

Automatic Control of Machining Processes
and Its Implementation in MATLAB

加工过程的自动控制 及其MATLAB实现

姚锡凡 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

加工过程的自动控制及其 MATLAB 实现

(Automatic Control of Machining Processes and Its
Implementation in MATLAB)

姚锡凡 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内 容 简 介

本书在简述加工过程控制系统组成及相关知识的基础上,构建加工过程模型,并利用 MATLAB 分析所建立的模型,进而系统地设计和实现加工过程的自动控制各种算法,包括 PID 控制、鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、混合控制等,同时给出加工过程自动控制的实验结果和相应的算法源程序。本书适合从事生产自动化、机械工程、机电一体化的研究人员和工程技术人员阅读,也可作为机械工程及自动化、机电工程、工业自动化等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

加工过程的自动控制及其 MATLAB 实现/姚锡凡编著. —广州:华南理工大学出版社, 2019. 5

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5959 - 3

I. ①加… II. ①姚… III. ①Matlab 软件 - 应用 - 机床 - 自动控制系统 - 研究 IV. ①TG502. 35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 065794 号

加工过程的自动控制及其 MATLAB 实现

姚锡凡 编著

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail:scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 詹志青

印 刷 者: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 12.5 字数: 252 千

版 次: 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

前 言

本书较全面而系统地介绍了加工过程自动控制各种算法，包括常规控制、现代控制和智能控制等。根据加工过程的特点、应用广泛性和自动控制发展趋势，在众多的控制算法和研究中，有所着重和取舍。在加工过程的常规控制算法中，着重介绍了PID控制。PID控制目前在工业生产中仍获得最为广泛的应用，是其他控制算法的基础之一，并且与其他控制算法结合而形成诸如自适应PID、智能PID等。在加工过程的现代控制算法中，着重介绍自适应控制。自适应控制是现代控制算法的典型代表，在加工过程控制的应用方面研究较多，并取得了较多研究成果和一定的实际应用。鲁棒控制是现代控制的研究热点之一，为具有不确定模型的加工过程控制提供了一种新思路。智能控制是当今自动控制研究的前沿热点和重点，其特点之一是不依赖被控对象的数学模型。由于传统自动控制依赖对象模型，而加工过程具有非线性、时变性和不确定性，因此发展不依赖或少依赖加工过程模型的智能控制是十分必要和具有重要的实用价值的；另外，由于不同控制算法各有其优缺点和适用范围，有必要将两种乃至多种不同的控制技术结合起来，克服单一控制技术的不足，形成功能更完善、更强大的混合控制系统。

全书共分12章。第1章介绍加工过程控制系统组成及相关概念与最流行的控制仿真语言——MATLAB语言，以便读者对自动控制系统及其仿真有一个总体认识；第2章介绍加工过程的模型及其特性，以便读者对加工过程的非线性、时变性、不确定性和非最小相位特性有

所了解；第3章和第4章是有关控制系统的数学模型与转换、系统的响应与根轨迹，这两章是控制系统的分析、设计与仿真的基础；第5、6、7、8、9、10、11章分别介绍加工过程的PID控制、鲁棒与优化PID控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、混合控制，是本书的重点和主要内容；第12章是有关加工过程控制算法的实验验证。在本书编写过程中，作者参阅和引用了课题组张毅、常少莉、邹伟全、刘志良等硕士研究生的成果以及其他相关研究者的论著，在此对这些论著的作者深表感谢。需要本书例题程序的读者，可到本书出版社的网站(<http://www.scutpress.com.cn>)下载。

本书是在总结作者近些年教学与研究成果，特别是在国家自然科学基金(项目编号50175029、59905008、59585006)资助所获得的研究成果基础上，进一步系统化、实用化而成的，具有以下特点：

(1) 新颖与系统性。本书不仅介绍了加工过程的常规控制和现代控制，而且还介绍了近些年发展起来的加工过程智能控制。取材新颖，重点突出，包括PID控制、鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、混合控制等内容。

