

生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战

柴天佑^{1,2}

摘要 从控制系统的观点描述了生产制造全流程的控制与运行管理流程, 分析了表征产品的质量、产量、成本、消耗等相关的综合生产指标与控制系统动作之间的联系, 回顾了涉及的控制与优化的研究成果。从基于数学模型、基于数据和基于模型与数据相结合的角度综述了控制与优化方面的研究现状。在此基础上分析了生产制造全流程优化控制对过程控制与运行优化、以及控制系统实现技术的挑战, 分析了实现生产制造全流程优化控制应开展的研究内容。

关键词 生产制造全流程, 综合生产指标, 运行优化控制, 优化控制系统

中图分类号 TP11

Challenges of Optimal Control for Plant-wide Production Processes in Terms of Control and Optimization Theories

CHAI Tian-You^{1,2}

Abstract This paper describes the control and operational management of plant-wide production processes from a viewpoint of control system, and analyzes the relationship between the control system actions and the multiple global production indices that characterise quality, yield, costs, consumptions, etc. The existing research results in the aspects of control and optimization are reviewed. From the angles of mathematical model-based, data-based, and the combination of mathematical model with data-based, the state-of-the-art of control and optimization are summarized. On the basis of the above review, this paper also analyzes the challenging of the optimal control for plant-wide production processes in terms of process control, operational optimization and the realization technique of the control systems. Finally, some research topics are discussed, which may be developed to realize the optimal control of the plant-wide production processes.

Key words Plant-wide production process, multiple global production indices, operational optimal control, optimal control system

近年来, 国内外日趋激烈的市场竞争使得工业生产制造企业对其能耗水平、生产效率、产品质量和生产成本等综合生产指标提出了更高的要求。以能耗指标为例, 在我国国民经济体系中, 工业能耗占我国总能耗的70%左右。据统计, 我国工业单位能源消耗比发达国家高30%以上。能源紧张已逐步成为制约我国工业生产制造业可持续发展的瓶颈因素。鉴于此, 节能降耗已成为我国国民经济战略的一项长期发展方针。我国国民经济和社会发展“十一五”规划纲要中提出“2010年单位国内生产总值能源消耗比‘十五’期末降低20%左右的目标”; 纲要还提

出, 强化能源节约和高效利用的政策导向, 加大节能力度; 通过开发推广节能技术, 实现技术节能。

我国制造业还面临着复杂多变的原料供应、日新月异的技术创新、瞬息万变的市场需求, 处于更加激烈的国际竞争之中。工业企业已经由过去的单纯追求大型化、高速化、连续化, 转向注重提高产品质量、降低生产成本、减少资源消耗和环境污染、可持续发展的轨道上来。十六大报告明确指出:“实现工业化仍然是我国现代化进程中艰巨的历史性任务。信息化是我国加快实现工业化和现代化的必然选择。坚持以信息化带动工业化, 以工业化促进信息化, 走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”。十七大报告也明确指出“加强能源资源节约和生态环境; 增强可持续发展能力”, “发展现代化产业体系, 大力推进信息化与工业化融合, 促进工业由大变强, 振兴装备制造业, 淘汰落后生产能力”。因此, 信息化与工业化融合是提高我国制造业竞争力的必然选择。

工业过程综合自动化技术是信息化与工业化融合的关键, 其内涵是采用信息技术, 围绕生产过程的知识与信息进行重组, 通过生产过程控制与运行管

收稿日期 2009-01-04 收修改稿日期 2009-03-12

Received January 4, 2009; in revised form March 12, 2009

国家重点基础研究发展计划(973计划)(2009CB320601), 国家自然科学基金(60534010, 60821063, 60828007), 高等学校学科创新引智计划项目(B08015)资助

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320601), National Natural Science Foundation of China (60534010, 60821063, 60828007), and the 111 Project (B08015)

1. 东北大学自动化研究中心 沈阳 110004 2. 流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004

1. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004 2. Key Laboratory of Integrated Automaton for Process Industry, Ministry of Education, Shenyang 110004
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00641

理的智能化和集成优化, 提高企业的知识生产力, 实现与产品质量、产量、成本、消耗等密切相关的综合生产指标的优化控制和实现企业管理的扁平化。综合自动化技术受到国际学术界和工业界的广泛关注。2005年的第十六届国际自动控制联合会世界大会特邀报告指出:“为了适应变化的经济环境, 减少消耗, 降低成本, 提高生产效率, 提高运行安全性, 必须对控制、优化、计划与调度以及生产过程管理实现无缝集成”^[1]。《欧洲钢铁工业技术发展指南》指出:“降低生产成本、提高产品质量、减少环境污染和资源消耗只能通过全流程自动控制系统的优化设计来实现”^[2]。

综合自动化的前沿核心技术是生产制造全流程优化控制技术, 其内涵是在市场需求、节能降耗、环保等约束条件下, 通过优化决策产生实现企业综合生产指标(反映企业最终产品的质量、产量、成本、消耗等相关的生产指标)优化的生产制造全流程的运行指标(反映整条生产线的中间产品在运行周期内的质量、效率、能耗、物耗等相关的生产指标)和过程运行控制指标(反映产品在生产设备(或过程)加工过程中的质量、效率与消耗等相关的变量), 通过生产制造全流程运行优化和过程运行控制实现运行指标的优化控制, 进而实现企业综合生产指标优化。

