



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

工业控制系统性能评估

苏宏业 谢 磊 著



科学出版社



信息化与工业化两化融合研究与应用

工业控制系统性能评估

苏宏业 谢 磊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书第1章综述了工业控制系统性能评估理论与技术的发展现状和未来趋势。第2章介绍了从跟踪性能角度进行控制回路性能评估的基本方法。第3章~第4章主要介绍了基础控制回路中单回路系统的抗扰控制性能评估方法,特别针对工业中广泛使用的PID控制器,讨论了基准控制器的序列凸优化求解方法。第5章~第7章分别从时滞信息矩阵、线性二次高斯控制以及数据驱动方法讨论了多变量与多回路控制系统的抗扰性能评估方法。第8章~第12章分别从预测控制系统的经济性能评估、模型失配的检测方法、基于迭代学习控制的预测控制系统经济性能改进等角度讨论了先进控制系统的经济性能评估、诊断与优化问题。

本书可作为自动控制专业研究生的教学参考书,同时对从事自动化系统开发与维护的广大工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工业控制系统性能评估/苏宏业,谢磊著. —北京:科学出版社,2016
(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-048866-4

I. ①工… II. ①苏… ②谢… III. ①工业控制系统-系统性能-评估
IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第136623号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:桂伟利
责任印制:张倩/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:300 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然

吴宏鑫 席裕庚 郭雷 周康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员 (按姓氏笔画排序)

于海斌 (中国科学院沈阳自动化研究所) 张纪峰 (中科院数学与系统科学研究院)

王龙 (北京大学) 陈杰 (北京理工大学)

王化祥 (天津大学) 陈虹 (吉林大学)

王红卫 (华中科技大学) 范铠 (上海工业自动化仪表研究院)

王耀南 (湖南大学) 周东华 (清华大学)

卢建刚 (浙江大学) 荣冈 (浙江大学)

朱群雄 (北京化工大学) 段广仁 (哈尔滨工业大学)

乔非 (同济大学) 俞立 (浙江工业大学)

刘飞 (江南大学) 胥布工 (华南理工大学)

刘德荣 (中国科学院自动化研究所) 桂卫华 (中南大学)

关新平 (上海交通大学) 贾磊 (山东大学)

许晓鸣 (上海理工大学) 贾英民 (北京航空航天大学)

孙长银 (北京科技大学) 钱锋 (华东理工大学)

孙彦广 (冶金自动化研究设计院) 徐昕 (国防科学技术大学)

李少远 (上海交通大学) 唐涛 (北京交通大学)

吴敏 (中南大学) 曹建福 (西安交通大学)

邹云 (南京理工大学) 彭瑜 (上海工业自动化仪表研究院)

张化光 (东北大学) 薛安克 (杭州电子科技大学)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路，在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价：产业革命 200 多年以来，占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化，在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的，而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程，从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业，发展新兴产业和高技术产业，推进国民经济信息化”，到党的十六大提出“以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路，大力推进信息化与工业化融合”，充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容，它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化，产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系，大幅度降低资源消耗；在保持经济高速增长和社会发展过程中，有效地解决发展与生态环境之间的矛盾，积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求，特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里，实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路，也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此，中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书，旨在展示两化融合领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向；既注意横向的共性技术的应用研究，又

注意纵向的行业技术的应用研究；既重视“两化融合”的软件技术，也关注相关的硬件技术；特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大专家、学者的积极参与和大力支持，以及丛书编委会的共同努力，本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后，衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对本丛书的厚爱。



中国工程院院士

2010 年 11 月

前 言

随着工业生产规模的不断扩大,控制系统日益成为保障过程运行安全、平稳、高效不可或缺的手段。目前,常规的单回路、多回路等基础控制策略已经难以满足现代工业生产对节能、减排、高效的需求,因此包括预测控制、自适应控制、鲁棒控制和智能控制等在内的先进控制理论与技术日益引起人们的重视,特别是预测控制近些年来已在石油化工等工业过程中获得了广泛应用,帮助企业在 PID 控制的基础上进一步提升竞争力,提升企业的经济效益。

