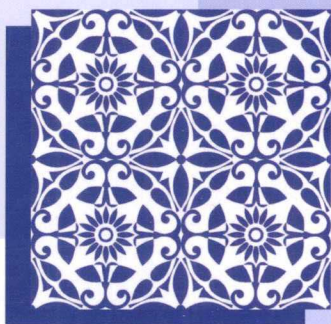


计算机控制 理论与设计

关守平 尤富强 徐林 谭树彬 编著
刘建昌 主审



Computer Control
Theory and Design

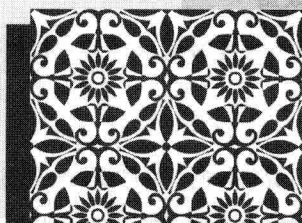


机械工业出版社
China Machine Press

重点

计算机控制 理论与设计

关守平 尤富强 徐林 谭树彬 编著
刘建昌 主审



Computer Control
Theory and Design



机械工业出版社
China Machine Press

本书着重介绍了计算机控制系统中控制器设计的理论与方法,涵盖了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论的核心内容,侧重从方法论的角度介绍基于精确模型和基于非精确模型两类系统的控制器设计方法。

全书共分 11 章,在对计算机控制系统进行概述以及建模与性能指标分析的基础上,介绍了基于精确模型的控制器设计方法,包括经典控制器的设计方法、复合系统控制器的设计方法、基于极点配置方法的控制器设计和基于最优化方法的控制器设计;然后介绍了基于非精确模型的控制器设计方法,包括基于模型辨识策略的控制器设计、基于参数修正策略的控制器设计、基于结构与稳定策略的控制器设计;作为一个理论应用的实例,介绍了网络控制系统的建模与控制器的设计方法;最后介绍了数字控制器的工程化设计与实现的关键技术。

本书在介绍这些内容时,注意与计算机控制系统基础理论的衔接和过渡,并在此基础上进行理论的提升和内容的拓展,以便于学生对计算机控制系统的理论和设计有更全面的理解和掌握。

本书可作为高等院校控制理论与控制工程及相关专业研究生的教材或参考书,也可供有关教师、科研人员以及工程技术人员学习参考。

封底无防伪标均为盗版

版权所有,侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制理论与设计 / 关守平等编著. —北京:机械工业出版社, 2012.9
(重点大学计算机教材)

ISBN 978-7-111-39450-1

I. 计… II. 关… III. 计算机控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 190784 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李 荣

北京瑞德印刷有限公司印刷

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

185mm×260mm·19.25 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-39450-1

定价: 36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991; 88361066

购书热线: (010) 68326294; 88379649; 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzsj@hzbook.com



计算机控制理论是控制学科最重要的专业课程之一，是控制理论与计算机技术以及通信技术相结合的产物。随着控制理论、计算机技术和通信技术的发展，产生了许多新理论与新技术，作者认为有必要将这些最新的研究成果编入计算机控制理论的教材中，供广大学生和研究人员参考。因此，作者在多年从事计算机控制理论与设计教学经验的基础上，参考了国内外经典的计算机控制系统方面的教材，结合近年来的研究成果，编著了此书。

本书共分 11 章，其中第 1 章～第 6 章为课程教学的基础内容，按 60 学时设计；第 7 章～第 10 章为课程教学的扩展内容，按 36 学时设计；第 11 章为课程教学的设计内容，按 14 学时设计。第 1 章介绍了计算机控制系统的概念、基本理论和发展历程；第 2 章介绍了计算机控制系统的模型表达与性能指标；第 3 章介绍了基于经典控制理论的常规控制器的设计方法，包括模拟化设计方法和直接数字化设计方法；第 4 章介绍了几种常用的复合控制系统控制器的设计方法，包括串级控制、前馈控制、纯滞后补偿控制和多变量解耦控制；第 5 章介绍了基于极点配置方法的控制器设计，包括极点配置方法的设计原理，针对状态空间模型和针对传递函数模型的极点配置控制器的设计方法；第 6 章介绍了基于最优化方法的控制器设计，包括最优化方法的设计原理，针对状态空间模型和针对传递函数模型的最优化控制器的设计方法；第 7 章介绍了基于模型辨识策略的控制器设计，包括模型辨识策略控制器设计的原理、自适应控制、神经网络控制等；第 8 章介绍了基于参数修正策略的控制器设计，包括参数修正策略控制器设计的原理、预测控制、模糊控制、滑模变结构控制等；第 9 章介绍了基于结构与稳定策略的控制器设计，包括结构与稳定策略控制器设计原理、内模控制、鲁棒控制等；第 10 章作为一个理论应用的实例，介绍了新兴的网络控制系统的建模与控制器设计方法，建立了网络控制系统的状态空间模型，并基于极点配置方法设计了网络控制系统的控制器；第 11 章介绍了计算机控制系统中数字控制器的工程化设计与实现的关键技术。

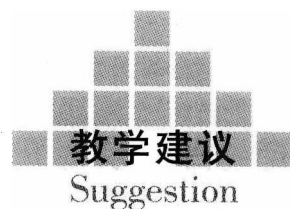
本书作为研究生教材，注意与本科生阶段计算机控制系统知识的衔接和过渡，并在此基础上进行理论的提升和内容的拓展；按照模型—指标—控制器设计—设计方法应用—控制器实现的顺序安排章节和内容，侧重从方法论的角度介绍基于精确模型和基于非精确模型两类系统控制器设计的理论和方法；同时，按照提出问题—分析问题—解决问题的思路展开教材内容，以便于研究生对计算机控制系统的理论和设计有一个更全面的理解和掌握，培养研究生从事理论和应用研究的科研能力。

