

具有多优先级的多变量实时在线决策支持系统

郑洪宇^{1,2}, 曾静³, 邹涛^{2†}, 胡静涛², 于海斌²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国科学院 沈阳自动化研究所 工业控制网络与系统研究室, 辽宁 沈阳 110016;

3. 沈阳化工大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 生产过程中, 操作人员的操作经验影响生产效益和安全, 为此本文结合双层预测控制中稳态目标计算思想, 提出了一种具有优先级的实时在线决策支持系统. 针对实际生产过程无法确定准确的代价系数的问题, 引入操作优先级的思想, 结合稳态目标计算层被控变量的优先级优化方法, 计算最优操作目标(被控变量和操作变量), 解决了模块多变量操作指导中每层模块无法区分变量重要性的问题, 并说明了二者在结构上的相似性. 最后给出应用本文提及的方法进行决策支持的一个例子, 验证该方法的有效性.

关键词: 多目标分层优化; 模型预测控制; 多优先级; 决策支持

中图分类号: TP273 文献标识码: A

A multi-variable real-time online decision support system with multi-priority

ZHENG Hong-yu^{1,2}, ZENG Jing³, ZOU Tao^{2†}, HU Jing-tao², YU Hai-bin²

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

2. Industrial Control Networks and Systems Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

3. College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang Liaoning 110142, China)

Abstract: Operation experiences of operators affect the enterprise economic benefit and production safety in the production process. Motivated by improving efficiency and safety, a real-time online decision support system with priority is proposed in this paper, combining with the idea of steady-state target calculation (SSTC) in two-layer model predictive control (MPC). For the case that cost coefficient can not be determined accurately, the operation priority optimization method is introduced. the optimal operation target (including controlled variables and manipulated variables) is calculated based on the priority idea of controlled variables of SSTC layer. The problem that the importance of independent variables can't be distinguished for each layer modules in modular multivariable operation guidance is solved, and the similarity of structure between multi-priority optimization and modular multivariable optimization is explained. Finally, an example of decision support system based on the proposed method is taken and the effectiveness of the methods mentioned is proved.

Key words: multi-objective and layered optimization; model predictive control (MPC); multi-priorities; decision support system

1 引言(Introduction)

石油化工是我国的基础性产业, 在国民经济中占有举足轻重的地位. 安全、持续、稳定地生产是石油化工企业的首要任务, 美国化学工程师协会(American Institute of Chemical Engineers, AIChE)化工过程安全中心(Center for Chemical Process Safety, CCPS)在《工艺安全设计指南》中提出8层独立风险控制

架构, 其中操作监控位于第2和第3层, 主要功能是保证安全高效过程生产和预防危险事故, 是流程工业不可或缺的一环^[1]. 虽然石油化工领域自动化水平不断提高, 但操作人员仍然是过程操作的决策制定者和实施操作的参与者. 面对大规模、长生产链的复杂工业过程, 由于专业知识和信息处理能力等因素限制, 操作人员很难快速、全面的识别和解决生产过程中出现

收稿日期: 2017-03-29; 录用日期: 2017-07-21.

† 通信作者. E-mail: zoutao@sia.cn; Tel.: +86 24-23970338.

本文责任编辑: 李少远.

国家重点研发计划(2017YFB0603703), 国家自然科学基金项目(61374112, 61533015, 61503257)资助.

Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFB0603703) and National Nature Science Foundation of China (61374112, 61533015, 61503257).

的各种问题. 据调查统计, 在调查的190件工业领域的事故原因分析中, 人为因素占70%~80%, 其中由于操作人员专业知识不足和操作错误占40%^[2]. 同时, 由于操作人员的经验也是生产效率和产品质量的重要影响因素^[3]. 因此, 系统、科学、有效的操作决策支持对提高生产过程安全、质量至关重要, 国内外针对石油化工领域的操作决策支持系统做了大量研究.

文献[4]综述了22种决策支持方法在各个领域学科的应用, 各方法的优点和局限性及未来的发展方向. 文献[5]详细介绍了一种智能信息支持系统(intelligent information support system, IISS), 辅助操作员执行大型复杂工厂的操作, 该系统的数据处理部分采用概率论中随机变量之间的相关性分析方法. 针对双流法溶出过程, 文献[6]以节能降耗为目标, 提出一种自适应状态转移算法进行操作参数的优化, 计算有利于的操作条件, 为生产提供操作指导. 文献[7]采用CLIPS和Visual C++相结合的程序设计方法, 构建了合成氨合成工段的专家决策支持系统, 实现对合成氨工况参数和设备开启顺序的监视, 该系统软件能够定性的对合成氨进行操作指导. 在石脑油蒸馏过程中, 最佳操作目标是最大化整个过程的产量, 同时满足产品品质, Biscarri F等对能量流优化, 通过数据挖掘的方法, 研究影响效益指标的主要因素, 并建立一个多元线性模型辅助操作人员决策^[8]. 罗雄麟等在线辨识模型增益符号, 根据辨识结果, 诊断乙烯精馏塔的工作状态, 进而改变控制器的正反作用, 保证乙烯精馏塔工作在正常工况^[9]. 基于数据的、开放的、模块化的、黑板架构模式, Vedam H等开发了一个用于协助操作者管理设备运行的决策支持系统Op-Aide^[10], 该系统包括数据采集、过程检测、故障诊断、运行状态评估等模块, 能够定量诊断和评估异常情况, 并成功应用在催化裂化装置. Panteli M和Kirschen D S指出通过提高过程状态估计的精度, 改善图形用户界面(graphical user interface, GUI)的有效性, 高度自动化系统, 广域监视、可视化协作等手段来改善和提高操作人员态势感知水平, 促使操作人员及时做出正确的决策以应对现场事故^[11]. 面向安全苛刻环境, Naderpour M, Lu J和Zhang G建立了用于管理非正常工况的态势感知支持系统(situation awareness support

