

## 基于权重的云推理算法

杨超\*, 燕雪峰, 张洁, 周勇

(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 南京 210016)

(\* 通信作者电子邮箱 crash\_magic@qq.com)

**摘要:**虽然正态云模型具有普适性,但它在描述论域内单调上升或下降的概念时存在一些局限性,同时由于现有的云推理算法存在多条件下人为主观因素影响大、运算量大等问题,为此提出一种新的指数云模型来描述单调概念,并基于此提出一种基于权重的云推理算法。该算法将多条件发生器拆分为多个一维发生器,先通过层次分析法确定各个条件的属性权重,再采取加权平均法将单条件单规则发生器输出的结果精确化为一个具体的输出值。将基于权重的云推理算法用于鱼雷规避仿真系统中,并与模糊推理结果进行比较,验证了该算法的有效性和实用性。

**关键词:**云模型;指数云;权重;云推理;层次分析法;规则发生器

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A

### Weight-based cloud reasoning algorithm

YANG Chao\*, YAN Xuefeng, ZHANG Jie, ZHOU Yong

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Although the normal cloud model is universally used, it faces some difficulties when describing some monotonic rise/fall conceptions. This model also has big subjective influence under multiple conditions and large computation consumption. To overcome these shortcomings, a new kind of exponential cloud model was provided along with a weight based cloud reasoning algorithm. By splitting the multi-condition generator to several single-condition generators, the algorithm firstly used Analytic Hierarchy Process (AHP) method to get weight of each property, and then used them to calculate weighted average of single-condition generator output to quantify value. The validation and effectiveness of this method is checked through a comparison between fuzzy reasoning and stimulation of torpedo avoid system.

**Key words:** cloud model; exponential cloud; weight; cloud reasoning; Analytic Hierarchy Process (AHP); rule generator

## 0 引言

自然语言是人类智慧的结晶,在人工智能中具有重要的地位,它是通过语言值来表示概念,而这些概念通常具有不确定性。以往研究不确定性的方法有很多,如概率论、模糊集理论、粗糙集理论等,但利用这些方法来研究概念的不确定性尚存在一定的局限性。特别在研究自然语言的模糊性和随机性时,这些方法没有很好地将两者联系起来。李德毅院士在传统模糊数学和概率统计的基础上提出了定性定量互换模型——云模型,它把概念的模糊性和随机性有机地综合在一起,实现了概念的定性值与数字的定量值之间的自然转换<sup>[1-2]</sup>。

近年来,正态云模型被广泛应用于空袭目标威胁评估<sup>[3]</sup>、遥感图像分类<sup>[4]</sup>、项目评价<sup>[5]</sup>等领域。尽管正态云具有普适性<sup>[1]</sup>,但仍无法表述一些特定的概念。文献[6]中提出多种扩展的正态云发生器,有效地扩大了云模型的应用场合。同时,李德毅院士在云模型基础上,引入不确定性推理方法,通过构建规则发生器能有效表示用自然语言描述的定性

规则,实现了带有不确定性的推理。现有的应用与研究主要集中在利用云模型构建单条件单规则发生器进行不确定推理。对于多条件的情况,文献[1]提出通过“软与”操作构建规则发生器;文献[7]则将单条件单规则发生器推广到双条件单规则发生器,乃至多条件单规则发生器,并给出相应算法。由于这两种方法存在人为主观因素影响大、运算量大和定性概念单一的问题<sup>[8]</sup>,本文提出一种新的指数云模型来描述单调概念,并基于此提出一种基于权重的云推理算法。

## 1 指数云模型

### 1.1 云模型相关概念

**定义 1** 论域  $X = \{x\}$  中的元素根据某个法则  $f$ , 可将  $X$  映射到另一个有序的论域  $X'$  上,  $X'$  中有且仅有一个  $x'$  和  $x$  对应, 则  $X'$  为基础变量, 隶属度在  $X'$  的分布叫作隶属云<sup>[2]</sup>。

云模型的整体特征可以用三个数字特征值来表征, 即期望  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$ 。

期望 云滴在论域空间分布的期望。它是最能代表定性概念的点, 是概念量化的最典型样本。

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2013-10-14。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61139002); 国防科工局十二五重大基础科研项目(c0420110005)。

