

文章编号: 1001-0920(2011)07-1117-04

基于用户自定义指标的多变量控制系统性能评估技术

张泉灵, 黄其珍

(浙江大学 智能系统与控制研究所, 杭州 310027)

摘要: 大量的计算以及对一般关联矩阵先验知识的需求导致用户自定义指标在实际工业应用中存在诸多不便, 鉴于此, 为了减少对过程模型信息的需求, 避免估计一般关联矩阵, 研究了如何简化用户自定义指标的计算, 并提出了两种改进的用户自定义指标的计算方法. 该方法仅需过程常规数据和对过程输入/输出时延或关联矩阵阶次的估计便可完成指标的计算. 最后通过仿真验证了两种方法的优越性和有效性.

关键词: 控制性能评估; 多变量控制系统; 对角关联矩阵; 用户自定义基准

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multivariable control performance assessment techniques based on user-specified benchmark

ZHANG Quan-ling, HUANG Qi-zhen

(Institute of Cyber-systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: HUANG Qi-zhen, E-mail: hqz.sdu@126.com)

Abstract: The complicity of computation procedures and the requirement of a general interactor pose a challenging issue for industrial applications of user-specified benchmark based performance monitoring techniques. Therefore, to reduce the model requirement of a general interactor, two improved computational methods are presented in this paper, which only require routine operating data and the estimate of input/output delays or the order of interactor matrix. Simulation examples show the superiority and effectiveness of the two proposed methods.

Key words: control performance assessment; multivariable control systems; diagonal interactors; user-specified benchmark

1 引言

控制系统的性能直接影响到生产的安全、稳定、质量和效率. 据综合性报告显示^[1], 工业过程中多达 60% 的工业控制器存在控制器性能的问题. 因此, 监测与评估控制系统的性能, 使其保持较好的控制水平对于企业的发展具有重大意义. 控制系统性能评估技术的研究已成为控制界近年来的研究热点. 尽管在单回路的研究和应用中取得了成功, 但对于多变量系统, 控制系统性能评估还是一个挑战. 虽然有很多学者相继提出了多种评估多变量系统性能的方法, 但在实际工业过程中能成功应用的方法还很少^[2]. 因此, 多变量系统性能评估在理论研究和实际应用上尚存在着较大的差距.

在众多评估方法中, 最小方差控制(MVC)基准最为流行, 主要原因在于其非侵入性, 并且依靠常规数据即可完成计算. 但这只适用于时延已知的单变量

系统, 对于多变量系统, 这种简便则不复存在, 这时时延已扩展为关联矩阵, 不再是简单地估计每对输入/输出时延. 此领域的早期研究^[3-4]均需要关联矩阵的完整信息, 文献[5-6]的研究在一定程度上减轻了对信息的需求, 但仍需要完整的等同于关联矩阵的信息. 为了减轻对过程模型信息的需求, [7]给出了一个实用的次优多变量MVC控制基准, 它是SISO系统性能评估技术的自然推广, 只需要关联矩阵的阶次, 不必构造出关联矩阵, 比一般MVC基准方法更简单实用. [8]提出了右对角关联矩阵和联合左/右对角关联矩阵的概念, 进而提出了基于右对角关联矩阵和联合左/右对角关联矩阵的MVC基准, 只需估计输入-输出时延便可准确计算MVC下界.

MVC基准的另一个缺点在于它利用了一个不切实际和不期望的指标与当前控制性能进行比较. 文献[9]提出了一个有效的用户自定义基准, 过程时延之

收稿日期: 2010-04-14; 修回日期: 2010-07-02.

作者简介: 张泉灵(1973—), 男, 副研究员, 博士, 从事预测控制、工业过程的建模等研究; 黄其珍(1986—), 男, 硕士生, 从事多变量控制系统性能评估的研究.

后的闭环脉冲响应系数不再是零,而是由用户期望的闭环动态响应来设定.虽然用户自定义基准提供了一个更为实际的基准,但需要大量的计算和关联矩阵的先验知识也限制了其在实际工程中的应用.

