第 16 卷第 4 期
1999 年 8 月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol.16, No.4
Aug., 1999

对称循环组合系统的几个控制问题*

黄守东　张嗣瀛
(东北大学自动控制系·沈阳,110006)

摘要:研究了对称循环组合系统的输出调节问题和不确定对称循环组合系统的二次稳定性和二次稳定化问题.结果表明,由于对称循环组合系统结构的特殊性,它的输出调节问题可以转化为一些低阶系统的输出调节问题.而不确定对称循环组合系统的二次稳定性可以通过考察若干个低阶系统的二次稳定性来判断,且其稳定化控制律也可以通过低阶系统的稳定化控制律来构造.

关键词:组合系统;对称循环结构;输出调节;二次稳定性;二次稳定化

Some Control Problems for Symmetric Circulant Composite Systems

Huang Shoudong　and　Zhang Siying
(Department of Automatic Control, Northeastern University·Shenyang, 110006, P.R.China)

Abstract: In this paper, we study the output regulation for symmetric circulant composite systems and the quadratic stability and the quadratic stabilization for uncertain symmetric circulant composite systems. It is shown that because of the special structure of the system, the output regulator problems for such a system can be transfered to the output regulator problem for systems with lower order. The quadratic stability for such a system can be simplified by considering the quadratic stability of several independent systems of lower order. And the quadratic stabilization controller of such a system can be constructed by the quadratic stabilization controller of systems with lower order.

Key words: composite system; symmetric circulant structure; output regulation; quadratic stability; quadratic stabilization

1 引言(Introduction)

许多复杂控制系统都具有明显的对称性和相似性,如何利用系统的对称相似性来简化系统的分析和控制器设计,是一个值得深入研究的问题[1].

本文考虑一类具有特殊结构的系统——对称循环组合系统.这类系统的状态矩阵既是块循环的,又是块对称的.对称循环组合系统具有广泛的实际背景,例如造纸机的横向控制系统,具有平行结构的电力系统等等[2,3].对于这类系统,文[2]研究了它的一些基本性质,如能控性、能观性、稳定性等,文[3]研究了它的 H_2 和 H_∞ 控制问题,文[4]研究了它的 Riccati 方程求解及二次最优控制问题.

本文研究对称循环组合系统的输出调节问题和不确定对称循环组合系统的二次稳定性和二次稳定化问题.关于一般系统的输出调节问题和一般不确定线性系统的二次稳定性和二次稳定化问题,文[5,6]和文[7,8]等分别进行了研究.在本文中,我们利用对称循环组合系统结构的特殊性,证明它的这些问题可以大大简化.

2 输出调节问题(Output regulation problem)

本节研究对称循环组合系统的输出调节问题,系统的状态空间模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Pw, \\ \dot{w} &= Sw, \\ e &= Cx + Qw. \end{aligned} \tag{1}$$

这里 $x = (x_1^{\mathrm T},\cdots,x_N^{\mathrm T})^{\mathrm T}$, $(x_i \in \mathbb{R}^n, i = 1,\cdots,N)$, $u = (u_1^{\mathrm T},\cdots,u_N^{\mathrm T})^{\mathrm T}$, $(u_i \in \mathbb{R}^m, i = 1,\cdots,N)$, $w = (w_1^{\mathrm T},\cdots,w_N^{\mathrm T})^{\mathrm T}$, $(w_i \in \mathbb{R}^s, i = 1,\cdots,N)$ 和 $e = (e_1^{\mathrm T},\cdots,e_N^{\mathrm T})^{\mathrm T}$, $(e_i \in \mathbb{R}^r, i = 1,\cdots,N)$ 分别是 Nn 维状态, Nm 维输入, Ns 维可测干扰和 Nr 维误差.而矩阵 $A \in \mathbb{R}^{Nn\times Nn}$, $B \in \mathbb{R}^{Nn\times Nm}$, $C \in \mathbb{R}^{Nr\times Nn}$, $P \in \mathbb{R}^{Nn\times Ns}$, $S \in \mathbb{R}^{Ns\times Ns}$, $Q \in \mathbb{R}^{Nr\times Ns}$ 具有结构