作者简介: 杨超(1989-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要研究方向: 系统建模与仿真、软件工程; 燕雪峰(1975-), 男, 江苏泰兴人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 分布交互仿真、计算机网络; 张洁(1989-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 系统建模与仿真、人工智能; 周勇(1975-), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 人工智能、专家系统、智能推理。

熵 在云模型中用来衡量定性概念的模糊程度,其值的大小直接决定满足该定性概念所涵盖的论域范围,熵越大,则该定性概念横跨的论域范围越大。

超熵 表示熵的熵,主要用来体现云滴的离散程度。从云图分布上看,超熵越大,云滴分布越离散,云层也就越厚。当超熵为 0 时,隶属云退化为模糊理论中的精确隶属度函数曲线。

李德毅等基于正态分布和钟形隶属度函数的普适性,论证了正态云模型的普适性。

定义 2 若随机变量  $x$  满足:  $x \sim N(Ex, En^2)$ , 其中  $En' \sim N(En, He^2)$ , 对定性概念的确定度满足:  $\mu(x) = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En^2}}$ , 则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为正态云, 图 1 是概念  $C(10, 1, 0.1)$  对应的云滴分布。

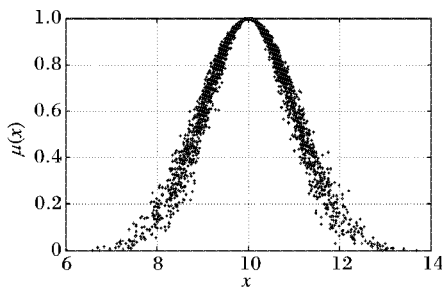


图 1 正态云的云滴分布 ( $Ex = 10, En = 1, He = 0.1, N = 3000$ )

### 1.2 新的指数云模型

指数分布是常见的概率分布之一,文献[9]基于指数分布函数提出一种指数云模型,用来描述关于寿命、排队等待时间和失效分布等定性概念。除此之外,在日常生活中经常会遇到一些在论域内单调上升或下降的概念,比如“寒冷”,通常人们认为气温低于 0 度时,气候十分寒冷;再比如“优秀学生”,通常认为学生的成绩高于 90 分就是优秀学生。对于此类定性概念,正态分布同样无法准确描述,而指数分布的累积分布函数在论域中具有单调性,更适于表述此类定性概念。

隶属函数是模糊集合论的基础,模糊概念的隶属函数并没有严格的确定方法,大多依靠实际经验确定。指数分布的累积分布函数描述该类定性概念较为合适,参考文献[9]中的隶属函数,本文给出一种新的指数型隶属度函数定义,  $\mu(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ 。正态云模型的确定度是基于正态型隶属函数建立的,因此,可以在指数型隶属函数的基础上定义指数云。

定义 3 设  $U$  是一个精确数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念,若定量值  $x \in U$ , 且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,若  $x$  满足:  $x \sim P(\lambda)$ , 其中  $1/\lambda \sim N(Ex, He^2)$ , 且  $x$  对  $C$  的确定度满足

$$\mu = 1 - e^{-\lambda x}$$

则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为指数云。如同正态云,指数云的数字特征也用期望  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  三个数值来表示:  $Ex$  (期望) 为确定度接近 0.9 的定量值;  $En$  (熵) 为定量值的起始点,确定论域中模糊概念的范围;  $He$  (超熵) 和正态云模型中的超熵意义相同,是不确定度量,其大小间接地表示了指数云的离散程度和厚度。

如图 2 所示,正向指数云发生器从概念表达的定性信息中获取定量数据的范围和分布情况,即由指数云的数字特征

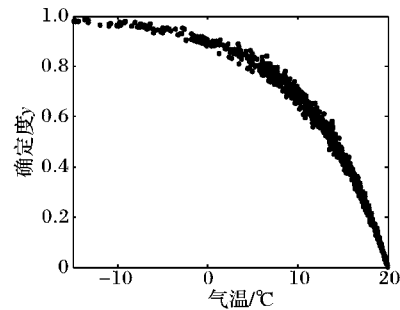
得到指数云的云滴分布,正向指数云发生器实现算法如下。

算法 1 一维正向指数云发生器算法。

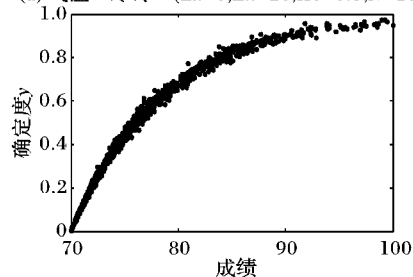
输入 定性概念的数字特征 ( $Ex, En, He$ ) 及云滴数  $N$ ;  
输出  $N$  个云滴的定量值以及代表的确定度  $\mu_i$ 。

