第 20 卷第 1 期
2003 年 2 月

控制理论与应用
Control Theory & Applications

Vol.20 No.1
Feb. 2003

文章编号：1000－8152(2003)01－0121－04

具有小时滞的线性大系统的次优控制

唐功友，王 芳
（中国海洋大学 计算机系，山东 青岛 266003）

摘要：研究具有小时滞的线性大系统的次优控制问题.首先将子系统状态向量增量和子系统耦合项视为大系统附加扰动输入.再利用无滞后转换法的思想结合微分方程的逐次逼近法，将一个既含有时滞项又含有超前项的高阶两点边值问题分解为若干个解耦的、既不含时滞项又不含超前项的低阶两点边值问题族.最后用最优控制的有限次逼近结果作为大系统的次优控制律.对小时滞线性大系统而言，利用此方法可使计算次优控制律的迭代次数大大减少，因此该方法尤其适合于具有小时滞的线性大系统的次优控制器设计.

关键词：大系统；时滞系统；最优控制；次优控制；无滞后转换法
中图分类号：TP13　　**文献标识码**：A

Suboptimal control for linear large-scale systems with small time-delay

TANG Gong-you, WANG Fang
(Department of Computer Science, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: The suboptimal control for linear large-scale systems with small time-delay is studied. First, all the increments of state terms and interconnected terms among subsystems are considered as additional disturbances. Then by using the non-delay transformation approach and the successive approximation method of differential equations, we transform a higher order two-point boundary value problem with time-delay and time-advance terms into a group of decoupled lower order ones without time-delay and time-advance terms. Finally, the definite iterative values of optimal solutions are taken as a suboptimal control law for the large-scale system. For the linear large-scale systems with small time-delay, iterative times computing suboptimal control law can be greatly reduced. Therefore, this approach is specially suited for the suboptimal controller design for the linear large-scale systems with small time-delay.

Key words: large-scale systems; time-delay systems; optimal control; suboptimal control; non-delay transformation approach

1 引言(Introduction)

由于现代科学日趋信息化和系统化，涉及到复杂大系统的问题越来越多[1~3].时滞大系统控制问题是大系统理论中很重要又非常难解决的课题之一.对状态变量具有时滞的系统，由于其最优控制问题往往导致求解既包含时滞项又包含超前项的两点边值问题[1,2]，所以无论是解析解还是数字解都是困难的.为避免求解最优控制律的困难，近年来有人研究时滞系统的保性能控制[4,5].这种控制算法可以保证性能指标收敛，但不能保证性能指标值尽量小.从而追求时滞大系统的次优控制不失为一个可选的途径[1,5].目前对时滞系统次优控制的研究方法主要有灵敏度法[1,5,6]、奇异摄动法[1,7]、无滞后转换法[1,5,8]及李雅普诺夫泛函法等[1,9].本文研究状态具有小时滞的线性定常大系统的次优控制问题.首先在大系统中引入状态向量的增量，将该增量和子系统间的耦合项当作附加扰动输入.从而将大系统分解为 N 个具有附加扰动输入的解耦子系统.然后利用无滞后转换法的思想结合微分方程的逐次逼近法将既含有时滞项又含有超前项的高阶两点边值问题化为 N 个解耦的且不含时滞项和超前项的低阶两点边值问题族.最后用最优控制的有限次逼近结果作为大系统的次优控制律.对于具有小时滞的线性大系统，利用此方法可使计算次优控制律的迭代次数大大减少，因此该方法尤其适合于子系统关联项具有小时滞的线性大系统的次优控制器设计.

