

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201611103

大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展

黄 侨,任 远,许 翔,刘小玲

(东南大学 交通学院,南京 210096)

摘 要: 对大跨径缆索承重桥梁进行合理的状态评估有助于掌握桥梁结构的技术状况、指导制定养护对策,以保证桥梁的正常运营和结构安全. 首先综述了基于标准和规范的评估方法和基于系统工程理论的评估方法的研究现状及应用;其次对桥梁管理系统和长期监测系统的发展情况和评估数据信息源现状进行综述和分析;然后阐述了大跨径缆索承重桥梁状态评估面临的机遇和挑战,并提出了多源信息融合的功能模型和结构模型. 综合分析表明:大跨径缆索承重桥梁评估规范的制定迫在眉睫;人工巡检信息和长期监测信息都有其各自的弊端,都难以独立成为桥梁状态评估的理想数据来源,引入多源信息融合技术,有望提高大跨径缆索承重桥梁评估结论的可信度;对缆索承重桥梁群实现评估方法标准化是未来发展方向之一.

关键词: 状态评估; 缆索承重桥梁; 研究现状; 信息融合; 检查; 健康监测

中图分类号: U446.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)09-0001-09

Research progress of condition evaluation for large span cable supported bridges

HUANG Qiao, REN Yuan, XU Xiang, LIU Xiaoling

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

Abstract: Reasonable condition evaluation for large span cable supported bridges could reveal the actual condition of the bridges, make rational maintenance and repair strategy, and ensure the operational and structural safety. Firstly, the evaluation methods were reviewed based on the standards, specifications and system engineering, respectively. Secondly, the development of bridge management system and long monitoring system, and the status of evaluation information sources were analyzed and discussed. Finally, the chances and challenges were proposed faced by large span cable supported bridge condition evaluation, and the multi-source information fusion functional and structural models were presented. Reviews analysis shows that the evaluation standard for large span cable supported bridges is imminent. Visual inspection and long term monitoring, due to their disadvantages, cannot support bridge condition evaluation respectively. Information fusion induced to bridge condition evaluation is expected to increase the credibility of bridge condition evaluation results. Standardized evaluation method for cable supported bridge group is one of future development directions.

Keywords: condition evaluation; cable supported bridge; research status; information fusion; inspection; health monitoring

在众多的桥梁结构形式中,缆索承重桥梁以跨越能力大而著称,在200~2 000 m内缆索承重桥梁具有很强的竞争力,覆盖了此跨径范围中90%的桥梁^[1]. 世界跨径排名前10的斜拉桥中,中国占了6座,跨径前10的悬索桥中,中国占了4座,充分表明中国缆索承重桥梁建设水平已经进入世界前列. 尤其在长江中下游地区及近年来方兴未艾的跨海桥梁工程中,缆索承重桥梁已成为桥型方案的首选^[2]. 然而,由于结构体系的复杂性、材料自身的缺陷、有限元计算模型与实际结构的偏差、施工问题、环境腐

蚀、车辆超载及运营期养护管理不利等因素的影响,一些已建成的缆索承重桥梁出现了各种病害或损伤,导致其结构承载能力降低,桥梁线形变化过大和构件老化、破损等问题的出现^[3-6]. 这些病害或损伤会影响桥梁的使用性能,甚至会降低桥梁主体结构的安全储备. 对桥梁的技术状况进行定期的评估,可以及时了解桥梁的运营状态,为制定养护维修决策提供依据,减少不必要的损失^[7]. 为了确保大型桥梁结构的安全性、耐久性和适用性,对桥梁状态评估理论与方法进行深入研究是十分必要和紧迫的.

