

文章编号: 100120920(2009)0120081205

基于信息融合估计的离散系统最优跟踪控制

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: 针对期望输出和未来干扰无预见的离散线性系统最优跟踪问题, 提出一种基于信息融合最优估计的控制方法. 若将当前给定值和可测干扰值分别看作系统未来输出和干扰的预见值, 则跟踪控制问题可转化为具有无限预见步数的预见控制问题, 并将无限预见信息融合成一步等效预见信息, 进而获得近似最优融合控制律. 对线性直流电机系统和宏观经济系统的仿真结果均验证了该控制器在提高系统跟踪精度和抑制干扰等方面的有效性.

关键词: 离散系统; 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 system optimal tracking control based on information fusion estimation

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 problem of the discrete system with no preview information of the desired output and disturbance, a control method based on information fusion optimal estimation is presented. The current reference input and the measurable disturbance input are respectively considered as the system preview output and the preview disturbance. Then the tracking control problem is converted into the preview control problem with infinite preview steps. Furthermore, the infinite preview information is fused into one step equivalent information. And an appropriate optimal control rule is obtained. Simulation results of a DC motor and a macroeconomic system show the effectiveness of the controller in developing the tracking precision, retaining the disturbance.

Key words: Discrete system; Tracking control; Information fusion; Optimal estimation

1 引言

所谓最优跟踪问题, 是指求解一个最优控制律, 使系统的实际输出跟踪期望输出轨线, 并使二次性能指标函数取极小值^[1]. 求解最优跟踪问题的传统方法是将其转化为最优调节问题, 但它引入了增广状态和增广矩阵. 近年来, 针对具有非线性、时滞性、受干扰和不确定性等特性的实际系统, 如何设计出有效的最优或近优控制律问题已受到众多学者的关注^[2-5].

信息融合估计主要研究在估计未知量的过程中, 如何最佳利用来自多个信息源(如多个传感器)的有用信息, 它最初主要应用于多个传感器的目标

跟踪中的航迹融合^[6]. 李晓榕^[7]和周军^[8]等提出了基于线性最小方差估计的最优融合准则. 王志胜等^[9,10]从信息融合的角度, 把期望航迹信息、系统动态信息和理想控制策略信息等均视为关于控制量的观测信息, 根据信息融合估计理论直接求出控制量的最优估计, 从而首次将二次型最优控制问题转化为最优估计问题. 然而, 许多实际系统的未来期望输出轨线往往难以事先确定. 为此, 甄子洋等^[11]将系统给定值经过前置滤波器后获得未来多步参考输出轨线信息, 由此提出了基于多步闭环滚动优化的预测控制方法.

本文针对期望输出和干扰无预见信息的跟踪系

收稿日期: 20071121; 修回日期: 20080414.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874037); 教育部博士点基金项目(20070287050); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX08B_091Z); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ08206).

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、智能航空仿真与控制等研究; 王道波(1957), 男, 河北易县人, 教授, 博士生导师, 从事无人机飞行控制、机电模拟等研究.

统问题,提出一种新的基于信息融合估计的跟踪控制方法,并通过仿真实例来验证其有效性.

2 问题描述及预备知识

2.1 最优跟踪控制问题

设受扰被控对象的离散状态方程和输出方程可表示为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k), \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k). \quad (2)$$

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

定义跟踪系统的性能指标函数为如下包含跟踪误差项和控制输入项的二次型:

$$J = \sum_{k=1}^N r(k+1) - y(k+1) + \frac{1}{2} Q(k+1) + \sum_{k=1}^N u(k) + \frac{1}{2} R(k). \quad (3)$$

式中: $r(k)$ 为期望输出向量, $Q(k) \in \mathbb{R}^{m@m}$ 为半正定权重矩阵, $R(k) \in \mathbb{R}^{r@}$ 为正定权重矩阵, N 为末端时刻.

2.2 线性信息融合估计

定理 1^[8] 设关于被估计量 $x \in \mathbb{R}^n$ 的量测统一模型为

$$z_i = H_i x + v_i, \quad i = 1 \sim N. \quad (4)$$

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

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

若 $\sum_{i=1}^N H_i^T R_i^{-1} H_i$ 为非奇异, 基于所有量测信息 $\{z_i, i = 1 \sim N\}$, 得出 x 的最优融合估计及其信息量分别表示为

$$\hat{x} = \left(\sum_{i=1}^N H_i^T R_i^{-1} H_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N H_i^T R_i^{-1} z_i, \quad (5)$$

$$I[\hat{x}] = \sum_{i=1}^N H_i^T R_i^{-1} H_i. \quad (6)$$

设 $I[\hat{x}]$ 表示最优融合估计 \hat{x} 关于被估计量 x 的信息量, $I[z_i | x]$ 表示量测 z_i 关于被估计量 x 的信息量, $I[z_i]$ 表示量测 z_i 关于自身的的信息量, 则有

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

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

称定理 1 为线性信息的统一最优融合模型.

