

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201206016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20120926.1627.001.html>

基于联系数的不确定空情意图识别

刘秀梅^{1,2} 赵克勤^{3,4}

(1. 连云港师范高等专科学校 初等教育学院, 江苏 连云港 222006; 2. 江苏师范大学 海州教师教育学院, 江苏 连云港 222006; 3. 诸暨市联系数学研究所, 浙江 诸暨 311811; 4. 浙江大学 非传统安全与和平发展研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对不确定空情信息的区间数表示问题, 把区间数转换成联系数, 再转换成三角函数表达式, 建立基于三角函数的不确定空情信息条件下的意图识别模型, 将待识别意图的目标作为比较序列, 已知作战意图的基准特征值作为参考序列, 利用三角函数表达式“模”的聚类计算识别目标, 再进一步作不确定分析. 实例应用表明, 在需要识别的3个目标中, 有2个与其他方法所得结果相同, 对有异议的另一个目标, 分析表明该文的识别结果更符合实际, 说明了基于联系数的“确定性计算加不确定性分析”方法简明有效、客观适用, 可以为防空作战指挥提供决策支持.

关键词: 空情意图识别; 不确定性; 区间数; 联系数; 聚类分析

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)05-0450-07

Inference method on intention with uncertain aerial information based on the connection number

LIU Xiumei^{1,2}, ZHAO Keqin^{3,4}

(1. School of Primary Education, Lianyungang Normal College, Lianyungang 222006, China; 2. College of Haizhou Teacher Education, Jiangsu Normal University, Lianyungang 222006, China; 3. Zhuzhi Institute of Connection Mathematics, Zhuzhi 311811, China; 4. Center for Non-traditional Security and Peaceful Development Studies, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The objective of the research study is to examine uncertain aerial intelligence expressed by the interval number as a decision making approach for air defense campaign commanding. First, the research explored the process of how the interval number is converted into connection numbers and triangle function expressions. After this process, the study reviewed the inference of an intention model and as a result of the triangle function expression under uncertain aerial testing data was analyzed. The target intention data collected disclosed an inferred comparative sequencing pattern was used in the study. The known vector was used as a reference sequence, modules of triangle function expressions were calculated by a cluster analysis to distinguish a target and uncertainty analyses were further completed. As a result, among the recognition of the 3 goals, two target test results confirmed to be same as those achieved when applying other research methods other than inference of an intention model or triangle function expression under uncertain aerial testing. However, an additional target test performed results indicate deterministic calculations and uncertainty analysis were effective, objective and applicable and may provide critical decision making support for air defense campaign commanding procedures.

Keywords: inference of aerial intelligence intention; uncertainty; interval number; connection number; cluster analysis

在现代空战作战指挥决策中, 对敌方作战意图

的正确识别具有极为重要的意义. 但由于在战场环境下获得的空情信息具有不确定性特点, 如何客观地表述和处理具有不确定性的空情信息成为空战指挥决策中的一个关键问题. 由于区间数能比较客观地刻画观测值的确定性与不确定性, 因而用区间数

收稿日期: 2012-06-12. 网络出版日期: 2012-09-26.

基金项目: 连云港市“学术技术带头人”基金资助项目(LRC2009232521);
2012年校科研基金课题项目(LYGSZ12033).

通信作者: 刘秀梅. E-mail: lyglxm21@163.com.

