

ZHANGZHONGJUN JIAOSHOU LUNWEN JI (第三卷)  
张钟俊教授

张钟俊

集

上海交通大学出版社

367416

N94

1282

3

N94  
1282

# 张钟俊教授论文集

## 第三卷



上海交通大学出版社

## 内容简介

《张钟俊教授论文集》第三卷收录了主要是1988年以后在国内期刊或杂志上发表的论文40篇。这些论文分别属于预测控制及其机理、非线性系统的预测控制、非线性系统的故障检测与诊断、故障诊断算法应用、线性多变量系统的鲁棒控制、线性多变量系统的状态空间分析和设计、自适应控制及其应用、非线性控制系统理论、机器人和柔性结构控制、人工智能方法的应用等十大类。这些论文是由张钟俊教授与其同行、同事和博士研究生合著的，他们是席裕庚、施颂椒、孙优贤、郑毓蕃、金钟骥、许晓鸣、张炎华、陈新海、蔡自兴、韩正之10位教授，鲍平安、徐冬玲、周东华、胡庭姝、钱大群5位副教授，金雁、孙浩、潘丹杰、陆鼎、刘思行、刘伟、王礼全、高峰等8位博士。这些论文包括国家自然科学基金课题的部分研究成果以及上列几位博士在攻读博士学位其间撰写的部分论文。这本论文集可供同行们及自动控制学科的科研人员及研究生参考。

## (沪)新登字 205 号 张钟俊教授论文集(第三卷)

· 出版：上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 · 200030)

字数：448000

发行：新华书店上海发行所

版次：1993 年 2 月 第 1 版

印刷：上海海峰印刷厂

印次：1993 年 3 月 第 1 次

开本：787×1092(毫米)1/16

印数：1500

印张：19

科目：283-340

ISBN 7-313-01104-0/Z

定 价：12.00 元

## 序

中国控制论科学技术的奠基人之一，中国科学院学部委员张钟俊教授 1915 年出生于浙江嘉善，1934 年毕业于交通大学电机系，同年赴美，进麻省理工学院深造，分别于 1935 年和 1938 年获工学硕士学位和科学博士学位。眷恋着出生和培育他的大地，钟爱祖国和他的人民，他义无反顾地于抗日战争烽火年代的 1939 年回国，曾任武汉大学、中央大学电机系教授，1940 年应交通大学校友之邀，转到交大重庆分校电机系任教，后任电信研究所主任。在控制论科学尚处于萌芽阶段，他在中国科技史上首先于 1948 年在电信研究所开设自动控制理论课程，并开始研究自动控制理论和应用。自那时起，张钟俊教授一直孜孜不倦地奋斗在控制论科学的第一线。本世纪 60 年代以来，控制论科学技术出现了几次大的飞跃，张钟俊教授始终屹立在学科研究的第一线，身先士卒，引导着时代的潮流。

1978 年，中国印来了科学事业的又一个春天。张钟俊教授的研究工作突飞猛进，取得了丰硕的理论成果，对我国的控制论科学、系统科学以及应用科学的发展在方向性和方法论上都提出了许多精辟的建树。为了纪录张钟俊教授的这些成就，上海交通大学出版社分别于 1986 年和 1988 年出版了《张钟俊教授论文集》第一卷和第二卷。1988 年以后，张钟俊教授指导他的研究生和博士后科研人员，在控制论和应用领域又取得了很多新进展。为了使国内外的同行能够全面地了解这些新成就，也为了推动我国的控制论与应用研究进一步深入开展，上海交通大学出版社决定出版《张钟俊教授论文集》第三卷。我衷心赞赏上海交通大学出版社的这一决定，并为张钟俊教授取得的成绩感到由衷的高兴。

《张钟俊教授论文集》第三卷收有他在过程控制、故障检测、鲁棒控制、自适应控制、非线性控制、机器人控制、智能控制、预测控制等 10 个主题下的论文 40 篇，内容广而结论新。论文中有相

当一部分在控制论科学中是首次建立的，具有很高的学术水平。例如：首次对预测控制的机理进行了分析，为预测控制和控制技术的结合开辟了道路；从时域和频域两个角度研究了鲁棒控制问题，对低敏感控制器的设计提出了新方法；给予了非线性系统检测器的镇定设计建立仿射非线性系统的新标准型。关于分布式问题求解是人工智能的前沿分支。《文集》内的各项论述在国际控制论坛上都别开生面。

