基于多模型混合最小方差控制的时变扰动控制系统性能评估

张 巍[1] 王 昕[2] 王振雷[1]

摘 要 在实际工业过程中, 控制系统经常会受到时变扰动的影响, 致使针对单一扰动模型设计的最小方差控制准则不再适用于评估时变扰动控制系统的性能. 当多个扰动信号同时出现时, 采用常规多模型切换方法会发生间歇切换进而产生较大的暂态误差, 不能准确评估系统当前性能. 针对上述问题, 本文提出了一种基于多模型混合最小方差控制准则的性能评估方法. 首先根据每个扰动模型分别制定最小方差控制器, 组成多模型最小方差控制器, 然后在每个时间点混合多模型最小方差控制器, 并将在其作用下的输出方差作为最终的性能评估基准, 该方法既充分考虑到每个扰动的特性, 又避免了常规多模型切换方法因间歇切换而产生的暂态误差对评估结果准确性带来的影响, 实现了准确、可靠地评估时变扰动控制系统的性能. 通过仿真, 验证了基于多模型混合最小方差控制准则的性能评估方法的有效性.

关键词 多模型, 混合, 最小方差, 时变扰动, 性能评估

引用格式 张巍, 王昕, 王振雷. 基于多模型混合最小方差控制的时变扰动控制系统性能评估. 自动化学报, 2014, **40**(9): 2037−2044

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.02037

Performance Assessment of Control Loop with Time-variant Disturbance Dynamics Based on Multi-model Mixing Minimum Variance Control

ZHANG Wei[1] WANG Xin[2] WANG Zhen-Lei[1]

Abstract In an actual industrial process, the control system is often affected by the time-variant disturbances, so the minimum variance control design based on a single disturbance model as the benchmark is no longer useful to assess the time-variant disturbance control loop performance. If several disturbances appear at the same time, a conventional method of multi-model switching could result in intermittent switching and a larger transient error, failing to evaluate the current system performance accurately. Therefore this paper proposes a multi-model mixing minimum variance control for performance assessment. Firstly, one minimum variance controller is designed for each disturbance characteristic, such that a multiple model minimum variance controller can be formed. Then at each time point, multiple minimum variance controllers are mixed, and the output variance is the final performance evaluation benchmark. This method fully considers the feature of each disturbance and avoids the intermittent switching and larger transient error caused by the conventional multi-model switching method, realize accurate of and reliable assess of the time-variant disturbance performance. Finally, the effectiveness of the multi-model mixing minimum variance control as the benchmark to assess time-variant disturbance control systems is verified through simulations.

Key words Multiple models, mixing, minimum variance, time-variant disturbance, performance assessment

Citation Zhang Wei, Wang Xin, Wang Zhen-Lei. Performance assessment of control loop with time-variant disturbance dynamics based on multi-model mixing minimum variance control. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 2037−2044

随着工业过程自动化程度不断提高, 控制系统

收稿日期 2013-07-08 录用日期 2014-02-26
Manuscript received July 8, 2013; accepted February 26, 2014
国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB720500), 国家自然科学基金重点项目 (61134007), 国家自然科学基金 (61203157, 61222303), 中央高校基本科研业务费专项资金, 上海市科技攻关项目 (12dz1125100), 十二五国家科技支撑计划项目 (2012BAF05B00), 上海市重点学科建设项目 (B504), 流程工业综合自动化国家重点实验室开放课题基金资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB720500), Key Project of National Natural Science Foundation of China (61134007), National Natural Science Foundation of China (61203157, 61222303), Fundamental Research Funds for the Central Universities, Shanghai Science and Technology Research Projects (12dz1125100), National Science and Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period (2012BAF05B00), Shanghai Leading Academic Discipline Project (B504), and Open Research Fund of State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries
本文责任编委 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
1. 华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室 上海 200237 2. 上海交通大学电工与电子技术中心 上海 200240
1. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes (Ministry of Education), East China University of Science and Technology, Shanghai 200237 2. Center of Electrical and Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

的自动控制回路也在不断增多, 但是相应的维护人员却逐渐减少, 导致不能及时地监控现场控制回路的当前状态. 若能通过性能评估的方法有效评估系统当前性能, 就可以判断系统是否运行在最佳状态, 进而改善控制系统性能, 维持整个控制系统在一个优良的状态下运行.