近年来,国内外在桥梁状态评估的研究中取得了一定的进展,但是每种评估理论都有其自身的局限性,各种方法得到的评估结果差异性较大. 此外,由于传统人工检查、检测部位的局限性和检查结果的主观性,仅凭人工检查的数据很难作为大跨径桥

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51208096);

江苏省交通运输科技项目重大科技专项(2014Y02);

江苏省交通运输科技项目(2012Y25)

作者简介: 黄 侨(1958—),男,教授,博士生导师

通信作者: 黄 侨, qhuanghit@126.com

梁状态评估的完整依据. 而结构健康监测系统 (structure health monitoring system, SHMS) 或长期监测系统的信息受到传感器寿命、系统稳定性等问题的制约^[8-9], 很难及时准确地反映出结构的异常或损伤^[10], 难以独立成为桥梁状态评估的理想数据来源.

本文对国内外大跨缆索承重桥梁的状态评估研究现状和进展进行综述, 介绍了桥梁状态评估方法、桥梁管理系统 (bridge management system, BMS) 和 SHMS 的研究及应用现状、评估数据信息来源以及桥梁评估面临的技术挑战, 提出了大跨缆索承重桥梁状态评估研究的发展方向, 可供同行交流和参考.

1 桥梁状态评估方法研究现状

桥梁状态评估是通过现有成熟可靠的检查和检测方法, 得到反映桥梁技术状态的各项检测指标, 在此基础上通过相关理论对获得的信息进行综合分析, 最终对桥梁的安全性、耐久性和适用性做出合理的评估^[11-12]. 既有的评估方法可分为两大类: 基于标准和规范的评估方法, 基于系统工程理论的评估方法.

1.1 基于标准和规范的评估方法

国内外相关规范或标准采用的桥梁评估方法可以划分为 3 类, 即综合技术状况评估方法^[13-18]、基于设计规范的评估方法^[19-20]和荷载试验评估方法^[19, 21].

1) 综合技术状况评估方法. 桥梁综合技术状况评估常采用的是分层加权综合的方法. 这类评估方法条理清晰, 计算方便, 应用范围广, 是一种典型的评估方法. 目前国内外采用该评估方法的规范或标准主要有: a) 《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)^[13], 简称“04 养护规范”. 该规范提供了两种方法对桥梁技术状况进行评估, 分别是考虑桥梁各部件权重的加权综合评定方法以及最差重要部件控制的评定方法. 加权综合评定法将桥梁分为 17 个部件, 分别对各部件进行评分, 然后进行加权综合, 其评分结果采用百分制表示. b) 《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[14], 简称“11 评定标准”. 该标准是对 04 养护规范中的桥梁评定内容的补充. 11 评定标准采用的是分层加权的评定方法, 全桥共分为 5 层, 分别为“全桥层→结构层→部件层→构件层→病害层”. 与 04 养护规范相比, 11 评定标准对桥梁结构形式、部件类型、评定指标和评定标准等进行了更为详细的规定, 评估方法更合理, 层次更清晰, 降低了人为主观因素对评定结果的影

响. c) 《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99—2003)^[15], 简称“03 城市养护规范”. 该规范主要适用于城市桥梁, 采用桥梁状况指数 (BCI) 作为综合技术状况的评估指标. 根据被检查部位的权重和评分值进行分项评估, 然后再进行加权综合. d) Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges (FHWA)^[17]. 美国联邦公路局规定的桥梁状态评估方法中要求首先对每个构件的状态进行评定, 分为“好、中、差”3 个状态等级, 然后由工程师根据构件的整体状况对组合部件 (桥面系、上部结构、下部结构等) 进行定性的评估, 分为 0~9 共 10 个等级, 0 表示结构失效, 9 表示结构处于非常完好状态. 此外, 该指南还规定了桥梁健全性评定 (sufficiency rating), 用来评估在役桥梁结构健全性的指标, 其评分范围在 0~100 之间, 0 分表示该桥梁缺损非常严重, 100 分则表示该桥梁完全健全. 健全性评估由结构充分性和安全性、服务和功能性、公共使用性和特殊扣分项等 4 个部分组成.

