文章编号: 1000 - 8152(2003)03 - 0449 - 05

线性不确定系统经动态输出反馈的分层次控制策略

贾新春, 郑南宁, 袁泽剑
(西安交通大学 人工智能与机器人研究所,陕西 西安 710049)

摘要: 利用李雅谱诺夫稳定理论及线性矩阵不等式(LMI)方法,研究了具有非结构摄动的不确定连续系统经动态输出反馈的二次鲁棒能稳定问题.推导出这类控制器存在的充分条件,即一个拟线性矩阵不等式(Q -LMI)的形式,给出了 Q -LMI 问题的基于 LMI 方法的求解步骤.为了使得 Q -LMI 问题有解,可引入一些 LMI 约束,提高了 Q -LMI 问题的可解性.基于 Q -LMI 条件,揭示了系统不确定参数界与系统控制规模的关系,提出了"不同的摄动实施不同规模的控制"的鲁棒能稳定的分层次控制策略.最后,通过一个例子说明了结论的可行性.

关键词: 鲁棒稳定控制; 动态输出反馈; LMI 方法; 分层次控制策略
中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Layered control strategy of robust stabilization for uncertain systems via dynamic output feedback

JIA Xin-chun, ZHENG Nan-ning, YUAN Ze-jian
(Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Shanxi Xi'an 710049, China)

Abstract: Robust stabilization for uncertain linear systems is studied using Lyapunov stability theory and linear matrix inequality approach. Parameter uncertainties under consideration are time-varying and norm-bounded. A sufficient condition for the existence of such a controller is established in a Q-LMI form, and the solution procedure of the Q-LMI problem is proposed. The solvability for the Q-LMI problem can be improved by adding some LMI constraints to the Q-LMI. Based on the Q-LMI condition, a robust stable layered control strategy for the robust stabilization, namely, "different controller is acted on the system with different parameter perturbation", is presented. An example is given to illustrate the feasibility of the strategy.

Key words: robust stable control; dynamic output feedback; LMI approach; layered control strategy

1　引言(Introduction)

Petersen[1]首先针对不确定连续系统,提出了二次鲁棒稳定及二次鲁棒能稳定的概念.之后,关于鲁棒稳定分析及鲁棒稳定综合方面发展了不少各具特色的研究方法,例如,Lyapunov 方法、Riccati 方程法、LMI 方法、H_∞方法、变结构控制方法等[1~5].对于不确定离散系统,也有一些相应的方法来研究不确定系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能[6,7].

上述方法追求的目标是:针对固定的不确定量范数界寻找系统的鲁棒稳定控制器,这对实际系统的控制器设计,是不够灵活的.文献[3]利用 Lyapunov 方法和极点配置原理,提出了不确定系统鲁棒稳定控制的分层次控制设计思想,所涉及的不确定量只局限于状态矩阵.文献[8]采用 Riccati 方程和矩阵范数等,研究带有不完全匹配不确定量的系统经动态输出反馈的鲁棒稳定控制,结论相当复杂和不易实现.可以发现,以往许多设计方法在处理控制器与不确定量关系时都缺乏一定的灵活性.

本文沿用 Petersen 的二次鲁棒稳定和二次鲁棒能稳定的概念[1],讨论了不确定连续系统经动态输出反馈的鲁棒能稳定问题.建立了问题有解的拟线性矩阵不等式(Q-LMI)形式的充分条件.在此基础上,提出了系统鲁棒能稳定的分层次控制策略,这种策略对应着"不同摄动的系统实施不同的控制"的思想.

本文采用如下记号.对于对称矩阵 M,N, $\|M\|$ 和 M^{T} 分别表示矩阵 M 的谱范数和矩阵转置,$M<N(M\leqslant N)$表示 $M-N<0$(或 $M-N\leqslant 0$),即负定对称矩阵(或半负定对称矩阵).

收稿日期:2001 - 04 - 23; 收修改稿日期:2002 - 04 - 05.
基金项目:国家创新研究群体科学基金(60024301);国家自然科学基金(60175006)资助项目.

