

文章编号: 1001-0920(2006)04-0440-05

离散时滞系统的近似最优扰动抑制

唐功友, 孙慧影

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266071)

摘 要: 研究了状态变量含有时滞的离散系统在外部扰动下的最优控制问题. 通过引入一个灵敏度参数, 将原系统的最优扰动抑制问题转化为一族不含超前项和时滞项的两点边值问题, 并由此导出了最优扰动抑制控制器的迭代近似设计方法. 得到的最优扰动抑制控制律由解析的前馈-反馈项和伴随向量级数和形式的补偿项组成, 截取伴随向量级数的有限和得到原系统的次优扰动抑制控制律. 数值仿真表明该近似最优控制器对外部持续扰动具有良好的鲁棒性.

关键词: 离散系统; 时滞; 扰动抑制; 最优控制; 前馈控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Approximate Optimal Disturbance Rejection for Discrete Time-delay Systems

TANG Gong-you, SUN Hui-ying

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266071, China. Correspondent: TANG Gong-you, E-mail: gtang@ouc.edu.cn)

Abstract: The optimal control for discrete time-delay system with additive disturbances is considered. By introducing a sensitivity parameter, the original optimal disturbance rejection problem is transformed into a series of two-point boundary value problem without delay or advance terms. An iterative approximate design approach of the optimal disturbance rejection controller is derived. The optimal disturbance rejection control law obtained consists of feedforward and feedback terms and a compensation term that is the sum of the infinite series of the adjoint vectors. Using a finite sum of the series of the adjoint vectors gives a suboptimal disturbance rejection control law. A simulation example shows the optimal controller designed is robust with respect to the additive persistent disturbances.

Key words: Discrete-time systems; Time-delay; Disturbance rejection; Optimal control; Feedforward control

1 引 言

严格地讲,任何系统都存在时滞现象.时滞系统的最优控制问题是较重要的研究领域,所以一直受到科技工作者的重视^[1, 2].虽然离散时滞系统可以通过扩维方法将原系统等效为无时滞的高阶系统,但对于时滞较大或阶数较高的系统,其最优控制律设计的计算量将按几何指数规律增长,即导致所谓“维数灾难”问题.因此,扩维方法仅适合于时滞不大且原系统阶数较小的系统.

一般的系统都是在外界持续干扰力作用下工作的.除了完全未知动态的外部扰动外,还有一类已知动态特性(但可能未知初始条件)的外部扰动.如阶跃扰动,斜坡扰动,正弦扰动和周期扰动等.具有这类扰动的系统有广泛的应用背景.例如对于飞机飞行振动控制系统,机翼承受的风剪应力的干扰^[3];海洋结构物承受风力或规则波海浪的正弦干扰力作用^[4]等.如果用无扰动的初值问题最优控制方法设计受扰系统,得到的控制律不是最优的,且设计的控

收稿日期: 2005-02-16; 修回日期: 2005-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574023); 山东省自然科学基金项目(Z2005G01).

作者简介: 唐功友(1953—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,从事非线性系统、时滞系统和大系统理论与应用等研究; 孙慧影(1974—),女,哈尔滨人,博士生,从事非线性及时滞系统控制理论与应用的研究.

制律对外部扰动影响的鲁棒性较差^[5]。因此研究在外界持续扰动作用下系统的最优控制问题有非常重要的理论与实际意义。

对时滞系统直接求二次型性能指标的最优控制, 其最优线性调节器问题往往导致求解既含有时滞项又含有超前项的两点边值问题^[2]。该问题无论求精确解还是数值解都较为困难, 因此人们不断寻求近似最优控制策略以避免求最优控制律的困难。在时滞系统和非线性系统最优控制近似方法研究方面, 近年来取得了若干成果。常见的方法包括求解 Hamilton-jacobi-bellman (HJB) 方程的逐次 Galerkin 逼近方法^[6]和状态依赖 Riccati 方程的迭代方法^[7]等。这些方法都是要迭代求解矩阵 HJB 方程。最近 Tang 等^[2, 8]提出了一种逐次逼近方法, 该方法只需迭代求解伴随向量方程, 避免了求解矩阵 HJB 方程的麻烦。

