



智能制造与装备制造业转型升级丛书
MADE IN CHINA

工业预测控制

丁宝苍 著

电气自动化新技术丛书

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



智能制造与装备制造业转型升级丛书
电气自动化新技术丛书

工业预测控制

丁宝苍 著



机械工业出版社

本书根据作者近年来的科研成果和应用实践,从科学原理、整体技术、理论要点、实施细节诸方面对双层结构预测控制这一工业预测控制的主流技术进行了全面的介绍,旨在搭建工程实践与理论之间的桥梁,以此促进工业预测控制技术在我国的研究与应用。书中围绕双层结构预测控制的框架,详细地阐述了工业预测控制所涉及的基础理论和应用技术,包括模型辨识、状态估计、开环预测、稳态目标计算、动态控制实现等。

本书适合从事电气自动化行业的工程技术人员阅读,也可供高校工业自动化、自动控制、计算机应用等专业的学生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业预测控制/丁宝苍著. —北京:机械工业出版社,2016.7
(智能制造与装备制造业转型升级丛书. 电气自动化新技术丛书)
ISBN 978-7-111-53743-4

I. ①工… II. ①丁… III. ①工业自动化控制—预测控制 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 099429 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:江婧婧 责任编辑:江婧婧

责任校对:张薇 封面设计:马精明

责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.25 印张·338 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53743-4

定价:79.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

- 主 任:** 王永骥
- 副 主 任:** 牛新国 赵光宙 孙 跃 阮 毅
何湘宁 霍永进 韩芙华
- 顾问委员:** 王 炎 孙流芳 陈伯时 陈敏逊
彭鸿才 尹力明
- 委 员:** (按姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 王永骥 | 王 旭 | 王志良 | 牛新国 |
| 许宏纲 | 孙 跃 | 刘国海 | 李永东 |
| 李崇坚 | 阮 毅 | 陈息坤 | 汪 镭 |
| 沈安文 | 张 兴 | 张 浩 | 张华强 |
| 张承慧 | 张彦斌 | 何湘宁 | 赵光宙 |
| 赵 杰 | 赵争鸣 | 赵荣祥 | 查晓明 |
| 徐殿国 | 常 越 | 韩芙华 | 霍永进 |
| 戴先中 | | | |
- 秘 书:** 王 欢 林春泉

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会学会领导和广大作者的支持下，在前5届编辑委员会的努力下，至今已发行丛书53种55万多册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断地推出介绍我国电气自动化新技术的丛书。本届编委决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，欢迎从事电气自动化研究的学者就新选题积极投稿；同时对受读者欢迎的已经出版的丛书，我们将组织作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读，我们将对今后新出版的丛书进行改版，扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书编写得更好。

在本丛书的出版过程中，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持，在此我们对这些单位再次表示感谢。

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会
2011年10月19日

序

预测控制从20世纪70年代问世以来,因其在处理复杂约束优化控制问题时的卓越能力,已在许多领域的过程控制中得到广泛应用,被认为是唯一能以系统和直观的方式处理多变量约束优化的控制技术,并成为工业过程中最有代表性的先进控制算法。虽然几十年来在预测控制领域中涌现了大量论文和专著,并且许多预测控制商用软件已在各类工业过程中得到成功应用,但完整详细介绍预测控制在大工业过程中所涉及的基础理论和实现技术的专著为数不多。从事工业过程控制的科技人员不但希望能够应用成熟的预测控制软件在生产过程中取得效益,而且更希望了解预测控制工业应用的系统构架、基本原理、具体算法和实现技术,以便全面地掌握工业预测控制的原理和技术,主动地根据实际要求研发有效的预测控制系统。丁宝苍博士的这本专著就是为适应这一要求撰写的。

目前,大工业过程的优化控制均采用多层递阶结构,预测控制一般用于该递阶结构中的动态控制层,其设定值通常由上层工艺优化给出。但在实际应用中,由于生产环节中存在诸多不确定性,由工艺优化得到的设定值未必能实现提高经济效益、节能降耗的目标。要使预测控制更好地发挥作用,不仅要解决设定值如何跟踪的问题,还要解决设定值如何优化的问题,研究包含设定值优化和设定值跟踪的双层结构预测控制正体现了工程应用的这一实际需求。虽然近年来对于双层结构预测控制的研究时有报道,但在理论方面的进展不大,关于双层结构预测控制系统的无静差特性和动态稳定性的结论甚少。这里很重要的一个原因就是目前的文献中尚缺乏来自实际应用的工业双层结构预测控制的完整描述。

