

复杂系统

的应用鲁棒预测控制

刘志林 张军 原新 ◎ 著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

复杂系统的应用鲁棒 预测控制

刘志林 张军 原新 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了预测控制相关建模、鲁棒性分析、复杂系统应用的理论与方法,侧重于预测控制在新系统中的拓展研究。前半部分从切换系统、时滞系统、非线性系统研究预测控制的基本原理和算法设计,后半部分从目前国防重点预研的高超声速飞行器的再入多约束控制、高速欠驱动水面艇的协调航迹跟踪控制两方面研究鲁棒预测控制的系统分析与设计、算法发展和实际应用。本书采用状态空间模型描述被控系统的多变量关系,基于线性矩阵不等式(LMI)滚动优化来设计预测控制律,解决输入和输出约束,实现多目标的协调优化。

本书可作为高等学校自动化类专业的研究生教材,也可作为预测控制及相关领域研究者和工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统的应用鲁棒预测控制/刘志林等著. —北京:电子工业出版社,2017.7
ISBN 978-7-121-32104-7

I. ①复… II. ①刘… III. ①鲁棒控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第151531号

策划编辑:米俊萍

责任编辑:董亚峰

文字编辑:徐 烨

印 刷:北京七彩京通数码快印有限公司

装 订:北京七彩京通数码快印有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:710×1 000 1/16 印张:17 字数:337千字

版 次:2017年7月第1版

印 次:2017年7月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254759。

前 言

当前社会经济的发展使各应用领域对解决约束优化问题提出了越来越高的要求,预测控制因其在处理复杂约束优化控制问题方面具有独特的优势,被广泛应用在各个生产领域中。近年来,在航天、航空、航海、先进制造、环境医疗等许多领域中,逐渐出现了用预测控制解决约束优化控制问题的研究,拓宽了预测控制的原有过程控制应用范围,给预测控制发展带来新的机遇。本书侧重于预测控制在新系统中的拓展研究,前半部分从切换系统、时滞系统、非线性系统研究预测控制的基本原理和算法设计,后半部分从目前国防重点预研的高超声速飞行器的再入多约束控制、高速欠驱动水面艇的协调航迹跟踪控制两方面研究鲁棒预测控制的系统分析与设计、算法发展和实际应用。本书采用状态空间模型描述被控系统的多变量关系,基于线性矩阵不等式(LMI)滚动优化来设计预测控制律,解决输入和输出约束,实现多目标的协调优化。

本书依托作者历年来承担的国家自然科学基金(项目编号:51379044、61304060、50909026)、黑龙江省归国留学基金、中央高校基本科研业务费专项资金的研究成果,部分内容参考了作者公开发表的学术论文,进行了以下研究工作:模型预测控制发展历史、时滞系统的鲁棒模型预测控制、切换系统的鲁棒模型预测控制、分段仿射系统的预测控制、非线性系统的鲁棒模糊预测控制、非完整约束系统的预测控制、高超声速飞行器的再入多约束控制、高速欠驱动水面艇的协调航迹跟踪控制。本书不仅有详尽的理论推导,而且有作者根据多年项目经验总结出的工程应用实例。本书可作为高校从事控制领域的相关研究人员的参考资料,也可作为大中专院校的参考教材。

本书由刘志林、张军和原新共同撰写,撰写过程中得到作者所在单位哈尔滨工程大学和江苏大学同行的鼎力支持。哈尔滨工程大学朱齐丹教授担任本书的主审,他对本书提出了许多宝贵的指导意见。感谢哈尔滨工程大学智能控制

研究所夏桂华教授、孟浩教授、陆军教授、蔡成涛副教授、苏丽副教授、张智副研究员、博士研究生李国胜、硕士研究生黎为、耿超、张伟、孙悦对本书的帮助。在撰写过程中，加之参阅了国内外许多专家、同行的专著和论文，在此向他们表示诚挚的感谢。