表达不确定空情信息受到人们的重视. 例如文献 [1] 采用区间数表示敌方目标的特征值, 将待识别目标的各种信息与已知参考目标的意图相对照, 按聚类思想判别待识别目标的作战意图. 但由于区间数的取值具有不确定性, 导致区间数的大小比较和排序以及区间数的运算至今没有公认的完全确定的算法^[2-5]. 人为地借助某些定义比较出 2 个区间数的大小, 仍然会侧重于确定性而导致原始信息的失真, 同时也会忽略不确定分析而使计算结论减少了可靠性和可信性. 考虑到区间数同时具有上下界确定而在其内取值不确定的这一特性, 一些学者根据集对分析的不确定性系统理论和其中的联系数^[6-11], 通过把区间数转换为联系数的方法, 研究不同问题背景下的区间数多属性决策问题^[12-15]. 本文主要沿用文献 [16-20] 中的思路, 把用区间数表示的空情不确定性信息转换成联系数, 再把联系数转换成三角函数, 利用三角函数的模与幅角进行不确定条件下的空情意图识别. 实例表明这种把区间数的确定性计算与不确定性分析有机结合的空情意图识别方法简明有效, 同时也为区间数聚类提供了一种新途径.

1 联系数与区间数

1.1 联系数

联系数是赵克勤在集对分析理论中创建的一个数学工具, 其最基本的一种表达形式是

$$U = A + Bi. \tag{1}$$

式中: A, B 是非负实数, $i \in [-1, 1]$. 令 $N = A + B$, $a = A/N$, $b = B/N$, $\mu = U/N$, 则由式 (1) 得

$$\mu = a + bi. \tag{2}$$

式中: $a + b = 1$, $i \in [-1, 1]$.

式 (1) 和式 (2) 中的 A (a) 称为确定性联系分量, B (b) 称为不确定性联系分量, 式 (1) 和式 (2) 统称为二元联系数, 简称联系数.

1.2 联系数的运算

1.2.1 代数运算

定义 1 设 $U_1 = A_1 + B_1i$, $U_2 = A_2 + B_2i$ 是 2 个联系数, 则

$$U = U_1 + U_2 = A + Bi.$$

式中: $A = A_1 + A_2$, $B = B_1 + B_2$, $i \in [-1, 1]$.

2 个联系数的加法满足交换律, 即有

$$U = U_1 + U_2 = U_2 + U_1.$$

并可以推广到 3 个联系数相加, 即有

$$U_1 + U_2 + U_3 = U_3 + U_2 + U_1 = U_2 + U_1 + U_3.$$

且有以下推论: 当有 n ($n \geq 3$) 个联系数相加时, 有

$$U = \sum_{k=1}^n U_k = \sum_{k=1}^n (A_k + B_k i).$$

1.2.2 数乘运算

定义 2 设 α 为一实数, $U = A + Bi$ 为一联系数, 则有数乘运算:

$$\alpha U = \alpha A + \alpha Bi.$$

1.2.3 向量运算

定义 3 设有联系数 $U = A + Bi$, 则有联系数的三角函数表达式:

$$u = r(\cos \theta + i \sin \theta). \tag{3}$$

式中:

$$r = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{4}$$

称为联系数的“模”,

$$\theta = \arctan \frac{B}{A} \tag{5}$$

称为联系数的“幅角”.

1.3 区间数向联系数的转换

定义 4 设有区间数 $x = [x^-, x^+]$, $x^-, x^+ \in \mathbf{R}$, $x^- \leq x^+$, 令

$$A = \frac{x^- + x^+}{2}, \quad B = x^+ - \frac{x^- + x^+}{2}, \tag{6}$$

根据式 (1) 则得联系数 $u = A + Bi$, 或写成

$$u = \frac{x^- + x^+}{2} + (x^+ - \frac{x^- + x^+}{2}) i, \quad i \in [-1, 1], \tag{7}$$

称式 (7) 是区间数向联系数转换的公式. 此联系数也称为“平均值 + 波动值”联系数.