苏东坡曾惊叹人生之短暂，羡长江之无穷。张钟俊教授已健越七甲，以其古稀之年依然矻矻开拓、辛勤耕耘，成果累累，树世纪风范。这40篇论文是张钟俊教授和他的学生们合作完成的，反映了他在研究方向、选题直到文字的修饰上所花费的心血。张钟俊教授在科学上的开拓精神和一丝不苟的科学作风使他的学生们得益匪浅。在读这本论文集的时候，我们为张钟俊教授所表现的严肃认真的科学风度而敬仰。

今天，《张钟俊教授论文集》第三卷出版了，我国控制论文库又增添了新的瑰宝。我们衷心祝愿张钟俊教授健康长寿，跨越世纪，为控制论科学的发展作出新的贡献。

宋 健

一九九二年五月

# 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 一、线性系统的预测控制                     | 1   |
| 1.一类新型计算机控制算法: 预测控制算法           | 3   |
| 2.预测控制系统的鲁棒性分析                  | 1   |
| 3.预测控制的研究现状和多层智能预测控制            | 14  |
| 二、非线性系统预测控制                     | 21  |
| 1.非线性系统基于 I/O 扩展线性化的预测控制算法      | 23  |
| 2.非线性系统扩展线性化预测控制                | 29  |
| 三、非线性系统的故障检测与诊断                 | 37  |
| 1.故障检测与诊断技术                     | 39  |
| 2.一种同时估计状态及参数的非线性滤波器            | 46  |
| 3.非线性系统参数突变故障的检测与诊断             | 49  |
| 4.一种非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器       | 54  |
| 5.一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器          | 60  |
| 6.非线性系统时变随机系统状态及参数的实时联合估计       | 67  |
| 四、故障诊断算法应用                      | 73  |
| 1.工业机器人故障的实时检测与诊断               | 75  |
| 2.一个通用的有向图故障诊断算法                | 81  |
| 五、线性多变量系统的鲁棒控制                  | 87  |
| 1.结构不确定线性多变量系统鲁棒控制              | 89  |
| 2.结构不确定线性系统的性能与鲁棒综合             | 97  |
| 3.多变量系统的 $H^\infty$ 设计方法        | 104 |
| 4.多变量广义系统 $H^\infty$ 最优敏感性控制器设计 | 111 |
| 六、线性多变量系统的状态空间分析和设计             | 127 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 1.通过传递函数的状态空间实现求 $H^\infty$ -范数 ..... | 129        |
| 2.状态反馈系统的 $H^\infty$ 低敏感性设计 .....     | 133        |
| 3.一类关于鲁棒性和敏感性的泛函的优化 .....             | 140        |
| 4.鲁棒设计: 闭环系统矩阵的 Frobenius 范数最小化 ..... | 144        |
| <b>七、自适应控制及其应用 .....</b>              | <b>151</b> |
| 1.鲁棒自适应控制 .....                       | 153        |
| 2.存在不确定性干扰时间间接自适应控制系统的 BIBO 稳定性 ..... | 160        |
| 3.自适应理论在船舶操纵中的应用 .....                | 165        |
| 4.自校正自适应控制器在非稳定时变系统中的应用 .....         | 173        |
| <b>八、非线性控制系统理论 .....</b>              | <b>181</b> |
| 1.非线性系统的能观性和状态观测器 .....               | 183        |
| 2.非线性系统的反馈镇定与右互质分解 .....              | 192        |
| 3.非线性系统的一种新标准型 .....                  | 197        |
| 4.非线性系统用状态检测器的有界镇定 .....              | 211        |
| 5.非线性控制系统的几乎干扰解耦 .....                | 221        |
| <b>九、机器人、柔性结构和空间站的控制 .....</b>        | <b>227</b> |
| 1.自主车技术 .....                         | 229        |
| 2.一种机械臂非线性鲁棒控制方法 .....                | 236        |
| 3.一种柔性结构的鲁棒自适应控制 .....                | 243        |
| 4.空间站的混合自适应控制 .....                   | 248        |
| <b>十、人工智能方法应用 .....</b>               | <b>255</b> |
| 1.分布式问题求解 .....                       | 257        |
| 2.基于知识的计算机辅助工艺过程设计 .....              | 265        |
| 3.工艺过程设计的分层规划策略 .....                 | 270        |
| 4.合同网的作业车间分布式合作调度策略 .....             | 276        |
| 5.智能控制与智能控制系统 .....                   | 281        |
| 6.专家系统及其在飞船控制中的应用 .....               | 290        |