作为工业生产过程的大脑与神经系统,不论是传统的 PID 控制,还是预测控制等先进控制策略,随着时间的推移,过程特性会发生变化,导致控制性能退化、产品质量下降,直接影响了经济效益。国际著名自动化解决方案供应商 Honeywell 公司曾针对流程工业中 26000 个控制回路进行调查,结果显示有 60% 左右的控制回路都存在着较严重的控制性能不良的问题,从而直接导致了能源使用率的大幅度降低,带来了巨大的损耗和浪费。在这种背景下,对控制系统进行自动性能评估与诊断,对于提升控制性能,提高企业的经济效益意义重大。

性能评估的概念源于商业管理与决策,之后被相关学者引入工程领域,目前控制系统性能评估的理论与技术已成为控制科学与工程领域的研究热点。控制性能评估的关键是对过程中可能发生的性能衰退或故障进行实时监控与诊断的技术。自从 Harris 于 1989 年提出利用最小方差控制 (minimum variance control, MVC) 思想评价控制回路性能以来,性能评估研究已从最基本的回路级发展到过程级乃至全厂级。纵观控制系统性能评估研究近二十年的发展,呈现两方面趋势:一方面是待评估对象的规模不断增大,从底层单回路调节控制的评估向多变量系统乃至厂级控制系统经济指标的评估发展;另一方面是评估的针对性越来越强,对特定控制系统的评估越来越准确客观。

无论评价何种控制系统,都离不开基准的选择。基准通常能代表被控对象实现的最优性能,从历史数据得出的经验值,或是根据优化计算得到的理想值都可作为基准。基准的设计与建立需要根据相应的控制目标,求取待评估系统的最佳可实现效果。在工业控制系统基础控制 + 先进控制的分层结构中,基础控制层的输出方差和跟踪误差累积量反映了控制系统的基本控制性能,基本控制性能与产品产量、合格率、能耗等经济因素结合,构成了反映先进控制系统经济性能的经济性能指标。基本控制性能是经济性能的实现基础,经济性能对基本控制性能具有重要的指导意义。针对二者的评估是相辅相成、不可割裂的。

本书凝练了作者长期从事工业控制系统性能评估研究的最新成果。第 1 章综述了工业控制系统性能评估理论与技术的发展现状和未来趋势。第 2 章介绍了从跟踪性能角度进行控制回路性能评估的基本方法。第 3 章、第 4 章主要介绍了基础控制回路中单回路系统的抗扰控制性能评估方法, 特别针对工业中广泛使用的 PID 控制器, 讨论了基准控制器的序列凸优化求解方法。第 5 章 ~ 第 7 章分别从时滞信息矩阵、线性二次高斯控制以及数据驱动方法讨论了多变量与多回路控制系统的抗扰性能评估方法。第 8 章 ~ 第 12 章分别从预测控制系统的经济性能评估、模型失配的检测方法、基于迭代学习控制的预测控制系统经济性能改进等角度讨论了先进控制系统的经济性能评估、诊断与优化问题。

本书涉及的研究成果得到了国家自然科学基金重点项目 (61134007) “多层结构过程控制系统性能实时监控、评估与优化”, 面上项目 (61374121) “双层结构预测控制系统全流程协调与经济性能优化研究” 的支持, 特此致谢。

由于水平所限, 尽管作了很大努力, 书中可能还会存在不妥之处, 望广大读者给予批评指正, 谢谢!

作者

2015 年 12 月于杭州

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 工业控制系统性能评估概述	1
1.1 引言	1
1.2 控制器性能评估流程	4
1.3 控制器性能评估方法与技术	7
1.3.1 最小方差控制基准与 Harris 评估技术	7
1.3.2 LQG 控制性能评估方法	11
1.3.3 用户自定义与基于历史数据的评估技术	17
1.3.4 先进控制系统经济性能评估	19
1.4 控制器性能评估工业应用	21
1.4.1 控制器性能评估工业实施步骤	21
1.4.2 工程化软件简介	23
1.5 结论	26
第 2 章 控制系统跟踪性能评估	28
2.1 性能度量	28
2.2 基于设定值相应数据的控制器评估	30
2.2.1 标准指标	30
2.2.2 评估方法	31
2.2.3 阶跃响应时延的确定	32
2.2.4 应用例子	35
2.3 闲置指标检测缓慢控制	36
2.3.1 控制迟滞的特征描述	37
2.3.2 闲置指标	37
2.3.3 操作条件和参数选择	38
2.3.4 示例	40
2.4 负载扰动抑制性能分析	42
2.4.1 方法	42
2.4.2 操作条件	44
2.4.3 示例	44