本文研究了状态变量含有时滞的线性离散系统在外扰动下的最优控制问题, 提出一种最优扰动抑制控制器的迭代近似设计方法。引进一个灵敏度参数并在其原点附近展开 Maclaurin 级数, 将原系统的最优扰动抑制问题简化为求解一个无时滞最优控制律的无穷级数问题, 并证明用此近似方法设计最优扰动抑制控制器存在的唯一性, 由此导出受扰线性离散时滞系统最优扰动抑制的迭代设计算法。数值仿真表明该近似设计方法对外部持续扰动具有良好的鲁棒性。

2 问题描述

考虑下列带扰动的离散时滞系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + A_1x(k-\tau) + \\ &\quad Bu(k) + Dv(k), \\ x(k) &= \Phi(k), k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 是状态变量; $u \in R^r$ 是控制输入; $v \in R^m$ 为外部扰动; A, A_1, B, D 是具有适当维数的常量矩阵; $\tau > 0$ 是正整数时滞项; $\Phi(k)$ 是初始函数向量。假设 v 的动态特性由外系统

$$v(k+1) = Gv(k) \quad (2)$$

确定, 其中 G 是 $m \times m$ 常量矩阵。假设矩阵 G 的特征值 $z_i(G)$ 满足

$$|z_i(G)| < 1, i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

且在单位圆上的特征值为矩阵 G 的最小多项式的单根。

注 1 假设 (3) 表明, 外系统 (2) 是稳定的但不一定是渐近稳定的。对于无限时域性能指标的最优控制问题, 假设 (3) 是必要的。否则, 扰动分量中将至少有一个趋向于无穷大, 无限时域性能指标的最优控制的性能指标将趋向于无穷大。

对于矩阵 G 至少有一个单位特征值时, 持续外部扰动 v 将趋向于等幅振荡, 其状态向量 x 和控制向量 u 至少有一个不趋于零, 从而对系统的最优控制问题, 如果选择通常的无限时域二次型性能指标, 其性能指标函数是不收敛的。在这种情况下, 一般可选取如下形式的平均二次型性能指标:

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)], \quad (4)$$

其中: $Q \in R^{n \times n}$ 是半正定矩阵, $R \in R^{r \times r}$ 是正定矩阵。对于外系统 (2) 为渐近稳定的情形, 可选取常规的无限时域二次型性能指标

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)], \quad (5)$$

系统的最优控制问题是寻找最优控制律 $u^*(k)$, 使 J 在约束 (4) 或 (5) 下取最小值。对于由 (4) 和 (5) 描述的性能指标而言, 其最优控制律的形式和推导过程是相同的。

系统 (1) 关于性能指标 (4) 或 (5) 的最优控制问题的必要条件导致求解下列两点边值问题:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + A_1x(k-\tau) - \\ &\quad BR^{-1}B^T\lambda(k+1) + Dv(k), \\ \lambda(k) &= Qx(k) + A^T\lambda(k+1) + \\ &\quad A_1^T\lambda(k+\tau+1), \\ x(k) &= \Phi(k), k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ \lambda(-\tau) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

系统的最优控制律可以用下式描述:

$$u^*(k) = -R^{-1}B^T\lambda(k+1). \quad (7)$$

注 2 问题 (6) 是一个既含有共态向量超前项 $\lambda(k+\tau+1)$ 和状态向量时滞项 $x(k-\tau)$ 又含有外部扰动向量 $v(k)$ 的非齐次两点边值问题, 对这一问题无论是求精确解还是求数值解都是非常困难的。因此, 研究这类系统最优控制问题的近似解是很有意义的课题。

3 前馈 - 反馈最优控制器的设计

针对系统 (1) 关于性能指标 (4) 或 (5) 的最优控制问题提出一种利用级数和近似求解前馈 - 反馈最优控制的灵敏度设计方法。仿效 (6) 和 (7) 构造下列含有灵敏度参数 ϵ 的两点边值问题:

$$\begin{aligned} x(k+1, \epsilon) &= Ax(k, \epsilon) + A_1x(k-\tau, \epsilon) - \\ &\quad BR^{-1}B^T\lambda(k+1, \epsilon) + Dv(k), \\ \lambda(k, \epsilon) &= Qx(k, \epsilon) + A^T\lambda(k+1, \epsilon) + \\ &\quad A_1^T\lambda(k+\tau+1, \epsilon), \\ x(k, \epsilon) &= \Phi(k), k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ \lambda(-\tau, \epsilon) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