2 问题描述和分层次控制策略(Problem description and layered control strategy)

考虑带有时变不确定参数的线性系统

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=(A+\Delta A(t))x(t)+(B+\Delta B(t))u(t),\\ y(t)=(C+\Delta C(t))x(t).\end{cases}\tag{1}$$

其中, $x(t)\in\mathbb{R}^n, u(t)\in\mathbb{R}^m, y(t)\in\mathbb{R}^p$ 分别为系统的状态、控制、输出矢量; A, B 和 C 为适当维数的已知矩阵; $\Delta A, \Delta B$ 和 ΔC 均为系统的时变参数不确定量,具有如下参数非结构摄动形式:

$$\begin{cases}\Omega_\alpha=\{\Delta A:\Delta A^{\mathrm T}\Delta A<\alpha^2 I,\alpha>0\},\\ \Omega_\beta=\{\Delta B:\Delta B^{\mathrm T}\Delta B<\beta^2 I,\beta>0\},\\ \Omega_\gamma=\{\Delta C:\Delta C^{\mathrm T}\Delta C<\gamma^2 I,\gamma>0\}.\end{cases}\tag{2}$$

当系统(1)的状态不能直接量测时,选择状态观测器形式的动态输出反馈控制律

$$\begin{aligned}&\dot{x}_c(t)=(A-LC)x_c(t)+Bu(t)+Ly(t),\\ &u(t)=Kx_c(t).\end{aligned}\tag{3}$$

其中 $x_c(t)\in\mathbb{R}^n, K\in\mathbb{R}^{m\times n}, L\in\mathbb{R}^{n\times p}$ 是待设计的常矩阵,并把式(3)简记为 (K,L). 记状态误差为 $e(t)=x(t)-x_c(t)$, 则系统(1)经动态输出反馈(3)的闭环系统为

$$\begin{pmatrix}\dot{x}(t)\\ \dot{e}(t)\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}A+BK+\Delta A+B\Delta K & -(B+\Delta B)K\\ \Delta BK-L\Delta C & A-LC-\Delta BK\end{bmatrix}\begin{pmatrix}x(t)\\ e(t)\end{pmatrix}.\tag{4}$$

本文的问题是:对于不确定系统(1)和给定的不确定界参数 α,β,γ, 寻找系统(1)存在二次鲁棒稳定控制器 (K,L) 的条件和相应的设计方法;在此基础上,给出这一类控制器的规模(用矩阵范数表示)与系统的不确定量界参数 α,β,γ 之间的关系,并且提出系统二次鲁棒稳定的分层次控制策略.

系统(1)二次鲁棒能稳定的分层次控制策略为:

1) 首先根据系统(1)二次鲁棒能稳定判据,分别求得系统(4)二次鲁棒稳定的不确定量的最大范数界: $\alpha^*,\beta^*,\gamma^*$;

2) 根据实际需要,给定3个递增的不确定量界序列 $\alpha_i(i=1,2,\cdots,p)$, $\beta_j(j=1,2,\cdots,q)$ 和 $\gamma_k(k=1,2,\cdots,s)$, 其中 $\alpha_p\leqslant\alpha^*$, $\beta_q\leqslant\beta^*$ 和 $\gamma_s\leqslant\gamma^*$;

3) 对每个不确定参数笛卡儿集 $\Omega_{\alpha_i}\times\Omega_{\beta_j}\times\Omega_{\gamma_k}$, 求系统(1)的形如式(3)的二次鲁棒稳定控制器 (K_{ijk},L_{ijk}), $i=1,2,\cdots,p$, $j=1,2,\cdots,q$, $k=1,2,\cdots,s$;

4) 总之,得系统(1)的分层次鲁棒稳定控制策略:对不确定参数笛卡儿集 $\Omega_{\alpha_i}\times\Omega_{\beta_j}\times\Omega_{\gamma_k}$, 实施控制器 (K_{ijk},L_{ijk}), $i=1,2,\cdots,p$, $j=1,2,\cdots,q$, $k=1,2,\cdots,s$.

