

非线性预测控制 与工业应用

张日东 薛安克 王树青 著
李平 黄海



科学出版社

非线性预测控制与工业应用

张日东 薛安克 王树青 李平 黄海 著

科学出版社

北京

前 言

20 世纪 70 年代以来,由于计算机在工业控制上的广泛使用,加上控制技术的发展,出现了以模型预测控制为代表的一类计算机先进控制算法,并在复杂的工业过程中得到了成功应用,从而形成了先进控制在工业过程应用的新时代。先进控制的特点是可以处理常规 PID 控制效果不好,甚至无法控制的复杂工业过程。先进控制应用得当可以带来显著的经济效益,先进控制系统的优点比较明显,不仅具有 PID 反馈控制的技术优点,还具有系统模型化、实时动态优化、最优稳态控制、自适应机制、回收期短等特点。但是,模型预测控制也遇到了一定的困难,这些困难来自于流程工业过程的实际现状:流程工业生产过程大多是多输入、多输出且存在关联的系统,同时各子系统中的增益和时间常数常与生产负荷具有一定的函数关系,因此生产过程又呈现非线性特性。另外,流程工业过程中的内部热量转换和传递导致了延迟的发生,这样造成生产过程的时间常数和滞后相对比较大。可以看出,工业过程非线性、多变量、大时滞等问题的存在使得模型预测控制无论在理论上还是在实际应用上都遇到了挑战。由于实际工业过程严格来说都是非线性的,若对象只存在较弱的非线性,可视为一种模型失配,通过系统的鲁棒性设计或在线辨识模型参数来克服弱非线性造成的影响。但当对象表现为强非线性时,基于线性对象模型的预测控制就很难得到满意的控制结果,从而产生了非线性预测控制算法。

迄今为止,非线性预测控制的理论研究和工业应用已经得到空前发展,出现了众多优秀的研究成果。大体来看,人们针对非线性预测控制的研究主要从三个方面入手:非线性预测控制基本算法、非线性预测控制稳定性和鲁棒非线性预测控制理论。非线性预测控制基本算法主要研究基于预测控制框架下的非线性系统的预测控制问题,即如何实现非线性系统的多步预测、动态优化和反馈校正。非线性预测控制稳定性方面的研究主要致力于得到稳定的非线性预测控制方法,它得到重视的原因在于,通常的预测控制是有限时域的,其最优性并不能保证闭环系统的稳定性。由于实际工业过程的精确模型难以得到,非线性预测控制的研究也结合鲁棒控制领域的相关思想,形成了鲁棒非线性预测控制的研究。

从面向工业应用的角度来说,研究出适合非线性过程的预测控制方法十分重要,许多学者提出了相关的非线性预测控制策略,使得目前的非线性预测控制理论研究得到了突飞猛进的发展,很多研究成果也得到了成功的工业应用。作者也吸收了前人的相关研究成果,对非线性预测控制的相关问题进行了多年研究,得到了

一些有益的成果。

本书是作者在多年来对预测控制研究的基础上撰写的,这些成果很多都受到过前人研究成果的启发。本书内容范围包含基本的非线性预测控制方法、该理论的控制功能实现原则和方法以及实际工业应用实例。结构体系采用基本的非线性预测控制理论研究一面向工业应用的非线性控制器设计方法—实际工业应用方式。写作采取提出问题、分析问题、解决问题、理论与实际应用验证的方式。

