

文章编号: 1001-0920(2006)12-1417-04

带阶跃扰动的线性时滞系统最优无静差控制

唐功友¹, 高洪伟¹, 董 瑞^{1,2}

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2 河南科学技术学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 研究线性时滞系统在阶跃扰动作用下的最优控制问题。首先基于内模原理构造扰动补偿器, 以完全消除阶跃扰动对系统的影响, 并将原系统的最优无静差扰动抑制问题转化为无扰动最优控制问题; 然后利用灵敏度方法, 求得由精确的解析项和伴随向量级数形式补偿项组成的最优控制律, 通过截取伴随向量级数的有限项和, 可得到次优无静差控制律。仿真实例验证了该方法的有效性。

关键词: 最优控制; 内模控制; 时滞; 扰动抑制; 灵敏度法

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Optimal Zero Steady-state Error Control to Step Disturbances for Linear Systems with Time-delay

TANG Gong-you¹, GAO Hong-wei¹, DONG Rui^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China. Correspondent: TANG Gong-you, Email: gtang@ouc.edu.cn)

Abstract: The optimal control for linear systems with time-delay affected by additive step disturbances is considered. Based on the internal model principle, a disturbance compensator is constructed to cancel the disturbances completely. The optimal disturbance rejection problem with zero steady-state error for time-delay systems affected by disturbances is transformed to an optimal control problem without disturbances. Then, using the sensitivity approach, the optimal control law is obtained consisting of an analytic state feedback term and a compensation term which is a series sum of the adjoint vectors. By intercepting finite sum of the adjoint vectors series, a suboptimal feedback control law with zero steady-state error is obtained. A simulation example shows the validity of the algorithm.

Key words: Optimal control; Internal model control; Time-delay; Disturbance rejection; Sensitivity approach

1 引言

控制系统通常会受到外部扰动的影响, 阶跃扰动是最常见的扰动形式之一。例如, 电力系统中电压的突然跳动, 过程控制系统中流量的突然增大或减小, 飞机姿态控制系统中遇到的常值阵风扰动^[1]等, 都可视为阶跃扰动。这些干扰不仅能使系统的工作点发生漂移, 而且会使系统的动态和稳态性能变差, 甚至造成系统失稳。在控制系统中加入前馈控制可

补偿干扰对系统输出的影响^[2], 但用前馈控制补偿干扰对系统输出的影响不是最优控制策略^[3,4], 也不能解决不稳定扰动的情形, 达到无静差最优控制的目的。

另一方面, 时滞现象广泛存在于化工过程、生物和经济等系统。时滞系统基于二次型性能指标的最优控制问题, 往往导致求解一组既含有超前项又含有时滞项的两点边值问题, 对这类问题无论求精

收稿日期: 2005-08-22; 修回日期: 2006-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574023); 山东省自然科学基金重点项目(Z2005G01); 青岛市自然科学基金项目(05-1-JC-94)。

作者简介: 唐功友(1953—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统、非线性系统等研究; 高洪伟(1979—), 女, 山东潍坊人, 博士生, 从事时滞系统、优化控制等研究。

确解还是数值解都是非常困难的。近年来,时滞系统的最优控制问题和近似最优控制问题受到控制界的重视,并取得了一些成果^[5-9],但对于受扰时滞系统的最优无静差控制问题的研究,还未见相关文献报道。

本文研究线性时滞系统在阶跃扰动作用下的最优控制问题。为实现无静差扰动抑制,首先利用内模原理构造一种无静差扰动补偿器,并将受扰时滞系统的最优无静差扰动抑制问题转化为无扰动增广系统的最优控制问题;然后通过引入灵敏度参数 ϵ 将系统变量围绕原点处展开Maclaurin级数,使得上述最优控制问题简化为求解不含超前项和时滞项的无穷级数问题,从而求得增广系统的次优控制律,进而得到原系统的次优无静差控制律。

2 问题描述

考虑如下有阶跃扰动的线性时滞系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau) + Bu(t) + Dv(t), & t > 0; \\ x(t) = \phi(t), & -\tau \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态向量, $u \in R^m$ 为控制向量, $v \in R^m$ 为扰动向量, A, A_1, B, D 为适当维数的常量矩阵, $\phi(t)$ 为已知的连续初始向量函数, $\tau > 0$ 为常数时滞项。

