

文章编号: 1001-0920(2008)07-0751-05

基于二维混合模型的改进型重复控制器设计

吴敏¹, 兰永红¹, 余锦华²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 东京工科大学 仿生学部, 日本 东京 192-0982)

摘要: 针对一类线性系统, 提出一种基于连续/离散二维混合模型的改进型重复控制系统设计方法. 首先, 通过分析重复控制系统中独立存在的控制行为和学习行为, 建立了连续/离散二维混合模型, 并将重复控制设计问题转化为一类连续/离散二维系统的状态反馈控制问题; 然后, 基于对重复控制过程的分析 and 二维模型, 提出一种新型重复控制系统结构, 并将重复控制器的设计问题转化为连续/离散二维混合系统的状态反馈设计问题; 最后, 应用二维 Lyapunov 泛函理论和线性矩阵不等式方法, 获得了重复控制器参数求解方法.

关键词: 线性系统; 重复控制; 二维系统; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Design of modified repetitive controller based on two-dimensional hybrid model

WU Min¹, LAN Yong-hong¹, SHE Jin-hua²

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Bionics, Tokyo University of Technology, Tokyo 192-0982, Japan. Correspondent: WU Min, E-mail: min@csu.edu.cn)

Abstract: A method of designing a modified repetitive control system for a class of linear systems based on two-dimensional (2D) continuous-discrete hybrid model is presented. Firstly, a 2D continuous-discrete hybrid model is established to describe two independent types of actions in repetitive control, control and learning. A new configuration of a repetitive control system is then presented based on an analysis of the repetitive control process and the 2D model. And the design problem for the repetitive controller is converted into a state-feedback design problem for a continuous-discrete 2D system. Finally, the design problem is solved by combining 2D Lyapunov theory with linear-matrix inequalities approach.

Key words: Linear systems; Repetitive control; 2D systems; Linear matrix inequality

1 引言

重复控制是 Inoue 等^[1]于 1981 年提出的一种新型控制方法, 它将周期信号的动态模型植入系统的控制器内, 从而达到对周期性参考输入进行高精度跟踪或对周期性干扰信号进行有效抑制的目的. 自重复控制提出以来, 不少学者对此展开了广泛深入的研究, 并且获得了成功的应用^[2-12]. She 等^[2]提出了离散时间变结构严密内模重复控制方法; Park 等^[3]研究了基于 PID 的重复控制, 但其方法在选择控制器参数时需要反复调节, 或多或少存在一些试凑的痕迹. Owens 等^[4]针对严格正实系统, 利用 Lyapunov 泛函方法, 提出了多周期重复控制器设计

方法. 鲁棒重复控制问题也吸引了不少学者的注意. Chen 和 Liu 在频域空间中研究了鲁棒重复控制器的设计问题^[5], 但由于设计时将系统控制器和重复控制器分开考虑, 得到的条件相当苛刻, 且只适用于最小相位系统. Ramrath 等^[6]针对特定的跟踪频率, 提出了一种基于最小-最大方法的鲁棒重复控制设计方法. Doh 等^[7]针对不确定线性系统, 提出了基于 LMI 的低通滤波器和重复控制器设计方法. 由于重复控制器和低通滤波器的参数相互影响, 需要反复调整才能获得比较理想的低通滤波器和重复控制器的参数.

事实上, 重复控制系统中存在着两种完全不同

收稿日期: 2007-04-22; 修回日期: 2007-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674016); 国家杰出青年科学基金项目(60425310).

作者简介: 吴敏(1963—), 男, 广东化州人, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、过程控制等研究; 兰永红(1976—), 男, 湖南湘潭人, 讲师, 博士生, 从事鲁棒控制、智能学习控制的研究.