# 一、线性系统的预测控制



# 一类新型计算机控制算法: 预测控制算法

## 摘 要

建立在预测模型基础上、以快速数字计算机为手段的预测控制算法, 是 70 年代以来工业过程控制中的一类新型算法。本文综述了这类预测控制算法产生的背景、基本原理及其研究的主要问题, 对这类算法的实际应用作出了评价, 并展望了今后的发展方向。

## 一、预测控制算法产生的背景

自 60 年代初期蓬勃发展起来的以状态空间法为基础的现代控制理论, 无疑是卓有成效的, 但这些理论和方法在工业过程控制中的应用却受到了限制, 这是因为工业过程是多输入、多输出的高维复杂系统, 其数学模型往往难以精确建立。采用现代控制的方法, 不但辨识、控制所涉及到的复杂运算难以用较经济的计算设备实现, 而且由于对象结构、参数随时间的变化, 很难获得持久的效果。工业过程控制有其特殊的要求, 对此, 现代的最优控制器往往不如经典的 PID 调节器。因此, 在工业过程控制领域内, 占统治地位的仍是经典的 PID 控制。

为了克服理论与应用之间的不协调, 70 年代以来, 除了加强对建模、辨识、自适应控制等的研究外, 人们开始打破传统方法的束缚, 试图面对工业过程的特点, 寻找各种对模型要求低、在线计算方便、控制综合质量好的算法。数字计算机向小型化、高速度、大容量、低成本方向发展, 则为这类算法的实现提供了物质基础。预测控制算法就是在这种情况下发展起来的一类新型计算机控制算法。

预测控制算法不是某一种统一理论的产物, 而是在启发式 (Heuristic) 的基础上, 从不同的方面 (首先是工业领域) 独立发展起来的算法, 例如模型预测启发控制 (MPHC)、模型算法控制 (MAC)、动态矩阵控制 (DMC)、预测控制 (PC)、外推数字控制 (EDC)、内模控制 (IMC)、输出预测算法控制 (OPAC)、输出预测最少拍控制 (OPDEC)。这些算法的表述形式及控制方案各不相同, 但基本思想非常类似, 所以都称为预测控制算法。

## 二、预测控制算法原理

预测控制是一类基于对象非参数模型 (例如脉冲响应或阶跃响应) 的计算机控制算法, 适用于线性 (或近似线性) 的渐近稳定对象。1978 年, J.Richalet 等首先提出了模型

---

国家自然科学基金资助课题。

预测启发控制的三要素：内部模型、参考轨迹和控制算法，它们通常被认为是这类预测控制的基本原理。

### 1. 内部模型

预测控制把对象的脉冲响应  $h(t)$  或阶跃响应  $a(t)$  在采样时刻的值  $h_i$  或  $a_i$  作为描述对象动态的信息构成预测模型。对于渐近稳定对象，因为  $h_i \rightarrow 0$ ,  $a_i \rightarrow \text{常数}$  ( $i \geq N$ )，这一模型参数系列可在  $i = N$  处截断。这样，预测模型可以通过有限的信息量  $\{h_i\}$  或  $\{a_i\}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 存放在数字控制器的内存中，故称为“内部模型”。

预测模型的作用在于，根据线性系统的比例和叠加性质，预测系统在未来某一时刻的输出，例如由脉冲响应系列  $\{h_i\}$ ，可得模型输出

$$y_M(k+i) = \sum_{j=1}^N h_j \cdot u(k+i-j) \quad i=1,2,\dots$$

显然，这里采用的模型概念有直接、方便的优点。这样得到的系统描述与其本身的结构（阶数、滞后、分布参数等等）无关，不一定是最小化的，但通过非最小化描述，反而赢得了信息余度，有利于改善控制系统的鲁棒性。

