

国外电子信息科学经典教材系列

计算机控制系统 ——原理与设计 (第三版)

Computer-Controlled Systems
Theory and Design
(Third Edition)

[瑞典] Karl J.Åström Björn Wittenmark 编著

周兆英 林喜荣 刘中仁 等译
李清泉 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

www.phei.com.cn

国外电子信息科学经典教材系列

计算机控制系统

——原理与设计

(第三版)

Computer-Controlled Systems

Theory and Design

Third Edition

[瑞典] Karl J. Åström Björn Wittenmark 编著

周兆英 林喜荣 刘中仁 等译

李清泉 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是计算机控制领域的经典教材。全书共分 13 章,系统地阐述了计算机控制的基本原理、设计方法以及实现和应用中遇到的实际问题。书中纳入了多年的教学经验,在讲解基本原理和设计方法时,尽量避免运用高深的数学理论,更加重视工程概念和在实际问题中的应用。书中安排了许多例题、仿真实验结果和习题,帮助读者理解。

本书主要作为大学计算机控制相关专业的教材和教学参考书,也可供工程技术人员参考。

Translation copyright © 2000 by Publishing House of Electronics Industry.

(Computer-Controlled Systems: Theory and Design, 3rd ed.)

Copyright © 1997 by Prince Hall, Inc. All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Prentice Hall Inc., a Simon Schuster Company.

本书中文简体专有翻译出版版权由 Simon & Schuster 下属的 Prentice Hall, Inc. 授予电子工业出版社。该专有出版版权受法律保护。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统:原理与设计:第3版/(瑞典)奥斯特隆姆(Åström, K. J.)著;周兆英等译.-北京:电子工业出版社,2001.4

(国外电子信息科学经典教材系列)

书名原文:Computer-Controlled Systems: Theory and Design

ISBN 7-5053-6586-X

I. 计 II. ①奥… ②周… III. 计算机控制系统-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第16698号

丛 书 名: 国外电子信息科学经典教材系列

原 书 名: Computer-Controlled Systems: Theory and Design, 3rd ed.

书 名: 计算机控制系统——原理与设计(第三版)

编 著 者: [瑞典]Karl J. Åström Björn Wittenmark

译 者: 周兆英 林喜荣 刘中仁等

审 校 者: 李清泉

责任编辑: 张 毅 zhangyi@phei.com.cn

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 河北省涿州桃园装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 32 字数: 819千字

版 次: 2001年4月第1版 2001年4月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6586-X

TP·3648

印 数: 6000册 定价: 42.00元

版权贸易合同登记号 图字: 01-2000-3014

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页问题者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换,电话:010-68279077。

出版说明

电子信息科学与技术的发展令人目不暇接，它正以主力军的姿态站在知识经济的最前列，引导着各行各业向着新的技术领域进军，影响着人们的工作和生活方式朝着现代化迈进。在电子信息科技领域里，除了计算机这一热门话题外，还有我们大量熟悉的、天天都会接触到的信息，如通信、网络、雷达、广播电视、自动控制、电磁干扰、信息安全，等等。在每一个专业领域，新技术、新产品都层出不穷。日新月异的科技发展，强烈地吸引着各方面的专家学者，及一切从事专业技术研究、生产、教学、管理、使用、维护的工程技术人员，他们执着地从国内外的技术文献和图书刊物里搜寻自己感兴趣的内容，不断地汲取新知识，增进才干、创造业绩。特别是正在从事教育或学习的院校师生，非常需要了解国外电子信息科学教育方面的发展，以使教与学更好地面向四个现代化，面向世界。为了满足读者的要求，我们电子工业出版社推出了这套“国外电子信息科学教材系列”丛书。

这套丛书的遴选是严格的，首先是选择了美国的 Prentice Hall 出版公司等在世界很有影响的高校教材出版商，他们几十年来致力于教育图书的出版，其电子信息科技类教材在美国为众多大学所采用，并拥有不少各专业的资深作者和经典名著，在世界上产生了很大的影响。其次，我们把自己策划和准备引进选题的英文原版，请国内一些著名高等院校的学者教授予以评论挑选，有些还先期影印发行，以便广泛征求意见。在此基础上，我们约请在北京地区的清华大学、北京大学、北京邮电大学、北京航空航天大学，上海地区的上海交通大学、复旦大学，南京地区的南京大学、解放军通信工程学院等名牌院校中在教学科研第一线的教师参加翻译工作。他们中间许多都是博士生导师和各专业的学科带头人，也有年轻的教师和博士。他们对原稿认真进行翻译加工，对其中一些表述不清甚至出错的地方也作了慎重地推敲或更正。这套丛书能高质量地与读者见面，应该感谢各位译者和审校者的辛勤劳动。

