

研究生教学用书

# 预测控制

► 钱积新 赵均 徐祖华 编著



化学工业出版社

TP273/457

2007

研究生教学用书

# 预 测 控 制

钱积新 赵 均 徐祖华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

预测控制由于其能够处理约束及其对模型形式要求比较宽松,因而在生产过程控制中得到了广泛应用。采用阶跃(脉冲)响应作为内部模型,在算法实现上比较直观与方便,所以在应用中大多采用这种模型形式。然而由于它并非最小实现,这给从理论上研究系统的稳定性、鲁棒性等带来困难。状态方程表述的模型为理论研究提供了非常方便的形式。更为重要的是,在这种模型形式之下,将预测控制的研究纳入到业已成熟的现代控制理论中线性系统的范畴,因而有大量的研究成果可供借鉴与应用,这给预测控制理论研究提供了一个良好的平台。然而由于生产过程中系统状态的不可测,给这种形式的控制算法实际应用带来极大困难。本书的特点之一就是对这两类模型及其控制算法都作了介绍,并重点介绍具有约束的多变量预测控制算法。本书的另一特点是对工业模型预测控制(MPC)算法及其商品软件进行了评述,并就相关算法进行了介绍。这种能处理非方系统且能够对控制目标按优先级进行排序的工业 MPC 算法是目前国际上通行的 MPC 软件的核心。相信这部分内容对应用工作者在理解及现场调试 MPC 系统时会有帮助。书中还介绍了作者十多年来在从事 MPC 现场成功应用的典型实例,并提供了自行研制的具有自主知识产权的工业 MPC 通用软件的算法框架。

本书可作为高等学校自动化类等专业的研究生教材以及本科高年级学生的教学参考书,也可供相关工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

预测控制/钱积新,赵均,徐祖华编著. —北京:化学工业出版社,2007.9  
研究生教学用书  
ISBN 978-7-5025-9594-4

I. 预… II. ①钱…②赵…③徐… III. 预测控制-研究生-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 130871 号

---

责任编辑:唐旭华  
责任校对:周梦华

文字编辑:吴开亮  
装帧设计:张辉

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印刷:北京云浩印刷有限责任公司  
装订:三河市延风装订厂  
787mm×1092mm 1/16 印张14 字数341千字 2007年9月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

# 序

预测控制是 20 世纪 70 年代在工业过程控制领域中出现的一类新型计算机控制算法。作为先进过程控制的典型代表，它的出现对复杂工业过程的优化控制产生了深刻影响，在全球炼油、化工等行业数千个复杂装置中的成功应用以及由此取得的巨大经济效益，使之成为工业过程控制领域中最受青睐的先进控制算法。不仅如此，由于预测控制算法具有在不确定环境下进行优化控制的共性机理，使其应用也早已跨越了工业过程，而延伸到航空、机电、环境、交通、网络等众多应用领域。预测控制的理论研究在早期曾被认为严重落后于实践，但在 20 世纪 90 年代以来也有了长足的进展，以预测控制与传统最优控制的联系为基础，预测控制的稳定性、鲁棒性设计形成了系统方法，呈现出理论的深刻性和方法的创新性。作为一个新的学科分支，预测控制无论在理论或应用方面都充满着活力和生机。

在我国，预测控制的研究和应用始终得到了学术界和工业界的广泛关注，特别是预测控制在海外工业过程中的成功应用，极大地鼓舞着我国过程控制界加快掌握和应用这种先进控制技术，以提高我国工业的现代化水平。从 20 世纪 90 年代以来，在国家科技攻关计划的支持下，国内不少单位研发了具有自主知识产权的预测控制软件，成功地应用在各种工业过程中，并在应用中取得了丰富的经验。然而，目前预测控制在我国的应用深度和广度与国外相比仍有较大差距，因此，进一步普及预测控制技术、特别是推广预测控制工业应用的经验，是推动预测控制在我国各行各业应用的当务之急。

钱积新教授长期以来从事预测控制的研究和应用，他在积多年研究体会和应用经验基础上编著的《预测控制》一书，正适应了上述需要。该书既介绍了预测控制的基本原理和算法，又从理论和应用两方面介绍了近年来预测控制的新发展，特别是关于预测控制工业应用软件和工程实施方法以及应用案例的介绍，是同类著作中很少见到的，也渗透着作者对预测控制深刻的理解和丰富的实践经验。该书的三个部分都写得很有特色，体现了普及和提高的结合。在预测控制的基本原理和算法方面，作者用工业界熟悉的语言深入浅出地介绍了预测控制的基本算法，除了提供必要的基础知识外，作者还针对工业过程的特点，强调了非方系统、扰动模型等内容，并介绍了相关的 MATLAB 工具以及约束优化的二次规划算法，这将有助于读者学习、理解和掌握预测控制算法。在理论方面，作者重点介绍了 20 世纪 90 年代以来预测控制稳定性和鲁棒性分析的典型重要成果，所选择的内容既能为进一步开展预测控制的理论研究提供基本的思路，又不至于过于深入而难以为大多数读者所理解。作为该书重点的预测控制工业应用方面，作者不仅如前所述给出了工业实施的细节指导并以丰富的应用案例加以说明，而且根据文献和资料对预测控制工业应用技术的全面情况进行了介绍，使读者能从宏观上把握预测控制在实际工业过程中的应用要点和构架。这三部分内容之间相互联系，但又有各自的侧重点并自成体系，从而使不同的读者可以根据需要熟悉相关的内容。此外，该书的例题和习题相当丰富，也很适合作为教材使用。