控制系统性能评估最早可以追溯到 1970 年, Astrom 提出了基于最小方差控制的评估方法, 并为接下来的研究打下了坚实的基础[1]. 1989 年, Harris 发表了具有里程碑意义的研究成果, 他提出了 "反馈不变项", 即无论控制器的参数如何调节, 此部分的值都不会减少, 也就是控制器性能达到最优时, 系统所能达到的最小方差, 并将其作为性能评估下限用来评估单变量控制系统的性能[2]. 此后, 文献 [3−4] 分别将该方法用于评估前馈–反馈控制系统和开环不稳定非最小相位系统. 但上述研究均针对时不变扰动系统进行性能评估, 没有考虑到工业中普遍存在的时变扰动系统的性能评估问题. 因此, 2004 年 Olaleye 等提出了一种基于最具代表性扰动和瞬态扰动的评估准则对时变扰动系统进行性能评估[5]. 2011 年, Zhou 等对受时变扰动的 PID 控制系统进行了性能评估[6]. 但上述性能评估方法均假设系统每个时间段只受一个扰动干扰, 无法对多扰动同时作用下的系统进行性能评估. 然而实际工业过程中, 控制系统受到多个扰动同时作用的情况比较普遍[7]. 例如实际工业中需求量较大的小型燃油锅炉系统, 蒸汽压力是影响其安全运行的重要参数. 汽压过高会影响承压部件的寿命, 并且引发爆炸, 对设备及人身安全带来严重的危害; 汽压过低将增大系统的汽耗和煤耗, 直接影响系统发电和供热的经济性, 所以确保锅炉燃烧系统的蒸汽压力平稳控制具有重要的意义. 而燃料品质和蒸汽流量即为影响蒸汽压力的时变扰动, 首先燃料品质影响锅炉的蒸汽压力, 导致热平衡失衡, 然后为了保持热量平衡, 蒸汽流量将会发生变化, 与燃料品质扰动共同影响蒸汽压力, 即构成了蒸汽压力系统的时变扰动. 多个扰动同时出现会影响生产的平稳操作, 导致系统性能降低, 影响工业过程的品质运行[8].

因此, 为了准确评估含多个扰动同时作用的时变扰动系统的性能, 本文提出基于多模型混合最小方差控制准则的性能评估方法. 首先根据每个扰动制定相应的最小方差控制器, 组成多模型最小方差控制器. 然后采用多模型混合的方法, 在每个时间点合成多模型最小方差控制器, 由混合权重来决定每个最小方差控制器的参与程度, 当单个扰动作用于系统时, 评估基准即为基于该扰动所设计的最小方差控制器作用下的输出方差, 当多个扰动同时作用时, 系统根据每个扰动作用时间的长短设定混合权重, 最终得到稳定的性能评估基准. 仿真结果验证了上述方法的有效性.

1 被控对象描述

被控对象为含多个扰动同时作用的单变量时变扰动反馈控制系统, 系统框图如图 1 所示.

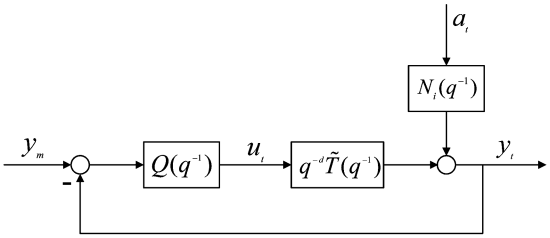

图 1 单变量时变扰动反馈控制系统

Fig. 1 SISO time-varying disturbance feedback control system

图 1 中, $\tilde{T}$ 为没有时滞的传递函数, d 为系统时滞, Q 为控制器传递函数, a_t 为白噪声序列, 扰动传递函数为 N_i $(i=1,\cdots,n)$, 分别为系统不同扰动的传递函数.

2 多模型最小方差控制器

对于含多个扰动同时作用的系统, 当采用上述单模型最小方差控制准则[1−4, 9] 时, 其准确性受到很大影响. 单模型最小方差控制准则是基于单一扰动模型设计最小方差控制器, 并将其作用下的输出方差作为评估基准, 该方法可以准确评估时不变扰动系统. 但对于本文研究的多扰动同时作用系统, 针对其中一个扰动设计的单模型最小方差控制准则, 并用以评估整个系统性能, 其准确性将受到影响. 而基于 "分解合成" 思想的多模型方法[10−13] 为上述问题的解决提供了一种新的思路. 因此, 为了准确、有效地评估含多个扰动同时作用的时变扰动系统的性能, 本文设计多模型最小方差控制器, 即根据每个扰动分别设计最小方差控制器, 组成多模型最小方差控制器, 该控制器充分考虑到每个扰动的特性, 可以提高评估结果的准确性.

对于任意扰动 N_i[9], 由图 1 可得系统在扰动 N_i 作用时的传递函数为

$$y_t=\frac{N_i}{1+q^{-d}\tilde{T}Q_i}a_t \tag{1}$$

采用丢番图方程分解 N_i, 得:

$$N_i=\underbrace{f_{i,0}+f_{i,1}q^{-1}+\cdots+f_{i,d-1}q^{-d+1}}_{F_i}+R_iq^{-d} \tag{2}$$

代入式 (1), 得:

$$y_t = \frac{F_i + q^{-d}R_i}{1 + q^{-d}\tilde{T}Q_i}a_t = \left(F_i + \frac{R_i - F_i\tilde{T}Q_i}{1 + q^{-d}\tilde{T}Q_i}q^{-d}\right)a_t = F_i a_t + L_i a_{t-d} \tag{3}$$

式中, $L_i = \dfrac{R_i - F_i\tilde{T}Q_i}{1 + q^{-d}\tilde{T}Q_i}$.