2) 基于设计规范的评估方法. 这一类方法主要根据现场检测的材料性能数据、实际结构尺寸、实际支承状况、外观缺损等级及通行荷载等, 按照结构的设计理论对桥梁承载能力进行评定. 美、英等国较早开始基于结构可靠性的桥梁评估研究, 并形成了一系列规范和文献. 近年来, 中国也在积极开展这方面的研究工作.

中国《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)^[19]中配筋混凝土桥梁以基于概率理论的极限状态设计方法为基础, 引入分项检算系数修正极限状态设计表达式, 对既有配筋混凝土桥梁承载能力进行评定. 美国主要采用《桥梁评定手册》^[20]作为桥梁检测与评估的主要依据. 美国桥梁的承载能力评估分为 3 个级别, 即设计荷载评估、法定荷载评估和允许荷载评估^[22]. 用评级系数 (rating factor) 表示桥梁承受荷载的能力. 美国桥梁的设计方法主要有 3 种, 分别为允许应力法、荷载系数法、荷载与抗力系数法. 荷载系数法的理论基础是基于经验的极限状态法, 而荷载抗力系数法的理论则是基于可靠度理论的极限状态法. 英国标准 BD 21/01 采用排序法对桥梁进行评估, 按照英国运输部 BS 5400、BD 15、BA 16、BA 55 标准所提供的计算方法, 考虑缺损状况, 对桥梁结构进行承载能力评估^[23]. 日本采用耐负荷性能评估方法, 即以桥梁的实际应力与设计应力比来判断桥梁的耐负荷性能^[24-25]. 通过连续 72 h 的测定, 将得到的最大应力度与设计应力度相比, 评估现有交通量下桥梁的耐负荷性能.

3) 基于荷载试验的评估方法. 通过静动力荷载试验测得的数据对桥梁进行诊断识别和模型修正, 根据修正后的有限元模型分析评定桥梁的实际承载能力. 利用现场测试获得的数据, 可以得到桥梁结构的部分确定信息, 将该信息应用于桥梁评估中, 降低评估结果的不确定性. 中国公路桥梁承载能力评估的荷载试验主要依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)^[19]和《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015)^[21], 它们基于试验数据对桥梁结构的工作状态进行分析, 进而评定桥梁的承载能力. 美国荷载试验包括诊断性荷载试验和验证性荷载试验^[20]. 诊断性试验是对检算法中相关参数的修正; 验证性试验则是直接评估法. 中美两国规程在加载车辆的轴重上存在一定差别, 美国的诊断性试验中试验效率可以取较低值.

1.2 基于系统工程理论的评估方法

除上述规范规定的评估方法外, 国内外学者积极引入系统工程理论, 形成了一系列桥梁结构的评估方法, 如模糊综合评估方法^[26-29]、变权综合评估方法^[26,30], 基于神经网络的评估方法^[27,31], 基于云理论的评估方法^[32-34]以及基于上述方法组合的评估方法等.

1) 模糊综合评估方法. Zadeh 在 1965 年发表的论文《Fuzzy Sets》, 标志着模糊数学的诞生^[35]. 模糊综合评定方法以模糊数学为理论基础, 将不确定信息量化, 构造评判结果矩阵, 得到评判对象隶属于各个等级的隶属度. 但是该方法中如何选择模糊运算法则、如何合理确定隶属函数等问题似没有得到根本的解决^[36].

2) 变权综合评估方法. 汪培庄在 1985 年首先提出了变权的思想, 强调指标权重应随指标状态值的变化而变化, 以弥补常权决策带来的偏差^[37]. 之后, 1995 年李洪兴给出了变权原理的公理化体系^[38]. 现在变权综合评估方法被广泛应用于桥梁评估、电网性能评估和地质评估等研究领域中^[31,34,39]. 但是该方法中没有对如何选取符合桥梁劣化规律的变权模式进行讨论, 目前尚无变权效果合适的变权模式.

