

# 基于相互隶属度的云模型相似性度量方法

付凯<sup>1,2</sup>, 夏靖波<sup>3</sup>, 韦泽鲲<sup>1</sup>, 贾延青<sup>4</sup>

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西, 西安 710077; 2. 95246 部队, 广西, 南宁 530003;  
3. 吉林大学 珠海学院, 广东, 珠海 519041; 4. 93582 部队, 山西, 怀仁 038301)

**摘要:** 针对现有云模型相似性度量方法计算复杂度高、结果不稳定、适用性有限等问题, 提出了一种基于相互隶属度的云模型相似性度量方法。依据云模型期望曲线以公共面积与自身面积之比定义云模型之间的隶属度, 进而利用相互隶属度计算云模型之间的相似度。讨论了不同交点及半云情形下相应面积的计算方法, 并给出了相似度的计算公式及性质证明。仿真实验表明, 该方法能够在多种情形下合理地度量云模型的相似性, 并且具有较高的结果准确度和较低的计算复杂度, 基于云模型的评估实例进一步验证了该方法的有效性。

**关键词:** 云模型; 相似性; 隶属度; 期望曲线

中图分类号: TP18 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2018)04-0405-07

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2018.04.013

## Similarity Measurement Between Cloud Models Based on Mutual Membership Degree

FU Kai<sup>1,2</sup>, XIA Jing-bo<sup>3</sup>, WEI Ze-kun<sup>1</sup>, JIA Yan-qing<sup>4</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;  
2. Unit 95246, Nanning, Guangxi 530003, China; 3. Zhuhai College, Jilin University, Zhuhai,  
Guangdong 519041, China; 4. Unit 93582, Huairan, Shanxi 038301, China)

**Abstract:** A method of similarity measurement between cloud models was proposed based on mutual membership degree to solve the problems existing in current approaches, such as high consumption, unstable conclusion and limited applicability. Firstly, the membership degree of cloud models was defined with the ratio of common cloud area to itself cloud area according to expectation curve. Then, the similarity between cloud models was calculated with the mutual membership degree. Finally, the calculation formula and properties of similarity were produced, considering the calculation of the area with different intersection points and half cloud. Simulation results show that the proposed method can achieve rational similarity measurement between cloud models with high accuracy and low consumption in different situations. And the effectiveness of the method was further verified based on cloud model with an evaluation example.

**Key words:** cloud model; similarity; membership degree; expectation curve

云模型<sup>[1-2]</sup>作为一种定性定量转换的认知模型, 将概念的模糊性和随机性有机结合起来, 实现定性概念和定量数值之间的双向转换, 在系统评价<sup>[3]</sup>、信任评估<sup>[4]</sup>、风险评估<sup>[5]</sup>、智能预测<sup>[6]</sup>、多目标优化<sup>[7]</sup>

等方面具有较广泛的应用。现有云模型理论主要涉及云滴与概念之间的隶属程度判定问题, 而对云与云之间的相似性判定缺乏系统的研究, 定量分析云模型之间的相似性对基于云模型的评估决策具有重

收稿日期: 2016-10-04

基金项目: 航空科学基金资助项目(20141996018); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JZ8005)

作者简介: 付凯(1987—), 男, 博士生, E-mail: fukaia3@163.com; 夏靖波(1963—), 男, 博士, 教授, E-mail: jbxia@sina.com.

要的现实意义.

现有云模型相似性度量方法主要分为基于云滴<sup>[8-9]</sup>、基于云的数字特征<sup>[10-11]</sup>和基于云的几何形态<sup>[12-14]</sup>等三类. SCM 方法<sup>[8]</sup> (similar cloud measurement) 基于云滴距离计算云之间的相似度, 但由于云滴选取的随机性大而造成结果不稳定, 而且对大量云滴距离的计算会带来较高的时间复杂度. 文献<sup>[9]</sup>中利用一个云的云滴对另一个云的平均隶属度计算云之间的相似度, 也存在复杂度高的问题. LICM 方法<sup>[10]</sup> (likeness comparing method based on cloud model) 将云模型的数字特征作为向量, 利用向量夹角的余弦值衡量云之间的相似性, 文献<sup>[11]</sup>中基于数字特征的距离计算相似性, 两种方法仅考虑数字特征而忽略了云模型的不确定性, 而且存在向量的部分分量过度占优问题. 文献<sup>[12]</sup>中提出了一种基于云模型重叠度的相似性度量方法, 本质上是云期望曲线在横轴上投影长度的重叠度, 在一定程度上克服了传统方法的不足. ECM 方法<sup>[13]</sup> (expectation based cloud model) 进一步利用云的几何形态, 基于云期望曲线的面积比例衡量相似性, 其计算复杂度低且结果稳定, 但应用于云模型顶点重合的情形时存在一定问题<sup>[14]</sup>. 文献<sup>[14]</sup>中同样基于面积比例提出一种云相似度的概念跃升间接计算方法 (concept skipping indirect approach of cloud model, CCM), 在一定程度上克服了结果随机性大、区分度不高等问题, 但需要生成新的云模型并计算两次公共面积, 计算复杂度比 ECM 方法稍高.

