

基于输出方差限制的广义多变量 控制系统性能评价

李大宇¹ 焦军胜¹ 靳其兵¹ 高彦臣²

摘要 研究具有线性时变扰动多变量控制系统性能评价的方法。通过将时变扰动分为三类定常扰动,进而构造一个加权的性能指标,权值矩阵与不同扰动类型和优先级相对应。在指定合理的输出方差后,运用对角关联矩阵方法明确计算出广义多变量系统闭环输出方差的上下限值。经过 ITAE (Integral of time-weighted absolute value of the error) 寻优得到最小输出方差下的控制器参数,并给出可实现的最优控制器模型。仿真实例证明了该方法计算的简便性和有效性。

关键词 输出方差限制,线性时变扰动,广义多变量系统,性能评价

引用格式 李大宇,焦军胜,靳其兵,高彦臣. 基于输出方差限制的广义多变量控制系统性能评价. 自动化学报, 2013, 39(5): 654–658

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00654

Generalized Multivariable Control System Performance Assessment Based on Output Variance Limit

LI Da-Zi¹ JIAO Jun-Sheng¹ JIN Qi-Bing¹
GAO Yan-Chen²

Abstract This paper focuses on the multivariable control system performance assessment method under linear time-varying disturbance. Through dividing time varying disturbance into three types of constant disturbance, a weighted performance index is constructed and a weight matrix corresponds to different disturbance types and priorities. After specifying reasonable output variance, the upper and lower bounds of the generalized multivariable system closed-loop output variance could be obtained through calculation of diagonal interactors. Controller parameters with minimum variance can be achieved and an optimal control model is obtained according to integral of time-weighted absolute value of the error (ITAE) optimization. Simulation results show the simplicity and availability of the proposed computing method.

Key words Output variance bound, linear time-varying disturbance, generalized multivariable system, performance assessment

Citation Li Da-Zi, Jiao Jun-Sheng, Jin Qi-Bing, Gao Yan-Chen. Generalized multivariable control system performance assessment based on output variance limit. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 654–658

收稿日期 2012-05-15 录用日期 2012-09-22
Manuscript received May 15, 2012; accepted September 22, 2012
国家自然科学基金 (61273132), 北京市优秀人才资助项目 (2009D013000000003) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61273132) and Outstanding Experts Foundation of Organization Department of Beijing Municipal Committee of the Communist Party of China (2009D013000000003)
本文客座编委 李少远
Recommended by Guest Editor LI Shao-Yuan
1. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029 2. 青岛高校软件股份有限公司 青岛 266045
1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029 2. Qingdao Gaixiao Software Control Stock Co. Ltd., Qingdao 266045

现代工业生产过程中控制回路众多,实际工况变化、过程非线性、设备老化甚至故障等都会大幅降低控制性能,据统计约有 60% 的控制回路存在性能缺陷^[1-2]。因此,准确评价系统性能对于设备实时监测、减少能源消耗、提高生产效率等意义重大。自从 1989 年 Harris^[3] 首次提出性能评价方法以来,控制器性能评价领域发展迅猛并成为当今研究热点。评价技术正由单变量向多变量、时不变向时变、线性向非线性等方向发展。

工业生产中的扰动是时变的,但绝大部分控制系统是时不变的,如何用线性时不变的控制器来控制时变的扰动是本文研究的重点。Xu 等^[4] 提出结构闭环响应的输出方差上限,但并没有提到下限或取值范围。文献 [5–7] 虽然也提出严格的性能评价理论,但由于多变量系统本身存在耦合性、能控观性以及计算关联矩阵等一系列问题,所得到的控制器模型结构复杂、阶次过高,进行模型降阶处理后系统鲁棒性变差,很难应用于工业生产。

针对上述问题本文从三点着手: 1) 提出广义多变量系统性能限制的方法,从而获得多变量系统可实现的最优性能指标; 2) 基于寻优得到的最优参数进行控制器性能评价; 3) 通过最优控制器模型确定控制器参数的重调方向。