由于预测控制工程应用技术发展尚未成熟，加之个人水平有限，书中难免存在缺点甚至错误，敬请广大读者批评指正。

作者

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本书的背景和意义	1
1.2 模型预测控制的发展历史	2
1.2.1 MPC 发展的理论基础	4
1.2.2 过程控制应用	5
1.3 模型预测控制的基本原理及特征	6
1.3.1 模型预测控制的基本原理	6
1.3.2 模型预测控制的特征	7
1.4 非线性模型预测控制的研究现状	8
1.4.1 典型的非线性模型预测控制方案	9
1.4.2 稳定性与鲁棒性研究	12
1.4.3 计算问题	15
1.4.4 非线性模型预测控制应用	15
1.4.5 将来的研究展望	16
1.5 本书的研究内容与结构安排	16
参考文献	18
第 2 章 预测控制的数学基础与基本方法	26
2.1 线性矩阵不等式	26
2.2 Schur 补和 S 过程	26
2.2.1 Schur 补	26
2.2.2 S 过程	27
2.2.3 矩阵求逆	27
2.3 不变集	28
2.3.1 不变集基本原理	28
2.3.2 控制约束的处理	29
2.4 模型预测控制的一般形式	30
2.4.1 问题描述	30
2.4.2 性能指标的上界	30
2.4.3 离散线性系统的预测控制算法	31

2.4.4	控制约束	33
2.4.5	预测控制算法的改进	34
2.4.6	稳定性分析	35
2.5	鲁棒预测控制	37
2.6	本章小结	39
	参考文献	39
第3章	时滞系统的鲁棒预测控制	41
3.1	引言	41
3.2	终端椭圆集约束的时滞系统预测控制	42
3.2.1	时滞系统的不变椭圆集	42
3.2.2	终端椭圆集约束的预测控制	45
3.2.3	带有混合约束的时滞系统预测控制	48
3.2.4	仿真研究	50
3.3	范数有界时滞系统的鲁棒预测控制	51
3.3.1	系统描述	51
3.3.2	主要结果	52
3.3.3	讨论	58
3.3.4	仿真研究	58
3.4	多胞型不确定时滞系统的鲁棒模型预测控制	60
3.4.1	系统描述	60
3.4.2	主要结果	61
3.5	多胞型时滞系统的准 Min-Max 鲁棒预测控制	65
3.5.1	问题描述	65
3.5.2	仿真研究	69
3.6	本章小结	74
	参考文献	74
第4章	切换系统的鲁棒预测控制	76
4.1	引言	76
4.2	模型描述	77
4.3	参数摄动切换系统预测控制	78
4.3.1	问题1的解决	78
4.3.2	问题2的解决	81
4.3.3	问题3的解决	81
4.3.4	椭圆集的线性切换系统的鲁棒控制	82
4.3.5	仿真结果1	82

4.3.6	仿真结果 2	83
4.4	时滞切换系统模型预测控制	85
4.4.1	问题描述	86
4.4.2	椭圆集与输入约束的时滞切换系统 MPC 算法	87
4.4.3	仿真研究	92
4.5	本章小结	93
	参考文献	93
第 5 章	分段仿射系统的鲁棒预测控制	95
5.1	切换系统的推广——分段仿射系统	95
5.2	分段仿射模型的建立	96
5.3	分段仿射系统研究的热点问题	97
5.4	分段仿射系统的应用	98
5.5	分段仿射系统的平衡点与区域划分	100
5.5.1	分段仿射系统的平衡点	100
5.5.2	分段仿射系统的区域划分	100
5.5.3	区域划分的椭圆集表示	101
5.5.4	平衡点与椭圆集的坐标变换	102
5.6	分段仿射系统的预测控制	102
5.6.1	问题描述	102
5.6.2	性能指标的上界	103
5.6.3	终止区域划分的椭圆集描述	104
5.6.4	分段仿射系统的预测控制算法	105
5.6.5	控制约束	111
5.6.6	分段仿射系统的预测控制算法改进	112
5.6.7	稳定性分析	114
5.7	多胞不确定 PWA 系统的预测控制	116
5.7.1	系统描述	116
5.7.2	性能指标优化问题	118
5.7.3	控制约束问题	122
5.7.4	稳定性分析	123
5.7.5	仿真研究	125
5.8	本章小结	127
	参考文献	127
第 6 章	非线性系统的鲁棒模糊预测控制	131
6.1	引言	131

