

基于 BIM 的多塔斜拉桥评估系统研究

许玉和¹, 刘晓剑¹, 黄正荣², 汪涛^{3,4}

[1.中国铁建投资集团有限公司,北京市 519015; 2.中铁建苏州设计研究院有限公司,江苏 苏州 215007; 3.东南大学,江苏 南京 211189; 4.道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学),江苏 南京 211189]

摘要: 基于王家河特大桥多塔斜拉桥,建立了桥梁 BIM 模型,通过轻量化和网页化形成了在线评估平台。基于江苏省地方标准《大跨径悬索桥和斜拉桥养护和评估规范》开发了多塔斜拉桥的评估系统,通过层次分析法确立了桥梁的评估指标。基于斜拉桥的健康监测数据,对索力等序列指标进行时间序列分析,提取了指标的趋势变化,并通过监测数据验证了预测方法的准确性,根据其趋势变化及上下限值对序列指标进行评估。通过 BIM 平台与评估体系的融合,为大跨度多塔斜拉桥服役性能评估提供了技术支撑。

关键词: BIM;多塔斜拉桥;桥梁评估;趋势预测

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)06-0147-04

0 引言

随着城市的发展和交通量的增加,我国的大跨径桥梁越来越多。大跨度斜拉桥的服役性能一直是国内外研究的重点问题。桥梁在长时间的运营中会不可避免地老化,对于斜拉桥而言,则具体体现在缆索的锚固、松弛、老化、腐蚀等方面的问题上。因此,为了找出并解决这些问题,从经济因素和时间管理上,基于桥梁的长期使用,健康监测技术便是必不可少的。而长期以来,受技术及经济等多方面制约,多数桥梁以人工检测为主。从长期人工检测结果、检测精度与检测频率限制来看,现有结构监测频率维持在以月、年为单位,数量不足以支撑健康监测系统的评估功能。

随之而来的则是以大桥与特大桥为对象的桥梁健康监测系统(Bridge Health Monitoring System),这种由现代传感器、通讯技术、环境监测、信息处理、综合报警等子功能系统组成的综合监测系统,能够实现对桥梁长期实时的数据监控,极大弥补了人工监测的缺点。在上世纪八十年代,欧美地区在此方面做出相关成果,通过在大跨径桥梁上安装健康监测系统来进行评估。我国在这方面的研究起步较晚,但是发展迅速^[1,2]。与此同时,长期监控带来了新问题,大量数据流引发的信息爆炸,使得数学模型的建立变得困难,为了应对这种局面,信息融合技术便显得

尤为重要,通过对数据自身的相互比对、与人工的相互比对、不同时期的数据比对、数学模型的验证等手段来提炼大量信息中的有用数据。为了得到统一、准确的监测结果,在明确桥梁规范的前提下,需要借助计算机技术对数据进行分析、综合、支配,得到一份可靠性较高的评估数据,因此在处理的过程中,对数据进行处理算法、比对、评估方案的重要性便尤为突出^[3]。

对于斜拉桥而言,拉索为关键构件,兰海等^[4]以索力变化达到某一固定百分比的状态来评定拉索的性能,并通过适度指标模型曲线插值分析计算。伍华成等^[5]根据变权综合原理提出了大跨度斜拉桥安全性评估方法,研究表明常规状态下的变权综合模式在影响因素众多时,即使个别索力出现严重问题,最终评价结果也不会出现太大变化。随着信息化的发展,BIM 技术被越来越多的用到结构的设计、施工、管养等方面。齐成龙等^[6]采用 BIM 平台对铁路混合梁斜拉桥的设计方法进行了探究,与传统的二维设计方法相比,具有较大的优势。胡娟等^[7]通过 Bentley 平台对桥梁的参数化建模以及箱梁施工的线性控制方法进行了研究,并进行了二次开发。

本文以王家河多塔斜拉桥为工程背景,基于 BIM 平台探讨斜拉桥的评估方法和体系,构建基于多源数据的斜拉桥评估平台,为桥梁的管理养护提供依据。

1 工程背景

王家河特大桥为一座特大型桥梁,位于铜川市王益区王家河乡王家河新村北。桥位及桥面标高受路线

收稿日期: 2022-09-27

作者简介: 许玉和(1983—),男,学士,副总经理,高级工程师,从事工程投资与管理工作。

控制,最大桥高 165 m 左右,跨径布置见图 1,全长 2 014.829 m,包括王家河特大桥主、引桥。本工程设计时速 100 km/h,双向 4 车道,主桥按整体式断面设置,桥面全宽 29.5 m。