3 动态输出反馈镇定条件(Conditions for the stabilization of dynamic output feedback)

引理 1[2] 设 $X\in\mathbb{R}^{n\times m}, Y\in\mathbb{R}^{n\times m}$, 则对 $\forall\varepsilon>0$, 有 $X^{\mathrm T}Y+Y^{\mathrm T}X\leqslant\varepsilon X^{\mathrm T}X+\varepsilon^{-1}Y^{\mathrm T}Y$.

引理 2[4] 给定矩阵 Y, M, N, 则不等式 $Y+M\Delta N+N^{\mathrm T}\Delta^{\mathrm T}M^{\mathrm T}<0$ 对所有满足 $\Delta:\Delta^{\mathrm T}\Delta<\sigma I$ 不确定量都成立的充分必要条件是存在常数 $\varepsilon>0$, 使得 $Y+\varepsilon MM^{\mathrm T}+\frac{\sigma}{\varepsilon}N^{\mathrm T}N<0$.

引理 3(Schur 补引理) 给定矩阵 $M_{11}\in\mathbb{R}^{n_1\times n_1}$, $M_{12}\in\mathbb{R}^{n_1\times n_2}$, $M_{22}\in\mathbb{R}^{n_2\times n_2}$, 则有矩阵不等式

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}M_{11} & M_{12}\\ M_{12}^{\mathrm T} & M_{22}\end{bmatrix}<0\Leftrightarrow M_{22}<0,\\ &M_{11}-M_{12}M_{22}^{-1}M_{12}^{\mathrm T}<0\Leftrightarrow M_{11}<0,\\ &M_{22}=M_{12}^{\mathrm T}M_{11}^{-1}M_{12}<0.\end{aligned}$$

定理 1 对不确定系统(1)及给定的正常数 α, β 和 γ, 如果下述矩阵不等式有解:正定对称矩阵 X, P_1, 矩阵 M, W, 和正常数 $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3,\varepsilon_4$,

$$\begin{pmatrix}\begin{matrix}(XA^{\mathrm T}+AX)+(M^{\mathrm T}B^{\mathrm T}+BM)+\\ \varepsilon_1 I+\varepsilon_2 I+(1+\varepsilon_3)BB^{\mathrm T}\end{matrix} & J\\ J^{\mathrm T} & N\end{pmatrix}<0,\tag{5}$$

$$\begin{pmatrix}\begin{matrix}(A^{\mathrm T}P_1+P_1A)-(C^{\mathrm T}W^{\mathrm T}+WC)+\\ \beta K^{\mathrm T}(\varepsilon_4 I)\beta K+K^{\mathrm T}K\end{matrix} & J_1\\ J_1^{\mathrm T} & N_1\end{pmatrix}<0.\tag{6}$$

其中, $J=[\alpha X,\beta M^{\mathrm T},\beta I,\beta M^{\mathrm T},X]$, $N=\mathrm{diag}\{-\varepsilon_1 I,-\varepsilon_2 I,-\varepsilon_3 I,-I,-I\}$, $J_1=[P_1,P_1,\gamma,W]$ 和 $N_1=\mathrm{diag}\{-\varepsilon_4 I,-I,-I\}$, 则当 $K=MX^{-1}$, $L=P_1^{-1}W$ 时,式(3)是系统(1)的二次鲁棒稳定控制器.

证 对系统(4),选取李雅谱诺夫函数 $V(x,e,t)=x^{\mathrm T}(t)Px(t)+e^{\mathrm T}(t)P_1e(t)$. 这里 $P=X^{-1}$, $K=MX^{-1}$, $L=P_1^{-1}W$, 矩阵 X, P_1 是矩阵不等式(5),(6)的解. $V(x,e,t)$ 沿闭环系统(4)对 t 的导函数为

$$\begin{aligned}\dot V_t =&\\ &\dot x^{\mathrm T}(t)Px(t)+x^{\mathrm T}(t)P\dot x(t)+\\ &\dot e^{\mathrm T}(t)P_1e(t)+e^{\mathrm T}(t)P_1\dot e(t)=\\ &x^{\mathrm T}\{[(A+BK)+(\Delta A+\Delta BK)]^{\mathrm T}P+\\ &P[(A+BK)+(\Delta A+\Delta BK)]\}x-\\ &2e^{\mathrm T}K^{\mathrm T}(B+\Delta B)^{\mathrm T}Px+e^{\mathrm T}[(A-LC-\Delta BK)^{\mathrm T}P_1+\\ &P_1(A-LC-\Delta BK)]e+2e^{\mathrm T}P_1(\Delta BK-L\Delta C)x.\end{aligned}$$