1 广义多变量系统性能评价

1.1 过程描述

线性时变多扰动动态下广义多输入多输出 (Multi-input multi-output, MIMO) 系统结构如图 1 所示^[8]。时变扰动矩阵 $N_t(q^{-1})$ 在不同的 t 时刻是变化的,通常用分段线性定常扰动来表示该过程。误差加权矩阵 P_C 和控制加权矩阵 F_C 可限制控制信号的幅值,避免控制器过饱和,从而使设计的控制器更加可行。多变量系统的时变扰动矩阵 $N_t(q^{-1})$ 可以从一组给定值、控制器操作变量和闭环输出等常规操作数据中辨识出来^[9-10],不会影响工业生产过程。线性控制器 $Q(q^{-1})$ 施加的控制作用对被控对象 $G(q^{-1})$ 的耦合部分也有影响且控制器和被控对象模型都是线性时不变的。

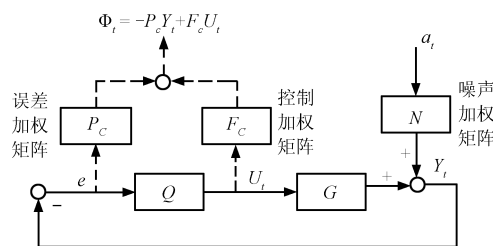


图 1 广义多变量系统结构框图

Fig. 1 Framework of generalized multivariate system

一类线性时变扰动矩阵 $N_t(q^{-1})$ 可以用几类线性定常扰动的组合来表示。其中,第一类是稳定的有代表性的 i -th 扰动,这部分扰动是不可避免的;第二类是短暂的突然的 j -th 扰动,这部分扰动对系统性能影响较大,但用户依然希望控制器跟踪先前的轨迹以保证系统的正常运行;剩下的 k -th 扰动介于两者之间,仅用于评价 j -th 扰动调节后的性能指标是否满足要求。无论是对于线性时变扰动还是线性时不变扰动,只需要区分前两种即可, k -th 扰动包含在 i -th 中。

为使 j -th 扰动满足闭环输出方差的要求,可以由用户指定的传递函数 $L_R(q^{-1})$ 代替反馈控制可变量。结合工业生产

的实际情况, 通常将多变量系统的 $L_R(q^{-1})$ 表示成如下形式:

$$L_R(q^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_{11} + \beta_{11}q^{-1}}{1 - \lambda_1 q^{-1}} & \frac{\alpha_{12} + \beta_{12}q^{-1}}{1 - \lambda_1 q^{-1}} \\ \frac{\alpha_{21} + \beta_{21}q^{-1}}{1 - \lambda_2 q^{-1}} & \frac{\alpha_{22} + \beta_{22}q^{-1}}{1 - \lambda_2 q^{-1}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义 $\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2]$, $\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}$, $\beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix}$. α 和 β 是特定的自由参数, λ 是由用户指定的响应动态.

此时 j -th 扰动的闭环输出可表示为

$$\Phi_t^{(j)} = F_j(q^{-1})a_t + q^{-d_G} L_R(q^{-1})a_t \quad (2)$$

其中, F_j 是利用 Diophantine 方程分解广义扰动矩阵得到的反馈控制不变项:

$$N_G^{(j)} = F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} G_R(q^{-1}) \quad (3)$$

d_G 是被控对象 I/O 时滞矩阵的最高阶次. i -th 扰动和 k -th 扰动的闭环输出分别表示为

$$\Phi_t^{(i)} = [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})] N_j^{-1} N_i a_t \quad (4)$$

$$\Phi_t^{(k)} = [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})] N_j^{-1} N_k a_t \quad (5)$$

由 Parseval 定理可知, 闭环系统的输出方差与闭环传递函数的 H_2 范数相等, 即:

$$\text{var}(\Phi_t^{(j)}) = \| [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})] \| \quad (6)$$

$$\text{var}(\Phi_t^{(i)}) = \| [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})] N_j^{-1} N_i \| \quad (7)$$

$$\text{var}(\Phi_t^{(k)}) = \| [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})] N_j^{-1} N_k \| \quad (8)$$