由定理 1 可知, 最优融合估计关于被估计量的

信息量即为所有量测信息关于被估计量的信息量之和. 通常, 信息关于自身的信息量与该信息的协方差互逆.

3 输入信号可预见的最优融合跟踪控制

系统期望输出和干扰可预见时, 最优跟踪控制问题(1)~(3)即为最优预见控制问题. 若采用信息融合估计的集中算法直接求出最优控制序列, 则相当于开环控制, 且计算复杂^[9]. 为此, 下面推导基于信息融合估计的序贯算法的最优跟踪控制算法.

1) 控制量的最优融合估计. 关于 k 时刻控制量的信息表达式包括:

性能指标函数中包含的对控制能量的软约束信息表达式为

$$0 = u(k) + n(k), \quad (7)$$

式中 $n(k)$ 是零均值、协方差为 $R^{-1}(k)$ 的白噪声. 由此得出控制能量软约束信息量为 $R(k)$.

假设已经融合关于 k 时刻之后的所有信息, 并获得协状态 $x(k+1)$ 的最优融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 及其信息量 $P^{-1}(k+1)$, 则 $\hat{x}(k+1)$ 关于 $x(k+1)$ 的信息表达式为

$$\hat{x}(k+1) = x(k+1) + w(k+1), \quad (8)$$

式中 $w(k+1)$ 是零均值、协方差为 $P(k+1)$ 的白噪声. 将系统状态方程(1)代入式(8), 得到 $\hat{x}(k+1)$ 关于 $u(k)$ 的信息表达式为

$$\hat{x}(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + w(k+1), \quad (9)$$

其信息量为 $B^T P^{-1}(k+1) B$.

根据线性信息的最优融合统一模型, 得出控制量 $u(k)$ 的最优融合估计为

$$\hat{u}(k) = [R(k) + B^T P^{-1}(k+1) B]^{-1} \{B^T P^{-1}(k+1) [\hat{x}(k+1) - Ax(k) - Ed(k)]\}. \quad (10)$$

由式(10)可知, 最优控制律与协状态最优融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 及其信息量 $P^{-1}(k+1)$ 有关. 下面推导协状态的最优融合估计问题.

2) 协状态的最优融合估计. 为求解协状态的最优融合估计, 需要利用以下信息:

性能指标函数式(3)中, 系统实际输出跟踪参考输入的期望信息表达式为

$$r(k+1) = y(k+1) + m(k+1), \quad (11)$$

式中 $m(k+1)$ 是零均值、协方差为 $Q^{-1}(k+1)$ 的白噪声. 联立系统输出方程式(2), 得到 $r(k+1)$ 关于 $x(k+1)$ 的信息表达式为

$$r(k+1) = Cx(k+1) + m(k+1), \quad (12)$$

其信息量为 $C^T Q(k+1) C$.

假设已经融合关于 $(k+1)$ 时刻之后的所有信息, 得到协状态最优融合估计 $\hat{x}(k+2)$ 及其信息

量 $P^{-1}(k+2)$, 则 $\hat{x}(k+2)$ 关于 $x(k+2)$ 的信息表达式为

$$\hat{x}(k+2) = x(k+2) + w(k+2), \quad (13)$$

式中 $w(k+2)$ 是零均值、协方差为 $P(k+2)$ 的白噪声. 联立系统状态方程(1) 和控制能量软约束信息表达式(7), 得到 $\hat{x}(k+2)$ 关于 $x(k+1)$ 的信息表达式为

$$\hat{x}(k+2) = Ax(k+1) - Bn(k+1) + Ed(k+1) + w(k+2), \quad (14)$$

其信息量为 $A^T[P(k+2) + BR^{-1}(k+1)B^T]^{-1}A$.

根据信息融合估计定理, 融合式(12) 和(14), 得出协状态最优融合估计及其信息量分别为

$$\hat{x}(k+1) = P(k+1)\{A^T[P(k+2) + BR^{-1}(k+1)B^T]^{-1}\# [\hat{x}(k+2) - Ed(k+1)] + C^TQ(k+1)r(k+1)\}, \quad (15)$$

$$P^{-1}(k+1) = C^TQ(k+1)C + A^T[P(k+2) + BR^{-1}(k+1)B^T]^{-1}A. \quad (16)$$

假设未来 N 步的系统期望轨迹和干扰信息均可预见, 则 $\hat{x}(k+1)$ 和 $P^{-1}(k+1)$ 可根据式(15), (16) 进行逆时间方向迭代求解. 关于迭代初值的选取在文献[11] 中有描述.