本书分四部分。第一部分结合工业过程控制的发展现状介绍了模型预测控制的研究概况以及相关基本算法的原理与方法,该部分包含第 1、2 章。第二部分主要从工业过程建模和控制系统设计的角度重点阐述基于智能工具的非线性预测控制设计与控制器性能分析,包含第 3、4 章。其内容包括基于神经网络的非线性系统多步预测控制、基于神经网络的非线性系统预测函数控制、支持向量机建模方法、基于支持向量机的非线性系统预测控制、基于支持向量机的非线性系统预测函数控制,给出了相应的控制策略和控制器性能分析。第三部分主要从状态空间模型入手,侧重研究基于状态空间模型的一类非线性系统模型预测控制方法,包含第 5~7 章。主要包括基于状态空间模型的非线性预测控制、基于状态空间模型的非线性自适应预测控制、基于智能模型的离线辨识非线性预测控制。第四部分结合实际工业应用中的过程控制问题,给出工业延迟焦化装置的预测函数控制的相关方法和实现原则。同时给出预测控制思想在网络控制中的思考,该部分包含第 8、9 章。

在完成本书的过程中,得到了国家重点基础研究(973)项目(2009CB320602, 2012CB821204)、国家自然科学基金(60804010, 61104049)、浙江省重点科技创新团队(200950019)、国家博士后科学基金(2012M511368)、浙江省科协“育才工程”(浙科协发[2009]45号)、浙江省重中之重学科“控制科学与工程”出版基金以及杭州电子科技大学出版基金等的资助。在此对相关的支持深表谢意。同时也感谢科学出版社给予的支持,使作者的相关研究成果能得到系统的总结和出版。感谢作者的同事鲁仁全教授、赵晓东教授、邹洪波副教授等的帮助与支持。衷心感谢导师浙江大学智能系统与控制研究所王树青教授和辽宁石油化工大学的李平教授,是他们把我引入预测控制领域,他们渊博的知识、严谨治学的精神、高尚的人格是我永远学习的榜样。另外,衷心感谢浙江大学智能系统与控制研究所和辽宁石油化工大学自动化研究所的所有老师在我求学期间给予的无私帮助。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

张日东

2012年3月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工业过程控制概述	1
1.2 工业过程控制的发展概况	2
1.3 工业过程中的预测控制技术	3
1.4 本书主要结构	5
参考文献.....	6
第 2 章 模型预测控制方法	8
2.1 模型预测控制的发展过程	8
2.2 模型预测控制基本原理	9
2.3 几种常见的模型预测控制算法.....	11
2.3.1 模型算法控制	11
2.3.2 动态矩阵控制	14
2.3.3 广义预测控制	18
2.3.4 预测函数控制	21
2.4 预测控制的主要研究方法概述.....	23
参考文献	23
第 3 章 神经网络非线性预测控制	25
3.1 引言.....	25
3.2 基于神经网络的非线性系统预测控制.....	26
3.2.1 问题的提出	26
3.2.2 非线性系统的模型及表示.....	26
3.2.3 预测控制器设计	28
3.2.4 控制律的收敛性分析	30
3.2.5 仿真实例.....	32
3.3 基于神经网络的非线性系统预测函数控制.....	33
3.3.1 问题的提出	33
3.3.2 系统建模与预测函数控制器设计	34
3.3.3 控制律收敛性分析	36
3.3.4 仿真实例.....	36

3.4 结论	38
参考文献	38
第4章 支持向量机非线性预测控制	40
4.1 引言	40
4.2 基于支持向量机的非线性系统预测控制	41
4.2.1 问题的提出	41
4.2.2 基于最小二乘法与支持向量机建模	41
4.2.3 实际工业过程的支持向量机建模	43
4.2.4 预测控制器设计	45
4.2.5 控制律的收敛性分析	47
4.2.6 仿真实例	49
4.3 基于支持向量机的非线性系统预测函数控制	55
4.3.1 问题的提出	55
4.3.2 过程模型	55
4.3.3 预测函数控制器设计	55
4.3.4 预测函数控制器收敛性	57
4.4 结论	57
参考文献	58
第5章 基于状态空间模型的非线性预测控制	59
5.1 引言	59
5.2 扩展状态空间非线性系统预测控制	61
5.2.1 问题的提出	61
5.2.2 模型的处理	61
5.2.3 预测控制算法	63
5.2.4 仿真实例	65
5.3 基于神经网络的扩展状态空间非线性系统预测控制	66
5.3.1 问题的提出	66
5.3.2 过程模型的处理	67
5.3.3 预测控制器设计	68
5.3.4 预测控制器收敛性分析	70
5.3.5 仿真实例	71
5.4 结论	76
参考文献	76
第6章 基于状态空间模型的非线性预测函数控制	78
6.1 引言	78