6.2	预备知识	131
6.2.1	T-S 模糊模型	132
6.2.2	模糊调节器	133
6.3	基于模糊调节器的鲁棒非线性模型预测控制	134
6.3.1	鲁棒模型预测控制问题描述	134
6.3.2	无约束系统鲁棒模型预测控制	135
6.3.3	约束系统鲁棒模型预测控制	136
6.3.4	滚动实现的可行性	139
6.3.5	闭环系统鲁棒稳定性	139
6.3.6	讨论	140
6.4	一种基于模糊模型的准鲁棒模型预测控制方法	141
6.4.1	问题描述	141
6.4.2	准鲁棒模型预测控制	141
6.4.3	滚动实现的可行性	144
6.4.4	闭环系统鲁棒稳定性	145
6.4.5	讨论	146
6.4.6	仿真研究	146
6.5	不确定模糊系统鲁棒模型预测控制	148
6.5.1	系统描述	148
6.5.2	模糊不确定系统非线性镇定	149
6.5.3	并行分布补偿控制律	152
6.6	基于状态反馈的鲁棒模型预测控制	153
6.6.1	鲁棒性能指标上界	153
6.6.2	稳定性约束	153
6.6.3	极小化问题	155
6.6.4	输入约束	155
6.6.5	输出约束	155
6.6.6	约束系统鲁棒模型预测控制	157
6.6.7	滚动实现的可行性与鲁棒性	157
6.7	基于并行分布补偿控制器的鲁棒模型预测控制	159
6.7.1	无约束鲁棒 MPC	159
6.7.2	约束鲁棒 MPC	160
6.7.3	仿真研究	162
6.8	基于 T-S 模型的非线性时滞系统预测控制	163
6.8.1	系统描述	163

6.8.2	主要结果	165
6.8.3	仿真研究	171
6.9	本章小结	173
	参考文献.....	173
第7章	非完整约束系统的预测控制研究	174
7.1	基本概念与问题	174
7.1.1	非完整系统定义	174
7.1.2	移动机器人的非完整约束	174
7.2	移动机器人的建模	176
7.2.1	笛卡儿坐标系下的机器人运动学模型	176
7.2.2	笛卡儿坐标系下的机器人动力学模型	179
7.3	微分几何工具	181
7.4	移动机器人的可控性与可镇定性	185
7.5	机器人模型的问题描述及跟踪控制器设计	186
7.5.1	针对模型的问题描述	186
7.5.2	跟踪控制器的设计	190
7.5.3	仿真	191
7.6	欠驱动无人艇的预测控制算法	193
7.6.1	无人艇的欠驱动控制	193
7.6.2	问题描述	194
7.6.3	控制器设计	196
7.6.4	仿真结果	201
7.7	本章小结	203
	参考文献.....	203
第8章	高超声速飞行器的再入预测控制	205
8.1	引言	205
8.2	高超声速飞行器的再入非线性模型	207
8.3	基于SDRE的再入控制器设计	209
8.3.1	基于奇异摄动理论的再入SDRE控制器	209
8.3.2	仿真研究	211
8.4	基于SDRE的再入约束预测控制	213
8.4.1	再入飞行器的外环预测控制	213
8.4.2	再入飞行器的内环预测控制	216
8.4.3	仿真研究	217
8.5	控制受限的再入鲁棒预测控制	218

8.5.1 基于参考模型的外环设计	218
8.5.2 基于预测控制的内环设计	219
8.5.3 仿真研究	223
8.6 本章小结	225
参考文献	225
第9章 水面艇自主航迹跟踪过程中的预测控制	227
9.1 引言	227
9.2 水面无人艇航迹跟踪控制系统建模	228
9.3 坐标系的建立	228
9.4 船舶的运动方程和水动力分析	229
9.4.1 船舶的运动方程	229
9.4.2 船舶水动力分析	230
9.5 舵机模型	231
9.6 水面船舶航迹跟踪控制模型	231
9.7 水面无人艇航迹跟踪预测控制	235
9.8 拉格朗日乘子法处理输入约束	237
9.9 仿真研究	239
9.9.1 不同预测时域的控制仿真	239
9.9.2 不同加权矩阵的控制仿真	241
9.10 基于干扰观测器的水面无人艇航迹跟踪预测控制	242
9.10.1 干扰观测器的设计	243
9.10.2 基于干扰观测器的模型预测控制器设计	245
9.10.3 基于干扰观测器的模型预测控制器稳定性分析	247
9.10.4 仿真研究	248
9.11 模型预测控制在自航模航迹跟踪上的应用	252
9.11.1 自航模系统的整体结构	252
9.11.2 自航模系统硬件设计	253
9.11.3 自航模系统软件设计	254
9.11.4 自航模航迹跟踪控制实验	255
9.12 自航模航迹跟踪控制实验结果	257
9.12.1 无扰动自航模航迹跟踪	257
9.12.2 有扰动自航模航迹跟踪	258
9.13 本章小结	260
参考文献	260

