第22卷 第2期 自 动 化 学 报 Vol. 22, No. 2
1996 年 3 月 ACTA AUTOMATICA SINICA March, 1996

分散固定阻塞零点与分散强镇定

熊运鸿 高为炳
(北京航空航天大学七研 100083)

摘 要

研究多通道系统的分散强镇定问题. 对集中控制系统的阻塞零点概念提出一种推广的定义. 在此基础上，对分散控制系统引入了关于通道及系统的分散固定阻塞零点等概念，揭示出分散系统的阻塞零点与反馈结构的关系. 利用这种关系,在比已有结论更弱的假定下,给出了可分散强镇定的充分必要条件及相应控制器求解的一般步骤.

关键词: 分散控制,分散固定阻塞零点,分散强镇定.

1 引言

本文研究分散强镇定问题，即通过稳定的分散补偿器镇定多通道大系统. 这是离散扰动下鲁棒分散镇定研究的一个基本问题[1,2]. 在一定的假定下，文 [3,4] 得到了一个分散可镇定的系统能实现分散强镇定的充分必要条件，即在实不稳定分散阻塞零点上系统特征行列式取相同的符号. 这里，新引入的分散阻塞零点是一个重要的概念. 不足的是对分散阻塞零点的定义没有明确的物理意义，没有阐明此类零点与分散的反馈结构有何关系. 结论的应用范围受到限制.

本文的工作旨在克服上述不足. 对集中控制系统的阻塞零点概念提出一种推广的定义. 在此基础上,对分散控制系统引入了关于通道及系统的分散固定阻塞零点等概念,揭示出分散系统的阻塞零点与反馈结构的关系. 利用这种关系，在比文 [3,4] 更弱的假定下,给出了可分散强镇定的充分必要条件及相应控制器求解的一般步骤.

一些记号. $\boldsymbol{R}$ 表示实数集合，$\boldsymbol{R}_{+e}=\{x\in\boldsymbol{R}\,|\,x\geqslant 0\}\cup\{\infty\}$. $\boldsymbol{C}$ 为复平面，$\boldsymbol{C}_{+}$ 为闭右半平面,$\boldsymbol{C}_{+e}=\boldsymbol{C}_{+}\cup\{\infty\}$. 记 $\boldsymbol{R}(s)$ 为以 s 为变元的实有理函数的集合，$\boldsymbol{S}$ 表示 $\boldsymbol{R}(s)$ 中的正则稳定有理函数子集，$\boldsymbol{U}$ 表示 $\boldsymbol{S}$ 中的可逆元(unit)的集合. 记 $\boldsymbol{R}^{k\times l}(s)$ 和 $\boldsymbol{S}^{k\times l}$ 分别为元素在 $\boldsymbol{R}(s)$ 和$\boldsymbol{S}$上的 $k\times l$ 维矩阵的集合. 一个方阵 $Q\in\boldsymbol{S}^{k\times k}$，如果行列式 $\det Q\in\boldsymbol{U}$，则称 Q 为么模阵. 在集合 $\boldsymbol{S}^{k\times l}$ 上可定义 H^{∞} 范数,使之在通常的矩阵加法和乘法运算下成为赋范代数,并由此定义了 $\boldsymbol{S}^{k\times l}$ 上的一个拓扑. 有关 $\boldsymbol{S}$ 及 $\boldsymbol{S}^{k\times l}$ 上的代数和拓扑性质,可参见文献 [5].

本文于 1993 年 8 月 5 日收到

2　问题的描述

对线性时不变的 k 通道分散控制系统采用如下形式的稳定分解描述[5]:

$$Q\boldsymbol{\xi}=\sum_{i=1}^{k}R_i\boldsymbol{u}_i,\ \ \boldsymbol{y}_i=P_i\boldsymbol{\xi},\ \ i\in\underline{k},\tag{2.1}$$

式中 $Q\in\boldsymbol{S}^{n\times n}$, $\det Q\neq 0$, $P_i\in\boldsymbol{S}^{r_i\times n}$, $R_i\in\boldsymbol{S}^{n\times m_i}$, $\boldsymbol{\xi}$ 是系统的 n 维拟状态向量，$\boldsymbol{y}_i$ 和 $\boldsymbol{u}_i$ 是相应维数的输出和输入向量，$i,j\in\underline{k}$. 记

$$P=[P_1^{\mathrm{T}}\cdots P_k^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},\ \ R=[R_1\cdots R_k].$$

记 $Z=[Z_{ij}]=PQ^{-1}R$ 为系统 (2.1) 的传递矩阵,其中 $Z_{ij}=P_iQ^{-1}R_j\in\boldsymbol{R}^{r_i\times m_j}(s)$.

