



[瑞典] K. J. 奥斯特隆姆 著
B. 威顿马克

计算机控制系统 理论与设计

科学出版社

计算机控制系统 理论与设计

K. J. 奥斯特隆姆 著
〔瑞典〕 B. 威顿 马克

周兆英 刘中仁 林喜荣 译

~~李德成校~~

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是瑞典隆德工学院的“计算机控制”课程教材,是由国际控制理论界的知名学者奥斯特隆姆和他的同事威顿马克共同撰写的。本书主要讲述控制理论的计算机实现理论、设计方法和实现中的一些实际问题。书中有些内容是作者多年研究的成果。

全书共十五章和三个附录。第一章是绪论。第二章讨论连续时间信号的采样原理和方法。第三、四、六章介绍基本的数学模型,包括面向计算机和面向过程的数学模型,以及扰动模型。第五章介绍离散时间系统的分析方法和仿真技术。第七章至十二章讨论设计问题,包括设计概述,模拟设计的转换,基于状态空间模型和基于输入-输出模型的极点配置设计方法和最优设计方法。第十三章和十四章分别讲述系统辨识和自适应控制。第十五章讲述数字控制器的实现问题。附录主要是介绍 Simnon 交互式仿真语言,这个程序包是由隆德工学院自动控制系统开发的。

本书可供高等院校自动控制、计算机科学与应用、系统工程,以及相近专业的学生、研究生和教师参考。也可供从事自动控制和计算机技术的有关科研人员和工程技术人员阅读。

K. J. Åström B. Wittenmark

COMPUTER CONTROLLED SYSTEMS

Theory and Design

Prentice-Hall, Inc., 1984

计算机控制系统

理论与设计

〔瑞典〕 K. J. 奥斯特隆姆 著

B. 威顿马克 著

周兆英 刘中仁 林喜荣 译

李清泉 校

责任编辑 刘兴民 袁放尧

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年7月第一版

1987年7月第一次印刷

印数: 0001—6,300

开本: 787×1092 1/32

印张: 19 3/8

字数: 438,000

统一书号: 15031·823

本社书号: 4838·15-8

定价: 4.85 元

译校者前言

控制理论包括经典控制理论和所谓的“现代”控制理论。经典控制理论以单变量系统为主要对象，用频域法分析和综合这类控制系统的动态特性。现代控制理论的对象不限于单输入-单输出系统，它以时域法为主，研究的基本内容是最优控制、最优估计、随机控制、系统辨识，以及自适应控制等。随着科学技术的进步和人们认识能力的提高，经典控制理论和现代控制理论的内容和方法已在互相渗透。就现代控制理论的发展来看，它一开始就与计算机技术息息相关，因此这种渗透现象已使整个控制理论与计算机技术紧密联系起来。种种迹象表明，控制理论和计算技术的结合正在有力地影响着和推动着科学技术的发展，正在各个不同领域引起一系列的变革，到处都可见到这种结合产生的硕果，其前景十分诱人。不妨认为，计算机控制理论和技术集中地体现了这两者的结合，它正被广泛地用于各种生产现场，并已取得明显的经济效益。人们利用这种控制技术可以完成常规控制技术无法完成的任务，可以达到常规控制技术无法达到的高性能指标。毫无疑问，在我国的技术改造和四化建设事业中，计算机控制理论和技术的作用将会越来越大，要求掌握这门技术的人将会越来越多。因此，及时出版一批高质量的计算机控制技术书籍是符合客观发展的需要。

奥斯特隆姆（Åström）和威顿马克（Wittenmark）合著的《计算机控制系统理论与设计》一书，是瑞典隆德（Lund）工学院的大学生和研究生教材，它比较系统地讲述

了计算机控制的基本理论、设计方法和实现中的一些实际问题。本书主要介绍现代控制理论的计算机实现理论和设计方法，其中有些内容是作者多年研究的成果。例如，扰动模型理论，输入-输出模型的设计方法，以及自校正调节器等。由于多种原因，在现代控制理论还不如经典控制理论那样得到广泛应用的今天，在计算机控制在我国还不象模拟控制那样普及的情况下，这样的内容自然是很有吸引力的。本书在讲述基本理论和设计方法时，主要限于单输入-单输出系统，尽量少用高深的数学理论，比较重视工程概念，书中安排了许多例题、仿真实验结果和习题。这样将有益于读者理解本书的内容。象作者第一本著作——《随机控制理论导论》一样，本书每章之后都对有关参考文献进行了简要评价。这有助于引导读者找到他需要进一步阅读的参考材料。总之，本书是颇具特色的。