控制动态过程和离散学习动态过程. 现分别用两个变量 t 和 k 表示这两个动态过程的自变量, 其中 t 为表示时间的连续变量, k 为表示学习次数的离散变量. 进一步假定

$$(k, t) = (kL + t) = (t),$$

其中 $k = 0, 1, \dots, [0, L]$. 则式(4) ~ (7) 可改写为

$$\dot{x}_p(k, t) = A_p x_p(k, t) + B_p u(k, t), \quad (8)$$

$$\dot{x}_f(k, t) = -\lambda_f x_f(k, t) + \lambda_f x_f(k, t - L) - \lambda_f C_p x_p(k, t), \quad (9)$$

$$x(k, t) - x(k - 1, t) = -C_p x_p(k, t) + C_p x_p(k, t - L), \quad (10)$$

$$u(k, t) = K_e (x(k, t - L) + K_p x_p(k, t) + K_f x_f(k, t)). \quad (11)$$

记

$$x(k, t) = [x_p^T(k, t) \quad x_f^T(k, t)]^T,$$

则式(8) ~ (10) 可简记为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(k, t) \\ x(k, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k, t) \\ x(k - 1, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k, t - L) \\ x(k - 2, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k, t). \quad (12)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ -\lambda_f C_p & -\lambda_f I \end{bmatrix}, \quad A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [C_p \quad 0].$$

由式(11) 可知, 重复控制器设计问题可以转化为二维系统(12) 的无记忆状态反馈控制器

$$u(k, t) = [K_c \quad K_e] \begin{bmatrix} x(k, t) \\ x(k - 1, t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

的设计问题, 其中 $K_c = [K_p \quad K_f]$.

下面用二维系统理论, 给出控制增益的计算方法.

3 基于二维混合模型的重复控制器设计

3.1 二维混合模型稳定性与二维反馈控制器

首先给出下述必要引理:

引理 1 (Schur 补^[16]) 给定常值对称矩阵 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 这里 $\lambda_1 = \lambda_1^T, 0 < \lambda_2 = \lambda_2^T$, 则 $\lambda_1 + \lambda_3^{-1} \lambda_2^{-1} \lambda_3 < 0$ 等价于

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} < 0, \text{ 或 } \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} < 0.$$

引理 2 对于如下二维系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_k(t) \\ y_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k(t) \\ y_{k-1}(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k(t - 1) \\ y_{k-2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 \\ D_0 \end{bmatrix} u_k(t), \quad (14)$$

其中 $k = 0, 1, \dots, t = 0$. 如果存在对称正定矩阵 P_1, P_2, Q_1, Q_2 , 以及任意合适维数对称正定矩阵 P_3 , 使得线性矩阵不等式(LMI)

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_1^T \bar{P}_1 + \bar{P}_1 \bar{A}_1 - \bar{R} + \bar{Q} & \bar{A}_2^T \bar{P} \\ & \bar{P} \bar{A}_2 - \bar{P} \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

成立, 其中

$\bar{P}_1 = \text{diag}\{P_1, 0, 0, 0\}$, $\bar{P} = \text{diag}\{P_3, P_3, P_3, P_2\}$, $\bar{R} = \text{diag}\{0, P_2, Q_1, Q_2\}$, $\bar{Q} = \text{diag}\{Q_1, Q_2, 0, 0\}$, 则二维系统(14) 渐近稳定. 其中

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} A & B & A_1 & B_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C & D & C_1 & D_1 \end{bmatrix}.$$

证明 令 $u_{k+1}(t) = 0$, 构造如下 Lyapunov 泛函:

$$V(k, t) = V_1(k, t) + V_2(k, t),$$

$$V_1(k, t) = x_k^T(t) P_1 x_k(t) + \int_t^{\infty} x_k^T(s) Q_1 x_k(s) ds,$$

$$V_2(k, t) = y_{k-1}^T(t) P_2 y_{k-1}(t) + y_{k-2}^T(t) Q_2 y_{k-2}(t),$$

其中 P_1, P_2, Q_1, Q_2 为待定对称正定矩阵. $V(k, t)$ 的增量为

$$\Delta V(k, t) = \partial V_1(k, t) / \partial t + V_2(k, t),$$

其中

$$V_2(k, t) = V_2(k + 1, t) - V_2(k, t).$$

经计算得

$$\Delta V(k, t) = \begin{bmatrix} x_k(t) \\ y_{k-1}(t) \end{bmatrix}^T (\bar{A}_1^T \bar{P}_1 + \bar{P}_1 \bar{A}_1 + \bar{A}_2^T \bar{P}_2 \bar{A}_2 - \bar{R} + \bar{Q}) \begin{bmatrix} x_k(t) \\ y_{k-1}(t) \end{bmatrix}.$$

