

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.025

基于云理论的斜拉索可靠性评价方法

梁力¹, 邢观华¹, 任艺鹏¹, 孙爽²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳市市政工程设计研究院, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 为准确评估易损难修的斜拉索的可靠性, 保证行车安全舒适, 提出一种基于云理论的斜拉索可靠性评估方法. 首先根据拉索力学特点和常见病害, 以斜拉索的运营状态应力极值、恒载索力变幅、应力幅、基频、服役时间、PE 护套开裂程度及阻尼系统完好程度为指标, 建立了斜拉索可靠性评估指标体系. 咨询专家意见建立权重云模型, 并根据泛概念树的概念扩充原理实现权重的群决策. 最后将指标对各等级的平均确定度与权重云模型加权汇总, 得到可靠等级确定度的云模型并以此确定最终评级. 规范评估结果与拉索实际病害情况对比验证了所提方法结果的合理性和可操作性.

关 键 词: 云理论; 斜拉索; 可靠性评估; 指标体系; 泛概念树

中图分类号: TU 43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)04-0585-05

Reliability Evaluation on Stay Cables Based on Cloud Theory

LIANG Li¹, XING Guan-hua¹, REN Yi-peng¹, SUN Shuang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Municipal Design and Research Institute, Shenyang 110015, China. Corresponding author: XING Guan-hua, E-mail: xinggghh@163.com)

Abstract: In order to accurately assess the reliability of the stay cables, which are vulnerable and difficult to repair, and to ensure a safety and comfort driving, a reliability evaluation method on stay cables based on cloud theory was proposed. According to the mechanical characteristics and common defects of cables, a reliability evaluation index system of stay cables was established by selecting indexes using the extreme stress value, amplitude of constant load, stress amplitude, basic frequency, service time, cracking degree of PE sheath and integrity of the damping system. Then the weight cloud models were established according to experts' opinions, and the group decision weights were obtained from the concept extension of general concept tree. Finally, a weighted summary was conducted on the average certainty of assessment grade for each index and the weight cloud model. The certainty cloud models of each reliable grade thus can be obtained to determine the final result. The rationality and maneuverability of the method were verified by comparing the specification evaluation results with the actual defect condition.

Key words: cloud theory; stay cables; reliability evaluation; index system; general concept tree

近年来我国修建了众多大跨缆索承重桥梁, 由于其体系庞杂, 管养难度较高, 加之其往往承担着巨大的交通流量, 给病害的滋生和发展创造了空间, 以拉索为代表的大部分易损难修的缆索构件其病害现状不容乐观. 为充分掌握拉索性能, 向桥梁管养提供指导, 有必要对拉索进行可靠性评估.

目前对拉索的评估大多为规范定性评估和以

钢丝腐蚀^[1]、疲劳^[2]性能为主的单属性评估, 对评估指标体系的研究不多, 且大多方法未考虑评估中广泛存在的不确定性, 显然无法保证评估结果的全面性和准确性.

近年来数据融合原理在评估决策领域受到广泛关注^[3], 本文提出一种基于云理论的斜拉索可靠性评估方法, 首先基于拉索力学特点和病害原因建立了拉索可靠性评估指标体系. 随

后在专家主观赋权的基础上利用云理论和泛概念树原理建立了群决策权重云模型. 最后将评估指标对各等级的平均确定度与指标权重云模型汇总,得到斜拉索各可靠等级确定度云模型并完成评级.

1 可靠性评估指标体系

合理的指标体系是评估结果准确性的重要保证,从拉索力学特征和病害分析入手,依据独立、有效、全面、可测的原则分别确定安全性、适用性、耐久性评估指标,逐层汇总形成指标体系,见表 1.

