

文章编号: 1000-8152(2008)03-0427-07

线性不确定系统的 H_∞ 状态反馈鲁棒重复控制

吴 敏¹, 兰永红¹, 余锦华², 何 勇¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 东京工科大学 计算机科学学部, 东京 192-0982)

摘要: 现有的重复控制设计不能同时优化低通滤波器的参数和重复控制器的参数. 我们在设计重复控制系统以控制线性不确定对象时, 解决了这个问题. 首先, 引入状态反馈以保证闭环系统的鲁棒稳定性, 把重复控制器设计问题转化为 H_∞ 状态反馈增益的设计问题. 为获得低通滤波器最大转折频率, 进一步将设计问题转化为基于线性矩阵不等式约束的凸优化问题. 提出了一种迭代算法, 用以计算低通滤波器的最大转折频率和 H_∞ 状态反馈增益. 在保证系统鲁棒稳定性的同时, 获得最高控制精度的重复控制器和低通滤波器的参数组合. 该方法与已有方法比较, 它的结果容易验证和求解, 因而更适用于实际应用. 最后, 通过数值实例验证了本文所提方法的有效性.

关键词: 线性不确定系统; 重复控制; H_∞ 控制; 低通滤波器; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

H-infinity state feedback robust repetitive control for uncertain linear systems

WU Min¹, LAN Yong-hong¹, SHE Jin-hua², HE Yong¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. School of Computer Science, Tokyo University of Technology, Tokyo 192-0982, Japan)

Abstract: The existing methods for designing repetitive control systems cannot simultaneously optimize the parameters of the low-pass filter and the parameters of the repetitive controller. We deal with this problem in designing a repetitive control system for a class of linear uncertain plants. First, we employ the state feedback controller to robustly stabilize the closed-loop system, and treat the controller design problem as an H-infinity state-feedback design problem. Next, under the H-infinity formulation, the design is formulated as a convex optimization problem subject to linear matrix inequalities. An iterative algorithm is presented for calculating the maximum cut-off frequencies of the low-pass filter and the gain of the H-infinity state-feedback controller. It also gives the combination of parameters for the low-pass filter and the repetitive controller, which yields the highest control precision under the requirements of robust stability of the system. The results of the proposed method can be more easily obtained and verified than by the existing methods, showing the practical value in applications. Finally, the validity of this method is verified by a numerical example.

Key words: uncertain linear systems; repetitive control; H-infinity state feedback control; linear matrix inequality(LMI)

1 引言(Introduction)

重复控制理论是20世纪80年代由日本学者中野道雄(Nakano Michio)教授等人提出的一种新型控制系统设计理论, 它的基本思想是在控制系统中引入一种学习机制, 使系统能够通过自身的学习来改善跟踪精度, 最终实现无稳态误差地跟踪任意的周期目标输入信号或对周期性干扰信号进行有效抑制的目的^[1]. 由于这种控制方法能够实现其它控制方法难以达到的高精度跟踪, 所以重复控制理论一经提出就获得了广泛关注, 并在各个领域得到了成功的应用^[2~11].

但是, 由于重复控制器的大时滞特性, 重复控制系统的稳定性难以得到保证^[2]. 不少学者对此进行了广泛深入的研究, 不同程度地改进了重复控制器的动态性. 例如, She等人提出了离散时间变结构严密内模重复控制方法^[4]; Owens等人针对严格正实系统, 利用Lyapunov泛函方法, 提出了多周期重复控制器设计方法^[5]; 张立强等人^[6]以及Park等人^[7]研究了基于PID的重复控制. 然而, 这些方法在选择控制器参数时需要反复调节, 多少存在一些试凑的痕迹. 对于鲁棒重复控制问题, 近年来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^[8],但所得结果只能适用于最小相位系统; Ramrath等人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^[9]; Doh等人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^[10]. 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参数.