### 2. 参考轨迹

为了使控制“软化”，对象输出  $y(t)$  应沿着一条期望的参考轨迹到达设定值  $c$ ，它通常取为一阶指数形式，且根据实际输出动态地设定。在某一采样时刻  $t = kT$ ，参考轨迹的设置如图 1 所示，它在未来  $P$  个时刻的值为：

$$y_r(k+i) = a^i y(k) + (1-a^i)c \quad i=1,\dots,P$$

其中  $a = \exp(-T/\tau)$ ,  $T$  为采样周期， $\tau$  为参考轨迹的时间常数。这样的一阶参考轨迹是很易于理解和计算的。

由于提出问题的理论背景不同，有人在反馈通道中引入了滤波器，并构成了状态观测器，它们在一定条件下可导致与参考轨迹一致的结果，但在设计上更为一般。

### 3. 控制算法

控制算法是要确定一组  $M$  个控制量（或增量） $u(k) = [u(k) \ u(k+1) \ \dots \ u(k+M-1)]^T$ ，使在未来  $P$  ( $M \leq P \leq N$ ) 个时刻的预测输出与期望输出（参考轨迹）的误差最小化（参见图 1）

$$\min_u J = \min_u \sum_{i=1}^P [y_p(k+i) - y_r(k+i)]^2$$

为了求解这一优化问题，首先要预测系统的未来输出  $y_p(k+i)$ ，它可由模型输出  $y_M(k+i)$  经过偏差校正求得

$$y_p(k+i) = y_M(k+i) + e(k) = y_M(k+i) + [y(k) - y_M(k)], \quad i=1,\dots,P$$

由于参考轨迹  $y_r(k+i)$  已经确定，故可由此求出未来的控制量  $u$ ，而为了及时地纠正因非线性、时变参数等引起的模型误差，在线实施时，一般只取即时控制量为

$$u(k) = d^T \cdot [y_r(k) - y_{p0}(k)]$$

式中： $d^T$  是只取决于模型参数  $h_i$  及时域参数  $M$ 、 $P$  的常矢量，可事先离线算

出,  $y_r(k)$ 、 $y_{p0}(k)$  的分量分别表示未来时刻的期望输出及根据过去输入预测并经校正的输出值。由此可见, 控制量的在线计算只是两矢量的点积。在每一时刻将重复上述预测——计算步骤, 图 2 是这类算法的原理框图。

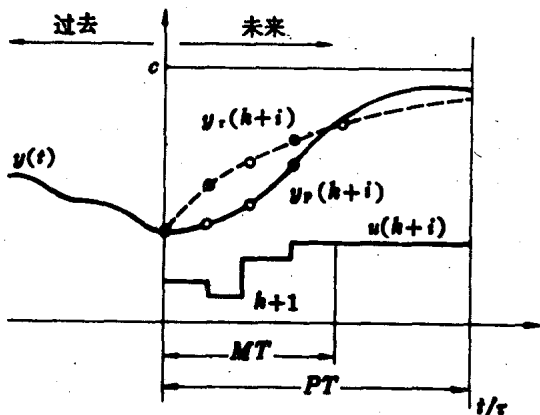


图 1 参考轨迹与最优化策略

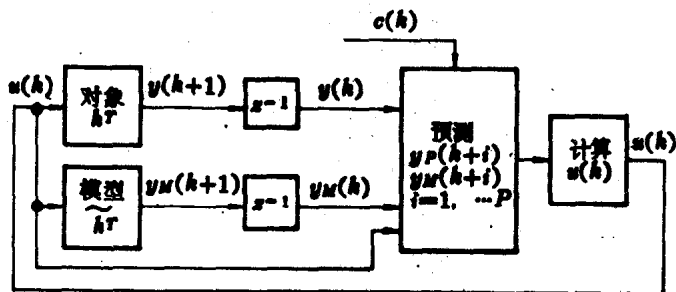


图 2 预测控制算法原理框图

### 三、预测控制的一些主要问题

#### 1. 关于方法的理论基础的探讨

自从 Richalet 等提出了预测控制的三要素后, 对预测控制的理论背景近年来又从不同角度提出了新的看法。

Garcia 等从控制结构出发, 提出了内模控制原理, 其结构形式如图 3 所示。整个控制设计的任务是: 根据模型精确时的期望动态响应设计控制器  $G_c(z)$ , 根据模型失配时的鲁棒性要求设计滤波器  $F(z)$ 。他们详尽地讨论了用预测控制策略设计控制器  $G_c(z)$  的问题, 并把预测控制归结为内模控制的特例, 但对滤波器  $F(z)$  的设计缺乏深入的讨论。