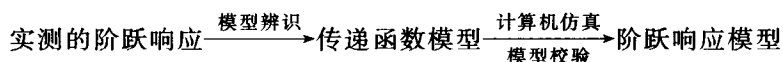
《预测控制》一书的出版，必将以其面向应用的特色，进一步推动预测控制技术在我国的工业领域的应用，使这一先进控制技术更广泛地在我国各行各业发挥作用，为提高我国工业自动化水平做出贡献。

席裕庚

2007 年 7 月于上海交通大学

# 前 言

预测控制是 20 世纪 70 年代后期提出的一类新型计算机控制算法。它是一种属于基于模型预测的启发式控制算法，采用的是输入/输出的非参数形式的阶跃响应及脉冲响应模型作为预测模型。由于这类模型强调的是因果关系，加之在工业过程中用测试方法比较容易得到，而且这种模型不要求对模型结构有先验知识（例如对于线性形式的参数模型中的模型阶次及纯滞后值等），所以受到了广大应用工作者的欢迎。它首先在炼油工业中得到成功应用，进入八九十年代以后，预测控制取得了越来越多的成功应用，应用领域也从炼油扩展到石油化工、造纸、冶金等行业，由此引起了理论工作者的高度关注。为了要对预测控制系统有一个本质的、更高层次的了解与把握，就必须研究这样的系统的稳定性与鲁棒性。用脉冲或阶跃响应作为预测的模型，由于其不是最小实现的，因而研究系统稳定性、鲁棒性在形式上就较为复杂。由于在测试时信号中混有严重的工业噪声，直接将阶跃响应、脉冲响应作为预测模型是不现实的（见第 2 章）。很长一段时间以来，工业界往往经由这样的步骤来得到阶跃（脉冲）响应模型：



这样得到的模型可以大大地削弱工业噪声对模型（阶跃响应）的影响。这种方法已成为工业界的惯用做法并已在商品工程软件中实施。人们自然会想到，既然已得到了参数模型（传递函数），将传递函数转换成状态空间模型应该还是比较方便的。要知道，描述多变量系统的参数模型中最方便也是最直接的是状态空间模型。这种模型为研究预测控制系统的稳定性和鲁棒性提供了一个十分理想的平台。然而，基于状态空间模型的预测控制在工程应用中最头疼的一个问题是状态不可测，由于工业噪声是非白色的有色噪声，卡尔曼滤波器不可能达到无偏甚至算法无法收敛。另外，多变量系统的状态方程模型在处理工业中常见的纯滞后是缺乏系统的方法。所以在工业实践中，包括绝大多数预测控制商品软件包还是基于输入-输出模型。针对这种实际情况，本书分别介绍基于输入-输出模型（阶跃响应）的预测控制（第 3 章）及基于状态空间模型的预测控制算法（第 5 章）。

本书另一个特点是，从工程应用讲处理非方系统是一个必须面对的问题。在书中理论部分介绍的都是处理方系统的。对于非方系统的处理，本书是结合商品工程软件来展开的。这部分内容在以往的著作中较少见到（它们散见于学术杂志上的论文）。还要强调的一点是，作为预测控制的最大优点是能处理约束。应该说，能处理约束的性能来源于采用了有限时域的滚动计算的思想。而这种有限时域滚动计算的思想，线性二次型最优控制问题中已经提出过。

预测控制，或基于模型的预测控制（“MPC”或“MBPC”）是非常先进的控制技术——也就是说它比 PID 控制更先进——在工业过程控制中已经有重要和广泛的影响，其主要原因如下。

① 它是目前最好的通用的控制技术，可以方便地处理设备及安全约束。为了最有力地或最有效地工作，在很多情况下，装置达到或者接近于这样的约束边界是必须的，因为生产过程的最优工况往往位于约束边界上。

② 它的基本思想很容易懂。

③ 它的基本公式扩展到多变量的时候几乎不用做什么修改，甚至扩展到非线性系统，在算法上也不存在太大困难。

④ 对于单回路没有约束的系统，它比 PID 控制更强有力，对“困难”的回路，例如包含大纯滞后及非最小相位系统，调整起来不会有太大困难。

在 20 世纪八九十年代预测控制方法大量应用于工业过程之后，吸引了大量控制领域的理论研究工作团队的认真关注，从现在来看，当时这些团队往往忽略了预测控制处理约束的能力，也就是遗漏了它的主要优点。实际上当约束被忽略时，预测控制就等价于常规的控制，即通常的线性二次型最优控制系统，因而看起来没有任何新意，这是确实的。另外，理论或算法研究中还遗漏了重要的一点，例如可调整性 (tunability) 和可预测性 (understandability)，这些性能对于一种控制技术被工业界认可可是至关重要的，至少在过程控制中是这样的。幸而理论研究的学术团队在好多年前就已认识到预测控制在存在约束时，对控制而言确实提供了一些新的东西，也提供了更多的分析和思想。这已到达了这样一种程度，即已超出了当前工业实践的范围，并且正酝酿着预测控制更广阔的应用场合——潜在的，几乎是所有的控制问题。在计算机的计算速度和能力持续增加的年代一定使得预测控制有着更加美好的前景。

本书的内容特别是第 4~6 章涉及到线性系统理论、辨识与滤波、某些数值计算方法(如奇异值分解、线性矩阵不等式)、最优化算法等。

MATLAB 是国际控制界公认的分析与设计线性系统的标准计算软件，它可以辅助掌握理论知识的本质，大大增强使用者对系统的实际体验。因此，读者应该具备使用 MATLAB 的能力。书中在推导理论结果时利用了为数不多的 MATLAB 的一些算子来表达数值分析的结果，如“\”、“:”、函数“chol”等，它们分别表示在最小二乘意义下利用 QR 分解算法的解、取出矩阵前若干行的操作、奇异值分解计算结果等。如果是不掌握 MATLAB 的读者，可以认为这些算子只是调用一种算法得到的结果而不管是如何得来的，这样也无妨阅读本书的内容。书中用到了 Control System Toolbox、Model Predictive Control Toolbox、Optimization Toolbox 等几种工具箱。