表 1 斜拉索可靠性评估指标
Table 1 Reliability evaluation indexes of stay cables

目标层	准则层	基准层	
		指标名称	选取理由
可靠性	安全性	<i>A</i>	典型承拉构件,刚度、稳定性问题无需考虑,强度失效由应力控制
	适用性	<i>B</i>	斜拉索的良好功能(适用性)体现在优化全桥内力分布
	耐久性 ^[4]	<i>C</i>	交通流量巨大,汽车荷载效应占主导地位
		<i>D</i>	密索体系频域广且数值低,阻尼抑振(参数振动)效果有限
		<i>E</i>	拉索护套易老化开裂,钢丝疲劳损伤将不断累积,潜在病害概率增大
		<i>F</i>	阻尼系统能有效控制除参数振动以外的大多数振动
		<i>G</i>	索内钢丝锈蚀情况很大程度上取决于 PE 护套的开裂程度

注:*A*—运营状态应力极值;*B*—恒载索力变幅;*C*—汽车荷载应力幅;*D*—拉索基频;*E*—服役时长;*F*—阻尼系统性能;*G*—护套损伤程度.

1.1 测试方法

指标可测性是多指标评估的基础,桥梁领域指标来源主要有基于传感器的健康监测、基于人工的检测和有限元计算. 其中健康监测往往会产生大量数据淤积,导致效率低下,数据质量常受限

于测试噪声和传感器寿命. 与监测相比,人工检测数据受噪声污染小,能及时反映早期损伤,且无需昂贵的硬件安装维护成本. 有限元可实现多种复杂工况下力学指标的计算,是实测的有效补充. 斜拉索可靠性评估指标测试方法见表 2.

表 2 评估指标类型及测试方法
Table 2 Evaluation index type and test method

指标名称	获取方法	备注	类型
<i>A</i>	有限元	恒载、活载、静风、整体升降温	离散样本
<i>B</i>	检测报告 + 设计资料	$\left \frac{T - T_d}{T_d} \right \times 100\%$	离散样本
<i>C</i>	有限元 有限元(主桥)	JTG D64—2015 疲劳荷载模型 I 动力分析,取基频	常值 常值
<i>D</i>	设计资料 + 公式(拉索)	$\sqrt{\left(\frac{Tg}{4WL^2} \right)}$	常值
<i>E</i>	运营维护资料	从换索时起算	常值
<i>F</i>	人工检测评分	令专家按表 4 评分	离散评分
<i>G</i>	人工检测评分	令专家按表 4 评分	离散评分

注:*A*~*G* 含义同表 1;*C*~*E* 视为常值偏于安全;*T* 为实测索力;*T_d* 为设计索力;*g* 为重力加速度;*W* 为拉索线重度;*L* 为索长度.

1.2 指标区间

因指标量纲不同,需要将其化归到统一区间再进行比较. 在缺少实桥大数据统计结果时,往往通过线性插值、黄金分割等方法划分区间. 为提高与规范匹配性,基于黄金分割原理将[0,100]区间分为 5 级(见表 4),作为基准区间. 定量指标按表 3 界值向[0,100]区间标准化,定性指标按表 4

标准评分.

2 云理论的应用

云理论可以适应自然界广泛存在的随机性和模糊性,单个云由大量云滴组成,每个云滴可以看作定性概念在定量论域上的一次随机实现,通过

表 3 评估指标界值			
Table 3 Boundary values of evaluation indexes			
指标	等级	界值	来源
应力极值	1	$0.3f_{pk}$	文献[5]
	5	$0.4f_{pk}$	JTG/T D65-1—2007
索力变幅	1	$\pm 10\%$	JTG/T J21—2011
	5	$\pm 40\%$	文献[6]
应力幅	1	110 MPa	文献[7]
	5	250 MPa	JT/T 775—2016
基频	1	$2f$	振动能量方程
	5	f	JTG D60—2015
服役年限	1	8a	CJ/T 504—2016
	5	20a	JTG B01—2014

