

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 无模型自适应控制 ——理论与应用

侯忠生 金尚泰 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地总结了作者自 1994 年以来关于无模型自适应控制理论和应用的研究成果. 无模型自适应控制是指仅利用受控系统的输入输出数据直接进行控制器的设计和分析, 并能实现未知非线性受控系统的参数自适应控制和结构自适应控制的一种全新架构的控制理论与方法. 本书主要内容包括: 伪偏导数、伪梯度、伪 Jacobian 矩阵和广义 Lipschitz 条件等新概念, 非线性系统的动态线性化技术, 无模型自适应控制、无模型自适应预测控制和无模型自适应迭代学习控制等控制方法, 以及相应的稳定性分析和典型的实际应用; 同时也包括复杂互联系统的无模型自适应控制、无模型自适应控制与其他控制方法之间的模块化设计、无模型自适应控制的鲁棒性和无模型自适应控制系统的对称相似结构构想等若干重要问题.

本书可供从事控制科学与工程领域的研究生、教师、研究人员, 以及从事过程控制实践的工程师参考和阅读.

### 图书在版编目(CIP)数据

无模型自适应控制: 理论与应用/侯忠生, 金尚泰著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037993-1

I. ①无… II. ①侯…②金… III. ①控制-自动化-研究 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 136221 号

责任编辑: 余 丁 于 红 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 20

字数: 382 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

自 20 世纪 50 年代末以来,现代控制理论得到了空前的发展和完善,形成了许多领域与分支,如线性系统理论、最优控制、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制、变结构控制和随机系统理论等,并已在工业过程、航空航天以及军事等诸多方面取得了令人瞩目的成就.然而,无论从学科发展还是应用需求方面来看,现代控制理论研究和应用都面临着巨大的挑战.现代控制理论是基于受控对象的数学模型或标称模型精确已知这个基本假设建立和发展起来的.众所周知,建立受控系统的数学模型不是一件容易的事情,有时甚至是不可能的,即使受控系统的数学模型能建立起来,其数学模型也不是精确的.因此,现代控制理论在实际应用中面临着建模困难、不易应用、鲁棒性差、不安全以及理论分析结果与实际应用效果存在鸿沟等诸多问题.系统精确建模和模型简约或控制器简约、未建模动态和系统鲁棒性、未知不确定性与鲁棒控制要求不确定性上界已知等问题是一些孪生的长期存在的理论难题,这些问题的解决在传统基于模型的控制理论研究框架下是非常困难的,从而阻碍了现代控制理论的健康发展.进一步,即使我们有办法建立受控系统精确的数学模型,由于实际受控系统的复杂性,其建立起来的数学模型也将是非常复杂的高阶强非线性时变系统,从而导致控制器的设计和系统分析变得非常复杂.同时,复杂控制器在实际应用中成本高、不易被工程师接受、不易应用、不易维护.

近年来,随着科学技术、特别是信息科学技术的快速发展,化工、冶金、机械、电力和交通运输等系统发生了重大变化,企业的规模越来越大,生产过程越来越复杂,对产品质量的要求越来越高,使得基于受控对象精确数学模型的控制理论和方法在实际中的应用变得越来越困难.然而,实际系统和工业过程时刻都在产生大量的生产和过程数据,这些数据隐含着系统状态变化和过程运行等信息.如何有效利用这些数据以及这些数据中蕴含的知识,在难以建立受控系统较准确模型的条件下,实现对系统和生产过程的优化控制已成为控制理论界迫切需要解决的问题.因此,研究和发展数据驱动控制理论与方法是新时期控制理论发展与应用的必然选择,具有重大的理论与现实意义.

无模型自适应控制是一种典型的数据驱动控制方法,它是本书的第一作者于 1994 年在其博士论文中提出的.无模型自适应控制仅利用受控系统的输入输出数据进行控制器的设计,能实现未知非线性受控系统的参数自适应控制和结构自适应控制,摆脱了控制器设计对受控系统数学模型的依赖及上述各种孪生的

理论难题,为控制理论的研究和实际应用提供了一种全新的控制理论与方法.经过近 20 年的研究与发展,无模型自适应控制已经形成了系统的理论体系,并且已经在许多实际系统,如电机、化工、机械等领域得到了成功的应用.

本书的主要内容包括离散时间非线性系统的动态线性化方法、无模型自适应控制方法、无模型自适应预测控制方法、无模型自适应迭代学习控制方法以及相应的稳定性分析和典型的实际应用,同时也包括复杂互联系统的无模型自适应控制、无模型自适应控制方法与其他控制方法之间的模块化设计、无模型自适应控制的鲁棒性和无模型自适应控制系统的对称相似结构构想等若干重要问题.

感谢国家自然科学基金委员会重点项目、重大国际合作项目和面上项目(60834001、61120106009、60474038)的资助.没有国家自然科学基金委员会的长期支持,就没有本书工作的完善.

感谢我已经毕业的和在读的研究生们,与他们的合作研究对无模型自适应控制理论研究的完善和实际应用起到了重要的作用.已毕业的研究生有池荣虎博士、金尚泰博士、王卫红博士、殷辰堃博士、晏静文博士、卜旭辉博士和柳向斌博士;在读博士研究生有李永强、孙何青、朱明远和吉鸿海.尤其是池荣虎博士和殷辰堃博士,他们为本书的最后定稿付出了很多的努力!感谢新加坡国立大学的 Jian-Xin Xu 教授,与他的讨论对本书动态线性化方法的数学严谨性起到了帮助作用;感谢浙江工业大学的孙明轩教授和新加坡国立大学的 Cheng Xiang 副教授对本书的写作提出的有益建议;感谢引用无模型自适应控制方法进行理论研究,尤其是进行实际系统应用的国内外学者,没有他们成功的实际应用对我们的激励,很难想象我们能有这么大的自信和勇气一直坚守这一方向的研究!

