



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

013057360

TP13
269

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



北航

C1662076

TP13
269

013027380

国家自然科学基金出版基金支持项目

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和分析,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

缩 写 表

比例积分微分控制	proportional integral differential control, PID
带外部输入的非线性自回归滑动平均	nonlinear auto-regressive moving average with exogenous input, NARMAX
单输入单输出	single input and single output, SISO
迭代反馈整定	iterative feedback tuning, IFT
迭代学习控制	iterative learning control, ILC
多输入单输出	multiple input and single output, MISO
多输入多输出	multiple input and multiple output, MIMO
动态矩阵控制	dynamic matrix control, DMC
广义预测控制	generalized predictive control, GPC
基于紧格式动态线性化的无模型自适应迭代学习控制	CFDL-MFAILC
基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制	CFDL-MFAC
基于紧格式动态线性化的无模型自适应预测控制	CFDL-MFAPC
基于模型的控制	model based control, MBC
基于偏格式动态线性化的无模型自适应控制	PFDL-MFAC
基于偏格式动态线性化的无模型自适应预测控制	PFDL-MFAPC
基于全格式动态线性化的无模型自适应控制	FFDL-MFAC
基于全格式动态线性化的无模型自适应预测控制	FFDL-MFAPC
基于相关性的整定方法	correlation-based tuning, CbT
紧格式动态线性化	compact form dynamic linearization, CFDL
控制输入线性化长度常数	linearization length constant, LLC
懒惰学习	lazy learning, LL
偏格式动态线性化	partial form dynamic linearization, PFDL
去伪控制	unfasified control, UC
全格式动态线性化	full form dynamic linearization, FFDL
神经网络	neural networks, NN
输入输出	input/output, I/O
数据驱动控制	data-driven control, DDC
同步扰动随机逼近	simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA

网络控制系统	networked control system, NCS
伪分块 Jacobian 矩阵	pseudo partitioned Jacobian matrix, PPJM
伪分块梯度	pseudo partitioned gradient, PPG
伪 Jacobian 矩阵	pseudo Jacobian matrix, PJM
伪偏导数	pseudo partial derivative, PPD
伪梯度	pseudo gradient, PG
无模型自适应迭代学习控制	model-free adaptive iterative learning control, MFAILC
无模型自适应控制	model-free adaptive control, MFAC
无模型自适应预测控制	model-free adaptive predictive control, MFAPC
虚拟参考反馈整定	virtual reference feedback tuning, VRFT
有界输入有界输出	bounded-input bounded-output
预测启发控制	model predictive heuristic control, MPHC

符号对照表

L	PFDL 数据模型中的控制输入线性化长度常数
L_y	FFDL 数据模型中的控制输出线性化长度常数
L_u	FFDL 数据模型中的控制输入线性化长度常数
$\phi_c(k)$	SISO 系统的 CFDL 数据模型中的 PPD 在第 k 时刻的值
$\phi_c(k, i)$	SISO 系统的迭代相关 CFDL 数据模型中的 PPD 在第 i 次迭代运行第 k 时刻的值
$\phi(k)$	MISO 系统的 CFDL 数据模型中的 PG 在第 k 时刻的值
$\phi_{c,i}(k)$	互联系统第 i 个子系统的 CFDL 数据模型中的 PG 在第 k 时刻的值
$\phi_{p,L}(k)$	SISO 系统的 PFDL 数据模型中的 L 维 PG 在第 k 时刻的值
$\bar{\phi}_{p,L}(k)$	MISO 系统的 PFDL 数据模型中的 mL 维 PPG 在第 k 时刻的值
$\Phi_{p,L}(k)$	互联系统第 i 个子系统的 PFDL 数据模型中的 L 维 PG 在第 k 时刻的值
$\phi_{f,L_y,L_u}(k)$	SISO 系统的 FFDL 数据模型中的 $L_y + L_u$ 维 PG 在第 k 时刻的值
$\bar{\phi}_{f,L_y,L_u}(k)$	MISO 系统的 FFDL 数据模型中的 $L_y + mL_u$ 维 PPG 在第 k 时刻的值
$\phi_s(k)$	串联系统的 PFDL 数据模型中的 PG 在第 k 时刻的值
$\phi_p(k)$	并联系统的 PFDL 数据模型中的 PG 在第 k 时刻的值
$\phi_f(k)$	反馈连接系统的 PFDL 数据模型中的 PG 在第 k 时刻的值
$\Phi_c(k)$	MIMO 系统 CFDL 数据模型中的 $m \times m$ 维 PJM 在第 k 时刻的值
$\Phi_{p,L}(k)$	MIMO 系统 PFDL 数据模型中的 $m \times mL$ 维 PPJM 在第 k 时刻的值
$\Phi_{f,L_y,L_u}(k)$	MIMO 系统 FFDL 数据模型中的 $mL_y \times mL_u$ 维 PPJM 在第 k 时刻的值
$U_L(k)$	SISO 系统的 PFDL 数据模型中由滑动时间窗口 $[k-L+1, k]$ 内的所有控制输入信号组成的向量, 即 $U_L(k) = [u(k), \dots, u(k-L+1)]^T$
$U_{i,L_i}(k)$	互联系统第 i 个子系统的 PFDL 数据模型中由滑动时间窗口 $[k-L_i+1, k]$ 内的所有控制输入信号组成的向量, 即 $U_{i,L_i}(k) = [u_i(k), \dots, u_i(k-L_i+1)]^T$
$\bar{U}_L(k)$	MIMO(或 MISO)系统的 PFDL 数据模型中由滑动时间窗口 $[k-L+1, k]$ 内的所有控制输入信号组成的向量, 即 $\bar{U}_L(k) = [u^T(k), \dots, u^T(k-L+1)]^T$
$H_{L_y,L_u}(k)$	SISO 系统的 FFDL 数据模型中由输入相关的滑动时间窗口 $[k-L_u+1, k]$ 内的所有控制输入信号以及在输出相关的滑动时间窗口 $[k-L_y+1, k]$ 内的所有控制输入信号组成的向量