像任何事情一样，我们这项工作也会有不尽人意的地方。所以，在这套丛书出版之际，特别希望广大读者能给予指正、建议。我们将会陆续引进和出版新书，充实到这套丛书中来，以飨读者。

电子工业出版社

译者序

由奥斯特隆姆 (Åström, K. J.) 和威顿马克 (Wittenmark, B.) 合著的《计算机控制系统——原理与设计》，是瑞典隆德 (Lund) 理工学院的大学生和研究生教材。本书是根据 1997 年该书的第三版译出的。与前两版相比，第三版的内容和结构都进行了很大的调整，作者改写了一半以上的内容，主要是增加了近年来计算机控制系统在理论和应用方面取得的最新研究成果，删去了过时的内容，但篇幅没有增加，从原来的 15 章改为 13 章，使全书更具先进性、逻辑性和实用价值。

本书比较系统地阐述了计算机控制的基本理论、设计方法，以及在实现和应用中遇到的许多实际问题。主要介绍了计算机控制的现代理论、设计方法、实现技术，以及分析方法和工具等，其中许多内容是作者多年研究的成果，如代数理论和设计方法、扰动模型理论，以及实现技术等等。作者在撰写本书时纳入了多年的教学经验，在讲解基本理论和设计方法时，都尽量避免使用高深的数学理论，比较重视工程概念、实际问题和工程应用，书中还安排了许多例题、仿真实验结果和习题。所有这些都将是有益于读者理解此书的内容。同作者的另外两本著作——《随机控制理论导论》和《自适应控制》一样，作者对书中每章末的参考文献都作了简要评价，这无疑将有助于引导读者找到进一步阅读的参考资料。总之，本书是颇具特色的经典高校教材。自它问世以后，已受到很多读者和有关专家的好评。在 1993 年悉尼的 IFAC (International Federation of Automatic Control, 国际自动控制联合会) 世界代表大会上，本书获得了“IFAC Control Engineering Textbook (IFAC 控制工程教科书)”奖。

奥斯特隆姆教授是国际控制界享有盛名的学者，他在随机控制、系统辨识、计算机控制、自适应控制和控制理论的代数方法等诸多方面都作出了重要的贡献。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起解决了理论实现中的一系列实际问题，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，在理论联系实际方面，他是当今世界知名的控制理论学者中的佼佼者。由于他在自动控制方面的杰出贡献，ASME (American Society of Mechanical Engineers, 美国机械工程师学会) 和 IFAC 分别在 1985 和 1987 年授予他 Rufus Oldenburger 和 Giorgio Quazza 奖章。

鉴于上述原因，特将此书第三版译成中文，供高等院校有关专业的师生、工程技术人员和对计算机控制有兴趣的读者参考。

本书前言、目录、第 1~3 章、第 7 章、例题、矩阵，以及索引由林喜荣和林緬翻译，第 4、6、8、10 章由刘中仁翻译，第 9、11、12、13 章由周兆英和熊沈蜀翻译，第 5 章由潘敏翻译，最后由李清泉教授对全书进行了审校。

限于译者水平，译文中定有许多不妥之处，敬请读者批评指正。

前 言

微电子技术的突破性进展使得现今设计的控制系统几乎都建立在微处理器和高级微控制器的基础之上。采用计算机控制系统，不但能获得新的功能，而且还能得到高于模拟系统的性能。新的软件工具也极大地改善了分析和设计控制系统时的工程效率。

本书的目的 本书提供为有效地分析和设计计算机控制系统所需的必要的洞察力、知识和理解力。

新的版本 本书为第三版，主要是基于技术水平的发展，和从教育界、学术界和工业界所取得的经验而对前几版进行修订。内容有了较大调整，一半以上经过了重新编写。计算机控制系统理论及应用上的进步，以及想加强设计方面的内容的愿望促成了本修订版。本修订版中已经编入了许多新的结果。经过认真地修剪和重新改写，现在已能把新的内容包括进来而又无需扩大本书的篇幅。而且经初稿的教学实践表明，这种改变是有利的。我们很高兴地告诉大家，通过本书的学习，学生们在初级阶段就能够真正从事一些设计任务，并有可能更加深入地完成设计和实现。

