一种基于初始闭环系统的

性能评估方法

冯皓1 谢磊1 张建明1

摘 要 基于初始闭环系统的输出方差和最小方差指标,提出了一种新 的性能评估方法.在过程时滞变化的情况下,基于最小方差指标的评估 可能会得到错误的结论,而新的方法可以避免这一缺点.扩展的性能指 标以控制器投运后的初始状态作为零基准,能够更准确地反映操作工系 统性能的变化,能够很好地替代最小方差指标.利用交互矩阵可将扩展指 标推广到多变量系统的评估中,本文将这一算法应用于精馏塔过程的评 估.精馏塔过程的仿真示例验证了方法的有效性,表明过程时滞变化时 用扩展指标来进行评估更能反映系统性能的变化.

关键词 性能评估,初始闭环系统,最小方差指标,精馏塔

引用格式 谢磊, 冯皓, 张建明. 一种基于初始闭环系统的性能评估方

法. 自动化学报, 2013, 39(5): 649-653 DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00649

A New Approach to Performance

Assessment Based on Initial-closed-system

XIE Lei¹ FENG Hao¹ ZHANG Jian-Ming¹

Abstract This article proposes a new approach to performance assessment based on initial-closed-system and minimum variance index. When the time delay of a process becomes shorter, assessment based on minimum variance index may draw a wrong conclusion, while the new approach can avoid this disadvantage. A generalized index that chooses the initial performance of closed-system as zero-point can give operators more exact result about how the performance of system changes and can substitute for the minimum variance index effectively. By the interactor matrix, the generalized index can be extended for multivariable systems. This article applies the approach to performance assessment of a distillation columns process. Simulation result of distillation columns process shows the validity of this method, indicating that the generalized index should be used for assessment when the time delay of the process becomes shorter.

Key words Performance assessment, initial-closed-system, minimum variance index, distillation columns

Citation Xie Lei, Feng Hao, Zhang Jian-Ming. A new approach to performance assessment based on initial closed-system. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 649-653

工业现场有着众多的控制回路,控制器通常是按照一定 的性能要求来设计的,而随着时间的推移,生产工况发生变 化,导致控制回路的性能下降,若不及时重新整定,会导致生 产过程波动变大、产品质量下降等后果.为此,需要一种对控

收稿日期 2012-05-15 录用日期 2012-07-22 Manuscript received May 15, 2012; accepted July 22, 2012

国家自然科学基金 (60721062, 61134007, 60904039), 中央高校基本科研业 务费专项资金资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (60721062, 61134007, 60904039) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities 本文客座编委 李小沅

Recommended by Guest Editor LI Shao-Yuan

^{1.} 浙江大学智能系统与控制研究所 杭州 310027

^{1.} Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027

制回路进行性能评估的手段, 能够对控制回路的性能进行监测.

1989年, Harris^[1] 最早提出了利用最小方差控制 (Minimum variance control, MVC) 来进行性能评估, 他将最小方 差控制作用下的系统看作理想系统,将其输出方差作为系统 性能基准的上界,他提出的最小方差指标也被称为 Harris 指 标. 1996 年, Tyler 等^[2] 将 Harris 指标推广到非最小相位系 统. 1996 年, Harris 利用多变量谱因子分解和多变量丢番图 方程的解来描述多变量控制系统的性能^[3],将单变量最小方 差控制基准引入到多变量控制系统中. Huang 等^[4-5] 对基 于最小方差控制的性能评估算法进行了改进,提出了系统滤 波和相关性分析 (Filtering and correlation analysis, FCOR) 算法,通过引入交互矩阵,把单变量性能评估中的时间延迟 用交互矩阵代替,把 FCOR 算法扩展到多变量控制系统,之 后还将该方法扩展到含有时变扰动的系统^[6]等领域. 2000 年, Bezergianni 等^[7] 在最小方差指标的基础上引入了开环 的性能,提出了单变量控制系统的相对方差指标 (Relative variance index, RVI), 将系统闭环输出方差与开环时的输出 方差及最小方差同时作比较. 2007 年, Wang 等^[8] 等将数据 驱动的子空间方法用于性能评估,从而不需要交互矩阵的知 识. Bezergianni 等^[9] 对于子空间的方法从辨识阶段开始做 了更深入的研究.