本文作者则从时域出发, 把系统的阶跃响应应用状态方程的形式在“预测空间”近似实现, 并根据这一描述的状态可观性, 沿用控制理论中带有观测器的状态反馈策略, 导出了反馈控制律。这一结果可将动态矩阵控制 (DMC) 算法包括在内。由于引入了观测器, 在设计中增加了改善系统鲁棒性及抑制特定扰动的可能性。

#### 2. 控制算法的稳定性与鲁棒性研究

预测控制算法的稳定性取决于对象特性及设计参数的选择。在这方面较有实际意义的研究工作, 一是对某些普遍使用的特殊情况进行分析, 二是在一般情况下定性分析设计参数对稳定性的影响。

Richalet 等针对一步预测算法证明了对象为最小相位时算法的收敛性。Mehra 等进一

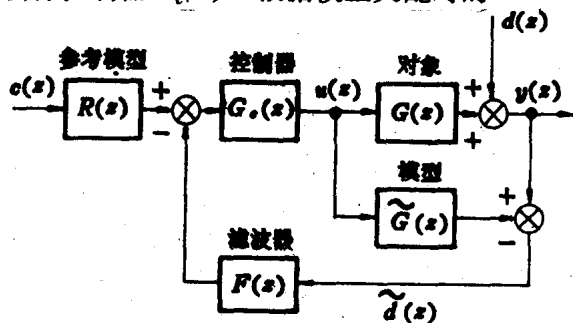


图 3 内模控制

步从闭环系统的  $Z$  传递函数出发, 证明了: 只要模型准确且对象的  $Z$  传递函数无单位圆外零点, 即使控制量受到饱和限制, 也可保证闭环系统稳定。对于有非最小相位特性的对象, Mehra 和 Rouhani 指出了一步预测算法实际上是不稳定的, 这时虽然有理论上收敛的输出系列, 但控制系列发散。在模型失配的情况下, Mehra 等引入了关于鲁棒性的若干定量测度, 并讨论了在有比例形式的模型误差时, 一步预测算法的鲁棒性与参考轨迹参数  $\alpha$  的关系。

Jarcia 等和本文作者立足于一般的优化指标, 不局限于一步预测, 分析了时域长度、权矩阵等设计参数对系统稳定性的定性影响, 从而为在线整定设计参数提供了依据。在模型失配的情况下, 席裕庚在他的博士论文中从时域和频域进行了鲁棒性分析, 定量研究了典型一、二阶对象的稳定性和鲁棒性, 讨论了模型以比例或其他形式失配时的参数稳定域范围。

### 3. 控制策略的多样性

预测控制算法是启发式的, 如果考虑一般优化指标

$$J = \sum_{i=1}^P q_i [y_p(k+i) - y_r(k+i)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j u^2(k+j-1)$$

它所涉及的设计参数要比 PID 控制多, 设计的灵活性也大。

最简便的预测控制算法是一步预测, 但它不能用于有纯滞后或非最小相位特性的对象。为此, Mehra 等提出了对非最小相位系统的修改算法, 其中选择了一个与对象不一致且满足整体输出误差最小的预测模型, 保证了闭环稳定性。Åström 对具有单调阶跃响应的稳定系统导出了一类简易的鲁棒控制器, 并指出这是模型算法控制的特例。所导出的控制律总可保证闭环系统稳定, 而与实际对象动态特性的细节无关。Leonhard 从对象阶跃响应出发导出一步预测增量算法, 其独特之处在于用多项式外推方法来推算预测误差。