* 国家自然科学基金(69774005)、高等学校博士学科点专项科研基金及辽宁省科学技术基金(972201)资助项目.
本文于 1997 年 5 月 21 日收到.1998 年 7 月 29 日收到修改稿.

$$\begin{cases} A=\mathrm{scl}[A_1,A_2,\cdots,A_N],\ P=\mathrm{scl}[P_1,P_2,\cdots,P_N], \\ S=\mathrm{scl}[S_1,S_2,\cdots,S_N],\ B=\mathrm{scl}[B_1,B_2,\cdots,B_N], \\ C=\mathrm{scl}[C_1,C_2,\cdots,C_N],\ Q=\mathrm{scl}[Q_1,Q_2,\cdots,Q_N], \end{cases} \tag{2}$$

即 A,P,S,B,C,Q 均是块对称循环矩阵.

关于块对称循环矩阵的定义和性质,参见文[4]中的定义2.1和引理2.1.

注1 对称循环组合系统是由 N 个相同的子系统以对称循环的方式互联组成的大系统.此外,若在(2)中,$A_2=A_3=\cdots=A_N,P_2=P_3=\cdots=P_N,S_2=S_3=\cdots=S_N,B_2=B_3=\cdots=B_N=0,C_2=C_3=\cdots=C_N=0,Q_2=Q_3=\cdots=Q_N=0$,则系统(1)变成文[9]中研究的平行系统(parallel systems[3])(文[10]中称之为对称组合系统 symmetric composite systems).所以对称循环组合系统是比平行系统范围更广的一类系统.

本节的目的是研究系统(1)的状态反馈输出调节问题,误差反馈输出调节问题和鲁棒输出调节问题[5,6].

由文[4]中的引理2.1,我们有(T_i 的构造见文[4])

$$\begin{cases} T_n^{-1}AT_n = \mathrm{diag}[A_{d1},A_{d2},\cdots,A_{dN}], \\ A_{di} = A_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N), \\ T_n^{-1}PT_s = \mathrm{diag}[P_{d1},P_{d2},\cdots,P_{dN}], \\ P_{di} = P_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N), \\ T_s^{-1}ST_s = \mathrm{diag}[S_{d1},S_{d2},\cdots,S_{dN}], \\ S_{di} = S_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N), \\ T_n^{-1}BT_m = \mathrm{diag}[B_{d1},B_{d2},\cdots,B_{dN}], \\ B_{di} = B_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N), \\ T_r^{-1}CT_n = \mathrm{diag}[C_{d1},C_{d2},\cdots,C_{dN}], \\ C_{di} = C_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N), \\ T_r^{-1}QT_s = \mathrm{diag}[Q_{d1},Q_{d2},\cdots,Q_{dN}], \\ Q_{di} = Q_{d(N+2-i)},\ (i=2,3,\cdots,N). \end{cases} \tag{3}$$

利用文[5]和文[6]中关于一般系统的输出调节问题和鲁棒输出调节问题的有关结果以及块对称循环矩阵的性质,采用与文[9]和文[11]类似的方法,可以证明下面的两个定理.

定理2.1 假设

A1′ $\sigma(S_{di})\subset\mathbb{C}^+,i=1,2,\cdots k$.(这里 $\sigma(S)$ 表示矩阵 S 的谱集,$\mathbb{C}^+$ 表示右半复平面.当 N 为偶数时,$k=\frac{N}{2}+1$;当 N 为奇数时,$k=\frac{N+1}{2}$).

A2′ 序对 (A_{di},B_{di}) 是可稳的,$i=1,2,\cdots,k$.

A3′ 序对

$$\left\{(C_{di}\quad Q_{di}),\begin{pmatrix} A_{di} & P_{di} \\ 0 & S_{di}\end{pmatrix}\right\}$$

是可检测的,$i=1,2,\cdots,k$.