通过寻优 $L_R(q^{-1})$ 的自由参数使 j -th 扰动的输出方差最小, 此时可实现的最优控制器模型为

$$Q_G = \frac{G_R(q^{-1}) - L_R(q^{-1})}{q^{d_G} [F_c - P_c G(q^{-1})] [F_j(q^{-1}) + q^{-d_G} L_R(q^{-1})]} \quad (9)$$

1.2 确定输出方差的上下限值

如第 1.1 节所描述的过程, $L_R(q^{-1})$ 中包含两个自由参数. 对于广义多变量系统, 按照 ITAE 积分型误差最优性能指标进行寻优:

$$J_{\text{ITAE}} = \int_0^\infty t |e_G(t)| dt$$

其中, $e_G(t)$ 是与 $L_R(q^{-1})$ 相关的系统广义误差, 计算后至少得到一组最优的 α 和 β , 使 i -th 和 k -th 扰动下闭环输出方差的迹最小, 同时 j -th 扰动的方差也被限定在一定区间之内. 此时得到的三部分闭环响应输出方差之和就是该扰动下闭环输出方差的下限值.

计算线性时变多变量系统的下限时, 需要区分扰动的三种类型, 不同扰动类型对于影响系统性能的重要程度是不同的. 首先, 应该保证 i -th 扰动输出方差在可实现的性能中取最小方差, 因为这部分扰动是不可避免的; 其次, 由于其他偶然因素产生的 j -th 扰动是造成生产性能恶化的主要原因, 应保证其跟踪先前轨迹的控制性能. 如果先保证 j -th 扰动输出方差最小, 此时得到的 α 和 β 过于理想, 实际生产中指导

调节控制器参数时, 极有可能无法实现, 这样得到的自由参数是没有意义的. 由于 k -th 扰动中也包含部分 j -th 扰动性质, 所以闭环系统输出中 i -th 和 k -th 两部分的输出方差应该各有侧重. 给予两类方差不同的权值 ρ_i 和 ρ_k , 且 $\rho_i + \rho_k = 2$. 偶然因素对系统的影响越小, ρ_i 取值越大而 ρ_k 取值越小, 表明 i -th 扰动更加重要.

通常理论计算出的方差上限值不会超过实际输出方差, 因此也可以用闭环系统满足输出协方差约束矩阵渐近稳定这一更严格的条件作为上限值. 一般根据生产需要, 由用户根据实际工况定义合理上限值即可. 综上所述, α 和 β 取最优值时, 广义系统可实现的闭环输出方差的上下限值:

$$\left[\min \left[\rho_i \cdot \text{var}(\Phi_t^{(i)}) + \rho_k \cdot \text{var}(\Phi_t^{(k)}) \right] + \text{var}(\Phi_t^{(j)}), V \right] \quad (10)$$

其中, V 是用户指定的上限值矩阵. 对输出方差进行约束主要有以下两方面优势:

首先, 如果对系统性能要求不高, 可以适当提高闭环输出方差的上限值以提高生产效率; 如果对系统性能要求很高, 可以大幅减小闭环输出方差的上限值以提高产品质量, 而且无需担心控制效果不能实现的问题.

其次, 在实际求解中, 由于校正器的零点在寻优过程中可能变得很小, 使得优化过程很慢, 所以合理控制模型输出方差上下限值, 可以在保证控制器可行性的前提下提高优化效率, 通常采用增大目标函数的方法即可实现.