6.2 扩展状态空间预测函数控制	79
6.2.1 问题的提出	79
6.2.2 预测函数控制算法	80
6.2.3 仿真实例	83
6.3 自适应扩展状态空间非线性系统预测函数控制	85
6.3.1 问题的提出	85
6.3.2 模型的处理	85
6.3.3 预测函数控制算法	87
6.3.4 仿真实例	89
6.4 结论	91
参考文献	92
第7章 基于智能模型的离线辨识非线性预测控制	93
7.1 基于支持向量机的双线性系统预测控制	93
7.1.1 引言	93
7.1.2 系统的模型及其表示	94
7.1.3 基于 SVM-ARX 模型的预测控制	96
7.1.4 仿真实例	97
7.2 基于支持向量机的扩展状态空间非线性系统预测控制	101
7.2.1 引言	101
7.2.2 非线性系统的模型及其表示方法	101
7.2.3 预测控制器设计	104
7.2.4 仿真实例	105
7.3 结论	108
参考文献	108
第8章 工业延迟焦化装置的预测函数控制	110
8.1 引言	110
8.2 延迟焦化装置工艺简介	110
8.3 预测函数控制系统设计	113
8.4 预测函数控制性能的仿真实验	114
8.5 DCS 组态及工业应用	115
8.6 工业应用效果	118
8.7 结论	120
参考文献	120
第9章 预测控制思想在网络控制中的进一步思考	122
9.1 引言	122

9.2 网络环境下的基本预测控制	123
9.2.1 基本 DMC 算法在网络控制中的应用	124
9.2.2 直接采用最优控制序列作为网络预测控制输入	129
9.3 基于网络实测时延的预测选择控制	132
9.3.1 基于实测时延的优化序列网络预测控制算法	132
9.3.2 基于预设时延的优化矩阵网络预测控制算法	135
9.4 结论	138
参考文献	139

第 1 章 绪 论

本章简单介绍工业过程控制的基本概念、工业过程控制研究的内容,以及工业过程控制研究的现状和工业过程中的预测控制技术,并对本书的内容安排进行相应的介绍。

1.1 工业过程控制概述

一般认为工业过程控制最早是 20 世纪 40 年代后期应用在军事工程中的随动调节理论被借用到化工过程控制这一领域^[1,2]。此后,随着电子技术、计算机技术以及测量技术的不断发展,工业过程控制也得到了空前发展。目前,工业过程控制已经应用到许多工业过程,如炼油、化工、发电、钢铁等^[3]。

1. 工业过程与工业过程控制^[4]

通常把原材料转变成产品并具有一定生产规模的过程称为工业生产过程,如图 1.1 所示。按照产品生产过程的特性,工业生产过程可分连续(或批处理)生产过程,典型的如化工、炼油、石油化工、冶金、发电、造纸、生物化工、轻工、水处理等,以及离散制造过程,如机械加工、汽车制造等。本书着重讨论连续的工业生产过程。

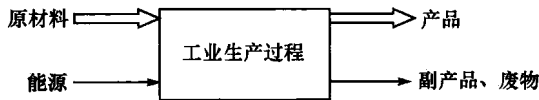


图 1.1 工业生产过程示意图

工业生产过程控制的目标就是根据工业生产过程的特点,采用自动化仪表和计算机等控制工具,应用过程控制相关理论,设计出工业生产过程控制系统,进而实现工业生产过程自动化。从过程的操作来讲,就是生产过程的相关工艺参数必须严格控制一定范围内。工业生产过程控制与各学科的关系如图 1.2 所示。