本书根据作者近年来的科研成果和应用实践,从科学原理、整体技术、理论要点、实施细节诸方面对双层结构预测控制这一工业预测控制的主流技术进行了全面的介绍,旨在搭建工程实践与理论之间的桥梁,以此促进工业预测控制技术在我国的研究与应用。书中围绕双层结构预测控制的框架,详细地阐述了工业预测控制所涉及的基础理论和应用技术,包括模型辨识、状态估计、开环预测、稳态目标计算、动态控制实现等。特别要提出的是,作者对稳态目标计算中可行性判别、优先级设置、软约束处理等实用技术做了深入的探讨,融合了满意控制的理念,十分符合预测控制在工业应用中的实际状况。此外,作者还通过总结大量文献并结合自己的理解和构造,颇具特色地介绍了双层结构预测控制系统的理论性质,这是对近年来工业双层结构预测控制理论最集中、完整的总结。

作者丁宝苍博士早期曾参加过预测控制的工业应用项目,从2000年到上海交通大学攻读博士学位起,长期从事预测控制系统稳定性及鲁棒预测控制等方面的研

究，发表了不少高质量的论文，并出版了多部专著。近年来，作者又积极投入工业预测控制的理论研究、软件开发和工业应用中，取得了不少成果，本书就是他在这些研究积累和应用经验的基础上完成的。希望本书的出版能从实际应用角度为读者提供工业预测控制理论和技术的新思路，帮助读者了解工业预测控制的实现技术和将要面临的理论挑战，从而为推动预测控制在我国工业领域的研究和应用做出贡献。

席裕庚
上海交通大学
2015年11月

前 言

模型预测控制 (MPC) 是 20 世纪 70 年代出现的一类计算机控制策略, 已在全球炼油、化工等行业的数千个复杂装置中得到成功应用, 并取得了巨大的经济效益。MPC 已被公认为处理多变量约束控制问题的标准, 成为工业过程控制领域最受青睐的先进控制策略, 它是继 PID 控制之后应用最广泛最有效的控制策略。MPC 的优势在于它能够平稳地运行在多约束条件的某些边界上, 即“卡边”运行, 这是能够产生经济效益的关键。目前, 国际上专门从事 MPC 技术服务的公司有几十家, 很多大型石油公司都有专业的技术人员负责 MPC/先进过程控制的工作, 很多国外的商品化软件包无论在技术体系上还是工程经验上都有独到之处。然而, MPC 在我国的应用深度和广度与国外相比有较大差距。

MPC 的工程实施是一个系统工程, 涉及模型辨识、信号滤波、数学规划、多变量控制、状态估计等诸多科学问题, 工程实施的关键在于相关技术的完备性及技术人员的经验。本书针对工业 MPC 中的主流技术即双层结构 MPC 进行详细的阐述, 主要有四部分内容: 基础知识与技术, 包括概述 (第 1 章)、状态估计与开环预测 (第 2 章) 和稳态目标计算方法 (第 3 章); 整体实现技术, 包括基于非参数化模型 (第 4、5 章) 和基于状态空间模型 (第 6 章); 模型辨识技术, 包括输入输出模型 (第 7 章) 和状态空间模型 (第 8 章); 其他技术和科学问题, 包括无静差特性 (第 9 章)、非线性和变自由度问题 (第 10 章)。本书的侧重点如下:

- 工业双层 MPC 的科学原理。阐述工业中已经和正在广泛应用的 MPC 技术的共性原理, 故既不同于研究 MPC 稳定性和综合理论等学术问题, 也不具有从经典算法到新近算法的常规逻辑。

- 工业 MPC 的基础知识与技术。将 Kalman 滤波、稳态优化、子空间辨识等相关问题统一放在双层 MPC 的背景下, 重点描述这个统一的基本部分。涵盖工业 MPC 研究者最可能关注的内容, 但不涉及众多 MPC 领域的其他“经典”算法。

