

基于改进相似权可拓理论的大跨径公路桥梁抗风稳定性评价

向 茂, 柴乃杰, 王起才, 李爱春

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 为准确评估大跨径公路桥梁的抗风稳定性能, 提出了基于改进相似权可拓理论的方法, 并依据《公路桥梁抗风设计规范》选取主梁截面宽度、密度比、扭弯频率比、竖弯基频、攻角系数、基本风速等12项指标作为评价大跨径桥梁抗风性能的评判因子。首先运用可拓学的理论知识, 引入经典域、节域、待评物元的概念, 并通过物元变换构建大跨度桥梁抗风稳定性能评价的物元体系, 计算评价指标对其稳定性等级的关联系数。然后利用改进相似权法确定物元指标体系的权重系数, 建立相似权物元可拓评价模型, 对大跨度桥梁抗风稳定性能的等级进行量化评价。最后, 以某公路大跨径悬索桥为实例进行抗风稳定性能的综合评判, 验证了该模型的实用性和可靠性。

关键词: 改进相似权; 可拓理论; 大跨径桥梁; 抗风稳定性评价

中图分类号: TU448.43

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2018)01-0032-08

引言

随着世界经济的发展, 桥梁工程必将迎来更大规模的建设高潮, 尤其是随着桥梁跨径的不断增大, 结构质量越来越轻、结构刚度越来越小、结构阻尼越来越低, 从而导致了风致作用的敏感性越来越大^[1]。1940年秋, 美国华盛顿州的旧Tocoma悬索桥由于风动力作用而垮桥的事故给桥梁工程界带来巨大冲击的同时, 也促进了桥梁风工程学的发展和进步^[2]。这一重大事故使桥梁工程师们开始认识到风的作用不仅仅是静力作用, 由此提出了风致振动的问题。所以, 抗风问题成为设计中必须重点考虑的因素。

在公路大跨径桥梁的抗风设计中, 需要考虑的因素除了风对结构的静力作用外, 还要考虑风对结构的动力作用。一般来说, 风对结构的动力

作用比静力作用更加危险。而风对结构的动力作用主要分为发散振动(如颤振和驰振)和限幅振动(如涡激振和抖振)两种^[3]。其中, 发散振动俗称是一种“急性病”, 具有较高的危险指数; 而限幅振动则恰恰相反, 称为一种“慢性病”, 具有时长不定的潜伏期。通常, 我们在大跨度桥梁的抗风设计中, 不仅要避免“慢性病”的发生, 更要严格控制“急性病”的发作。因此, 如何尽快地诊断结构是否会发生“急性病”及其可能发生的程度, 已经吸引了不少学者进行相应研究: 王爱勤^[4]运用模糊数学方法对公路大跨度桥梁的抗风稳定性能进行定量评价; 邱可^[5]基于ANSYS/APDL语言和MATLAB语言, 提出对颤振方程组优化求解研究; 以及现阶段热门的颤振稳定性^[6]的评价方法, 该评价方法公式简单, 分级明确。上述这些研究与评价方法都为大跨径桥

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT15R29)

作者简介: 向 茂 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程管理方面研究。Email: 1036068127@qq.com

柴乃杰 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程管理方面研究。Email: 1722685894@qq.com

王起才 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁建设与材料方面研究。Email: 13909486262@139.com

梁稳定性评价和指导桥梁抗风设计提供了丰富的理论依据,但考虑到影响大跨径桥梁本身抗风稳定性的因素复杂多变,而且各影响因素之间关系又错综复杂,有的是确定的,有的是不确定的,这就使得前述各种方法对解决这些问题势必存有一定的局限性,在具体运用过程中往往达不到准确判断的目的。因此,应该寻求一种可以更好地解决这类不确定性、多属性难题的综合评价方法,而可拓学正是研究此类复杂事物可拓性以及开拓规律的一种典型的评价方法^[7-8]。