其中

$$\begin{bmatrix} x_k(t) \\ y_{k-1}(t) \\ x_k^T(t - 1) \\ y_{k-2}^T(t) \end{bmatrix}^T,$$

$\bar{P}_1, \bar{R}, \bar{Q}$ 的定义与引理 2 条件中的 $\bar{P}_1, \bar{R}, \bar{Q}$ 的定义一致, 取 $\bar{P}_2 = \text{diag}\{0, 0, 0, P_2\}$. 从而二维系统(14) 渐近稳定的一个充分条件为

$$\bar{A}_1^T \bar{P}_1 + \bar{P}_1 \bar{A}_1 + \bar{A}_2^T \bar{P}_2 \bar{A}_2 - \bar{R} + \bar{Q} < 0. \quad (16)$$

式(16) 也可写为如下形式:

$$\bar{A}_1^T \bar{P}_1 + \bar{P}_1 \bar{A}_1 + \bar{A}_2^T \bar{P} \bar{A}_2 - \bar{R} + \bar{Q} < 0. \quad (17)$$

其中 $\bar{P} = \text{diag}\{P_3, P_3, P_3, P_2\}$, 且 P_3 为任意合适维数对称正定矩阵. 由 Schur 补引理, 不等式(17) 等价于式(15).

引理 3 对于二维系统(14), 如果存在对称正定矩阵 U_1, U_2, U_3, Z, Y 以及任意合适维数矩阵 N 和 M , 使得如下 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \text{11} & BZ + B_0 M & A_1 Z & B_1 Z & YC^T + N^T D_0^T \\ * & U_3 - Z & 0 & 0 & ZD^T + M^T D_0^T \\ * & * & -U_2 & 0 & ZC_1^T \\ * & * & * & -U_3 & ZD^T \\ * & * & * & * & -Z \end{bmatrix} < 0, \quad (18)$$

其中

$$\text{11} = YA^T + AY + B_0 N + N^T B_0^T + U_1.$$

则二维无记忆状态反馈控制器

$$u_k(t) = [K \quad F] \begin{bmatrix} x_k(t) \\ y_{k-1}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

使得闭环过程稳定,且一个能稳的控制增益为

$$K = NY^{-1}, \quad F = MZ^{-1}. \quad (20)$$

证明 将二维控制器(19)作用于二维系统(14),由引理2,闭环过程稳定的一个充分条件是如下LMI成立:

$$\begin{bmatrix} (\overline{A_1} + \overline{B_0} \overline{K})^T \overline{P_1} + \overline{P_1} (\overline{A_1} + \overline{B_0} \overline{K}) - \overline{R} + \overline{Q} \\ \overline{P_2} (\overline{A_2} + \overline{D_0} \overline{K}) \\ (\overline{A_2} + \overline{D_0} \overline{K})^T \overline{P_2} \\ - \overline{P_2} \end{bmatrix} < 0. \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \overline{B_0}^T &= [B_0^T \quad 0 \quad 0 \quad 0], \\ \overline{D_0}^T &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad D_0^T], \\ \overline{K} &= [K \quad F \quad 0 \quad 0]. \end{aligned}$$

将式(21)展开可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 3 \end{bmatrix} < 0. \quad (22)$$