奥斯特隆姆教授是国际控制理论界的知名学者，他在随机控制、系统辨识、自适应控制和控制理论的代数方法等几个方面都有重要贡献。他长期致力于把控制理论与实际相结合的研究工作，并与他的同事和学生一道，成功地把现代控制理论用于船舶驾驶、惯性导航，以及造纸、化工和矿山等众多工业对象上。应当承认，在理论联系实践方面，在当今世界知名的控制理论学者中，他处在领先地位。他提出的自校正调节器便是一个突出的例子。

鉴于上述原因，我们将本书译出，以飨读者。

本书第一章至第五章，以及附录由林喜荣同志翻译，第六至第十章由刘中仁同志翻译，第十一至十五章由周兆英同志翻译。罗秀芝和笠宏两位同志曾参加过附录的初译工作。全书经周兆英同志初校，最后由李清泉同志负责对全书进行统一校对。

限于译校者水平，译文中定有许多不妥之处，敬请读者批评指正。

译校者

1985年6月14日于清华大学

前 言

在六十年代，控制工程师必须掌握模拟计算技术。这是因为当时是用模拟计算机进行控制系统仿真和作为主要的计算工具的。力学、气动力学以及电子学中的模拟技术也在控制系统中得到了应用。

由于数字计算机和微电子学的迅速发展，现在的情况已经大不相同了。数字计算机最初是作为复杂过程控制系统的一个组成部分。然而，现在由于数字计算机体积小、价格低廉，它也正在用于单个控制回路的调节器中。在不少领域里，数字计算机不仅在性能上优于模拟计算机，而且价格更加便宜。

作为控制系统分析和设计的工具，数字计算机的应用也日益增长。现在和过去相比，控制工程师已经拥有许多更加有力的手段。由于超大规模集成技术的进展，数字计算机的发展正方兴未艾。因此，在不久的将来，可望会取得重大的技术进步。

鉴于上述的发展，控制系统的分析、设计和实现方法正在发生急剧的变化。起初，人们只是把较早的模拟化设计“转换”成新的数字化设计。但后来认识到，如果充分地挖掘这种新方法的潜力，就能获得更多的结果。在过去的三十年中，控制理论亦获得了重大的发展。在一段时间内，除了宇航或先进过程控制等少数几种特殊情形外，要实现由这种新的控制理论导出的调节器是一件极不现实的事情。然而，由于微电子学方面的变革性发展，现在即使对于普通的应

用，也可以采用先进的调节器。交互设计手段正日益变得可用，因此利用这种设计方法，就有可能以适当的代价对控制系统进行分析与设计。

本书的宗旨是打算介绍与计算机控制系统设计和分析有关的控制理论，重点放在介绍一些基本概念和基本思想上。如果有适当的软件供数字计算机进行计算与仿真，那么许多冗繁的具体工作便可留给计算机去完成。控制系统设计也达到利用高级语言编制的计算机程序就能实现的阶段。

本书的编排如下：第一章介绍计算机控制发展的概貌，并且综述了理论发展的过程，目的在于对发展历史有一个明确的了解（对于不清楚发展历史的人，必定会重复这种过程）。

第二章讨论采样问题，采样是计算机控制系统的基本特性。第三、四章和第六章介绍所需的基本数学模型。第三章介绍的模型是站在计算机角度来看的，而第四章介绍的模型是面向过程的。没有扰动就不存在控制问题。因此，重要的事情是寻找某种合适的方式来表征扰动，第六章就是讨论这个问题的。

第五章介绍系统分析与仿真的主要方法，由于许许多多的细节问题仅用分析方法很难回答，于是仿真就起着重要的作用。Simnon语言是本书始终使用的一种交互仿真语言，在本书附录中将对它进行介绍。把这种语言程序转换成其它的仿真语言并不十分困难。有了强有力的仿真方法，就会急剧地改变人们的看法，推动技术的进步。把仿真与分析结合起来是很重要的。通过分析可以作出数量级的估计，以确保仿真结果是合理的。同时不必寻求精确的计算手段，因为计算机很容易做到这点。从第七章到第十二章都是讨论设计问题。第七章对设计问题作了概述；第八章讨论模拟化设计方法的转

换；第九章讨论以极点配置为基础的确定性系统之状态空间方法；第十章用输入-输出模型讨论同一问题；第十一章和第十二章讨论以卡尔曼滤波器、线性二次型控制，以及线性二次型高斯过程控制为基础的最优设计方法。第十一章按照状态空间模型来讨论，第十二章按照输入-输出模型来讨论。

上述许多新的设计方法的一个特点是，它们都需要有过程及其干扰的数学模型。第十三章讨论如何获得这些模型；第十四章主要处理参数自适应控制系统。我们可以把这种处理看作是第九章至第十二章介绍的设计方法和第十四章介绍的递推辨识方法之结合。第十五章研究计算机控制算法实现中的各种问题。

