

文章编号: 1001-0920(2007)11-1245-05

## 受扰奇异摄动时滞组合大系统的近似最优控制

张宝琳<sup>1</sup>, 唐功友<sup>2</sup>

(1. 中国计量学院 理学院, 杭州 310018; 2. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 研究一类受扰奇异摄动时滞组合大系统的近似最优控制问题. 基于奇异摄动的快慢分解理论, 将原组合大系统的最优控制问题分解为组合线性快优化子问题和降阶的受扰时滞组合慢优化子问题. 通过采用前馈补偿方法抑制外部扰动, 采用参数摄动法求解组合慢优化子问题, 得到了系统的前馈反馈组合 (FFCC) 控制律. 通过引入降维扰动观测器解决了 FFCC 律的物理可实现问题. 仿真算例验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 奇异摄动系统; 时滞; 最优控制; 参数摄动法; 外系统

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A

## Approximate optimal control for singularly perturbed time-delay composite systems with disturbances

ZHANG Bao-lin<sup>1</sup>, TANG Gong-you<sup>2</sup>

(1. College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266071, China. Correspondent: ZHANG Bao-lin, E-mail: hiblzhang@gmail.com)

**Abstract:** The optimal control problem for a class of singularly perturbed time-delay composite systems affected by external disturbances is considered. Based on the theory of singular perturbation decomposition, the original optimal control problem is decomposed into a fast optimal sub-problem of the linear composite system and a slow optimal one of the composite time-delay system with disturbances. By using the feedforward compensation method to reject the external disturbances, and the parameter perturbation approach to solve the reduced slow optimal problem, the feedforward and feedback composite control (FFCC) law of the original system is obtained. A reduced-order disturbance observer is introduced to make the FFCC law physically realizable. A numerical example shows the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Singularly perturbed systems; Time-delay; Optimal control; Parameter perturbation approach; Exosystem

### 1 引言

几乎所有的实际控制系统都存在时滞现象, 关于时滞系统最优控制的研究一直是学者们关注的课题之一. 例如, Kolmanovskiy 等<sup>[1]</sup> 研究了随机变时滞系统的有限时域最优控制问题. Cai 等<sup>[2]</sup> 针对一类含控制时滞的线性系统研究了其最优控制律的设计方法. 对于二次型性能指标的时滞系统最优控制问题导致既含时滞项又含超前项的两点边值 (TPBV) 问题, 其解析解通常是不存在的. 近年来, 有关时滞系统最优控制的近似方法研究越来越引起

人们的重视. 文献[3, 4]中给出的基于向量迭代的逐次逼近法是求解时滞系统和非线性系统近似最优控制的有效方法之一, 该方法计算量小, 收敛速度快.

奇异摄动系统的最优控制研究在近十几年也取得了一系列成果. 例如, Fridman<sup>[5]</sup> 基于不变流形方法研究了非线性奇异摄动系统的最优控制问题. Bidani 等<sup>[6]</sup> 根据双线性变换, 给出了奇异摄动离散系统最优控制的设计方法. 目前, 有关受扰奇异摄动时滞系统最优控制的研究结果相对较少<sup>[7]</sup>. 对此, 本文研究受扰奇异摄动时滞组合大系统的最优控制问

收稿日期: 2006-07-22; 修回日期: 2006-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60574023); 浙江省教育厅科研项目 (Y200702660); 中国计量学院 123 人才计划项目 (2006RC17).

