

研究论文

含滞后及不确定参数动态过程系统的 定量优化方法与应用

黄卫清, 李秀喜, 钱 宇

(华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

摘要: 许多动态化工系统含有不确定参数。当含不确定参数的过程系统又带有滞后环节时, 系统的优化问题就变得非常复杂。对含不确定参数的化工系统的动态过程进行优化, 若未考虑滞后环节对动态优化结果的影响, 不能保证系统实际操作的优化及安全运行。本文采用改进的有限元正交配置优化算法, 较好地解决了含有滞后、不确定参数的化工过程的动态优化问题。最后将一个具有循环返料的反应-分离器系统以及一个绝热反应釜作为案例对该优化方法的应用进行分析, 根据案例的研究验证了该优化方法的有效性, 从而为含有滞后、不确定参数的动态系统的设计和操作性优化提供一种有效的定量分析方法和理论依据。

关键词: 不确定参数; 动态优化; 滞后环节; 化工过程

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) S1-083-07

Quantitative optimization method and application of dynamic process systems with time delay and parametric uncertainty

HUANG Weiqing, LI Xiuxi, QIAN Yu

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Many typical chemical dynamic systems include uncertain parameters, which can put a lot of influences to the system design and performance. The system optimization problems become more complexity when systems cherish with uncertain parameters and time delay together. The effect of the time delay on the result of the dynamic optimization for chemical process system with uncertain parameters is considered in this paper. In order to solve this complicated optimization problem, the improved finite collation method is provided. By the improved optimization algorithm, the optimization problem of dynamic systems including uncertainty and time delay can be solved availably. The validity of the proposed approach is demonstrated by the analysis and simulation result of the reactor-separator chemical system train with delayed recycle and the non-adiabatic reactor case study. So a quantitative analysis method and theory is provided finally for the dynamic system design and operation optimization under uncertainty and time delay.

Key words: uncertainty parameter; dynamic optimization; time delay; chemical process

引 言

对过程设计、操作与控制进行模拟和优化, 在化工领域已经得到了越来越多的应用^[1]。实际的工

业过程常常为具有不确定参数的动态系统, 一般采用微分代数方程进行描述并对过程进行动态优化, 文献[2]对此类问题进行了研究。文献[3]采用有限元正交配置的方法对动态系统进行分析处理, 但并

2009-09-02 收到初稿, 2009-12-25 收到修改稿。

联系人: 钱宇。第一作者: 黄卫清 (1983—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20876056, 20536020)。

Received date: 2009-09-02.

Corresponding author: Prof. QIAN Yu, ceyuqian@scut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20876056, 20536020).

未考虑滞后环节对优化结果的影响；文献[4]采用动态优化的方法对间歇多产品厂调度和设计的过程进行研究；Grossmann 等^[5]提出活性集约束的方法对该类系统进行优化研究。文献[6-7]结合不确定参数的来源对动态系统优化问题进行研究。Ogunnaike 等^[8]通过对不确定参数进行动态柔性分析从而对系统进行设计和控制集成研究，Zhou 等^[9]通过优化初始条件对含不确定参数的系统进行优化改进系统柔性。但实际操作过程往往较为复杂，化工过程不但存在不确定性参数的影响，也存在一些滞后环节，化工反应过程中一般采用循环返料过程的方式实现对原材料的转化率或利用率的提高，该循环返料的测量值中往往因为过程的传输存在滞后；一些夹套反应器也存在传热滞后问题，此外测量仪表所测量数据的不及时以及离线分析数据再返回到实际操作过程等，均存在滞后环节。目前，集成考虑滞后和不确定参数对动态过程系统进行优化研究，尚无较好的算法。本文集成考虑滞后环节以及不确定性参数的影响对实际动态过程系统进行优化，并提供可行的优化求解算法，以保证系统设计以及实际操作工况系统运行的安全和优化。含不确定参数的动态系统的优化问题可描述为

$$\min_{x,z,\theta} \Phi[x(t), z(t), \theta(t)] \quad (1)$$

s. t.