本书第 1、2、3、5、6、10 章由关守平编写；第 4 章和第 7 章由徐林编写；第 8 章和第 9 章由尤富强编写；第 11 章由谭树彬编写。全书由关守平统稿，刘建昌教授主审。本书在编写过程中参考了有关文献内容，这些文献均列入本书的参考文献中，在此对文献作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，诚请读者批评指正。

作者

2012 年 7 月于东北大学



教学章节	教学要求	课时
第1章 绪论	掌握计算机控制系统的基础知识	2
第2章 计算机控制系统的数学模型与性能指标	掌握离散系统模型的建模方法	4
	掌握离散系统性能分析方法	4
第3章 经典控制器设计方法	掌握数字控制器模拟化设计方法	2
	掌握数字控制器离散化设计方法	3
	掌握数字控制器最小拍设计方法	1
第4章 复合系统控制器设计方法	掌握串级与前馈控制器设计方法	2
	掌握纯滞后与解耦控制器设计方法	2
第5章 基于极点配置方法的控制器设计	掌握极点配置设计方法的基本原理	2
	掌握基于状态空间模型的极点配置控制器设计方法	10
	掌握基于传递函数模型的极点配置控制器设计方法	8
第6章 基于最优化方法的控制器设计	掌握最优化设计方法的基本原理	2
	掌握基于状态空间模型的最优化控制器设计方法	10
	掌握基于传递函数模型的最优化控制器设计方法	8
第7章 基于模型辨识策略的控制器设计	了解自适应控制器设计方法	4
	了解神经网络控制器设计方法	4
第8章 基于参数修正策略的控制器设计	了解预测控制器设计方法	4
	了解模糊控制器设计方法	4
	了解滑模变结构控制器设计方法	4
第9章 基于结构与稳定策略的控制器设计	了解内模控制器设计方法	4
	了解鲁棒控制器设计方法	4
第10章 网络控制系统控制器的设计	了解网络控制系统的基本原理与建模方法	4
	了解网络控制系统控制器的设计方法	4
第11章 数字控制器的工程化设计与实现	掌握数字控制器的程序设计方法	2
	掌握数字控制器工程应用中一般问题的解决方法	6
	掌握数字控制器饱和现象的解决方法	4
	掌握数字控制器的其他工程技术	2
总课时	第1~11章建议课时	110

说明:

- 1) 建议课堂教学全部在多媒体机教室进行,利用教学课件进行授课,提高教学效率。
- 2) 建议教学分为基本教学模块(第1~6章的内容)、扩展教学模块(第7~10章的内容)和设计教学模块(第11章的内容),其中基本教学模块建议教学学时为60,扩展教学模块建议学时为36,设计教学模块建议学时为14。不同学校可以根据各自的教学要求和计划学时数对教学内容进行取舍。



前言

教学建议

第1章 绪论	1
1.1 计算机控制系统的基本概念	1
1.2 计算机控制系统的组成	2
1.3 计算机控制系统的发展	3
1.4 计算机控制理论与设计的基本内容	6
1.5 计算机控制系统的分类	7

第2章 计算机控制系统的数学模型与性能指标	9
2.1 传递函数模型	9
2.1.1 由差分方程求 z 传递函数模型	9
2.1.2 由连续对象模型求 z 传递函数模型	10
2.1.3 由单位脉冲响应序列求 z 传递函数模型	12
2.2 状态空间模型	13
2.2.1 不带延时的连续被控对象模型的离散化	13
2.2.2 包含延时的连续被控对象模型的离散化	14
2.2.3 矩阵指数及其积分的计算	17
2.3 稳定性分析	18
2.3.1 离散系统稳定性与计算机控制系统稳定性问题	18
2.3.2 计算机控制系统的稳定性分析	20

2.3.3 基于传递函数模型的稳定性判据	22
----------------------------	----

2.3.4 基于状态空间模型的稳定性判据	25
----------------------------	----

2.4 性能指标描述	29
2.4.1 稳态指标	29
2.4.2 动态指标	33
2.4.3 抗干扰性能	34

第3章 经典控制器设计方法	35
3.1 模拟化设计方法	35
3.1.1 连续控制器的离散化方法	35
3.1.2 数字PID控制器设计	41
3.2 离散化设计方法	42
3.2.1 根轨迹设计法	42
3.2.2 频率响应设计法	47
3.2.3 解析设计法	54
3.3 最小拍控制设计法	60
3.3.1 最小拍有纹波控制系统设计	61
3.3.2 最小拍无纹波控制系统设计	64

第4章 复合系统控制器设计方法	68
4.1 串级控制	68
4.1.1 串级控制的基本概念	68
4.1.2 串级控制主副控制器的设计	70
4.2 前馈控制	71
4.2.1 前馈控制的工作原理	71
4.2.2 前馈控制的类型	72
4.2.3 前馈控制的使用原则	75
4.3 纯滞后补偿控制	75

