网络信息模式下复杂工业过程建模与控制

柴天佑 [1,2] 李少远 [3] 王宏 [1,4]

在现代工业控制中, 过程控制是一历史较为久远的分支. 几十年来, 工业过程控制取得了惊人的发展, 无论是在传统工业过程改造中, 还是在大规模的结构复杂的工业生产过程中, 过程控制对于提高产品质量以及节省能源等均起着十分重要的作用. 随着现代工业生产的发展, 分布控制系统、现场总线等技术的广泛应用和信息网络的建立, 控制系统的结构越来越复杂, 在炼钢、轧钢、炼油、发电、造纸、化工等生产过程中, 系统由许多局部子系统组成, 在子系统之间, 不但有物质、能量的流通, 而且有大量的信息流通, 子系统之间存在着复杂的关联. 系统的外部环境和内部干扰是多变的和不确定的. 同时对生产过程的优化目标提出了越来越高的要求, 除了对单个生产装置或局部子系统实现优化控制外, 追求整个系统的全局优化已是提高产品质量和降低成本的关键.

传统的控制理论和方法一般将这类控制系统看作是一个多输入多输出的系统, 用多变量系统的控制来概括, 但是随着系统维数的不断增加, 子系统之间关联复杂性的不断加强, 采用传统的控制理论和方法已经不满足现代工业生产实时性发展的需要. 现有的控制理论一般都是在一个回路中考虑问题, 不考虑回路之间的关联, 随着系统结构的复杂性的提高, 以及工业生产过程的上述新特点, 对现有的控制理论和方法提出了新的挑战. 同时, 大型的工业系统在结构上本身就存在着分布性, 在网络技术发展的推动下, 控制系统也逐渐由原来的集中式模式转向分布式实现, 在网络信息模式下实现复杂工业系统过程的建模与控制既是实现大型工业系统控制的需求, 在控制系统模式转变过程中区别于传统的集中式控制也需要发展一些新的理论方法.

本专集的目的是希望过程控制领域的专家学者能够关注复杂工业系统的发展需求, 在控制系统的结构设计与控制理论方法方面进行积极探索, 交流新的成果, 启迪新的思路, 深入了解工业过程控制系统的特点与要求, 不断完善和发展针对复杂工业系统的建模、控制与优化的理论方法, 为推动和提高工业系统的信息化与自动化发展水平做出积极的贡献.

在 2012 年中国过程控制会议的投稿论文中, 经推荐和审稿专家几轮评审最后专集录用了 39 篇, 因版面限制, 本期作为专集发表 29 篇论文, 集中反映了近年来在复杂工业过程控制方面的最新成果, 以供广大科技工作者了解和研讨. 其他 10 篇论文也将在本刊其他期中陆续发表.

复杂工业过程的建模与故障诊断: 汤健等对工业大系统时变特性需要软测量模型具有自适应能力, 常用的滑动窗口和每样本递推更新的在线建模方法难以有效地在建模精度和建模速度间进行均衡的问题, 提出了一种在线核偏最小二乘 KPLS 建模方法, 这也是近年来基于数据进行复杂系统建模研究的热点问题. 赵春晖等和樊继聪等研究了多变量过程故障诊断问题, 对于主成分分析、独立成分分析等统计学习方法进行了系统性的研究工作, 并应用于复杂工业系统的故障分析, 提出了两种联合的独立成分分析监测指标, 在仿真数据中验证了联合指标的优势, 并在 TE 过程中验证了其检测和诊断特性. 陈晓岑等为了提高双框架磁悬浮控制力矩陀螺的框架伺服系统 (多变量、非线性且强耦合性的复杂系统) 的控制精度, 提出了一种基于电流模式的动态逆系统解耦方法, 并采用自适应滑模控制器提高系统的跟踪特性. 上述四篇论文获得了张钟俊优秀论文奖.

模型预测控制: 对于复杂工业系统的控制, 模型预测控制仍是大家广泛关注的热点问题. 蔡星等对串联系统的分布式预测控制进行研究, 给出了一种提高系统性能的基于串联结构非迭代的分布式预测控制算法, 并结合氧化铝碳分解这一串联过程仿真验证算法的有效性. 邹涛等对多变量非方系统的预测控制系统可能出现输出静差和输入稳态值不确定问题, 从控制输入与被控输出稳态关系入手, 将上述问题归结为非齐次线性方程组的相容性与唯一性问题. 通过非齐次方程组解的判定定理分析了多变量预测控制系统稳态解出现相容性和唯一性问题的原因, 并由此给出了双层结构控制策略及解决方案. 刘琳琳等在分析多层次多模型预测控制系统各通道非线性程度对模型层次切换, 以及层次间模型切换过程对系统动态特性的影响的基础上, 提出了一种新的模型切换方法以改善多输入多输出非线性系统工况大范围跳变时的动态性能, 并通过仿真将此方法应用到多输入多输出 pH 中和过程. 蒋亚丽等针对输出采样周期是输入更新周期倍的多速率分段线性系统, 提出了保证稳定性的显式预测控制器设计方法. 目的是能够有效降低多速率分段线性系统的在

收稿日期 2013-04-02 Manuscript received April 2, 2013
DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00469
引用格式 柴天佑, 李少远, 王宏. 网络信息模式下复杂工业过程建模与控制. 自动化学报, 2013, **39**(5): 469−470
Citation Chai Tian-You, Li Shao-Yuan, Wang Hong. Modeling and control for complex industrial processes in networked information. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 469−470
1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004, 中国 2. 东北大学自动化研究中心 沈阳 110004, 中国 3. 上海交通大学自动化系 上海 200240, 中国 4. 曼彻斯特大学控制系统中心 曼彻斯特 M60 1QD, 英国
1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries (Northeastern University), Shenyang 110004, China 2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China 3. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China 4. Control Systems Centre, University of Manchester, Manchester M60 1QD, UK

线计算时间, 在保证系统稳定性的同时, 满足其对输入更新速度的要求. 孔小兵等针对双馈式风力发电机的功率控制提出了一种非线性模型预测控制方法, 在目标函数中考虑了现实约束下的经济因素和给定值跟踪能力, 并通过实验验证了所构造的非线性模型预测控制器的有效性. 苏成利等针对一类具有非线性扰动且同时存在多重状态和输入时滞的不确定系统, 提出了鲁棒预测控制器设计的综合方法, 并通过仿真验证了所提方法的有效性.

