

预测控制的研究现状和多层智能预测控制*

席裕庚 许晓鸣 张钟俊

(上海交通大学自控系)

摘 要

本文简要评述了预测控制的研究现状,用控制论的观点分析了算法中蕴含的方法机理,指出了把预测控制提高到方法高度加以研究的必要性。文中探讨了预测控制与人工智能和大系统方法结合的可能性,提出了多层智能预测控制的概念。

一、引 言

预测控制,亦称为基于模型的控制(Model-based Control),是七十年代后期兴起的一类新型计算机控制算法。文[1]已综述了1984年以前以非参数模型为基础的预测控制算法产生的背景、算法原理及研究状况。值得注意的是,随着预测控制在工业过程及其它领域内的成功应用,近年来国内外控制界对于预测控制的研究又有了引人注目的进展。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。第十届IFAC世界大会上专题讨论了预测控制及其应用,参加者达130人,被认为是特别吸引人的两个专题讨论之一。1988年IFAC又在亚特兰大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的发展方向之一^[2]。此外,包含有预测控制的多变量控制方法已在国外许多大公司得到应用,商用软件包亦已出现。在我国,近年来也有许多单位开展了预测控制的研究,在控制理论及应用、过程控制等专业会议和杂志上发表了不少研究成果,并在工业过程中获得了初步的成功应用。

为了正确认识预测控制的地位并深入开展其研究和应用,在本文中,我们将对预测控制的研究现状作一简要评述,并指出把预测控制的研究从算法提高到方法的必要性。通过运用控制论的观点分析预测控制的方法机理,说明它在复杂系统控制中的适用性。文中还探讨了把人工智能和大系统方法引入预测控制的可能性,提出了多层智能预测控制的概念。

二、预测控制算法的研究现状

由于篇幅所限,本节中我们只以提纲方式对预测控制的研究现状作一总结,并略去

*国家自然科学基金资助的课题。

本文于1987年12月16日收到。1989年1月11日收到修改稿。

了近180篇参考文献中的大部分。

1. 模式分类

目前对预测控制的种种研究,按其基础模式的来源不同主要可分为以下三类:

(1) 直接从工业应用中产生的以非参数模型为基础的模型预测启发控制算法,典型的如模型算法控制(MPHC^[3]、MAC^[4])、动态矩阵控制(DMC^[6])等。这类算法以脉冲或阶跃响应为模型,采用启发式的滚动优化,用以克服复杂工业环境中建模的困难,并提高控制的鲁棒性。

(2) 由经典自适应控制算法发展起来的一类远程预测控制算法,典型的如广义预测控制(GPC^[6])、扩展时域预测自适应控制(EPSAC^[7])、扩展时域自适应控制(EHAC^[8])等。这类算法以长时段多步优化取代了经典最小方差控制中的一步预测优化,从而可应用于时滞和非最小相位对象,并改善了控制性能和对模型失配的鲁棒性。由于其产生的原由,这类算法往往与自校正机制相结合,对模型进行在线辨识。

(3) 从结构设计出发的内模控制(IMC^[9])或推理控制(IC^[10])。这是从结构上研究预测控制的一个独特分支。其控制器设计常采用预测控制的优化原理,两者联系甚密。

2. 算法修正与推广

这是预测控制的文献中比重最大的部分,包括:

(1) 对已有基础算法作技术性的修正,如导出递推算法、采用控制间隔内多步预测、引入扰动观测器、采用变反馈校正系数等。

(2) 把单变量算法推广到多变量算法,把只适用于稳定对象的算法推广到非自衡对象,把预测控制的适用范围推广到非线性对象及分布参数系统。

(3) 修改目标函数,采用与期望值误差的二次函数为目标函数,或采用线性目标、无穷范数目标、带状目标等。

(4) 考虑对输入、输出或中间状态的约束,用线性规划、二次规划方法处理多变量有约束预测控制问题。

(5) 通过把期望输出分解为基函数的响应,综合系统输入,实现预测函数控制;通过对期望轨线加权并离线仿真,协调修改期望轨线,减小输入输出间的交互影响。

(6) 引入大系统方法,实现递阶或分散的预测控制算法,以处理对象的高维性和信息的不完全性。

(7) 在非参数模型预测控制中引入自校正机制,实现模型在线辨识和控制策略在线修正;在广义预测控制中引入自学习机制,以适应对象和环境的不确定性。

(8) 把预测控制与先进的控制结构结合起来,引入前馈、串级、解耦设计方法,以简化设计,提高控制性能。

对于预测控制基础算法的上述推广,主要来自于控制实践的需要。这些推广算法,在不同程度上增强了预测控制对于复杂多变量系统的适用性,简化了系统设计,改善了控制性能,并提高了控制的实时性。

3. 理论分析

预测控制作为一种复杂系统控制的策略和方法,有着强烈的应用背景,其理论分析的要点应在于解释预测控制的机理及其鲁棒性的原因,导出设计参数和闭环特性间的定量关系,为系统设计提供指导。然而,由于预测控制的设计参数通常是以蕴含方式出现在闭环系统中,而优化指标又是滚动的,从而使一般的理论分析难以进行。目前在这方面的研究大抵集中在以下方面:

(1) 通过把预测控制算法转化为某种控制结构,如内模控制、状态反馈与观测器等,解释预测控制的算法机理。

(2) 导出预测控制的闭环传递函数,分析设计参数对稳定性的影响趋势,或是在某些特殊控制策略下(如一步预测),定量分析参数对稳定性、鲁棒性的影响。

(3) 对某些典型对象,采用特定的控制策略,分析设计参数与闭环动态响应、稳定性、鲁棒性的定量关系,导出特定的模型失配(如增益、滞后失配)下的鲁棒性界域。

(4) 通过对闭环预测机制的分析,在一般的意义上解释其鲁棒性优于传统最优控制的原因。

总的说来,对于预测控制的理论研究至今仍是十分薄弱的,这里的困难不仅来自算法形式,而且还在于缺乏明确的命题。例如,预测控制系统所具有的鲁棒性虽已为大量工业实践和系统仿真所证实,但必须首先从工业的应用环境及与其它控制算法效果相比较的意义上加以理解,而不能认为它在设计参数任意选择、环境任意变化的情况下都是鲁棒的。如何把预测控制的理论研究纳入明确的体系,看来是亟待解决的问题。我们认为,这方面的工作可首先在下述方向进行:

(1) 充分利用 IMC 结构的优点,分析预测控制在 IMC 结构下的开环稳定性(即无失配稳定性)及闭环稳定性(即鲁棒性)。

(2) 针对典型对象,具体分析预测控制系统的性能。

(3) 在特定的控制策略下,研究较少的设计参数对系统特性的定量影响。

4. 算法比较

(1) 分析预测控制与某些已有控制算法,如最少拍控制、离散最优控制、Smith 预估的关系。

(2) 比较预测控制与 PID、LQC、ESTR、GMV 等控制算法的效果。

(3) 比较不同的预测控制算法,如 PC、DMC、MAC、GPC、EHAC、EPSAC 等在模型与控制策略上的异同,评价它们的控制效果。

5. 背景领域

预测控制在其产生的初期主要应用于过程控制领域,近年来,预测控制在更广泛的领域内获得了直接应用或开展了带有背景的实验研究,例如:

(1) 过程系统:如蒸馏塔、分离塔、多效蒸发器、锅炉、预热炉。

(2) 网络系统:如大规模天然气传输网。

(3) 精密、高速、随动系统:如导弹、飞行器、机器人。

(4) 其它:如三相电弧炉、PVC 工厂。

综上所述可以看出,预测控制研究中近年来的发展,已突破了其研究初期的单一算法模式。由于被控对象的复杂性,预测控制已不再停留在某种固定的算法模式上,而开始与适应控制、鲁棒控制、非线性控制等结合起来,成为复杂系统多变量优化控制的重要组成部分。这种发展的多样性,是建立在预测控制一般方法机理的基础上的。因此,我们认为,有必要把预测控制的研究从算法提高到方法的高度,通过各种算法中蕴含的共同方法机理,来分析其成功应用的原因,并以此来探讨预测控制在更高层次上的发展。这对于在复杂系统中灵活有效地应用预测控制,无疑是有重要的意义的。