其中

$$\text{1} = \begin{bmatrix} \text{11} & P_1(B + B_0 F) & P_1 A_1 & P_1 B_1 \\ * & Q_2 - P_2 & 0 & 0 \\ * & * & -Q_1 & 0 \\ * & * & * & -Q_2 \end{bmatrix},$$

$$\text{11} = (A + B_0 K)^T P_1 + P_1 (A + B_0 K) + Q_1,$$

$$\text{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (C + D_0 K)^T P_2 \\ * & 0 & 0 & (D + D_0 F)^T P_2 \\ * & * & 0 & C_1^T P_2 \\ * & * & * & D_1^T P_2 \end{bmatrix},$$

$$\text{3} = \text{diag}\{-P_2, -P_2, -P_2, -P_2\}.$$

对式(22)先后左乘和右乘

$$\text{diag}\{P_1^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}, P_2^{-1}\}.$$

注意到同时移除式(22)中第5行第5列、第6行第6列以及第7行第7列不改变其负定性,并令

$$Y = P_1^{-1}, \quad Z = P_2^{-1}, \quad P_1^{-1} Q_1 P_1^{-1} = U_1,$$

$$P_2^{-1} Q_1 P_1^{-1} = U_2, \quad P_2^{-1} Q_2 P_2^{-1} = U_3,$$

利用式(20)可得式(18).

3.2 基于二维模型的改进型重复控制器设计

应用引理3,可得如下定理:

定理1 如果存在对称正定矩阵 U_1, U_2, U_3, Z, Y , 以及任意合适维数矩阵 N 和 M , 使得如下LMI成立:

$$\begin{bmatrix} \text{11} & BM & A_d Z & 0 & -YC^T \\ * & U_3 - Z & 0 & 0 & Z \\ * & * & -U_2 & 0 & ZC^T \\ * & * & * & -U_3 & 0 \\ * & * & * & * & -Z \end{bmatrix} < 0, \quad (23)$$

其中

$$\text{11} = YA^T + AY + BN + N^T B^T + U_1.$$

则二维系统(12)在控制律(13)的作用下渐近稳定,且一个能稳的控制增益为

$$K_c = [K_p \quad K_f] = NY^{-1}, \quad K_e = MZ^{-1}. \quad (24)$$

证明 易见,二维系统(12)是系统(14)当 $l=2$ 时的一种特殊情形. 由引理3,在重复控制律(13)的作用下,如果定理条件满足,则二维系统(12)渐近稳定,且控制增益由式(24)给出.

注1 定理1给出了重复控制稳态跟踪误差收敛的充分条件,同时也给出了重复控制器参数的具体求解方法. 条件以基于LMI的形式给出,可方便地利用Matlab中的工具箱求解. 与文献[3,5,6]相比,无需验证繁杂的频域稳定性条件. 文献[4,7,11,12]在系统中也引入了改进型重复控制器,其中:文献[4,11,12]是针对特定的跟踪频率设计的,因而带宽受限;文献[7]虽扩大了跟踪频率的范围,但重复控制器和低滤波器的参数相互影响. 另一方面,基于定理1中的LMI条件,可将上述结果推广至控制对象为线性不确定时的情形.

注2 根据系统的控制精度与低滤波器的关系,为了提高重复控制系统的稳态控制精度,需要尽可能提高低滤波器的转折频率. 实际上,定理1也提供了一种寻找最大转折频率的简单方法,即通过Matlab工具箱 feasp 求解获得一个最大值,从而达到同时优化滤波器和控制器参数的目的.

4 数值仿真

设控制对象(1)具有如下参数:

$$A_p = \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ 4 & -5 \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad C_p = [6 \quad 0].$$

考虑其对参考输入

$$r(t) = \sin(2t/10) + 0.5\sin(4t/10) + 0.5\sin(6t/10)$$

的跟踪问题. 利用定理1,求得低滤波器的最大转折频率为 $f = 255.9814 \text{ rad/s}$, 此时相应的重复控

制器参数为

$$K_c = [- 57.158 \ 2 \ 6.895 \ 8 \ 373.085 \ 0],$$

$$K_e = 0.241 \ 3.$$

系统仿真结果如图 3 所示. 由图 3 可知, 该系统具有较好的过渡过程和稳态跟踪特性. 过渡过程中的最大相对跟踪误差为 $\pm 4.1\%$. 经过两个周期后, 系统输出便进入了稳定状态, 稳态相对误差仅为 $\pm 0.2\%$, 系统具有较好的跟踪性能.