$$h[d, \dot{x}(t), x(t), z(t), \theta(t), t] = 0 \quad x(0) = x^0$$

$$g[d, x(t), z(t), \theta(t), t] \leq 0$$

$$x^L \leq x \leq x^U$$

$$z^L \leq z \leq z^U$$

其中， h 表示向量，描述过程稳定操作的质量、能量以及相平衡关系的等式方程； g 表示向量，表明过程可行操作需满足的条件； d 为与单元尺寸有关的设计向量； z 为可以调节控制变量的向量集； x 为系统的状态变量； θ 为不确定参数。对该优化问题，采用有限元正交配置方法就能较好地求解。但如果系统存在滞后环节，有限元正交配置方法已经不能解决该类问题的优化。含滞后环节以及不确定参数过程系统的优化问题可以描述为

$$\min_{x,z,\theta} \Phi[x(t), z(t), \theta(t)] \quad (2)$$

s. t.

$$h[d, \dot{x}(t), x(t), x(t-\tau), z(t), \theta(t), t] = 0 \quad x(0) = x^0$$

$$g[d, x(t), x(t-\tau), z(t), \theta(t), t] \leq 0$$

$$x^L \leq x \leq x^U$$

$$z^L \leq z \leq z^U$$

其中， τ 为滞后环节的时间常数，如果仍按照有限元正交配置的方法，得出的控制变量是不考虑滞后影响的优化值。但是实际过程由于滞后环节的存在可能导致控制器未能及时响应。对此问题需要对控制变量优化以及对有限元正交配置方法加以改进，从而解决含不确定参数及滞后环节动态系统的优化问题。

1 含滞后环节动态系统优化

为解决含不确定参数及滞后环节动态过程系统的优化问题，以下将进行该类问题定量优化算法的描述和改进，将系统控制变量优化算法镶嵌在有限元正交配置算法中进行改进，可应用在典型的化工过程系统的设计、优化与运行安全的研究上。

1.1 含滞后系统控制变量优化求解

以下介绍如何对含滞后系统控制变量进行优化求解，含有滞后环节的过程系统可以采用形如下式的微分—差分方程进行描述

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_\tau x(t-\tau) + Bz(t) \quad (3)$$

式中 A 、 A_τ 、 B 各为 $n \times n$ ， $n \times n$ ， $n \times r$ 常数矩阵。为方便 LQR (linear quadratic regulator) 方法处理上述系统，将上述系统简化为

$$\dot{x} = Ax + A_\tau y(-\tau) + Bz \quad (4)$$

根据文献[10]，得到式(4)中系统控制变量的优化求解可描述为最小化成本函数

$$J = \int_0^\infty \left[x'(t) \phi_0 x(t) + 2x'(t) \int_{-\tau}^0 \phi_1(s) x(t+s) ds + \int_{-\tau}^0 \int_{-\tau}^0 x'(t+s) \phi_2(s, v) x(ts) ds dv + u'(t) Nu(t) \right] dt \quad (5)$$

根据延迟系统模型可得出式中 ϕ_0 是 $n \times n$ 维常数矩阵， $\phi_1(s)$ 是在 $[-\tau, 0]$ 上 $n \times n$ 维分段连续矩阵， $\phi_2(s, v)$ 是在 $[-\tau, 0] \times [-\tau, 0]$ 上 $n \times n$ 维分段连续矩阵， N 为 $r \times r$ 维对称正定矩阵。由文献[11]，假设在 $H = R^n \times Q[-\tau, 0]$ 上定义式(6)

$$Z[x, y(\cdot)] = x' \phi_0 x + 2x' \int_{-\tau}^0 \phi_1(s) y(s) ds + \int_{-\tau}^0 \int_{-\tau}^0 y'(s) \phi_2(s, v) x(t+s) ds dv \quad (6)$$

则式(4)~式(6)的优化控制问题的解具有以下形式

$$z^0[x, y(\cdot)] = -N^{-1} B' [Px + \int_{-\tau}^0 D(s) y(s) ds] \quad (7)$$

式中 P 为 $n \times n$ 维矩阵。 P 、 $D(s)$ 、 $R(s, v)$ 是下述矩阵方程 (Riccati 方程) 系统的解

$$PA + A'P + D(0) + \phi_0 = PKP \quad (8)$$

$$\frac{dD(s)}{ds} + [PK - A']D(s) = R(0, s) + \phi_1(s) \quad (9)$$

$$\frac{\partial R(s, v)}{\partial s} + \frac{\partial R(s, v)}{\partial v} = -D(s)KD(v) + \phi_2(s) \quad (10)$$