system, SASS)^[12], 通过美国化学安全委员会报告的一个案例验证了该系统能够很好地协助操作员保持动态情况下的风险在可接受的水平. Biscarri F等采用数据挖掘的方法构建决策支持系统, 在最小化操作成本的同时, 确保产品的产量满足需求, 并应用在石脑油重装装置上^[13]. 文献[14]采用离散事件仿真技术, 在模型求解时运用自适应参数差分进化算法对装炉过程进行优化, 提高生产效率. 针对聚乙烯装置, 张庆武等提出了采用字典顺序式目标规划策略求解多目标优化稳态的模块多变量在线操作指导方法, 即将优化目标按重要等级分配到不同模块, 构成分层的模块结构, 并按一定顺序对各模块进行优化^[15], 求解最优的操作允许集, 该方法充分的体现了优化目标的优先级, 但是没有考虑各优化目标中不同变量的优先级问题.

本文研究基于过程稳态模型的操作决策支持系统. 在模块多变量在线操作指导方法的基础上, 结合双层结构预测控制中稳态优化层的优先级思想^[16-19], 针对被控变量的操作目标采用升序策略优先级优化方法, 特别地, 针对操作变量的多优先级优化, 引入操作优先级概念, 以解决无法准确地确定操作变量代价系数问题. 至此, 通过引入优先级解决模块多变量在线操作指导方法中无法明确区分模块中变量重要性的问题, 使操作决策更为合理.

本文首先简单介绍了模块多变量在线操作指导方法和双层结构预测控制的基本思想和结构; 然后在其基础上详细阐述了基于稳态模型的被控变量和操作变量多优先级的在线操作指导方法; 接着通过仿真和模拟验证了本文提及方法的有效性; 最后小结全文.

2 过程稳态模型(Steady-state model of process)

假设一线性时不变稳定系统(m 个控制输入变量, n 个被控输出变量, l 个可测扰动变量), 被控输出变量 Y_i 在控制输入变量 U_j 的作用下单位阶跃响应系数为 $a_{ij} = [a_{ij}(1) \cdots a_{ij}(N)]^T$, 其中: $i = 1, \cdots, n$, $j = 1, \cdots, m$; 可测扰动 F_l 的作用下单位阶跃响应系数为 $b_{ij} = [b_{ij}(1) \cdots b_{ij}(N)]^T$, 其中: $i = 1, \cdots, n$, $j = 1, \cdots, l$; N 为建模时域, 对于稳定系统而言, $a_{ij}(N) \approx a_{ij}(N+1)$, $b_{ij}(N) \approx b_{ij}(N+1)$. 则系统的阶跃响应模型可以做如下描述^[20]:

$$\begin{bmatrix} Y(k+1|k) \\ Y(k+2|k) \\ \vdots \\ Y(k+N-1|k) \\ Y(k+N|k) \end{bmatrix} = M_S \begin{bmatrix} Y(k|k-1) \\ Y(k+1|k-1) \\ \vdots \\ Y(k+N-2|k-1) \\ Y(k+N-1|k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_{N-1} \\ A_N \end{bmatrix} \Delta U(k) + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{N-1} \\ B_N \end{bmatrix} \Delta F(k), \quad (1)$$

其中:

$$M_S = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_n & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_n & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \end{bmatrix},$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11}(i) & \mathbf{a}_{12}(i) & \cdots & \mathbf{a}_{1m}(i) \\ \mathbf{a}_{21}(i) & \mathbf{a}_{22}(i) & \cdots & \mathbf{a}_{2m}(i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{a}_{n1}(i) & \mathbf{a}_{n2}(i) & \cdots & \mathbf{a}_{nm}(i) \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{11}(i) & \mathbf{b}_{12}(i) & \cdots & \mathbf{b}_{1l}(i) \\ \mathbf{b}_{21}(i) & \mathbf{b}_{22}(i) & \cdots & \mathbf{b}_{2l}(i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{b}_{n1}(i) & \mathbf{b}_{n2}(i) & \cdots & \mathbf{b}_{nl}(i) \end{bmatrix},$$

$Y(k_1|k_2)$ 表示在 k_2 时刻对 k_1 时刻的输出预测值.

对于 $L \geq N$, 有

$$Y(k+L) = Y(k+N-1|k-1) + A_N \sum_{i=0}^{L-N} \Delta U(k+L-N-i) + \sum_{i=1}^{N-1} A_i \Delta U(k+L-i) + B_N \sum_{i=0}^{L-N} \Delta F(k+L-N-i) + \sum_{i=1}^{N-1} B_i \Delta F(k+L-i). \quad (2)$$

假设 $k+M-1$ 时刻开始, ΔU 和 ΔF 保持不变, 则有

$$Y(\infty|k+M-1) = Y(k+M+N-1|k+M-1). \quad (3)$$

令 $L = N + M - 1$, 则

$$Y(\infty|k+M-1) = Y(k+N-1|k-1) + A_N[\Delta U(k) + \cdots + \Delta U(k+M-1)] + B_N[\Delta F(k) + \cdots + \Delta F(k+M-1)]. \quad (4)$$

由式(4), 过程的稳态模型可如下表示:

$$\Delta Y_{SS}(k) = G_u \Delta U_{SS}(k) + G_f \Delta F_{SS}(k), \quad (5)$$

其中下角标SS(steady-state)表示稳态. 过程输入稳态增益矩阵 $G_u = A_N$ 和可测扰动稳态增益矩阵 $G_f = B_N$.

