第 26 卷第 3 期
2009 年 3 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 26 No. 3
Mar. 2009

文章编号: 1000−8152(2009)03−0238−05

广义二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置

黄 玲[1], 段广仁[2], 于海华[2]

(1. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 考虑了具有摄动的广义二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置问题, 提出了一种优化算法. 该算法的目标是使得特征结构配置的误差最小. 根据广义二阶动力学系统基于状态加微分反馈的参数化特征结构配置结果, 给出了优化指标的完全参数形式. 该算法不包含"返回"过程, 允许特征值在一定范围内参与优化, 能够给出鲁棒性较强的控制系统. 数值例子说明了算法的有效性.

关键词: 广义二阶系统; 特征结构配置; 鲁棒性; 参数摄动

中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Robust eigenstructure assignment in descriptor second-order linear systems

HUANG Ling[1], DUAN Guang-ren[2], YU Hai-hua[2]

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China;

2. Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Robust eigenstructure assignment in descriptor second-order systems is considered; and an optimization algorithm is given for minimizing the error of the eigenstructure assignment. Based on the parametric eigenstructure assignment result for descriptor second-order systems, the parametric expression of the optimization index is obtained. The optimization algorithm does not contain "going back" procedures, and allows the closed-loop eigenvalues to be optimized within desired regions. A numerical example demonstrates its validity.

Key words: descriptor second-order systems; eigenstructure assignment; robustness; parameter perturbation

1 引言(Introduction)

无论是二阶系统还是二阶系统, 特征结构配置都是广义线性系统理论中的重要课题, 受到了很多学者的关注[1~7]. 文献[1~3]研究了广义二阶系统基于状态反馈的特征结构配置. 文献[4,5]研究了广义二阶系统基于输出反馈的特征结构配置. 文献[6]研究了广义二阶系统基于比例加微分状态反馈的特征结构配置. 由于系统常常存在不确定性, 所以进行鲁棒特征结构配置非常必要[3,8].

由于可控的广义系统特征结构配置的非唯一性, 因此可以利用额外的自由度来满足其他性能要求. 本文研究的是具有结构摄动的广义二阶系统的鲁棒特征结构配置问题. 基于文献[6]的比例加微分状态反馈特征结构配置的显式完全参数化解, 在设计时可以利用系统中的所有自由度, 因此能够给出问题的最优解. 利用文献[6]中的特征结构配置结果和系统参数摄动下闭环系统特征值, 特征向量所满足方程组的误差, 建立鲁棒特征结构配置指标的显式参数表达式, 并给出了一种优化算法. 该算法不包括"返回"过程, 且可以方便地使闭环系统特征值在一定允许范围内参与优化, 因而在保证闭环系统性能的前提下可以进一步提高系统的鲁棒性.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑下述具有参数扰动的广义二阶系统:

$$(M+\Delta M)\ddot{x}+(D+\Delta D)\dot{x}+(K+\Delta K)x=(B+\Delta B)u. \tag{1}$$

其中: $x\in\mathbb{R}^n$, $u\in\mathbb{R}^r$分别为系统的广义状态向量和控制向量, M,D,K,B为具有适当维数的已知矩阵, 满足下述假设:

收稿日期: 2006−11−20; 收修改稿日期: 2008−10−31.
基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(69925308); 长江学者与创新团队发展计划资助项目.

假设 1 $\operatorname{rank} M = \operatorname{rank}(M+\Delta M) = n_0$, $0<n_0<n$, $\operatorname{rank} B = r$.

矩阵$\Delta M, \Delta D, \Delta K, \Delta B$分别为系统矩阵$M, D, K, B$中的不确定性, 且具有下述形式:

$$\begin{aligned}\Delta M = \sum_{i=1}^{s} M_i q_i,\ \Delta D = \sum_{i=1}^{s} D_i q_i,\\ \Delta K = \sum_{i=1}^{s} K_i q_i,\ \Delta B = \sum_{i=1}^{s} B_i q_i.\end{aligned} \tag{2}$$

式中: $M_i, D_i, K_i, B_i (i=1,2,\cdots,s)$为已知矩阵, $q_i(i=1,2,\cdots,s)$为未知但有界的摄动参数, 且满足

$$|q_i| \leqslant \bar{q}_i,\ i=1,2,\cdots,s, \tag{3}$$

$\bar{q}_i(i=1,2,\cdots,s)$为已知的非负标量.

