	(292)
13.5 递推计算.....	(295)
13.6 例题.....	(300)
13.7 小结.....	(303)
13.8 习题.....	(303)
13.9 参考文献.....	(304)
第十四章 自适应控制	
14.1 引言.....	(306)
14.2 自校正控制.....	(306)
14.3 分析.....	(308)
14.4 自适应控制的其它方法.....	(312)
14.5 自适应技术的应用和滥用.....	(316)
14.6 结束语.....	(318)
14.7 习题.....	(318)
14.8 参考文献.....	(319)
第十五章 数字控制器的实施	
15.1 引言.....	(322)
15.2 综述.....	(322)
15.3 前置滤波和计算延迟.....	(324)
15.4 非线性执行器.....	(328)
15.5 操作情况.....	(332)
15.6 数值问题.....	(335)
15.7 编程.....	(345)
15.8 结束语.....	(349)
15.9 习题.....	(350)
15.10 参考文献.....	(354)
附录A 实例	(356)
附录B 矩阵函数	(360)
附录C Simnon——交互式仿真程序	(363)
附录D 定理10.1的证明	(374)

第一章 计算机控制

目的：介绍计算机控制，提供计算机控制技术和理论发展的一些历史背景。

1.1 引言

采用数字计算机实施控制系统的情况日益增长，因此，深入了解计算机控制系统很重要。人们可以把计算机控制系统看作是近似处理的模拟控制系统，然而，这种方法未能利用计算机控制的全部潜力，是一种下策。充其量只能得到和模拟控制同样的效果。应当学会计算机控制系统，而充分发挥它的全部潜力。本书旨在提供计算机控制基础知识。

计算机控制系统的示意图如图 1.1 所示。过程输出 $y(t)$ 是时间连续信号。输入由

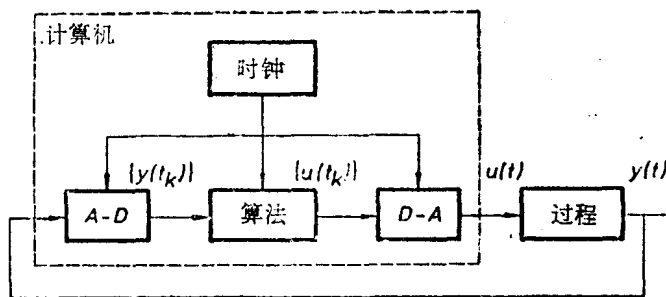


图 1.1 计算机控制系统示意图

模数 (A-D) 转换器转换成数字型信号。A-D 转换器可以包括在计算机内，也可以作为一个分离的单元，因人而异。信号转换在时刻 t_k 完成。然后计算机将转换后的信号 $\{y(t_k)\}$ 理解为一列数字，用某种算法处理这些测量值，给出一列新的数字 $\{u(t_k)\}$ 。由数模 (D-A) 转换器将它转换成模拟信号。请注意，在 A-D 转换和 D-A 转换之间，系统以开环方式工作。各项操作都由计算机的实时时钟来同步。数字计算机的操作在时间上是有序的，每个操作都要占用一些时间。然而，D-A 转换器又必须产生一个连续时间信号。通常的办法是在两次转换之间保持控制信号不变。计算机控制系统含有连续时间信号和采样的或离散时间的信号。这类系统习惯上叫做采样数据系统，在本书中，它是计算机控制系统的同义词。

不同类型信号的混合有时会引起麻烦。在多数场合，只需要描述系统在采样瞬间的行为。这样，只研究离散点上的信号。这类系统称为离散时间系统。离散时间系统与数列打交道，因此，自然要用差分方程来表示这类系统。

本书旨在讲述与计算机控制系统的分析和设计有关的控制理论。本章提供一些背景

材料。计算机控制技术的发展概貌在 1.2 节中给出。1.3 节讨论理论的必要性。举例说明线性时不变连续时间系统理论不能充分解释计算机控制系统。其中一例，不仅表明计算机控制系统能用连续时间理论及近似化技术来设计，而且表明利用计算机控制全部潜力的技术能够显著地改善控制系统。1.4 节举出一些固有采样系统的例子。1.5 节概述采样数据系统理论的发展史。

1.2 计算机技术

将数字计算机作为控制系统部件的概念出现在 1950 年前后。最初，打算在导弹和飞机控制中应用它。研究表明，当时无法使用通用数字计算机，因为它的体积太大、耗能太多而且不可靠。因此为早期航天应用研制了专用数字计算机——数字微分分析机 (DDA)。