侯忠生

2013 年 5 月于北京

# 目 录

前言

缩写表

符号对照表

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 基于模型的控制 .....	1
1.1.1 建模和辨识 .....	1
1.1.2 基于模型的控制设计 .....	3
1.2 数据驱动控制 .....	4
1.2.1 数据驱动控制的定义和动机 .....	5
1.2.2 数据驱动控制方法的被控对象 .....	6
1.2.3 数据驱动控制理论与方法的必要性 .....	7
1.2.4 已有数据驱动控制方法的简要综述 .....	8
1.2.5 数据驱动控制方法总结 .....	12
1.3 章节概况 .....	13
第 2 章 离散时间系统的递推参数估计 .....	15
2.1 引言 .....	15
2.2 线性参数化系统的参数估计算法 .....	16
2.2.1 投影算法 .....	16
2.2.2 最小二乘算法 .....	17
2.3 非线性参数化系统的参数估计算法 .....	20
2.3.1 投影算法及其改进形式 .....	20
2.3.2 最小二乘算法及其改进形式 .....	23
2.4 小结 .....	32
第 3 章 离散时间非线性系统的动态线性化方法 .....	33
3.1 引言 .....	33
3.2 SISO 离散时间非线性系统 .....	34
3.2.1 紧格式动态线性化方法 .....	34
3.2.2 偏格式动态线性化方法 .....	39
3.2.3 全格式动态线性化方法 .....	43

3.3 MIMO 离散时间非线性系统 .....	46
3.3.1 紧格式动态线性化方法 .....	46
3.3.2 偏格式动态线性化方法 .....	47
3.3.3 全格式动态线性化方法 .....	49
3.4 小结 .....	51
<b>第4章 SISO 离散时间非线性系统的无模型自适应控制 .....</b>	<b>53</b>
4.1 引言 .....	53
4.2 基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	54
4.2.1 控制系统设计 .....	54
4.2.2 稳定性分析 .....	57
4.2.3 仿真研究 .....	61
4.3 基于偏格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	67
4.3.1 控制系统设计 .....	67
4.3.2 稳定性分析 .....	69
4.3.3 仿真研究 .....	75
4.4 基于全格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	82
4.4.1 控制系统设计 .....	82
4.4.2 仿真研究 .....	84
4.5 小结 .....	89
<b>第5章 MIMO 离散时间非线性系统的无模型自适应控制 .....</b>	<b>91</b>
5.1 引言 .....	91
5.2 基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	92
5.2.1 控制系统设计 .....	92
5.2.2 稳定性分析 .....	95
5.2.3 仿真研究 .....	100
5.3 基于偏格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	104
5.3.1 控制系统设计 .....	104
5.3.2 稳定性分析 .....	107
5.3.3 仿真研究 .....	111
5.4 基于全格式动态线性化的无模型自适应控制 .....	115
5.4.1 控制系统设计 .....	115
5.4.2 仿真研究 .....	119
5.5 小结 .....	122

---

<b>第 6 章 无模型自适应预测控制</b>	123
6.1 引言	123
6.2 基于紧格式动态线性化的无模型自适应预测控制	124
6.2.1 控制系统设计	124
6.2.2 稳定性分析	128
6.2.3 仿真研究	130
6.3 基于偏格式动态线性化的无模型自适应预测控制	135
6.3.1 控制系统设计	135
6.3.2 仿真研究	140
6.4 基于全格式动态线性化的无模型自适应预测控制	146
6.4.1 控制系统设计	146
6.4.2 仿真研究	150
6.5 小结	152
<b>第 7 章 无模型自适应迭代学习控制</b>	154
7.1 引言	154
7.2 基于紧格式动态线性化的无模型自适应迭代学习控制	155
7.2.1 迭代域的紧格式动态线性化方法	155
7.2.2 控制系统设计	157
7.2.3 收敛性分析	159
7.2.4 仿真研究	162
7.3 小结	164
<b>第 8 章 复杂互联系统的无模型自适应控制及控制器模块化设计</b>	165
8.1 引言	165
8.2 复杂互联系统的无模型自适应控制	166
8.2.1 串联系统的无模型自适应控制	166
8.2.2 并联系统的无模型自适应控制	169
8.2.3 反馈连接系统的无模型自适应控制	170
8.2.4 复杂连接系统的无模型自适应控制	172
8.2.5 仿真研究	174
8.3 控制器模块化设计	180
8.3.1 估计型控制系统设计	180
8.3.2 嵌入型控制系统设计	182
8.3.3 仿真研究	187
8.4 小结	191

<b>第9章 无模型自适应控制的鲁棒性</b>	192
9.1 引言	192
9.2 存在输出量测噪声情形下的无模型自适应控制	193
9.2.1 鲁棒稳定性分析	193
9.2.2 仿真研究	196
9.3 数据丢失情形下的无模型自适应控制	198
9.3.1 鲁棒稳定性分析	199
9.3.2 带有丢失数据补偿的无模型自适应控制方案	201
9.3.3 仿真研究	206
9.4 小结	208
<b>第10章 控制系统设计的对称相似性</b>	210
10.1 引言	210
10.2 自适应控制系统的对称相似结构	211
10.2.1 对称相似结构构想及设计原则	212
10.2.2 具有对称相似结构的基于模型的自适应控制	213
10.2.3 具有对称相似结构的无模型自适应控制	218
10.2.4 仿真研究	221
10.3 无模型自适应控制和无模型自适应迭代学习控制的相似性	228
10.4 自适应控制和自适应迭代学习控制的相似性	230
10.4.1 离散时间非线性系统的自适应控制	231
10.4.2 离散时间非线性系统的自适应迭代学习控制	236
10.4.3 两种控制方法的对比	241
10.5 小结	243
<b>第11章 应用</b>	244
11.1 引言	244
11.2 三容水箱系统	245
11.2.1 实验装置	245
11.2.2 三种数据驱动控制方案	246
11.2.3 实验研究	248
11.3 永磁直线电机	253
11.3.1 永磁同步直线电机	254
11.3.2 双轴直线电机龙门系统	262
11.4 快速路交通系统	265
11.4.1 宏观交通流模型	266



---

11.4.2 控制方案设计 .....	268
11.4.3 仿真研究 .....	269
11.5 焊接过程 .....	272
11.5.1 实验系统 .....	273
11.5.2 控制方案设计 .....	274
11.5.3 仿真研究 .....	274
11.5.4 实验研究 .....	276
11.6 兆瓦级风力发电 .....	278
11.6.1 风电叶片静力加载控制系统 .....	278
11.6.2 控制方案设计 .....	279
11.6.3 静力加载试验 .....	280
11.7 小结 .....	281
<b>第 12 章 结论与展望 .....</b>	<b>282</b>
12.1 结论 .....	282
12.2 展望 .....	283
<b>参考文献 .....</b>	<b>285</b>



# 第 1 章 绪 论

本章首先简要地回顾了基于模型的控制理论中存在的问题和挑战,然后概要地介绍了已有的各种数据驱动控制方法及应用,并尝试给出了数据驱动控制的定义、分类方法、特点以及一些本质的理解,最后是本书后续各章节的简介.