本书内容由三部分组成：基于阶跃(脉冲)响应的预测控制算法(第 1~4 章)；基于状态空间模型的预测控制算法(第 5、6 章)；工业多变量预测控制技术及应用(第 7、8 章)。阅读本书时，自动化应用工作者可跳过第 4~6 章，应该说从内容衔接上不会产生困难；而作为研究生，应将重点放在第 4~6 章及第 7、8 章。

撰写本书的目的是介绍近十多年来在预测控制理论、算法及工业应用中的一些进展，并给出了某些研究和应用的未来方向。同时介绍作者十多年来在教学、工业应用及通用工程软件编制等方面的研究成果，试图以此来进一步推动预测控制在我国的研究和应用，并对我国国民经济的发展和工业自动化水平的提高起到积极的作用。本书第 1、2、3、4、5、7 章由钱积新执笔，第 6 章由徐祖华执笔，第 8 章由赵均执笔。全书经席裕庚审阅，在全书的大框架及各部分相互关系方面提出了许多宝贵意见，对全书的系统性及可读性的增色起到了很大作用，在此表示衷心的感谢，作者还向为本书编排过程中进行了大量卓有成效工作的周立芳表示感谢。

由于作者水平有限，书中不尽如人意之处，衷心希望广大读者提出宝贵意见。

钱积新

2007 年 5 月于浙江大学

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 引言</b> .....             | 1  |
| 1.1 预测控制的特点 .....                 | 1  |
| 1.2 早期历史和术语 .....                 | 3  |
| 1.3 在递阶控制体系中的预测控制 .....           | 5  |
| 习题 .....                          | 6  |
| <b>第 2 章 预测控制的基本原理</b> .....      | 7  |
| 2.1 预测模型 .....                    | 7  |
| 2.2 有限时域滚动计算的思想 .....             | 7  |
| 2.3 计算最优输入 .....                  | 9  |
| 2.4 反馈与预测校正 .....                 | 13 |
| 2.5 不稳定的装置 .....                  | 14 |
| 2.6 澄清一些误解 .....                  | 15 |
| 习题 .....                          | 16 |
| <b>第 3 章 预测控制中的模型与预测</b> .....    | 17 |
| 3.1 阶跃响应与脉冲响应模型 .....             | 18 |
| 3.1.1 单输入、单输出装置的阶跃响应预测模型 .....    | 18 |
| 3.1.2 多输入、多输出装置的阶跃与脉冲响应预测模型 ..... | 18 |
| 3.2 传递函数模型 .....                  | 22 |
| 3.2.1 传递函数模型表述 .....              | 22 |
| 3.2.2 利用传递函数模型的预测 .....           | 24 |
| 3.2.3 扰动模型 .....                  | 25 |
| 3.2.4 广义预测控制模型 .....              | 30 |
| 3.2.5 多变量系统 .....                 | 31 |
| 3.3 状态空间模型 .....                  | 31 |
| 3.3.1 状态空间模型的表述 .....             | 31 |
| 3.3.2 利用状态空间模型的预测 .....           | 32 |
| 3.4 模型之间的转换 .....                 | 40 |
| 3.4.1 阶跃响应与状态空间模型关系 .....         | 40 |
| 3.4.2 由阶跃响应得到低维状态空间模型 .....       | 42 |
| 附录 3-1 Diophantine 方程 .....       | 46 |
| 附录 3-2 奇异值分解 .....                | 47 |
| 习题 .....                          | 48 |
| <b>第 4 章 无约束预测控制算法</b> .....      | 49 |
| 4.1 基于阶跃响应模型的动态矩阵控制算法 .....       | 49 |
| 4.1.1 单输入、单输出装置的动态矩阵控制算法 .....    | 49 |
| 4.1.2 多变量系统的动态矩阵预测控制算法 .....      | 58 |

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 4.2        | 基于传递函数模型的广义预测控制算法             | 64         |
| 4.2.1      | 预测模型                          | 64         |
| 4.2.2      | 滚动优化                          | 66         |
| 4.2.3      | 在线辨识与校正                       | 67         |
| 4.3        | 基于状态空间模型的预测控制算法               | 68         |
| 4.3.1      | 预测控制的基本表述                     | 68         |
| 4.3.2      | 求解无约束预测控制问题                   | 73         |
|            | 习题                            | 78         |
| <b>第5章</b> | <b>约束预测控制的优化求解</b>            | <b>80</b>  |
| 5.1        | 基于状态空间模型的约束预测控制               | 80         |
| 5.1.1      | 利用二次规划(QP)求解                  | 80         |
| 5.1.2      | 控制器的结构                        | 82         |
| 5.1.3      | 求解QP问题                        | 83         |
| 5.1.4      | 约束软化与管理                       | 90         |
| 5.2        | 基于阶跃响应模型的约束预测控制               | 94         |
| 5.3        | 两种模型描述方式的预测控制算法比较             | 95         |
|            | 习题                            | 96         |
| <b>第6章</b> | <b>稳定性和鲁棒性分析</b>              | <b>97</b>  |
| 6.1        | 稳定性分析                         | 97         |
| 6.1.1      | 终端等式约束                        | 98         |
| 6.1.2      | 无限时域                          | 99         |
| 6.1.3      | 终端加权                          | 102        |
| 6.2        | 鲁棒性分析                         | 104        |
| 6.2.1      | 线性矩阵不等式                       | 105        |
| 6.2.2      | 模型不确定性                        | 105        |
| 6.2.3      | 基于LMI的鲁棒预测控制算法                | 106        |
|            | 附录                            | 110        |
|            | 习题                            | 111        |
| <b>第7章</b> | <b>工业多变量预测控制技术</b>            | <b>112</b> |
| 7.1        | 工业预测控制技术评述                    | 112        |
| 7.1.1      | 工业MPC技术发展的简要回顾                | 112        |
| 7.1.2      | 工业MPC控制技术评述                   | 126        |
| 7.2        | 工业多变量预测控制器的实现技术               | 139        |
| 7.2.1      | 两个层次的最优化算法                    | 140        |
| 7.2.2      | 工业MPC中提高系统鲁棒性的技术              | 154        |
| 7.2.3      | 一种可以处理积分对象的工业MPC算法            | 162        |
| 7.2.4      | 在递阶控制体系中稳态—动态两层结构的预测控制系统的功能分析 | 166        |
| 7.2.5      | 一个工业MPC算法的结构及功能简介             | 167        |
|            | 习题                            | 168        |
| <b>第8章</b> | <b>工业预测控制应用设计与实例</b>          | <b>170</b> |
| 8.1        | 工业预测控制软件简介                    | 170        |