计算机控制的重大成就是在加工工业方面。图 1.2 展示 25 年里用于过程控制的计算机增加的情况，表明计算机控制发展的进程。

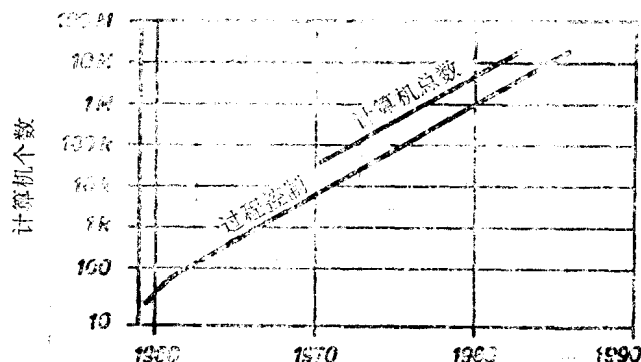


图 1.2 工业过程控制计算机增长情况。图中还示出计算机总数以便比较

在过程控制中使用数字计算机的思想发端于五十年代中期。1956年3月，Thomson Ramo Woolridge (TRW) 航空公司同 Texaco 公司签订可行性研究合同，开始了认真的工作。经初步讨论，决定在得克萨斯州的亚瑟港炼油厂对聚合装置进行调查研究。TRW 和 Texaco 的一组工程师，花费了30个人年的工作量，作了详尽的可行性研究。为该装置设计了使用 RW-300 计算机的计算机控制系统。这套控制系统于1959年3月1日投入使用。该系统控制着26个流量、72个温度、3个压力和3个位置。它的基本功能使反应器的压力最小，确定在5个反应器供料中的最优分配，根据催化剂活度实测值控制热水流量，确定最优闭合循环。

TRW 的开拓性工作受到了许多计算机厂商的重视，他们意识到自己产品有广大潜在市场。多种多样的可行性研究开始了，开创了朝气蓬勃的发展局面。这些努力的成果表现为图 1.2 所示的增长情况。

为便于讨论，把计算机控制的令人瞩目的发展过程划分成四个阶段：

开创阶段 ≈1955

直接数字控制阶段 ≈1962

小型计算机阶段

≈1967

微型计算机阶段

≈1972

计算机控制的发展纷纭繁杂，很难给出确切的划分时间。在各种应用领域之间和不同工业之间，计算机控制发展迥异，同时又有明显的重叠。上述时间是指新概念首次出现的时间。

开创阶段

TRW 和 Texaco 的成果在加工工业、计算机厂商和研究机构中产生了重大影响。工业界看到了增进自动化的潜在手段；计算机制造业发现了新的市场；各大学意识到新的研究领域。计算机厂商急于掌握这门新技术，而且很想了解正经的过程控制计算机应是什么样的，因此，他们立即进行许多可行性研究。在整个六十年代可行性研究延续不断。

当时使用的计算机系统速度慢、价格高而且不可靠。早期计算机使用真空管。1958年前后的计算机典型参数是：加法时间是1毫秒，乘法时间是20毫秒，中央处理机平均故障间隔时间（MTBF）是50~100小时。要想充分利用这类昂贵的计算机，应使它们执行更多的任务。由于这类计算机的可靠性太差，所以它们只能通过将指令打印给操作员或改变模拟调节器的设置量来控制过程。这类监督操作模式叫做操作指南或设置点控制。

当时计算机的主要任务包括寻找最优工作条件、编排日程表和生产计划、编制产品和原材料消耗报告。寻找最优工作条件被看作是静态最优化问题，解最优化问题时需要过程的数学模型。所使用的模型是由物理模型和由过程数据的回归分析导出的，相当复杂。人们还曾尝试在线最优化。

对过程缺乏了解常会阻碍工作进展，而且将控制问题简单地当作静态最优化问题也嫌不足。应该有动态数学模型。在可行性研究中，大部分精力用于建模。由于缺乏良好的建模技术，建模过程相当费时。这种状况刺激了对系统辨识方法的研究。

在可行性研究期间获得了大量经验。人们方才明白，过程控制对计算机提出的快速响应的要求导致中断部件的产生。中断部件是一种特殊的硬件装置，它允许外来事件中中断计算机正在进行的工作，使其处理更紧迫的任务。当时，缺乏许多需要的传感器，而且老企业引进新技术也有不少困难。