目前, 我国生产制造全流程的运行控制采用金字塔式的人工操作方式, 因此难以实现综合生产指标的优化控制, 造成能耗高、产品质量差、生产成本高、资源消耗大等问题。为了适应变化的经济环境, 节能降耗、提高产品质量和生产效率、降低成本、提高运行安全性、减少环境污染和资源消耗, 必须实现生产制造全流程优化控制。因此, 研究和开发符合国情的生产制造全流程优化控制系统势在必行。

由于全流程优化控制系统的被控对象由生产设备(或过程)变为整条生产线, 其被控对象特性、控制目标、约束、涉及范围及系统的实现结构远远超出已有的控制理论和控制系统设计方法的适用范围, 对工业过程控制与优化提出了新的挑战。

本文在分析了基于数学模型、基于数据和基于模型与数据相结合的过程控制与优化方面研究成果的基础上, 描述了生产制造全流程优化控制对过程控制与运行优化以及控制系统实现技术的挑战, 指出了今后应开展的研究内容。

1 过程控制与优化研究现状

1.1 过程控制

过程控制所涉及的控制理论和控制系统设计方法的研究集中在保证闭环控制回路稳定的条件下,

使被控变量尽可能地跟踪控制系统的设定值。控制理论形成于20世纪40年代, 与其他学科一样, 源于社会实践和科学实践。二次大战期间, 控制理论有了很大发展。1932年, Nyquist频域分析技术和稳定判据产生^[3], 以及1945年的实际应用的Bode图分析方法^[4]和求解闭环特征方程根的简单图解方法—根轨迹方法(1948年)^[5-6]的提出, 标志着自动控制技术开始形成一套完整的、以传递函数为基础的控制系统分析和设计理论。主要研究单输入—单输出、线性定常控制系统的分析和控制器设计问题。这种建立在频率法和根轨迹法基础上的控制理论, 通常被称为经典控制理论。经典控制理论的局限性在于难以有效地应用于时变系统、多变量系统等。

20世纪50年代, 随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的发展与应用, 为适应宇航技术的发展, 控制理论有了重大突破和创新。在此期间, Bellman提出了寻求最优控制的动态规划法^[7]。Kirk证明了极大值原理^[8], 使得最优控制理论得到了极大发展。Kalman将状态空间法引入到系统与控制理论中来, 并提出了能控性、能观性的概念和新的滤波理论^[9]。这些构成了以状态空间法为基础的现代控制理论。

上述控制理论与方法要求被控对象可以用确定性的线性模型描述。由于实际中被控对象的模型参数未知或时变, 或受到未知的随机干扰, 或存在未建模动态等不确定性, 自适应控制、鲁棒控制、模型预测控制等先进控制方法的研究受到广泛关注^[10]。在实际中, 有的被控对象具有强的非线性动态特性, 难以采用上述方法获得满意的控制性能, 因此近年来非线性控制理论与方法的研究受到重视。

由于难以建立工业过程的精确数学模型, 因此难以应用上述以数学模型为基础的控制理论和方法。由于工业过程中可以方便地使用输入、输出与跟踪误差等数据, 以跟踪误差为基础的PID控制器得以广泛应用^[11]。目前, 工业界应用的控制系统大部分采用PID控制技术。其他基于数据的控制方法, 如无模型控制^[12]、学习控制^[13-14]、模糊控制^[15-16]、专家控制(规则控制)^[17]、神经网络控制^[18]、仿人行为的智能控制^[19]等也开始应用于工业过程控制。

复杂工业过程往往具有多变量、强耦合、强非线性、大时延、生产边界条件变化频繁、动态特性随工况变化、难以用数学模型描述等综合复杂特性。由于PID控制器适合于具有线性动态特性的被控对象, 对于具有综合复杂性的工业过程, PID控制器难以取得满意的控制效果。因此, 适合复杂工业过程的基于数据和数学模型相结合的先进控制技术的研究受到控制工程界的广泛关注。针对一类具有非线性

和不确定性、且输出被控变量不能在线直接连续测量的复杂对象, 文献 [20–21] 提出了一种基于智能特征模型的智能控制新方法。针对具有多变量、强耦合、强非线性和不确定性且特性随工况频繁变化的复杂工业过程, 文献 [22–25] 提出了基于多模型切换的智能解耦控制方法。上述控制方法成功应用于复杂工业过程, 取得了满意的控制效果^[25]。

1.2 过程运行优化与反馈控制

从工业工程的角度看, 自动控制或者人工控制的作用不仅仅是使控制系统输出很好地跟踪设定值, 而且要控制整个运行过程, 使反映产品在加工过程中质量、效率与消耗相关的运行指标在目标值范围内。同时要求在保证安全运行的条件下, 尽可能提高反映产品质量与效率的运行指标, 尽可能降低反映产品在加工过程中消耗的运行指标, 实现运行优化^[26–27]。然而, 过去的控制理论与控制系统设计方法的研究都假定可以获得理想的控制回路设定值, 集中在提高反馈控制的效果, 忽略偏离理想设定点的反馈控制不能实现系统的良好运行^[26, 28]。

近年来, 生产设备(或过程)的运行优化和运行控制吸引了学术界和工业界的很多研究者进行研究^[29–30]。由于工业过程运行与行业知识密切相关, 至今没有形成适合各种工业过程的统一的过程运行优化和运行控制方法。目前的过程运行控制和运行优化是结合具体工业过程开展研究的。