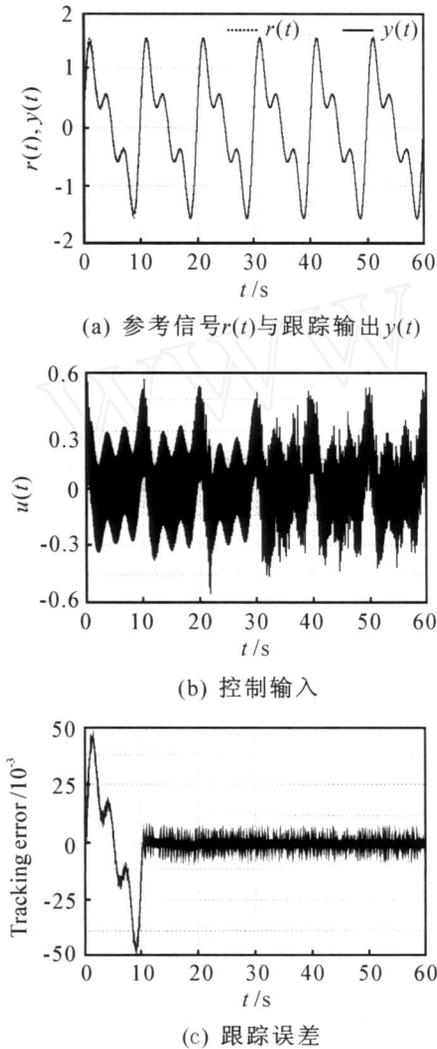


图 3 仿真结果

注 3 针对标称系统, 采用文献 [7] 的算法, 求得最大转折频率为 $f = 187.765 \ 4 \text{ rad/s}$, 其稳态相对误差为 $\pm 9\%$. 显然, 本文设计方法所求得的最大转折频率高于文献 [7] 的结果, 从而提高了重复控制系统的跟踪精度.

5 结 论

本文针对一类线性系统, 提出了一种基于连续/离散二维模型的改进型重复控制设计方法. 该方法将重复控制设计问题转化为一类二维时滞连续/离散系统的无记忆状态反馈控制设计问题. 在此基础上, 利用 Lyapunov 泛函理论和 LMI 方法, 给出了

重复控制器存在的充分条件以及控制增益的具体计算方法. 所得结果以 LMI 的形式给出, 可以方便地利用 Matlab 工具箱求解. 数值仿真说明了该方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Inoue T, Nakano M, Iwai S. High accuracy control of servomechanism for repeated contouring [C]. Proc of 10th Annual Symposium on Incremental Motion, Control System and Devices. Oxford, 1981: 285-292.
- [2] She J H, Pan Y, Nakano M. Repetitive control with variable structure controller[C]. The 6th Int Workshop on Variable Structure Systems. Gold Coast: World Scientific Publishing, 2000: 273-282.
- [3] Park S W, Jeong J, Yang H S, et al. Repetitive controller design for minimum track misregistration in hard disk drives[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(9): 2522-2528.
- [4] Owens D H, Li L M, Banks S P. Multi-periodic repetitive control system: A Lyapunov stability analysis for MIMO systems[J]. Int J Control, 2004, 77(5): 504-515.
- [5] Chen J W, Liu T S. H_∞ repetitive control for pickup head flying height in near-field optical disk drives[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(2): 1067-1070.
- [6] Ramrath L, Singh T. A minimax approach to robust repetitive learning control[C]. Int Conf on Control and Automation. Budapest, 2005: 397-403.
- [7] Doh T Y, Chung M J. Design of a repetitive controller: An application to the track-following servo system of optical disk drives[J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2006, 153(3): 323-330.
- [8] Hara S, Yamamoto Y, Omata T, et al. Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(7): 659-668.
- [9] 中野道雄, 山本裕, 井上惠, 等. 繰返し制御[M]. 东京: 计测自动控制学会, 1990. (Nakano M, Yamamoto Y, Inoue T, et al. Repetitive control[M]. Tokyo: Auto-control Press, 1990.)
- [10] 李翠艳, 张冬纯, 庄显义. 重复控制综述[J]. 电机与控制, 2005, 9(1): 37-46. (Li C Y, Zhang D C, Zhung X Y. Repetitive control — A survey[J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(1): 37-46.)
- [11] Chang K, Shim I, Park G. Adaptive repetitive control for an eccentricity compensation of optical disk drivers [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2006, 52(2): 445-451.