系统(1)的理想系统为

$$M\ddot{x}+D\dot{x}+Kx=Bu. \tag{4}$$

在控制律

$$u=F_0x+F_1\dot{x} \tag{5}$$

作用下的闭环系统为

$$M\ddot{x}+(D-BF_1)\dot{x}+(K-BF_0)x=0. \tag{6}$$

系统(6)能够表示成二阶状态空间的形式:

$$E_{\mathrm{ec}}\dot{z}=A_{\mathrm{ec}}z, \tag{7}$$

其中:

$$\begin{cases} E_{\mathrm{ec}}=\begin{bmatrix} I_n & 0\\ 0 & M\end{bmatrix},\\ A_{\mathrm{ec}}=\begin{bmatrix} 0 & I_n\\ -(K-BF_0) & -(D-BF_1)\end{bmatrix}.\end{cases} \tag{8}$$

假设 2 系统(4)R–可控和I–可控.

引理 1[6] 已知如公式 (8) 的 $E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}}$ 及 $\Lambda=\operatorname{diag}\{s_1,s_2,\cdots,s_{n+n_0}\}$, 则

1) 存在矩阵$V, V' \in \mathbb{C}^{n\times(n+n_0)}$满足

$$A_{\mathrm{ec}}\begin{bmatrix} V\\ V'\end{bmatrix}=E_{\mathrm{ec}}\begin{bmatrix} V\\ V'\end{bmatrix}\Lambda$$

的充要条件是

$$MV\Lambda^2+(D-BF_1)V\Lambda+(K-BF_0)V=0 \tag{9}$$

和

$$V'=V\Lambda. \tag{10}$$

2) 存在矩阵$V_\infty, V'_\infty \in \mathbb{C}^{n\times(n-n_0)}$满足

$$E_{\mathrm{ec}}\begin{bmatrix} V'_\infty\\ V_\infty\end{bmatrix}=0,\ \operatorname{rank}\begin{bmatrix} V'_\infty\\ V_\infty\end{bmatrix}=n-n_0 \tag{11}$$

的充要条件是$V'_\infty=0$和

$$MV_\infty=0,\ \operatorname{rank}(V_\infty)=n-n_0. \tag{12}$$

引理1的结论1说明矩阵对$(E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}})$的约当标准形是$\Lambda$的充要条件是存在矩阵$V\in\mathbb{R}^{n\times(n+n_0)}$满足(9), 这时矩阵对$(E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}})$相应的有限特征向量矩阵是

$$V_{\mathrm{ec}}^{f}=\begin{bmatrix} V\\ V\Lambda\end{bmatrix}. \tag{13}$$

结论2)说明矩阵对$(E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}})$的无穷特征向量矩阵是

$$V_{\mathrm{ec}}^{\infty}=\begin{bmatrix} 0\\ V_\infty\end{bmatrix}, \tag{14}$$

其中V_∞满足式(12).

于是理想系统(4)在比例微分状态反馈控制律(5)作用下的特征结构配置问题可描述为

问题ESA 已知满足假设2的系统(4)、满足式(12)的V_∞和一组共轭封闭复数$s_i(i=1,2,\cdots,n+n_0)$和$V\in\mathbb{C}^{n\times(n+n_0)}$使得下述要求满足:

1) 式(9)满足;

2) $\det\begin{bmatrix} V & 0\\ V\Lambda & V_\infty\end{bmatrix}\neq 0$;

3) 闭环系统(6)正则.

式(9)是实现上述特征结构配置的基本条件, 当系统参数矩阵存在不确定性时, 方程(9)一般不再成立, 但希望

$$\Psi+\Delta\Psi=0, \tag{15}$$

其中:

$$\begin{aligned}&\Psi=MV\Lambda^2+(D-BF_1)V\Lambda+\\&\quad (K-BF_0)V=0,\\&\Delta\Psi=\Delta MV\Lambda^2+(\Delta D-\Delta BF_1)V\Lambda+\\&\quad (\Delta K-\Delta BF_0)V\end{aligned}$$

尽可能成立, 即希望$\Delta\Psi=0$尽可能成立.

