

文章编号: 1001-0920(2009)06-0862-05

离散线性信息融合最优跟踪控制

甄子洋, 王志胜, 王道波

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 提出一种有限时间离散线性最优跟踪控制问题的新解法))) 信息融合估计解法. 基于信息融合估计理论, 推导出协状态融合滤波方程和控制量融合估计值, 由此获得最优融合控制律及二次性能指标最小值. 从理论上证明了信息融合估计解法与传统解法的等同性. 从信息融合的角度建立了有限时间离散线性最优跟踪控制系统, 从而统一了最优控制问题和最优估计问题. 电机系统的控制仿真结果验证了该解法的有效性以及与传统解法的等同性.

关键词: 离散线性系统; 最优跟踪控制; 信息融合; 最优估计

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Discrete linear information fusion optimal tracking control

ZHEN Zi2yang, WANG Zhi2sheng, WANG Dao2bo

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China.

Correspondent: ZHEN Zi2yang, E2mail: zhenziyang@nuaa.edu.cn)

Abstract: For the optimal tracking control problem of finite time discrete linear system, a new solving method based on information fusion estimation is presented in this paper. Based on the theory of information fusion estimation, a fusion filter of the α state and a fusion estimator of the control variable are derived. Then the optimal fusion control law and the minimum value of quadratic performance index are obtained. Furthermore, the equal principle between the proposed solving method and the traditional solving method is proved. An optimal tracking control system is built up from the perspective of information fusion, which unifies the optimal control problem and the optimal estimation problem. Control simulation results of a motor system verify the effectiveness of the proposed solving method and the equal principle with the traditional solving method.

Key words: Discrete linear system; Optimal tracking control; Information fusion; Optimal estimation

1 引言

离散最优跟踪控制问题的传统解法主要有极大值原理法、动态规划法、李雅普诺夫法和矩阵配方法等^[1]. 然而, 传统解法的推导过程较繁琐, 且不适用于非线性系统的推广应用.

信息融合的主要思想是利用计算机技术, 对多传感器信息在一定准则下加以自动分析、优化综合以完成所需的估计与决策^[2]. 文献[3]提出了统一线性数据模型以及基于加权最小二乘估计和最佳线性无偏估计的统一最优融合规则. [4]提出了线性信息的统一量测模型, 还从信息量的角度提出了基于线性均方估计的最优融合规则. [5]将信息融合估计方

法用于求解最优控制问题. [629]建立了非线性信息最优融合的封闭表达式, 进一步研究了离散非线性系统的信息融合最优预见和预测控制问题. [10]研究了未来信息无预见下的定常离散线性最优跟踪问题, 将当前参考输入和可测干扰视为系统未来输出和干扰的无限预见值, 经过集中等效融合后获得近似最优控制律.

本文利用信息融合估计方法来求解有限时间线性跟踪系统问题. 首先给出问题描述及其传统解法; 然后给出信息融合估计解法, 并证明其与传统解法的一致性; 最后构建了信息融合最优跟踪控制系统. 仿真结果验证了该解法的有效性.

收稿日期: 2008206202; **修回日期:** 2008208227.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874037); 教育部高等学校博士点科研基金项目(20070287050); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX082091Z); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ0206).

作者简介: 甄子洋(1981), 男, 浙江浦江人, 博士生, 从事信息融合估计与控制、航空仿真与控制等研究; 王道波(1957), 男, 南京人, 教授, 博士生导师, 从事无人机飞行控制、航空仿真与控制等研究.

2 有限时间线性跟踪系统问题及传统解法

设受扰被控对象的离散状态方程和输出方程分别为

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) + d(k), \quad (1)$$

$$y(k) = C(k)x(k). \quad (2)$$

式中: $x(k) \in \mathbb{R}^{n@}$ 为状态向量, $y(k) \in \mathbb{R}^{m@}$ 为输出向量, $u(k) \in \mathbb{R}^{r@}$ 为控制向量, $d(k) \in \mathbb{R}^{n@}$ 为干扰向量, $A(k) \in \mathbb{R}^{n@}$ 为状态系数矩阵, $B(k) \in \mathbb{R}^{n@}$ 为控制系数矩阵, $C(k) \in \mathbb{R}^{m@}$ 为输出系数矩阵.