根据引理 1 和引理 2,对正常数 $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3,\varepsilon_4$, 可推得

$$\begin{aligned}\dot V \leqslant&\\ &x^{\mathrm T}\{(A+BK)^{\mathrm T}P+P(A+BK)+\varepsilon_1P^2+\\ &\varepsilon_1^{-1}\alpha^2I+\varepsilon_2P^2+\varepsilon_2^{-1}\beta^2K^{\mathrm T}K+P[(1+\varepsilon_3)BB^{\mathrm T}+\\ &(1+\varepsilon_3^{-1})\beta^2I]P+\beta^2K^{\mathrm T}K+I\}x+\\ &e^{\mathrm T}\{(A-LC)^{\mathrm T}P_1+P_1(A-LC)+\varepsilon_4\beta^2K^{\mathrm T}K+\\ &\varepsilon_4^{-1}P_1^2+K^{\mathrm T}K+P_1^2+\gamma^2P_1LL^{\mathrm T}P_1\}e.\end{aligned}$$

如果式(7),(8)成立,则 $\forall(x^{\mathrm T},e^{\mathrm T})^{\mathrm T}(\neq 0)\in\mathbb{R}^{2n}$, $\dot V<0$ 对所有容许不确定量 $\Omega_\alpha\times\Omega_\beta\times\Omega_\gamma$ 都成立.

$$\begin{aligned}\Pi_1 =&\\ &(A+BK)^{\mathrm T}P+P(A+BK)+\varepsilon_1P^2+\varepsilon_1^{-1}\alpha^2I+\\ &\varepsilon_2P^2+\varepsilon_2^{-1}\beta^2K^{\mathrm T}K+P[(1+\varepsilon_3)BB^{\mathrm T}+\\ &(1+\varepsilon_3^{-1})\beta^2I]P+\beta^2K^{\mathrm T}K+I<0,\end{aligned}\qquad(7)$$

$$\begin{aligned}\Pi_2 =&\\ &(A-LC)^{\mathrm T}P_1+P_1(A-LC)+\varepsilon_4\beta^2K^{\mathrm T}K+\\ &\varepsilon_4^{-1}P_1^2+K^{\mathrm T}K+P_1^2+\gamma^2P_1LL^{\mathrm T}P_1<0.\end{aligned}\qquad(8)$$

根据引理 3 和作适当的合同变换,得矩阵不等式(7),(8)等价于矩阵不等式(5),(6).

应该强调的是,把已知 $K=WX^{-1}$ 代入式(6)后,式(6)就变为 LMI,故式(5),(6)称为拟线性矩阵不等式(记 Q -LMI).可以看到,矩阵 K 对不等式(6)的可解性是相当关键的.一般地,$K^{\mathrm T}K$ 越小(在对称正定矩阵意义下),即 $\|K\|$ 越小,则矩阵不等式(6)的可解性就越大;若 LMI(5)有解,则有无穷多个解.为了提高 Q -LMI(5),(6)的可解性,在式(5)中引入一些线性矩阵不等式约束,例如

$$\begin{pmatrix}-bI & M^{\mathrm T}\\ M & -I\end{pmatrix}<0,\ b>0,\ X>aI,\ a>0. \qquad(9)$$

其中 a 和 b 为可调参数.通过增大 a 和减小 b,减小了 $\|K\|$,从而提高了式(6)的可解性.

$$\Sigma(\alpha,\beta,\gamma)=:\{(K,L):K=MX^{-1},L=P_1^{-1}W.\ (X,M,P_1,W)\text{ 是式(5),(6) 的可行解}\}. \qquad(10)$$

推论 1(解集合的单调性)　$\Sigma(\alpha,\beta,\gamma)$ 有集合单调性:当 $\alpha_1<\alpha_2$ 时,$\Sigma(\alpha_1,\beta,\gamma)\subset\Sigma(\alpha_2,\beta,\gamma)$;当 $\beta_1<\beta_2$ 时,$\Sigma(\alpha,\beta_1,\gamma)\subset\Sigma(\alpha,\beta_2,\gamma)$;当 $\gamma_1<\gamma_2$ 时,$\Sigma(\alpha,\beta,\gamma_1)\subset\Sigma(\alpha,\beta,\gamma_2)$.