作者简介: 张宝琳 (1972—), 男, 宁夏西吉人, 讲师, 博士, 从事奇异摄动系统、非线性系统的研究; 唐功友 (1953—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统、大系统的研究.



$$\begin{cases}
C_{i0} x_i(t - \tau_i) + H_i w_i(t); \\
\dot{x}_i(t, \tau_i) = \\
\begin{cases}
-Q_{i\tau} x_i(t, \tau_i) - A_{i\tau}^T x_i(t, \tau_i) - C_{i0}^T x_i(t + \tau_i), \\
0 < t - \tau_i < t_f - \tau_i; \\
-Q_{i\tau} x_i(t, \tau_i) - A_{i\tau}^T x_i(t, \tau_i), \\
t_f - \tau_i < t < t_f, t_f - \tau_i < \tau_i; \\
x_i(t - \tau_i, \tau_i) = 0, x_i(t, \tau_i) = x_i(t), \tau_i = 0.
\end{cases}
\end{cases} \quad (14)$$

对应的最优控制律为

$$\begin{aligned}
u_{is}(t, \tau_i) &= [u_{i1s}^T(t, \tau_i), \dots, u_{iNs}^T(t, \tau_i)]^T, \\
u_{i\tau}(t, \tau_i) &= -R_{i\tau}^{-1} [D_{i\tau} x_i(t, \tau_i) + B_{i\tau}^T x_i(t, \tau_i)], \\
i &= 1, 2, \dots, N. \quad (15)
\end{aligned}$$

假定对于任意的  $\tau_i / \tau_i \geq 1$ , TPBV 问题(14) 的解唯一存在. 显然, 当  $\tau_i = 1$  时, TPBV 问题(14) 等价于(12), 最优控制律(15) 即为(11). 假定  $u_{is}(t, \tau_i)$ ,  $x_i(t, \tau_i)$  和  $x_i(t, \tau_i)$  关于  $\tau_i = 0$  处无限可微, 其 Maclaurin 级数为

$$(x_i(t, \tau_i))^{(j)} = \frac{\tau_i^j}{j!} (x_i)^{(j)}(t), \quad \{x_i, u_{is}, i\}. \quad (16)$$

其中  $(\cdot)^{(j)} = \partial^j(\cdot) / \partial \tau_i^j |_{\tau_i=0}$ . 假设级数(16) 在  $\tau_i = 1$  处收敛, 于是当  $\tau_i = 1$  时, 慢最优控制律可表示为

$$\begin{aligned}
u_{is}(t) &= [u_{i1s}^T(t), \dots, u_{iNs}^T(t)]^T, \\
u_{i\tau}(t) &= \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} u_{i\tau}^{(j)}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (17)
\end{aligned}$$

由式(14) ~ (16) 可得

$$\begin{aligned}
\dot{x}_i^{(j)}(t) &= A_{i\tau} x_i^{(j)}(t) - S_{i0} x_i^{(j)}(t) + x_i^{(j)}(t) + \\
&\quad [1 - \text{sgn}(j)] H_i w_i(t); \\
\dot{x}_i^{(j)}(t) &= -Q_{i\tau} x_i^{(j)}(t) - A_{i\tau}^T x_i^{(j)}(t) - x_i^{(j)}(t), \\
x_i^{(j)}(t) &= [1 - \text{sgn}(j)] x_i(t), \tau_i = 0; \\
x_i^{(j)}(0) &= 0, j = 0, 1, \dots \quad (18) \\
u_{is}^{(j)}(t) &= \\
&\quad [(u_{i1s}^{(j)}(t))^T, \dots, (u_{iNs}^{(j)}(t))^T, \dots, (u_{iNs}^{(j)}(t))^T]^T, \\
u_{i\tau}^{(j)}(t) &= -R_{i\tau}^{-1} [D_{i\tau} x_i^{(j)}(t) + B_{i\tau}^T x_i^{(j)}(t)]. \quad (19)
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
\text{sgn}(j) &= \begin{cases} 0, & j = 0; \\ 1, & j = 1, 2, \dots; \end{cases} \\
x_i^{(j)}(t) &= \begin{cases} 0, & j = 0; \\ j[A_{i0} x_i^{(j-1)}(t) + C_{i0} x_i^{(j-1)}(t - \tau_i)], & j = 1, 2, \dots; \end{cases} \\
x_i^{(j)}(t) &= \begin{cases} 0, & j = 0, 0 < t < t_f; \\ jC_{i0}^T x_i^{(j-1)}(t + \tau_i), & j = 1, 2, \dots, 0 < t - \tau_i < t_f; \\ 0, & j = 1, 2, \dots, t_f - \tau_i < t < t_f, \\ t_f + \tau_i. \end{cases} \quad (20)
\end{aligned}$$

于是, TPBV 问题(12) 化为可迭代求解的 TPBV 问

题族(18).