用户自定义指标比最小方差指标更为实际,当利用用户自定义指标对系统进行性能评价时,也会遇到求解最小方差指标的问题,如过程模型的先验知识及计算关联矩阵的复杂性等.针对以上问题,本文研究了如何简化用户自定义指标的计算,从而使基于用户自定义指标的多变量控制系统性能评估技术在实际工业过程的应用成为可能.

2 基于用户自定义指标的多变量控制系统的性能评估技术

为了克服应用最小方差基准的不切实际性,一些专家学者提出了用户自定义指标.该指标中,过程时延之后的闭环脉冲响应系数不再是零,而是由用户期望的闭环动态响应来设定.与最小方差指标相比,用户自定义基准提供了一个更为实际的指标.然而,与计算基于最小方差基准的指标相比,基于用户自定义的指标同样需要关联矩阵的先验知识,即需要系统的过程模型信息.在计算该指标的同时,需要计算系统所能达到的最小方差,因而简化了计算最小方差,也就简化了用户自定义指标的计算.本文提出了两种改进的用户自定义指标的计算方法,即基于对角关联矩阵的用户自定义指标和次优用户自定义指标,仅需过程常规数据以及对过程输入/输出时延或关联矩阵阶次的估计便可以完成指标的计算,使系统的计算量得到了明显减少.

2.1 用户自定义指标

Huang 等人^[9]提出了用户自定义指标.考虑如下 MIMO 系统:

$$Y_t = GU_t + Na_t. \quad (1)$$

其中: G 是过程传递函数矩阵; N 是干扰矩阵; Y_t , U_t 和 a_t 分别是输出、输入和干扰.则系统的闭环响应为

$$Y_t = q^d D^{-1} (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)} + F_d q^{-d} + \dots) a_t. \quad (2)$$

在最小方差的控制作用下,系统响应为

$$Y_{t|\min} = q^d D^{-1} (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)}) a_t = (E_0 + E_1 q^{-1} + \dots + E_{d-1} q^{-(d-1)}) a_t. \quad (3)$$

对于用户自定义基准而言,需要在式(3)中加入用户设定的传递函数矩阵 G_R , 即

$$Y_{t|\text{user}} = (E_0 + E_1 q^{-1} + \dots + E_{d-1} q^{-(d-1)} + G_R q^{-d}) a_t. \quad (4)$$

G_R 的设定有多种方法^[9],可以直接将其设定为期望的传递函数矩阵,即 $G_R = G_{\text{des}}$.这样设定后,对于系统的性能评估则只需要常规数据和关联矩阵的先验知识.所以,要想达到简化用户自定义指标的计算,必须简化或避免关联矩阵的计算.回顾多变量控制系统性能评估的发展,可以发现文献[7]提出的次优多变量 MVC 控制基准的计算方法完全可以用来计算次优的用户自定义指标,而将文献[8]提出的对角关联矩阵应用到用户自定义指标的计算中,也可得到准确的用户自定义指标值.

2.2 基于对角关联矩阵的用户自定义指标

首先介绍对角关联矩阵.根据 Yuan 等人^[8]的理论,对角关联矩阵分为右对角关联矩阵 D_R 和左对角关联矩阵 D_L .当系统时延较为简单时,只需估计 D_R .对于任意 $n \times n$ 有理多项式传递函数矩阵 $G(q)$,若输入变量 $1 \sim n$ 的时延分别为 d'_1, d'_2, \dots, d'_n , 则 $G(q)$ 可以表示为

$$G(q) = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11} q^{-d'_1} & \dots & \tilde{G}_{1n} q^{-d'_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{G}_{n1} q^{-d'_1} & \dots & \tilde{G}_{nn} q^{-d'_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11} & \dots & \tilde{G}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{G}_{n1} & \dots & \tilde{G}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^{-d'_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & q^{-d'_n} \end{bmatrix} = \tilde{G} D_R^{-1}, \quad (5)$$

其中 $D_R = \text{diag}(q^{d'_1}, q^{d'_2}, \dots, q^{d'_n})$ 是包含所有输入时延的对角矩阵.如果满足

$$\lim_{q^{-1} \rightarrow 0} \tilde{G}(q) = \lim_{q^{-1} \rightarrow 0} G(q) D_R = K, \quad (6)$$