工业过程操作运行中,干扰是不可避免的。产品的质量、产量和产率等都会随着各种干扰和生产过程工艺设备等特性的改变而发生波动。工业过程中的干扰比较多和复杂,如原材料的组成变化、产品质量与规格的变化、生产过程设备的可使用性发生变化、装置与装置或工厂与工厂之间的关联改变、生产设备特性的漂移、控制系统的失灵等。另外,现代工业生产过程规模越来越大,设备关联越发严重,

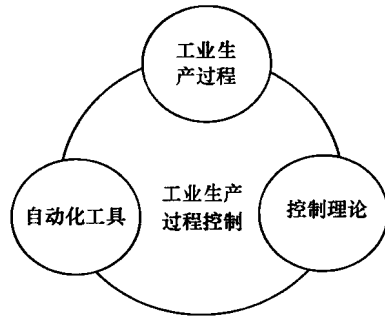


图 1.2 工业生产过程控制与其他学科的关系

因此,整个生产装置对扰动十分敏感。从干扰的角度来说,过程控制的目标就是在使过程参数保持在一定范围内的同时,抑制干扰对过程的不利影响,从而保证产品的质量、产量和合格率等。

2. 工业过程的特点

一般来讲,工业过程或多或少有下列特点:

滞后特性 由于在管道中的传递或取样化验分析等原因,实际工业生产过程中存在着纯滞后或叫时滞。这对于控制系统来说是不利的。因为纯滞后导致了过程的动态响应不及时,而控制系统的输出作用是希望能尽快在被控变量中反映出来。

时间常数长短不一样 这是因为工业生产过程形状、尺寸大小等不一样,如流量过程的时间常数通常很小,而工业加热炉的时间常数就很大。

非线性特性 工业生产过程一般都具有非线性的特性,另外,操作点的改变也使工业过程的特性发生改变。

时变性 工业生产过程的某些过程变量和参数是随着时间发生变化的,并不是一成不变的。

不稳定性 有些工业生产过程从控制理论上讲,是不稳定过程,如化学反应过程,其过程变量的变化可能会以指数形式增加。

耦合特性 工业生产过程中一个输入可能会同时改变几个输出,反过来,一个输出可能会受到多个输入的影响。

1.2 工业过程控制的发展概况^[4]

工业过程控制的发展与工业自动化仪表和计算机控制技术应用两个方面关系比较密切。

在工业生产过程中,测量原理变化不是很明显,但信号转换、显示和控制装置

的变化十分迅速。随着电子技术、计算机技术和测量技术的迅速发展,工业自动化仪表已经从六十年前的气动仪表变化到电动仪表,从现场就地控制变化到中央控制室控制,从在仪表屏上操作到利用计算机操作站操作,信号转换已经从模拟信号转变到数字信号等。

20世纪60年代,计算机只是代替常规的PID控制器进行显示、记录和报警,即所谓的直接数字控制。到了70年代,出现了基于微处理器的集散型计算机控制系统。到了80年代,真正实现了计算机控制工业生产过程,为先进控制和优化控制奠定了物质基础。进入90年代后,现场总线控制系统走向实用化,出现了过程自动化、工厂自动化、计算机集成过程控制、计算机集成制造系统和企业资源总综合规划等,形成如图1.3所示的工厂计算机综合优化控制系统。