1.4 区间数的三角函数表达

把区间数转换成式 (7) 所示的联系数后, 再根据式 (3) ~ (6) 可得区间数的三角函数表达式如式 (8):

$$u = r(\cos \theta + i \sin \theta). \tag{8}$$

式中:

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + s_x^2}, \quad \bar{x} = \frac{x^- + x^+}{2},$$

$$s_x = \frac{x^+ - x^-}{2}, \quad \theta = \arctan \frac{s_x}{\bar{x}}. \tag{9}$$

2 不确定空情意图识别

2.1 问题描述

设在不确定的空情信息条件下有 p 个飞行目标 y_1, y_2, \dots, y_p , 需要识别其意图, 每个目标用 5 个特征来描述, 分别是方位角 β (mil)、距离 d (km)、水平速度 v ($m \cdot s^{-1}$)、航向角 θ ($^\circ$) 和高度 H (km), 每个特征值用区间数表示, 与此同时, 已知 m ($m > p$) 种作战意图的上述 5 个特征的基准特征值, 历史数据是实数, 要求对 p 个目标的意图作出聚类 and 识别.

2.2 识别步骤

具体的基于联系数的不确定空情意图识别方法

的流程如图1所示.

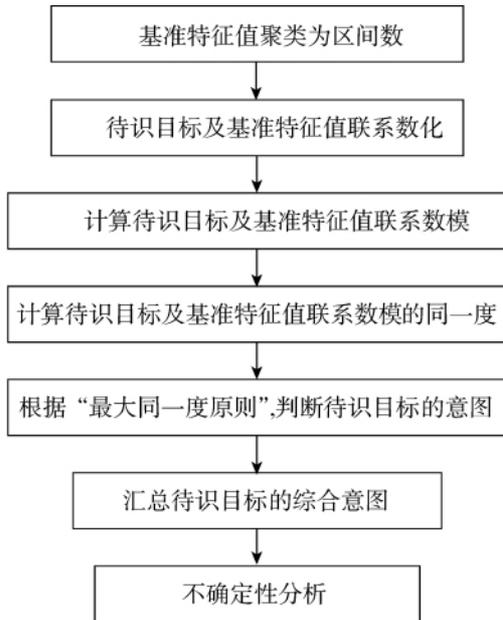


图1 不确定空情意图识别方法

Fig.1 A method of inference intention with uncertain aerial information

1) 将已知的 m 种作战意图的各个基准特征值的历史数据(点实数)用区间数表示.

2) 根据式(7),把作为基准特征值的历史数据区间数,以及待识别的 p 个目标的各特征值区间数 $x = [x^-, x^+]$ 改写成“平均值+波动值”联系数.

3) 根据式(9)把各个联系数改写成式(8)的三角函数形式.

4) 计算待识别的第 q ($q = 1, 2, \dots, p$) 个目标在第 k 个 ($k = 1, 2, 3, 4, 5$) 特征上的“模” r'_{qk} 与 m 种作战意图在第 k 个特征上的基准特征值的“模” r_{tk} ($t = 1, 2, \dots, m$) 的同一度:

$$a_{qk}^{[t]} = \frac{\min(r'_{qk}, r_{tk})}{\max(r'_{qk}, r_{tk})}, t = 1, 2, \dots, m.$$

5) 比较待识别的第 q 个目标在第 k 个特征上的 m 个同一度 $a_{qk}^{[t]}$ ($t = 1, 2, \dots, m$) 的大小. 根据“最大同一度原则”,与最大同一度对应的作战意图为第 q 个目标在第 k 个特征上的作战意图.

6) 当待识别目标在 5 个特征上分属不同的作战意图时,以相同作战意图最多者作为该待识别目标的首选作战意图,次多者作为该待识别目标的其次作战意图,以此类推.

7) 借助 i 在 $[-1, 1]$ 区间取不同的值展开意图识别的不确定分析,得到意图识别的最终结论.

3 实例与分析

采用文献[1]中的实例,已知有 x_1, x_2, \dots, x_{10} 共 10 批目标的作战意图,其在方位角 β (mil)、距离 d (km)、水平速度 v ($m \cdot s^{-1}$)、航向角 θ ($^\circ$) 和高度 H (km) 上的历史观测值如表1所示. 有 y_1, y_2, y_3 共 3 批待识别目标,各待识别目标在不确定空情信息下各特征值如表2所示,试识别这 3 批目标的作战意图.