(2) 结合工程实际应用。以加工过程为具体的研究对象，结合生产的实际情况，考虑了诸如非线性、时变性和不确定性等特点，具有非常强的工程性和实用性。

(3) 便于自学和直接应用。书中提供了大量经调试运行的源程序，以及经生产实践所得成果，便于读者自学和直接使用与借鉴。

本书适用于从事生产自动化、机械工程、机电一体化的研究人员和工程技术人员阅读，可作为机械工程及自动化、机电工程、工业自动化等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材。

疏漏不妥之处，请读者不吝批评指正。

作 者
2019年1月

目 录

1	绪论	1
1.1	加工过程控制系统的组成	1
1.2	加工过程的自动控制	2
1.3	控制系统的基本要求	7
1.4	计算机控制	8
1.5	加工过程控制发展趋势	10
1.6	MATLAB 简介	10
2	加工过程的模型与分析	17
2.1	加工过程模型	17
2.2	加工过程模型的仿真分析	21
3	控制系统的数学模型与转换	27
3.1	控制系统数学模型	27
3.1.1	传递函数模型	27
3.1.2	零极点增益模型	28
3.1.3	状态空间模型	29
3.2	控制系统数学模型之间的转换	29
3.3	方框图模型的化简	33
4	系统的响应与根轨迹分析	35
4.1	系统的响应函数	35
4.2	线性时不变系统观察器	38
4.3	根轨迹设计工具	42
4.3.1	根轨迹设计工具	42
4.3.2	根轨迹函数	45

5	加工过程的 PID 控制	48
5.1	PID 控制	48
5.2	PID 控制系统设计	58
5.2.1	Ziegler-Nichols 方法	58
5.2.2	稳定边界法	63
5.2.3	根轨迹设计方法	66
5.2.4	优化方法	70
6	加工过程的鲁棒控制	74
6.1	鲁棒 PID 控制	74
6.2	变结构控制	83
6.2.1	滑模变结构控制原理	83
6.2.2	变结构控制器的设计	84
6.2.3	变结构控制抖振问题	85
6.3	QFT 控制	87
7	加工过程的自适应控制	90
7.1	概论	90
7.2	自适应控制的基本思想及控制模型	91
7.2.1	自适应控制原理	91
7.2.2	控制模型	91
7.3	增益调整自适应控制	92
7.4	模型参考自适应控制	96
7.5	零极点配置自校正控制	98
7.5.1	零极点配置自校正控制原理	98
7.5.2	系统状态反馈	99
7.5.3	系统极点配置	100
7.5.4	离散模型的极点配置控制方法	101
7.5.5	加工过程的极点配置自校正控制	103
7.6	自适应控制的应用实例	105
8	加工过程的模糊控制	108
8.1	模糊控制原理及查表法实现	108
8.2	模糊推理法及其实现	114
8.3	自适应模糊控制	122
8.3.1	模糊控制器性能的改善	122
8.3.2	自适应模糊控制实现	124
8.4	基于模糊芯片的加工过程控制实验	126

8.4.1 常规的模糊控制	127
8.4.2 参数自调整模糊控制	129
8.5 FLC 和 SOFLC/AFLC 与 PID 对比实验	132
9 加工过程的神经网络控制	135
9.1 神经网络模型及其控制学习结构	135
9.1.1 神经网络模型与学习算法	135
9.1.2 神经网络控制的学习结构	136
9.2 基于神经网络的加工过程建模	138
9.2.1 神经网络建模原理	138
9.2.2 加工过程的神经网络建模	139
9.3 加工过程的神经网络自适应控制原理与仿真	141
9.3.1 基于 BP 神经网络的直接自适应控制	141
9.3.2 改进的神经网络直接自适应控制	149
9.3.3 神经网络间接自适应控制	150
9.4 基于神经网络的控制实验实例	151
9.4.1 加工过程的神经网络控制	151
9.4.2 加工过程的模糊神经网络控制	153
10 加工过程的专家控制	156
10.1 专家控制简述	156
10.2 基于知识的加工过程控制示例	160
10.2.1 仿真示例	160
10.2.2 实验示例	163
11 加工过程的混合控制	171
11.1 PD + 智能补偿的混合控制	171
11.2 模糊变结构控制	177
12 加工过程控制实验	179
12.1 铣削加工的半实物实验平台	179
12.1.1 加工过程半实物仿真	181
12.1.2 Simulink 外部模式下实现半实物仿真	181
12.2 模型参数设置及系统标定	183
12.2.1 模型参数设置	183
12.2.2 系统设备标定	184
12.3 加工过程控制实验	187
参考文献	190

