

预测控制

席裕展 著

国防工业出版社

预测控制

席裕庚 著

TP273

100



国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书全面介绍了预测控制的机理、算法、设计要点及其在复杂工业系统中的应用技巧。全书共分九章。第一章是引言，第二、三章分别介绍了预测控制的基本原理和典型算法，第四、五章对预测控制系统进行了定量分析，并在此基础上给出了其参数设计的方法，第六章介绍了多变量系统的预测控制，第七章讨论了预测控制面向实用的多样化发展，第八章通过介绍预测控制在复杂工业系统中的若干应用实例，展示了这一控制技术的地位和价值，第九章对预测控制的发展前景作了展望。全书分别从总体概念、基础算法及理论分析、实用算法及应用技巧诸侧面描绘了预测控制的全貌，各部分相互渗透，有机结合，有助于读者正确认识预测控制的本质，在较高的视野上拓宽研究和应用预测控制的思路。

本书是国内预测控制方面的第一本专著。取材注意先进性和广泛性，内容深入浅出，体现了普及与提高相结合的原则，适合于不同读者的需要。本书有助于从事计算机控制的广大工程技术人员熟悉和应用这一新型优化控制技术。也可供从事预测控制研究的高校师生和科研工作者参考。

预 测 控 制

席裕庚 著

责任编辑 周烈强

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 印张7¹/₄ 186千字

1993年6月第一版 1993年6月第一次印刷 印数：0001—2000册

ISBN 7-118-01070-7/TP·137 定价：8.60元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革

IV

开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

V

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

前 言

预测控制是70年代后期产生的一类新型计算机控制算法。它的问世，一方面是受到了计算机技术发展的推动，另一方面也来自复杂工业实践向高层优化控制提出的挑战。10多年来，随着它处理复杂系统控制的策略思想日益为人们所认识，以及它在工业实践中的大量成功应用，这一控制技术的生命力及诱人的应用前景已引起了控制理论界和工业控制界的广泛兴趣。本书的撰写，就是为了适应这方面的需要，通过全面介绍预测控制的机理、算法、设计要点及其在复杂工业系统中的应用技巧，推动预测控制在我国的研究和应用，使这一新型技术对我国国民经济的发展和工业自动化水平的提高产生积极的影响。

本书力图从多方面对预测控制作出全面的描绘。全书内容由三部分组成：一是从概貌上介绍预测控制的产生、机理、研究现状及发展前景（第一、二、九章）；二是介绍预测控制的基础算法及系统的分析与设计（第三、四、五章），这部分一方面对常用的典型算法进行了细致的描述，另一方面对预测控制系统进行了深入的理论分析，为系统设计提供了有益的参考；三是介绍复杂系统中的预测控制（第六、七、八章），即从应用的角度介绍预测控制的实用化算法及其应用实例。这三个部分分别侧重于从总体概念、基础算法及理论分析、实用算法及应用技巧上描绘预测控制，但又相互渗透，有机结合。本书既使读者了解预测控制的方法论，又反映出具体的理论问题及应用技巧。这将有助于读者跳出单一算法框框的束缚，加深对预测控制本质的理解，正确认识预测控制的实际地位和价值，在较高的视野上拓宽研究和应用预测控制的思路。

预测控制发展到今日，已不能仅仅理解为是一种或几种控制

算法，而要从更高的层次上，把它作为一种控制方法来理解。虽然在这种方法框架下，新的算法层出不穷，但由于篇幅所限，本书只能以某些典型算法为例进行介绍。在这里，作者选择了动态矩阵控制算法，这是因为，它是产生最早、影响最大、应用最广的预测控制算法之一。虽然如此，书中所介绍的原理也同样适用于其他算法。基于同样的理由，书中对预测控制的实用化算法及应用实例的介绍，也只能选择有限的典型例子，而不可能将各种策略和实例均包含在内。作者希望这种取材的有限性，不致影响本书对这一领域全貌的反映。

本书是作者近10年来在该领域的研究工作的结晶，同时书中也综合了近年来该领域在国际上的发展动态。在这里，特别要感谢导师施密特 (G.Schmidt) 教授和张钟俊教授对作者在这一领域研究的引导和支持。几年来，作者的同事和学生们，特别是许晓鸣博士和谢剑英副教授，与作者一起在这一领域中作出了持续有效的努力，华东师范大学袁震东教授，中国石油大学袁璞教授等许多国内同行与作者进行了极为有益的讨论，均为本书的撰写奠定了基础，作者在此表示衷心的感谢。