系统(1)受阶跃扰动的影响,如果选取无限时间二次型性能指标,其性能指标函数是不收敛的,因为当 $t \rightarrow \infty$ 时,状态向量 x 和控制向量 u 至少有一个不趋于零。

下面通过构造一种扰动补偿器,寻求能保证性能指标收敛的最优无静差控制律。

3 扰动补偿器的设计

利用内模原理构造扰动补偿器,将系统(1)转化为无扰动的增广系统,并选取其无限时间二次性能指标,从而将系统(1)的最优无静差扰动抑制问题转化为设计增广系统的最优调节器问题。

假设1 矩阵对 (A, B) 是完全可控的

假设2 系统(1)的扰动满足匹配条件,即

$$\text{Rank } B = \text{Rank } D = \text{Rank } [B \ D] = m. \quad (2)$$

由假设2知,存在唯一可逆矩阵 $M \in R^{m \times m}$,使得 $D = BM$ 成立。从而系统(1)可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau) + B[u(t) + w(t)], & t > 0; \\ x(t) = \phi(t), & -\tau \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $w(t) = Mv(t)$,可视为等价的 m 维扰动向量。令

$$z(t) = u(t) + w(t), \quad (4)$$

则有

$$\dot{z}(t) = \dot{u}(t). \quad (5)$$

定义新的状态向量 \bar{x} 和控制向量 \bar{u} 为

$$\begin{cases} \bar{x}(t) = [x^T(t) \ z^T(t)]^T, \\ \bar{u}(t) = u(t). \end{cases} \quad (6)$$

由式(3), (4)和(6)可得到 $n + m$ 维增广系统

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{A}_1\bar{x}(t - \tau) + \bar{B}\bar{u}(t), & t > 0; \\ \bar{x}(t) = \bar{\phi}(t), & -\tau \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad (8)$$

I 为 m 阶单位阵。 $n + m$ 维增广系统的结构如图1所示。

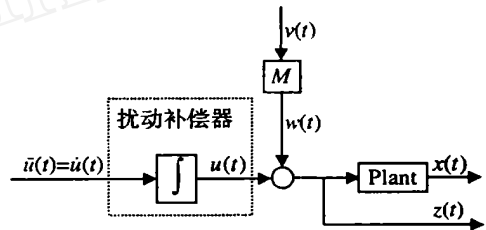


图1 增广系统结构

对系统(7)选取性能指标

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + \bar{u}^T(t)R\bar{u}(t)] dt \quad (9)$$

其中: $Q = \text{Block-diag}\{Q_0, Q_1\}$, Q_0 是半正定矩阵, Q_1 和 R 是正定矩阵,且 Q_0 满足通常的最优调节器条件。

至此,最优无静差控制问题便转化为寻找最优控制律 $\bar{u}^*(t)$,使 J 取得最小值的最优调节器问题。

4 最优无静差控制器的实现

根据极大值原理,系统(7)关于性能指标(9)的最优控制问题的必要条件,导致求解下列两点边值问题:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{A}_1\bar{x}(t - \tau) - S\lambda(t), \\ -\dot{\lambda}(t) = Q\bar{x}(t) + \bar{A}^T\lambda(t) + \bar{A}_1^T\lambda(t + \tau), \\ \bar{x}(t) = \bar{\phi}(t), & -\tau \leq t \leq 0, \\ \lambda(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $S = \bar{B}R^{-1}\bar{B}^T$ 。其最优控制律可描述为

$$\bar{u}^*(t) = -R^{-1}\bar{B}^T\lambda(t). \quad (11)$$

问题(10)为既含时滞项又含超前项的非齐次两点边值问题,这类问题无论是求精确解还是求数值解都非常困难。为求解两点边值问题(10),引入与 t 无关的实标量灵敏度参数 ϵ 将问题(10)转化为如下两点边值问题:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t, \epsilon) = \\ \bar{A}\bar{x}(t, \epsilon) - S\lambda(t, \epsilon) + \bar{A}^{-1}\bar{x}(t - \tau, \epsilon), \\ - \dot{\bar{\lambda}}(t, \epsilon) = \\ Q\bar{x}(t, \epsilon) + \bar{A}^T\lambda(t, \epsilon) + \bar{A}^{-T}\lambda(t + \tau, \epsilon), \\ \bar{x}(t, \epsilon) = \bar{\phi}(t), \quad -\tau \leq t \leq 0, \\ \lambda(t, \epsilon) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