1999年, Huang 等^[10] 提出了使用线性二次型高斯 (Linear quadratic Gaussian, LQG) 最优控制作为性能评估的基 准, 这一方法将系统的输入和输出均作为评估系统性能的 因素, 通过获得权衡曲线来定义性能指标. 2002年, Kadali 等^[11] 提出了数据驱动的子空间 LQG 方法, 不需要求取系 统的状态空间描述就可以进行 LQG 性能评估. Xu 等^[12] 将 子空间的方法用于经济性能评估. Grimble^[13] 将控制幅度作 为惩罚项引入目标函数, 提出了广义最小方差 (Generalized minimum variance, GMV) 基准. 与只考虑系统输出方差的 最小方差指标不同, LQG 和 GMV 基准均考虑了系统的输 入与输出, 适合于模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 这一类将控制精度和控制代价作为目标函数的控制器 的评估. Tian 等^[14] 将子空间的方法用于 MPC 的性能监测.

本文將提出一种新的性能评估方法,将闭环后系统输出 方差同时与理想的最小方差及初始闭环系统输出方差做比 较.最小方差指标 (Harris 指标) 表征了当前控制器与理想控 制器的接近程度,是一个绝对指标;而本文提出的指标则表征 了相对于初始工况,系统输出方差的改善程度,是一个相对 指标.相对指标比绝对指标在应用中有更大的实用性,同时 明确的物理意义使其比最小方差指标更容易让操作工理解. 本文把这一指标和最小方差指标进行比较,发现当过程时滞 变化时,最小方差指标可能给出错误的评估结果,而新的指 标则可以避免这一状况的发生.此外,还将新指标推广到多 变量控制系统中,使其有更广的应用范围.精馏塔控制系统 的仿真示例表明了算法的有效性,并且验证了当过程时滞可 能减小的情况下,新的指标适用性更强.

1 推广的性能评估指标

对于一个在随机噪声作用下的系统,最小方差控制器可 以使得控制回路输出与设定值之间误差的方差达到最小.对 于一个单变量控制系统,最小方差控制器可以消除系统时 滞后的所有扰动,Harris 对最小方差指标的定义如下,其中 σ_{MV}^2 为最小方差控制器作用下系统输出误差的方差, σ_y^2 为 实际控制器作用下系统输出误差的方差:

$$\eta_{\text{Harris}} = \frac{\sigma_{\text{MV}}^2}{\sigma_y^2} \tag{1}$$

η_{Harris}的取值为 0 到 1, 当实际系统的输出方差越接近 最小方差控制作用下系统的输出方差时, η_{Harris}越接近 1, 表 示回路的性能越好.最小方差指标把当前闭环系统的输出方 差和只有在最小方差控制器作用下才能达到的理论上的最小 方差做比较,并且在实际应用中,由于最小方差控制器会引 起输入过分频繁的变动,往往得不到应用,所以很难向操作 工解释最小方差指标.同时,仅仅把当前输出方差和理论上 的最小方差做比较,不引入初始过程中的任何参量,当过程 模型发生变化时,最小方差指标的变小主要由最小方差的变 小引起,但输出方差却没有多大的变化,这样可能会得出错 误的结论.

基于初始闭环回路的性能评估方法在最小方差指标的基础上,引入了控制器投运之后,闭环系统的输出方差.这一 方法认为系统刚进行投运时性能是好的,并以此作为零基准, 来评估之后系统性能的变化.对于单变量控制系统,扩展的 性能指标定义为

$$\eta_{\rm init} = \frac{\sigma_{\rm initial}^2 - \sigma_y^2}{\sigma_{\rm initial}^2 - \sigma_{\rm MV}^2} \tag{2}$$

其中, $\sigma_{\text{initial}}^2$ 为控制器投运之后, 初始系统的输出方差. η_{init} 越大表明性能越好. 当 η_{init} 为零时, 表明系统性能和初始工 况一样, 没有变化; 当 η_{init} 大于零时, 表明系统性能比初始工 况有所改善; 当 η_{init} 小于零时, 表明系统性能比初始工况有 所下降. 需要注意的是, 一般情况下, $\sigma_{\text{initial}}^2$ 大于 σ_{MV}^2 , η_{init} 的取值为 ($-\infty$,1); 当 $\sigma_{\text{initial}}^2$ 小于 σ_{MV}^2 时, 由于实际输出方 差大于最小方差, 此时 η_{init} 大于 1, 说明模型发生了较大的 变化, 性能下降较大.