控制的目的是使系统的输出跟踪期望轨迹, 即求最优控制量序列 $\{u^*(k)\}$, 使如下性能指标最小:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [y(k) - y^*(k)]^2 + \sum_{k=0}^{N-1} [u(k) + \hat{r}(k)]^2, \quad (3)$$

式中: $y^*(k) \in \mathbb{R}^{m@}$ 为期望输出向量; $S \in \mathbb{R}^{m@m}$, $Q(k) \in \mathbb{R}^{m@m}$ 为对称半正定权重矩阵; $R(k) \in \mathbb{R}^{r@}$ 为对称正定权重矩阵; N 为末端时刻.

定理 1^[1] 给定离散线性系统(1)和(2), 使性能指标(3)取最小值的最优控制序列为

$$u^*(k) = -[K(k)x(k) + v(k)], \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

且性能指标的最小值为

$$J^* = x^T(0)P(0)x(0) + g^T(0)x(0) + h(0). \quad (5)$$

式中

$$K(k) = R^{-1}(k)B^T(k)P(k+1)A(k), \quad (6)$$

$$R(k) = R(k) + B^T(k)P(k+1)B(k), \quad (7)$$

$$P(k) = C^T(k)Q(k)C(k) + A^T(k)P(k+1)A(k) - K^T(k)R(k)K(k),$$

$$P(N) = C^T(N)S(N), \quad (8)$$

$$v(k) = R^{-1}(k) \left[\frac{1}{2}B^T(k)g(k+1) + B^T(k)P(k+1)d(k) \right], \quad (9)$$

$$g(k) = -2C^T(k)Q(k)y^*(k) + A^T(k)g(k+1) + 2A^T(k)P(k+1)d(k) - 2K^T(k)R(k)v(k),$$

$$g(N) = -2C^T(N)S(N)y^*(N), \quad (10)$$

$$h(k) = h(k+1) + y^{*T}(k)Q(k)y^*(k) + d^T(k)P(k+1)d(k) + d^T(k)g(k+1) - v^T(k)R(k)v(k),$$

$$h(N) = y^{*T}(N)S(N)y^*(N). \quad (11)$$

3 信息融合估计解法

3.1 信息融合估计理论

设关于被估计量 $x \in \mathbb{R}^n$ 的统一量测模型为^[4]

$$z_i = H_i x + v_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

式中: $z_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ 为量测向量; $H_i \in \mathbb{R}^{m_i \times n}$ 为信息传递矩阵; $v_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ 为量测误差, 且

$$E[v_i] = 0, \quad E[v_i v_j^T] = \begin{cases} R_i, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

定理 2^[4] 设关于被估计量 x 的所有量测信息 $\{z_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ 由式(12)表示, 若满足 $\prod_{i=1}^m H_i^T R_i^{-1} H_i$ 为非奇异, 则 x 的最优融合估计及其信息量分别为

$$\hat{x} = \Gamma^{-1}[\hat{x}] \prod_{i=1}^m H_i^T R_i^{-1} z_i,$$

$$I[\hat{x}] = \prod_{i=1}^m I[z_i | x],$$

$$I[z_i | x] = H_i^T I[z_i] H_i, \quad I[z_i] = R_i^{-1}. \quad (13)$$

式中: $I[\hat{x}]$ 表示 \hat{x} 关于自身的信息量, $I[z_i | x]$ 表示 z_i 关于 x 的信息量, $I[z_i]$ 表示 z_i 关于自身的信息量.

信息量表征量测信息对被估计量的贡献量. 通常情况下, 信息的信息量与其方差互为倒数. 若信息量为零, 则表示该信息对估计无用; 若信息量为无穷大, 则表示该信息为确定性信息.

3.2 信息融合估计解法

3.2.1 控制量的最优融合估计

关于控制量 $u(k)$ 的信息包含以下内容:

1) 性能指标(3)中关于控制能量的软约束信息, 其量测模型及信息量分别为

$$0 = u(k) + r(k), \quad I[0 | u(k)] = R(k). \quad (14)$$

2) 假设已经获得协状态融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 及其信息量 $P(k+1)$, 结合系统状态方程(1), 得到关于控制量的软约束信息, 其量测模型及信息量为

$$\hat{x}(k+1) - A(k)x(k) - d(k) = B(k)u(k) + p(k+1), \quad I[\hat{x}(k+1) | u(k)] = B^T(k)P(k+1)B(k). \quad (15)$$

式中: $\hat{x}(k+1)$ 为协状态; $r(k)$ 为零均值、协方差为 $R^{-1}(k)$ 的白噪声; $p(k+1)$ 为零均值、协方差为 $P^{-1}(k+1)$ 的白噪声.

