

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.058

基于不确定性推理的大跨度斜拉桥综合评估研究

付勇高

(无锡市市政设施建设工程有限公司, 无锡 江苏 214010)

摘要: 随着国内桥梁建造水平的飞速提升,大跨度桥梁技术状态评估越来越受到重视的同时,仍存在较多问题和不足。以某斜拉桥为研究背景,采用不确定性推理中的多级模糊综合方法和D-S证据理论,对钢箱梁斜拉桥开展状态评估,并与直接加权平均方法的结果进行比较。研究表明:不确定性推理方法可以较好地应用于大跨度斜拉桥的技术状态评估;D-S证据理论方法能体现子指标之间的差异性,有利于做出更加合理的养护决策。

关键词: 斜拉桥;状态评估;模糊综合评估;D-S证据理论;不确定性推理

中图分类号: U447

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)06-0222-04

0 引言

近年来,斜拉桥以其自身在刚度、抗风性能、拉索可更换、施工简便等优点在大批大跨径桥梁项目中得到了广泛的应用。但超大跨径桥梁工程建设管理本身存在的大量不确定因素,往往给斜拉桥的运营带来巨大风险。桥梁状态评估通过现有成熟可靠的检查和检测方法,采用相关理论对获得的信息综合分析,最终对桥梁的安全性、耐久性和适用性作出合理的评估。

目前,有关大型桥梁技术状态的综合评估的研究主要围绕层次分析法展开,即将影响因素层次化,形成一个多层次的、每层包含多个指标的体系,先确定底层各指标的状态,再应用综合评估的计算方法计算出其他指标的状态。王永平等^[1]采用多层次模型评价方法进行桥梁评估,建立了桥梁评估专家系统的基本框架。刘小玲^[2]结合多源信息融合技术进行了状态评估的应用研究。王维康^[3]引入了不确定方法中的模糊理论加以改进。

不确定性推理,指建立在不确定性知识和证据的基础上的推理。它实际上是一种从不确定的初始证据出发,通过运用不确定性知识,最终推出既保持一定程度的不确定性,又是合理和基本合理的结论的推理过程^[4]。其中,模糊综合评估方法它应用模糊关系合成的原理,将一些边界不清,不易量化的因素量化,对实际问题进行综合评估。D-S证据理论是不

确定推理的典型方法,可体现评定思维的模糊性,类比人的推理过程。两者都较好的解决了事物的模糊性和算法的确定性这一矛盾,能很好的反应客观事物的本质。

传统的桥梁评估中,直接将子指标得分加权平均,得到其上层指标的分值,进一步根据分值区间划分桥梁所处的状态等级。这种方法在多个指标得分相差较大时,将掩盖子指标间的差异性,降低评估结果的可信度。因此,本文依据某斜拉桥的特点和养护实际需要,结合该桥人工巡检的年检报告和长期监测所得的检测数据,采用模糊综合评价理论和D-S证据理论,构建桥梁技术状况评估体系。

1 工程概况

本文主要对某斜拉桥的钢箱梁主桥进行评估。主桥结构型式为主跨510m的双塔双索面斜拉桥,其跨径布置为50m+215m+510m+215m+50m=1040m,主桥立面图如图1所示。

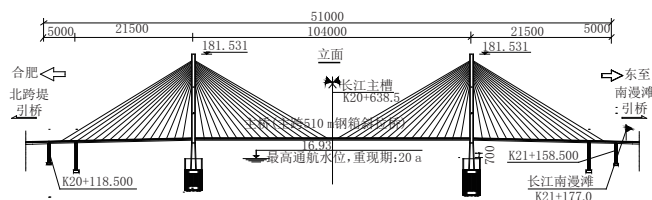


图1 斜拉桥主桥立面示意图(单位:mm)

主梁采用扁平流线形钢箱梁,主桥钢箱梁标准横断面主要轮廓尺寸为含风嘴顶板宽30.0m,底板宽为(5.6+18.8+5.6)m,中心线处高度3.0m,其上翼缘为正交异性板结构。根据受力需要,箱梁顶、底板在顺桥向不同区段采用不同的钢板厚度,并用U型加劲肋加劲。腹板设置两道平板加劲肋。箱梁沿桥纵向横