3) 基于神经网络的评估方法. 神经网络通过模拟神经系统结构, 获得较好的学习和识别能力. 神经网络主要有以下几个优点: 首先是在样本足够的前提下, 能够处理任意复杂非线性系统; 其次是具有很强的鲁棒性, 少量神经元连接的损坏不会影响整个系统的功能; 再次是具有分布并行信息处理的功能^[40-42]. 但是神经网络算法需要大量样本, 若积累的桥梁资料不足, 评估结果的准确性是难以保证的.

4) 基于云理论的评估方法. 研究随机现象的主

要手段是概率理论, 概率论有坚实的理论基础, 能够很好地表示和处理随机不确定性. 模糊集合理论是处理模糊不确定性问题的主要工具, 在理论和应用中取得了诸多成就^[43]. 云理论是在以上两种理论进行交叉渗透的基础上, 通过特定的算法, 形成定性概念与其定量表示之间的转换模型, 并揭示随机性和模糊性的内在关系. 李德毅院士最早提出了云理论的概念^[44]. 目前, 基于云模型的评估方法已经应用于电力系统的评估研究当中, 但是在桥梁评估中的应用尚处于初步研究阶段.

此外, 专家系统^[45-48]、缺损状况指标法^[49-50]、灰色关联度评估法^[51-54]等在桥梁评估中也进行了广泛的研究.

1.3 基于长期监测数据的评估方法

基于长期监测数据的评估多进行单项评估, 且主要考虑安全性问题. 例如, 通过车辆荷载的统计以及主梁应力数据分析, 研究主梁最不利位置处的钢材疲劳寿命; 分析关键索力的疲劳寿命; 分析结构的频率及阻尼比的变化趋势, 探索其与温度、风速等环境因素的相关性等等^[55-58]. 目前, 通过长期监测数据实现损伤诊断仍是一个技术难题, 且单方面的监测评估也不能完全反映结构的综合性能.

2 评估数据信息源现状分析

大跨径缆索承重桥梁通常配备有养护管理系统和长期监测系统, 这两个系统为桥梁的状态评估提供了必要的人工检查信息和长期监测数据. 下面对这两类系统的发展情况和评估数据信息源现状进行综述和分析.

2.1 BMS 发展现状

1968 年美国联邦公路局开发出最早的桥梁管理系统. 经过半个世纪的发展和完善, BMS 已在世界范围内得到了广泛的应用, 系统中除了对桥梁基础数据和养管信息进行数据存储外^[59-60], 还增加了桥梁技术状况评价、中长期需求预测及费用分析、养护维修计划等功能, 系统的结构也日趋复杂. 国外较典型的桥梁养护管理系统有: 美国联邦公路管理局开发的 PONTIS 系统、联邦公路研究合作组织开发的 BRIDGIT 系统、丹麦公路 BMS、日本道路公用 BMS、法国的 SCANPRINT 系统等^[61-63]. 中国 BMS 的研究起步始于 80 年代中后期. 在吸收国外开发经验的基础上, 结合各省市的桥梁发展情况, 目前已开发的 BMS 软件系统有: 交通部公路研究所开发的“公路桥梁管理系统(CBMS)”、四川省桥梁养护数据库系统、广东省桥梁管理系统, 台湾地区公路局的桥梁管理系统等^[64-65].

2.2 SHMS 发展现状

SHMS 是一个复杂的系统工程,融合了现代测试分析、计算机、数学理论和通讯等领域的尖端技术. SHMS 的主体目标是通过测量反映桥梁环境激励和结构响应状态的某些信息,实时监测桥梁的工作性能和评估桥梁的工作状态,以保证桥梁的安全运营. 近些年,随着对桥梁安全性和耐久性认识的提高以及新型的检测手段、监测技术及信息传输手段的不断涌现,使得结构长期监测技术有了长足的发展. 自 90 年代以来,许多国家将 SHMS 安装在一些大型缆索承重桥梁和造型独特新颖的非传统结构的桥梁上^[66]. 中国桥梁 SHMS 的研究与应用始于 20 世纪 90 年代后期,与其他国家相比,中国 SHMS 具有数量多、投资规模大的特点,如香港的青马大桥、舟山跨海大桥、苏通大桥和汀九大桥等. 目前,国内已有上百座大型桥梁安装了 SHMS^[67-69].