根据定理 2, 得到控制量的最优融合估计为

$$\hat{u}(k) = [R(k) + B^T(k)P(k+1)B(k)]^{-1} \# \{B^T(k)P(k+1)[\hat{x}(k+1) - A(k)x(k) - d(k)]\}. \quad (16)$$

下面需要求解协状态 $x(k+1)$ 的最优融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 及其信息量 $P(k+1)$.

3.2.2 协状态的最优融合滤波

关于协状态 $x(j)$ ($j = N, N-1, \dots, k-1$) 的信

息包含以下内容:

1) 性能指标(3) 中系统期望轨迹的软约束信息, 结合系统输出方程(2), 得到关于 $x(j)$ 的量测模型及其信息量为

$$\begin{aligned} y^*(j) &= y(j) + q(j) = C(j)x(j) + q(j), \\ I[y^*(j) | x(j)] &= C^T(j)Q(j)C(j). \end{aligned} \quad (17)$$

2) $(j+1)$ 时刻协状态融合估计 $\hat{x}(j+1)$ 结合系统状态方程(1) 和控制能量软约束信息表达式(14) 后, 得到关于 j 时刻协状态的软约束信息, 其量测模型及信息量为

$$\begin{aligned} \hat{x}(j+1) - d(j) &= \\ A(j)x(j) + B(j)[-r(j)] + p(j+1), \\ I[\hat{x}(j+1) | x(j)] &= \\ A^T(j)[P^{-1}(j+1) + B(j)R^{-1}(j)B^T(j)]^{-1}A(j). \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $q(j)$ 为零均值、协方差为 $Q^{-1}(j)$ 的白噪声; $p(j+1)$ 为零均值、协方差为 $P^{-1}(j+1)$ 的白噪声.

根据定理 2, 得到逆时间方向递推计算的协状态融合滤波方程为

$$\begin{aligned} \hat{x}(j) &= P^{-1}(j)\{A^T(j)[P^{-1}(j+1) + \\ & B(j)R^{-1}(j)B^T(j)]^{-1}[\hat{x}(j+1) - \\ & d(j)] + C^T(j)Q(j)y^*(j)\}, \\ P(j) &= C^T(j)Q(j)C(j) + A^T(j)[P^{-1}(j+1) + \\ & B(j)R^{-1}(j)B^T(j)]^{-1}A(j), \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $j = N, N-1, \dots, k+1$.

从性能指标(3) 可知, 在 k 时刻, 期望轨迹信息的可利用时间范围为 $[k, N]$, 干扰信息的可利用时间范围为 $[k, N-1]$, 于是有 $\hat{x}(N+1) = 0, P(N+1) = 0, d(N) = 0, Q(N) = S$. 因此, 根据式(19) 得出协状态的融合滤波初值为

$$\begin{aligned} \hat{x}(N) &= P^{-1}(N)C^T(N)Sy^*(N), \\ P(N) &= C^T(N)SC(N). \end{aligned} \quad (20)$$

实际上, 协状态融合滤波等同于协状态卡尔曼滤波. 根据卡尔曼滤波的稳定性定理可知, 当原系统(1), (2) 一致完全能控和一致完全能观时, 随着时间的推移, 协状态融合估计及其信息量将与初值的选取无关.

3.3 信息融合估计解法与传统解法的一致性

为便于比较信息融合估计解法和传统解法, 将前者进一步整理成传统解法的表达形式, 由此得到如下定理:

定理 3 对于离散线性系统(1), (2) 的最优跟踪控制问题, 使性能指标(3) 取最小值的最优融合控制序列为

$$\begin{aligned} \hat{u}(k) &= -[K(k)x(k) + v(k)], \\ k &= 0, 1, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (21)$$

且性能指标的最小值为

$$\begin{aligned} J &= x^T(0)P(0)x(0) - \\ & 2[P(0)\hat{x}(0)]^T x(0) + h(0). \end{aligned} \quad (22)$$

