文章编号: 1000-8152(2001)04-0569-04

非线性相似组合系统的鲁棒分散输出反馈镇定*

王银河
(西北工业大学自动控制系·西安,710072)
张嗣瀛
(青岛大学电气及工程学院·青岛,266071)
戴冠中
(西北工业大学自动控制系·西安,710072)

摘要: 首先描述了两个非线性控制系统间输出反馈相似的概念.这种相似性是线性系统理论中输出反馈等价概念的一般化.然后,讨论了由这样的控制系统互联而成的非线性组合系统.这种组合系统仍然具有某种相似结构.充分利用这种相似结构设计出一种鲁棒分散输出反馈控制器.最后的算例表明了所采用方法的有效性.

关键词: 相似性; 非线性组合系统; 鲁棒; 分散输出反馈
文献标识码: A

Decentralized Robust Output Feedback Stabilization for Similar Nonlinear Composite Systems

WANG Yinhe
(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University · Xi'an, 710072, P. R. China)
ZHANG Siying
(College of Electrical and Automatic Engineering, Qingdao University · Qingdao, 266071, P. R. China)
DAI Guanzhong
(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University · Xi'an, 710072, P. R. China)

Abstract: The output feedback similarity between two control systems is described, which is the corresponding expansion of output feedback equivalence in linear theory. Then, the nonlinear composite systems composed of interconnected similar subsystems, which possess certain similar structures, are discussed. By full using the information from the similar structures, the decentralized robust output feedback controllers are designed. At length, the example shows the validity.

Key words: similarity; nonlinear composite system; robust; decentralized output feedback

1 引言、相似性描述(Introduction and similarity description)

由于在工业及其他领域中,存在许多具有相似性结构的控制系统,特别是由若干相似的子系统互联而成的大系统具有广泛的工程背景[1,2].所以,研究具有相似结构的组合大系统是必要的.近年来,关于具有相似结构的组合大系统反馈镇定的研究,已经取得了一些成果[2~5],但是,这些成果都是关于状态反馈镇定的结果.由于在实际工程中,大多数情况下很难得到系统的全部状态,而且常常由于地理上的分布,子系统间也很难进行完全的信息交流,所以,研究分散输出反馈镇定更具有现实意义.然而,目前有关具有相似结构的组合大系统分散输出反馈镇定问题的研究成果还较少见,仅有的一些主要成果也都是针对标称系统为相同维数和结构的组合大系统取得的[6].对于各标称系统维数和结构并不完全相同的情形,目前还鲜见于报道.

开展研究的第一步,是如何用合适的数学语言描述相似性.受文[1,7]的启发,系统的相似性应该是其与另一系统间的或其各子系统间的在某种相互作用中保持不变的性质或保持部分不变的性质.而系统间的相互作用可以用映射描述.为了充分利用数学中的微积分方法,用微分几何中的映射描述控制系统的相似性较为有效.

考虑如下两个非线性系统:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, t), \quad \bar{y} = \bar{h}(\bar{x}), \tag{1}$$

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad y = h(x), \tag{2}$$

其中,状态 $x \in U \subseteq \mathbb{R}^n$, $\bar{x} \in \bar{U} \subseteq \mathbb{R}^m$, $m \geqslant n$, U, $\bar{U}$

* 基金项目:国家自然科学基金(79970114),国家重点基础研究发展规划项目(G998040471)资助课题.
收稿日期:1998-10-26; 收修改稿日期:2000-04-12.

分别是 $\mathbb{R}^n$,$\mathbb{R}^m$ 中的开集;输入 $u,\bar{u}\in\mathbb{R}^d$;输出 $y,\bar{y}\in\mathbb{R}^p$;$f(\cdot)$,$\bar{f}(\cdot)$ 是相应维数的光滑向量场;$h(\cdot)$,$\bar{h}(\cdot)$ 分别是相应维数的连续映射.