针对上述问题, 本文提出一种基于相互隶属度的云模型相似性度量方法 (mutual membership degree based similarity measurement between cloud models, MMDCM). 该方法基于云期望曲线的面积比例计算云模型之间的隶属度, 并以相互隶属度衡量云模型之间的相似性. 仿真实验表明, 该方法能够在单交点、双交点等多种情形下取得与现有方法基本一致的结论, 并在计算结果的准确性及稳定性、计算复杂度等方面具有一定的优越性.

## 1 相似性度量方法

### 1.1 基本思想

本文提出一种基于相互隶属度的云模型相似性度量方法, 而相似度和隶属度是两个既有联系又有

区别的概念. 云模型  $C_1$  和  $C_2$  之间的相似度  $S(C_1, C_2)$  反映了两个云所代表定性概念的贴近程度, 具有自反性, 即  $S(C_1, C_2) = S(C_2, C_1)$ . 云模型之间的隶属度  $B(C_1, C_2)$  反映了云  $C_1$  对云  $C_2$  所代表定性概念的隶属程度, 不具有自反性, 即  $B(C_1, C_2)$  与  $B(C_2, C_1)$  不一定相等. 本文进行云模型相似性度量是基于这样的思想: 两个云模型的相似度取决于它们相互之间的隶属度, 即如果云  $C_1$  对云  $C_2$  的隶属度较高, 且云  $C_2$  对云  $C_1$  的隶属度也较高, 则云  $C_1$  和  $C_2$  的相似度较高.

### 1.2 隶属度定义及计算方法

在基于云模型的评估中, 主要涉及到两种隶属度判定: 精确数值与云模型之间的隶属度判定、云模型与云模型之间的隶属度判定. 前者主要通过  $X$  条件云发生器得到数值对各评价云的隶属度, 然后采用最大隶属度原则<sup>[15]</sup>进行判定. 对于后者, 文献<sup>[16]</sup>中提出一种新的一维正态云概念隶属度判定算法, 借用向量思想综合考虑云滴比例和公共面积两方面进行隶属度判定, 但求解云滴比例仍然导致计算量较大, 隶属度合成时也存在向量部分分量过度占优的问题. 该文指出, 两个云的公共面积不能完全决定其隶属度, 对象云落入概念云的云滴数量也对隶属度判定有影响. 如图 1 所示, 可以明显地看出, 云  $C_1$  对云  $C_2$  的隶属度较大, 而反过来云  $C_2$  对云  $C_1$  的隶属度较小. 从云图面积上看, 两个云的公共面积占各云面积的比例是不同的, 公共面积占云  $C_1$  面积的比例较大而占云  $C_2$  面积的比例较小. 当两个云的顶点重合时, 公共面积占云  $C_1$  面积的比例为 1, 此时可认为云  $C_1$  完全隶属于云  $C_2$ .

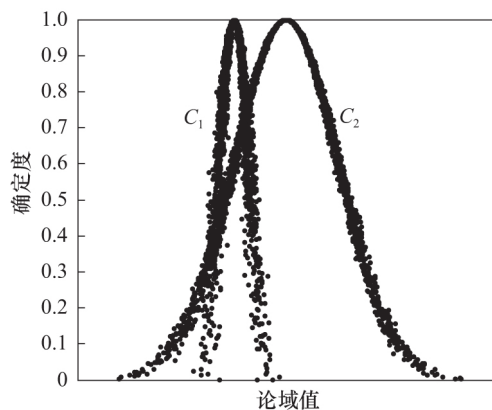


图 1 云之间的隶属度

Fig. 1 Membership degree between cloud models

基于以上分析,本文定义云  $C_1$  对云  $C_2$  的隶属度为

$$B(C_1, C_2) = S_c / S_1, \quad (1)$$

式中:  $S_1$  为云  $C_1$  的面积;  $S_2$  为云  $C_2$  的面积;  $S_c$  为云  $C_1$  和云  $C_2$  的公共面积. 同理,  $B(C_2, C_1) = S_c / S_2$ .