含有灵敏度参数 ϵ 的最优控制律为

$$\bar{u}^*(t, \epsilon) = -R^{-1}B^T\lambda(t, \epsilon), \quad (13)$$

其中 $0 < \epsilon < 1$

假设 $\bar{u}(t, \epsilon)$, $\bar{x}(t, \epsilon)$ 和 $\lambda(t, \epsilon)$ 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

$$(\bullet)(t, \epsilon) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\epsilon^i}{i!} (\bullet)^{(i)}(t). \quad (14)$$

其中

$$(\bullet)^{(i)}(t) = \partial^i (\bullet)(t, \epsilon) / \partial \epsilon^i |_{\epsilon=0}$$

以下讨论总是假设上述各级数在 $\epsilon = 1$ 处收敛. 显然, 含灵敏度参数 ϵ 的两点边值问题(12) 在 $\epsilon = 1$ 处的解等价于两点边值问题(10) 的解. 最优控制律 $\bar{u}^*(t)$ 由 $\bar{u}(t, 1)$ 的无限和得到, 即

$$\bar{u}^*(t) = \bar{u}(t, 1) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \bar{u}^{(i)}(t). \quad (15)$$

定理 1 系统(1) 满足性能指标(9) 的动态最优控制律为下列微分方程的解:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}(t) = -R^{-1}P_2x(t) - R^{-1}P_3[\tilde{z}(t) + \\ Mv(t)] - R^{-1}B^T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} g_i(t), \\ \bar{u}^*(t) = \tilde{z}(t). \end{cases} \quad (16)$$

其中 $g_i(t)$ 为第 i 阶伴随向量, 由下式求得:

$$\begin{cases} g_0(t) = 0, \\ \dot{g}_i(t) = \\ -(\bar{A}^T - PS)g_i(t) - i\bar{P}\bar{A}^{-1}\bar{x}^{(i-1)}(t - \tau) - \\ i\bar{A}^{-T}[P\bar{x}^{(i-1)}(t + \tau) + g_{i-1}(t + \tau)], \\ g_i(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (17)$$

P 是下列 Riccati 矩阵方程的唯一正定解:

$$\bar{A}^T P + P\bar{A} - PSP + Q = 0 \quad (18)$$

第 i 阶状态向量 $\bar{x}^{(i)}(t)$ 由下列第 i 阶状态方程确定:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}^{(0)}(t) = (\bar{A} - SP)\bar{x}^{(0)}(t), \\ \bar{x}^{(0)}(t) = \bar{\phi}(t), \quad -\tau \leq t \leq 0; \end{cases} \quad (19a)$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}^{(i)}(t) = (\bar{A} - SP)\bar{x}^{(i)}(t) + \\ i\bar{A}^{-1}\bar{x}^{(i-1)}(t - \tau) - Sg_i(t), \\ \bar{x}^{(i)}(t) = 0, \quad -\tau \leq t \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (19b)$$

证明 将式(14) 代入(12), 并令等式两边无穷级数和关于 ϵ 的同次项对应相等, 可得两点边值

问题族

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}^{(0)}(t) = \bar{A}\bar{x}^{(0)}(t) - S\lambda^{(0)}(t), \\ -\dot{\bar{\lambda}}^{(0)}(t) = Q\bar{x}^{(0)}(t) + \bar{A}^T\lambda^{(0)}(t), \\ \bar{x}^{(0)}(t) = \bar{\phi}(t), \quad -\tau \leq t \leq 0, \\ \lambda^{(0)}(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