石化过程普遍采用的运行优化控制系统的结构如图 1 所示, 由实时优化(Real time optimization, RTO) 和单入单出控制器组成^[31–32]。RTO 采用计划调度产生的有关质量、效率或消耗等相关的变量, 建立经济性能指标, 将与产品在生产加工过程中的质量、效率、能耗、物耗等相关某一变量作为决策变量(即控制系统设定值), 通过精确非线性静态过程模型优化经济性能指标, 产生控制系统设定值。RTO 需要建立过程的稳态模型, $c(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0$, 作为约束方程。优化目标函数 $F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w})$ 一般为经济效益函数, 即

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}} F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \\ \text{s.t. } & c(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 \\ & \mathbf{x} \in X, \quad \mathbf{u} \in U \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 为状态变量, \mathbf{u} 为控制系统设定值, \mathbf{p} 为过程参数, \mathbf{w} 为可测和不可测干扰。

RTO 的一般结构由数据调和、模型更新、稳态优化与校验四部分组成。数据调和是在过程处于稳态时, 利用物料和能量平衡来消除测量误差。调和后的数据用来更新模型的参数, 更新后的模型更加精

确地表示当前的工作点。稳态优化以经济效益函数为目标, 以设备、产品规格、安全和环境、生产管理系统给出的经济指标约束等为约束, 优化求取新的过程稳态变量。优化结果经过监督系统(包括操作员)进行校验, 校验后的结果送给过程控制系统, 作为控制回路的设定值。

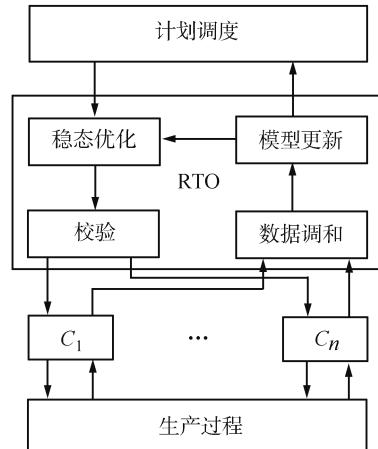


图 1 RTO 系统的一般结构

Fig. 1 General structure of RTO system

由于 RTO 采用静态模型, 当出现工况变化和系统干扰时, 只能等到被控过程达到新的稳态时才能进行优化, 从而优化滞后^[26]。优化周期与控制周期不一致, 因此采用模型预测控制。模型预测控制将控制器的设定值作为决策变量, 建立设定值与输出之间的动态模型。在此基础上, 利用多步预测、滚动优化实现控制器设定值的在线调整, 通过单变量控制器跟踪调整后的设定值实现生产设备(或过程)的运行优化^[26, 29–30]。

生产过程往往是动态的, 如生产负荷频繁变化、产品牌号经常切换、批次间歇生产等, 难以实现在运行条件发生变化时系统的全局优化运行。复杂生产过程往往具有强非线性, 以美国为代表的发达国家的大学和高技术公司正在开展在线动态优化运行和非线性预测控制方法与技术的研究^[33–34]。

对于钢铁、有色金属等工业过程, 还没有形成适用于工业过程的运行优化与运行控制方法。过程运行优化与运行控制方面的研究是结合具体的生产设备(或过程)开展的。

国外高技术公司针对钢铁等工业过程采用预处理手段使原材料成分稳定、生产工况平稳, 研发将运行指标转化为控制回路设定值的工艺模型或经验模型, 进行开环设定控制。

由于我国资源条件和生产条件与国外差别甚大, 原材料成分波动较大, 因此国外研发的控制技术及系统不适合国情, 价格昂贵且技术保密。目前我国的

工业过程运行优化和运行控制基本采用人工控制方式, 难以实现运行优化。

针对我国工业过程的上述问题, 结合选矿、稀土萃取、氧化铝等工业过程的特点, 文献 [31–32, 35] 将建模与控制相集成, 反馈、预测、前馈相结合, 利用数据与知识, 采用案例推理、规则推理、神经网络等智能方法, 提出了过程优化运行的混合智能控制方法。该方法的控制目标是使反映产品在加工过程中质量、效率与消耗相关的指标, 即运行指标在目标值范围内。同时要求在保证安全运行的条件下, 尽可能提高反映产品质量与效率的运行指标, 尽可能降低反映产品在加工过程中消耗的运行指标。因此, 运行优化的目标可表示为

$$\gamma_{\min} \leq \gamma(t) \leq \gamma_{\max}$$

且

$$\min(\gamma_{\max} - \gamma(t)), \quad \gamma(t) \text{ 为质量、效率指标}$$

或

$$\max(\gamma_{\max} - \gamma(t)), \quad \gamma(t) \text{ 为消耗指标}$$

其中, γ_{\max} 和 γ_{\min} 分别为运行指标的上、下限。

如图 2 所示, 该方法由设定层和控制层两层结构组成。设定层由控制回路预设定模型、前馈补偿器、运行指标预报模型、故障诊断与容错控制器组成。其中, 设定模型将运行指标目标值自动转化为控制回路预设定值; 前馈与反馈补偿器根据指标的预测值、实际值与其目标值的误差补偿预设定值; 故障工况诊断与容错控制器根据异常工况给出控制回路设定值的修正量, 从而产生控制回路的优化设定值。控制回路跟踪设定值, 从而将运行指