表1 目标特征值及攻击意图

Table 1 Target character number and attack intention

目标	β /mil	d /km	$v/(m \cdot s^{-1})$	$\theta/(^\circ)$	H /km	意图
x_1	820	280	250	200	6.0	侦察
x_2	2 300	210	300	320	4.0	攻击
x_3	828	281	245	201	6.5	侦察
x_4	2 350	215	320	322	4.2	攻击
x_5	830	282	255	200	6.3	侦察
x_6	825	283	250	204	6.1	侦察
x_7	2 200	150	300	156	5.0	攻击
x_8	4 000	110	300	50	3.5	突防
x_9	2 800	260	220	260	8.0	监视
x_{10}	4 050	120	280	51	3.6	突防

表2 待识目标特征值

Table 2 Target character number to be inferred

待识目标	β /mil	d /km	$v/(m \cdot s^{-1})$	$\theta/(^\circ)$	H /km
y_1	[1 000, 1 200]	[200, 210]	[300, 320]	[45, 51]	[3, 4]
y_2	[2 500, 2 600]	[100, 110]	[200, 220]	[250, 260]	[8, 9]
y_3	[4 000, 4 010]	[90, 100]	[240, 250]	[300, 310]	[2, 3]

识别过程如下.

1) 根据表1,把 S_1 (侦察)、 S_2 (监视)、 S_3 (攻击)和 S_4 (突防)在 5 个特征上的基准值改写为区间数的形式,得表3.

2) 把表3中基准特征值的区间数按式(7)改写

成“平均值+波动值”联系数形式,得表4,表中数值为 u_{tk} ($t = 1, 2, 3, 4$).

3) 把表2中各待识别目标的特征值区间数按式(7)改写成“平均值+波动值”联系数的形式,得表5,表中数值为 u'_{qk} .

表 3 基准特征值区间数

Table 3 Interval number of normal character number

作战意图	目标群体	β/mil	d/km	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\text{°})$	H/km
S_1 (侦察)	x_1, x_3, x_5, x_6	[820 830]	[280 283]	[245 255]	[200 204]	[6.0 6.5]
S_2 (监视)	x_9	2 800	260	220	260	8.0
S_3 (攻击)	x_2, x_4, x_7	[2 200 2 350]	[150 215]	[300 320]	[156 322]	[4.0 5.0]
S_4 (突防)	x_8, x_{10}	[4 000 4 050]	[110 120]	[280 300]	[50 51]	[3.5 3.6]

表 4 基准特征值联系数

Table 4 Connection number of normal character number

作战意图	目标群体	β/mil	d/km	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\text{°})$	H/km
S_1 (侦察)	x_1, x_3, x_5, x_6	$825 + 5i$	$281.5 + 1.5i$	$250 + 5i$	$202 + 2i$	$6.25 + 0.25i$
S_2 (监视)	x_9	$2\ 800 + 0i$	$260 + 0i$	$220 + 0i$	$260 + 0i$	$8.0 + 0i$
S_3 (攻击)	x_2, x_4, x_7	$2\ 275 + 75i$	$182.5 + 32.5i$	$310 + 10i$	$239 + 83i$	$4.5 + 0.5i$
S_4 (突防)	x_8, x_{10}	$4\ 025 + 25i$	$115 + 5i$	$290 + 10i$	$50.5 + 0.5i$	$3.55 + 0.5i$

表 5 待识目标区间数的联系数

Table 5 Connection number of interval number to be inferred

待识目标	β/mil	d/km	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\text{°})$	H/km
y_1	$1\ 100 + 100i$	$205 + 5i$	$310 + 10i$	$48 + 3i$	$3.5 + 0.5i$
y_2	$2\ 550 + 50i$	$105 + 5i$	$210 + 10i$	$255 + 5i$	$8.5 + 0.5i$
y_3	$4\ 005 + 5i$	$95 + 5i$	$245 + 5i$	$305 + 5i$	$2.5 + 0.5i$

4) 把表 4、5 中的联系数按式 (9) 计算各自的模, 得表 6、7, 表 6 中数据为 r_{tk} , 表 7 中数据为 r_{qk} .