|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 8.1.1 | 工业预测控制软件进展 .....      | 170 |
| 8.1.2 | 工业预测控制软件功能 .....      | 171 |
| 8.2   | 预测控制工业应用设计的工程方法 ..... | 171 |
| 8.2.1 | 初步设计与效益分析 .....       | 172 |
| 8.2.2 | 开发在线工艺计算和软测量 .....    | 174 |
| 8.2.3 | 预测试 .....             | 174 |
| 8.2.4 | 动态响应测试与模型辨识 .....     | 175 |
| 8.2.5 | 控制器离线仿真与参数整定 .....    | 177 |
| 8.2.6 | 控制器投运与培训 .....        | 177 |
| 8.2.7 | 控制器维护 .....           | 178 |
| 8.3   | 工业预测控制应用实例 .....      | 179 |
| 8.3.1 | 溶剂脱水塔单元控制 .....       | 179 |
| 8.3.2 | PX 氧化反应单元控制 .....     | 186 |
| 8.3.3 | PTA 浆料配置单元控制 .....    | 197 |
| 8.3.4 | 乙醛精制单元的控制 .....       | 202 |
|       | 习题 .....              | 205 |
|       | <b>参考文献</b> .....     | 207 |

# 第 1 章 引 言

## 1.1 预测控制的特点<sup>[1]</sup>

当前在工业控制工程中产生重要影响的、最好的先进控制方法是预测控制。它主要应用于石油化工工业，但在过程工业的其他领域的应用正在不断地扩大着。预测控制能够在过程工业中得到成功应用的主要原因是：

- ① 允许卡边操作（与常规控制相比），投资回收期短；
- ② 可以引入执行器的约束；
- ③ 容易处理多变量问题；
- ④ 在过程工业中所要求的控制修正速度是相当缓慢的，所以有充分的时间用于在线计算。

除了进行上述具有约束的最优控制这类预测控制以外，还有一类“易于调整、直观”的预测控制（见 2.3）。这类预测控制对约束和最优化较少关注，而更加关注简单和计算速度。它特别适合于单输入-单输出（SISO）问题，这类控制已被应用于高带宽的场合，例如伺服机械，可以得到与较慢的过程一样好的效果。

对一个控制系统来说，要求考虑约束是出于多种原因的。在过程工业中，预测控制能够成功应用通常的理由是，最佳操作工况往往处于过程的一个甚至多个约束边界上。而这些约束往往直接与价格因素有关，它们常常是能源、原材料及产品价格等。例如产品在加工过程中需要加热，为使加工的价格尽可能的低，就必须要使供应热尽量少。虽然供应热（在整个控制时间段内）是充分的，但在加工过程中这是一个约束。对一种产品都有某种质量要求，通常应该使它的质量刚好合格而使成本最小化（卡边生产），这个质量指标就是一个约束。这是一个被控输出变量约束的例子，产品质量本身是一个被控变量，它又取决于某些被控变量的组合。

控制信号，这是过程的输入或称操纵变量，它们的约束也是必须考虑的。最常见的这种约束是饱和特性的形式：具有有限调整范围的阀门，固定的阀门口径限制了通过阀门流量的最大值，或者具有有限偏转角的可控开口面积限制等。输入约束还可以以速度约束的形式出现：阀杆位移速度和具有有限旋转速度的其他执行器。尤其是当过程控制在它的最适宜状态时，饱和形式的约束还可能经常出现，例如它们能够限制生产速度。

预测控制有处理约束的能力，从应用角度讲这是具有重要意义的。下面举几个例子说明其重要作用。

压缩机最有效的运行是尽可能接近“喘振线”，但如果运行工作点穿越到“喘振线”的错误的那一边，那么就可能产生灾难性的损害。很明显，这是对任何压缩机控制系统的硬性约束（或简称硬约束）。这种喘振线约束是一种包含压缩机出、入口的压缩比和通过流量的非线性不等式约束。然而非线性约束需要用一个或多个线性约束来近似表达，因为大多数预测控制的描述都假设是线性的不等式约束。

汽车污染的法规要求内燃机在一种相对较低的燃料/空气比的情况下工作，但这会使得发动机容易熄火，就需要引入发动机的自动控制系统，这种控制问题的描述中应当既包含污染法规界限，又包含需要产生扭矩的约束。

水下运输工具，无论是军用的潜艇还是商用水下运输工具（比如作为油井平台的维修用等），都有尽可能高的机动性的要求，无论是逃避追踪者，还是减少操作费用都有这种要求。但这种机动性受限于所允许的俯仰和测滚角度及深度变化速度的限制，这些动作限制都是由内部设备和船员的需求而产生的。所以所谓最好的操作性能，是在满足一个或多个约束下达到的。