本文在已有研究的成果的基础上,依据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/TD60-01-2004)选取结构影响参数(如扭弯频率比等)和风荷载参数(如攻角效应系数等)12个因素作为评价大跨径桥梁抗风性能等级的指标体系,并利用物元变换对其抗风性能等级物元系统进行可拓性定性分级。然后,在此基础上构建物元可拓评价模型,利用可拓集合论的关联函数对待评对象的各指标参数值进行定量计算,并建立单指标评价关联隶属矩阵,将各个指标评价转化为一种定量化的问题。同时为客观地反映评价指标在其评价中的重要性差异,故采用改进相似权法进行赋权,以提高评价的科学性和合理性,进而为定性和定量相

结合评价大跨径桥梁抗风性能提供新的思路,也对桥梁抗风设计起到一定的指导意义。

1 抗风稳定性评价指标的选取

大跨径公路桥梁抗风稳定性评价,主要是评估强风对桥梁结构的破坏性程度,即可以表示为风对结构的危害性=桥址处风荷强度+桥梁结构自身设计的易损性。因此,对大跨径公路桥梁抗风稳定性评价,主要是在大跨径公路桥梁自身结构的抗风能力和桥址处风荷载强度两大部分因素综合分析的基础上进行的。其中,决定大跨径公路桥梁自身结构的抗风稳定的因素有很多,本文选取扭弯频率比等7个结构因子,同时根据大跨径公路桥梁桥址处风环境的特点,选取攻角效应系数等5个场地因子作为其风荷载评价参数。大跨径公路桥梁的各评价指标的名称和定义见表1。

2 物元可拓模型的建立

2.1 抗风稳定性能物元的确定

为便于分析影响大跨径桥梁稳定性的评价指标体系,需对评价指标进行物元变换;设影响其抗风性能的指标有 n 个,则大跨径桥梁的抗风稳定性可用下面的 n 维物元来描述;

表1 大跨径公路桥梁抗风稳定性评价指标名称和定义

影响因素编号	评价指标	评价指标定义
结构影响参数 B_1	C_1 主梁(加劲梁)的全宽 B (m)	$B=2b$
	C_2 桥面质量与空气的密度比 μ	$\mu=m/(\pi\rho b^2)$, 其中 m 为桥面系及主缆单位长度(kg/m); ρ 为空气密度(kg/m ³); b 为主梁断面半宽(m)
	C_3 主梁(加劲梁)的惯性半径比 r/b	$\frac{r}{b}=\frac{1}{b}\sqrt{\frac{I_2+I_3}{A}}$, 其中 A 、 I_2 、 I_3 分别为主梁(加劲梁)的面积和惯性矩
	C_4 扭弯频率比 ε	$\varepsilon=f_t/f_b$, 其中 f_t 指最低阶扭弯自振频率, f_b 指最低阶竖弯自振频率
	C_5 最低阶竖弯自振频率 f_b (Hz)	f_b 为主梁(加劲梁)的最低阶竖弯自振频率
	C_6 最低阶扭弯自振频率 f_t (Hz)	f_t 为主梁(加劲梁)的最低阶扭弯自振频率
风荷载参数 B_2	C_7 断面形状影响系数 η_s	η_s 为与主梁(加劲梁)的断面形状有关的影响系数
	C_8 风的攻角效应系数 η_α	η_α 为与风的攻角(主流方向与水平面产生的夹角)有关的影响系数
	C_9 风的偏角效应系数 η_β	η_β 为与风的偏角(主流方向与桥轴平面产生的夹角)有关的影响系数
	C_{10} 基本风速 V_{10} (m/s)	V_{10} 为开阔平坦地貌条件下,地面以上10m高度处,100a重现期的10min平均年最大风速
	C_{11} 地表粗糙度系数 α	反映大气边界层中地表起伏或地物高矮稀密程度的影响系数
	C_{12} 基准高度 z (m)	确定桥梁主要构件距水面或某一平面的计算高度

$$R_i = (N_i, C, V_i) = \begin{bmatrix} N_i & c_1 & v_{i1} \\ & c_2 & v_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： R 为 n 维大跨径桥梁的抗风稳定性评价的物元，其中 N_i 为第 i 座待评大跨径桥梁， c_k ($k = 1, 2, \dots, n$) 为评价其抗风稳定性的第 k 个指标； v_{ik} 为第 i 座桥梁对应于其评价指标 k 的量值。