表 6 基准特征值联系数的模

Table 6 Module of connection number of normal character number

作战意图	β/mil	d/km	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\text{°})$	H/km
S_1 (侦察)	825.02	281.50	250.05	202.01	6.26
S_2 (监视)	2 800.00	260.00	220.00	260.00	8.00
S_3 (攻击)	2 276.24	185.37	310.16	253.00	4.53
S_4 (突防)	4 025.08	115.11	290.17	50.50	3.59

表 7 待识目标区间数的联系数的模

Table 7 Module of connection number of interval number to be inferred

待识目标	β/mil	d/km	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\text{°})$	H/km
y_1	1 104.54	205.06	310.16	48.09	3.54
y_2	2 550.49	105.12	210.24	255.05	8.51
y_3	4 005.00	95.13	245.05	305.04	2.55

5) 按式 (7), 计算表 6、7 在 5 个对应特征上的模的同一度, 并把最大同一度对应的意图类别判定给待识别目标在该特征上的意图.

例如 y_1 的方位角的联系数的模 $r'_{11} = 1\ 104.54$, 其与 4 种作战意图的同一度分别为:

$$a_{11}^{[1]} = \frac{825.02}{1\ 104.54} \approx 0.746\ 9,$$

$$a_{11}^{[2]} = \frac{1\ 104.54}{2\ 800} \approx 0.394\ 5,$$

$$a_{11}^{[3]} = \frac{1\ 104.54}{2\ 276.24} \approx 0.485\ 2,$$

$$a_{11}^{[4]} = \frac{1\ 104.54}{4\ 025.08} \approx 0.274\ 4.$$

由于 $a_{11}^{[1]} = \max_{t=1,2,3,4} a_{11}^{[t]} = 0.746\ 9$, y_1 在 4 种作战意图中与侦察的同一度最大, 所以 y_1 在方位角上体现出的作战意图是 S_1 (侦察), 如此得到表 8.

表 8 待识目标的作战意图的初步判断

Table 8 Preliminary judgement to the target intention to be inferred

待识目标	β	d	v	θ	H	综合意图
y_1	侦察	攻击	攻击	突防	突防	攻击或突防
y_2	监视	突防	监视	攻击	监视	监视
y_3	突防	突防	侦察	监视	突防	突防

6) 综合各个待识别目标的作战意图, 由表 8 可见, 目标 y_3 在 5 个特征值上, 有 3 个是突防、1 个是侦察、1 个是监视, 所以, 综合意图为突防; 目标 y_2 在 5 个特征中有 3 个监视、1 个突防、1 个攻击, 故综合意图定为监视; 目标 y_1 在 5 个特征上有 2 个突

防、2个攻击、1个侦察,所以综合意图为攻击或突防.各目标的综合意图列在表8的最右侧.

7) 不确定性分析.

①文献[1]的结论中 y_3 是突防 y_2 是监视,这与本文一致.但文献[1]对 y_1 的意图识别结果是侦察,而本文显示,该目标只在1个特征上归属侦察,各有2个特征归属攻击和突防,因此所得综合结论是攻击或突防.这与文献[1]明显不同,究竟哪一个识别结论更符合实际呢?分析如下.

由于表4、5中给出的是“平均值+波动值”形式的联系数,因此这里从平均值的角度来分析.

在距离 d (km) 这个特征上, y_1 的平均值是205 km,而4种作战意图在该特征上的平均值分别是 $d_{s_1} = 281.5$ $d_{s_2} = 260$ $d_{s_3} = 182.5$ $d_{s_4} = 115$. 由于 $\frac{182.5}{205} \approx 0.89$ $\frac{205}{260} \approx 0.79$ $\frac{205}{281.5} \approx 0.73$ $\frac{115}{205} \approx 0.56$, 也就是205与182.5(攻击)的同一程度(接近程度)要比205与其他特征值的同一程度(接近程度)都大,所以 y_1 在该特征上的意图首选为攻击,而不是侦察.