## 1.1 基于模型的控制

Kalman 在 1960 年提出的状态空间方法的概念<sup>[1,2]</sup>标识着现代控制理论与方法的萌芽和诞生. 由于现代控制理论是基于受控对象的数学模型或标称模型精确已知这个基本假设建立和发展起来的,因此,它也可被称为是基于模型的控制(model based control, MBC)理论. 随着现代控制理论的主要分支,线性系统理论、系统辨识理论、最优控制理论、自适应控制理论、鲁棒控制理论以及滤波和估计理论等的蓬勃发展, MBC 理论在实际中得到了广泛的成功应用,尤其是在航空航天、国防、工业等领域更是取得了无可比拟的辉煌成就. 但是,随着现代科学和技术的发展,系统和企业的规模越来越大,工艺和过程越来越复杂,对产品质量的要求也越来越高,这给 MBC 的理论研究和实际应用带来了许多前所未有的挑战.

### 1.1.1 建模和辨识

目前绝大多数线性系统和非线性系统的控制方法都属于 MBC 方法. 利用 MBC 理论与方法进行控制系统设计时,首先要得到系统的数学模型,然后根据“确定等价原则”在得到的系统数学模型基础上设计控制器,最后基于所获取的数学模型进行闭环控制系统分析. “确定等价原则”成立的依据是承认系统模型可以代表真实的实际系统,这是现代控制理论的基石. 因此,系统模型对于 MBC 理论是不可或缺的.

系统模型的获取主要有两种方法:机理建模和系统辨识. 机理建模指的是根据物理或化学定律建立被控对象的动力学方程,并通过一系列试验来确定动态系统参数的建模方法. 系统辨识是事先给定模型集合,然后利用受控过程的在线或离线的量测数据从模型集合中寻找与这些采样数据最贴近的被控对象的输入输出(input/output, I/O)模型,预先给定的模型集合必须能覆盖真实系统才能使辨识模型在一定程度的偏差下很好地逼近原有的真实系统. 由于实际系统内部结构和外部运行环境的复杂性,采用机理建模或通过系统辨识方法建立的模型都仅是

对真实系统带有一定偏差的逼近模型. 换句话说, 未建模动态和其他不确定性在上述的建模过程中总是不可避免的. 而基于这种不精确的数学模型设计控制器, 在实际应用中会存在各种各样的问题, 未建模动力学因素以及各种外部扰动等原因可能引起闭环控制系统鲁棒性差, 有时甚至会引起失稳或者安全事故<sup>[3-6]</sup>.

为了在保持 MBC 方法设计优点的同时增强控制系统的鲁棒性, 科学家们已经付出了巨大的努力来发展鲁棒控制理论. 人们考虑了多种方法对不确定性进行描述, 如对噪声、模型误差的加性描述、乘性描述或假设这些不确定性的上界已知. 鲁棒控制设计方法依赖于对这些不确定因素的描述. 然而, 机理建模或系统辨识方法都不能给出上述各种不确定性的定性或定量描述. 即使针对不确定性的上界, 到现在为止也没有获取任何有效的辨识方法. 关于不确定性的描述与各种建模方法所能提供的结果是相互不配套的. 换句话说, 这些关于不确定性的假设与已有的机理建模或系统辨识方法所能提供的结果不一致<sup>[7]</sup>, 进而导致鲁棒控制方法在实际应用时可能无法保证其控制效果和安全性<sup>[8]</sup>.

通常, 控制系统的设计思路是, 先花大力气通过机理建模或系统辨识方法尽可能地建立受控系统的非常精确的数学模型(包括模型不确定性), 然后在此基础上进行 MBC 系统设计, 最后再进行实际应用. 然而, 这种思路面临着理论和实际的双重困难. 首先, 未建模动态和鲁棒性是一对不可避免的孪生问题, 它们在传统的 MBC 理论框架下是不能同时得到解决的. 理论上讲, 实际系统都是非常复杂的非线性系统. 对于复杂非线性系统, 到现在为止, 无论是数学理论还是系统辨识理论都没有很好的工具和方法能够给出系统精确的建模结果. 受控系统的精确建模有时候比控制系统设计自身更难实现. 如果系统的结构是时变的或者含有快时变参数, 则用解析的数学工具很难对系统进行设计和分析. 其次, 模型越精确, 需要花费的代价就越大, 依此精确模型所设计的控制器也会越复杂. 复杂的控制器会使闭环系统的鲁棒性和可靠性降低, 同时也会使控制系统的实现及应用变得更加困难. 如果动态系统的模型阶数非常高, 基于此高阶模型进行控制系统设计必定会导致控制器也具有很高的阶数, 而高阶控制器可能导致控制系统的设计、分析和应用变得更加复杂, 系统监控和维护也更为困难, 因此, 高阶模型不适用于实际的控制器设计. 实际中, 为了得到简单实用的控制系统, 必须要对复杂的高阶数学模型或者高阶控制器进行额外的模型简约和控制器简约工作. 因此, 这是一对矛盾. 一方面为了提高被控对象的性能需要建立精确的高阶模型; 另一方面为了得到低阶控制器又需要进行模型简约. 最后一个非常重要的理论问题是建模中的持续激励条件. 在系统建模和闭环控制过程中如何保障系统输入信号具有持续激励条件是一个非常具有挑战性的问题. 若缺乏持续激励的输入, 则无法得到系统的精确模型. 没有精确的数学模型, 在实际系统中应用 MBC 理论和方法就不能保证它一定能使闭环控制系统达到其理论分析得到的控制效果, 如稳定性和收敛

性等<sup>[4-6,8]</sup>. 因此,持续激励条件与控制效果是一对不可调和的矛盾,这对矛盾在传统的 MBC 理论框架下也是很难得到解决的.

### 1.1.2 基于模型的控制器设计

在现代控制理论中,控制器的设计都是基于受控系统的数学模型给出的. 典型的线性控制系统设计方法有零极点配置、线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)设计、最优控制等. 对于非线性系统,最基本的控制器设计方法包括基于 Lyapunov 函数的设计方法、backstepping 设计方法和反馈线性化设计方法等. 这些控制器设计方法都被认为是 MBC 系统的基本设计方法. MBC 设计方法的特点体现在对被控系统的闭环误差动力学的数学分析中,甚至还包括在控制系统的运行监控、评价和诊断的各个环节中. MBC 理论框架体系如图 1.1 所示. 从该示意图可以看出,系统模型和假设既是 MBC 系统设计和分析的起点,同时也是 MBC 系统设计和分析的目的.

