

基于群组 AHP 的悬索桥状态评估指标权重确定*

许翔,黄侨[†],任远,刘小玲

(东南大学 交通学院,江苏 南京 210096)

摘要:为确定悬索桥综合技术状况评估模型中指标的权重,应用群组 AHP 方法确定相应的评估指标权重.首先,根据韦伯-费希纳定律确定了 $10^{\frac{0}{8.384}} \sim 10^{\frac{8}{8.384}}$ 形式的五级指数标度方法,对其合理性进行论述;其次,采用遗传算法对专家的判断矩阵一致性进行优化,优化后的判断矩阵一致性明显提高;随后采用粒子优化 K 均值聚类算法对专家意见进行聚类分析,并以主流专家意见为基础,采用对等共识模型计算专家权重,得到各评估指标最终的权重值;最后,以悬索桥评估模型为例,通过上述方法确定悬索桥模型中各指标的权重值,论证了方法的可行性和实用性.将本文的权重计算结果与规范权重进行对比,发现计算得到的大跨径悬索桥评估指标权重较规范权重更趋合理,尤其是索塔和附属设施的权重值.悬索桥评估指标权重的研究结论是对现行规范权重的补充,可以为规范的进一步修编提供参考.

关键词:悬索桥;状态评估;指标权重;群组层次分析法;对等共识模型

中图分类号:U446.3

文献标志码:A

Determination of Index Weights in Suspension Bridge Condition Assessment Based on Group-AHP

XU Xiang, HUANG Qiao[†], REN Yuan, LIU Xiaoling

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To determine the index weights of the condition assessment model for suspension bridges, group Analytic Hierarchy Process (AHP) approach was explored to determine the corresponding index weights. Firstly, the $10^{\frac{0}{8.384}} \sim 10^{\frac{8}{8.384}}$ scale method was adopted based on the Weber-Fechner law. Then, the genetic algorithm was used to optimize the consensus of judgment matrixes. The consensus of judgment matrixes was significantly improved after optimization. Moreover, the PSO-K-MEANS clustering algorithm was used to classify the experts' opinions, and the expert weights were calculated by the peer-to-peer consensus reaching model. In the end, the presented group-AHP method was applied to a suspension bridge assessment model to verify its feasibility and practicability. Compared with the index weights of the code, it was found that the index weights calculated in this paper were more reasonable than those of the code. The presented index weights of suspension bridges are the effective supplement to the current standard, which can provide reference to revise the current standard.

* 收稿日期:2017-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208096), National Natural Science Foundation of China (51208096); 江苏省交通运输科技项目重大科技专项(2014Y02), Major Transportation Science and Technology Project in Jiangsu Province (2014Y02); 江苏省交通运输科技项目(2012Y25), Transportation Science and Technology Project in Jiangsu Province (2012Y25)

作者简介:许翔(1989-),男,江苏丹阳人,东南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: quanguhit@126.com

Key words: suspension bridges; condition assessment; index weights; group AHP; peer-to-peer consensus reaching model

桥梁评估是复杂的系统工程,由于评估中判断的主观性、统计的局限性和因素的不可定量性,使得桥梁评估存在极大的模糊性和不确定性^[1-2].层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)具有实用性、系统性和简捷性等优点,被广泛应用于桥梁评估的研究中^[3-4].采用层次分析法对桥梁评估进行研究可以分为5个步骤,分别为:①评估指标选取;②评估体系建立;③指标权重确定;④评估方法研究;⑤评估标准划分.其中,指标权重确定是桥梁评估研究中的关键环节之一.

我国现行行业标准 JTG/T H21-2011《公路桥梁技术状况评定标准》中规定了各类桥梁评估指标的权重值,但该评定标准在满足普适性的前提下,不可避免地会忽略复杂结构桥梁的特殊性,尤其是大跨径缆索承重桥梁.对斜拉桥评估指标权重取值的研究已取得一定的成果^[5-6],但对于大跨悬索桥评估指标权重的研究相对较少.

