

# 基于云理论的斜拉索耐久性风险评估

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:** 为了有效地避免事故的发生,给项目的安全提供前瞻性意见,提出一种基于云理论和 ALARP 准则的空间风险分析法. 首先引入“可预兆性”作为风险指标,建立三维风险空间. 随后定义了“风险界面”的概念,并以风险指标等级为变量建立界面方程. 通过修改变量系数调整风险空间形态,实现不同评估需求下对风险指标的赋权. 最后,根据云运算法则建立风险空间云模型和评估样本云模型,并基于样本云模型生成大量云滴,带入风险空间正向云发生器中计算平均确定度,作为确定最终风险评级的依据,实现了风险评估过程的完全量化. 以斜拉索耐久性风险评估为例,验证了新方法与规范的相符性和可行性.

**关 键 词:** ALARP 准则; 云理论; 风险评价; 斜拉索; 耐久性  
**中图分类号:** TU 43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0425-05

## Durability Risk Assessment of Stay Cables 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:** Reasonable evaluation of risk can effectively avoid accidents and provide forward-looking opinions for the project safety. A spatial risk analysis method based on cloud theory and ALARP criterion was proposed. First of all, "predictability" is introduced as a risk index to establish a three-dimensional risk space. Subsequently, the concept of "the risk interface" is defined, and the interface equation is established based on the level of the risk index. By modifying the variable coefficient, the risk space shape is adjusted to realize the empowerment of risk indicators under different assessment needs. Finally, the cloud models of risk space and evaluation sample are established according to the principle of cloud theory. Based on sample cloud model, a large number of cloud drops are generated and brought into normal cloud generator to calculate average certain degree, which is a basis for determining the final risk rating. It realizes the complete quantification of the risk assessment process. The consistency and feasibility between this method and standard are verified by taking durability risk evaluation as an example.

**Key words:** as low as reasonable practical (ALARP) criterion; cloud theory; risk evaluation; stay cables; durability

基于 ALARP(as low as reasonable practical) 准则的风险矩阵评价法是目前应用最为广泛风险评价方法之一(以下简称 ALARP 法),它以“发生概率”和“危害性”作为风险指标,并事先制定指标的评级标准.对某项风险评估时,参照标准完成风险指标评级,再根据风险指标不同等级的组合确定最终风险评级和处置方案<sup>[1]</sup>. Jones 等<sup>[2]</sup>详细阐述了基于 ALARP 准则的风险接受基线,讨论了风险应对措施和成本; Bottelberghs<sup>[3]</sup>阐述了荷兰基于风险管理的对外安全政策,对危险装置设置、危险物品运输和机场风险接受准则进行了研究.从上述研究可以看出,

目前人类对风险的认知较不完善,不同国家和地区的社会状况、业主承受风险能力也有差异,加之风险普遍具有很强的不确定性,难以确保评估结果的准确<sup>[4]</sup>. 针对不同的评估需求,也缺少一种全面普适的方法. 因此从以下三方面改进:

- 1) 只要人们能察觉风险迹象,一般会主动寻求防范补救措施,并不会完全承担风险的全部后果. 引入“可预兆性”作为风险指标,以提高风险评估的全面性;
- 2) 不同情境的风险评估需求不同,有时评估者更关注于风险的某项特性. 定义风险区域界面方程的概念并在此基础上为风险指标赋权,以适应风险指标的重要性差异;
- 3) 现阶段人类对风险的认知程度还很有限,专家参考标准评级的过程主观性较强,引入云理论以适应风险区域边界认知的模糊性和评级过程随机性.

# 1 构建三维风险评价空间

传统方法将风险矩阵划分成不同区域,样本落入不同位置对应不同的风险评级. 其中,样本即风险指标的等级组合,风险指标的分级标准将显著影响评估结果.

## 1.1 风险指标分级

### 1.1.1 发生概率

国际隧道协会颁布的《隧道风险管理指南》通过统计大量案例,得出普适于工程结构风险评估的发生概率  $P$  分级标准,见表 1.

| 表 1 “发生概率”分级标准  |       |                       |
|---|-------|-----------------------|
| Table 1 Classification standard of occurrence probability |       |                       |
| 等级  | 定性描述  | 定量描述                  |
| 一   | 很少发生  | $P \leq 0.003$        |
| 二   | 偶尔发生  | $0.003 < P \leq 0.03$ |
| 三   | 可能发生  | $0.03 < P \leq 0.3$   |
| 四   | 很可能发生 | $P > 0.3$             |

### 1.1.2 危害性

风险的危害具备多样性,以经济损失描述更适用于工程问题. 文献[5]通过相对经济损失  $Q$  作为分级标准(见表 2),相对于绝对经济损失而言更加灵活和科学.