### 3.2 FFCC 律设计

**定理 1** 考虑受扰奇异摄动时滞组合大系统 (1) 关于二次型性能指标(3) 的最优控制问题. 假设: 1)  $(A_{i\tau}, B_{i\tau}, Q_{i\tau}^{1/2})$  和  $(A_{i0}, B_{i0}, Q_{i\tau}^{1/2})$  均完全可控可观; 2) 外系统渐近稳定或临界稳定. 则系统的 FFCC 律  $u_c(t)$  由下式唯一确定:

$$\begin{aligned}
u_c(t) &= [u_{1c}^T(t), \dots, u_{ic}^T(t), \dots, u_{Nc}^T(t)]^T, \\
u_{ic}(t) &= \\
&\quad K_{iz} z_i(t) + K_{ix} x_i(t) + K_x x(t) + K_{iw} w_i(t) + \\
&\quad K_i x_i(t - \tau_i) + K_{ig} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{g_i^{(j)}(t)}{j!}. \quad (21)
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
K_{iz} &= -R_{i\tau}^{-1} B_{i\tau}^T P_{if}, \quad K_i = K_{iz} A_{i\tau}^{-1} C_{i\tau}, \\
K_{ig} &= -(I_{r_i} + K_{iz} A_{i\tau}^{-1} B_{i\tau}) R_{i\tau}^{-1} B_{i\tau}^T, \\
K_x &= K_{iz} A_{i\tau}^{-1} A_{i\tau}, \\
K_{iw} &= K_{iz} A_{i\tau}^{-1} D_{i\tau} L_i + K_{ig} P_{iw}, \\
K_{ix} &= K_{iz} A_{i\tau}^{-1} A_{i\tau} + K_{ig} P_{is} - (I_{r_i} + \\
&\quad K_{iz} A_{i\tau}^{-1} B_{i\tau}) R_{i\tau}^{-1} D_{i\tau}. \quad (22)
\end{aligned}$$

这里:  $I_{r_i}$  为  $r_i$  阶单位矩阵,  $P_{if}$  和  $P_{is}$  分别为 Riccati 方程(10) 和

$$A_{i\tau}^T P_{is} + P_{is} A_{i\tau} - P_{is} S_{i0} P_{is} + Q_{i\tau} = 0 \quad (23)$$

的唯一正定解,  $P_{iw}$  为 Sylvester 矩阵方程

$$(P_{is} S_{i0} - A_{i\tau}^T) P_{iw} - P_{iw} G_i = P_{is} H_i \quad (24)$$

的唯一解.  $g_i^{(j)}(t)$  和  $x_i^{(j)}(t)$  满足以下向量微分方程:

$$\begin{aligned}
\dot{g}_i^{(j)}(t) &= \\
&\quad (S_{i0} P_{is} - A_{i\tau}^T) g_i^{(j)}(t) - j P_{is} [A_{i0} x^{(j-1)}(t) + \\
&\quad C_{i0} x_i^{(j-1)}(t - \tau_i)] - \nabla_i^{(j)}(t), \\
g_i^{(j)}(0) &= 0, j = 1, 2, \dots, g_i^{(0)}(t) = 0, t > 0. \quad (25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_i^{(j)}(t) &= \\
&\quad (A_{i\tau} - S_{i0} P_{is}) x_i^{(j)}(t) - S_{i0}^{(j)} g_i^{(j)}(t) + x_i^{(j)}(t) + \\
&\quad [1 - \text{sgn}(j)] (H_i - S_{i0} P_{iw}) w_i(t), 0 < t < t_f; \\
x_i^{(j)}(t) &= 0, j = 1, 2, \dots; \\
x_i^{(0)}(t) &= x_i(t), \tau_i = 0. \quad (26)
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
x^{(j)} &= [(x_1^T)^{(j)}, (x_2^T)^{(j)}, \dots, (x_N^T)^{(j)}]^T; \\
\nabla_i^{(j)}(t) &= \begin{cases} jC_{i0}^T [P_{is} x_i^{(j-1)}(t + \tau_i) + g_i^{(j-1)}(t + \tau_i)], \\ 0 < t - \tau_i < t_f, j > 0; \\ 0, t_f - \tau_i < t < t_f, j > 0. \end{cases} \quad (27)
\end{aligned}$$

证明 令

$$x_i^{(j)}(t) = P_{is} x_i^{(j)}(t) + [1 - \text{sgn}(j)] P_{iw} w_i(t) + g_i^{(j)}(t). \quad (28)$$

其中:  $g_i^{(j)}(t) \in R^{n_i} (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots)$  为待求的共态向量, 且  $g_i^{(0)}(t) = 0$ ;  $P_{is}$  为 Riccati 方程 (23) 的唯一正定解.

由式 (28) 和 (19) 可得

$$\begin{aligned} u_s^{(j)}(t) &= \\ & [ (u_{1s}^{(j)}(t))^T, \dots, (u_{is}^{(j)}(t))^T, \dots, (u_{Ns}^{(j)}(t))^T ]^T, \\ u_{is}^{(j)}(t) &= \\ & - R_{is}^{-1} [ (D_{is} + B_{i0}^T P_{is}) x_i^{(j)}(t) + B_{i0}^T g_i^{(j)}(t) ] - \\ & [ 1 - \text{sgn}(j) ] R_{is}^{-1} B_{i0}^T P_{iw} w_i(t), \\ & i = 1, 2, \dots, N, j = 0, 1 \dots \end{aligned} \quad (29)$$

进一步可得第  $j$  阶的状态方程 (26). 将式 (28) 代入 (18), 结合式 (23) 和 (26), 可得 Sylvester 方程 (24) 及共态向量方程 (25).

根据线性系统的调节器理论, 对任意  $\lambda_i \in (A_{is} - S_{i0} P_{is})$ , 有  $\text{Re } \lambda_i < 0$  成立. 由条件 2) 可知, 对任意  $\mu_i \in (G_i)$ , 有  $\text{Re } \mu_i > 0$  成立. 其中  $(\cdot)$  表示矩阵的谱. 从而对于任意  $\lambda_i \in (A_{is} - S_{i0} P_{is})$  和  $\mu_i \in (G_i)$ , 不等式  $\lambda_i + \mu_i < 0$  成立. 由矩阵理论可知, Sylvester 代数方程 (24) 有唯一解  $P_{iw}$ . 另外, 定理 1 的条件 1) 保证了代数 Riccati 方程 (10) 和 (23) 解的存在唯一性. 于是, 由式 (16), (17) 和 (29) 可得

$$\begin{aligned} u_s(t) &= [ u_{1s}^T(t), \dots, u_{is}^T(t), \dots, u_{Ns}^T(t) ]^T, \\ u_{is}(t) &= - R_{is}^{-1} (D_{is} + B_{i0}^T P_{is}) x_{is}(t) - \\ & R_{is}^{-1} B_{i0}^T P_{iw} w_i(t) - R_{is}^{-1} B_{i0}^T \sum_{j=1}^{\infty} \frac{g_i^{(j)}(t)}{j!}, \\ & i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (30)$$

进一步, 结合快组合子系统的最优控制律  $u_f(t)$  可直接得到原系统的 FFCC 律 (21).