标控制在目标范围内。上述方法成功应用于赤铁矿选矿厂竖炉、磨矿、磁选以及稀土萃取和氧化铝生产等工业过程, 取得显著成效^[28, 36]。

2 控制与优化理论和方法面临的挑战

到目前为止, 国际上还没有形成实现生产制造全流程的控制与优化的控制理论及控制系统设计方法。目前, 采用如图 3 (见下页) 所示的生产制造全流程的控制与运行管理流程。生产计划部门和调度部门采用人工方式将企业的综合生产指标(反映企业最终产品的质量、产量、成本、消耗等相关的生产指标)从空间和时间两个尺度上转化为生产制造全流程的运行指标(反映整条生产线的中间产品在运行周期内的质量、效率、能耗、物耗等相关的生产指标); 工艺部门的工程师将生产制造全流程的运行指标转化为过程运行控制指标(反映产品在生产设备(或过程)加工过程中的质量、效率与消耗等相关变量); 作业班的运行工程师将运行控制指标转化为过程控制系统的设定值。当市场需求和生产工况发生变化时, 上述部门根据生产实际数据, 自动调整相应指标, 通过控制系统跟踪调整后的设定值, 实现对生产线全流程的控制与管理, 从而将企业的综合生产指标控制在目标范围内。

当市场需求和生产工况发生频繁变化时, 以人工操作为主体的生产计划、调度和工艺技术等部门不能及时准确地调整相应的指标, 导致产品质量下降、生产效率降低和能耗增加, 从而无法实现企业综合生产指标的优化控制。要实现对生产制造全流程的优化控制必须解决下列问题:

1) 采用何种控制结构和方案实现综合生产指标、生产制造全流程的运行指标、过程运行控制指

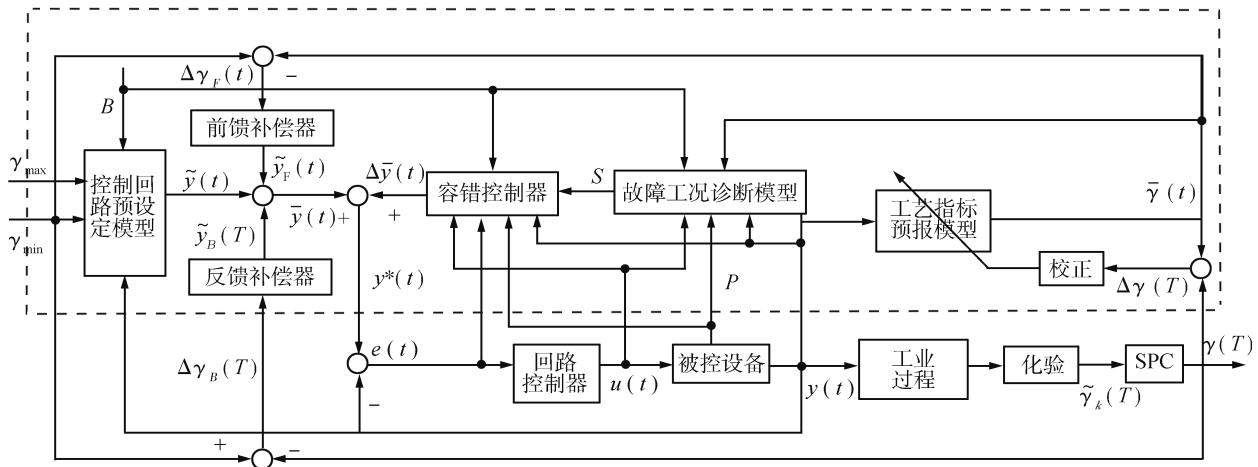


图 2 过程优化运行的混合智能控制结构

Fig. 2 Structure of hybrid intelligent control for process optimal operation

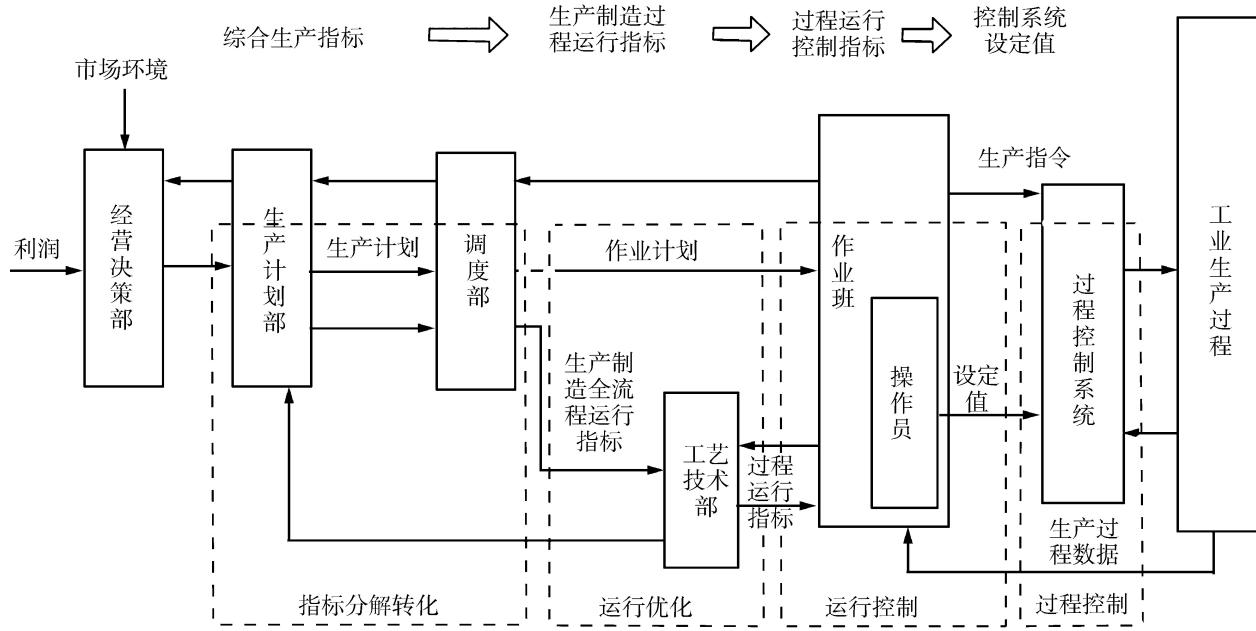


图3 生产制造全流程的控制与运行管理流程图

Fig. 3 Flowchart of control and operational management for the plant-wide production process

标、过程控制系统自动协同, 实现对整条生产线的控制;

- 2) 如何实时确定实现企业综合生产指标优化的生产全流程的运行指标;
- 3) 如何实现难以建立过程模型的生产制造全流程基于数据和知识的智能动态运行优化;
- 4) 如何通过自适应调整控制回路设定值对过程运行指标进行闭环反馈控制;
- 5) 如何设计一个具有安全性、协同性和易用性的生产制造全流程优化控制系统.

解决上述难题的关键就在于解决: 生产制造全流程运行控制, 基于数据和知识的实时智能动态优化等关键科学问题和关于全流程优化控制系统安全性、协同性、易用性的若干技术基础问题.

3 生产制造全流程运行控制与运行优化

生产制造全流程是由多个生产设备(或过程)有机联接而成, 其具有如下综合复杂性: 多变量、变量类型混杂、变量之间强非线性强耦合, 其特性随生产条件变化而变化, 受到原料成分、运行工况、设备状态等多种不确定因素的干扰, 难以用数学模型来描述等. 其全流程优化控制系统涉及到生产计划调度部门将企业综合生产指标分解转化为生产制造全流程运行指标过程、工艺技术部门将生产制造全流程运行指标转化为过程运行控制指标、作业班将过程运行控制指标转化为过程控制系统设定值的多层次多尺度的运行控制与管理过程.

要实现复杂生产制造全流程运行控制首先就要确定其控制性能指标—生产制造全流程的运行指标, 运行指标由反映整条生产线的中间产品在运行周期内的质量 Q 、效率 E 、能耗 W 、物耗 C 等相关的多目标组成, 即

$$\begin{aligned} J_i &\sim \{Q, E, W, C\} \\ J_{\min} < J_i < J_{\max} \quad \text{且} \\ \max(J_i - J_{\min}) \quad J_i : Q, E \\ \text{或} \\ \max(J_{\max} - J_i) \quad J_i : W, C \end{aligned}$$

其中, J_i 为综合生产指标, J_{\min} 为综合生产指标的下限, J_{\max} 为综合生产指标的上限.

运行指标和综合生产指标之间的动态特性具有非线性、强耦合、难以用数学模型描述、受市场环境和生产条件的变化而变化等特征. 企业的综合生产指标是反映企业最终产品的生产指标, 而生产制造全流程的运行指标是反映生产线的中间产品在运行周期内的生产指标. 因此综合生产指标分解转化过程的优化涉及到多层次、多尺度的非线性动态优化难题.

生产制造全流程优化控制系统涉及到全流程的运行优化、过程运行控制、过程控制等不同层次, 运行层又涉及到不同行业的生产工艺和设备运行知识. 如何建立一个统一的控制结构来实现全流程优化控制是对传统的由反馈、前馈所构成的控制系统的挑

战。

过程运行控制与运行优化的目的是在保证安全运行的条件下, 将运行指标控制在目标值范围内, 其中反映中间产品质量、生产效率的指标尽可能地接近目标值的上限, 反映能耗、物耗的指标尽可能地远离目标值的上限。复杂工业过程(或设备)的运行控制指标往往难于在线测量, 与底层控制回路的输出密切相关, 它们之间的动态特性常常具有强非线性、强耦合、难以用精确模型描述、随工况运行条件变化而变化的综合复杂性, 难以采用已有的RTO与模型预测控制方法实现运行优化与运行控制。目前运行优化与运行控制仍采用人工控制方式, 当工况变化频繁时, 不能及时准确地调整设定值, 常常造成故障工况。

工业过程运行控制不仅涉及到底层控制层的反馈控制, 而且涉及到上层运行控制指标的反馈控制。运行控制的底层(回路控制)和上层(回路设定控制)采用不同的控制周期。由于运行控制指标不能在线连续测量, 往往需要对运行工况进行识别和对运行控制指标进行预报。运行工况的识别有时需要采用过程数据、声音、图像等多源信息与无线传感器网络信息融合。运行控制指标往往和产品质量数据的分布相关。运行控制涉及到多层次、不同类型网络环境下的网络化控制问题。因此, 工业过程的运行控制对现有的反馈控制方法和网络化控制方法提出了挑战。回路控制与回路设定控制的复合闭环控制系统的稳定性、收敛性、鲁棒性分析是对现代控制理论中闭环控制系统性能分析方法的挑战。

