

广义预测控制理论及其应用

王伟 著

科学出版社

PDG

(TP-0972.0101)

责任编辑: 杨家福

ISBN 7-03-006804-1



9 787030 068040 >

ISBN 7-03-006804-1/TP · 972

定 价: 12.00 元

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

广义预测控制理论及其应用

王 伟 著

科 学 出 版 社

1998

内 容 简 介

本书从基本原理与方法、多种实用算法及理论分析、工业应用等诸方面描绘了广义预测控制的全貌。全书共分八章。第一章为引言。第二、三章分别介绍了广义预测控制的机理、方法和控制算法。第四章将单变量广义预测控制推广到多变量系统。第五章介绍了广义预测控制面向实用的多样化发展。第六章介绍了非线性系统的广义预测控制。最后两章为应用实例和发展前景。本书是国内广义预测控制方面的第一本专著,内容深入浅出、有机结合,取材新颖、广泛,理论联系实际,所给出的七个实例展示了广义预测控制在工业及其它领域的应用价值。

本书适宜于从事计算机控制专业的广大科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

广义预测控制理论及其应用/王伟著. —北京:科学出版社, 1998.9

ISBN 7-03-006804-1

I. 广… I. 王… III. 预测控制, 广义 N. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16253 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1998 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1998 年 9 月第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 1—2 000 字数: 162 000

定价: 12.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

前 言

广义预测控制(Generalized Predictive Control)是 80 年代产生的一种新型计算机控制方法,是预测控制中最具代表性的算法之一。它具有如下的特点:(1)基于传统的参数模型,因而模型参数少,而其它类型的预测控制算法如模型算法控制和动态矩阵控制都则基于非参数化模型,即脉冲响应模型或阶跃响应模型。(2)是在自适应控制研究中发展起来的,保留了自适应控制方法的优点,但比自适应控制方法更具有鲁棒性。(3)由于采用多步预测、滚动优化和反馈校正等策略,因而控制效果好,更适合于工业生产过程的控制。由于这些优点,所以它一出现就受到了国内外控制理论界和工业控制界的重视,成为研究领域最为活跃的一种预测控制算法。十多年来,对广义预测控制研究的不断深入,使得其理论和算法逐步完善,在工业界得到了成功的应用。但这些成果大多见于分散发表的文献,因而给从事计算机控制的科技工作者熟悉、掌握和应用这种新型有效的控制算法带来了一定的困难。本书的目的就是要通过全面地介绍广义预测控制的机理、算法、前景和工业应用,推动这一先进的控制方法在我国的研究和应用,从而促进我国工业自动化的发展。

本书共分八章,主要介绍广义预测控制的基本方法、基本算法及其性能分析,广义预测控制的直接算法及其理论分析,将单变量广义预测控制推广到多变量系统,极点配置广义预测控制、PID 广义预测控制、变结构广义预测控制和基于状态空间模型的广义预测控制,非线性系统的广义预测控制,以及应用实例等等。尽管本书只介绍了某些典型的方法和算法,但随着广义预测控制的不断发展,新的控制算法定会层出不穷,其工业应用也会越来越多。

作者首先要感谢广义预测控制方法的提出者、英国工程院院士、英国牛津大学工程科学系主任 D. W. Clarke 教授和挪威工学

16/94/12

院 R. Henriksen 教授在这一领域对作者的引导和支持。作者的研究工作先后得到我国国家自然科学基金(69674010)及辽宁省首届优秀青年科研人才培养基金(963007)的资助,本书的出版获得国家科学技术学术著作出版基金的资助,特在此一并表示感谢。

本书是作者多年研究工作的结晶,部分内容已在上海宝山钢铁公司举行的自适应控制高级研讨班中讲授过。希望本书的出版能为推动广义预测控制在我国的研究和应用起一定的作用。由于作者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第一章 概论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 预测控制的基本原理	(3)
1.3 参数自适应控制的基本原理	(6)
第二章 广义预测控制的基本方法	(10)
2.1 广义预测控制的基本方法	(10)
2.2 Diophantine 方程的递推求解	(16)
2.3 广义预测自适应控制算法	(18)
2.4 广义预测控制方法的参数选择	(23)
2.5 广义预测控制的扩展和解释	(25)
2.6 广义预测控制的稳定性和鲁棒性	(34)
2.7 简单广义预测控制算法	(43)
第三章 广义预测控制的直接算法	(46)
3.1 广义预测控制的直接算法	(46)
3.2 改进的广义预测控制直接算法	(52)
3.3 简单广义预测控制直接算法	(64)
3.4 具有稳定性的广义预测控制直接算法	(66)
第四章 多变量系统的广义预测控制	(76)
4.1 多变量系统的广义预测控制	(76)
4.2 多变量系统广义预测控制的直接算法	(78)
4.3 具有解耦设计的多变量系统广义预测控制	(85)
第五章 广义预测控制在应用中的发展	(93)
5.1 性能指标加权的广义预测控制	(93)
5.2 极点配置广义预测控制	(98)
5.3 具有 PID 结构的广义预测控制	(106)
5.4 变结构广义预测控制	(112)
5.5 基于状态方程模型的广义预测控制	(120)
第六章 非线性系统的广义预测控制	(124)