- 1) 计算期望值  $Ex' = (Ex - En) / (\ln 10)$ ;
- 2) 生成以  $Ex'$  为期望值、 $He$  为方差的正态随机数  $\lambda$ ;
- 3) 生成以  $\lambda$  为期望值的指数分布的随机数  $\mu_i$ ;
- 4) 计算确定度  $\mu_i = 1 - e^{-(1/\lambda)x_i}$ ;
- 5) 具有确定度  $\mu_i$  的  $x_i$  成为数域中的一个云滴;
- 6) 重复步骤 2) ~ 5), 直至产生要求的  $N$  个云滴为止。

由指数云特征参数定义可知,  $En$  为定量值起始点,当  $Ex > En$  时,期望曲线在论域内单调上升;当  $Ex < En$  时,期望曲线在论域内单调下降。一维正向指数云发生器使用 Matlab 7.0 软件实现,并使用 Normrnd 函数生成服从指数分布的随机数。



(a) 气温“寒冷” ( $Ex=0, En=20, He=0.5, N=1000$ )



(b) “优秀”学生 ( $Ex=90, En=70, He=0.5, N=1000$ )

图 2 指数云的云滴分布

### 1.3 前件指数云发生器和后件指数云发生器

在云推理过程中,给定论域中一个定量值  $x$ ,通过正向云发生器生成定量值  $x$  属于定性概念的确定度  $\mu$ ,称为前件云发生器。确定度  $\mu$  每次实现都带有不确定性,一维前件指数云发生器具体算法如下:

算法 2 一维前件指数云发生器算法。

输入 一维定性概念的数字特征 ( $Ex, En, He$ ) 及定量值  $x$ ;

输出 定量值  $x$  属于定性概念的确定度  $\mu$ 。

- 1) 生成期望值  $Ex' = (Ex - En) / \ln 10$ ;
- 2) 生成以  $Ex'$  为期望值、 $He$  为方差的正态随机数  $\lambda$ ;
- 3) 计算确定度  $\mu = 1 - e^{-(1/\lambda)x}$ 。

给定确定度  $\mu \in [0, 1]$ ,通过正向云发生器生成定性概念上满足确定度  $\mu$  的定量值  $x$ ,称为后件云发生器。定量值  $x$  每次实现都带有不确定性,后件指数云发生器具体算法如下:

算法 3 一维后件指数云发生器算法。

输入 一维定性概念的数字特征 ( $Ex, En, He$ ) 及确定度  $\mu, \mu \in [0, 1]$ ;

输出 满足确定度  $\mu$  的定量值  $x_0$ 。

- 1) 生成期望值  $Ex' = (Ex - En) / \ln 10$ ;
- 2) 生成以  $Ex'$  为期望值,  $He$  为方差的正态随机数  $\lambda$ ;
- 3) 计算定量值  $x = En - \lambda \ln(1 - \mu)$ 。

## 2 基于权重的云推理算法

### 2.1 传统云推理算法

传统的云规则发生器是基于正态云模型的不确定性推理,规则库由正态云描述的定性概念组成,未讨论其他类型的云模型。现有的应用与研究主要集中在利用云模型构建单条件单规则发生器进行不确定推理,而对于多条件情况,目前有以下两种常用算法:一是通过“软与”操作将多个一维前件云发生器和一个后件云发生器连接起来构成规则发生器。以双条件单规则发生器为例,在进行“软与”操作时,常用二维正态云  $C(1, En_x, He_x, En_y, He_y)$  表示“软与”概念。 $En_x, He_x, En_y, He_y$  作为“软与”程度的调节参数需要有经验的专家来确定它们的值,所以人为主观因素会影响到推理过程。而且随着规则条件数增加,需要专家确定的调节参数变多,其存在的不确定性也大大增加。二是将二维前件云发生器与一维后件云发生器相连接构造出双条件单规则 IF  $A_1, A_2$  THEN  $B$  发生器<sup>[7]</sup>。由于给定的输入值可能激活规则前件概念  $A_1$  和  $A_2$  的上升沿和下降沿,因此规则的后件具体输出情况分为 4 种。若规则包含  $n$  个条件,需要讨论的后件输出情况就有  $2n$  种,所以,随着条件数的增加,运算量也变得更大。