1 绪论

本章讨论加工过程计算机控制的基本概念。首先介绍加工过程控制系统的组成和控制算法，然后阐述加工过程的自动控制与计算机控制相关知识，接着讨论控制系统的计算机控制及其未来发展趋势，最后介绍在控制领域的分析与设计研究中最有影响和最为有效的编程语言——MATLAB 语言。

1.1 加工过程控制系统的组成

一个闭环控制系统由被控制对象、控制器和检测装置等环节组成，图 1-1 所示为一个加工过程的负反馈控制系统。

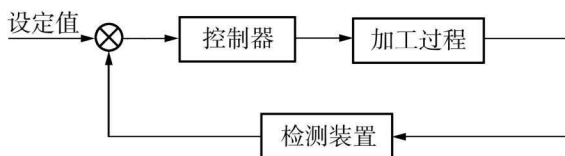


图 1-1 加工过程的负反馈控制系统框图

图 1-1 中的控制器根据设定值与过程的输出之差按照某种算法或规律运算，其输出结果作为控制量。而按调节规律的不同，控制器算法可分为经典控制（如 PID 控制和前馈控制等）、现代控制（如自适应控制和变结构控制等）及智能控制（如专家控制和模糊控制等），如图 1-2 所示。

由于控制方法众多，本书不可能对每种方法都详细介绍。后面各章将结合加工过程的特点，分别介绍具有代表性和应用较多的加工过程控制系统，如 PID 控制、自适应控制和模糊控制等。PID（比例积分微分）控制是经典控制算法的代表，在工业生产中获得最为广泛的应用。在加工过程控制的研究中，PID 控制早期研究较多，现在大多集中于自适应控制和智能控制的研究，但 PID 算法是其他控制算法的重要基础，并且与其他控制算法结合而形成诸如自适应 PID、智能 PID 等。此外，其他控制算法的优劣还往往要与 PID 控制进行比较后才能显现出来。自适应控制是现代控制算法的主要代表，在加工过程控制的应用研究较多，并取得了较多的研究成果。鲁棒控制是现代控制的研究热点之一，为模型具有不

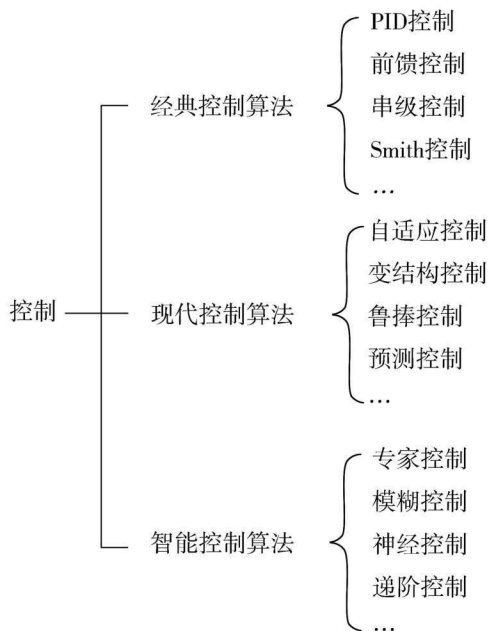


图 1-2 控制算法的分类

确定和非线性的加工过程控制提供了一种新思路。加工过程的智能控制经过 20 多年发展已取得了大量的成果。由于基于知识的控制(专家控制)存在控制实时性和机器学习等问题,目前对加工过程智能控制的研究较多集中于模糊控制和神经网络控制,特别是加工过程的模糊控制取得了丰富的研究成果,是目前加工过程控制的研究热点之一。

