



国防科技图书出版基金

# 预测控制

(第2版)

Predictive Control  
(2nd Edition)

■ 席裕庚 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

014038009

TP273  
138-2

席裕庚 著

# 预测控制

(第2版)

## Predictive Control

(2nd Edition)



 国防工业出版社  
National Defense Industry Press

TP 273 / 138-2



北航

C1723635

图书在版编目(CIP)数据

预测控制/席裕庚著,—2版.—北京:国防工业出版社,  
2013.12

ISBN 978-7-118-08919-6

I. ①预... II. ①席... III. ①预测控制 IV. ①  
TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 022451 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 19¼ 字数 334 千字

2013 年 12 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 68.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

|         |     |     |     |     |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员    | 王 峰 |     |     |     |
| 副主任委员   | 宋家树 | 蔡 镭 | 杨崇新 |     |
| 秘 书 长   | 杨崇新 |     |     |     |
| 副 秘 书 长 | 邢海鹰 | 贺 明 |     |     |
| 委 员     | 于景元 | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 |
|         | 甘茂治 | 甘晓华 | 卢秉恒 | 邬江兴 |
|         | 刘世参 | 芮筱亭 | 李言荣 | 李德仁 |
|         | 李德毅 | 杨 伟 | 肖志力 | 吴有生 |
|         | 吴宏鑫 | 何新贵 | 张信威 | 陈良惠 |
|         | 陈冀胜 | 周一宇 | 赵万生 | 赵凤起 |
|         | 崔尔杰 | 韩祖南 | 傅惠民 | 魏炳波 |

(按姓氏笔画排序)

# 前言

本书是1993年由国防工业出版社出版的《预测控制》一书的第2版。

预测控制产生于20世纪70年代中期,它最初是适应复杂工业过程特点的一种先进控制算法,因能解决在约束情况下的实时优化控制而受到工业界的重视,并在化工、炼油、电力等领域的过程控制中得到成功应用。80年代以后,预测控制的理论和应用得到了迅猛发展,预测控制商用软件已经历了四到五代的版本更新和功能扩展,不仅在全球数以千计的系统中得到应用并取得显著经济效益,而且应用领域也从工业过程向制造、航空航天、交通、环境、能源等领域迅速扩展。自20世纪90年代以来,原来被认为相对滞后的预测控制理论通过采用新的综合思路和新的研究工具,迅速成为控制领域学术研究的热点,特别是在预测控制稳定性和鲁棒性综合方面取得的系统性进展,加深了对预测控制本质机理的理解,构建了内容丰富的预测控制定性综合理论体系。如今,预测控制已成为一个多元化的学科分支,包含了具有不同目的和不同特色的诸多发展轨迹,不仅受到广大工业界的青睐,成为最有代表性的先进控制算法,而且形成了具有滚动优化特色的不确定性系统稳定和鲁棒设计的理论体系。

《预测控制》成稿于1991年,所撰写的预测控制原理、算法、理论及应用,大部分取自20世纪80年代的研究结果和应用报道。作为国内第一本介绍预测控制的专著,该书对普及并推动预测控制在我国的研究和应用起到了一定作用,1995年获国防工业出版社优秀图书一等奖,第七届全国优秀科技图书二等奖。该书出版20年来,预测控制在理论研究、算法发展、原理推广、技术提升和实际应用方面都取得了巨大进展。在我国,研究和应用预测控制的整体水平也有了很大提高。在

国家科技攻关计划支持下,已成功开发了预测控制商用软件并结合典型工业过程得到应用,利用预测控制这一新技术改造传统工业、提高产品质量、实现节能降耗的应用成果已屡见报道。预测控制理论和算法也已成为控制界学术研究的热点,在国内学术刊物和会议上发表的预测控制的论文和相关博士、硕士论文已多达数千篇。当前,我国经济和社会正在快速发展,对优化、节能、环保等提出了更高的要求,在各应用领域中解决各类复杂的约束优化控制问题也对预测控制寄予很大的期望。在这种情况下,原书内容已远不能满足预测控制研究应用的需要,很有必要对该书进行修订,补充预测控制的新思想和新进展,为读者研究和应用预测控制提供更新、更宽广的视野。