本文采用群组 AHP 的方法来确定大跨径悬索桥的指标权重,研究步骤主要包括:标度的选择,判断矩阵一致性优化,专家意见分析,专家意见聚类分析,专家权重确定和评估指标权重确定.群组 AHP 方法的研究主要有3个关键问题:1)标度的选择;2)判断矩阵一致性优化;3)专家权重的确定.本文在多年系列研究的基础上,提出了一种新的指数标度方法,然后应用遗传算法、粒子群优化 K 均值聚类算法和对等共识模型对大跨悬索桥的指标权重进行研究.在调研全国 45 位特大桥梁养护管理专家、学者和进行若干座大型悬索桥试算的基础上,提出了一组用于悬索桥评估的指标权重,可为大型悬索桥的养护、评价和管理提供理论参考.

1 标度的选择和判断矩阵一致性优化

1.1 标度的选择

目前应用最广泛的标度是 Saaty^[7]最早提出的 1~9 标度.随后,国内外学者相继提出了多种标度方法,其中互反性标度有 1~5 标度、1~15 标度、 x^2 标度、 \sqrt{x} 标度、9/9~9/1 标度、10/10~18/2 标度和指数标度等;互补性标度有 0.1~0.9 标度、0~1 标度和 0~2 标度等^[8-9].

本文中专家在判断两两指标相对重要性时,仍采用 1~9 标度.但是专家的判断属于其主观感受,不能够直接采用该标度进行权重计算.韦伯-费希纳定律^[10]认为:人的主观感觉量 S 是客观刺激量 R 的对数函数,即有:

$$S = k \log R \quad (1)$$

式中: k 为韦伯常数.指数标度能够满足韦伯-费希纳定律,且有效地解决了等差分布标度与 AHP 原理间的矛盾^[7].本文根据韦伯-费希纳定律,将主观感受量转化为客观刺激量,该客观刺激量反映的是实际的两两指标间的相对重要性,可用于计算指标权重值.

心理学家 Miller^[11]认为,在某种属性上对若干个不同物体进行辨别,普通人能正确辨别的数目为 5~9 个.因此他认为心理学上的极限应为 9.与多数标度方法一致,本文采用了五级标度,主观感受量 S 采用 0~8 的等差数列,而客观刺激量 R 采用 1~9 的等比数列.根据式(1)可得:

$$8 = k \log 9$$

由此可计算得到韦伯常数 $k = 8.384$,则指数标度的形式为 $(10^{\frac{0}{8.384}}, 10^{\frac{2}{8.384}}, 10^{\frac{4}{8.384}}, 10^{\frac{6}{8.384}}, 10^{\frac{8}{8.384}})$.

1.2 判断矩阵的一致性优化

在层次分析法中,由于判断系统中指标数量繁多、判断准则错综复杂,易造成主观判断不一致的现象.判断矩阵的一致性包含两个概念,次序一致性和基本一致性^[12].

1)次序一致性:若判断矩阵内所有元素满足 $a_{ij} > 1$ 、 $a_{jk} > 1$ 和 $a_{ik} > 1$,则称判断矩阵具有次序一致性.

2)基本一致性:一般认为一致性比例 $CR \leq 0.1$ 时,判断矩阵具有基本一致性.其中,CR 是一致性指标 CI 与平均一致性指标 RI 的比值,CI 可通过判断矩阵计算得到,RI 可通过查表得到.若判断矩阵内任意的元素满足 $a_{ij} = a_{ik} a_{kj}$,则称判断矩阵具有完全一致性.

次序不一致的问题是由于决策者的疏忽造成的,属于逻辑错误问题,一般出现的情况较少,可以通过辅助信息对判断矩阵进行修正,最终达到次序一致.而判断矩阵完全一致在实际应用中几乎是不可能的,但是可以通过优化算法对判断矩阵一致性

进行优化,优化后的判断矩阵能够达到基本一致性程度。

由于标度分级的限制,专家对指标进行两两判断时,最终选择的标度与其真实偏好存在偏差。例如,专家的真实偏好是标度 4.1,在 1~9 标度中只有 3 和 5 可选,为了更加准确表达真实偏好,专家只能选取标度 5。所以,专家最终选择的标度未必是一个定值,而是一个区间范围。可以定义该区间范围为 $[s_{ij} - \delta, s_{ij} + \delta]$,其中 δ 为标度的波动幅值。当 δ 在其定义域内取值越大,优化后的判断矩阵一致性越好,而当取值越小时,则能够最大限度地保留专家原始判断信息。

