

文章编号: 1001-0920(2008)09-1045-04

线性时变参数系统切换 H 输出反馈控制

丛 岫, 邹 云

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 考虑时变参数系统的切换 H 控制问题. 提出了由参数触发的切换策略, 由此在最小驻留时间的限制下, 将线性时变参数系统分解为若干具有范数有界不确定性的子系统. 利用多 Lyapunov 函数方法分别设计各子系统的输出动态反馈控制器, 使在切换策略驱动下构成的闭环系统满足 H 控制性能. 仿真算例完整地实现了理论方法, 并验证了其有效性.

关键词: 时变参数系统; 切换控制; 输出动态反馈; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Switching H output feedback controller design for linear parameter-varying systems

CONG Shen, ZOU Yun

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: CONG Shen, E-mail: shen_tsong@163.com)

Abstract: This paper concerns with the switching control of linear parameter-varying systems with the optimization of H performance. The parameter-driven switching strategy with the minimum dwell time is presented, through which the linear parameter-varying system is described by a family of subsystems with a norm-bounded uncertainty. Then multiple Lyapunov functions design method is exploited to construct the output compensator for each subsystem respectively. All the compensators are orchestrated alternatively by the switching strategy to make the closed-loop system stabilized with H performance achieved. A numerical example is worked out in detail to demonstrate the proposed method.

Key words: Linear parameter-varying systems; Switching control; Output dynamical feedback; Linear matrix inequality

1 引 言

时变参数系统用于刻画对象随时间演化或环境改变而发生的变化, 其参数可以线性或非线性形式出现于系统. 这种系统模型具有较为广泛的描述能力, 因而成为研究的热点之一.

增益规划是时变参数系统研究的经典方法^[1,2], 它要求在被控对象与反馈控制之间, 参数在任意时刻是严格对应的. 这类条件可归结为无穷维优化问题, 因此难以求解^[3,4]; 而且参数通常描述的是客观因素对系统模型的影响, 将其引入控制器设计也不方便. 根据参数大范围变化的特点, 自然的考虑是通过切换控制^[5,6]. 由于未引入鲁棒设计的思想, 现有的切换控制方法仍未摆脱控制器与模型之

间参数严格对应的缺陷.

切换控制系统的一些基本理论已发展得较为成熟^[7]. 本文在此基础上, 建立了时变参数系统的多 Lyapunov 函数设计方法, 给出了由时变参数触发的切换控制, 以满足给定的 H 性能指标.

2 时变参数系统的切换控制策略

时变参数 $[A(t), B(t), C(t), D(t)] \in \mathcal{R}$ 满足 $|A(t)| < \infty, |B(t)| < \infty, |C(t)| < \infty, |D(t)| < \infty$. 时变参数线性系统描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\sigma(t))x(t) + B_w w(t) + B(\sigma(t))u(t), \\ z(t) = C_1 x(t) + Du(t), \\ y(t) = C_2 x(t), \quad t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2007-07-13; 修回日期: 2007-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474078, 60304001).

作者简介: 丛岫(1976—), 男, 哈尔滨人, 讲师, 博士, 从事切换系统、时滞系统的研究; 邹云(1962—), 男, 江苏宜兴人, 教授, 博士生导师, 从事奇异摄动系统、电力系统稳定性等研究.

其中: $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, z \in \mathbb{R}^q$ 和 $y \in \mathbb{R}^h$ 分别为系统状态、控制输入、受控输出和量测输出; $w(\cdot) \in L^2_1[0, +\infty)$ 为干扰输入; A, B, B_w, C_1, C_2 和 D 为适当维数矩阵.

假设 1 系统矩阵 (A, B) 关于时变参数 θ 为已知的连续函数.

假设 2 时变参数随时间连续变化, 其变化率的上确界已知.

假设 3 时变参数是可实时测量的.