我们是这样来组织计算机控制理论的，即全部的数学模型和性能指标都按连续时间来给定，这样就与物理学联系密切而易于应用。只要用到状态空间方法，就一定包含多变量系统的内容。但是，我们采用多项式方法处理输入-输出模型时，只限于单输入-单输出的情形。在系统的分析与设计中，确定性和随机性两个方面都要加以讨论。

在设计某个系统时，从不同的观点来观察问题往往是很好处的。由于本书的目的是要为计算机控制系统设计打下一个良好的基础，所以必须包含范围广泛的课题。在详细介绍和概述这两个方面我们作出了合理的平衡。但是，第六、十一、十二、十三章和十四章还是要求全书完全包括各个课题。

在采样数据理论中，习惯于用同一符号 z 既表示复变量，也表示正向平移算子。我们发现，这常常使学生混淆不清。所以我们引进符号 q 表示正向平移算子。这点和在连续时间系统中使用 s 作为复变量，而用 $p = d/dt$ 作为微分算子

的用法相类似。符号 q^{-1} 用来表示后向平移算子。

本书可以按不同的方式选用。第二、三、五、七、八、九、十章和第十五章，以及第六章的一、二、三节可以安排在大类生采样数据系统课程中学习；第四、六、七章和第九章至十五章中的详细分析部分可以作为研究生计算机控制系统设计的中心内容。我们曾根据第三、四、五、八、九、十、十三、十四章和十五章的内容为工程界读者安排过课程。上述各类读者对象中，如果能掌握计算机仿真技术，听一些补充讲座，做一定的实验，我们发现这很有帮助。这方面的一些建议是通过解题手册的方式提出的。

目 录

译校者前言

前言

第一章 计算机控制	1
1.1 引言	1
1.2 计算机技术	3
1.3 计算机控制理论	10
1.4 固有采样系统	16
1.5 理论的发展过程	20
参考文献	24
第二章 连续时间信号的采样	28
2.1 引言	28
2.2 采样机理的描述	29
2.3 采样定理	30
2.4 信号重构	33
2.5 假频现象或频率卷叠	35
2.6 选择采样周期时的一些实际考虑	42
2.7 小结	44
2.8 习题	44
参考文献	46
第三章 面向计算机的数学模型：离散时间系统	48
3.1 引言	48
3.2 连续时间状态空间系统的采样	49
3.3 状态空间模型的变换	62
3.4 输入-输出模型	65
3.5 Z 变换	76

3.6	极点和零点	80
3.7	采样速率的选择	86
3.8	习题	88
	参考文献	93
第四章	面向过程的模型	95
4.1	引言	95
4.2	计算机控制系统	96
4.3	调制模型	97
4.4	频率响应	105
4.5	脉冲传递函数表示法	114
4.6	多速率采样	125
4.7	习题	129
	参考文献	130
第五章	离散时间系统的分析	131
5.1	引言	131
5.2	稳定性	132
5.3	能控性、能达性和能观测性	146
5.4	简单反馈回路的分析	155
5.5	习题	165
	参考文献	168
第六章	扰动模型	170
6.1	引言	170
6.2	扰动影响的减小	171
6.3	经典扰动模型	174
6.4	分段确定性扰动	178
6.5	扰动的随机模型	182
6.6	连续时间随机过程	205
6.7	随机微分方程的采样	212
6.8	结论	213
6.9	习题	214
	参考文献	217

第七章 设计概述	219
7.1 引言	219
7.2 运行问题	221
7.3 构造原理	226
7.4 自顶向下的方法	227
7.5 自底向上的方法	232
7.6 简单回路的设计	235
7.7 结论	240
7.8 习题	240
参考文献	241
第八章 模拟设计的转换	242
8.1 引言	242
8.2 一些可供选择的近似方法	243
8.3 数字PID控制器	250
8.4 状态反馈再设计	264
8.5 频率响应设计方法	268
8.6 结论	269
8.7 习题	269
参考文献	272
第九章 状态空间设计方法	274
9.1 引言	274
9.2 基于状态反馈实现极点配置的调节问题	274
9.3 观测器	287
9.4 输出反馈	296
9.5 伺服问题	299
9.6 结论	304
9.7 习题	304
参考文献	307
第十章 基于输入-输出模型的极点配置设计方法	309
10.1 引言	309
10.2 问题的表述形式	309

10.3	解	313
10.4	一个代数问题	318
10.5	设计步骤	320
10.6	相对建模误差的灵敏度	328
10.7	与其它设计方法的关系	331
10.8	实际问题	336
10.9	设计举例	342
10.10	结论	350
10.11	习题	351
	参考文献	353
第十一章 最优设计方法: 状态空间法		355
11.1	引言	355
11.2	线性二次型控制	361
11.3	预报和滤波理论	375
11.4	线性二次型高斯控制	383
11.5	实际应用方面的问题	386
11.6	结论	388
11.7	习题	388
	参考文献	393
第十二章 最优设计方法: 输入-输出法		395
12.1	引言	395
12.2	问题的表达形式	396
12.3	最优预报	401
12.4	最小方差控制	408
12.5	LQG控制	420
12.6	实际应用方面的问题	435
12.7	结论	447
12.8	习题	448
	参考文献	455
第十三章 系统辨识		457
13.1	引言	457