### ① $S_1$ 和 $S_2$ 的计算.

云的期望曲线能够勾勒出云的基本轮廓,因此可以依据期望曲线计算云模型的面积. 设两条云期望曲线分别为  $y_1(x) = \exp[-(x - Ex_1)^2 / 2En_1^2]$  和  $y_2(x) = \exp[-(x - Ex_2)^2 / 2En_2^2]$ , 标准正态分布的概率密度函数和分布函数分别为  $\phi(t)$  和  $\Phi(t)$ , 令

$t = (x - Ex_1) / En_1$ , 则

$$S_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{2\pi}En_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}En_1} \exp\left[-\frac{(x - Ex_1)^2}{2En_1^2}\right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{2\pi}En_1 \phi(t) dt = \sqrt{2\pi}En_1. \quad (2)$$

同理可得,  $S_2 = \sqrt{2\pi}En_2$ .

### ② $S_c$ 的计算.

在计算两个云模型的公共面积时,云的数字特征决定了两条云期望曲线的交点数目和位置,主要分为以下几种情况,如图2所示.

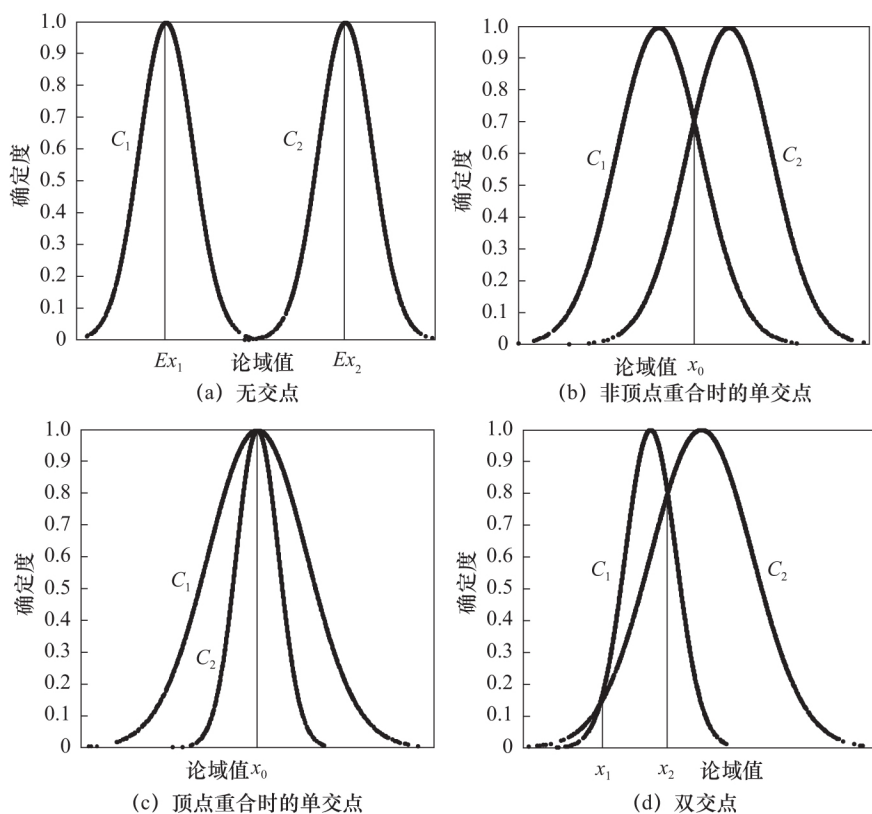


图2 两条云期望曲线相交的不同情况

Fig. 2 Different cases of intersections between two expectation curves

当  $Ex_1 \neq Ex_2, |Ex_2 - Ex_1| \geq 3(En_1 + En_2)$  时,如图2(a)所示,依据“ $3En$ ”规则,本文认为两个云没有交点,即  $S_c = 0$ .