4.3.1 史密斯预估控制	76	6.3.3 广义最小方差控制器的设计 ...	161
4.3.2 大林算法	77		
4.4 多变量解耦控制	82	第7章 基于模型辨识策略的控制器	
4.4.1 解耦控制原理	82	设计	165
4.4.2 多变量解耦控制的综合方法 ...	84	7.1 引言	165
		7.2 自适应控制	166
第5章 基于极点配置方法的控制器		7.2.1 概述	166
设计	86	7.2.2 系统辨识的最小二乘法	168
5.1 极点配置设计方法的原理	86	7.2.3 模型参考自适应控制	173
5.1.1 性能指标与闭环系统零极点		7.2.4 自校正控制	176
之间的关系	86	7.3 神经网络控制	179
5.1.2 极点配置设计方法的原理与		7.3.1 概述	180
相关概念	88	7.3.2 BP 神经网络	185
5.2 极点配置状态反馈控制器的设计 ...	89	7.3.3 神经网络自校正控制	189
5.2.1 状态可测时按极点配置设计		7.3.4 神经网络 PID 控制	192
控制律	89		
5.2.2 按极点配置设计状态观测器 ...	97	第8章 基于参数修正策略的控制器	
5.2.3 状态不可测时控制器的设计 ...	104	设计	194
5.3 极点配置复合控制器的设计	111	8.1 引言	194
5.3.1 复合控制器的设计分析	111	8.2 预测控制	194
5.3.2 丢番图方程	115	8.2.1 概述	194
5.3.3 一般形式的复合控制器的		8.2.2 模型算法控制	196
设计	118	8.2.3 动态矩阵控制	200
		8.2.4 广义预测控制	203
第6章 基于最优化方法的控制器		8.3 模糊控制	206
设计	126	8.3.1 概述	206
6.1 最优控制设计方法的原理	126	8.3.2 模糊控制原理	206
6.1.1 最优控制的基本概念	126	8.3.3 基本模糊控制器设计	210
6.1.2 线性二次型最优控制问题	127	8.3.4 模糊自适应 PID 控制器设计 ...	215
6.2 最优化状态反馈控制器的设计	128	8.4 滑模变结构控制	217
6.2.1 确定性系统 LQ 控制器的		8.4.1 概述	217
设计	128	8.4.2 滑模变结构控制原理	218
6.2.2 状态最优估计器的设计	137	8.4.3 滑模变结构控制器设计	221
6.2.3 随机系统 LQG 控制器的			
设计	142	第9章 基于结构与稳定策略的控制器	
6.3 最小方差控制器的设计	146	设计	225
6.3.1 随机干扰模型及性能指标	146	9.1 引言	225
6.3.2 最小方差控制器的设计	150	9.2 内模控制	225

9.2.1 概述	225	第 11 章 数字控制器的工程化设计与实现	260
9.2.2 内模控制原理	226	11.1 数字控制器的程序设计方法	260
9.2.3 内模控制器设计	229	11.1.1 直接程序设计法	260
9.3 鲁棒控制	233	11.1.2 串行程序设计法	261
9.3.1 概述	233	11.1.3 并行程序设计法	263
9.3.2 H_∞ 优化与鲁棒控制	234	11.2 数字控制器应用中的问题	264
9.3.3 标准 H_∞ 控制问题	237	11.2.1 一般性问题及其解决方法	264
9.3.4 离散系统的 H_∞ 状态反馈控制	240	11.2.2 量化误差问题	271
第 10 章 网络控制系统控制器的设计	243	11.3 数字控制器饱和现象及其抑制方法	275
10.1 网络控制系统的设计问题	243	11.3.1 饱和现象及其对系统性能的影响	275
10.1.1 网络控制系统的概念	243	11.3.2 抑制积分饱和效应的控制算法	277
10.1.2 网络控制系统的设计方法	245	11.3.3 抑制微分饱和效应的控制算法	279
10.2 网络控制系统的模型分析	246	11.4 数字控制器的工程化实现	284
10.2.1 单包传输网络控制系统的建模	246	11.5 数字程序控制器的设计	288
10.2.2 多包传输网络控制系统的建模	252	11.5.1 数字程序控制基础	288
10.3 网络控制系统控制器的设计	254	11.5.2 逐点比较法插补原理	290
10.3.1 控制律的设计	255	参考文献	296
10.3.2 状态观测器的设计	255		
10.3.3 控制器的设计	257		

绪 论

计算机控制系统因强调计算机作为控制系统的一个重要组成部分而得名，即由计算机参与并作为核心环节的自动控制系统称为计算机控制系统。计算机控制系统也称为数字控制系统，这是强调控制系统中包含数字信号。

1.1 计算机控制系统的基本概念

计算机控制理论就是控制理论基于计算机实现时所需要的理论，如采样周期的选择、量化效应的分析、信号采样与恢复、模型及其性能指标的离散化、数字控制器的实现等方面的理论，也称为计算机控制系统理论。

计算机在控制系统中的应用主要分为以下两个方面：

1) 计算机在控制系统方面的离线应用。如利用计算机帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿真以及建模等，这方面的计算机软（硬）件系统称为计算机辅助设计控制系统或控制系统 CAD。控制系统 CAD 可以大大减轻设计人员的繁杂劳动，缩短设计周期，提高设计质量。