(下转第 761 页)

- 控制理论与应用, 2002, 19(1): 143-145.
(Li Y D, Li S Y. A new genetic chaos optimization combination method [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 143-145.)
- [8] 王焱, 刘景录, 孙一康. 基于变尺度混沌优化策略的混合遗传算法[J]. 控制与决策, 2002, 17(6): 958-960.
(Wang Y, Liu J L, Sun Y K. Hybrid genetic algorithm based on mutative scale chaos optimization strategy[J]. Control and Decision, 2002, 17(6): 958-960.)
- [9] 杜海峰, 公茂果, 刘若辰, 等. 自适应混沌克隆进化规划算法[J]. 中国科学 E: 信息科学, 2005, 35(8): 817-829.
(Du H F, Gong M G, Liu R C, et al. Adaptive parallel chaos immune evolutionary programming[J]. Science in China Series E: Information Sciences, 2005: 35(8): 817-829.)
- [10] 雷德明, 严新平, 吴智铭. 多目标混沌进化算法[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1142-1145.
(Lei D M, Yan X P, Wu Z M. Multi-objective chaotic evolutionary algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1142-1145.)
- [11] 唐巍, 李殿璞, 陈学允. 混沌理论及其应用研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 67-70.
(Tang W, Li D P, Chen X Y. Chaos theory and research on its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 67-70.)
- [12] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]. Proc of the IEEE Conf on Evolutionary Computation. California: IEEE Service Center, 2000: 84-88.
- [13] 胡凌燕, 辛勇, 项安. 基于变参数控制的谐波励磁发电机电压调节器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 89-91.
(Hu L Y, Xin Y, Xiang A. Automatic voltage regulator of harmonic excited generator based on variable parameter PID control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 89-91.)
- [14] Zwi-lee Gaing. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 384-391.
- [15] Dong Hwa Kim, Jae Hoon Cho. Intelligent control of AVR system using GA-BF [C]. Lecture Notes in Computer Science Proc of Springer. Melbourne, 2005: 854-859.
- [16] Dong Hwa Kim, Jin Ill Park. Intelligent PID controller tuning of AVR system using GA and PSO[C]. Lecture Notes in Computer Science Proc of Springer. Hefei, 2005: 366-375.
- [17] 房启超, 徐林, 王建辉, 等. 改进的 PSO 及其在结晶器液位控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1399-1402.
(Fang Q C, Xu L, Wang J H, et al. Improved PSO and its application in crystallizer liquid level control system[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1399-1402.)

(上接第 755 页)

- [12] Zhou K, Low K, Wang D, et al. Zero-phase odd-harmonic repetitive controller for a single-phase PWM inverter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(1): 193-202.
- [13] Shi J, Gao F, Wu T J. Robust design of integrated feedback and iterative learning control of a batch process based on a 2D Roesser system[J]. J of Process Control, 2005, 15(1): 907-924.
- [14] Xie L H, Du C L. H_∞ control and filter of two-dimensional system[M]. Berlin: Springer, 2002: 5-25.
- [15] Paszke W, Krzysztof G, Eric R. Guaranteed cost control of uncertain differential linear repetitive processes[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2004, 51(11): 629-634.
- [16] Khargonek P P, Petersen I R, Zhou K. Robust stabilization of uncertain linear systems: Quadratic stabilizability and H_∞ control theory[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1990, 35(3): 356-361.
- [17] Balas G, Chiang R, Packard A, et al. Robust control toolbox user's guide[M]. Natick: The Math Works, 2005: 134-157.