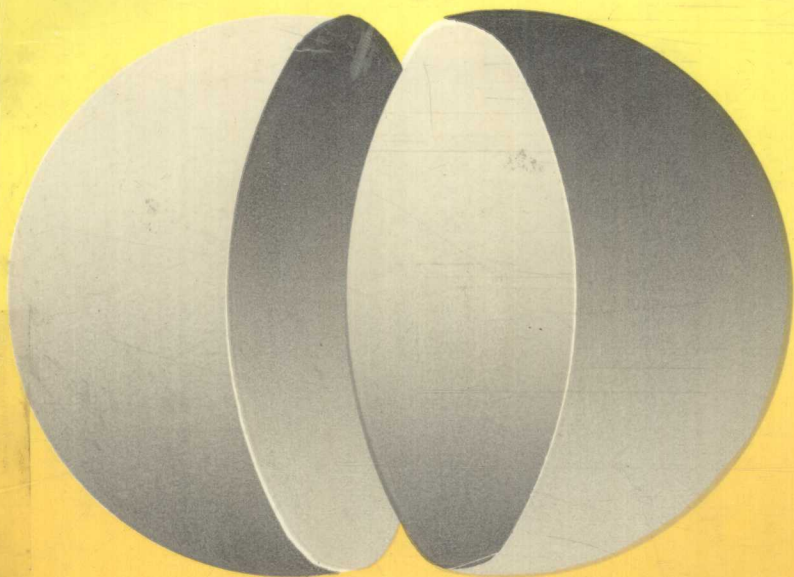


预测控制 及应用

陈福祥



华中理工大学出版社

预测控制及应用

陈福祥

华中理工大学出版社

预测控制及应用

陈福祥

责任编辑 姜新祺

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

邮政编码430074

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.125 字数: 242 000

1993年3月第1版 1993年3月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0768-7/TP:79

定价: 2.86元

(鄂)新登字第10号

内 容 简 介

预测控制是突破了传统控制理论思想的一类新型计算机控制算法，是控制理论的新发展。本书总结了预测控制近十年来的成就，系统地介绍了预测控制的基本概念、算法原理、技术方法和工程应用情况。全书共分十章，其内容包括预测控制模型、模型预测启发控制、模型算法控制、动态矩阵控制、广义预测控制、推理控制、内模控制、双线性系统预测控制、自校正预测补偿控制等。

本书可供从事自动控制工程、管理科学、系统工程、宇航工程、计算机科学等方面的工程技术人员和高等院校教师参考阅读，也可作为高等院校自动化及其相近专业的研究生教材。

序

预测控制是当今国内外控制理论界的热门研究领域，是解决建模困难的复杂对象的生产过程问题的有效控制方案。

预测控制是突破了传统控制理论的思想而产生的一类新型的计算机控制算法，它是基于内部模型的控制，而不是基于受控对象的控制，从这个意义上讲，预测控制的出现确实是控制理论的一个重大进展。

预测控制自70年代问世以来，就以惊人的速度飞速地向前发展，出现了各种不同的预测控制方案；但迄今为止，在国内外尚未见到预测控制方面的专著发表。目前国内外学者和本书作者在预测控制方面发表的理论研究论文及应用成果论文多达数百篇，

《预测控制及应用》一书就是这些研究成果的总结、提炼和升华，是预测控制发展史上的一个阶段性成果，是一本很好的专著，特向读者推荐。

我们必须清醒地看到，预测控制毕竟是刚刚兴起的一门新型的研究领域，无论是从理论上还是从应用研究上看，都显得不够成熟，有许多问题还需今后作进一步的研究和探讨。

本书内容很系统，结构完整，层次分明，推证严谨，文笔流畅，图文并茂，具有较高的学术价值和工程实用价值。本书可供从事自动控制、系统工程、管理科学、宇航技术、计算机科学等方面的科技人员和高等院校教师参考阅读，也可作为高等院校自动化及其相近专业的研究生教材。

刘晨晖

1992年7月

前 言

经典控制理论和现代控制理论以及由此而产生的一切分析设计方法，都是从受控对象的精确模型出发的；但大多数实际工业过程，往往是多变量的、高阶的、时变的复杂过程，要对这种复杂工业过程建立精确模型是极其困难的，有时甚至是不可能的。即使付出了高昂代价建立了某一时刻条件下的对象精确模型，并依此求出了该时刻相应的最优控制策略，但在下一时刻由于对象结构和参数的时变性，原来求出的最优控制策略已不再具有最优性，有时甚至会起不利的作用。为此人们不得不想方设法冲破传统控制理论的束缚，企图寻找一种对于对象模型要求低、在线计算简易、控制品质优良的新型控制算法。预测控制算法就是这样的一种新型控制算法。