本文采用的标度方法中 δ 对应的定义域为 $[0,1]$,综合考虑判断矩阵一致性优化效果和专家原始判断信息的保留程度,在此暂取 $\delta = 0.5$ 进行优化运算。可通过设计遗传算法对判断矩阵一致性进行优化。判断矩阵一致性优化框图如图 1 所示。

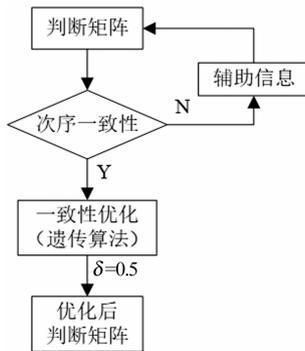


图 1 判断矩阵一致性优化框图

Fig. 1 Optimization flow for consensus of judgment matrixes

2 专家权重的确定

由于专家知识水平、工作经验、状态好坏和对问题的熟悉程度不同,势必会产生专家意见的多样性甚至对立性。在确定专家权重之前,应先进行聚类分析,确定专家的主流意见,并在此基础上进行专家权重的分析。本文采用粒子群优化 K 均值聚类算法 (Particle Swarm Optimization K-Means Clustering Algorithm, PSO-K-MEANS)^[13] 对专家意见进行聚类分析。

2.1 PSO-K-MEANS 聚类算法

K-MEANS 聚类算法是基于划分的算法类型。该算法的原理是首先选取 k 个对象作为初始的 k 个簇的中心;然后将其他对象根据其各个簇的中心

距离分配到最近的簇;最后重新计算各个簇的中心。不断重复这个过程,直到达到最大迭代次数或聚类中心不再变化为止。PSO 是一种基于迭代的智能优化算法,由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出^[14]。该算法初始化为一群随机粒子,每个粒子都有自身的速度和位置,然后通过迭代找到最优解。每次迭代过程中,粒子通过跟踪 2 个最优解来更新自己:1)粒子本身找到的最优解,即个体极值;2)整个粒子群找到的最优解,即全局极值。粒子根据以下公式来更新自身的速度和位置:

$$V_i^{t+1} = V_i^t + c_1 r_1 (P_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (P_g^t - X_i^t) \quad (2)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (3)$$

式中: V 为粒子速度; X 为粒子位置; t 为迭代次数; r_1 和 r_2 为 0~1 均匀分布的随机数; c_1 和 c_2 为学习因子; P_i 为个体极值; P_g 为全局极值。

PSO-K-MEANS 聚类算法融合了粒子群优化算法较强的全局搜索能力和 K 均值聚类算法较强的局部寻优能力,加快了算法的收敛速度。基于 PSO 的 K-MEANS 聚类算法中,每个粒子代表 k 个类的中心。设给定数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,若聚类集为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, k 个聚类中心用 c_1, c_2, \dots, c_k 来表示,那么聚类中心的计算公式和聚类目标函数可表示为:

$$m_{ij} = \frac{1}{n_j} \sum_{x_p \in C_i} x_p \quad (4)$$

$$f(X_i) = \sum_{j=1}^k \sum_{x_p \in C_j} d(x_p, m_{ij}) \quad (5)$$

式中: X_i 为第 i 个粒子; m_{ij} 为第 i 个粒子第 j 类聚类中心的位置; $d(x_p, m_{ij})$ 为第 p 个数据样本到相应的聚类中心的距离,考虑指标变量之间相关性的影响,这里采用马氏距离; $f(X_i)$ 为聚类目标函数均方误差,即为样本数据到各个聚类中心的距离总和。

2.2 专家权重

给群组中的专家分配权重是群决策中的关键步骤,它决定了群组 AHP 方法得到的最终结果的正确性。目前,国内外的专家学者已经相继提出了众多确定专家权重的方法^[15-16]。在这些方法中,专家权重可以分为两类:主观权重和客观权重。

主观权重需通过主观判断得到,这势必会引入新的判断误差。Saaty^[7]曾提出利用 AHP 方法来确定专家权重,也有学者提出群体内部专家之间进行

相互重要性评价来确定专家权重的方法^[17].但是以上方法在专家数量大和专家相互不熟悉的情况下较难开展,存在一定的局限性.

客观权重是通过专家对具体问题所作决策的可信度来决定的.所作决策的可信度可以用专家判断矩阵的一致性和该专家意见与其他专家意见的统一性等指标来评估.