将对理想系统(4)设计的比例微分状态反馈控制律(5)应用于不确定性系统(1), 方程(9)存在误差, 即

$$\begin{cases}\Delta\Psi=\\ \sum_{k=1}^{s}(M_kV\Lambda^2+D_kV\Lambda+K_kV-B_kW)q_k=\\ \sum_{k=1}^{s}(s_i^2M_kV_i+s_iD_kV_i+K_kV_i-B_kW_i)q_k,\\ i=1,2,\cdots,n+n_0.\end{cases} \tag{16}$$

其中

$$W = F_1 V \Lambda + F_0 V = [F_0 \quad F_1][V^{\mathrm{T}} \quad \Lambda V^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},$$

M_i代表矩阵M的第i列.

当系统的参数存在不确定性时, 特征值特征向量所满足的方程(9)一般不再满足, 由于不确定性所导致的该方程的误差为式(16), 则系统(1)特征结构配置误差的一个合理度量可取为

$$J = \sum_{k=1}^{s} a_k \sum_{i=1}^{n+n_0} \|s_i^2 M_k V_i + s_i D_k V_i + K_k V_i - B_k W_i\|_2^2. \tag{17}$$

其中: $||v_i||_2$表示向量 v_i 的 2–范数, 按 $||v_i||_2 = \sqrt{v_i^{\mathrm{H}} v_i}$计算, $a_k(i = 1, 2, \cdots, s)$为适当的正加权因子. 于是本文的广义二阶动力学系统的基于比例微分状态反馈的鲁棒特征结构配置问题可描述如下:

问题RESA 给定满足假设2的理想系统(4), 求解问题ESA且使得性能指标(17)达到最小.

3 问题的求解(Solution to the problem)

由系统(4)的R–可控性可知存在右互质多项式$N(s) \in \mathbb{R}^{n\times r}[s]$和$D(s) \in \mathbb{R}^{r\times r}[s]$满足下述互质分解:

$$(s^2 M + sD + K)^{-1} B = N(s) D^{-1}(s). \tag{18}$$

下述引理给出了问题ESA的参数化解.

引理 2[6] 设系统(4)R–可控, $N(s)$和$D(s)$为满足右互质分解(18)的多项式矩阵, 则

1) 问题ESA有解的充要条件是存在一组参数$f_i \in \mathbb{C}^r, i = 1, 2, \cdots, n + n_0$满足下述约束:

C1) 当$s_i = \bar{s}_j$, $f_i = \bar{f}_j$;

C2) $\det(s_i^2 M + s_i(D - BF_1) + (K - BF_0)) \neq 0, \exists \lambda \in C$;

C3) $\det(V_{cb}) \neq 0$, 其中

$$V_{cb} = \begin{bmatrix} N(s_1)f_1 & \cdots & N(s_{n+n_0})f_{n+n_0} & 0 \\ s_1 N(s_1) f_1 & \cdots & s_{n+n_0} N(s_{n+n_0}) f_{n+n_0} & V_\infty \end{bmatrix}. \tag{19}$$

2) 当上述条件满足时, 特征结构配置问题的所有解可参数化表示为

$$\begin{aligned} V &= [N(s_1)f_1 \ \cdots \ N(s_{n+n_0})f_{n+n_0}], \\ W &= [D(s_1)f_1 \ \cdots \ D(s_{n+n_0})f_{n+n_0}] \end{aligned} \tag{20}$$

和

$$[F_0 \ \ F_1] = [W \ \ W_\infty] V_{cb}^{-1}, \tag{21}$$

其中: $f_i \in \mathbb{C}^r$, $i = 1, 2, \cdots, n + n_0$为满足约束1~3的自由参数向量, 而$W_\infty \in \mathbb{C}^{r\times(n-n_0)}$为一自由参数矩阵.

注 1 约束1保证了所设计的控制器是实的.