预测控制是70年代末期、80年代初期兴起的一种新型的计算机控制算法，它是基于模型的控制，有异于常规控制方案基于对象的控制。由于预测控制具有对模型要求低、在线计算简易、控制品质优良等显著优点，所以它一问世就极大地缓解了精确建模的困难，显现出了强大的生命力和吸引力，引起了国内外控制理论界专家学者的极大关注。近十余年来，预测控制的发展极其迅速，出现了各种不同的预测控制算法方案，国内外学者发表了许多优秀的理论研究和实际应用成果。

为了把预测控制在近十余年来发展状况加以总结、提炼和升华，以便更好地启迪读者和开创未来，作者撰写了《预测控制及应用》一书，望能起到抛砖引玉、承前启后、继往开来的作用。为了保证本书的系统性，扩大预测控制的内涵，书中引用了国内外学者近期发表的优秀理论和实际应用成果，在此特向这些

优秀学者专家表示衷心的感谢。

武汉水利电力学院刘晨晖教授在百忙中主审了全书，并为本书作序。武汉工学院何文蛟教授、上海交通大学席裕庚教授对本书的出版给予了热情的支持和帮助。在此特向他们致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中缺点和错误在所难免，恳祈各界专家学者和广大读者批评指正。

陈福祥

1992年7月

目 录

| | |
|---------------------------|--------|
| 第一章 预测控制引论..... | (1) |
| § 1.1 概 述 | (1) |
| § 1.2 预测控制的分类及其特点..... | (3) |
| § 1.3 预测控制的基本算法原理..... | (5) |
| § 1.4 预测控制的方法机理..... | (9) |
| § 1.5 预测控制的应用状况及发展方向..... | (11) |
| 第二章 受控对象的数学描述..... | (15) |
| § 2.1 概 述 | (15) |
| § 2.2 状态空间模型及其求解..... | (15) |
| § 2.3 差分算子表达式..... | (21) |
| § 2.4 非参数模型..... | (41) |
| § 2.5 参数节省模型..... | (43) |
| § 2.6 预测控制常用的目标函数..... | (49) |
| 第三章 模型预测启发控制 (MPHC) | (51) |
| § 3.1 概 述..... | (51) |
| § 3.2 MPHC的算法原理..... | (51) |
| § 3.3 性能分析..... | (67) |
| § 3.4 控制系统的实现方案..... | (70) |
| § 3.5 控制的分类和高级控制算法..... | (72) |
| § 3.6 应用实例..... | (74) |
| 第四章 模型算法控制 (MAC) | (87) |
| § 4.1 概 述..... | (87) |
| § 4.2 MAC的算法原理..... | (88) |
| § 4.3 无约束输入和约束输入条件下的 | |

| | |
|-----------------------------|---------|
| 输出预测..... | (94) |
| § 4.4 稳定性分析..... | (97) |
| § 4.5 鲁棒性分析..... | (99) |
| § 4.6 噪声扰动下的预测控制..... | (103) |
| § 4.7 非最小相位系统的MAC..... | (106) |
| § 4.8 矩阵Riccati方程的求解..... | (113) |
| 第五章 动态矩阵控制 (DMC) | (118) |
| § 5.1 概述..... | (118) |
| § 5.2 DMC的算法原理..... | (122) |
| § 5.3 多变量系统的DMC..... | (127) |
| § 5.4 比较性研究..... | (132) |
| 第六章 广义预测控制 (GPC) | (137) |
| § 6.1 概述..... | (137) |
| § 6.2 GPC的算法原理..... | (138) |
| § 6.3 GPC算法的仿真研究..... | (155) |
| § 6.4 有色噪声扰动下的GPC..... | (158) |
| § 6.5 GPC的鲁棒性研究..... | (164) |
| 第七章 推理控制 (IC) | (179) |
| § 7.1 概述..... | (179) |
| § 7.2 推理控制系统的工作原理及设计方法..... | (180) |
| § 7.3 推理控制系统的性能分析..... | (184) |
| § 7.4 推理控制系统的仿真研究..... | (186) |
| § 7.5 推理控制系统的理论研究结果..... | (190) |
| § 7.6 自适应推理控制..... | (191) |
| 第八章 内模控制 (IMC) | (209) |
| § 8.1 概述..... | (209) |
| § 8.2 IMC的算法原理..... | (210) |
| § 8.3 内模结构..... | (214) |
| § 8.4 IMC结构与其他控制结构的关系..... | (223) |