1.2 加工过程的自动控制

自动控制理论自创立至今大致经过了三个阶段的发展:第一个阶段为 20 世纪初开始形成并于 50 年代趋于成熟的经典反馈控制理论;第二个阶段为 50—60 年代在线性代数的数学基础上发展起来的现代控制理论;第三阶段为 60 年代中期已开始萌芽,在发展过程中综合了人工智能、运筹学、信息论等多学科成果的智能控制理论。控制理论与制造工程紧密结合已成为现代制造科学发展的一个重要趋势。加工过程的自动控制与控制理论发展类似,也经历了从经典控制、自适应控制到智能控制的发展历程。

如图 1-3 所示,第一阶段是初级阶段,以经典控制理论为主要基础,包括 PID 控制、前馈控制、串级控制、Smith 控制。第二阶段是发展阶段,以现代控

制理论为主要基础,以微型计算机和高档仪表为工具,对较复杂的对象进行控制,包括克服对象特性时变和环境干扰等不确定影响的自适应控制,消除因模型失配而产生不良影响的预测控制等。第三阶段是高级阶段,以人工智能为主要基础,以计算机及其网络为工具,包括专家控制、模糊控制、神经网络控制等。

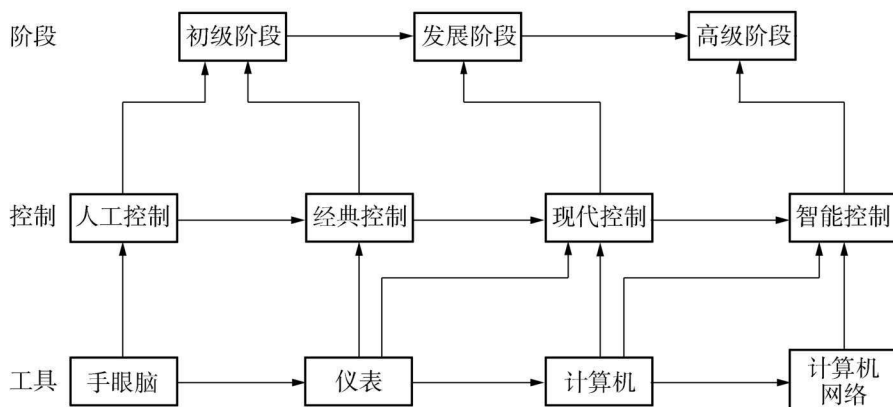


图 1-3 加工过程控制发展示意图

数控机床的研究成功使机械制造业发生一次技术革命,也使机械加工自动化发展进入了一个新阶段。在传统的数控机床上,由编程人员预先确定好切削速度及进给速度等,而这些预先给定的工艺参数,与编程人员的经验和知识有关,这些参数往往不是最优的,而且一旦确定下来就不能随切削条件的变化而改变。机床的自动控制正是为了适应不同切削条件的需要而发展起来的,其主要思想是在加工过程中随时实测某些状态参数,并且根据预定的评价指标(如最大生产率、最低加工成本、最好加工质量等)或约束条件(恒切削力、恒切削速度、恒切削功率等),及时自动地修正输入参数,使切削过程达到最佳状态,以获得最优的切削效益。

1. 经典控制

在 20 世纪 30 至 40 年代期间, Nyquist 提出稳定性的频率判据; Bode 在频率法中引入对数坐标系; Harris 引入传递函数概念, Evans 提出根轨迹法,从而奠定了经典控制理论的基础,到 20 世纪 50 年代,该理论趋于成熟。

经典控制理论主要研究单输入单输出线性定常系统,采用频率响应法,以传递函数为数学工具,根据幅值裕度、相位裕度、超调量和调节时间等性能指标来确定校正装置。系统的综合手段是输出反馈和校正,综合的目标是使系统在满足性能指标要求的同时具有足够的稳定裕量,以此来保证系统在对象特性发生变化和外部干扰影响下仍能保持可接受的控制品质。