第三版的另一个主要变化在于大量地使用了计算工具 MATLAB[®]和 SIMULINK[®]，并从根本上修改了教学方法。所有主要的结果都直接采用计算工具来表述，这样使得容易处理复杂问题，而且有可能解决本课程的大量实际设计问题。在使用计算工具的同时，我们也强调原理和概念的重要性，书中最关键的结果也用笔算和书面计算的方法表示出，以便帮助学生理解计算工具的工作。

本书简介

背景材料 第1章介绍计算机控制系统的概况，目的在于对计算机、控制系统和相关理论的发展给出一个历史的透视。某些关键理论和计算机控制系统的特性也结合了大量的示例来一起介绍。

离散时间系统的分析和设计 如果单纯考虑系统在采样时刻的特性，则可能把分析和设计问题大大地简化，我们称之为面向计算机，即通过观察计算机中的数据行为来获得对系统的认识。之所以可以这样简化，是因为系统能用常系数线性差分方程来描述。在第2、3、4、5章中都采用这一方法。第2章描述了如何对连续时间系统采样来获得离散时间系统，给出了状态空间模型和输入-输出模型。这些模型的基本性质也和数学工具（如 z 变换等）一起给出。第3章中介绍了分析工具。

第4章介绍了状态反馈和观测器中的传统问题，但它的内容比同类教科书正常涵盖的范围要宽广和深入得多，特别是该章介绍了如何处理负载扰动、前馈和指令信号流的问题。与此同时，这些特点使控制器获得一种在应用中屡见不鲜的结构。一个教学上的好处，就是使掌握了这些工具的学生经过很短时间学习后就能处理实际设计问题。

第 5 章从输入-输出的观点来处理第 4 章中的问题,即提出了一个有关设计问题的更新的视角,所有在第 4 章中讨论过的内容在第 5 章中也被提出来。这样提供一个很好方式来保证透彻理解状态空间法和多项式法之间的相似性与差异性。多项式法还能处理关于建模误差和鲁棒性(robustness)问题,这些问题采用状态空间法不易解决。

在接触了一些特殊的设计方法之后,在第 6 章中我们又介绍了许多通用的控制系统设计方法,其中包括大系统的结构及自底向上和自顶向下的技术。

拓宽视野 虽然计算机控制系统中的许多问题都能采用面向计算机的方法来解决,但当需要详细研究采样点间的系统特性时,仍存在某些问题。如果计算机控制系统是通过过程中出现的模拟信号来考察的话,这些问题就会自然产生,我们称之为面向过程的观察。这常常导致线性系统带有周期性系数,并引起假频那样的现象。除非采取专门的预防措施,否则会导致不希望的效果。在考察计算机控制系统时,了解这类问题和抗假频滤波器的设计是非常重要的。解决办法将在第 7 章中介绍。

在更新已有的控制设备时,有时控制器的模拟设计已成事实。在这种情况下,将模拟设计直接转换成数字控制设计的方法是能有效节约成本的,具体方法将在第 8 章介绍。

实现 仅仅知道分析和设计的方法是不够的,作为一名控制工程师也应该同时熟悉实现的问题。这些在第 9 章中介绍,其中包括前置滤波、计算延迟、数值、编程及运算等方面的问题。在此基础上,读者对于设计中从概念到计算机实现的各个步骤均有很好的理解。

高级设计方法 为了更加有效地设计控制系统,有必要更好地表征干扰问题。第 10 章讨论了这个问题,有了干扰描述后才可能实现最优性能设计。采用状态空间法(第 11 章)和多项式技术(第 12 章)能够做到这点。迄今为止,我们假设过程和干扰的模型均为已知,在第 13 章中阐述了获得这些模型的实验方法。

前提

本书适用于工程专业的本科最后一年或研究生第一年的学习课程。并假设读者已经具备了自动控制的入门知识。本书对于工业界也是有益的。

课程安排

本书可以按不同的方式选用。第 1、2、3、4、5 章和第 9 章可以作为计算机控制系统的入门课程。更高级的课程则要用到本书的全部内容。对于工业界来说,可以安排学习第 1 章的全部和第 2、3、4、5 章的部分内容,以及第 6、7、8 章及第 9 章。为了从课程中尽可能的多受益,听一些有解题训练的补充讲座,进行仿真练习,在实验室做些实验都是很重要的。

计算工具

在实施计算机控制系统时,用于分析、设计和仿真的计算机工具是不可缺少的。本书中介绍的分析和设计的方法都可以很方便地通过 MATLAB[®]来完成。许多练习也都涵盖这方面内