2.5	仿真研究比较	46
2.6	本章小结	47
第 3 章	基于初始闭环性能的单回路控制性能评估	49
3.1	引言	49
3.2	基于初始闭环系统的性能基准	49
3.2.1	最小方差基准	50
3.2.2	基于初始闭环系统的性能基准	51
3.2.3	两性能基准分析	52
3.2.4	仿真分析	53
3.3	新基准在多变量控制系统性能评估中的应用	55
3.3.1	交互矩阵与多变量最小方差控制	55
3.3.2	多变量系统性能基准	56
3.4	精馏塔过程分析	58
3.5	本章小结	60
第 4 章	PID 单回路控制性能评估	61
4.1	引言	61
4.2	LTI 系统 PID 控制回路的模型与输出方差	62
4.2.1	离散时间传递函数模型	63
4.2.2	脉冲响应矩阵模型	64
4.2.3	PID 控制器参数与系统输出方差的关系	66
4.3	PID 控制系统的最小可达输出方差	67
4.3.1	最小可达输出方差的传统描述方法	68
4.3.2	改进的问题描述	68
4.3.3	秩一约束与矩阵迹不等式约束分析	72
4.4	基于迭代凸规划的求解算法	74
4.4.1	罚函数法与非凸约束	74
4.4.2	算法步骤	76
4.4.3	算法的初始化与收敛性	76
4.5	仿真研究	78
4.6	本章小结	80
第 5 章	基于时滞信息的多变量控制性能评估	81
5.1	引言	81
5.2	基于时滞信息的性能基准估计	81
5.2.1	多变量最小方差基准的上界	81
5.2.2	交互矩阵的阶次	84

5.2.3 多变量最小方差基准的下界	85
5.3 仿真分析	87
5.4 本章小结	91
第 6 章 基于子空间方法的 LQG 性能评估	92
6.1 引言	92
6.2 子空间辨识方法	93
6.3 LQG 性能指标	96
6.3.1 LQG 性能基准定义	96
6.3.2 LQG 问题的一般求解方法	97
6.4 基于子空间方法的 LQG 性能基准	98
6.5 精馏塔过程分析	101
6.6 基于 LQG 性能基准的控制器优化设计	103
6.6.1 粒子群优化算法	103
6.6.2 基于性能基准的 LQG 控制器设计	104
6.7 溶剂回收过程研究	106
6.8 本章小结	110
第 7 章 基于数据驱动的多工况过程控制性能评估	111
7.1 引言	111
7.2 基于协方差的数据驱动型的性能评估方法	112
7.3 正确选择性能基准数据的必要性	115
7.4 基于综合相似因子的多工况性能评估	116
7.4.1 PCA 相似因子	117
7.4.2 几何距离相似因子	117
7.4.3 综合相似因子	118
7.4.4 多工况过程性能评估步骤	118
7.5 案例分析	119
7.5.1 仿真例子	119
7.5.2 工业例子	120
7.6 本章小结	122
第 8 章 模型不确定条件下预测控制经济性能评估	123
8.1 引言	123
8.2 MPC 经济性能评估	124
8.3 模型不确定性及鲁棒线性规划	126
8.3.1 二次锥规划	126
8.3.2 鲁棒线性规划	126

8.4	模型不确定条件下的约束调整与方差调整	128
8.5	仿真分析	131
8.6	本章小结	133
第 9 章	基于多参数规划的 MPC 稳态层软约束优化处理	134
9.1	引言	134
9.2	问题描述	135
9.3	多参数线性规划	137
9.3.1	参数规划理论分析与算法	137
9.3.2	数值例子	143
9.4	基于多参数线性规划的 MPC 稳态目标计算的软约束处理	146
9.5	仿真分析	149
9.6	本章小结	151
第 10 章	线性多变量系统模型失配检测与定位	152
10.1	引言	152
10.2	MPC 层模型失配检测	153
10.3	有外部激励信号的残差获取方法	156
10.4	无外部激励信号的残差获取方法	158
10.5	仿真实例	160
10.6	工业数据案例研究	165
10.7	本章小结	168
第 11 章	非线性多变量系统模型失配检测与定位	170
11.1	引言	170
11.2	预备知识	170
11.2.1	互信息的定义	170
11.2.2	互信息的估计	171
11.2.3	置信限的获取	172
11.3	模型失配检测	173
11.3.1	非线性相关的直观实例	174
11.3.2	模型失配检测与定位	176
11.3.3	模型失配定位	177
11.4	仿真实例	179
11.4.1	线性 MPC 控制器多变量系统	179
11.4.2	非线性 MPC 控制器多变量系统	180
11.5	工业应用	183
11.6	本章小结	185