收稿日期：2001－04－03；收修改稿日期：2002－03－13.
基金项目：国家自然科学基金(60074001)；山东省自然科学基金(Y2000G02)资助项目.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑可分解为 N 个子系统的线性时滞大系统,第 i 个子系统用下列微分差分方程描述

$$\begin{cases}\dot{x}_i(t)=A_{ii}x_i(t)+A_ix(t)+B_iu_i(t)+C_ix_i(t-\tau),\\ \qquad t>0,\\ x_i(t)=\varphi_i(t),\ -\tau\leqslant t\leqslant 0,\ i=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{1}$$

其中 $x_i\in\mathbb{R}^{n_i}$, $u_i\in\mathbb{R}^{r_i}$ 分别为第 i 个子系统的状态和控制向量, $\varphi_i(t)$ 为初始函数向量, $A_i=[A_{i1},\cdots,A_{i\,i-1},0,A_{i\,i+1},\cdots,A_{iN}]$, A_{ij}, B_i, 和 C_i 为适当维数的常量矩阵, $\tau>0$ 是较小的时滞项, $\sum_{i=1}^{N}n_i=n$, $\sum_{i=1}^{N}r_i=r$. 问题是要寻找 $u^*(t)$, 使得性能指标 $J=\sum_{i=1}^{N}J_i$ 取得极小值. 这里

$$J_i=\frac{1}{2}\{x_i^{\mathrm{T}}(t_f)F_ix_i(t_f)+\int_0^{t_f}[x_i^{\mathrm{T}}(t)Q_ix_i(t)+u_i^{\mathrm{T}}(t)R_iu_i(t)]\mathrm{d}t\}. \tag{2}$$

其中 F_i 和 Q_i 为半正定矩阵, R_i 为正定矩阵. 假定大系统(1)和性能指标(2)满足线性最优调节器问题解的条件. 系统最优性的必要条件导致下列两点边值问题

$$\begin{cases}\dot{x}_i(t)=A_{ii}x_i(t)+A_ix(t)+C_ix_i(t-\tau)+B_iu_i(t),\\ \qquad 0<t\leqslant t_f,\\ -\dot{\lambda}_i(t)=\begin{cases}Q_ix_i(t)+A_{ii}^{\mathrm{T}}\lambda_i(t)+C_i^{\mathrm{T}}\lambda_i(t+\tau),\\ \qquad\qquad 0<t\leqslant t_f-\tau,\\ Q_ix_i(t)+A_{ii}^{\mathrm{T}}\lambda_i(t),\ t_f-\tau<t\leqslant t_f,\end{cases}\\ R_iu_i(t)+B_i^{\mathrm{T}}\lambda_i(t)=0,\ 0<t\leqslant t_f,\ i=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{3}$$

边界函数为

$$\begin{cases}x_i(t)=\varphi_i(t),\ -\tau\leqslant t\leqslant 0,\\ \lambda_i(t_f)=F_ix_i(t_f),\ i=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{4}$$

(3)和(4)是 N 个互联的既含滞后项又含超前项的两点边值问题,此类问题无论是解析解还是数值解都是非常困难的[1,5]. 由式(3)的第一式得

$$u_i(t)=-R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}\lambda_i(t),\ i=1,2,\cdots,N. \tag{5}$$

将问题(3)变形为

$$\begin{cases}-\dot{\lambda}_i(t)=Q_ix_i(t)+\bar{A}_i^{\mathrm{T}}\lambda_i(t)+C_i^{\mathrm{T}}\Delta\lambda_i(t+\tau),\\ \dot{x}_i(t)=\bar{A}_ix_i(t)+A_ix(t)-S_i\lambda_i(t)-C_i\Delta x_i(t),\\ 0<t\leqslant t_f,\ i=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\bar{A}_i=A_{ii}+C_i,\ S_i=B_iR_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}},$$

$$\Delta\lambda_i(t+\tau)=\begin{cases}\lambda_i(t+\tau)-\lambda_i(t),\ 0<t\leqslant t_f-\tau,\\ -\lambda_i(t),\qquad t_f-\tau<t\leqslant t_f,\end{cases}$$

$$\Delta x_i(t)=x_i(t)-x_i(t-\tau).$$

由于已假设 τ 值较小,因此 $\|\Delta\lambda_i\|$ 和 $\|\Delta x_i\|$ 一般相对也较小. 可暂将 $\Delta\lambda_i(t+\tau)$ 和 $\Delta x_i(t)$ 视为扰动. $A_{ij}x_j(i,j=1,2,\cdots,N,j\neq i)$ 是子系统间的关联项,如果再将该项视为扰动,则问题(6)被分解为不含时滞项和超前项的 N 个解耦的低阶两点边值问题.