在加工过程控制领域中,固定增益的 PID 控制往往被称为“固定增益自适应

控制”。但从自动控制原理上来说,这种 PID 控制系统不是真正的自适应系统,而仅仅是普遍的反馈系统而已。研究表明, PID 控制系统对加工过程内部特性的变化和外部扰动的影响具有一定的抑制能力。但由于 PID 控制器参数是固定的,当系统内部特性变化或者外部扰动的变化幅度很大时,系统的性能常常会大幅度下降,甚至是不稳定的。对那些对象特性或扰动特性变化范围很大的系统,可采用自适应控制。

2. 现代控制

现代控制理论正是为了克服经典控制理论的局限性而在 20 世纪 50 年代末 60 年代初发展起来的,它引用了“状态”的概念,用“状态变量”(系统内部变量)及“状态方程”描述系统,利用计算机作为系统建模分析、设计和仿真的手段。采用状态方程后,最主要的优点是系统的运动方程采用向量、矩阵形式表示,因此形式简单、概念清晰、运算方便,更能反映出系统的内在本质与特性。现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观性、稳定性及许多复杂系统的控制问题,尤其适合多变量、时变系统的设计分析。

虽然现代控制理论可以解决多输入多输出控制系统的分析和控制设计问题,但仍然采用被控对象数学模型进行分析与综合,而模型的精确程度对控制系统性能有很大影响。被控对象准确的数学模型是难以获得的,在建模过程(包括机理建模与辨识)中必要的假设与简化是必不可少的。也就是说,工业过程中的被控对象的模型总包含未建模动态部分。由于它的存在有时会使控制系统的品质大大恶化,有时甚至使自适应控制系统发散。除了被控对象的上述不确定性以外,工业生产过程中的干扰也十分复杂,它们的统计特性往往是未知的,有时甚至是不确定的,难以采用随机控制理论,这给设计控制系统带来很大的困难。虽然自适应控制假设被控制对象的不确定性可用其数学模型中的未知参数来描述,通过在线估计未知参数来克服干扰和不确定性,但实现比较复杂,特别是存在非参数不确定性时,难以保证系统的稳定性。为了保证实际系统对外界干扰、系统的不确定性等有尽可能小的敏感性,引发了研究系统鲁棒控制问题。20 世纪 80 年代出现的 H_∞ 设计方法和变结构控制推动了鲁棒控制理论的发展。

始于 20 世纪 50 年代末 60 年代初的加工过程自适应控制,可分为优化自适应控制(adaptive control optimization, ACO)和约束自适应控制(adaptive constraint control, ACC)两大类,其中 ACO 系统的研究侧重于刀具磨损模型的辨识与建模、切削用量的实时优化算法等方面。由于 ACO 系统中性能指标与控制变量之间存在严重的非线性,加上需要对刀具磨损进行在线检测,使得 ACO 系统寻优过程的期望动态特性的获得变得异常困难,因而难以满足实际加工过程的需要。由于在线检测的局限性和加工过程模型的不确定性,ACO 自适应控制在加工生产上应用不普遍。而 ACC 系统保持约束(切削力、功率等)的恒定,可通过工艺技术

指标的充分利用来间接地使粗加工的生产率最大,还可提高零件加工精度。由于不用经济技术指标,回避了刀具磨损在线检测这一至今仍未得到解决的难题,因而得到较快的发展和更深入的研究。

加工过程的约束型控制,可分为常规控制(固定增益控制)、自适应控制和智能控制等。由于被加工的工件几何形状、材料特性和刀具磨损等,导致加工过程的模型具有时变性和不确定性,因此那些采用增益固定不变的常规控制器,在加工过程模型参数发生较大变化时,使控制系统的性能严重地恶化,甚至变得不稳定。由于自适应控制能根据加工过程的参数变化而自动调整控制器的参数,因此获得了人们更多的关注和重视。

图1-4是约束自适应控制(ACC)示意图,当背吃刀量或切削宽度增大时,进给速度相应地减小,而采用普通方法加工时,采用固定的进给速度(图中虚线、进给速度按最恶劣条件设定),其进给速度较低,生产率也较低。