2) 计算机在控制系统方面的在线应用。指利用计算机代替常规的模拟控制器，而使它成为控制系统的一个组成部分。基于计算机实现的控制器称为数字控制器，可以极大地提升控制器的性能，具有模拟控制器无法比拟的优势。

控制系统中的信号一般包括连续信号、离散信号和数字信号。连续信号指时间上连续、幅值上也连续的信号，也可以称为模拟信号；离散信号指时间上离散、幅值上连续的信号，也称为离散模拟信号；数字信号指时间上离散、幅值上量化的信号。控制系统按照它所包含的信号形式通常可以划分为连续控制系统、离散控制系统、采样控制系统和数字控制系统，计算机控制系统即为典型的数字控制系统，如图 1-1 所示。

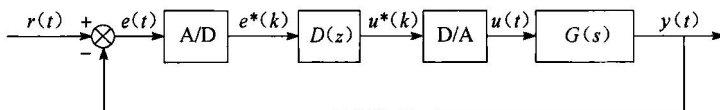


图 1-1 数字控制系统

在计算机控制系统中，除了包含有数字信号 $e^*(k)$ 、 $u^*(k)$ 外，由于被控对象是连续的，因此其中也包含有连续的信号 $r(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ 。如果忽略幅值上的量化效应，数字

信号 $e^*(k)$ 、 $u^*(k)$ 即为离散信号 $e(k)$ 、 $u(k)$ ；如果再将连续的被控对象离散化，那么计算机控制系统即简化为离散控制系统。

计算机控制的对象狭义上来说指回路级的控制，即给定一个对象 $G(s)$ 和控制指标，应用控制理论知识设计控制器 $D(z)$ 。该控制理论包括经典控制理论（如 PID 控制）、现代控制理论（如最优控制）、智能控制理论（如神经网络控制）等。

广义上来说，计算机控制的对象不仅包括回路级的控制，也包括过程的控制、生产线的控制，甚至一个企业的管理控制。从流程工业综合自动化的理论看，包括基础自动化控制、过程自动化控制、调度自动化控制和管理决策自动化控制四个层次。

基础自动化强调的是单一对象的控制，即回路的控制，满足的是常规控制指标，如过渡过程时间和超调量等；过程自动化强调的是对基础自动化各个控制回路的设定值优化以及各个回路之间的协调，满足的是过程指标，如产品的质量、消耗的能量等；调度自动化强调的是生产线上各个过程的优化调度，满足的是调度指标，如生产节奏与时间等；管理决策自动化强调的是企业产供销各个部门的协调与优化管理，满足的是企业的管理目标，如生产效率、利润指标等。

1.2 计算机控制系统的组成

计算机控制系统由工业控制计算机主体（包括硬件、软件和网络）和被控对象两大部分组成。工业生产过程中的自动控制系统因被控对象、控制算法及采用的控制器结构不同而有所区别。从工业生产过程来看，常规连续控制系统结构如图 1-2 所示。

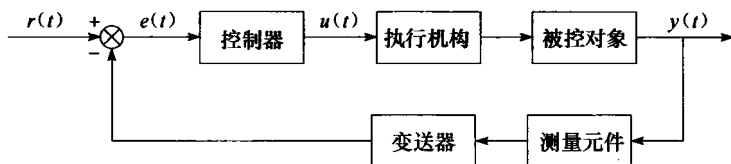


图 1-2 连续控制系统结构图

从图 1-2 可以看出，该系统通过测量传感器对被控对象的被控量（如温度、压力、流量、成分、位移等物理量）进行测量，再由变送器将测量元件的输出变换成一定形式的电信号，反馈给控制器。控制器将与反馈信号对应的工程量和系统的给定值比较，根据误差产生控制信号来驱动执行机构进行工作，使被控参数的值与系统给定值相一致。

用计算机系统来代替图 1-2 中的控制器，就构成了计算机控制系统，如图 1-3 所示。

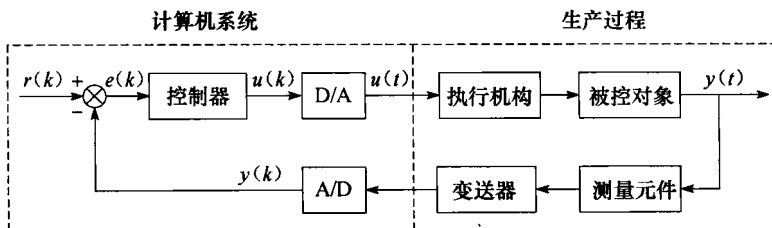


图 1-3 计算机控制系统结构图

在计算机控制系统中，计算机处理的都是数字量，因此，需要有将模拟信号转换为数字信号的模/数（A/D）转换器，以及将数字信号转换为模拟信号的数/模（D/A）转换器。

计算机控制系统执行控制程序的过程如下:

- 1) 实时数据采集: 对被控参数在一定的采样间隔上进行测量, 并将采样结果输入计算机。
- 2) 实时计算: 对采样到的被控参数进行处理后, 按预先规定的控制律进行控制律的计算, 或称决策, 决定当前的控制量。
- 3) 实时控制: 根据实时计算结果, 将控制信号送往执行机构。
- 4) 信息管理: 随着网络技术和控制策略的发展, 信息共享和管理也介入到控制系统中。