3 预备引理(Preliminary lemmas)

考虑可分解为 N 个子系统的自治线性时滞大系统,第 i 个子系统为

$$\begin{cases}\dot{x}_i(t)=A_{ii}x_i(t)+A_ix(t)+C_i\Delta x_i(t),\ t>0,\\ x_i(t)=\varphi_i(t),\ -\tau\leqslant t\leqslant 0,\ i=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{7}$$

令 $\Phi_i(t)=\exp(A_{ii}t)$, 定义向量函数序列 $\{x_i^k(t)\}$ 为

$$\begin{cases}x_i^0(t)=\Phi_i(t)\varphi_i(0),\ t>0,\\ x_i^k(t)=\Phi_i(t)\varphi_i(0)+\int_0^t\Phi_i(t-r)[\hat{A}_ix_i^{k-1}(r)+\\ \qquad C_i\Delta x_i^{k-1}(r)]\mathrm{d}r,\ t>0,\\ x_i^k(t)=\varphi_i(t),\ -\tau\leqslant t\leqslant 0,\\ i=1,2,\cdots,N,\ k=0,1,2,\cdots.\end{cases} \tag{8}$$

引理 1 在区间 $t\in[0,t_f]$, 序列(8)一致收敛于大系统(7)的解.

证 将大系统(7)表示为紧凑形式

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=A_dx(t)+\hat{A}x(t)+C\Delta x(t),\ t>0,\\ x(t)=\varphi(t),\qquad -\tau\leqslant t\leqslant 0.\end{cases} \tag{9}$$

其中

$$A_d=\mathrm{blockdiag}(A_{ii}),\ \hat{A}=\mathrm{block}[A_{ij}]_{N\times N}-A_d,$$

$$C=\mathrm{blockdiag}(C_i),$$

$$x=[x_1^{\mathrm{T}},x_2^{\mathrm{T}},\cdots,x_N^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},\ \varphi=[\varphi_1^{\mathrm{T}},\varphi_2^{\mathrm{T}},\cdots,\varphi_N^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}.$$

将式(8)写为如下形式

$$\begin{cases}x^0(t)=\Phi_d(t)\varphi(0),\ t>0,\\ x^k(t)=\Phi_d(t)\varphi(0)+\int_0^t\Phi_d(t-r)[\hat{A}x^{k-1}(r)+\\ \qquad C\Delta x^{k-1}(r)]\mathrm{d}r,\ t>0,\ k=1,2,\cdots,\\ x^k(t)=\varphi(t),\ -\tau\leqslant t\leqslant 0,\ k=0,1,2,\cdots.\end{cases} \tag{10}$$

这里 $\Phi_d(t)=\mathrm{blockdiag}\{\Phi_i(t)\}$. 令

$$L=\sup_{t\in[-\tau,0]}\|\varphi(t)\|,\ M=\sup_{t\in[-\tau,t_f]}\|\Phi_d(t)\|,$$

$$N_a = \| \hat{A} \|, \; N_c = \| C \|.$$

选 $\Phi_d(\cdot)$ 的范数,使得 $\| \Phi_d(0) \| = \| I \| = 1$,即有 $M \geqslant 1$. 所以

$$\begin{aligned}
&\| x^1(t) - x^0(t) \| = \\
&\| \int_0^t \Phi_d(t-r)[(\hat{A} + C)\Phi_d(r)\varphi(0) - \\
&Cx^0(r\tau) \| \mathrm{d}r \| \leqslant \\
&M^2(N_a + N_c)Lt + MN_cL\tau + M^2N_cL(t-\tau) \leqslant \\
&LM^2(N_a + 2N_c)t,\; 0 < t \leqslant t_f,
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
&\| x^2(t) - x^1(t) \| \leqslant \\
&M(N_a + N_c)[\int_0^t \| x^1(r) - x^0(r) \| \mathrm{d}r + \\
&N_c\int_\tau^t \| x^1(r-\tau) - x^0(r-\tau) \| \mathrm{d}r] \leqslant \\
&LM^3(N_a + 2N_c)\left[(N_a + N_c)\frac{t^2}{2!} + N_c\frac{(t-\tau)^2}{2!}\right] \leqslant \\
&LM^3(N_a + 2N_c)^2\frac{t^2}{2!},\; 0 < t \leqslant t_f.
\end{aligned} \tag{12}$$

