

文章编号: 1001-0920(2008)10-1145-04

基于直觉模糊数的信息不完全的多准则规划方法

王坚强, 张忠

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘要: 定义了直觉模糊数和直觉梯形模糊数及其期望值. 针对权系数信息不完全确定和准则值为直觉梯形模糊数的多准则决策问题, 提出了信息不完全确定的直觉梯形模糊多准则决策的规划方法. 该方法利用权系数的不完全信息构造方案集综合期望值的最优线性规划模型, 求解该模型得到各准则的最优权系数, 进而得到各方案综合期望值的区间数. 利用区间数可能度法对其进行比较, 得到整个方案集的排序. 实例分析说明了该方法的有效性和可行性.

关键词: 多准则决策; 信息不完全; 直觉梯形模糊数; 规划方法

中图分类号: C934

文献标识码: A

Programming method of multi-criteria decision-making based on intuitionistic fuzzy number with incomplete certain information

WANG Jian-qiang, ZHANG Zhong

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: WANG Jian-qiang, E-mail: jqwang@csu.edu.cn)

Abstract: Intuitionistic fuzzy numbers, intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers and their expected values are defined. For multi-criteria decision making problems, in which the information on criteria's weights is incomplete and the criteria values are intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers, a programming method of intuitionistic trapezoidal fuzzy multi-criteria decision making with incomplete certain information on weights is proposed. By using the incomplete information of criteria weight coefficient, the optimized linear programming of alternatives' integrated expected values is constructed. By solving the linear programming, the optimized criteria weight coefficients are attained. Then, interval numbers of the alternatives' integrated expected values are attained. The ranking of the whole alternatives set can be obtained by comparing interval numbers of the alternatives' integrated expected values using possibility degree method. An example analysis shows the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: Multi-criteria decision making; Incomplete information; Intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers; Programming method

1 引言

在社会经济生活中, 存在大量多准则决策 (MCDM) 问题. 目前, 关于准则权系数和准则值都确定的 MCDM 理论和方法已较为完善. 自 Zadeh 提出模糊集理论并用于多准则决策以来, 模糊 MCDM 问题成为研究的热点^[1-17]. 模糊数的提出使得 MCDM 问题中的模糊性有了较好的刻画工具^[1], 关于准则权系数确定或为模糊数而准则值确定或为模糊数的 MCDM 方法的研究较多^[1-4], 对权系数信息不完全且准则值为模糊数的 MCDM 或群

决策问题也有一定的研究^[5,6]. 这些研究主要集中在利用一个集成函数将各准则值的模糊数和准则权系数集成起来, 再利用某种模糊数的比较方法得到方案的排序或分类, 但模糊数只通过隶属度刻画事物的模糊性. 直觉模糊集在模糊集的基础上增加了一个新的参数——非隶属度, 它能更加细腻地描述和刻画客观世界的模糊本质^[7], 但研究人员对其研究主要集中在其性质、运算和相关性等方面^[8-10].

目前对多准则直觉模糊决策的研究较少. 文献 [11] 研究了准则权系数和准则值均为直觉模糊集的

收稿日期: 2007-08-01; 修回日期: 2007-10-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (70771115); 湖南省科技计划项目 (06FJ4126); 湖南省哲学社会科学评审委员会项目 (0608064A).

作者简介: 王坚强 (1963—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士, 从事决策理论与应用、风险管理与控制等研究; 张忠 (1983—), 男, 河南信阳人, 硕士生, 从事决策理论与应用、信息管理的研究.

MCDM 问题,提出了一种相应的解决方法.文献 [12]针对权系数信息不完全和准则值为直觉模糊集的 MCDM 问题,提出了两种折衷方法:TOPSIS 方法和 VIKOR 方法.文献 [13,14]将求解基于直觉模糊集的 MCDM 的 TOPSIS 方法、VIKOR 方法及基于证据推理方法推广到基于区间直觉模糊集的 MCDM 中.