运行优化除了对相应的运行指标进行常规优化外, 还要考虑到所优化的指标应在其所期望的范围内的最佳位置。这一优化问题对已有的优化理论和方法提出了挑战。

基于数据和知识的运行优化和运行控制方法是解决难以建立过程模型的生产制造全流程运行优化和过程运行控制的有效途径。为此, 应开展下列研究:

1) 生产制造全流程优化控制系统的体系结构研究, 包括: a) 全流程一体化控制系统的模型体系、模型结构与功能; b) 复杂生产过程全流程一体化控制体系结构与功能等。

2) 在市场需求、节能降耗、环保等约束条件下, 实现企业综合生产指标优化的生产制造全流程运行指标的基于数据和知识的智能优化决策方法, 包括: a) 在满足市场需求、节能降耗、环保等约束条件下, 实现企业效益最大化的多时间尺度的生产制造全流程综合生产指标的优化决策方法; b) 生产制造全流程综合生产指标、过程运行指标及控制变量之间的

动态特性研究; c) 综合生产指标转化为生产过程运行指标的动态分解与协调控制方法等。

3) 基于数据和知识的工业过程运行控制理论与方法, 包括: a) 基于图像、声音、数据、知识等信息融合的过程运行控制方法; b) 建模与控制相集成, 惩罚与约束控制相结合的过程运行控制方法; c) 非线性模型预测控制方法及运行控制中的应用研究; d) 基于回路控制与回路设定控制不同速率下的运行控制方法; e) 基于回路控制与设定控制的复合闭环控制系统的性能分析。

4) 基于数据和知识的实时智能动态优化理论和方法, 包括: a) 基于数据和知识的复杂生产制造全流程动态运行优化模型建模方法与性能分析; b) 基于动态运行优化模型的控制回路设定值自适应协调优化理论和方法; c) 基于数据和知识的全流程动态运行优化方法。

5) 多层次不同类型网络环境下网络化运行控制方法, 包括: a) 不同类型网络系统通讯限制下, 信息采集、信号传输与处理过程对控制系统的不确定性因素分析与描述; b) 通讯限制所造成的随机延时特性的建模与估计; c) 随机延时对运行指标模型的不确定性影响分析与建模方法; d) 多层次不同类型网络环境下网络化运行控制方法; f) 不同类型网络环境下不确定性对控制系统性能的影响分析。

4 具有安全性、协同性、易用性的全流程优化控制系统

实现生产全流程的优化控制策略和方法, 必须研究全流程优化控制系统实现的关键技术基础问题。如图4(a)(见下页)所示的传统的工业过程控制系统图与图4(b)全流程优化控制系统相比, 全流程优化控制系统的结构和组成都发生了根本的变化, 其结构涉及控制、运行和管理三个层次, 其组成包括由多种类型网络(设备网、控制网(工业以太网)、企业管理网等)、多种控制计算机(PLC、DCS、管理计算机)、传感器与执行机构组成的硬件平台, 由组态软件、实时数据库、关系数据库等组成的支撑软件平台和采用全流程优化控制方法研制的软件系统(运行控制软件、运行优化软件、指标分解与转换软件)。这种变化对控制系统的安全性、协同性和易用性提出了挑战。

由于全流程优化控制系统涉及到不同种类的计算机、网络和软件系统、传感器与执行机构, 运行环境复杂。故障预报与故障诊断是提高系统安全运行不可缺少的重要部分。如何保证整个系统的安全运行还需要采用基于过程数据、知识和模型的故障预报和故障诊断来研究控制系统的安全分析问题。