2 单变量控制系统性能评估

最小方差指标将实际输出方差与最小方差作比较,但开 环时系统输出方差即不为零,实际方差与最小方差只是两个 绝对的数值,绝对数值的比较使得得到的性能指标没有一个 确切的物理意义,很难说服操作工这是当前系统性能的表征. 如同液位控制系统,相比真实液位是多少,我们更关心其与 设定值的差值.在整定控制器时,我们希望系统能够按照既 定的设计性能来运行,以投运后初始的输出方差作为基准, 可以明确地让操作工知道当前系统性能是变好还是变差.新 指标分母部分是相比投运后的初始状态,输出方差理论上最 大可以改变的量,分子是当前系统输出方差与初始状态的差 值,新指标的物理意义是当前系统对于输出方差的抑制能力 相比初始状态的改善比例.以下例子将讨论当过程的时滞发 生变化时,新指标与最小方差指标是如何变化的.

一阶连续时间模型为

$$y(t) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-ds} u(t) + \frac{0.2}{50s + 1} e(t)$$
(3)

当 k = 1, $\tau = 20$ s 时, 将过程离散化, 采样时间为 1 s, 获得离散模型:

$$y(t) = \frac{0.04877}{z - 0.9512} z^{-d} u(t) + \frac{0.00396}{z - 0.9802} e(t)$$
(4)

对于此过程,我们采用 PI 控制器进行控制,控制器 Q 采 用如下形式:

$$Q = T_p \left(1 + T_i \frac{z}{z-1} \right) \tag{5}$$

过程时滞 d = 15时,利用 ZN 法对控制器进行整定得到 PI 控制器的参数 $T_p = 0.49$, $T_i = 0.077$. 当过程时滞 d 分别 取不同值时,我们对控制器进行性能评估,得到的结果如表 1 所示,同时将对应的 η_{init} 和 η_{Harris} 绘制在图 1 中.



图 1 不同过程时滞对应的性能评估值 Fig. 1 Performance assessment value of process with different time delays

对评估结果进行比较, 在过程时滞 d < 15的情况下, 随 着时滞的增加, η_{Harris} 增大, 认为性能变好, 而 η_{init} 减小, 认 为性能变差. 当时滞继续增加时, 两者均减小, 认为性能变 差. η_{Harris} 认为 d = 15 时系统性能最好, η_{init} 认为 d = 3 时 系统性能最好.

表 1 不同过程时滞下的 η_{init} 和 η_{Harris} Table 1 η_{init} and η_{Harris} of process with different time delays

时滞	$\sigma_{\rm MV}^2$	$\sigma^2_{ m initial}$	σ_y^2	$\eta_{ m init}$	$\eta_{ m Harris}$
3	0.03	0.33	0.19	0.457	0.159
6	0.07	0.33	0.22	0.426	0.329
9	0.11	0.33	0.25	0.357	0.436
12	0.14	0.33	0.29	0.228	0.5
15	0.17	0.33	0.33	0	0.52
18	0.2	0.33	0.38	-0.393	0.516
21	0.22	0.33	0.45	-1.078	0.491
24	0.24	0.33	0.54	-2.301	0.449