本文所述系统为稳定过程, 对积分过程, 可采用“点”模型方法, 建立过程的问题模型, 详见文献[16-18].

3 模块多变量在线操作指导 (Online operating instruction based on modular multivariable optimization)

为了满足流程工业复杂过程控制的需求(即保证装置运行稳定和安全的同时, 保证产品质量、提高产品收率并降低运营成本), 模块多变量优化的在线操作指导系统框架结构得到广泛应用. 其根据生产过程设置不同等级的优化目标(生产安全、产品质量、产品产量、操作成本等), 并分配到不同的模块中, 进而构成模块化的分层结构. 模块多变量优化采用字典顺序式目标规划策略^[21], 根据当前时刻系统状态, 优先求解满足高等级模块目标的操作允许集, 并将该操作允许集作为约束单向传递给下一等级模块, 直到所有目标都达到或目标优化不可行(所有自由度耗尽). 常见的约束条件和优化目标有:

3.1 约束条件(Constraints)

3.1.1 被控变量的上下限约束(The upper and lower bounds of the controlled variable)

被控变量的约束分为硬约束和软约束. 硬约束条件通常为确保系统安全运行, 因此不允许有任何破坏硬约束条件的行为, 其约束表达式为

$$Y_{LLL} \leq Y(k) + \Delta Y(k) \leq Y_{HHL}, \quad (6)$$

其中: $Y \in \mathbb{R}^n$ 为被控变量; Δ 表示增量, ΔY 表示被控变量的增量, 以此类推; k 为采样时刻; Y_{HHL} 和 Y_{LLL} 表示被控变量的上限和下限硬约束.

3.1.2 操作变量的上下限约束(The upper and lower bounds of the manipulated variable)

操作变量的约束通常为执行机构的物理特性决定, 不可违背, 其表达式为

$$U_{LL} \leq U(k) + \Delta U(k) \leq U_{HL}, \quad (7)$$

其中: $U \in \mathbb{R}^m$ 为操作变量, U_{HL} 和 U_{LL} 表示操作变量的上限和下限约束.

3.1.3 操作变量的增量约束(Incremental constraints on manipulated variables)

出于执行机构的机械性能以及系统稳定运行方面的考虑, 不希望操作变量剧烈波动, 因此增加操作变量的增量约束, 其表达式如下:

$$\Delta U_{LL} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{HL}, \quad (8)$$

其中 ΔU_{HL} 和 ΔU_{LL} 表示操作变量增量的上限和下限约束.

3.2 优化目标(Optimization targets)

3.2.1 输出缓冲区设置(Output buffer settings)

考虑外界扰动的情况下, 处于约束边界的被控

变量在扰动的作用下可能会违反约束. 因此为确保系统能够处于安全的操作区间, 设置输出缓冲区, 已达到在干扰作用的情况下, 被控变量不违反约束, 如图1. 该模块的优化命题如下:

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \|d_{YH}\|_{w_1}^2 + \|d_{YL}\|_{w_2}^2, \\ \text{s.t.} & \begin{cases} d_{YH} = \begin{cases} Y(k+1) - Y_{HL}, & Y(k+1) \geq Y_{HL}, \\ 0, & Y(k+1) < Y_{HL}, \end{cases} \\ d_{YL} = \begin{cases} Y(k+1) - Y_{LL}, & Y(k+1) \leq Y_{LL}, \\ 0, & Y(k+1) > Y_{LL}, \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $Y(k+1) = Y(k) + \Delta Y(k)$; d_{YH} 和 d_{YL} 为上限和下限约束的缓冲区; w_1 和 w_2 分别为被控变量的上下限约束调整的权重.

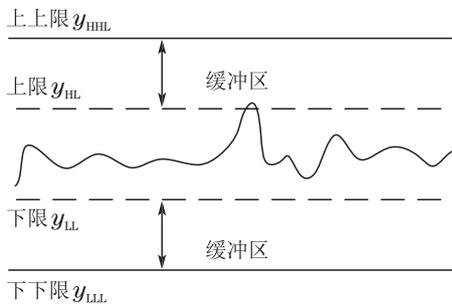


图1 被控变量缓冲区示意图

Fig. 1 The structure of a controlled variable buffer range setting

3.2.2 经济优化(Economic optimization)

经济优化通常采用如下格式:

$$\min J_2 = \alpha^T \Delta U(k) + \beta^T \Delta Y(k), \quad (10)$$

其中 $\alpha^T = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n]$ 和 $\beta^T = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_n]$ 分别表示操作变量和被控变量的代价系数, 即生产过程的成本和效益系数.

3.2.3 工作点优化(Work point optimization)

在实际工业过程中, 某些操作变量的波动对生产过程中产品的质量或者收益有很大的影响, 因此需要对这类操作变量的变化(移动)进行惩罚. 在文献[16]中, 这样的变量称之为最小移动变量. 其优化命题如下:

$$\min J_3 = \gamma^T |\Delta U(k)|, \quad (11)$$

其中: $|\Delta U(k)|$ 表示操作变量增量的绝对值, γ^T 为操作变量变化的权重.

