文章编号: 1001-0920(2006)11-1249-04

线性离散切换系统的输出调节问题

宋政一[1], 聂 宏[1,2], 赵 军[1]
(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 辽宁石油化工大学 理学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 利用多Lyapunov函数方法,研究线性离散切换系统的输出调节问题. 在假定每个子系统都不是输出调节问题可解的条件下,分别给出了在全息反馈控制器和误差反馈控制器作用下,这类系统输出调节问题可解的两个充分条件. 同时还分别给出了相应的切换律和控制器的设计方案. 最后的仿真例子进一步表明了结论的有效性.

关键词: 线性离散切换系统; 输出调节; 全息反馈; 误差反馈
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Output Regulation of Linear Discrete-time Switched Systems

SONG Zheng-yi[1], *NIE Hong*[1,2], *ZHAO Jun*[1]
(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Faculty of Science, Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, Fushun 113001, China. Correspondent: SONG Zheng-yi, E-mail: songzhy12@163.com)

Abstract: The output regulation problem is addressed for a class of linear discrete-time switched systems in terms of multiple Lyapunov function method. Under the assumption that the output regulation problem of each individual subsystem is not solvable, two sufficient conditions for the problem to be solvable are derived, based on full information feedback and error feedback. The controllers and the switching laws are simultaneously constructed. Simulation examples show the validity of the results.

Key words: Linear discrete-time switched systems; Output regulation; Full information feedback; Error feedback

1 引 言

输出调节问题是控制论中的经典问题之一. 一般通过设计反馈控制器来消除扰动的影响,使跟踪误差渐近趋于零. 由于输出调节问题具有很强的应用背景,对于线性和非线性系统的输出调节问题已经得到了较为深入和系统的研究成果[1~4]. 切换系统是一类特殊的混杂系统,具有极其广泛的应用背景,如飞机的多工作点控制、电力系统网络的切换系统、受限机器人系统以及智能高速公路系统等[5]. 因此,近年来切换系统受到了广泛的关注,切换系统的稳定性是研究最为集中的问题[6~8]. 文献[9]研究了任意切换下线性离散切换系统的动态输出反馈H_∞控制器的设计问题. 但关于切换系统的输出调节问题的研究相对较少. 其中,文献[10]利用监控技术,通过在一簇备选的控制器中进行切换,来抑制持续的扰动对输出的影响; 文献[11]用凸组合方法给出切换策略的设计方案,保证了线性连续切换系统输出调节问题的可解性. 但关于离散切换系统输出调节问题的研究结果却未见报道.

本文针对线性离散切换系统的输出调节问题进行了研究,在假定每个子系统都不是输出调节问题可解的条件下,利用多Lyapunov函数方法设计切换律,分别给出了系统在全息反馈控制器和误差反馈控制器作用下,输出调节问题可解的两个充分条件. 同时分别给出了相应的切换律和控制器的设计方案.

收稿日期: 2005-09-26; **修回日期**: 2006-01-14.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009, 60574013); 博士后基金项目(2005037754); 辽宁省教育厅科研基金项目(2004F100).
作者简介: 宋政一(1965—),男,辽宁抚顺人,博士生,从事非线性与切换系统、鲁棒控制等研究; 赵军(1957—),男,辽宁海城人,教授,博士生导师,从事混杂系统、非线性系统等研究.

2 问题描述

考虑由如下状态空间模型描述的线性离散切换系统:

$$x(k+1)=A_{\sigma(k)}x(k)+B_{\sigma(k)}u(k)+P_{\sigma(k)}w(k),$$
$$e(k)=C_{\sigma(k)}x(k)+Q_{\sigma(k)}w(k). \tag{1}$$

其中: $x(k)\in R^n$ 是系统的状态, $u(k)\in R^m$ 是控制输入, $\sigma(k): Z^+\to\overline{M}=\{1,2,\cdots,m\}$ 是一个分段常值函数, 称之为切换信号, $e(k)\in R^p$ 是误差变量, $w(k)\in R^r$ 是外部输入变量, 既包括扰动又包括被跟踪的参考输入, 它满足下面的方程:

$$w(k+1)=Sw(k), \tag{2}$$

该系统称为外部系统 和其他文献一样, 本文恒假定外部系统(2) 满足如下假设:

假设 1 外部系统(2) 是非稳的(Antistable), 即矩阵 S 的所有特征值在单位圆上或单位圆外.