由于

$$\begin{aligned} J = \sum_{i=1}^{n+n_0} \sum_{k=1}^{s} a_k f_i^{\mathrm{H}} (& s_i^2 M_k N(s_i) + \\ & s_i D_k N(s_i) + K_k N(s_i) - \\ & B_k D(s_i))^{\mathrm{H}} (s_i^2 M_k N(s_i) + \\ & s_i D_k N(s_i) + K_k N(s_i) - \\ & B_k D(s_i)) f_i, \end{aligned}$$

于是鲁棒设计指标J具有下述形式

$$J(s_i, f_i, i = 1, 2, \cdots, n + n_0) = \sum_{i=1}^{n+n_0} J_i(s_i, f_i). \tag{22}$$

为了便于实际计算, 通常将指标J表达成实优化参数的形式. 将矩阵对$(E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}})$的实特征值$s_i$记为$\sigma_i$, 其对应的参向量记为$h_i$; 将矩阵对$(E_{\mathrm{ec}}, A_{\mathrm{ec}})$的复特征值$s_j$和$s_k$记为$s_j = \bar{s}_k = \sigma_j + \sigma_k j$, 它们对应的参向量记为$f_j = \bar{f}_k = h_j + h_k j$, 这里$\sigma_i$为实数, h_i为实参向量, 这样约束1自然满足.

考虑到系统的稳定性及其他动态性能要求, 对闭环极点引入下述约束条件:

C4) $a_i \leqslant \sigma_i \leqslant b_i \ \ i = 1, 2, \cdots, n + n_0$.

式中$a_i, b_i(i = 1, 2, \cdots, n + n_0)$为适当选取的实数.

这样问题RESA的解可以归结为下述优化问题的解, 即

$$\begin{cases} \min J(\sigma_i, h_i, i = 1, 2, \cdots, n + n_0), \\ \text{s.t. C1)} \sim \text{C4)}. \end{cases} \tag{23}$$

算法

1) 求解满足式(18)的右互质分解多项式$N(s)$和$D(s)$;

2) 求解满足式(12)的矩阵V_∞;

3) 由式(20)给出V和W的参数表示, 再由式(22)给出指标J的实优化参数形式;

4) 用适当的优化算法求解优化问题(23);

5) 利用上一步优化得到的参数, 根据式(20)求出V和W;

6) 给出一个W_∞, 根据式(21)计算反馈增益阵F_0, F_1.

4 数值例子(Numerical example)

考虑具有下述参数的广义二阶系统[6]:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ D = \begin{bmatrix} 2.5 & -0.5 & 0 \\ -0.5 & 2.5 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix},$$

$$K=\begin{bmatrix}10&-5&0\\-5&25&-20\\0&-20&20\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}1&0\\0&0\\0&1\end{bmatrix}.$$

设不确定的上界为$0.1, 0.1, 0.1$, 而

$$M_1=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix},\ M_2=\begin{bmatrix}0&0&1\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix},$$

$$D_1=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&-1&0\\0&0&0\end{bmatrix},\ D_3=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&-1&0\end{bmatrix},$$

$$K_1=\begin{bmatrix}0&0&-1\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix},\ K_3=\begin{bmatrix}-1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix},$$

$$B_2=\begin{bmatrix}0&0\\0&0\\0&1\end{bmatrix},\ B_3=\begin{bmatrix}1&0\\0&0\\0&0\end{bmatrix},$$

$$M_3=D_2=K_2=B_1=0.$$

直接引用文献[6]的结果能够给出$V_\infty, N(s)$和$D(s)$.

令

$$f_i=\begin{bmatrix}f_{i1}\\f_{i2}\end{bmatrix},\ i=1,2,\cdots,5,$$

则有V_i和W_i的参数表示. 可以事先取定向量f_i中的一个元素, 这里设$f_{11}=f_{22}=f_{31}=f_{42}=f_{51}=0.2$, 而特征值在这里限定为实数, 其区间设为$-1.5<s_1<-0.5,\ -2.5<s_2<-1.5,\ -3.5<s_3<-2.5,\ -4.5<s_4<-3.5,\ -5.5<s_5<-4.5$. 权值$a_k$分别取为$a_1=0.5,\ a_2=0.2,\ a_3=0.1,\ a_4=0.1,\ a_5=0.1$. 优化的结果是

$$J=1312.9,\ s_1=-0.5,\ s_2=-1.5,\ s_3=-2.5,$$
$$s_4=-3.5,\ s_5=-4.5,\ f_{12}=0.2890,\ f_{21}=0.1274,$$
$$f_{32}=0.0890,\ f_{41}=0.1072,\ f_{52}=0.0221.$$