在分散反馈的假定下，每个控制通道的反馈只与本通道的量测输出有关．设第 i 个通道的反馈为

$$\boldsymbol{u}_i=-Z_{ci}\boldsymbol{y}_i+\boldsymbol{v}_i=-N_{ci}D_{ci}^{-1}\boldsymbol{y}_j+\boldsymbol{v}_i,\tag{2.2}$$

式中 $\boldsymbol{v}_i$ 是外部输入，$Z_{ci}\in\boldsymbol{R}^{m_i\times r_i}(s)$ 是控制器的传递矩阵，(N_{ci},D_{ci}) 是 Z_{ci} 的一个右互质分解，$i\in\underline{k}$. 这时闭环系统可写为

$$\begin{bmatrix}Q & RN_c\\ -P & D_c\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\xi}\\ \bar{\boldsymbol{\xi}}\end{bmatrix}=\sum_{i=1}^{k}\begin{bmatrix}R_i\\ 0\end{bmatrix}\boldsymbol{v}_i,\ \ \boldsymbol{y}_i=P_i\boldsymbol{\xi},\ \ i\in\underline{k},\tag{2.3}$$

式中 $\bar{\boldsymbol{\xi}}=[\boldsymbol{\xi}_1^{\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{\xi}_k^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{\xi}_i$ 是 Z_{ci} 的 r_i 维拟状态，$N_c=\mathrm{blockdiag}(N_{c1},\cdots,N_{ck})$, $D_c=\mathrm{blockdiag}\ (D_{c1},\cdots,D_{ck})$. 记

$$\bar{Q}=:\begin{bmatrix}Q & RN_c\\ -P & D_c\end{bmatrix}.\tag{2.4}$$

闭环系统 (2.3) 内部稳定当且仅当 $\bar{Q}$ 是么模矩阵,即 $\det\bar{Q}\in\boldsymbol{U}$.

在式 (2.2) 中,如令 $Z_{ci}=F_i\in\boldsymbol{S}^{m_i\times r_i}$, 即 Z_{ci} 是稳定的传递矩阵，$i\in\underline{k}$, 并记 $F=\mathrm{blockdiag}(F_1,F_2,\cdots,F_k)$, 则系统 (2.3) 的形式可简化为

$$(Q+RFP)\boldsymbol{\xi}=\sum_{i=1}^{k}R_i\boldsymbol{v}_i,\ \ \boldsymbol{y}_i=P_i\boldsymbol{\xi},\ \ i\in\underline{k}.\tag{2.5}$$

系统(2.5)内部稳定当且仅当 $(Q+RFP)$ 是么模阵.

记 $F=\mathrm{blockdiag}(F_1,F_2,\cdots,F_k)$ 的全体组成的集合为 $\boldsymbol{F}$, 式中 $F_i\in\boldsymbol{S}^{m_i\times r_i},i\in\underline{k}$. 分散强镇定问题可严格叙述为：求 $F\in\boldsymbol{F}$, 使得 $\det(Q+RFP)\in U$.

3　分散固定阻塞零点

3.1　集中控制系统中的阻塞零点

按照阻塞零点的传统定义，不可镇定与不可检测模态被排除在阻塞零点之外[5]. 这对于研究分散控制系统是不方便的．本节将重新定义阻塞零点.

设一个被控系统有如下的稳定分解描述:

$$A\boldsymbol{\xi}=B\boldsymbol{u},\ \ \boldsymbol{y}=C\boldsymbol{\xi},\tag{3.1}$$

式中 $A\in S^{n\times n}$, $B\in S^{n\times m}$, $C\in S^{r\times n}$ · $\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u},\boldsymbol{y}$ 分别是相应的拟状态、输入与输出向量.