第 12 章 基于迭代的工业双层模型预测控制性能优化	186
12.1 引言	186
12.2 经济性能评估的框架	187
12.2.1 经济性能评估问题描述	187
12.2.2 LQG 经济性能评估存在的问题	189
12.3 ILC 提升 MPC 控制系统经济性能的策略	190
12.3.1 基于 ILC 的经济性能设计 (EPD) 问题求解	190
12.3.2 改进方差的灵敏度分析	192
12.3.3 ILC 的收敛性分析	196
12.4 仿真测试	197
12.4.1 单输入单输出系统	198
12.4.2 多输入多输出系统	201
12.5 本章小结	205
12.6 本章附录	205
参考文献	207
索引	217

第 1 章 工业控制系统性能评估概述

1.1 引言

长期以来,传统的 PID 控制策略在流程工业过程控制中得到了充分应用。与此同时,自动控制工作者致力于各种条件下工业过程控制策略的研究,提出了多种多样的先进、复杂控制算法,如自适应控制、鲁棒控制和智能控制等,将控制理论研究不断推向前进。而以预测控制为代表的先进控制技术,近些年来已在流程工业过程获得广泛应用,成为企业在 PID 控制基础上进一步提升竞争力,实现高效、优质、安全生产和获得更大经济效益的重要手段。同时人们也普遍认识到,预测控制等先进控制策略在运行初期具有比传统控制更优的控制效果,但是随着时间的推移,控制性能会很快退化,导致产品质量下降、资源浪费,使企业蒙受损失,甚至不得不切换到传统 PID 控制。国际著名自动化整体解决方案供应商 Honeywell 公司曾针对流程工业中 26000 个控制回路进行调查,统计分析结果显示有 60% 左右的控制回路都存在着较严重的控制性能不良的问题,从而直接导致了能源使用率的大幅度降低,带来了巨大的损耗和浪费。在这种背景下,实时监控并评估控制系统的性能,使其保持较好的控制水平对企业的发展意义重大。

然而,随着复杂工业过程系统的规模日益庞大,传统的人工方法已无法监控成百上千条控制回路的性能,而这些控制回路的性能变化对产品质量、资源消耗和经济效益具有重大影响。因此,如何在控制系统运行时获知有关控制器的性能信息,从而识别、诊断过程控制性能的状况和存在的问题并加以处理,成为企业和控制工程师普遍关注的问题。

控制系统性能评估与监控 (control performance assessment & monitoring, CPA&M) 技术作为当今过程控制界最受关注的研究方向之一,涉及控制理论、系统辨识、计算机技术、信号处理和概率统计等学科。其中 CPA 是指对能够反映系统控制性能的统计值进行实时估计和计算,CPM 是指对能够反映系统控制性能的统计值随着时间的变化而变化的趋势和状态进行监控。但一般而言这两个术语并没有明确的区分,常常混淆在一起使用。其他类似的术语还有回路监控 (loop auditing) 与控制回路管理 (control loop management) 等。CPA&M 技术可追溯到 20 世纪六七十年代 Åström 的工作,但直到 1989 年 Harris 发表了利用最小方差控制 (minimum variance control, MVC) 进行 SISO 系统方差性能的评估后,CPA&M 技术才吸引了大批学者进行研究,获得快速发展,每年有许多重要国际会议都将其