$$\mathrm{var}(y_t) = \mathrm{var}(F_i a_t) + \mathrm{var}(L_i a_{t-d}) \tag{4}$$

$$\mathrm{var}(y_t) \geq \mathrm{var}(F_i a_t) \tag{5}$$

使式 (5) 等号成立的条件是 $L_i = 0$, 即:

$$L_i = \frac{R_i - F_i\tilde{T}Q_i}{1 + q^{-d}\tilde{T}Q_i} = 0 \tag{6}$$

$$R_i - F_i\tilde{T}Q_i = 0 \tag{7}$$

这样, 即可得到最小方差控制器:

$$Q_i = \frac{R_i}{\tilde{T}F_i} \tag{8}$$

上述多个最小方差控制器 $\{Q_i(q^{-1})\}_{i\in I}$ ($I = \{1, \cdots, n\}$) 就构成了多模型最小方差控制器 Q.

3　多模型混合最小方差控制准则及性能评估

对于上述多模型最小方差控制器 Q, 若采用常规多模型切换方法, 当多个扰动同时作用时, 该方法会发生间歇切换, 使系统出现较大的暂态误差, 导致评估基准偏大, 无法准确、有效地评估控制系统的性能. 因此, 本文设计多模型混合 (Mixing)[14−15] 方法对时变扰动系统进行性能评估.

基于多模型混合最小方差控制的系统框图如图 2 所示, 其中多模型最小方差控制器为 $Q = \{Q_i(q^{-1})\}_{i\in I}$ ($I = \{1, \cdots, n\}$).

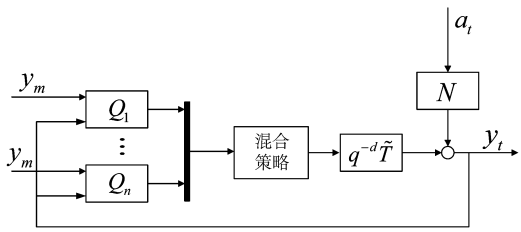

图 2　多模型混合最小方差控制系统

Fig. 2　Multi-model mixing minimum variance control system

每个扰动的作用时间分别为 $T_1, \cdots, T_n$, 并且 $T \subset \cup_{i\in I}T_i$, 其中 $I = \{1, \cdots, n\}$. 在每一个时间域 T_i 都设计一个最小方差控制器 Q_i, 基于每个最小方差控制得到的控制律如式 (9) ∼ (11) 所示:

$$u_t = -Q_1 y_t, \quad t \in T_1 \tag{9}$$

$$u_2 = -Q_2 y_t, \quad t \in T_2 \tag{10}$$

$$\vdots$$

$$u_t = -Q_n y_t, \quad t \in T_n \tag{11}$$

多模型混合最小方差控制器 $Q(t)$ 由一系列最小方差控制器 $\{Q_i(q^{-1})\}_{i\in I}$ 合成, 其表达式如下所示:

$$u_t = -Q(t)y_t \tag{12}$$

$$Q(t) = \beta_1(t)Q_1 + \beta_2(t)Q_2 + \cdots + \beta_n(t)Q_n \tag{13}$$

式中, $\beta_1(t), \cdots, \beta_n(t)$ 分别为对应的最小方差控制器的混合权重, 决定了每个最小方差控制器的参与程度, 应满足如下关系式:

$$\beta_i(t) = 0, \quad t \notin T_i, \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{14}$$

$$\beta_1(t), \beta_2(t), \cdots, \beta_n(t) \geq 0 \tag{15}$$

$$\beta_1(t) + \beta_2(t) + \cdots + \beta_n(t) = 1 \tag{16}$$

混合权重 β_i ($i = 1, 2, \cdots, n$) 的定义如下所示:

$$\beta_i(t) = \frac{\tilde{\beta}_i(t)}{\tilde{\beta}_1(t) + \tilde{\beta}_2(t) + \cdots + \tilde{\beta}_n(t)}, \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{17}$$

式中, $\tilde{\beta}_i(t)$ 为未规范化权重因式, 满足连续可微条件. 不失一般性, 设 $\tilde{\beta}_i(t)$ 表示为

$$\tilde{\beta}_i(t) = \varphi\left\{\frac{t - \dfrac{U_i + L_i}{2}}{\dfrac{U_i - L_i}{2}}\right\}, \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{18}$$

式中, U_i 和 L_i 分别为 T_i 区间的上限和下限, 即 $T_i = \{t : L_i \leq t \leq U_i\}$. φ 的选择要使 $\tilde{\beta}_i(t)$ 在 $t \in T_i$ 区间内连续可微, 并且在 $t \notin T_i$ 区间时, $\tilde{\beta}_i(t) = 0$. 因此可采用如下函数:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \mathrm{e}^{-\frac{1}{1-x^2}}, & 若\ |x| < 1 \\ 0, & 否则 \end{cases} \tag{19}$$

性能评估指标定义如下:

$$\eta = \frac{\sigma^2_{\text{multi-mixing}}}{\sigma^2_y} \tag{20}$$

式中, $\sigma^2_{\text{multi-mixing}}$ 是多模型混合最小方差控制下输出的方差, σ^2_y 是实际输出的方差. 性能评估指标 η 的取值范围为: $0 < \eta < 1$.