| | | |
|--------|---------------------|---------|
| § 8.5 | 近似逆设计 | (234) |
| § 8.6 | IMC的仿真试验 | (249) |
| 第九章 | 双线性系统预测控制 (BSPC) | (259) |
| § 9.1 | 概 述 | (259) |
| § 9.2 | 双线性系统的数学描述 | (260) |
| § 9.3 | Volterra级数和广义拉氏变换 | (269) |
| § 9.4 | 基于Volterra模型的预测控制 | (272) |
| § 9.5 | 基于输入—输出(I/O)模型的预测控制 | (287) |
| 第十章 | 自校正预测补偿控制 (STPCC) | (293) |
| § 10.1 | 概 述 | (293) |
| § 10.2 | STPCC的算法原理 | (293) |
| § 10.3 | 配料方程及其求解 | (297) |
| § 10.4 | 系统实现 | (299) |
| | 后记 | (303) |
| | 参考文献 | (304) |

第一章 预测控制引论

§ 1.1 概 述

本世纪40年代中期发展起来的以频率法为基础的古典控制理论和60年代初期发展起来的以状态空间法（时域法）为基础的现代控制理论，对于自动化技术的发展起了巨大的推动作用。但这两种理论和基于这两种理论的方法都是建立在已知对象精确模型的基础之上的。众所周知，70年代以来，工业生产过程控制和飞行控制变得越来越复杂，出现了大量多输入多输出高阶时变系统，对象的精确数学模型很难建立，采用经典控制理论和方法根本不能奏效，采用现代控制理论和方法不但辨识和控制所需的庞大计算量难以用较经济的计算设备实现，而且由于对象的结构和参数随时间发生变化，也很难获得持久的控制效果⁽¹⁻⁴⁾。

为了解决上述问题，自70年代以来，人们除了加强对建模、辨识、自适应控制等方面的理论研究以外，并试图冲破传统的理论和方法的束缚，面对实际工业生产过程的特点，寻求对模型要求低、在线计算简易、控制质量优良的控制算法。小型化、大容量、高速度、强功能、低成本的数字计算机的出现和发展，为实现这类控制算法提供了基础条件。预测控制就是在这种形势下发展起来的一类新型的计算机控制算法。

早在60年代，在法国的化学工业生产过程控制中，就萌发了模型算法控制的思想，后来发展成为完善的模型算法控制（MAC）⁽⁶⁻⁹⁾。1978年，J·Richalet在启发式（Heuristic）

的基础上首次完整地提出了模型预测启发控制 (MPHC) (5), 继后, 在80年代初期, 其他科学家们又从工业应用领域、经典自适应理论研究领域、系统结构设计原理研究领域等各个不同的方面, 提出了各种不同的预测控制算法, 例如动态矩阵控制 (DMC) (10—11)、预测控制 (PC) (12)、输出预测算法控制 (OPAC) (13)、输出预测最少拍控制 (OPDBC) (14)、广义预测控制 (GPC) (15)、扩展时域预测自适应控制 (EPSAC) (16)、扩展时域自适应控制 (EHAC) (17)、推理控制 (IC) (18—20)、内模控制 (IMC) (21) 等。这些控制算法虽然表达形式各不相同, 但其基本思路却非常类似, 都是在输出预测的基础上来寻求各种不同的最优预测控制律, 故可把它们统称为预测控制算法。

预测控制算法具有实现简易、对模型要求低、在线计算简便、算法鲁棒性强、控制性能优良等优点, 引起了国内外控制学者的极大关注。值得欣慰的是, 近几年来预测控制在化工、冶金、建材(22)、建筑、电力等生产过程及其他领域都得到了成功的应用, 取得了满意的控制效果。各级控制学术组织也都对预测控制极其重视。从1984年起, 每年举行一次的美 国控制年会 (ACC), 都把预测控制列为专题讨论。第10届IFAC世界大会上, 也专题研讨了预测控制及其应用, 引起了与会者的极大兴趣。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”工作研讨会。1989年11月在我国西安举行的“控制理论及应用”年会上, 预测控制及应用被列为大会的第一个专题, 并组织了研讨, 交流了预测控制方面的学术论文多篇。更为可喜的是, 预测控制的应用论文越来越多地出现在国内外各种著名的刊物上, 特别是在生产过程控制界, 已把预测控制列为当前的重要发展方向(23), 并提出了多层智能预测控制的新概念(24), 即把预测控制与人工智能大系统理论相结合的新型控制方案。可以相信, 预测控制的应用前景是极其广阔的, 它将会在未来的控制应用中发挥更大的作用。