定义 3.1. 如果 $s\in \boldsymbol{C}_{+e}$ 使得

$$\operatorname{rank}\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & 0 \end{bmatrix} \leqslant n, \tag{3.2}$$

则称 s 是系统 (3.1) 的一个 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点，或说是三元组 (C,A,B) 的一个 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点.

定义 3.1 中，(A,B) 不必是左互质的，(C,A) 也不必是右互质的. 另外，定义 3.1 也适用于 $\det A=0$ 的系统，即非适定系统. 当 $\det A\neq 0$ 且 (A,B) 左互质，(C,A) 右互质时，定义 3.1 与传统的定义等价，即 $s\in \boldsymbol{C}_{+e}$ 是系统 (3.1) 的 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点当且仅当 $G(s)=0$，式中，$G=:CA^{-1}B$.

命题 3.2. 设 $s\in \boldsymbol{C}_{+e}$ 是系统 (3.1) 的一个 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点，则对任意的 $K\in \boldsymbol{S}^{m\times r}$，$\det(A(s)+B(s)K(s)C(s))=\det A(s)$.

3.2 分散反馈结构下的阻塞零点

对系统 (2.1) 引入两个新概念，对 $F\in \boldsymbol{F}$ 及 $i\in \underline{k}$，引入集合

$$\mathscr{S}_i(F)=:\left\{s\in \boldsymbol{C}_{+e} \middle| \operatorname{rank}\begin{bmatrix} Q(s)+R(s)F(s)P(s) & R_i(s) \\ P_i(s) & 0 \end{bmatrix} \leqslant n\right\}. \tag{3.3}$$

由定义 3.1，$\mathscr{S}_i(F)$ 是闭环系统 (2.5) 第 i 个通道的 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点的集合. 令

$$\mathscr{S}_i=:\bigcap_{F\in \boldsymbol{F}} \mathscr{S}_i(F).$$

定义 3.3. 称 $s\in \mathscr{S}_i$ 是系统 (2.1) 第 i 个通道的 C_{+e} 分散固定阻塞零点.

换言之，第 i 个通道的 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 分散固定阻塞零点是第 i 个通道的不能被分散反馈所改变的那些 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点.

定义 3.4. 令

$$\mathscr{S}=\bigcap_{i=1}^{k} \mathscr{S}_i,$$

称 $s\in \mathscr{S}$ 为系统 (2.1) 的 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 分散固定阻塞零点.

对 $\underline{k}$ 的任意子集 $\varphi=\{i_1,i_2,\cdots,i_t\}$，$1\leqslant i_1<i_2<\cdots<i_t\leqslant k$，记

$$R_\varphi=[R_{i_1}R_{i_2}\cdots R_{i_t}],\quad P_\varphi=[P_{i_1}^{\mathrm{T}}P_{i_2}^{\mathrm{T}}\cdots P_{i_t}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}.$$

关于 $\mathscr{S}_i$ 有如下定理:

定理 3.5. 设 $s\in \boldsymbol{C}_{+e}$，则 $s\in \mathscr{S}_i$ 当且仅当存在 $\underline{k}-\{i\}$ 的某个子集 φ，使得

$$\operatorname{rank}\begin{bmatrix} Q(s) & R_i(s) & R_\varphi(s) \\ P_{(\underline{k}-\varphi)}(s) & 0 & 0 \end{bmatrix} \leqslant n.$$

注. $\mathscr{S}_i$ 可能是有限集、空集或整个 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 平面. 由定理 3.5，如果系统 (2.1) 是通道强关联的，则 $\mathscr{S}_i$ 是有限集或空集.

定理 3.6. 设系统 (2.1) 通道强关联. 给定 $i\in \underline{k}$，如果存在 $\varphi_0\subseteq \underline{k}-\{i\}$，使得对 $\underline{k}-\{i\}$ 的任意子集 $\varphi\neq\varphi_0$，系统 (2.1) 满足

$$\operatorname{rank}(P_{(\underline{k}-\varphi)}Q^{-1}[R_iR_\varphi])\geqslant 2,$$

则 $\boldsymbol{F}$ 中使 $\mathscr{S}_i(F)=\mathscr{S}_i$ 的 F 的集合是 $\boldsymbol{F}$ 中的稠密子集.