本文采用对等共识模型(Peer-to-Peer Consensus Reaching Model)来确定专家权重^[18].该方法通过两两比较专家意见的一致性,找到意见相差最大的两位专家,然后对两位专家的判断矩阵进行修正,以增加两位专家意见的一致性.

专家 p 和专家 q 的意见一致性程度可用下式表示:

$$ICI_{pq} = \frac{1}{n^2} e^T A_p A_q^T e = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij(p)} a_{ij(q)} \quad (6)$$

式中: ICI_{pq} 表示专家 p 和专家 q 的意见一致性程度,其值越小,表明一致性越高; n 表示判断指标数量; e 为单位矩阵; A 为专家的判断矩阵; a 为判断标度.

当专家 p 和专家 q 意见的不一致程度最高时,即 ICI_{pq} 的值最大,则需要对 A_p 和 A_q 进行修正,修正公式为:

$$a_{ij(p)}^{k+1} = (a_{ij(p)}^k)^{\alpha_p} (a_{ij(q)}^k)^{1-\alpha_p} \quad (7)$$

$$a_{ij(q)}^{k+1} = (a_{ij(q)}^k)^{\alpha_q} (a_{ij(p)}^k)^{1-\alpha_q} \quad (8)$$

式中: k 为迭代次数; α_p 和 α_q 是参数,表达式为

$$\alpha_p^k = 1 - \frac{\sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{pi}}{2(\sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{pi} + \sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{qi})} \quad (9)$$

$$\alpha_q^k = 1 - \frac{\sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{qi}}{2(\sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{pi} + \sum_{i=1, i \neq p, q}^m ICI_{qi})} \quad (10)$$

专家一致性的控制可以用参数 ϵ 表示.对于任意的两位专家 p 和 q ,当 $ICI_{pq} \leq \epsilon$ 时,认为专家们达到了共识. Saaty^[7] 认为 1.1 是 ϵ 的取值上界,一般可取 1.01 作为专家一致性的控制值^[18].

当专家意见一致性满足要求时,各专家权重可按照下式进行计算:

$$w_i = \frac{1}{ICI_{is}} / \sum_{s=1}^m \frac{1}{ICI_{is}} \quad (11)$$

3 大跨悬索桥的权重分析实例

JTG H11-2004《公路桥涵养护规范》和 JTG/T H21-2011《公路桥梁技术状况评定标准》为了满足评估对象的普遍适用性,将桥梁结构划分为上部结构、下部结构和桥面系.但是,大跨径悬索桥结构形式复杂,要求更加精细的层次划分.本文根据大跨径悬索桥的结构特点,综合考虑安全性、耐久性和适用性,以全面性、简捷性、独立性、客观性和可检性为指标选取原则,融合人工检查、健康监测和无损检测数据,建立了基于多源数据的综合技术状况评估模型.该评估模型以主缆系统、吊索系统、加劲梁、索塔、锚碇、下部结构和附属设施为 1 级指标;选择主缆索股索力、主缆线形和主缆索体等 31 个元素为 2 级指标.大跨悬索桥综合技术状况评估模型中的具体指标如图 2 所示.