### 1.1.3 可预兆性

可预兆性通过预报时间提前量  $t$  直接反映,若撤离、防护的时间充裕,则可有效降低风险损失. 建筑设计防火规范(GB 50016—2014)对火灾

中风险人群安全疏散时间进行了规定,为制定标准提供了参考,见表 3.

| 表 2 “危害性”分级标准                                  |       |                           |
|--|-------|---------------------------|
| Table 2 Classification standard of harmfulness |       |                           |
| 等级   | 定性描述  | 定量描述                      |
| 一  | 无关紧要的 | $Q \leq 0.125\%$          |
| 二  | 比较轻微的 | $0.125\% < Q \leq 1.25\%$ |
| 三  | 比较严重的 | $1.25\% < Q \leq 12.5\%$  |
| 四  | 极其严重的 | $Q > 12.5\%$              |

| 表 3 “可预兆性”分级标准  |             |                                    |
|---|-------------|------------------------------------|
| Table 3 Classification standard of prediction ability |             |                                    |
| 等级  | 定性描述        | 定量描述                               |
| 一   | 特征明显,仅需常识判断 | $t > 12\text{ h}$                  |
| 二   | 需要推断,具备专业知识 | $3\text{ h} < t \leq 12\text{ h}$  |
| 三   | 预测较难,借助专业工具 | $0.5\text{ h} < t \leq 3\text{ h}$ |
| 四   | 几乎无法预测,发生突然 | $t \leq 0.5\text{ h}$              |

需要指出,尽管隧道、工民建结构与桥梁结构在受力、运营维护等方面均有差异,但风险具备共性,风险指标及其分级标准不因结构类型不同而不同,因此上述指标体系具备合理性.

## 1.2 风险界面

根据 ALARP 风险矩阵扩充的三维风险空间模型见图 1. 传统方法风险指标的评级为离散正整数,对应的风险空间也是块状的. 为提高评估的准确性,将风险指标评级连续化,因此不同风险区域的边界不再是齿状而应趋于一个空间平面,将此类起分界作用的空间平面定义为“风险界面”.

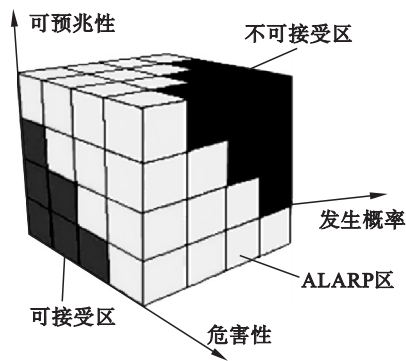


图 1 三维风险评价模型  
Fig. 1 Three dimensional risk assessment model

# 2 界面方程的修正

当“齿状”分界面无限细化时,风险界面趋于空间平面. 风险界面与三个风险指标对应的坐标轴截距即为风险指标的最大可接受等级和最小拒绝等级(以下统称“截距等级”). 当不考虑风险指

标的重要性差异时,风险界面与三坐标轴夹角相等.

2.1 风险空间特征分析

风险评估的侧重点不总相同,有时往往更关心风险的某一特性,此时可通过风险空间的形状得以反映:重要性越大的指标,在某个风险区域内的截距等级越小,这意味着该指标对风险决策的控制力较强.

进一步而言,风险空间的形状实际上由风险界面决定,风险界面的法向量方向改变时,与界面外法向量夹角越大的坐标轴其截距等级越大,该坐标轴对应的风险指标重要性越低.可见通过改变风险界面的法向量,为引入风险指标权值提供了可能.

2.2 加权界面方程

设风险界面方程  $ax + by + cz = k$  ( $a, b, c > 0$ ). 其中  $x, y, z$  分别表示“发生概率”、“危害性”和“可预兆性”指标的等级; $a, b, c$  为待定系数,决定了界面的法线方向; $k$  为待定常数项.