上述测量、计算、控制、管理的过程不断重复, 使整个系统按照一定的动态品质指标进行工作, 并对被控参数或控制设备出现的异常状态及时监督且迅速做出处理。

在前面的分析中, 多次提及“实时”这个术语。所谓实时, 指的是计算机控制系统能及时响应某一事件。在计算机控制系统中要求对外界信息的获取、控制决策的计算和控制量的输出都要在规定的某一时间段内完成, 也就是计算机应有较快的运算速度, 能在给定的时间内(通常为采样周期)完成一次对被控对象的控制。根据被控对象的性质不同, 有些系统的采样周期要以毫秒计, 而另一些系统可以用秒计等。只要在给定的采样周期内完成相应的控制任务, 这些系统都是实时系统。

相对于模拟控制, 计算机控制的主要特点可以归纳为:

- 1) 计算机控制利用计算机的存储记忆、数字运算和 CRT 显示功能, 可以同时实现模拟变送器、控制器、指示器、手操作器以及记录仪等多种模拟仪表的功能, 并且便于监视和操作。
- 2) 计算机控制利用计算机快速运算能力, 通过分时工作可以用一台计算机同时控制多个回路, 并且还可以同时实现 DDC、顺序控制、监督控制等多种控制功能。
- 3) 计算机控制利用计算机强大的信息处理能力, 可以实现模拟控制难以实现的各种先进复杂的控制策略, 如最优控制、自适应控制、多变量控制、模型预测控制以及智能控制等, 从而不仅可以获得更好的控制性能, 而且还可实现对于难以控制的复杂被控对象(如多变量系统、大滞后系统以及某些时变系统和非线性系统等)的有效控制。
- 4) 计算机控制系统调试、整定灵活方便, 系统控制方案、控制策略以及控制算法及其参数的改变和整定, 只通过修改软件和键盘操作即可实现, 不需要更换或变动任何硬件。
- 5) 利用网络分布结构可以构成计算机控制、管理集成系统, 即 DCS, 实现工业生产与经营的管理、控制一体化, 大大提高了工业企业的综合自动化水平。
- 6) 计算机控制系统中同时存在连续型和离散型两类信号, 系统中必有 A/D 和 D/A 转换器实现连续信号与离散信号相互转换, 连续系统控制理论不能直接用于计算机控制系统分析和设计。

1.3 计算机控制系统的发展

计算机控制是计算机技术与控制理论、自动化技术相结合的产物, 它的发展与计算机技术的进步密不可分。追溯计算机控制在工业上的应用历史, 可从 20 世纪 50 年代中期算起, 计算机控制系统大约经历了以下几个时期:

- 20 世纪 50 年代前后为早期。
- 20 世纪 60 年代为直接数字控制 (DDC) 时期。
- 20 世纪 70 年代~80 年代前期为分散控制系统 (DCS) 时期。

- 20 世纪 80 年代中后期~90 年代为现场总线控制系统 (FCS) 时期。
- 21 世纪初为网络控制系统 (NCS) 时期。

世界上第一台数字计算机于 1946 年诞生在美国。起初计算机用于科学计算和数据处理, 之后, 人们开始尝试将计算机用于导弹和飞机的控制。然而, 由于那时的计算机是电子管式的, 体积、功耗太大, 可靠性又差, 用来构建控制系统不现实。此后的计算机仍是用来进行科学计算和数据处理。

20 世纪 50 年代中期, 美国开始在工业过程控制中研究计算机控制的可行性, 经过三年的努力, 到 1959 年 3 月, 世界上第一套有一定规模的工业过程计算机控制系统在德州的一个炼油厂正式投入运行并获得成功。该系统控制过程中有 26 个流量、72 个温度、3 个压力和 3 个成分, 控制系统的目标是使反应器的压力最小, 确定出反应器进料量的最佳分配, 并根据催化作用去控制热水流量和最优循环。

美国的开创性工作, 奠定了计算机控制的基础, 吸引了各个方面的广泛注意和兴趣。计算机制造商看到了计算机应用的新市场, 工业界则发现计算机将成为实现工业自动化的一个新工具, 学术界和教育界看到了一个新兴的研究领域和对计算机控制人才的需求, 所有这些都有力地推动了计算机控制和计算机本身的进一步发展。

第一代计算机是电子管计算机, 其运算速度慢、价格昂贵、体积大、可靠性差。1958 年前后的计算机的平均无故障时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 约为 50~100h, 这些缺点极大地限制了计算机控制在工业上的推广应用。由于价格昂贵, 一台计算机要承担很多的控制任务才能发挥其优越性。而计算机的可靠性差使其主要用于数据处理、操作指导和监督控制等简单控制功能, 真正用来作闭环控制的系统非常少。

20 世纪 60 年代初, 伴随半导体技术的发展, 出现了晶体管计算机, 它的体积缩小了, 运算速度有了提高, 可靠性也增加了, 计算机的 MTBF 大约为 1000h。人们开始采用计算机去完全取代模拟控制器而直接用计算机控制过程变量, 即所谓直接数字控制 (Direct Digital Control, DDC)。1962 年英国的帝国化学工业公司成功地实现了一个 DDC 系统, 该系统的数据采集量为 244 个, 控制了 129 个阀门。DDC 系统的出现是计算机控制技术发展的一个重要里程碑, 它将计算机纳入了系统的闭环控制回路, 可以较好地发挥计算机控制的优势, 所以 DDC 系统的实现无疑是计算机控制系统的一大进步。但是计算机的价格仍然太高, 可靠性仍然不能满足很多部门和生产过程控制的要求, 因此, 计算机控制的推广应用仍然受到很大的限制。由于该阶段的一台计算机控制了多个控制回路或控制点, 因此从计算机控制系统的结构来看, 也称为集中控制系统 (Integrated Control System, ICS)。