证　根据不等式(7),(8)与 Q -LMI(5),(6)的等价性,推论容易证明,略.

推论 2(控制规模的单调性)　函数 $f(\alpha,\beta,\gamma)=:\min\{\|(K,L)\|,(K,L)\in\Sigma(\alpha,\beta,\gamma)\}$ 关于每个不确定量界 α,β,γ 是单调递增的.

上述推论是本文制定"不同摄动的系统实施不同规模的控制"的分层次控制策略的理论依据.

矩阵不等式(5),(6)的求解步骤:

1) 首先求解 LMI(5),可得正定对称矩阵 $X>0$,矩阵 M 及正数 $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3$;

2) 把矩阵 $K=MX^{-1}$ 代入矩阵不等式(6),可得一个线性矩阵不等式,对之求解可得正定对称矩阵 $P_1>0$ 和矩阵 W; 如果式(6)无可行解, 可在式(5)上附加一些 LMI 约束(9), 再继续 1);

3) 把 $K=MX^{-1}$,$L=P_1^{-1}W$ 代入式(3),得不确定系统(1)的二次鲁棒稳定控制器(3).

4　举例(Example)

考虑具有不确定参数结构(2)的系统(1), 其中的系统矩阵为

$$\begin{cases}A=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&1.6&-2.1\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}1.1&0\\1&0\\0&1.1\end{bmatrix},\\ C=\begin{bmatrix}2.8&0&0\\0&1.5&0\end{bmatrix}.\end{cases}\qquad(11)$$

系统(11)的自治标称系统是不稳定的.根据系统(1)二次鲁棒能稳定的 Q -LMI 判据式(5),(6),附加 LMI 约束(9)($a=0.1,b=5$),首先求系统(11)的不确定量的最大范数界,得 $\alpha^*=0.68,\beta^*=0.176,\gamma^*=0.178$.根据实际要求,给定 3 个递增的不确定量范数界序列, 例如,$\alpha_1=0.17,\alpha_2=0.34,\alpha_3=0.51$;$\beta_1=0.044,\beta_2=0.088$;$\gamma_1=0.0445,\gamma_2=0.1335$.对 $\alpha=\alpha_i,\beta=\beta_j,\gamma=\gamma_k$,求解式(5),(6),得控制器为$(K_{ijk},L_{ijk})$,$i=1,2,3$,$j=1,2$,$k=1,2$.根据结果, 制定鲁棒稳定分层次控制策略,见表 1 和表 2.容易发现, 随着系统不确定参数的范数界的增大, 控制规模基本呈递增趋势. "……"表示当 $\alpha=\alpha_i,\beta=\beta_j,\gamma=\gamma_k$ 时,式(5),(6)

无可行解.