定义 1 考虑系统(1)与(2),如果存在正则嵌入(或微分同胚,对应于 $m=n$ 的情形)映射 $\varphi:U\to\bar{U},x\mapsto\bar{x}$,正则输出反馈 $u=\alpha(y,t)+\beta(y,t)v,\bar{u}=\bar{\alpha}(\bar{y},t)+\bar{\beta}(\bar{y},t)v$ 使切映射 φ_* 满足:

$$\varphi_* f(x,\alpha(h(x),t)+\beta(h(x),t)v,t)=$$
$$\bar{f}(\varphi(x),\bar{\alpha}(\bar{h}(\varphi(x)),t)+\bar{\beta}(\bar{h}(\varphi(x)),t)v,t),$$
$$h(x)=\bar{h}(\varphi(x)),\quad\forall x\in U,$$

则称系统(2)与(1)输出反馈相似,简称相似;$(\varphi,\bar{\alpha},\bar{\beta},\alpha,\beta)$ 称为相似参量.

考虑如下两个仿射系统:

$$\dot{\bar{x}}=\bar{f}(\bar{x},t)+\bar{g}(\bar{x},t)\bar{u},\quad\bar{y}=\bar{h}(\bar{x}),\tag{3}$$
$$\dot{x}=f(x,t)+g(x,t)u,\quad y=h(x),\tag{4}$$

其中的符号说明与系统(1)、(2)类似(略).将定义 1 用于(3)、(4),容易验证(4)与(3)输出反馈相似的充要条件是存在正则嵌入(或微分同胚)$\varphi:U\to\bar{U},x\mapsto\bar{x}$,正则输出反馈 $u=\alpha(y,t)+\beta(y,t)v,\bar{u}=\bar{\alpha}(\bar{y},t)+\bar{\beta}(\bar{y},t)v$ 使下列式子在 U 中某邻域内成立:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x}(f(x,t)+g(x,t)\alpha(h(x),t))=$$
$$\bar{f}(\varphi(x),t)+\bar{g}(\varphi(x),t)\bar{\alpha}(\bar{h}(\varphi(x)),t),\tag{5a}$$
$$\frac{\partial\varphi}{\partial x}g(x,t)\beta(h(x),t)=\bar{g}(\varphi(x),t)\bar{\beta}(\bar{h}(\varphi(x)),t),\tag{5b}$$
$$h(x)=\bar{h}(\varphi(x)).\tag{5c}$$

注 1 对于系统矩阵分别为 $(\bar{A},\bar{B},\bar{C})$,$(A,B,C)$ 的两个定常线性系统,由定义 1 容易验证,如果我们要求正则嵌入(或微分同胚)及正则输出反馈是线性的,则 (A,B,C) 与 $(\bar{A},\bar{B},\bar{C})$ 相似的充要条件是:存在 $m\times n$ 阶列满秩矩阵 F 及 $d\times p$ 阶矩阵 $\bar{K}$,K,$d\times d$ 阶可逆矩阵 $\bar{\beta}$,β,使 $F(A+BKC)=(\bar{A}+\bar{B}\bar{K}\bar{C})F$,$FB\beta=\bar{B}\bar{\beta}$,$C=\bar{C}F$ 成立,相似参量为 $(F,\bar{K},\bar{\beta},K,\beta)$. 由此可以看出,定义 1 实际上是线性系统理论中两系统相似(输出反馈等价)的一般化.同时,定义 1 所描述的相似性蕴含了[3,5,6]中情形.定义 1 的不足之处在于它所描述的相似性不具有对称性,这也说明了关于相似性的数学描述还有许多工作要做.

2 鲁棒分散输出反馈控制器设计(Robust decentralized output feedback control design)

考虑如下具有不确定性的非线性组合系统:

$$\dot{x}_i=f_i(x_i,t)+\Delta f_i(x_i,t)+$$
$$G_i(x_i,t)(u_i+\Delta g_i(x_i,t))+\Delta H_i(x,t),\tag{6a}$$
$$y_i=h_i(x_i),\quad i=1,2,\cdots,N,\tag{6b}$$

其中,状态 $x_i\in U_i\subseteq\mathbb{R}^{n_i}$,$U_i$ 是$\mathbb{R}^{n_i}$ 中的开集;$n_1=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant N}(n_i)$;输入 $u_i\in\mathbb{R}^d$;输出 $y_i\in\mathbb{R}^p$;$f_i(x_i,t)$ 是相应维数的光滑向量场;$G_i(x_i,t)$ 是相应维数的光滑函数矩阵;$\Delta f_i(x_i,t)$,$\Delta H_i(x,t)$ 和 $\Delta g_i(x_i,t)$ 分别是不匹配和匹配的(结构或参数)不确定项;$h_i(x_i)$ 是相应维数的连续映射;$f_i(0,t)=0,\Delta H(0,t)=0$;$x=(x_1^{\mathrm T},x_1^{\mathrm T},\cdots,x_N^{\mathrm T})^{\mathrm T}$.