式中

$$K(k) = R^{-1}(k)B^T(k)P(k+1)A(k), \quad (23)$$

$$R(k) = R(k) + B^T(k)P(k+1)B(k), \quad (24)$$

$$v(k) =$$

$$-R^{-1}(k)B^T(k)P(k+1)[\hat{x}(k+1) - d(k)], \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= P^{-1}(k)\{A^T(k)[P^{-1}(k+1) + \\ & B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}[\hat{x}(k+1) - \\ & d(k)] + C^T(k)Q(k)y^*(k)\}, \\ \hat{x}(N) &= P^{-1}(N)C^T(N)Sy^*(N), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} P(k) &= C^T(k)Q(k)C(k) + A^T(k)[P^{-1}(k+1) + \\ & B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}A(k), \\ P(N) &= C^T(N)SC(N), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} h(k) &= h(k+1) + y^{*T}(k)Q(k)y^*(k) + \\ & d^T(k)P(k+1)[-2\hat{x}(k+1) + \\ & d(k)] - v^T(k)R(k)v(k), \\ h(N) &= y^{*T}(N)Sy^*(N). \end{aligned} \quad (28)$$

证明 将式(16), (19), (20) 作适当转化即可得到式(21), (23) ~ (27). 根据矩阵配方法^[1], 将性能指标函数(3) 进一步转化为

$$\begin{aligned} J &= \\ & x^T(N)C^T(N)SC(N)x(N) - \\ & 2y^{*T}(N)SC(N)x(N) + y^{*T}(N)Sy^*(N) + \\ & \sum_{k=0}^{N-1} \{x^T(k)C^T(k)Q(k)C(k)x(k) - \\ & 2y^{*T}(k)Q(k)C(k)x(k) + y^{*T}(k)Q(k)y^*(k) + \\ & u^T(k)R(k)u(k)\} = \\ & x^T(0)P(0)x(0) - 2[P(0)\hat{x}(0)]^T x(0) + \\ & h(0) + \sum_{k=0}^{N-1} \{[u(k) + K(k)x(k) + \\ & v(k)]^T R(k)[u(k) + K(k)x(k) + v(k)]\}, \end{aligned} \quad (29)$$

式中 $h(0)$ 由式(28) 计算. 将式(21) 代入(29), 即可得到式(22). t

下面讨论信息融合估计解法与传统解法之间的等价关系.

将式(6) 和(7) 代入(8), 有

$$\begin{aligned} P(k) &= \\ & C^T(k)Q(k)C(k) + A^T(k)P(k+1)A(k) - \\ & A^T(k)P(k+1)B(k)[R(k) + \\ & B^T(k)P(k+1)B(k)]^{-1}B^T(k)P(k+1)A(k) = \\ & C^T(k)Q(k)C(k) + A^T(k)[P^{-1}(k+1) + \\ & B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}A(k). \end{aligned}$$

与式(27) 比较, 有

$$P(k) = P(k), P(N) = P(N).$$

通过比较式(6), (7) 和(23), (24), 容易得出

$$K(k) = K(k), R(k) = R(k).$$

将式(6), (7) 代入(10), 得到

$$\begin{aligned} \hat{g}(k) = & -2C^T(k)Q(k)y^*(k) + A^T(k)g(k+1) + \\ & 2A^T(k)P(k+1)d(k) - 2A^T(k)P(k+1)B(k)R^{-1}(k) \left[\frac{1}{2}B^T(k)g(k+1) + \right. \\ & \left. B^T(k)P(k+1)d(k) \right] = \\ & -2C^T(k)Q(k)y^*(k) + [A^T(k) - \\ & A^T(k)P(k+1)B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]g(k+1) + \\ & 2A^T(k)[P(k+1) - P(k+1)B(k)R^{-1}(k)B^T(k)P(k+1)]d(k) = \\ & -2C^T(k)Q(k)y^*(k) + A^T(k)[P^{-1}(k+1) + \\ & B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}[P^{-1}(k+1)g(k+1) + \\ & 2A^T(k)[P^{-1}(k+1) + B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}d(k)]. \end{aligned}$$

进一步整理, 得到

$$\begin{aligned} g(k) = & A^T(k)[P^{-1}(k+1) + \\ & B(k)R^{-1}(k)B^T(k)]^{-1}[P^{-1}(k+1) \\ & 1)g(k+1) + 2d(k)] - \end{aligned}$$

$$2C^T(k)Q(k)y^*(k),$$

$$g(N) = -2C^T(N)Sy^*(N). \quad (30)$$

与式(26) 比较, 可得

$$g(k) = -2P(k)\hat{x}(k) = -2P(k)\hat{x}(k),$$

$$g(N) = -2P(N)\hat{x}(N) = -2P(N)\hat{x}(N).$$

此时, 比较式(9), (11) 和(25), (28), 容易得出

$$v(k) = v(k), h(k) = h(k).$$

因此, 容易得出

$$u^*(k) = \hat{u}(k), J^*(k) = J(k). \quad (31)$$

基于上述分析, 信息融合估计解法与传统解法所获得的最优控制律和最优性能指标值均等同. 信息融合解法引入了协状态和信息量的概念, 用其描述关于控制律所有信息的最优融合过程, 可使最优控制问题得到方便地解决.