### 2.2 基于权重的云推理算法

针对传统云推理算法存在的问题,本文提出一种基于权重的云推理算法。该算法的主要思想是将多维发生器拆分为多个一维发生器,再向一维发生器中嵌入指数云发生器,最后采用加权平均法将多个一维发生器输出的定量值精确化为一个输出值,其权重是每个条件的属性权重。假设规则包含  $n$  个条件,“软与”法需要专家确定  $2n$  个调节参数的值,文献<sup>[7]</sup>提出的多条件发生器需讨论  $2n$  种输出情况,而本文提出的云推理算法只需通过单条件单规则发生器计算  $n$  次再将输出的结果精确化为一个输出值即可,其不确定性和计算量均远小于传统方法,并将指数云模型融入到云规则发生器中。

由于传统的云规则发生器没有考虑条件对结果的贡献不同,认为所有条件的重要性是一样的。本文提出根据条件对结果的相对重要程度确定前件属性权重。系统工程理论中的层次分析法<sup>[10]</sup>是一种较好的权重确定方法,它不仅降低了计算的复杂度,提高了权重的精确度和科学性,而且通过对判断矩阵进行一致性检验等措施,提高了权重确定的可信度。本文应用层次分析法确定条件属性权重并使用 Matlab 7.0 软件实现该算法,具体算法如下:

算法 4 基于层次分析法的条件属性权重计算:

输入 多条件规则 IF  $A_1, A_2, \dots, A_n$  THEN  $B$  以及各个条件对结果的相对重要程度。

输出 各条件权重  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 。

- 1) 构造判断矩阵:  $u_{ij}$  表示  $A_i$  对  $A_j$  的相对重要程度,并由  $u_{ij}$  组成判断矩阵  $P$ 。
- 2) 一致性检验:对判断矩阵进行一致性检验。若不合理需调整  $P$  中元素以使具有满意的一致性。

3) 计算重要性排序:根据判断矩阵,求出其最大特征根  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量  $\omega_0$ 。方程如下:  $P\omega = \lambda_{\max}\omega_0$ 。所求特征向量  $\omega$  经归一化,即为各个条件的重要性排序,也就是权重分配。输出各条件权重  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 。

在得到所有条件属性权重后,再通过云规则发生器得到最终输出,具体算法流程如图 3 所示。

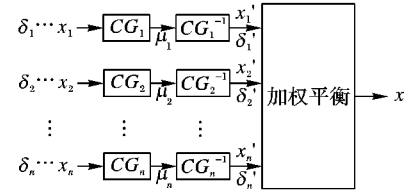


图 3 基于权重的云推理算法流程

算法 5 基于权重的多条件单规则发生器。

输入 前件定性概念的数字特征  $C_1(Ex_1, En_1, He_1), C_2(Ex_2, En_2, He_2), \dots, C_n(Ex_n, En_n, He_n)$ , 定量值  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 前件权重  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  以及后件定性概念的数字特征  $C(Ex, En, He)$ ;