定义 2 i) 系统 $\dot{x}_i=f_i(x_i,t)+G_i(x_i,t)u_i,y_i=h_i(x_i)$ 称为组合系统(6)的第 i 个标称系统;

ii) 如果组合系统(6)的每个标称系统都与第 1 个标称系统相似,则称(6)是非线性(输出反馈)相似组合系统.

假定 1 如果(6)是非线性相似组合系统,设第 i 个标称系统与第 1 个标称系统间的相似参量为 $(\varphi_i,\alpha_1,\beta_1,\alpha_i,\beta_i)$,$\varphi_i(0)=0$,即有下列等式成立:

$$\frac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}(f_i(x_i,t)+G_i(x_i,t)\alpha_i(h_i(x_i),t))=$$
$$f_1(\varphi_i(x_i),t)+G_1(\varphi_i(x_i),t)\alpha_1(h_1(\varphi_i(x_i)),t),\tag{7a}$$
$$\frac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}G_i(x_i,t)\beta_i(h_i(x_i),t)=$$
$$G_1(\varphi_i(x_i),t)\beta_1(h_i(\varphi_i(x_i)),t),\tag{7b}$$
$$h_i(x_i)=h_1(\varphi_i(x_i)).\tag{7c}$$

假定 2 1) $h_1(0)=0$,且 $h_1(x_1)$ 在 $x_1=0$ 的某邻域内满足 Lipschitz 条件:

$$\|h_1(x_1)-h_1(\hat{x}_1)\|\leqslant\delta\|x_1-\hat{x}_1\|.\tag{8}$$

其中 δ 为 Lipschitz 常数.

2) 存在 $x_1=0$ 的某邻域内的正定函数 $r_1(x_1)$,$r_2(x_1)$,正值函数 $c_1(*)$,$c_2(*)$ 及函数 $V(x_1,t)$ 和输出反馈 $u_1=\Psi_1(y_1,t)$,使下列式子成立:

$$r_1(x_1)\leqslant V(x_1,t)\leqslant r_2(x_1),$$
$$\left\|\frac{\partial V(x_1,t)}{\partial x_1}\right\|\leqslant c_2(\|x_1\|)\cdot\|x_1\|,\tag{9a}$$
$$\frac{\partial V(x_1,t)}{\partial x_1}[f_1(x_1,t)+G_1(x_1,t)\Psi_1(y_1,t)]+$$
$$\frac{\partial V(x_1,t)}{\partial t}\leqslant-c_1(\|x_1\|)\cdot\|x_1\|^2.\tag{9b}$$

注 2 1) 假定 2 中的(9)式是为了保证组合系统(6)的第一个标称系统可用输出反馈 $u_1=\Psi_1(y_1,t)$一致渐近镇定. 2) 如果组合系统(6)的第

一个标称系统可用输出反馈 $u_1 = \Psi_1(y_1,t)$ 指数镇定,则显然(9)成立.所以,(9)式是较指数镇定弱的条件.

假定 3 组合系统(6)的不确定项满足:

i) $\|\Delta f_i(x_i,t)\| \leqslant \phi(\|y_i\|)\cdot\|y_i\|$;

ii) $\|\Delta g_i(x_i,t)\| \leqslant \rho(y_i,t)$;

iii) $\|\Delta H_i(x,t)\| \leqslant \sum\limits_{\substack{j\neq i\\ j=1}}^{N}\eta_{ij}(x_j)\|y_j\|$.

其中,$\phi(*)$,$\rho(*)$,$\eta_{ij}(*)$ 均是已知的非负值函数.$\|*\|$ 表示欧氏范数.

假定 4 存在 $d\times d$ 阶非奇异函数矩阵 $D(y_1,t)$ 使得:

$$\frac{\partial V(x_1,t)}{\partial x_1}G_1(x_1,t) = [D(y_1,t)y_1]^{\mathrm T},$$

其中 $V(x_1,t)$ 由(9)确定.