4 有限时间离散线性信息融合最优跟踪系统

基于3.2节的推导分析可知, 信息融合最优跟踪控制系统由逆时间递推计算的协状态融合滤波器和控制量融合估计器构成, 如图1所示. 其中第j(j = N, N-1, ..., k-1) 个滤波方程如式(19), (20) 所示.

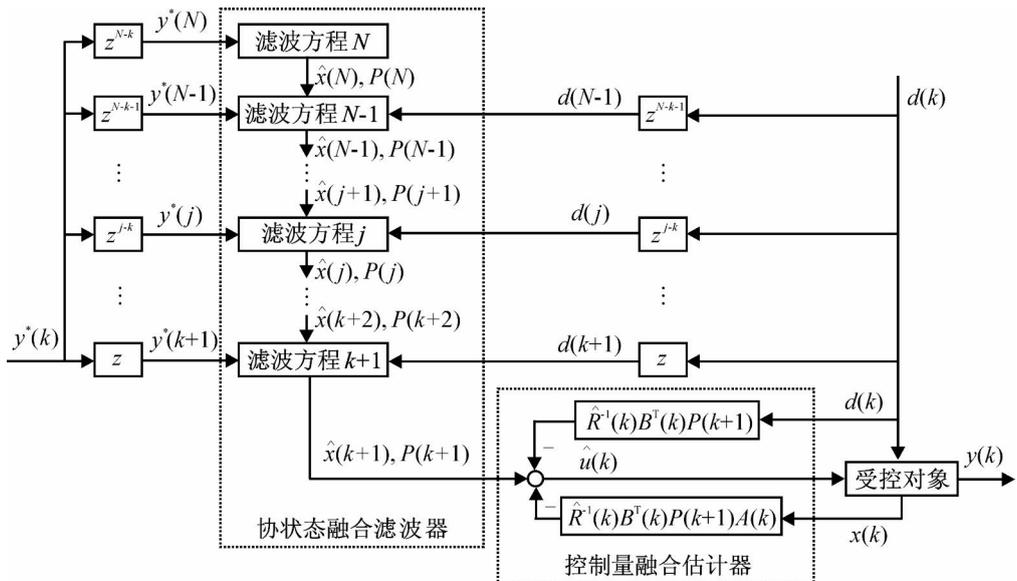


图1 信息融合最优跟踪系统

由图1可知, 对于信息融合最优跟踪系统, k时刻最优控制律 $\hat{u}(k)$ 除了与k时刻系统状态 $x(k)$ 和干扰输入 $d(k)$ 有关外, 还与将来时刻的期望输出序列 $\{y^*(j), j = N, N-1, \dots, k+1\}$ 和干扰预见序列 $\{d(j), j = N-1, N-2, \dots, k+1\}$ 有关. 在期望轨迹和未来干扰值可预见的前提下, 信息融合最优跟踪控制问题将演变为信息融合最优预见控制问题, 此时利用本文方法即可解决; 而在期望轨迹和未来干扰值不可预见的情形下, 信息融合最优跟踪控制

问题则演变为信息融合最优伺服控制问题, 此时可参考文献[9, 10]的思路, 来获得近似最优控制律.

5 仿真研究

考虑如下线性直流无刷电机系统^[10]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 1 & 9.96 @ 10^{-4} \\ 0 & 9.91 @ 10^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 4.74 @ 10^{-6} \\ 9.46 @ 10^{-3} \end{bmatrix} u(k) + \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} - & 1.25 @ 10^{-6} \\ - & 2.49 @ 10^{-3} \end{bmatrix} \mathbf{d}(k),$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}.$$

式中: 状态量 x_1, x_2 分别表示位置和速度, 控制量 u 表示驱动回路的平均电流. Matlab 仿真中, 目标位置信号取 $y^*(t) = 0.2 \sin(Pt)$, 干扰信号为 $\mathbf{d}(t) = \sin(Pt)$, 采样周期 $t_s = 0.001 \text{ s}$, 采样点数 $N = 2000$; 权重矩阵取 $S = Q = 10^4, R = 1$; 初始状态 $x_1(k) = 0, x_2(k) = 0$.