2.2 经典域、节域与待评物元的确定

对照现阶段的公路大跨径桥梁的颤振稳定性的评价，依据《公路桥梁抗风设计规范》所确定

的各指标界限值，用单因素法将其抗风稳定性由高到低分为 4 个等级；即 I 级（稳定型）、II 级（次稳定型）、III 级（次不稳定型）、IV 级（不稳定型），如表 2 所示。对此，为更好地进行定性与定量相结合地综合评价，运用物元的可拓性原理^[9-10]，将抗风稳定性定量地概述为 N_0 ：即 $N_0 = \{N_{01}, N_{02}, N_{03}, N_{04}\}$ ，其中 $N_{01} = \text{I 级}$ ， $N_{02} = \text{II 级}$ ， $N_{03} = \text{III 级}$ ， $N_{04} = \text{IV 级}$ 。然后，对样本集中的任一待判对象 N_P ，利用可拓集合论的关联函数进行定量计算， N_P 各指标属于 N_{01} ， N_{02} ， N_{03} 和 N_{04} 的隶属程度。

表 2 大跨径公路桥梁抗风稳定性评价指标及分级界限值

稳定性分级	主梁截面宽度 $C_1/\text{(m)}$	密度比 C_2	惯性半径比 C_3	扭弯频率比 C_4	竖弯基频 $C_5/(\text{Hz})$	扭转基频 $C_6/(\text{Hz})$
I 级	>35	>50	>0.5	>3.0	>0.4	>1.6
II 级	$(25, 35]$	$(35, 50]$	$(0.4, 0.5]$	$(2.0, 3.0]$	$(0.3, 0.4]$	$(0.8, 1.6]$
III 级	$(15, 25]$	$(20, 35]$	$(0.3, 0.4]$	$(1.5, 2.0]$	$(0.2, 0.3]$	$(0.4, 0.8]$
IV 级	≤ 15	≤ 20	≤ 0.3	$(1.0, 1.5]$	≤ 0.2	≤ 0.4
稳定性分级	断面形状系数 C_7	风攻角系数 C_8	风偏角系数 C_9	基本风速 $C_{10}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	地表粗糙度系数 C_{11}	基准高程 $C_{12}/\text{(m)}$
I 级	$(0.8, 1.0]$	$(0.9, 1.0]$	$(0.9, 1.0]$	$(0, 25]$	$(0.22, 0.30]$	$(0, 20]$
II 级	$(0.6, 0.8]$	$(0.7, 0.9]$	$(0.6, 0.9]$	$(25, 35]$	$(0.16, 0.22]$	$(20, 40]$
III 级	$(0.4, 0.6]$	$(0.5, 0.7]$	$(0.4, 0.6]$	$(35, 45]$	$(0.12, 0.16]$	$(40, 60]$
IV 级	≤ 0.4	≤ 0.5	≤ 0.4	>45	≤ 0.12	>60

(1) 确定经典域 R_0

根据大跨径桥梁稳定性分级，可得物元系统中研究对象的经典物元 $R_0 = (N_{0j}, C, V_{0j})$ ；

$$R_0 = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & v_{0j1} \\ & c_2 & v_{0j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{0jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： N_{0j} 表示桥梁抗风稳定性物元系统中的第 j 级抗风性能， C_i 表示描述抗风稳定性分级 N_{0j} 的特征， V_{0jk} 表示 N_{0j} 关于 C_i 中第 k 个指标所规定的无量纲化后的量值域，即各等级关于对应特征所取的数据范围。

(2) 确定节域 R_P

在全体桥梁抗风稳定性物元系统集合 N_P 中，将 n 个特征 C_i 各指标对应的所有取值范围中，取最低值、最高值分别作为物元下限和上限，形成的新物元称为节域物元 N_{P0} 。其中 v_{pk} 为特征 c_k 的值域；

$$R_P = \begin{bmatrix} N_P & c_1 & v_{P1} \\ & c_2 & v_{P2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_P & c_1 & \langle a_{P1}, b_{P1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{P2}, b_{P2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{Pn}, b_{Pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 确定待评物元 R_i