其次是水平速度 v ($m \cdot s^{-1}$), 目标 y_1 在该特征上的平均值是310,与表4中 S_3 (攻击)这个作战意图在该特征上的基准值310完全相同,而与其他特征值明显不同,所以 y_1 在水平速度这个特征上的作战意图明显是攻击,而不是侦察.

再看航向角 θ ($^\circ$), y_1 的航向角范围是 $[45^\circ, 51^\circ]$, 平均值为48,与表4对照后,十分明显地显示出作战意图是突防,而不是侦察.

最后看高度 H (km), y_1 的高度范围是 $[3, 4]$, 平均值为3.5,对照表4,显然,其作战意图也是突防,而不是侦察.

综合以上分析,目标 y_1 的综合作战意图不是侦察,而是攻击或突防.

② i 的取值分析. 由于上面进行了本文结果与文献[1]结果的对照分析,对相同的结论作了肯定,也对不同的结论(y_1 的作战意图)作了分析说明,充分证明了本文认为的待识目标 y_1 的作战意图是攻击或突防,比文献[1]认为是侦察的识别更为客观合理,所以,为节约篇幅起见,不再一一取值分析.

事实上,由于本文采用各联系数的“模”作为聚类识别依据,而根据“模”的计算公式(6)可见,“模”中不仅有“平均值”信息,也有“波动值”信息;因此,在一定程度上反映出原始数据为区间数时的相对确定性信息和相对不确定性信息以及这2类信息的相互作用信息,因而所得结论具有较好的客观

合理性.

4 结束语

本文基于集对分析理论,首次将联系数用于军事空战中不确定空情意图识别,给出了一种可供实战采用的不确定空情意图识别新方法,具有重要的理论意义与军事应用价值.与已有的区间数排序方法所不同的是:本文把区间数转换成联系数及其三角函数表达式的方法不仅承认了区间数上下界取值的确定性(取区间数上下界的平均值作为联系数的确定部 A),也承认了区间数在上下界内取值的不确定性(取围绕区间数上下界平均值的波动幅度作为联系数的不确定部 B),还承认了区间数的确定性与不确定性的相互作用(A 与 B 构成的“模”),并对对应特征上的模的同一度展开具体分析.这种把相对确定的计算与不确定分析有机结合的方法,特别是这种方法的合理性和有效性以及算法的经济性与简明性,不仅能对不确定空情信息的目标作战意图进行科学的识别,而且对其他不确定信息的处理也具有方法论意义.另外,本文实例仅用到联系数的向量运算而没有用到联系数的代数运算,而后者已经在网络计划^[21]、电网调度^[22]、工程预先危险性分析^[23]等多方面得到应用,既说明了联系数有较强的适用性,也说明在一个具体的不确定性问题中,存在如何选择联系数算法的问题,下一步工作将对此另行研究.

参考文献:

[1]张肃,程启月,解瑶,等.不确定空情信息条件下的意图识别方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(3):50-53.
ZHANG Su, CHENG Qiyue, XIE Yao, et al. A method of inference intention with uncertain aerial information [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(3): 50-53.

[2]徐泽水,达庆利.区间数的排序方法研究[J].系统工程,2001,19(6):94-96.
XU Zeshui, DA Qingli. Research on method for ranking interval numbers [J]. Systems Engineering, 2001, 19(6): 94-96.

[3]张吉军.区间数的排序方法研究[J].运筹与管理,2003,12(3):18-22.
ZHANG Jijun. Research on method for ranking interval numbers [J]. Operations Research and Management Science, 2003, 12(3): 18-22.

[4]孙海龙,姚卫星.区间数排序方法述评[J].系统工程学报,2010,26(3):304-314.