区间直觉模糊集是将直觉模糊集的隶属度和非隶属度由实数扩展到区间值.文献 [14,15]对基于区间直觉模糊集的 MCDM 问题进行了研究,提出了相应的决策方法.但直觉模糊集和区间直觉模糊集也与模糊集一样,其论域是离散集合,且直觉模糊集只能粗略地表示隶属或非隶属于某模糊概念“好”、“坏”的程度.文献 [16]定义了直觉三角模糊数及其运算,并应用于故障树分析中.文献 [17]定义了直觉梯形模糊数,它是直觉三角模糊数的扩展.直觉三角模糊数和直觉梯形模糊数从另一个方向对直觉模糊集进行扩展,即将离散集合扩展到连续集合,是对模糊数的扩展.为此,本文更进一步扩展直觉梯形模糊数并定义了直觉梯形模糊数的期望值,针对权系数信息不完全确定和准则值为直觉梯形模糊数的 MCDM 问题,提出了信息不完全确定的直觉梯形模糊多准则决策的规划方法.

2 直觉模糊数

定义 1 设 \tilde{a} 是实数集上一个直觉模糊数,其隶属函数为

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} f_a^L(x), & a < x < b; \\ \mu_{\tilde{a}}, & b < x < c; \\ f_a^R(x), & c < x < d; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

其非隶属度函数为

$$v_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} g_a^L(x), & a_1 < x < b; \\ v_{\tilde{a}}, & b < x < c; \\ g_a^R(x), & c < x < d_1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_a^L(x)$ 和 $g_a^R(x)$ 为连续的单调递增函数, $f_a^R(x)$ 和 $g_a^L(x)$ 为连续的单调递减函数; $f_a^L(x)$, $f_a^R(x)$, $g_a^L(x)$, $g_a^R(x)$ 分别称为隶属度的左基准函数、右基准函数、非隶属度的左基准函数、右基准函数.

直觉模糊数记为

$$\tilde{a} = ((a, b, c, d); \mu_{\tilde{a}}), ((a_1, b, c, d_1); v_{\tilde{a}}).$$

当

$$f_a^L(x) = \frac{x-a}{b-a}\mu_{\tilde{a}}, f_a^R(x) = \frac{d-x}{d-c}\mu_{\tilde{a}},$$

$$g_a^L(x) = \frac{b-x+v_{\tilde{a}}(x-a)}{b-a_1},$$

$$g_a^R(x) = \frac{x-c+v_{\tilde{a}}(d_1-x)}{d_1-c},$$

$$0 \leq \mu_{\tilde{a}} \leq 1, 0 \leq v_{\tilde{a}} \leq 1,$$

$$\mu_{\tilde{a}} + v_{\tilde{a}} \leq 1, a, b, c, d \in R$$

时,直觉模糊数称为直觉梯形模糊数,记为

$$\tilde{a} = ([a, b, c, d]; \mu_{\tilde{a}}), ([a_1, b, c, d_1]; v_{\tilde{a}}).$$

相对于梯形模糊数,直觉梯形模糊数增加了一个非隶属度函数,表示决策者认为不属于 $[a_1, b, c, d_1]$ 的程度.当 $\mu_{\tilde{a}} = 1, v_{\tilde{a}} = 0$ 时,称 \tilde{a} 为标准的直觉梯形模糊数,即传统的梯形模糊数.当 $b = c$ 时,直觉梯形模糊数成为直觉三角模糊数.一般地,在直觉梯形模糊数 \tilde{a} 中有 $[a, b, c, d] = [a_1, b, c, d_1]$,此时,记为 $\tilde{a} = ([a, b, c, d]; \mu_{\tilde{a}}, v_{\tilde{a}})$.文中若无特殊声明,直觉梯形模糊数均指此类模糊数. $\bar{\alpha} = 1 - \mu_{\tilde{a}} - v_{\tilde{a}}$ 表示模糊数的犹豫程度, $\bar{\alpha}$ 越小,代表模糊数越确定.

相对于直觉模糊集定义,直觉梯形模糊数增加了梯形模糊数 $[a, b, c, d]$,使隶属度和非隶属度不再只是相对于一个模糊概念“优秀”或“好”,而是相对于该梯形模糊数,这更能准确地反映决策者信息,并可以表达不同量纲的决策信息.假设模糊数 $\tilde{6} = ([4, 5, 7, 8]; 0.7, 0.2)$,那么当 $x = 5$ 时,是模糊数 $\tilde{6}$ 的隶属度为 0.7,同时不是模糊数 $\tilde{6}$ 的非隶属度为 0.2,对不能确定是否为模糊数 $\tilde{6}$ 的犹豫度为 0.1.