容。系统的仿真同样可用 Simnon[®]或 SIMULINK[®]来实现。这里有 30 幅图来说明应用 MATLAB[®]进行分析和设计时遇到的各种问题，还有 73 幅图是采用 SIMULINK[®]做仿真时得到的。其中宏指令及 m-文件可从匿名的 FTP 站点 ftp.control.lth.se 下的/pub/books/ccs 目录中下载到。其他的工具诸如 Simnon[®]和 Xmath[®]等工具可以使用。

补充说明

完整的解法可以从采用本书的教师的出版物中得到，仿真宏指令、幻灯片及试题例都可以通过访问网页 <http://www.control.lth.se> 找出，参见 Education/Computer-Controlled Systems。

希望反馈

作为自动控制领域的教师和研究人員，都知道信息反馈的重要性。因此。我们鼓励所有的读者都能够给我们写信，指出在本书中存在的错误、潜在的不足、改正的建议，以及内容中尚待挖掘的有用之处。

致谢

这几年，我们从事了许多有关计算机控制系统的研究并编写了本书，我们很高兴有幸与世界各国的学术界和工业界的同行们进行交流。我们自觉或不自觉地搜集了称之为计算机控制基础知识的素材，对于每一个贡献过思想、建议、概念和例证的人士，虽然不可能一一提到，但对他们每一位仍表达我们最诚挚的谢意。同时对于长时间支持我们研究工作的瑞典工业技术发展委员会（NUTEK）和瑞典工程科学研究会（TFR）也表示感谢。

最后，我们想要感谢许多帮助编写本书的人。感谢我们的 Leif Andersson 先生。他是我们的文字排版专家（T_EXpert），他和 Eva Dagnegård 先生一起为解决文字排版（T_EX）方面的许多问题做出了不可估量的贡献。而且 Eva Dagnegård 和 Agneta Tuszynski 在各版手稿打印方面做了出色的工作。本书中大部分的图示都是由 Britt-Marie Mårtensson 完成的。没有他们的耐心和对我们的想法的理解，也就不会有本书的出版。在此，还要感谢 Prentice Hall 出版社的员工为本书的出版所做的贡献。

KARL J. ÅSTRÖM
BJÖRN WITTENMARK

Department of Automatic Control
Lund Institute of Technology
Box 118, S-221 00 Lund, Sweden
karl_johan.astrom@control.lth.se
bjorn.wittenmark@control.lth.se

目 录

第 1 章 计算机控制	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 计算机技术	(2)
1.3 计算机控制理论	(8)
1.4 固有采样系统	(18)
1.5 怎样发展理论	(20)
1.6 注释和参考文献	(23)
第 2 章 离散时间系统	(25)
2.1 引言	(25)
2.2 连续时间信号的采样	(25)
2.3 连续时间状态空间系统的采样	(26)
2.4 离散时间系统	(36)
2.5 状态空间模型的坐标系变换	(37)
2.6 输入 - 输出模型	(40)
2.7 z 变换	(47)
2.8 极点和零点	(53)
2.9 采样速率的选择	(58)
2.10 习题	(60)
2.11 注释和参考文献	(67)
第 3 章 离散时间系统的分析	(69)
3.1 引言	(69)
3.2 稳定性	(69)
3.3 灵敏度和鲁棒性	(80)
3.4 能控性、能达性、能观测性和能检测性	(83)
3.5 简单反馈回路分析	(91)
3.6 习题	(100)
3.7 注释和参考文献	(105)
第 4 章 极点配置设计:状态空间方法	(106)
4.1 引言	(106)
4.2 控制系统设计	(106)
4.3 采用状态反馈的调节	(108)
4.4 观测器	(119)
4.5 输出反馈	(125)
4.6 伺服问题	(131)
4.7 设计举例	(138)

4.8	结论	(141)
4.9	习题	(141)
4.10	注释和参考文献	(144)
第5章	极点配置设计:多项式方法	(145)
5.1	引言	(145)
5.2	简单的设计问题	(145)
5.3	丢番图方程	(149)
5.4	更实际的假设	(154)
5.5	相对于建模误差的灵敏度	(162)
5.6	设计步骤	(164)
5.7	双重积分器的控制器的设计	(172)
5.8	谐波振荡器的控制器的设计	(179)
5.9	柔性机器人臂的控制器的设计	(184)
5.10	与其它设计方法的关系	(188)
5.11	结论	(195)
5.12	习题	(195)
5.13	注释和参考文献	(198)
第6章	设计概述	(199)
6.1	引言	(199)
6.2	运行问题	(200)
6.3	构造原理	(202)
6.4	自顶向下的方法	(203)
6.5	自底向上的方法	(206)
6.6	简单回路的设计	(209)
6.7	结论	(211)
6.8	习题	(212)
6.9	注释和参考文献	(212)
第7章	面向过程的模型	(213)
7.1	引言	(213)
7.2	计算机控制系统	(213)
7.3	采样和信号重构	(214)
7.4	假频现象或频率混叠	(219)
7.5	具有预期一阶保持的控制器的设计	(225)
7.6	调制模型	(231)
7.7	频率响应	(236)
7.8	脉冲传递函数表示法	(245)
7.9	多速率采样	(252)
7.10	习题	(255)
7.11	注释和参考文献	(256)
第8章	近似连续时间控制器	(258)