控制器的构造采用两种形式: 一种是全息反馈形式, 包括系统的状态和外部输入变量, 即

$$u(k)=K_{\sigma(k)}x(k)+L_{\sigma(k)}w(k); \tag{3}$$

另一种是误差反馈形式, 即

$$\xi(k+1)=F_{\sigma(k)}\xi(k)+G_{\sigma(k)}e(k),$$
$$u(k)=H_{\sigma(k)}\xi(k), \tag{4}$$

这里, 内部状态 $\xi(k)\in R^r$.

系统(1) 和控制器(3) 或(4) 中的一个构成一个闭环系统 给出如下的输出调节问题:

1) 全息反馈输出调节问题 对 $\forall i\in\overline{M}$, 给定矩阵 A_i,B_i,P_i,C_i,Q_i,S, 寻找矩阵 K_i,L_i 及切换律 $\sigma(k)$, 使得:

① 无扰动输入时, 系统(1) 和控制器(3) 构成的闭环系统在切换律 $\sigma(k)$ 下渐近稳定;

② 对每个 (x^0,w^0), 方程

$$x(k+1)=(A_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}K_{\sigma(k)})x(k)+(P_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}L_{\sigma(k)})w(k),$$
$$w(k+1)=Sw(k), \tag{5}$$

满足 $(x(0),w(0))=(x^0,w^0)$ 的解 $(x(t),w(t))$, 使得

$$\lim_{k\to\infty}(C_{\sigma(k)}x(k)+Q_{\sigma(k)}w(k))=0.$$

2) 误差反馈输出调节问题 对 $\forall i\in\overline{M}$, 给定矩阵 A_i,B_i,P_i,C_i,Q_i,S, 寻找矩阵 F_i,G_i,H_i 及切换律 $\sigma(k)$, 使得:

① 无扰动输入时, 系统(1) 和控制器(4) 构成的闭环系统在切换律 $\sigma(k)$ 下渐近稳定;

② 对每个 (x^0,ξ^0,w^0), 方程

$$x(k+1)=A_{\sigma(k)}x(k)+B_{\sigma(k)}H_{\sigma(k)}\xi(k)+P_{\sigma(k)}w(k),$$
$$\xi(k+1)=G_{\sigma(k)}C_{\sigma(k)}x(k)+F_{\sigma(k)}\xi(k)+G_{\sigma(k)}Q_{\sigma(k)}w(k),$$
$$w(k+1)=Sw(k), \tag{6}$$

满足 $(x(0),\xi(0),w(0))=(x^0,\xi^0,w^0)$ 的解 $(x(t),\xi(t),w(t))$, 使得

$$\lim_{k\to\infty}(C_{\sigma(k)}x(k)+Q_{\sigma(k)}w(k))=0.$$

3 全息反馈输出调节

当系统状态和外部输入变量能完全获得时, 采用控制器(3), 得到的闭环系统为

$$x(k+1)=(A_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}K_{\sigma(k)})x(k)+(P_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}L_{\sigma(k)})w(k),$$
$$w(k+1)=Sw(k),$$
$$e(k)=C_{\sigma(k)}x(k)+Q_{\sigma(k)}w(k). \tag{7}$$

为了使系统(7) 的输出调节问题可解, 作如下假定:

假设 2[12] 对 $\forall i\in\overline{M}$, 存在 Π,Γ_i 满足下面的矩阵方程:

$$\Pi S=A_i\Pi+B_i\Gamma_i+P_i,$$
$$0=C_i\Pi+Q_i. \tag{8}$$

下面给出系统(7) 输出调节问题可解的充分条件.