同理可得

$$\begin{cases}
\| x^k(t) - x^{k-1}(t) \| \leqslant LM^{k+1}(N_a + 2N_c)^k\dfrac{t^k}{k!}, \\
0 < t \leqslant t_f.
\end{cases} \tag{13}$$

由三角不等式知,对任意的 j, 有

$$\begin{cases}
\| x^{k+j}(t) - x^k(t) \| \leqslant \\
\displaystyle\sum_{i=k+1}^{k+j}\frac{t^i}{i!}LM^{i+1}(N_a + 2N_c)^i \leqslant \\
\dfrac{[M(N_a + 2N_c)t]^{k+1}}{(k+1)!}LM\exp[M(N_a + 2N_c)t], \\
0 < t \leqslant t_f,
\end{cases} \tag{14}$$

所以 $\{x_k(t)\}$ 是 $C^n[-\tau, t_f]$ 中的 Cauchy 序列,即这个序列是一致收敛的.由于 j 是任意的,所以这个序列的极限是系统(9)的解.引理证毕.

4 主要结果(Main results)

现构造下列两点边值问题族

$$\begin{cases}
-\dot{\lambda}_i^k(t) = Q_ix_i^k(t) + \bar{A}_i^{\mathrm{T}}\lambda_i^k(t) + C_i^{\mathrm{T}}\Delta\lambda_i^{k-1}(t+\tau), \\
\dot{x}_i^k(t) = \bar{A}_ix_i^k(t) + A_ix^{k-1} - S_i\lambda_i^k(t) - C_i\Delta x_i^{k-1}(t), \\
0 < t \leqslant t_f,\; i = 1,2,\cdots,N,\; k = 1,2,\cdots.
\end{cases} \tag{15}$$

边界函数为

$$\begin{cases}
x_i^k(t) = \varphi_i(t),\; -\tau \leqslant t \leqslant 0, \\
\lambda_i^k(t_f) = F_ix_i(t_f),\; i = 1,2,\cdots,N,\; k = 1,2,\cdots.
\end{cases} \tag{16}$$

其中

$$\begin{cases}
\Delta\lambda_i^0(t) = 0,\; \Delta x_i^0(t) = 0, \\
\Delta\lambda_i^k(t+\tau) = \begin{cases} \lambda_i^k(t+\tau) - \lambda_i^k(t), & 0 < t \leqslant t_f - \tau, \\ -\lambda_i^k(t), & t_f - \tau < t \leqslant t_f, \end{cases} \\
\Delta x_i^k(t) = x_i^k(t) - x_i^k(t-\tau), \\
0 < t \leqslant t_f,\; i = 1,2,\cdots,N,\; k = 1,2,\cdots.
\end{cases} \tag{17}$$

并构造相应的控制序列

$$u_i^k(t) = -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}\lambda_i^k(t),\; i = 1,2,\cdots,N,\; k = 1,2,3,\cdots. \tag{18}$$

对固定的 k,问题(15) ~ (17) 是 N 个解耦的、无时滞和超前项的非齐次两点边值问题.

定理 1 满足两点边值问题族(15) ~ (18) 的解序列 $\{x_i^k(t)\}$ 和 $\{u_i^k(t)\}$ 分别一致收敛于由式(1)和式(2) 给出的优化问题的最优状态轨线 $x_i^*(t)$ 和最优控制律 $u_i^*(t)$.