各种学术会议和杂志密切关注着取得的进展，一系列阐述过程控制中计算机应用的文章发表在“Control Engineering”杂志上。到1961年3月，共安装了37个系统，一年后，系统的数目增加到159个。应范围包括钢铁厂控制、化学工业的控制、和电厂发电机的控制等。在各种工业中，计算机控制的发展速度并不平衡。在六十年代和七十年代，都不断地进行着可行性研究。

数字直接控制

早期的控制计算机装置以监督模式工作，或为操作指南或为设置点控制。这两种场合都需要通常的模拟控制设备。1962年，英国的帝国化工研究院（ICI）提出了与此迥异的方法。过程控制的全部模拟设备由一台 Ferranti Argus 计算机所取代，这台计算机直接测量224个变量并控制着129只阀。这标志着过程控制新纪元的开始：模拟技术完全由数字技术所取代，而系统的功能相同。创造数字直接控制（DDC）这个名词，是

强调计算机直接控制过程。1962年,典型的过程控制计算机能在100微秒内将两个数相加,在1毫秒内将两个数相乘,MTBF 大约为1000小时。

投资是技术改造的重要因素。模拟技术的投资随控制回路数目线性增加。计算机的起始投资很大,但增加一个附加回路所追加的投资却很小。所以,对于大规模系统,数字系统反倒便宜。另一个优点是能显著改善操作员与计算机的联络,即一块操作控制板可以代替一片模拟仪器。在ICI系统中,控制板相当简单,只有一个数字显示器和几个按钮。

灵活性是DDC系统的另一个优点。修改模拟系统需要重新布线,而修改计算机控制系统只需重新编制程序。数字技术还提供许多便利条件:易于实现一些控制回路间的相互作用,可以使控制回路的参数成为工作条件的函数。采用特定的DDC语言可以简化程序编制过程,用户不必了解编程技术,只需将输入变量、输出变量、调节器种类、比例因子和调节器参数放入一个表格里。对使用者来说,这样的系统好象是把常用调节器连结在一起。这种系统的缺点是难于实施非常规的控制策略。多年来,正是这个原因阻碍了控制技术的发展。

DDC是计算机控制系统发展中的重要转折,注意力从早期系统的监督功能转移到基本控制功能上。1963~1965年间取得了显著进展。DDC系统的指标由用户和卖主共同制定。广泛讨论了与采样周期选择和算法有关的问题,以及关键的可靠性问题。尽管DDC系统常常比相应的模拟系统昂贵,人们还是很快地接受了DDC控制概念。

小型计算机

在六十年代里,数字计算机技术有很大发展。集成电路技术的进展满足了对过程控制计算机提出的要求。这时,计算机的体积小了,速度快了,可靠性高了,而且价格便宜了。小型计算机这个名词是为当时出现的新型计算机而创造的。设计应用小型计算机的高效过程控制系统已成为可能。

小型计算机技术和在开创阶段、DDC阶段积累的过程控制经验相结合,引起计算机控制应用的迅速增长。一些厂商生产出专用过程控制计算机。该阶段的典型计算机的字长为16位,主存贮器为8~124k字节。通常用磁盘驱动器作辅助存贮器。DDC1700是该阶段的一种典型计算机,加法时间是2微秒,乘法时间是7微秒,中央处理机的MTBF大约为20,000小时。

该阶段计算机控制迅速增长的一个重要因素是数字计算机控制以小“单元”形式出现。对于小型工程和小型课题,也能采用计算机控制。小型计算机的出现使过程计算机的总数从1970年的5,000台增加到1975年的50,000台。

微型计算机

小型计算机仍然是一个相当大的系统。尽管它的功能不断增加,价格不断下降。1975年,小型计算机主机的价格仍需10,000美元左右。这意味着,一个小型系统的价格很少低于100,000美元,对于大量的控制问题,计算机控制仍旧是可望而不可即。但是,随着微型计算机在1972年出现,一台具有1975年小型计算机功能的卡片计算机的价格,在1980年跌到500美元。而且1980年的数字计算功耗低,约值50美元。这就意味着,在无论多么小的应用问题中,计算机控制都是一个选择方案。