- SUN Hailong, YAO Weixing. Comments on methods for ranking interval numbers [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 26(3): 304-314.
- [5] 肖峻, 张跃, 付川. 基于可能度的区间数排序方法比较 [J]. *天津大学学报*, 2011, 57(8): 705-711.
XIAO Jun, ZHANG Yue, FU Chuan. Comparison between methods of interval number ranking based on possibility [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 57(8): 705-711.
- [6] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理 [J]. *信息与控制*, 1995, 24(3): 162-166.
ZHAO Keqin. Disposal and description of uncertainties based on the set pair analysis [J]. *Information and Control*, 1995, 24(3): 162-166.
- [7] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000: 1-198.
- [8] 赵克勤. 集对分析的不确定性理论在 AI 中的应用 [J]. *智能系统学报*, 2006, 1(2): 16-25.
ZHAO Keqin. The application of uncertainty systems theory of set pair analysis (SPA) in the artificial intelligence [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2006, 1(2): 16-25.
- [9] 赵克勤. SPA 的同异反系统理论在人工智能研究中的应用 [J]. *智能系统学报*, 2007, 2(5): 27-35.
ZHAO Keqin. The application of SPA-based identical-discrepancy-contrary system theory in artificial intelligence research [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2007, 2(5): 27-35.
- [10] 赵克勤. 二元联系数 $A + Bi$ 的理论基础与基本算法及在人工智能中的应用 [J]. *智能系统学报*, 2008, 3(6): 476-486.
ZHAO Keqin. The theoretical basis and basic algorithm of binary connection $A + Bi$ and its application in AI [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, 3(6): 476-486.
- [11] 赵森烽, 赵克勤. 概率联系数化的原理及其在概率推理中的应用 [J]. *智能系统学报*, 2012, 7(3): 200-205.
ZHAO Senfeng, ZHAO Keqin. Principles and applications of the probability of connection number in probability [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2012, 7(3): 200-205.
- [12] 叶跃祥, 糜仲春, 王宏宇, 等. 一种基于集对分析的区间数多属性决策方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(9): 1344-1347.
YE Yuexiang, MI Zhongchun, WANG Hongyu, et al. Set-pair-analysis-based method for multiple attributes decision-making with intervals [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(9): 1344-1347.
- [13] 汪新凡, 杨小娟. 基于联系数贴近度的区间数多属性决策方法 [J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(3): 16-22.
WANG Xinfan, YANG Xiaojuan. Connection-number-similarity-measure-based method for multiple attribute decision making with interval numbers [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(3): 16-22.
- [14] 谭乐祖, 杨明军. 采用区间数的集对分析目标威胁判断模型 [J]. *电光与控制*, 2011, 42(2): 73-76, 84.
TAN Lezu, YANG Mingjun. A SPA based target threat evaluation model using interval numbers [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 42(2): 73-76, 84.
- [15] 于洋. 基于联系数 $A + Bi$ 的区间多属性决策在炮兵中的运用 [J]. *舰船电子工程*, 2011, 31(2): 39-41, 141.
YU Yang. Application of zone more decision in artillery based on the contact number $A + Bi$ [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(2): 39-41, 141.
- [16] 刘秀梅, 赵克勤. 基于联系数复运算的区间数多属性决策方法及应用 [J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(23): 57-64.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attribute decision making and its applications based on complex number arithmetic operation of connection number with interval numbers [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(23): 57-64.
- [17] 刘秀梅, 赵克勤. 基于 SPA 的 D-U 空间的区间数多属性决策模型及应用 [J]. *模糊系统与数学*, 2009, 23(2): 167-174.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attribute decision making and its applications with interval numbers based on D-U space of SPA [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2009, 23(2): 167-174.
- [18] 刘秀梅, 赵克勤. 基于联系数确定性与不确定性相互作用的多属性决策 [J]. *数学的实践与认识*, 2009, 39(8): 68-75.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attribute decision making based on the interval numbers certainty and the uncertainty interact on each other [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 39(8): 68-75.
- [19] 刘秀梅, 赵克勤. 基于联系数不确定分析的区间数多属性决策 [J]. *模糊系统与数学*, 2010, 24(5): 141-148.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attributes decision-making of intervals based on analysis of the uncertainty of connection number [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2010, 24(5): 141-148.
- [20] 赵克勤. 基于集对分析的不确定性多属性决策模型及算法 [J]. *智能系统学报*, 2010, 5(1): 41-50.
ZHAO Keqin. Decision making algorithm based on set pair analysis for use when facing multiple uncertain attributes [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2010, 5(1): 41-50.
- [21] 黄德才, 赵克勤. 用联系数描述和处理网络计划中的不确定性 [J]. *系统工程学报*, 1999, 15(2): 10-15.
HUANG Decai, ZHAO Keqin. Using the connection num-