证 设

$$\begin{cases}
\lambda_i^k(t) = P_i(t)x_i^k(t) + g_i^k(t), \\
0 < t \leqslant t_f,\; i = 1,2,\cdots,N,\; k = 1,2,\cdots.
\end{cases} \tag{19}$$

其中 $P_i(t)$ 是待定的正定时变矩阵,由 $\lambda_i^k(t_f) = F_ix_i(t_f)$ 可知 $g_i^k(t_f) = 0$, 再由式(19)可得

$$\Delta\lambda_i^k(t) = P_i(t)\Delta x_i^k(t) + \Delta g_i^k(t),\; 0 < t \leqslant t_f. \tag{20}$$

将式(19)两边求导数,将式(20)和(15)的第二式代入可得

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_i^k(t) = {} & [\dot{P}_i(t) + P_i(t)\bar{A}_i - P_i(t)S_iP_i(t)]x_i^k(t) - \\
& P_i(t)C_i\Delta x_i^{k-1}(t) + P_i(t)A_ix^{k-1} - \\
& P_i(t)S_ig_i^k(t) + \dot{g}_i^k(t),\; 0 < t \leqslant t_f.
\end{aligned} \tag{21}$$

又将式(19),式(20)代入式(15)的第一式,得到

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_i^k(t) = {} & -(Q_i + \bar{A}_i^{\mathrm{T}}P_i(t))x_i^k(t) - \bar{A}_i^{\mathrm{T}}g_i^k(t) - \\
& C_i^{\mathrm{T}}[P_i(t)\Delta x_i^{k-1}(t+\tau) + \Delta g_i^{k-1}(t+\tau)].
\end{aligned} \tag{22}$$

其中

$$\Delta g_i^k(t+\tau) = \begin{cases} g_i^k(t+\tau) - g_i^k(t),\; 0 < t \leqslant t_f - \tau, \\ -g_i^k(t), \qquad t_f - \tau < t \leqslant t_f. \end{cases}$$

比较式(21)、式(22)得 Riccati 矩阵微分方程

$$\begin{cases}
-\dot{P}_i(t) = P_i(t)\bar{A}_i + \bar{A}_i^{\mathrm{T}}P_i(t) - P_i(t)S_iP_i(t) + Q_i, \\
\qquad 0 \leqslant t < t_f, \\
P_i(t_f) = F_i,
\end{cases} \tag{23}$$

及共态方程

$$\begin{cases} \dot{g}_i^k(t) = [-\bar{A}_i^{\mathrm{T}} + P_i(t)S_i]g_i^k(t) + P_i(t)C_i\Delta x_i^{k-1}(t) - \\ \qquad P_i(t)A_ix^{k-1}(t) - C_i^{\mathrm{T}}[P_i(t)\Delta x_i^{k-1}(t+\tau) + \\ \qquad \Delta g_i^{k-1}(t+\tau)],\ 0 \leqslant t < t_f, \\ g_i^k(t_f) = 0,\ k = 1,2,3,\cdots. \end{cases} \tag{24}$$

从式(23)中可求出正定矩阵 $P_i(t)$,代入式(24),可以通过反向积分解出 $g_i^k(t)$. 将式(19)代入式(18)得到第 k 次逼近的最优控制

$$u_i^k(t) = -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}[P_i(t)x_i^k(t) + g_i^k(t)]. \tag{25}$$

将式(25)代入式(15)的第二式可以得到第 k 次逼近的最优闭环系统

$$\dot{x}_i^k(t) = (\bar{A}_i - S_iP_i(t))x_i^k(t) + A_ix^{k-1}(t) - S_ig_i^k(t) - C_i\Delta x_i^{k-1}(t),\ 0 < t \leqslant t_f. \tag{26}$$

由引理1可知,式(24)和式(26)的解序列 $\{g_i^k(t)\}$, $\{x_i^k(t)\}$ 是一致收敛的,故 $\{u_i^k(t)\}$ 也是收敛的. 记 $g_i(t)$ 和 $u_i(t)$ 分别是序列 $\{g_i^k(t)\}$ 和 $\{u_i^k(t)\}$ 的极限,所以序列 $\{x_i^k(t)\}$ 的极限 $x_i(t)$ 是最优控制问题(1)和(2)的最优状态轨线. 由此得到最优控制律为

$$u_i^*(t) = -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}[P_i(t)x_i(t) + g_i(t)],\quad i = 1,2,\cdots,N. \tag{27}$$

定理证毕.