和控制律

$$u(k, \epsilon) = -R^{-1}B^T\lambda(k+1, \epsilon). \quad (9)$$

其中 $0 < \epsilon < 1$ 是与 k 无关的实标量灵敏度参数. 显然, 两点边值问题(8)和控制律(9)在 $\epsilon=1$ 处的解分别等价于原最优控制问题的两点边值问题(6)和最优控制律(7). 假设 $u(k, \epsilon), x(k, \epsilon), \lambda(k, \epsilon)$ 在 $\epsilon=0$ 处关于 ϵ 无限可微, 则它们关于 ϵ 的 Maclaurin 级数展开式为

$$\begin{aligned} u(k, \epsilon) &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\epsilon^i}{i!} u^{(i)}(k), \\ x(k, \epsilon) &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\epsilon^i}{i!} x^{(i)}(k), \\ \lambda(k, \epsilon) &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\epsilon^i}{i!} \lambda^{(i)}(k). \end{aligned} \quad (10)$$

其中 (i) 表示在 $\epsilon=0$ 处关于 ϵ 的 i 阶偏导数. 在以下的讨论中, 总是假设上述各级数在 $\epsilon=1$ 处收敛. 将式(10)代入(8), 并令等式两边无穷级数和中 ϵ 的同次项对应相等, 可得以下两点边值问题族:

$$\begin{aligned} x^{(0)}(k+1) &= Ax^{(0)}(k) - BR^{-1}B^T\lambda^{(0)}(k+1) + Dv(k), \\ \lambda^{(0)}(k) &= Qx^{(0)}(k) + A^T\lambda^{(0)}(k+1), \\ x^{(0)}(k) &= \Phi(k), k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ \lambda^{(0)}(\cdot) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

和

$$\begin{aligned} x^{(i)}(k+1) &= Ax^{(i)}(k) - BR^{-1}B^T\lambda^{(i)}(k+1) + \\ &+ iAx^{(i-1)}(k-\tau), \\ \lambda^{(i)}(k) &= Qx^{(i)}(k) + A^T\lambda^{(i)}(k+1) + \\ &+ iA^T\lambda^{(i-1)}(k+1+\tau), \\ x^{(i)}(k) &= 0, k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ \lambda^{(i)}(\cdot) &= 0, i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

将式(10)代入(9), 可以得到控制律 $u^{(i)}$ 的表达式为

$$u^{(i)}(k) = -R^{-1}B^T\lambda^{(i)}(k+1), \quad i = 0, 1, \dots \quad (13)$$

原问题的最优控制律 $u^*(k)$ 可以通过计算出 $u^{(i)}(k)$, 由 $u(k, 1)$ 的无限和得到, 即

$$u^*(k) = u(k, 1) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} u^{(i)}(k). \quad (14)$$

注3 由(11)和(12)描述的两点边值问题族在第 i 次迭代式中只包含了第 $i-1$ 次迭代的时滞项和超前项. 其中第 $i-1$ 次各项在第 i 次迭代式中是已知的激励项, 所以它是一族既无超前项又无时滞项的两点边值问题族.

对原最优控制问题导致的由式(11)和(12)描述的两点边值问题族及由此得到的最优控制律, 给出以下结果:

定理1 考虑由式(1), (2)描述的受扰离散时

滞系统关于性能指标(4)或(5)的最优控制问题. 假设 (A, B) 完全可控, (A, C) 完全可观测, 这里 C 为满秩矩阵, 由 $Q = C^TC$ 定义, 则前馈-反馈最优控制律存在且唯一. 最优控制律可表示为

$$u^*(k) = -SB^T[PAx(k) + PA_1x(k-\tau) + (PD + P_1G)v(k) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} g_i(k+1)]. \quad (15)$$