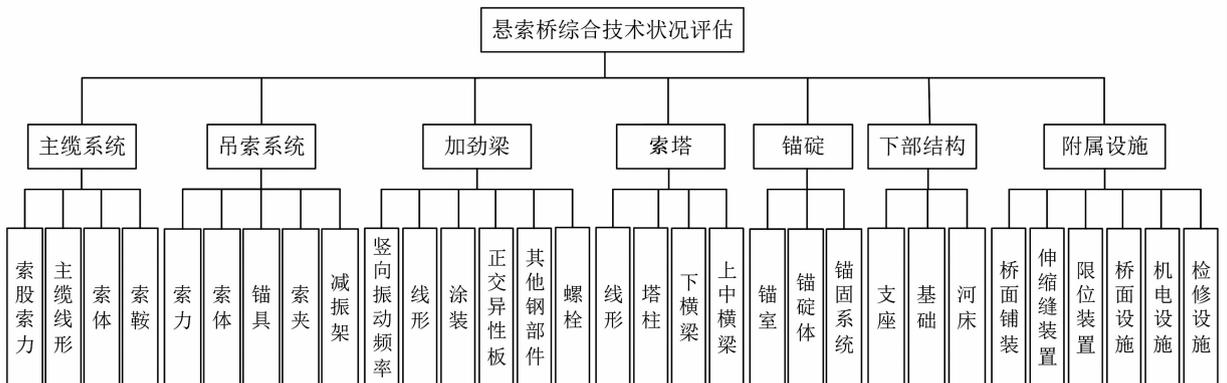


图 2 悬索桥综合技术状况评估模型
Fig. 2 Suspension comprehensive condition assessment model

3.1 专家调研

本文对大跨径悬索桥综合技术状况评估指标权重研究开展了调研工作. 考虑专业性、地域性和涵盖行业等要求, 最终在全国范围内邀请了45位与大型桥梁养护管理及建设有关的专家、教授进行问卷调

查. 45位专家的地缘分布和构成比例如图3所示.

本次调研共发放45份问卷, 反馈问卷44份, 回收率为98%. 在回收的问卷中, 未出现填写错误等原因导致问卷作废的现象, 最终的有效问卷数为44.

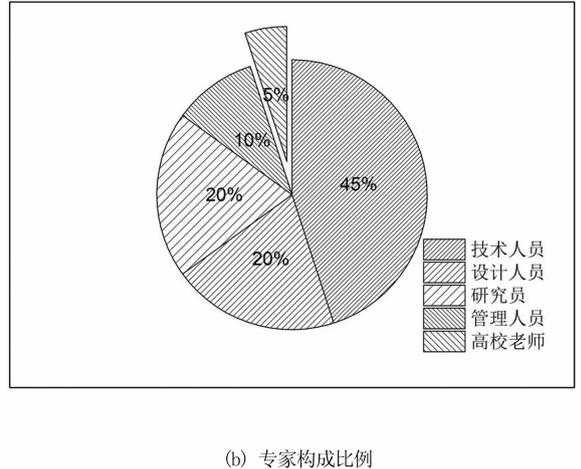
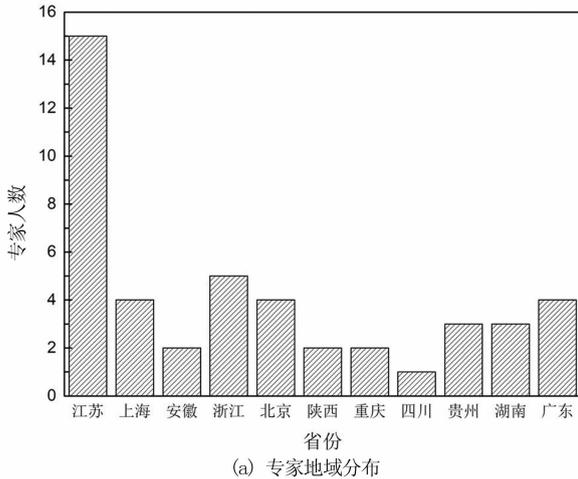


图3 调研专家基本信息
Fig. 3 Essential information of experts

3.2 指标权重计算

以第2层的7个指标(主缆系统、吊索系统、加劲梁、索塔、锚碇、下部结构和附属设施)为例进行指标权重计算说明.

3) PSO-K-MEANS 聚类分析. 采用 MATLAB 编写 PSO-K-MEANS 聚类算法代码, 分析44位专家的意见, 最终的聚类分析结果如图5所示.

1) 次序一致性检验. 对44位专家的判断矩阵的次序一致性进行检验, 未发现次序不一致现象.

2) 判断矩阵一致性优化. 利用遗传算法对判断矩阵一致性进行优化, 优化目标是判断矩阵的一致性比例CR最小. 遗传算法设定种群数量为30, 交叉概率为0.93, 变异概率为0.001, 交叉算子参数为0.3, 停止代数为50, 利用MATLAB遗传算法工具箱进行优化运算. 判断矩阵一致性比例CR优化效果如图4所示. 从图4中可以看出, 经过遗传算法优化后, 44位专家的判断矩阵中的一致性比例CR明显降低, 并达到了较好的一致性水平.