当三个风险指标重要性相同,即权向量  $w = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)^T$  时,风险界面方程的一次项系数  $a, b, c$  均为 1. 显然某自变量系数越大,法向量越偏向该坐标轴,其权重相应越大.若将指标权重的比值视为各指标截距等级的比值,则每给出一组权重  $w = (w_1, w_2, w_3)^T$ , 对应有  $a = 3w_1, b = 3w_2, c = 3w_3$ , 于是加权界面方程写为

$$3w_1x + 3w_2y + 3w_3z = k. \tag{1}$$

实际评估时,将样本点代入式(1)解得  $k$ , 并与风险界面的  $k$  值比较,即可判断其相对于风险界面的位置并确定风险评级.但由于人类认知的局限性,现阶段不能精准确定风险界面的  $k$  值,需要引入合适的方法来适应界面附近的模糊性,后文将作进一步探讨.

3 风险空间云模型

3.1 云理论

人类主观意见参与风险评估的过程具有模糊性和随机性,引入云理论可以有效克服这两类缺点,提高风险评价的科学性.云理论结合了模糊数学原理和传统概率论原理,通过云描述事物的不确定性,旨在实现自然语言与定量数值之间的互相转换<sup>[6]</sup>.

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.若设  $U$  是定量论域,  $T$  是  $U$  内

的定性概念,  $x$  是  $T$  在  $U$  上的某次量化实现,则对于某个云滴  $x$  来说,其对于定性概念  $T$  的确定度  $C_T(x)$  是一个有稳定倾向的随机数,可以表示为

$$\forall x \in U, x \rightarrow C_T(x), C_T(x) \in [0, 1]. \tag{2}$$

云模型种类很多,其中正态云适用于描述自然科学领域指标数据的分布特征<sup>[7]</sup>,取其建立风险空间和风险样本的云模型.

云的整体特征由期望 ( $Ex$ )、熵 ( $En$ )、超熵 ( $He$ ) 表征<sup>[8]</sup>,对于受双边约束的区间指标,其整体云参数计算方法见表 4. 将云参数输入正向云发生器,可以生成大量符合分布特征的云滴,算法见文献[9].特别地,当云滴  $x$  距期望的距离大于  $3En$  时属于小概率样本,分析时可予以忽略<sup>[10]</sup>.

表 4 云运算法则  
Table 4 Cloud algorithms

| 特征 | 法则 | 公式  |
|----|----|---|
| Ex | ①  | $\frac{C_{\max} + C_{\min}}{2}$           |
|    | ②  | $\sum_{i=1}^n Ex_{w_i} \mu_{ij}$          |
| En | ①  | $\frac{C_{\max} - C_{\min}}{6}$           |
|    | ②  | $\sqrt{\sum_{i=1}^n En_{w_i}^2 \mu_{ij}}$ |
| He | ①② | $\frac{En}{10}$                           |

注:①—区间法则 ( $C_{\max}, C_{\min}$  为约束区间上下界);②—加权法则.

3.2 风险界面  $k$  值分析

对风险界面认知的模糊性导致风险界面并不是一个确定的平面,换言之,大部分情形下风险界面并不能完整地“切下”某个风险区域,边界附近或多或少地混杂着不同成分,需要进一步分析其不确定性特征.

由离散化的三维风险空间可知,通过  $\left(\frac{1}{w_1}, 0, 0\right), \left(0, \frac{1}{w_2}, 0\right), \left(0, 0, \frac{1}{w_3}\right)$  三点的风险界面上及其与坐标面围成的区域内部所有点都属于可接受风险,将这些点代入式(1)有  $k \in [0, 3]$ , 因此对应的确定度为 1. 将风险界面沿其外法线方向移动到  $\left(\frac{2}{3w_1}, \frac{2}{3w_2}, \frac{2}{3w_3}\right)$ , 此时界面上仅此一点属于可接受风险,其他点均属于 ALARP 风险,因此  $k \geq 6$  时样本对可接受风险的确定度为 0. 同理,当样本点对应的  $k \in [9, 12]$  时,有十足把握认为其属于不可接受风险,即确定度为 1. 当  $k \leq 6$  时,样本点对应不可接受评级的确定度为 0. 对于 ALARP 风险来说,只有当样本点的  $k = 6$  时,才有十足把握认为其属于 ALARP 风险(确定度 = 1), 当对应的  $k \leq 3$  或  $k \geq 9$  时确定度为 0.