时变参数系统切换 H 控制的目的是: 给定干扰抑制水平 $\epsilon > 0$, 将系统(1) 划分为相对独立的若干子系统, 分别设计其输出动态反馈控制器, 并制定反馈控制的切换策略, 以满足: 1) 若 $w(t) = 0, t \in [0, \infty)$, 则整个系统指数稳定; 2) 若初始状态为零, 则

$$\int_0^{\infty} |z(t)|^2 dt < \epsilon^2 \int_0^{\infty} |w(t)|^2 dt, \\ w(\cdot) \in L^2_1[0, \infty) \setminus \{0\}.$$

对于给定的常数 $\epsilon > 0$, 取连通紧集 I, J 由左右依次编号的有限开区间覆盖族

$$\left\{ I_i \mid I_i \subset I, J \subset \bigcup_{i=1}^N I_i, I_i \cap I_{i-1} = \emptyset, \right. \\ \left. I_i \cap I_{i+1} = \emptyset, i = 2, 3, \dots, N-1 \right\}_{i=1}^N, \quad (2)$$

其上的标称系统 $\Sigma_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 分别定义为

$$\exists \theta_i \in I_i, A_i = A(\theta_i), B_i = B(\theta_i). \quad (3)$$

使参数取值于相应的开区间时, 满足有界性条件

$$A(\cdot) - A_i = \Delta A_i, \quad B(\cdot) - B_i = \Delta B_i, \\ \forall \theta \in I_i, i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

由此, 系统(1) 可分解为如下若干不确定子系统 $\Sigma_i(\cdot)$:

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(\theta))x(t) + B_w w(t) + \\ (B_i + \Delta B_i(\theta))u(t). \quad (5)$$

其中: $\Delta A_i = [I_m \quad 0_{(n-m) \times m}]$.

重叠区域 $I_i^{i+1} = I_i \cap I_{i+1}$ 满足 $I_i^{i+1} \cap I_{i-1}^{i+1} = \emptyset, i = 2, 3, \dots, N-1$. 设 $\partial_i^{i+1}, \partial_{i+1}^{i+1}$ 分别为重叠区域 I_i^{i+1} 的左右边界. 由此设计子系统(5) 的反馈控制, 由时变参数依次触发, 如图 1 所示.

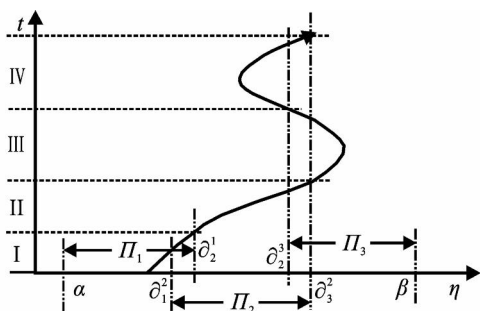


图 1 时变参数系统切换控制的建模机理

切换策略定义为

$$s(t) = \begin{cases} i+1, & (t) = \partial_{i+1}^i; \\ i-1, & (t) = \partial_i^{i-1}; \\ i, & t = 0. \end{cases} \quad (6)$$

给定时变参数的变化率, 依据式(6) 可知, 开覆盖之间的重叠部分决定了切换信号的最小驻留时间 $T_D = \min_{i=1, \dots, N-1} \{\partial_i^{i+1} - \partial_{i+1}^i\}$, 其中

$$T_D = \min_{i=1, \dots, N-1} \{\partial_i^{i+1} - \partial_{i+1}^i\}. \quad (7)$$

注 1 最小驻留时间表征了时变参数在开覆盖重叠区域附近以最快速度反复振荡时, 切换信号变化的剧烈程度. 若子系统承受较小的不确定性, 则要求切换控制信号的变化较为剧烈; 若切换控制信号的变化较为平缓, 则要求子系统承受较大的不确定性. 即两个物理量 θ 与 T_D 是相互制约的.

3 切换控制系统 H 性能分析

切换系统的机理及其性能分析是实现时变参数系统切换控制的理论基础. 为此在较为一般的条件下考虑其 H 控制性能.