6.1	基于 Hammerstein 模型的广义预测控制	(124)
6.2	基于 Hammerstein 模型改进的广义预测控制	(126)
6.3	基于 Laguerre 模型的广义预测控制	(139)
6.4	具有输入输出幅值受限的广义预测控制	(143)
6.5	基于神经网络的广义预测控制	(148)
第七章	广义预测控制的应用实例	(155)
7.1	镀锌板生产过程的广义预测控制	(155)
7.2	工业锅炉的加权广义预测控制	(161)
7.3	热交换器的广义预测控制	(165)
7.4	飞机机翼颤振的广义预测控制	(169)
7.5	环境实验箱的多变量广义预测控制	(173)
7.6	机器臂极点配置的广义预测控制	(179)
7.7	手术麻醉药注入的广义预测控制	(181)
第八章	结束语	(188)
	参考文献	(190)

第一章 概 论

1.1 引 言

以状态空间法为基础的现代控制理论从 60 年代初期发展以来,已取得了很大进展,特别在航天、航空等领域取得了辉煌的成果。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,提供了设计控制系统的手段,对控制理论和控制工程的发展起到了积极的推动作用。但随着科学技术和生产的迅速发展,对复杂和不确定性系统实行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。这主要表现在以下两个方面:

(1) 现代控制理论的基础是被控对象精确的数学模型,而在工业环境下,其精确的数学模型很难建立,即使一些被控对象能够建立起数学模型,但其结构往往十分复杂,难于设计和实现有效的控制。

(2) 系统在实际运行时由于各种原因其参数要发生一些变化,而且生产环境的改变和外来扰动的影响给系统带来很大的不确定性,这使得按理想模型得到的最优控制失去最优性并使控制品质严重下降。在实际应用中,人们往往更关心的是控制系统在不确定性影响下仍能保持良好的控制性能,而不是只追求理想的最优性。这些来自实际的原因阻碍现代控制理论在工业过程中的有效应用。为了克服理论和应用之间的不协调,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,寻找各种对模型要求低、在线计算方便、控制综合效果好的控制方法和算法。与此同时,计算机技术的飞速发展,使得高速、大容量、低成本的计算机应用越来越广泛,这也为新算法提供了可实现

的重要基础。预测控制就是在这种情况下发展起来的一类新型计算机控制算法。

预测控制不是某一种统一理论的产物,而是在工业实践过程中发展起来的,并在实际中得到了十分成功的应用。到目前为止已有许多种类不同的预测控制方法。最早提出的典型预测控制算法有 Richalet、Mehra 等提出的建立在脉冲响应基础上的模型预测启发控制(MPHC)^[1]和模型算法控制(MAC)^[2],以及 Cutler 等提出的建立在阶跃响应基础上的动态矩阵控制(DMC)^[3]。被控对象的脉冲响应或阶跃响应一般称为非参数模型。这两类响应易于从生产现场检测到,且不需要事先知道过程模型的结构和参数等先验知识,也不必通过使用复杂的系统辨识技术便可设计控制系统。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,即所谓的滚动优化取代了传统的最优控制。由于在优化过程中利用测量信息不断进行反馈校正,所以这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,这些控制算法的在线计算比较简单。这些特点使它们更适合于工业过程控制实际要求,因此在石油、化工等领域取得了成功的应用。

除了上述基于脉冲响应或阶跃响应的非参数模型用于预测控制算法外,还出现了另一类基于离散时间参数模型的预测控制算法。80年代初期,人们在自适应控制的研究中发现,为了增加自适应控制系统的鲁棒性,有必要在广义最小方差控制的基础上,汲取预测控制中的多步预测优化策略,提高自适应控制系统的实用性,因此出现了基于辨识被控过程参数模型且带有自适应机制的预测控制算法,其中最具有代表性的就是 Clarke 等人提出的广义预测控制(Generalized Predictive Control,简称 GPC)^[4~6],也就是本书所要介绍的内容。

基于参数模型的预测控制算法仍然保留了基于非参数模型的 MAC 和 DMC 等预测控制算法的基本特征,不过这里的被控对象模型采用的是受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)或受控自回归滑动平均模型(CARMA)。由于参数模型是最小化模型,需