在仿真中, 根据式(3) 得到传统解法下的性能指标值 $J^* = 577.5627$, 而在本文解法下的性能指标值 $J = 581.3608$. 根据式(5) 和(22) 得到两种解法下的性能指标值均为 577.5627. 两种解法在位置跟踪误差序列和控制量序列上的仿真比较如图 2 所示.

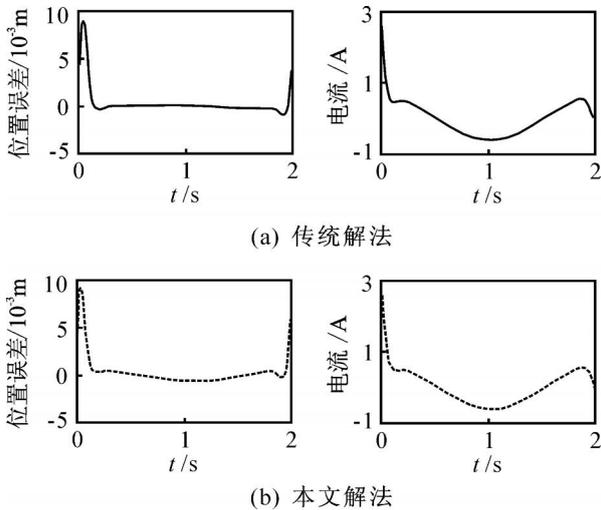


图 2 本文解法与传统解法的仿真比较

从上述仿真结果可知, 两种解法的计算结果基本一致, 其较小差别主要是由于本文解法在递推计算协方差融合估计及其信息量时存在矩阵求逆运算所带来的舍入误差引起的.

6 结 论

本文利用信息融合技术, 将最优控制问题转化为最优估计问题来解决. 推导了有限时间离散线性系统最优跟踪控制问题的信息融合估计解法, 由此获得了最优融合控制律及其性能指标最优值. 从理论上证明了本文解法与传统解法在结论上是完全一致的. 从信息融合的角度建立了最优跟踪控制系统结构, 并通过仿真验证了其有效性以及与传统解法的一致性.

本文的研究工作有助于将信息融合理论推广应用具有非线性、不确定性、时滞性、受限性等特性的离散系统最优控制问题中, 从而为求解最优控制

问题提供了一种新的思路.

参考文献(References)

- [1] 龚德恩. 离散控制系统理论引论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 2992326.
(Gong D E. Introduction of discrete control system theory[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 2992326.)
- [2] 潘泉, 于昕, 程咏梅, 等. 信息融合理论的基本方法与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29(4): 5992615.
(Pan Q, Yu X, Cheng Y M, et al. Essential methods and progress of information fusion theory [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(4): 5992615.)
- [3] Li X R, Zhu Y M, Wang J, et al. Optimal linear estimation fusion - Part I: Unified fusion rules [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(9): 21922208.
- [4] 周军, 王志胜, 周凤岐. 基于线性均方估计的数据融合理论[J]. 宇航学报, 2003, 24(4): 3642367.
(Zhou J, Wang Z S, Zhou F Q. The theory of multi2 sensor system data fusion based on linear least estimation [J]. J of Astronautics, 2003, 24(4): 3642367.)
- [5] 王志胜, 王道波. 含理想控制策略和期望轨道的最优控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 1002103.
(Wang Z S, Wang D B. Optimal control with ideal control strategy and expected trajectory [J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 1002103.)
- [6] Wang Z S, Wang D B, Zhen Z Y. Primary exploration of nonlinear information fusion control theory [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2007, 50(5): 6862696.
- [7] 王志胜. 非线性离散系统的信息融合最优预见控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(4): 3972402.
(Wang Z S. Information fusion optimal preview control for nonlinear discrete system [J]. Control and Decision, 2008, 23(4): 3972402.)
- [8] 王志胜. 时滞非线性离散动态系统最优控制的信息融合估计方法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 5382542.
(Wang Z S. Optimal control for tim2delayed nonlinear discrete system based on IFE method [J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(3): 5382542.)
- [9] 甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合最优估计的非线性离散系统预测控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(3): 3312336.
(Zhen Z Y, Wang Z S, Wang D B. Predictive control based on information fusion optimal estimation for nonlinear discrete system [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(3): 3312336.)