考虑下列不确定子系统 $\Sigma_i(\cdot)$:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A_i + H_i(\theta) E_i] x(t) + B_{wi} w(t), \\ z(t) = C_i x(t), t = 0, i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (8a)$$

在切换序列

$$\{(t_0 = 0, (0)), \dots, (t_k, (k)), \dots, \mid \inf_k (t_k - t_{k-1}) \geq T_D\} \quad (8b)$$

驱动下构成的切换系统. 其中: (t) 元素为 Lebesgue 可测函数, 满足 $\theta \in I_{s(t)}$; $T_D > 0$ 为最小驻留时间; t_k 和 (k) 分别为切换时刻及相应的切换序列取值.

定理 1 设 $\mu > 0, \epsilon > 0, \theta \in I$, 满足 $\ln \epsilon = \mu T_D$. 对于给定的 $\epsilon > 0$, 如果存在对称矩阵 $P_i > 0$, 满足下列线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} A_i + H_i & * & * & * & * \\ B_{wi} P_i & -I_p & * & * & * \\ C_i & 0 & -I_q & * & * \\ H_i P_i & 0 & 0 & -I_n & * \\ E_i & 0 & 0 & 0 & -I_n \end{bmatrix} < 0, \\ i = 1, 2, \dots, N; \quad (9)$$

$$P_i = P_j, i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

则切换系统(8) 满足 H 性能, 其中

$$\dot{V}_i = P_i A_i + \frac{\mu}{2} P_i, i = 1, 2, \dots, N.$$

证明 构造子系统 Lyapunov 函数 $V_i(x) = x^T P_i x, i = 1, 2, \dots, N$. 根据不等式(9) 可推得

$$\dot{V}_i \leq |z(t)|^2 - \epsilon^2 |w(t)|^2 + \dot{V}_i(\theta(t)) \\ = \theta(t) [A_i P_i + P_i A_i + \frac{\mu}{2} P_i B_{wi} B_{wi}^T P_i +$$

$$P_i H_i H_i P_i + E_i E_i + C_i C_i] (t) - \mu V_i (t).$$

设 $\delta(t) = \frac{1}{2} [w(t)]^2 - [z(t)]^2$, 由此即得

$$\dot{V}_i(t) = -\mu V_i(t) + \frac{1}{2} [w(t)]^2 - [z(t)]^2. \tag{11}$$

对于 $t \in [t_k, t_{k+1}], k = 0, \dots$, 根据式(11) 可得

$$V_{(k)}(t) = e^{-\mu(t-t_k)} V_{(k)}(t_k) + \int_{t_k}^t e^{-\mu(t-\tau)} \delta(\tau) d\tau. \tag{12}$$

进而由式(10) 得到如下递推关系:

$$V_{(i)}(t_i) = V_{(i-1)}(t_i), 1 \leq i \leq k. \tag{13}$$

依据式(12) 和(13), 参照文献[8] 的证明过程即可证得.

注 2 不同于定理 1 的一般情形, 在时变参数系统的切换控制中, 切换逻辑比较简单, 即只在相邻子系统之间进行切换.

4 输出切换反馈控制设计

根据时变参数系统建模原则, 相应子系统 i 的一般形式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A_i + H_i(t) E_i] x(t) + B_{wi} w(t) + [B_i + H_i(t) F_i] u(t), \\ z(t) = C_{i1} x(t) + D_i u(t), \\ y(t) = C_{i2} x(t), i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \tag{14a}$$

时变参数触发的切换控制满足

$$\{ (t_0 = 0, (0)), \dots, (t_k, (k)), \dots, / \inf_k (t_k - t_{k-1}) \geq T_D \}, \tag{14b}$$

其中最小驻留时间 T_D 由式(7) 确定.

注 3 参照式(1) 和(5), 可知对于所考虑问题, 有 $\mu < \dots, B_{wi} = B_w, C_{i1} = C_1, C_{i2} = C_2, D_i = D, H_i = E_i = I_n, F_i = F$.