多模型混合最小方差控制准则可以产生一个稳定的评估基准, 混合权重决定每个最小方差控制器的参与程度. 当只有一个扰动作用于系统时, 为该扰动所设计的最小方差控制器的混合权重为 1, 基于其他扰动设计的最小方差控制器的混合权重为 0, 即合成的评估基准为基于该扰动所设计的最小方差控制器作用下的输出方差; 当多个扰动同时作用于系统时, 系统会根据扰动的作用时间来相应分配各控制器的混合权重, 评估基准即为多模型混合控制器作用下输出的方差. 因此, 该方法避免了因间歇切换而导致较大的暂态误差对评估结果准确性的影响, 有效地解决了多个扰动同时作用的控制系统的性能评估问题.

4 仿真研究

4.1 数值仿真

4.1.1 评估性能良好时的控制系统

被控对象的传递函数如下所示[5]:

$$q^{-d}\tilde{T}(q^{-1}) = q^{-4}\frac{0.33}{1-0.67q^{-1}} \tag{21}$$

设过程有 3 种扰动, 扰动传递函数分别为 N_1、N_2 和 N_3. 扰动的传递函数形式如下:

$$N_1(q^{-1}) = \frac{1-0.4q^{-1}}{1-0.67q^{-1}},\ \ 1 \le t \le 2\,000 \tag{22}$$

$$N_2(q^{-1}) = \frac{1-0.4q^{-1}}{1-0.77q^{-1}},\ \ 1\,801 < t < 2\,000 \tag{23}$$

$$N_3(q^{-1}) = \frac{1-0.4q^{-1}}{1-0.87q^{-1}},\ \ 1\,501 \le t \le 3\,500 \tag{24}$$

N_1 的作用时间为 1 s ~ 2 000 s, N_2 的作用时间为 1 801 s ~ 2 000 s, N_3 作用的时间为 1 501 s ~ 3 500 s, 中间有 300 s 的时间是两个扰动叠加, 有 200 s 的时间是三个扰动叠加, 共同影响控制系统. 噪声源为 $\text{var}(a_t) = 1$ 的白噪声.

本文采用如式 (25) 所示的控制器:

$$Q = \frac{0.59-0.46q^{-1}}{0.83-0.28q^{-1}-0.23q^{-4}} \tag{25}$$

过程的时变扰动响应曲线如图 3 所示.

根据三个扰动模型分别设计最小方差控制器 $\{Q_i(q^{-1})\}_{i=1,2,3}$. 采用多模型混合方法在每个时间点合成多模型最小方差器, 将其输出方差作为最终的性能评估基准. 混合权重 β_1, β_2, β_3 在每个时间点的取值分布曲线如图 4 ~ 6 所示.