4 基于稳态目标计算的在线决策支持系统 (Online decision support system based on SSTC)

采用字典顺序式目标规划策略的模块多变量在

线操作指导以生产过程中的生产安全、产品质量、产品产量、操作成本为优化目标, 根据各目标的优先级, 优先求解高优先级目标的操作允许集, 并传递到下一级别优化目标, 以此类推, 直至所有的优化目标完成或所有自由度耗尽. 模块多变量在线操作指导没有提及当优化不可行时的解决方案, 且在决策的过程中, 仅考虑优化目标的优先级, 未提及各模块中不同变量的优先级. 本文结合双层结构预测控制中稳态目标计算的优先级思想, 建立基于操作变量和被控变量优先级的决策支持.

4.1 双层结构预测控制(Double-layered predictive control)

预测控制能够很好地处理多变量、约束、纯滞后等问题, 在工业的各个领域均有实际应用. 为了更好的处理不确定的过程扰动和计算最优工作点, 目前工业应用中, 广泛采用一种双层结构的预测控制^[23-24], 其结构如图2所示.

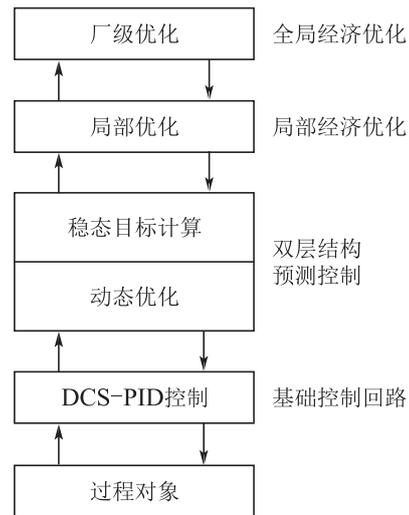


图2 双层结构预测控制结构图

Fig. 2 The structure of hierarchical control function with double-layered predictive control

图2中: 上层为稳态目标计算层, 下层为动态控制层. 稳态目标计算层主要实现在稳态工作点附近进行自动寻优, 计算最优稳态工作点.

动态优化层接收上层稳态目标计算层的最优稳态值, 并作为其设定点, 采用MPC的滚动优化控制策略计算最优的控制序列, 实现在不违背约束条件的基础上使过程达到上层的稳态优化值.

本文提及的决策支持系统借鉴双层结构预测控制中稳态目标计算层的思想, 而非双层结构预测控制的应用. 决策支持系统最优目标的执行部分可以是预测控制, 也可以是非预测控制.

4.2 稳态目标计算的问题描述 (Description of SSTC problem)

稳态目标计算的问题描述可采用如下形式:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U_{SS}} J = [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} \Delta U_{SS}^C(k) \\ |\Delta U_{SS}^{mov}(k)| \end{bmatrix}, \\ \text{s.t.} \begin{cases} \Delta Y_{SS}(k) = G_u \Delta U_{SS}(k) + G_f \Delta F_{SS}(k) + e, \\ Y_{LL} - \varepsilon_2 \leq Y_{SS}(k) + \Delta Y_{SS}(k) \leq Y_{HL} + \varepsilon_1, \\ U_{LL} \leq U_{SS}(k) + \Delta U_{SS}(k) \leq U_{HL}, \\ \Delta U_{LL} \leq \Delta U_{SS}(k) \leq \Delta U_{HL}, \\ 0 \leq \varepsilon_1 \leq Y_{HHL} - Y_{HL}, \\ 0 \leq \varepsilon_2 \leq Y_{LL} - Y_{LLL}. \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

本命题中, 将操作变量分为代价变量和最小移动变量, 并假设同一变量只能为代价变量或最小移动变量. 如需要设置变量为代价变量, 同时也为最小移动变量时, 做相应的变换即可. 其中: C_1 为代价变量的代价系数; C_2 为最小移动变量的惩罚系数; e 为稳态偏差; $\Delta U_{SS}^C(k)$ 表示 k 时刻代价变量的稳态增量; $\Delta U_{SS}^{mov}(k)$ 表示 k 时刻最小移动变量; ε_1 和 ε_2 为约束条件的松弛变量.

针对式(12)的优化问题, 文献[16]提出二阶段法, 即第1步进行可行性判定, 第2步求解优化问题. 本文在此仅做简单介绍, 具体过程请参考相关文献.

1) 可行性判定.

将优化的可行性判定问题转换为约束目标调整问题, 如下:

$$\min J = \|\varepsilon_1\|_{w_3}^2 + \|\varepsilon_2\|_{w_4}^2, \quad (13)$$

其中约束条件同式(12), 在此不做累述. w_3 和 w_4 为松弛变量的权重. 当 $J=0$ 时, 说明式(12)的约束集为非空, 优化问题可行; 当 $J \neq 0$ 时, 说明式(12)的约束集为空, 优化问题不可行, 但通过对约束条件进行调整后, 优化问题可行;

2) 问题求解.

在确定问题可行或通过调整后可行时, 对式(12)进行求解, 得到最优操作点. 注: 由此可以看出, 稳态目标计算在结构上等价于模块多变量优化. 其中: 模块多变量优化中输出缓冲区设置相当于稳态目标计算中的可行性判定部分(约束条件的松弛变量 ε_1 和 ε_2 等价于上限和下限约束的缓冲区 d_{YH} 和 d_{YL}); 经济优化和工作点优化相当于问题求解部分(C_1 等价于 $\alpha^T + G_u^C \beta^T + K_u^C$, C_2 等价于 γ^T). G_u^C 和 K_u^C 用来表示代价变量与操作变量之间的线性关系.