在八十年代,随着超大规模集成(VLSI)技术而出现的微电子学有着惊人的发

展,可以肯定,今后计算机控制的应用将有更大增长。微型计算机已经冲击了控制设备;微型计算机正在取代模拟硬件,甚至作为单回路的控制器;小型 DDC 系统已经采用了微型计算机,在这些系统中引用了彩色图象显示器,操作联络有了很大的改善;具有大量微处理机的分级控制系统已经建成;采用微型计算机的专用调节器已经设计出来了。

展望

过去的进展惹人注目,展望将来更加诱人。计算机过程控制的发展有四个重要方面:

- 过程知识;
- 测量技术;
- 计算机技术;
- 控制理论。

关于过程控制和过程动态特征的知识一直在缓慢地增长着。应用过程控制系统后,收集数据、进行试验和分析结果都很方便,这样,掌握过程特性的可能性显著增加。系统辨识和数据分析方面的进展也为认识过程动态特性提供了有价值的信息。

测量技术的进展难于预测,利用现有的技术还可以做许多事情。通过数学模型综合几个不同传感器的输出信号的可能性令人感兴趣。也有可能利用计算机进行自动校准。新型传感器的出现总会带来新的希望。

可以预计,计算机技术会因采用 VLSI 技术而有惊人的发展,价格功能比将明显下降。八十年代末期的微型计算机运算功能将胜过七十年代后期的大型主机。在显示技术和信息交换方面也将有显著的改进。

到目前为止,程序设计还是阻碍发展的一环。从1950年到1970年,程序设计效率提高很有限。在七十年代末期,仍然有许多计算机控制系统采用汇编码编制程序。在计算机控制领域内,通常提供表格进入软件来克服一些程序设计问题。DDC 系统的用户得到一个所谓的 DDC 程序包,用户只须填表格就可以开发 DDC 系统,因此开发一个系统轻而易举。然而程序包的广泛使用却妨碍了计算机控制的发展。这是因为使用 DDC 很方便,另创新路却需煞费心机,因而只有确实有效的方法才被试用。

在1955~1970年这一时期,控制理论有了很大进展。尽管可行性研究表明,应用这些理论可以明显改善控制系统,但在现存计算机控制系统中却很少采用。程序设计费用高是原因之一。正如前面所提到的那样,采用卖主提供的程序包只需做少量工作,而要另劈新途必须付出很多精力。一些迹象表明,这种状况可望改变。具有象 BASIC 那样交互语言的个人计算机开始进入过程控制。利用交互语言试验新的东西就很容易。在很大程度上,那些应用实时 BASIC 的人在做这类事情。可惜的是,很难用 BASIC 编写出可靠的系统。随着更好的交互语言的出现,情况将会改变。

如此,众多迹象指出了计算机控制系统方面的令人注目的前景,迎接它的最好准备是掌握本书讲述的理论。

1.3 计算机控制理论

图 1.1 是计算机控制系统示意图。这个系统包括五个主要部份:过程、A-D 转换器、D-A 转换器、控制算法和时钟。时钟控制着系统的工作节拍。实测信号转换为数

字形式的时刻叫做采样瞬间；两次相邻采样之间的时间称为采样周期用 h 表示。通常采用周期采样，当然也有其它形式的采样。例如，只在输出信号改变达到一定量时进行采样，也可以对一个控制系统中不同的回路采用不同的采样周期，这种采样叫做多速率采样。

计算机控制系统与通常的模拟反馈系统的最突出的差别是控制规律由数字计算机实施。正因为如此，一类使用方便的控制规律迅速增加，例如，在控制器中采用非线性运算、合并使用逻辑运算和进行大量运算都很方便。可以用表格贮存数据，以便积累有关系统特性的知识。

需要计算机控制系统理论吗？

一个良好的理论应能解释象图 1.1 所示系统是如何工作的，又该怎样设计。显然，如果采样周期足够小，一个采样系统会象连续时间系统一样工作。在合理的条件下，这种认识肯定是正确的。那么，计算机控制系统还需要一套专门的理论吗？

一些例子表明，即使被控过程是一个线性、时不变、连续时间的系统，也不可能用时不变线性系统理论彻底理解如图 1.1 所示的系统。

例 1.1 时间相关

假定我们要作一个一阶延迟的校正器。这个校正器可以用 A-D 转换、数字计算机和 D-A 转换来实现。一阶微分方程可近似成一阶差分方程。图 1.3 展示这个系统的阶跃响应。它清楚地展示了响应对阶跃出现时刻的依赖关系，这个系统不是时不变的。只有当输入信号的延迟是采样周期的整数倍时，输出信号的延迟才与输入信号的延迟相同。