证明. 利用文 [6] 引理 2.2 可得.

命题 3.7. 对 $\forall s\in\mathscr{S}$ 及 $\forall F\in\boldsymbol{F}$，有 $\det(Q(s)+R(s)F(s)P(s))=\det Q(s)$.

命题 3.8. 如果系统 (2.1) 没有不稳定分散固定模，则对 $\forall s\in\mathscr{S}$，$\det Q(s)\neq 0$.

命题 3.9. 如果系统 (2.1) 没有不稳定分散固定模,则对 $\forall s\in\boldsymbol{C}_{+e}$，$s\in\mathscr{S}$ 当且仅当对每一个 $i\in\underline{k}$ 都存在 $\varphi_i\subseteq\underline{k}-\{i\}$，使得

$$P_{(\underline{k}-\varphi_i)}(s)Q^{-1}(s)[R_i(s)R_{\varphi_i}(s)]=0.$$

对系统 (2.1)，文 [4] 定义了 C_{+e} 分散阻塞零点：$\forall s\in\boldsymbol{C}_{+e}$，$s$ 称为 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 分散阻塞零点当且仅当存在 $\{1,2,\cdots,k\}$ 的一个排列 $\{i_1,i_2,\cdots,i_k\}$，使得

$$\begin{bmatrix} Z_{i_1i_1}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ Z_{i_2i_1}(s) & Z_{i_2i_2}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i_ki_1}(s) & Z_{i_ki_2}(s) & \cdots & Z_{i_ki_k}(s) \end{bmatrix}=0. \tag{3.4}$$

由命题 3.9 可以证明,在没有不稳定分散固定模时，C_{+e} 分散阻塞零点等价于定义 3.4 引入的 C_{+e} 分散固定阻塞零点. 文 [4] 的定义没有给出明确的物理意义. 相比之下，定义 3.4 更清楚地表达了概念的本质.

4　多通道系统的分散强镇定

定理 4.1. 假定系统 (2.1) 满足下列条件：(i) 通道强关联；(ii) 无不稳定分散固定模；(iii) 存在 $k_0\in\underline{k}$ 及 $\varphi_0\subseteq\underline{k}-\{k_0\}$，使得对 $\underline{k}-\{k_0\}$ 的任意子集 $\varphi\neq\varphi_0$，

$$\operatorname{rank}(P_{(\underline{k}-\varphi)}Q^{-1}[R_{k_0}\quad R_{\varphi}])\geqslant 2,$$

则系统 (2.1) 可分散强镇定的充分必要条件是对于所有 $s\in\mathscr{S}\cap\boldsymbol{R}_{+e}$，$\det Q(s)$ 取相同符号.

证明. 充分性. 不妨假设条件 (iii) 中 $k_0=1$，且 $\det Q(s)$ 在 $s\in\mathscr{S}\cap\boldsymbol{R}_{+e}$ 时均取正号. 令 $\bar{\mathscr{S}}_i=:(\mathscr{S}_1-\mathscr{S}_i)\cap\boldsymbol{R}_{+e},i=2,3,\cdots,k$. 由文 [6] 定理 3.1 ,可取 $\tilde{F}\in\boldsymbol{F}$，使得对 $\forall i\in\underline{k},P_i(Q+R\tilde{F}P)^{-1}R_i$ 双侧互质,并且对 $\forall s\in\bar{\mathscr{S}}_i,s\notin\mathscr{S}_i(\tilde{F}),i=2,3,\cdots,k$. 记 $Q_1=:Q+R\tilde{F}P$.