以及

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}^{(i)}(t) = \bar{A}\bar{x}^{(i)}(t) - S\lambda^{(i)}(t) + \\ i\bar{A}^{-1}\bar{x}^{(i-1)}(t - \tau), \\ -\dot{\bar{\lambda}}^{(i)}(t) = \\ Q\bar{x}^{(i)}(t) + \bar{A}^T\lambda^{(i)}(t) + i\bar{A}^{-T}\lambda^{(i-1)}(t + \tau), \\ \bar{x}^{(i)}(t) = 0, \quad -\tau \leq t \leq 0, \\ \lambda^{(i)}(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (21)$$

同理, 将式(14) 代入(13), 可得控制项 $\bar{u}^{(i)}(t)$ 的表达式

$$\bar{u}^{(i)}(t) = -R^{-1}B^T\lambda^{(i)}(t), \quad i = 0, 1, \dots \quad (22)$$

下面讨论 $\bar{u}^{(i)}(t)$ 的求法. 令

$$\lambda^{(i)}(t) = P\bar{x}^{(i)}(t) + g_i(t), \quad i = 0, 1, \dots \quad (23)$$

由式(20) 和(23) 可得关于 P 的 Riccati 矩阵方程(18). 由矩阵对 (A, B) 可控, 易证 (\bar{A}, \bar{B}) 可控, 且 Q_0 满足最优调节器条件, 因此 Riccati 矩阵方程(18) 有唯一正定解 P . 由式(23), (20) 和(21) 即得(19a) 和(19b). 对式(23) 两边求导并将(19b) 代入, 得

$$\begin{cases} \dot{\lambda}(t) = \\ (P\bar{A} - PSP)\bar{x}^{(i)}(t) + i\bar{P}\bar{A}^{-1}\bar{x}^{(i-1)}(t - \tau) - \\ PSg_i(t) + \dot{g}_i(t), \quad i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (24)$$

比较式(21), (23) 和(24), 即得求解 $g_i(t)$ 的伴随方程(17).

由线性系统最优控制理论知, 矩阵 $(\bar{A} - SP)$ 的所有特征值都具有负实部. 所以对式(17) 反向积分可得到 $g_i(t)$ 的解表达式

$$\begin{aligned} g_i(t) = & i \int_t^{\infty} e^{(\bar{A} - SP)(r-t)} [P\bar{A}^{-1}\bar{x}^{(i-1)}(r - \tau) + \\ & \bar{A}^{-T}P\bar{x}^{(i-1)}(r + \tau) + \bar{A}^{-T}g_{i-1}(r + \tau)] dr, \\ & i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $\bar{x}^{(i-1)}$ 和 g_{i-1} 是已知的激励函数, 所以求解 g_i 的过程是一个求解既无时滞项又无超前项的线性递推过程.

式(23) 代入(22) 可求得

$$\bar{u}^{(i)}(t) = -R^{-1}B^T [P\bar{x}^{(i)}(t) + g_i(t)], \quad i = 1, 2, \dots \quad (26)$$

式(26) 代入(15) 即得系统(7) 关于性能指标(9) 的最优控制律

$$\bar{u}^*(t) = -R^{-1}B^T [P\bar{x}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} g_i(t)] \quad (27)$$

设 $P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2^T \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix}$, 则式(27)可表示为

$$\bar{u}^*(t) = -R^{-1}P_2x(t) - R^{-1}P_3z(t) - R^{-1}B^T \sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} g_i(t). \quad (28)$$

由式(3)和(6)中第2式以及(28)即可得到系统(1)的最优控制律(16).

注1 在实际控制系统的最优控制律的设计

中, $\sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} g_i(t)$ 不可能精确求出, 只能截取级数的前 N 项和来近似其精确最优控制律, 即得到系统(1)的 N 阶动态无静差次优控制律

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}(t) = -R^{-1}P_2x(t) - R^{-1}P_3[\tilde{z}(t) + Mv(t)] - R^{-1}B^T \sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} g_i(t), \\ u_N(t) = \tilde{z}(t). \end{cases} \quad (29)$$

注2 实际应用中, 求取级数近似解的项数 N 可按以下规则确定次优控制迭代的次数: 给定常数 $\delta > 0$, 每迭代一次, 便计算性能指标 J_i , 当

$$\left| \frac{J_{i-K} - J_i}{J_i} \right| < \delta \quad (30)$$

时, 取 $N = i$, 其中 K 为某个正整数 从而得到次优控制律 u_N .