注： f_{pk} 为高强度钢丝标准抗拉强度； f 为主桥基频。

表 4 定性指标评分标准		
Table 4 Qualitative indexes scoring standard		
阻尼系统	护套开裂	分值区间
完好	几乎完好,护套表面仅存在轻微擦痕	[95,100]
轻微损坏,但可使用	护套表面局部有擦伤,不具备长期发展性	[86,95]
损坏明显,勉强使用	护套局部纵向开裂,裂缝长 $\leq 1\text{cm}$,老化现象不明显,且呈闭合特点	[62,86]
损坏严重,难以使用	护套表面局部纵向裂缝 >2 条,裂缝长度 $>3\text{cm}$,存在老化或部分渗水	[38,62]
完全损坏,无法使用	护套纵向裂缝较多,裂缝长度 $>5\text{cm}$,存在锈蚀迹象,内部钢丝裸露	[0,38]

表 5 评分区间云参数			
Table 5 Cloud parameters for scoring interval			
等级	Ex	En	He
1	19	6.33	0.633
2	50	4	0.4
3	74	4	0.4
4	90.5	1.5	0.15
5	97.5	0.83	0.083

注:当指标归一化量值 ≤ 19 时,对 1 级的确定度为 1;当指标归一化量值 ≥ 97.5 时,对 5 级的确定度为 1。

2.2 评估指标云模型和确定度的计算

依据离散样本的云参数计算公式可建立评估指标云模型,令部分常值指标的熵和超熵等于 0.文献[11]指出,当样本数量 >10 时,Ex 的误差将小于 0.01.对于绝大部分评估指标来说,足以满足精度需求。

编制 Matlab 程序,基于评估指标云模型生成大量能反映指标不确定性的云滴,代入评估标准正向云发生器中计算平均确定度并归一化,以便进一步汇总比较。

3 指标赋权

权重是解决评估问题的关键因素之一,显著

大量凝聚的云滴可以反映云整体特征^[8](期望 Ex、熵 En、超熵 He)。

云模型种类很多,其中正态云模型对自然科学领域对象具有普适性^[8],本文选取正态云模型作为基础云模型,表 2 中不同类型指标的正态云参数的计算方法见文献[9-10]。

2.1 评估标准云模型

1 级和 5 级的分值区间符合单边约束特征,分别建立半降云模型和半升云模型.由区间数据云参数的计算方法得各评估等级的云参数见表 5。

影响着结果的准确性.专家赋权过程主观性较强,取均值的做法忽略了这一要点.本文共邀请 3 位桥梁方向的教师、2 位工程师和 5 位博士生,根据离散样本云参数的计算方法建立某指标下各专家权重云模型,再通过云的概念扩充建立群决策权重云模型.云运算法则见表 6。

表 6 云运算法则		
Table 6 Cloud algorithms		
公式	法则	
Ex	①	$(Ex_1 + Ex_2)/2 + En_1 - En_2 /4$
	②	$Ex_1 \times Ex_2$
	③	$\sum_{i=1}^n Ex_{\omega_i} \mu_{ij}$
En	①	$ Ex_1 - Ex_2 /4 + (En_1 + En_2)/2$
	②	$ Ex_1 Ex_2 \times \sqrt{\left(\frac{En_1}{Ex_1}\right)^2 + \left(\frac{En_2}{Ex_2}\right)^2}$
	③	$\sqrt{\sum_{i=1}^n En_{\omega_i}^2 \mu_{ij}}$
He	①	$\text{Max}(He_1, He_2)$
	②	$\frac{En}{10}$
	③	$\frac{En_{sj}}{10}$

注:①—概念扩充;②—乘法运算;③—加权运算。

3.1 运算法则

设 $C_i(Ex_i, En_i, He_i)$ 是论域 U 上某个云模型 (对于群决策而言, U 为某指标的权重集, C_i 可视为第 i 个专家权重的云模型), 群决策过程可参考表 6 扩充法则.