1.3 MIMO 性能指标的计算

计算的中间过程采用对角关联矩阵方法 (Diagonal interactor matrix, DIM)^[11], 该方法仅需扰动模型和时滞矩阵等少量先验知识就能得到准确的评价方差 $\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t)$, 避免了辨识关联矩阵 (Interactor matrix, IM) 时产生的系统误差. 两种计算方法虽然存在一定误差, 但容易证明相对误差有界, 即:

$$e = \frac{\text{var}_{\text{opt}}^{\text{DIM}}(\Phi_t) - \text{var}_{\text{opt}}^{\text{IM}}(\Phi_t)}{\text{var}(\Phi_t)} \quad (11)$$

有界; 同时由于输出方差 $\text{var}(\Phi_t)$ 是二次项, 故相对误差的无穷项级数之和绝对收敛, 即:

$$\sum_{t=1}^n e = \sum_{t=1}^n \frac{\text{var}_{\text{opt}}^{\text{DIM}}(\Phi_t) - \text{var}_{\text{opt}}^{\text{IM}}(\Phi_t)}{\text{var}(\Phi_t)} \quad (12)$$

绝对收敛. DIM 很好地平衡了多变量系统辨识和计算复杂性之间的关系.

取广义多变量系统性能指标为

$$\eta = \frac{\text{tr}[\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t)]}{\text{tr}[\text{var}_{\text{act}}(\Phi_t)]} \quad (13)$$

其中, $\text{tr}[\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t)]$ 和 $\text{tr}[\text{var}_{\text{act}}(\Phi_t)]$ 分别是最优控制器和实际控制器下闭环输出方差的迹. 根据输出方差限值条件可知 $0 \leq \eta \leq 1$, 并且 η 越趋向于 1, 闭环控制系统性能越好, 实际控制效果越接近于最优控制, 无需调节自由参数; η 越趋向于 0, 闭环控制系统性能越差, 此时需考虑重新调节自由参数以提高控制器性能.

综上所述, 评价线性时变的广义多变量系统性能可以通过以下 7 步完成:

步骤 1. 基于一组常规操作数据, 辨识出线性时变系统闭环传递函数的扰动模型, 并根据扰动对系统性能的影响区分 i -th, j -th 和 k -th 三类扰动. 利用 Diophantine 方程将 j -th 扰动分解成反馈控制不变项 $F_j(q^{-1})$ 和反馈控制器相关

联项 $G_R(q^{-1})$.

步骤 2. 根据式 (10) 对输出方差上下限值的约束条件, 确定分段时变扰动下输出方差限制并分配合理的权值.

步骤 3. 根据实际工况定义的下限值, 确定式 (1) 中自由参数 α 和 β 的最优值.

步骤 4. 根据所确定的反馈关联项 $L_R(q^{-1})$, 运用 DIM 方法, 分别从式 (5)~(7) 中得到闭环输出的最小方差 $\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t)$.

步骤 5. 分别计算各段时变扰动下的实际闭环输出方差 $\text{var}_{\text{act}}(\Phi_t)$.

步骤 6. 根据式 (13) 计算广义多变量系统性能指标 η , 判断控制器的性能是否满足要求.

步骤 7. 如果 η 太小, 不能满足用户要求, 可以按照式 (9) 所得出的最优控制器模型参数进行再次调节, 直到满足要求为止.

2 仿真实例

采用文献 [4] 的经典模型, 仿真说明线性时变扰动下广义多变量系统性能评价过程及所提方法的有效性, 运用 DIM 代替 IM 并对比文献 [12] 的性能评价结果, 仿真过程如下:

当 $P_C = I$ 且 $F_C = 0$ 时, 广义被控对象和控制器模型分别是:

$$G_G = \begin{bmatrix} \frac{q^{-1}}{1-0.4q^{-1}} & \frac{q^{-2}}{1-0.1q^{-1}} \\ \frac{0.3q^{-1}}{1-0.1q^{-1}} & \frac{q^{-2}}{1-0.8q^{-1}} \end{bmatrix}$$

$$Q_G = \begin{bmatrix} \frac{0.5-0.2q^{-1}}{1-0.5q^{-1}} & 0 \\ 0 & \frac{0.25-0.2q^{-1}}{1-0.25q^{-2}} \end{bmatrix}$$