定理 1 若假设 1 和假设 2 成立, 并且存在非负常数 $\beta_{ij}\geq 0$, 正定矩阵 $\tilde{P}_i>0$ 和矩阵 K_i 满足下面的矩阵不等式组:

$$(A_i+B_iK_i)^{\mathrm T}\tilde{P}_i(A_i+B_iK_i)-\tilde{P}_i+\sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}(\tilde{P}_j-\tilde{P}_i)<0,\ \forall i\in\overline{M}. \tag{9}$$

选取切换律

$$\sigma(k)=\arg\min_{i\in\overline{M}}\{\tilde{x}^{\mathrm T}(k)\tilde{P}_i\tilde{x}(k)\}, \tag{10}$$

其中

$$\tilde{x}(k)=x(k)-\Pi w(k),$$

则系统(7) 在切换律(10) 的作用下输出调节问题可解, 且使系统(7) 输出调节问题可解的全息反馈控制器为(3), 其中

$$L_{\sigma(k)}=\Gamma_{\sigma(k)}-K_{\sigma(k)}\Pi$$

证明 将 $L_{\sigma(k)}=\Gamma_{\sigma(k)}-K_{\sigma(k)}\Pi$ 代入系统(7), 然后作变换 $\tilde{x}(k)=x(k)-\Pi w(k)$, 由式(8) 可得

$$\tilde{x}(k+1)=(A_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}K_{\sigma(k)})\tilde{x}(k)=\tilde{A}_{\sigma(k)}\tilde{x}(k),$$
$$w(k+1)=Sw(k),$$
$$e(k)=C_{\sigma(k)}\tilde{x}(k). \tag{11}$$

取 Lyapunov 函数为

$$V(k,\tilde{x}(k))=V_{\sigma(k)}(k,\tilde{x}(k))=\tilde{x}^{\mathrm T}(k)\tilde{P}_{\sigma(k)}\tilde{x}(k). \tag{12}$$

当 $\sigma(k+1)=\sigma(k)=i$ 时, 由式(9) 和切换律(10) 可知

$$\Delta V(k,\tilde{x}(k)) = \tilde{x}^{\mathrm{T}}(k)[\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{P}_i\tilde{A}_i - \tilde{P}_i]\tilde{x}(k) < \sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}\tilde{x}^{\mathrm{T}}(k)(\tilde{P}_i - \tilde{P}_j)\tilde{x}(k) < 0; \tag{13}$$

当 $\sigma(k+1) \neq \sigma(k)$, $\sigma(k) = i$ 时, 由切换律(10) 可知

$$\Delta V(k,\tilde{x}(k)) = V_{\sigma(k+1)}(k+1,\tilde{x}(k+1)) - V_i(k,\tilde{x}(k)) \leq V_i(k+1,\tilde{x}(k+1)) - V_i(k,\tilde{x}(k)) < 0, \tag{14}$$

因此无扰动输入时, 系统(7) 在切换律(10) 下渐近稳定, 且

$$\lim_{k\to\infty}(C_{\sigma(k)}x(k) + Q_{\sigma(k)}w(k)) = \lim_{k\to\infty}C_{\sigma(k)}\tilde{x}(k) = 0.$$ □

注 1　当给定非负常数 β_{ij} 时, 利用矩阵的 Schur 补性质, 矩阵不等式组(9) 可变换成如下线性矩阵不等式组:

$$\begin{bmatrix} -\eta\tilde{Q}_i & * & * & \cdots & * \\ (A_i\tilde{Q}_i + B_iY_i) & -\tilde{Q}_i & * & \cdots & * \\ \sqrt{\beta_{i1}}\tilde{Q}_i & 0 & -\tilde{Q}_1 & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{\beta_{im}}\tilde{Q}_i & 0 & 0 & \cdots & -\tilde{Q}_m \end{bmatrix} < 0, \quad \forall i \in \bar{M}.$$