其中: $S = (R + B^TPB)^{-1}$; P 是下列 Riccati 矩阵方程的唯一正定解:

$$A^TPTA - P + Q = 0, \quad (16)$$

$T = I - BSB^TP$; P_1 是下列 Stein 矩阵方程的唯一解:

$$A^TT^TP_1G - P_1 = -A^TPTD. \quad (17)$$

第 i 阶伴随向量 g_i 由下式求得:

$$\begin{aligned} g_i(k) &= [A^TT^T]^m [iA^TPTA_1x^{(i-1)}(k-\tau+m) + \\ &+ iA^TPx^{(i-1)}(k+1+\tau+m) + \\ &+ iA^Tg_{i-1}(k+1+\tau+m)], \\ & \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (18)$$

第 i 阶状态向量 $x^{(i)}$ 由下列状态方程确定:

$$\begin{aligned} x^{(0)}(k+1) &= TAx^{(0)}(k) + (TD - BSB^TP_1G)v(k), \\ x^{(0)}(k) &= \Phi(k), k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ x^{(i)}(k+1) &= TAx^{(i)}(k) - BSB^Tg_i(k+1) + \\ &+ iTA_1x^{(i-1)}(k-\tau), \\ x^{(i)}(k) &= 0, k = -\tau, -\tau+1, \dots, 0, \\ & \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (19)$$

证明 首先讨论 $u^{(0)}(k)$ 的求法. 当 $i=0$ 时, 令

$$\lambda^{(0)}(k) = Px^{(0)}(k) + P_1v(k), \quad (20)$$

由式(13)和(20)并考虑到(11)的第1式和(2), 可以得到

$$u^{(0)}(k) = -SB^T[PAx^{(0)}(k) + (PD + P_1G)v(k)]. \quad (21)$$

再由式(11)第1式及(21), (13), 得到(19)的第1式. 将(19)的第1式代入(20), 得到

$$\lambda^{(0)}(k+1) = PTAx^{(0)}(k) + T^T(PD + P_1G)v(k). \quad (22)$$

将(22)代入(11)的第2式, 得到

$$\lambda^{(0)}(k) = (Q + A^TPTA)x^{(0)}(k) + A^TT^T(PD + P_1G)v(k). \quad (23)$$

比较式(20)和(23)的右边, 考虑到对任意的 $x^{(0)}(k)$ 和 $v(k)$, 式(23)均成立, 从而可以得到求解

矩阵 P 和 P_1 的 Riccati 矩阵方程(16) 和 Stein 矩阵方程(17). 由 (A, B) 完全可控和 (A, C) 完全可观测的假设条件可知, 代数 Riccati 方程(16) 有唯一正定解 P . 可以知道^[9], 对具有适当维数的已知矩阵 \bar{A}, \bar{B} 和 Γ , Stein 矩阵方程 $\bar{B}\bar{X}\bar{A}^T - X = \Gamma$ 有唯一解 X 的充分必要条件是

$$\lambda(\bar{A})\lambda(\bar{B}) \neq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

由线性离散系统最优控制理论可知, 矩阵 TA 是渐近稳定的, 即

$$|\lambda(TA)| = |\lambda(A^T T^T)| < 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

又根据已知条件(3) 有

$$\lambda(A^T T^T)\lambda(G) \neq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n. \quad (25)$$

所以 Stein 矩阵方程(17) 有唯一解 P_1 .

下面递推计算 $u^{(i)}(k) (i = 1, 2, \dots)$. 令

$$\lambda^{(i)}(k) = Px^{(i)}(k) + g_i(k), \quad (26)$$

由式(12) 的第 1 式, (13) 和(26), 得到

$$u^{(i)}(k) = -SB^T[PAx^{(i)}(k) + iPA_1x^{(i-1)}(k - \tau) + g_i(k + 1)], \quad (27)$$

再由式(12) 的第 1 式, (13) 和(27) 得到(19) 的第 3 式 将(19) 的第 3 式代入(26), 得到

$$\lambda^{(i)}(k + 1) = PTAx^{(i)}(k) + T^Tg_i(k + 1) + iPTA_1x^{(i-1)}(k - \tau). \quad (28)$$

由式(12) 的第 2 式和(26), (28) 得到

$$\lambda^{(i)}(k) = Qx^{(i)}(k) + A^T[PTAx^{(i)}(k) + T^Tg_i(k + 1) + iPTA_1x^{(i-1)}(k - \tau)] + iA^T[Px^{(i-1)}(k + 1 + \tau) + g_{i-1}(k + 1 + \tau)] \quad (29)$$