- 工业双层 MPC 的整体技术。描述各种技术相互融合的工业 MPC 的整体技术, 故不在经典的定值调节控制问题上赘述。

- 工业 MPC 的理论攻关难点。为读者研究工业 MPC 相关理论问题做铺垫, 读者通过阅读本书, 不仅可以编制工业 MPC 软件, 还可寻找 MPC 稳定性等理论研究的实用新策略。

为了完成上述任务, 本书甚至创造了一些符号或新的表达方式。本书很多章节应为首次在论著中出现。

本人从 1997 年开始接触和学习 MPC, 在攻读硕士期间参加了两个 MPC 工程应

用项目。攻读博士期间，接触和学习了导师席裕庚教授于20世纪90年代提出的满意控制。博士毕业后，一直从事MPC的学术理论研究，推广MPC工业应用。2010年，开始开发工业MPC软件。经过近5年的努力，逐渐形成了本书的主体内容。另外，在这些过程中，我们还学习了Aspen Technology的工业MPC软件，从其中获得了概念和方法。由于Aspen Technology的工业MPC软件具有国际领先水平，因此我们在本书中的阐述与其尽量吻合（主要体现在第4、5、7、10章的部分内容）。当然，Aspen Technology的技术具有保密性，所以我们并未由其得到完整技术细节。撰写本书的目的在于搭建工程实践与理论之间的桥梁，以此促进MPC在我国的研究与应用。全书由本人提笔，西安交通大学的几个研究生负责完成了大部分仿真算例，他们包括谢亚军和陈桥（2014级硕士）、葛良（2013级硕士）、李世卿和高晨波（2012级硕士）、张英和孙耀（2011级硕士）、高海南（2010级硕士）等。本书的主体算法均已经编制成软件，并经过了测试和一些工程应用。除了本人课题组的应用外，主要是外单位采用该软件，在十余个不同的工艺流程上开展或计划开展工作。这些工作有的涉及全厂各段流程的控制，有的是在局部生产单元采用MPC。这些是很有成效的，也鼓舞了我们尽快出版该专著。

感谢国家自然科学基金（资助号：61573269、61174095）的资助。本人还特别感谢博士导师席裕庚教授、博士副导师李少远教授、硕士导师袁璞教授的指导，感谢中国科学院沈阳自动化研究所邹涛研究员的帮助，感谢新奥科技发展有限公司路江鸿、郭敏、董胜龙、段所行等同仁提供的帮助！

尽管本人十分努力地撰写此书，但由于水平有限，书中会有不尽如人意之处，衷心希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

著者 丁宝苍

2015年11月 于 西安交通大学

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 预测控制的发展背景	1
1.2 预测控制的变量选择	2
1.3 工业预测控制的基本结构	4
1.4 常用的数学知识	6
1.4.1 确定性过程	6
1.4.2 随机过程	7
1.4.3 最小二乘估计原理	9
1.5 工业预测控制的数学模型	10
1.5.1 多变量系统模型	11
1.5.2 动态模型与稳态模型	17
1.6 本书内容编排	18
第2章 状态估计与开环预测	20
2.1 投影理论	21
2.1.1 线性最小方差估计和投影	22
2.1.2 新息序列和递推投影公式	24
2.2 Kalman 滤波器和预报器	25
2.2.1 Kalman 滤波器	26
2.2.2 Kalman 预报器	30
2.2.3 时变系统、有色噪声和噪声相关情形	32
2.3 稳态 Kalman 滤波器与预报器	36
2.4 基于阶跃响应模型和 Kalman 滤波器的开环预测	39
2.4.1 稳定型 CV 的开环预测	40
2.4.2 积分型 CV 的开环预测	43
第3章 稳态目标计算方法	45
3.1 实时优化和外部目标	46
3.2 稳态目标计算的经济优化和目标跟踪问题	47
3.2.1 稳态目标计算的经济优化方法	47
3.2.2 稳态目标计算的目标跟踪问题	52