3.3 风险空间云模型

由 3.2 节分析可知,通过  $k$  值可建立风险空间的云模型.取云滴数为 3 000,生成各风险等级的云滴图如图 2 所示.

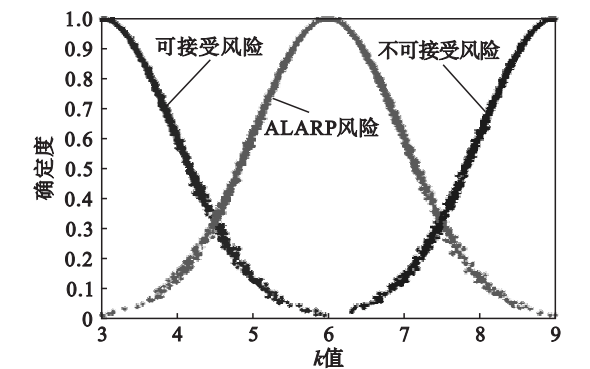


图 2 风险空间云模型  
Fig. 2 Cloud model of risk space

4 风险评估

4.1 评估样本云模型

对某风险因素来说,邀请专家参考评估标准对风险指标进行区间评级,基于区间法则计算该风险指标的云参数,再基于式(1)和表 4 加权法则可得风险评估样本的云模型.

4.2 确定度的计算

传统方法依靠绘图比较风险样本与风险空间云模型的接近程度确定评级,显然过于主观,且当云滴离散程度较大时难以分辨.

为了使评估过程完全量化,基于风险样本云模型生成大量云滴(经试算,云滴数为 3 000 时可以满足精度要求),再带入风险空间的正向云发生器计算平均确定度,取最大值对应的风险等级

作为最终评级.

5 实例验证

结构构件的耐久性一般指在预定的使用年限、使用条件、环境作用和维修条件下保持安全性和适用性的能力.耐久性失效是一种涉及物理、化学等多方面因素的长期过程,在不考虑突发事件和特殊运营环境的前提下,从成因上将耐久性风险分为环境、材料、受力、人因四类.表 5 和表 6 列出常见斜拉索耐久性风险与风险指标权重.

表 5 斜拉索耐久性风险  
Table 5 Durability risk of stay cables

| 环境 | 材料    | 受力   | 人因    |
|----|-------|------|-------|
| 腐蚀 | 老化    | 疲劳   | 施工质量差 |
| 振动 | 预应力松弛 | 护套开裂 | 检查不及时 |
|    | 材料瑕疵  | 锚头开裂 |       |

注:“老化”指分子凝聚力降低引起的材料劣化;“护套开裂”指高应力状态下护套与钢丝反复协同变形引起的开裂.

表 6 风险指标权重  
Table 6 Risk index weight

| 发生概率        | 危害性         | 可改善性        |
|-------------|-------------|-------------|
| $w_1 = 0.4$ | $w_2 = 0.4$ | $w_3 = 0.2$ |

注:风险指标权重取值在此不作为研究重点.

将表 6 数据代入式(1),得界面方程为  $1.2x + 1.2y + 0.6z = k$ . 随后,对各风险因素的风险指标分别进行区间评级,通过表 4 区间法则和加权法则,得到评估样本的云参数.再依 4.2 节所述方法计算平均确定度,确定风险因素的最终风险等级,评级结果见表 7.