§ 1.2 预测控制的分类及其特点

对象的输出预测是预测控制的关键，而对象的输出预测又必须基于描述对象动态特性的数学模型。因此，采用不同的数学模型可得到不同的预测控制算法。预测控制的种类虽然繁多，但仅就其基础数学模型的不同形式可把预测控制分为以下几类。

1.2.1 基于非参数模型的预测控制

非参数模型主要包括脉冲响应模型和阶跃响应模型。基于非参数模型的预测控制是直接来自工业应用中发展起来的，通常采用脉冲响应模型或阶跃响应模型来描述对象的输出响应，并选用启发式的滚动优化目标函数来求解其最优预测控制律。这样，就可以克服复杂工业过程建模的困难，改善系统的控制性能，提高控制算法的鲁棒性。这类预测控制算法主要有MPHC, MAC, DMC等。

基于非参数模型的预测控制具有如下特点：

(1) 对象描述采用的是非参数模型，且不需要确定对象的阶次和时滞等参数。

(2) 非参数模型易于用实验方法求得，因此基于非参数模型的预测控制在工程上被广泛采用。

(3) 基于非参数模型的预测控制一般只应用于开环渐近稳定且具有非欠阻尼特性的最小相位系统。

(4) 采用非参数模型来描述对象的动态特性时，一般情况下不考虑对象受噪声干扰的情况，也不考虑对象存在不稳定极点的情况，因此基于非参数模型的预测控制在工程应用方面却又存在着一定的局限性。

1.2.2 基于参数节省模型的预测控制

参数节省模型 (Parameter Parsimonious Model) 主要包括

受控自回归滑动平均 (CARMA) 模型和受控自回归积分滑动平均 (CARIMA) 模型。基于参数节省模型的预测控制是从经典自适应控制算法发展起来的。这类预测控制通常采用 CARMA 模型或 CARIMA 模型来描述对象的输出特性, 并以长时段多步优化的目标函数来取代经典最小方差控制中的一步预测优化的目标函数, 从而可改善系统的控制性能和提高系统对模型失配的鲁棒性。这类算法通常与自校正机制结合起来, 对模型进行在线辨识。这类预测控制算法主要有 GPC, EPSAC, EHAC 等。

基于参数节省模型的预测控制具有如下特点:

(1) 对象描述采用的是参数节省模型, 且需要事先确定对象的阶次和时滞等参数。

(2) 基于参数节省模型的预测控制算法通常与自校正机制结合起来, 对模型进行在线辨识。

(3) 基于参数节省模型的预测控制既可适用于开环稳定且具有非欠阻尼特性的最小相位系统, 也可适用于开环不稳定或具有欠阻尼特性的非最小相位系统。

(4) 采用参数节省模型来描述对象的动态特性时, 可以将随机干扰和负载干扰同时考虑进去。

1.2.3 从结构设计出发所产生的预测控制

从结构设计出发所产生的预测控制是预测控制中的一个独特的分支。这类预测控制算法主要有 IC, IMC 等。

IC 和 IMC 具有如下特点:

(1) 控制器的设计往往是把预测控制的估计原理、优化原理与先进的结构设计原理结合起来, 使系统能对外界干扰实现完全的动态补偿和对输入设定实现完全的动态跟踪, 从而可改善系统的控制性能和提高系统的鲁棒性。特别是在 IMC 结构中, 可分别独立地设计控制器以改善系统的动态特性品质, 独立地设计滤波器以提高系统的鲁棒性。

(2) 控制器相当于一个变增益控制器⁽¹⁹⁾，其稳态增益趋于无穷大，因而系统的稳态输出是无差的。

(3) 在IC和IMC中所采用的估计模型，无论其稳态增益或时间常数存在多大的误差，均不影响系统的稳态性能，这就是说，IC和IMC对模型参数的变化具有良好的鲁棒性。

(4) 在自适应推理控制 (AIC) 方案中，可借助于快速测量的辅助输出测量值来估计受控输出的估计值，并在输出估计和参数估计的基础上来设计自适应推理控制器。

(5) IMC结构可以很方便地处理输入约束条件、输出约束条件和状态约束条件，或者对输入量和输出量采用惩罚的办法，以防止任何违反约束条件的现象发生。

1.2.4 其他预测控制

根据不同的应用对象，可以研究出一些针对性强的简易的预测控制算法。例如在双线性系统应用中，有双线性系统预测控制 (BSPC) ^(89—95)，在固态物料配料生产过程控制应用中，有自校正预测补偿控制 (STPCC) ^(96, 97)。