采用多步预测的算法也是形式多样的。Bruijn 等利用脉冲响应进行预测控制, 选择了与优化时域相同的控制时域, 并在品质指标中考虑了控制能量。Reid 等在同一基础上进一步考虑采样点间若干点的输出误差最小化, 以保证输出光滑。由于增加的数据信息可分块事先离线算出, 在线的运算仍是简单的。为了用这一算法处理非最小相位系统, Reid 等指出: 优化时域必须超过阶跃响应中因非最小相位引起的反向部分, 并对这部分在优化指标中加很小的权。Cutler 等介绍的动态矩阵控制, 立足于取一个足够长的优化时域, 然后适当改变控制时域的长度以获得满意的控制效果。席裕庚在他的博士论文中, 从不同的理论背景出发, 推广了这一算法, 提出了“预测状态”的观测及反馈的概念, 这一方法可直接用于有纯滞后或非最小相位性质的系统。

### 4. 预测控制的应用研究

在工业过程中, 涉及的对象绝大多数是多变量系统。预测控制所用的建模方法, 使它可根据单个输出对单个输入的响应对多变量系统直接建模。在控制器设计中, 除了计算量相应增大外, 在方法上没有原则上的困难。Richalet 等介绍了三个用模型预测启发控制的多变量系统, 其控制效果明显地优于模拟 PID 调节。Mereau 和 Mehra 等还用同样的方法解决了 F-100 发动机的多变量控制问题。Cutler 等则导出了用动态矩阵法处理多变量系统的算法形式。

预测控制算法的性质,使其可预测到各种实际约束条件是否被破坏。在遇到静态约束时,能及时采取措施改变控制量以保证约束条件得到满足。在遇到时变约束时, Prett 等通过矩阵分裂方法将在线求逆的矩阵维数降到最低,即等于时变约束的数目,使在线处理时变约束成为可能。

鉴于预测控制有较好的跟踪响应, Richalet 等提出了在实际过程中采用串接控制的方案,见图 4。其中内回路用常规 PID 调节器,目的在于使内回路稳定并抑制各种扰动,而外回路则采用预测控制,以便较好地跟踪设定值的变化。这是一种很有吸引力的控制结构。

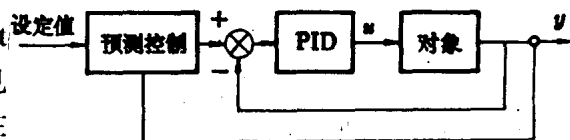


图 4 预测控制与 PID 控制的串接

为了将预测控制算法用于实际过程, Richalet, Mereau, Mehra 和 Foigel 等还介绍了将在线辨识与控制结合在一起的软件系统 IDCOM (Identification-Command)。这一软件具有自适应性质,已被用于化工、发电等多方面的实际控制系统。

由于预测控制的在线整定缺乏象 PID 调节那样的经验,因此 Garcia, Reid 及本文作者分析了设计参数对系统稳定性及动态的影响,给出了整定的方向。作者还对典型系统作了定量分析,提供了阶跃响应与此相似的一类系统直接设计的可能性。

#### 四、预测控制算法的评价及发展的方向

预测控制算法自 70 年代中期形成以来,已得到了广泛的应用。它主要用于有必要建立系统模型、但建模过程十分繁复的复杂对象。这类对象通常有大量的内部关联,有非线性特性及非静态特性,存在着对控制量或中间变量的各种约束,其参数甚至结构都可能随着时间发生变化。这样的对象特别在工业过程中是经常遇到的。目前发表的预测控制应用实例,已涉及到从飞行控制、发电系统控制到化工、石油、玻璃等工业过程控制的广阔领域。

预测控制的主要支柱,是在方法上采用预测模型,在技术上采用快速数字计算机。从信息的观点看,这种控制所用的预测模型,是存储在控制器中描绘对象的信息集合,它含有系统动态的主要特征,即使不作进一步的提炼,也足以完成控制的任务。

预测控制算法产生的直接原因是为了简化建模过程。这在复杂的工业系统中意义十分重大,这也是预测控制最突出的优点之一,特别在过程控制中,对象复杂,参数及环境经常变化,最小化模型的辨识十分困难,建立在精确模型基础上的最优控制失去了原有的意义,如果采用易于辨识的直接模型化方法,可以节省辨识的代价,同时又不会对控制质量带来很大影响。此外,用预测控制算法处理多变量系统,机理简单,能及时地考虑约束问题,有较好的跟踪质量,并通过适当的参数选择可获得鲁棒控制。这类方法的在线运算都是较简单的非矩阵运算,可以用微型或小型计算机实现。这些都是预测控制算法的优点。