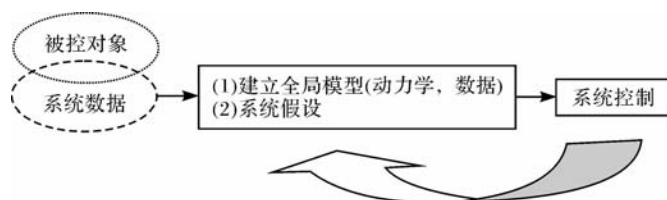


图 1.1 MBC 理论框架

由于未建模动态和其他不确定性总是存在于建模过程中,因此基于 MBC 方法设计的控制器在实际应用中并不一定能很好地工作,甚至可能会导致很差的动态性能和使闭环系统失稳,任意小的建模误差都可能会引起非常差的闭环性能<sup>[9]</sup>. Rohrs 给出的关于自适应控制的反例给研究 MBC 理论和方法的学者敲响了警钟. Rohrs 等指出,基于一些系统模型假设和确定性等价原理设计得到的自适应控制系统,在存在未建模动态的情况下,可能会表现出某种不希望得到的动态行为<sup>[10,11]</sup>,从而使 MBC 系统设计方法的正确性和可用性受到质疑.

如果针对系统模型所做的假设不正确,即使模型是精确的,通过严谨的数学推导所得到的诸如稳定性、收敛性和鲁棒性等理论分析结果也不总是有价值的. 以自适应控制为例,典型的说法是在假设 A、B、C、D 和 E 成立的条件下,利用算法 F,当时间趋于无穷时,所有信号都是有界的,以及其他一些结果成立. 进一步,由于建模中未建模动态以及各种其他外界扰动等不确定性的存在,自适应控制系统在运行中也可能产生参数随时间的漂移. 参数漂移和其他外界因素引起的未建模动态就可能引起自适应控制系统的失稳,也就是说,自适应控制所给出的结论并未排除在时间趋向无穷前的某个时刻,与系统相连的控制器会使闭环系统变得不

稳定这种可能性<sup>[6]</sup>.

自适应控制系统研究中通常含有两类不确定因素,一类是参数不确定性,另一类是非参数的模型不确定性. 为了加强控制系统的鲁棒性,人们提出了许多改进技术和鲁棒自适应控制设计方法,如正规化、死区方法、投影方法、 $\sigma$ 修正和滑模自适应控制方法等. 自适应控制系统的鲁棒性是现在许多研究者所关心的棘手问题.

总之,对于 MBC 系统设计,由于受控系统的动力学模型是嵌入在控制系统中的,因此建模精度和针对受控系统数学模型所作假设的正确性决定了控制系统性能、可靠性和安全性. 如果没有系统模型和系统假设,就无法进行控制器的设计和控制系统的分析,更无从谈起控制方法的应用. 系统模型既是 MBC 设计方法的出发点,也是目的地. 在某种意义上, MBC 方法应该被称为是模型理论而非控制理论.

## 1.2 数据驱动控制

随着信息科学技术的发展,许多工业过程都经历了翻天覆地的变化,如化工业、冶金业、机械制造业、电子工业、电气工业、交通运输业等. 工业生产的规模越来越大,设备工艺越来越复杂,对产品的质量要求也越来越高,对这些过程进行机理建模或者辨识建模变得越来越困难. 因此,利用传统的 MBC 理论来解决这些难于建模的工业过程的控制问题会变得更加困难和不现实. 但另一方面,工业过程中每时每刻都产生并储存了大量的过程数据,这些数据中包含了关于过程运行和设备状态的全部有用信息. 在无法获得过程精确模型的情况下,如何利用这些离线或在线的过程数据直接进行控制器设计,实现对这些过程的有效控制,甚至实现对系统的监测、预报、诊断和评估等,并将其提炼上升为数据驱动控制(data driven control, DDC)理论和方法,是一项具有重要应用价值的工作,同时对完善控制理论也具有十分重要的意义.

到目前为止,文献中已经给出了一些数据驱动的控制方法,如 PID 控制、无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)、迭代反馈整定(iterative feedback tuning, IFT)、虚拟参考反馈整定(virtual reference feedback tuning, VRFT)和迭代学习控制(iterative learning control, ILC)等. 虽然 DDC 的研究现在仍处于萌芽状态,但在控制理论领域已经吸引了越来越多学者的广泛注意. 明尼苏达大学数学及应用研究所(The Institute for Mathematics and Applications, IMA)在 2002 年举办了一次名为“IMA Hot Topics Workshop: Data-driven Control and Optimization”的研讨会. 中国国家自然科学基金委员会(NSFC)于 2008 年 11 月召开了题目为“Data-based Control, Decision, Scheduling, and Fault

Diagnostics”的“双清论坛”。随后,《自动化学报》于2009年6月出版了同名的专刊<sup>[12]</sup>。国家自然科学基金委员会和北京交通大学在2010年11月又召开了名为“International Workshop on Data Based Control, Modeling and Optimization”的国际学术研讨会。2009年和2011年举办的中国自动化大会(Chinese Automation Congress)也把数据驱动控制列为大会的主论坛题目之一。另外,2010年和2011年,国际控制领域著名期刊 *IEEE Transactions on Neural Networks*、*Information Sciences* 和 *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 也分别发布了数据驱动控制的专刊征文通知。其中, *IEEE Transactions on Neural Networks* 的专刊已于2011年11月出版发行<sup>[13]</sup>。

### 1.2.1 数据驱动控制的定义和动机

截至目前,在因特网上可找到的关于数据驱动控制的定义有如下三种。

**定义 1.1**<sup>[14]</sup> 数据驱动控制是指控制器设计并不显含或隐含受控过程的数学模型信息,仅利用受控系统的在线或离线 I/O 数据以及经过数据处理而得到的知识来设计控制器,并在一定的假设下有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论与方法。

**定义 1.2**<sup>[15]</sup> 数据驱动控制是指控制器设计仅用被控系统的 I/O 数据,且不显含被控系统的参数模型(或非参数模型)的自适应控制方法。

**定义 1.3**<sup>[16]</sup> 数据驱动控制是指直接使用被控系统的量测数据设计以控制器参数作为优化变量的优化问题,并通过离线最优化方法求解此优化问题的控制方法。

定义 1.1 强调 DDC 控制器设计仅使用被控对象量测的 I/O 数据,并不包含被控系统的任何动态信息和结构信息。定义 1.2 则不排除 DDC 可以隐含地利用被控对象结构信息。定义 1.3 则偏重于给定 DDC 控制器结构的控制器参数离线优化获取方法。从上面三种定义中可以看出,DDC 设计方法的基本特点就是直接使用被控对象的 I/O 量测数据进行控制器设计。

综合上述三个定义,可给出如下更一般的数据驱动控制的定义。

**定义 1.4**<sup>[17]</sup> 数据驱动控制是指控制器设计不显含受控过程的数学模型信息,仅利用受控系统的在线或离线 I/O 数据以及经过数据处理而得到的知识来设计控制器,并在一定假设下有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论与方法。

定义 1.4 和定义 1.1 的唯一区别是定义 1.4 的 DDC 可以隐含地利用被控对象的数学模型信息。根据定义 1.4,直接自适应控制和子空间预测控制等均属于 DDC 方法。

DDC 方法框架结构如图 1.2 所示。



图 1.2 DDC 方法框架

### 1.2.2 数据驱动控制方法的被控对象

控制系统包含两个主要部分:一是被控对象,另一个就是控制器.被控对象一般可分为如下四类.