X

3.3	稳态目标计算的可行性判定与软约束调整	53
3.3.1	可行性判定与软约束调整的加权方法	54
3.3.2	可行性判定与软约束调整的优先级方法	57
3.3.3	软约束调整与经济优化的折中	62
3.4	线性与二次规划	63
3.4.1	线性规划算法描述	63
3.4.2	二次规划算法描述	68
第4章	稳定过程的双层结构动态矩阵控制	72
4.1	开环预测模块	73
4.1.1	开环动态与稳态预测值	74
4.1.2	开环预测误差	76
4.2	稳态目标计算模块	76
4.2.1	将约束统一为关于 MV 稳态增量的形式	77
4.2.2	引入辅助变量和松弛变量, 将约束统一为不含 MV 稳态增量的等式形式	79
4.2.3	软约束的优先级排名和每个优先级约束的确定	80
4.2.4	稳态目标计算的可行性阶段	82
4.2.5	稳态目标计算的经济优化阶段: 不含软约束情况	84
4.2.6	稳态目标计算的经济优化阶段: 含最低优先级软约束情况	85
4.3	动态控制模块	86
4.4	动态矩阵控制的等价形式	95
4.4.1	无约束动态矩阵控制	95
4.4.2	二次规划动态矩阵控制	101
第5章	含积分输出的双层结构动态矩阵控制	104
5.1	开环预测模块	105
5.1.1	被控系统数学模型	105
5.1.2	稳定型 CV 部分	106
5.1.3	积分型 CV 部分	107
5.2	稳态目标计算问题描述	110
5.2.1	稳定型 CV 部分的稳态预测模型	110
5.2.2	积分型 CV 部分的稳态模型与约束	111
5.3	多优先级稳态目标计算算法	115
5.3.1	将约束统一表达为关于 MV 稳态增量的形式	115
5.3.2	软约束的优先级排名以及每个优先级约束的确定	118
5.3.3	稳态目标计算的可行性阶段	118
5.3.4	稳态目标计算的经济优化阶段: 不含软约束情况	121
5.3.5	稳态目标计算的经济优化阶段: 含最低优先级软约束情况	122
5.4	动态控制模块	122
5.4.1	动态控制的设定值	124

5.4.2	动态控制算法	125
5.5	仿真算例	127
第6章	基于状态空间模型的双层结构预测控制	139
6.1	干扰模型与可检测性	139
6.1.1	不可测扰动模型	140
6.1.2	增广模型的可检测性	141
6.1.3	积分型输出的扰动模型	144
6.2	开环预测模块	146
6.3	稳态目标计算模块	148
6.3.1	将约束统一表达为关于控制摄动稳态增量的形式	149
6.3.2	稳态目标计算的可行性阶段	151
6.3.3	稳态目标计算的经济优化阶段: 不含软约束情况	153
6.4	动态控制模块	154
6.5	其他备选方案	161
6.5.1	消除稳态工作点	161
6.5.2	将被控输出作为状态	163
6.5.3	将操作变量作为状态	166
6.6	能控性、能观性、可镇定性、可检测性	167
第7章	输入输出模型参数辨识	170
7.1	工业过程的测试	170
7.1.1	测试信号	170
7.1.2	过程测试与数据采集	176
7.1.3	数据预处理	177
7.2	最小二乘参数辨识的基本原理	178
7.3	非参数化输入输出模型辨识	181
7.3.1	待辨识模型的描述	181
7.3.2	数据处理	183
7.3.3	模型辨识方法	185
7.4	仿真研究	195
第8章	状态空间模型的子空间辨识法	199
8.1	子空间辨识常用的投影与矩阵分解理论	199
8.1.1	投影理论	199
8.1.2	QR分解和SVD分解	201
8.2	子空间辨识基本原理	203
8.2.1	问题描述	203
8.2.2	子空间矩阵方程	205
8.2.3	子空间辨识的基本思想	207
8.3	几种典型的开环子空间辨识算法	209

8.3.1	线性回归分析法	209
8.3.2	N4SID 方法	211
8.3.3	PO - MOESP 法	211
8.4	开环辨识实验与仿真研究	212
8.4.1	Shell 重油分馏塔模型	212
8.4.2	CD 播放器机械臂模型	213
8.4.3	燃料电池模型	215
8.4.4	连续搅拌反应釜模型	216
8.4.5	三容水箱系统实验	219
8.5	闭环子空间辨识	223
第9章	双层结构预测控制的无静差特性	228
9.1	基于状态空间模型的目标跟踪问题	228
9.2	基于状态空间模型的动态控制和无静差特性	231
9.3	双层结构动态矩阵控制的无静差特性	238
9.4	无静差控制的基础即动态稳定性的研究现状	239
第10章	双层结构预测控制的非线性和自由度变换	243
10.1	非线性变换方法	243
10.2	变自由度的双层结构预测控制	247
10.3	氯乙烯分馏塔应用实例	248
参考文献		252