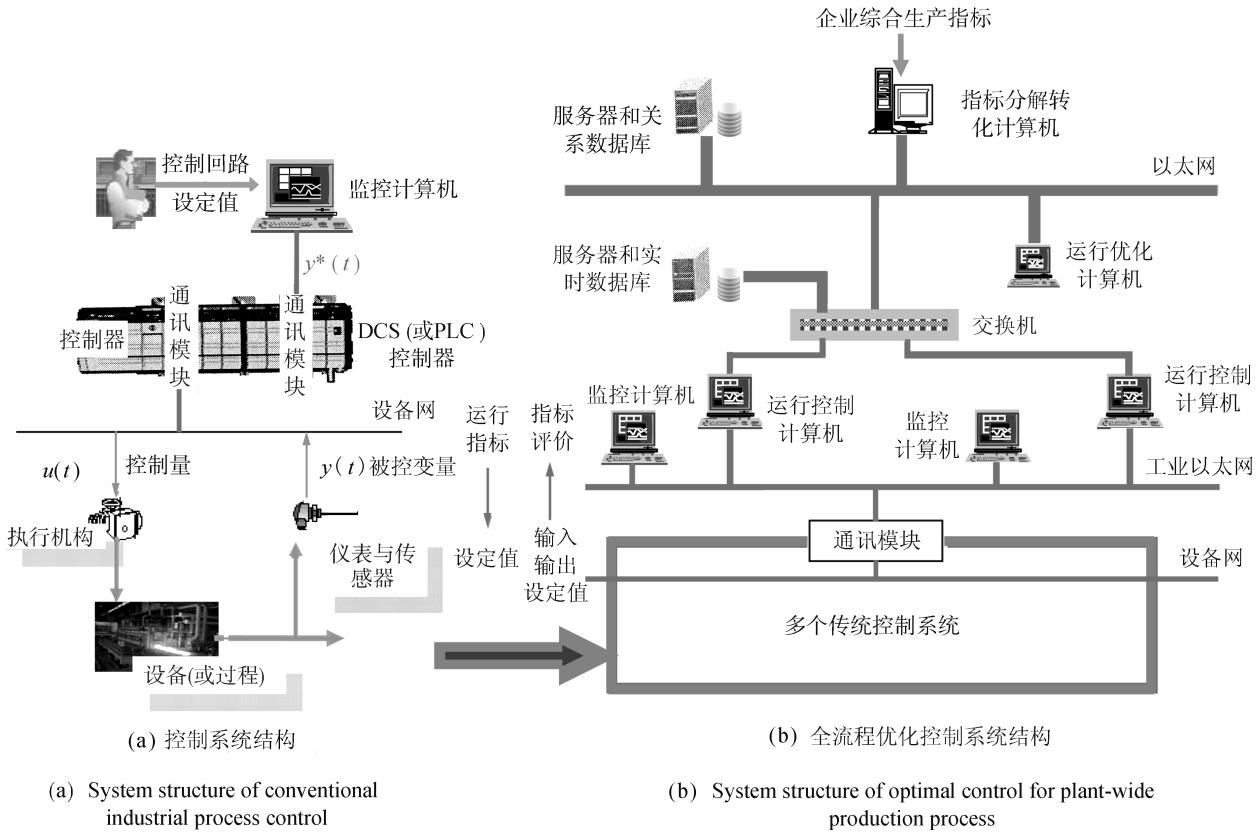


图4 全流程优化控制系统与传统的工业过程控制系统的结构对比
Fig. 4 The optimal control system for plant-wide production process versus the conventional industrial process control system

虽然实际工业过程多种多样, 工艺流程千差万别, 不同工业过程的控制算法也不完全相同, 但为了使用方便, 研制了组态软件作为过程控制的平台软件。为了在石化工业推广 RTO 技术, 国外高技术公司研制了运行优化的软件平台。因为有了软件平台, 研究人员可以结合具体的工业过程在软件平台的基础上研发应用软件, 这样不仅可以提高控制系统的可靠性, 还可以缩减开发周期。为了在各种生产制造全流程广泛应用全流程优化控制技术, 需要研究全流程优化控制的软件平台。具体生产制造全流程千差万别, 研究人员针对具体工业过程以全流程优化控制的软件平台为基础进行二次开发, 开发出各自的应用软件。

由于算法复杂、实时性强, 增加了开发全流程优化控制软件系统过程中出现错误的可能, 加上错误的发生具有离散特点, 导致传统系统的安全分析技术不能直接应用到全流程优化控制软件系统的设计与开发过程, 因此需要研究在全流程优化控制软件系统的设计与开发中的安全性分析技术。

全流程优化控制软件系统需要协同运行控制软

件、运行优化软件与指标分解转化软件, 实现企业全局优化, 这就需要以各种网络通讯为基础实现组态软件、实时数据库、关系数据库等平台软件与运行控制软件、运行优化软件、指标分解转化软件的互通和互操作。

全流程优化控制软件系统的使用者是生产管理者、工艺工程师、运行工程师、操作员等。软件系统的易操作、易理解、易学习对于提高其使用效率至关重要, 对控制软件的易用性提出了更高的要求。

要解决上述问题, 必须开展具有安全性、协同性、易用性的全流程优化控制系统的若干技术基础研究。其中包括:

- 1) 基于过程数据、知识和模型的故障诊断和故障预报的控制系统安全分析方法, 包括: a) 基于定量、半定量数据信息的复杂生产过程故障预报方法; b) 复杂生产过程异常工况的预报方法与诊断理论; c) 基于故障预报的复杂生产过程最优维护时机的确定方法; d) 数据的非线性特征提取理论及非线性故障方向的描述、获取、重构与预测; e) 复杂控制、运行优化与调度过程中的性能评价与偏离最优状况的

诊断。

- 2) 全流程优化控制软件系统设计与开发过程中的安全性分析和安全性验证方法。
- 3) 全流程优化控制软件与平台软件的统一管理、运行机制和实时协同的研究。
- 4) 针对最终用户(管理者、工艺工程师、操作员)的友好、安全、易用的人机交互方法。

5 结论

为提高我国制造业的生产效率和产品质量, 实现节能降耗, 降低生产成本, 提高经济效益及市场竞争力, 迫切需要生产制造全流程优化控制系统, 通过生产制造过程控制和运营管理的智能化与集成优化, 实现与产品质量、产量、成本、消耗等密切相关的综合生产指标的优化控制。全流程优化控制系统的被控对象特性、控制目标、约束、涉及范围及系统的实现结构超出已有的控制理论和控制系统设计方法的适用范围。研究基于数据和知识的运行优化和运行控制方法是解决难以建立过程模型的生产制造全流程运行优化和过程运行控制的有效途径。开展生产制造全流程优化控制系统理论与方法的研究, 不仅可以解决生产制造全流程的控制与优化中的主要科学问题和难点, 而且对解决其他复杂系统控制与优化问题也具有普遍的科学意义, 有助于推动我国控制科学与工程学科的发展, 为使我国在该领域处于国际先进水平做出贡献。同时, 也为我国工业企业采用先进控制系统节能降耗提供科学支撑。