表 1 当 $\gamma \in [0,0.0445)$ 时的分层次控制策略

Table 1 Layered control strategy in the case $\gamma \in [0,0.0445)$

	$\alpha \in [0,0.17)$	$\alpha \in [0,0.34)$	$\alpha \in [0,0.51)$
$\beta \in [0,0.044)$	$K_{11} = \begin{bmatrix} -4.4504 & -3.7203 & -1.2621 \\ 2.5405 & -3.0800 & -1.3283 \end{bmatrix}$ $L_{11} = \begin{bmatrix} 3.6983 & 0.9334 \\ 1.6305 & 7.8311 \\ 1.2127 & 6.2301 \end{bmatrix}$	$K_{12} = \begin{bmatrix} -4.9402 & -3.3484 & -1.2025 \\ 3.1623 & -3.2634 & -1.2845 \end{bmatrix}$ $L_{12} = \begin{bmatrix} 4.4881 & 0.7717 \\ 1.3020 & 7.6322 \\ 1.0740 & 6.0432 \end{bmatrix}$	$K_{13} = \begin{bmatrix} -5.7503 & -2.7609 & -1.1242 \\ 4.0905 & -3.8416 & -1.5992 \end{bmatrix}$ $L_{13} = \begin{bmatrix} 5.0808 & 0.2804 \\ 0.4298 & 9.4832 \\ 0.6903 & 9.6279 \end{bmatrix}$
$\beta \in [0,0.088)$	$K_{21} = \begin{bmatrix} -4.5728 & -3.3862 & -1.1399 \\ 2.9948 & -3.2429 & -1.3001 \end{bmatrix}$ $L_{21} = \begin{bmatrix} 4.2263 & 0.7588 \\ 1.2807 & 7.9161 \\ 0.9873 & 6.2744 \end{bmatrix}$	$K_{22} = \begin{bmatrix} -5.1952 & -3.2987 & -1.1574 \\ 3.4365 & -3.4829 & -1.4490 \end{bmatrix}$ $L_{22} = \begin{bmatrix} 4.8863 & 0.6961 \\ 1.1492 & 8.1015 \\ 0.9191 & 6.5557 \end{bmatrix}$	……

表 2 当 $\gamma \in [0,0.1335)$ 时的分层次控制策略

Table 2 Layered control strategy in the case $\gamma \in [0,0.1335)$

	$\alpha \in [0,0.17)$	$\alpha \in [0,0.34)$	$\alpha \in [0,0.51)$
$\beta \in [0,0.044)$	$K_{11} = \begin{bmatrix} -4.4504 & -3.7203 & -1.2621 \\ 2.5405 & -3.0800 & -1.3283 \end{bmatrix}$ $L_{11} = \begin{bmatrix} 7.1238 & 1.1553 \\ 1.7431 & 15.4086 \\ 2.4787 & 13.6546 \end{bmatrix}$	$K_{12} = \begin{bmatrix} -4.9402 & -3.3484 & -1.2025 \\ 3.1623 & -3.2634 & -1.2845 \end{bmatrix}$ $L_{12} = \begin{bmatrix} 4.6669 & 0.9136 \\ 1.5085 & 11.4060 \\ 2.0110 & 10.9954 \end{bmatrix}$	……
$\beta \in [0,0.088)$	$K_{21} = \begin{bmatrix} -4.5728 & -3.3862 & -1.1399 \\ 2.9948 & -3.2429 & -1.3001 \end{bmatrix}$ $L_{21} = \begin{bmatrix} 4.3222 & 1.0030 \\ 1.4692 & 711.5148 \\ 1.9371 & 11.7667 \end{bmatrix}$	……	……

当 $\alpha = \alpha^* = 0.68, \beta = \gamma = 0$ 时,先求解 LMI(5),把得到的矩阵 $K = MX^{-1}$ 代入矩阵不等式(6),得式(6)无可行解.但是,当在式(5)中引入 LMI 约束(9)($a = 0.1, b = 5$)时,Q-LMI(5),(6)问题有可行解

$$K = \begin{bmatrix} -6.4650 & -2.3782 & -1.0985 \\ 4.5240 & -4.2957 & -1.9381 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 6.9168 & -0.1930 \\ 0.2605 & 12.6412 \\ 0.1938 & 10.5510 \end{bmatrix}.$$

可见,在 Q-LMI(5),(6)中引入 LMI 约束(9),对求解 Q-LMI 问题相当有效.

参考文献(References):

[1] PETERSEN I R. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems [J]. *Systems & Control Letters*, 1989, 8(4): 351 - 357.

[2] XIE Lihua, FU Minyue, de SOUZA C E. H_∞ control and quadratic stabilization of systems with parameter uncertain via output feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(8): 1253 - 1256.