3 直觉梯形模糊数的期望值

对于直觉梯形模糊数, $f_a^L(x)$ 是严格增函数, $f_a^R(x)$ 是严格减函数,其反函数分别为

$$p_a^L(x) = a + \frac{y}{\mu_{\tilde{a}}}(b-a), y \in (0, \mu_{\tilde{a}}],$$

$$p_a^R(x) = d + \frac{y}{\mu_{\tilde{a}}}(c-d), y \in (0, \mu_{\tilde{a}}].$$

对于直觉梯形模糊数 \tilde{a} ,其梯形模糊数的信任度在区间 $[\mu_{\tilde{a}}, 1 - v_{\tilde{a}}]$ 内.

定义 2 称

$$I_a^L(\tilde{a}) = \int_0^{\mu_{\tilde{a}}} \left\{ (1 - \alpha) \left[a + \frac{y}{\mu_{\tilde{a}}}(b-a) \right] + \left[d + \frac{y}{\mu_{\tilde{a}}}(c-d) \right] \right\} dy$$

为直觉梯形模糊数 \tilde{a} 的极小期望值,其中 $\alpha \in [0, 1]$ 表示决策者的风险态度.当 $\alpha > 0.5$ 时,称决策者是追求风险的;当 $\alpha < 0.5$ 时,称决策者是厌恶风险的;当 $\alpha = 0.5$ 时,称决策者是风险中立的.通过计算得到

$$I^L(\tilde{a}) = \frac{\mu_{\tilde{a}}}{2} [(1 - \alpha)(a+b) + (c+d)].$$

定义 3 称

$$I^R(\tilde{a}) = \int_0^{1-v_{\tilde{a}}} \left\{ (1-y) \left[a + \frac{y}{1-v_{\tilde{a}}} (b-a) \right] + \left[d + \frac{y}{1-v_{\tilde{a}}} (c-d) \right] \right\} dy$$

为直觉梯形模糊数 \tilde{a} 的极大期望值. 计算得到

$$I^R(\tilde{a}) = \frac{1-v_{\tilde{a}}}{2} [(1-v_{\tilde{a}})(a+b) + (c+d)].$$

这样便得到直觉梯形模糊数的期望值区间为 $[I^L(\tilde{a}), I^R(\tilde{a})]$.

4 基于直觉梯形模糊数的多准则决策方法

对于一个模糊 MCDM 问题, 设有 n 个方案 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, l 个决策准则 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$, 对应的权系数为 $\mu_j = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_l\}$, 且 $\mu_j \in [0, 1]$, $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_l = 1$. 方案 a_i 在准则 c_j 下的值为直觉梯形模糊数 $\tilde{a}_{ij} = ([m_{1j}(a_i), m_{2j}(a_i), m_{3j}(a_i), m_{4j}(a_i)]; \mu_j(a_i), v_j(a_i))$. 其中: $\mu_j(a_i)$ 表示方案 a_i 在准则 c_j 下隶属于梯形模糊数 $[m_{1j}(a_i), m_{2j}(a_i), m_{3j}(a_i), m_{4j}(a_i)]$ 的程度, $v_j(a_i)$ 表示方案 a_i 在准则 c_j 下非隶属于梯形模糊数 $[m_{1j}(a_i), m_{2j}(a_i), m_{3j}(a_i), m_{4j}(a_i)]$ 的程度, $0 \leq \mu_j(a_i) \leq 1, 0 \leq v_j(a_i) \leq 1, \mu_j(a_i) + v_j(a_i) \leq 1$. 假设 H 为决策者给出的准则权系数的不完全确定信息的集合, 要确定方案的排序.

对于多准则决策问题, 常见的准则类型有效益型和成本型. 为了消除不同物理量纲对决策结果的影响, 利用梯形模糊数的规范化公式进行规范化处理.