当  $Ex_1 \neq Ex_2, En_1 = En_2, |Ex_2 - Ex_1| < 3(En_1 + En_2)$  时,如图2(b)所示,两个云有单交点,公共面积分为两部分. 以  $Ex_1 < Ex_2$  为例,联立两云期望曲线方程得到交点的横坐标为

$$x_0 = (Ex_1 + Ex_2) / 2,$$

令  $t_1 = \frac{x_0 - Ex_1}{En_1}, t_2 = \frac{x_0 - Ex_2}{En_2}$ , 则

$$S_c = \int_{-\infty}^{x_0} y_2(x) dx + \int_{x_0}^{\infty} y_1(x) dx = \int_{-\infty}^{t_2} \sqrt{2\pi}En_2 \phi(t) dt + \int_{t_1}^{\infty} \sqrt{2\pi}En_1 \phi(t) dt = \sqrt{2\pi}En_2 \Phi(t_2) + \sqrt{2\pi}En_1 (1 - \Phi(t_1)). \quad (3)$$

当  $Ex_1 = Ex_2, En_1 \neq En_2$  时,如图2(c)所示,两个云有单交点,且交点为两云期望曲线的重合顶点,此时两云的公共面积为熵较小的云的面积,即

$$S_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi}En_1 & En_1 < En_2 \\ \sqrt{2\pi}En_2 & En_2 < En_1 \end{cases}. \quad (4)$$

当  $Ex_1 \neq Ex_2, En_1 \neq En_2, |Ex_2 - Ex_1| < 3(En_1 + En_2)$  时, 如图 2(d) 所示, 两个云有双交点, 公共面积分为 3 部分. 以  $Ex_1 < Ex_2, En_1 < En_2$  为例, 此时两交点在云  $C_2$  的左侧, 联立两云期望曲线方程得到两交点的横坐标为

$$\begin{cases} x_1 = (Ex_1 En_2 - Ex_2 En_1) / (En_2 - En_1), \\ x_2 = (Ex_1 En_2 + Ex_2 En_1) / (En_1 + En_2). \end{cases} \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{x_1 - Ex_1}{En_1}, t_2 = \frac{x_1 - Ex_2}{En_2}, \\ t_3 &= \frac{x_2 - Ex_1}{En_1}, t_4 = \frac{x_2 - Ex_2}{En_2}, \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} S_c &= \int_{-\infty}^{x_1} y_1(x) dx + \left( \int_{-\infty}^{x_2} y_2(x) dx - \int_{-\infty}^{x_1} y_2(x) dx \right) + \\ &\quad \int_{x_2}^{\infty} y_1(x) dx = \int_{-\infty}^{t_1} \sqrt{2\pi} En_1 \phi(t) dt + \\ &\quad \left( \int_{-\infty}^{t_4} \sqrt{2\pi} En_2 \phi(t) dt - \int_{-\infty}^{t_2} \sqrt{2\pi} En_2 \phi(t) dt \right) + \\ &\quad \int_{t_3}^{\infty} \sqrt{2\pi} En_1 \phi(t) dt = \sqrt{2\pi} En_1 \Phi(t_1) + \\ &\quad \sqrt{2\pi} En_2 (\Phi(t_4) - \Phi(t_2)) + \sqrt{2\pi} En_1 (1 - \Phi(t_3)). \end{aligned} \quad (6)$$

### ③ 半云情形.

在实际应用中, 某些定性概念(如最优、最差等)可能需要用半云表示, 因此计算云的面积时有了边界约束. 如图 3 所示, 云  $C_2$  为半云, 云  $C_1$  由于边界约束也不是完整的云. 两云的公共面积为  $S_c$ , 两云除公共部分外的面积分别为  $S_1^*$  和  $S_2^*$ , 则

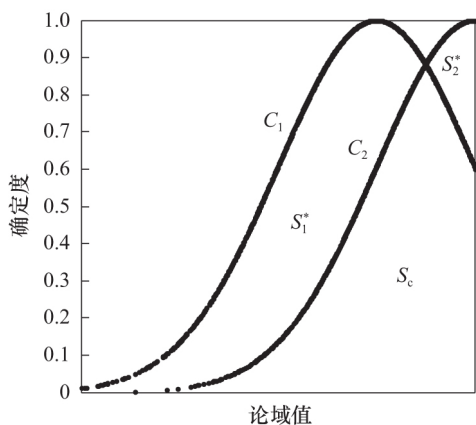


图 3 半云情形

Fig. 3 Case of half cloud

$$\begin{aligned} B(C_1, C_2) &= S_c / (S_c + S_1^*), \\ B(C_2, C_1) &= S_c / (S_c + S_2^*). \end{aligned}$$