注3 如果系统无时滞, 即 $A_{-1} = 0$, 则由式(25)可得 $g_i(t) = 0 (i = 1, 2, \dots)$, 说明式(29)中最后一项的作用是补偿时滞对系统的影响

注4 式(29)等号右边只有最后一项为近似解, 如果时滞较小或 g_i 衰减较快, 则次优控制律(29)在较小的迭代次数 N 时可逼近最优控制

5 仿真实例

考虑由系统(1)描述的二阶系统和式(9)描述的性能指标 其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, A_{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.8 \\ -0.1 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, Q = I, R = 1,$$

$$\tau = 1, v(t) = 1, \mathcal{Q}(t) = [1 \ 0]^T.$$

由仿真计算知, 当 $i = 0, 1, 2, 3$ 时, 性能指标分别为 $J_0 = 2.3945, J_1 = 2.2477, J_2 = 2.1174, J_3 = 2.1102$, 显然有 $J_0 > J_1 > J_2 > J_3$. 若给定 $\delta = 0.005$, 则 $|(J_2 - J_3)/J_3| = 0.0025 < \delta$ 因此可取 $u_3(t)$ 作为系统(1)关于性能指标(9)的次优控制律 图2和图3分别给出了不同迭代次数下状态变量第1个分量和控制量 $u(t)$ 的仿真曲线

通过计算结果和仿真曲线可以看出, 迭代次数 i 越大, 系统的性能越好, 并且次优控制律收敛于最优

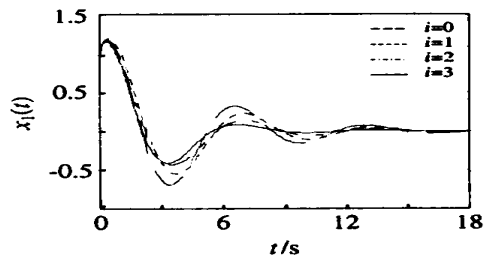


图2 不同迭代次数下的状态曲线

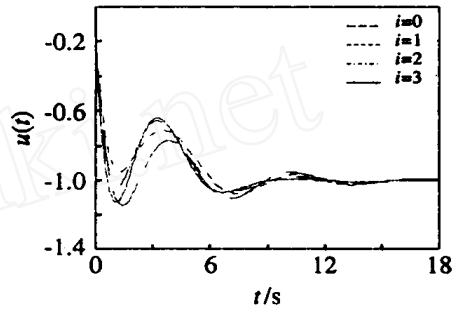


图3 不同迭代次数下的控制律曲线

控制的速度较快

6 结论

本文利用内模原理构造了扰动补偿器, 以精确抵消阶跃扰动对系统的影响; 并且利用灵敏度方法设计了能补偿状态时滞对系统影响的最优控制器 仿真结果表明, 该方法对阶跃扰动能实现最优无静差扰动抑制, 算法易于实现, 且次优控制律收敛于最优控制的速度较快

参考文献(References)

- [1] Mulgund S S, Stengel R F. Optimal Nonlinear Estimation for Aircraft Flight Control in Wind Shear[J]. *Automatica*, 1996, 32(1): 3-13
- [2] Wu W, Chou Y S. Adaptive Feedforward and Feedback Control of Non-linear Time-varying Uncertain Systems[J]. *Int J of Control*, 1999, 72(12): 1127-1138
- [3] Lindquist A, Yakubovich V A. Optimal Damping of Forced Oscillations in Discrete-time Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(6): 786-802
- [4] Tang G Y. Feedforward and Feedback Optimal Control for Linear System with Sinusoidal Disturbances[J]. *High Technology Letters*, 2001, 7(4): 16-19
- [5] Mahmoud M S, Ismail A. New Results on Delay-dependent Control of Time-delay Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(1): 95-100
- [6] Basin M B, Rodriguez-Gonzalez J. A Closed-form Optimal Control for Linear Systems with Equal State and Input Delays[J]. *Automatica*, 2005, 41(5): 915-920

