

# 基于云理论的评估模型和方法

梁 力<sup>1</sup>, 邢观华<sup>1</sup>, 吴凤元<sup>2</sup>  
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:** 提出一种基于云理论的评估方法, 首先利用程度分析法量化定性标度, 并在此基础上建立评估标准的云模型. 随后根据底层指标的实测值和专家评分计算云参数, 并结合指标权重逐层向上进行云运算, 得到评估样本的云参数. 基于此生成大量样本点, 代入评估标准的正向云发生器中计算确定度均值, 作为最终评级的依据. 相比之下, 取评估样本期望计算确定度的方法没有考虑评估的不确定性, 当评估不确定性较强时可能导致确定度的计算结果失真. 最后以斜拉索耐久性评估为例, 验证了方法的有效性和可操作性, 为解决评估问题提供了一种更科学的手段.

**关 键 词:** 云理论; 云发生器; 确定度; 程度分析; 斜拉索耐久性

**中图分类号:** U 448.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0881-05

## The Evaluation Model and Method Based on Cloud Theory

LIANG Li<sup>1</sup>, XING Guan-hua<sup>1</sup>, WU Feng-yuan<sup>2</sup>  
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: XING Guan-hua, E-mail: xinggghhh@163.com)

**Abstract:** An evaluation method based on cloud theory is proposed as follows: firstly, the degree analysis method is used to quantify the qualitative scales so that the cloud model of evaluation criteria can be established; then the index cloud parameters can be calculated according to the normalized measurement range and expert scores to obtain the cloud parameters of the evaluation samples by cloud computing according to the weight of the indexes from layer to layer; finally, a large number of sample points can be generated to calculate the mean value of certainty in the normal cloud generator to be the basis of the final rating. Compared with the evaluation method mentioned above, the certainty degree calculated from the value of expectation of samples can be distorted when there exists a lot of uncertainty. Taking the durability evaluation of stay cables as an example, the effectiveness and operability of the cloud theory method are verified, which proved to be a more scientific method for assessment problem.

**Key words:** cloud theory; cloud generator; certainty degree; degree analysis; durability of stay cables

评估属于人类一种独有的复杂思维方式,是指通过对外界信息的搜集和处理,最终针对问题做出最佳决断的过程. 为提高评估可靠性,往往基于多指标融合原理进行综合评判,目前在结构的损伤识别<sup>[1-2]</sup>、风险评估<sup>[3]</sup>等领域都有应用. 人们通过建立分层次、多指标的分析流程,将繁杂的全局问题转化为不同层次的细部问题加以解决,提高了评估的有效性和可操作性.

随着实际问题复杂程度提高,不难发现,评估结果受随机不确定性影响显著. 因此,单纯基于模糊理论或概率理论的评估方法的有效性有待商榷. 本文提出一种基于云理论的评估方法,在使用程度分析法量化定性标度的基础上建立评估标准云模型,随后基于底层指标实测值计算其云参数,并逐层向上汇总得到评估样本的云参数. 最后基于样本云参数生成大量云滴,代入评估标准云模

型中计算平均确定度,作为确定最终评级依据.

1 云理论

1.1 云参数的定义

云理论由李德毅院士于 20 世纪 90 年代提出,它结合了模糊数学和传统概率论原理,通过建立云模型描述事物的随机不确定性和认知不确定性.

云由大量云滴组成,云滴越多越能反映定性概念的整体特征(由期望(Ex)、熵(En)、超熵(He)表征).期望是数域  $U$  内最能代表定性概念  $T$  的点,熵是定性概念模糊度的度量,超熵是熵的离散程度,即云层的厚度<sup>[4]</sup>.

1.2 云模型的建立

云模型的种类很多,其中正态云模型普遍适用于描述自然科学领域各种指标、数据的分布特征<sup>[5]</sup>.因此,本文选取正态云作为评估指标和评估标准的基础云模型.

对于承受双边约束 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 的指标,其整体参数计算方法如下<sup>[6]</sup>:

$$Ex = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2}, \tag{1}$$

$$En = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6}, \tag{2}$$

$$He = \frac{En}{10}. \tag{3}$$

当指标受单边约束时,先根据约束特点确定边界缺省参数,再依式(1)~(3)计算其云参数,进而使用半云模型描述其分布特征.

云发生器分为正、逆向两种.将云参数输入正向云发生器,可生成大量符合参数规律的云滴进而凝聚成云,其算法见文献<sup>[7]</sup>.

1.3 与传统方法的比较

确定性方法强调对应关系,即一个定性概念对应唯一—一个定量数值,这样往往忽视了定性概念本身的随机不确定性.此外,事物还具有广泛的模糊性,大多数情况下,即使给出了定性概念的某一个定量估值,也不能肯定估值完全对应于定性概念,这是由人类对复杂事物认知的不确定性造成的.