4.3 基于被控变量优先级的优化 (Optimization based on priority of controlled variables)

式(13)中, 当 $J=0$ 时, 可直接计算最优操作目标; 当 $J \neq 0$ 时, 需要对被控变量的约束边界进行调整, 得到可行空间后, 继而求解. 工业生产过程中, 为了保证生产的安全和效益, 被控变量及其约束条件是具有优先级的. 为了适应被控变量的这种需求, 本文通过设置不同的优先级表征各被控变量约束条件的重要性, 采用基于升序优先级策略计算 ε_1 和 ε_2 , 即高优先级的约束条件优先给予满足, 其次为低优先级的约束条件, 并以此类推. 为适于计算, 修改式(13)为LP问题, 并通过引入辅助变量 Z , 将式(12)中的约束统一为不含 ΔU 和 ΔY 的等式形式^[24-25], 便于直接采用单纯性法求解. 其形式如下:

$$\begin{aligned} \min J = W^T Z, \\ \text{s.t. } \theta Z = b. \end{aligned} \quad (14)$$

假设被控变量 Y 的上下限共 p_Y 个不同优先级, 按升序排列依次为 $P_Y^1, P_Y^2, \dots, P_Y^{p_Y}$. 依据升序优先级优化策略, 首先对优先级最高(P_Y^1)的约束进行调整, 此时只考虑优先级为 P_Y^1 的约束条件:

$$\begin{aligned} \min J^1 = W^{1T} Z^1, \\ \text{s.t. } \theta^1 Z^1 = b^1, \end{aligned} \quad (15)$$

其中上角标为1, 表示为上下限约束优先级为 P_Y^1 , 以此类推.

求解式(15)得到优先级为 P_Y^1 的约束条件的松弛变量解 ε_1^1 和 ε_2^1 . 其次, 考虑优先级为 P_Y^2 的约束条件:

$$\begin{aligned} \min J^2 = W^{2T} Z^2, \\ \text{s.t. } \theta^2 Z^2 = b^2. \end{aligned} \quad (16)$$

此时约束优先级为 P_Y^1 的松弛变量 ε_1^1 和 ε_2^1 已经固定, 且不考虑低优先级的约束. 求解式(16), 得到优先级为 P_Y^2 的约束条件的松弛变量解 ε_1^2 和 ε_2^2 . 依上述流程, 直到求得 $\varepsilon_1^{p_Y}$ 和 $\varepsilon_2^{p_Y}$. 进而得到被控变量约束条件的松弛变量解 ε_1^* 和 ε_2^* , 将其代入式(12)并求解, 得到最优操作目标.

4.4 基于操作变量优先级的优化 (Optimization based on priority of manipulate variables)

稳态目标计算中, 首先要确定代价变量的代价系数和最小移动变量的惩罚系数. 代价系数的确定需要准确的数学模型, 模型误差可能导致计算后的最优操作目标与期望不符; 另外当操作条件、工艺条件等因素发生变化时, 固定的代价系数和惩罚系数必定不能符合生产需求. 本文提出一种基于操作变量优先级的优化思想.

由于受优化方向、相关性、被控变量的调节方向

等因素影响,操作变量的操作优先级并不与优先级完全一致,因此,首先要进行操作优先级判断,其过程如下:

1) 初始化设置.

a) 操作变量的优先级设置:假设操作变量 U_i 的优先级为 p_{U_i} , $i = 1, 2, \dots, m$.

b) 操作变量的优化方向设置:优化方向包括最大化、最小化、最小移动.即为提高产品收益,希望该操作变量的最优操作指向(依次为 U_{HL} , U_{LL} , $\Delta U(k) = 0$).

① 当操作变量 U_i 的效益方向为最大化时,记为 $D_{C_i} = +1$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$.

② 当操作变量 U_i 的效益方向为最小化时,记为 $D_{C_i} = +1$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$.

③ 当操作变量 U_i 的效益方向为最小移动时,记为 $D_{C_i} = +1$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$.

c) 相关性Cor判断:操作变量与被控变量之间的相关性判断,可通过对象的稳态模型进行判断.

① 当操作变量稳态值 $U_{i,SS}$ 与被控变量稳态值 $Y_{j,SS}$ 为正相关时,记为 $Cor_{ij} = +1$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

② 当操作变量稳态值 $U_{i,SS}$ 与被控变量稳态值 $Y_{j,SS}$ 为负相关时,记为 $Cor_{ij} = -1$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

d) 被控变量的调节方向 D_Y .

① 当 $Y_{i,SS}(k) \leq Y_{i,LL}$ 时, $\Delta Y_{i,SS}(k)$ 的调节方向为正,记为 $D_{Y_i}(k) = +1$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

② 当 $Y_{i,SS}(k) \geq Y_{i,HL}$ 时, $\Delta Y_{i,SS}(k)$ 的调节方向为负,记为 $D_{Y_i}(k) = -1$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

③ 当 $Y_{i,LL} \leq Y_{i,SS}(k) \leq Y_{i,HL}$ 时,记为 $D_{Y_i} = 0$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

2) 操作优先级.