其中, 边界条件为

$$D(-\tau) = PA_\tau \quad (11)$$

$$R(-\tau, s) = A'_\tau D(s) \quad (12)$$

对于 s, v 有 $-\tau \leq s \leq 0$, $-\tau \leq v \leq 0$, 式中 $K = BN^{-1}B'$, 且 P 是对称半正定矩阵, $R(s, v) = R'(s, v)$, 因此, 成本函数优化值为

$$W[x, y(\cdot)] = x'Px + 2x' \int_{-\tau}^0 D(s)y(s)ds + \int_{-\tau}^0 \int_{-\tau}^0 y'(s)R(s, v)x(t+s)dsdv \quad (13)$$

由以上的过程可以构造相应系统的反馈控制, 系统的控制作用需满足最小化二次成本函数式(5), 最后, 具有滞后过程的控制变量的优化解转化为经典的 Riccati 方程的求解, 接下来介绍 Riccati 方程的显式解的求解方法。

1.2 Riccati 方程的显式解

在选择合适矩阵 ϕ_0 、 ϕ_1 、 $\phi_2(s, v)$ 的基础上, 可以简化方程式(8)~式(12), 从而找到它的显式解。将成本函数矩阵取值为

$$\phi_0 = M - [D(0) + D'(0)], \phi_1(s) = -R(0, s) \quad (14)$$

$$\phi_2(s, v) = -D'(s)KD(v) \quad (15)$$

$D(s)$ 和 $R(s, v)$ 是下述特殊 Riccati 方程系统的解。

$$PA + A'P + M = PKP \quad (16)$$

$$\frac{dD(s)}{ds} + [PK - A']D(s) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial R(s, v)}{\partial s} + \frac{\partial R(s, v)}{\partial v} = 0 \quad (18)$$

此外, 还需包含边界条件式(11)、式(12), M 是 $n \times n$ 维的正定对称矩阵。由式(16)~式(18)可以看出, 矩阵 $D(s)$ 和 $R(s, v)$ 已经分离开, 仅通过边界条件式(12)相关联。于是, 具有滞后作用的系统控制变量的优化求解得到了解决。

1.3 改进的有限元正交配置方法

有限元正交配置技术对微分方程采用多项式近似的方法, 近似所用的多项式需要满足一些条件, 如在离散配置点上多项式通常为为一组为零的正交多项式。此外, 有限元正交配置将时间轴分成若干段, 每段上采用近似方法处理。但是每段的开始点要求其状态变量具有连续性。正交配置方法的说明见图 1, 时间轴被分成 m 个有限元, $m=1, 2, \dots, M$ 。状态变量 $x(t)$ 、控制变量 $z(t)$ 、不确定参数 $\theta(t)$ 在每一个元内均采用基于一定数量配置点 $n=1, 2, \dots, N$ 的拉格朗日多项式进行近似。每一个元上正交点的相对位置为该元正交多项式的根。元 m 内的近似方程为

$$x_m(\zeta) = \sum_{k=0}^M x_{mk} \phi_k(\zeta), \phi_k(\zeta) = \prod_{l=0, l \neq k}^M \frac{\zeta - \zeta_l}{\zeta_k - \zeta_l} \quad (19)$$

$$z_m(\zeta) = \sum_{k=1}^M z_{mk} \varphi_k(\zeta),$$

$$\theta_m(\zeta) = \sum_{k=1}^M \theta_{mk} \varphi_k(\zeta),$$

$$\varphi_k(\zeta) = \prod_{l=1, l \neq k}^M \frac{\zeta - \zeta_l}{\zeta_k - \zeta_l} \quad (20)$$

注意到状态变量在每一个元上采用 $N+1$ 个配置点近似, 状态变量对时间的微分很容易通过近似多项式得到, 如式(21)

$$\dot{x}(\zeta) = \sum_{k=0}^M x_{mk} \frac{\dot{\phi}_k(\zeta)}{\alpha_{m+1} - \alpha_m} \quad (21)$$