云模型实际上是一种概率模型,通过生成符合一定分布的云滴,对事物的随机性进行描述.简而言之,每一个云滴都是定性概念的一次随机估值及该估值对定性概念的隶属度的组合.通过建立事物的云模型,实现了随机性与模糊性的统一

描述.

2 评估标准云模型

2.1 评估标度

人类往往难以区分量的界限,而对性质的认知却比较有把握,依靠自然语言对复杂概念分类、判断是最直接有效的方法.因此,对不能给出先验定量标度的复杂问题,需要通过合理方法量化定性标度.

程度分析法属于模糊集合论范畴,是一种依托心理测量量化定性描述的数学方法<sup>[8]</sup>.通过设计心理测量试验,获得人们对定性问题的心理感受,并以定量形式表现.

为给出各等级最具代表性的评分,将评估标准分为五级,设一级点估计值为 0,五级为 1,用区间为 $[0,1]$ 的线段代表量化标度轴.令专家参考定性描述在数轴上对二级、三级、四级分别进行若干次独立标定,取均值乘 100 作为各等级的百分制点估计值(期望),这一过程与基于大数定理的估值类似.

2.2 计算评估标准云参数

传统方法多将标度视为定值,相当于使用“硬”边界对指标和评估结果划分等级,部分样本很可能被划分到错误的区间中,严重影响了结果的准确性.

对二级、三级、四级分别取相邻点估计值作为双边约束的上下限,代入式(1)~(3)计算云参数;对一级、五级来说,取相邻的点估计值作为单边约束限计算云参数.

3 评估样本云模型

3.1 指标云参数的计算

基于大数定理可知,当样本数量足够多时,可利用样本特性估计整体特性.对于定量指标,监测得到的样本容量足以满足要求;定性指标依赖于专家评分,令多位专家进行多次独立评定,也能得到数量可观的样本,为评估样本云模型的建立提供了可能.计算公式如下<sup>[5]</sup>(He 同式(3)):

$$Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \tag{4}$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex|. \tag{5}$$

3.1.1 定量指标

定量指标往往通过传感器按一定频率采样得

到,统计一段时间内的样本均值  $E$  和方差  $\sigma$ ,并取  $[E-3\sigma, E+3\sigma]$  区间内的采样点按极差变换原理进行百分制归一化.

### 3.1.2 定性指标

请专家参照定性标准、量化标度和指标实际情况进行多次独立百分制评分,当评分样本数量较多时,认为由样本特性估计整体期望和方差的精度满足云模型的建模需要.

### 3.2 加权云运算

设指标  $i$  的云参数为  $(Ex_i, He_i)$ , 依式(6)~式(8)的云参数运算法则进行加权计算,可求得评估样本的云参数为<sup>[9]</sup>

$$Ex_i = \frac{\sum_{i=1}^n Ex_i En_i k_i}{\sum_{i=1}^n En_i k_i}, \tag{6}$$

$$En_i = \sum_{i=1}^n En_i k_i, \tag{7}$$

$$He_i = \frac{\sum_{i=1}^n He_i En_i k_i}{\sum_{i=1}^n En_i k_i}. \tag{8}$$

式中  $k_i$  为指标  $i$  的权值,根据各种主、客观赋权法(如 AHP<sup>[10]</sup>)可以确定符合评估需求的权重,在此不作为研究的重点.

## 4 计算确定度

### 4.1 计算方法比较

参考评估样本云模型和评估标准云模型确定最终评估结果的过程是云理论评估方法的关键,目前主流方法主要有两种:

- 1) 将评估样本和评估标准的云模型绘图比较,根据相对位置确定最终评估等级;
- 2) 取样本期望代入评估标准的正向云发生器中计算平均确定度作为评级依据.

前者完全依赖人的观察,当云滴凝聚程度较差时难以判断;后者忽视了评估样本的不确定性,可能导致确定度计算结果失真.

### 4.2 改进思路

实际上,评估标准和评估样本共同决定了最终评估结果,忽视任何一个因素必然导致结果不准确.利用 Matlab 编程,根据样本云参数生成大量云滴,代入评估标准正向云发生器中计算平均确定度作为评级依据.

### 4.3 误差规律分析

实际问题的评估标准往往比较固定,一般不受评估者主观因素干扰,云参数一旦确定即可视为定值;指标的实测值或专家评分受内外因素的影响很大.为初步探寻误差变化规律,假设某评估问题的评估标准云参数恒为  $(6, 1, 0.1)$ , 评估样本的期望恒为 7.5, 令云滴数量、样本熵值分别发生变化(超熵相应变化),以模拟评估过程随机不确定性的强弱变化.