综上所述, 式(7) ~ (16) 构成了信息融合最优预见跟踪控制算法. 然而对于多数实际系统而言, 未来期望轨迹和干扰等信息难以事先确知, 因此, 如何将信息融合技术应用于该类系统, 具有重要的研究意义. 鉴于此, 下面提出了输入信号无预见情况下的信息融合最优跟踪控制算法.

4 输入信号无预见的最优融合跟踪控制

假设把系统当前输入值视为所有未来时刻的输出预见值, 则跟踪系统问题便可利用最优融合预见控制来解决. 然而, 信息融合最优预见控制对有限预见值进行分别处理, 而信息融合最优跟踪控制的所有预见值均相等, 属于无限预见, 无须选取预见步数, 它要解决的关键问题是如何把所有未来预见值经过等效集中处理后变成一步融合预见值.

定理 2 对于跟踪系统问题(1) ~ (3), 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 给定定常权重矩阵 Q 和 R , 所有协状态最优融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 的信息量 $P^{-1}(k+1)$ 收敛于 P^{-1} , 且 P^{-1} 是如下黎卡提差分方程的解:

$$P^{-1} = C^TQC + A^T[P + BR^{-1}B^T]^{-1}A. \quad (17)$$

在满足谱半径 $QPA^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1} < 1$ 时, 协状态最优融合估计 $\hat{x}(k+1)$ 收敛于 \hat{x} , 且

$$\hat{x} = [P^{-1} - A^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}]^{-1}[-A^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}Ed(k) + C^TQr(k)]. \quad (18)$$

证明 协状态信息量的计算公式(16) 即为逆时间方向求解的矩阵黎卡提差分方程, 它具有如下性质^[1]: 当性能指标权重矩阵均为定常矩阵时, 对于任意初始的对称半正定矩阵 P_0^{-1} , 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P^{-1}(k) = P^{-1}. \quad (19)$$

式中: $k \in [k+1, K]$, K 为相当大的有限时间值. 将稳态解 P^{-1} 近似代替 $P^{-1}(k)$, 即 $P^{-1}(k) \approx P^{-1}$, 再将其代入式(16) 即可得到(17). 并且, 协状态最优融合估计的迭代公式(15) 可进一步转化为

$$\hat{x}(k+1) = \mathcal{S}\hat{x}(k) + \mathcal{H}. \quad (20)$$

式中

$$\begin{cases} \mathcal{S} = PA^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}, \\ \mathcal{H} = -PA^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}Ed(k) + PC^TQr(k). \end{cases}$$

根据数值分析中迭代法的收敛性定理, 容易得出式(20) 在满足谱半径 $Q\mathcal{S} < 1$ 时收敛, 即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \hat{x}(k) = \hat{x}. \quad (21)$$

将 $\hat{x}(k+1) \approx \hat{x}$, $\hat{x}(k) \approx \hat{x}$ 代入式(15) 即可得到式(18). \square

定理 2 对所有预见信息进行了集中处理, 得到了一步等效协状态最优融合估计及其信息量.

定理 3 跟踪系统问题(1) ~ (3) 的具有全局渐近稳定作用的近似最优控制律为

$$\hat{u}^*(k) = G_r r(k) + G_d d(k) + G_x x(k). \quad (22)$$

式中: $r(k)$ 为当前给定值, $d(k)$ 为当前干扰值, $x(k)$ 为当前状态值, G_r 为目标前馈系数, G_d 为干扰前馈系数, G_x 为状态反馈系数, 且

$$\begin{aligned} G_r &= N[P^{-1} - A^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}]^{-1}C^TQ, \\ G_d &= -N\{[P^{-1} - A^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}]^{-1}\# \\ &\quad A^T(P + BR^{-1}B^T)^{-1}E + E\}, \\ G_x &= -NA. \end{aligned}$$

式中: $N = (R + B^T P^{-1} B)^{-1} B^T P^{-1}$, P^{-1} 为黎卡提方程(17) 的解.