但是,由于简化了建模过程,采用非最小化模型也带来了一些问题。首先,把脉冲响应或阶跃响应作为对象动态的信息储存起来,要求预测模型有较高的维数,在线计算时预测的工作量比用递归模型大,特别对复杂的多变量系统更为突出;其次,由于模型信息的储存是有限的,脉冲响应或阶跃响应总要在某一时刻截断,故方法本身存在着固有的模型误差;最后,由于模型的非最小化性质,使其可控性受到影响,给控制器的解析设计带来

了困难。

随着微型计算机速度的提高、容量的增大,预测控制算法一定会在工业过程控制中得到更广泛的应用。但这还有待于解决如下几方面的问题。

1. 需在理论上进一步研究的有:

(1) 模型信息的合理选择: 即如何合理采样以得到最能反映对象动态特性、信息量适度的高质量的预测模型。

(2) 模型失配与设计参数的关系: 即如何选择参考轨迹或观测器反馈等, 以保证闭环系统在模型有已知最大失配时仍保持稳定。

2. 进一步探索控制质量与设计参数的关系, 开发从采样、建模到在线控制的软件包, 供工业过程控制实时使用, 其中包括:

(1) 对预测控制算法模型截断时刻及截断策略的研究;

(2) 对状态量、控制量及其他中间量的静态约束或时变约束的在线考虑;

(3) 将辨识与控制相结合、在线修正预测模型的自适应方法;

(4) 为满足控制系统快速性、抗扰性及鲁棒性的要求, 在线改变控制器参数的策略。

3. 探索多种结构的预测控制算法, 包括多变量系统、多级预测控制、预测控制与常规 PID 控制的串接等, 研究其优、缺点, 提供实际有效的高质量的控制结构。

4. 采用同样的控制机理, 推广到脉冲响应、阶跃响应以外的预测模型 (包括非线性模型、随机模型), 研究在更广泛领域内使用预测控制的可能性和有效算法。

计算机技术的进展, 为预测控制算法提供了实现的可能性。可以预料, 随着计算机硬件、软件的进一步发展, 在工业控制中, 会出现更多的新型控制算法。预测控制在其三要素的基础上, 也会进一步得到改进与发展, 使之更普遍地得到应用并获得更高的控制质量。

(转录自《控制理论与应用》, 1985 年第 2 卷, 第 3 期

合著者: 席裕庚)

# 预测控制系统的鲁棒性分析

## 摘 要

预测控制的强鲁棒性已在过程控制领域中引起了广泛的注意。本文在对鲁棒性作出定义后,用定量分析的方法说明,预测控制在出现模型失配时鲁棒性优于传统最优控制的主要原因,是由于它增加了对未知模型失配进行预测的功能。

## 一、引 言

从 70 年代中期起,一类新型的高级过程控制算法——预测控制在工业中获得了成功的应用。这种成功首先应归功于预测控制的强鲁棒性。然而对于产生鲁棒性的机理,至今尚未从理论上得到分析。本文希望通过定量分析的方法,揭示预测控制鲁棒的原因。为此,首先给出鲁棒性的定义。

**定义 1.1** 所谓控制系统的鲁棒性,是指系统在其数学模型与实际过程出现失配时,使系统性能保持在允许范围内的能力。

按照上述定义,不同的控制性能(如稳定性,最优性等)都有自己相应的鲁棒性。尽管目前鲁棒控制器的设计方法很多。但所采用的基本思想,大多为将控制系统的性能指标设定在允许范围的不敏感区域或几何中心。这样当模型失配时,性能指标就不容易超出允许范围。从本质上说,这是以性能指标的降低来换取鲁棒性的设计方法。

从定义 1.1 可知,模型失配是使系统性能指标发生漂移的主要原因。当然,实际系统中的模型失配是无法预知的,但是通过历史数据对其进行预测,就有可能获得模型失配的近似信息。从最优控制理论可知,当性能指标最优时,它一定落在允许范围内。预测控制的有限时域滚动优化技术,保证了预测具有一定的精度,从而使控制系统的性能指标落在最优点的附近,达到了改善鲁棒性的目的。