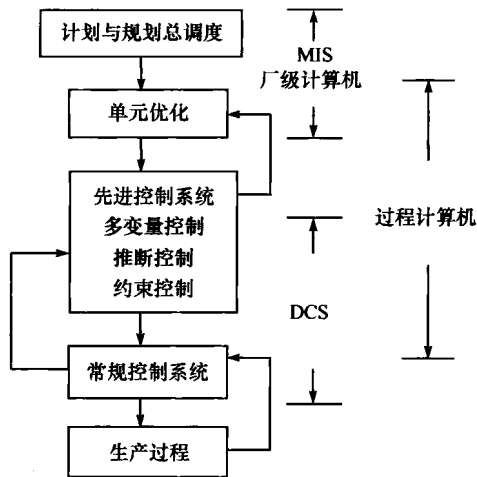


图 1.3 工厂计算机综合优化控制

1.3 工业过程中的预测控制技术

过程控制系统的稳定优化运行离不开控制策略,常规PID控制及其改进方法是应用较为成功的控制策略,工业上80%左右的控制均采用该策略,另外其控制方式简单,容易操作,受到了理论界和工业界的高度重视^[5]。但随着生产向大型、连续和强化等方向发展,控制回路之间相互关联现象严重起来,原来单独考虑控制回路的方法行不通了,加上过程变得复杂,对产品和过程被控变量波动范围要求越来越严格,尤其是与企业经济效益密切相关的过程,简单PID控制已经远远不能适应复杂工业过程的要求,难以实现卡边控制。另外,对于生产装置向复杂化发展所引起的生产过程多变量、大时滞、非线性等特性,这些特性已经涉

及所谓的大系统工程问题, PID 这种简单方法很难得到理想的控制效果。

自从 20 世纪 60 年代的现代控制理论在航空航天领域得到较好的应用之后, 学者们经过努力, 也为复杂的工业生产过程找到了一系列先进控制方法。所谓的先进控制是指不同于常规单回路 PID 控制, 并具有比常规 PID 更好控制效果的控制策略的统称, 而非专指某种计算机控制算法^[6,7]。其中最具有代表性的莫过于模型预测控制(model predictive control, MPC)技术了。以石油化工行业为例, 一个先进控制项目的年经济效益在百万元以上, 其投资回收期一般在一年以内^[8,9]。先进控制与常规(PID)控制的关系如图 1.4 所示, 先进控制的效益的体现如图 1.5 所示^[4]。

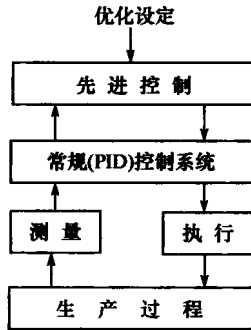


图 1.4 先进控制与常规(PID)控制关系

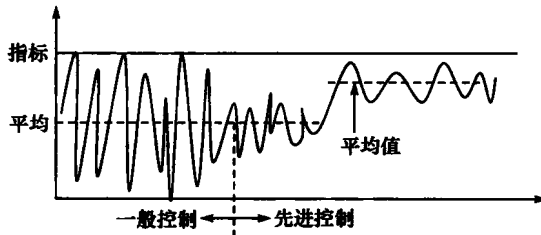


图 1.5 先进控制的效益

通常来说主要有三大类设计模型预测控制的方法。早期的模型预测控制基于有限脉冲响应模型(或阶跃响应模型), 典型方法是动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)^[10]以及相应的改进方法。这种方法的局限性在于它受限于开环稳定的被控过程并且该设计方法的模型阶次通常很高。第二类预测控制方法采用过程输入输出传递函数作为模型, 最具有代表性的方法是自整定预测控制(predictor-based self tuning control)^[11]和广义预测控制(generalized predictive control, GPC)^[12]。这种预测控制器设计的方法可以应用于开环稳定过程, 也可以应用于开环不稳定过程。但这类方法对多变量过程不是很有效, 并且实际工业应用效果

不明显。第三类预测控制方法采用状态空间模型,基于过程内部状态的信息进行过程输出预测和相应的控制器设计。正因为如此,这类方法得到了大量研究,涌现了很多研究成果^[13~20]。