纵观以上重复控制系统设计方法,普遍存在着要求控制对象较严、条件难于验证以及重复控制器和低通滤波器的参数相互影响等问题. 本文针对一类不确定线性系统,设计一个改进型重复控制系统,研究重复控制系统中重复控制器和低通滤波器参数的同时优化问题. 基于Lyapunov泛函方法给出一个保证闭环系统鲁棒稳定的充分条件,然后将重复控制器的参数设计问题转化为 H_∞ 状态反馈控制问题. 在此基础上,提出求解低通滤波器最大转折频率和 H_∞ 状态反馈增益的迭代算法. 算法在保证系统鲁棒稳定性的同时,能获得实现最高控制精度的重复控制器和低通滤波器的参数组合.

本文中,如不作特殊说明,对称矩阵的对称部分用*表示,即 $\begin{bmatrix} A & B \\ * & C \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix}$.

2 系统控制精度与低通滤波器的关系分析(Relationship between system control precision and low-pass filter)

一般地,称图1中虚线所示部分 C_R 为重复控制器. 若控制系统回路中包含 C_R ,则相应的控制系统称为重复控制系统^[1,2].

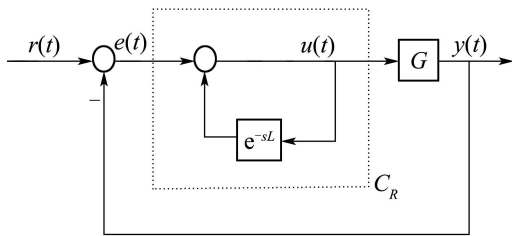


图1 基本的重复控制系统

Fig. 1 The basic repetitive control systems

图1中,虚线部分传递函数为

$$C_R(s) = \frac{1}{1 - e^{-sL}}. \quad (1)$$

因为

$$C_R(j\omega_k) = \frac{1}{1 - e^{-j\omega_k L}} = \infty, \quad (2)$$

$$\omega_k = \frac{2k\pi}{L}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (3)$$

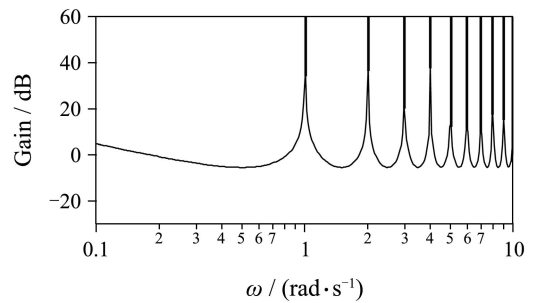
当重复控制器中含有该内部模型时,由于在周期信号的基波频率及高次谐波频率处的增益为无穷大,

从而对该周期信号能实现稳态无误差跟踪.

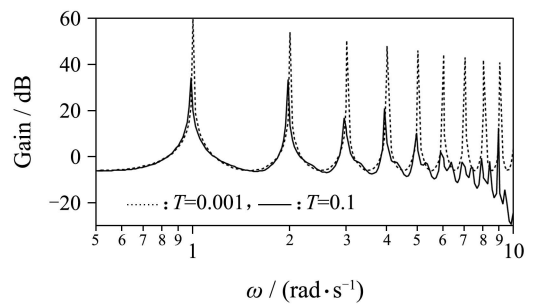
为了改善系统的稳定性,改进型重复控制系统^[2]在重复控制器中引入了一个低通滤波器,即重复控制器中含有的是周期信号产生器的近似模型:

$$C_{RI}(s) = \frac{1}{1 - q(s)e^{-sL}}. \quad (4)$$

低通滤波器 $q(s)$ 的引入使系统的跟踪特性发生变化. 例如,考虑重复控制系统中最常用的一阶低通滤波器 $q(s) = \frac{1}{Ts + 1}$. 图2为 $L = 2\pi$ s时的 $C_R(j\omega)$ 及 $T = 0.001$ s和 $T = 0.1$ s时的 $C_{RI}(j\omega)$ 的波特增益图. 显然,当 $T = 0.001$ s时, $C_{RI}(j\omega)$ 的在周期信号的基波及2次谐波处的增益由无穷大降为60.00 dB及53.98 dB,这时对周期信号的跟踪将出现稳态误差. 当低通滤波器的转折频率降低100倍(即 $T = 0.1$ s)时,在周期信号的基波及2次谐波处的增益则急剧降至19.87 dB和13.45 dB,导致稳态误差急剧增大.