第 1 章 绪 论

一种控制理论，如果符合了数学和服务应用的双重标准，就会有发展价值。模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)，简称预测控制，是约束多变量控制的代表性方法，是流程过程先进控制中最值得信赖的方法。

滚动优化策略是 MPC 与预先计算控制律的最优控制的主要区别。这里的滚动优化，是指在每个控制周期都进行优化，这样就能将优化结果建立在过程实际、实时工况的基础上。滚动优化是容易想到的，就像走路和下棋中要滚动优化一样，是一种比较自然的做法，但只有 20 世纪 70 年代计算机在过程控制中得到推广后，在过程控制中具体实现滚动优化才成为现实。MPC 在过程控制中的影响很大，英国学者 J. M. Maciejowski 在其具有很大影响力的专著《Predictive Control with Constraints》(Prentice Hall, 2002) 中，开篇点题地指出：对工业控制工程产生重大影响的先进控制技术唯有预测控制 (原文：“The only advanced control methodology which has made a significant impact on industrial control engineering is predictive control.”；见其 Chapter 1, Introduction 1.1, Motivation)。

对已有的 MPC，是应该区分理论研究和工程算法的 (在第 9 章将进一步称为“MPC 中的数学问题”和“工业 MPC 算法”)。有一段话，绝对不能概括所有的 MPC，但确为工业 MPC 的核心价值观：“在每个采样时刻，基于被控过程的实际测量值，优化从当前时刻开始到未来某个时刻的控制作用序列，使得未来一段时间的被控输出跟踪其设定值的偏差最小；仅实施控制作用序列中的第一个值，下个时刻基于更新的测量值进行同样的优化”。近 40 年来，不管是在工业实践上，还是在理论研究上，MPC 都得到了很大的发展，在有些问题的研究上已经成熟。

1.1 预测控制的发展背景

寻求一种能利用计算机的计算能力有效处理系统约束的优化控制算法促成了预测控制的产生和发展。可以这么说，预测控制起源于工业应用，起源于解决实际控制问题，并且是在工业界首先有成功应用后才有相应的理论研究的。因此沿着已有论文的出版顺序并不能完全了解模型预测控制早期发展的轨迹。——见参考文献 [56]

本书中所涉及的工业过程主要是指流程工业过程，如炼油、化工、冶金、造纸、水泥等工业生产过程，MPC 通常被应用于这些工业过程的某些生产单元。MPC 也称滚动时域控制 (Receding Horizon Control, RHC)，是一类基于模型的控制

算法的总称。预测控制在过去近 40 年中被成功地应用于过程控制领域，已经成为过程工业解决有约束多变量控制问题的标准方法。预测控制可以处理各种约束，并把各种要求以软约束和目标函数等形式结合到控制中加以考虑，它通过提高过程控制的动态性能，减少过程变量的波动幅度，经常将生产过程推进至关键约束条件（质量或经济上的）边界上运行，实现卡边控制。目前，在工程应用中使用最为广泛的是基于输入输出模型结构的 MPC 算法（模型形式包括参数模型和非参数模型），其中最为成功的是美国 Aspen Technology 公司的 DMCplus 技术。

在工业优化控制技术中，预测控制通常位于体系结构的中间层。这有些类似于一所大学，具有学校、学院、系所等从上而下的管理结构，预测控制相当于学院级。预测控制经常被称为多变量协调控制。预测控制是实现上级优化结果的有效手段，原因在于其处理约束的能力；如果采用 PID 等底层控制，则难以处理大量约束，尤其是“卡边”的约束。对一个实际被控过程，如果不采用预测控制等先进控制手段，则可能存在前馈、串级、均匀、比值、分程、超前滞后补偿、运算（加减乘除）、选择逻辑（高选、低选）等各种复杂的组态；而采用预测控制后，这些复杂的组态将大大减少。预测控制基于被控对象的模型，采用数学规划方法，可以“统一”地代替复杂组态的功能，并且能获得更好的效果。