作者还要感谢妻子和父母对作者工作极为可贵的支持。近10年来，他们为此所作出的巨大牺牲作者将终身难忘。

本书中的研究工作先后受到德国科学研究基金 (DFG)、我国国家自然科学基金的资助，作者谨在此一并表示感谢。

预测控制作为一种新型优化控制技术，在我国的工业和其他领域内有着广阔的应用前景。作者希望，本书的出版能为推动预测控制在我国的研究和应用起到一定的作用。由于作者水平所限，书中定有不少不尽人意之处，衷心希望广大读者提出宝贵意见。

席裕庚 于上海交通大学

1991年10月

目 录

第一章	引言	1
第二章	预测控制的基本原理	5
第三章	几种典型的预测控制算法	10
§ 3.1	动态矩阵控制	10
§ 3.2	模型算法控制	18
§ 3.3	广义预测控制	28
第四章	预测控制系统的分析	36
§ 4.1	动态矩阵控制的状态空间分析	36
§ 4.2	动态矩阵控制系统的内模控制结构	43
§ 4.3	动态矩阵控制系统的动态特性分析	52
§ 4.4	动态矩阵控制系统的稳定性和鲁棒性分析	61
第五章	预测控制系统的参数设计	78
§ 5.1	动态矩阵控制的参数设计	78
§ 5.2	典型工业过程动态矩阵控制的解析设计	92
第六章	多变量预测控制算法	107
§ 6.1	多变量系统的动态矩阵控制	107
§ 6.2	多变量动态矩阵控制的算法实现及参数整定	115
§ 6.3	多变量动态矩阵控制的解耦设计	120
§ 6.4	有约束的多变量动态矩阵控制	128
§ 6.5	多变量系统的分散预测控制	138
第七章	预测控制在实际应用中的发展	148
§ 7.1	具有前馈-反馈结构的预测控制	148
§ 7.2	串级预测控制	152
§ 7.3	带有自校正的预测控制算法	159
§ 7.4	高维大系统的递阶预测控制	164
§ 7.5	利用无穷范数优化的鲁棒预测控制	172
§ 7.6	非线性系统的预测控制	179

X

第八章 预测控制的工业应用实例	189
§ 8.1 汽轮发电机组蒸汽系统的控制	191
§ 8.2 炼油厂加氢裂化单元的动态矩阵控制	194
§ 8.3 天然气传输网络的在线优化	201
§ 8.4 工业机器人的预测函数控制	207
第九章 预测控制的发展前景	215
参考文献	220

第一章 引言

70年代后期,在美、法等国的工业过程领域内出现了一类新型计算机控制算法,如动态矩阵控制(DMC)、模型算法控制(MAC)。这类算法以对象的阶跃或脉冲响应为模型,采用滚动推移的方式在线地对过程实现优化控制,在复杂的工业过程中显现出良好的控制性能。1978年,理查勒特(Richalet)等在文献〔1〕中,首次详细阐述了这类算法产生的动因、机理及其在工业过程中的应用效果。从此,预测控制(Predictive Control)作为这类新型控制算法的统一名称,便开始出现在控制领域中。

预测控制的产生,并不是理论发展的需要,而首先是工业实践向控制提出的挑战。众所周知,60年代初形成的现代控制理论,在航天、航空等领域都取得了辉煌的成果。利用状态空间法分析和设计系统,提高了人们对被控对象的洞察能力,提供了在更高层次上设计控制系统的手段。特别是,立足于最优性能指标的设计理论和方法已趋成熟,这对于在工业过程中追求更高控制质量和经济效益的控制工程师来说,无疑具有极大的吸引力。然而,人们不久就发现,在完美的理论与控制实践之间还存在着巨大的鸿沟。这主要表现在以下几个方面,

(1) 现代控制理论的基点是对象精确的数学模型,而在工业过程中所涉及的对象往往是多输入、多输出的高维复杂系统,其数学模型很难精确建立,即使建立了模型,从工程实用的角度来说,往往需要简化,从而很难保证得到对象精确的模型。

(2) 工业对象的结构、参数和环境都具有很大的不确定性。由于这些不确定性的存在,按照理想模型得到的最优控制在实际上往往不能保持最优,有时甚至会引引起控制品质的严重下降。在工业环境中,人们更关注的是控制系统在不确定性影响下保持良

好性能的能力，即所谓鲁棒性，而不能只是追求理想的最优性。

(3) 工业控制中必须考虑到控制手段的经济性，对工业控制计算机的要求不能太高。因此，控制算法必须简易以满足实时性的要求。而现代控制理论的许多算法往往过于复杂，难以用低性能的计算机实现。

这些来自实际的原因，阻碍了现代控制理论在复杂工业过程中的有效应用，也向控制理论提出了新的挑战。

为了克服理论与应用之间的不协调，70年代以来，除了加强对系统辨识、模型简化、自适应控制、鲁棒控制等的研究外，人们开始打破传统方法的约束，试图面对工业过程的特点，寻找各种对模型要求低、控制综合质量好、在线计算方便的优化控制新算法。在此期间，数字计算机技术的飞速发展，也为新算法的产生提供了物质基础。预测控制就是在这种背景下发展起来的一类新型计算机优化控制算法。