$1, k]$ 内的所有系统输出信号组成的向量, 即 $\mathbf{H}_{L_y, L_u}(k) = [y(k), \dots, y(k-L_y+1), u(k), \dots, u(k-L_u+1)]^T$

$\bar{\mathbf{H}}_{L_y, L_u}(k)$ MIMO 系统的 FFDL 数据模型中由输入相关的滑动时间窗口 $[k-L_u+1, k]$ 内的所有控制输入信号以及输出相关的滑动时间窗口 $[k-L_y+1, k]$ 内的所有系统输出信号组成的向量, 即 $\bar{\mathbf{H}}_{L_y, L_u}(k) = [y^T(k), \dots, y^T(k-L_y+1), u^T(k), \dots, u^T(k-L_u+1)]^T$

$\check{\mathbf{H}}_{L_y, L_u}(k)$ MISO 系统的 FFDL 数据模型中由输入相关的滑动时间窗口 $[k-L_u+1, k]$ 内的所有控制输入信号以及输出相关的滑动时间窗口 $[k-L_y+1, k]$ 内的所有系统输出信号组成的向量, 即 $\check{\mathbf{H}}_{L_y, L_u}(k) = [y^T(k), \dots, y^T(k-L_y+1), u^T(k), \dots, u^T(k-L_u+1)]^T$

\mathbf{R} 实数集

\mathbf{R}^n n 维实向量空间

$\mathbf{R}^{n \times m}$ $n \times m$ 维实矩阵空间

\mathbf{Z}^+ 正整数集

I 单位矩阵

q^{-1} 单位延迟算子

Δ 变量在相邻两时刻的差分

$\text{sign}(x)$ 符号函数

$\text{round}(\cdot)$ 四舍五入

$|\cdot|$ 绝对值

$\|\cdot\|_v$ 相容范数

$\hat{a}(k)$ 变量 a 在 k 时刻的估计值

$\tilde{a}(k)$ 变量 a 在 k 时刻的估计值与其真实值的误差

$s(\mathbf{A})$ 矩阵 \mathbf{A} 的谱半径

\mathbf{A}^{-1} 矩阵 \mathbf{A} 的逆矩阵

\mathbf{A}^T 矩阵 \mathbf{A} 的转置

\mathbf{A}^* 矩阵 \mathbf{A} 的伴随矩阵

$\det(\mathbf{A})$ 矩阵 \mathbf{A} 的行列式

$\sigma_1(\mathbf{A})$ 矩阵 \mathbf{A} 的条件数

$\lambda_{\max}[\mathbf{A}]$ 矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值

$\lambda_{\min}[\mathbf{A}]$ 矩阵 \mathbf{A} 的最小特征值

$\nabla J(\boldsymbol{\theta})$ 函数 $J(\boldsymbol{\theta})$ 关于 $\boldsymbol{\theta}$ 的梯度

$\nabla^2 J(\boldsymbol{\theta})$ 函数 $J(\boldsymbol{\theta})$ 关于 $\boldsymbol{\theta}$ 的 Hessian 矩阵

目 录

前言	1
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 基于模型的控制器设计	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
第4章	SISO 离散时间非线性系统的无模型自适应控制	53
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
第5章	MIMO 离散时间非线性系统的无模型自适应控制	91
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

第 6 章 无模型自适应预测控制	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
第 7 章 无模型自适应迭代学习控制	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
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	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

第 9 章 无模型自适应控制的鲁棒性	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
第 10 章 控制系统设计的对称相似性	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
第 11 章 应用	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
第 12 章 结论与展望	282
12.1 结论	282
12.2 展望	283
参考文献	285

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^[1,2]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^[3-6].

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^[7], 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^[8].

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非常高的阶数, 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, 系统监控和维护也变得更加困难, 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^[4-6,8]. 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.

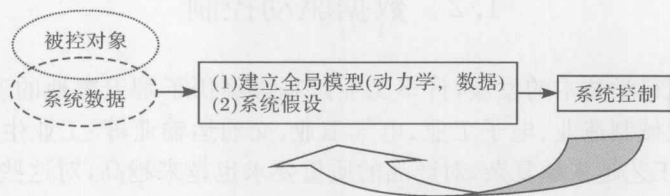


图 1.1 MBC 理论框架

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^[9]. 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^[10,11],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