事实上求得当 $k \to \infty$ 时式(25)的解析解几乎是不可能的. 如果在式(25)使 k 充分大,则会充分接近最优控制结果. 在实际应用中可按如下算法寻求次优控制. 由式(25)得

$$\begin{aligned} u_i^*(t) &= -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}\lim_{k\to\infty}[P_i(t)x_i^k(t) + g_i^k(t)] = \\ &\quad -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}[P_i(t)x_i(t) + \lim_{k\to\infty}g_i^k(t)]. \end{aligned} \tag{28}$$

在式(28)中,用 m 取代 ∞ 则得到另一种控制律的 m 次逼近表达方式

$$\bar{u}_i^m(t) = -R_i^{-1}B_i^{\mathrm{T}}[P_ix_i(t) + g_i^m(t)],\ i = 1,2,\cdots,N. \tag{29}$$

注意到在式(29)中的第一项中的 $x_i(t)$ 是 $k \to \infty$ 时的精确解,只有其第二项 $g_i^m(t)$ 为第 m 次近似解. 因此,式(29)比式(25)更接近最优解. 次优控制律是这样确定的,P_i 由式(23)一次性求出,按 $m = 1,2,\cdots$ 顺序由式(24)求出 $g_i^m(t)$,代入式(29)求出 $u_i^m(t)$,并计算 $\Delta_m = |J_{m-1} - J_m|$. 给定 $\varepsilon > 0$ 和正整数 K,当 $\Delta_{m+k} < \varepsilon, k = 0,1,\cdots,K$,则 $\bar{u}_i^m(t)$ 则为(1)的次优控制律.

对于一般低阶时滞系统应用此方法作的系统仿真结果及曲线见文献[8].

5 结论(Conclusions)

本文的理论贡献总结如下: i) 在具有小时滞的大系统的子系统中引入状态向量的增量,将该增量和子系统间的耦合项当作附加扰动输入,从而将大系统分解为 N 个具有附加扰动输入的解耦子系统. ii) 利用无滞后转换法的思想结合微分方程的逐次逼近法将既含有时滞项又含有超前项的高阶两点边值问题化为个解耦的且不含时滞项和超前项的低阶两点边值问题族. iii) 给出了子系统的次优控制律的具体算法.

对于同样精度的次优控制律而言,利用该文的方法其计算的迭代次数将随着时滞量的增大而增加. 因此本文的方法特别适合于具有状态小时滞的线性大系统的次优控制器设计.

参考文献(References):

[1] LIU Y Q, TANG G Y. *Theory and Application of Large-Scale Dynamic Systems: Delays, Stability and Control* [M]. Guangzhou: The South China University of Technology Press, 1992 (in Chinese).

[2] JAMSHIDI M. *Large-Scale Systems: Modeling and Control* [M]. New York: North-Holland, 1983.

[3] SILJAK D. *Large-Scale Dynamic Systems: Stability and Structure* [M]. New York: North-Holland, 1978.

[4] LI Huaizhong. NICULESCU S I, DUGARD L, et al. Robust guaranteed cost control of uncertain linear time-delay systems using dynamic output feedback [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1998, 45(3/4):349 - 358.

[5] MALEK-ZAVAREI M, JAMSHIDI M. *Time-Delay Systems* [M]. New York: North-Holland, 1987.

[6] TANG Gongyou, LUO Zhiwei. Suboptimal control of linear systems with state time-delay [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics* [C].[s.l.]:[s.n.],1999,104 - 109.

[7] MOHEIMANI S O R, PETERSEN I R. Optimal guaranteed cost control of a class of uncertain time-delay systems [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 1997, 144(2):183 - 188.

[8] WANG Fang, TANG Gongyou. Non-delay transformation approach of suboptimal control for linear systems with small time-delay [J]. *J of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(2):281 - 286 (in Chinese).

[9] TANG Gongyou, FU Peilin. A suboptimal control approach of linear time-delay systems [A]. *14th IFAC World Congress* [C]. Beijing: [s.n.],1999,99 - 104.

作者简介:

唐功友 (1953 —),男,博士,教授,博士生导师. 研究方向为大系统理论与应用,时滞系统的分析与综合,计算机控制等. Email: gtang@mail.ouc.edu.cn;

王 芳 (1975 —),女,中国海洋大学硕士研究生. 研究方向为大系统理论与应用,时滞系统的分析与综合,计算机控制等.