在工业过程中,时滞越大则会带来输出波动越大、系统 的稳定性变差等后果,甚至造成回路振荡.当1 ≤ d ≤ 15,利 用 η_{initial} 和 η_{Harris} 对系统进行分析得到了相反的结论,但 根据经验我们可以确定 η_{initial} 的结果是正确的. d = 3 时 η_{Harris} 较初始工况下降较多,认为控制器需要重新整定,这 将给操作工一个错误的信号.由于控制器 Q 是在 d = 15 时 进行整定的,Q 比较接近此时的理想控制器(最小方差控制 器).当d从15变化到3时, σ_{MV}^2 和 σ_y^2 自身变动幅度相 近,但 σ_{MV}^2 却减小为自身的1/6,而 σ_y^2 的减小值不到自身 的1/2;当d≥15 时,随着d的增大, σ_y^2 变动幅度较大,使 得 d = 15 时 η_{Harris} 达到峰值. $\sigma_{\text{initial}}^2$ 的加入获得了 σ_{MV}^2 随着模型的变化而变化的相对值,从而使得 η_{init} 更为精确. η_{Harris} 是将当前控制器与理想控制器作用下的过程输出方差 作比较,而 η_{init} 是评估系统投运后,相对于初始的性能,随着 过程模型的变化,输出方差改善的比例.以初始性能作为基 准, η_{init} 给出了更有效的评估结果.

3 多变量控制系统的推广指标

r

$$Y_t = TU_t + Na_t \tag{6}$$

定义多变量控制系统的推广指标为

$$g_{\text{init}} = \frac{\mathrm{E}\{Y_t^{\mathrm{T}}|_{\text{init}}Y_t|_{\text{init}}\} - \mathrm{E}\{Y_t^{\mathrm{T}}Y_t\}}{\mathrm{E}\{Y_t^{\mathrm{T}}|_{\text{init}}Y_t|_{\text{init}}\} - \mathrm{E}\{Y_t^{\mathrm{T}}|_{\mathrm{MV}}Y_t|_{\mathrm{MV}}\}}$$
(7)

其中, $Y_t|_{MV}$ 为最小方差控制器作用下系统的输出误差, Y_t 为实际工况中系统的输出误差, $Y_t|_{init}$ 为初始工况下的输出误差.

多变量相对方差指标计算需要引入交互矩阵的概念.对于传递函数矩阵 *T*,存在唯一的下三角矩阵 *D*, $|D| = q^{\tau}$,并且满足 $\lim_{q^{-1}\to 0} DT = K$,其中, *K* 为一常数阵,即称 *D* 为交互矩阵.

当不受下三角矩阵这一条件限制,并且满足 $D^{T}(q^{-1}) \times D(q) = E$ 时,称 D 为单位交互矩阵,以下计算用到的均为单位交互矩阵.可推出

$$D^{-1} = (D_0 q^d + \dots + D_{d-1} q)^{-1} = D_0^{\mathrm{T}} q^{-d} + \dots + D_{d-1}^{\mathrm{T}} q^{-1}$$
(8)

计算系统闭环后的最小方差不变项 Fat

$$q^{-d}DN = F_0 + \dots + F_{d-1}q^{-(d-1)} + q^{-d}R \tag{9}$$

$$q^{-a}DY_t|_{MV} = e_t = F_0a_t + \dots + F_{d-1}a_{t-d+1}$$
(10)

等式两边同乘以 $q^d D^{-1}$, 得:

$$Y_t|_{MV} = (D_0^{\mathrm{T}} q^{-d} + \dots + D_{d-1}^{\mathrm{T}} q^{-1}) \times (F_0 + \dots + F_{d-1} q^{-(d-1)}) a_t = (E_0 + \dots + E_{d-1} q^{-(d-1)}) a_t$$
(11)

其中

$$E = [E_0, E_1, \cdots, E_{(d-1)}] = [D_0^{\mathrm{T}}, E_1^{\mathrm{T}}, \cdots, E_{(d-1)}^{\mathrm{T}}] \times \begin{pmatrix} F_0 & F_1 & \cdots & \cdots & F_{d-1} \\ F_1 & F_2 & \cdots & F_{d-1} \\ \vdots & \vdots & & \\ \vdots & F_{d-1} & & \\ F_{d-1} & & & \end{pmatrix}$$
(12)

初始工况与当前工况下的输出方差可以通过辨识来获得 扰动至过程的模型,再由模型的 H₂ 范数来获得输出方差,则 推广指标可化为

$$\eta_{\text{init}} = \frac{\|N\|_2^2 - \|W\|_2^2}{\|N\|_2^2 - \operatorname{tr}\left(E^{\mathrm{T}}E\right)}$$
(13)

其中, N 和 W 分别为初始工况和当前工况下扰动到系统输出的传递函数.