[3] 贾新春,王素格.线性不确定系统的稳定控制鲁棒界和多级稳定鲁棒控制[J].系统科学与数学,2000,20(2):155 - 159.
(JIA Xinchun, WANG Suge. Robust bounds of stable controllers and multilevel stable robust controllers for linear uncertain systems [J]. *J of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2000, 20(2): 155 - 159.)

[4] KHARGONEKAR P P, PETERSEN I R, ZHOU Kemin. Robust stabilization of uncertain systems and H_∞ optimal control [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(3): 351 - 361.

[5] BOYD S, GHAOUI L E, BALAKRISHNAN V, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory* [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.

[6] YANG Guanghong, WANG Jianliang, CHAI S Y. Guaranteed cost control for discrete-time linear systems under controller gain perturbations [J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2000, 312(1/3): 161 - 180.

[7] GARCIA G, BERNUSSOU J, ARIZELIER D. Robust stabilization of discrete-time linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty [J]. *Systems & Control Letters*, 1994, 22(4): 327 - 339.

[8] YANG S K, CHEN C L. Observer based robust controller design for a linear system with time-varying perturbations [J]. *J of Mathematical Analysis and Applications*, 1997, 213(2): 642 - 661.

作者简介：

贾新春　(1964 —), 男, 1988 年获中国科学院系统科学研究所硕士学位, 在职博士生. 研究领域为鲁棒控制, 智能信息处理, 广义系统等.　E-mail: xchjia@aiar.xjtu.edu.cn;

郑南宁　(1952 —), 男, 中国工程院院士. 研究领域为智能信息处理, 机器人视觉与模式识别等;

袁泽剑　(1971 —), 男, 博士生. 研究领域为鲁棒控制, 智能信息处理, 图象处理等.

(上接第 448 页)

参考文献(References):

[1] GAREY M R, JOHNSON D S, SETHI R. The complexity of flow shop and job shop scheduling [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1976, 1(2): 117 - 129.

[2] LENSTRA J K, RINNOOY Kan AHG, BRUCKER P. Complexity of machine scheduling problems [J]. *Annal of Discrete Mathematics*, 1977, 1(1): 343 - 362.

[3] CAMPBELL H G, DUDEK R A, SMITH M L. A heuristic algorithm for the *n*-jobs, *m*-machine sequencing problem [J]. *Management Science*, 1970, (16): 630 - 637.

[4] NAWAZ M, EMSCORE Jr E E, HAM I. A heuristic algorithm for the *n*-job, *m*-machine flow shop sequencing problems [J]. *Int J of Management Science*, 1983, (11): 91 - 98.

[5] TAILLARD E. Some efficient heuristic methods for the flow shop seqencing problem [J]. *European J of Operational Research*, 1990, (47): 65 - 74.

[6] OSMAN I H, POTTS C N. Simulated annealing for permulation flow shop scheduling [J]. *Int J of Management Science*, 1989, (17): 551 - 557.

[7] KIRKPATRICK S, GELATT C D Jr, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing [J]. *Science*, 1983, (220): 671 - 680.

[8] GRABOWSKI J, SKUBALSKA E, SMUTNICKI C. On flow shop scheduling with release and due dates to minimize maximum lateness [J]. *J of Operational Research Society*, 1983, (4): 615 - 620.

[9] GRABOWSKI J, NOWICKI E, ZDRALKA S. A block approach for single-machine scheduling with release dates and due dates [J]. *European J of Operational Research*, 1986, (26): 278 - 285.

[10] TAILLARD E. Benchmark for basic scheduling problems [J]. *European J of Operational Research*, 1993, (64): 278 - 285.

作者简介：

陈　雄　(1964 —), 男, 博士, 现为复旦大学电子工程系副教授. 研究方向为智能调度理论及应用, 过程控制, 移动机器人规则. E-mail: chenxiong@fudan.edu.cn;

杨凤霞　(1968 —), 女, 学士, 现为河南职业技术师范学院化学工程系讲师. 研究方向为智能调度理论及应用, 智能方法在化学领域中的应用;

吴启迪　(1947 —), 女, 博士, 现为同济大学校长, 博士生导师. 研究方向为智能控制, CIMS, 智能调度.