第 1 章 绪 论

1.1 本书的背景和意义

20 世纪 60 年代初期发展起来的现代控制理论对自动控制技术的发展起到了积极的推动作用。但随着科学技术和生产水平的迅速发展,人类面临的问题越来越多,对大规模、复杂和不确定性系统实现自动控制的要求不断提高,使得现代控制理论的局限性日益明显。自适应和自校正技术虽然能在一定程度上解决不确定性问题,但是其算法复杂、计算量大、鲁棒性差,因此应用范围受到了限制。70 年代以来,人们除了加强对生产过程的建模、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制等的研究外,开始打破传统控制思想的束缚,试图面向工业过程的特点,寻找各种在线计算方便、控制综合效果好的算法。随着计算机向小型、高速、大容量、低成本方向发展,也为这类算法的实现奠定了基础。模型预测控制 (MPC) 就是在这种情况下发展起来的一类新型计算机控制算法^[1]。

模型预测控制是通过在线求解,或者近似求解一个开环最优控制问题来求得当前的控制动作,它的一个重要优点是具有处理控制和状态硬约束的能力。MPC 已经广泛应用于石油、化工、电力、冶金、轻工、机械、造纸等领域,这些工业过程很重要的一点是需要满足约束,因为高工业效率需要系统工作在可考虑的状态和控制集合的边界上,或在边界附近。MPC 的历史是很有趣的,原因是它开始的时候是在过程控制(在这一领域,除了通常的称呼 Model Predictive Control (MPC) 外,有一个商业上的称呼 Dynamic Matrix Control (DMC)) 和系统理论(这个领域通常称为 Receding Horizon Control (RHC)) 领域独立发展起来的,尽管预测控制在工业过程中的应用要先于理论研究^[2]。

由于 MPC 采用了多步预测、滚动优化和反馈校正等控制策略,因而控制效果好、鲁棒性强,因此在石油、化工、冶金、机械和航空航天等领域都得到了成功的应用^[3]。尽管如此,其理论研究滞后于实际应用,以致于在工程实践中缺少理论分析和指导。从预测模型来分,有线性模型预测控制 (LMPC) 和 nonlinear 模型预测控制 (NLMP) 两大类。到目前为止,线性模型预测控制作为一种约束多变量过程控制的工业标准已经得到了很好的发展与应用,其主

要限制是对象动态特性需用线性动态模型来描述,但是不适用于强非线性过程或者具有多工作状态的一般非线性过程;而非线性模型预测控制是一种基于优化的控制策略,适合于约束多变量过程控制,但目前尚处于理论研究、仿真与实验研究阶段^[4],大多数现有的研究都是针对小规模非线性过程进行仿真来验证所提出方法的有效性和可行性。MPC 经过 20 多年的发展,在国外现已出现了大量的商品化软件包,而国内的 MPC 理论只局限于广义预测控制,深度和广度与国外有很大的差距,在应用方面更是凤毛麟角。MPC 的发展所依赖的相关技术方法有建模方法、不同的 MPC 算法形式、效率高的非线性规划求解策略、非线性状态观测器设计方法、闭环系统的稳定性和鲁棒性分析以及新的工业过程应用等。

1.2 模型预测控制的发展历史

在 20 世纪 50 年代左右,经典控制理论在控制界得到了蓬勃发展。从 60 年代开始,现代控制理论在控制领域逐步得到重现,大力推进了状态空间法的应用范畴。但是随着工业自动化的迅速发展,工业控制系统对处理模型失配和扰动引起的不确定性的要求也在不断提高,使现代控制理论无法完全应用于实际的工业控制系统,根本原因是:第一,实际工业过程中对象往往是多输入多输出,精确建立延迟滞后或非线性特别严重的系统的精确数学模型十分困难;第二,工业控制系统在实际生产过程中由于环境、原料等原因,系统某些控制参数发生了明显的变化,利用不变的模型设计最优的控制器在这种情况下难以保持系统实时的最优。