目前,针对非线性系统的预测控制研究也出现了大量的成果,由于成果繁多并限于篇幅,难以一一加以介绍,这里仅列出一些作者在研究过程中曾经着重了解过的一些基本的非线性建模与相应预测控制器设计的文献。如 Grosman 提出一种基于遗传算法优化的非线性预测方法^[21]。Karer 等提出一种基于模糊逻辑的非线性预测控制方法^[22]。Shafiee 等提出一种线性化维纳模型的非线性预测控制方法^[23]。Yuzgec 等提出一种基于遗传算法的非线性预测控制方法^[24]。Al Seyab 等提出神经网络非线性预测控制方法^[25,26]。Balaji 等提出递推非线性预测控制方法^[27]。Causa 等提出一种混合模糊逻辑非线性预测控制方法^[28]。DeHaan 等提出一种自适应输入参考轨迹参数的非线性预测控制方法^[29]。Raffo 等给出一种基于拉格朗日-欧拉方程与 H_∞ 鲁棒结合的非线性预测控制方法^[30]。

1.4 本书主要结构

本书以非线性系统为研究对象,针对工业过程先进控制问题,从非线性系统设计、智能控制等角度出发,阐述了非线性预测控制的基本思想与设计方法。针对工业过程建模和控制系统设计的角度重点阐述非线性预测控制设计方法与控制器性能分析;针对状态空间模型的角度重点介绍了非线性预测控制的设计思想和设计方法;最后给出了一个实际工业应用例子,详细阐述了控制器的设计方法和应用效果。

本书的结构安排如下:

第一部分结合工业过程控制的发展现状介绍了模型预测控制的研究概况以及相关基本算法的原理与方法。本部分包括第1章的绪论和第2章的模型预测控制方法。

第二部分介绍基于智能工具的工业过程建模与非线性预测控制系统的设计。针对工业过程的非线性系统,提出了神经网络、支持向量机建模方法,基于该神经网络、支持向量机模型,提出了相应的非线性预测控制与预测函数控制方法,并给出了算法的收敛性分析。本部分包括第3章的基于神经网络的非线性系统多步预测控制与预测函数控制,第4章的基于支持向量机的非线性系统预测控制与预测函数控制。

第三部分为状态空间模型的非线性预测控制方法。主要研究一类状态空间模型的非线性系统预测控制方法,提出了基于参考轨迹线性化、等效自适应机制、智能模型离线辨识的相关控制方法。本部分包括第5章的基于状态空间模型的非线性预测控制,第6章的基于状态空间模型的非线性预测函数控制,第7章的基于智

能模型的离线辨识非线性预测控制。

第四部分为实际工业应用,通过实际工业延迟焦化装置的预测函数控制,验证相关方法的可行性与有效性,同时给出预测控制在网络控制中的思考。本部分包括第8章和第9章。

参 考 文 献

- [1] 王骥程,祝和云. 化工过程控制工程. 北京:化学工业出版社,1991.
- [2] 金以慧. 过程控制. 北京:清华大学出版社,1993.
- [3] Bequette B W. Process Control; Modeling Design and Simulation. London; Prentice Hall,2008.
- [4] 王树青,等. 工业过程控制工程. 北京:化学工业出版社,2003.
- [5] 欣斯基(Shinsky F G). 过程控制系统. 萧德云,吕伯明译. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 邵惠鹤. 工业过程高级控制. 上海:上海交通大学出版社,1997.
- [7] 王树青,等. 先进控制技术及应用. 北京:化学工业出版社,2001.
- [8] Bauer M, Craig I K. Economic assessment of advanced process control—A survey and framework. *Journal of Process Control*,2008,18(1):2-18.
- [9] Jelali M. An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*,2006,14(5):441-466.
- [10] Cutler C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control—A computer control algorithm. Presented at the Meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Houston, Texas, 1979.
- [11] Peterka V. Predictor-based tuning control. *Automatica*,1984,20:39-50.
- [12] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control. Part 1; The basic algorithm. Part 2; Extensions and interpretations. *Automatica*,1987,23:137-160.
- [13] Balchen J G, Ljungquist D, Strand S. State-space predictive control. *Chemical Engineering Science*,1992,47(4):787-807.
- [14] Muske K, Rawlings J B. Linear model predictive control of unstable processes. *Journal of Process Control*,1993,3:85-96.
- [15] Muske K, Rawlings J B. Model predictive control with linear models. *AIChE Journal*,1993,39:262-287.
- [16] Sokaert P O, Rawlings J B. Constrained linear quadratic regulation. *IEEE Transactions on Automatic Control*,1998,43:1163-1169.
- [17] 袁璞,左信,郑海涛. 状态反馈预估控制. *自动化学报*,1993,19(5):569-577.
- [18] Ricker N L. Model predictive control with state estimation. *Industrial Engineering Chemistry Research*,1990,29(3):569-577.
- [19] Ricker N L. Model-predictive control; State of the art. *Proceedings of Fourth International Conference on Chemical Process Control, Padre Island, Texas*,1991:271-296.
- [20] Bitmead R R, Gevers M, Wertz V. *Adaptive Optimal Control the Thinking Man's GPC*. New York; Prentice Hall, 1990.