其中

$$\eta = 1 + \sum_{j=1}^{m}\beta_{ij},\ \tilde{Q}_i = \tilde{P}_i^{-1},\ Y_i = K_i\tilde{P}_i^{-1}.$$

用 Matlab 工具箱容易求得矩阵 $\tilde{Q}_i$ 和 Y_i, 从而得到 $\tilde{P}_i = \tilde{Q}_i^{-1}$ 和 $K_i = Y_i\tilde{P}_i$.

注 2　定理 1 的结论退化到通常的线性系统就是线性系统输出调节问题的一般性结论.

4　误差反馈输出调节

当系统状态和外部输入变量不能完全获得时, 采用控制器(4) 得到的闭环系统为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_{\sigma(k)}x(k) + B_{\sigma(k)}H_{\sigma(k)}\xi(k) + P_{\sigma(k)}w(k), \\ \xi(k+1) &= G_{\sigma(k)}C_{\sigma(k)}x(k) + F_{\sigma(k)}\xi(k) + G_{\sigma(k)}Q_{\sigma(k)}w(k), \\ w(k+1) &= Sw(k), \\ e(k) &= C_{\sigma(k)}x(k) + Q_{\sigma(k)}w(k). \end{aligned} \tag{15}$$

为了使系统(15) 的输出调节问题可解和切换规则只依赖于系统的误差, 对 $\forall i \in \bar{M}$ 令 $C = C_i, Q = Q_i$, 且作如下假定:

假设 3[12]　对 $\forall i \in \bar{M}$, 存在 Π, Σ, H_i, F_i 满足下面的矩阵方程:

$$\Pi S = A_i\Pi + B_iH_i\Sigma + P_i, \quad \Sigma S = F_i\Sigma,\ 0 = C\Pi + Q. \tag{16}$$

作变换

$$\chi(k) = \begin{bmatrix} x(k) - \Pi w(k) \\ \xi(k) - \Sigma w(k) \end{bmatrix},$$

利用(16) 整理(15) 得

$$\begin{aligned} \chi(k+1) &= \bar{A}_{\sigma(k)}\chi(k), \\ w(k+1) &= Sw(k), \\ e(k) &= \bar{C}\chi(k), \end{aligned} \tag{17}$$

其中

$$\bar{A}_{\sigma(k)} = \begin{bmatrix} A_{\sigma(k)} & B_{\sigma(k)}H_{\sigma(k)} \\ G_{\sigma(k)}C & F_{\sigma(k)} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \quad 0]. \tag{18}$$

选取 Lyapunov 函数为

$$V(k,\chi(k)) = V_{\sigma(k)}(k,\chi(k)) = \chi^{\mathrm{T}}(k)\bar{P}_{\sigma(k)}\chi(k),$$

其中

$$\bar{P}_{\sigma(k)} = \begin{bmatrix} C^{\mathrm{T}}\bar{P}_{11\sigma(k)}C & 0 \\ 0 & \bar{P}_{22} \end{bmatrix}. \tag{19}$$

设计切换律如下:

$$\sigma(k) = \arg\min_{i\in M}\{\chi^{\mathrm{T}}(k)\bar{P}_i\chi(k)\},$$

考虑到

$$\chi^{\mathrm{T}}(k)\bar{P}_i\chi(k) = [x(k) - \Pi w(k)]^{\mathrm{T}}C^{\mathrm{T}}\bar{P}_{11i}C[x(k) - \Pi w(k)] + [\xi(k) - \Sigma w(k)]^{\mathrm{T}}\bar{P}_{22}[\xi(k) - \Sigma w(k)],$$

有

$$\sigma(k) = \arg\min_{i\in M}\{e^{\mathrm{T}}(k)\bar{P}_{11i}e(k)\}. \tag{20}$$

类似于定理 1 的证明, 容易得到下面使系统(15) 输出调节问题可解的充分条件.