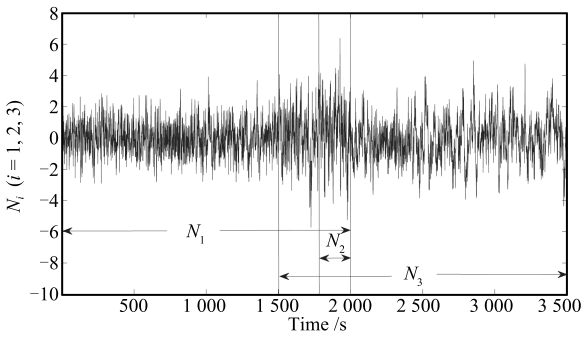

图 3 时变扰动响应曲线

Fig. 3 The response curve of time-varying disturbance

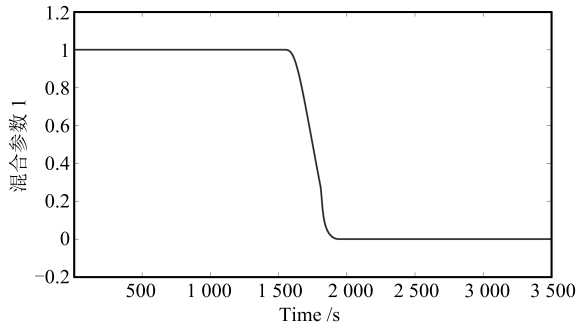

图 4 混合参数 β_1 的取值分布曲线

Fig. 4 The distribution of mixing parameter β_1

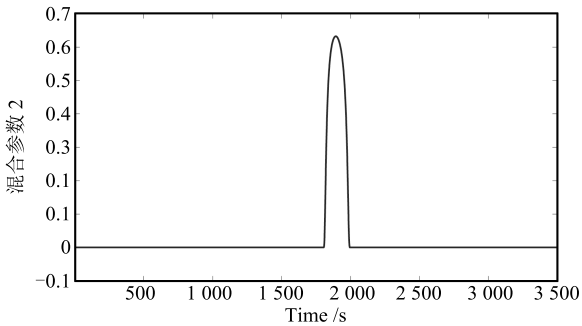

图 5 混合参数 β_2 的取值分布曲线

Fig. 5 The distribution of mixing parameter β_2

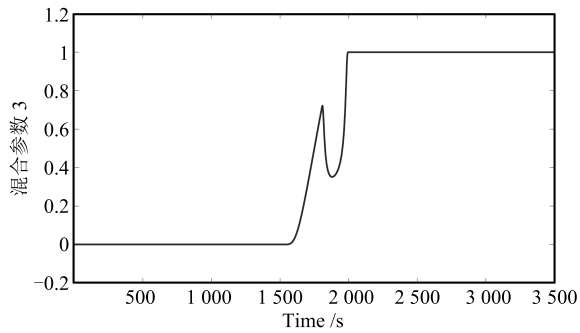

图 6 混合参数 β_3 的取值分布曲线

Fig. 6 The distribution of mixing parameter β_3

采用基于三个扰动模型分别设计的单模型最小方差控制准则、多模型切换的最小方差准则、基于 FCOR 算法[9] 和多模型混合最小方差控制准则分别对系统进行性能评估, 不同时段的输出方差如表 1 所示, 评估的对比结果如表 2 所示.

图 7 为不同评估结果的折线对比图, 其中指标 1～6 分别对应于表 2 中从上到下的 6 种评估方法.

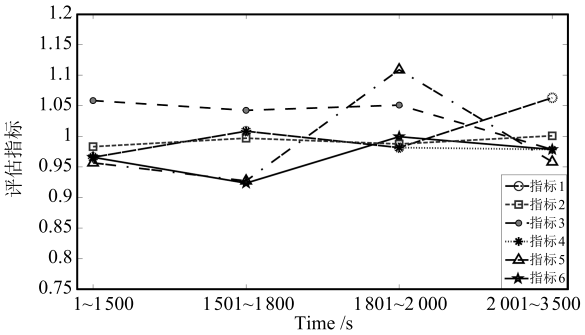

图 7　评估结果曲线对比图

Fig. 7　The curves of evaluation results

从表 2 中的数据和图 7 中的评估结果曲线可以看出, 单模型最小方差控制准则分别为方法 1、2、3. 当扰动单独作用时, 即 1～1 500 s 和 2 001～3 500 s 这两个时间段, 分别基于 N_1 和 N_3 设计的单模型最小方差控制准则可以准确评估系统的性能. 但是基于某扰动设计的单模型最小方差控制准则只能准确评估该扰动单独作用的时间段内系统的性能, 不能有效评估其他扰动单独作用时系统的性能, 如采用基于 N_1 设计的单模型最小方差控制准则评估 2 001～3 500 s N_3 单独作用的时间段, 评估结果是无效的性能指标, 同理基于 N_2 设计的单模型最小方差控制准则不能评估 2 001～3 500 s 这个时间段的性能, 基于 N_3 设计的单模型最小方差控制准则不能评估 1～1 500 s 这个时间段的性能. 当多个扰动同时作用时, 即 1 501～1 800 s 和 1 801～2 000 s 这两个时间段, 基于 N_1 和 N_3 设计的单模型最小方差控制准则均存在无效的性能指标, 即单模型最小方差控制准则不能准确评估多个扰动同时作用时系统的性能.

多模型切换的最小方差准则为方法 4, 当扰动单独作用时, 即 1～1 500 s 和 2 001～3 500 s 这两个时间段, 多模型切换方法将切换到基于 N_1 和 N_3 设计

表 1　不同评估方法作用下的输出方差

Table 1　The output variance of different assessment methods

	σ^2			
	1～1 500 s	1 501～1 800 s	1 801～2 000 s	2 001～3 500 s
基于 N_1 的单模型最小方差准则	1.1309	2.8656	3.4532	1.6802
基于 N_2 的单模型最小方差准则	1.1513	2.8331	3.4739	1.5818
基于 N_3 的单模型最小方差准则	1.2394	2.9628	3.6973	1.5465
多模型切换最小方差准则	1.1309	2.8656	3.4532	1.5465
FCOR 算法	1.1203	2.6349	3.9011	1.5146
多模型混合最小方差准则	1.1309	2.6245	3.5158	1.5465
实际方差	1.1711	2.8420	3.5183	1.5806

表 2　不同评估方法的评估结果对比

Table 2　The assessment results of different methods

	η			
	1～1 500 s	1 501～1 800 s	1 801～2 000 s	2 001～3 500 s
基于 N_1 的单模型最小方差准则	0.9657	1.0083	0.9815	1.0630
基于 N_2 的单模型最小方差准则	0.9831	0.9969	0.9874	1.0008
基于 N_3 的单模型最小方差准则	1.0583	1.0425	1.0509	0.9784
多模型切换最小方差准则	0.9657	1.0083	0.9815	0.9784
FCOR 算法	0.9566	0.9271	1.1088	0.9582
多模型混合最小方差准则	0.9657	0.9235	0.9993	0.9784

的单模型最小方差控制准则, 可以准确地进行性能评估. 当多个扰动同时作用时, 在绝对理想化的条件下将切换到基于存在的扰动所设计的方差最小的准则上并进行性能评估, 从评估结果可以看出该方法不能有效地评估 1 501 ~ 1 800 s 时间段的性能, 并且在实际工业中由于间歇切换时产生的较大的暂态误差也会影响评估结果的准确性, 因此该方法不能准确评估含多个扰动同时作用的系统的性能.