8.1	引言	(258)
8.2	基于传递函数的近似法	(258)
8.3	基于状态模型的近似法	(265)
8.4	频率响应设计方法	(269)
8.5	数字 PID 控制器	(270)
8.6	结论	(282)
8.7	习题	(282)
8.8	注释和参考文献	(285)
第 9 章	数字控制器的实现	(286)
9.1	引言	(286)
9.2	概述	(286)
9.3	前置滤波和计算时延	(288)
9.4	非线性执行机构	(291)
9.5	运行方面的问题	(296)
9.6	数值问题	(299)
9.7	数字控制器的实现	(306)
9.8	程序设计	(315)
9.9	结论	(318)
9.10	习题	(318)
9.11	注释和参考文献	(322)
第 10 章	扰动模型	(324)
10.1	引言	(324)
10.2	扰动影响的减小	(324)
10.3	分段确定性扰动	(326)
10.4	扰动的随机模型	(329)
10.5	连续时间随机过程	(347)
10.6	随机微分方程的采样	(353)
10.7	结论	(353)
10.8	习题	(354)
10.9	注释和参考文献	(357)
第 11 章	最优设计方法:状态空间法	(358)
11.1	引言	(358)
11.2	线性二次型控制	(362)
11.3	预报和滤波理论	(376)
11.4	线性二次型高斯控制	(382)
11.5	实际应用方面的问题	(385)
11.6	结论	(386)
11.7	习题	(386)
11.8	注释和参考文献	(391)
第 12 章	最优设计方法:多项式方法	(392)

12.1	引言	(392)
12.2	问题的表达形式	(392)
12.3	最优预报	(397)
12.4	最小方差控制	(404)
12.5	线性二次型高斯(LQG)控制	(414)
12.6	实际应用方面的问题	(430)
12.7	结论	(438)
12.8	习题	(438)
12.9	注释和参考文献	(446)
第 13 章	辨识	(447)
13.1	引言	(447)
13.2	数学建模	(447)
13.3	系统辨识	(448)
13.4	最小二乘原理	(450)
13.5	递推计算	(454)
13.6	例题	(460)
13.7	结论	(465)
13.8	习题	(465)
13.9	注释和参考文献	(466)
附录 A	例题	(467)
附录 B	矩阵	(472)
B.1	矩阵函数	(472)
B.2	矩阵逆的引理	(475)
B.3	注释和参考文献	(475)
附录 C	参考文献	(476)
附录 D	相关英汉对照	(488)

第 1 章 计算机控制

1.1 引言

目前所有的控制系统实际上都是基于计算机控制来实现的，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近似，但是，这种看法是不全面的，它没有充分发挥计算机控制的潜力，最多只能获得与采用模拟控制时一样好的结果。与此相反，我们最好是精通计算机控制系统，进而利用计算机控制的全部潜力。而且，在计算机控制系统中还有一些在模拟系统中未出现过的现象，这些都是一个工程技术人员应当了解的。本书的主要目的就是介绍了在了解、分析和设计计算机控制系统时所需要的基础知识。

计算机控制系统可以用图 1.1 来简要描述。过程输出 $y(t)$ 是连续时间信号。通过模-数 (A-D) 变换器把此输出转换成数字形式。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 (D-A) 变换器把这个序列转换成模拟信号。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。在这种情况下，由于控制信号是恒定的，并与输出值无关，所以在两个采样时刻之间的时间间隔里系统工作在开环状态。