因为拉格朗日条件 $\phi_m(\zeta_n) = \varphi_m(\zeta_n) = \delta_{nm}$, 其中 δ_{nm} 为 Kronecker delta, 因此有

$$x_m(\zeta_n) = x_{nm}, z_m(\zeta_n) = z_{nm}, \theta_m(\zeta_n) = \theta_{nm} \quad (22)$$

如果上述的近似多项式都写成每个元以及每个配置点的形式, 然后代入微分方程将产生具有未知系数 $x_{nm} \equiv x$ 、 $z_{nm} \equiv z$ 、 $\theta_{nm} \equiv \theta$ 的代数残差方程的形式。为了确保系统状态变量在每个元初始值的连续性,

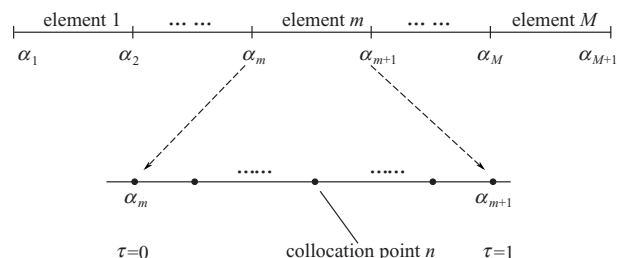


图 1 有限元正交配置示意图

Fig. 1 Finite collation method

系统还必须满足如下的连续性条件

$$x_{m0} = \sum_{k=0}^K x_{m-1,k} \phi_k(\zeta = 1)$$

(23)

此外，其他的一些约束方法也可以包括进去，如近似的误差控制、边界条件等。采用有限元正交配置的方法可以得到不确定参数以及状态变量在各段的函数，结合含滞后环节控制变量的优化解可以改进其方法。即在有限元正交配置方法中，控制变量采用式(24) 进行求解

$$z[x,y(\cdot)] = -N^{-1}B'[Px + \int_{-\tau}^0 D(s)y(s)ds]$$

(24)

改进的有限元正交配置方法可以表述为式(25)~式(27)。

$$x_m(\zeta) = \sum_{k=0}^M x_{mk} \phi_k(\zeta), \phi_k(\zeta) = \prod_{l=0, l \neq k} \frac{\zeta - \zeta_l}{\zeta_k - \zeta_l}$$

(25)

$$\theta_m(\zeta) = \sum_{k=1}^M \theta_{mk} \varphi_k(\zeta), \varphi_k(\zeta) = \prod_{l=1, l \neq k} \frac{\zeta - \zeta_l}{\zeta_k - \zeta_l}$$

(26)

$$z_m[x(\zeta),y(\cdot)] = -N^{-1}B'[Px(\zeta) + \int_{-\tau}^0 D(s)y(s)ds]$$

(27)

改进的有限元正交配置法中，在元 m 内直接将含滞后的控制变量的优化解来代替正交配置法中对控制变量的离散化，当不同元内状态变量确定以后，相应的控制变量的值也随之确定。通过该方法对动态系统进行优化，既能考虑不确定参数对系统的影响，同时又考虑到滞后环节对控制变量响应的影响。为验证该改进的优化方法对考虑滞后环节且含不确定参数的动态过程系统的有效性，接下来通过一个典型的带循环返料的化工反应-分离系统及一个非绝热反应釜系统作为案例进行该优化方法的应用和有效性分析。