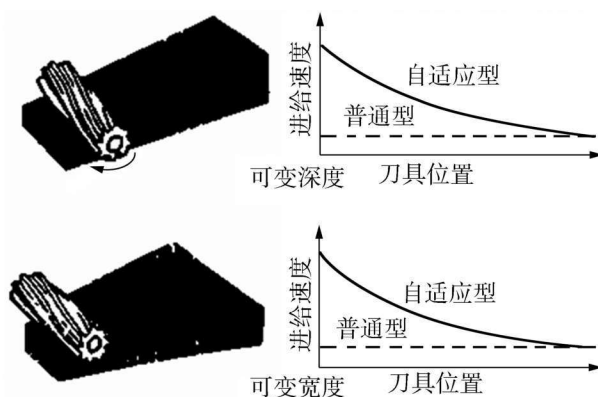


图1-4 约束自适应控制

加工过程的ACC又可分为三种形式:可变增益的自适应控制、模型参考自适应控制(MRAC)和极点配置自校正(STR)控制。可变增益自适应调整方案旨在确保系统的开环增益稳定。模型参考自适应控制和极点配置自校正控制都是建立在模型参数估计有效的基础上,由于加工过程具有时变性,因此需要实时在线辨识过程模型,而加工过程的非线性使得辨识变得困难和实时控制受到影响。当加工过程的模型具有非最小相位特性时,就不能采用常规的MRAC,要用修正的MRAC或极点配置自校正控制,但修正的MRAC算法或STR算法较为复杂。由于加工过程模型的非线性、时变性、不确定性和非最小相位特性,使得基于模型的自适应控制在加工生产上的应用受到一定的限制。

鲁棒控制是现代控制的研究热点之一。所谓鲁棒控制,就是设计一种控制器,使得当系统存在一定程度的参数不确定性及一定程度的未建模动态时,闭环

系统仍能保持稳定,并保持一定的动态性能品质的控制。鲁棒控制实际上是在一定的外部干扰和内部参数变化作用下,用一个结构和参数都是固定不变的控制器的,来保证即使不确定性对系统的性能品质影响最恶劣时仍满足设计要求。鲁棒控制是一类研究不确定系统控制方法的总称,除了传统上的 H_∞ 鲁棒控制,还包括变结构控制和定量反馈控制等。变结构控制作为一种鲁棒控制设计方法,在连续与离散的加工系统中获得了应用。由于定量反馈理论具有较好的工程应用背景且与经典控制方法相接近,在加工过程应用研究中也颇受青睐。

自适应控制和鲁棒控制都是为了克服系统中所包含的不确定性,以达到优化控制的目的,然而,自适应控制是以自动调节控制器的参数,使控制器与被控对象和环境达到良好的“匹配”来消除不确定的影响的。从本质上来说,自适应控制是通过对与控制质量有关因素的估计,以补偿的方法来克服干扰和不确定性;而鲁棒控制是在一定的外部干扰和内部参数变化作用下,以提高系统的不灵敏度为宗旨,来抵御不确定性。

经典控制理论和现代控制理论可称为传统控制理论,两者都是建立在对象数学模型的基础上。尽管自适应控制和鲁棒控制在一定程度上减少现代控制理论对数学模型的依赖,但它们本质上还是没有摆脱基于数学模型的量化思想,传统控制在加工过程应用中遇到了困难。与此同时,一些所谓无模型控制方法(如模糊控制、专家系统、神经网络控制等智能控制方法)应运而生并且蓬勃发展,运用到加工过程控制中。

3. 智能控制

智能控制是自动控制发展的新阶段,其特点之一是不依赖被控对象的数学模型。由于传统的自动控制依赖过程模型,而加工过程由于加工参数的影响而具有严重的不确定性和时变性,因此发展不依赖或少依赖加工过程模型的智能控制是十分必要的,同时也是适应加工系统的高度集成化和智能化的需要。1980 年 Matsushima 等首先研究了机床的智能控制,此后对加工过程的智能控制进行了广泛的研究,包括加工过程的专家控制、模糊控制和神经网络控制等领域。专家控制是专家系统与自动控制技术的结合,它利用被控对象与人操作控制的各种知识来弥补传统控制因难以建立对象模型而无法进行有效控制的不足。模糊控制的本质是将人的操作经验用模糊关系来表示,通过模糊推理和决策方法来对复杂过程进行有效的控制,具有不依赖被控对象模型和鲁棒性强等特点,为非线性和不确定性的复杂系统控制提供了良好的途径。神经网络因其具有并行计算、分布式信息存储、非线性映射能力和自适应学习能力,已在控制领域表现出其独特的潜力。专家控制、模糊控制和神经网络控制各具特点,对它们的研究为具有非线性、时变性和不确定性的加工过程控制提供了新的有效途径和方法。需要指出的是,智能控制并不排斥包括自适应控制在内的传统控制,而是继承和发展,它们各有所