本文将对预测控制在最优性和稳定性两方面的鲁棒性,与最优控制作一个比较。

## 二、预测控制的状态空间表达式

预测控制的基本特征,主要有以下几个方面:

### (1) 闭环预测

$$y_p(k+i|k) = y_m(k+i) + q(k+i|k) \quad (1)$$

国家自然科学基金资助课题。

(2) 柔化作用

$$y_r(k+i|k) = c(k+i) + v(k+i|k) \quad (2)$$

(3) 滚动指标

$$J(k) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{HP} \| y_p(k+i|k) - y_r(k+i|k) \|_{Q(i)}^2 + \sum_{j=0}^{HM-1} \| u(k+j) \|_{R(j)}^2 \right\} \quad (3)$$

式中:  $y_p(k+i|k)$  是在  $k$  时刻对  $k+i$  时刻输出所作的预测值;  $y_m(k+i)$  是基于模型的预测值;  $q(k+i|k)$  是闭环校正值;  $c(k+i)$  是  $k+i$  时刻的输出理想值;  $v(k+i|k)$  是  $k$  时刻对  $c(k+i)$  的柔化项;  $y_r(k+i|k)$  是期望值;  $Q(i)$ 、 $R(j)$  是正定权矩阵;  $u(k+j)$  是  $k+j$  时刻的控制输入;  $HP$  称为预测时域;  $HM$  称为控制时域。

为了便于将预测控制和最优控制进行比较, 并考虑在分析时突出主要矛盾, 本文特作以下几点假设:

- (1) 采用离散状态空间模型, 并以状态量  $x(k)$  作为输出;
- (2) 在指标式 (3) 中, 令  $Q(i) = Q$ ,  $i = 1, \dots, HP$ ;  $R(j) = R$ ,  $j = 0, \dots, HM-1$ ;
- (3) 期望轨迹  $x_r(k+i|k) = 0$ ,  $\forall i, k > 0$ ;
- (4)  $HP = HM$ , 即预测时域与控制时域一致。

这时, 我们得到  $k$  时刻的预测模型和滚动时域优化指标分别为

$$x_p(k+i|k) = Ax_p(k+i-1|k) + Bu(k+i-1) + q(k+i|k) \quad (4)$$

$$J(k) = \frac{1}{2} \left\{ \| x_p(k+HP|k) \|_Q^2 + \sum_{i=0}^{HP-1} [\| x_p(k+i|k) \|_Q^2 + \| u(k+i) \|_R^2] \right\} \quad (5)$$

其中,  $q(k+i|k)$  是  $k$  时刻对  $q(k+i)$  所作的预测,  $x_p(k|k) = x(k)$ 。在模型式 (4) 基础上对式 (5) 进行优化, 并取使  $J(k)$  极小化的  $\{u(k), \dots, u(k+HP-1)\}$  中的第一项为实际作用在系统上的控制量, 可求得预测控制律为

$$u_p(k) = -[R + B^T P(1)B]^{-1} B^T [P(1)Ax(k) + \tilde{v}(k+1)] \quad (6)$$

其中,  $P(i)$  满足下列 Riccati 方程

$$P(i) = Q + A^T [P^{-1}(i+1) + BR^{-1}B^T]^{-1} A, \quad P(HP) = Q \quad (7)$$

$$\tilde{v}(k+1) = P(1)q(k+1|k) + \sum_{j=2}^{HP} \left\{ \prod_{l=2}^j A^T [I + P(l)BR^{-1}B^T]^{-1} \right\} \cdot P(j)q(k+j|k) \quad (8)$$

式 (6) 中的  $u_p(k)$  就是预测控制的状态空间表达式。

### 三、对应于最优性的鲁棒性分析

假定实际系统由方程

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + q(k+1) \quad (9)$$

来加以描述,  $q(k+1)$  是在实际系统的数学模型

$$x_m(k+1) = Ax_m(k) + Bu(k) \quad (10)$$

中未加考虑的失配项。上述系统 (9) 的性能指标, 通常采用二次型函数