对于待评价大跨径桥梁抗风稳定性能，其所收集的评价信息用物元表示，即为待评物元：

$$R_t = \begin{bmatrix} N_t & c_1 & v_{t1} \\ & c_2 & v_{t2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_t & c_1 & \langle a_{t1}, b_{t1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{t2}, b_{t2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{tn}, b_{tn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: N_t 为第 t 个待评大跨径桥梁; v_{tk} 为 N_t 关于 C_k 评价指标的量值, 即为待判对象对于第 k 个指标的具体数值。

2.3 指标值的无量纲化处理

由于评价大跨径桥梁抗风稳定性的各指标的量纲不同, 为便于统计, 故对各指标量纲进行无量纲化处理, 具体方法如下:

越小越好型指标:

$$\bar{v}_{tk} = \frac{v_{tk} - v_{tk}^{\min}}{v_k^{\max} - v_k^{\min}} \quad (5)$$

越大越好型指标:

$$\bar{v}_{tk} = \frac{v_k^{\max} - v_{tk}}{v_k^{\max} - v_k^{\min}} \quad (6)$$

式中: v_{tk} 为无量纲化前的第 t 个待判对象对于第 k 个指标的评价值; $v_k^{\max}$ 表示物元系统中第 k 个指标的最大评价值; 则 $v_k^{\min}$ 为第 k 个指标的最小评价值。

2.4 计算桥梁抗风稳定性评价指标的关联函数

根据实变函数中距的概念, 计算待评价对象 N_t 各指标值与各个抗风稳定性评价等级 N_{0j} 及 N_p 中所对应评价指标范围值的距离 ρ ;

$$\rho(v_{tk}, v_{0jk}) = \left| v_{tk} - \frac{1}{2}(a_{0jk} + b_{0jk}) \right| - \frac{1}{2}(b_{0jk} - a_{0jk}) \quad (7)$$

$$\rho(v_{tk}, v_{pk}) = \left| v_{tk} - \frac{1}{2}(a_{pk} + b_{pk}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pk} - a_{pk})$$

然后, 在此基础上计算待评对象 N_t 与各个评价等级 N_{0j} 的单项指标关联度为 $r_{ij}(v_{tk})$;

$$r_{ij}(v_{tk}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{tk}, v_{0jk})}{|v_{0jk}|}, & v_{tk} \in v_{0jk} \\ \frac{\rho(v_{tk}, v_{0jk})}{\rho(v_{tk}, v_{pk}) - \rho(v_{tk}, v_{0jk})}, & v_{tk} \notin v_{0jk} \end{cases} \quad (8)$$

2.5 改进相似权法确定评价指标权重系数

相似权法^[11-12]是根据待评价对象的指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种客观评价方法, 具体步骤如下:

第 1 步: 既然事先无法确定评价指标的相对重要程度, 不妨假定样本的各个指标具有相同的重要程度, 由此形成指标权重向量 K ;

$$K = (k_j)_{1 \times m} = \left(\frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \dots, \frac{1}{m} \right)_{1 \times m} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

第 2 步: 在此假定条件下, 根据样本所选取的主梁截面宽度、密度比等 12 项评价指标的实际观测值, 利用式(7)~(8)构造出样本的关联系数矩阵 R ;

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (10)$$

第 3 步: 由样本单指标关联系数矩阵 R , 根据上式(9)、(10)及公式 $F = K \times R$ 求出多指标综合关联系数评价矩阵 F ;

$$F = (f_j)_{1 \times n} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

第 4 步: 单指标关联系数评价向量与多指标综合关联系数向量的“相近”程度, 实质反映了指标 C_j 反映总体情况的能力, 所以单指标关联系数向量与综合指标关联系数向量越相近, 则说明指标 C_j 权重越大, 在此选用灰色关联系数^[13-14]进行定量化描述, 具体如下:

将样本单指标关联系数矩阵 R 转换为系统行为序列, 则有

$$\begin{aligned} R_1 &= (r_{1j})_{1 \times n} = (r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n}) \dots \\ R_i &= (r_{ij})_{1 \times n} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \dots \\ R_m &= (r_{mj})_{1 \times n} = (r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn}) \end{aligned} \quad (12)$$

将多指标综合关联系数评价矩阵 F 设为系统行为的参考序列, 即

$$R_0 = (r_{0j})_{1 \times n} = (r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0n}) \quad (13)$$