(a) $C_R(j\omega)$



(b) $C_{RI}(j\omega)$

图2 波特图

Fig. 2 Bode plot

由此可见,为了提高重复控制系统的稳态控制精度,需要尽可能提高低通滤波器的转折频率.

3 系统描述与稳定条件(System description and stability condition)

本文设计图3所示的重复控制系统,为了便于定义问题,把滤波器 $q(s) = \frac{1}{Ts + 1}$ 放在了前向通道.

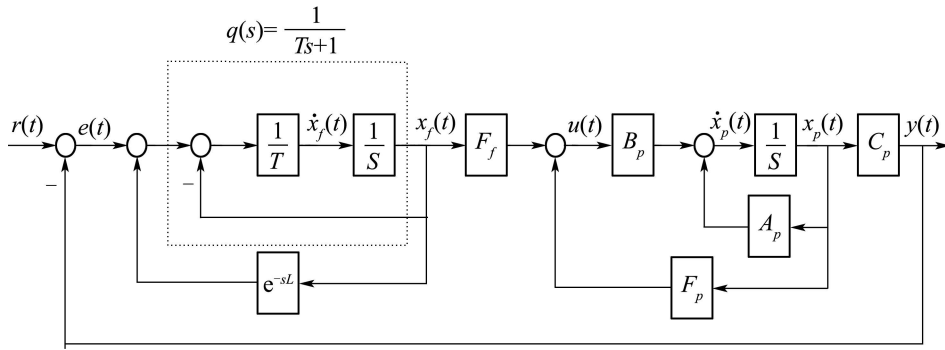


图3 重复控制系统结构

Fig. 3 Configuration of the repetitive control system

在图3中, e^{-sL} 为滞后环节, 其滞后时间与目标输入信号的周期相同. T 为低通滤波器的时间常数, 待定向量 $F = [F_p \ F_f]$ 为系统的控制增益.

考虑如下不确定线性控制对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = (A_p + \Delta A_p)x_p(t) + (B_p + \Delta B_p)u(t), \\ y(t) = C_p x_p(t). \end{cases} \quad (5a)$$

这里 $x_p(t) \in \mathbb{R}^n$ 为控制对象的状态, $u(t) \in \mathbb{R}^n$ 为控制输入, $y(t)$ 为控制输出. 时变不确定结构为

$$[\Delta A_p \ \Delta B_p] = \Phi_p \Gamma(t) [\Psi_A \ \Psi_B]. \quad (5b)$$

其中: Ψ_A, Ψ_B 为已知实矩阵, $\Gamma(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是具有Lebesgue可测元的不确定矩阵, 且

$$\|\Gamma(t)\| \leq 1.$$

低通滤波器的状态空间描述为

$$\dot{x}_f(t) = -\omega_c x_f(t) + \omega_c x_f(t-L) + \omega_c e(t), \quad (6)$$

其中, ω_c 为低通滤波器转折频率, 且

$$\omega_c(t) = \frac{1}{T}. \quad (7)$$

取 $x(t) = [x_p^T(t) \ x_f^T(t)]$, 则重复控制系统的控制律为

$$\begin{cases} u(t) = Fx(t), \\ F := [F_p \ F_f], \end{cases} \quad (8)$$

由式(5)(6)和(8)得复合系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + A_d x(t-L), \\ A = \begin{bmatrix} A_p + B_p F_p & B_p F_f \\ -\omega_c C_p & -\omega_c \end{bmatrix}, \\ A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \omega_c \end{bmatrix}, \\ \Delta A = \begin{bmatrix} \Phi_p \\ 0 \end{bmatrix} \Gamma(t) [\Psi_A + \Psi_B F_p \ \Psi_B F_f]. \end{cases} \quad (9)$$

这样, 重复控制系统的设计问题就转化为系统(9)的鲁棒稳定性问题.