则系统(1)的状态反馈输出调节问题和误差反馈输出调节问题可解当且仅当存在矩阵 Π_i 和 Γ_i 满足

$$\Pi_iS_{di}=A_{di}\Pi_i+B_{di}\Gamma_i+P_{di},$$
$$C_{di}\Pi_i+Q_{di}=0.\ i=1,2,\cdots,k.$$

此时,状态反馈控制律可以这样选取:

对 $i=1,\cdots,N$,取 F_i 使 $A_{di}-B_{di}F_i$ 为 Hurwitz 矩阵,令

$$u=-T_m\mathrm{diag}[F_1,\cdots,F_N]T_n^{-1}x+T_m\mathrm{diag}[(F_1\Pi_1+\Gamma_1),\cdots,(F_N\Pi_N+\Gamma_N)]T_s^{-1}w.$$

误差反馈控制律可以这样选取:

对 $i=1,\cdots,N$,取 F_i,L_{Ai},L_{si} 使 $A_{di}-B_{di}F_i$ 和

$$\begin{bmatrix} A_{di}-L_{Ai}C_{di} & P_{di}-L_{Ai}Q_{di} \\ -L_{Si}C_{di} & S_{di}-L_{Si}Q_{di}\end{bmatrix}$$

都是 Hurwitz 矩阵,令

$$\begin{bmatrix} e_{d1} \\ e_{d2} \\ \vdots \\ e_{dN}\end{bmatrix}=T_r^{-1}\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N\end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_{di} \\ \dot{\hat{w}}_{di}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{di}-L_{Ai}C_{di}-B_{di}F_i & P_{di}-L_{Ai}Q_{di}+B_{di}(F_i\Pi_i+\Gamma_i) \\ -L_{Si}C_{di} & S_{di}-L_{Si}Q_{di}\end{bmatrix}\begin{bmatrix} \hat{x}_{di} \\ \hat{w}_{di}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} L_{Ai} \\ L_{Si}\end{bmatrix}e_{di},$$

$$u=-T_m\mathrm{diag}[F_i,\cdots,F_N]\begin{bmatrix} \hat{x}_{d1} \\ \hat{x}_{d2} \\ \vdots \\ \hat{x}_{dN}\end{bmatrix}+T_m\mathrm{diag}[(F_1\Pi_1+\Gamma_1),\cdots,(F_N\Pi_N+\Gamma_N)]\begin{bmatrix} \hat{w}_{d1} \\ \hat{w}_{d2} \\ \vdots \\ \hat{w}_{dN}\end{bmatrix}.$$

定理2.2 假设A1′,A2′和A3′成立.则系统(1)在 $\{A,B,C,P,Q\}$ 处存在鲁棒输出调节器当且仅当对 i

$= 1,\cdots,k$ 及每个 $\lambda \in \bigcup_{i=1}^{k}\sigma(S_{di}) = \sigma(S)$. 矩阵

$$\begin{bmatrix} A_{di} - \lambda I & B_{di} \\ C_{di} & 0 \end{bmatrix}$$

的行都是线性独立的.

3 二次稳定问题(Quadratic stable problem)

对一般的不确定线性系统,Barmish 在[7]中给出了二次稳定性和二次稳定化的定义.在[8]中,Khargonekar 等研究了下面的不确定线性系统

$$\dot{x} = (A_s + D_sF_s(t)E_s)x. \tag{4}$$

(这里 $F_s(t)$ 是不确定的矩阵且 $F_s^{\mathrm{T}}(t)F_s(t) \leqslant I$),得到如下结论:

引理 3.1[8] 系统(4)是二次稳定的当且仅当它满足下面两个条件

C1) $\sigma(A_s) \subset \mathbb{C}^-$ (这里$\mathbb{C}^-$ 表示左半复平面);

C2) $\| E_s(sI - A_s)^{-1}D_s \|_\infty < 1$.