求各序列初值像, 第 i 个序列记为 R'_i , 则有

$$R'_i = (r'_{ij})_{1 \times n} = (r'_{i0}, r'_{i1}, \dots, r'_{in}) \quad (14)$$

对于 $\xi \in (0, 1)$, 则有

$$\gamma(r_{0j}', r_{ij}') = \frac{\min_i \min_j |r_{0j} - r_{ij}| + \xi \max_i \max_j |r_{0j} - r_{ij}|}{|r_{0j} - r_{ij}| + \xi \max_i \max_j |r_{0j} - r_{ij}|} \quad (15)$$

$$\gamma(R_0, R_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(r_{0j}, r_{ij}) \quad (16)$$

则 $\gamma(R_0, R_i)$ 满足灰色四公理, ξ 为分辨系数取 0.5, 称 $\gamma(R_0, R_i)$ 为 R_0 与 R_i 的灰色关联度;

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i} \quad (17)$$

称 r_i 为相似数, w_i 为相似权, 即用 w_i 作为指标 c_i 的权重。

2.6 确定抗风稳定性分级的综合关联度

在计算待评价对象 N_t 与各个评价等级 N_{0j} 的单项指标关联函数的基础上, 得出 N_t 关于各评价等级 N_{0j} 多项指标综合关联度为

$$k_{tj} = \sum_{j=1}^n w_j r_{tj}(v_{tj}) \quad (18)$$

$$k_{ts} = \max \{k_{tj}(N_j)\} \quad (19)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, m; s = 1, 2, \dots, j$
依据上式判定待评价对象 N_t 属于评价等级 N_{0s} 。

3 实例应用

以已建成通车的广东省汕头海湾大桥为例, 对该方法的评价过程进行说明及验证。

3.1 工程概况及有关参数

汕头海湾大桥位于汕头港东部出入口妈屿岛海域处, 为跨海公路桥; 主跨为三跨双铰预应力混凝土加劲箱梁悬索桥, 桥跨布置为 154m+452m+154m, 于 1995 年建成, 它是我国第一座大型预应力混凝土悬索桥。该桥桥址正处于我国台风频繁发生的地区, 为了有效避免该大跨径桥梁颤振和驰振等“急性病”以及涡激振和抖振等“慢性病”的发生, 故对本桥的抗风稳定性进行评价显得十分重要。根据大桥构造形式及地形、地貌及当地风压等资料, 并通过分析和查阅当地气象资料, 计算得到该桥状态各评价因子的数值如表 3 所示。

表 3 待评对象评价指标实测值

指标	主梁截面宽度 C_1	密度比 C_2	惯性半径比 C_3	扭弯频率比 C_4	竖弯基频 C_5	扭转基频 C_6	断面形状系数 C_7	风攻角系数 C_8	风偏角系数 C_9	基本风速 C_{10}	地表粗糙系数 C_{11}	基准高程 C_{12}
实测值	24.72	62.90	0.60	4.26	0.1917	0.5860	0.75	0.70	0.45	47	0.12	50
无量纲值	0.506	0.035	0.333	0.348	0.681	0.756	0.250	0.300	0.550	0.470	0.180	0.500

3.2 大跨径桥梁物元的经典域 R_0

为便于统计, 根据式(5)~(6), 分别对其各分级评价指标值进行无量纲化处理 (见表 3), 然后

将 I~IV 级各评价指标无量纲化后对应的取值范围作为经典域, 则所形成的 12 个评价指标 $C_1 \sim C_{12}$ 的经典域物元矩阵 R_0 如下:

$$R_0 = \begin{matrix} & N_{01} & N_{02} & N_{03} & N_{04} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \end{matrix} & \begin{bmatrix} \langle 0.00, 0.30 \rangle \\ \langle 0.00, 0.25 \rangle \\ \langle 0.00, 0.50 \rangle \\ \langle 0.00, 0.60 \rangle \\ \langle 0.00, 0.33 \rangle \\ \langle 0.00, 0.33 \rangle \\ \langle 0.00, 0.20 \rangle \\ \langle 0.00, 0.10 \rangle \\ \langle 0.00, 0.10 \rangle \\ \langle 0.00, 0.25 \rangle \\ \langle 0.00, 0.27 \rangle \\ \langle 0.00, 0.20 \rangle \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \langle 0.30, 0.50 \rangle \\ \langle 0.25, 0.50 \rangle \\ \langle 0.50, 0.67 \rangle \\ \langle 0.60, 0.80 \rangle \\ \langle 0.33, 0.50 \rangle \\ \langle 0.33, 0.66 \rangle \\ \langle 0.20, 0.40 \rangle \\ \langle 0.10, 0.30 \rangle \\ \langle 0.10, 0.40 \rangle \\ \langle 0.25, 0.35 \rangle \\ \langle 0.27, 0.47 \rangle \\ \langle 0.20, 0.40 \rangle \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \langle 0.50, 0.70 \rangle \\ \langle 0.50, 0.75 \rangle \\ \langle 0.67, 0.84 \rangle \\ \langle 0.80, 0.90 \rangle \\ \langle 0.50, 0.67 \rangle \\ \langle 0.66, 0.83 \rangle \\ \langle 0.40, 0.60 \rangle \\ \langle 0.30, 0.50 \rangle \\ \langle 0.40, 0.60 \rangle \\ \langle 0.35, 0.45 \rangle \\ \langle 0.47, 0.60 \rangle \\ \langle 0.40, 0.60 \rangle \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \langle 0.70, 1.00 \rangle \\ \langle 0.75, 1.00 \rangle \\ \langle 0.84, 1.00 \rangle \\ \langle 0.90, 1.00 \rangle \\ \langle 0.67, 1.00 \rangle \\ \langle 0.83, 1.00 \rangle \\ \langle 0.60, 1.00 \rangle \\ \langle 0.50, 1.00 \rangle \\ \langle 0.60, 1.00 \rangle \\ \langle 0.45, 1.00 \rangle \\ \langle 0.60, 1.00 \rangle \\ \langle 0.60, 1.00 \rangle \end{bmatrix} \end{matrix}$$

3.3 大跨径桥梁物元的节域 R_P 及待评物元 R_N

根据式(3)~(4), 由大跨径桥梁抗风稳定性评价指标取值的整体范围确定节域 R_P , 以及由表 3 确定该桥梁的待评物元 R_N , 结果见表 4。

表 4 物元节域 R_P 及待评物元 R_N

物元节域 R_P			待评物元 R_N		
$R_P =$	N_P	C_1	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$	$R_N =$	N
		C_2	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_1
		C_3	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_2
		C_4	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_3
		C_5	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_4
		C_6	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_5
		C_7	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_6
		C_8	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_7
		C_9	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_8
		C_{10}	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_9
		C_{11}	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_{10}
		C_{12}	$\langle 0.00, 1.00 \rangle$		C_{11}
					C_{12}

3.4 评价指标关于抗风稳定性分级的关联度计算

根据式(7)~(8), 以此大桥为例来计算单项评价指标 c_1 的关联度。因为 $v_{11} \in v_{013}$, 所以 c_1 对第 3 等级的关联度为;

$$r_{13}(v_{11}) = \frac{-\rho(v_{11}, v_{013})}{|v_{013}|} = -\frac{\left|0.506 - \frac{1}{2}(0.50 + 0.70)\right| - \frac{1}{2}(0.70 - 0.50)}{|0.70 - 0.50|} = 0.03$$

而 $v_{11} \notin v_{011}$, 所以 c_1 对第 1 等级的关联度为;

$$r_{11}(v_{11}) = \frac{\rho(v_{11}, v_{011})}{\rho(v_{11}, v_{p1}) - \rho(v_{11}, v_{011})} = \frac{\left|0.506 - \frac{1}{2}(0.00 + 0.30)\right| - \frac{1}{2}(0.30 - 0.00)}{\rho(v_{11}, v_{p1}) - \left|0.506 - \frac{1}{2}(0.00 + 0.30)\right| + \frac{1}{2}(0.30 - 0.00)} = -0.294$$