#### 4.3.1 云滴数量

若将 100 000 个云滴的平均确定度视为精确值,经大量试算发现当云滴数小于 2 000 时,确定度的误差波动性显著,单次试算的最大误差可能 >5% (图 1). 这是因为云滴数量较少,不能精确计算确定度;当云滴数大于 3 000 时确定度误差趋于平缓,满足 5% 的工程精度要求,建议云滴数取值不少于 3 000.

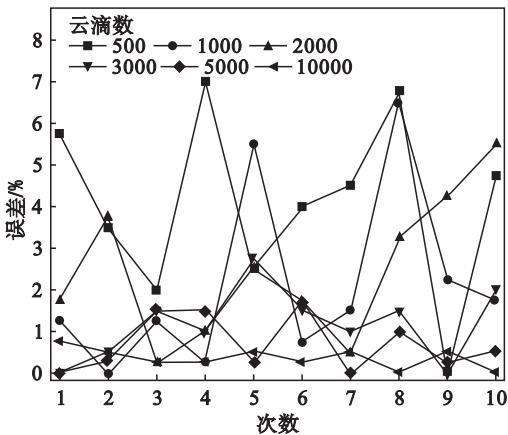


图1 确定度误差(云滴数改变)  
Fig. 1 Certainty errors( cloud drop number changes)

#### 4.3.2 样本熵值

当评估样本的熵小于评估标准熵的  $1/3$  时,确定度计算误差小于 5%. 此时评估样本相对于评估标准来说是更明晰的,评估标准具有“标尺”的效用.当评估样本的熵与评估标准熵的比  $>1/3$  且  $<1$  时,误差随样本熵增大呈现凹增长,最大接近 20% (见表 1),意味着样本不确定性较强时将显著影响确定度结果.当样本的熵大于评估标准的熵时,用相对明晰的标准已无法评价不明晰的样本,相当于从“怎么评”(样本明晰,标准模糊)转化成“评什么”(标准清晰,样本模糊),确定度计算结果已经失真,这与普遍认知相符.

传统方法忽视了样本不确定性,给确定度计算结果带来不容忽视的误差.

表 1 确定度误差(样本熵改变)			
Table 1 Certainty errors( sample entropy changes)			
样本的熵	传统方法	本文方法	误差/%
0. 1	0. 325	0. 324	0. 3
0. 3	0. 325	0. 338	3. 8
0. 5	0. 325	0. 364	10. 7
1	0. 325	0. 401	19. 0
2	0. 325	0. 361	10. 0
5	0. 325	0. 187	73. 8

## 5 实例验证

斜拉索属于斜拉桥中易损的传力构件,几乎决定着全桥的性能优劣,有必要对斜拉索进行耐久性评估,以便对管养维修提供指导,降低全寿命周期成本.

### 5. 1 评估指标体系

拉索耐久性主要受到疲劳和腐蚀影响,遵循有效性、可测性、全面性、独立性原则,建立斜拉索的耐久性评估指标体系,见表 2.

表 2 斜拉索耐久性指标体系			
Table 2 Durability index system of stay cables			
指标	上限	下限	权重
应力幅	250 MPa	110 MPa <sup>[11]</sup>	0. 3
腐蚀程度	定性	定性	0. 3
护套损伤	定性	定性	0. 2
阻尼系统	定性	定性	0. 2

注:权重不作为本文研究重点.

### 5. 2 评估标准云参数

由于结构构件性能的降低必然以外在病害的形式表现出来,因此耐久性标准的制定可以从病害情况和使用性能的角度进行考虑. 评估指标和评估结果的定性标准可能不一致,但重点在于方法适用性的验证,因此指标和评估结果的定性标度如表 3 所示.

表 3 耐久性评级定性描述	
Table 3 Qualitative description of durability rating	
等级	定性描述
一	性能优异,无病害,完全正常使用
二	性能一般,病害偏弱,部分影响使用
三	性能退化,病害中度,影响正常使用
四	性能偏差,病害较重,难以正常使用
五	性能很差,病害严重,几乎不能使用

令 9 位专家参考定性描述,在 $[0,1]$ 线段上

对二到四级分别进行 5 次独立标定,即可得各等级归一化点估计值  $a$  和盲度  $m$ (表 4). 其中定量指标的归一化按照下限 0 分,上限 100 分线性插值完成;定性指标按照表 3 定性描述和表 4 对应的量化标度评分. 盲度  $m$  均小于文献[8]结果,表明专家对点估计值的把握较高,可用于评估标准云参数计算.

表 4 量化评估标度及评估标准云参数			
Table 4 Quantitative evaluation scales and cloud parameters of evaluation criteria			
等级	$a$	$m$	熵
一	0	—	8
二	24	0. 037	8. 67
三	52	0. 029	9. 17
四	79	0. 051	8
五	100	—	7

注:超熵依式(3)计算.