输出 满足后件定性概念的定量值  $x_0$ 。

- 1) 先将  $N$  维单规则发生器拆分为一维规则发生器,分别计算每个属性条件对应的输出值  $x_i$ 。
- 2) 若前件定性概念的数字特征为正态云,转到步骤 3); 数字特征为指数云,转到步骤 5)。
- 3) 若  $x \leq Ex_i$ , 则  $x$  处于上升沿; 若  $x > Ex_i$ , 则  $x$  处于下降沿。
- 4) 根据一维前件云发生器<sup>[7]</sup> 输出确定度  $\mu = e^{-\frac{(x-Ex_i)^2}{2En^2}}$ , 转到步骤 7)。
- 5) 若  $En \leq Ex$ , 则  $x$  处于上升沿; 若  $En > Ex$ , 则  $x$  处于下降沿。
- 6) 根据算法 2 输出确定度  $\mu = 1 - e^{-(1/\lambda)x}$ 。
- 7) 若后件定性概念的数字特征为正态云,转到步骤 8); 数字特征为指数云,转到步骤 9)。
- 8) 根据一维后件云发生器<sup>[7]</sup> 计算满足确定度的  $x' = Ex \pm En' \times \sqrt{-2 \ln \mu}$ , 若  $x$  处于上升沿取“-”, 否则取“+”。回到步骤 2), 计算下一个条件对应的属性值, 若全部计算完毕, 转到步骤 10)。
- 9) 根据算法 3 计算满足确定度的  $x' = En - \lambda \ln(1 - \mu)$ 。回到步骤 2), 计算下一个条件对应的属性值, 若全部计算完毕, 转到步骤 10)。
- 10) 根据前件各条件属性权值, 采用加权平均法输出定量值:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i \times x_i)}{\sum_{i=1}^N \delta_i}$$

若输入值激活了多条规则,将每条规则对应的输出值求和平均得到最终输出。算法 5 中的一维规则发生器所针对的定性概念不仅仅是正态云,还能将符合指数云分布的概念进行定量转换。由于指数云模型在论域内单调上升或下降,其输入值能根据指数云的单调性确定处在上升沿或下降沿。同样,当后件云符合指数云分布时,也可以根据其单调性确定唯

一的定量值。该算法在开发环境 Visual Studio 2005 下使用 C++ 语言实现。

### 3 实例验证

在水下作战中,潜艇被鱼雷发现时,鱼雷规避系统<sup>[11-12]</sup>根据设备提供的鱼雷、诱饵、干扰机等信息推理决定诱饵、干扰机的下一步工作,诱骗或发射干扰鱼雷使潜艇能够规避鱼雷攻击。

在鱼雷规避仿真规则库中,所有规则的条件分为 3 种:鱼雷与潜艇间的距离、诱饵的状态以及干扰机的状态;结果也分为 3 种:潜艇的行驶方式、诱饵的工作方式以及干扰机的工作方式。规则库由模糊规则组成:

Rule4: IF Torpedo Warning and Decoy Empty THEN  
Move\_Quietly\_Against\_Torpedo\_Direction  
Rule7: IF Torpedo Danger and Decoy Empty and Jammers Empty THEN  
Move\_At\_Full\_Speed\_Against\_Torpedo\_Direction

文献[11]中采用模糊推理法进行决策,这种方法要求数据精度高,并且不能兼顾随机性和模糊性,而云模型具有在定性概念与其定量值表示之间转换的优良特性,能够很好地将随机性与模糊性结合起来。本文将描述定性概念的隶属度函数转化为正态云模型以及指数云模型,以鱼雷与潜艇间距离这一定性概念为例,原隶属度函数图中,距离“远”在 3000~8000 m 范围内单调上升,“近”在 0~2000 m 范围内单调下降,均用指数云来表示,距离“中”用正态云来表示,如图 4 所示。

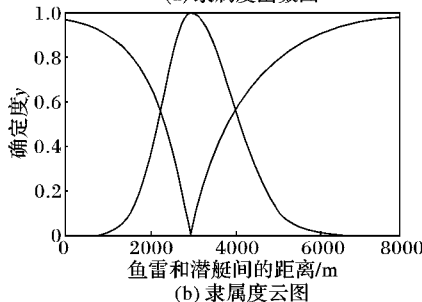
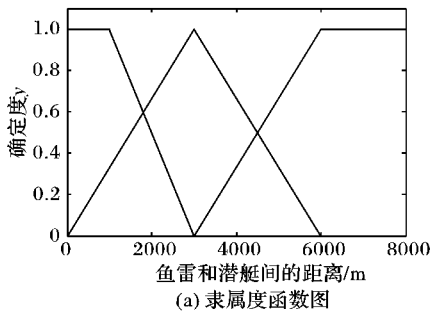