-
- [21] Grosman B, Lewin D R. Automated nonlinear model predictive control using genetic programming. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26: 631-640.
- [22] Karer G, Music G, Skrjanc I, et al. Hybrid fuzzy model-based predictive control of temperature in a batch reactor. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, 31: 1552-1564.
- [23] Shafiee G, Arefi M M, Jahed-Motlagh M R, et al. Nonlinear predictive control of a polymerization reactor based on piecewise linear Wiener model. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 143: 282-292.
- [24] Yuzgec U, Becerikli Y, Turker M. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms. *ISA Transactions*, 2006, 45: 589-602.
- [25] Al Seyab R K, Cao Y. Differential recurrent neural network based predictive control. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32: 1533-1545.
- [26] Al Seyab R K, Cao Y. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation. *Journal of Process Control*, 2008, 18: 568-581.
- [27] Balaji S, Fuxman A, Lakshminarayanan S, et al. Repetitive model predictive control of a reverse flowreactor. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 2154-2167.
- [28] Causa J, Karer G, Nunez A, et al. Hybrid fuzzy predictive control based on genetic algorithms for the temperature control of a batch reactor. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32: 3254-3263.
- [29] DeHaan D, Guay M. A new real-time perspective on non-linear model predictive control. *Journal of Process Control*, 2006, 16: 615-624.
- [30] Raffo G V, Ortega M G, Rubio F R. An integral predictive/nonlinear control structure for a quadrotor helicopter. *Automatica*, 2010, 46(1): 29-39.

第 2 章 模型预测控制方法

本章主要介绍预测控制的发展过程、基本原理、常用的一些预测控制方法、它们的基本算法以及各自的特点、设计控制器时应该考虑的相关问题。这些基本的预测控制原理和常用的预测控制对理解本书后续的内容有一定的帮助。

2.1 模型预测控制的发展过程

模型预测控制是一种基于模型的计算机控制算法。它的产生有深刻的实际工业生产背景。一是 20 世纪 60 年代发展起来的现代控制理论,在空间技术等领域的应用获得了极大的成功,然而应用于工业生产过程却遇到了许多困难。这主要是由于工业过程机理比较复杂,难以建立很准确的模型,尤其是许多工业过程往往是非线性的、时变的、严重不确定的、大纯滞后的和多变量的。因此,现代控制理论和传统的控制理论很难适合复杂工业过程提出的这些要求。二是计算机性能的迅速提高、存储空间的不增大和成本的不降低,使工业过程计算机控制不断普及与发展,这样就产生了以比较容易建立的非参数模型为基础的适合于计算机控制的预测控制。