长,如专家系统与传统控制相结合而形成一种递阶智能控制,其中专家系统完成组织级、协调级的智能调度,而执行级用传统控制方法作为对象的直接控制。

1.3 控制系统的基本要求

评价一个控制系统的好坏,其指标是多种多样的。对每一个具体系统来说,由于控制对象不同,工作方式不同,完成的任务不同,因此对系统性能的要求往往也不完全一样,甚至差异很大。但是,对控制系统的基本要求(基本性能)一般可以归纳为稳定性、快速性和准确性。

1. 系统的稳定性

稳定性的要求是控制系统正常工作的首要条件,而且是最重要的条件,它表征着一个系统能够恢复其平衡态的能力特性。一个系统如果不稳定,其运动就不受预定的约束,受控量将忽大忽小,产生振荡,或使运动发散而不能达到原定的工作状态。因此,一个控制系统要完成令人满意的工作,首先应该是稳定的,即应该具有这样的性质:输出量对给定的输入量的偏离随着时间增长逐渐趋近于零。同时,稳定性的要求应该考虑到满足一定的稳定裕度,以便照顾到系统工作时参数可能发生的变化,以免由此变化而导致系统失稳。

2. 响应的快速性

在系统稳定性的前提下,响应的快速性是衡量系统性能的一个很重要的指标,它表征系统瞬态运动趋于平衡态的速度特性。所谓快速性,是指当系统的输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。衡量一个系统响应的快速性一般有两种方法:一种方法是,在阶跃信号作用下,用系统跟随的瞬态响应时间来衡量。瞬态响应时间(也称过渡时间或调整时间)越小,说明系统从一个稳态过渡到另一个稳态所需要的时间越短,反之则越长。另一种方法是,用在过渡过程中系统出现的超调量来衡量,超调量越小,则说明系统的过渡过程进行得越平稳。

3. 响应的准确性

响应的准确性是指在过渡过程结束后输出量与给定的输入量的偏差,也称为静态偏差,它表征系统稳态运动与目标平衡态的误差特性。当由一个稳态过渡到另一个稳态时,总希望输出量尽量接近或复现给定的输入量,即要求稳态精度尽可能高。由于外界干扰和给定输入量经常在变化,系统处在不断调整的过程中,但在一定时间内,系统的输出大致可以视为是不变的。

可见,对于控制系统,人们要求系统中被控对象的行为应尽可能迅速而准确地实现它所应遵循的变化规律。

1.4 计算机控制

控制理论与计算机技术相结合,产生了计算机控制理论与技术。含有计算机并且由计算机完成部分或全部控制功能的控制系统,都可以称为计算机控制系统。随着计算机应用技术的日益普及,计算机在控制工程领域中也发挥着越来越重要的作用,它在控制系统中的应用主要可分为以下两个方面。

(1)利用计算机帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿真以及建模等工作,从而大大减轻了设计人员的繁杂劳动,缩短了设计周期,提高了设计质量,这方面的内容简称为计算机辅助控制系统设计(computer aided control system design, CACSD)或控制系统 CAD,这是计算机在控制系统方面的离线应用。

(2)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部分。这种有计算机参与控制的系统简称为计算机控制系统,这是计算机在控制系统中的在线应用。计算机控制系统与通常的模拟反馈系统最突出的差别是控制规律由数字计算机来实现。由于数字计算机具有采集、传送、存储、处理大量数据的能力,使自动控制进入了以计算机为主要控制设备的新阶段。