(下转第1424页)

表 2 人体健康状况的广义决策表

论域	属性值域					决策值 \hat{a}
	职业	职业类型	工作强度	体育活动	身体状况	
u_1	教师	脑力	强	#	不好	{不好}
u_2	科研人员	脑力	强	#	不好	{不好}
u_3	科研人员	脑力	中	球类 田径	好	{好}
u_4	*	*	*	球类	一般	{好, 一般}
u_5	工人	体力	弱	*	一般	{好, 一般}
u_6	工人	体力	中	球类	好	{好, 一般}
u_7	工人	体力	弱	田径	好	{好, 一般}

表 3 决策表所包含的规则

规则	条 件	结论
r_1	(职业, 教师) (职业类型, 脑力) (工作强度, 强) (体育活动, #)	(不好)
r_2	(职业, 科研人员) (职业类型, 脑力) (工作强度, 强) (体育活动, #)	(不好)
r_3	(职业, 科研人员) (职业类型, 脑力) (工作强度, 中) ((体育活动, 球类) (体育活动, 田径))	(一般)
r_4	(体育活动, 球类)	(一般)
r_5	(职业, 工人) (职业类型, 体力) (工作强度, 弱)	(一般)
r_6	(职业, 工人) (职业类型, 体力) (工作强度, 中) (体育活动, 球类)	(好)
r_7	(职业, 工人) (职业类型, 体力) (工作强度, 弱) (体育活动, 田径)	(好)

4 结 语

广义信息系统具有更广泛的应用范围 基于广义信息系统的粗糙集理论是经典的粗糙集理论和基于不完备信息系统的粗糙集理论的推广 本文提出了应用范围更广泛的数据处理方法和技術, 并给出

了决策规则的一般描述形式 与(完备的、不完备的)决策表规则的描述形式不同, 规则的条件部分的描述形式由原子属性的合取变为原子属性值的合取 这种规范的规则描述形式有利于进行推理和计算最佳规则

广义信息系统在各个领域的应用, 如机器学习、模式识别、数据挖掘等领域, 都是需要进一步研究的课题

参考文献 (References)

[1] Pawlak Z. Rough Sets[J]. *Int J of Computer and Information Science*, 1982, 11: 341-356

[2] Leung Y, Li D. Maximal Consistent Block Technique for Rule Acquisition in Incomplete Information Systems [J]. *Information Sciences*, 2003, 153: 85-106

[3] Kryszkiewicz M. Rules in Incomplete Information Systems[J]. *Information Sciences*, 1999, 113: 271-292

[4] Kryszkiewicz M. Rough Set Approach to Incomplete Systems[J]. *Information Sciences*, 1998, 112: 39-49

[5] 胡可云, 石纯一. 多值粗糙集模型[J]. *计算机科学*, 2001, 28(1): 1-4
(Hu K Y, Shi C Y. Multivalued Rough Set Model[J]. *Computer Science*, 2001, 28(1): 1-4)

[6] 周军, 佟玉军. 多值粗糙集的一般化[J]. *辽宁工学院学报*, 2002, 22(6): 57-58, 61
(Zhou J, Tong Y J. Generalization of Multivalued Rough Set[J]. *J of Liaoning Institute of Technology*, 2002, 22(6): 57-58, 61)

[7] 蔡自兴, 徐光祐. *人工智能原理与应用*[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 32-66
(Cai Z X, Xu G Y. *Artificial Intelligence: Principles and Applications*[M]. Third Edition. Beijing: Tsinghua University Publisher, 2004: 32-66)

(上接第 1420 页)

[7] Yue D, Han Q L, Lam J. Network-based Robust H Control of Systems with Uncertainty [J]. *Automatica*, 2005, 41(6): 999-1007

[8] 唐功友, 刘毅敏. 时滞离散系统最优输出跟踪控制的灵敏度法[J]. *控制与决策*, 2005, 20(11): 1279-1282
(Tang G Y, Liu Y M. Sensitivity Approach of Optimal Output Tracking Control for Discrete Systems with

Time-delay [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(11): 1279-1282)

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