最早产生于工业过程的预测控制算法，有理查勒特、梅拉(Mehra)等提出的建立在脉冲响应基础上的模型预测启发控制(Model Predictive Heuristic Control, 简称为MPHC)⁽¹⁾，或称模型算法控制(Model Algorithmic Control, 简称为MAC)⁽²⁾，以及卡特勒(Cutler)等提出的建立在阶跃响应基础上的动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, 简称为DMC)⁽³⁾。由于这类响应易于从工业现场直接获得，并不要求对模型的结构有先验知识，所以不必通过复杂的辨识过程便可设计控制系统。这些预测控制算法汲取了现代控制理论中的优化思想，但用不断的在线有限优化，即所谓滚动优化，取代了传统的最优控制。由于在优化过程中利用实测信息不断进行反馈校正，所以在一定程度上克服了不确定性的影响，增强了控制的鲁棒性。此外，这些算法的在线计算比较简易。这些特点使它们很适合于工业过程控制的实际要求。70年代后期，模型算法控制和动态矩阵控制分别在锅炉和分馏塔的控制以及石油加工的生产装置上获得了成功的应用，从而引起了工业控制界的广泛兴趣。此后，基于对象脉冲或

阶跃响应的各种预测控制算法相继出现,有些算法已形成了商品化软件包,在石油、化工、电力等领域的过程控制中取得了明显的经济效益。

除了直接来自工业控制的以对象非参数模型为基础的预测控制算法外,还出现了另一类算法。80年代初期,人们在自适应控制的研究中发现,为了克服最小方差控制的弱点,有必要汲取预测控制中的多步预测优化策略,这样可以大大增强算法的适用性和鲁棒性,因此出现了基于辨识模型并带有自校正的预测控制算法,如扩展时域预测自适应控制(Extended Prediction Self-Adaptive Control, 简称为EPSAC)^[4]、广义预测控制(Generalized Predictive Control, 简称为GPC)^[5]等。此外,莫拉里(Morari)等1982年在研究一类新型控制结构——内模控制(Internal Model Control, 简称为IMC)^[6]时,发现预测控制算法与这类控制结构有着密切的联系,从而从结构的角对预测控制作了更深入的研究。这些研究和应用,有力地推动了预测控制的进一步发展。现在我们所说的预测控制,就包括了上述来自工业控制、自适应控制及内模控制等多方面的研究成果。它们统称为模型预测控制,或基于模型的控制(Model-based Control),其应用范围也已超出了过程控制领域,而应用到机器人、飞行器、网络系统等更广泛的领域内。

近年来,国内外对预测控制的研究和应用日趋广泛。从1984年起,每年的美国控制年会(ACC)上都有关于预测控制的专题组。1987年召开的第10届国际自控联(IFAC)世界大会上,专题讨论了预测控制及其应用,被认为是特别吸引人的两个专题讨论之一。1988年,IFAC又组织了以预测控制为主题的“基于模型的过程控制”工作讨论会。关于预测控制及其应用的文献越来越多地出现在各种控制杂志和会议上。特别在过程控制界,已把预测控制作为当前过程控制的发展方向之一。此外,包含有预测控制的多变量优化控制算法已在国外许多大公司得到应用。在我国,近年来也有许多单位开展了预测控制的研究,取得了不少新的成

果，并在工业过程中获得了初步成功的应用。这些事实表明，预测控制已成为当前控制理论界和工业控制界均十分关注的一个热门课题。

由于预测控制对于复杂系统的适应性，它在工业过程和其他领域内有着诱人的应用前景。作为一种有前途的新型控制方法，预测控制在我国的深入研究和推广应用，必将对国民经济的发展产生显著的推动作用。

第二章 预测控制的基本原理

在介绍具体预测控制算法之前，我们首先要对这类算法的一般轮廓作一描绘，以使读者了解什么样的控制算法可称为预测控制算法。

首先应该指出，预测控制是以计算机为实现手段的，因此其算法一般应为采样控制算法而不是连续控制算法。顾名思义，预测控制应包含预测的原理。在传统的采样控制中，有些算法也用到了预测的原理。例如，利用史密斯（Smith）预估器可以把未经纯滞后的对象输出提前反馈给PID控制，其实质就是对输出作了预测。又如在离散最优控制中，性能指标涉及到未来时刻的状态或输出，也需要利用状态方程模型对这些量进行预算。但是这些算法都不能称为预测控制算法。那么，预测控制算法应具备什么特征呢？