### 1.3 相似度定义及性质证明

基于两个云模型相互隶属度的思想, 本文定义云模型之间的相似度为

$$S(C_1, C_2) = (B(C_1, C_2) + B(C_2, C_1)) / 2. \quad (7)$$

由式(7)可知, 云模型之间的相似度为两个云模型相互隶属度的均值, 如果两个云的相互隶属度较高, 则它们的相似度也较高. 当相互隶属度都为 1 时, 其相似度为 1.

云模型之间的相似度  $S(C_1, C_2)$  具有以下性质:

$$\textcircled{1} 0 \leq S(C_1, C_2) \leq 1.$$

证明 根据云模型隶属度的定义

$$0 \leq B(C_1, C_2) = S_c / S_1 \leq 1,$$

$$0 \leq B(C_2, C_1) = S_c / S_2 \leq 1,$$

则

$$0 \leq [B(C_1, C_2) + B(C_2, C_1)] / 2 \leq 1,$$

即  $0 \leq S(C_1, C_2) \leq 1$ . 证毕.

$$\textcircled{2} S(C_1, C_2) = S(C_2, C_1).$$

证明  $S(C_1, C_2) = (B(C_1, C_2) +$

$$B(C_2, C_1)) / 2 = (B(C_2, C_1) + B(C_1, C_2)) / 2 = S(C_2, C_1).$$

证毕.

$$\textcircled{3} S(C_1, C_2) = 1 \text{ 当且仅当 } Ex_1 = Ex_2, En_1 = En_2.$$

证明 1) 当  $Ex_1 = Ex_2, En_1 = En_2$  时, 由云图易知  $S_1 = S_2 = S_c, B(C_1, C_2) = B(C_2, C_1) = 1$ , 因此  $S(C_1, C_2) = 1$ .

2) 当  $S(C_1, C_2) = 1$  时,  $B(C_1, C_2) + B(C_2, C_1) = 2$ , 由于  $B(C_1, C_2) \leq 1, B(C_2, C_1) \leq 1$ , 因此  $B(C_1, C_2) = B(C_2, C_1) = 1, S_1 = S_2, En_1 = En_2$ . 由 1.2 节知, 当  $En_1 = En_2$  时,  $C_1$  和  $C_2$  可能存在无交点、单交点和完全重合 3 种情形. 假设  $C_1$  和  $C_2$  无交点, 则  $B(C_1, C_2) = B(C_2, C_1) = 0$ , 与  $B(C_1, C_2) = B(C_2, C_1) = 1$  矛盾, 此假设不成立. 再假设  $C_1$  和  $C_2$  有单交点, 则

$$\begin{aligned} S_c &= \sqrt{2\pi} En_2 \Phi(t_2) + \sqrt{2\pi} En_1 (1 - \Phi(t_1)) = \\ &\quad \sqrt{2\pi} En_1 [1 + \Phi(t_2) - \Phi(t_1)]. \end{aligned}$$

而  $B(C_1, C_2) = 1$ , 则

$$\begin{aligned} S_c &= S_1 = \sqrt{2\pi} En_1 [1 + \Phi(t_2) - \Phi(t_1)] = 1, \\ \Phi(t_2) &= \Phi(t_1). \end{aligned}$$

由于  $\Phi(x)$  为单调函数, 因此  $t_1 = t_2, \frac{x_0 - Ex_1}{En_1} =$

$\frac{x_0 - Ex_2}{En_2}$ , 则  $Ex_1 = Ex_2$ . 再假设  $C_1$  和  $C_2$  完全重合, 则有  $Ex_1 = Ex_2$ . 可知上述 3 种假设均有  $Ex_1 =$

$Ex_2, En_1 = En_2$ . 证毕.

性质①说明了相似度的封闭性,性质②说明了相似度的自反性. 由于采用云期望曲线计算面积,没有考虑超熵的影响,因此性质③可以理解为当且仅当两个云完全相同(即数字特征相同)时其相似度为1. 以上性质反映了本文相似度计算公式在理论上的合理性.