收稿日期: 2022-06-20

作者简介: 付勇高(1979—),男,学士,工程师,从事桥梁养护与维修加固工作。

隔板间距 4.0 m, 横向设置两道纵隔板, 除竖向支撑区、压重区及索塔区采用实体式纵隔板外, 余均为桁架式纵隔板。

2 多级模糊综合评估方法

2.1 评估等级隶属度函数

为反映指标评定结果的模糊和不完全性, 首先需将指标通过隶属度函数模糊化, 转化为面向不同评估等级的隶属度。隶属度的思想是模糊数学的基本思想, 应用模糊数学方法的关键在于建立符合实际的隶属函数。参考相关文献, 以往学者多采用梯形来作为桥梁指标得分的隶属度函数, 但实际上, 隶属度变化满足非线性的特点, 本文选用岭形分布函数作为隶属度函数。假定某个指标得分为 x , 其对应等级的隶属度向量为 $\mu=(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5)$ 。计算公式如下:

$$\mu_1 = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{7.5}(x-93.8)\right] & 90 \leq x < 97.5 \\ 1 & 97.5 \leq x < 100 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-80)\right] & 75 \leq x < 85 \\ 1 & 85 \leq x < 90 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-80)\right] & 90 \leq x < 97.5 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3 = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-60)\right] & 55 \leq x < 65 \\ 1 & 65 \leq x < 75 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-60)\right] & 75 \leq x < 85 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-40)\right] & 35 \leq x < 45 \\ 1 & 45 \leq x < 55 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-40)\right] & 55 \leq x < 65 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_5 = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 35 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{10}(x-40)\right] & 35 \leq x < 45 \end{cases} \quad (5)$$

评估等级隶属度函数图形绘制如图 2 所示。

2.2 模糊模式识别步骤

得到每个指标的等级隶属度函数后, 可采用多级模糊综合评判方法进行推理评定, 得到上层指标隶属度, 进一步推得全桥隶属等级情况。对于一个复杂的大跨径斜拉桥系统来说, 其评价因素往往是多方面的, 且不同因素之间存在着不同的层次。此时,

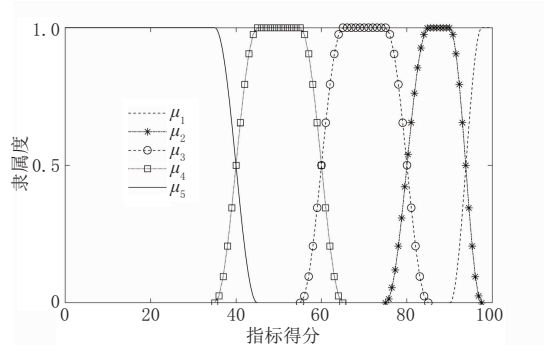


图 2 指标得分的隶属度函数

就要将评价因素集按照某种属性分为几类, 先对每一类进行综合评判, 再对每类的评判结果进行类之间的高层次综合评判, 即为多级模糊综合评判方法。具体评价分为以下四个步骤:

(1) 确定评价指标体系的因素集。根据之前的层次分析模型将每层指标分类划分成不同的因素集 $U=\{\mu_1, \mu_2, \dots, u_n\}$;

(2) 确定评价指标体系的评判集合。对于桥梁状态等级, $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 其中 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 分别表示一级、二级、三级、四级、五级;

(3) 单因素评判。通过隶属度函数对每个指标评分进行模糊化, 即可诱导出模糊关系矩阵;

(4) 模糊综合评价。确定指标权重 $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 即可计算模糊合成值 $B=\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ 。

3 D-S 证据推理评定

证据理论提供了一种不确定信息的推理方法, 但其融合规则在遇到高度冲突证据时, 存在一些不足。为此, 研究将不确定度分配作为另一种权重的表现形式, 同时引入不确定度的概率分配指派, 在斜拉桥的状态评估中应用 D-S 证据推理。具体公式如下:

$$m_i(\Theta) = (\alpha - \beta) \frac{\mu_{\max} - \mu_i}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} + \beta \quad (6)$$

式中: α, β 为不确定概率指派常数, 取 $\alpha=0.3, \beta=0.1$; μ_i 为该组证据中的第 i 项所对应的权重; μ_{\max}, μ_{\min} 为该组证据中所对应的权重的最大值和最小值。

有了 $m_i(\Theta)$ 的概率指派后, 可对隶属度函数进行相应改变, 得到重新分布于 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_\Theta\}$ 的隶属度向量, 相应的函数图如图 3 所示。

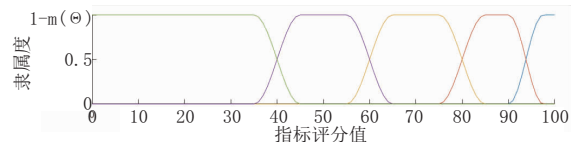


图 3 重分配后的指标得分的隶属度函数

当某一层每个指标的隶属度向量确定后, 可利用证据理论合成规则得到其上一层指标的等级隶属

度向量;重复进行,即可完成斜拉桥的综合状态评估。

4 评估方法对比分析

4.1 子指标差异性情况

传统意义上的大跨度斜拉桥构件状况评估一般采用加权平均方法,按照下式计算:

$$PMCI_i = 100 - \sum_{x=1}^k U_x \quad (7)$$

当 $x = 1$ 时, $U_1 = DP_{i1}$

当 $x \geq 2$ 时,

$$U_x = \frac{DP_{ix}}{100\sqrt{x}} \left(100 - \sum_{y=1}^{x-1} U_y \right) \quad (8)$$