- C1: 机理模型或辨识模型可精确获取;
- C2: 机理模型或辨识模型不精确,且含有不确定因素;
- C3: 机理模型或辨识模型虽然可获取,但非常复杂,阶数高,非线性强;
- C4: 机理模型或辨识模型很难建立,或不可获取.

现代控制理论与方法,又被称为 MBC 理论与方法,可以很好地处理 C1 和 C2 两类被控对象.对于 C1 类被控对象,虽然一般非线性系统的控制器设计比较复杂,但已有很多针对线性或非线性系统的成熟方法可使用,如零极点配置、基于 Lyapunov 方法的控制器设计、backstepping 设计方法和反馈线性化设计方法等.对于 C2 类被控对象,如果不确定项可参数化,或者不确定性因素的上界可获取或者假设已知,则可使用自适应控制和鲁棒控制的方法来处理这些不确定性.当然,还有其他一些现代控制理论与方法也可处理这两类被控对象的控制问题.

对于 C3 类被控对象,虽然高精度的机理模型或辨识模型可以获取,但系统模型可能由成百上千的状态变量和方程组成,阶数高、非线性性强.对这样的非线性系统的控制问题,控制器的设计和控制系统的分析都是一件非常困难的事情.众所周知,高阶非线性模型一定会导致高阶非线性的控制器.过于复杂的高阶非线性控制器会给控制器的实现、性能分析、实际应用和维护带来巨大困难.在这种情况下,模型简约或控制器简约的过程就必不可少.因此,复杂的高阶非线性模型不适合进行控制器的设计、分析和应用.从这个角度看,C3 类被控对象和 C4 类被控对象一样,到目前为止还没有很好的方法来解决这两类系统的控制问题.

在上述四类被控对象中,已有的 MBC 理论和方法只能很好地处理其中一半或不到一半的对象,另一大半的被控对象到目前为止还没有很好的方法来处理.然而,无论哪类被控对象,系统 I/O 数据总是可获取的.因此,可以考虑应用 DDC



方法. 如果系统模型是不可获取的, 或者受控对象的不确定性非常大, 则 DDC 方法就是必然的选择. 控制方法和相应的研究对象之间的关系如图 1.3 所示.

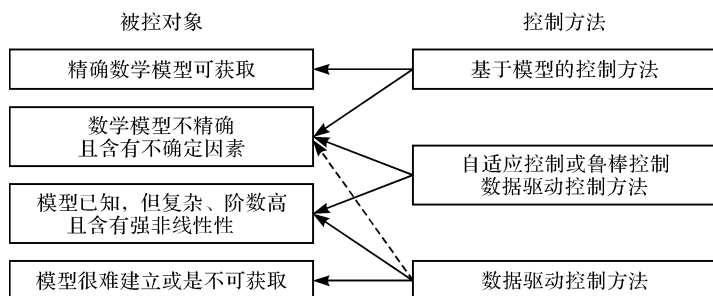


图 1.3 DDC 方法研究的被控对象

### 1.2.3 数据驱动控制理论与方法的必要性

完整的控制理论体系应包含能处理上述所有被控对象的控制理论和方法. 从这个观点来说, MBC 方法和 DDC 方法应该是一套完整的控制理论体系中不可缺少的两个部分, 也就是说, 完整的控制理论体系应该包括 MBC 理论与 DDC 理论.

从控制理论、控制理论的应用和控制理论的发展历程三个层面的历史和现状也能说明 DDC 理论与方法存在的必要性.

从理论方面来讲: ①MBC 理论和方法总是不可避免地会出现未建模动态和鲁棒性这种在 MBC 框架下难于解决的问题. 没有模型, MBC 方法就无能为力; 而建模又面临着未建模动态和鲁棒性问题, 从而形成了一个无可避免的怪圈. ②数学模型的复杂结构决定了控制器的复杂结构, 复杂的高阶非线性系统模型势必导致复杂的高阶非线性控制器, 控制器的简化和降阶问题以及鲁棒性问题变成了不可逾越的设计问题. ③进行鲁棒控制器设计需要已知不确定性的定性描述或者定量上界, 然而理论上的建模方法又不能提供有关不确定性的任何定性描述或者定量上界.

从应用角度来看, 实际中的很多问题, 如化工过程、生产过程系统等, 多数都要求低成本且能满足决策者控制指标的自动化系统和装置. 而建立系统的机理模型和全局数学模型需要很多专家以及高水平研究人员, 成本高, 尤其对间歇过程, 很难对每一批次、每个产品和每个周期都进行建模以提高产品的产量和质量, 更何况并不是每个系统都能建立起准确的数学模型. 对复杂系统来说, 由于系统本身的复杂性以及受到的各种干扰, 建立系统的全局数学模型不太可能, 即使建立局部模型也不是很准确, 因此 MBC 理论和方法在解决实际问题时就显得苍白无力. 虽然理论结果丰富, 可实际应用的控制方法很少. 信息量大、知识匮乏已经成

为很多过程工业、复杂系统管理和控制的共同问题. 另外, 复杂高深的数学知识及专业技能的需求使得控制工程师在设计和维护控制系统时, 尤其是在进行复杂系统的控制时, 显得力不从心和缺乏自信. 理论和实际之间的距离越来越大, 制约了控制理论的健康发展.

从控制理论发展历程上来看, 控制理论的发展依次经历了不需要数学模型的简单调节装置、PID 控制、基于传递函数模型的经典控制理论、基于受控系统状态空间模型的 MBC 理论、基于其他规则模型、网络模型和专家系统等依赖系统专业领域知识的控制理论与方法, 和目前为了摆脱对受控系统数学模型依赖的数据驱动控制理论, 整个过程是螺旋式的发展历程. DDC 理论与方法, 能够直接基于数据设计控制器, 符合控制理论的螺旋式发展趋势.