其中 K 为满秩矩阵且 $\det(D_R) = q^r$, 则 D_R 即为 $G(q)$ 的右对角关联矩阵. D_R 可以从 $G(q)$ 的 I/O 时延矩阵 $D_{I/O}$ 中分解出来, 即

$$D_{I/O} = \begin{bmatrix} q^{-d_{1,1}} & \dots & q^{-d_{1,n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q^{-d_{n,1}} & \dots & q^{-d_{n,n}} \end{bmatrix},$$

其中 $d_{i,j}$ 为第 i 个输入与第 j 个输出间的时延.则有

$$D_R = \text{diag}(q^{d'_1}, q^{d'_2}, \dots, q^{d'_n}), \quad (7)$$

$$d'_j = \min_i d_{i,j}. \quad (8)$$

关于 D_R 是否存在的证明也可简化为:若 G_0^f 为系统一阶无 I/O 延时的 Markov 参数, 即

$$G_0^f = \begin{bmatrix} g_{d_{1,1}}^{(1,1)} & \dots & g_{d_{1,n}}^{(1,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{d_{n,1}}^{(n,1)} & \dots & g_{d_{n,n}}^{(n,n)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

则有

$$\lim_{q^{-1} \rightarrow 0} G D_R = \lim_{q^{-1} \rightarrow 0} (G_0^f \odot D_{I/O}) D_R. \quad (10)$$

所以只需满足

$$\lim_{q^{-1} \rightarrow 0} (G_0^f \odot D_{I/O})D_R = K. \quad (11)$$

若 K 满秩, 则系统存在右对角关联矩阵.

实际上, 一阶无 I/O 延时的 Markov 参数 G_0^f 等同于过程传递函数 $G(q)$ 的增益矩阵, 所以只需知道增益矩阵便可判断对角关联矩阵是否存在. 显然估计增益矩阵要比估计所有的主导 Markov 参数简单得多. 对于时延较为复杂的过程可求解联合左/右对角关联矩阵^[8], 有

$$G(q) = D_L^{-1} \tilde{G}(q) D_R^{-1}, \quad (12)$$

其中 D_R 和 D_L 均可从 $G(q)$ 的 I/O 时延矩阵 $D_{I/O}$ 中分解出来. 若系统存在右对角关联矩阵, 则有

$$Y_{t|duser} = q^d (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)} + q^{-d} G_R) D_R^{-1} a_t. \quad (13)$$

若系统存在联合左/右对角关联矩阵, 则有

$$Y_{t|duser} = q^d D_L^{-1} (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)} + q^{-d} G_R) D_R^{-1} a_t. \quad (14)$$

进而, 基于对角关联矩阵的用户自定义指标 η_{duser} 可以表示为

$$\eta_{duser} = \text{tr}(\Sigma_{duser}) / \text{tr}(\Sigma_Y). \quad (15)$$

2.3 次优用户自定义指标

当一些系统不存在对角关联矩阵时, 为了得到更为实际的用户自定义指标, 可以利用 Huang 等人^[7]提出的次优多变量 MVC 控制基准的计算方法来计算次优的用户自定义指标. 相对于估计完整的关联矩阵, 估计其阶次是简单可行的. 根据 Huang 的理论, 有

$$MV_{d-v} \leq MV \leq MV_d, \quad (16)$$

$$MV_d = \text{tr}(F_0 \Sigma_a F_0^T + F_1 \Sigma_a F_1^T + \dots + F_{d-1} \Sigma_a F_{d-1}^T), \quad (17)$$

$$MV_{d-v} = \text{tr}(F_0 \Sigma_a F_0^T + F_1 \Sigma_a F_1^T + \dots + F_{d-v-1} \Sigma_a F_{d-v-1}^T). \quad (18)$$

其中 MV_d 和 MV_{d-v} 分别为最小方差的上限和下限, d 为关联矩阵的阶次, v 为关联矩阵中 q 的最大次数与最小次数之差. 这样即可计算次优的用户自定义指标为

$$Y_{t|user} = q^d (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)} + q^{-d} G_R) a_t, \quad (19)$$

$$Y_{t|user} = q^d (F_0 + F_1 q^{-1} + \dots + F_{d-v-1} q^{-(d-v-1)} + q^{-(d-v)} G_R) a_t. \quad (20)$$