3.1 二次稳定性(Quadratic stability)

考虑自治不确定对称循环组合系统

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x. \tag{5}$$

这里

$$x = (x_1^{\mathrm{T}},\cdots,x_N^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}(x_i \in \mathbb{R}^n, i = 1,\cdots,N)$$

是 Nn 维状态,而矩阵 A 和 ΔA 具有结构

$$A = \mathrm{scl}[A_1,A_2,\cdots,A_N], \quad A_i \in \mathbb{R}^{n\times n},(i = 1,\cdots,N), \tag{6}$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{k_1}A_{1j}d_{11j}(t) & \sum_{j=1}^{k_2}A_{2j}d_{21j}(t) & \sum_{j=1}^{k_3}A_{3j}d_{31j}(t) & \cdots & \sum_{j=1}^{k_N}A_{Nj}d_{N1j}(t) \\ \sum_{j=1}^{k_N}A_{Nj}d_{N2j}(t) & \sum_{j=1}^{k_1}A_{1j}d_{12j}(t) & \sum_{j=1}^{k_2}A_{2j}d_{22j}(t) & \cdots & \sum_{j=1}^{k_{N-1}}A_{(N-1)j}d_{(N-1)2j}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum_{j=1}^{k_2}A_{2j}d_{2Nj}(t) & \sum_{j=1}^{k_3}A_{3j}d_{3Nj}(t) & \sum_{j=1}^{k_4}A_{4j}d_{4Nj}(t) & \cdots & \sum_{j=1}^{k_1}A_{1j}d_{1Nj}(t) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

对系统(5)做如下假设:

1) $d_{ilj}(t)$ 是 Lebesgue 可测函数且 $|d_{ilj}(t)| \leqslant 1,(i,l = 1,\cdots,N;j = 1,\cdots,k_i)$.

2) $k_i = k_{N+2-i}, A_{ij} = A_{(N+2-i)j},(i = 2,\cdots,N,j = 1,\cdots,k_i)$;$A_{ij}$ 是秩 1 的且

$$A_{ij} = a_{ij}\tilde{a}_{ij}^{\mathrm{T}}, \quad a_{ij},\tilde{a}_{ij} \in \mathbb{R}^n, \quad (i = 1,\cdots,N,j = 1,\cdots,k_i).$$

在本节中,我们记

$$\bar{k} = \sum_{i=1}^{N}k_i, \quad a_i = [a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{ik_i}] \in \mathbb{R}^{n\times k_i}, \quad \tilde{a}_i = [\tilde{a}_{i1},\tilde{a}_{i2},\cdots,\tilde{a}_{ik_i}] \in \mathbb{R}^{n\times k_i},(i = 1,\cdots,N).$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_N & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_N & a_1 & \cdots & a_{N-1} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & a_2 & a_3 & \cdots & a_1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{Nn\times N\bar{k}},$$

$$E_0^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 & & & \tilde{a}_N & & & \cdots & \tilde{a}_2 & & \\ & \tilde{a}_2 & & & \tilde{a}_1 & & \cdots & & \tilde{a}_3 & \\ & & \ddots & & & \ddots & \cdots & & & \ddots \\ & & \tilde{a}_N & & & \tilde{a}_{N-1} & \cdots & & & \tilde{a}_1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{Nn\times N\bar{k}},$$

$$D_{00} = [a_1,a_2,\cdots,a_N] \in \mathbb{R}^{n\times\bar{k}}, \quad E_{00}^{\mathrm{T}} = [\tilde{a}_1,\tilde{a}_2,\cdots,\tilde{a}_N] \in \mathbb{R}^{n\times\bar{k}}.$$

则易证系统

$$\dot{\tilde{x}} = (A + D_0F_0(t)E_0)x. \tag{8}$$

过界于系统(5),这里 $F_0(t) \in \mathbb{R}^{N\bar{k}\times N\bar{k}}$ 满足 $F_0^{\mathrm{T}}(t)F_0(t) \leqslant I$.

显然,可直接利用引理 3.1 得到系统(8)二次稳定的一个充要条件.但这个条件的检验要计算一个高维矩阵的 H_∞ 范数,所以很困难.下面,我们给出一个判断系统(8)是否二次稳定的一个简单方法.