此次再版在保持原书的基本框架,即反映预测控制的基本原理和算法、系统分析与设计、算法发展和工业应用的基础上,根据近 20 年来预测控制的发展和我们对预测控制的深入理解,对原书内容进行了较全面的补充和调整,使其更准确地反映预测控制最基本的内容和最新的研究水平。修订的重点是加强预测控制实际应用环境、算法与实例的介绍,增加预测控制理论研究的主要分支与基本思路的介绍,合理归并预测控制算法和策略发展的相关内容。主要包括以下几方面:一是加强了预测控制工业应用的环境、技术特点和应用范例的介绍,展示了预测控制向更广泛应用领域扩展的原理和应用实例(第 10 章);二是增补了 20 世纪 90 年代以来经典预测控制定量分析理论的新进展(第 4 章)以及成为当今研究主流的预测控制定性综合理论的新思路和新方法(第 9 章);三是对预测控制算法和策略的内容做了适当调整(第 6、7、8 章部分),从代表性、新颖性、实用性角度出发进行增删,加强了非线性系统预测控制的介绍;四是增补了预测控制原理的信息论、控制论诠释及推广应用(第 10 章部分)。这些内容,除了适当补充 20 世纪 90 年代以来国内外具



有典型意义的预测控制研究成果外,主要来源于我们这 10 多年来在预测控制研究中所取得的新成果。

本书的取材和写作保留了原书的风格,兼顾普及与提高,不但可使读者全面地了解和熟悉预测控制的基本方法原理、算法、理论和应用技术,而且为科研人员和工程技术人员从事深入的预测控制理论研究、开展高水平的工业应用以及把预测控制推广到更多应用领域提供了有益的参考。衷心希望本书的出版,能为进一步推动预测控制在我国的研究和应用做出新的贡献。

在本书出版之时,作者要特别感谢国家自然科学基金委员会长期以来对预测控制研究的资助,同时也要感谢国内学术界和工业界的同行们,正是与他们的有益交流,使作者对预测控制的理解不断深入,并不断获得新的启发。还要感谢 20 多年来并肩工作在预测控制研究领域的博士生和硕士生,正是他们的努力和贡献,丰富了本书的内容。国防科技图书出版基金为本书初版和第 2 版提供了资助,作者也在此深表感谢。

作者还要感谢妻子和已经离去的父母,他们始终不渝的支持与鼓励是作者进行研究和完成写作的强大动力。谨以此书纪念在天堂的父母。

席裕庚于 上海交通大学  
2012 年 11 月 20 日

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 预测控制的发展历史及基本原理 .....    | 1  |
| 1.1 预测控制的产生与发展 .....          | 1  |
| 1.2 预测控制的基本方法原理 .....         | 4  |
| 1.3 预测控制的主要研究内容 .....         | 8  |
| 第 2 章 几种典型的预测控制算法 .....       | 10 |
| 2.1 基于阶跃响应的动态矩阵控制 .....       | 10 |
| 2.2 基于随机离散模型的广义预测控制 .....     | 17 |
| 2.3 基于状态方程的预测控制 .....         | 23 |
| 2.4 小结 .....                  | 28 |
| 第 3 章 动态矩阵控制算法的内模控制结构分析 ..... | 29 |
| 3.1 内模控制结构及其性质 .....          | 29 |
| 3.2 动态矩阵控制算法的内模控制结构 .....     | 32 |
| 3.3 关于控制器的讨论 .....            | 36 |
| 3.3.1 控制器的稳定性 .....           | 36 |
| 3.3.2 一步预测优化策略下的控制器 .....     | 41 |
| 3.3.3 具有纯滞后对象的控制器 .....       | 42 |
| 3.4 关于滤波器的讨论 .....            | 43 |
| 3.4.1 3 种反馈校正策略及相应的滤波器 .....  | 43 |
| 3.4.2 滤波器对系统鲁棒稳定性的影响 .....    | 47 |