闭环输出响应受到三个线性定常扰动的影响, 且扰动的切换发生在 2001 和 3001 时刻, 三个广义扰动模型分别是:

$$N_{G1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-0.5q^{-1}} & \frac{-0.6q^{-1}}{1-0.5q^{-1}} \\ \frac{0.5q^{-1}}{1-0.5q^{-1}} & \frac{1}{1-0.5q^{-1}} \end{bmatrix}, 1 \leq t < 2001$$

$$N_{G2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-0.9q^{-1}} & \frac{-0.6q^{-1}}{1-0.9q^{-1}} \\ \frac{0.5q^{-1}}{1-0.9q^{-1}} & \frac{1}{1-0.9q^{-1}} \end{bmatrix}, 2001 \leq t < 3001$$

$$N_{G3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-0.7q^{-1}} & \frac{-0.6q^{-1}}{1-0.7q^{-1}} \\ \frac{0.5q^{-1}}{1-0.7q^{-1}} & \frac{1}{1-0.7q^{-1}} \end{bmatrix}, 3001 \leq t \leq 4500$$

二维白噪声序列 a_t 均值为 0, 方差 $\sum_a = I_{2 \times 2}$. 扰动对系统两个回路输出方差 $\text{var}_{\text{act}}(\Phi_t)$ 的影响如图 2 和图 3 所示.

从图 2 可以看出, 随着时间的变化, 三类扰动对回路 1 的影响变化不大, 特征不明显, 所以无法做出判断. 从图 3 可以清晰地看出, 在 2001 到 3000 时间内, 闭环系统受到突然的扰动对生产过程影响较大, 这类扰动应该作为 j -th 扰动; 在 1 到 2000 时间内, 闭环系统受到相对稳定的扰动影响, 这类扰动应该作为 i -th 扰动; 在 3001 到 4500 时间内, 闭环系统受到介于 i -th 和 j -th 的扰动影响, 这类扰动应该作为 k -th

扰动. 如第 1.1 节所述, 可将 k -th 扰动包含在 i -th 中, 给予两种输出方差适当的权值. 系统的左、右对角关联矩阵分别是:

$$D_L = \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}, \quad D_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}$$

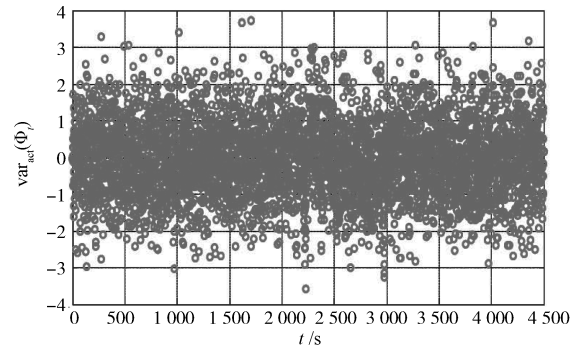


图 2 三扰动对回路 1 的影响

Fig. 2 Influence of the three disturbances on Loop 1

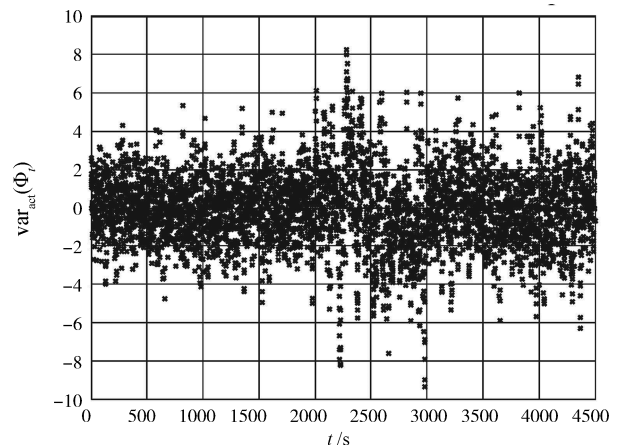


图 3 三扰动对回路 2 的影响

Fig. 3 Influence of the three disturbances on Loop 2

关联矩阵阶次 $d_G = 2$, 并且满足对角关联矩阵存在条件:

$$\text{rank} \left(\lim_{q^{-1} \rightarrow 0} D_L G_G D_R \right) = 0.7 \neq 0 \quad (14)$$