式中: $PMCI_i$ 是上部构件第 i 类部件 1 构件的得分; k 为第 i 类部件 1 构件出现扣分的指标的种类数; U_x 、 y 为引入的变量; i 为部件类别, 如表示上部承重构件、支座等; j 为第 i 类部件 1 构件的第 j 类检测指标; DP_{ij} 为第 i 类部件 1 构件的第 j 类检测指标的扣分值。得到构件分值后,按照式(9)计算可得桥梁部件的技术状况评分。

$$PCCI_i = \overline{PMCI} - (100 - \overline{PMCI}_{min})/t \quad (9)$$

式中: $PCCI_i$ 为上部结构第 i 类部件的得分, \overline{PMCI} 为上部结构第 i 类部件个构件的得分平均值。 \overline{PMCI}_{min} 为上部结构第 i 类部件中得分值最低的构件得分值。计算得各部件得分后,再通过式(10)加权求和的方式得到上部构件得分值。

$$SPCI = \sum_{i=1}^m PCCI_i \times W_i \quad (10)$$

采用同样的方法可得到下部构件和桥面系的得分值,根据式(11)桥梁总体技术状况得分直接加权即可求得最终分值。

$$D_r = BDCI \times W_D + SPCI \times W_{sp} + SBCI \times W_{SB} \quad (11)$$

传统加权平均法下“斜拉索系统”、“钢箱梁”、“索塔”、“下部结构”、“附属设施”和“总体状况”的得分结果依次为:86.5、83.46、89.0、97.65、95.33、89.16分。

《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)与《大跨径悬索桥和斜拉桥养护规范》(DB 32/T 1648—2010)下实桥各部件表观病害的评估结果具体分值见表 1。

多级模糊综合评价(fuzzy)和 D-S 证据推理方法

表 1 国标与地标体系评估结果

表观病害部位	《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)得分	《大跨径悬索桥和斜拉桥养护规范》(DB 32/T 1648—2010)得分
斜拉索系统	80.8	90.7
钢箱梁	64.3	48.24
索塔	78.8	75.84
支座	72.7	61
排水设施	72.5	84

(ds)的可信度柱状图分布如图 4 所示。对比加权平均方法与两种综合评估方法的结果,可以看出:加权平均方法在子指标得分相近的情况下(如对斜拉索系统的评估),评估结果与两种综合评估方法的结果基本一致。但当子指标差异性较大时,两种综合评估方法都展现出较分散的可信度。