## 2 实验分析

为验证本文 MMDCM 方法的有效性,采用文献[14]中的算例进行对比实验. 在两云期望曲线存在单交点和双交点的情形下分别与 SCM、LICM、ECM 和 CCM 方法进行对比分析,并以一个装备保障系统能力评估实例说明本文方法的实际应用.

### 2.1 单交点情形的相似度计算

单交点共分为两种情况. 第一种为当  $Ex_1 \neq Ex_2, En_1 = En_2$  时,云模型算例为  $C_1(1.50, 0.55, 0.10)$ ,  $C_2(8.50, 0.55, 0.24)$ ,  $C_3(9.00, 0.55, 0.09)$ . 由云图可以直观地看出  $C_2$  和  $C_3$  的距离较近,  $C_1$  和  $C_2$ 、 $C_1$  和  $C_3$  的距离较远. 各方法的相似度计算结果如表1所示.

表1 第一种单交点情形的计算结果

Tab 1 Results of one intersection for case 1

算例	$S(C_1, C_2)$	$S(C_1, C_3)$	$S(C_2, C_3)$
SCM	0.8306	0.8257	0.9935
LICM	0.9587	0.9568	0.9998
ECM	0.0001	0.0000	0.6528
CCM	0.0255	0.0174	0.7154
MMDCM	0.0000	0.0000	0.6528

由表1可知,本文 MMDCM 方法得到的相似度结果与现有方法基本一致,即  $C_2$  和  $C_3$  最相似,  $C_1$  和  $C_2$ 、 $C_1$  和  $C_3$  的相似度较小. 且依据“3En”规则,MMDCM 方法判定  $C_1$  和  $C_2$ 、 $C_1$  和  $C_3$  无交点,其相似度为0. SCM 方法利用云滴距离计算相似度, LICM 方法利用数字特征计算向量夹角的余弦值实现相似性的度量,两者计算  $C_1$  和  $C_2$ 、 $C_1$  和  $C_3$  的相似度较高,与实际有较大偏差. 其他3种方法均基于公共面积计算相似度,本文 MMDCM 方法的计算结果与 ECM 和 CCM 方法比较接近,由于 CCM 方法要计算两次云之间的公共面积,因此 MMDCM 方法的计算复杂度相对 CCM 方法较低.

第二种情况为当  $Ex_1 = Ex_2, En_1 \neq En_2$  时,云

模型算例为  $C_1(1.50, 0.16, 0.28)$ ,  $C_2(1.50, 0.78, 0.62)$ ,  $C_3(1.50, 0.01, 0.32)$ . 由云图可以看出,3个云的顶点重合,为包含与被包含的关系. 各方法的相似度计算结果如表2所示.

表2 第二种单交点情形的计算结果

Tab 2 Results of one intersection for case 2

算例	$S(C_1, C_2)$	$S(C_1, C_3)$	$S(C_2, C_3)$
SCM	0.9831	0.9822	0.9197
LICM	0.9224	0.9836	0.8452
ECM	0.3404	0.1176	0.0253
CCM	0.6026	0.5313	0.5064
MMDCM	0.6026	0.5313	0.5064

由表2可知,SCM 和 LICM 方法计算的两两相似度结果虽然相对大小是正确的,但区分度不高. ECM 计算的结果较小,是因为 ECM 依据  $S(C_1, C_2) = 2S_c / (S_1 + S_2)$  在计算顶点重合的云模型相似度时存在一定缺陷. 假设被包含的云为  $C_1$ , 则有  $S_c = S_1$ ,  $S(C_1, C_2) = 2S_1 / (S_1 + S_2)$ , 当  $S_1 \rightarrow 0$  时,  $S(C_1, C_2) \rightarrow 0$ , 而顶点重合的云模型之间的相似度理应较高,此时 ECM 方法的计算结果与实际不符. CCM 方法通过概念跃升将公共面积的计算转移至综合云中,使得计算结果不低于0.5. 同样,假设被包含的云为  $C_1$ , MMDCM 方法根据相似度公式可得  $S(C_1, C_2) = (S_c / S_1 + S_c / S_2) / 2 = (1 + S_c / S_2) / 2 = 0.5 + (S_c / S_2) / 2 > 0.5$ , 可见 MMDCM 方法也适合于顶点重合时的情形.