2 案例研究

2.1 带循环的反应-分离系统考虑滞后及不确定参数的优化

对一个带循环返料的化工反应-分离系统进行改进的正交配置法优化方法的应用分析，该案例过

程的描述如图 2 所示，该系统包含一个反应器和一个分离器，文献[12]采用振动控制（vibraional control）的方法对该过程进行研究。文献[13]对此也进行了详细的研究，该案例是化工过程具有滞后效应的一个典型案例。不可逆反应 $A \rightarrow B$ 发生在反应器内，A 表示反应物，B 表示产物，该反应为一个强放热反应，反应过程产生的热量采用夹套冷却。假设该反应为一阶反应，且反应速率可由 $r = k_0 \exp(-E/RT)C_A$ 描述，其中 k_0 和 E 是指反应速率常数和反应活化能； T 和 C_A 代表反应器内的温度以及反应物 A 的浓度。反应器出口的物料直接进入一分离器，在分离器内未反应的反应物 A 与产物 B 分离开。为提高反应转化率，分离后的反应物 A 通过循环与新鲜进料一起进入反应器内进行再反应。进料的组成有两股物流，其一是新鲜进料，进料流率为 λF 、浓度为 C_{Af} 、温度为 T_f ，其二为循环返料，进料流率为 $(1-\lambda)F$ 、浓度为 $C_A(t-\alpha)$ 、温度为 $T(t-\alpha)$ 。此外假设该过程反应物体积 V 为常数，热损失可以忽略不计，物料密度 ρ 为常数，热容为 c_p ，夹套温度冷却 T_c 为常数，表 1 为该反应器系统的各参数值，为此可以通过质量以及能量平衡，导出系统的动态模型如式(28) ~ 式(30) 所示。

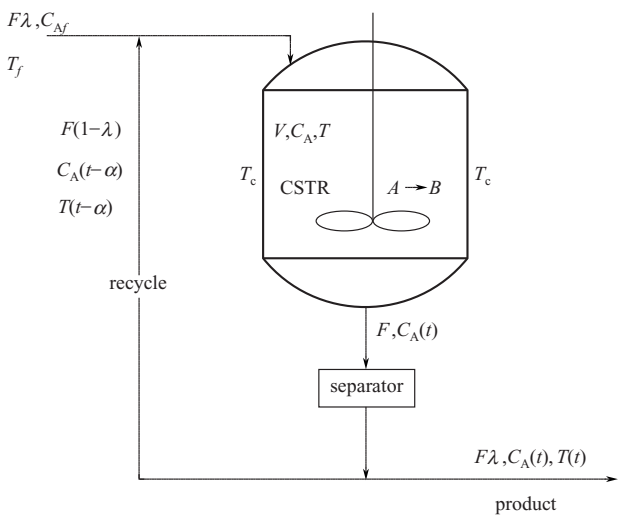


图 2 带循环物流的反应分离系统
Fig. 2 Reactor-separator process with recycle

表 1 反应器的各参数值
Table 1 Parameters of reactor

V/m^3	F_e $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	λ	E $/\text{kcal} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	k_0 $/\text{s}^{-1}$	$R/\text{kcal} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	ΔH^N $/\text{kcal} \cdot \text{kmol}^{-1}$	c_p $/\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	ρ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	T_{fe} $/\text{K}$	T_c $/\text{K}$	U^N $/\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	A $/\text{m}^2$
0.01	13.3330×10^{-3}	0.25	1.24×10^4	1.0×10^7	1.987	5.0×10^4	0.001	1000	300	295.0	30.0	1.0

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{\lambda F}{V} C_{Af} - \frac{F}{V} C_A + \frac{(1-\lambda)F}{V} C_A(t-\alpha) - k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C_A \quad (28)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda F}{V} T_f - \frac{F}{V} T + \frac{(1-\lambda)F}{V} T(t-\alpha) + \frac{-\Delta H}{\rho c_p} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C_A - \frac{UA}{V\rho c_p} (T - T_c) \quad (29)$$

另反应速率常数为

$$k_1 = k_0 \exp(-E/RT) \quad (30)$$

上述系统中温度描述系统能量的变化，反应物浓度描述系统内反应物的量的变化。因此该系统具有两个储能元件，可由温度和反应物浓度两个状态变量进行描述，反应器内温度和浓度即为目标状态变量，即 $x_1 = T$ ， $x_2 = C_A$ 。该系统的滞后时间为 $\alpha = 2\text{min}$ ，该系统不确定参数为换热壁的结垢引起，在该案例过程模型中表现为传热系数 U 。在确保系统安全稳定运行以及提高转化率的条件下，要求得到该系统允许克服不确定参数的变化范围最大值。为此对该系统构造动态优化问题，针对该问题，采用改进的有限元正交配置方法进行优化计算，经过优化计算分析得到该系统允许不确定参数变化的下限为 $U^L = 23.4 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，由于该案例不确定参数由换热器的结垢引起，在系统运行过程中随着时间推移一般小于设计的标称值，因此不确定参数变化的上限为换热系数 U 的标称值为 $U^U = U^N = 23.4 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。即该系统的不确定参数允许变化范围为 $U \in [23.4, 30] \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，且反应过程的优化正常稳定工作点为 $C_{A,e} = 0.5000 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $T_e = 296.16 \text{ K}$ 。