### 3.3 扰动观测器及物理可实现问题

FFCC 律 (21) 因包含外系统的状态变量  $w_i(t)$  而物理不可实现. 下面讨论其物理可实现问题.

对于矩阵  $L_i$ , 总存在矩阵  $\bar{L}_i \in R^{(q_i - p_i) \times q_i}$  使得  $[L_i^T \ \bar{L}_i^T] \in R^{q_i \times q_i}$  非奇异. 令

$$\begin{aligned} T_i &= \begin{bmatrix} L_i \\ \bar{L}_i \end{bmatrix}^{-1} = [ T_{i1} \quad T_{i2} ], \\ T_i G_i T_i^{-1} &= \begin{bmatrix} G_{i1} & G_{i3} \\ G_{i4} & G_{i2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (31)$$

其中:  $T_{i1} \in R^{q_i \times p_i}$ ,  $G_{i1} \in R^{p_i \times p_i}$ ,  $G_{i2} \in R^{(q_i - p_i) \times (q_i - p_i)}$ ,  $G_{i3} \in R^{p_i \times (q_i - p_i)}$ ,  $G_{i4} \in R^{(q_i - p_i) \times p_i}$ .

令  $w_i = T_i \bar{w}_i$ , 则外系统 (2) 可转化为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{w}}_{i1}(t) &= G_{i1} \bar{w}_{i1}(t) + G_{i3} \bar{w}_{i2}(t), \\ \dot{\bar{w}}_{i2}(t) &= G_{i4} \bar{w}_{i1}(t) + G_{i2} \bar{w}_{i2}(t), \\ v_i(t) &= \bar{w}_{i1}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (32)$$

其中  $\bar{w}_i^T = [ \bar{w}_{i1}^T \quad \bar{w}_{i2}^T ]$ ,  $\bar{w}_{i1} \in R^{p_i}$ ,  $\bar{w}_{i2} \in R^{(q_i - p_i)}$ .

显然,  $\bar{w}_{i1}(t) = v_i(t)$ . 注意到  $L_i T_i = [L_{i1} \ 0]$ ,

且  $(G_i, L_i)$  完全可观测, 则  $(G_{i2}, G_{i3})$  亦完全可观测. 令

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= G_{i2} z_i(t) + L_{i1} v_i(t), \\ w_{i2}(t) &= z_i(t) + K_i v_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (33)$$

其中:  $z_i \in R^{q_i - p_i}$ ,  $w_{i2}(t)$  为  $\bar{w}_{i2}(t)$  的观测值,  $K_i$  为待定的增益矩阵, 且

$$\begin{aligned} G_{i2} &= G_{i2} - K_i G_{i3}, \\ L_{i1} &= G_{i2} K - K_i G_{i3} K_i + G_{i4} - K_i G_{i1}, \\ & i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (34)$$

适当选择矩阵  $K_i$ , 以保证观测器 (33) 的收敛速度和精度. 从而由式 (2), (33), (34) 及 (21), 可得动态 FFCC 律的递推式, 即

$$\begin{aligned} \dot{w}_i(t) &= T_{i2} z_i(t) + (T_{i1} + T_{i2} K_i) v_i(t), \\ u_k(t) &= [ u_{1k}^T(t), \dots, u_{ik}^T(t), \dots, u_{Nk}^T(t) ]^T, \\ u_{ik}(t) &= u_{i,k-1}(t) + \frac{K_{ik}}{k!} g_i^{(k)}(t), \quad k = 1, 2, \dots, \\ u_{i0}(t) &= K_{i2} z_i(t) + K_{i3} x_i(t) + K_{i4} x(t) + \\ & K_{i5} w_i(t) + K_{i6} x_i(t - \tau), \\ & i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (35)$$