则用户自定义指标值的上限值和下限值可以分别表示为

$$\eta_{user} = \text{tr}(\Sigma_{user}) / \text{tr}(\Sigma_Y), \quad (21)$$

$$\eta_{user} = \text{tr}(\Sigma_{luser}) / \text{tr}(\Sigma_Y). \quad (22)$$

3 仿真研究

3.1 仿真对象

考虑如下系统: 过程模型为

$$G(q) = \begin{bmatrix} \frac{q^{-1}}{1-0.4q^{-1}} & \frac{k_{12}q^{-2}}{1-0.1q^{-1}} \\ \frac{0.3q^{-1}}{1-0.1q^{-1}} & \frac{q^{-2}}{1-0.8q^{-1}} \end{bmatrix}.$$

干扰模型为

$$N(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-0.5q^{-1}} & \frac{-0.6}{1-0.1q^{-1}} \\ \frac{0.5}{1-0.5q^{-1}} & \frac{1.0}{1-0.5q^{-1}} \end{bmatrix}.$$

干扰 $a(t)$ 为二维零均值白噪声序列, $\Sigma_a = 0.1I$. 系统采用 PI 控制器, 且有

$$Q_c = \begin{bmatrix} K_{p1} \left(1 + \frac{t_s}{\tau_{i1}(1-q^{-1})}\right) & 0 \\ 0 & K_{p2} \left(1 + \frac{t_s}{\tau_{i2}(1-q^{-1})}\right) \end{bmatrix},$$

$K_{p1} = 0.12, \tau_{i1} = 1.20, K_{p2} = 0.08, \tau_{i2} = 6.35$.

3.2 仿真过程

令 $k_{12} = 1$, 将 G_R 设定为期望的传递函数矩阵 G_{des} , 即 $G_R = G_{des} = \frac{0.4}{1-0.5q^{-1}}$. 首先可求得一般关

联矩阵为 $D = \begin{bmatrix} -0.9578q & -0.2873q \\ -0.2873q^2 & 0.9578q^2 \end{bmatrix}$. 更为简单的

右对角关联矩阵为 $D_R = \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & q^2 \end{bmatrix}$. 计算得到基于一般

关联矩阵的用户自定义指标 η_{user} 和基于对角关联矩阵的用户自定义指标 η_{duser} 分别为 $\eta_{user} = 0.9994, \eta_{duser} = 1.0029$. 二者的评估结果一致, 基于对角关联矩阵的用户自定义指标减少了模型需求和关联矩阵的计算, 更为简单方便. 再计算次优的用户自定义指标得到 $\eta_{user} = 1.0235, \eta_{user} = 0.8972$. 可以看出, 当系统不存在对角关联矩阵时, 也可以方便地得到次优的用户自定义指标值.

当 $k_{12} = 1$ 时, 可以计算基于最小方差基准的性能指标 $\eta_{mv} = 0.8565$, 说明系统性能还可以进一步提高, 而在用户自定义指标的评价下, 系统已达到期望状态, 无需作出调整.

令 k_{12} 不断变化, 分别利用对角关联矩阵和一般关联矩阵来计算系统基于最小方差基准的性能指标, 并比较二者的符合程度, 如图 1 所示. 由图 1 可以看出, 随着 k_{12} 的增大, 两输出间的关联变强, 系统性能开始恶化. 同时, 采用对角关联矩阵计算的性能指标值与采用一般关联矩阵计算的性能指标值相一致. 所以, 当系统存在对角关联矩阵时, 计算最小方差完全可以由对角关联矩阵代替一般关联矩阵, 从而减少对过程模型信息的需求, 简化计算. 当设定了期望的传递函数矩阵 G_{des} 后, 即可更为简便地计算用户自定义

指标. 当不存在对角关联矩阵时, 则可以计算次优用户自定义指标, 得到用户自定义指标的上下限.