整个 20 世纪 60 年代, 集成电路技术发展迅速, 促使计算机技术有了很大的发展。计算机运算速度加快, 体积减小, 可靠性和性价比又有了进一步的提高, MTBF 提高到大约 2000h。到了 20 世纪 60 年代后期, 出现了用中小规模集成电路制作的小型计算机。小型计算机的出现使得更多场合可以采用计算机控制, 因此加快了计算机控制系统的发展。但是小型计算机的价格还是比较贵, 只有规模较大的控制项目才有可能采用, 对于大量的中、小规模控制项目, 采用计算机控制仍然是可望而不可即的事。

计算机控制的蓬勃发展是从 20 世纪 70 年代初出现微型计算机开始的。随着大规模集成电路技术的突破, 微型计算机于 1971 年问世, 微型计算机的出现使得计算机控制进入了一个崭新的发展阶段。微型计算机的突出特点是运算速度快、体积小、可靠性高、价格低廉, 它消除了长期阻碍计算机控制发展中计算机价格昂贵和可靠性差的两大问题, 并使计算机控

制系统的结构形式发生变化,从传统的集中控制为主的系统逐渐转变为集散式控制系统(Distributed Control System, DCS)。20世纪70年代中期出现的DCS,成功地解决了传统集中控制系统整体可靠性低的问题,从而使计算机控制系统获得了大规模的推广应用。1975年世界上几个主要计算机和仪表公司几乎同时推出了计算机集散控制系统,如美国Honeywell公司的TDC-2000、日本横河公司的CENTUM等,并都得到了广泛的工业应用。但是,DCS不具备开放性、互操作性,布线复杂,费用高。

20世纪80年代以后,超大规模集成电路技术发展迅速,使计算机朝着超小型化、软件固化和控制智能化方向发展。微处理器在测量仪表、执行装置等自动化仪表上的应用促使它们向智能化方向发展,20世纪80年代中后期出现了将现场控制器和智能化仪表等现场设备用现场通信总线互连构成的新型分散控制系统——现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)。FCS具有开放性、互操作性和彻底分散性等特点,并且易于同上层管理级和互联网实现互连构成多级网络控制系统。FCS的可靠性更高,成本更低,设计、安装调试、使用维护更简便。

随着通信技术和网络技术的不断发展,21世纪初,出现了以工业以太网为代表的网络控制系统(Networked Control System, NCS)技术。使用专用或公用计算机网络代替传统控制系统中的点对点结构,实现传感器、控制器和执行器等系统组件之间的控制信息可以相互传递的系统,不仅部件散布在大范围区域的广域分布式系统(如大型工业过程控制系统)中,甚至在集中的小型局域系统(如航天器、舰船以及新型高性能汽车等)中都正在或者将要得到使用。在这样的控制系统中,检测和控制等各种信号均可通过公用数据网络进行传输,而估计、控制和诊断等职能也可以在不同的网络节点中分布执行。NCS与传统的点对点结构的系统相比,具有可以实现资源共享、实现远程操作与控制、高的诊断能力、安装与维护简便、能有效减少系统的重量和体积、增加了系统的灵活性和可靠性等诸多优点。另外,使用无线网络技术还可以实现使用大量广泛散布的廉价传感器与远距离的控制器、执行器构成某些特殊用途的NCS,这是传统的点对点结构的控制系统所无法实现的。NCS的研究正成为国际学术界和工业界研究的一个热点。

以上从计算机技术的层面介绍了计算机控制的发展历程。实际上,计算机控制的发展不仅和计算机技术的发展关系密切,而且与控制理论的应用与发展也有密切的关系。几十年来,随着计算机技术的发展,计算机控制系统及其技术已经取得了巨大的进步和发展,得到了广泛的应用。但是,就系统对被控对象的控制功能而言,大多数计算机控制系统的控制功能并没有得到充分的发挥,其应用水平仍然较低,绝大多数工业过程计算机控制系统至今仍然沿用传统的PID反馈控制律。然而,当对象参数的时变性、不确定性、非线性等方面的特点突出时,再用传统的PID控制律就不能达到较好的控制效果。造成这种局面的主要原因是:

1) 自20世纪60年代以来,控制理论的理论研究有了很大的发展,先后形成了最优控制、多变量控制、系统辨识、自组织自适应控制、鲁棒控制、预测控制以及智能控制等一系列先进控制理论和方法。然而,这些先进控制理论和方法有些需要对象的精确数学模型,有些导出控制律非常复杂不能满足实时计算的要求,有些有附加的应用条件,有些实际控制效果并不比PID效果好,种种原因使得它们大多在工程上难以应用。20世纪80年代兴起的智能控制,前景诱人,其中的模糊控制有不少工业应用的实例。但总的来看,智能控制迄今仍处于可行性研究阶段,还没有形成系统的应用技术。