ber of the SPA to express and process the uncertainties in network planning [J]. *Journal of Systems Engineering*, 1999, 15(2): 10-15.

[22] 金华征 程浩忠 杨晓梅, 等. 基于联系数模型的电网灵活规划方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 43(12): 16-20.

JIN Huazheng, CHENG Haozhong, YANG Xiaomei, et al. Transmission network flexible planning based on connection number model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 43(12): 16-20.

[23] 张清河. 基于联系数的预先危险性分析技术与应用 [J]. *数学的实践与认识*, 2005, 35(3): 165-171.

ZHANG Qinghe. A new technology and its apply of preliminary hazard analysis considering of uncertainty [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2005, 35(3): 165-171.

作者简介:



刘秀梅, 女, 1963年生, 教授, 中国系统工程学会决策科学专业委员会委员, 连云港市“学术、技术带头人”。主要研究方向为数学教育、数学分析和联系数学等, 发表学术论文50余篇。



赵克勤, 男, 1950年生, 研究员, 浙江大学非传统安全与和平发展中心集对分析研究所所长, 中国人工智能学会理事、人工智能基础专业委员会副主任、集对分析联系数学专业筹备委员会主任。主要研究方向为联系数学, 1989年提出集对分析(联系数学), 发表学术论文90余篇, 出版专著1部。

欢迎订阅 2013 年期刊

《哈尔滨工程大学学报》(月刊)

《哈尔滨工程大学学报》是由工业和信息化部主管、哈尔滨工程大学主办的国内外公开发行的理工科综合性学术期刊, 创刊于1980年, 是入选中国期刊方阵的中文核心期刊。该刊深入落实内涵式发展战略, 依托学校“三海一核”学科优势, 坚持严把学术质量关, 着力突出船海特色, 扩大业内影响力, 在国内大学学报类科技期刊中独树一帜。该刊曾荣获工信部科技期刊评比“优秀期刊奖”, 中国高校科技期刊评比“精品期刊奖”, “北方十佳期刊奖”和首届黑龙江省政府出版奖——优秀期刊奖。多年来, 该刊刊登了大量的包含船舶与海洋工程、水声工程、核科学与应用、能源与动力、自动化技术、计算机与通信、建筑工程、材料与化学等多个领域的优秀稿件。

目前, 该刊已被以下重要检索系统列为来源期刊:

- ◆ 美国《工程索引: 核心期刊》(EI Compendex)
- ◆ 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- ◆ 日本《科学技术文献速报》(JST)
- ◆ 中国科学引文数据库(CSCD)
- ◆ 美国《剑桥科学文摘: 工程技术》(CSA)
- ◆ 《英国海运技术》(BMT)

邮发代号: 14-111 连续出版物号: ISSN 1006-7043 CN 23-1390/U 定价: 20元/期 240元/年

地址: (150001) 哈尔滨市南岗区南通大街145-1号楼 哈尔滨工程大学期刊社

电话: 0451-82519357 <http://heuxb.hrbeu.edu.cn> E-mail: xuebao@hrbeu.edu.cn