三、预测控制的方法机理

预测控制发展至今,已很难用其在发展初期由 Richalet 提出的脉冲响应模型、滚动优化、参考轨迹三要素加以概括。但各类预测控制算法虽然在表现形式上各不相同,仍具有某些共同点。我们可把预测模型、滚动优化、反馈校正作为预测控制的本质特征。本节中,我们将着重分析这些基本特征中所蕴含的方法原理,并以此来说明预测控制对于复杂系统的适应性。

1. 预测模型

在预测控制算法中,需要一个描述对象动态行为的基础模型,称为预测模型。预测控制称为基于模型的控制,其意义即在于此。预测模型应具有预测的功能,即能够根据系统的历史信息 and 选定的未来输入,预测其未来输出值。作为产生于工业过程的某些早期预测控制算法,如 MAC、DMC 等,为了克服建模的困难,选择了实际工业过程中较易测量的脉冲或阶跃响应作为预测模型,但不能认为预测模型仅限于这种形式。从方法的角度讲,只要是具有预测功能的信息集合,不论其有什么样的表现形式,均可作为预测模型。在这里,强调的只是模型的功能,而不是其结构形式。因此,预测控制打破了传统控制中对模型结构的严格要求,更着眼于在信息的基础上根据功能要求按最方便的途径建立模型。

2. 滚动优化

预测控制是一种优化控制算法,但它与通常的离散最优控制算法不同,不是采用一个不变的全局优化目标,而是采用滚动式的有限时域优化策略。这意味着优化过程不是一次离线进行,而是反复在线进行的。这种有限优化目标的局部性,使其在理想情况下只能得到全局的次优解,但其滚动实施,却能顾及由于模型失配、时变、干扰等引起的不确定性,及时进行弥补,始终把新的优化建立在实际的基础上,使控制保持实际上的最优。这种启发式的滚动优化策略,兼顾了对未来充分长时间内的理想优化和实际存在的不确定性的影响,是最优控制对于对象和环境不确定性的妥协。在复杂的工业环境中,要比建立在理想条件下的最优控制更加实际与有效。

3. 反馈校正

所有的预测控制算法在进行滚动优化时,都强调了优化的基点应与系统实际一致。这意味着在控制的每一步,都要检测实际输出信息,并通过引入误差预测或模型辨识对

未来作出较准确的预测。这种反馈校正的必要性在于：作为基础的预测模型，只是对象动态特性的粗略描述，由于实际系统中存在的非线性、时变、模型失配、干扰等因素，基于不变模型的预测不可能和实际完全相符，这就需要用附加的预测手段补充模型预测的不足，或者对基础模型进行在线修正。滚动优化只有建立在反馈校正的基础上，才能体现出其优越性。这种利用实际信息对模型预测的修正，是克服系统中所存在的不确定性的有效手段。

因此，如果舍去预测控制算法的具体公式而从其中蕴含的方法机理加以分析，则预测控制的三个基本特征：预测模型、滚动优化、反馈校正，正是一般控制论中模型、控制、反馈概念的具体体现。由于模型结构的不唯一性，使它可以根据对象的特点和控制的要求，以最简易的方式集结信息建立预测模型。由于优化模式和预测模式的非经典性，使它可以把实际系统中的不确定因素考虑在优化过程中，形成动态的优化控制，并可处理约束和多种形式的优化目标。因此，预测控制的预测、优化模式是对传统最优控制的修正，它使建模简化，并考虑了不确定性及其它复杂性的影响，因而更加贴近复杂系统控制的实际要求，这是预测控制在复杂系统领域中受到重视和应用的根本原因。