13.2	数学建模	458
13.3	系统辨识	459
13.4	最小二乘原理	462
13.5	递推计算	468
13.6	例题	476
13.7	结论	479
13.8	习题	479
	参考文献	481
第十四章 自适应控制		482
14.1	引言	482
14.2	自校正控制	483
14.3	分析	486
14.4	实现自适应控制的其它方法	492
14.5	自适应技术的合理应用	498
14.6	结论	502
14.7	习题	503
	参考文献	504
第十五章 数字控制器的实现		507
15.1	引言	507
15.2	概述	508
15.3	前置滤波和计算时延	511
15.4	非线性执行机构	517
15.5	运行方面的问题	524
15.6	数值问题	530
15.7	程序设计	544
15.8	结论	552
15.9	习题	553
	参考文献	558
附录		561
A	例题	561
B	矩阵函数	567
C	SIMNON——一种交互仿真程序	571
	参考文献	587
D	定理10.1的证明	588
人名及名词索引		590

第一章 计算机控制

这章介绍本书的内容，并回顾计算机控制技术和理论发展的某些历史背景。

1.1 引言

人们越来越多地用数字计算机来实现控制系统，因此，充分理解计算机控制系统是十分重要的。我们可以把计算机控制系统看作是模拟控制系统的一种近似，但是，这种看法是贫乏的，它没有充分发挥计算机控制的潜力，顶多只能获得与采用模拟控制时一样好的结果。与此相反，我们可以学习计算机控制系统，进而利用计算机控制的全部潜力。本书的主要目的就是介绍所需要的基础知识。

计算机控制系统可以用图 1.1 的简图来描述。过程输出 $y(t)$ 是连续时间信号，用模-数变换器 (A-D) 把此输出

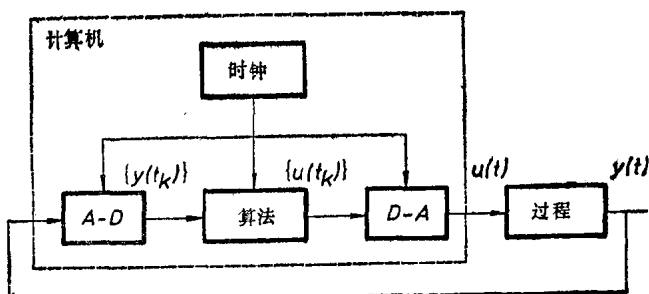


图1.1 计算机控制系统原理图

8710584

转换成数字形式。根据人们的选择, A-D变换器可以包括在计算机中, 也可看作是一个独立单元。这种转换在采样时刻 t_k 时完成。计算机把这个转换后的信号 $\{y(t_k)\}$ 作为一个数列, 并用某种算法来处理这个测量序列, 进而给出一个新的数列 $\{u(t_k)\}$ 。再用数-模变换器(D-A)把这个序列转换成模拟信号。注意在A-D变换和D-A变换期间, 系统工作在开环状态。上述过程都由计算机里的实时钟进行同步控制。数字计算机按照时序操作, 每次操作都要花一定时间。可是D-A变换器必定产生连续时间信号, 为此, 通常在转换期间内保持控制信号恒定不变。计算机控制系统既含有连续时间信号, 也含有采样信号, 即离散时间信号。传统上把这类系统称为采样数据系统, 在本书中, 这个术语将作为计算机控制系统的同义语使用。

不同类型的信号混合在一起, 有时会引起麻烦。但是在大多数情形下, 只描述系统在采样瞬间的状态就足够了。这时我们感兴趣的仅仅是离散时间上的信号, 这类系统将称为离散时间系统。离散时间系统是处理数值序列的, 所以表示这类系统的一种天然方法就是采用差分方程。

本书的目的在于介绍与计算机控制系统的分析和设计有关的控制理论。本章介绍一些背景材料。在第1.2节中, 简单地回顾了计算机控制技术的进展情况; 第1.3节论证需要一种适当的理论。我们举了一些例子来说明, 采用线性时不变连续时间系统的理论, 并不能完全理解计算机控制系统。有一个例子说明, 不但可以用连续时间理论及其近似方法来设计计算机控制系统, 而且也可采用其它能充分发挥计算机控制潜力的技术来获得实质性的改进; 第1.4节提出一些本身就是采样系统的例子; 第1.5节概述了采样数据系统理论的发展。