连续生产工业过程中，在单元与单元之间往往要加一些缓冲罐，这样的罐通常是用来储存生产过程中各单元之间的中间产品。装置设计者本意是利用它们来吸收一个单元中的扰动对下一单元操作的影响，防止扰动向下游单元的传播，缓冲罐的液位是被控制的。事实上，设置这样的储罐的整体目的是为了液位变化，以此来吸收扰动影响。因此，不需要把缓冲罐液位控制在它的设定值之上，因为这将破坏设置它的初衷。传统的过程控制处理这种问题是采用超驰（取而代之）的手段或采用均匀控制等其他参数整定方法来实现的。而预测控制可提供一种非常自然的处理缓冲罐控制的方法。在它的标准控制形式中，这种罐的液位控制仅定义其上、下限为约束，而不是定义液位为设定值（这种输出的控制目标称为区间控制）。类似的控制目标在其他场合也广泛存在。大多数的控制问题也可以很自然地采用这种方式构造。

预测控制能够显式地处理约束也是很重要的一个特点。像执行器的饱和约束可作为输入约束，这点控制器是预先“知道”的。而在常规控制器中（如PID控制器），控制器算法中没有引入约束，所以它不能产生试图脱离约束的输入信号以克服积分饱和现象。如果存在长时间的设定值偏差会引起积分器输出超过饱和极限，可能会引起大的超调量甚至引起系统不稳定的现象。常规控制器（如PID控制器）工业产品中是将抗积分饱和与PI控制器硬件做成一体化来解决这个问题的，这当然增加了产品的复杂性，用预测控制时“积分饱和现象”不会发生。

当然，人们并不能真正地将装置精确地控制在它要求的实际限度之内，而往往必须要留有余地，以对付各种来源的不期望的扰动。较好的控制系统在处理这样的问题时采用使系统尽可能地接近约束边界的一种操作方式。流行的随机线性最优控制经典理论中假定扰动是随机的（高斯的），如果人们能够尽可能地减少控制输出的方差，那么就可以使系统运行在尽可能接近约束边界的状态，使得装置运行在尽可能接近它的最佳性能上。在图1-1中列举了装置的某个被控输出的三种假设的概率分布，超出约束边界的输出应该是以可以接受的小概率偶然发生的。分布(a)表示的是有较大方差的高斯分布的情况，这是在假设装置行为近似线性及扰动具有高斯分布的情况下，线性控制器参数调整较差的情况。为了得到可接受的低概率违反约束的结果，输出变量的设定值 $a$ 离约束是比较远的，因此装置在大多数时间里是运行在远离最优点的情况。分布(b)表示另一种最优线性控制所达到的被控变量输出值的分布，其方差已经减少了，因此允许设定值 $b$ 可显著地接近于约束。分布(c)表示利用在命题中加入了约束以后的预测控制系统的情况。由于扰动把输出朝着留有余地的约束边界推动时控制器的作用与将输出推回留有余量的约束边界控制器对扰动的响应是非常不同的。因此，控制器可以用一个非常接近约束边界的设定值 $c$ 来操作装置，仍然可以保持一种可以接受的小概率违反约束的状态。图1-1仅仅显示出利用预测控制以后假设的定性效果，因为

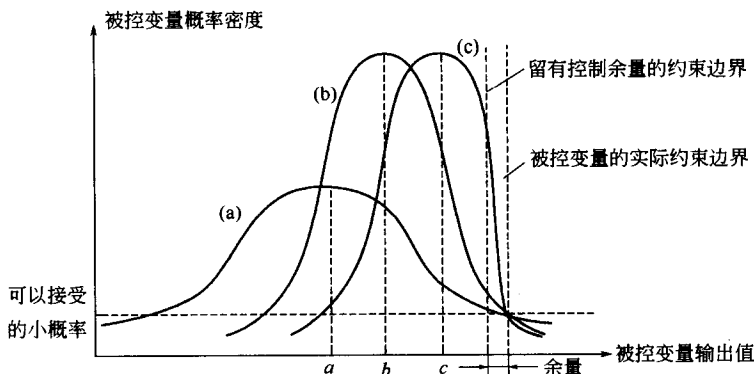


图 1-1 利用预测控制的设定值控制有效改善性能的示意图

一旦约束变成起作用时，控制作用变成非线性。通常要计算系统输出值的概率分布是非常困难的。

另外一个预测控制能够在工业过程控制中获得成功的关键因素是它可以容易地处理多变量系统。利润最大化及更为一般的性能最优化，要求对复杂装置和过程进行整体控制，这就意味着需要监控很多输出变量的未来行为并且利用整个区间的可能的控制来保持尽可能经济的，并且在某个未来区域内是安全的运行。展望预测控制未来的应用，可以举出先进的飞机的整体控制作为例子。在整体控制中的发动机、横向推力、漩涡分离控制及空气动力学表面全部用一种协调的方式进行控制。所有的思路和大多数算法可以不作任何修改就可应用于同样的多变量控制问题。如果可利用的输入的数量超过、等于或小于被控变量的数目（即所谓构成“胖”、“方”、“瘦”系统），这样的应用没有明显的困难，也就是说预测控制具有自动地处理非方系统的能力。