1) 对于成本型准则

$$\frac{\max_j (m_{4j}(a_i)) - m_{kj}(a_i)}{\max_j (m_{4j}(a_i)) - \min_j (m_{1j}(a_i))},$$

$$k = 1, 2, \dots, 4;$$

2) 对于效益型准则

$$\frac{m_{kj}(a_i) - \min_j (m_{4j}(a_i))}{\max_j (m_{4j}(a_i)) - \min_j (m_{1j}(a_i))},$$

$$k = 1, 2, \dots, 4.$$

为方便起见, 经过规范化处理后, 方案 a_i 在准则 c_j 下的值仍记为

$$\tilde{a}_{ij} = ([m_{1j}(a_i), m_{2j}(a_i), m_{3j}(a_i), m_{4j}(a_i)]; \mu_j(a_i), v_j(a_i)).$$

由直觉梯形模糊数的定义可知, 方案 a_i 在准则 c_j 下的值对梯形模糊数的信任度在区间 $[\mu_j(a_i), 1 - v_j(a_i)]$ 内, 对应的期望值在区间 $[I_j^L(a_i), I_j^R(a_i)]$ 内.

对于每个方案 a_i , 其最优综合期望值通过下列线性规划确定:

$$\begin{aligned} \max I_i &= \sum_{j=1}^l \mu_j I_{ij}, \\ \text{s. t. } I_j^L(a_i) &\leq I_i \leq I_j^R(a_i), j = 1, 2, \dots, l, \\ (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_l) &\in H, \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_l = 1. \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)可转化为^[11]

$$\begin{aligned} \max I &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \mu_j [I_j^R(a_i) - I_j^L(a_i)], \\ \text{s. t. } (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_l) &\in H, \sum_{j=1}^l \mu_j = 1. \end{aligned} \tag{4}$$

求解线性规划模型(4), 得到最优解为

$$\mu^* = (\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_l^*).$$

对于每个方案 a_i , 计算

$$I_i^{*L}(a_i) = \sum_{j=1}^l \mu_j^* I_j^L(a_i),$$

$$I_i^{*R}(a_i) = \sum_{j=1}^l \mu_j^* I_j^R(a_i),$$

得到方案的期望值区间 $[I_i^{*L}(a_i), I_i^{*R}(a_i)]$, 通过比较区间数确定方案的排序.

5 实例分析

某发动机零部件制造公司选择供应商, 有 5 个供应商 a_1, a_2, \dots, a_5 可供选择, 选取供应能力、交货能力、服务质量、影响力和科研实力 5 个准则进行评价, 记为 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 , 易知准则均为效益型准则. 决策者根据自己的知识、经验以及统计数据等信息确定每个供应商的决策信息, 如表 1 所示. 决策者给出准则权系数的不完全确定信息如下: $0.10 \leq \mu_1 \leq 0.15, 0.10 \leq \mu_2 \leq 0.30, 0.05 \leq \mu_3 \leq 0.20, 0.08 \leq \mu_4 \leq 0.18, 0.10 \leq \mu_5 \leq 0.30, \mu_2 \leq \mu_5$. 试选择最优供应商.

当决策者风险中立时, 利用本文方法求解得最优权系数为 $\mu^* = (0.15, 0.30, 0.10, 0.15, 0.30)$. 根据得到的最优权系数, 求得各方案的综合期望值区间为 $I^*(a_1) = [3.758, 4.268], I^*(a_2) = [4.378, 4.880], I^*(a_3) = [3.818, 4.088], I^*(a_4) = [3.690, 4.061], I^*(a_5) = [4.189, 4.856]$. 利用区间数可能度法^[18] 得到方案集排序向量为

$$w = (0.1650, 0.2796, 0.1522, 0.1362, 0.2671).$$

因此, 方案排序为: $a_2 > a_5 > a_1 > a_3 > a_4$. 而当决策者风险态度 $\alpha = 0$ 时, $a_2 > a_5 > a_1 > a_3 > a_4$; $\alpha = 1$ 时, $a_5 > a_2 > a_4 > a_1 > a_3$; $\alpha = 0.3$ 时, $a_2 > a_5 > a_1 > a_3 > a_4$; $\alpha = 0.8$ 时, $a_2 > a_5 > a_1 > a_4 > a_3$.

通过对表 1 数据进行分析, 可知上述结果均是合理的, 因风险态度的不同而略有差异.