第一步. 令 $\tilde{Q}_2^{-1}\tilde{R}_2$ 为 $P_2Q_1^{-1}R_2$ 的一个左互质分解. 并不妨假定 $\det\tilde{Q}_2(s)$ 与 $\det Q_1(s)$ 在 $s\in\boldsymbol{R}_{+e}$ 时取相同符号. 令 $\sigma_2(s)=\operatorname{sif}(\tilde{R}_2)$，式中 $\operatorname{sif}(\cdot)$ 表示最小不变因子. 由于对 $\forall s\in\bar{\mathscr{S}}_2$，$\sigma_2(s)\neq 0$，故可构造一个 $f_2\in\boldsymbol{S}$，使得

$$\det\tilde{Q}_2(s)+\sigma_2(s)f_2(s)>0,\ \forall s\in\bar{\mathscr{S}}_2. \tag{4.1}$$

由文献 [5] 的定理 4.4.2，知存在 $F_2\in\boldsymbol{S}^{m_2\times r_2}$ 使得

$$\det(\tilde{Q}_2(s)+\tilde{R}_2(s)F_2(s))=\det\tilde{Q}_2(s)+\sigma_2(s)\cdot f_2(s)>0,\ \forall s\in\bar{\mathscr{S}}_2, \tag{4.2}$$

从而

$$\det(Q_1(s)+R_2(s)F_2(s)P_2(s))>0,\forall s\in\bar{\mathscr{S}}_2. \tag{4.3}$$

令 $Q_2=:Q_1+R_2F_2P_2$，并且不妨假定：(1) $P_iQ_2^{-1}R_i$ 是双侧互质的，$i\in\underline{k}$；(2)(P_i,Q_2,R_i) 的 $\boldsymbol{C}_{+e}$ 阻塞零点集合 $\cap\bar{\mathscr{S}}_i=\phi$，$i=2,3,\cdots,k$. 否则,可通过对 F_2 及 $\tilde{F}$ 施以任意小的扰动使上面两条满足,同时保持 $\det Q_2(s)$ 在 $s\in\bar{\mathscr{S}}_2$ 上的正号性质.

第二步．与第一步类似，可求出 $F_3 \in \boldsymbol{S}^{m_3 \times r_3}$，使得

$$\det(Q_2(s) + R_3(s)F_3(s)P_3(s)) > 0, \ \forall s \in \bar{\mathscr{S}}_3. \tag{4.4}$$

另外，由于 $\bar{\mathscr{S}}_2 \cup \bar{\mathscr{S}}_3 = (\bar{\mathscr{S}}_2 \cap \mathscr{S}_3) \cup \bar{\mathscr{S}}_3$，又由命题 3.2，有

$$\det(Q_2(s) + R_3(s)F_3(s)P_3(s)) = \det Q_2(s) > 0, \ \forall s \in \bar{\mathscr{S}}_2 \cap \mathscr{S}_3, \tag{4.5}$$

因而

$$\det(Q_2(s) + R_3(s)F_3(s)P_3(s)) > 0, \ \forall s \in \bar{\mathscr{S}}_2 \cup \bar{\mathscr{S}}_3. \tag{4.6}$$

令 $Q_3 =: Q_2 + R_3F_3P_3$，并且不妨假定：(1) $P_iQ_3^{-1}R_i$ 是双侧互质的，$i = 1,2,\cdots k$；(2) (P_i, Q_3, R_i) 的 C_{+e} 阻塞零点集合 $\cap \bar{\mathscr{S}}_i = \phi$，$i = 2,3,\cdots,k$.

如此经过 $k-1$ 步之后，可构造出 $F_i \in \boldsymbol{S}^{m_i \times r_i}(i = 2,3,\cdots,k)$ 使得

$$\det(Q(s) + R(s)F_0(s)P(s)) > 0, \ \forall s \in \bigcup_{i=2}^{k} \bar{\mathscr{S}}_i, \tag{4.7}$$

式中 $F_0 =: \tilde{F} + \text{blockdiag}\ (0_{m_1 \times r_1}, F_2, \cdots, F_k)$．此外，由于

$$\mathscr{S}_1 \cap R_{+e} = \left(\bigcup_{i=2}^{k} \bar{\mathscr{S}}_i\right) \cup (\mathscr{S} \cap \boldsymbol{R}_{+e}),$$

又由命题 3.7，有

$$\det(Q(s) + R(s)F_0(s)P(s)) > 0, \ \forall s \in \mathscr{S} \cap \boldsymbol{R}_{+e}, \tag{4.8}$$