表 7 拉索耐久性风险评级  
Table 7 Stay cables durability risk rating

| 风险因素  | 危害性       | 发生概率      | 可预兆性      | 评估样本云参数           | 确定度向量           | 风险评级  |
|-------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|-------|
| 腐蚀    | [3.3,3.6] | [2.6,2.9] | [2.5,2.9] | (9.06,0.09,0.009) | (0,0,1.000)     | 不可接受  |
| 振动    | [2.4,2.8] | [2.8,3.1] | [3.2,2.6] | (8.13,0.10,0.010) | (0,0.106,0.682) | 不可接受  |
| 老化    | [3.1,3.4] | [2.6,3.0] | [3.2,2.6] | (8.73,0.10,0.010) | (0,0.025,0.960) | 不可接受  |
| 预应力松弛 | [2.7,2.9] | [2.2,2.4] | [3.0,3.1] | (7.29,0.09,0.009) | (0,0.435,0.234) | ALARP |
| 材料瑕疵  | [2.5,3.2] | [0.6,0.8] | [3.3,3.6] | (6.33,0.14,0.014) | (0,0.937,0.030) | ALARP |
| 疲劳    | [2.9,3.3] | [2.4,2.7] | [3.1,3.4] | (8.73,0.10,0.010) | (0,0.025,0.959) | 不可接受  |
| 护套开裂  | [3.4,3.7] | [1.9,2.2] | [2.6,2.8] | (8.34,0.08,0.008) | (0,0.065,0.803) | 不可接受  |
| 锚头开裂  | [3.4,3.7] | [1.3,1.6] | [3.2,3.4] | (7.98,0.08,0.008) | (0,0.142,0.597) | 不可接受  |
| 施工质量差 | [2.7,3.3] | [1.8,2.5] | [2.5,2.7] | (7.74,0.17,0.017) | (0,0.228,0.455) | 不可接受  |
| 检查不及时 | [0.4,1.2] | [2.8,3.2] | [2.7,3.3] | (6.36,0.18,0.018) | (0,0.927,0.034) | ALARP |



表 7 中共七项不可接受风险,它们正是斜拉索系统病害的主要成因<sup>[11]</sup>,必须采取相应措施降低风险水平. 检查不及时、材料瑕疵属 ALARP 风险,我国目前桥梁养护管理机制愈加完善,工程材料制造技术趋于成熟,未来这两种风险水平有望得到进一步降低.

我国公路桥梁技术状况评定规范 ( JTG/T H21—2011) 从拉索损坏情况、护套破损程度、锚固区损坏程度、减振装置损伤程度四个方面对斜拉索系统进行技术状况评定,所有指标对应上述不可接受风险. 虽然技术状况评定反映的是桥梁构件的病害程度,但病害的产生往往与相应的耐久性风险密切相关,两者实为因果关系,因此规范可验证此风险评估方法的有效性.

## 6 结 论

1) 引入“可预兆性”指标建立三维风险空间,并制定了风险指标分级标准. 从业人员依据标准对风险指标进行区间评级,降低了评估难度,有利于提升评估的全面性;

2) 以风险指标等级为自变量构建了风险界面方程,通过修改变量系数引入风险指标权重,有利于满足不同的评估需求;

3) 引入云理论分别建立了风险空间和风险样本的云模型,降低了风险评估过程的不确定性. 基于风险样本云参数生成大量云滴,再带入风险空间正向云发生器求解平均确定度,以此为评级依据更加科学、准确.

### 参考文献:

[ 1 ] Eskesen S D, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for

tunnelling risk management; international tunneling association, working group No. 2 [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2004, 19 ( 3 ) : 217 – 237.

[ 2 ] Jones L M, Aven T. ALARP-what does it really mean [ J ]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96 ( 8 ) : 877 – 882.

[ 3 ] Bottelberghs P H. Risk analysis and safety policy developments in the Netherland [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 71 : 59 – 84.

[ 4 ] Trbojevic V M. Risk criteria in EU [ J ]. *Risk*, 2005, 10 ( 5 ) : 1945 – 1952.

[ 5 ] Soren D K, Per T B, Jorgen K M, et al. Guidelines for tunneling risk management; international tunneling association working group No. 2 [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2004, 19 ( 1 ) : 217 – 237.

[ 6 ] Xu Z, Zhu P, Mei J. Research on backward cloud model with uncertainty [ J ]. *Journal of Networks*, 2013, 8 ( 11 ) : 2556 – 2563.

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

[ 8 ] 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.

[ 9 ] 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.

[ 10 ] 汪明武, 李健, 徐鹏, 等. 膨胀土与石灰改良膨胀土涨缩性的云模型评价 [ J ]. 东南大学学报 ( 自然科学版 ), 2014, 44 ( 2 ) : 396 – 400.

( Wang Ming-wu, Li Jian, Xu Peng, et al. Cloud model for shrinkage-swelling property classification of untreated and lime-treated expansive clays [ J ]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition )*, 2014, 44 ( 2 ) : 396 – 400. )

[ 11 ] 黄侨, 任远, 马文刚. 斜拉索病害及其养护维修 [ J ]. 预应力技术, 2011 ( 3 ) : 19 – 25.

( Huang Qiao, Ren Yuan, Ma Wen-gang. Deterioration and maintenance of stayed-cables [ J ]. *Prestress Technology*, 2011 ( 3 ) : 19 – 25. )