### 5. 3 评估样本云参数

以病害特征明显的单根拉索(图 2)为例,按照 3. 1. 1 和 3. 1. 2 所述方法计算定量指标和定性指标的云参数,结果见表 5.

将表 5 参数结合指标权值代入式(7)~式(9),可得评估样本的云参数为(29. 16, 6. 56, 0. 758).



图 2 斜拉索病害  
Fig. 2 Stay cable diseases

### 5. 4 最终评级

计算样本对各等级的确定度,与取样本期望



计算的结果对比,误差见表 6.

表 5 耐久性指标云参数

Table 5 Cloud parameters of durability indexes

指标	Ex	En	He
应力幅	1. 5	10. 71	1. 071
腐蚀程度	61. 2	6. 24	0. 624
护套损伤	16. 6	3. 36	0. 336
阻尼系统	75. 6	4. 02	0. 402

表 6 确定度误差

Table 6 Certainty errors

等级	改进方法	取均值计算	误差/%
一	0. 016	0. 002	87. 5
二	0. 711	0. 836	17. 6
三	0. 106	0. 049	53. 8
四	0	0	0
五	0	0	0

取极值可知该斜拉索耐久性评级为二级,对应的定性描述为:性能一般,病害偏弱,部分影响使用. 基本与实际病害程度相符,验证了方法的有效性. 另外,三级的确定度为 0. 106,说明病害存在进一步发展演变的可能,需要加强管养力度. 取均值虽然也能判定评级,但确定度误差较大,且有过低估计病害等级的趋势,适用性较差.

## 6 结 论

- 1) 针对缺乏量化标度的定性指标和评估标准,引入程度分析法量化了定量标度,并在此基础上建立了评估标准云模型,充分适应了人类对评估标准的认知模糊性.
- 2) 基于指标实测值、量化评分的期望和方差建立了评估指标的正态云模型,回避了逆向云发生器需要先验确定度的局限性.
- 3) 基于最终评分云参数生成大量云滴,再代入评估标准云模型计算平均确定度,降低了传统方法的确定度计算误差.

## 参考文献:

[ 1 ] Zhou Y L, Figueiredo E, Maia N, et al. Damage detection in structures using a transmissibility-based Mahalanobis distance [ J ]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2015, 22( 10 ): 1209 – 1222.

[ 2 ] Bao Y Q, Xia Y, Li H, et al. Data fusion-based structural damage detection under varying temperature conditions [ J ]. *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, 2013, 12( 6 ): 67 – 75.

[ 3 ] Xie G Y, Yue Z. Seismic safety evaluation for mountainous highway bridge based on risk matrix [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2011, 255: 4212 – 4216.

[ 4 ] Dong W, Zeng D, Singh V P, et al. A cloud model-based approach for water quality assessment [ J ]. *Environmental Research*, 2016, 149: 113 – 121.

[ 5 ] Wang G, Xu C, Li D. Generic normal cloud mode [ J ]. *Information Science*, 2014, 280( 1 ): 1 – 15.

[ 6 ] Zhang L M, Wu X G, Ding L Y, et al. A novel model for risk assessment of adjacent buildings in tunneling environments [ J ]. *Building and Environment*, 2013, 65: 185 – 194.

[ 7 ] Yang J, Liu H, Yu X, et al. Entropy-cloud model of heavy metals pollution assessment in farmland soils of mining areas [ J ]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25( 3 ): 1315 – 1322.

[ 8 ] 黄志伟, 黄侨, 任远. 基于程度分析的中小桥梁评估方法 [ J ]. 东南大学学报 ( 自然科学版 ), 2012, 42 ( 2 ): 358 – 362.  
( Huang Zhi-wei, Huang Qiao, Ren Yuan. Assessment method of existing bridge with mid-small span based on degree analysis theory [ J ]. *Journal of Southeast University ( Nature Science Edition )*, 2012, 42( 2 ): 358 – 362. )

[ 9 ] 彭怀德, 刘敦文, 马静, 等. 基于云模型的长时停工隧道衬砌结构质量评价 [ J ]. 安全与环境学报, 2017, 17 ( 4 ): 1232 – 1236.  
( Peng Huai-de, Liu Dun-wen, Ma Jing, et al. Quality degrading evaluation for the lining structure of the longtime shutdown tunnels based on a cloud model [ J ]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17( 4 ): 1232 – 1236. )

[ 10 ] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process [ J ]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1 ( 1 ): 83 – 98.

[ 11 ] Birkenmaier M, Narayanan R. Fatigue resistance of large high tensile steel stay tendons [ R ]. Bergamo: Springer, 1982: 663 – 672.