为验证其结果的正确性，对该系统允许变化的不确定参数范围内进行模拟分析，闭环控制，然后对该系统进行阶跃响应测试，其模拟结果如图 3、图 4 所示，图 3 的曲线表示系统反应器内温度随反应过程的变化曲线，图 4 的曲线表示系统反应器内反应物 A 浓度随时间的变化过程。

由图 3、图 4 曲线趋势图分析发现，当系统经过一阶跃响应 30min 后，该系统在其控制作用下能正常稳定安全运行，且过程的优化稳定工作点为 $C_{A,e} = 0.5000 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $T_e = 296.16 \text{ K}$ 。可见采用改进的有限元正交配置的优化算法，能较好地解决含滞后、不确定参数的带循环反应-分离系统的动态优化问题。

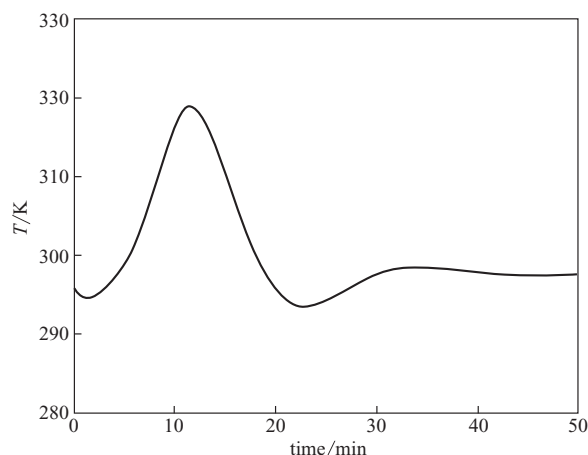


图 3 反应温度的模拟曲线

Fig. 3 Result of simulation for the reaction temperature with step response

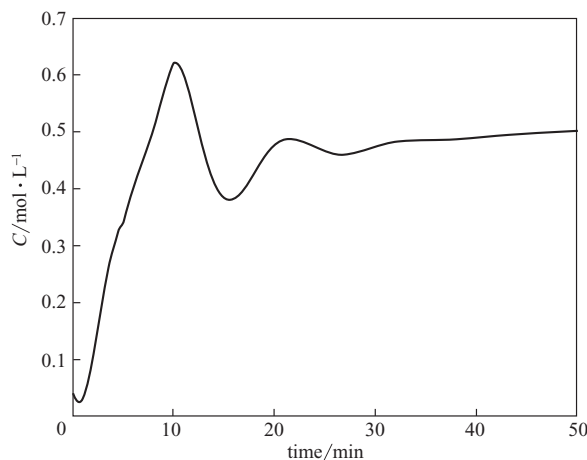


图 4 浓度模拟趋势

Fig. 4 Result of simulation for the concentration with step response

2.2 含不确定性参数非绝热反应釜系统考虑滞后环节的优化

非绝热反应釜也是化工处理单元中常见的反应器之一，常用来处理化工中的放热或者吸热反应。实际过程中传热系数存在不确定参数问题而且往往反应过程中存在传热滞后或者测量滞后，如果不对滞后过程进行考虑，得到该动态过程系统的优化结果往往与现实有较大的差距。