定理 3.1 系统(8)是二次稳定的当且仅当下面两个条件成立:

i) $\sigma(A_{di}) \subset \mathbb{C}^-, i = 1,\cdots,k$.

ii) $\| E_{00}(sI - A_{di})^{-1}D_{00} \|_\infty < 1, i = 1,\cdots,k$.

证　因为 $T_n^{-1}AT_n = \mathrm{diag}[A_{d1}, A_{d2}, \cdots, A_{dN}]$,我们有 $\sigma(A) = \bigcup_{i=1}^{N}\sigma(A_{di}) = \bigcup_{i=1}^{k}\sigma(A_{di})$,这样 $\sigma(A) \subset \mathbb{C}^-$ 当且仅当 $\sigma(A_{di}) \subset \mathbb{C}^-, i = 1, \cdots, k$.

由矩阵 E_0 和 D_0 的结构容易看出,存在两个正交矩阵 $S_1, S_2 \in \mathbb{R}^{N\bar{k}\times N\bar{k}}$, 使得

$$S_1E_0 = \mathrm{diag}[E_{00}, \cdots, E_{00}] = I_N \otimes E_{00},$$
$$D_0S_2 = \mathrm{diag}[D_{00}, \cdots, D_{00}] = I_N \otimes D_{00}.$$

这里 $\otimes$ 表示矩阵的 Kronecker 积.

因为对一个矩阵左乘或右乘一个酉矩阵不改变它的 H_∞ 范数,故

$$\begin{aligned}
&\| E_0(sI - A)^{-1}D_0 \|_\infty = \\
&\| S_1E_0(sI - A)^{-1}D_0S_2 \|_\infty = \\
&\| (I_N \otimes E_{00})(sI - A)^{-1}(I_N \otimes D_{00}) \|_\infty = \\
&\| T_{\bar{k}}^{-1}(I_N \otimes E_{00})T_nT_n^{-1}(sI - A)^{-1} \cdot \\
&T_nT_n^{-1}(I_N \otimes D_{00})T_{\bar{k}} \|_\infty = \\
&\| \mathrm{diag}[E_{00}(sI - A_{d1})^{-1}D_{00}, E_{00}(sI - A_{d2})^{-1} \cdot \\
&D_{00}, \cdots, E_{00}(sI - A_{dN})^{-1}D_{00}] \|_\infty = \\
&\max\{ \| E_{00}(sI - A_{di})^{-1}D_{00} \|_\infty : 1 \leqslant i \leqslant N \} = \\
&\max\{ \| E_{00}(sI - A_{di})^{-1}D_{00} \|_\infty : 1 \leqslant i \leqslant k \}.
\end{aligned}$$

这样

$$\| E_0(sI - A)^{-1}D_0 \|_\infty < 1$$

当且仅当

$$\| E_{00}(sI - A_{di})^{-1}D_{00} \|_\infty < 1, i = 1, \cdots, k.$$

由引理3.1,证明完成.

由于系统(8)过界于系统(5),所以有

定理 3.2　如果条件 i)和 ii)成立,则系统(5)是二次稳定的.

注 2　定理3.1和定理3.2可以推广到式(5)中的矩阵 A 是块循环矩阵的情形,由于结论类似,细节从略.

3.2　二次稳定化(Quadratic stabilization)

现在我们考虑带输入的不确定对称循环组合系统,它的状态空间模型为

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u. \tag{9}$$

这里 x 是 Nn 维状态,u 是 Nm 维控制输入,而矩阵 $A, \Delta A$ 具有结构(6),(7),矩阵 $B, \Delta B$ 具有结构

$$B = \mathrm{diag}[B_0, \cdots, B_0],\ B_0 \in \mathbb{R}^{n\times m},$$

$$\Delta B = \mathrm{diag}[\sum_{j=1}^{k_0}B_jf_{1j}(t), \sum_{j=1}^{k_0}B_jf_{2j}(t), \cdots, \sum_{j=1}^{k_0}B_jf_{Nj}(t)].$$