其中,

$$\rho(v_{11}, v_{p1}) = \left|v_{11} - \frac{1}{2}(a_{p1} + b_{p1})\right| - \frac{1}{2}(b_{p1} - a_{p1}) = \left|0.506 - \frac{1}{2}(0.00 + 1.00)\right| - \frac{1}{2}(1.00 - 0.00) = -0.494$$

同理, 按上述原则进行判断后计算, 可得汕头海湾大桥各指标关于 4 个抗风稳定性分级的单指标关联度, 结果如表 5 所示。

表 5 各评价指标对其稳定性分级的关联度

指标	稳定性分级			
	I	II	III	IV
I_1	-0.2943	-0.0120	-0.0300	-0.2820
I_2	-0.1400	-0.8600	-0.9300	-0.9533
I_3	-0.3340	-0.3340	-0.5030	-0.6036
I_4	-0.4200	-0.4200	-0.5650	-0.6133
I_5	-0.5239	-0.3620	-0.0333	-0.0333
I_6	-0.6358	-0.2824	-0.4353	-0.2327
I_7	-0.1667	-0.2500	-0.3750	-0.5833
I_8	-0.4000	0.0000	0.0000	-0.4000
I_9	-0.5000	-0.2500	-0.2500	-0.1000
I_{10}	-0.3188	-0.2034	-0.0408	-0.0364
I_{11}	-0.3333	-0.3333	-0.6170	-0.7000
I_{12}	-0.3750	-0.1667	-0.5000	-0.1667

3.5 改进相似权法确定评价指标权重

首先, 采用式(9)、(11)求出多指标综合关联系数评价向量 F , 并作为系统行为的参考序列; 然后再根据式(10)、(12)构建单指标关联系数评价向量 $(R'_i = (r_i)_{1 \times n}, i=1, 2, \dots, 12; n=1, 2, \dots, 4)$; 最后, 根据式(15)~(17)确定指标权系数的步骤, 求得待评价汕头海湾大桥中各指标参数的权系数向量记为 W_1 , 其计算结果如下所示;

$W_1=[0.080 \quad 0.076 \quad 0.080 \quad 0.085 \quad 0.079 \quad 0.097$
 $0.099 \quad 0.081 \quad 0.094 \quad 0.082 \quad 0.079 \quad 0.068]$

3.6 大跨径桥梁抗风稳定性的评价

由上述第2.4节计算的关联度和第2.5节确定的权重系数,可以得出汕头海湾大桥的抗风稳定性关于各评价等级的综合关联度及其排序,如表6所示。

表6 抗风稳定性综合关联度评价

等级	抗风稳定性分级			
	N_1	N_2	N_3	N_4
综合关联度	-0.3735	-0.2873	-0.3529	-0.3898
排序	NO.3	NO.1	NO.2	NO.4

由本文上式(18)、(19)的评价原则和计算结果可知,汕头海湾大桥的抗风稳定性分级为次稳定型。

4 评价结果分析

为验证利用本文所提方法所得出的评价结果的可靠性,将其与该桥风洞试验结果进行比较;即通过由西南交通大学风工程试验研究中心负责对全桥模型进行风洞试验,得出汕头海湾大桥的颤振临界风速 $v_{cr}=135\text{m/s}$,比本桥成桥阶段的主梁颤振检验风速 $[v_{cr}]=96.5\text{m/s}$ 高出40%。

对本桥而言,当 $v_{cr}/[v_{cr}] \geq 4.0$ 时,抗风稳定性等级可划为稳定型;当 $1.3 \leq v_{cr}/[v_{cr}] < 4.0$ 时,抗风稳定性等级可划为次稳定型;当 $1.0 \leq v_{cr}/[v_{cr}] < 1.3$ 时,抗风稳定性等级可划为次不稳定型;当 $v_{cr}/[v_{cr}] < 1.0$ 时,抗风稳定性等级可划为不稳定型。

由此可见,采用本文研究方法得出的结论与该桥风洞试验的结论具有良好的吻合性。

5 结论

公路大跨径桥梁抗风稳定性评价是一个涉及多项参数指标的复杂性工程决策问题。对此,本文提出了基于改进相似权物元可拓理论的大跨径桥梁抗风稳定性评价模型,通过采用将改进相似