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。

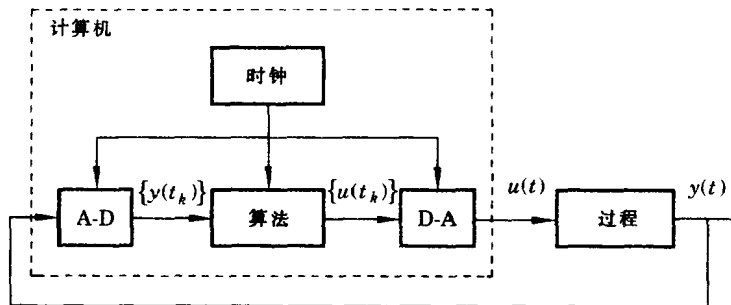


图 1.1 计算机控制系统简图

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，只描述系统在采样时刻的行为就足够了。这时我们感兴趣的仅仅是离散时间上的信号，这类系统被称为离散时间系统。离散时间系统是用来处理数值序列的，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 1.2 节中，简单地回顾了计算机控制技术的进展情况。1.3 节论证了对一种适当的理论的需要。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，而且也可采用其他能充分发挥计算机控制潜力的技术来获得实质性的改进。1.4 节提出一些本身就是采样系统的例子，1.5 节概述了采样数据系统理论的发展。

1.2 计算机技术

将数字计算机作为控制系统的部件的思想萌生于 1950 年前后。最初研究了导弹和飞机控制方面的应用。许多研究表明，把当时已有的通用数字计算机用于控制系统没有什么潜力。那时计算机的体积太大，能耗太多，而且不甚可靠。因此，在早期的航空应用中研制出了一些专用计算机——数字微分分析器（DDA）。

在过程控制中采用数字计算机的思想出现在 20 世纪 50 年代中期。最重要的工作开始于 1956 年 3 月，当时汤姆森·拉莫·伍尔里奇（Thomson Ramo Woolrige——TRW）航空公司与得克萨柯（Texaco）公司联合提出了一个可行性研究报告。经过初步讨论，决定针对得克萨州（Texas）的波特·阿瑟（Port Arthur）炼油厂的一台聚合装置进行研究。来自 TRW 公司和得克萨柯公司的一个工程师小组做出了一项大约需要 30 人年的彻底的可行性研究。设计出来一个采用 RW-300 计算机的聚合装置计算机控制系统。该控制系统于 1959 年 3 月 12 日在线运行。它控制 26 个流量、72 个温度、3 个压力和 3 个成分。该系统的基本功能是使反应器的压力最小，确定对 5 个反应器供料的最佳分配，根据催化剂活性测量结果来控制热水的流入量，以及确定最佳循环。

TRW 公司的这项开创性工作受到许多计算机制造商的注意，他们看到自己的产品的巨大的潜在市场，纷纷开始各种各样的可行性研究，出现了蓬勃发展的局面。为了讨论这种急剧的发展，按 6 个发展阶段来介绍是有益的：

开创期——约 1955 年

直接数字控制期——约 1962 年

小型计算机控制期——约 1972 年

微型计算机控制期——约 1972 年

数字技术普遍应用期——约 1980 年

集散型控制期——约 1990 年

由于这种发展是非常多样化的，所以很难给出各个时期的精确日期。在不同的应用领域和不同的工业部门之间，差异甚大，而且在很大程度上还相互交叠，上述所给的年份是指新思想第一次出现的时间。

开创时期

TRW 公司和得克萨柯公司所开创的工作，在工业界，在计算机制造商和各种研究组织中间唤起了对过程工业极大的兴趣。工业界看到这是一种提高自动化的潜在手段，计算机工业

界看到了新的市场，大学则看到了一个新的研究领域。由于计算机制造商渴望熟悉这种新技术，非常想知道适合于过程控制的计算机究竟是什么样的形式，他们纷纷着手可行性研究。这种可行性研究持续了整个 20 世纪 60 年代。

当时使用的计算机系统速度慢、价格贵，也不可靠。早期系统采用真空管。在 1958 年前后，计算机加法时间的典型值是 1 毫秒，乘法时间是 20 毫秒，一台中央处理器的平均无故障时间 (MTBF) 为 50~100 小时。为了使昂贵的计算机得到充分的应用，必须让它承担多种任务。由于当时计算机很不可靠，在进行计算机控制时，计算机要打印出指令来给操作者，或修改模拟调节器的设定值。这种监督操作方式称之为操作指导式或设定值控制。

计算机的主要任务是寻找最佳运行条件，完成调度和生产计划，报告产量和原材料的消耗。可以把寻找最好运行条件的问题看作是一个静态最优化问题。要实现最优化就需要建立过程的数学模型。采用的模型（一般是相当复杂的）可以根据物理模型，或者根据过程数据的回归分析推导出来。并且尝试力图实现在线最优控制。