这里不确定参数 $f_{ij}(t)$ 都是 Lebesgue 可测函数且

$$|f_{ij}(t)| \leqslant 1, (i = 1, \cdots, N; j = 1, \cdots, k_0),$$

矩阵 B_j 是秩1的且

$$B_j = b_j\tilde{b}_j^{\mathrm{T}},\ b_j \in \mathbb{R}^n,\ \tilde{b}_j, \in \mathbb{R}^m,\ (j = 1, \cdots, k_0).$$

记

$$\tilde{k} = \bar{k} + k_0,\ b = [b_1, b_2, \cdots, b_{k_0}] \in \mathbb{R}^{n\times k_0},$$
$$\tilde{b} = [\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \cdots, \tilde{b}_{k_0}] \in \mathbb{R}^{m\times k_0}.$$
$$D_1 = [D_0\quad I_N \otimes b] \in \mathbb{R}^{Nn\times N\tilde{k}},$$
$$E_1 = \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N\tilde{k}\times Nn},$$
$$E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_N \otimes \tilde{b}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N\tilde{k}\times Nm},$$
$$D_{11} = [D_{00}, b] = [a_1, a_2, \cdots, a_N, b] \in \mathbb{R}^{n\times\tilde{k}},$$
$$E_{11}^{\mathrm{T}} = E_{00}^{\mathrm{T}} = [\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \cdots, \tilde{a}_N] \in \mathbb{R}^{n\times\tilde{k}}.$$

则易证系统

$$\dot{x} = (A + D_1F(t)E_1)x + (B + D_1F(t)E_2)u. \tag{10}$$

过界于系统(9),这里 $F(t) \in \mathbb{R}^{N\tilde{k}\times N\tilde{k}}$ 满足 $F^{\mathrm{T}}(t)F(t) \leqslant I$.

设 $\mathrm{rank}(\tilde{b}) = i_0$.取 $V_1 \in \mathbb{R}^{i_0\times m}$ 使得 $\mathrm{rank}(V_1) = i_0$,且 $V_1^{\mathrm{T}}V_1 = \tilde{b}\tilde{b}^{\mathrm{T}}$.选择 $\Phi_1 \in \mathbb{R}^{(m-i_0)\times m}$ 使得 $\Phi_1V_1^{\mathrm{T}} = 0, \Phi_1\Phi_1^{\mathrm{T}} = I$(若 $i_0 = m$ 则 $\Phi_1 = 0$).

记

$$W_1 = V_1^{\mathrm{T}}(V_1V_1^{\mathrm{T}})^{-2}V_1 \in \mathbb{R}^{m\times m},$$
$$\Phi = \mathrm{diag}[\Phi_1, \cdots, \Phi_1],\quad W = \mathrm{diag}[W_1, \cdots, W_1].$$

则关于系统(10)和系统(9)的二次稳定化,我们有

定理 3.3　如果存在 $\varepsilon > 0$ 和对称正定矩阵 $P_{di} \in \mathbb{R}^{n\times n}(i = 1, \cdots, k)$,使得

$$A_{di}^{\mathrm{T}}P_{di} + P_{di}A_{di} + P_{di}(D_{11}D_{11}^{\mathrm{T}} - B_0W_1B_0^{\mathrm{T}} - \frac{1}{\varepsilon}B_0\Phi_1^{\mathrm{T}}\Phi_1B_0^{\mathrm{T}})P_{di} + E_{11}^{\mathrm{T}}E_{11} + \varepsilon I = 0.$$

则系统(10)(系统(9))可利用线性状态反馈二次稳定化,此时,稳定化线性状态反馈控制律可由下式得到

$$u = -[\frac{1}{2\varepsilon}\Phi^{\mathrm{T}}\Phi + W]B^{\mathrm{T}}Px(t).$$

这里 $P = \mathrm{scl}[P_1, P_2, \cdots, P_N]$, 而

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{N}}(F_N \otimes I_n)\begin{bmatrix} P_{d1} \\ P_{d2} \\ \vdots \\ P_{dN} \end{bmatrix}.$$

证　利用[4]中的引理2.1和[8]中的定理2.3

很容易证明,细节从略.