为了得出系统(9)鲁棒渐近稳定的一个充分条件, 引用文献[12]的下述结论.

引理 1 (Schur 补)^[12] 给定常值矩阵 $\Sigma = \Sigma^T$, 则下述命题等价

- i) $\Sigma := \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ * & \Sigma_{22} \end{bmatrix} > 0$;
- ii) $\Sigma_{11} > 0$, 且 $\Sigma_{22} - \Sigma_{12}^T \Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12} > 0$;
- iii) $\Sigma_{22} > 0$, 且 $\Sigma_{11} - \Sigma_{12} \Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{12}^T > 0$.

根据引理1, 应用Lyapunov泛函方法, 可以得到下述定理.

定理 1 如果存在合适维数的对称正定矩阵 P, Q 以及常数 $\lambda > 0$, 使得如下LMI成立:

$$\begin{bmatrix} PA + A^T P + Q + \lambda \Psi^T \Psi & P A_d & P \Phi \\ * & -Q & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

则状态反馈控制律(8)保证图3所示的重复控制系统鲁棒稳定.

证 构造如下Lyapunov函数:

$$V(x(t), t) = x^T(t) P x(t) + \int_{t-L}^t x^T(\tau) Q x(\tau) d\tau.$$

不难证明, 系统(9)鲁棒渐近稳定的一个充分条件为

$$\begin{bmatrix} PA + A^T P + Q & P A_d & P \Phi & \lambda \Psi^T \\ * & -Q & 0 & 0 \\ * & * & -\lambda I & 0 \\ * & * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

由Schur补引理, 式(11)等价于式(10). 证毕.

在本文中, 考虑如下的重复控制器设计问题: 针对如图3所示的重复控制系统, 设计一个状态反

$$\begin{cases} A = A_0 + A_1 \delta \omega_c, \\ A_d = A_{d0} + A_{d1} \delta \omega_c, \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_0 &= \begin{bmatrix} A_p + B_p F_p & B_p F_f \\ -\hat{\omega}_c C_p & -\hat{\omega}_c \end{bmatrix}, \\ A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -C_p & -I \end{bmatrix}, \\ A_{d0} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{\omega}_c \end{bmatrix}, \\ A_{d1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

对于式(10)中的 Q , 假定

$$Q = Q_0 - \delta \omega_c Q_1 > 0. \quad (18)$$

如果下面的矩阵不等式

$$\Pi \leq \Pi_0 + \delta \omega_c \Pi_1 < 0 \quad (19)$$

成立, 则LMI(10)有解, 其中:

$$\begin{aligned} \Pi_0 &= \begin{bmatrix} P A_0 + A_0^T P + Q_0 + \lambda \Psi^T \Psi & P A_{d0} & P \Phi \\ * & -Q_0 & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \\ \Pi_1 &= \begin{bmatrix} P A_1 + A_1^T P - Q_1 & P A_{d1} & 0 \\ * & Q_1 & 0 \\ * & * & 0 \end{bmatrix} < 0. \end{aligned}$$

若设 $\gamma = \frac{1}{\delta \omega_c}$, 则式(18)和(19)可以表示为

$$\begin{cases} Q_1 < \gamma Q_0, \\ \Pi_1 < \gamma(-\Pi_0), \end{cases} \quad (20)$$

因此, 对给定的反馈控制增益 F , 以及粗略估计值 $\hat{\omega}_c$, 低通滤波器的设计问题可以转换为一个带LMI约束的线性优化gevp问题:

$\min \gamma = 1/\Delta \omega_c$ 使得式(20)成立, 且

$$P > 0, Q > 0, \lambda > 0. \quad (21)$$

对给定的反馈控制增益 F , 为寻求低通滤波器的最大转折频率 ω_c , 采用如下迭代算法:

算法 1:

步骤 1 给定一个充分小的正常数 ϵ 和 $\hat{\omega}_c$, 解标准化gevp问题(21). 如果(21)无解, 则使系统鲁棒稳定的低通滤波器的转折频率 ω_c 小于 $\hat{\omega}_c$. 否则, 转步骤2;

步骤 2 解标准化gevp LMI问题(21)获得一个

最大值 $\delta \omega_c$, 令 $\omega_c = \hat{\omega}_c + \delta \omega_c$. 如果 $\delta \omega_c$ 小于事先给定的任意小的正数 ϵ , 则 $\hat{\omega}_c$ 即为低通滤波器的最大转折频率 ω_c , 算法结束. 否则, 转步骤3;

步骤 3 将步骤2得到的 $\hat{\omega}_c$ 代入式(21), 重新解标准化gevp问题(21). 如果有解, 则转步骤2.

应用MATLAB中的LMI工具箱^[14,15], 利用算法1可以方便的求解gevp问题(21).

注 1 在求解低通滤波器的最大转折频率时, 文献[10]也采用了迭代算法. 所不同的是, 文献[10]是通过固定LMI(10)中的参数 Q , 并将LMI(10)转化为一个标准的线性优化gevp问题. 事实上, 如果 Q 不固定, 通过上述迭代算法1中的LMI的解, 可以获得更合适的矩阵, 从而可以克服文献[10]中求解低通滤波器的最大转折频率的保守性. 这从本文中数值仿真实例中也得到了验证.

4.3 低通滤波器与 H_∞ 状态反馈控制器的最优参数组合求解(Solving the optimal combination parameters of the low-pass filter and H_∞ state feedback controller)

为获得保证系统鲁棒稳定性及最高跟踪精度的 F 和 $T = \frac{1}{\omega_c}$ 的组合, 先固定 T 求取 F , 然后再固定 F 求取 T . 如此反复进行, 直到获得最高控制精度的重复控制器和低通滤波器的参数组合为止. 具体实现算法如下:

算法 2:

步骤 1 给定一个充分小的正常数 h 和 $\hat{\omega}_c$, 解LMI(14)得一 F ;

步骤 2 对步骤1的 $\hat{\omega}_c$ 和 F , 利用算法1解gevp问题(21). 若无解, 则不存在比 $\hat{\omega}_c$ 更高的低通滤波器的转折频率 ω_c 和能稳的 H_∞ 状态反馈控制器的组合. 否则转步骤3;

步骤 3 令 $\omega_c = \hat{\omega}_c + h$, 解LMI(14). 如果该问题无解, 算法停止, 否则转步骤4;

步骤 4 将求得的 H_∞ 状态反馈控制器代入gevp问题(21)求解. 如果采用算法1求出最大低通滤波器的转折频率大于当前的 ω_c , 则转步骤5, 否则, 继续增大 ω_c , 重复步骤3;

步骤 5 将步骤4求得的最大低通滤波器的转折频率代入解LMI问题(14), 如果该问题无解, 重复步骤3, 否则转步骤4.

算法终止时取最大低通滤波器的转折频率 ω_c 以及相应的 H_∞ 状态反馈控制器, 即为保证系统鲁棒稳定且跟踪精度最高的 F 和 $T = \frac{1}{\omega_c}$ 的组合.