## 4 实例仿真

考虑以下受扰奇异摄动时滞组合大系统 ( $N = 2$ ):

$$\begin{aligned} 1: & A_{111} = -1, A_{112} = -1, A_{11} = [0 \ 0.5], \\ & B_{11} = 1, C_{11} = 1, D_{11} = 0.5, A_{113} = 3, \\ & A_{114} = -1, A_{13} = [0 \ -2], B_{12} = 1, \\ & C_{12} = 0.3, D_{12} = 0, \quad x_1(t) = x_1(t - 1), \\ & -0.1 \leq t \leq 0, z_1(0) = 1, \quad w_1(0) = 0.05. \\ 2: & A_{221} = -0.8, A_{222} = 0.5, A_{21} = [0.5 \ 0], \\ & B_{21} = 2, C_{21} = 0.5, D_{21} = 1, A_{223} = -0.4, \\ & A_{224} = 0.5, A_{23} = [0.2 \ 0], B_{22} = 0.6, \\ & C_{22} = 0.2, D_{22} = 0, \quad x_2(t) = x_2(t - 0.2), \\ & -0.1 \leq t \leq 0, z_2(0) = 0.5. \end{aligned}$$

二次型性能指标泛函的权矩阵为

$$\begin{aligned} Q_{11} &= 4, Q_{13} = 5, R_1 = 5, \\ Q_{21} &= 6, Q_{23} = 3, R_2 = 3. \end{aligned}$$

外系统的系数矩阵及初值为

$$\begin{aligned} G_1 &= \begin{bmatrix} -0.1 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} -0.5 & -1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}, \\ L_1 &= L_2 = [1 \ 0], v_1(0) = -1, \\ v_2(0) &= 1. \end{aligned}$$

显然, 外系统渐近稳定. 当采用 FFCC 律 (35) 时, 不同迭代次数  $k$  对应的系统性能指标值  $J_k$  如表 1 所示. 相对误差限为 0.001, 则  $J_3 = 22.8633$  可视为系统的近似最优性能指标值. 当采用第 3 次迭代的 FFCC 律和相应的纯反馈组合控制 (FCC) 律时, 对

外部扰动抑制效果的比较曲线如图 1 ~ 图 6 所示.