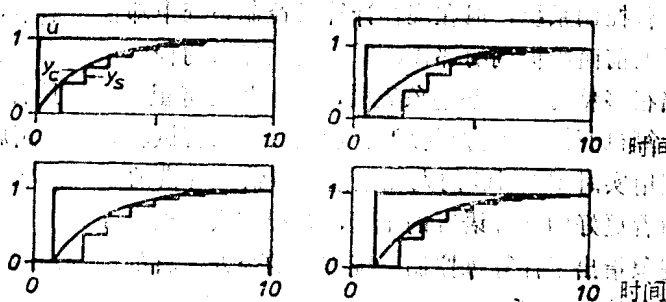
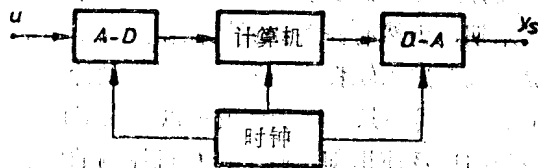


图 1.3

a. 数字滤波器框图；

b. 阶跃响应 y_s ，相应的连续时间系统的响应 y_c 。一阶延迟是用数字计算机实现的，图中，输入阶跃与首次采样瞬间有不同的延迟。

图 1.3 所示现象与系统被时钟控制有关 (参照图 1.1)。该系统对外部激励信号的响应依赖于外部激励信号与计算机系统内部时钟同步的状况。

周期采样的计算机控制系统是周期系统。采用足够高的采样速率, 可以使周期性效应充分少。然而, 为彻底了解计算机控制系统的工作情况, 必须考虑采样系统的周期特性。

例 1.2 高次谐波

众所周知, 对一个稳定、线性的、时不变的、连续时间系统加入一个正弦输入信号, 在过渡过程结束后, 系统给出与输入信号频率相同的正弦信号。本例将频率为 4.9 赫的信号加到例 1.1 中的系统上, 图 1.4 显示计算机控制系统承受周期激励时可能发生的事。显然, 图 1.4 中的现象是线性时不变系统理论解释不了的。计算机控制系统输出信号中的差拍是输入频率和采样过程中产生的高频相干涉引起的。

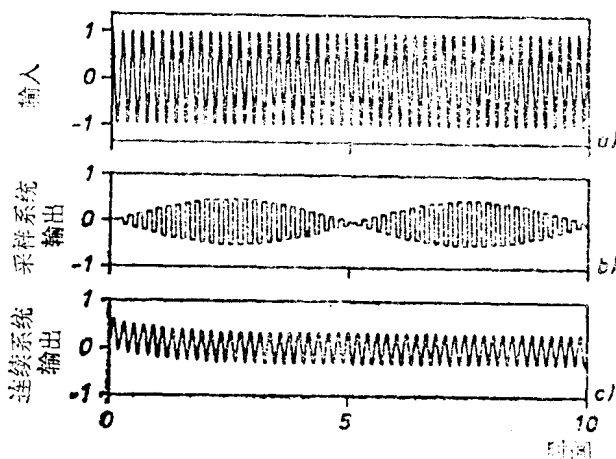


图 1.4 例 1.1 中采样系统的正弦激励
a. 4.9 赫的正弦输入信号; b. 采样系统输出, 采样周期 0.1 秒;
c. 相应的连续时间系统的输出。

确实有许多采样系统的问题能用线性时不变理论来解释。但是, 上述例子表明, 采样系统不能用那种理论体系充分解释, 因而拥有别的分析手段很有益。

在解控制器设计问题时, 先以通常的连续时间控制理论设计控制规律, 然后采用合理的离散时间逼近。这种方法肯定行得通; 下面就是一个例子。

例 1.3 离散时间近似化

一个二次积分装置很容易用状态反馈控制。直截了当的办法是先用连续时间理论计算出反馈增益, 再用计算机控制实施状态反馈。如果采样周期足够小, 可以期望, 就所有实际效果而言, 数字控制具有连续时间控制的性能。如图 1.5 所示, 情况确实如此。减小采样周期, 可使数字控制更接近连续时间调节器。

例 1.3 的结果会诱惑人们得出一个错误的结论, 即不需要采样系统理论。然而, 计算机控制系统确实比相应的连续时间系统工作得好, 正因为如此, 采样系统理论很有用。下面的例子进一步阐明这一点。