5 数值仿真(Numerical simulation)

设控制对象具有如下参数:

$$\begin{cases} A_P = \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ 4 & -5 \end{bmatrix}, B_P = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \\ C_P = \begin{bmatrix} 6 & 0 \end{bmatrix}, \Phi_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0.1 \end{bmatrix}, \\ \Gamma(t) = \begin{bmatrix} \sin(0.1\pi t) & 0 \\ 0 & \cos(0.1\pi t) \end{bmatrix}, \\ \Psi_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Psi_B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (22)$$

参考输入为

$$r(t) = \sin \frac{2\pi t}{10} + 0.5 \sin \frac{4\pi t}{10} + 0.5 \sin \frac{6\pi t}{10},$$

选择

$$h = 0.1, \epsilon = 10^{-4},$$

利用算法2, 求得

$$\omega_c = 238.55 \text{ rad/s},$$

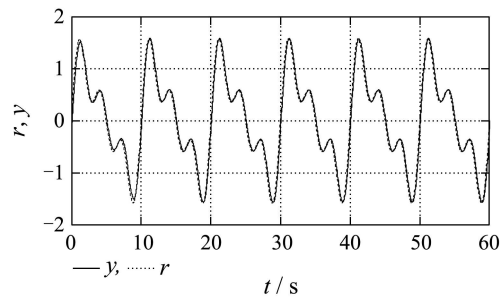
$$F = [619.78 \quad -29.566 \quad -284.99].$$

注 2 针对求得的状态反馈增益, 采用文献[10]的迭代算法, 仍固定 $Q = 0.01I$, 求得最大转折频率仅为 $\omega_c = 13.399 \text{ rad/s}$. 显然, 本文提出的算法, 求得的最大转折频率远远高于文献[10]的结果. 与文献[10]的算法相比, 本文提出的算法明显降低了求取低通滤波器最大转折频率算法的保守性, 从而提高了重复控制系统的稳态控制精度.

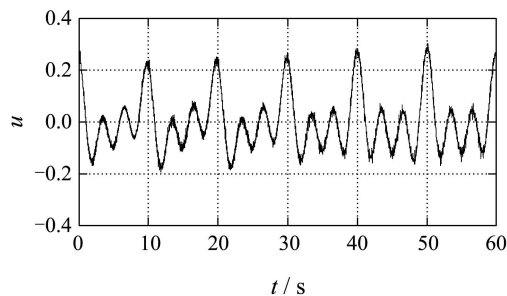
系统仿真结果示于图5. 经过一个周期后, 系统输出便基本进入了稳定状态, 并且对系统的容许不确定性, 设计的重复控制器不但能保证系统的稳定, 而且稳态相对误差仅为 $\pm 0.8\%$, 系统输出能较好的跟踪参考输入.

6 结论(Conclusion)

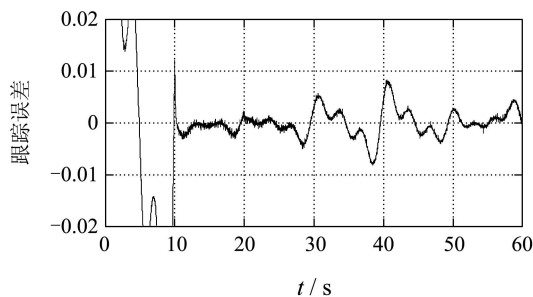
本文针对一类不确定线性系统, 研究了重复控制系统中同时优化重复控制器和低通滤波器参数的设计问题. 通过引入状态反馈控制器, 把重复控制器的设计问题转化为 H_∞ 状态反馈增益的设计问题, 为了获得低通滤波器最大转折频率, 进一步将设计问题转化为基于LMI约束的凸优化问题. 在此基础上, 提出了获得低通滤波器最大转折频率和 H_∞ 状态反馈增益的迭代算法, 它在保证系统鲁棒稳定的同时, 能获得实现高精度控制的重复控制器和低通滤波器的参数组合. 仿真算例说明了所提方法的有效性.