操作变量 U_i 的操作优先级表示为 $P_{U_i}(k+1) = (Cor_{ij} D_{Y_j}(k) D_{C_i} + 2) p_{U_i}$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$,其中 j 的选取参照如下准则:

① 被控变量稳态值 Y_{SS} 均满足控制要求(D_{Y_i}

$= 0$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$),且 $Y_{x,SS}(k) \in Y_{SS}(k)$ 具有最高约束优先级,则 $j = x$.

② 被控变量不满足控制要求,定义 \bar{Y}_{SS} 表示不满足控制要求的被控变量集合:

$$\bar{Y}_{SS} = \{Y_{i,SS}(k) | Y_{i,SS}(k) \leq Y_{i,LL} \cup Y_{i,SS}(k) \geq Y_{i,HL}, i \in \{1, 2, \dots, n\}\}, \tag{17}$$

且 $Y_{x,SS}(k) \in \bar{Y}_{SS}$ 的约束优先级最高,则 $j = x$.

在确定了操作优先级后,即可按该操作优先级的次序,进行升序策略的操作变量优先级目标优化,其过程同被控变量,在此不再赘述.

注 被控变量的优先级大于操作变量的优先级,即在多优先级的优化过程中,优先进行被控变量的优先级优化,然后进行操作变量的优先级优化.

5 讨论(Discussion)

本文提及的多优先级优化方法提供了一种新的解决工业过程中操作目标决策的思路.本方法的应用基于线性稳态过程(可扩展到积分过程)的假设前提下,但在实际的应用过程中,对象特性及其操作要求的复杂性远超过本方法的假设条件.为提高本方法的适应性和适用范围,可通过增加输入输出计算(优化计算前和优化计算后)环节,如:

1) 喘振是离心式压缩机的固有特性.通常采用可变极限流量法确保压缩机的安全有效运行.因此在进行决策支持前,预先建立压缩机运行工况与极限喘振流量的对应关系.根据实时工况,设置不同的流量约束,进而进行多优先级优化.

2) 工业数据由于存在噪声、废值、漂移等缺陷,因此在优化前应进行数据预处理,如滤波、限值、剔除废值等.

3) 对于含有静态非线性过程,在优化计算的前/后,可通过非线性变换转换为理想线性过程.

6 仿真(Simulation)

Shell重油分馏塔^[26]是一个有约束的多输入多输出控制对象,该过程的对象模型为

$$Y(s) = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} & \frac{6.90e^{-15s}}{40s+1} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} & \frac{7.20}{19s+1} \end{bmatrix} U(s) + \begin{bmatrix} \frac{1.20e^{-27s}}{45s+1} & \frac{1.44e^{-27s}}{40s+1} \\ \frac{1.52e^{-15s}}{25s+1} & \frac{1.83e^{-15s}}{20s+1} \\ \frac{1.14}{27s+1} & \frac{1.26}{32s+1} \end{bmatrix} F(s),$$

其中:操作变量 U_1 , U_2 , U_3 分别表示分馏器顶部产品的抽出率、侧线产品的抽出率和底部的回流热负荷;被控变量 Y_1 , Y_2 , Y_3 分别表示分馏器顶部产品

的提取成分、侧线产品的提取成分和底部的回流温度.过程的扰动 F_1 , F_2 为塔中部的回流热负荷和塔顶的回流热负荷.

被控变量: 约束条件为

$$\begin{aligned} Y_{LL} &= [-0.5 \quad -0.5 \quad -0.5]^T, \\ Y_{HL} &= [0.5 \quad 0.5 \quad 0.5]^T, \\ Y_{LLL} &= [-0.6 \quad -0.6 \quad -0.6]^T, \\ Y_{HHL} &= [0.6 \quad 0.6 \quad 0.6]^T. \end{aligned}$$

约束优先级:

$$\begin{aligned} p_{Y_H} &= [1 \quad 2 \quad 3]^T, \\ p_{Y_L} &= [1 \quad 2 \quad 3]^T. \end{aligned}$$

操作变量: 约束条件为

$$\begin{aligned} U_{LL} &= [-0.5 \quad -0.5 \quad -0.5]^T, \\ U_{HL} &= [0.5 \quad 0.5 \quad 0.5]^T. \end{aligned}$$

优先级:

$$p_U = [1 \quad 2 \quad 3]^T.$$

代价系数:

$$C = [-2 \quad +1 \quad -1]^T.$$

优化方向:

$$D_C = [+1 \quad +1 \quad -1]^T.$$

相关性Cor:

$$\text{Cor}_{ij} = +1, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3.$$

情况 1 假设当前状态:

$$\begin{aligned} U(0) &= [0 \quad 0 \quad 0]^T, \\ Y(0) &= [0 \quad 0 \quad 0]^T, \\ F(0) &= [1.5 \quad -1]^T, \end{aligned}$$

则操作优先级

$$\begin{aligned} P_{U_1}(1) &= ((+1) \times 0 \times (+1) + 2) \times 1 = 2, \\ P_{U_2}(1) &= ((+1) \times 0 \times (+1) + 2) \times 2 = 4, \\ P_{U_3}(1) &= ((+1) \times 0 \times (-1) + 2) \times 3 = 6, \end{aligned}$$

即 $P_{U_1}(1) < P_{U_2}(1) < P_{U_3}(1)$. 操作决策结果如表 1 所示.

情况 2 修改代价系数为

$$C = [-0.5 \quad -1 \quad 2],$$

操作决策结果如表 2 所示.

情况 3 假设当前状态:

$$\begin{aligned} U(0) &= [0.1 \quad 0 \quad 0]^T, \\ Y(0) &= [0 \quad 0 \quad 0]^T, \\ F(0) &= [-1.5 \quad 1.5]^T, \end{aligned}$$

操作决策结果如表 3 所示.