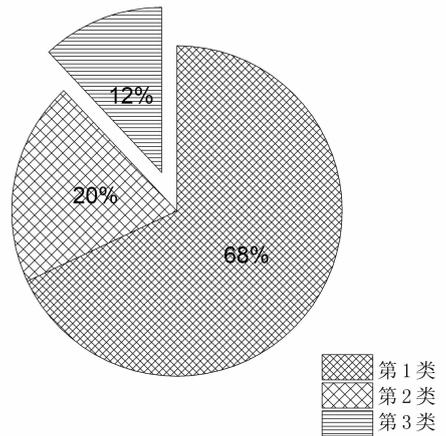


图5 PSO-K-MEANS 聚类分析结果
Fig. 5 PSO-K-MEANS clustering analysis result

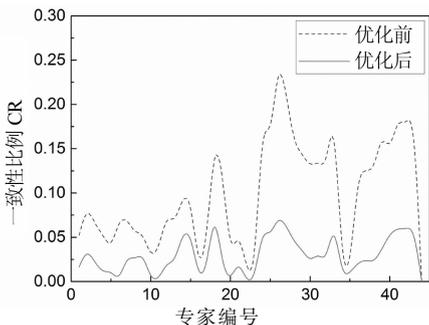


图4 专家判断矩阵CR优化效果
Fig. 4 Optimization results of CR

由图5可知, 第1类专家意见占比为68%, 是主流意见, 专家权重将以此为基础进行计算.

4) 专家权重. 第1类专家共有30位, 分别计算专家两两之间的一致性程度指标ICI, 形成一个30×30的矩阵. 在这个矩阵中, 有两位专家的一致性程度最差, 其一致性程度指标 $ICI_{ij} = 1.828$. 这两位专家的判断矩阵分别为:

$$A_p^1 = \begin{bmatrix} 1.000 & 4.000 & 4.000 & 0.500 & 0.500 & 0.500 & 7.030 \\ 0.250 & 1.000 & 1.000 & 0.250 & 0.250 & 0.250 & 4.000 \\ 0.500 & 1.000 & 1.000 & 0.250 & 0.250 & 0.250 & 4.000 \\ 2.000 & 4.000 & 4.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 8.000 \\ 2.000 & 4.000 & 4.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 8.000 \\ 2.000 & 4.000 & 4.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 8.000 \\ 0.142 & 0.250 & 0.250 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$A_q^1 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.615 & 0.250 & 0.250 & 0.500 & 0.500 & 4.000 \\ 1.627 & 1.000 & 0.477 & 0.500 & 0.876 & 0.882 & 4.000 \\ 4.000 & 2.097 & 1.000 & 1.069 & 2.000 & 2.000 & 6.000 \\ 4.000 & 2.000 & 0.935 & 1.000 & 1.718 & 1.729 & 6.000 \\ 2.000 & 1.142 & 0.500 & 0.582 & 1.000 & 1.004 & 4.459 \\ 2.000 & 1.134 & 0.500 & 0.579 & 0.996 & 1.000 & 4.431 \\ 0.250 & 0.250 & 0.167 & 0.167 & 0.224 & 0.226 & 1.000 \end{bmatrix}$$

因为专家一致性指标 $ICI_{p_i} > \epsilon = 1.01$, 需要对这两位专家的判断矩阵进行修正. 根据式(5)和式(6)分别计算修正系数, 得 $\alpha_p^1 = 0.812, \alpha_q^1 = 0.688$. 以群组内其他专家的意见为参考, 对判断矩阵进行修正, 使得两位专家的意见趋于一致, 修正后的判断矩阵为:

$$A_p^2 = \begin{bmatrix} 1.000 & 2.813 & 2.375 & 0.439 & 0.500 & 0.500 & 6.323 \\ 0.356 & 1.000 & 0.870 & 0.285 & 0.316 & 0.317 & 4.000 \\ 0.421 & 1.149 & 1.000 & 0.328 & 0.369 & 1.369 & 4.317 \\ 2.278 & 3.512 & 3.045 & 1.000 & 1.107 & 1.108 & 7.579 \\ 2.000 & 3.160 & 2.706 & 0.903 & 1.000 & 1.001 & 7.167 \\ 2.000 & 3.156 & 2.707 & 0.902 & 0.999 & 1.000 & 7.159 \\ 0.158 & 0.250 & 0.232 & 0.132 & 0.140 & 0.140 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$A_q^2 = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.102 & 0.594 & 0.310 & 0.500 & 0.500 & 4.770 \\ 0.907 & 1.000 & 0.601 & 0.403 & 0.592 & 0.595 & 4.000 \\ 1.684 & 1.664 & 1.000 & 0.679 & 1.045 & 1.045 & 5.287 \\ 3.222 & 2.483 & 1.472 & 1.000 & 1.457 & 1.457 & 6.563 \\ 2.001 & 1.688 & 0.957 & 0.689 & 1.000 & 1.003 & 5.351 \\ 2.000 & 1.680 & 0.957 & 0.686 & 0.997 & 1.000 & 5.328 \\ 0.210 & 0.250 & 0.189 & 0.152 & 0.187 & 0.188 & 1.000 \end{bmatrix}$$