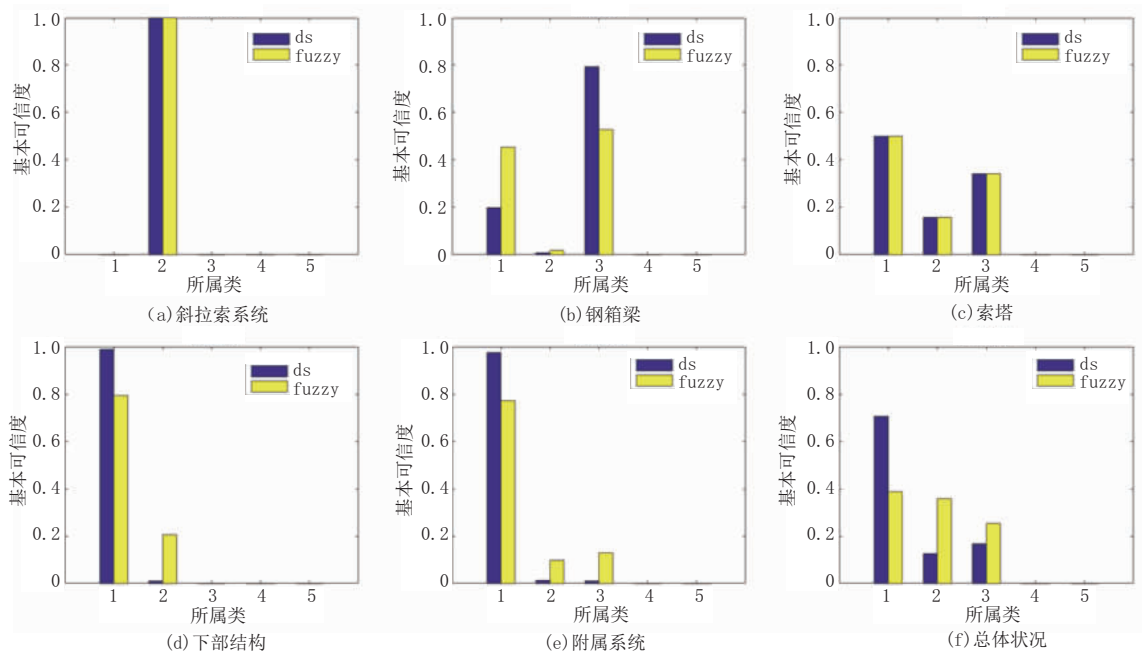


图 4 两种评估方法的结果对比

加权平均方法仅是对数值的平均,掩盖了子指标之间的差异性。例如,钢箱梁的评估中,加权平均定其状态等级为2类;但实综合评估方法表明,子指标主要分布于1类和3类状态下。直接加权平均方法容易造成对较差子指标状况的忽视。

多级模糊综合评价方法和D-S证据推理评定方法对桥梁各部件及全桥整体综合状态评估分布基本相近。两种评估方法下,全桥最终评估结果的可信度分散且数值较低。因此,养护单位需要及时关注子部件的情况。

4.2 全桥状态可信度

从二级指标推理到全桥最终状态连续推理的过程,可直接对加权平均得到的一级指标进行得到分信息的融合,从而得到全桥状态等级可信度分布,具体如图5所示。

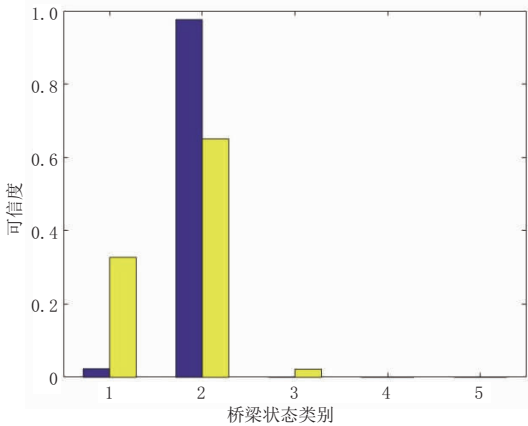


图5 一级指标加权数据融合的全桥等级可信度分布

全桥状态的可信度分布主要集中在二类,其中D-S证据理论更加明显。实际年检报告中评定此桥梁状态为二类。可见D-S证据理论方法比模糊证据理论更为接近实际情况。

进一步地,直接从加权数据推得的全桥状态丢失了桥梁可能处于三类状态的信息;而从二级指标逐层推理得到的全桥结果,更能保留更多有效信息,并在可信度分散的情况下有针对性的逐层向下找到评级较低子指标,这更加体现出传统加权方法的不足。

5 结论

本文为解决传统加权平均方法掩盖子指标差异性的缺陷,引入模糊综合评判方法,利用新的模糊合成算子,将主因素突出和加权平均两种模型的合成算子进行结合;引入D-S证据理论方法,将不确定度分配作为另一种权重的表现形式,得到不确定度的概率分配指派,从而计算时减小不同证据之间的冲突情况。可以得出以下结论:

- (1)D-S证据推理评定方法更能体现子指标之间的差异性,保留更多准确的评估信息。
- (2)多级模糊综合评价方法和D-S证据推理评定方法对桥梁各部件及全桥综合状态评估结果相接近。
- (3)当子部件安全状态可信度分散时,管理人员应及时检查子指标的实际状况。

参考文献:

[1] 王永平,张宝银,张树仁. 桥梁使用性能模糊评估专家系统[J]. 中国公路学报,1996(2):62-67.

[2] 刘小玲.多源信息融合技术在钢结构斜拉桥状态评估中的应用研究[D].南京:东南大学,2017.

[3] 王维康. 基于层次分析法和模糊理论的矮塔斜拉桥状态综合评估[D].西安:长安大学,2014.

[4] 张婷,翟明玉,张海滨,等. 基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识[J].电力系统自动化,2014(6):49-54.

(上接第175页)

[3] 洪开荣.盾构隧道穿越广州火车站站场的设计与施工[J].现代隧道技术,2002,39(6):34-37.

[4] 陶勇虎,饶军应,熊鹏,等.地铁暗挖隧道下穿既有火车站站场施工方案安全性评估[J].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(4):74-82.

[5] 徐干成,李成学,王后裕,等.地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J].岩土力学,2009,30(增2):269-273.

[6] 王效文.盾构隧道下穿火车站站场保护方案的探讨[J].现代交通技

术,2009(6):72-74.

[7] 蒋红光.高速铁路板式轨道结构-路基动力相互作用及累积沉降研究[D].杭州:浙江大学,2014.

[8] 张强.开挖卸荷下既有地铁隧道的竖向变形及其控制研究[D].北京:北京交通大学,2012.

[9] 郑钦文.浅埋暗挖黄土隧道下穿火车站场区变形控制技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.