计算机与自动控制的结合日益密切和广泛,不仅能实现复杂的控制规则,而且被控对象已从单一回路扩展到企业生产过程的管理和控制。计算机控制系统按功能来分有顺序控制、程序控制、直接数字控制、计算机监督控制、分级控制和分布控制等;按控制规律来分,则有 PID 控制、最优控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制等。本书主要按控制规律来介绍加工过程的计算机控制。

计算机控制系统由计算机、被控制对象、输入输出通道和检测装置等环节组成,因强调计算机作为控制系统的一个重要的组成部分而得名。计算机通过输入通道将采样得到的数据,按预定的控制规律进行运算,并通过输出通道把计算结果转换成模拟量(或直接以数字量输出)去控制被控对象,使被控制量达到预期的目标。计算机的高速度、高精度、集成化、大容量、多功能,特别是日趋完善和功能强大的各种控制软件的支持,使它参与各类过程的控制有着广阔的前景。

CACSD 专用于研究控制系统的建模、分析、设计与仿真。因为它与控制理论、控制系统紧密相联,利用不断汲取的计算机技术新成果,加速设计过程,优化设计结果,并具有直观、快捷、准确等优点,所以, CACSD 自研究开发以来就显示出了其极强的生命力,因而在控制理论的研究、教学、工程设计和工业生

产中发挥着重大作用,已成为控制理论与教学不可缺少的工具。世界各国控制界普遍重视 CACSD,开展了一系列专门的研究,取得了卓著的成效,北美西欧各大学都在使用 CACSD 软件进行教学和科研。CACSD 学术组织陆续成立, CACSD 学术会议也在不断开展。

CACSD 形成于 20 世纪 60 年代末 70 年代初,是随着计算机技术和控制理论的发展、实际应用的需要以及算法的突破而形成和发展起来的。

在第一台数字电子计算机问世以前和问世以后不久,控制系统的建模、分析、设计、仿真,主要依据的是经典控制理论,形成了一套行之有效的工程化设计方法,如根轨迹图、奈魁斯特图、伯德图的使用等,只靠试探法手工设计就可以满足控制系统分析设计的需要,无须计算机的介入,而且初期计算机性能差,编程难,不易交互,只用来处理数值计算问题。20 世纪 50 年代中期,航天技术的需求导致了现代控制理论的状态空间法的产生和发展,它不仅特别适于各种空间问题,更重要的是,现代控制理论是以线性空间和矩阵理论为基础,对控制系统进行定量分析与设计,能够借助计算机进行必要的运算。空间问题中分析设计的计算量很大,且随着系统的阶数呈几何级数上升,有了计算机的参与,才使人工难以完成的运算得以进行。20 世纪 60 年代大型机批处理运作方式使频率响应、时间响应、根轨迹、仿真等运算成为可能,世界各地各院所都有自己编写的各种各样的运算程序。欧美逐渐形成可联合使用的各种算法子程序库,但它们几乎没有软件可移植性、可兼容性及可重用性,数据难以通用,当时也没有任何商用软件。20 世纪 70 年代随着主机(mainframe)终端访问的实现,开始出现各种交互综合功能软件用于一次完成控制系统分析设计和仿真等不同任务,专用于控制问题的商用软件大量涌现。这些软件一般规模很大,难以修改和扩充,控制系统设计者不得不亲自编写自己需要的专用软件。1980 年, Moler 于 Lund Institute of Technology 召开的关于控制系统数值计算的学术会议上,正式公开宣布了矩阵数值计算软件 MATLAB 开发成功。MATLAB 的问世在控制界产生了巨大的影响,现已成为最有影响和最为有效的 CACSD 编程语言。

特别自 1993 年以来, MathWorks 公司相继推出了不同版本的 MATLAB。国内已陆续出版了介绍 MATLAB 的专著,使用 MATLAB 的单位和个人也不断增加。随着 MATLAB 版本的不断升级,其所含的工具箱的功能也越来越丰富,因此应用范围也越来越广泛,已成为涉及数值分析的各类设计不可或缺的工具。本书将利用 MATLAB 和相应的 Simulink 对加工过程进行分析、设计、仿真研究。