2.3 评估数据信息源现状分析

2.3.1 人工检查信息

BMS 中人工检查信息是主要的评估指标来源. 目前外观检查仍以目测为主、检测设备为辅,通过接近结构物表面了解部件的缺损状况,找出显性病害并记录病害特征. 由于巡检设备的限制,不可避免地存在检查盲点,例如索塔、桥墩或基础的病害检查. 此外,由于检查手段的限制以及检查人员的专业知识参差不齐,一些病害的严重程度表述不同,影响最终的评估结论.

对于重点养护的大跨径缆索承重桥梁,在实际运营过程中,养护单位一般委托具有相关资质的单位进行一年一次的全面检查. 由于每年检测的单位可能不同,使得构件分类编号不同、病害描述不一致的现象时有发生,这无疑增加了病害连续性观测和定位的难度. 此外,对于一些专项检查内容,通常只对当次检查的病害位置作认定,缺乏整体的评估方法以及历年发展趋势的分析,这方面的连续性规律有待进一步挖掘.

2.3.2 长期监测数据信息

长期监测数据信息目前主要存在以下问题: 1) 数据失真逐年增多. 由于传感器自身信号故障、传输遗漏、外界环境干扰等因素,使得采集的数据往往出现不完整、有噪声或不一致的现象. 监测数据的准确性是评估结构完整度的前提,而几乎每类传感器都存在数据失真的问题. 如果海量数据大量堆积,必将成为制约 SHM 系统发挥其科学指导意义的瓶颈. 目前,长期监测数据出现数据失真逐年增多的趋势. 图 1 给出了某大桥运营 6 a 后各类传感器异常的统计情况,由图可知,各类传感器均出现了不同

程度的损坏. 图 2 给出了该桥索力的逐年损坏率,由图可知,索力传感器的异常率逐年增加,使用 5 a 后的异常率已超过半数. 2) 数据失真类型多样. 长期监测数据失真较为严重,可归纳为两种具有代表性的失真类型,即单点数据失真和连续数据失真. 对于单点数据失真较常出现的是单点缺失,这是在信号传输和采集过程中产生的,同时也存在个别的野值,即严重偏离大部分数据所呈现变化趋势的个别数据;对于连续数据常出现的问题是数据段漂移,相较于数据段缺失和紊乱,数据段漂移的判断更加困难,需要定期观测数据走势,及时重新标定传感器. 3) 其他问题. 缆索承重桥梁的 SHMS 通常与 BMS 各自独立运行,长期监测数据分析也缺少与人工检查病害的关联. 因而,海量监测数据仍有待于有效的利用并更好的辅助养管单位进行有针对性的检查与维修^[70].