定理 2　若假设 1, 假设 3 成立, 并且对 $\forall i, j \in \bar{M}$ 存在非负常数 $\beta_{ij} \geq 0$, 正定矩阵 $\bar{P}_{11i} > 0, \bar{P}_{22} > 0$ 和矩阵 U_i 满足下面的矩阵不等式组:

$$\begin{bmatrix} C^{\mathrm{T}}(-\eta\bar{P}_{11i} + \sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}\bar{P}_{11j})C & * & * & * \\ 0 & -\bar{P}_{22} & * & * \\ C^{\mathrm{T}}\bar{P}_{11i}CA_i & C^{\mathrm{T}}\bar{P}_{11i}CB_iH_i & -C^{\mathrm{T}}\bar{P}_{11i}C & * \\ U_iC & \bar{P}_{22}F_i & 0 & -\bar{P}_{22} \end{bmatrix} < 0, \tag{21}$$

则系统(15) 在切换律(20) 的作用下输出调节问题可解. 且使系统(15) 输出调节问题可解的误差反馈控制器为(4), 其中 $G_i = \bar{P}_{22}^{-1}U_i$.

证明　将(18) 和(19) 代入(21), 利用矩阵的 Schur 补性质有

$$-\bar{P}_i + \sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}(\bar{P}_j - \bar{P}_i) + \bar{A}_i^{\mathrm{T}}\bar{P}\bar{A}_i < 0.$$

类似于定理 1 的证明, 可得系统(15) 在切换律(20) 下是输出调节问题可解的. □

5　仿真例子

例 1　考虑 $M = 2$ 时的系统(1), 其参数分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.02 & 0 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix},\ A_2 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 1.02 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},\ P_1 = \begin{bmatrix} -0.18 & 0.08 \\ 0.3 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} -0.3 & 0.2 \\ 0.18 & 0.08 \end{bmatrix},\ C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q_1 = Q_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},\ S = \begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 1.1 \end{bmatrix}. \tag{22}$$

对于上述参数, 存在满足假设 3 的矩阵如下:

$$\Pi = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},\ \Sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = [0.1\quad -0.1],\ H_2 = [-0.1\quad 0.1],$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},\ F_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}.$$

显然, 由图 1～ 图 4 可以看出系统(22) 的两个子系统都不是输出调节问题可解的. 但利用定理 2, 采取切换策略, 可使系统(22) 输出调节问题可解. 选取 $\beta_{12} = 4$, $\beta_{21} = 5$, 求解线性矩阵不等式(21), 可得

$$\bar{P}_{111} = \begin{bmatrix} 78.8662 & 0 \\ 0 & 84.5491 \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.0359 \\ 0 & 0.0359 \end{bmatrix},$$

$$\bar{P}_{112} = \begin{bmatrix} 77.1979 & 0 \\ 0 & 86.7367 \end{bmatrix},$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} -0.0330 & 0 \\ 0.0330 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{P}_{22} = \begin{bmatrix} 96.5874 & -2.2799 \\ -2.2799 & 96.5874 \end{bmatrix}.$$

根据定理 2, 有

$$\Omega_1 = \{(e_1, e_2) \mid 1.6683 e_1^2 - 2.1876 e_2^2 \le 0\},$$

$$\Omega_2 = \{(e_1, e_2) \mid 1.6683 e_1^2 - 2.1876 e_2^2 > 0\},$$

显然 $\Omega_1 \cup \Omega_2 = R^n$. 切换律设计如下:

$$\sigma(k) = \begin{cases} 1, & e(k) \in \Omega_1; \\ 2, & e(k) \in \Omega_2. \end{cases} \tag{23}$$

图 5 和图 6 的仿真结果显示系统(22) 在切换律(23) 下是输出调节问题可解的. 初始值为 $X(0) = [-20\quad 15\quad 18\quad -16]^{\mathrm{T}}$.