图 4 隶属度函数转化为云模型

将规则库中所有定性概念进行云模型转换,规则转换完毕后,应用层次分析法计算属性权重:首先根据条件与结果建立层次模型,如图 5 所示。

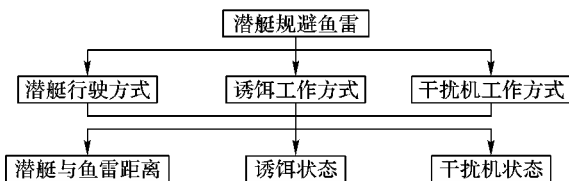


图 5 潜艇规避鱼雷层次结构模型

根据层次结构模型,设计好调查问卷供 10 位专家填写。

综合专家们的答案后,将调查结果转化为判断矩阵  $A_1, A_2, A_3$ , 矩阵按照层次结构模型顺序构造:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 3 \\ 7 & 1 & 9 \\ 1/3 & 1/9 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/7 \\ 1/3 & 1 & 1/9 \\ 7 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵  $A_1, A_2, A_3$  进行一致性检验,CR 分别为 0.059, 0.069 2, 0.025 1 均小于 0.10, 不一致性均可接受。通过计算,分别得到三个矩阵相应的权向量:  $\omega_1 = (0.723 5, 0.193 2, 0.083)$ ,  $\omega_2 = (0.154 9, 0.776 6, 0.068 5)$ ,  $\omega_3 = (0.154 9, 0.776 6, 0.068 5)$ 。由此确定规则库中 3 个条件相对于 3 个结果的属性权重。

在仿真中,潜艇发现鱼雷的距离分别设置为 1425 m、1450 m、1475 m、1500 m,每个距离仿真 100 次,每次仿真中鱼雷和潜艇的初始距离设置 12.5 m 的随机误差。本仿真系统在 Windows XP 操作系统上运行,开发环境为 Microsoft Visual Studio 2005,开发语言为 C++,使用第三方组件 TeeChart Pro v5 ActiveX Control,仿真分别使用基于传统规则的模糊推理以及基于权重的隶属云推理两种方法进行决策,图 6 是不同距离上鱼雷规避成功的概率分布情况。

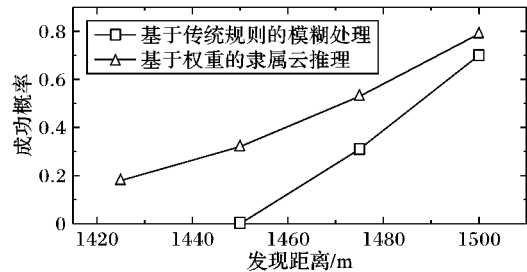


图 6 潜艇规避鱼雷层次结构模型

图 6 中模糊推理的仿真结果来自文献[11],隶属云推理的仿真条件和初始态势均与文献[11]中仿真环境相同。使用模糊推理方法进行决策时,发现距离小于 1450 m 时潜艇没有存活的可能性。而使用基于权重的云推理方法进行决策时,在发现距离为 1425 m 时潜艇规避成功的概率就大于 0;在 1425 m~1500 m,云推理法决策的效果都要优于模糊推理,提高了潜艇存活的几率。

### 4 结语

本文提出了一种新的指数云模型,并给出其定义以及一维正向云发生器算法。指数云模型较正态云能更好地表示在论域内具有单调性的定性概念,同时也是对其他云模型理论应用的一些探索。另外,本文提出了一种基于权重的云推理算法,它解决了传统云理论中人为主观因素影响过大和运算量大的问题,并且允许规则库中包含以指数云描述的定性概念。文中实例表明:该方法能对战时态势的不确定性与随机性进行处理,提高了潜艇在受到鱼雷攻击时安全逃离的可能