另外, 从控制理论完整性角度来说, 现有的控制理论和方法可分为三类: ①需要已知数学模型才能设计控制器的控制理论和方法, 如航天控制技术、最优控制方法、线性和非线性控制方法、大系统控制协调和分解方法、极点配置方法等. ②需要已知部分数学模型信息就能设计控制器的控制理论和方法, 如鲁棒控制、滑模变结构控制、自适应控制、模糊控制、专家控制、神经网络控制、智能控制等. ③仅知道受控系统的 I/O 数据就能设计控制器的 DDC 理论与方法, 如 PID 控制、ILC、其他数据驱动控制方法等. DDC 理论和方法的建立符合控制理论体系完整性的要求.

需要指出的是, DDC 方法和 MBC 方法不能互相取代, 且这两种控制方法之间也不是相互排斥的. MBC 方法有其无法替代的优点, 而 DDC 方法也有它的长处, 它们可以共存发展, 并能优势互补地工作. MBC 方法和 DDC 方法的主要区别在于: 前者是在精确模型可获取情况下的基于模型的控制设计方法, 而后者则是在精确数学模型不可获取情况下的基于数据的控制设计方法. DDC 理论与方法的优点是, 它摆脱了控制系统设计对受控系统数学模型的依赖, 在传统 MBC 方法中无可回避的诸如, 未建模动态和鲁棒性问题、精确建模和模型简约问题、鲁棒设计与不确定性定性和定量描述不可获取问题、理论结果好与实际应用效果差等问题在 DDC 方法框架下不再存在.

#### 1.2.4 已有数据驱动控制方法的简要综述

迄今为止, 在文献中可以找到 10 余种不同的 DDC 方法. 根据数据使用方法的不同, 这些 DDC 方法可归纳为三类: 基于在线数据的 DDC 方法, 基于离线数据的 DDC 方法和基于在线/离线数据的 DDC 方法. 根据控制器结构的不同, 这些 DDC 方法也可分为两类: 控制器结构已知的 DDC 方法和控制器结构未知的 DDC 方法. 以下将根据这两种不同的分类方法对已有 DDC 方法做一个简要的综述.

## 1. 基于数据使用方法的 DDC 分类

### 1) 基于在线数据的 DDC 方法

**同步扰动随机逼近 (simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA):** 基于 SPSA 的直接逼近控制器方法是由美国学者 J. C. Spall 于 1992 年提出的<sup>[18]</sup>. 该方法针对一类离散时间非线性系统, 仅使用闭环系统的量测数据来调整控制器参数, 而不依赖于被控对象的数学模型. 基于 SPSA 的控制方法假设被控对象的非线性动态是未知的, 所设计的控制器是一种函数逼近器, 其结构固定, 参数可调. 神经网络或多项式等都可以作为逼近器. 该方法设计一个以控制器参数为优化变量的控制性能指标函数, 利用每个时刻系统的 I/O 数据最小化该性能指标函数得到最优的控制器参数, 从而实现控制器的设计. 为了在系统模型未知的情况下求解上述优化问题, 该控制方法采用 SPSA 算法来估计指标函数关于控制输入的梯度信息<sup>[19,20]</sup>. 基于 SPSA 的控制算法已被应用于交通控制<sup>[21]</sup>和工业控制中<sup>[22]</sup>.

**无模型自适应控制 (model free adaptive control, MFAC):** MFAC 方法是由本书作者于 1994 年提出来的<sup>[23-26]</sup>. 该方法针对离散时间非线性系统使用了一种新的动态线性化方法及一个称为伪偏导数 (pseudo partial derivative, PPD) 的新概念, 在闭环系统的每个动态工作点处建立一个等价的动态线性化数据模型, 然后基于此等价的虚拟数据模型设计控制器并进行控制系统的理论分析, 进而实现非线性系统的自适应控制. PPD 参数可仅使用被控对象的 I/O 量测数据进行估计. 动态线性化方法有三种具体形式, 分别为紧格式动态线性化 (compact form dynamic linearization, CFDL)、偏格式动态线性化 (partial form dynamic linearization, PFDL) 和全格式动态线性化 (full form dynamic linearization, FFDL). 与传统自适应控制方法相比, MFAC 方法具有如下几个优点, 使其更加适用于实际系统的控制问题. 第一, MFAC 仅依赖于被控系统实时量测的数据, 不依赖受控系统任何的数学模型信息, 是一种数据驱动的控制方法. 这意味着对一类实际的工业过程, 可独立地设计出一个通用的控制器. 第二, MFAC 方法不需要任何外在的测试信号或训练过程, 而这些对于基于神经网络的非线性自适应控制方法是必需的. 因此, MFAC 方法得到的是低成本的控制器的. 第三, MFAC 方法简单、计算负担小、易于实现且鲁棒性较强. 第四, 在一些实际假设的条件下, 基于 CFDL 的 MFAC (CFDL-MFAC) 方案和基于 PFDL 的 MFAC (PFDL-MFAC) 方案可保证闭环系统跟踪误差的单调收敛性和有界输入有界输出 (bounded-input bounded-output, BIBO) 稳定性, 这是区别于其他数据驱动控制方法的重要特点. 第五, 结构最简单的 CFDL-MFAC 方案已在很多实际系统中得到了成功的应用, 如化工过程<sup>[27,28]</sup>、直线电机控制<sup>[29]</sup>、注模过程<sup>[30]</sup>、pH 控制<sup>[31]</sup>等.

**去伪控制 (unfasified control, UC):** 美国学者 M. G. Safonov 在 1995 年提出了 UC 方法<sup>[32]</sup>. 该方法通过递归证伪的方式从候选的控制器集合中筛选出满足特定性能要求的控制器作为当前的控制器. 该方法不需要任何形式的被控对象数学模型, 只根据被控对象的 I/O 量测数据进行控制器设计. 本质上, UC 属于一种切换控制方法, 而又不同于传统的切换控制. UC 方法能在控制器作用于闭环反馈系统之前, 有效地剔除伪控制器, 即不能镇定控制系统的控制器, 表现出较好的瞬态响应. UC 方法由三个要素组成: 可逆控制器组成的候选控制器集合、评价控制器的性能指标和控制器切换机制<sup>[33,34]</sup>. 文献[35]说明去伪自适应切换控制机制在噪声环境下的 I/O 稳定性. 其他改进形式的 UC 可参见文献[36]. 在导弹导航、机器人手臂控制和工业过程控制等领域, UC 都已有成功的应用<sup>[37]</sup>.

## 2) 基于离线数据的 DDC 方法

**PID 控制:** PID 控制方法是一种在实际中广泛应用的成熟技术, 可以找到大量关于 PID 控制方法的研究文献. 到目前为止, 工业过程中使用的控制方法有 95% 以上都是 PID 类控制方法<sup>[38]</sup>. 值得指出的是, PID 控制可以认为是最早的 DDC 方法, PID 控制器的参数整定方法和技术仍在不断发展.