表 1 性能指标值  $J_k$

$k$	0	1	2	3
$J_k$	25.210 9	23.010 6	22.872 3	22.864 4

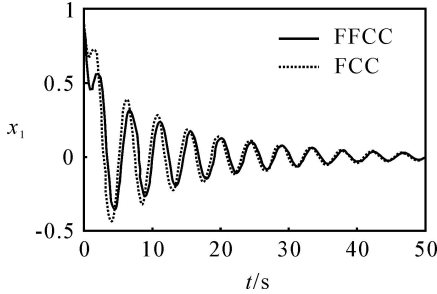


图 1 慢状态变量  $x_1$

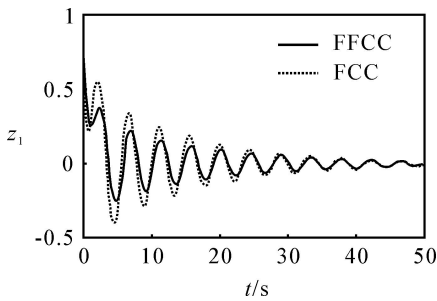


图 2 快状态变量  $z_1$

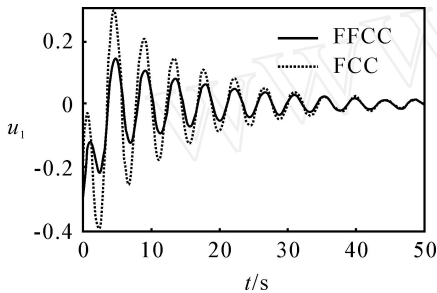


图 3 控制变量  $u_1$

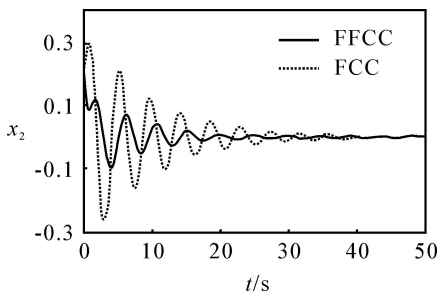


图 4 慢状态变量  $x_2$

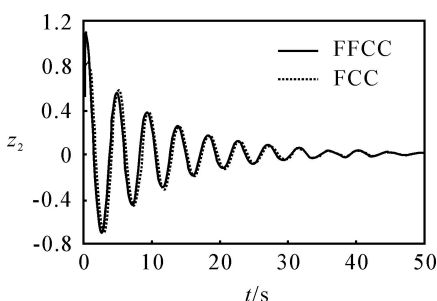


图 5 快状态变量  $z_2$

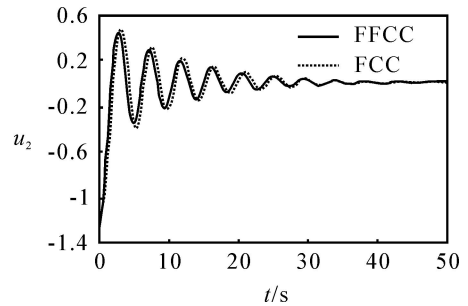


图 6 控制变量  $u_2$

由表 1 和图 1 ~ 图 6 可知,参数摄动法对求解奇异摄动时滞组合大系统的最优控制问题是有效的,且采用前馈补偿方法得到的 FFCC 律对外部扰动的抑制效果明显优于纯反馈控制律.

### 5 结 论

本文针对一类含外部扰动的奇异摄动时滞组合大系统,基于参数摄动法设计了其近似最优控制律.采用该方法,可使组合系统最优控制问题实现解耦,同时,将时滞系统的最优控制问题转化为易求解的无时滞情形.该方法计算量小,收敛速度快,且采用前馈补偿方法能有效抑制外部扰动.

### 参考文献(References)

[1] Kolmanovskiy V, Maizenberg T L. Optimal control of continuous-time linear systems with time-varying, random delay[J]. Systems and Control Letters, 2001, 44(2): 119-126.

[2] Cai G P, Huang J Z, Yang S X. An optimal control method for linear systems with time delay [J]. Computers and Structures, 2003, 81(15): 1539-1546.

[3] Tang G Y. Suboptimal control for nonlinear systems: A successive approximation approach [J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(5): 429-434.

[4] Tang G Y, Wang H H. Successive approximation approach of optimal control for nonlinear discrete-time systems[J]. Int J of Systems Science, 2005, 36(3): 153-161.

[5] Fridman E. Exact slow-fast decomposition of the nonlinear singularly perturbed optimal control problem [J]. Systems and Control Letters, 2000, 40(2): 121-131.

[6] Bidani M, Radhy N E, Bensassi B. Optimal control of discrete-time singularly perturbed systems[J]. Int J of Control, 2002, 75(13): 955-966.

[7] Glizer V Y, Fridman E.  $H^\infty$  control of linear singularly perturbed systems with small state delay [J]. J of Mathematical Analysis and Applications, 2000, 250(1): 49-85.

(下转第 1254 页)

表3 谱域原空间法实验结果

飞机类型	最短距离分类器 (256 维谱域原空间)			贝叶斯分类器 (256 维谱域原空间)		
	雅克 -42	安 -26	奖状	雅克 -42	安 -26	奖状
雅克 -42	98.25	23.25	2.75	73.25	13.00	1.25
安 -26	1.75	61.25	16.75	25.25	75.50	50.25
奖状	0.00	15.50	80.50	1.50	11.50	48.50
平均识别率 / %	80.00			65.75		

核函数. 在加权  $k$ NN 非参数 LDA 法中,  $k = 3$ ,  $\gamma = 2$ .