表 1 情况 1 优化可行时, 操作决策结果比较

Table 1 The operation decision in feasible case of case 1

优化准则	最优操作变量	最优被控变量
模块多变量在线优化	[0.5000; 0.0517; -0.4262]	[-0.0294; 0.5000; -0.2000]
基于被控变量多优先级优化	[0.5000; 0.0517; -0.4262]	[-0.0294; 0.5000; -0.2000]
基于操作变量多优先级优化	[0.5000; 0.0517; -0.4262]	[-0.0294; 0.5000; -0.2000]

表 2 情况 2 优化可行时, 操作决策结果比较

Table 2 The operation decision in feasible case of case 2

优化准则	最优操作变量	最优被控变量
模块多变量在线优化	[0.2588; 0.2455; -0.3984]	[-0.5000; 0.5000; -0.2000]
基于被控变量多优先级优化	[0.2588; 0.2455; -0.3984]	[-0.5000; 0.5000; -0.2000]
基于操作变量多优先级优化	[0.5000; 0.0517; -0.4262]	[-0.0294; 0.5000; -0.2000]

表 3 情况 3 优化不可行时, 操作决策结果比较

Table 3 The operation decision in infeasible case of case 3

优化准则	最优操作变量	最优被控变量
模块多变量在线优化	[0.5000; 0.0624; 0.2771]	[-0.6000; -0.6000; 0.4231]
基于被控变量多优先级优化	[0.5000; 0.0576; 0.2956]	[-0.5002; -0.5001; 0.5346]
基于操作变量多优先级优化	[0.5000; 0.0576; 0.2956]	[-0.5002; -0.5001; 0.5346]

对比上述情况: 情况 1 和情况 2 为约束可行. 情况 1 中, 模块多变量在线优化、基于被控变量多优先级优化和基于操作变量多优先级优化具有相同的最

优操作目标. 在代价系数改变后(情况 2), 前两者优化的最优操作目标随着改变; 由于约束问题可行, 且可行空间和操作变量的优先级和操作方向没有改

变,因此基于操作变量多优先级的最优操作目标没有变化。

情况3为约束不可行.由于基于被控变量多优先级优化和基于操作变量多优先级优化采用了优先级策略,因此两者具有较好的最优操作目标.同时由于约束不可行,系统没有多余的自由度,因此两者具有相同的优化结果.由此可以看出,基于优先级的优化方法计算的最优操作目标更为合理,更接近工业的实际需求.代价系数的不同,影响最优操作目标.由于基于操作变量多优先级优化方法不需要

精确的数学模型且设置简单,针对无法准确确定代价系数的情况下,基于操作变量多优先级优化方法为工业过程的优化和操作指导开辟了新的思想和解决方案。

为更直观的体现本文提及的在线决策支持策略,设计了虚拟的工业操作环境.采用MATLAB软件仿真工业过程并构建基于稳态目标计算的多优先级决策支持算法,人机交互界面采用SIEMENS的工业监控软件Wincc,通讯方式为OPC,其在线决策支持的人机交互界面如图3所示。



图3 决策支持仿真平台人机界面

Fig. 3 The HMI (human machine interface) of the online decision support system

7 结论(Conclusions)

本文结合双层预测控制中稳态目标计算思想,提出优先级的在线决策支持系统.阐述了基于稳态目标计算的在线决策支持与模块多变量在线操作在优化结构的相似性以及优越性.引入操作优先级的思想,结合被控变量的优先级优化方法,解决实际生产过程无法确定准确的代价系数的问题.最后通过仿真证明了本文提及的决策支持方法的有效性;并构建虚拟工业操作平台,模拟化工过程操作在线决策支持系统,直观地说明了该方法的实用性。

参考文献(References):

- [1] Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for Engineering Design for Process Safety* [M]. 2nd Edition. New Jersey: Wiley, 2012.
- [2] SNEDDON A, MEARNES K, FLIN R. Situation awareness and safety in offshore drill crews [J]. *Cognition Technology & Work*, 2006, 8(4): 255 - 267.
- [3] HUANG Xiyue, CHAI Yi, DENG Renming. A kind of directing operation expert systems based on self-adaptive predictor [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 1995, 18(2): 55 - 58.
(黄席隼, 柴毅, 邓仁明. 一种基于自适应预报的操作指导专家系统 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1995, 18(2): 55 - 58.)
- [4] DANIEL J E, ELENA C L, JORGE R H, et al. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction [J]. *Automation in Construction*, 2014, 45(1): 151 - 162.
- [5] CHERNYSHOV K R, JHARKO E P. Information support and skill evaluation of human-operators [J]. *IFAC Papersonline*, 2015, 48(3): 1345 - 1350.
- [6] YAN Yuqing, XIE Yongfang, WANG Xiaoli, et al. Optimization method of double-stream alumina digestion process parameters [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(3): 1014 - 1022.
(闫雨晴, 谢永芳, 王晓丽, 等. 双流法溶出过程操作参数优化方法 [J]. 化工学报, 2017, 68(3): 1014 - 1022.)
- [7] HUANG Dao, ZHU Jun, WANG Chunsheng. The study of expert system for safety project and fault detection of large-scale ammonia plant [J]. *Control Theory & Applications*, 1995, 12(2): 255 - 259.
(黄道, 朱军, 王春生. 大型合成氨厂生产保护和故障诊断专家系统研究 [J]. 控制理论与应用, 1995, 12(2): 255 - 259.)