如图 5 所示为一个非绝热反应器，反应器内进行绝热反应，为控制反应温度，必须通过载热体由夹套移去部分热量，单位时间内反应器内由于化学反应所产生的热量为

$$Q_1 = \frac{F}{\rho} C_o \eta H \quad (31)$$

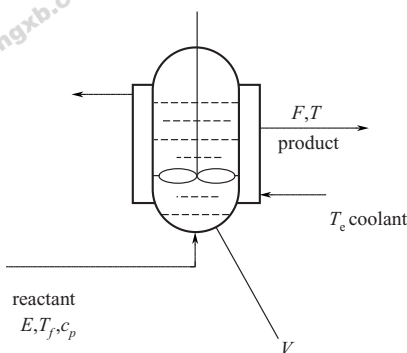


图 5 非绝热反应器示意图

Fig. 5 Non-adiabatic reactor

式中 F 为反应物质量流量, ρ 为反应物密度, C_0 为反应物浓度, η 为反应的转化率, H 为摩尔反应热。在不考虑反应器热损失的前提下由反应物和载热体冷却所带走热量的总和可表示为

$$Q_2 = Fc_p(T - T_f) + KA(T - T_c) \quad (32)$$

式中 T_c 为冷却剂入口温度, T_f 和 T 分别表示反应器进料温度和出料温度, 出料温度也即反应器内部温度, c_p 为反应器比热容, K 为载热体与反应器内总传热系数, A 为传热面积。反应器内热量积累可表示为

$$\frac{dQ}{dt} = V\rho c_p \frac{dT}{dt} \quad (33)$$

式中 V 为反应器内的物料体积。结合上述可得到反应器动态模型为

$$V\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{HFC_0}{\rho} \eta - KA(T - T_c) - Fc_p(T - T_f) \quad (34)$$

取反应器内的温度 T 为目标状态变量, 冷却剂的入口温度 T_c 为控制调节变量, 则该系统控制通道的特性就是 $T_c \sim T$ 之间的输入、输出关系。对上述方程进行拉普拉斯变换推导得 $T_c \sim T$ 之间传递函数关系为

$$\begin{aligned} \frac{T(s)}{T_c(s)} &= G(s) = \frac{KA}{\left(-\frac{HFC_0}{\rho}K_\eta + KA + Fc_p\right) + V\rho c_p s} \\ &= \frac{K_p}{T_p s + 1} \end{aligned} \quad (35)$$

式中 $K_p = \frac{KA}{-\frac{HFC_0}{\rho}K_\eta + KA + Fc_p}$, $T_p = \frac{V\rho c_p}{-\frac{HFC_0}{\rho}K_\eta + KA + Fc_p}$, 由于实际过程中夹套换热器换热壁产生结垢等原因, 将对过程模型产生不

确定参数的影响, 在该模型中不确定参数表现为总传热系数 K 。为方便模拟, 对式(35)进行简化处理, 假设 $\theta_1 = K_p$, $\theta_2 = T_p$, $y(s) = T(s)$, $u(s) = T_c(s)$, 则系统的模型如式(36)所示

$$y(s) = G(s)u(s) = \frac{\theta_1}{\theta_2 s + 1} u(s) \quad (36)$$

该实际过程存在滞后, 且系统的滞后时间为 $\tau = 1.2$ s, 带滞后的系统模型可以表述为

$$y(s) = G(s)e^{-\tau s}u(s) = \frac{\theta_1}{\theta_2 s + 1} e^{-\tau s} u(s) \quad (37)$$

系统要求在变化值为 5 的阶跃响应变化的参考输入下满足 $t \in [0, 4]$, $T \in [0, 5.8]$; $t \in [4, 30]$, $T \in [4.4, 5.8]$ 及 $t \in [30, 50]$, $T \in [4.7, 5.1]$, 采用改进的有限元正交配置方法进行优化计算分析, 得出系统不确定参数的优化允许变化范围为 $\theta_1 \in [4, 16]$ 和 $\theta_2 \in [15, 30]$ 。在此条件下对系统的参考输入进行幅度为 5 的阶跃响应, 闭环控制, 响应过程系统的温度变化如图 6 所示, 图中曲线表示在变化值为 5 的阶跃响应变化的参考输入下反应釜系统的温度变化。可见采用改进的有限元正交配置的优化算法, 能较好解决带传热滞后环节以及不确定参数的化工反应器系统的动态优化问题。