为了缩小控制理论与它在实际应用之间的差距,一大批专家学者便通过对系统辨识,自适应和鲁棒控制等方法研究系统中的不确定性,根据工业过程的多变量复杂非线性特点,研究一种对模型的精度要求低、系统控制效果好并且在线计算方便的算法。于是,20 世纪 70 年代后期,从工业过程控制中研究出了一种新型计算机控制算法——模型预测控制 (Model Predictive Control),它是一种基于模型的滚动时域的优化方法。

总体而言,模型预测控制算法经过了以下几个阶段的发展:

第一阶段,基于非参数模型预测控制。包含 Richalet^[5]提出的基于系统脉冲响应的模型预测启发控制、Rouhani^[6]提出的模型算法控制以及 Cutler^[7]提出的基于阶跃响应模型的动态矩阵控制,这类控制算法具有在线计算简单的特点,尤其适用于动态响应不规则的对象。

第二阶段,基于参数模型预测控制。1987 年 Clarke^[8]提出了基于模型的广义预测控制,这种控制方法是基于受控自回归积分滑动平均模型而设计的,

与其他预测控制算法一样，广义预测控制也是基于辨识被控过程的参数模型且带有自适应机制的预测控制算法成功应用于工业过程中，引起了控制界的广泛关注。

第三阶段，基于结构化参数预测控制。具有代表性的是 Morari^[9] 和 Garcia 提出的内模控制、Kuntze^[10] 提出的预测函数控制、Byun^[11] 提出的基于状态空间的滚动时域预测控制，相比其他的预测控制算法，这种结构的预测控制算法可以克服控制规律不明确的输入问题，从而体现出独特的优越性。

模型预测控制在以上的基础上发展成了预测控制基础算法、现代预测控制以及非线性预测控制三大类，在炼油、化工、航空、汽车等多个领域已经取得了成功应用。模型预测控制是从计算机优化算法中衍生出来的，具有三个最基本特征^[12]：预测模型、滚动优化和反馈校正。通过反复在线地优化有限时域内相应的性能指标函数，将获得的控制规律滚动施加第一个控制分量，对时变干扰和模型失配等引起的系统不确定性及时进行补偿控制，始终把新的控制量建立在实际的控制系统上，使系统的性能保持实际上的最优。

许多学者越来越清晰地认识到：模型预测控制不同于一般的最优控制算法的最大优点在于控制律的计算不是一次离线得到的，而是通过当前时刻的输入和状态预测未来时刻的输出，经过大量反复的在线计算而获得的。

实际的控制系统几乎都受到一定的约束作用，比如系统的经济性要求系统稳态操作点接近允许的状态集的边界但不允许超过约束集。由于实际控制系统中硬约束的普遍存在，而且工业中对处理硬约束的控制器要求不断提高，但是能处理这些约束条件的控制方法却非常有限，因此可以借鉴模型预测控制这种独特的设计控制系统的方法，它可以针对系统的优化过程包含满足硬约束的边界条件，获得包含约束条件的控制规律，所以模型预测控制在控制领域成为一个非常重要的方法。特别是在被控过程变化非常缓慢的工业过程中，能够充分发挥模型预测控制器的优势。同时模型预测控制也适用于其他的无约束非线性过程或时变过程等，在实际的控制研究领域的应用也越来越广泛，比如在水面无人艇的航迹跟踪过程中，需要考虑多种约束条件，包括输入幅值约束、输入变化率的幅值约束、输出幅值约束以及状态约束等，模型预测控制能够在优化相应的性能指标函数的同时，将约束条件转换成二次规划的问题来处理，这样获得的控制律中就包含了约束条件，达到了在满足约束条件的前提下完成对系统的实时控制。因此将模型预测控制应用于水面无人艇的航迹跟踪过程，扩大了模型预测控制的应用范畴，体现了预测控制理论具有一定的工程时效性。

非线性模型预测控制是一种基于优化的控制策略，适合于约束多变量过程控制。尽管 NMPC 取得了很大的进展，并有几家公司提供了可用于工业过程控制的 NMPC 产品，但是仍然处于理论研究、仿真与实验研究阶段^[4]。目前