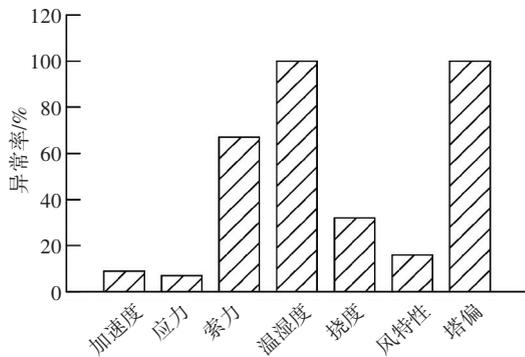


图 1 传感器异常和损坏情况统计

Fig.1 Statistic results of sensor anomaly and damage

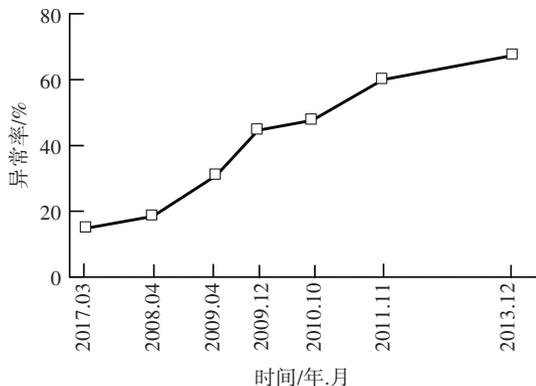


图 2 索力传感器异常率

Fig.2 Anomaly rate of cable force sensors

3 桥梁状态评估发展机遇与挑战

以人工检查为主的 BMS 和以传感器监测为主的 SHMS 都有各自的弊端,都难以独立成为桥梁状态评估的理想数据来源. 鉴于此,有必要通过多源信息融合的方法将大跨度缆索承重桥梁的 BMS 与 SHMS 的数据信息进行采集、传输、综合、过滤、相关

及合成^[71],以期获得合理、科学的评估结果。

信息融合技术作为一种智能化信息处理技术,已在工业过程、环境系统、金融系统等复杂系统的状态监测与诊断维护等领域得到广泛应用,这使得BMS与SHMS的数据信息的融合成为可能。近年来,实时监测系统与传统的巡检养护相结合的趋势已引起学术界和工程界的关注^[72-73]。实施信息融合的基础是建立一套完善的融合功能模型和体系结构,以描述系统中各组件的功能、相互关系以及数据流向。近年来人们提出的功能模型有很多,例如情报环,美国三军组织——实验室理事联合会提出的JDL(joint directors of laboratories)模型,John Boyd提出的Boyd控制环,Dasarathy提出的融合模型,Bedworth等提出的瀑布模型、混合模型等。

情报环模型稍显粗糙,Boyd控制环模型不能较好地反映评估结果对基础数据的影响,Dasarathy模型有效地描述了各级融合行为,但是欠缺对系统融合目的的描述,而JDL模型按目标分级,且应用最为广泛,因此,在此基础上引入反馈机制,建立修正的JDL模型并应用到桥梁评估中,如图3所示。

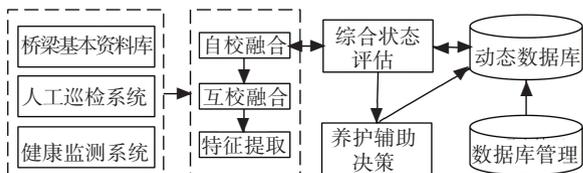


图3 缆索承重桥梁状态评估的系统功能模型

Fig.3 Functional model of cable supported bridge condition evaluation

建立的修正JDL模型共包含4级^[74]:1)自校融合、互校融合、特征提取。这一级别主要针对多种信息源进行融合处理,纠正不一致、虚假的数据,并进行特征抽取,建立具有一致性、全面性的桥梁评估指标体系。信息源包含:长期监测系统中传感器监测到的环境特性数据、结构响应数据;巡检养护系统中人工检查到的几何外观缺损、材料退化、裂缝等信息;基于设计、施工、竣工资料建立起来的基准有限元模型计算值。2)综合状态评估。在层次化指标体系的基础上,对各个指标的权重和评估标准予以确认,最终采用适合的算法对缆索承重桥梁的综合技术状况进行评估。3)养护辅助决策。根据评估结果,对缆索承重桥梁的运营状况做更加详细的说明,总结桥梁目前存在的性能缺陷和病害,为后期养护提供相关建议。4)过程优化。将桥梁状态评估和养护辅助决策信息保存到统一的数据库中管理,通过动态数据库的链接实现优化和数据反馈,可调整第1