计算机控制的发展进程常常由于缺乏过程知识而受到阻碍。很明显，把控制问题简单地看作静态最优化问题是很不够的，需要建立动态模型。在许多可行性研究中，很大一部分努力都是花在建模上。由于缺乏有效的建模方法学，使这种建模相当费时，这就激发人们去研究系统辨识的方法。

在可行性研究阶段，获得了许多宝贵的经验。很明显，过程控制向计算机提出了许多特殊的要求，需要它对各种过程命令做出迅速响应，从而导致发展中断设备，这是一种特殊的硬件装置，它允许外部事件中断计算机的当前工作，以便计算机能够对更紧迫的过程任务做出响应。所需的许多传感器在当时无法获得。在试图把一种新的技术引进古老的工业中时，同样碰到了一些困难。

计算机控制方面的进展受到各种会议和学术刊物的密切注视。在《控制工程》(Control Engineering) 杂志上，发表了一系列论述计算机在过程控制中应用的文章。到 1961 年 3 月为止，安装了 37 套系统。一年之后，系统台数增长到 159 套。应用领域涉及到钢铁、化工和电力工业的控制。在不同的工业领域，以不同的速度推动了这种技术的发展。可行性研究贯穿了整个 20 世纪 60 年代和 70 年代。

直接数字控制时期

早期的控制计算机按照监督方式运行，不是作为操作指导式运行，就是作为设定值控制运行，这两种控制方式都需要常规的模拟控制设备。1962 年，英国的帝国化学工业公司 (ICI) 制造出一套与这种方法极不相同的装置，过程控制中的全部模拟仪表由一台名为费伦蒂·阿格斯 (Ferranti Argus) 的计算机来代替。计算机直接测量 224 个变量和控制 129 个阀门。这是过程控制新纪元的开始，即模拟技术直接被数字技术所代替，而系统的功能却保持不变。直接数字控制 (DDC) 这个名字就是为了强调计算机直接地控制生产过程这一特征。1962 年，一台典型的过程控制计算机，完成两数相加所花的时间为 100 微秒，相乘所花的时间为 1 毫秒。平均无故障时间大约为 1000 小时。

价格问题是变革这种技术的主要理由。模拟系统的价格随着控制回路数目增加成线性增长，一台数字系统的最初投资虽然很大，但增加一个回路的费用却很小。因此，对于大型装置来说，数字系统是便宜的。数字控制系统的另一个优点是操作员通信能够迅速地变更，一

块操作员通信板便可代替一大片墙壁的模拟仪表。用在 ICI 系统的通信板非常简单，仅仅包含一台数字显示器和少数按钮。

灵活性是 DDC 系统的又一个优点。模拟系统是通过重新接线来改变的，而计算机控制系统则是通过重新编程序来改变。数字技术还有其他优点。它容易实现几个回路之间的相互作用。我们可以使控制环节的参数成为运行条件的函数。引入专用的 DDC 语言可以简化编程工作。使用这种语言的用户，除了要把输入、输出、调节器类型，标度因子和调节器参数等直接写入表格之外，不必熟悉有关编程的任何知识。因此在用户看来，DDC 系统仿佛是用常规调节器连成的。不过，DDC 系统也有其不足之处，它难于实现特殊的控制策略。多年来，这一点的确妨碍了控制系统的发展。

DDC 系统是计算机控制系统发展方向上的重大变革，这种系统着重关心的是基本的控制功能，而不是早期系统的监督功能。在 1963~1965 年间，DDC 系统取得了显著的进展。这种系统的性能规格是由用户和厂家共同拟定的。有关采样周期的选择，控制算法，以及可靠性这个关键问题，都进行了广泛讨论。尽管 DDC 系统比相应的模拟系统更加昂贵，但 DDC 的概念很快为人们所接受。

小型计算机时期

在 20 世纪 60 年代，数字计算机技术取得了重大的进展。过程控制计算机的技术要求是与集成电路技术的进步紧密相关的。计算机体积变得更小，速度更快，更加可靠和更加便宜。小型计算机一词指的是新出现的这种计算机。采用小型计算机，有可能更加有效地设计过程控制系统。

在计算机开创期和 DDC 期间，获得了越来越多的计算机过程控制的知识。这种知识和小型计算机技术发展相结合，又使得计算机控制的应用更加迅速发展。好几个制造商声称制造出来专用的过程控制机。这个时期的典型过程计算机的字长为 16 位，主存储器为 8~124 千字，磁盘一般作为辅助存储器。CDC1700 是这个时期的典型计算机，它的加法时间为 2 微秒，乘法时间为 7 微秒，中央处理单元的平均无故障时间为 20000 小时。