总之，预测控制的主要发展背景（或称主要应用领域、主要优势领域）就是流程过程先进控制和约束多变量控制。

1.2 预测控制的变量选择

一般工业过程的输入输出结构如图 1-1 所示。工业过程的输入通常可分为两类，一类是可控输入（控制输入），也称为操作变量（Manipulated Variable, MV）；另一类是不可控输入，即干扰变量（Disturbance Variable, DV），包含可测干扰和不可测干扰。动态控制的目的是克服 DV 的影响，并使被控变量（Controlled Variable, CV）具有期望的动态特性。对于可测 DV，在其到 CV 的模型已知的前提下即可通过前馈加以补偿，故可测 DV 有时也称为前馈变量（FeedForward variable, FF）。但是，对于不可测 DV，只有其作用到被控过程并反映出来后，才能通过反馈方式抑制其影响。

变量选择就是确定 MV、DV 和 CV。

典型的 MV 包括回流流量、再沸器流量或热负荷、压缩机转速等。MV 通常为常规底层控制回路（PID 为主）的设定值，如果过程动态过于缓慢，则可使用阀位作为 MV，但要考虑阀的非线性问题。MV 的数量受限于实际系统的可自动调节的阀门等执行机构的数量。

典型的 DV 包括进料流量、进料温度、进料组分等。要尽量将所有的可测 DV 都包含在控制器设计中，即便它们在另一单元或 DCS 系统。

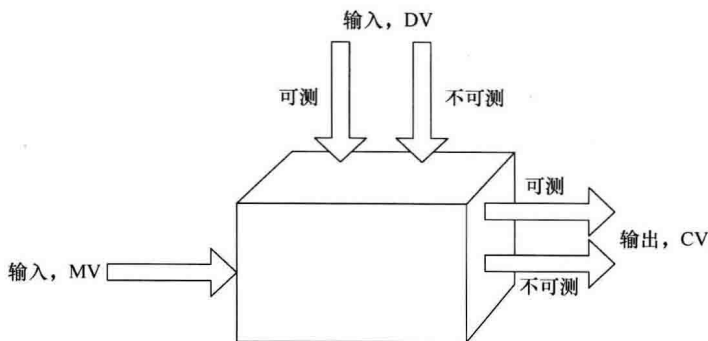


图 1-1 工业过程的输入输出结构

典型的 CV 包括流量、液位、温度、压力、成分等。对同一个变量，其真实值可以作为 CV，而其 PID 设定值可以作为 MV，该 PID 对应的阀门开度也可以作为 CV。MPC 中某些 CV 可能没有跟踪设定值的要求，只要处于一定的范围内即可。CV 分可测与不可测两种，本书仅考虑可测 CV，不可测 CV 的处理可能涉及软测量等技术。通常，CV 的个数不等于 MV。

若系统进入稳态后，对输入做一阶跃变化，某 CV 在一段时间后重新进入到新的稳态，则称此 CV 为稳定（Stable）CV。若系统进入稳态后，对输入做一阶跃变化，某 CV 经过一段时间后保持匀速上升或匀速下降，则称此 CV 为斜坡（Ramp）变量或者积分 CV。在 MPC 的工程实现中，一般可设定积分 CV 与所有输入之间呈现积分特性。

如果一个变量不受被控过程中其他变量的影响，则称其为独立变量（Independent Variable, IndepV），反之称为依赖变量（Dependent Variable, DepV）。故 IndepV 的任何改变都来自被控过程之外，如由控制器改变 MV、人扳动阀门等。MV 和 DV 都是 IndepV，而 CV 一定是 DepV。IndepV 不限于 MV 和 DV，DepV 也不限于 CV。不可能所有的 IndepV 都作为 MV 和 DV，更不可能所有的 DepV 都作为 CV。对一个实际工业过程，MV、DV、CV 的选择要兼顾操作的平稳性、安全性及经济效益的优化等，故是一个复杂的问题，就像医生诊断病情一样，不可能有统一的定律。

以一个分馏塔顶温度、回流流量组成的环节为例。可以选择回流液阀门开度作为 MV，而回流流量和塔顶温度为 CV。如果采用了 PID 控制回流流量，则可以选择回流流量 PID 的设定值作为 MV，而回流流量和塔顶温度及阀门开度都可作为 CV。如果采用了串级 PID 控制塔顶温度，温度 PID 为主回路、流量 PID 为副回路，则可以选择塔顶温度 PID 的设定值为 MV，而回流流量和塔顶温度及阀门开度都可作为 CV。这些就像医生采用了不同的治疗方案一样，药方也会随之不同。