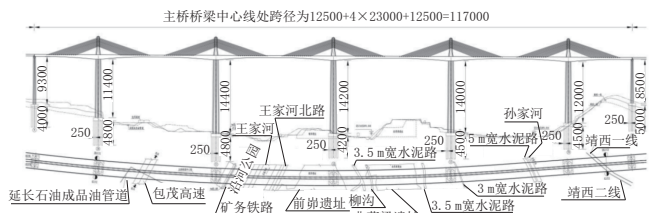


图 1 多塔斜拉桥立面示意图(单位:cm)

主塔与主梁为固结,桥面以上塔高 36 m。塔柱采用实体截面,纵桥向塔柱桥面以上 12 m 范围内为渐变段,宽度由 6 m 直线变化至 9 m,斜率为 1:8,上塔柱为等截面,宽度为 6 m。横桥向尺寸为 3.5 m。从美观上考虑,主塔四个角设置 120 cm×40 cm 倒角,横桥向设 20 cm 深凹槽。

斜拉索性质为中央双索面, 双排布置在主梁的中央分隔带处。塔根两侧无索区长度为 90 m, 中跨无索区长度为 28 m, 边跨无索区长 23.68 m, 梁上索距 4.0 m, 塔上索距 1.2 m。每个索塔设有 2×15 对 30 根斜拉索, 全桥共 150 根斜拉索。斜拉索采用单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线, 单股钢绞线直径 15.2 mm, 标准强度 1 860 MPa, 每根斜拉索规格为 43- ϕ_s 15.2, 采用拉索群锚锚固体系。

2 BIM 模型系统平台

传统的桥梁管养理念，即利用桥梁自身的健康养护数据进行养护需求性分析、桥梁健康状态评价和结构性能老化程度的判别，进而有针对性地制定具体的养护计划。但该方法对于大跨径的桥梁来说存在较大局限性，特大型多塔斜拉桥需要采用常规养护措施与健康监测系统相结合的方法，及时地对目标桥梁进行监测、养护与维修。

因此,以 Autodesk Revit 软件平台中的三维信息化模型为依托,利用 HTML5、CSS3 和 JavaScript 技术搭建网页框架,开发实现轻量化 BIM 模型的网页端可视化交互与管理。王家河特大桥管养系统平台主要分为三大功能模块:查看轻量化模型、在线管养系统和监测评估系统。

其中,查看轻量化模型模块(见图 2),是指 BIM 模型在网页端轻量化后可以实现:动态观察、平移、缩放、第一视角、相机交互(布满视图与滚动)、截面分析(X、Y、Z 三轴截面与框截面)、特性、设置和全屏

显示。



图 2 多塔斜拉桥 BIM 模型

在线管养系统模块分为数据层、模型层、公功能层三个子模块,便于管理人员高效地开展日常管养工作,并提供将 BIM 模型和管养数据导入本地数据库的功能。

监测评估系统模块,基于索力的恒载特征值对索力进行评估,根据 SHM 索力时程中每个索力数据点索力数值获取其对应实时评分,用以及时感知多塔斜拉桥结构体系的突发情况。

3 斜拉桥评估体系

3.1 评估标准

目前,国内对大跨径斜拉桥桥梁技术状态的评估规范广泛应用的主要有《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)(下称“国标”),这两部规范涵盖了所有桥型的状态评估。但针对大跨度斜拉桥而言,该规范指标并不完全适用,且健康监测与养护系统间的融合度明显不足。江苏省推行了一套地方标准,《大跨径悬索桥和斜拉桥养护规范》(DB 32/T 1648—2010)(下称“地标”),作为该省推荐性的标准辅助评定方法。该地方标准同样采用层次分析法,其桥梁技术状态分析模型分为三层,即部位层、构件层及损伤层,见图3。部位层和构件层的评定结果用0~100分表示,损伤层的评定结果用0~5分表示