通过子系统输出动态反馈控制

$$ic \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_i \hat{x}(t) + B_i y(t), \\ u(t) = C_i \hat{x}(t) + D_i y(t). \end{cases} \tag{15}$$

得到闭环系统

$$icl \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = [\overline{A}_i + \widetilde{H}_i \quad \widetilde{E}_i] (t) \hat{x}(t) + \widetilde{B}_{wi} w(t), \\ z(t) = \widetilde{C}_i (t), i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \tag{16}$$

其中: $\hat{x} = [x \quad \hat{x}]$, 各项系数矩阵如下:

$$\begin{aligned} \overline{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i + B_i D_i C_{i2} & B_i C_i \\ B_i C_{i2} & A_i \end{bmatrix}, \\ \widetilde{B}_{wi} &= \begin{bmatrix} B_{wi} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \widetilde{C}_i = \begin{bmatrix} C_{i1} + C_{i2} D_i D_i \\ C_i D_i \end{bmatrix}, \\ \widetilde{H}_i &= \begin{bmatrix} H_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \widetilde{E}_i = \begin{bmatrix} E_i + C_{i2} D_i F_i \\ C_i F_i \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用多 Lyapunov 函数设计方法并结合变量代换^[9], 求解输出动态反馈控制. 为此, 引入参数集

$$\begin{aligned} &= \{ Y \in \mathbb{R}^{n \times n} \} \cup \{ X_i, R_i \in \mathbb{R}^{n \times n}, \\ &U_i \in \mathbb{R}^{m \times m}, V_i \in \mathbb{R}^{n \times n}, W_i \in \mathbb{R}^{m \times n} \}_{i=1}^N, \end{aligned} \tag{17}$$

其中 $X_i > 0$ 和 $Y > 0$ 为对称矩阵.

定理 2 如果形如式(17) 的参数集 满足下列线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} i(t) + i(t) & * & * & * & * \\ \widetilde{B}_{wi}(t) & -I_p & * & * & * \\ \widetilde{C}_i(t) & 0 & -I_q & * & * \\ \widetilde{H}_i(t) & 0 & 0 & -I_n & * \\ \widetilde{E}_i(t) & 0 & 0 & 0 & -I_r \end{bmatrix} < 0, \tag{18}$$

$i = 1, 2, \dots, N;$

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_i(t) & \overline{Q}_{i+1}(t) \\ \overline{Q}_{i+1}(t) & \overline{Q}_{i+1}(t) \end{bmatrix} > 0,$$

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_{i+1}(t) & \overline{Q}_i(t) \\ \overline{Q}_i(t) & \overline{Q}_i(t) \end{bmatrix} > 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, N - 1. \tag{19}$$

则存在输出动态反馈控制(15), 使闭环系统(16) 在切换策略(6) 驱动下满足 H 性能. 其中各项分别为

$$i(t) = \overline{A}_i(t) + \frac{\mu}{2} \overline{Q}_i(t), \quad \overline{Q}_i(t) = \begin{bmatrix} X_i & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix},$$

$$\overline{A}_i(t) = \begin{bmatrix} A_i X_i + B_i U_i & A_i + B_i W_i C_{i2} \\ R_i & Y A_i + V_i C_{i2} \end{bmatrix},$$

$$\widetilde{B}_{wi}(t) = \begin{bmatrix} B_{wi} \\ Y B_{wi} \end{bmatrix}, \quad \widetilde{C}_i(t) = \begin{bmatrix} X_i C_{i1} + U_i D_i \\ C_{i1} + C_{i2} W_i D_i \end{bmatrix},$$

$$\widetilde{H}_i(t) = \begin{bmatrix} H_i \\ Y H_i \end{bmatrix}, \quad \widetilde{E}_i(t) = \begin{bmatrix} X_i E_i + U_i F_i \\ E_i + C_{i2} W_i F_i \end{bmatrix}.$$