级中的信息源参数、优化传感器管理和优化数据处理等,通过反馈自适应提高系统的融合效果。

综上所述,采用修正的JDL模型有望能够很好地描述缆索承重桥梁状态评估系统的各个组成部分的功能,而且通过数据库更新实现了信息反馈,进而为信息融合及传感器管理的优化提供数据平台^[75]。信息融合系统的结构可以抽象分为集中式和分布式两种。以层次化指标体系的架构为基础,结合3个层次的融合结构剖析,将信息融合系统设计为一个集散式的信息融合体系结构,即分布式结构和集中式结构相结合的混合结构,如图4所示。

图4中的体系结构以集中式的层次化指标体系为支撑,在各个节点的融合上采用分布式,并将融合结果反馈给数据级,达到了反馈控制的目的。这种结构结合了集中式和分布式的优点,系统既保留了尽量多的底层信息,又具有较好的可扩展性。

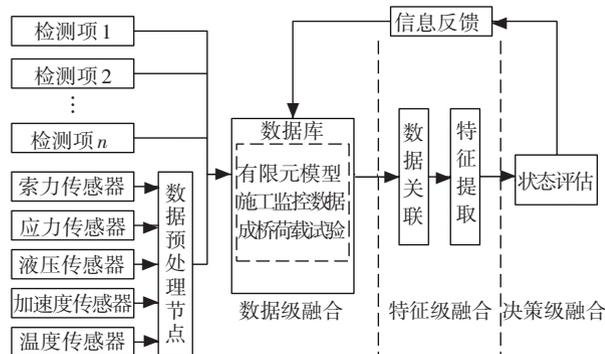


图4 缆索承重桥梁状态评估的信息融合体系结构

Fig.4 Information fusion system structure of cable supported bridge condition evaluation

对于信息融合技术,从信息处理层次的角度可划分为3个层次:数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据级融合信息融合技术与评估的对应关系如图5所示。

4 结论与展望

1)缆索承重桥梁评估复杂,不同评估方法得到的评估结果差异性大,且各种评估理论在实际应用中均存在一定的局限性。传统的人工检查对于桥梁隐蔽部位和结构内部的检测效果不理想,且检查结果的主观性强。SHMS中传感器的寿命、系统稳定性以及监测数据后处理技术一直是制约其发展的障碍。引入多源信息融合技术,可以让人工检查数据和SHMS数据相互补充、相互支撑、相互校核,有望提高大跨径索支承桥梁的评估结论的可信度。