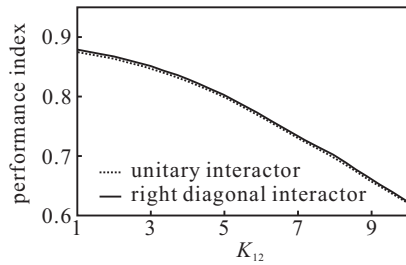


图 1 由一般关联矩阵和右对角关联矩阵计算的基于 MVC 基准的性能指标的比较

4 结 论

本文从实用角度研究了改进的用户自定义指标的计算方法, 不但减轻了求解互联矩阵的复杂性, 而且克服了最小方差基准的一些缺陷, 提供了更为实用的评价系统性能的标准. 当系统存在对角关联矩阵时, 可以方便地求得用户自定义指标的准确值; 当系统不存在对角关联矩阵时, 可以得到次优的用户自定义指标值, 这两种计算方法可以形成有效的互补. 在实际应用中, 两种方法不需要过程模型信息, 应用较为方便. 计算机仿真结果表明, 这两种方法减少了对过程模型的需求, 简化了计算.

参考文献(References)

- [1] Jelali M. An overview of control performance assessment technology and industrial applications[J]. Control Engineering Pract, 2006, 14: 441-466.
- [2] Horch A, Dumont G. Special issue for control loop performance assessment[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 2003, 17: 523-525.
- [3] Harris T J, Boudreau F, MacGregor J F. Performance assessment using of multivariable feedback controllers[J]. Automatica, 1996, 23: 1505-1518.
- [4] Huang B, Shah S L, Fujii H. The unitary interactor matrix and its estimation using closed-loop data[J]. J of Process Control, 1997, 7: 195-207.
- [5] Ko B S, Edgar T F. Performance assessment of multivariable feedback control systems[J]. Automatica, 2001, 37: 899-905.
- [6] Kadali R, Huang B. Multivariate control performance assessment without interactor matrix[C]. IFAC Advanced Control of Chemical Processes. 2003: 61-66.
- [7] Huang B, Ding S X, Thornhill N F. Practical solutions to multivariate feedback control performance assessment problem: Reduced a prior knowledge of interactor matrices[J]. J of Process Control, 2005, 15: 573-583.
- [8] Yu J, Qin S J. MIMO control performance monitoring using left/right diagonal interactors[J]. J of Process Control, 2009.
- [9] Huang B, Shah S L. Practical issues in multivariable feedback control performance assessment[J]. J of Process Control, 1998, 8: 421-430.
- [10] Daafouz J, Riedinger P, Iung C. Stability analysis and control synthesis for switched systems: A switched Lyapunov function approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1883-1887.
- [11] Ding D W, Yang G H. Static output feedback for discrete-time switched linear systems under arbitrary switching[J]. Int J of Control, Automation, and Systems, 2010, 8(2): 220-227.
- [12] Fridman E, Shaked U. A descriptor system approach to H_∞ control of linear time-delay systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(2): 253-270.
- [13] He Y, Wang Q G, Xie L H, et al. Further improvement of freewighting matrices technique for systems with timevarying delay[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(2): 293-299.
- [14] Han Q L. A discrete delay decomposition approach to stability of linear retarded and neutral systems[J]. Automatica, 2009, 45(2): 517-524.
- [15] Zhu X L, Yang G H. Jensen integral inequality approach to stability analysis of continuous-time systems with time-varying delay[J]. IET Control Theory & Applications, 2008, 2(6): 524-534.
- [16] Gu K. An integral inequality in the stability problem of time-delay systems[C]. Proc of 39th IEEE Conf on Decision and Control. 2000: 2805-2810.
- [17] Shao H. New delay-dependent stability criteria for systems with interval delay[J]. Automatica, 2009, 45: 744-749.
- [18] Zhu X L, Wang Y, Yang G H. New stability criteria for continuous-time systems with interval time-varying delay[J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(6): 1101-1107.
- [19] Park P, Ko J W, Jeong C. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2010, 47: 235-238.
- [20] Sun X M, Zhao J, Hill D J. Stability and L_2 -gain analysis for switched delay system: A delay-dependent method[J]. Automatica, 2006, 42: 1769-1774.

(上接第1116页)