证明 设 $Z_i = X_i - Y^{-1}$, 构造参数化控制器

$$A_i(t) = (-B_i W_i C_{i2} X_i + B_i U_i + Y^{-1} V_i C_{i2} X_i - Y^{-1} R_i Z_i^{-1} + A_i X_i) Z_i^{-1},$$

$$B_i(t) = B_i W_i - Y^{-1} V_i,$$

$$C_i(t) = -C_{i2} X_i Z_i^{-1}, \quad D_i(t) = W_i.$$

构造相应的 Lyapunov 函数矩阵

$$P_i^{-1}(t) = Q_i(t) = \begin{bmatrix} X_i & Z_i \\ Z_i & Z_i \end{bmatrix}. \tag{20}$$

由此得到参数化的闭环系统系数矩阵

$$\overline{A}_i(t) = \begin{bmatrix} A_i + B_i W_i C_{i2} & (-B_i W_i C_{i2} X_i + B_i U_i) Z_i^{-1} \\ B_i W_i C_{i2} - Y^{-1} V_i C_{i2} & (-B_i W_i C_{i2} X_i + B_i U_i - Y^{-1} R_i - Y^{-1} V_i C_{i2} X_i + A_i X_i) Z_i^{-1} \end{bmatrix}, \tag{21a}$$

$$\widetilde{B}_{wi}(t) = [B_{wi} \quad 0], \tag{21b}$$

$$\widetilde{C}_i(t) = [C_{i1} \quad (-D_i W_i C_{i2} X_i + D_i U_i) Z_i^{-1}], \tag{21c}$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_i(\cdot) = & \\ [E_i + F_i W_i C_{i2} \quad & (-F_i W_i C_{i2} X_i + F_i U_i) Z_i^{-1}]. \end{aligned} \quad (21d)$$

根据定理 1, 只要证明参数化 Lyapunov 函数 (20) 和系数矩阵 (21) 满足矩阵不等式 (9) 和 (10) 即可. 设 $S(\cdot) = \begin{bmatrix} I_n & Y \\ 0 & -Y \end{bmatrix}$, 构造非奇异变换矩阵

$$T_i(\cdot) = \text{diag}\{Q_i(\cdot) S(\cdot) \quad I_p \quad I_q \quad I_n \quad I_n\}.$$

将参数化 Lyapunov 函数 (20) 和系统系数矩阵 (21) 代入式 (9), 经过相似变换可知其等价于

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_i(\cdot) + \tilde{A}_i(\cdot) & * & * & * & * \\ \tilde{B}_{wi}(\cdot) S_i(\cdot) & -I_p & * & * & * \\ \tilde{C}_i(\cdot) Q_i(\cdot) S_i(\cdot) & 0 & -I_q & * & * \\ \tilde{H}_i S_i(\cdot) & 0 & 0 & -I_n & * \\ \tilde{E}_i(\cdot) Q_i(\cdot) S_i(\cdot) & 0 & 0 & 0 & -I_n \end{bmatrix} < 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (22)$$

其中

$$\tilde{A}_i(\cdot) = S(\cdot) [\overline{A}_i(\cdot) Q_i(\cdot) + \frac{\mu}{2} Q_i(\cdot)] S(\cdot).$$

分别计算其中各项, 得到

$$\begin{aligned} S(\cdot) \overline{A}_i(\cdot) Q_i(\cdot) S(\cdot) &= \overline{A}_i(\cdot), \\ S(\cdot) \tilde{B}_{wi}(\cdot) &= \tilde{B}_{wi}(\cdot), \\ S(\cdot) \tilde{H}_i(\cdot) &= \tilde{H}_i(\cdot), \\ \tilde{C}_i(\cdot) Q_i(\cdot) S(\cdot) &= \tilde{C}_i(\cdot), \\ \tilde{E}_i(\cdot) Q_i(\cdot) S(\cdot) &= \tilde{E}_i(\cdot). \end{aligned}$$

因此不等式 (18) 与 (9) 是等价的.