**迭代反馈整定 (iterative feedback tuning, IFT):** IFT 是由瑞典学者 H. Hjalmarsson 在 1994 年首先提出的一种数据驱动的控制器参数整定方法<sup>[39]</sup>. 该方法通过迭代估计控制性能指标相对于控制输入的梯度信息来寻找反馈控制器的最优参数. 在每次迭代估计梯度时需要收集两次实验数据, 一是来自于闭环系统正常实验的运行数据; 二是来自于特定实验的数据. 在适当的假设下, 上述算法可以使控制性能指标达到局部最小值, 具体内容参见文献[40]. 从文献[41-44]中可以找到 IFT 方法在非线性系统中的推广结果. IFT 在工业中或实验室条件下应用的结果参见文献[40,45].

**基于相关性的整定方法 (correlation-based tuning, CbT):** CbT 是由瑞士学者 A. Karimi、L. Miskovic 和 D. Bonvin 于 2002 年提出的一种数据驱动的控制器参数整定方法<sup>[46]</sup>. 该方法的主要思想来源于系统辨识中的相关性分析方法, 通过最小化受控闭环系统的输出误差与外部激励信号或外部参考信号的相关性准则函数, 来迭代地整定控制器的参数. 值得指出的是, IFT 和 CbT 是两种相近的方法, 二者的主要区别体现在用于控制器设计的目标函数和获取梯度估计值的方法不同. 文献[47]将 CbT 方法推广到 MIMO 系统, 文献[48,49]将其应用于悬浮系统.

**虚拟参考反馈整定 (virtual reference feedback tuning, VRFT):** VRFT 是由意大利学者 G. O. Guardabassi 和 S. M. Savaresi 在 2000 年提出的一种数据驱动的直接辨识线性时不变系统控制器参数的方法<sup>[50]</sup>. 该方法通过引入虚拟参考信号将控制器设计问题转化成控制器参数辨识问题. VRFT 和 IFT 属于同一类控制器设计方法, 但它们的特点又是截然不同的: IFT 是一种基于梯度下降准则的迭代算

法,而 VRFT 是一种寻找性能指标全局最小值的一次性(非迭代)的批量方法.它仅利用被控对象的一组 I/O 数据,而不需要进行特定的试验<sup>[51]</sup>.文献[52]介绍了 VRFT 在针对非线性控制器整定时的设计方法,文献[53]将该方法推广到 MIMO 系统. VRFT 已成功应用于垂直单连杆机械臂<sup>[54]</sup>、油气悬挂系统<sup>[55]</sup>、工业用自平衡手操式机械臂<sup>[56]</sup>等.

### 3) 基于在线/离线数据的 DDC 方法

**迭代学习控制 (iterative learning control, ILC):** ILC 首先是由日本学者 M. Uchiyama 提出的<sup>[57]</sup>,但未能引起足够的关注.真正推动 ILC 广泛研究和大规模应用的是 1984 年的另一篇文献<sup>[58]</sup>.对于在有限时间区间执行重复控制任务的系统而言,ILC 是一种理想的控制手段.该方法利用以前循环的系统输出误差和控制输入信号构建当前循环的控制输入信号,以获得比以前循环更好的控制效果. ILC 控制器结构非常简单,本质上是一种迭代域的积分器. ILC 的另一个特点是它仅需要少量的系统先验知识就可以保证学习得到的误差在迭代域上收敛.文献[59-63]对近些年 ILC 研究的最新结果做了系统的总结和综述.大多数关于 ILC 的理论研究都是以压缩映射方法作为主要分析手段<sup>[64,65]</sup>.此外,ILC 也广泛应用于很多实际领域,参见文献[66,67].与其他 DDC 方法相比,ILC 可以更充分地利用收集的各种数据,包括在线的和离线的数据.值得指出的是,ILC 方法并不是使用数据进行控制器参数整定,而是直接用数据逼近最优的控制输入信号.

**懒惰学习 (lazy learning, LL) 控制:** LL 是一种有监督的机器学习算法.1994 年美国学者 S. Schaal 和 C. G. Atkeson 首先将 LL 应用于控制领域<sup>[68]</sup>.与其他有监督的机器学习算法一样,LL 的目的是:从一组由 I/O 数据对组成的训练数据集中找到输入输出的映射关系.基于懒惰学习的控制方法利用历史数据在线建立受控系统局部线性模型,然后基于每个时刻的局部线性模型设计局部控制器.由于历史数据的实时更新,使得 LL 控制具有先天的自适应特性,但其计算量较大.另外,LL 控制的稳定性分析还缺乏相应的理论研究<sup>[69,70]</sup>.类似的方法还有许多,如 Just-in-time 学习<sup>[71]</sup>、基于案例的学习<sup>[72]</sup>、局部加权模型<sup>[73]</sup>以及 model-on-demand<sup>[74,75]</sup>等.

## 2. 基于不同控制器结构的 DDC 分类

本小节将按照控制器结构是否已知为原则对前述的各种 DDC 方法再次进行分类,使读者能更好地理解这些方法.

### 1) 控制器结构已知的 DDC 方法

该类方法基于事先已知的控制器结构,而控制器的未知参数则是通过受控对象的 I/O 量测数据,利用数学优化的方法获取.优化方法包括批量算法或递归算法.换句话说,该类 DDC 方法本质上是将控制器的设计问题转化为控制器参数的

辨识问题,属于该类方法的有:PID、IFT、VRFT、UC、基于 SPSA 的控制、CbT 等. 这些方法都不涉及对象模型的任何显式信息,但其问题的关键在于如何事先确定控制器的结构. 一般而言,对特定对象尤其是一般非线性系统合理地设计出带有未知参数的控制器是十分困难的,有时候其难度相当于对受控系统进行精确建模. 这类 DDC 方法的另一个局限在于缺乏闭环系统的稳定性分析方法和结论.

## 2) 控制器结构未知的 DDC 方法

**模型相关的 DDC 方法.** 表面上看,这类数据驱动控制方法仅依赖于受控对象的 I/O 量测数据,但其控制器的设计隐含地用到了系统模型结构和动态信息. 因此,这类 DDC 方法的控制系统设计和理论分析都与 MBC 方法类似. 但是,模型相关的数据驱动控制方法对控制系统设计还是非常有意义的,该类方法在实际应用中体现出了较好的鲁棒性. 典型的方法有直接自适应控制方法和子空间预测控制方法等.