修正后的专家一致性指标 $ICI_{p_i} = 1.159$. 对专家一致性指标矩阵进行迭代计算, 直到任意的 $ICI \leq 1.01$. 最后再按照式(7)计算专家权重值.

5) 指标权重. 根据上述算法, 可以得到图 2 所示的悬索桥综合技术状况评估模型中的各指标的权重

值, 如表 1 所示. 表 1 中, “AHP 权重”为按本文方法计算得到的权重值; “规范权重”是指 JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》中规定的权重值.

表 1 各层指标的权重分配结果表
Tab.1 Weight distribution of each index layer

| 第 1 层结构 | 第 2 层结构 | AHP 权重 | 规范权重 |
|---------|---------|--------|-------|
| 主缆系统 | 索股索力 | 0.10 | — |
| | 主缆线形 | 0.25 | 0.57 |
| | 索体 | 0.45 | — |
| | 索鞍 | 0.20 | 0.43 |
| | 吊索系统 | 0.080 | 0.086 |
| 加劲梁 | 索力 | 0.20 | — |
| | 索体 | 0.31 | 0.81 |
| | 锚具 | 0.22 | — |
| | 索夹 | 0.22 | 0.19 |
| | 减振架 | 0.05 | — |
| | 竖向振动频率 | 0.12 | — |
| | 线形 | 0.20 | — |
| | 涂装 | 0.05 | — |
| 索塔 | 正交异性板 | 0.34 | 1.00 |
| | 其他钢部件 | 0.19 | — |
| | 螺栓 | 0.10 | — |
| | 线形 | 0.20 | — |
| 锚碇 | 塔柱 | 0.60 | 1.00 |
| | 下横梁 | 0.15 | — |
| | 上/中横梁 | 0.05 | — |
| 下部结构 | 锚碇 | 0.200 | 0.204 |
| | 锚室 | 0.10 | — |
| | 锚碇体 | 0.30 | 0.80 |
| | 锚固系统 | 0.60 | 0.20 |
| | 支座 | 0.14 | 0.11 |
| 附属设施 | 基础 | 0.74 | 0.67 |
| | 河床 | 0.12 | 0.22 |
| | 桥面铺装 | 0.20 | 0.44 |
| 附属设施 | 伸缩缝装置 | 0.18 | 0.28 |
| | 限位装置 | 0.17 | — |
| | 桥面设施 | 0.18 | 0.28 |
| | 机电设施 | 0.19 | — |
| | 检修设施 | 0.08 | — |

注:表中“—”表示现行规范缺少该项指标类别.

对表 1 进行分析, 可以发现:

1) 本文在规范的基础上, 结合大跨悬索桥的结构特点并考虑可融合的长期监测指标, 增加了部分评估指标, 例如索股索力、检修设施等.

2) 规范中规定的主缆系统、吊索系统、锚碇和下部结构的权重与本文提出的权重值几乎一致.

3) 索塔是悬索桥的主要受力构件之一, 规范中

的索塔权重仅为 0.081,与索塔的重要性地位相比,这一权重值似偏小.规范中附属设施的权重值达到了 0.204,但是附属设施并非悬索桥主要受力构件,规范中给出的权重值与其重要性似不相符.因此可认为,相对于规范而言,本文提出的索塔和附属设施权重似更趋合理.

通过规范权重和本文计算权重的对比可知,两者间差异性最大的是索塔和附属设施对应的权重值.在实际应用中,经常出现桥梁状态尚佳但状态评分值却较低的现象,主要是因为附属设施具有易损性,且规范中附属设施权重值偏大,导致桥梁总体技术状况评分值较低.