基于数据的性能评估与故障诊断: 司小胜等针对设备视情维护和预测与健康管理中剩余寿命估计问题, 提出了一种基于扩散过程的非线性退化过程建模方法, 在首达时间的意义下, 推导出了剩余寿命的分布, 通过激光发生器和陀螺仪的退化测量数据验证了所提出的方法的优势, 这篇论文获得了优秀学生论文奖. 王陆等给出了基于数据驱动的子空间模型预测控制方法, 在无先验知识的情况下设计模型结构, 给出了选择用来监督控制器性能的历史数据的准则, 并通过精馏塔仿真对算法进行了验证. 刘苏等给出了一种分散 MPC 经济性能评估的方法. 谢磊等基于初始闭环系统的输出方差和最小方差指标, 提出了一种新的性能评估方法避免在过程时滞变化的情况下最小方差方法可能会得到错误的结论的缺点, 并在精馏塔过程的仿真示例验证了方法的有效性. 李大字等研究了具有线性时变扰动的多变量控制系统性能评价的方法. 田学民等通过预测控制目标优化函数和内模控制结构分析, 把操纵变量和预测误差项纳入到了监控变量集, 并给出了基于协方差基准的在线性能评价指标, 实现了模型预测控制性能的实时监控.

针对过程控制系统的新方法: 赵大勇等针对赤铁矿选矿再磨过程, 提出了一种泵池液位串级模糊控制方法, 在国内某大型赤铁矿选矿厂的实际应用表明, 选矿再磨过程运行平稳, 磨矿产品粒度指标提高了 2.92 %, 取得了显著的应用成效, 这篇论文获得了优秀学生论文奖. 师佳等根据模型预测控制和性能参考模型控制思想, 提出了一种基于 2 维性能参考模型的 2 维模型预测迭代学习控制系统设计方案, 引导迭代学习控制系统收敛到合理的控制性能, 并有效避免系统性能收敛过程中控制输入可能发生的剧烈波动. 陈增强等研究了线性扩张状态观测器的估计能力并且分析了在线性自抗扰控制下闭环系统的稳定性, 并通过分析得出了在扩张状态观测器跟踪误差趋于零的前提下, 在线性子抗扰控制下的闭环系统可以实现对设定信号的精确跟踪以及输入 - 输出有界稳定的结论. 黄淼等针对一类非线性离散时间系统, 提出了一种基于时间序列的多模型自适应控制器. 仿真结果表明该控制器不但具有良好的暂态性能, 较快的控制速度, 而且在相似的控制效果下, 可以极大地减少模型的数量. 陈珺等研究了一类模糊双线性跳变系统的随机镇定问题, 并推导出了保证闭环模糊双线性跳变系统随机稳定的充分条件, 最后, 通过 CSTR 系统的数值示例表明该设计方法的合理性和有效性. 刘月等使用一种奇异系统方法讨论了时滞系统的输出反馈滑模控制问题, 给出了滑动模态稳定及切换面存在的线性矩阵不等式充分性条件, 以及使得系统闭环渐近稳定的静态输出反馈滑模控制器的设计方法. 刘毅等为了及时跟踪非线性化工过程的时变特性, 提出即时递推核学习的在线辨识方法, 以期在保证计算效率的同时, 较传统递推核学习方法能够提高辨识的准确程度, 并通过一时变连续搅拌釜式反应过程的在线辨识过程验证了该方法的有效性.

上述论文大都得到了国家自然科学基金委员会、国家 973、国家 863 以及省市一些项目的资助, 在一些实际系统中得到验证, 丰富了理论研究成果, 显示出复杂工业系统建模、控制与优化研究方向上所具有的广泛前景, 在此对于项目的资助单位和所能提供应用验证的单位一并表示感谢.

客座编委

柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授. IEEE Fellow, IFAC Fellow. 1985 年获得东北大学博士学位, 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制, 流程工业综合自动化理论、方法与技术.
E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn
(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University. IEEE Fellow, IFAC Fellow. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation theory, method and technology of industrial process.)

李少远 上海交通大学自动化系教授, 国家杰出青年基金获得者, 主要研究方向为自适应预测控制, 网络化分布式系统的优化控制及数据驱动系统控制器设计. E-mail: syli@sjtu.edu.cn
LI Shao-Yuan Professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. He was supported by National Outstanding Youth Fund. His research interest covers adaptive predictive control, optimization control of network distributed systems and data driven system controller design.

王 宏 中组部 "千人计划" 教授, 国家特聘专家, IET 和 InstMC Fellow, 长江学者讲座教授, 英国曼彻斯特大学教授. 主要研究方向为非高斯随机系统的随机分布控制, 故障检测与诊断以及在工业过程的应用.
E-mail: Hong.wang@manchester.ac.uk
WANG Hong IET, InstMC Fellow, Professor at the Control Systems Centre, University of Manchester, Manchester, UK, since 2002. His research interest covers stochastic distribution control, fault detection and diagnosis, nonlinear control, and data-based modeling for complex systems.