列为专门议题 (如美国 ACC 会议、化工过程控制会议、欧洲控制会议、IFAC 大会等), 迅速成为控制领域研究的一个热点。

CPA&M 的一般过程是: 针对工业过程系统待评估的控制性能, 利用过程数据和模型辨识等技术, 寻找一个可供实际控制器参照的最佳性能控制器基准, 然后利用过程数据测量实际控制器的性能参数, 将其和基准控制器的性能进行比较, 给出实际控制器的性能优劣的评价, 如果控制性能下降或恶化, 可进一步分析诊断性能异常/恶化的原因, 提供其性能提高的可能途径和建议。根据不同的评估目标, 选择、设计评估基准是 CPA&M 的关键, 考虑流程工业控制对象动力学机理的复杂性, 通常要求性能基准客观、简单, 容易通过分析过程运行数据自动获得, 尽可能少地依赖于被控对象的模型信息。其中, 控制性能基准的选择和设计、由执行机构 (如控制阀异常或故障) 等引起的过程振荡性能的监控诊断, 是 CPA&M 技术的关键环节, 也是当前研究的核心和成果最为集中的内容。

作为新兴的监控和评估工业过程控制性能的有效手段, 控制系统性能评估与监控技术能在线检测系统控制性能的变化, 诊断性能下降的根源, 使其保持在较优的控制水平, 已成为维护现代流程工业自动化系统运行性能的主要技术。目前, 国际上, 该领域的主要研究成果已运用于石油化工、造纸、冶炼以及水处理等多个流程工业领域的跨国企业, 带来的效益非常可观, 深受企业和控制工程师的密切关注。

二十年来, 理论界和工程界的学者专家已经提出了很多控制器性能评估的方法, 下面简要介绍性能评估领域中一些主要的研究方法及其发展现状。在介绍具体的性能评估方法之前, 先阐述一般形式的控制性能指标 (control performance index, CPI)。

控制器的性能是指其处理被控变量同期望设定值之间偏差的能力。如果干扰是确定性扰动, 可以采用传统的性能指标, 如上升时间、调节时间、超调量、静态误差、误差积分等; 在工业过程控制中, 干扰往往是随机性扰动, 所以在性能评估领域中, 最广泛采用的控制性能指标是输出方差, 这是因为输出方差与产品的质量以及利润有着非常直接的关系。如果被控变量的方差超过了设定标准, 就会对产品质量乃至利润造成很大的影响, 给企业带来损失。在性能评估中, 一般采用如下的性能指标形式:

$$\eta = \frac{J_{\text{des}}}{J_{\text{act}}} \quad (1.1)$$

其中 J_{des} 是一个理想, 最优的或者期望的性能基准; 而 J_{act} 是从控制回路输入输出数据中计算得到的实际性能。

Harris 首先提出用最小方差控制来评价单回路系统控制性能的思想, 即以最小方差控制器作用下的输出方差作为单变量控制器性能下限, 将实际系统的输出

方差与这个最小方差进行比较,得到评价控制系统性能的 Harris 指标。该指标的范围为 $[0, 1]$,越接近于 1,表示系统的控制性能越好,反之性能越差。最小方差基准不需要附加试验,只需要知道过程时滞参数,就可以从日常的闭环操作数据中估计出来。

在 Harris 工作的基础上,众多学者将 MVC 基准的评估方法推广到各种控制结构及系统。Desborouogh、Harris、Stanfeljet 基于最小方差基准对前馈反馈控制系统进行了研究,得知在前馈作用下的最小方差有两部分组成,为可测干扰和不可测干扰所引起的最小方差,进而能够区分出系统输出的方差主要是由前馈还是反馈造成的。Tyler 和 Morari 用最小方差基准对非最小相位的单变量系统进行了评估。Ko 和 Edgar 对 Harris 指标进行了改进,使它将内回路设定点的改变也考虑在内,对串级控制问题进行了研究。Huang、Olaleye、Huang、Tamayo 对时变过程用最小方差基准进行了评估,建立起了线性时变系统性能评估的框架。Harris、Huang、Shah、Kwok 将单变量最小方差基准引入到多变量过程中。在单变量系统中,时滞是控制系统性能评估重要的因素,对于多变量系统,单变量系统中的标量形式的过程时滞被推广为关联矩阵。关联矩阵的构造需要利用时滞有关知识,从闭环数据中估计,算法较为复杂。Huang、Shah、Fujiii 完整地给出了估计关联矩阵的方法。在知道关联矩阵的情况下,可以得到多变量系统的最小方差性能下限。之后 Huang 提出了一种有效稳定的滤波与相关性分析算法 (filtering and correlation analysis algorithm, FCOR) 用于估计最小方差基准,并将其推广到多变量过程。Huang 和 Shah 把最小方差控制基准扩展到前馈加反馈的多变量系统性能评估中。