这个时期计算机控制迅速增长的重要因素，是数字计算机控制现在成了更小的“单元”。因此，对于小型工程项目和课题也有可能使用计算机控制。由于小型计算机的出现，过程计算机的台数从 1970 年的 5000 台左右增长到 1975 年的 50000 台左右。

微型计算机时期和计算机控制的普遍应用

由于数字计算机仍是昂贵、体积庞大、速度缓慢而且不可靠的机器，所以计算机控制在早期，其应用仅限于大型工业系统中。小型计算机仍然是一个相当大的系统。尽管计算机的性能不断提高，价格持续下降，但到 1975 年，一台小型计算机的主机价格仍然在 1 万美元左右，这意味着一个小系统的价格难以低于 10 万美元。对于大量的控制问题，计算机控制仍然是可望而不可及的事情。但在 1972 年之后，由于微型计算机的不断发展，1980 年一台相当于 1975 年小型计算机性能的卡式计算机的价格已下降到 500 美元。另一个重要进展是 1980 年的数字计算电源费用已减少到 50 美元。随着超大规模集成 (VLSI) 技术的进展，微电子学技术继续发展。20 世纪 90 年代，微处理器的价格降到仅为几美元。这对计算机控制的应用产生了深远的影响。结果，今天所有的控制器均是以计算机为基础的。巨大的市场潜力，如

电子自动化的需求使得一些称为微控制器的特殊用途计算机得到了发展,在这些微控制器中,一块标准的计算机芯片已增添了 A-D 和 D-A 变换器、寄存器和其他特性,这样使微控制器可以方便地与物理设备接口。

实际上,今天所有开发的控制系统都以计算机控制为基础。应用涉及电力、过程控制、制造、运输,以及娱乐行业的控制、生产和分配的全部领域。大规模的市场应用,包括电子自动化、CD 唱机和视频设备等,尤其令人鼓舞,因为它们激发计算机制造商生产能够用于不同领域的芯片。

图 1.2 所示为一个应用于过程控制的单回路控制器。这种系统在传统上是应用气动装置或电子技术实现的,但现在它们借助于计算机来完成。控制器具有传统的比例、积分和微分 (PID) 操作,这些都是通过微处理器实现的。在数字控制下,它还可能获得附加的功能。在本例特殊的情况中,调节器可以进行自动整定、增益调度及前馈和反馈增益的连续自适应。这些功能在模拟技术中是很难实现的。这个范例也说明了传统产品的功能如何因使用计算机控制而得到显著的提高。

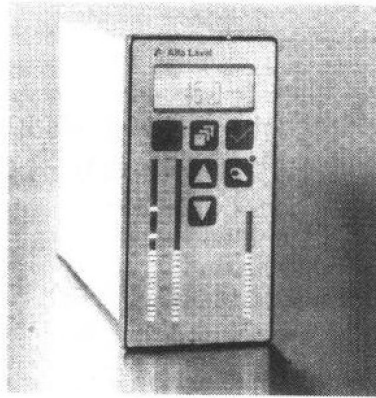


图 1.2 过程控制中标准单回路控制器
(蒙 Alfa Laval Automation, Stockholm, Sweden 允许在此发表)

逻辑、顺序和控制

工业自动化系统在传统上有两个部分,控制器和继电器逻辑电路。继电器电路通常应用于顺序操作,如开和关,同时它通过提供联锁来保护操作的安全。继电器电路和控制器在工厂中都是由不同工种的人员来操作。仪表工程师负责控制器,而电气技师则负责继电器系统。我们已经讨论过控制器的功能是如何被微型计算机所影响的。而继电器系统在微电子技术的进步的基础上也经历了类似的变革。可编程控制器 (PLC) 作为继电器电路的替代产品出现于 20 世纪 70 年代。电气技师可用熟悉的符号表示法对它进行编程,即按继电器触点逻辑梯形法或逻辑 (AND/OR) 语句法编程。美国人率先把这项新产品带入市场,主要依赖于继电器触点逻辑法,而欧洲人则选择逻辑语句法紧跟其后。这项技术获得了巨大的成功,主要是在组合部件的制造业上(原因显然)。不过,很快它们就被使用在调节控制及数据处理方面,扩大了其应用的前景。这项技术之所以受到如此的关注,是因为它的控制,包括内部环路间的关系,都容易实现和变更,而又不对硬件造成任何影响。