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原理基础上^[7]。

1. 预测模型

预测控制是一种基于模型的控制算法，这一模型称为预测模型。预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出。这里只强调模型的功能而不强调其结构形式。因此，状态方程、传递函数这类传统的模型都可以作为预测模型。对于线性稳定对象，甚至阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型，也可直接作为预测模型使用。此外，非线性系统、分布参数系统的模型，只要具备上述功能，也可在对这类系统进行预测控制时作为预测模型使用。

预测模型具有展示系统未来动态行为的功能，这样，我们就可像在系统仿真时那样，任意地给出未来的控制策略，观察对象

在不同控制策略下的输出变化 (见图2-1)。从而为比较这些控制策略的优劣提供了基础。

2. 滚动优化

预测控制是一种优化控制算法,它是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用的。这一性能指标涉及到系统未来的行为,例如,通常可取对象输出在未来的采样点上跟踪某一期望轨迹的方差为最小;但也可取更广泛的形式,例如要求控制能量为最小而同时保持输出在某一给定范围内等等。性

能指标中涉及到的系统未来的行为,是根据预测模型由未来的控制策略决定的。

然而,需要强调的是,预测控制中的优化与传统意义下的离散最优控制有很大的差别。这主要表现在预测控制中的优化是一种有限时段的滚动优化。在每一采样时刻,优化性能指标只涉及到从该时刻起未来有限的时间,而到下一采样时刻,这一优化时段同时向前推移(见图2-2)。因此,预测控制不是用一个对全局相同的优化性能指标,而是在每一时刻有一个相对于该时刻的优化性能指标。不同时刻优化性能指标的相对形式是相同的,但其绝对形式,即所包含的时间区域,则是不同的。因此,在预测控制中,优化不是一次离线进行,而是反复在线进行的,这就是滚动优化的含义,也是预测控制区别于传统最优控制的根本点。

3. 反馈校正

预测控制是一种闭环控制算法。在通过优化确定了一系列未来的控制作用后,为了防止模型失配或环境干扰引起控制对理想状态的偏离,预测控制通常不是把这些控制作用逐一全部实施,

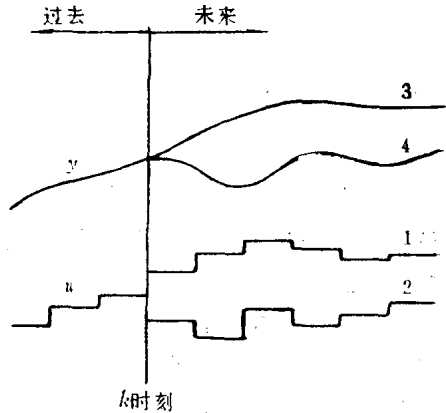


图2-1 基于模型的预测

1—控制策略 I; 2—控制策略 II; 3—对应于 I 的输出; 4—对应于 II 的输出。

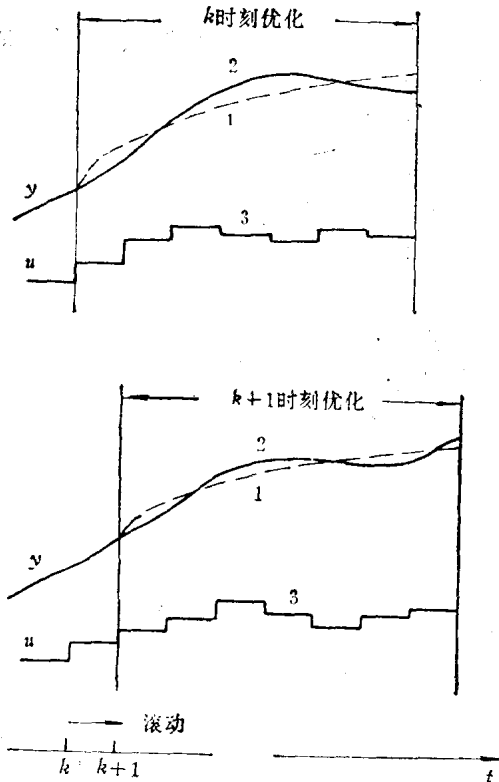


图2-2 滚动优化

1—参考轨迹，2—最优预测输出，3—最优控制作用。

而只是实现本时刻的控制作用。到下一采样时刻，则首先检测对象的实际输出，并利用这一实时信息对基于模型的预测进行修正，然后再进行新的优化（见图2-3）。

反馈校正的形式是多样的，可以在保持预测模型不变的基础上，对未来的误差作出预测并加以补偿，也可以根据在线辨识的原理直接修改预测模型。不论取何种校正形式，预测控制都把优化建立在系统实际的基础上，并力图在优化时对系统未来的动态行为作出较准确的预测。因此，预测控制中的优化不仅基于模型，而且利用了反馈信息，因而构成了闭环优化。

综上所述可以看到，预测控制作为一种新型计算机控制算