要获得多变量最小方差基准,需要得到过程的关联矩阵,但是为了避免计算关联矩阵的复杂性,McNabb 和 Qin 研究了在状态空间框架下的最小方差控制基准。Ko 和 Edgar 利用过程的 Markov 参数和闭环运行数据,给出了基于 MVC 基准的性能评估方法,只需要获得过程的时滞阶次信息。Shah、Patwardhan、Huang 提出一个多变量脉冲响应曲线法来评估多变量系统性能,只需要过程的 Markov 参数,无需关联矩阵,从曲线上可以得到系统的调节时间,衰减率等信息,弥补了 MVC 基准只评估随机性能的不足,不过获知过程的 Markov 参数本质上与过程的关联矩阵是相同的。Huang、Ding、Thornhill 提出一个基于预测误差的多变量性能评估方法,该方法只需要关联矩阵的阶次,而不必构造出关联矩阵,给出一个实用的次优多变量 MVC 控制基准,但基于预测误差的方法本质上仍然等同于最小方差的性能指标。

最近几年,很多专家学者从工程应用实际出发,提出许多基于数据驱动的性能评估方法。例如,McNabb 和 Qin 提出协方差监控及广义特征值分析来区分出性能显著变差或变好的方向和子空间,建立了性能评估与统计的故障分析之间的联系。Yu 和 Qin 在此基础上作进一步的研究,用历史协方差基准对多变量控制

器进行统计性能监控。Zhang 和 Li 提出了一种基于主元分析 (principal component analysis, PCA) 模型基准的控制器性能评估方法, 实质是基于历史数据建立 PCA 模型基准。AlGhazzawl 和 Lennox 研究了用多变量统计过程控制技术来监控工业 MPC 控制系统, 给出了一种基于 PCA 和 PLS 模型的多变量统计量指标图的控制系统性能监控方法。这种方法的优点是只需要来自于生产过程的日常操作数据, 不需更多的先验知识。

纵观控制系统性能评估研究近二十年的发展, 呈现两方面发展趋势: 从底层单回路调节控制的评估向上层经济指标的优化发展; 模型更细化, 针对性越来越强, 评估越来越准确。尽管不少性能评估算法和指标已在工业现场得到有效应用, 不仅辅助了过程监测, 还指导了控制系统整定和维护。然而, 更深入的研究仍然值得关注。

近几年来, 非线性与时变系统的性能评估研究比较活跃。Harris 和 Yu 利用 NARMAX 模型对一类非线性动态随机系统建立了性能基准; 鉴于神经网络与数据挖掘等人工智能方法处理非线性问题的优势, Majecki 和 Grimbale 将广义最小方差评估理论推广到非线性系统。以上方法仍有待发展, 以解决非线性系统的设定值跟踪评估与前馈控制性能评估等问题。时变系统尤其是扰动时变的系统在过程工业中极为常见。对于受分段时变扰动影响的系统, 性能评估基准的建立转化为寻找改进最优 LTI 控制器的问题, 通过求解线性矩阵不等式得到控制性能的极值。

各类性能评估算法由于利用的控制系统模型不同, 鲁棒性也不同。实际对象与模型的匹配程度, 会严重影响评价指标的准确程度。如何在模型精度要求不高的情况下, 得出真实客观的评估结果? 另外, 控制结构敏感性与自由度的分析也是最近得到重视的分支, Iino 提出的敏感性、控制自由度等概念, 能衡量分层 MPC 监督控制结构下, 系统特征参数的微小改变对回路最优操作点的影响大小, 以及 MIMO 控制系统变量配对的合理性。

1.2 控制器性能评估流程

控制器性能评估与监控已成为保证过程控制有效的必要措施, 是工厂经济高效运行的一项重要技术。评估是指在一个确定时间点上估计出表示控制器性能的统计量。监控是指时刻监视反映控制器性能的统计量的变化情况。控制器性能评估与监控包括如下三个方面:

- (1) 确定系统的控制能力;
- (2) 定义一个性能基准, 然后将系统的性能与基准性能相比, 给出控制器性能进一步提高的可能性及裕度;
- (3) 对反映控制器性能的统计量不断进行监控, 发现控制系统性能变化。