**模型无关的 DDC 方法.** 对于这类数据驱动控制方法,其控制器的设计仅使用对象的 I/O 量测数据,且不隐含或显含受控系统的任何模型信息,能统一处理线性系统和非线性系统的控制问题. 这类数据驱动控制方法的另一个重要特征是它具有系统化的控制器设计框架,且能提供系统的稳定性分析方法和结论. 典型的模型无关的数据驱动控制方法有 ILC、LL 和 MFAC. 与其他 DDC 方法相比,这些方法在理论上已说明了控制器结构和设计的有效性和合理性.

## 1.2.5 数据驱动控制方法总结

为了让读者能对 DDC 方法有一个整体的了解,下面给出关于 DDC 方法的简要总结.

(1) 从理论上讲,ILC、SPSA、UC 和 MFAC 都是源于直接应用受控系统的 I/O 数据解决非线性系统控制问题而提出的,而其他 DDC 方法,诸如 IFT、VRFT 等都是基于线性时不变系统给出的,然后再推广到非线性系统.

(2) SPSA、MFAC、UC 和 LL 都具有自适应的特点,而其他 DDC 方法都是非自适应的工作方式. 基于 SPSA 的 DDC 方法的适应性会受到系统结构变化或参数变化的影响.

(3) SPSA、IFT 和 VRFT 方法本质上都是控制器参数辨识方法,其中,VRFT 方法仅需要一次试验收集系统的 I/O 数据对,然后通过离线优化方法直接辨识控制器参数,其他两种都是迭代辨识方法.

(4) MFAC 和 LL 都是基于动态线性化的方法. 具体而言,MFAC 可针对 SISO、MISO 和 MIMO 系统给出一套系统化的动态线性化数据模型,以及一系列的控制器设计策略,并有基于压缩映射的闭环系统稳定性分析方法和误差收敛性结论. LL 控制方法则没有形成体系.

(5) 除了 PID、ILC 和 VRFT 外,大多数 DDC 方法都需要利用量测的 I/O 数据估计梯度. SPSA、IFT 和基于梯度的 UC 估计某种值函数关于控制器参数的梯度值,而基于动态线性化的 MFAC 和 LL 则是在线地估计系统输出关于输入的梯度值.

(6) SPSA、UC 和 MFAC 利用的是在线量测的 I/O 数据, PID、IFT 和 VRFT 使用的是离线的 I/O 数据,而 ILC 和 LL 既使用在线数据也使用离线数据. 值得指出的是, ILC 有系统化的基于在线/离线数据的控制器设计框架,且其控制器的输出在迭代域上直接逼近期望的控制信号,而不是进行控制器参数的调节.

(7) 针对控制器设计和性能分析, ILC 给出一套较完美的系统的分析框架, MFAC 也具有与 ILC 类似的特点,而其他的 DDC 方法还需要进一步地研究.

(8) 除了 ILC 以外,上述提到的数据驱动控制器几乎都是基于控制器参数整定方法进行设计的,其中一部分是在线整定控制器参数的,如 MFAC、UC 和 SPSA,另一部分则是离线整定. DDC 方法的关键在于其控制器结构不依赖于被控对象的数学模型,尽管某些数据驱动控制方法假设控制器结构预先已知. 相对于其他 DDC 方法而言, MFAC 和 LL 这两种方法的控制器结构都是基于有理论支撑的动态线性化数据模型和某种优化指标进行设计的,其合理性由优化理论保障,而其他方法的控制器结构则必须事先假设已知. 对给定的受控系统,确定一个合理的控制器结构与对受控对象进行精确建模一样,都是非常困难的问题.

(9) 控制器参数整定问题本质上就是数学优化问题,而 DDC 控制器设计中的优化与传统的优化是截然不同的. 这主要是由于 DDC 控制器设计过程中系统的模型是未知的,而 MBC 方法中其数学模型则是已知的. 从这一点上来看, MFAC、SPSA 和 IFT 这三种 DDC 方法的突出之处在于这些方法给出了在目标函数未知情况下利用受控系统的 I/O 数据计算或估计梯度信息的技术. 上述三种 DDC 方法的不同之处在于, MFAC 和 IFT 使用的是确定性方法,而 SPSA 是一种随机逼近的方法.

(10) 区别一种控制方法是 DDC 方法还是 MBC 方法的关键在于,其控制器是否是基于受控系统的 I/O 数据来设计的,受控系统的动力学模型结构信息或者动力学方程本身(包括其他形式的表述,如神经网络、模糊规则、专家知识等)是否嵌入到控制器结构当中. 如果仅用受控系统的 I/O 数据进行设计,且不包含系统模型的结构信息和动力学方程本身,则该种方法就是 DDC 方法,否则就是 MBC 方法.

### 1.3 章节概况

本书共有 12 章,其中,第 1 章~第 10 章集中论述 MFAC 设计和分析以及相关重要内容,第 11 章是 MFAC 的典型应用,第 12 章是结论与展望.

第1章,首先介绍了MBC理论的建模、辨识、控制以及面临的主要问题,然后对DDC方法的定义、分类、已有DDC方法,以及其他一些重要问题进行了简要的讨论.

第2章,介绍了在线参数估计的一些预备知识和改进的参数估计算法.

第3章,针对离散时间SISO、MISO和MIMO非线性系统,提出了一系列新型动态线性化方法,这是MFAC理论与方法设计和分析的基础.三种不同的动态线性化方法包括CFDL、PFDL和FFDL.

第4章和第5章,针对离散时间SISO、MISO和MIMO非线性系统,分别给出了MFAC设计、稳定性分析和仿真验证结果.

第6章,针对离散时间SISO非线性系统,给出了无模型自适应预测控制(model free adaptive predictive control, MFAPC)的设计、稳定性分析和仿真验证结果.

第7章,针对离散时间SISO非线性系统,提出了无模型自适应迭代学习控制(model free adaptive iterative learning control, MFAILC)方法,并理论证明和仿真验证了最大学习误差在迭代域的单调收敛性.

第8章,针对复杂互联非线性系统控制问题,给出了相应的MFAC的设计方法,并研究了MFAC方法和其他控制方法(如自适应控制和ILC)之间优势互补的模块化设计方案.

第9章,研究了存在输出量测噪声和数据丢包情形下的MFAC系统的鲁棒性问题.

第10章,针对控制系统设计中的对称相似结构设计问题,给出概念性的描述和设计原理,并分析了MFAC和MFAILC、自适应控制和ILC之间的对称相似关系.

第11章,介绍了MFAC在三容水箱系统、直线电机系统、交通系统、焊接过程和风力发电等实际系统中的应用.

第12章,总结了MFAC理论与方法,并对相关问题进行了展望.