4 精馏塔过程仿真

精馏就是将一定浓度的混合溶液送入精馏装置中,使其 反复地进行部分汽化和部分冷凝,从而得到预期的塔顶和塔 底产品.完成这一操作过程的相应设备除了精馏塔之外还有 再沸器、冷凝器、回流罐和回流泵等辅助设备,目前工业上 常采用的精馏塔过程如图 2 所示.精馏塔是一个多输入多 输出的对象,由多级塔板组成,内在机理复杂,参数间关联严 重,对控制要求较高,所以本文采用精馏塔过程作为仿真对 象.仿真所使用的精馏塔为乙醇 – 水常压筛板精馏塔,共41 块塔板,每块塔板上液体流动的时间常数为 0.06 分钟,进料 塔板为从下往上数第 21 块塔板,板上液体的相对挥发度为 1.5,原料液为饱和液体,其中乙醇的摩尔分数 zF = 50%,进 料流量 F = 8 kmol/min,回流量 L = 16 kmol/min,再沸器蒸汽流量 <math>V = 20 kmol/min, 馏出液产量 D = 4 kmol/min,釜液产量 B = 4 kmol/min. 在 Simulink 中对其进行机理建模^[15],可获得精馏塔的非线性模型.



Fig. 2 Flowchart of the distillation columns process

达到稳态时,仿真获得馏出液浓度为 96.3 %, 釜液浓度 为 3.7 %.利用两个增益为 30 的比例控制器控制塔顶和塔底 的液位,控制变量为馏出液产量和釜液产量.精馏塔模型为

$$\begin{pmatrix} X_D \\ X_B \end{pmatrix} = Tz^{-d} \begin{pmatrix} L \\ V \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix}$$
(14)

其中, X_D 为馏出液浓度, X_B 为釜液浓度, L 为回流量, V 为再沸器蒸汽量, e_1 , e_2 为白噪声, T 为过程模型, N 为噪声 模型, d 为测量、阀门等造成的时滞.

当 d = 0 时, 对系统作用激励信号, 通过系统辨识得到:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{0.013}{z^4 - 0.88z^3} & \frac{-0.012}{z^2 - 0.88z}\\ \frac{0.01}{z^4 - 1.3z^3 + 0.41z^2} & \frac{-0.019}{z^3 - 0.86z^2} \end{bmatrix}$$
(15)

$$N = \begin{bmatrix} \frac{0.0005z}{z^2 - 1.8z + 0.79} & \frac{0.066z}{z^2 - 1.3z + 0.33}\\ \frac{0.012}{z - 0.86} & \frac{0.12z}{z^2 - 1.1z + 0.2} \end{bmatrix}$$
(16)

采用 PI 控制器对精馏塔过程进行控制,控制器整定则 采用 Simulink 中 PID 模块自带的整定功能. 当 d = 2 时,整 定获得控制器

$$Q = \begin{bmatrix} -0.4 + 0.8 \frac{z}{z-1} & 0\\ 0 & -3.1 - 0.68 \frac{z}{z-1} \end{bmatrix}$$
(17)

当 d 取不同值时, 对控制器性能进行评估, 结果如表 2 所示. 可以发现随着 d 的增加 η_{init} 一直变小, 而 η_{Harris} 先增 大后变小, 这与之前单变量仿真例子一样, η_{init} 表明性能随 着时滞的增加一直变差, 而 η_{Harris} 表明性能先变好后变差.

表 2 不同时滞下精馏塔的性能评估值

 Table 2
 Performance assessment value of distillation columns process with different time delays

d	0	1	2	3	4
$\eta_{ m init}$	0.4	0.26	0	-0.49	-1.44
$\eta_{ m Harris}$	0.26	0.35	0.37	0.35	0.29

将系统的输入均设置为方差为 0.0001 的白噪声, d = 0和 d = 2 时系统的输出如图 3 所示. 从图中可以看出 d = 2时的系统输出波动显然要大于 d = 0 时的波动, 所以时滞从 0 增加到 2, 系统性能显然是下降了, 此时 η_{Harris} 给出错误 的结论, η_{init} 则是给出了正确的结论. 最小方差指标评估的 是过程的输出方差, 虽然过程更接近于最小方差控制作用下 的状态, 但由于过程本身发生了较大的变化, 使得这一评估 不再有意义, 而推广的指标评估的是过程输出方差的改善值, 即使过程发生了较大的变化, 仍能准确地表现系统的性能.