(a) 参考信号(点线) 跟踪输出(实线)



(b) 控制输入



(c) 跟踪误差

图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

参考文献(References):

- [1] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATA T, et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(7): 659 – 668.
- [2] 中野道雄, 山本裕, 井上惠, 等. 繰り返し制御[M]. 东京: 计测自动制御学会, 1990: 19 – 26.
(NAKANO M, YAMAMOTO Y, INOUE T, et al. *Repetitive Control*[M]. Tokyo: Auto control Press, 1990: 19 – 26.)
- [3] HILLERSTRÖM G, WALGAMA K. Repetitive control theory and applications-a survey[C]// *Proceedings of IFAC 13th Triennial World Congress*. California: IEEE Press, 1996, D: 1 – 6.
- [4] SHE J H, PAN Y, NAKANO M. Repetitive control system with variable structure controller[C]// *The 6th International Workshop on Variable Structure Systems(Advances in variable structure systems - Analysis, integration and applications-*, Xinghuo Yu and Jian-Xin Xu Eds). Australia, Gold Coast: World Scientific Publishing, 2000: 273 – 282.
- [5] OWENS D H, LI L M, BANKS S P. Multi-periodic repetitive control system: a lyapunov stability analysis for MIMO systems[J]. *International Journal of Control*, 2004, 77(5): 504 – 515.
- [6] 张立强, 杨国来, 龚海峰. 基于重复控制补偿的电液位置伺服系统PID控制[J]. *机床与液压*, 2005, 8: 112 – 114.

- (ZHANG Liqiang, YANG Guolai, GONG Haifeng. PID control for electro-hydraulic position servo system with repetitive control compensation[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2005, 8: 112 – 114.)
- [7] PARK S W, JEONG J, YANG H S, et al. Repetitive controller design for minimum track misregistration in hard disk drives[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(9): 2522 – 2528.
- [8] CHEN J W, LIU T S. H_∞ repetitive control for pickup head flying height in near-field optical disk drives[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(2): 1067 – 1070.
- [9] RAMRATH L, SINGH T. A minimax approach to robust repetitive learning control[C]// *International Conference on Control and Automation*. Budapest, Hungary: IEEE Press, 2005: 397 – 403.
- [10] DOH T Y, CHUNG M J. Design of a repetitive controller: an application to the track-following servo system of optical disk drives[J]. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2006, 153(3): 323 – 330.
- [11] 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 Cuiyan, ZHANG Dongchun, ZHUNG Xianyi. Repetitive control—a survey[J]. *Electric Machines and Control*, 2005, 9(1): 37 – 46.)
- [12] KHARGONEK P P, PETERSEN I R, ZHOU K. Robust stabilization of uncertain linear systems: quadratic stabilizability and H_∞ control theory[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, 35(3): 356 – 361.
- [13] 吴敏, 桂卫华, 何勇. 现代鲁棒控制[M]. 第2版. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 214 – 215.
(WU Min, GUI Weihua, HE Yong. *Advanced Robust Control* [M]. 2nd ed. ChangSha: Central South University Press, 2006: 214 – 215.)
- [14] 俞立. 鲁棒控制—LMI方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 59 – 64.
(YU Li. *Robust Control: An LMI Approach*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 59 – 64.)
- [15] BALAS G, CHIANG R, PACKARD A, et al. *Robust Control Toolbox User's Guide*[M]. Natick, Mass: The Math Works, Inc, 2005: 134 – 157.

作者简介:

吴敏 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向是鲁棒控制、过程控制和智能控制, 1999年与中野道雄教授和余锦华博士一起获国际自动控制联合会(IFAC)控制工程实践优秀论文奖, E-mail: min@csu.edu.cn;

兰永红 (1976—), 男, 博士研究生, 目前主要研究方向是学习控制和时滞系统控制, E-mail: lyhcsu@yahoo.com.cn;

余锦华 (1963—), 男, 博士, 副教授, 目前主要研究方向是专家控制和智能机器人研究, 1999年与吴敏教授和中野道雄教授一起获国际自动控制联合会(IFAC)控制工程实践优秀论文奖, E-mail: she@cc.teu.ac.jp;

何勇 (1969—), 男, 博士, 教授, 目前主要研究方向是时滞系统控制、鲁棒控制和神经网络控制, E-mail: heyong08@yahoo.com.cn.