利用 Diophantine 方程将 N_{G2} 分解, 得到反馈控制不变项 F :

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -0.6 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix} q^{-1}$$

将反馈控制可变项用 $L_R(q^{-1})$ 代替, 在 Matlab 中 OCD 工具箱中进行自由参数 α 和 β 的寻优计算和有输出方差限制的性能评价计算, 取图 2 和 3 中两回路扰动之和作为扰动对多变量系统施加的总影响, 计算结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出, 本文方法和文献 [12] 相比, 在没有约束条件的情况下, 用户指定的 λ 对闭环输出方差的影响都成正比例关系. 如果用户指定的 λ 过大, 可能造成 i -th 和 k -th 扰动下闭环输出方差过小, 系统性能就会变差, 由于该部分扰动是不可避免的, 太小的最优控制器输出方差也难以实现. 同时, j -th 扰动下的控制性能会随着 λ 的增大而变优, 会得

表 1 λ 变化时三类扰动下的性能评价结果比较Table 1 Performance assessment results under three kinds of disturbances when λ is increasing

λ	α		β		$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^1)$ 本文/参考	$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^2)$ 本文/参考	$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^3)$ 本文/参考
[0.3, 0.3]	0.3784	0.4965	0.8600	0.8998	2.8369/2.7938	3.3868/3.6753	3.6017/3.0154
	0.8261	0.8537	0.6449	0.5936			
[0.5, 0.5]	0.3562	0.4345	0.8975	0.8998	2.7686/2.7223	3.6216/3.8844	3.5587/3.0028
	0.7864	0.8875	0.6449	0.6573			
[0.7, 0.7]	0.3175	0.4032	0.8997	0.8241	2.6460/2.6298	4.4783/4.3277	3.3632/2.9846
	0.6469	0.9753	0.4279	0.3784			

表 2 带有输出方差限制的性能评价结果

Table 2 Performance assessment results with output variance limit

ρ	上下限值	α		β		$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^1)/\eta$	$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^2)/\eta$	$\text{var}_{\text{opt}}(\Phi_t^3)/\eta$
[1, 1]	[12.736, 15.7318]	-0.7450	-0.8318	-0.4263	-0.5367	3.1428/0.9668	4.0397/0.4970	3.4972/0.8033
		0.7095	0.6813	0.4751	0.6369			
[1.2, 0.8]	[11.8333, 15.7318]	-0.7450	-0.4966	-0.8600	0.8998	3.2489/0.9994	6.2564/0.7697	3.9735/0.9127
		0.8216	0.8537	0.6449	0.5936			
[1.2, 0.8]	[11.8333, 14.0000]	-0.7449	-0.3704	-0.3093	0.7027	3.1672/0.9743	5.1981/0.6395	3.6298/0.8338
		-0.5466	0.8385	0.4449	0.5681			

到性能较差回路反而评价结果较好的错误评价。相对于参考文献, 文中各类扰动最小输出方差变化趋势更加明显, 反应出系统性能对于 λ 变化更加灵敏, 有利于确定 λ 的取值范围。

从图 4 可以看出随着 λ 的增大, 三类扰动作用下系统性能指标的变化趋势。

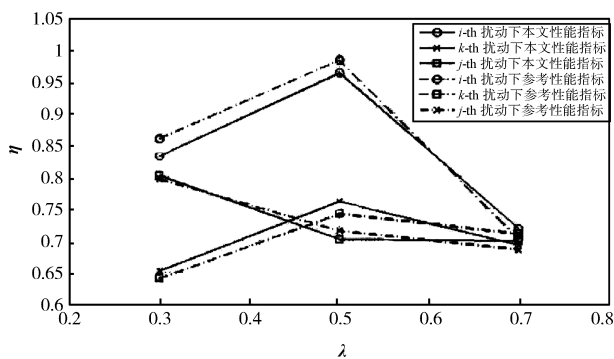
图 4 λ 变化时三类扰动下的性能指标Fig. 4 Performance index under three kinds of disturbances when λ is increasing