表1 方案的准则值

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
a_1	$([1,2,3,4];0.7,0.3)$	$([5,6,7,8];0.7,0.3)$	$([3,4,5,6];0.6,0.2)$	$([4,5,7,8];0.6,0.3)$	$([4,5,6,7];0.8,0)$
a_2	$([2,3,4,5];0.6,0.3)$	$([6,7,8,9];0.8,0.1)$	$([4,5,6,7];0.8,0.2)$	$([3,4,5,6];0.7,0.3)$	$([6,7,8,9];0.6,0.3)$
a_3	$([1,2,3,5];0.6,0.4)$	$([4,6,7,8];0.6,0.3)$	$([3,4,5,6];0.5,0.5)$	$([4,5,6,7];0.8,0.1)$	$([5,6,7,8];0.8,0.2)$
a_4	$([2,3,4,6];0.6,0.2)$	$([5,6,7,8];0.8,0.2)$	$([2,3,5,6];0.6,0.4)$	$([3,4,5,7];0.6,0.3)$	$([4,6,7,8];0.6,0.3)$
a_5	$([2,3,4,5];0.8,0.2)$	$([4,5,6,7];0.9,0)$	$([3,4,5,6];0.8,0.2)$	$([3,5,7,8];0.7,0.1)$	$([4,5,6,7];0.8,0)$

6 结 论

本文定义了直觉模糊数、直觉梯形模糊数及其期望值,在此基础上提出了信息不完全确定的直觉梯形模糊多准则决策的规划方法,并详细讨论了其实现步骤.实例分析表明了该方法的有效性、可行性和可操作性.该方法可用于区域产业选择、投资效益评价等相关决策中.

参考文献(References)

- [1] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
(Li R J. Fuzzy multi-criteria decision making theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [2] Aouam T, Chang S I, Lee E S. Fuzzy MADM: An outranking method [J]. European J of Operational Research, 2003, 145(2): 317-328.
- [3] Chu Tachung. A fuzzy number interval arithmetic based fuzzy MCDM algorithm[J]. Int J Fuzzy Systems, 2002, 4(4): 867-872.
- [4] 徐玖平. 基于 Hausdorff 度量模糊多指标群决策的 TOPSIS 方法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(10): 84-93.
(Xu J P. Technique of order preference by similarity to ideal and anti-ideal alternative for multiple attribute group decision making problems based on Hausdorff metric[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2002, 22(10): 84-93.)
- [5] 王坚强. 信息不完全的 Fuzzy 群体多准则决策的规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11): 1604-1608.
(Wang J Q. Programming method of fuzzy group multiple criteria decision making with incomplete information[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(11): 1604-1608.)
- [6] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9-12.
(Xu Z S. Study on method for triangular fuzzy number-based multi-attribute decision making with preference information on alternatives[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(8): 9-12.)
- [7] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [8] De S K, Biswas R, Roy A R. An application of intuitionistic fuzzy sets in medical diagnosis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 117(2): 209-213.
- [9] Li D F, Chen C T. New similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and application to pattern recognitions[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1-3): 221-225.
- [10] Przemyslaw Grzegorewski. Distances between intuitionistic fuzzy sets and/or interval-valued fuzzy sets based on the Hausdorff metric[J]. Fuzzy Sets and Sisetms, 2004, 148(2): 319-328.
- [11] Li D F. Multiattribute decision making models and methods using intuitionistic fuzzy sets [J]. J Comput System Science, 2005, 70(1): 73-85.
- [12] 王坚强, 张忠. 信息不完全确定的多准则直觉模糊决策的折衷解法[C]. 控制与决策学术年会论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 2006.)
(Wang J Q, Zhang Z. Compromise approach on multi-criteria intuitionistic fuzzy decision-making with incomplete certain information [C]. Chinese Control and Decision Conf. Shenyang: Northeastern University Press, 2006.)
- [13] 王坚强. 几类信息不完全确定的多准则决策方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
(Wang J Q. Study on multi-criteria decision-making approach with incomplete certain information [D]. Changsha: Central South University, 2005.)
- [14] 王坚强. 信息不完全确定的多准则区间直觉模糊决策方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(11): 1253-1256.
(Wang J Q. Multi-criteria interval intuitionistic fuzzy decision-making approach with incomplete certain information[J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1253-1256.)
- [15] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 215-219.
(Xu Z S. Methods for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and their application to decision making [J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 215-219.)
- [16] Shu M H, Cheng C H, Chang J R. Using intuitionistic fuzzy sets for fault-tree analysis on printed circuit board assembly [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(12): 2139-2148.