参考文献(References)

1 张嗣瀛.复杂控制系统的对称性及相似性结构.控制理论与应用,1994,11(2):231-237

2 Brockett R W and Willems J L. Discretized partial differential equations: examples on control systems defined on modules. Automatica, 1974,10(4):507-515

3 Hovd M and Skogestad S. Control of symmetrically interconnected plants. Automatica,1994,30(6):957-973

4 Huang Shoudong and Zhang Siying. The solving of Riccati equations for large-scale systems with symmetric circulant structure. Control Theory & Applications,1998,15(1):75-81

5 Francis B A. The linear multivariable regulator problem. SIAM J. Control and Optimiz.,1977,15(4):486-505

6 Hans W Knobloch, Alberto Isidori and Flockerzi Dietrich. Topics in Control Theory. Basel: Birkhäuser Verlag,1993,5-36

7 Barmish B R. Necessary and suffcient condition for quadratic stabilizability of an uncertain linear systems. J. Optimiz. Theory Appl.,1985, 46(4):399-408

8 Khargonekar P P, Petersen I R and Zhou K. Robust stabilization of uncertain linear systems: quadratic stabilizability and H^∞ control theory. IEEE Trans. Automat. Contr. 1990,35(3):356-361

9 Liu Xiaoping. Output regulation of strongly coupled symmetric composite systems. Automatica,1992,28(5):1037-1041

10 Lunze J. Dynamics of strongly coupled symmetric composite systems. Int. J. Control,1986,44(6):1617-1640

11 黄守东,黄菊永,张嗣瀛.对称组合系统的鲁棒输出调节.东北大学学报(自然科学版),1997,18(4):408-412

本文作者简介

黄守东　见本刊1999年第1期第99页.

张嗣瀛　见本刊1999年第1期第99页.

中国2000年机器人学大会(CCR'2000)

——中国第六届机器人学术大会暨中国第四届智能机器人学术研讨会

征　文　通　知

主办单位:中国自动化学会、中国机械工程学会、中国电子学会、中国汽车工程学会、中国宇航学会、中国人工智能学会、中国机器人工程协会、国家863计划智能机器人专家组、国家863计划空间机器人专家组.

承办单位:中国人工智能学会智能机器人学会

协办单位:中南工业大学

时　　间:2000年10月

地　　点:湖南长沙

一、征文范围

·机器人技术发展趋势及社会经营论题 ·机器人新型机构及运动学、动力学 ·机器人控制技术及智能控制 ·人工智能在机器人中的应用 ·机电一体化系统与机器人应用工程 ·机器人视觉及非视觉传感技术 ·人—机器人—机器交互技术及接口 ·机器人语言编程及仿真 ·遗传算法、进化计算及软计算在机器人中的应用 ·机器人学的教育与培训 ·面向二十一世纪的智能机器人体系结构及系统技术 ·神经网络、多智能体、模拟现实等技术在机器人系统中的应用 ·机器人规划与导航 ·先进制造技术与机器人 ·多媒体技术和多传感融合集成技术 ·机器人装配 ·工业机器人的新设计方法和新应用 ·机器人及自动化的其它内容

二、征文要求

1. 未在其他会议或刊物上发表过的论文.
2. 反映机器人学的理论、技术及应用研究成果.
3. 文稿必须正式打印;录用论文将要求寄文稿软盘..
4. 每篇论文篇幅不超过6000字(含英文摘要和关键词),并附50字左右的作者简介.

三、关键日期

1. 收文截止:2000年3月31日
2. 录用通知:2000年4月15日
3. 清样截止:2000年6月15日

四、来稿请寄:　410083　长沙市中南工业大学中国智能机器人学会办公室　刘明收

注:　录用论文将在核心刊物上以专辑正式出版.

联系单位:中南工业大学信息工程学校(湖南省长沙市,410083)　联系人:罗安　刘明

电话:0731-8876677或8879628　传真:0731-8876677　Email:x-info@cust.edu.cn