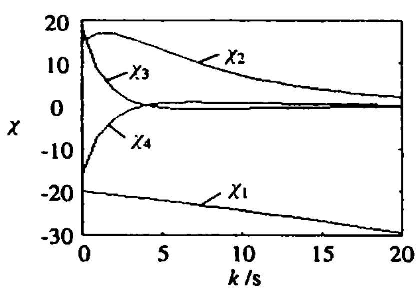

图 1　第 1 个子系统的状态响应曲线

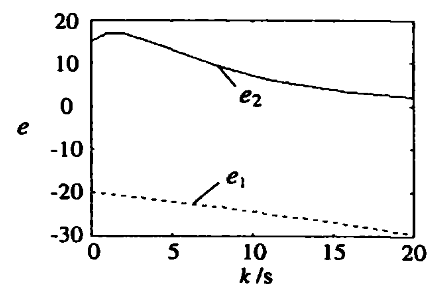

图 2　第 1 个子系统的输出误差曲线

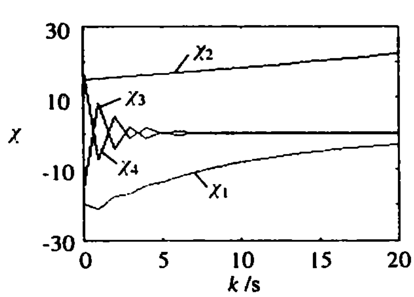

图 3　第 2 个子系统的状态响应曲线

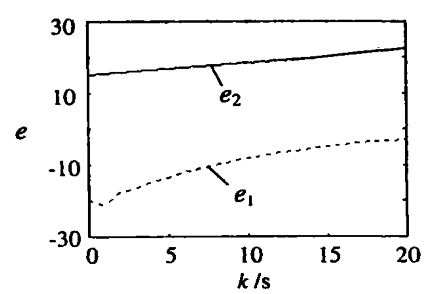

图 4　第 2 个子系统的输出误差曲线

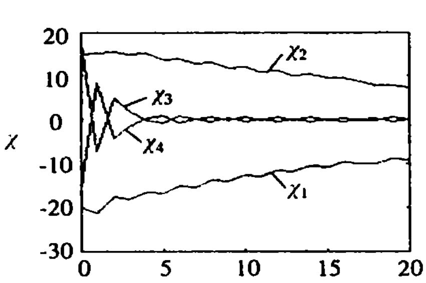

图 5　切换系统的状态响应曲线

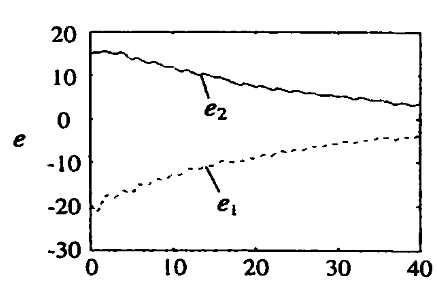

图 6　切换系统的输出误差曲线

(下转第 1274 页)

5 结 语

本文对于复杂多智能体系统的不一致性协调问题, 在自私-利他原则基础上提出了扩展自私-利他协调原则, 并进一步提出了系统不一致性的递推协调算法, 并证明了算法的收敛性. 该算法充分考虑了智能体的自主性和独立性, 具有较强的灵活性和实际意义, 通过实例说明该算法是有效的.

参考文献(References)

[1] 刘金琨, 王树青. 复杂系统多智能体不一致问题的研究[J]. *控制与决策*, 1999, 14(3): 249-252.
(Liu J K, Wang S Q. Inconsistency Research Based on Complicated Multi-agent System [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 249-252.)