因而，有

$$\det(Q(s) + R(s)F_0(s)P(s)) > 0, \ \forall s \in \mathscr{S}_1 \cap \boldsymbol{R}_{+e}. \tag{4.9}$$

令

$$\bar{\boldsymbol{F}} =: \{F \in \boldsymbol{F} \mid P_1(Q + RFP)^{-1}R_1 \text{ 双侧互质且 } \mathscr{S}_1(F) = \mathscr{S}_1\},$$

由定理 3.6，知 $\bar{\boldsymbol{F}}$ 是 $\boldsymbol{F}$ 中的稠密子集．因此，可假定 $F_0 \in \boldsymbol{F}$，否则，可在 $\boldsymbol{F}$ 内给 F_0 以任意小的扰动使之属于 $\bar{\boldsymbol{F}}$，同时保持 $\det(Q(s) + R(s)F_0(s)P(s))$ 在 $s \in \mathscr{S}_1 \cap \boldsymbol{R}_{+e}$ 时的正号性质．这意味着：

1) $P_1(Q + RF_0P)^{-1}R_1$ 双侧互质；

2) $\det(Q(s) + R(s)F_0(s)P(s)) > 0, \ \forall s \in \mathscr{S}_1(F_0) \cap \boldsymbol{R}_{+e}$.

由文[5]定理 5.3.1，存在 $F_1 \in \boldsymbol{S}^{m_1 \times r_1}$，使得

$$\det(Q + RF_0P + R_1F_1P_1) \in \boldsymbol{U}. \tag{4.10}$$

故系统 (2.1) 可分散强镇定．充分性得证．

必要性．系统 (2.1) 可分散强镇定仅当存在 $F \in \boldsymbol{F}$ 使得 $(P_1, Q + RFP, R_1)$ 可强镇定．由文[5]定理 5.3.1，仅当 $\det(Q(s) + R(s)F(s)P(s))$ 在 $s \in \mathscr{S}_1(F) \cap \boldsymbol{R}_{+e}$ 时取相同的符号．由于 $\mathscr{S} \subseteq \mathscr{S}_1(F)$，由命题 3.7，得 $\det Q(s)$ 在 $s \in \mathscr{S} \cap \boldsymbol{R}_{+e}$ 时取相同符号．必要性得证．证毕．

注． 在定理 4.1 的三个假定中，(i) 和 (ii) 都是不失一般性的． 此外，条件 (iii) 也是一个并不苛刻的要求． 当系统 (2.1) 至少在一个通道有两维以上的输入或输出时，一般情况下，条件 (iii) 成立．与文 [4] 的对应条件相比，本文的要求大大放松了．

注． 定理 4.1 的构造性证明提供了分散强镇定控制器综合的一般步骤． 在这个构造性证明中，各通道 C_{+e} 分散固定阻塞零点的集合 $\mathscr{S}_i(i \in \underline{k})$ 非常重要．这说明 $\mathscr{S}_i(i \in \underline{k})$ 不仅是用于确定系统 C_{+e} 分散固定阻塞零点集合 $\mathscr{S}$ 的辅助工具，而且还在控制器设计

中起着重要作用。

推论 4.4. 系统 (2.1) 可分散强镇定的必要条件是对于所有 $s \in \mathscr{S} \cap R_{+e}$, $\det Q(s)$ 取值非零且有相同的符号。

5 例子

考虑两通道系统 $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Z}\boldsymbol{u}$，其中

$$\boldsymbol{y} = [\boldsymbol{y}_1^T \quad \boldsymbol{y}_2^T,]^T, \quad \boldsymbol{u} = [\boldsymbol{u}_1^T \quad \boldsymbol{u}_2^T]^T,$$

$$Z =: \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} \dfrac{1}{s-2} & 0 & \dfrac{1}{(s-2)(s+1)} \\ \hline 1 & \dfrac{1}{s+1} & \dfrac{2s}{(s-1)(s+1)} \end{array}\right].$$