基于 FCOR 算法的性能评估方法为方法 5, 从仿真结果可以看出, 该方法可以准确评估扰动单独作用时系统的性能, 但是当多个扰动同时作用时, 即 1 801 ~ 2 000 s 时间段, 该方法的评估结果无效, 即该方法不能准确评估含多个扰动同时作用的系统的性能.

本文的方法为方法 6, 采用本文提出的多模型混合最小方差准则进行性能评估时, 四个时间段控制系统的性能指标均有效, 即本文方法既可以准确评估扰动单独作用时系统的性能, 又可以准确评估多个扰动同时作用时系统的性能, 且本文方法的评估结果曲线整体位于其他曲线的下方, 可以作为一个评估下限准确评估系统的性能. 从评估结果可以判定系统整体性能良好, 1 801 ~ 2 000 s 这个时间段评估结果相比于其他评估方法, 评估结果更接近于 1, 也说明该方法总体上优于其他方法, 能准确、有效地评估系统的性能.

4.1.2 评估性能下降时的控制系统

随着时间的推移, 控制器的参数可能会偏离原来的预设值, 如控制器 $Q = (0.59 - 0.46q^{-1})/(0.83 - 0.28q^{-1} - 0.23q^{-4})$ 中的参数 0.59 随着时间的推移逐渐增加, 导致系统实际输出方差增加, 控制系统性能下降. 此时基于不同的性能评估方法得到的不同时段的评估对比结果如表 3 所示, 评估结果对比曲线如图 8 所示.

从表 3 中的数据和图 8 中的曲线对比图可以看出, 基于 N_1 和 N_2 的单模型最小方差控制准则及基于 FCOR 算法的性能评估方法仍存在无效的性能评估指标, 并且前四种性能评估方法的曲线位于本文方法的上方, 即指标较本文方法均相对较高. 在 1 501 ~ 1 800 s 时间段, 即多个扰动同时作用时, 单模型方法和多模型切换方法对该时间段的性能评估指数均接近 0.9 甚至超过 0.9, 若采用这几种方法对系统进行性能评估, 则不能有效地判定系统当前性能已经下降. 因此综合考虑, 与其他方法相比, 采用多模型混合最小方差控制准则得到的评估结果准确度和可信度更高.

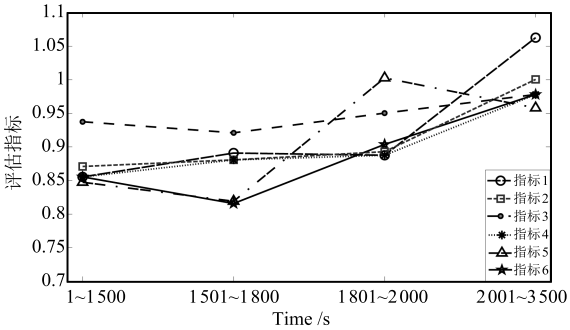

图 8 性能下降时评估结果曲线对比图

Fig. 8 The curves of evaluation results when performance reduction

4.2 小型燃油锅炉蒸汽压力控制系统仿真

在实际工业过程中, 小型燃油蒸汽锅炉由于其需求量大, 使用范围广, 得到广泛应用. 小型燃油蒸汽锅炉控制系统包括三个控制回路, 分别为蒸汽压力控制回路、锅筒水位控制回路和炉膛负压控制回路. 系统的主要的输入参数分别为燃料量、给水量、引风量和送风量; 主要的输出参数则为蒸汽压力、炉膛负压、锅筒水位和蒸汽流量. 其系统组成如图 9 所示.

蒸汽压力系统是一个典型的含多个扰动同时作用的时变扰动控制系统, 传统的锅炉蒸汽压力控制系

表 3 性能下降时不同评估方法的评估结果对比

Table 1 The assessment results of different methods when performance reduction

	η			
	1 ~ 1 500 s	1 501 ~ 1 800 s	1 801 ~ 2 000 s	2 001 ~ 3 500 s
基于 N_1 的单模型最小方差准则	0.8554	0.8908	0.8876	1.0627
基于 N_2 的单模型最小方差准则	0.8709	0.8807	0.8929	1.0005
基于 N_3 的单模型最小方差准则	0.9375	0.9210	0.9503	0.9781
多模型切换最小方差准则	0.8554	0.8807	0.8876	0.9781
FCOR 算法	0.8474	0.8191	1.0027	0.9580
多模型混合最小方差准则	0.8554	0.8158	0.9037	0.9781

统采用 PID 控制, 该方法不仅直观、易于实现, 而且鲁棒性好. 通过控制系统的性能评估可以判定控制系统是否运行在最优的状态.