一般认为,模型预测控制最早是 Richalet 等学者于 1978 年提出,是建立在以脉冲响应模型为基础的模型预测启发式控制(model predictive heuristic control, MPHIC)或模型算法控制(model algorithmic control, MAC)^[1,2]。1980 年美国壳牌公司工程师、DMC 公司董事长 Cutler 等提出了以阶跃响应模型为基础的 DMC^[3]。同时,工程师 Pretthe 和 Gillette 在催化裂化中应用 DMC 获得成功。由于这类以非参数模型为基础的预测控制算法具有建模简单、实现容易和鲁棒性好等优点而得到广泛应用,取得了显著的经济效益。

基于非参数模型的预测控制尽管有许多优点,但有两个缺点:一是脉冲响应和阶跃响应模型不能描述不稳定系统,虽然大多数工业过程是稳定系统,有广泛的应用基础,但对那些不稳定系统就不能适用;二是非参数模型在线辨识比较难。因此,在 20 世纪 80 年代初,在研究自适应控制的基础上,应用预测控制的思想提出各种自适应预测控制,最值得注意的是 Clarke 等于 1987 年提出的以可控自回归积分平均滑动模型 CARIMA(controlled autoregressive integrated moving average)为基础的广义预测控制^[4],它不仅能用于控制简单的开环稳定的最小相位系统,而且可用于控制非最小相位系统、不稳定系统和时滞变结构系统。它无需精确

已知的时滞结构和关联矩阵,在模型阶次高于或低于真实过程时,仍能获得良好的控制特性。

另外,还有一类称为基于结构化的预测控制算法。主要有 Garcia 等 1982 年提出的内模控制(internal model control, IMC)^[5],内模控制结构的提出,使得可以从结构的角度分析预测控制系统,理解预测控制的运行机制,有利于进一步分析控制系统的稳定性、鲁棒性等。20 世纪 80 年代中后期, Kuntze 等提出了把控制输入结构视为关键的预测函数控制(predictive functional control, PFC)^[6], PFC 可以克服其他预测控制可能出现规律不明的控制输入问题。自从 PFC 被提出以来,它不仅在理论上取得了重要的研究成果,而且在机器人、火炮或雷达的目标跟踪、冶金轧制过程等快速随动系统中得到了广泛的应用。尤其是最近 20 年来,预测函数控制方法已经扩展到以热焓控制为代表的一类工业过程中,如反应器、传热设备、加热炉等,并取得了一些应用成果。同时, ADERSA 公司已推出商品化的 PFC 软件^[7]。

2.2 模型预测控制基本原理

预测控制算法的种类多、表现形式多种多样,但都具有相同的三大本质特征:预测模型、滚动优化和反馈校正。各种预测控制算法具有类似的计算步骤:在当前时刻,基于过程的动态模型预测未来一定时域内每个采样周期(或按一定间隔)的过程输出,这些输出为当前时刻和未来一定时域内控制量的函数。按照基于反馈校正的某个优化目标函数计算当前及未来一定时域的控制量大小。为了防止控制量剧烈变化及超调,一般在优化目标函数中都考虑使未来输出以一参考轨迹最优地去跟踪期望设定值,计算出当前控制量后输出给过程实施控制。至下一时刻,根据新测量数据重新按上述步骤计算控制量。从预测控制的基本原理可以看出,预测控制是不断滚动的局部优化,而非全局最优。

预测控制是一类基于模型的计算机控制算法,因此是基于离散控制系统的。预测控制的基本思想如图 2.1 所示。

图中 $u(k+i)$ 为优化控制律, $y(k)$ 为当前的过程输出, $\hat{y}(k+i)$ 为过程模型预测输出, $y_r(k+1)$ 为参考轨迹, N_u 为控制时域, N_1 为最小预测步长, N_2 为最大预测步长。预测控制就是以某种模型为基础利用过去的输入输出数据来预测未来某段时间内的输出,再通过具有控制约束和预测误差的二次目标函数的极小化,得到当前和未来几个采样周期的最优控制律,在下一采样周期,利用最新的数据重复这一优化过程。

就一般的意义来说,预测控制不论其算法形式如何不同,都应建立在下述三项基本特征基础上^[8]。