- [8] BISCARRI F, MONEDERO I, LEÓN C. A decision support system for consumption optimization in a naphtha reforming plant [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 44(22): 1 – 10.
- [9] LUO Xionglin, ZHAO Xiaoying, WU Bo, et al. Online detection and control of ethylene column abnormal condition [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(11): 4518 – 4523.
(罗雄麟, 赵晓鹰, 吴博, 等. 乙烯精馏塔异常工况在线侦测与控制 [J]. 化工学报, 2014, 65(11): 4518 – 4523.)
- [10] VEDAM H, DASH S, VENKATASUBRAMANIAN V. An intelligent operator decision support system for abnormal situation management [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(6): 577 – 580.
- [11] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Situation awareness in power systems: theory, challenges and applications [J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122(5): 140 – 151.
- [12] NADERPOUR M, LU J, ZHANG G. An intelligent situation awareness support system for safety-critical environments [J]. *Decision Support Systems*, 2014, 59(1): 325 – 340.
- [13] BISCARRI F, MONEDERO I, LEÓN C. A decision support system for consumption optimization in a naphtha reforming plant [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 44(22): 1 – 10.
- [14] LIN Yongli, ZHAO Jun, WANG Wei, et al. Optimal scheduling research and its realization for a bell-type batch annealing based on differential evolution algorithm [J]. *Control Engineering of China*, 2010, 17(S1): 73 – 76.
(林永俐, 赵珺, 王伟, 等. 基于差分进化算法的罩式炉优化调度与应用 [J]. 控制工程, 2010, 17(S1): 73 – 76.)
- [15] ZHANG Qingwu, WU Gang, XUE Meisheng, et al. Modular multi-variable online operation guidance for polyethylene installation [J]. *Information and Control*, 2007, 36(1): 79 – 85.
(张庆武, 吴刚, 薛美盛, 等. 聚乙烯装置模块多变量在线操作指导 [J]. 信息与控制, 2007, 36(1): 79 – 85.)
- [16] ZOU Tao, PAN Hao, DING Baocang, et al. Research development of two-layered predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1327 – 1337.
(邹涛, 潘昊, 丁宝苍, 等. 双层结构预测控制研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1327 – 1337.)
- [17] WU Mingguang, QIAN Jixin. Multi-objective and layered steady-state optimization method of model predictive control [J]. *CIESC Journal*, 2005, 56(1): 105 – 109.
(吴明光, 钱积新. 基于多目标分层的预测控制定态优化技术 [J]. 化工学报, 2005, 56(1): 105 – 109.)
- [18] PAN Hongguang, GAO Hainan, SUN Yao, et al. The algorithm and software implementation for double-layered model predictive control based on multi-priority rank steady-state optimization [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(3): 405 – 414.
(潘红光, 高海南, 孙耀, 等. 基于多优先级稳态优化的双层结构预测控制算法及软件实现 [J]. 自动化学报, 2014, 40(3): 405 – 414.)
- [19] ZOU Tao, DING Baocang, ZHANG Duan. *MPC: an Introduction to Industrial Applications* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
(邹涛, 丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.)
- [20] LEE J H, MORARI M, GARCIA C E. State-space interpretation of model predictive control [J]. *Automatica*, 1994, 30(4): 707 – 717.
- [21] ZOU Tao, WANG Dingding, DING Baocang, et al. Steady-state analysis and feedback correction of model predictive control for integrating process [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(2): 1 – 10.
(邹涛, 王丁丁, 丁宝苍, 等. 积分过程预测控制的稳态分析及反馈校正 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(2): 1 – 10.)
- [22] MEADOWCROFT T A, STEPHANOPOULOS G, BROSILOW C. The modular multivariable controller, I: steady-state properties [J]. *AIChE Journal*, 1992, 38(8): 1254 – 1278.
- [23] XIE Yajun, DING Baocang, CHEN Qiao. Double-layered model predictive control of state-space model [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 1 – 8.
(谢亚军, 丁宝苍, 陈桥. 状态空间模型的双层结构预测控制算法 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 1 – 8.)
- [24] DING Baocang. *Industrial Model Predictive Control* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016.
(丁宝苍. 工业预测控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.)
- [25] XI Yugeng GU Hanyu. Feasibility analysis and soft constraint adjustment of constrained multi-objective multi degree of freedom optimization [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(6): 727 – 732.
(席裕庚, 谷寒雨. 有约束多目标多自由度优化的可行性分析及软约束调整 [J]. 自动化学报, 1998, 24(6): 727 – 732.)
- [26] PRETT D M, MORARI M. *The Shell Process Control Workshop* [M]. Boston: Butterworths, 1987.

作者简介:

郑洪宇 (1986–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为先进过程控制与优化、模型预测控制, E-mail: zhenghongyu@sia.cn;

曾 静 (1981–), 女, 副教授, 目前研究方向为复杂工业过程的优化与控制, E-mail: Zengjing1503@163.com;

邹 涛 (1975–), 男, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为工业过程实时优化与模型预测控制, E-mail: zoutao@sia.cn;

胡静涛 (1963–), 男, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为设备远程监测与智能维护技术、IC制造先进过程控制技术, E-mail: hujingtao@sia.cn;

于海斌 (1964–), 男, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为工业通信与实时系统理论、分布控制系统技术、网络协同与智能制造, E-mail: yhb@sia.cn.