(下转第 1152 页)

图2和图3分别为周期通讯逻辑下对象的状态响应和数据发送时间,纵坐标1为不发送数据,2为发送数据.从图2和图3可以看出,对象的状态值最终收敛到0.周期通信逻辑的数据发送时间间隔保证了系统的稳定性,同时从离散对象的采样时间(0.05s)和周期通信逻辑的数据发送时间间隔(0.5s)比较可以看出,采用周期通信逻辑减少了系统发送数据的次数,从而减少了网络的消耗量,达到了解决网络控制系统带宽约束问题的目的.

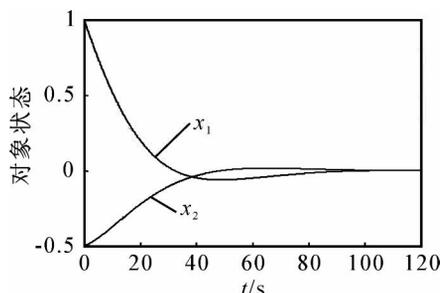


图2 周期通信逻辑下对象的状态响应图

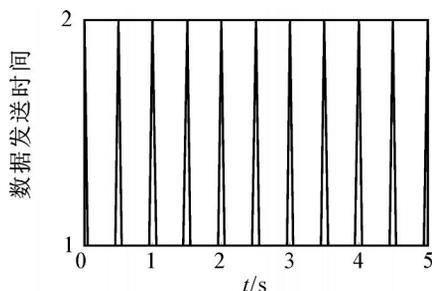


图3 周期通信逻辑下数据发送时间图

6 结 论

本文针对具有线性不确定对象的网络控制系统带宽约束问题,设计了具有周期通信逻辑的网络控制系统结构.对该结构建立的数学模型,综合反映了被控对象的不确定性与周期通信逻辑对系统的影响.周期通信逻辑的引入,在保证系统稳定的前提下降低网络中节点包传输速率,减少了系统对网络的依赖,从而有效地解决了网络控制系统中的带宽约束问题.仿真结果验证了该方法的有效性.在此仅考

虑线性定常不确定情况,对于线性时变不确定被控对象的网络控制系统的通信逻辑设计及稳定性分析还有待进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Zhang Wei, Branicky M S, Philips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 85-99.
- [2] Tatikonda S, Mitter S. Control under communication constraints[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(7): 1056-1068.
- [3] Hristu D. Stabilization of LTI systems with communication constraints[C]. Proc of the American Control Conf. Chicago: Illinois, 2000: 2342-2346.
- [4] Lei Zhang, Hristu D. Communication and control co-design for networked control systems[J]. Automatica, 2006, 42(6): 953-958.
- [5] Antsaklis P, Baillieul J. Special issue on networked control systems[J]. Automatic Control, 2004, 49(9): 1421-1423.
- [6] Montestruque L A, Antsaklis P. On the model-based control of networked systems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [7] Xu Y G, Hespanha J. Communication logics for networked control systems[C]. Proc of the 2004 American Control Conf. Boston, 2004: 572-577.
- [8] Xu Y G, Hespanha J. Optimal communication logics for networked control systems[C]. Proc of the 43rd Conf on Decision and Control. Bahamas, 2004: 4-9.
- [9] 宗群,王鹤,李然.一种新的网络控制系统随机通信逻辑设计与分析[J].控制与决策,2007,22(7):795-799.
(Zong Q, Wang H, Li R. Design and analysis of new stochastic communication logic for networked control systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 795-799.)
- [10] 黄廷祝,钟守铭,李正良.矩阵理论[M].北京:高等教育出版社,2003.
(Huang T Z, Zhong S M, Li Z L. Matrix theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.)

(上接第1148页)

- [17] 王坚强.模糊多准则决策方法研究综述[J].控制与决策,2008,23(6):601-606.
(Wang J Q. Survey on fuzzy multi-criteria decision-making approach[J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 601-606.)

- [18] 徐泽水,达庆利.区间数排序的可能度法及其应用[J].系统工程学报,2003,18(1):67-70.
(Xu Z S, Da Q L. Possibility degree method for ranking interval numbers and its application[J]. J of Systems Engineering, 2003, 18(1): 67-70.)