四、预测控制与人工智能、大系统方法的结合——多层智能预测控制

预测控制的一般方法原理，为其在复杂系统控制中的应用提供了有益的启示。把这些原理与人工智能、大系统控制的思想相结合，对于预测控制方法的结构化以及指导新算法的开发，是有着重要意义的。

预测控制算法的创新意义，首先在于其模型的非经典性即信息建模的思想。由于在预测控制中，选择有效的信息集合作为预测模型只是为了实现预测的功能，对其结构类型没有限制，因而可以根据实际对象的复杂程度，建立恰如其分的预测模型。例如，当对象易于辨识时，可建立通常的状态方程或传递函数作为预测模型；当对象的动态比较复杂而实际过程允许进行某些试验时，可把实测的脉冲或阶跃响应作为预测模型；而当对象的动态变化规律高度复杂难以给出定量模型时，甚至还允许采用表格模型、模糊模型乃至规则集作为预测模型。建立预测模型的原则只有两条：一是正确反映输入输出的动态因果关系，二是建模过程和模型的表达尽可能简便。这种对模型结构约束的突破为系统建模提供了很大的自由度，使我们不但可以采取常规建模手段，而且可以引进人工智能中的先进技术建立非常规的启发式模型，为多层控制提供相适应的不同类型的预测模型。

以误差预测补充模型预测的综合预测，是一类预测控制算法中常用的策略。其中，模型预测反映了预测模型所描述的确定的动态因果关系，而误差预测则描述了在预测模型中未能包含的一切不确定性，它作为模型预测的重要补充，可以弥补在基础模型中已简化或无法加以考虑的一切其它因素。在目前的预测控制中，由于只采用了单一的预测模型，使得误差预测只能建立在非因果的基础上。但如果我们对引起误差的原因还有某些先验知识，则可对误差预测再作分解，以形成多层次的综合预测。例如，作为基础的线性化模型是无法描述非线性的，但我们对非线性的程度却可能有某些确定的先验知识，这

时若能在高一层上建立非线性程度的预测模型,则可把底层的误差预测在高层进一步分解为模型预测和误差预测,并可望对系统的动态作出更准确的预报。这种多层预测的策略是与多层建模相适应的。各层次模型预测的综合,最大限度地利用了已知信息中的因果部分,提高了预测的准确度,而其分层分解实现,则可降低对每一层基础模型的要求,克服一揽子建模的困难,并有利于引入智能启发式的模型与预测概念,最大程度地克服不确定性的影响。

预测控制的优化模式具有鲜明的特点,它的离散形式的有限优化目标及滚动推进的实施过程,使其在控制的全过程中表现为动态优化,而在控制的每一步表现为静态参数优化即规划问题。这种规划问题的一般化,可以使它处理更复杂的情况,如有约束、多目标、非线性乃至非参数目标等。吸取规划中的分层思想,我们可把目标按其重要性及类型分层,在各层次建立相应的预测模型,并实施不同形式的优化。在这里,不但可以采用二次型性能指标,而且可以采用非线性性能指标甚至非定量的控制目标,不但可以运用优化技术中的各种解析算法,而且还可采用启发式寻优、计算机仿真预测寻优、规则判别等各种非经典方法。由于多种目标被分散到不同的层次以及规划方式的多样性,无疑可以增强预测控制对于复杂系统和综合性能要求的适用性。