表 2 是闭环输出方差按式 (9) 施加约束条件后的最优控制参数和三类扰动下的输出方差。可以看出, 当权值按照扰动的重要程度对 i -th 和 k -th 分别赋值 1.2 和 0.8 时, 得到的性能指标比分配前更好, 由于考虑到了削减 k -th 中突然扰动对于性能的影响, 更利于跟踪最佳性能。当 ρ 值不变时, 为提

高产品质量将上限方差值缩小到 14.0000, 这时对系统性能的要求更加严格, 所以评价出来的性能指标较小, 应尽快调节控制器参数。反之, 放宽约束区间相当于放松了对性能的要求, 评价出来的性能指标就会较大。实际生产中应根据各部分扰动的重要程度以及实际控制效果等因素合理约束闭环输出方差的上下限值。

3 结论

本文针对线性时变扰动对广义多变量系统的影响, 将时变扰动分解成三类定常扰动, 剖析了各类扰动的性质和对各回路性能的影响程度, 用加权的输出方差上下限值来约束闭环输出方差, 通过 ITAE 寻优确定多变量系统可实现的最优控制器模型及其参数, 为当前控制器参数的重调指明了方向。仿真实例证明利用该模型中的自由参数来调节实际控制器能更好地满足用户需求。

References

- 1 Bialkowski W L. Dreams versus reality: a view from both sides of the gap: manufacturing excellence with come only through engineering excellence. *Pulp and Paper-Canada*, 1993, **94**(11): 19–27
- 2 Ender D B. Process control performance: not as good as you think. *Control Engineering*, 1993, **9**(10): 180–190
- 3 Harris T J. Assessment of control loop performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1989, **67**(5): 856–861

- 4 Xu F W, Lee K H, Huang B. Monitoring control performance via structured closed-loop response subject to output variance/covariance upper bound. *Journal of Process Control*, 2006, **16**(9): 971–984
- 5 Wang X, Huang B, Chen T. Multirate minimum variance control design and control performance assessment: a data-driven subspace approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(1): 65–74
- 6 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
- 7 McNabb C A, Qin S J. Projection based MIMO control performance monitoring: I-covariance monitoring in state space. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(8): 739–757
- 8 Zhao Y, Su H Y, Chu J, Gu Y. Multivariable control performance assessment based on generalized minimum variance benchmark. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, **18**(1): 86–94
- 9 Björklund S. A Survey and Comparison of Time-Delay Estimation Methods in Linear Systems [Ph.D. dissertation], Division of Automatic Control, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden, 2003
- 10 Bezergiannj S, Georgakis C. Evaluation of controller performance — use of models derived by subspace identification. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2003, **17**(7–9): 527–552
- 11 Yu J, Qin S J. MIMO control performance monitoring using left/right diagonal interactors. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(8): 1267–1276
- 12 Xu F W, Huang B, Tamayo E C. Performance assessment of MIMO control systems with time-variant disturbance dynamics. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, **32**(9): 2144–2154

李大宇 北京化工大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为人工智能, 先进控制. 本文通信作者. E-mail: lidz@mail.buct.edu.cn

(**LI Da-Zi** Professor at the School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology. Her research interest covers artificial intelligence and advanced process control. Corresponding author of this paper.)

焦军胜 北京化工大学信息科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为控制器性能评价. E-mail: jiaojunsheng110@163.com

(**JIAO Jun-Sheng** Master student at the School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology. His main research interest is control performance assessment.)

靳其兵 北京化工大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为内模控制. E-mail: jinqb@mail.buct.edu.cn

(**JIN Qi-Bing** Professor at the School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology. His main research interest is internal model control.)

高彦臣 青岛高校软控股份有限公司研究员. 主要研究方向为橡胶工业自动化. E-mail: gaoyc@mesnac.com

(**GAO Yan-Chen** Professor at Qingdao Gaoxiao Software Control Stock Co. Ltd. His main research interest is automation in rubber industry.)