证明 根据定理 2, 将协状态的一步等效融合估计 \hat{x} 及其信息量 P^{-1} 代入式(10), 得到控制量 $u(k)$ 的近似最优融合估计如式(22) 所示. 并且, 跟踪系统的全状态反馈结构与最优输出调节器相同, 其动态性能与期望输出无关, 特征值与输出调节器特征值完全相同, 且是全局渐近稳定的^[1]. \square

定理 3 给出了时不变系统(1), (2) 的最优跟踪

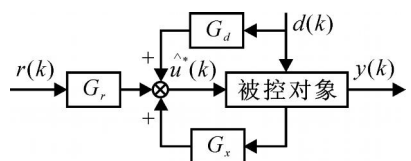


图 1 无预见信息的最优融合跟踪系统

问题(3)的近似最优控制律.由此可知,信息融合最优跟踪系统是在最优输出调节器的基础上附加了目标前馈补偿项和干扰前馈补偿项,如图1所示.

5 仿真研究

例1 线性直流电机

为验证信息融合最优跟踪控制器的有效性,考虑无芯无刷线性直流电机与驱动回路组成的线性直流电机系统作为被控对象进行仿真研究,并假设电机系统位置输出期望值和干扰值均未知.线性直流电机与旋转式伺服电机相比,具有结构简单、体积小、重量轻等特点,适合于小型、高速、高精度要求的伺服系统.因为系统是电流输入型的,所以将4个驱动回路的平均电流*i*作为系统的控制输入,状态量取为*p*(位置)和*v*(速度),其状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{p}}(t) \\ \dot{\hat{v}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_F}{M} \end{bmatrix} i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \end{bmatrix} d(t).$$

所用线性直流电机的参数值为:可动部分质量 $M = 1.82 \text{ kg}$,摩擦系数 $D = 3.48 \text{ Ns/m}$,推力系数 $K_F = 3.8 \text{ N/A}$.

按采样周期 $t_s = 0.001 \text{ s}$,将伺服电机系统的状态微分方程离散化,得到

$$\begin{bmatrix} p(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 9.96 @ 10^{-4} \\ 0 & 9.91 @ 10^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4.74 @ 10^{-6} \\ 9.46 @ 10^{-3} \end{bmatrix} i(k) + \begin{bmatrix} -1.25 @ 10^{-6} \\ -2.49 @ 10^{-3} \end{bmatrix} d(k).$$

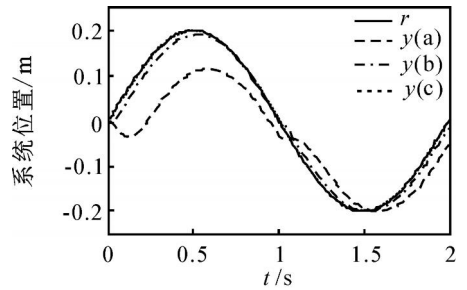
这里只对电机位置进行控制,即系统位置输出方程为

$$y(k) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} p(k) \\ v(k) \end{bmatrix}.$$

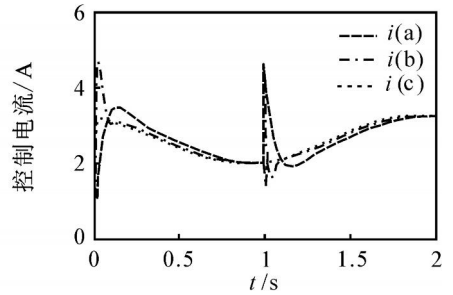
系统给定目标信号为 $r(k) = 0.2 \sin(Pkt_s)$,常值干扰输入为 $d(k) = 10$.为考察权重矩阵选取对控制性能的影响,权重矩阵取为 $R = I_{2@}$ ($I_{2@}$ 表示 $2 @ 2$ 维的单位阵),而权重矩阵 Q 分别取:(a) $Q = 10^3 I_{2@}$; (b) $Q = 10^5 I_{2@}$; (c) $Q = 10^8 I_{2@}$.

为验证近似最优控制律中干扰前馈补偿项的有效作用,在给定正弦信号为负半周期时才将其加入系统.图2表示取不同权重矩阵下的系统位置跟踪响应结果.

由图2可知:1)若系统的可操纵范围允许,则通过调节权重矩阵可使控制系统达到相当高的跟踪精度;2)在控制能量受较大约束时,干扰前馈补偿



(a) 位置跟踪



(b) 控制电流

图2 不同权重矩阵下的系统位置跟踪响应

项更能发挥补偿作用,减小跟踪误差;3)当系统可操纵范围较宽时,调节权重矩阵可使系统在没有干扰前馈补偿项时仍能保持高精度跟踪.这些充分说明了控制器具有较强的自适应能力.