基于表 1 指标层次, 将评估指标权重云模型依据表 6 乘法运算向上汇总, 进而求得下层指标对上层指标的权重云参数, 见表 7.

表 7 指标权重云参数

Table 7 Cloud parameters of index weights

指标	Ex	En	He
应力幅	0.135	0.012	0.001 2
基频	0.047	0.008	0.000 8
服役时间	0.053	0.011	0.001 1
阻尼	0.071	0.007	0.000 7
开裂	0.132	0.012	0.001 2
应力极值	0.475	0.016	0.001 6
索力变幅	0.087	0.021	0.002 1

注: 权重期望需要满足归一化条件.

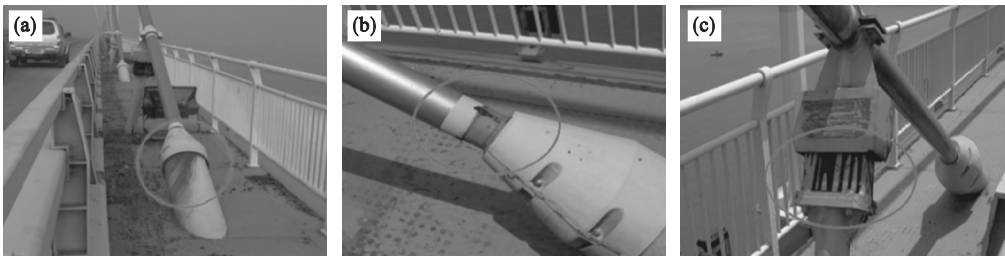


图 1 斜拉索系统病害
Fig. 1 Defects of stay cable system

4.1 建模与修正

由于评估仅需索力及其相关指标, 因此使用 Midas/civil 2015 建立单主梁模型, 拉索锚固点与梁、塔对应节点为刚性主从联接, 拉索使用桁架单元模拟. 不考虑下部结构的作用, 在主梁支座对应的节点处直接约束相关自由度, 模拟支座对主梁的约束.

既有桥梁力学特性与设计不同, 为保证索力电算与实测值相一致, 需要进行参数修正. 经大量试算发现 2 期恒载对索力分布影响很大, 考虑铺装层的磨损, 将 2 期恒载在设计值 (61.8 kN/m) 的基础上折减 4.6% 时, 可保证模型恒载索力分布与实测值最为接近, 误差绝对值不超过 5%, 满足工程精度要求.

4.2 指标云模型

以西北侧上游索面的尾索为例, 该斜拉索病害主要为护套滑移, 按表 2 方法获取指标并建立各指标云模型. 随后, 基于指标云模型分别生成 10 000 个云滴, 代入表 5 所示评分区间的正向云发生器中计算平均确定度并归一化. 最后, 结合表

3.2 最终评级

设指标 i 对等级 j 的确定度为 μ_{ij} , 指标 i 的权重为 ω_i , 将群决策得到的指标权重 ω_i 的云模型与指标确定度按式 (1) 相结合可得评估结果 $S(s_1, \cdots, s_s)$, 对应的加权法则见表 6.

$$s_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_{ij} .$$

(1)

4 实例验证

某公路大桥是一座双塔双索面扁平钢箱梁斜拉桥, 半漂浮体系, 跨径布置为 48 m + 204 m + 460 m + 204 m + 48 m. 拉索采用 $\phi 7$ 高强镀锌平行钢丝束, 斜拉索弹模经 Ernst 公式修正, 按双向对称性取 1/4 的拉索电算结果进行分析. 依据最近桥检结果可知, 该桥部分斜拉索存在图 1 所示病害.

7 所示指标权重云模型和表 6 加权运算法则逐层向上汇总, 可以得到该斜拉索可靠性对 5 个等级的确定度云模型, 见表 8.