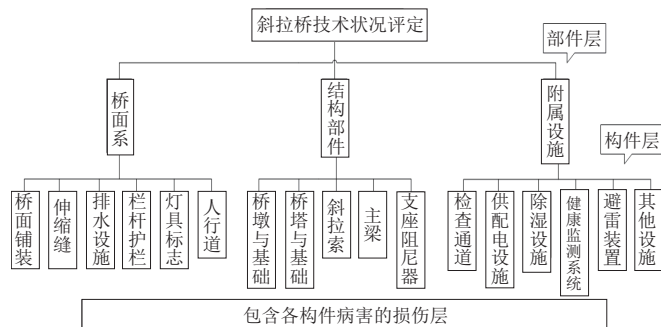


图3 斜拉桥综合技术状况评定的层次分析模型

综合技术状况评定的计算过程与“国标”相仿，都是自下而上的逐层计算。首先是对于损伤层各元素可根据“地标”中的病害状况表直接查询每一单项的得分，其结果采用 0~5 分制表示。与国标不同的是，除新增部分斜拉桥特有的定性指标外，“地标”中还包括了通过监测数据得到的定量指标。通过判断

监测数据所处的范围区间来确定监测指标得分。

通过对构件病害得分后,即可对构件层的各构件得分进行计算。对于综合技术状况评定,各构件的技术状况得分 D_{ij} 的计算公式为:

$$D_{ij} = 100 \times (1 - \sum_{k=1}^n R_{ij,k} W_{ij,k} / 5)$$
 (1)

式中: $R_{ij,k}$ 为各病害项的标度(0~5); $W_{ij,k}$ 为构件 ij 的第 k 项的损伤项的权重, $W_{ij,k} = (3.0 \mu_{ij,k}^3 - 5.5 \mu_{ij,k}^2 + 3.5 \mu_{ij,k}) \beta_{ij,k}$; $\mu_{ij,k}$ 表示构件 ij 的第 k 项损伤扣分与比重的积与该构件各损伤项扣分与对应比重之积的总和的比值, $\mu_{ij,k} = \beta_{ij,k} R_{ij,k} / \sum_{k=1}^n \beta_{ij,k} R_{ij,k}$,而 $\beta_{ij,k}$ 为构件 ij 的第 k 项损伤的评定比重。

部位层各项得分与构件层得分的计算方法不同,它采用了加权综合法,评定结果根据下式计算:

$$D_j = \sum_{i=1}^n D_{ij} W_{ij}$$
 (2)

当计算完成桥面系,结构部件和管养系统的综合技术状况的分数后,采用加权综合法计算全桥综合技术状况得分 D ,计算公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i W_i$$
 (3)

3.2 评估平台开发

根据“地标”的评定流程,借助 Matlab 程序针对“地标”编制桥梁状态分值的自动评估 GUI 程序,并进行封装,通过混合编程实现在 BIM 平台的直接调用,对桥梁状态进行评估,界面见图 4。根据桥梁养护报告中具体病害情况与界面中的选项一一对应,并按照评定流程自动打分。界面布局简单明了,操作简便,主要包括以下功能:(1)养护巡检数据的录入功能;(2)规范评定方法的打分功能;(3)数据的自动报表生成功能。针对“地标”评价标准,直接在输入构件病害状况时,将根据不同构件病害程度直接对应病害的扣分标度,用户可根据实际病害情况直接在下拉菜单中进行选择。这种方式使界面可以包含更多的评定标准信息,更加便于不熟悉江苏省地方标准的用户操作使用,图 5 为桥面铺装病害评定的界面。

3.3 基于监测数据的状态评估

斜拉索是斜拉桥最重要的构件之一,而索力是评价斜拉索以及大桥状态的重要参数,是必须监测的内容,同时斜拉索风致振动监测也是非常重要的。系统采用加速度传感器连续监测部分索的索力。使用振动法将测得的加速度值计算出频谱能够较准确



图 4 评估系统界面



图 5 桥面铺装病害评定

地测量出斜拉索索力,从而达到实时掌握斜拉索的拉力情况,为评估各构件的工作状况提供依据的目的。

为充分利用监测数据进行状态评估,可以通过建立索力预测模型提取健康监测数据中的趋势项,一方面得到结构真实的退化趋势,可对索力未来发展情况进行预测,另一方面可通过序列指标变化阈值得到单个测点的评价值,进而通过变权分析融合多个测点的评价值得到索力的得分评价值。索力随时间的变化关系主要受到以下几方面因素的影响:(1)季节性荷载,如温度荷载、风荷载等,此因素引起的变化年复一年的重复同一规律变化,具有很强的季节性;(2)车辆荷载,其产生的主要为高频成分;(3)趋势变化,结构在长期使用过程中不可避免的发生的趋势退化。同时交通量的变化也会给结构趋势带来影响。综合以上几种因素,可以认为索力是一个有趋势的季节性变化时间序列,本文采用 Holt-Winters 三次指数平滑法进行预测,从而对索力状态进行合理评估和预测,见图 6、图 7。