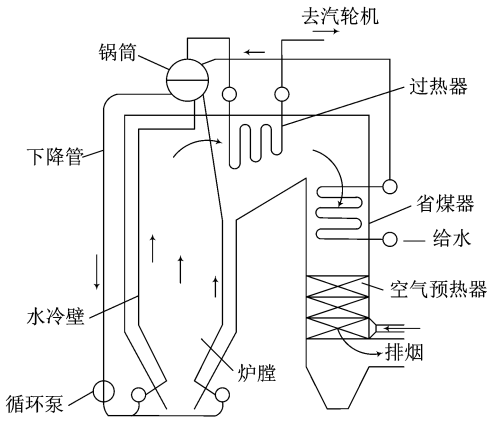

图 9　小型燃油锅炉系统组成

Fig. 9　Small fuel boiler system

被控对象为一小型燃油蒸汽锅炉[16], 其传递函数为

$$G(s)=\frac{1.3}{100s+1}\mathrm{e}^{-10s} \tag{26}$$

其中, 系统输入量为燃油调节阀开度, 输出为小型燃油锅炉蒸汽压力.

取采样时间为 1 s, 得到相应的离散化模型为

$$G(q^{-1})=\frac{0.013}{1-0.99q^{-1}}q^{-10} \tag{27}$$

系统的蒸汽压力输出如图 10 所示, 共有 1 800 个数据, 从图中可以看出, 在 670 ~ 1 190 s 系统所受燃料品质扰动和蒸汽流量扰动同时出现, 共同影响控制系统, 这里假设两个扰动模型已知. 采用上述方法评估系统的性能, 评估结果如表 4 所示, 评估结果的曲线对比图如图 11 所示.

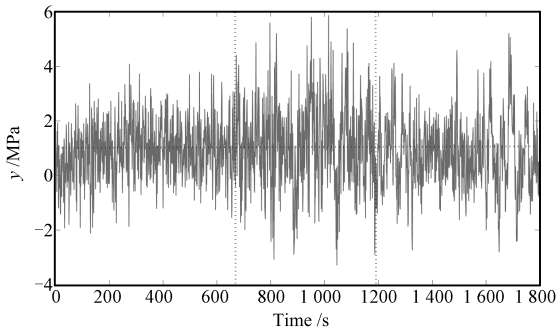

图 10　系统的蒸汽压力 (MPa) 输出曲线

Fig. 10　The output curve of system steam pressure (MPa)

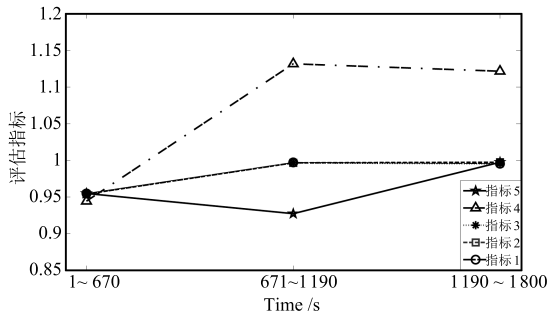

图 11　蒸汽压力控制系统评估结果曲线对比图

Fig. 11　The evaluation results curves of steam pressure control system under different performance assessment methods

图 11 中的指标 1 ~ 5 分别对应于表 4 中从上到下的 5 种评估方法, 从表 4 的数据和图 11 的对比曲线可以看出, 本文方法的评估结果曲线仍位于其他方法的下方, 可以作为绝对下限评估系统当前的性能. 控制器在 1 ~ 670 s 时间段和 1 191 ~ 1 800 s 时间段控制作用良好, 但是当两个扰动同时存在时, 控制系统性能一般, 并不是最优. 当两个扰动同时作用时, 单模型方法和多模型切换方法的评估指数均偏高, 基于 FCOR 算法的性能评估基准在 671 ~ 1 190 s 和 1 191 ~ 1 800 s 时间段的性能指标均大于 1, 性能指标无效, 因此综合考虑本文所提方法的评估

表 4　不同方法下蒸汽压力控制系统性能评估结果

Table 4　The performance assessment results of steam pressure control system under different performance assessment methods

	η		
	1 ~ 670 s	671 ~ 1 190 s	1 191 ~ 1 800 s
基于 N_1 的单模型最小方差准则	0.9548	0.9972	0.9954
基于 N_2 的单模型最小方差准则	0.9541	0.9967	0.9974
多模型切换最小方差准则	0.9541	0.9967	0.9954
FCOR 算法	0.9443	1.1318	1.1217
多模型混合最小方差准则	0.9548	0.9272	0.9974

结果整体准确性优于前四种方法, 对实际的工业生产具有一定的指导意义.