该系统通道强关联，没有不稳定分散固定模，且满足定理 4.1 的条件(iii)。由命题 3.9，可以判定该系统只有一个 C_{+e} 分散固定阻塞零点：$\mathscr{S} = \{0\}$。由定理 4.1，该系统可分散强镇定。按照定理 4.1 的证明方法，求得使闭环系统内部稳定的一个稳定的分散反馈控制器为

$$\boldsymbol{u}_1 = -3\boldsymbol{y}_1, \quad \boldsymbol{u}_2 = -\begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{27(s+1)^2}{32s^2 + 26s + 77} \end{bmatrix} \boldsymbol{y}_2.$$

本例不能用文 [3,4] 的结果来判定是否可分散强镇定。与文 [3,4] 的结果相比，本文定理 4.1 适用于更为广泛的系统。

参 考 文 献

[1] Chu C C and Chang F R. Some results on the problems of decentralized reliable stabilization. *Int. J. Control*, 1991, **53**(6): 1343—1358.

[2] Unyelioglu K A and Ozguler A B. Reliable decentralized stabilization of feedforward and feedback interconnected systems. *IEEE Trans*. 1992, **AC-37**: 1119—1132.

[3] Ozguler A B and Unyelioglu K A Decentralized strong stabilization problem. Proceedings of American Control Conference, 1992, 3294—3298.

[4] Unyelioglu K A and Ozguler A B. Decentralized blocking zeros-part I: decentralized strong stabilization problem. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control, 1992, 1340—1345.

[5] Vidyasagar M. Control system synthesis: a factorization approach. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.

[6] 熊运鸿，高为炳. 分散控制系统综合的正则稳定分解方法：几个引理. 控制与决策，1995，**10**(1)：28—33.

DECENTRALIZED FIXED BLOCKING ZEROS AND DECENTRALIZED STRONG STABILIZATION

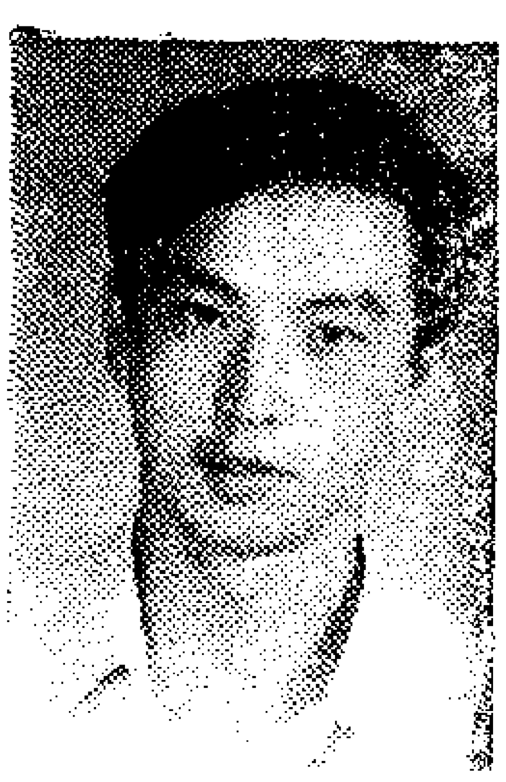
XIONG YUNHONG GAO WEIBING

(*The 7th Research Division, Beijing University of Aero. & Astro. Beijing* 100083)

ABSTRACT

This paper is concerned with decentralized strong stabilization problem of linear time-invariant multi-channel systems. First, after generalizing the notion of blocking zeros to systems which are not necessarily controllable and observable, decentralized fixed blocking zeros with respect to each channel and with respect to the whole system are introduced. Then, under a weaker assumption than previous results, a necessary and sufficient condition for stabilization to occur with stable decentralized controllers, termed in such zeros, is proved. The constructive proof also provide also provide a procedure for synthesizing such controllers.

Key words: Decentralized control, decentralized fixed blocking zeros, decentralized strong stabilization.



熊运鸿 1966年生于新疆北屯. 1988年于北京航空航天大学自动控制系毕业, 1991年和1994年分别获得该校工学硕士和工学博士学位. 现为北京航空航天大学动力学与控制研究室讲师. 研究兴趣包括线性系统的分解方法和大系统理论.

高为炳 照片、简介见本刊第18卷第6期.