由式(26), (29) 两式右边相等并注意(16) 得到 i 阶伴随向量差分方程

$$g_i(k) = A^T T^T g_i(k + 1) + iA^T PTA_1 x^{(i-1)}(k - \tau) + iA^T P x^{(i-1)}(k + 1 + \tau) + iA^T g_{i-1}(k + 1 + \tau). \quad (30)$$

同时应该注意到系统(1) 中存在由(2) 确定的持续扰动 $v(k)$, 且 $\lim_k v(k)$ 可能不为零或不存在(如 $v(k)$ 可能趋于等幅震荡). 但因为外系统(2) 是稳定的(未必是渐近稳定的), 所以 $\lim_k v(k)$ 一定是有界的. 由最优控制理论可知, 无限时域最优控制闭环系统是渐近稳定的, 所以当 $v(k) \rightarrow 0$ 时, $x^{(i)}(k)$ 一定是有界的. 由(12) 的最后 1 式及(26) 得

$$g_i(k) = -Px^{(i)}(k), \quad (31)$$

从而有

$$\lim_k g_i(k) < \eta \quad (32)$$

其中 η 是某个与 $v(k)$ 相关的正常数. 对(30) 求反向差分可以得到

$$g_i(k) = \lim_k (A^T T^T)^m g_i(m) + (A^T T^T)^m [iA^T PTA_1 x^{(i-1)}(k - \tau + m) + iA^T P x^{(i-1)}(k + 1 + \tau + m) + iA^T g_{i-1}(k + 1 + \tau + m)] \quad (33)$$

注意到式(24) 有

$$\lim_k (A^T T^T)^m = 0 \quad (34)$$

从而可以得到如(18) 描述的第 i 阶伴随向量的解. 再将(21) 和(27) 代入(14) 得到系统(1) 的前馈-反馈最优控制律(15).

4 前馈-反馈最优控制器的近似算法

在实际控制系统的前馈-反馈最优控制律设计中,

$\frac{1}{i!}g_i(k + 1)$ 几乎是不可能精确求出的, 只能在最优控制律(15) 最后一项中截取级数的前 M 项和来近似其精确最优控制律, 得到系统(1) 的 M 阶前馈-反馈次优控制律

$$u_M(k) = -SB^T[PAx(k) + PA_1x(k - \tau) + (PD + P_1G)v(k) + \sum_{i=1}^M \frac{1}{i!}g_i(k + 1)] \quad (35)$$

由式(35) 可知, 等号右边的前 3 项是最优控制组成部分的精确解, 近似解只是第 4 项. 所以, 如果第 4 项数值相对较小或 g_i 衰减较快, 则次优控制律(35) 在较小的迭加次数 M 时就可以逼近最优控制. 由(35) 可以得到求解 M 阶次优跟踪控制律的递推算算法

$$u_0(k) = -SB^T[PAx(k) + PA_1x(k - \tau) + (PD + P_1G)v(k)],$$

$$u_i(k) = u_{i-1}(k) - \frac{1}{i!}SB^Tg_i(k + 1), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (36)$$

针对具体系统, 求取级数近似解的项数 M 可以根据一定的误差标准确定. 下面根据性能指标的相对精度标准给出一种求解 M 阶次优跟踪控制律的实用算法:

算法 1 (次优跟踪控制律(36) 的计算过程)

Step 1: 分别由式(16) 和(17) 求出 P 和 P_1 , 给定 $\sigma > 0$, 由(36) 的第 1 式得到 $u_0(k)$, 令 $i = 0$,

表1 迭代次数*i*和对应的性能指标 J_i 及控制精度

<i>i</i>	0	1	2	3	4	5	6
J_i	172.70	117.06	109.47	109.16	108.90	108.87	108.87
$ \frac{J_{i-1}-J_i}{J_i} $	-	0.475	0.069	0.003	0.002	0.0003	0

$J_{i-1} =$;

Step2: 将 $u_i(k)$ 代入系统(1) 得到闭环系统的状态向量 $x(k)$, J_i 为

$$J_i = \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u_i^T(k)Ru_i(k)]; \quad (37)$$