[2] 刘海龙. *动态环境下分布式智能系统的任务协作理论研究*[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
(Liu H L. *Task Cooperation for Distributed Intelligent Systems in the Dynamic Environment*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)

[3] Zhang C Q. Cooperation under Uncertainty in Distributed Expert Systems[J]. *Artificial Intelligence*, 1992, 56(1): 21-69.

[4] 李凡. *人工智能中的不确定性*[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 97-167.
(Li F. *The Uncertainty of Artificial Intelligence*[M]. Beijing: Weather Press, 1992: 97-167.)

[5] Paul G. Group Decision Support System [J]. *Decision Support System*, 1987, 3(3): 233-242.

[6] Masahiro Takatsuka, Terry M Caelli, Geoff A W West, et al. An Application of "Agent-oriented" Techniques to Symbolic Matching and Object Recognition[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(4): 419-429.

[7] 刘越, 陈火旺, 王怀民. 一种渐近式多Agent合作理论[J]. *计算机学报*, 2003, 26(4): 454-459.
(Liu Y, Chen H W, Wang H M. A Theory of Reactive Multi-agent Cooperation[J]. *Chinese J of Computers*, 2003, 26(4): 454-459.)

[8] Khan N A, Jain R. Uncertainty Management in a Distributed Knowledge Based System[A]. *Proc IJCAI-85*[C]. Los Angels, 1985: 318-320.

[9] Jeff Y C, Jay M T. An Intelligent Framework for Enterprise Integration [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1991, 21(6): 1391-1408.

(上接第 1252 页)

6 结 论

本文利用多 Lyapunov 函数方法, 研究了线性离散切换系统的输出调节问题. 在假定每个子系统都不是输出调节问题可解的条件下, 分别给出了全息反馈控制器和误差反馈控制器作用下, 这类系统输出调节问题可解的两个充分条件. 同时还分别给出了相应的切换律和控制器的设计方案.

参考文献(References)

[1] Francis B A. The Linear Multivariable Regulator Problem [J]. *SIAM J Control Optimization*, 1977, 15(3): 486-505.

[2] Byrnes C I, Isidori A. Output Regulation for Nonlinear Systems: An Overviews [J]. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2000, 33(10): 323-337.

[3] Huang J. *Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications*[M]. New York: Springer Verlag, 2004: 4-24.

[4] Chen Z, Huang J. Robust Output Regulation with Nonlinear Exosystems[J]. *Automatica*, 2005, 41(8): 1447-1454.

[5] Savkin A V, Matveev A S. Cyclic Linear Differential Automata: A Simple Class of Hybrid Dynamical Systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(5): 727-734.

[6] Liberzon D, Morse A S. Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems [J]. *Control Systems Magazine*, 1999, 19(5): 59-70.

[7] Cheng D Z, Guo L, Huang J. On Quadratic Lyapunov Functions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(5): 885-890.

[8] Daafouz J, Riedinger P, Iung C. Stability Analysis and Control Synthesis for Switched Systems: A Switched Lyapunov Function Approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1883-1887.

[9] Jamal D, Jacques B. Robust Dynamic Output Feedback Control for Switched Systems [A]. *Proc of the 41st Conf on Decision and Control*[C]. Las Vegas, 2003: 4812-4817.

[10] Fujii S, Hespanha J P, Morse A S. Supervisory Control of Families of Noise Suppressing Controllers [A]. *Proc of the 37th Conf on Decision and Control* [C]. Tampa, 1998: 1641-1646.

[11] 刘玉忠, 赵军. 一类带扰动线性开关系统的误差反馈输出调节问题[J]. *控制与决策*, 2001, 16(增): 815-817.
(Liu Y Z, Zhao J. Problem on Output Regulation via Error Feedback for a Class of Switched Linear Systems with Disturbance[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(S): 815-817.)

[12] Isidori A. *Nonlinear Control Systems* [M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 391-402.