2) 先进控制理论和方法大多涉及较多较难的数学知识。工程应用时,控制律设计、软

件实现以及参数调整等通常都比较复杂,专业性很强,一般工程技术人员难以掌握。因此应该提倡搞理论的研究者和工程技术开发者相结合,共同研究、探讨新控制理论的应用技术,逐步解决理论与实践脱节的问题。

综上所述,计算机控制的未来发展一方面受计算机技术发展的推动,另一方面则依赖控制理论和应用的进步与发展。只有不断提高控制水平,才能发挥计算机控制系统的更大潜在功能。为此,要进一步加强先进控制理论,特别是智能控制应用技术的研究,发展各种使用简便的先进控制策略;同时,加速发展计算机控制理论与技术方面的教育,培养更多从事计算机控制的研究、开发和应用工作,既懂控制理论又懂工程应用的专业人才。

1.4 计算机控制理论与设计的基本内容

计算机控制系统中既包含连续的被控对象,也包含离散的控制器,因此计算机控制系统中既有连续信号,也有离散信号,同时,还包含特殊的信号转换环节——A/D 和 D/A 变换,因此计算机控制理论是基于信号转换(准确地说,是对连续信号进行离散采样)对被控对象进行分析和控制器设计及实现的理论。计算机控制理论与设计主要包括如下几个方面。

1. 信号采集与描述

计算机控制系统与连续控制系统的根本区别就在于计算机控制系统中存在连续信号与数字信号(也可认为是离散信号)之间的转换,因此计算机控制系统理论首先包括连续信号与离散信号之间相互转换的理论,包括:

1) 信号转换理论:香农(Shannon)采样定理,采样频谱分析(频率混迭、畸变等现象分析),采样信号的恢复,采样系统的结构图分析,采样周期的选择。

2) 信号的数学描述:离散拉普拉斯变换(又称星号变换), z 变换等。

2. 系统的数学建模与性能指标分析

这是指基于计算机控制系统中离散的信号形式,对计算机控制系统的动态行为予以定量表征,即建立计算机控制系统的数学模型,并基于此进行计算机控制系统性能分析的理论,包括:

1) 差分方程, z 传递函数,单位脉冲响应序列,离散状态空间模型等。

2) 利用上述模型分析计算机控制系统稳定性,暂态性能和稳态性能,灵敏性、鲁棒性和抗干扰性能等。

3. 控制器的设计

控制器的设计是指基于对象的数学模型和性能指标,应用控制理论设计计算机控制系统的数字控制器,包括:

1) 经典控制器的设计方法。以 z 传递函数作为数学模型对离散系统进行常规设计的各种方法的研究,如最小拍、离散 PID 控制、根轨迹设计、Bode 图设计、解析设计法等。

2) 复合系统控制器的设计方法。主要是如何在单回路经典控制设计方法的基础上,增加计算环节、控制环节或其他环节构成对复杂对象的控制,包括串级控制、前馈控制、纯滞后补偿控制、多变量解耦控制、比值控制、均匀控制、选择性控制与分程控制等。

3) 极点配置设计方法,包括针对传递函数模型和针对状态空间模型的两种设计方法。在利用状态空间模型时,包括按极点配置设计控制律及设计观测器两方面的内容。

4) 最优化设计方法,包括针对传递函数模型和针对状态空间模型的两种设计方法。针对传递函数模型的最优设计,主要包括最小方差控制和广义最小方差控制等内容;针对状态

空间模型的最优设计, 主要包括线性二次型最优控制及状态的最优估计两个方面, 通常简称LQG (Linear Quadratic Gaussian) 问题。

5) 先进控制律的设计方法。也可称之为高级控制律的设计, 包括系统辨识与自适应控制、鲁棒控制、预测控制、容错控制等方法。

6) 智能化设计方法。包括模糊控制、专家控制、神经网络控制、分层递阶控制等。

4. 计算机控制系统的工程实现

计算机控制系统的工程实现包括测量数据的预处理, 数字信号量化效应分析, 工程上采样周期的选择, 数字控制器实现中的一些问题 (如计算延时、控制算法编程等), 以及系统的抗干扰与可靠性技术研究等。

计算机控制系统的设计包括: 控制任务分析与控制系统性能指标的拟定; 被控对象特性测试及其模型的建立; 控制系统结构与控制计算机硬件系统 (包括输入、输出通道设备) 结构设计与论证; 测量装置与驱动执行装置的选型; 数字控制器的设计与程序实现; 软件的设计、编写、调试、仿真等各项工作。本书所讲的计算机控制系统设计, 主要是指数字控制器的设计, 较少涉及其他方面的设计内容。

实际上, 数字控制器的设计虽然是其中一项十分重要的工作, 对控制系统的影响很大, 但不是决定系统性能的唯一因素。在工程实践中, 数字控制器的设计应该与其他各项设计工作紧密结合, 全面考虑与其他各项设计工作的协调配合以及影响系统性能的其他有关因素。例如, 如果通过测试表明所建立的系统模型精度很低, 那么在控制系统结构和数字控制器的设计时就应该充分考虑对系统鲁棒性的要求 (指系统的结构和参数在一定范围内变化时, 系统性能仍满足指标的要求), 必要时降低对控制系统精度的要求, 而提高对系统鲁棒性的要求。再比如, 若所选用的执行装置有较严重的非线性, 那么数字控制器的设计就必须考虑非线性特性对系统的影响, 采取适当的非线性补偿措施来降低非线性对系统性能的影响, 或者重新选用线性度较好的执行器。数字控制器设计结果还需要通过仿真实验 (包括纯数字系统仿真和半实物系统仿真) 来检验是否达到设计目标, 否则应修改设计结果直到获得满意的控制系统性能为止。