至此，上面已给出了预测控制在过程工业的实际应用中取得成功应用的主要原因。另外还存在未来可以期望其作用更加突出的原因：预测控制是基于模型的，即它利用一个显式的内部模型以产生装置未来行为的预测。通常普遍利用的模型是“黑箱”线性输入-输出模型，它是由简单的对装置进行测试或借助于对装置运行数据应用系统辨识的方法得到的。但是在过程工业中，可以增加一种利用非线性机理模型的方法。这些模型是由描述过程中发生的物理和化学变化规律而得到的。它们中有的是非常细微和复杂的，所以开发这种模型的价格也是相当高的，而它们的用途却是非常广泛的。机理模型与基于模型的预测控制未来的最佳组合，在应用中将有更大的潜力。为了以非线性形式给出更加精确的过程行为的预测，可以直接利用非线性模型或者利用非线性模型导出的线性近似模型，而省略对装置进行测试。非线性模型还可以广泛地应用在其他地方，甚至是现在还未开发的地方。

## 1.2 早期历史和术语

之所以要引入这一节的内容，是为了让读者了解到预测控制的思想、概念是怎样在实践中逐步形成与完善的。这有助于有志者在工业实践中不断自主地提出新的控制思想和概念。

预测控制算法是由一些学者几乎同时独立地提出的。先驱者都是工业实践者，这些学者在算法首先发布之前已实施预测控制若干年了，所以发表的日期并不表明整个的历程。

法国 Adersa 公司的 Richalet 等 1978 年提出的“模型预测启发式控制” (model predictive heuristic control) 主要贡献在于提出了一种控制方法论, 这种方法能够用于由常规 PID 控制很难处理的问题, 而且这种控制方法是基于直觉概念并且调整很容易。另外, Cutler 和 Ramaker 在 1980 年提出了被称为“动态矩阵控制” (dynamic matrix control) 或 DMC 的预测控制, 它着重于在约束下优化装置运行, 而欲计算的控制信号是重复地计算一个线性规划 (LP) 问题。DMC 不久成为众所周知的商业化的预测控制产品。它的专利被授予 Prett 等人 (1982 年)。然而最早的专利在 1976 年授予了 Martiu-Sanchez, 他的方法简称为“自适应预测控制” (adaptive predictive control)。正如该名称一样, 他看中的是利用由自适应得到的内部模型, 借助于自适应模型并依靠最优化计算出适当的控制信号。

所有这些提出的方法, 都具有了预测控制的基本特点: 一个显式的用于预测装置输出的内部模型, 有限时域的滚动计算 (receding horizon) 的思想和借助于预测装置的行为来计算最优控制信号。早期的含有类似思想的学术论文包括文献 [2]、[3] 等。一篇更早期的文章, 它们关注一个稍有不同的问题, 由 Coales 和 Noton<sup>[4]</sup> 引入某些类似于在预测控制中的那些符合目前标准的思想。它提供了一种近似于解综合最小时间的“bang-bang”最优控制问题。该方法借助于一个快速仿真模型并假定利用不变的控制信号产生的装置行为的预测, 从而在预测时域末端行为预测的基础上决定是否切换控制信号的符号。然而, 该预测时域不是常数, 所以它不是有限时域滚动计算的策略, 但它包含了从一个显式内部模型 (当时采用的是一台模拟计算机) 用于产生预测的基本思想, 然后在线实时计算一个控制信号。

然而, 在控制中利用预测的思想是非常古老和普通的思想。例如, 众所周知的 Smith 预估器, 它适用于具有大纯滞后装置的控制。它的核心是具有一个没有纯滞后的装置模型用以获得的预测是相位超前的信号, 由此来提供装置输出的控制。这种超前补偿由纯滞后引起大的相位滞后。更基本的是, 任何利用导数作用的控制器或者相位超前的补偿器可以看作是提供某些信号的一种预测。例如, 在一个基本的“比例加微分”控制器中, 控制信号依赖于  $y + T(dy/dt)$ , 其中  $y$  是装置的输出。这可看成是一个“T-Second-ahead” (下一个时间间隔量的提前) 的输出预测器, 其中假设  $dy/dt$  在这个时间间隔中保持不变。这里讨论的问题表明我们并没有考察一切可能的某种预测的控制律。本书中仅讨论那些包括具有一个显式的装置模型, 有限时域滚动计算的思想 and 某种最优化的策略。

在早期有过众多的表示特定的预测控制的命名, 通常用相应的首字母缩写略语表示。例如:

动态矩阵控制 (DMC),  
 扩展的预测自适应控制 (EPSAC),  
 广义算法控制 (GPC),  
 模型算法控制 (MAC),  
 预测函数控制 (PFC),  
 二次动态矩阵控制 (QDMC),  
 序贯开环最优控制 (SOLO)。

等。目前在整个预测控制领域已被广泛采用的较通用的名字为“模型预测控制” (model predictive control), 或称 MPC 及“基于模型的预测控制” (model-based predictive control), 或称 MBPC。

### 1.3 在递阶控制体系中的预测控制

图 1-2 展示了预测控制当前在过程工业应用中典型的情况。在顶部这一层，借助于稳态优化方法来确定设定值。稳态优化能够在不同级别上实施，流程级的战略设定值是一天执行一次，更细微的最优化在操作单元级实施，它是每小时执行一次。这种最优化是基于经济目标的——它产生的是时变的设定值——而通常是不考虑装置的动态特性的。次低层是传统的局部控制器，分别控制压力、流量、温度等工艺变量。这些控制器是典型的比例 (P) 和比例积分 (PI) 控制器，或者有时是还具有微分作用的三项作用 PID 控制器。最低层是各种执行器，例如阀门伺服机构有关的控制回路。

在稳态最优化层与局部控制层之间有一个处理逻辑、超驰、解耦网络和例外情况等复杂问题的传统层次，它们是用来处理不可能由简单的“一个设定值”，“一个控制回路”模式所处理的的所有的那些问题，这一层通常包括了个别问题的特殊解决方案的问题集合。因此，这些是在装置使用期间设置的，而不是在设计过程中形成的。其每一个解决方案不大可能考虑整个过程或装置的总体行为，而且这一层的总体动态行为离最优化是非常远的。