由此可见,把大系统控制中分层决策的思想和人工智能中的启发式方法引入预测控制,就可以形成多层智能预测控制的模式。在这种模式中,控制的目标被划分到不同的层次,在每一层次,都有与目标相适应的预测模型和优化方式,它们可以是经典的,也可以是模糊的或启发式的。对象的先验信息将按层次由下而上集结成不同类型的模型,而实时信息将反馈到各个层次中予以识别,并补充基于模型的预测。在较低层中的不确定性,可在较高层上进一步识别和描述,有针对性地加以优化处理,而智能启发式方法将渗透到预测和优化策略中。这种控制概念与原有的单一模型的预测控制算法相比,不但具有适应性质,而且可以有效地处理非参数的信息规律,因而可用来解决预测控制算法中的参数在线设计和调整问题,并可拓宽原有算法的应用范围,处理动态复杂(如非线性对象)、目标多样(包括非经典的目标)、不确定性难以参数化的复杂系统的控制。事实上,目前预测控制的研究,已在不同程度上反映了这一趋势。模型、目标的多样性、控制的层次性、启发式寻优和校正,已在许多文献中可见。第十届 IFAC 世界大会上,工业界也明确指出要把不确定性描述、多目标优化、专家系统作为预测控制的基本内容^[11]。它与人工智能、大系统方法的结合,是工业控制实践的要求,已是势在必行。这种多层智能预测控制方法的研究,将有力地克服单一模型的预测控制算法的不足,进一步增强预测控制处理复杂对象和综合目标的能力。

五、结 论

鉴于预测控制算法单一模式的局限性,把它提高到方法的高度加以研究,已成为预测控制在复杂系统中能否得到广泛和有效应用的关键。预测控制的一般方法,除了保持原算法中预测模型、滚动优化、反馈校正的基本特征外,应充分吸取人工智能和大系统控制中的先进技术,对复杂系统实现多层次、多模式的控制。研究这种多层智能预测控

制的结构、模式和实现方法,将是预测控制向高层次发展的重要内容。它不仅有助于复杂系统的控制,而且还能把大系统的优化管理和控制统一在同一框架下,实现系统管控的一体化,这将对复杂工业系统的控制与管理提供新的思想和方法。本文从评述预测控制的研究现状出发,指出了这一研究的背景及必然性,并根据预测控制的方法机理探讨了其实现的可能性,旨在引起工业控制界的兴趣,在更高的立足点上开发更实用有效的新型预测控制算法。

参 考 文 献

- [1] 席裕庚、张钟俊,一类新型计算机控制算法:预测控制算法,控制理论与应用,2:3 (1985) 1—9.
- [2] Edgar, T.F., Current Problems in Process Control, IEEE Control Systems Magazine, 7:2, (1987) 13—15.
- [3] Richalet, J. et al, Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial Processes, Automatica, 14:5, (1978), 413—428.
- [4] Rouhani, R., Mehra, R.K., Model Algorithmic Control (MAC), Basic Theoretical Properties, Automatica, 18:4, (1982), 401—414.
- [5] Cutler, C.R., Ramaker, B.L., Dynamic Matrix Control—A Computer Control Algorithm, Proc. JACC, San Francisco, (1980), WP5-B.
- [6] Clarke, D.W., Mohtadi, C., Tuffs, P.S., Generalized Predictive Control, Automatica, 23:2, (1987), 137—162.
- [7] De Keyser, R.M.C., Van Cauwenberghe, A.R., A Self-tuning Multi-step Predictor Application, Automatica, 17:1, (1981), 167—174.
- [8] Ydstie, B.E., Extended Horizon Adaptive Control, Proc. of IFAC 9th World Congress, Budapest Vol.2, (1984), 911—915.
- [9] Garcia, C.E., Morari, M., Internal Model Control, 1. A Unifying Review and Some New Results, IEC Process Des. Dev., 21:2 (1982), 308—323.
- [10] Brosilow, C.B., Joseph, B., Inferential Control of Processes, AIChE J., 24:3, (1978), 485—509.
- [11] Prett, D.M., Garcia, C.E., Design of Robust Process Controllers, Preprint of IFAC 10th World Congress, Munich, Vol. 2, (1987), 291—296.

The Status of Predictive Control and the Multilayer Intelligent Predictive Control

Xi Yugeng, Xu Xiaoming, Zhang Zhongjun

(Department of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University)

Abstract

In this paper, the state of the art of predictive control is briefly surveyed. The methodological mechanism implied in predictive control algorithms is analysed from the view point of cybernatics. The necessity to study predictive control in a higher methodological level is pointed out. We also discuss the possibility to combine the predictive control with artificial intelligence and large scale systems techniques. A new control concept, multilayer intelligent predictive control, is proposed.