依据切换逻辑的顺序性和 Schur 引理, 不等式 (10) 可改写成

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Q_i(\cdot) & Q_i(\cdot) \\ Q_i(\cdot) & Q_{i+1}(\cdot) \end{bmatrix} > 0, \\ \begin{bmatrix} Q_{i+1}(\cdot) & Q_{i+1}(\cdot) \\ Q_{i+1}(\cdot) & Q_i(\cdot) \end{bmatrix} > 0, \\ i = 1, 2, \dots, N - 1. \end{aligned} \quad (23)$$

上式包含了参数化 Lyapunov 函数矩阵 (20) 的正定性. 构造非奇异变换矩阵 $T(\cdot) = \text{diag}\{S(\cdot) \quad S(\cdot)\}$, 经过相似变换, 由式 (23) 可知

$$\begin{aligned} T(\cdot) \begin{bmatrix} Q_i(\cdot) & Q_i(\cdot) \\ Q_i(\cdot) & Q_{i+1}(\cdot) \end{bmatrix} T(\cdot) = \\ \begin{bmatrix} \overline{Q}_i(\cdot) & \overline{Q}_{i+1}(\cdot) \\ \overline{Q}_{i+1}(\cdot) & \overline{Q}_{i+1}(\cdot) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

因此不等式 (23) 与 (19) 是等价的.

由此证明了在切换策略 (6) 驱动下, 通过输出动态反馈控制器 (15), 实现闭环控制的时变参数系统 (1) 满足 H_∞ 性能指标.

注 4 由于 Lyapunov 函数与控制器通过一组参数实现参数化, Lyapunov 函数之间的耦合关系导

致控制器的设计并不是相互独立的.

5 仿真分析

对于时变参数系统 (1), 设参数取值于 $[0, 1]$, 其变化率 $|\dot{\mu}| \leq 1.25$, 系统矩阵为

$$\begin{aligned} A(\cdot) &= (1 - \mu) \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}, \\ B(\cdot) &= (1 - \mu) \begin{bmatrix} -2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2 \\ 2 \end{bmatrix}, \\ B_w &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}, \quad D = 0. \end{aligned}$$

开覆盖划分为

$$\mu_1 \in [0, 0.5], \quad \mu_2 \in [0.25, 0.75], \quad \mu_3 \in [0.5, 1].$$

相应的标称子系统分别取值为

$$\begin{aligned} \mu_1 = 0.25, \quad \mu_2 = 0.5, \quad \mu_3 = 0.75, \\ A_1 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.5 \\ 0.25 & 1.25 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -2 \\ 1.25 \end{bmatrix}, \\ A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} -2 \\ 1.5 \end{bmatrix}, \\ A_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 \\ -1.25 & -0.25 \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} -2 \\ 1.75 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

计算可知, 子系统不确定性的上确界满足 $\mu \leq 1.06$.

依据式 (7) 得到最小驻留时间 $T_D \geq 0.2$. 在不等式 (18) 中取定 $\mu = 0.2$, 由此解得输出动态反馈控制的增益矩阵分别为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} D_1 & C_1 \\ B_1 & A_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.052 & -1.490 & -4.745 \\ -0.712 & 3.056 & 8.680 \\ -1.051 & -0.30 & -6.335 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} D_2 & C_2 \\ B_2 & A_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.094 & 0.142 & -0.481 \\ 0.12 & -0.609 & 1.590 \\ -0.407 & 0.275 & -1.328 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} D_3 & C_3 \\ B_3 & A_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.180 & 0.570 & -0.067 \\ 0.537 & -1.593 & 1.500 \\ -0.206 & 0.233 & -1.481 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

当干扰输入恒为零时, 在切换控制作用下, 闭环系统状态轨迹如图 2 所示.