References

- 1 Havlena V, Lu J. A distributed automation framework for plant-wide control, optimization, scheduling and planning. In: Proceedings of the 16th IFAC World Congress. Prague, Czech: Elsevier, 2005. 80–94
- 2 Charbonnier J C. Technology Road Map to Determine the Research Priorities of the European Steel Industry, Technical Report, European Confederation of Iron and Steel Industries, Eurofer, 1999
- 3 Pippard A B. *Response and Stability: An Introduction to the Physical Theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
- 4 Sansen W M C. *Analog Design Essentials*. Berlin: Springer, 2006
- 5 Evans W R. Control system synthesis by root locus method. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1950, **69**(1): 66–69
- 6 Evans G W. Bringing root locus to the classroom. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, **24**(6): 74–81
- 7 Bellman R. *Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press, 1957
- 8 Kirk D E. *Optimal Control Theory: An Introduction*. Dover: Prentice Hall, 1970
- 9 Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, **82**(1): 35–45
- 10 Friedland B. *Advanced Control System Design*. New Jersey: Prentice Hall, 1996
- 11 O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. London: Imperial College Press, 2006
- 12 Han Zhi-Gang, Wang Guo-Qiang. Cascade scheme of model free control law and its application. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(3): 345–352
(韩志刚, 汪国强. 无模型控制律串级形式及其应用. 自动化学报, 2006, **32**(3): 345–352)
- 13 Sugie T, Ono T. An iterative learning control law for dynamical systems. *Automatica*, 1991, **27**(4): 729–732
- 14 Moore K L, Johnson M, Grimble M J. *Iterative Learning Control for Deterministic Systems*. New York: Springer-Verlag, 1993
- 15 Yager R R, Zadeh L A. *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 1992
- 16 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, **1**(2): 146–155
- 17 Astrom K J, Anton J J, Arzen K E. Expert control. *Automatica*, 1986, **22**(3): 277–286
- 18 Psaltis D, Sideris A, Yamamura A A. A multilayered neural network controller. *IEEE Control Systems Magazine*, 1988, **8**(2): 17–21
- 19 Li Zu-Shu, Xu Ming, Zhou Qi-Jian. A novel simulating of human intelligent controller. *Acta Automatica Sinica*, 1990, **16**(6): 503–509
(李祖枢, 徐鸣, 周其鉴. 一种新型的仿人智能控制器. 自动化学报, 1990, **16**(6): 503–509)
- 20 Wu Hong-Xin, Wang Ying-Chun, Xing Yan. Intelligent characteristic model based intelligent control and its applications. *Science in China (Series E)*, 2002, **32**(6): 805–816
(吴宏鑫, 王迎春, 邢琰. 基于智能特征模型的智能控制及应用. 中国科学 E辑, 2002, **32**(6): 805–816)
- 21 Wu Hong-Xin. Intelligent characteristic model and intelligent control. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(z1): 30–37
(吴宏鑫. 智能特征模型和智能控制. 自动化学报, 2002, **28**(z1): 30–37)
- 22 Fu Y, Chai T Y. Nonlinear multivariable adaptive control using multiple models and neural networks. *Automatica*, 2007, **43**(6): 1101–1110
- 23 Fu Y, Chai T Y. Neural-network-based nonlinear adaptive dynamical decoupling control. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, **18**(3): 921–925
- 24 Fu Y, Chai T Y, Yue H. Intelligent control using multiple models and neural network. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2008, **22**(5): 495–509
- 25 Chai Tian-You, Yue Heng. Multivariable intelligent decoupling control system and its application. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(1): 123–131

- 26 Engell S. Feedback control for optimal process operation. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(3): 203–219
- 27 Skogestad S. Plantwide control: the search for the self-optimizing control structure. *Journal of Process Control*, 2000, **10**(5): 487–507
- 28 Chai T Y, Wu F H, Ding J L, Su C Y. Intelligent worksituation fault diagnosis and fault-tolerant system for roasting process of shaft furnace. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2007, **221**(6): 843–855
- 29 Basak K, Abhilash K S, Ganguly S, Saraf D N. On-line optimization of a crude distillation unit with constraints on product properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, **41**(6): 1557–1568
- 30 Marchetti A, Chachuat B, Bonvin D. Real-time operations optimization of continuous processes. In: Proceedings of the 5th International Conference on Chemical Process Control. Lake Tahoe, USA: American Institute of Chemical Engineering, 1996. 156–164
- 31 Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Wang Hong, Su Chun-Yi. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 505–515
(柴天佑, 丁进良, 王宏, 苏春翌. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, **34**(5): 505–515)
- 32 Chai T Y, Yang H. Integrated automation system for rare earth countercurrent extraction process. *Journal of Rare Earths*, 2004, **22**(6): 752–758
- 33 Henson M A. Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **23**(2): 187–202
- 34 Cannon M, Kouvaritakis B, Deshmukh V. Enlargement of polytopic terminal region in NMPC by interpolation and partial invariance. *Automatica*, 2004, **40**(2): 311–317
- 35 Chai T Y, Ding J L. Integrated automation system for hematite ores processing and its applications. *Measurement and Control*, 2006, **39**(5): 140–146
- 36 Chai T Y, Liu J X, Ding J L, Su C Y. Hybrid intelligent control for hematite high intensity magnetic separating process. *Measurement and Control*, 2007, **40**(6): 171–175



柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士。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, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation of industrial process.)