权理论和物元可拓理论相互结合的方法,实现大跨径桥梁稳定性进行定量化综合评价的目标,为大跨径桥梁抗风设计以及确定桥梁结构力学参数提供参考。这既有利于避免大跨径桥梁颤振和驰振等“急性病”的发生,也能降低涡激振和抖振等“慢性病”发生的可能性。第一,以《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/TD60-01-2004)为基础构建公路大跨径桥梁抗风稳定性评价指标体系,既能较好地客观全面反映影响大跨度桥梁抗风性能的主要参数,也增强了分析的科学与可靠性。第二,该模型依据《公路桥梁抗风设计规范》所确定的各指标界限值,确定节域物元和经典域物元的临界值,不仅可以尽可能地消除不确定干扰因素的影响,也克服了确定临界值的主观性和片面性。第三,采用物元可拓模型能对大跨径桥梁进行单指标评价,并选用改进相似权进行赋权,这样就能保证在很大程度上避免受主观因素影响的基础上建立关联隶属矩阵,从而确定出单个指标关联系数。最后,再通过对所有单指标关联系数进行综合评价,极大地提高了该模型评估的准确率。

参考文献

- [1] 李加武,方成,侯利明等.大跨径桥梁静风稳定参数的敏感性分析[J].振动与冲击,2014,33(4):124-130.
- [2] 张鸣祥.大跨度桥梁的风致振动分析与被动控制研究[D].合肥工业大学,2011.
- [3] 邹岩.铁路大跨度钢桁梁加劲拱桥风致振动研究[J].铁道建筑技术,2017,(4):61-65.
- [4] 王爱勤,李龙安.公路大跨度桥梁抗风性能评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(5):58-62.
- [5] 邱可.大跨度桥梁颤振及静力抗风研究[M].广州大学学报,2011.
- [6] JTG/TD60-01-2004.公路桥梁抗风设计规范[S].
- [7] 杨贵军,蒋朝辉等.基于熵权-可拓理论的高炉软熔带位置状态模糊综合评判方法[J].自动化学报,2015,41(1):75-83.
- [8] 杨卓,戎晓力等.基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J].安全与环境学报,2016,16(2):15-19.
- [9] 梁桂兰,徐卫亚等.基于熵权的可拓理论在岩体质量

- 评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 16(2): 535-540.
- [10] 李秋义, 全洪珠, 秦 原. 混凝土再生骨料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 张亚明, 李 娜, 赵培卿. 基于蚁群相似权算法的网络团购信用评价模型研究[J]. 现代图书情报技术, 2016, (1): 40-47.
- [12] 王 健, 朝 晖, 曹海波. 基于相似权的公路绿色施工属性评价研究[J]. 现代图书情报技术, 2016, (1): 40-47.
- [13] 赵 敏, 龚声蓉, 高祝静. 基于灰色关联系数的混合噪声滤波算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(5): 1713-1716.
- [14] 王砚羽, 张 卓, 王正新. 基于灰色关联系数改进的加权 TOPSIS 法及其应用[J]. 华东经济管理, 2011, 25(10): 139-144.

Evaluation of Wind-Resistant Stability of Large Span Highway Bridge Based on Improved Similarity and Extension Theory

Xiang Mao, Chai Naijie, Wang Qicai, Li Aichun

(Institute of civil engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the fighting-wind stability of large span highway bridges, a method based on improved similarity extension theory is proposed. According to the standard for wind-resistant design of highway bridge Bridge, Width of main beam cross section, Density ratio, Bending frequency, angle of attack, basic wind speed and other 12 indicators as long-span bridge wind-resistant evaluation factors. First of all, by the theory of extension theory, by the introduction of the classic domain, section domain and the concept of meta-material, and through the Matter-element transformation we build large span bridge wind-resistant stability evaluation of the material element system and calculate the stability of the evaluation indicators Rank correlation coefficient. Then, we use the improved similarity right method to determine the weight coefficient of the matter-element index system, and establish the similarity element-element extension evaluation model to evaluate the wind-stabilizing performance of long-span bridge. Finally, a comprehensive evaluation of the wind stability performance of a large span suspension bridge is carried out, and the practicability and reliability of the model are verified.

Keywords: improved similarity right; extension theory; large span bridge; wind-resistant stability evaluation