于 NS/D 的传递函数, $T_a = 0.1250$; 对于 OR/D 传递函数, $T_a = -0.2813$. 图 2 和图 3 为 GA 进行 OBPCS 策略搜索最小化 H_1 的过程.

然后, 进行供应链补货系统仿真和牛鞭效应计算. 需求 $D(k) \sim N(0, R^2)$, $R=1$, 且 $D(k) \times 0$. H_1 范数计算和系统仿真结果见表 2 和表 3. 仿真过程中, 式 (7a), (8a), (9a), (10a), (11a) 和式 (7b), (8b), (9b), (10b), (11b) 的 LMI 最小负定参数分别是 -0.5286 , -0.6594 , -0.0013 , -0.0298 , -0.1295 ; -0.0538 , -0.6243 , -0.063 , -0.6034 , -0.5658 . 仿真结果进一步表明 OBPCS 是最优的补货策略.

通过对两类供应链订货系统传递函数的计算和仿真, 表明了所提出的算法能有效地找到最小的 H_1 范数, 按照此时确定的参数进行供应链运作, 可使系统的波动最小, 有效抑制了牛鞭效应.

5 结 论

供应链系统的一个重要指标是牛鞭效应, 即供应链系统传递函数的 H_1 范数, 它反映了系统抑制扰动的能力. 针对这一指标, 本文根据参数不确定传递函数 H_1 保成本计算, 提出了一种参数不确定的供应链订货策略优选方法. 通过计算和仿真, 表明了所提出的方法是有效的. 进一步的工作是考虑更为复杂的系统, 如参数不确定闭环供应链系统的订货与库存策略的优选和控制问题.

参考文献(References)

- [1] Dejonckere J, Disney S M, Lambrecht M R, et al. Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chain [J]. *Int J of Production Economics*, 2002, 78(1): 133-144.
- [2] Disney J D, Towill D R. A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain [J]. *Int J of Production Research*, 2002, 40(1): 179-204.
- [3] Disney S M, Towill D R. On the bullwhip and inventory variance produced by an order policy [J]. *Int J of Management Science(OMEGA)*, 2003, 31(1): 157-167.
- [4] Jaksó M, Rusjan B. The effect of replenishment policies on the bullwhip effect: A transfer function approach [J]. *European J of Operational Research*, 2008, 184(6): 946-961.
- [5] 朱怀意, 朱道立, 胡峰. 基于不确定性的供应链风险因素分析 [J]. *中国软科学*, 2006, 20(3): 372-41. (Zhu H Y, Zhu D L, Hu F. Factor analysis of supply chain risks based on uncertainties [J]. *China Soft Science*, 2006, 20(3): 372-41.)
- [6] 周莉, 许淑君, Disney S M. 制造与再制造混合系统中库存与牛鞭效应的分析与优化 [J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(10): 1582-1591. (Zhou L, Xu S J, Disney S M. Analysis and optimization of inventory variance and bullwhip in a manufacturing/remanufacturing system [J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(10): 1582-1591.)
- [7] 王晶, 孙海燕, 李伊岚. 供应链中的不确定性信息失真及其弱化策略 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(12): 1482-1484. (Wang J, Sun H Y, Li Y L. Irregular information distortion and weakening methods in supply chains [J]. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(12): 1482-1484.)
- [8] Lalwani C S, Disney S M, Towill D R. Controllable, observable and stable state space representations of a generalized order-up-to policy [J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 101(2): 172-184.
- [9] Huang Xiaoyuan, Yan Nana, Guo Haifeng. A H_1 control method of the bullwhip effect for a class of supply chain systems [J]. *Int J of Production Research*, 2007, 45(1): 202-226.
- [10] Oliveira M C De, Geromel J C, Bernussou J. Extended H_2 and H_1 norm characterizations and controller parametrizations for discrete-time systems [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(9): 666-679.
- [11] Ogata K. *Discrete time control systems* [M]. 2nd ed. New York: Prentice Hall, 2006.

(上接第 873 页)

- [10] 甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合估计的离散系统最优跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2009, 24(1): 812-85.

(Zhen Z Y, Wang Z S, Wang D B. Discrete system

optimal tracking control based on information fusion estimation [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(1): 812-85.)