利用优化的结果可得

$$W=\begin{bmatrix}8.1172&3.9662&24.9930&10.3653&41.1305\\9.4056&12.8919&2.1021&35.7704&-0.4502\end{bmatrix},$$

$$V=\begin{bmatrix}3.8000&2.1666&3.0000&1.3937&2.2000\\5.4911&3.4000&1.3352&2.6000&0.2435\\5.9861&4.1583&1.4754&5.3516&0.2025\\-1.9000&-3.2499&-7.5000&-4.8780&-9.9000\\-2.7456&-5.1000&-3.3380&-9.1000&-1.0956\\-2.9931&-6.2375&-3.6884&-18.7305&-0.9114\end{bmatrix}.$$

取$W_\infty=[0\ \ 1]^{\mathrm T}$, 利用式(21)可求得反馈增益阵$F_0, F_1$:

$$F_0=\begin{bmatrix}1.5965&-8.1515&8.2658\\-0.8668&-14.3589&15.1901\end{bmatrix},$$

$$F_1=\begin{bmatrix}-4.2654&3.9240&0\\-0.1474&-1.2123&1.0000\end{bmatrix}.$$

对于摄动系统(1), 如果取$q_1=0.01,\ q_1=0.02,\ q_1=0.03$, 在所求得的鲁棒状态反馈控制律的作用下, 闭环系统的极点为

$$s'_1=-0.3890,\ s'_2=-1.7355,$$
$$s'_3=-2.3356,\ s'_4=-3.1660,\ s'_5=-4.6879.$$

有限特征向量矩阵为

$$V'=\begin{bmatrix}3.8000&2.1666&3.0000&1.3937&2.2000\\5.4207&3.8632&1.0133&1.4459&0.2298\\5.8697&4.9954&0.8788&2.5226&0.2137\\-1.4781&-3.7601&-7.0069&-4.4125&-10.3135\\-2.1085&-6.7045&-2.3667&-4.5777&-1.0775\\-2.2831&-8.6693&-2.0525&-7.9865&-1.002\end{bmatrix}.$$

任意选择一组自由参数: $\tilde s_1=-1,\ \tilde s_2=-2,\ \tilde s_3=-3,\ \tilde s_4=-4,\ \tilde s_5=-5,\ \tilde f_{12}=1,\ \tilde f_{21}=1,\ \tilde f_{32}=1,\ \tilde f_{41}=1,\ \tilde f_{52}=1$, 取相同的权值, 对应的性能指标是

$$\tilde J=120370.$$

$\tilde V$和$\tilde W$可求得

$$\tilde V=\begin{bmatrix}3.60&16.00&2.80&12.00&2.00\\18.00&3.20&14.00&2.40&10.00\\22.60&0.80&25.80&3.20&37.00\\-3.60&-32.00&-8.40&-48.00&-10.00\\-18.00&-6.40&-42.00&-9.60&-50.00\\-22.60&-1.60&-77.40&-12.80&-185.00\end{bmatrix},$$

$$\tilde W=\begin{bmatrix}-50.40&131.20&-16.80&184.80&20.00\\82.80&-38.40&165.20&9.60&270.00\end{bmatrix}.$$

取和上面相同的V_∞和W_∞, 由式(21)可求得一个非鲁棒控制器:

$$\tilde F_0=\begin{bmatrix}2.2629&-5.2646&1.2600\\-1.8427&-12.1615&13.1500\end{bmatrix},$$

$$\tilde F_1=\begin{bmatrix}-3.5182&0.2736&0\\-0.2956&-1.8159&1.0000\end{bmatrix}.$$

将该控制器作用于摄动系统(1), 在同样的摄动参数下, 闭环系统的极点为: $\tilde s'_1=-0.8670,\ \ \tilde s'_2=-1.8982,\ \ \tilde s'_3=-3.6102\ \ \tilde s'_4=-4.1485,\ \ \tilde s'_5=$

-4.4276, 相应的有限特征向量矩阵为

$$\tilde{V}' = \begin{bmatrix} 3.6000 & 16.0000 & 2.8000 & 12.0000 & 2.0000 \\ 21.5746 & 6.8644 & 3.3753 & 1.6406 & -0.9848 \\ 26.9664 & 6.1150 & 6.9710 & 1.4691 & -3.4673 \\ -3.1213 & -30.3708 & -10.1086 & -49.7815 & -8.8551 \\ -18.7059 & -13.0299 & -12.1855 & -6.8059 & 4.3605 \\ -23.3807 & -11.6073 & -25.1670 & -6.0944 & 15.3515 \end{bmatrix}.$$