性,效果明显优于模糊推理算法。在仿真过程中规则的激活对决策结果有较大影响,当输入值激活多条规则时采用求和平均得到输出值,因此多规则发生器的研究是下一步工作重点。

#### 参考文献:

- [1] LI D, DU Y. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.)
  - [2] LI D, MENG H, SHI X. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research Development, 1995, 32(6): 15-20. (李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.)
  - [3] WANG X, WANG W. Air-attack target threat assessment based on cloud model[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 41(2): 201-203. (王晓璇, 王蔚旻. 基于云模型的空袭目标威胁程度估计[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(2): 201-203.)
  - [4] LI G, WAN Y. Uncertainty classification method of remote sensing image based on high-dimensional cloud model and RBF neural network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 115-118. (李刚, 万幼川. 基于高维云模型和 RBF 神经网络的遥感影像不确定性分类方法[J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 115-118.)
  - [5] ZHANG X, JIANG F, LIU G. Comprehensive evaluation method of energy saving project based on cloud model[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(2): 294-296. (张旭东, 蒋方美, 刘桂范. 基于云模型的节能项目综合评价方法[J]. 油气储运, 2012, 31(2): 294-296.)
  - [6] CHEN H, WANG D, ZHANG L. The extended normal cloud generator[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2011, 33(2): 251-255. (陈昊, 王代萍, 张莉. 扩展的正态云发生器[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 251-255.)
  - [7] CHEN H, LI B. Approach to uncertain reasoning based on cloud model[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(12): 2449-2455. (陈昊, 李兵. 基于云模型的不确定性推理方法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2449-2455.)
  - [8] LIU B, LI H, YANG L. Methods of conception soft-and operation in cloud model[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(10): 2510-2512. (柳炳祥, 李海林, 杨丽彬. 云模型中的概念软与求解方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(10): 2510-2512.)
  - [9] WEN Y. Research and realization of qualitative and quantitative integration modeling method based on COSIM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (温艳. 基于 COSIM 的定性定量混合建模方法的研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.)
  - [10] DENG X, LI J, ZENG H, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100. (邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.)
  - [11] SON M J, KIM T. Torpedo evasion simulation of underwater vehicle using fuzzy-logic-based tactical decision making in script tactics manager[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 7995-8012.
  - [12] SON M J, CHO D Y, KIM T, et al. Modeling and simulation of target motion analysis for a submarine using a script-based tactics manager[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(3): 506-516.
- 
- (上接第 490 页)
- [4] ZHOU G, ZOU H, XIONG X, et al. MB-SinglePass: Microblog topic detection based on combined similarity [J]. Computer Science, 2012, 39(10):198-202. (周刚, 邹鸿程, 熊小兵, 等. MB-SinglePass: 基于组合相似度的微博话题检测[J]. 计算机科学, 2012, 39(10):198-202.)
  - [5] DIAO Q M, JIANG J, ZHU F D. Finding Bursty topics from Microblogs[C]// Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2012:536-544.
  - [6] QIU Y, CHENG L. Research on sudden topic detection method for microblog[J]. Computer Engineering, 2012, 38(9):288-290. (邱云飞, 程亮. 微博突发话题检测方法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(9):288-290.)
  - [7] WANG Y, XIAO S, GUO Y, et al. Research on Chinese microblog Bursty topics detection[J]. New Technology of Library and Information Service, 2013, 29(2):57-62. (王勇, 肖诗斌, 郭蹇秀, 等. 中文微博突发事件检测研究[J]. 现代图书情报技术, 2013, 29(2):57-62.)
  - [8] TONG W, CHEN W, MENG X. EDM: An efficient algorithm for event detection in microblogs[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2012, 6(12):1-9. (童薇, 陈威, 孟小峰. EDM: 高效的微博事件检测算法[J]. 计算机科学与探索, 2012, 6(12):1-9.)
  - [9] DU Y Y, HE Y X, TIAN Y, et al. Microblog Bursty topic detection based on user relationship[C]// Proceedings of the 2011 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Piscataway: IEEE, 2011:260-263.
  - [10] ZHENG F, MIAO D, ZHANG Z, et al. News topic detection approach on Chinese microblog[J]. Computer Science, 2012, 39(1):138-141. (郑斐然, 苗夺谦, 张志飞, 等. 一种中文微博新闻话题检测的方法[J]. 计算机科学, 2012, 39(1):138-141.)
  - [11] SONG S Y, LI Q D, ZHENG X L. Detecting popular topics in micro-blogging based on a user interest-based model [C]// Proceedings of the 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence. Piscataway: IEEE, 2012:10-15.
  - [12] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent Dirichlet allocation [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2003, 3:993-1022.
  - [13] ZHANG H P, YU H K, XIONG D Y, et al. HHMM-based Chinese lexical analyzer ICTCLAS[C]// Proceedings of the 2nd SIGHAN Workshop on Chinese Language Processing. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2003: 184-187.
  - [14] SALTON G, BUCKLEY C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval [J]. Information Processing and Management, 1988, 24(5):513-523.