要已知模型结构,但模型参数远比非参数模型要少,减少了预测控制算法的计算量。为了克服模型参数失配对输出预测误差的影响,在基于参数模型的预测控制算法中,引进了自适应控制的在线递推算法估计模型参数,并用估计的参数取代原模型参数,从而可进行预测控制算法的计算。由于将自适应控制与预测控制相结合,因而由于过程参数慢时变所引起预测模型输出误差得以及时的修正,从而改善了系统的动态性能。同 MAC 和 DMC 预测控制算法一样,广义预测控制也在工业过程控制中获得了许多成功的应用,从而引起工业控制界广泛的兴趣。

十几年来,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)、IEEE 决策与控制年会(CDC)和 3 年一届的 IFAC 世界大会几乎都有关于预测控制及其应用的专题分组。1938 年,IFAC 组织了以预测控制为主题的工作讨论会。1995 年在韩国又召开了关于预测控制的国际讨论会。关于预测控制及其应用的文献不断地出现在各种控制杂志和国际会议上。我国近年来也有许多单位开展了预测控制的理论和应用研究,取得了不少新的成果^[7~16]。

作为一种有前途的新型控制算法,预测控制在我国的深入研究和推广应用,必将对我国国民经济的进一步发展起到积极作用。

1.2 预测控制的基本原理

在介绍广义预测控制之前,有必要对预测控制基本原理作一描绘,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,因此其数学模型的建立和控制算法的推导都是基于离散时间。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^[7,10]。

(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,从而为比较这些控制策略的优劣提供基础。

(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。这一性能指标涉及到系统未来的行为。例如,通常可取被控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。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,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,它通常不是把这些控制作用逐一全部实施,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。

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,而且利用了反馈的信息,因而构成了闭环优化。

综上所述可以看到,作为一种新型计算机控制算法,预测控制是有其鲜明特征的,是一种基于模型、滚动实施并结合反馈校正的优化控制算法。预测控制汲取了优化控制的思想,但利用滚动的有限时段优化取代了一成不变的全局优化。这虽然在理想情况下不能导致全局最优,但由于实际上不可避免地存在着模型误差和环境干扰。这种建立在实际反馈信息基础上的反复优化,能不断顾及不确定性的影响,并及时加以校正,反而要比只依靠模型的一次优化更能适应实际过程,有更强的鲁棒性。所以,预测控制是针对传统最优控制在工业过程中的不适用性而进行修正的一种新型优化控制算法。

预测控制的这种优化控制原理,实际上反映了人们在处理带有不确定性问题时的一种通用思想方法。例如,人们在穿越马路时,不必去看左右很远处有无车辆,而只需看近几十米处,但还需边走边看,以防近处开出新的车辆或远处车速加快且原来估计不足而发生意外。这里就包含了建立在反馈信息基础上的反复决策过程。对象的滚动优化思想早已出现在管理领域中,企业管理中常采用滚动计划,其思想与上面介绍的基本原理是一致的。预测控制正是汲取了其中包含的方法、原理,并把它与控制算法结合起来,从而能有效地应用于复杂系统的控制。

1.3 参数自适应控制的基本原理

因为广义预测控制是基于被控对象参数模型,而在通常情况下,被控对象模型的参数是未知或慢时变的,这时要实现广义预测控制必须使用自适应控制的技术。那么,什么是自适应控制呢?

自适应控制系统不同于常规的反馈控制,也不同于最优控制。众所周知,当被控对象结构和参数已知时,一般可用常规反馈控制或最优控制等方法便可以得到较为满意的控制效果。然而,由于种种原因,要事先要求被控对象的结构或参数完全已知,几乎是不可能的。这种被控对象的结构或参数的未知性质称为不确定性。形成被控对象不确定性的原因有:

(1) 由于工业装置和过程的复杂性,单纯依靠机理分析很难确切知道它的动态特性,因而设计者事先不能够完全掌握被控对象数学模型的结构和参数,所得到的数学模型都是近似的。

(2) 外部环境对过程的影响不可避免。例如,化学反应过程的参数随环境温度和湿度的变化而变化,飞行器在低空和高空飞行时的气动特性相差很大。应把这些外部环境的影响等效地用于干扰来表示,而这些干扰有的不能量测,有的虽然能量测但无法预计它们的变化。

(3) 过程本身的特性在运行过程中也会发生变化。例如,绕纸卷筒的惯性会随纸卷的直径而变化,机械手的动态特性会随着臂的伸屈而变化等。

面对如此众多的具有较强不确定性的被控对象,如何设计一个满意的控制器,就是自适应控制的任务。由于自适应控制的对象是那些存在不确定性的系统,所以这种控制应首先能在控制系统的运行过程中通过不断地量测系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐地了解 and 掌握被控对象。然后根据所得的过程信息,按一定的设计方法,作出控制决策去更新控制器的结构、参数或控制作用,以便在某种意义下使控制效果达到最优或次最优,或达到某个