取代这一特殊解决方案的是预测控制。它在过程工业中有广阔的应用场合。最普通的方法是利用线性动态模型和约束最优化的联合，这使得它能处理非常多的由上述特殊解决方案层来解决的例外的（但不稀有的）状况。此外，因为预测控制是一种处理所有这些问题的总体解决方案，它能够提供令人印象深刻的，比被它取代的技术更好的性能。

预测控制通常运行在传统的局部回路控制器上层，这对于它被工业界认可与今后的发展有重要的意义。首先，它使得运行中的工厂能相对保险地引入这种新技术，因为如果一个预测控制器起初表现不好，该系统通常可能被切除，并令局部回路控制器把装置维持在他们从高层（或由人工手动）给出的最新的设定点上。大多数情况下，过程中基层控制装置是能够处理这种状况的，所以虽然这已不可能是最有利的状况，但至少是一个安全状态。这就是为什么甚至预测控制系统在满意的稳定性理论建立以前就有很多预测控制器被安装在装置上运行的原因之一，而且这也就是为什么很多目前运行的系统不大考虑稳定性问题。其次，这使得已开发完成的商品工业预测控制器对稳定的装置几乎都是成功的。

并不是所有的预测控制器都扮演着图 1-2 中所示的角色。还有某些预测控制器可用来代替最低层控制器。例如，在伺服机构中及在要求自适应控制的应用场合<sup>[5~7]</sup>。尤其当预测控制扩展到新的应用领域时，人们可以期望，预测控制将变得越来越通用，它可以代替包括当前惯用的 PI 调节器在内的所有基层控制器，剩下的仅仅是执行器伺服机构在它下层。这可用图 1-3 来表示。在飞行及宇宙飞船控制的应用中，执行器层上面没有设置单独回路的余地，因为保持每一个设定值（例如爬高速度或 3-坐标的位置）要求若干执行器的协调动作。

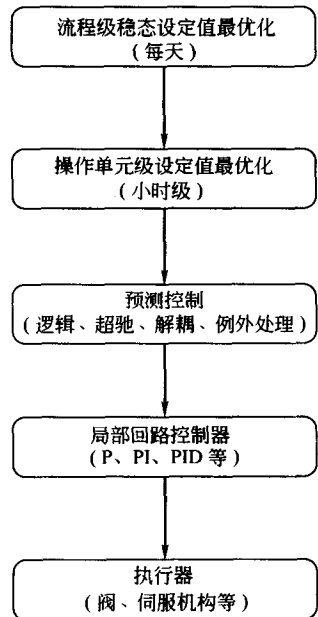


图 1-2 预测控制的典型应用——当前的做法

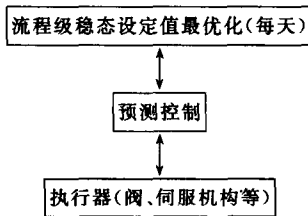


图 1-3 采用预测控制——未来的趋势

当执行次低层控制功能时，较快地控制修正速度（控制周期）是必须的，但这只有当计算机硬件变得更快时才有可能。

在图 1-3 中表示出的其他特点是经济的（短期的设定值）优化与借助于当前预测控制执行的动态性能最优化的集成。传统的控制系统中，其动态行为的性能要求并不能以一种反映价格的形式表现出来。部分原因是现有控制设计和执行技术还不可能支持这种问题的表述。利用预测控制中的稳态优化部分算法，可以方便地处理被控变量及控制变量的优先级，还可以处理经济问题的短期的设定值优化。这种将稳态优化与动态优化分别处理的方法，可以把传统控制系统无法处理的复杂的控制目标用很自然的方式表达出来（参见 7.2.1.2）。

## 习 题

1. 预测控制的主要特点是什么？
2. 与 PID 算法相比预测控制有什么优点？这些优点使它能处理一些 PID 算法无法处理的问题，你能列举出这些问题中的一些吗？

## 第2章 预测控制的基本原理

在介绍预测控制的具体算法之前，先来建立预测控制的基本概念。为简单起见，这里仅讨论一个单输入-单输出（SISO）装置的控制问题。预测控制是以计算机为实现手段的，因此其算法的表现形式一般为采样控制算法而不是连续控制算法。另外，预测控制应包含预测的原理，即利用内部模型的状态或输出预测，同时应用了有限预测时域的滚动计算思想和反馈及预测校正，最后采用了对某个系统性能指标的最优化计算以确定在一个控制时域内的最优控制序列。这是预测控制的基本原理。

### 2.1 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，也可以在对这类系统进行预测控制时作为预测模型使用。

预测模型具有表达系统未来动态行为的功能，对于不同的控制策略（一个控制作用序列）就可利用预测模型计算出不同的输出预测轨迹，从而为选择最优控制策略使系统某个性能指标优化提供了基础。

直接采用阶跃响应及脉冲响应作为预测模型使用，无疑可以为建模带来方便。早期的一些预测控制算法就是这样处理的。预测控制得到了越来越广泛的应用，在应用中人们对于既快又准确（相对地）地获得装置模型有了迫切的要求，特别是对于复杂的工业对象。用阶跃信号进行测试时由于工业噪声非常严重，直接将测试得到的阶跃响应曲线或脉冲响应曲线作为预测模型是不现实的。实际上，工业实践中往往是对装置进行动态测试得到的阶跃响应曲线通过面积法处理转换成传递函数，或者用加入有较大信噪比的伪随机序列信号进行测试得到的结果，经相关分析法处理转换成脉冲响应曲线再转换成传递函数等。得到了传递函数以后，再反算或计算机仿真得到阶跃响应及脉冲响应进行模型验证，最终得到算法中采用的阶跃响应或传递函数等表达的内部预测模型。这样做可以大大削弱工业噪声对模型的影响。这种方法已是当前工业界中惯用的做法，并已在商品工程软件中实施了。基于上述情况。本书在第3章介绍的预测控制算法是直接利用经过处理的阶跃响应及脉冲响应作为预测模型，第4章介绍了各种模型的转换与预测，据此可以构成各种预测控制算法，第5章介绍了基于状态空间模型的预测控制算法。