|            |                                   |            |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 3.5        | 小结 .....                          | 49         |
| <b>第4章</b> | <b>预测控制系统性能的定量分析 .....</b>        | <b>51</b>  |
| 4.1        | 基于 Kleinman 控制器的广义预测控制稳定性分析 ..... | 52         |
| 4.2        | 预测控制系统开、闭环特征多项式系数变换 .....         | 56         |
| 4.2.1      | 广义预测控制在内模控制结构下的控制器 .....          | 57         |
| 4.2.2      | 动态矩阵控制和广义预测控制控制律的一致性 .....        | 61         |
| 4.3        | 基于系数变换的预测控制系统性能分析 .....           | 65         |
| 4.4        | 小结 .....                          | 72         |
| <b>第5章</b> | <b>预测控制系统的参数整定与设计 .....</b>       | <b>73</b>  |
| 5.1        | 动态矩阵控制基于趋势性分析的参数整定 .....          | 74         |
| 5.2        | 一阶加纯滞后对象预测控制的解析设计 .....           | 83         |
| 5.2.1      | 闭环特征多项式和稳定性 .....                 | 85         |
| 5.2.2      | 闭环系统的动态特性 .....                   | 86         |
| 5.2.3      | 解析设计的步骤 .....                     | 88         |
| 5.3        | 典型振荡过程预测控制的解析设计 .....             | 90         |
| 5.3.1      | 控制不加权时的闭环性能分析 .....               | 92         |
| 5.3.2      | 控制加权时的闭环性能分析 .....                | 96         |
| 5.4        | 小结 .....                          | 98         |
| <b>第6章</b> | <b>多变量系统的预测控制 .....</b>           | <b>100</b> |
| 6.1        | 多变量系统的动态矩阵控制 .....                | 100        |
| 6.2        | 有约束多变量预测控制的在线优化 .....             | 107        |
| 6.2.1      | 基于矩阵求逆分解的约束优化算法 .....             | 109        |
| 6.2.2      | 基于二次规划的约束优化算法 .....               | 112        |
| 6.3        | 多变量预测控制在在线优化的分解算法 .....           | 116        |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 6.3.1        | 基于分解—协调的递阶预测控制 .....         | 117        |
| 6.3.2        | 分布式预测控制 .....                | 121        |
| 6.3.3        | 分散预测控制 .....                 | 124        |
| 6.3.4        | 几种优化分解算法的比较 .....            | 126        |
| 6.4          | 小结 .....                     | 129        |
| <b>第 7 章</b> | <b>非线性系统的预测控制 .....</b>      | <b>130</b> |
| 7.1          | 非线性系统预测控制问题的一般描述 .....       | 130        |
| 7.2          | 分层预估迭代的非线性预测控制 .....         | 134        |
| 7.3          | 基于输入输出线性化的非线性预测控制 .....      | 136        |
| 7.4          | 基于模糊聚类的多模型预测控制 .....         | 142        |
| 7.5          | 神经网络预测控制 .....               | 149        |
| 7.6          | 基于广义卷积模型的非线性预测控制 .....       | 152        |
| 7.7          | 哈默斯坦系统的非线性预测控制 .....         | 154        |
| 7.8          | 小结 .....                     | 156        |
| <b>第 8 章</b> | <b>预测控制算法和策略的多样化发展 .....</b> | <b>158</b> |
| 8.1          | 具有前馈—反馈结构的预测控制 .....         | 158        |
| 8.2          | 串级预测控制 .....                 | 161        |
| 8.3          | 无穷范数优化的预测控制 .....            | 165        |
| 8.4          | 有约束多目标多自由度优化的满意控制 .....      | 168        |
| 8.5          | 预测控制的输入参数化方法 .....           | 174        |
| 8.5.1        | 优化变量的分块策略 .....              | 174        |
| 8.5.2        | 预测函数控制 .....                 | 176        |
| 8.6          | 预测控制在线优化变量的集结 .....          | 178        |
| 8.6.1        | 预测控制在线优化变量集结的一般框架 .....      | 178        |
| 8.6.2        | 具有性能保证的在线优化变量集结 .....        | 180        |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 8.7         | 小结 .....                  | 190        |
| <b>第9章</b>  | <b>预测控制的定性综合理论 .....</b>  | <b>191</b> |
| 9.1         | 预测控制定性综合理论的基本思路 .....     | 192        |
| 9.1.1       | 预测控制与最优控制的关系 .....        | 192        |
| 9.1.2       | 在线开环优化的无穷时域近似 .....       | 193        |
| 9.1.3       | 滚动优化中相邻时刻性能指标的联系 .....    | 195        |
| 9.1.4       | 不变集和线性矩阵不等式 .....         | 197        |
| 9.2         | 稳定预测控制器的综合 .....          | 200        |
| 9.2.1       | 终端零约束预测控制 .....           | 200        |
| 9.2.2       | 带有终端代价函数的预测控制 .....       | 201        |
| 9.2.3       | 带有终端集约束的预测控制 .....        | 206        |
| 9.2.4       | 预测控制稳定性一般条件与次优性分析 .....   | 210        |
| 9.3         | 鲁棒预测控制器的综合 .....          | 214        |
| 9.3.1       | 多胞描述不确定性系统的鲁棒预测控制 .....   | 214        |
| 9.3.2       | 鲁棒预测控制器综合的难点与解决方案 .....   | 219        |
| 9.4         | 小结 .....                  | 235        |
| <b>第10章</b> | <b>预测控制的应用及发展前景 .....</b> | <b>236</b> |
| 10.1        | 预测控制在工业过程中的应用 .....       | 236        |
| 10.1.1      | 预测控制的工业应用及软件发展概况 .....    | 236        |
| 10.1.2      | 预测控制在工业过程优化中的定位及实施 .....  | 240        |
| 10.1.3      | 炼油厂加氢裂化单元的动态矩阵控制 .....    | 248        |
| 10.2        | 预测控制在其它领域的应用 .....        | 253        |
| 10.2.1      | 天然气传输网络的在线优化 .....        | 254        |
| 10.2.2      | 预测控制在汽车自适应航迹控制中的应用 .....  | 259        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 10.2.3 预测控制原理在应用中的普适性和灵活性 ..... | 264 |
| 10.3 预测控制面临的挑战问题及发展前景 .....     | 271 |
| 10.3.1 预测控制面临的挑战问题 .....        | 271 |
| 10.3.2 预测控制的发展前景 .....          | 274 |
| 10.4 小结 .....                   | 278 |
| <br>                            |     |
| 参考文献 .....                      | 279 |
| 附录 .....                        | 284 |
| 编后语 .....                       | 285 |