### 2.2 双交点情形的相似度计算

对于双交点情形,云模型算例为  $C_1(1.41, 0.61, 0.31)$ ,  $C_2(9.10, 0.66, 0.33)$ ,  $C_3(8.85, 0.75, 0.28)$ . 由云图可以直观地看出  $C_2$  和  $C_3$  距离较近且存在两个交点,  $C_1$  和  $C_2$ 、 $C_1$  和  $C_3$  的距离较远. 各方法的相似度计算结果如表3所示.

表3 双交点情形的计算结果

Tab 3 Results of two intersections case

算例	$S(C_1, C_2)$	$S(C_1, C_3)$	$S(C_2, C_3)$
SCM	0.7626	0.7540	0.9908
LICM	0.9320	0.9351	0.9999
ECM	0.0001	0.0000	0.8569
CCM	0.0578	0.0336	0.9265
MMDCM	0.0000	0.0000	0.8604

由表3可知,在双交点情形下,本文 MMDCM 方法仍能得到与其他方法一致的结果. 依据“3En”

规则,MMDCM方法判定 $C_1$ 和 $C_2$ 、 $C_1$ 和 $C_3$ 的相似度为0.而对于 $C_2$ 和 $C_3$ 的相似度计算结果较大,与实际相符.

值得注意的是,表1中MMDCM与ECM方法得到的结果相同,是由于 $En_1=En_2$ 导致的特殊情形.表2中MMDCM与CCM方法得到的结果相同,是由于 $Ex_1=Ex_2$ 导致的特殊情形.表3中双交点情形不存在类似的情况.可见,ECM、CCM和MMDCM方法均基于公共面积计算相似度,而MMDCM方法更具有-般性,计算复杂度低而且适用性强.

### 2.3 基于云模型的评价试验

本节主要验证MMDCM方法在某装备保障系统能力评价<sup>[14,16]</sup>中的合理性,为便于分析对比,仍采用文献<sup>[14]</sup>中的论域划分方式,各评价等级对应的数值区间及云模型如表4所示.其中,“极差”属于半降云,“优”属于半升云,其他等级对应完整的云.

表4 评价等级对应的数值区间及云模型

Tah 4 Number interval and cloud model of evaluation degree

等级描述	区间	云模型
极差	[0,31.2]	$C_1(0,10.3,1.04)$
差	[11.7,50.1]	$C_2(30.9,6.37,0.64)$
中	[38.0,62.0]	$C_3(50.0,3.93,0.39)$
良	[49.9,88.3]	$C_4(69.1,6.37,0.64)$
优	[68.8,100.0]	$C_5(100.0,10.3,1.04)$

根据某装备保障系统能力评价的结果建立评价目标云为 $T(84.77,4.0,0.4)$ ,分别采用文献<sup>[16]</sup>、<sup>[14]</sup>和本文中的方法计算目标云对各评价等级云的相似度,如表5所示.可以看出,几种方法计算的相似度结果基本一致,认为目标云与等级为优的评价云最相似,因此得到的评价结果为优,与实际相符.

表5 目标云与评价等级云的相似度

Tah 5 Similarity between target cloud and evaluation degree cloud

方法	极差	差	中	良	优
文献 <sup>[16]</sup>	0.00	0.00	0.00	0.0	0.38
文献 <sup>[14]</sup>	0.00	0.01	0.01	0.13	0.46
本文	0.00	0.00	0.00	0.14	0.44

## 3 结 论

在现有研究基础上,本文提出了一种基于相互隶属度的云模型相似性度量方法.该方法从云图公

共面积的角度,基于云模型之间的相互隶属度计算其相似度.仿真结果表明,该方法在单交点、双交点等多种情形下取得的结论与现有方法基本一致,并且不涉及云滴及云数字特征的计算,有效克服了SCM方法不稳定、LICM方法区分度不高、ECM方法存在个别缺陷、CCM方法计算复杂度高等问题,能够较好地应用在基于云模型的评估决策中,具有一定的理论价值及实际意义.本文方法是对云模型理论的进一步完善,但在计算云的面积时未考虑超熵<sup>[17]</sup>的影响,而且在提高计算结果的区分度方面有待进一步研究.