§ 1.3 预测控制的基本算法原理

各种不同的预测控制，虽然其算法原理略有差异，但其基本的内涵要素却有着类似之处。1978年，J. Richalet等人首次完整地提出了模型预测启发控制的三要素：内部模型、参考轨迹和控制算法⁽⁵⁾。人们通常把这三要素称为预测控制的基本算法原理。

1.3.1 内部模型

在基于非参数模型的预测控制中，通常把对象的脉冲响应 (t) 或阶跃响应 $a(t)$ 在一系列采样时刻 j 的值 $\{h_j\}$ 或 $\{a_j\}$ 作为描

述对象动态特性的信息，并以此构成对象的预测模型。如对于渐近稳定的对象，总可以找到一个足够大的正整数 N ，使在 $j \geq N$ 时，有 $h_j \rightarrow 0$ ， $a_j \rightarrow$ 常数，于是可在 $j = N$ 处对这一模型序列进行截断，从而可将有限个信息量 $\{h_j\}$ 或 $\{a_j\}$ ($j = 1, \dots, N$) 存放在数字控制器的内存中，作为对象的预测模型。这种存放于数字控制器内存中的预测模型（能描述对象动态特性的数字量或信息集）称为内部模型。

内部模型的作用在于，根据线性系统的比例尺度原理和线性叠加原理可得到预测模型在未来某一时刻的输出值。例如，由脉冲响应序列 $\{h_j\}$ ，可得到未来 $(t+i)$ 时刻的模型输出值为

$$y_M(k+i) = \sum_{j=1}^N h_j u(k+i-j) \quad i = 1, \dots, P \quad (1.3.1)$$

式中， $y_M(k)$ 为模型输出值， k 为当前考察时刻， i 为预测时域长度， P 为最大预测时域长度， N 为建模时域长度。

由模型(1.3.1)可以看出，这种模型具有直观、简便、易于由实验求得等优点，它对对象的描述与对象本身的阶数、时滞、分布参数等均无关，但这种描述不一定是最小化描述。需要指出的是，虽然这种描述为非最小化描述，但通过这种非最小化描述，反而可赢得信息裕度，这有利于改善系统的控制性能和增强系统的鲁棒性。

1.3.2 参考轨迹

为使控制“柔软化”，应使对象输出 $y(k)$ 沿着一条预先规定的期望轨迹或按某种判据（例如无超调、给定的响应时间等）所确定的轨迹平滑地到达设定值 C 。这种预先规定的期望轨迹或按某种判据所确定的轨迹称为参考轨迹，并记为 $y_r(k)$ 。参考轨迹可以选用高阶曲线，但通常总是选取一阶指数曲线作为参考轨迹，并根据实际输出动态地加以设定。例如，在某一采样时刻

r , 参考轨迹的设置如图1.3.1所示, 它在未来 P 个时刻的期望输出值为

$$\begin{cases} y_r(k+i) = \alpha^i y_r(k+i-1) + (1-\alpha^i)C & (i=1, \dots, P) \\ y_r(k) = y(k) \end{cases} \quad (1.3.2)$$

式中, $\alpha = \exp(-T_s/T_r)$ 称为衰减系数或速度系数, 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 表示输出能很快地到达设定值 C , 当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, 表示输出只能很慢地到达设定值 C . T_s 为采样周期, T_r 为参数轨迹的时间常数. 这样的一阶参考轨迹是很易于理解和易于计算的. 图1.3.1中,

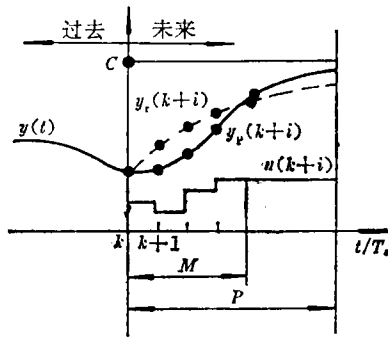


图1.3.1 参考轨迹 $y_r(k+i)$ 与最优控制 $u(k+i)$

$y_p(k+i)$ 为预测输出, $y_r(k+i)$ 为期望输出, $y(t)$ 为过去时刻的对象输出, $u(k+i)$ 为最优控制输入, M 为控制时域长度, P 为最大预测时域长度, i 为预测时域长度。

1.3.3 控制算法

控制算法就是要确定一组 M 个控制变量(或控制增量)

$$U(k) = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+M-1)]^T$$

使在未来 P ($M \leq P \leq N$)时刻的预测输出 $y_p(k+i)$ 与期望输出 $y_r(k+i)$ ($i=1, \dots, P$)的方差为极小(参见图1.3.1), 即