# Contents

|  |    |
|--|----|
| <b>Chapter 1 Brief History and Basic Principles of Predictive Control</b> .....                        | 1  |
| 1.1 Generation and Development of Predictive Control .....   | 1  |
| 1.2 Basic Methodological Principles of Predictive Control .....  | 4  |
| 1.3 Main Research Contents of Predictive Control .....   | 8  |
| <b>Chapter 2 Some Typical Predictive Control Algorithms</b> .....                                      | 10 |
| 2.1 Dynamic Matrix Control (DMC) Based on Step Response Model .....                                    | 10 |
| 2.2 Generalized Predictive Control (GPC) Based on<br>Stochastic Discrete Model .....                   | 17 |
| 2.3 Predictive Control Based on State Space Model .....  | 23 |
| 2.4 Summary .....  | 28 |
| <b>Chapter 3 Analysis of DMC Algorithm in Internal Model<br/>        Control (IMC) Structure</b> ..... | 29 |
| 3.1 Structure and Properties of IMC .....  | 29 |
| 3.2 IMC Structure of DMC Algorithm .....   | 32 |
| 3.3 Discussions on the Controller .....  | 36 |
| 3.3.1 Stability of the Controller .....  | 36 |
| 3.3.2 Controller with One Step Prediction and Optimization Strategy ...                                | 41 |
| 3.3.3 Controller for Systems with Time Delay .....   | 42 |
| 3.4 Discussions on the Filter .....  | 43 |
| 3.4.1 Three Feedback Correction Strategies and the<br>Corresponding Filters .....                      | 43 |
| 3.4.2 Influence of the Filter to Robust Stability of the System .....                                  | 47 |