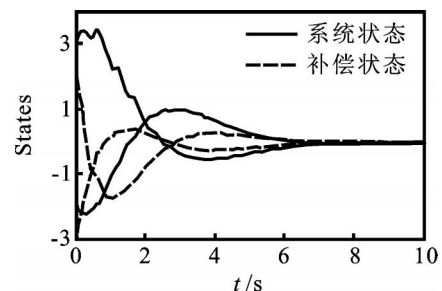


图 2 切换控制驱动下闭环系统状态轨迹

(下转第 1054 页)

- Research, 1994, 72(3): 443-459.
- [3] 刘清. Rough 集及 Rough 推理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(Liu Q. Rough sets and rough reasoning[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [4] Jensen R, Shen Q. Semantics-preserving dimensionality reduction: Rough and fuzzy-rough-based approaches[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(12): 1457-1471.
- [5] 叶东毅, 陈昭炯. 一个新的差别矩阵及其求核方法[J]. 电子学报, 2002, 30(7): 1086-1088.
(Ye D Y, Chen Z J. A new discernibility matrix and the computation of a core [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(7): 1086-1088.)
- [6] 杨明. 一种基于改进差别矩阵的核增量式更新算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(3): 407-413.
(Yang M. An incremental updating algorithm of the computation of a core based on the improved discernibility matrix[J]. Chinese J of Computers, 2006, 29(3): 407-413.)
- [7] 刘少辉, 盛秋馥, 吴斌, 等. Rough 集高效算法的研究[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 524-529.
(Liu S H, Sheng Q J, Wu B, et al. Research on efficient algorithms for rough set methods[J]. Chinese J of Computers, 2003, 26(5): 524-529.)
- [8] Woblewski J. Finding minimal reducts using genetic algorithm [R]. Warsaw: Warsaw University of Technology, 1995.
- [9] 杨明. 一种基于改进差别矩阵的属性约简增量式更新算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 815-822.
(Yang M. An incremental updating algorithm for attribute reduction based on the improved discernibility matrix[J]. Chinese J of Computers, 2007, 30(5): 815-822.)
- [10] 叶东毅. Jelonek 属性约简算法的一个改进[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 81-82.
(Ye D Y. An improvement to Jelonek's attribute reduction algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 81-82.)
- [11] Yang M, Chen S C, Yang X B. A novel approach of rough set-based attribute reduction using fuzzy discernibility matrix[C]. FSKD 07. Haikou, 2007, 3: 96-101.
- [12] Janssens D, Brijs T, Vanhoof K, et al. Evaluating the performance of cost-based discretization versus entropy- and error-based discretization[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3107-3123.

(上接第 1048 页)

6 结 论

时变参数系统切换控制方式易于实现, 具有较好的鲁棒性和实时性, 且可承受一定的切换延迟, 而不影响整个系统的性能. 然而, 相对于具有自学习特征的控制方式, 比如自适应控制, 本文方法不具备智能化的特征, 结论也偏于保守. 这些问题有待于进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Apkarian P, Gahinet P. A convex characterization of gain-scheduling H -infinity controllers [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(5): 853-864.
- [2] Stilwell D J, Rugh W J. Stability and L_2 gain properties of LPV systems[J]. Automatica, 2002, 38(6): 1601-1606.
- [3] Wu F, Yang X H, Packard A K, et al. Induced L_2 norm control for LPV systems with bounded parameter variation rates[J]. Int J of Robust Nonlinear Control, 1996, 6(9): 983-998.
- [4] Wu F, Prajna S. A new solution approach to polynomial LPV system analysis and synthesis [C]. Proc of American Control Conf. Boston, 2004: 1362-1367.
- [5] Lu B, Wu F. Switching LPV control designs using multiple parameter-dependent Lyapunov functions [J]. Automatica, 2004, 40(11): 1973-1980.
- [6] Bett C J, Lemmon M D. Bounded amplitude performance of switched LPV systems with application to hybrid systems[J]. Automatica, 1999, 35(3): 491-503.
- [7] Sun Z, Ge S. Switched linear systems: Control and design[M]. London: Springer-Verlag, 2005.
- [8] Zhai G, Hu B, Yasuda K, et al. Disturbance attenuation properties of time-controlled switched systems[J]. J of Franklin Institute, 2001, 338(7): 765-779.
- [9] Chilali M, Gahinet P. H -infinity design with pole placement constraints: An LMI approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(3): 358-367.