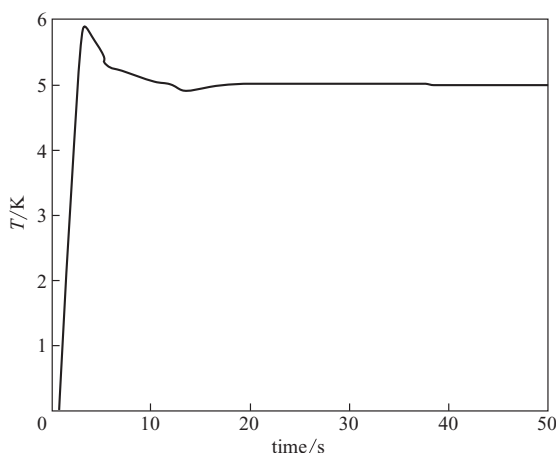


图 6 反应器温度阶跃响应模拟曲线

Fig. 6 Temperature response result of the simulation for non-adiabatic reactor

对含滞后及不确定性参数的动态化工过程系统进行优化, 寻找其他合适的算法以及采用不同的优化算法对合适的化工系统进行考虑滞后及忽略滞后的研究和应用结果比较, 尚有待进一步推进。并将在进一步的相关工作中加以论述。

3 结 论

动态化工系统含有不确定参数，且又带有滞后环节时，系统的优化问题就变得非常复杂。本文对有限元正交配置法进行改进，并采用改进的有限元正交配置优化算法，很好地解决了含有滞后、不确定参数的化工过程的动态优化问题。所提出结合控制变量优化算法的改进正交配置法为含有滞后、不确定参数的动态系统的设计和操作性优化提供了一种有效的定量分析方法和理论依据。

符 号 说 明

d	设计变量
$G(s)$	传递函数
g	不等式约束
h	等式约束
J	最小化成本函数
R	气体常数
s	频域因子
T	温度, K
t	时间
V	体积, m^3
x	状态变量
z	控制变量
η	反应的转化率
Φ	目标函数
θ	不确定参数
ρ	密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
τ	滞后时间
上角标	
L	下限
U	上限
0	初始值

References

- [1] Wang Jian (王健), Chen Bingzhen (陈丙珍), He Xiaorong (何小荣). Parallel computing applied in chemical process simulation and optimization. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (5): 441-446
- [2] Biegler L T, Grossmann I E. Retrospective on optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, **28**: 1169-1192
- [3] Cuthrell J E, Biegler L T. On the optimization of differential-algebraic process systems. *AIChE J.*, 1987, **33** (8): 1257-1270
- [4] Bhatia T, Biegler L T. Dynamic optimization in the design and scheduling of multi-product batch plants. *I&EC Research*, 1996, **35** (7): 2234
- [5] Grossmann I E, Floudas C A. Active constraint strategy for flexibility analysis in chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, 1987, **11** (6): 675-693
- [6] Zhou Hua (周华), Li Xiuxi (李秀喜), Xu Liang (许亮), Qian Yu (钱宇). Safety verification of the chemical process using dynamic flexibility analysis. *Computers and Applied Chemistry* (计算机与应用化学), 2007, **24** (10): 1307-1310
- [7] Sahinidis N V. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities//Grossmann I E, McDonald C M. Proceedings of FOCAPO2003. Coral Springs, 2003
- [8] Malcolm A, Polan J, Zhang L B, Ogunnaike B A. Integrating systems design and control using dynamic flexibility analysis. *AIChE J.*, 2007, **53** (8): 2048-2061
- [9] Zhou H, Li X X, Qian Y, Chen Y, Kraslawski A. Optimizing the initial conditions to improve the dynamic flexibility of batch processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, **48**: 6321-6326
- [10] Halemane K P, Grossmann I E. Optimal process design under uncertainty. *AIChE J.*, 1983, **29** (3): 425-433
- [11] Uchida K, Shimemura E, Kubo T, Abe N. The linear-quadratic optimal control approach to feedback control design for systems with delay. *Automatica*, 1988, **24** (6): 773-780
- [12] Lehman B, Wodjaya I, Shujaee K. Vibrational control of chemical reactions in a CSTR with delayed recycle stream. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1995, **193**: 29-59
- [13] Antoniadis C, Christofides P D. Feedback control of nonlinear differential difference equation systems. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54**: 5677-5709