Step3: 若 $|(J_{i-1} - J_i)/J_i| < \sigma$, 则令 $M = i$, 输出 $u_M(k)$, 结束, 否则转至 Step4;

Step4: 令 $i = i + 1$, 由 (18) 求出 $g_i(k)$, 代入 (36) 求出 $u_i(k)$, 转至 Step2

5 实例仿真

考虑由系统(1) 描述的二阶离散时滞系统, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.2 & 1 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.3 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}, \tau = 4,$$

$$x(k) = [0 \ 0]^T, k = -4, -3, \dots, 0$$

扰动由外系统(2) 描述, 其中

$$G = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.745 \\ -0.5 & 0.8 \end{bmatrix}, v(0) = [0 \ 2]^T.$$

选取性能指标(5), 其中 $Q = I, R = 1$.

图1 给出仿真曲线, 表1 给出了不同迭代次数对应的性能指标值及控制精度. 从图1 和表1 中可以看出随着迭代次数增加, 前馈-反馈次优控制的性能不断提高. 表1 中的数据显示 $J_0 > J_1 > J_2 > \dots > J_6$, 即性能指标值随着迭代次数增加而减小, 并趋于一个稳定的最优性能指标 J^* . 若预先取定 $\delta = 0.01$, 则有 $|(J_2 - J_3)/J_3| = 0.003 < \delta$. 当 $i = 3$ 时, J_3 满足控制精度要求. 因此可以认为 $u_3(k)$ 为最优控制律.

6 结论

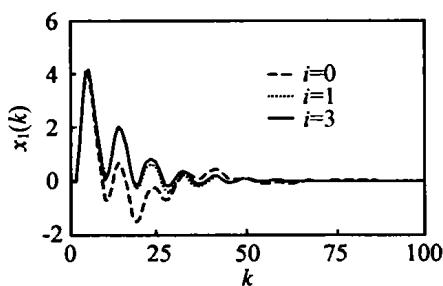
本文对在外外部确定扰动下状态变量含有时滞的离散线性系统提出了一种最优扰动抑制的近似设计方法. 给出了近似最优扰动抑制控制器的设计过程, 并给出了一种实际的次优扰动抑制控制器设计的有效算法. 仿真结果表明近似最优控制律算法实现简单, 收敛于最优控制的速度较快, 设计的扰动抑制控制器对外部持续扰动具有良好的鲁棒性.

参考文献 (References)

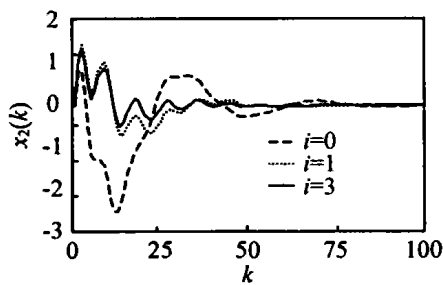
[1] Huang C M, Tsai J S H, Provence R S, et al. The Observer-based Linear Quadratic Sub-optimal Digital Tracker for Analog Systems with Input and State Delays [J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2003, 24(4): 197-236

[2] Tang G Y, Wang H H. Suboptimal Control for Discrete Linear Systems with Time-delay: A Successive Approximation Approach [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(3): 419-426

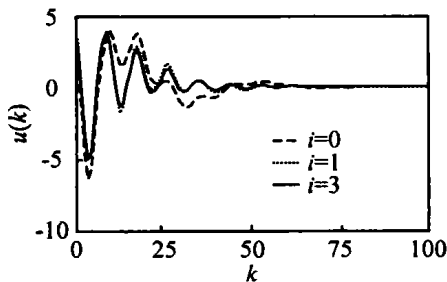
[3] Cao Y, Chen Y, Yuan K, et al. Nonlinear Inverse Dynamics Control of the Aircraft in the Presence of Wind-shear [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2004, 76(6): 592-599



(a) 状态变量 $x_1(k)$ 曲线



(b) 状态变量 $x_2(k)$ 曲线



(c) 控制律 u 曲线

图1 仿真曲线

(下转第448页)