大多数研究都是针对小规模的非线性过程进行仿真来验证所提出方法的有效性和可行性。NMPC 的发展所依赖的相关技术方法有建模方法、不同的 NMPC 算法形式、效率高的非线性规划求解策略、非线性状态观测器设计方法、闭环系统的稳定性和鲁棒性分析以及新的工业过程应用等。由于 NMPC 最适合于强非线性约束多变量过程控制,这是传统的线性控制方法所无能为力的,因此对 NMPC 的理论、实验及应用研究具有重要理论意义和实际应用价值。

模型预测控制是自 20 世纪 70 年代后期直接从工业过程控制实践中发展起来的一类新型控制算法。一经问世,就在石油、化工、电力、航空等领域获得了成功的应用。最早应用于工业过程控制的预测控制算法是 Richalet 等人提出的基于脉冲响应模型的模型预测启发控制 (MPHC)^[13],或称为模型算法控制 (MAC)^[14],随后相继出现了基于阶跃响应模型的动态矩阵控制 (DMC)^[15]、扩展时域预测自适应控制^[16]、广义预测控制 (GPC)^[17-21]、广义预测极点配置控制^[22],以及预测控制的状态空间形式^[23]。预测控制具有预测模型、滚动优化和反馈校正三个基本特征,因此针对预测控制的基本特征相继提出了各种改进算法,并和系统辨识结合起来形成自适应预测控制^[24-26]。

对于 MPC 的研究出现了两个方向,一个是过程控制应用,另一个是控制理论研究。本质上, MPC 是求解最优控制问题。与一般最优控制不同,它基于对象当前的测量值在线求解最优控制问题,而不是离线确定反馈控制律。这一特性使得 MPC 能够处理更困难的问题,也就是处理带状态和控制硬约束的问题。由于 MPC 在线求解开环优化控制问题,这使得它严格受限于这样一个条件,即开环优化问题在一个合理的时间(与对象动态过程相比较)内是可解的。这个条件可能会限制有限时域 MPC 的应用。

1.2.1 MPC 发展的理论基础

首先是 20 世纪 60 年代控制革命中的两大定理 Pontriagin 极大值原理和 Bellman 动态规划,为最优控制的发展奠定了基础。Bellman (1957) 和 Lee and Markus (1967) 的著作中都曾特别指出^[2] “One technique for obtaining a feedback controller synthesis from knowledge of open-loop controllers is to measure the current control process state and then compute very rapidly for the open-loop control function. The first portion of this function is then used during a short time interval, after which a new measurement of the process state is made and a new open-loop control function is computed for this new measurement. The procedure is then repeated.” 这个结论反映了最优控制的不确定性本质,即 “Feedback is only necessary when uncertainty is present”。

其次, Kalman (1960) 指出 “Optimality does not imply stability”, 但是在

某些条件下（可稳性和可检测性），无限时域最优控制器是镇定的。求解无限时域开环最优控制问题通常是不切实际的，尤其是在线求解（当然不包括标准 H_2 和 H_∞ 控制问题），因此需要通过求解有限时域开环最优控制问题得到镇定控制器。这样，Kleinman^[27] 和 Thomas^[28] 提出的最优控制问题中，存在稳定性约束 $x(t+T)=0$ 。对于每一个时刻 t ，通过在区间 $[t, t+T]$ 上求解矩阵 Riccati 微分方程来确定 $K(t)$ ，作者首次提出了在线计算最优控制律的思想，即在每一个时刻 (x, t) 求解最优控制问题得到控制律 $u(t)=K(t)x$ 。这篇文章可以看成 MPC 的早期思想。因此得到这样一个结论^[2]，“Optimal feedback control for a constrained system could be obtained by solving an open-loop, finite horizon, optimal, control problem with initial state equal to the current state of the plant being controlled; moreover, this controller is stabilizing if an appropriate stability constraint is included in the optimal control problem”。

1.2.2 过程控制应用

实际上，MPC 首先是在过程控制中提出来的，源于控制工程师们的思想。当时已经存在的控制方法不能处理约束、非线性和不确定性。而在石油化工方面，经济上的考虑要求系统工作点位于满足所有约束的工作点集的边界上。因此动态控制器必须能够处理约束，否则小的干扰将造成约束违背^[29,30]。MPC 的本质是在线求解开环最优控制得到非线性反馈控制律，毫无疑问这是一个能够经得住考验的思想。