在贝叶斯分类器情况下, SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法的特征子空间维数为 5 维, 加权  $k$ NN 非参数 LDA 法的子空间维数为 33 维, 但前者识别率为 91%, 远高于后者的 81.5%. 在最短欧式距离分类器情况下, SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法识别率高于加权  $k$ NN 非参数 LDA 法, 前者特征子空间维数仅为 4 维, 而后者子空间维数为 150 维. 无论采用最短距离分类器还是贝叶斯分类器, 特征子空间法均优于原空间法.

采用同样数据, 最大相关系数匹配法的平均识别率为 69.667%, 自适应高斯分类器法平均识别率为 83.1667%, 这两种方法的数据维数均为 256, 识别率均低于 SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法.

相比加权  $k$ NN 非参数 LDA 法, SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法需要采用 SVM 获取每一类对的支撑向量, 但在计算类间散布矩阵时无需所有样本参与计算, 且不需计算权值. 对于 RATR, 特征提取属于离线训练, 相比原空间法, 虽然 SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法提高了离线训练的计算复杂度, 但由于大大降低了特征维数, 使得在线识别过程的计算复杂度有所降低, 提高了在线识别速度. 另外, SVM- $k$ NN 非参数 LDA 法能有效提取数据的线性可分特征, 从而显著提高了在线识别率.

## 6 结 语

HRRP 数据具有方位敏感性、平移敏感性和幅度敏感性, 使得高分辨 RATR 比较棘手. 本文提出了 SVM- $k$ NN 非参数 LDA 方法, 应用于谱域 HRRP 的特征提取. 实测数据识别结果表明, 该方法能有效提取谱域 HRRP 数据的线性可分特征, 显

著提高识别效率. 本文的工作表明, HRRP 数据在谱域原空间中的可分性表达存在较严重的冗余, 在设计分类器分类识别前有必要进行特征提取.

## 参考文献(References)

- [1] Webb A R. Gamma mixture models for target recognition[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(12): 2045-2054.
- [2] Copsey K, Webb A R. Bayesian gamma mixture model approach to radar target recognition[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2003, 39(4): 1201-1217.
- [3] Jacobs S P, O'sullivan J A. Automatic target recognition using high-resolution radar range profiles[D]. Washington: Washington University, 1999.
- [4] Van der Heiden R, Groen F C A. The box-cox metric for nearest neighbour classification improvement[J]. Pattern Recognition, 1997, 30(2): 273-279.
- [5] Belhumeur P N, Hespanha J P, Kriegman D J. Eigenfaces vs fisherfaces: Recognition using class specific linear projection[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7): 711-720.
- [6] Chakrabarti S, Roy S, Soundalgekar M. Fast and accurate text classification via multiple linear discriminant projections[J]. Very Large Databases J, 2003, 12(2): 170-185.
- [7] Dudoit S, Fridlyand J, Speed T P. Comparison of discrimination methods for the classification of tumors using gene expression data[J]. J of American Statistical Association, 2002, 97(457): 77-87.
- [8] Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition[M]. Boston: Academic Press, 1990.
- [9] Anil K Jain, Robert P W Duin, Mao Jianchang. Statistical pattern recognition: A review[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(1): 4-37.
- [10] Yu Hua, Yang Jie. A direct LDA algorithm for high-dimensional data-with application to face recognition[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(10): 2067-2070.
- [11] Xing Meng-dao, Bao Zheng. The properties of range profiles of aircraft[J]. Chinese J of Electronics, 2002, 11(1): 1-6.

(上接第 1249 页)

- [8] Tang G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear systems with sinusoidal disturbances[J]. High Technology Letters, 2001, 7(4): 16-19.
- [9] Ma H, Tang G Y, Zhao Y D. Feedforward and feedback optimal control for offshore structures

subjected to irregular wave forces [J]. Ocean Engineering, 2006, 33(8/9): 1105-1117.

- [10] Tang G Y, Xie N. Sensitivity approach to optimal control for affine nonlinear discrete-time systems[J]. Asian J of Control, 2005, 7(4): 448-454.