预期目标。按此思想建立起来的控制系统便是自适应控制系统。

由此可见,一个自适应控制系统必然具有下列三个基本特征:

(1) 有过程信息的在线积累。这用以降低被控对象原有的不确定性。为此,可用系统辨识的方法在线辨识被控对象的结构和参数,直接积累过程的信息,也可通过量测能反映过程状态的某些辅助变量,间接积累过程信息。

(2) 有一个可调的控制器。该控制器的结构参数或信号可以根据性能指标要求进行自动调整。这种可调性的要求是由被控对象的不确定性决定的,否则就无法对过程实现有效的控制。

(3) 在性能指标的闭环控制中实现性能指标的控制。将获取的实际性能与预定性能之间的偏差信息进行反馈,并据以修改可调控制器,直到实际性能达到或接近预定性能为止。

自 50 年代末期由麻省理工学院 Whitaker 等人提出第一个自适应控制系统以来,先后出现过许多形式完全不同的自适应控制系统。但是,无论从理论研究和实际应用的角度来看,目前比较成熟的自适应控制主要有两大类:自校正控制和模型参考自适应控制。因为广义预测控制主要是使用自校正技术,所以这里主要介绍自校正控制。

当被控对象的随机、时延、时变和非线性等特性比较明显时,采用常规的 PID 调节器很难收到良好的控制效果,甚至无法达到基本要求。此外,在初次运转或者工况发生变化时,都需要重新整定 PID 参数,这相当耗费时间。如果采用自校正控制,上述问题可能得到圆满的解决。理论分析和应用结果表明,自校正控制特别适用于结构已知且参数未知而恒定或缓慢变化的随机控制系统。由于大多数工业被控对象都具有这些特征,再加上自校正控制理解直观,所以它在工业过程控制中已得到广泛应用。

自校正控制系统的一个主要特点是具有被控对象数学模型的在线辨识环节。此类系统要根据系统运行数据,首先对被控对象进行在线辨识,然后再根据辨识得出来的模型参数和事先指定的性能指标,进行在线的综合控制。自校正控制系统由两个环路组成,

它的典型结构如图 1.1 所示。内环同常规反馈控制系统类似,由被控对象和控制器组成。外环由参数估计和控制器参数设计机构组成。外环的任务是估计被控对象参数,按选定的设计方法综合出控制器参数,用以修改内环的控制器。

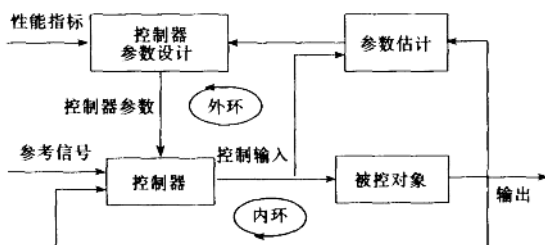


图 1.1 自校正控制系统的典型结构

在目前的自校正控制中,用来综合自校正控制律的性能指标有两类:优化性能指标和常规性能指标。前者如最小方差、广义最小方差、LQG 和广义预测控制,后者如极点配置和 PID 控制。用来进行参数估计的方法有最小二乘法、增广最小二乘法、辅助变量法和极大似然法等。在参数估计时有两种形式:一种是估计被控对象模型本身的未知参数,这样的自校正控制算法称为显式算法或间接算法;另一种是估计控制器的未知参数,这时需要将过程重新参数化,建立一个与控制器参数直接关联的估计模型,相应的自校正算法称为隐式算法或直接算法。隐式算法无需进行控制器参数的设计计算,所以它的计算量比显式算法小,不过要为其建立一个合适的参数估计模型。

由此可见,自校正控制是在线参数估计和控制器参数在线设计两者的有机结合。由于存在多种参数估计和控制器设计方法,所以自校正控制的设计十分灵活,这也是它得到广泛应用的原因之一。但是,由于自校正控制常常兼有随机、非线性和时变等多种特征,内部机理也相当复杂,所以分析这类系统十分困难。广泛研究的理论课题有自校正控制的稳定性、收敛性和鲁棒性等。虽然在这

些理论研究方面已取得很好的结果,但与人们的期望还相差甚远。在应用方面由于速度快、价格低的微型计算机的普及,自校正控制在许多工业部门中有了成功的应用。可以预料,随着控制理论和计算机技术的发展和完善,自校正控制的应用会愈来愈广,效益会愈来愈高。