表 8 可靠等级的确定度云模型

Table 8 Certainty degree cloud model of reliability level

等级	Ex	En	He
1	0.292	0.025	0.002 5
2	0.046	0.005	0.000 5
3	0.435	0.019	0.001 9
4	0.207	0.013	0.001 3
5	0.002	0.001	0.000 1

取第 j 个等级云模型所有云滴的 x 轴和 y 轴坐标乘积的平均值 \bar{Q}_j 作为评级依据, 见式 (2), 根据最大值确定最终评级.

$$\bar{Q}_j = \frac{\sum x_j x_{x_j}}{n} .$$

(2)

式中: x_j 为斜拉索可靠性 j 级的某个云滴对该等级的确定度; x_{x_j} 为 x_j 的确定度 (即确定度的确定度); n 为该等级云模型的云滴数. 有 $\bar{Q} = (0.207,$

0.032,0.306,0.148,0.001),可见该拉索可靠性为 3 级且具有部分 4 级特征,需加强日常管养维修,防止病害的进一步发展.

4.3 规范验证

基于规范(JTG/T H21—2011)对该桥斜拉索系统进行技术状况评估,斜拉索系统部件技术状况评分 PCCI = (94.42,91.74,92.89,65),斜拉索系统技术状况评分 SPCI = 86.01,对应的定性描述为:功能良好,材料有局部轻度缺损或污染.这一结论与本文方法评估结果和拉索系统实际病害情况相符合.但本方法能量化单根拉索的评级,且指标体系更加科学全面,具有显著优势.

可靠性评估与针对病害、缺损的技术状况评定有一定区别,但大多数情况下结构构件可靠性的降低必然会以种种外在病害体现出来.因此,将规范评估结果与本文方法评估结果对比,可作为验证合理性的依据.

5 结 论

根据斜拉索力学特点和病害特征,选取了拉索可靠性评估指标,并根据相关规范确定了指标界值,构建了全新的斜拉索可靠性评估指标体系.在此基础上分别建立评估样本和标准的云模型,最终实现了斜拉索可靠性的量化评估.背景工程斜拉索系统功能良好,西北侧上游索面的尾索可靠性评级为 3,且有向 4 级恶化的趋势.

参考文献:

[1] Faber M H,Enelund S,Rackwitz R. Aspects of parallel wire

cable reliability[J]. *Structural Safety*,2003,25:201 – 225.

[2] Castillo E,Ramos A,Koller R,et al. A critical comparison of two models for assessment of fatigue data[J]. *International Journal of Fatigue*,2008,30(1):45 – 57

[3] Khaleghi B,Khamis A,Karray F O,et al. Multi-sensor data fusion;a review of the state of the art[J]. *Information Fusion*,2013,14(1):28 – 44.

[4] Shun I N,Keita S M. Hydrogen embrittlement and corrosion fatigue of corroded bridge wires [J]. *Journal of Construcntional Steel Research*,2009,65:269 – 277.

[5] 刘山洪. 斜拉索 HDPE 防护套的损伤机理及预防对策研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版) 2013,32(1):888 – 893.

(Liu Shan-hong. Damage mechanism and prevention countermeasures of HDPE protecting sheath of stayed cables [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature Science)*,2013,32(1):888 – 893.)

[6] 李蓉. 基于层次分析法的桥梁健康状态模糊综合评价方法的研究及其应用[D]. 长沙:湖南大学,2007:39 – 40.

(Li Rong. The research and application of the fuzzy synthetic assessment method for health condition evaluation of bridges based on AHP [D]. Changsha: Hunan University, 2007: 39 – 40.)

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

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

[10] 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.

[11] 吕辉军,王晔,李德毅,等. 逆向云在定性评价中的应用 [J]. 计算机学报,2003,26(8):1009 – 1014.

(Lyu Hui-jun,Wang Ye,Li De-yi,et al. The application of backward cloud in qualitative evaluation[J]. *Chinese Journal of Computers*,2003,26(8):1009 – 1014.)