### 参考文献:

- [1] 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.  
Li Deyi, Meng Haijun, Shi Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20. (in Chinese)
- [2] Li D, Cheung D, Shi Xuemei, et al. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers[J]. Computers and Mathematics with Applications, 1998, 35(3): 99-123.
- [3] 刘延华,陈国龙,吴瑞芬.基于云模型和AHP的网络信息系统可生存性评估[J].通信学报,2014,35(8):107-115.  
Liu Yanhua, Chen Guolong, Wu Ruifen. Survivability evaluation of network information system based on the cloud model and analytic hierarchy process[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8): 107-115. (in Chinese)
- [4] Wang Shouxin, Zhang Li, Wang Shuai, et al. A cloud-based trust model for evaluating quality of web services[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(6): 1130-1142.
- [5] Zhang Limao, Wu Xianguo, Ding Lieyun, et al. A novel model for risk assessment of adjacent buildings in tunneling environments[J]. Building and Environment, 2013, 65: 185-194.
- [6] 张秀玲,赵文保,徐腾,等.基于T-S云推理网络的板形智能控制对比研究[J].中南大学学报:自然科学版,2014,44(11):4461-4467.  
Zhang Xiuling, Zhao Wenbao, Xu Teng, et al. Contrastive on flatness intelligent control via T-S cloud inference network[J]. Journal of Central South University: Science and Technology ed, 2014, 44(11): 4461-4467. (in Chinese)

- [7] Wang Weixin, Wang Xu, Ge Xianlong, et al. Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 68: 33-39.
- [8] 张勇, 赵东宁, 李德毅. 相似云及其度量分析方法[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 129-132.  
Zhang Yong, Zhao Dongning, Li Deyi. The similar cloud and the measurement method[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 129-132. (in Chinese)
- [9] 张仕斌, 许春香, 安宇俊. 基于云模型的风险评估方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(1): 92-104.  
Zhang Shibin, Xu Chunxiang, An Yujun. Study on the risk evaluation approach based on cloud model[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(1): 92-104. (in Chinese)
- [10] 张光卫, 李德毅, 李鹏, 等. 基于云模型协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2007, 18(10): 2403-2411.  
Zhang Guangwei, Li Deyi, Li Peng, et al. A collaborative filtering recommendation algorithm based on cloud model[J]. Journal of Software, 2007, 18(10): 2403-2411. (in Chinese)
- [11] 张景安, 张杰, 王秀义. P2P网络中基于云模型的主观信任评价[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 96-99.  
Zhang Jingan, Zhang Jie, Wang Xiuyi. Subjective trust evaluation based on cloud model theory for P2P network[J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27(8): 96-99. (in Chinese)
- [12] 孙妮妮, 陈泽华, 牛昱光, 等. 基于云模型重叠度的相似性度量[J]. 计算机应用, 2015, 35(7): 1955-1958, 1964.  
Sun Nini, Chen Zehua, Niu Yuguang, et al. Similarity measurement between cloud models based on overlap degree[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(7): 1955-1958, 1964. (in Chinese)
- [13] 李海林, 郭崇慧, 邱望仁. 正态云模型相似度计算方法[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2561-2567.  
Li Hailin, Guo Chonghui, Qiu Wangren. Similarity measurement between normal cloud models[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2561-2567. (in Chinese)
- [14] 查翔, 倪世宏, 谢川, 等. 云相似度的概念跃升间接计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1676-1682.  
Zha Xiang, Ni Shihong, Xie Chuan, et al. Indirect computation approach of cloud model similarity based on conception skipping[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(7): 1676-1682. (in Chinese)
- [15] 张家精, 王焕宝, 陈金兰, 等. 基于云模型的隶属概念判定算法的改进[J]. 计算机技术与发展, 2007, 10(17): 665-668.  
Zhang Jiajing, Wang Huanbao, Chen Jinlan, et al. An improved algorithm for determining membership conception based on cloud mode[J]. Computer Technology and Development, 2007, 10(17): 665-668. (in Chinese)
- [16] 杨宏伟, 岳勇, 杨学强. 一种新的一维正态云概念隶属度判定算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(9): 2117-2123.  
Yang Hongwei, Yue Yong, Yang Xueqiang. New determining algorithm for conception membership of one-dimensional normal cloud[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(9): 2117-2123. (in Chinese)
- [17] 阎岩, 唐振民. 基于含熵期望曲线的云模型相关性度量方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(10): 95-100.  
Yan Yan, Tang Zhenmin. Pertinence measurement of cloud model by using expectation-entropy curves[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science ed, 2012, 40(10): 95-100. (in Chinese)

(责任编辑: 李兵)