为了说明系统的鲁棒性, 计算了摄动系统在鲁棒及非鲁棒控制器作用下极点的偏移平均值:

$$d = [\sum_{i=1}^{5}[\mathrm{abs}(s_i') - \mathrm{abs}(s_i)]^2]^{\frac{1}{2}}/5,$$

其中: 在鲁棒控制器作用下, $d = 0.0983$; 而在非鲁棒控制器作用下, $\tilde{d} = 0.1732$.

从结果很容易看出, 对比于非摄动系统的特征值和特征向量, 在鲁棒控制器作用下闭环系统的特征值和特征向量"漂移"较小, 而在非鲁棒控制器作用下的闭环系统的特征值和特征向量"漂移"较大, 这说明上述鲁棒状态反馈控制器的作用下, 闭环系统的特征结构对于参数摄动式(2)具有较强的鲁棒性.

注 2 在该数值例子中采用的是MATLAB的命令fmincon来求解优化问题(23).

参考文献(References):

[1] OWENS T J, ASKARPOUR S. Integrated approach to eigenstructure assignment in descriptor systems by PD and P state feedback[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications,* 2000, 147(4): 407 – 415.

[2] DUAN G R. Eigenstructure assignment and response analysis in descriptor linear systems with state feedback control[J]. *International Journal of Control*, 1998, 69(5): 663 – 694.

[3] 段广仁, 张彪, 孙德波. 广义线性系统的鲁棒状态反馈特征结构配置[J]. 系统工程和电子技术, 2004, 26(7): 933 – 937.
(DUAN Guangren, ZHANG Biao, SUN Debo. Robust Eigenstructure asignment in descriptor linear systems via state feedback[J]. *Systems Engineering and Electronics,* 2004, 26(7): 933 – 937.)

[4] FLETCHER L R. Eigenstructure assignment by output feedback in descriptor systems[J]. *IEE Proceedings, Part D: Control Theory and Applications,* 1988, 135-D(4): 302 – 308.

[5] DUAN G R. Eigenstructure assignment in descriptor linear systems via output feedback[J]. *International Journal of Control,* 1999, 72(4): 345 – 364.

[6] DUAN G R. Parametric eigenstructure assignment in second-order descriptor linear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 2004, 49(10): 1789 – 1795.

[7] ZAGALAK P, KUCERA V. Eigenstructure assignment in linear descriptor systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 1995, 40(1): 144 – 147.

[8] NICHOLS N K, KAUTSKY J. Robust eigenstructure assignment in quadratic matrix polynomials[J]. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications* 2001, 23(8): 77 – 102.

作者简介:

黄 玲 (1975—), 女, 讲师, 1999 年7月获哈尔滨理工大学自动化专业工学学士学位, 2002年4月获哈尔滨理工大学控制理论与控制工程专业工学硕士学位, 2007年8月在哈尔滨工业大学获得导航、制导与控制专业工学博士学位, 研究方向为特征结构配置、模型跟踪、鲁棒极点配置等, E-mail: huangling@hrbust.edu.cn;

段广仁 (1962—), 男, 国家杰出青年基金获得者, 博士生导师，控制理论与制导技术研究中心主任, 长江学者奖励计划特聘教授, 1989 年9月获哈尔滨工业大学一般力学专业博士学位, 1991年8 月结束哈尔滨工业大学机械工程学科博士后流动站科研工作. 目前主要研究兴趣为特征结构配置理论、鲁棒控制理论、广义线性系统理论等, E-mail: g.r.duan@hit.edu.cn;

于海华 (1970—), 女, 博士研究生, 1992年7 月获黑龙江大学数学专业理学学士学位, 2003年7月获黑龙江大学控制理论与控制工程专业工学硕士学位, 2007年8月在哈尔滨工业大学获得导航、制导与控制专业工学博士学位, 研究方向为特征结构配置、鲁棒极点配置等, E-mail: yuhaihua@hit.edu.cn.