4 结 论

1)根据韦伯-费希纳定律,提出了 $10^{\frac{0}{8.384}} \sim 10^{\frac{8}{8.384}}$ 五级指数标度方法用于计算悬索桥评估指标权重.

2)综合考虑优化效果和专家原始判断信息的保留程度,采用遗传算法对专家判断矩阵的一致性进行优化,优化后的专家判断矩阵一致性有明显提高.

3)对专家反馈意见进行 PSO-K-MEANS 聚类分析后,采用对等共识模型计算专家权重.在计算专家权重的同时能够对专家判断矩阵进行修正,专家意见能够达到满意的一致性程度.

4)用实例论证了本文的群组 AHP 方法的可行性和实用性.通过对全国范围内 45 位专家的调研,计算得到悬索桥各层次评估指标的权重.

5)与规范权重的对比发现,本文在索塔和附属设施的权重取值上更趋合理.论文研究的结论可供相关规范的修编参考.

参考文献

- [1] HUANG Q, REN Y, LIN Y Z. Application of uncertain type of AHP to condition assessment of cable-stayed bridges[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2007, 23(4): 599-603.
- [2] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 大跨度钢斜拉桥主梁监测挠度的评估与预警[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(9): 98-104.
LIU X L, HUANG Q, REN Y, *et al.* Assessment and early warning on the monitoring girder deflection of the long-span steel cable-stayed bridge[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(9): 98-104. (In Chinese)
- [3] SAATY T L, KEARNS K P. Analytical planning: the organization of system[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014: 3-12.
- [4] 陈娜, 向辉, 叶强, 等. 基于层次分析法的弹性城市评价体系研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 146-150.
CHEN N, XIANG H, YE Q, *et al.* An AHP-based approach

- evaluation index system of resilience city[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 146-150. (In Chinese)
- [5] 黄侨, 任远, 林子阳. 大跨径桥梁综合评估中的不确定型层次分析法[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 79-83.
HUANG Q, REN Y, LIN Y Z. Uncertain type of AHP method in comprehensive assessment of long span bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 79-83. (In Chinese)
- [6] REN Y, TANG H H, HUANG Q. Research on fuzzy comprehensive evaluation of cable-stayed bridges[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 361: 1119-1123.
- [7] SAATY T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation[M]. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1980: 12-20.
- [8] BAI H B, WANG N C. Research on the selection of scale in AHP [C]//Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on. Washington DC: IEEE, 2010, 6: 108-111.
- [9] 吕跃进, 陈万翠, 钟磊. 层次分析法标度研究的若干问题[J]. 琼州学院学报, 2013, 20(5): 1-6.
LV Y J, CHEN W C, ZHONG L. Research on some problems of the scale of analytic hierarchy process[J]. Journal of Qiongzhou University, 2013, 20(5): 1-6. (In Chinese)
- [10] SAATY T L, VARGAS L G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012: 14-18.
- [11] MILLER G A. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information[J]. Psychological Review, 1956, 63(2): 81-97.
- [12] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1986: 25-40.
XU S B. AHP principle[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1986: 25-40. (In Chinese)
- [13] KAMEL N, OUCHEN I, BAALI K. A sampling-pso-k-means algorithm for document clustering[M]. New York: Springer International Publishing, 2014: 45-54.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Neural Networks, Proceedings IEEE International Conference on. Washington DC: IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [15] BLAGOJEVIC B, SRDJEVIC B, SRDJEVIC Z, *et al.* Heuristic aggregation of individual judgments in AHP group decision making using simulated annealing algorithm[J]. Information Sciences, 2015, 330: 260-273.
- [16] 刘彦平, 王恩茂, 杨建红. 基于 AHP 的工程项目管理群决策方法[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2015, 24(1): 80-84.
LIU Y P, WANG E M, YANG J H. Group decision-making method of engineering project management based on AHP[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Science Edition), 2015, 24(1): 80-84. (In Chinese)
- [17] 李琳, 刘雅奇, 李双刚. 一种群决策专家客观权重确定的改进方法[J]. 运筹与管理, 2011, 20(4): 77-81.
LI L, LIU Y Q, LI S G. New method for determining the object weight of decision makers in group decision based on judgment matrix and cluster analysis[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(4): 77-81. (In Chinese)
- [18] DONG Q, COOPER O. A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 250(2): 521-530.