5 结论

本文针对时变扰动系统的特点, 提出了基于多模型混合最小方差控制器的性能评估方法, 并进行了仿真研究. 该方法考虑到各个扰动的特性, 较基于单一模型的最小方差控制准则, 其准确度和可信度都有较大提高. 通过混合的方法合成的多模型最小方差准则, 避免了传统多模型方法因间歇切换而产生的暂态误差对评估结果准确性带来的影响. 从仿真分析可以看出, 采用多模型混合最小方差控制准则, 可以准确、可靠地评估时变扰动控制系统的性能, 为改善控制系统的性能奠定了理论基础.

目前本文方法仅对单变量系统进行了研究, 下一阶段将进行多变量系统的研究. 但对于多变量系统, 由于采用矩阵形式进行表示, 并且矩阵的乘法不满足交换性, 因此在最小方差控制器的设计、Diophantine 方程的求解等方面, 既要确保矩阵的逆的存在性, 又要实现矩阵乘法的伪交换性, 目前尚需进一步研究.

References

1 Astrom K J. *Introduction to Stochastic Control Theory*. New York: Academic, 1970.

2 Harris T. Assessment of control loop performance. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1989, **67**(5): 856−861

3 Stanfelj N, Marlin T E, MacGregor J F. Monitoring and diagnosing process control performance: the single-loop case. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1993, **32**(2): 301−314

4 Tyler M, Morari M. Performance assessment for unstable and nonminimum-phase systems. In: Proceedings of the 1996 IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries. Tyne, UK: IFAC, 1996. 187−192

5 Olaleye F, Huang B, Tamayo E. Performance assessment of control loops with time-variant disturbance dynamics. *Journal of Process Control*, 2004, **14**(8): 867−877

6 Zhou M F, Xie L, Pan H T,Wang S Q. Performance assessment of PID controller with time-variant disturbance dynamics. In: Proceedings of the 2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes. Hangzhou, China: IEEE, 2011. 650−655

7 Huang B. Minimum variance control and performance assessment of time variant processes. *Journal of Process Control*, 2002, **12**(6): 707−719

8 Xu F W, Huang B. Performance monitoring of SISO control loops subject to LTV disturbance dynamics: an improved LTI benchmark. *Journal of Process Control*, 2006, **16**(6): 567−579

9 Huang B, Shah S L. *Performance Assessment of Control Loops: Theory and application*. New York: Springer, 1999

10 Roderick M S, Johansen T A. *Multiple Model Approaches to Modeling and Control*. London: Taylor and Francis, 1997.

11 Dong Zhi-Kun, Wang Xin, Wang Xiao-Bo, Li Shao-Yuan, Zheng Yi-Hui. Application of weighted multiple models adaptive controller in the plate cooling process. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(8): 1144−1150
(董志坤, 王昕, 王笑波, 李少远, 郑益慧. 多模型加权自适应控制在中厚板层流冷却系统中的应用. 自动化学报, 2010, **36**(8): 1144−1150)

12 Zheng Yi-Hui, Wang Xin, Li Shao-Yuan. Multiple models direct adaptive decoupling controller for stochastic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(9): 1295−1304
(郑益慧, 王昕, 李少远. 随机系统的多模型自适应解耦控制器. 自动化学报, 2010, **36**(9): 1295−1304)

13 Wang Xin, Li Shao-Yuan, Yue Heng. Multivariable adaptive decoupling controller using hierarchical multiple models. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(2): 223−230
(王昕, 李少远, 岳恒. 分层递阶多模型自适应解耦控制器. 自动化学报, 2005, **31**(2): 223−230)

14 Matthew K, Petros I. Multiple model adaptive control with mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(8): 1822−1836

15 Simone B, Petros I, Edoardo M. Multiple model adaptive mixing control: the discrete-time case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(4): 1040−1045

16 Chen Ming-Jie, Lan Hai, Sun Shi-Feng. GA in fuzzy PID control of the boiler steam pressure. *Techniques of Automation and Applications*, 2008, **27**(1): 12−16
(陈明杰, 兰海, 孙世峰. 遗传算法在锅炉蒸汽压力模糊 PID 控制中的应用研究. 自动化技术与应用, 2008, **27**(1): 12−16)

张 巍 华东理工大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为控制系统性能评估.
E-mail: zhangwei19880407@tom.com
(**ZHANG Wei** Master student at the School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology. Her main research interest is control loop performance assessment.)

王 昕 上海交通大学副教授. 主要研究方向为多模型自适应控制, 智能解耦, 复杂工业过程建模、控制与优化.
E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn
(**WANG Xin** Associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers multiple models adaptive control, multivariable intelligent decoupling control, and modeling, control and optimization of complex industrial processes.)

王振雷 华东理工大学教授. 主要研究方向为智能控制, 复杂系统的建模及特征分析, 故障诊断, 智能优化算法. 本文通信作者.
E-mail: wangzhen_l@ecust.edu.cn
(**WANG Zhen-Lei** Professor at East China University of Science and Technology. His research interest covers intelligent control, modeling and analysis the characteristics of complex systems, fault diagnosis, and intelligent optimization algorithms research. Corresponding author of this paper.)