注 3 假定 4 是讨论具有线性标称系统的组合系统输出反馈镇定问题中相应基本条件的一般化,它与系统的无源性紧密相关[6,8].

对于非线性组合系统(6),提出如下分散输出反馈控制器:

$$u_i = u_i^a + u_i^b + u_i^c, \tag{10a}$$

$$u_i^a = \alpha_i(y_i,t) + \beta_i(y_i,t)\beta_1^{-1}(y_i,t)\cdot [\Psi_1(y_i,t) - \alpha_1(y_i,t)], \tag{10b}$$

$$u_i^b = -\frac{1}{2\varepsilon^2}\phi^2(\|y_i\|)\beta_i(y_i,t)\beta_1^{-1}(y_i,t)\cdot [D(y_i,t)^{\mathrm T}]^{-1}y_i, \tag{10c}$$

$$u_i^c = \begin{cases} z\rho(y_i,t), & y_i\neq 0,\\ 0, & y_i = 0,\end{cases} \tag{10d}$$

这里 $z = -\dfrac{(\beta_1(y_i,t)\beta_i^{-1}(y_i,t))^{\mathrm T}D(y_i,t)y_i}{\|\beta_1(y_i,t)\beta_i^{-1}(y_i,t))^{\mathrm T}D(y_i,t)y_i\|}$.

其中,ε 是可调参数,满足:

$$0<\varepsilon^2\leqslant \frac{\min\limits_{1\leqslant i\leqslant N}\inf\limits_{x_i\in\Omega_i}\{c_1(\|\varphi_i(x_i)\|)\}}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant N}\sup\limits_{x_i\in\Omega_i}\left\{\left\|\dfrac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}\right\|^2 c_2^2(\|\varphi_i(x_i)\|)\right\}}.$$

注 4 Ω_i 是保证 $\sup\limits_{x_i\in\Omega_i}\left\{\left\|\dfrac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}\right\|^2 c_2^2(\|\varphi_i(x_i)\|)\right\}$ 和 $\inf\limits_{x_i\in\Omega_i}\{c_1(\|\varphi_i(x_i)\|)\}$ 存在的 $x_i=0$ 的某个邻域.由正则嵌入 $\varphi_i(x_i)$ 的光滑性及(9)知这样的 Ω_i 是存在的.Ω_i 的具体取法应结合 ε 的取值及下面的定理 1 中的函数矩阵 $W^{\mathrm T}(x)+W(x)$ 的正定域统一考虑.

定理 1 如果(6)是满足假定 1 ~ 假定 4 的非线性相似组合系统且函数矩阵 $W^{\mathrm T}(x)+W(x)$ 在 $x=0$ 的某邻域内是正定矩阵,则组合系统(6)可由分散输出反馈控制器(10)一致局部鲁棒渐近镇定.其中,

$W(x) = (w_{ij})_{N\times N}$,

$$w_{ij} = \begin{cases} 0.5\cdot c_1(\|\varphi_i(x_i)\|), & i=j,\\ -\delta\cdot c_2(\|\varphi_i(x_i)\|)\cdot\left\|\dfrac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}\right\|\cdot\eta_{ij}(x_j), & i\neq j,\end{cases}$$

$c_1(*)$,$c_2(*)$ 由(9)确定,δ 由(8)确定,$\left\|\dfrac{\partial\varphi_i}{\partial x_i}\right\|$ 可以根据具体情况结合 ε 的取值取欧氏范数或谱范数.

证 考虑由控制器(10)与组合系统(6)构成的闭环系统及 Lyapunov 函数 $\bar V(x,t) = \sum\limits_{i=1}^{N}V(\varphi_i(x_i),t)$ 即可.证明略.

注 5 1) 由控制器(10)的构成可以看出,分散输出反馈控制器(10)主要由相似参量和有关第一个标称系统的信息确定.这说明相似结构具有简化组合系统分析和设计的优点,特别是当组合系统中子系统的个数相当大时,相似结构可以极大地减小运算量.这在一定程度上体现了第一个标称系统的"全息作用",与文[1]的预见完全吻合. 2) 由于本文所描述的相似性蕴含了[3,5,6]的情形,所以本文采用的方法更具有一般性.