|                  |   |            |
|------------------|---|------------|
| 3.5              | Summary .....   | 49         |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Quantitative Analysis of the Performances of Predictive Control Systems .....</b>                              | <b>51</b>  |
| 4.1              | Analysis of GPC Stability Based on Kleinman Controller .....  | 52         |
| 4.2              | Coefficient Mapping of Open-Loop and Closed – Loop Characteristic Polynomials of Predictive Control Systems ..... | 56         |
| 4.2.1            | Controller of GPC in IMC Structure .....  | 57         |
| 4.2.2            | Consistency of the DMC and GPC Control Laws .....   | 61         |
| 4.3              | Performance Analysis of Predictive Control Systems Based on Coefficient Mapping .....                             | 65         |
| 4.4              | Summary .....   | 72         |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Parameter Tuning and Design of Predictive Control Systems .....</b>  | <b>73</b>  |
| 5.1              | DMC Parameter Tuning Based on Trend Analysis .....  | 74         |
| 5.2              | Analytical Design of Predictive Control for First Order System with Time Delay .....                              | 83         |
| 5.2.1            | Closed – Loop Characteristic Polynomial and Stability .....   | 85         |
| 5.2.2            | Dynamic Performances of the Closed – Loop System .....  | 86         |
| 5.2.3            | Analytical Design Steps .....   | 88         |
| 5.3              | Analytical Design of Predictive Control for Typical Oscillation Systems .....                                     | 90         |
| 5.3.1            | Closed – Loop Performance Analysis without Control Weighting .....  | 92         |
| 5.3.2            | Closed – Loop Performance Analysis with Control Weighting .....   | 96         |
| 5.4              | Summary .....   | 98         |
| <b>Chapter 6</b> | <b>Predictive Control for Multivariable Systems .....</b>   | <b>100</b> |
| 6.1              | DMC for Multivariable Systems .....   | 100        |
| 6.2              | Online Optimization of Constrained Multivariable Predictive Control .....   | 107        |
| 6.2.1            | Constrained Optimization Algorithm Based on Matrix Inversion Decomposition .....                                  | 109        |
| 6.2.2            | Constrained Optimization Algorithm Based on Quadratic Programming .....   | 112        |
| 6.3              | Decomposition Algorithms for Online Optimization of Multivariable Predictive Control .....                        | 116        |



|                  |   |            |
|------------------|---|------------|
| 6.3.1            | Hierarchical Predictive Control Based on<br>Decomposition – Coordination .....                        | 117        |
| 6.3.2            | Distributed Predictive Control .....  | 121        |
| 6.3.3            | Decentralized Predictive Control .....  | 124        |
| 6.3.4            | Comparison of Optimization Decomposition Algorithms .....   | 126        |
| 6.4              | Summary .....   | 129        |
| <b>Chapter 7</b> | <b>Predictive Control for Nonlinear Systems .....</b>   | <b>130</b> |
| 7.1              | General Description of Predictive Control for Nonlinear Systems .....                                 | 130        |
| 7.2              | Nonlinear Predictive Control with Multilayer Prediction and Iteration .....                           | 134        |
| 7.3              | Nonlinear Predictive Control Based on Input – Output Linearization .....                              | 136        |
| 7.4              | Multi – Model Predictive Control Based on Fuzzy Clustering .....                                      | 142        |
| 7.5              | Neural Network Predictive Control .....   | 149        |
| 7.6              | Nonlinear Predictive Control Based on Generalized Convolution Model .....                             | 152        |
| 7.7              | Nonlinear Predictive Control for Hammerstein Systems .....  | 154        |
| 7.8              | Summary .....   | 156        |
| <b>Chapter 8</b> | <b>Comprehensive Development of Predictive<br/>Control Algorithms and Strategies .....</b>            | <b>158</b> |
| 8.1              | Predictive Control with Feedforward – Feedback Structure .....  | 158        |
| 8.2              | Cascade Predictive Control .....  | 161        |
| 8.3              | Predictive Control with Infinite Norm Optimization .....  | 165        |
| 8.4              | Satisfactory Control with Constrained Multi-Objective<br>Multi – Degree of Freedom Optimization ..... | 168        |
| 8.5              | Input Parametrization of Predictive Control .....   | 174        |
| 8.5.1            | Blocking Strategy of Optimization Variables .....   | 174        |
| 8.5.2            | Predictive Functional Control .....   | 176        |
| 8.6              | Aggregation of the Online Optimization Variables in Predictive Control .....                          | 178        |
| 8.6.1            | General Framework of Online Optimization Variable<br>Aggregation in Predictive Control .....          | 178        |
| 8.6.2            | Online Optimization Variable Aggregation with<br>Guaranteed Performances .....                        | 180        |