供应链时滞内,这种对订货价格的敏感性表现产品供给定价的非线性机制而且,随着 E_s 的增大,相图的满映射减少,导致混沌运动的相空间拉伸、压缩和折叠机制减缓,预测效果会越来越好。在 $|E_d| > E_s$ 条件下,上游企业产品供应量对产品订货价格敏感程度小于下游企业需求量对上游企业供给价格的敏感程度,所以,产品供给定价对供给价格弹性和需求价格弹性具有较强的敏感依赖性。产品供给价格对初始状态引入的不确定性具有放大作用,系统状态的相邻轨迹随时间偏离的程度增大,最大Lyapunov指数较大,混沌价格预测的精度较低。同理,随着 E_s 的增大,最大Lyapunov指数越来越小,混沌价格预测的精度越来越高。混沌吸引子作为混沌系统的特征之一,体现了混沌系统的规律性。利用混沌吸引子规则的、有形的轨迹进行短期预测不仅可以避免预测的人为主观性,而且能够提高预测的精度和可信度。

参考文献(References)

- [1] Howe W G, Cox J F. Enterprise Implications of Transfer Pricing[J]. *Production and Inventory Management J*, 1994, 35(2): 35-38
- [2] Rajan A, Rakesh, Steinberg R. Dynamic Pricing and Ordering Decisions by a Monopolist[J]. *Management Science*, 1992, 38(2): 240-262
- [3] Balvers, Ronald J, Cosimano. Actively Learning About Demand and Dynamics of Price Adjustment[J]. *The Economic J*, 1990, 23(9): 882-898
- [4] Bradford, John W, Sugrue. A Bayesian Approach to the Two-period Style-goods Inventory Problem with Single Replenishment and Heterogeneous Poisson Demand[J]. *J of the Operational Research Society*, 1990, 41(3): 211-218
- [5] Murray G R, Silver E A. A Bayesian Analysis of the Style-goods Inventory Problem [J]. *Management Science*, 1966, 13(12): 785-797
- [6] Hausman W H, Peterson R. Multiproduct Production Scheduling for Style-goods with Limited Capacity, Forecast Revisions and Terminal Delivery [J]. *Management Science*, 1972, 18(7): 370-383
- [7] James T, Treharne, Charles R Sox. Adaptive Inventory Control for Nonstationary Demand and Partial Information [J]. *Management Science*, 2002, 48(5): 607-624
- [8] Lode Li. Information Sharing in a Supply Chain with Horizontal Competition[J]. *Management Science*, 2002, 48(9): 1196-1212
- [9] 唐小我, 曾勇, 李仕明. 管理经济分析——理论与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000: 36-44
(Tang X W, Zeng Y, Li S M. *An Analysis on Managerial Economics — Theories and Applications* [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2000: 36-44)
- [10] Chiarella C. The Elements of a Nonlinear Theory of Economic Dynamics[A]. *Lecture Notes in Economics and Mathematical System* [C]. New York: Springer-Verlag, 1991: 343-347.
- [11] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 27-46
(Lv J H, Lu J A, Chen S H. *Analyze on the Chaotic Time Series and Its Applications* [M]. Wuhan: University of Wuhan Publisher, 2002: 27-46)

(上接第 444 页)

- [4] Wang W, Tang G Y. Feedback and Feedforward Optimal Control for Offshore Jacket Platforms[J]. *China Ocean Engineering*, 2004, 18(4): 515-526
- [5] Lindquist A, Yakubovich V A. Optimal Damping of Forced Oscillations in Discrete-time Systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(6): 786-802
- [6] Beard R W, Mclain T W. Successive Galerkin Approximation Algorithms for Nonlinear Optimal and Robust Control[J]. *Int J of Control*, 1998, 71(5): 717-743
- [7] Cimen T, Banks S P. Nonlinear Optimal Tracking Control with Application to Super-tankers for Autopilot Design[J]. *Automatica*, 2004, 40(11): 1845-1863
- [8] Tang G Y. Suboptimal Control for Nonlinear Systems: A Successive Approximation Approach [J]. *Systems and Control Letters*, 2005, 54(5): 429-434
- [9] Klein A, Spreij P. On Stein's Equation, Vandemonde Matrices and Fisher's Information Matrix of Time Series Processes Part I: The Autoregressive Moving Average Process[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2001, 329(1-3): 9-47.