3 算例(Illustrative example)

考虑如下具有参数不确定的非线性组合系统:

$$\dot x_i = f_i(x_i,t) + \Delta f_i(x_i,\theta_{i1}) + g_i(x_i)(u_i + \Delta g_i(x_i,\theta_{i2})) + \Delta H_i(x,\theta_{i3}), \tag{11a}$$

$$y_i = x_{i2},\quad i = 1,2,3, \tag{11b}$$

其中

$x_1 = (x_{11},x_{12},x_{13})^{\mathrm T}$,

$x_2 = (x_{21},x_{22})^{\mathrm T}$, $x_3 = (x_{31},x_{32})^{\mathrm T}$;

$$f_1(x_1,t) = \begin{bmatrix} -x_{11}-\mathrm e^{-2t}x_{12}\\ x_{11}\\ -x_{11}-(1+2\mathrm e^{-2t})x_{12}-x_{13}\end{bmatrix},$$

$$f_2(x_2,t) = \begin{bmatrix} -x_{21}-\mathrm e^{-2t}x_{22}\\ x_{21}\end{bmatrix},$$

$$f_3(x_3,t) = \begin{bmatrix} -x_{31}-\mathrm e^{-2t}x_{32}\\ x_{31}+\mathrm e^{-t}x_{32}^2\end{bmatrix};$$

$$g_1(x_1) = \begin{bmatrix}0\\-1\\1\end{bmatrix},\ g_2(x_2) = \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix},\ g_3(x_3) = \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix};$$

$$\Delta f_1(x_1,\theta_{11}) = \begin{bmatrix} 3x_{12}\sin(\theta_{11}x_{11}) \\ 4x_{12} \\ 3x_{12}\cos(\theta_{11}x_{11}) \end{bmatrix},$$

$$-3.14 \leqslant \theta_{11} \leqslant 3.14;$$

$$\Delta f_2(x_2,\theta_{21}) = \begin{bmatrix} 3x_{22}e^{-\theta_{21}} \\ 4x_{22} \end{bmatrix},\ 0 \leqslant \theta_{21} \leqslant 1;$$

$$\Delta f_3(x_3,\theta_{31}) = \begin{bmatrix} 4x_{32}e^{-\theta_{31}} \\ 3x_{32} \end{bmatrix},\ 0 \leqslant \theta_{31} \leqslant 2;$$

$$\Delta g_1(x_1,\theta_{12}) = x_{12}^2\theta_{12},\ 0 \leqslant \theta_{12} \leqslant 1;$$

$$\Delta g_2(x_2,\theta_{22}) = 0.5x_{22}^2\theta_{22},\ -1 \leqslant \theta_{22} \leqslant 2;$$

$$\Delta g_3(x_3,\theta_{32}) = x_{32}^2\theta_{32},\ -1 \leqslant \theta_{32} \leqslant 1;$$

$$\Delta H_1(x,\theta_{13}) = \begin{bmatrix} 0.04x_{21}x_{22}\theta_{13} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$-0.5 \leqslant \theta_{13} \leqslant 0.5;$$

$$\Delta H_2(x,\theta_{23}) = \begin{bmatrix} \dfrac{x_{31}x_{32}}{500+\theta_{23}^2} \\ 0 \end{bmatrix},\ -5 \leqslant \theta_{23} \leqslant 5;$$

$$\Delta H_3(x,\theta_{33}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{x_{22}^2}{500e^{\theta_{33}}+\theta_{33}^2} \end{bmatrix},\ 0 \leqslant \theta_{33} \leqslant 2.$$

容易验证,(11)是(输出反馈)相似组合系统,依照前面假定1的记号,相应的相似参量可取为:

$\varphi_1: x_1 \mapsto x_1,\ \alpha_1(y_1,t) = 0,\ \beta_1(y_1,t) = 1;$

$\varphi_2: x_2 \mapsto x_1, (x_{21},x_{22}) \mapsto (x_{21},x_{22},2x_{21}-x_{22}),$

$\alpha_2(y_2,t) = 0,\ \beta_2(y_2,t) = -1;$

$\varphi_2: x_3 \mapsto x_1, (x_{31},x_{32}) \mapsto (x_{31},x_{32},2x_{31}-x_{32}),$