图 3 不同时滞下精馏塔的输出比较 Fig. 3 Output of the distillation columns process with different time delays

5 结论

本文提出了一种基于初始闭环系统的性能评估方法, 这 种方法是在最小方差指标中加入了初始系统输出方差, 使得 对系统的评估更加准确, 避免了当过程时滞变化时, 最小方 差指标可能会给出错误评估结论这一缺点. 新的指标以初始 性能为基准, 对应指标的零点, 使评估结果更加直观, 能够很 好地替代最小方差指标. 利用交互矩阵将新指标从单变量系 统扩展到多变量系统, 可以让新指标适应现代工业中对于多 变量控制系统评估的要求. 精馏塔过程的仿真验证了算法的 有效性, 同时也证明了由于阀门或测量的原因, 当精馏塔过 程时滞变小时, 用本文提出的指标来评估更为有效.

References

1 Harris T J. Assessment of control loop performance. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989, **67**(5): 856 -861

- 2 Tyler M L, Morari M. Performance monitoring of control systems using likelihood methods. Automatica, 1996, 32(8): 1145-1162
- 3 Harris T J, Boudreau F, Macgregor J F. Performance assessment of multivariable feedback controllers. Automatica, 1996, **32**(11): 1505-1518
- 4 Huang B, Shah S L. Practical issues in multivariable feedback control performance assessment. *Journal of Process Control*, 1998, 8(5–6): 421–430
- 5 Huang B, Shah S L, Fujii H. The unitary interactor matrix and its estimation using closed-loop data. *Journal of Process Control*, 1997, 7(3): 195-207
- 6 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
- 7 Bezergianni S, Georgakis C. Controller performance assessment based on minimum and open-loop output variance. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(7): 791-797
- 8 Wang X, Huang B, Chen T. Multirate minimum variance control design and control performance assessment: a datadriven subspace approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(1): 65–74
- 9 Bezergianni S, Özkan L. On the assessment of multivariable controllers using closed loop data, Part I: Identification of system models. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(1): 125 -131
- 10 Huang B, Shah S L. Performance Assessment of Control Loops: Theory and Applications. UK: Springer-Verlag, 1999.
- 11 Kadali R, Huang B. Controller performance analysis with LQG benchmark obtained under closed loop conditions. ISA Transactions, 2002, 41(4): 521-537
- 12 Xu Q L, Zhao C, Zhang D F, An A M, Zhang C. Datadriven LQG benchmaking for economic performance assessment of advanced process control systems. In: Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, USA, IEEE: 2011. 5085-5090
- 13 Grimble M J. Controller performance benchmarking and tuning using generalised minimum variance control. Automatica, 2002, 38(12): 2111-2119
- 14 Tian X M, Chen G Q, Chen S. A data-based approach for multivariate model predictive control performance monitoring. *Neurocomputing*, 2011, **74**(4): 588–597
- 15 Luyben W L. Realistic models for distillation columns with partial condensers producing both liquid and vapor products. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012, 51(24): 8334-8339

谢 磊 浙江大学智能系统与控制研究所副教授. 主要研究方向为工业 控制系统性能评估, 过程监测与故障诊断技术.

E-mail: leix@iipc.zju.edu.cn

(XIE Lei Associate professor at the Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University. His research interest covers control performance assessment and diagnosis, process monitoring, and fault diagnosis.)

冯 皓 浙江大学智能系统与控制研究所硕士研究生.主要研究方向为性能评估. E-mail: wunian@zju.edu.cn

(FENG Hao Master student at the Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University. His main research interest is performance assessment.)

张建明 浙江大学智能系统与控制研究所副研究员.主要研究方向为智能控制和仿生优化.本文通信作者.

E-mail: jmzhang@iipc.zju.edu.cn

(**ZHANG Jian-Ming** Associate professor at the Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University. His research interest covers intelligent control and evolutionary optimization. Corresponding author of this paper.)