### 2.2 有限时域滚动计算的思想

图2-1说明了预测控制的基本概念。在该图形中表达的仅是一个单输入-单输出（SISO）装置的控制问题。这里采用的是用离散形式表达的情况。当前时刻被标以时间的第 $k$ 步，当



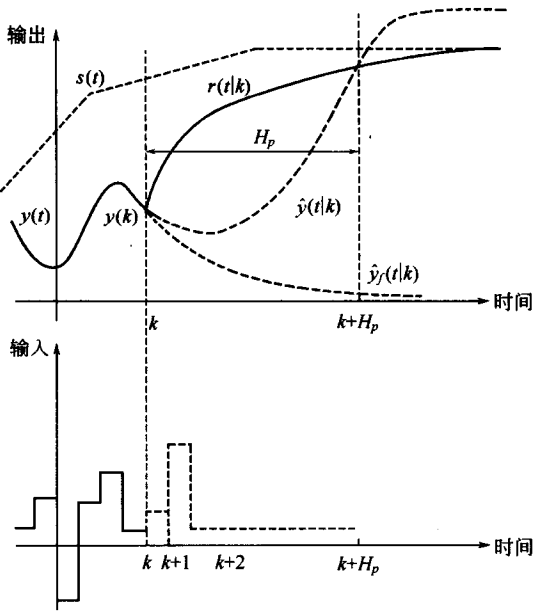


图 2-1 预测控制的基本概念示意图

前时刻装置输出为  $y(k)$ ，图中展示出输出预测轨迹  $\hat{y}(t|k)$  及以前的历史状况  $y(t)$ 。图中还表示了一条任意时刻的设定值变化轨迹  $s(t)$  及人们期望的理想输出轨迹  $r(t|k)$ 。应该指出的是，理想输出轨迹  $r(t|k)$  的引入并不是必须的。输出轨迹还可以通过在后面要介绍的目标函数中的加权矩阵  $Q$  和  $R$  的调整来达到。

这里引入的参考轨迹（理想输出轨迹）起始于当前输出  $y(k)$ ，它被定义为这样一条理想轨线：当一个扰动出现以后，装置应该沿着这条理想轨线  $r(t|k)$  返回到设定值轨线  $s(t)$  去。因此，参考轨迹定义了被控装置闭环行为的一种期望的形状。强行要求装置尽可能快地被驱动返回到设定值轨迹并不是必要的。参考轨迹的选择是自由的。通常假设参考轨迹从当前输出值以指数形式渐近地逼近设定值轨迹。指数形式的时间常数以  $T_{ref}$  来表示，它定义了响应速度。也就是说，如果当前误差是

$$\epsilon(k) = s(k) - y(k) \quad (2-1)$$

那么，参考轨迹可以这样来选择：如果输出精确地跟踪它，且假设  $s(k)$  为常数 [即  $s(k+i) = s(k)$ ]，那么  $i$  步之后的误差将是

$$\epsilon(k+i) = e^{-iT_s/T_{ref}} \epsilon(k) \quad (2-2)$$

$$= \lambda^i \epsilon(k) \quad (2-3)$$

式中， $T_s$  是采样周期，而  $\lambda = e^{-T_s/T_{ref}}$  ( $0 < \lambda < 1$ )，也就是参考轨迹被定义为

$$r(k+i|k) = s(k+i) - \epsilon(k+i) \quad (2-4)$$

$$= s(k+i) - e^{-iT_s/T_{ref}} \epsilon(k) \quad (2-5)$$

符号  $r(k+i|k)$  表示参考轨迹取决于  $k$  时刻的状态。还可以另外定义参考轨迹，例如可以是当前输出值在指定时间以后达到设定值轨迹的一条直线。

预测控制器的内部模型是用来预测从当前时刻开始的在一个未来预测时域  $H_p$  上的装置行为的，这种行为取决于在预测时域  $H_p$  上施加的输入序列  $\hat{u}(k+i|k)$  ( $i=0, 1, \dots, H_p-1$ )。而选择这样的输入序列使期望得到的预测行为是在某种意义上最佳的。我们采用的内部模型是线性的，这使得最优输入的计算相对简明。用符号  $\hat{u}$  而不是  $u$  表示在时刻  $k$  预测  $k+i$  时刻可能的输入值。时刻  $k+i$  真实的输入  $u(k+i)$  一般不同于  $\hat{u}(k+i|k)$ 。假定输出测量值  $y(k)$  在确定输入  $u(k)$  以前是可以得到的，这就意味着采用的内部模型必须是严格真的，也就是根据模型， $y(k)$  取决于过去的输入  $u(k-1)$ ， $u(k-2)$ ， $\dots$  而不取决于  $u(k)$ 。

在最简单的情况下，试着选择输入序列，例如使得装置的输出在预测时域的末端，即在时刻  $k+H_p$  达到所要求的值  $r(k+H_p)$ 。对这种情况，在  $k+H_p$  时刻有“单个重合点”。有各种不同的输入序列  $\{\hat{u}(k|k), \hat{u}(k+1|k), \dots, \hat{u}(k+H_p-1|k)\}$  能满足上述要求，我们可