$\alpha_3(y_3,t) = -e^{-t}y_3^2,\ \beta_3(y_3,t) = -1.$

利用Lyapunov函数 $V(x_1,t) = x_{11}^2 + (1+e^{-2t})x_{12}^2 + (x_{13}-2x_{11}+x_{12})^2$ 容易验证(11)的第一个标称系统可由输出反馈 $u_1 = y_1$ 渐近镇定.相应于式中的记号:

$r_1(x_1) = x_{11}^2 + x_{12}^2 + (x_{13}-2x_{11}+x_{12})^2,$

$r_2(x_1) = x_{11}^2 + 2x_{12}^2 + (x_{13}-2x_{11}+x_{12})^2;$

$c_1(\|x_1\|) = 2\lambda_{\min}(P) \approx 0.3392,$

$c_2(\|x_1\|) = 2\sqrt{\lambda_{\max}(Q)} \approx 14.9314;$

$$P = \begin{bmatrix} 5 & -2.5 & -2 \\ -2.5 & 2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix};\ Q = \begin{bmatrix} 37 & 20 & 16 \\ 20 & 15 & 9 \\ 16 & 9 & 7 \end{bmatrix};$$

$D(y_1,t) = -2(1+e^{-2t}).$

容易验证,此时 $W^{T}(x)+W(x)$ 在 $\Omega = \{x \mid |x_{21}| \leqslant 0.6, |x_{22}| \leqslant 1.1841, |x_{31}| \leqslant 1\}$ 内是正定矩阵.所以,由定理1知组合系统(11)可由下列分散输出反馈控制器一致局部渐近镇定:

$$u_1 = y_1 + \frac{25}{4\varepsilon^2(1+e^{-2t})}y_1^3 + y_1^3\mathrm{sgn}(y_1),$$

$$u_2 = -y_2 - \frac{25}{4\varepsilon^2(1+e^{-2t})}y_2^3 - y_2^3\mathrm{sgn}(y_2),$$

$$u_3 = -y_3 - e^{-t}y_3^2 - \frac{25}{4\varepsilon^2(1+e^{-2t})}y_3^3 - y_3^3\mathrm{sgn}(y_3),$$

其中,$0 < \varepsilon \leqslant 0.01576$.

4 结语(Conclusion)

本文描述了两个非线性控制系统间输出反馈相似的概念,这是线性系统理论中两个线性控制系统输出反馈等价概念的一般化.由这样一些相似的非线性控制系统互联而构成的带有不确定性的组合系统仍具有某种相似结构,结果表明,充分利用这种相似结构可以简化对系统的分析和控制器设计.所设计的鲁棒分散输出反馈控制器主要由相似参量决定,从而有利于控制器的重构.

参考文献(References)

[1] Siying Zhang The symmetry and similarity structure of complex control systems [J]. Control Theory and Applications, 1994, 11(2):231-237 (in Chinese)

[2] Lunze J. Stability analysis of large-scale systems composed of strongly connected similar subsystems [J]. Automatica, 1989, 25(6):561-570

[3] Yan Xinggang and Zhang Siying. Design of robust controllers with similar structure for nonlinear uncertain composite large-scale systems possessing similarity [J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(4):513-519 (in Chinese)

[4] Qian L, Liu Y X, Wang C J and Zhang S Y Synthesis of quadratic stability control for a class of similar composite systems [J]. Automatica, 1998, 34(4):493-498

[5] Liu X P. Output regulation of strongly coupled symmetric composite systems [J]. Automatica, 1992, 28(5):1037-1041

[6] Yan X G, Wang J C, Lu Y X and Zhang S Y. Decentralized output feedback robust stabilization for a class of nonlinear composite large-scale systems with similarity [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 43(2):294-299

[7] Shaozhou Huo. Systematics [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1988 (in Chinese)

[8] Qin Huashu and Hong Yiguang. Passivity, stability and optimality [J]. Control Theory and Applications, 1994, 11(4):421-427 (in Chinese)

本文作者简介

王银河 见本刊2001年第1期第30页.

张嗣瀛 见本刊2001年第1期第30页.

戴冠中 见本刊2001年第1期第115页.