例2 宏观经济系统

设某宏观经济动态系统的状态方程和输出方程为^[12]

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ed(k), \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k). \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} x(k) &= [Y(k-2) \quad Y(k-1) \quad R(k-1) \quad R(k)]^T, \\ u(k) &= [G(k) \quad M(k)]^T, \\ d(k) &= e, \quad y(k) = Y(k), \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -g & b+g & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -hdg & hd(g+b) & hda & 1+hj \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -hd & -h \end{bmatrix},$$

$$C = [-g \quad b+g \quad a \quad 0], \quad D = [1 \quad 0],$$

$$E = [0 \quad 0 \quad 0 \quad h]^T,$$

$Y(k)$ 是以货币计算的国民总需求, $G(k)$ 是政府财政支出, $M(k)$ 是货币供应量, e 是常数, $R(k)$ 是利率.以上变量的单位为亿元.

在仿真中,通过辨识得到模型参数为

$b = 0.5894$, $d = 0.1881$, $g = 1.7403$,
 $e = -513.6163$, $a = 225.8225$,
 $j = -22.4881$, $h = -0.0059$.

控制的目的是选择财政政策和货币政策, 以保持国民总需求和社会总供给的均衡. 其中社会总供给轨迹为 $Y^*(k) = \{4093.6, 4566.1, 4890.1, 5398.1, 6025.5, 7163.1, 9159, 10388, 11773.2, 14855.1, 16651.5, 17809.2, 20662.9, 25588.1, 35180.2, 45600\}$.

采用本文提出的近似最优跟踪控制律(22), 设初始状态为 $x(0) = [3095 \ 3560 \ 0 \ 0]^T$, 取 $R = I_3 \otimes I_2$, $Q = 2 \times 10^3$, 可得: 国民总需求轨迹为 $Y(k) = \{4794.4, 4785.1, 4774.8, 5169.8, 5670.6, 6812.4, 8774.3, 9416.6, 10938, 14405, 15262, 16414, 19943, 24800, 34377, 42764\}$; 政府财政支出为 $G(k) = \{1266.2, 848.68, 558.45, 515.96, 476.14, 638.78, 882.52, 462.29, 789.71, 1605, 908.49, 1060.7, 2135.1, 2752.1, 4074.5, 3478.2\}$; 货币供应量为 $M(k) = \{548.18, 159.54, 53.735, 58.831, 149.81, 262.79, 447.58, 868.64, 1117.3, 1229.1, 1759.4, 2101.1, 2107.6, 2344.8, 2962.8, 4727.6\}$.

从上述结果可知, 本文控制算法使宏观经济系统的国民总需求很好地跟踪社会总供给, 使供需水平趋于均衡, 并且本文控制算法得出的政府财政支出和货币供应量均比文献[12]给出的相应数据要小, 从而节省了政府财政开支和货币供应量.

6 结 论

本文提出了基于信息融合估计的离散线性系统最优跟踪控制方法. 将系统当前输入信息作为跟踪系统的无限预见信息, 并融合成一步等效预见信息, 从而获得计算简单的线性近似最优控制律. 仿真结果表明, 该跟踪控制方法具有抑制持续扰动、跟踪精度高等优点, 在工程上具有很好的应用前景.

参考文献(References)

[1] 胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2005: 162207.
 (Hu S S, Wang Z Q, Hu W L. Optimal control theory and systems[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005: 162207.)

[2] Kazantzis N, Krayaris C, Tseronis C, et al. Optimal controller tuning for nonlinear process[J]. Automatica, 2005, 41(1): 79286.

[3] Tang G Y, Zhao Y D, Zhang B L. Optimal output

tracking control for nonlinear systems via successive approximation approach[J]. Nonlinear Analysis, 2007, 66(6): 13621377.

- [4] Tang G Y, Zhang S M, Zhang B L. Optimal tracking control with zero steady-state error for time-delay systems with sinusoidal disturbances[J]. J of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 6332644.
- [5] Yang Y S, Wang S F. Adaptive H_2 tracking control for a class of uncertain nonlinear systems using radial basis function neural networks[J]. Neurocomputing, 2007, 70(46): 932941.
- [6] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 2312286.
 (Han C Z, Zhu H Y, Duan Z S. Information fusion from multiple sources[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2006: 2312286.)
- [7] 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.
- [8] 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 multi-sensor system data fusion based on linear least estimation[J]. J of Astronautics, 2003, 24(4): 3642367.)
- [9] 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.)
- [10] 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): 682696.
- [11] 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): 332336.
 (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): 332336.)
- [12] 黄国石. 关于宏观经济模型的一个控制策略[J]. 厦门大学学报, 1998, 37(1): 19223.
 (Huang G S. A control strategy for macroeconomic model[J]. J of Xiamen University, 1998, 37(1): 19223.)