1.5 计算机控制系统的分类

计算机控制系统的分类方法很多, 可以按照系统的功能、结构、控制律等方式进行分类。按照功能与结构分类, 计算机控制系统可以分为以下几种类型。

1. 操作指导系统 (Operational Guidance System, OGS)

计算机根据一定的算法, 依据检测元件测得的信号, 其数据处理系统对生产过程中的大量参数做巡回检测、处理、分析、记录以及参数的超限报警等。通过对大量参数的积累和实时分析, 可以对生产过程进行各种趋势分析, 为操作人员提供参考。或者, 计算出可供操作人员选择的最优操作条件及操作方案, 操作人员则根据计算机输出的信息去改变调节器的给定值或直接操作执行机构。

2. 直接数字控制系统 (Direct Digital Control, DDC)

计算机通过测量元件对一个或多个物理量进行循环检测, 经采样、A/D转换为数字量, 并根据规定的规律进行运算, 然后发出控制信号直接控制执行机构, 使各个被控量达到预定的要求。

DDC系统中的计算机参与闭环控制过程, 它不仅能完全取代模拟调节器, 实现多回路的PID (比例、积分、微分) 调节, 而且不需要改变硬件, 只通过改变程序就能有效地实现

较复杂的控制,如前馈控制、非线性控制、自适应控制、最优控制等。

DDC 系统是计算机用于工业生产过程控制的最典型的一种系统。在 DDC 系统中使用的计算机作为数字控制器,在热工、化工、机械、冶金等部门已获得广泛应用。

3. 监督控制系统 (Supervisory Computer Control, SCC)

它是操作指导系统和直接数字控制系统的综合与发展。计算机按照描述生产过程的数学模型,计算出最佳给定值,送给模拟调节器或 DDC 计算机,由模拟调节器或 DDC 计算机控制生产过程,使得生产过程始终处于最优工作状态。SCC 系统较 DDC 系统更接近生产变化的实际情况,它不仅可以进行给定值控制,同时还可以进行顺序控制、最优控制等。该类系统有两种结构形式:一种是 SCC+模拟调节器,另一种是 SCC+DDC 控制系统。

4. 集散控制系统 (Distributed Control System, DCS)

以计算机为核心,把工业控制计算机、数据通信系统、显示操作装置、输入输出通道等有机地结合起来,既实现地理上和功能上分散的控制,又通过高速数据通道把各个分散点的信息集中监视和操作,并实现高级复杂规律的控制。

集散控制的优点主要有:容易实现复杂的控制律,系统是积木式结构,系统结构灵活,可大可小,易于扩展;系统可靠性高;采用 CRT 显示技术使操作、监视十分方便;电缆和敷设电缆成本低,施工周期短;易于实现程序控制。

5. 现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS)

现场总线是用于现场仪表与控制室系统之间的一种开放、全数字化、双向、多站的通信系统,使系统成为具有测量、控制、执行和过程诊断的综合能力的控制网络。它实际上融合了智能化仪表、计算机网络和开放系统互连 (OSI) 等技术的精粹。

现场总线的优点主要有:现场总线通过一对传输线,可挂接多个设备,实现多个数字信号的双向传输;数字信号完全取代 4~20mA 的模拟信号,实现了全数字通信;现场总线控制系统具有良好的开放性、可互操作性与互用性;现场设备具有高度的智能与功能自治性,将基本过程控制、报警和计算等功能分布在现场完成,提高了系统的可靠性;对现场环境的高度适应性;使设备易于增加非控制信息,如自诊断信息、组态信息以及补偿信息等;易于实现现场管理和控制的统一。

6. 网络控制系统 (Networked Control System, NCS)

目前以太控制网络正在工业自动化和过程控制市场迅速增长。以太网具有其他网络无法比拟的优势,主要体现在:

- 1) 开放性。采用公开的标准和协议。
- 2) 平台无关性。具有伸缩性,可以选择不同厂家、不同类型的设备和服务。
- 3) 提供多种信息服务。提供 E-mail、WWW、FTP 等多种信息服务。
- 4) 图形用户界面。统一、友好、规范化的图形界面,操作简单,易学易用。
- 5) 信息传递快速准确。
- 6) 易于实现多现场总线的集成。相互包容,多种现场总线集成起来协同完成测控任务。
- 7) 易于实现多系统集成。现场总线控制系统与传统控制系统集成、各种现场总线控制系统之间集成,以太控制网络容易与信息网络集成,组成统一的企业网络。集成主要体现在现场通信协议的相容、不同系统数据的交换以及组态、监控、操作界面的统一上。

8) 易于实现多技术集成。设备互操作性技术、OPC (OLE for Process Control) 技术、Ethernet 技术、TCP/IP 技术、Web 技术、现场总线设备管理技术和无线通信技术集成。