IDCOM (Identification and Command)^[5] 是一种 MPC 形式，它利用有限脉冲响应模型，二次型代价函数及输入和输出约束。Cutler and Ramaker 提出的 DMC 利用了阶跃响应模型^[31]，但是处理输入输出约束是一种临时的方案。这在第二代产品 QDMC (Quadratic DMC) 中被克服了，QDMC 应用二次规划精确求解约束开环最优控制问题^[32-34]。第三代 MPC 技术是大约十年前出现的^[33,34]，通过对约束进行适当的变化，即硬约束或者软约束，使得 MPC 具有可行解。

应用 MPC 的工程师们没有在理论上提出稳定性，但是意识到了它的重要性，这时的 MPC 不是自动镇定的。然而，用于稳定的对象，并且选择一个相对于对象过渡过程时间较长的预测时域，得到了与无限预测时域相似的稳定特性。MPC 理论并不像应用中那样成功，这刺激了学术上对 MPC 的研究，主要包括控制时域、预测时域和性能指标中参数对稳定性的影响^[32]，而且是在线性系统、二次型代价、没有硬约束的情况下讨论的。GPC 是 MPC 的一种^[35]，通过附加一个合适的终端代价能自动保证稳定性，但是没有给出如何处理硬约束，而这正是 MPC 研究的主要问题。

1.3 模型预测控制的基本原理及特征

1.3.1 模型预测控制的基本原理

一般说来,模型预测控制是一类计算机控制算法,它通过求解涉及状态约束和控制约束的有限时域开环优化问题得到一组控制序列,并将当前的控制作用于对象,在下一采样时刻基于新的初始状态重复上一时刻的优化过程,从而形成闭环控制。

图 1-1 给出了模型预测控制的一般原理^[5]。在采样时刻 k , 得到系统状态或输出的测量值, 利用受控系统标称模型, 并假定一组控制序列 (控制时域 $T_c = N_c \delta$, 预测时域 $T_p = N_p \delta$, δ 为采样周期), 这样就可以预测出系统将来的动态, 通过优化使得开环性能指标极小, 可以求得这组控制序列, 称之为预测控制序列。一般取 $T_p \geq T_c$, 大多数情况下取 $T_p = T_c$ 。事实上, 如果系统不存在干扰和建模误差, 并且在预测时域和控制时域为无穷大的情况下能够求得开环优化问题的最优解, 那么可以将 $k=0$ 时刻求得的整个无穷预测控制序列作用于对象。然而, 一般来说这是不可能的, 由于系统存在干扰或建模误差, 这使得系统真实动态与预测动态存在误差; 而且, 一般来说求解无限时域约束优化问题也是不可行的, 只能求得有限时域预测控制。这样模型预测控制通过滚动优化的方式在每一个采样时刻都基于新的对象测量值求解一个有限时域开环优化问题得到一个预测控制序列, 并将当前控制作用于对象。由图 1-1 可

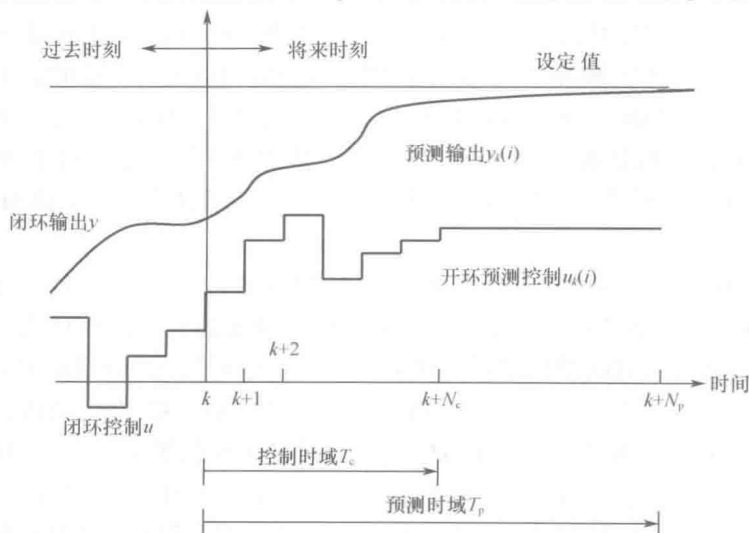


图 1-1 模型预测控制原理