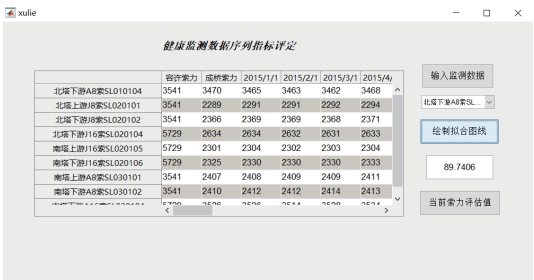


图 6 斜拉索状态评估

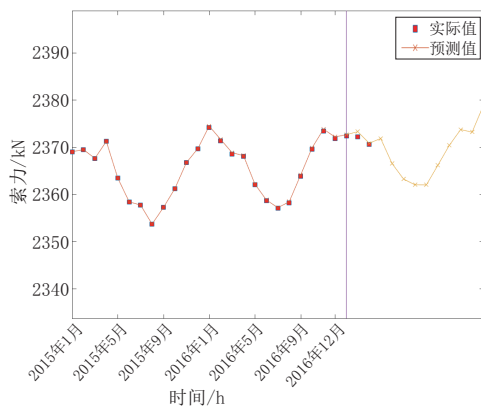


图 7 索力状态预测

如图 7 所示,本文方法基本可实现对索力变化发展规律的预测,也就能够较准确的得到索力的变化趋势,并进一步根据索力变化趋势预测发展年限对索力状态进行打分。本文所采用的时间序列分析方法可根据序列长度的增加不断动态修正计算模型,该索力的发展变化趋势可由新的数据引入而不断更新,最终归纳得到完整的变化规律。

4 结 语

本文结合王家河特大桥工程实例,基于 BIM 平台对多塔斜拉桥的评估系统进行了研究,并研发了一套评估体系,研究结论如下:

(1)针对大跨径斜拉桥的特点,结合 BIM 平台和地方标准,可以建立在线评估系统,为桥梁长期服役性能评估提供支撑。

(2)针对监测数据,引入统计学中指数平滑、非参数性检验等方法,可以对索力等关键参数进行数据趋势变化,结合测点的上下限值结合趋势变化进行打分,并利用变权分析方法得到群测点的整体评估分值。

参考文献:

- [1] 杨小森,闫维明,陈彦江,等.面向养护策略的大跨度斜拉桥技术状态评估方法研究[J].公路,2010(8):214-216.
- [2] 宋晓东,崔珊珊,熊文,等.基于健康监测的斜拉桥恒载索力提取与评估[J].东南大学学报:自然科学版,2020,50(6):1102-1108.
- [3] 涂雪,熊文,肖汝诚,等.基于统计理论的桥梁应力趋势预测与评估方法[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(4):105-110.
- [4] 兰海,史家钧.灰色关联分析与变权综合法在桥梁评估中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2001(1):50-54.
- [5] 伍华成,项贻强.基于变权综合原理的斜拉桥索力、线形状态评估[J].中国铁道科学,2006(6):42-48.
- [6] 齐成龙,贾留锁,王永.基于达索 3D 体验平台的铁路混合梁斜拉桥 BIM 设计[J].结构工程师,2017,33(1):1-7.
- [7] 胡娟,刘海龙,汪涛.基于 BIM 的短线预制箱梁桥设计与线形控制[J].广东建材,2021,37(3):42-45,68.

(上接第 78 页)

桥塔寓意临海腾飞,同时结构借鉴“四平八稳”、“四通八达”的“八”字笔画(见图 8)。



图 8 方案概念

桥塔结构稳定、有气势且线条极具现代感,表达了人们对临海经济腾飞的赞叹(见图 9)。



图 9 桥位效果示意

4 结 语

(1)本桥方案于 2018 年从众多方案中脱颖而出,得到当地政府认可,结构创新是其胜出的重要原因。

(2)目前伏龙大桥正在施工过程中,很多细节的创新设计即将在设计项目组的同心协力下成为现实。