2)缆索承重桥梁的状态评估方面未来研究方向应包括:针对缆索承重桥梁的评估规范或指南的

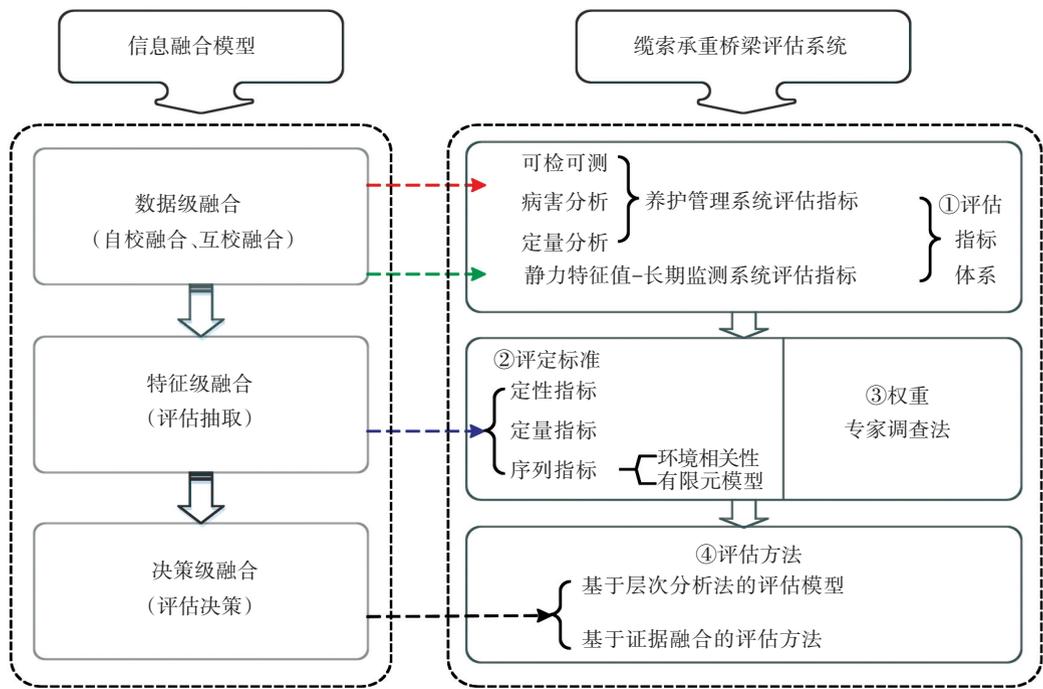


图 5 信息融合模型与评估的关系

Fig.5 Relationship of information fusion model and evaluation system

制定;针对缆索承重桥梁群的评估标准化研究;新的无损检测技术的开发;监测数据的进一步深入挖掘以及传感器技术的升级;信息融合技术在评估各层面的理论研究;预防性养护理念在大跨径桥梁养护中的应用。

3) 中国的桥梁已开始进入建养并重的历史阶段. 未来 5~10 a, 中国修建的大型桥梁基础设施将会面临病害或损伤频发期, 如何预知这些病害, 如何评价这些桥梁, 如何利用预防性养护理念维修和加固这些桥梁必将成为桥梁工程界面临的重大挑战, 同时也为桥梁工程师提供进一步施展才华的历史机遇。

参考文献

[1] GIMSING N, GEORGAKIS C. Cable supported bridges: concept and design[M]. British: A Wiley Inter science Publication, 1983: 1-6.

[2] 梁鹏, 肖汝诚, 夏旻, 等. 超大跨度缆索承重桥梁结构体系[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2004.05.016.

LIANG Peng, XIAO Rucheng, XIA Min, et al. Structural systems for ultra-long span cable supported bridges [J]. Journal of Highway Communication Technology, 2004, 21(5): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2004.05.016.

[3] 张启伟, 周艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7372. 2006.06.011.

ZHANG Qiwei, ZHOU Yan. Applicability of bridge health monitoring technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7372. 2006.06.

011.

[4] 郭彤, 李爱群, 李兆霞, 等. 大跨桥梁结构状态评估方法研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 609-704. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2004.05.031.

GUO Tong, LI Aiqun, LI Zhaoxia, et al. Progress in condition assessment methods for long span bridges [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2004, 34(5): 609-704. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505. 2004.05.031.

[5] 谭冬梅, 瞿伟廉, 张建波, 等. 大跨斜拉桥拉索断裂的损伤诊断研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 107-110. DOI: 10.3963/j.issn:1671-4431.2012.07.022.

TAN Dongmei, QU Weilian, ZHANG Jianbo, et al. Damage identification of cable of long span cable-stayed bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 107-110. DOI: 10.3963/j.issn:1671-4431.2012.07.022.

[6] DING Y, LI A, DU D, et al. Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6(6): 725-739. DOI: 10.1080/15732470802187680.

[7] 许翔, 黄侨, 任远, 等. 中美既有公路桥梁评估方法对比研究[C]//第二十二届全国桥梁学术会议论文集(下册). 北京: 人民交通出版社, 2016: 1076-1082.

XU Xiang, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Research on existing highway bridge assessment methods between America and China [C]//The 22nd National Conference on Academic Bridge (Part II). Beijing: China Communications Press, 2016: 1076-1082.

[8] 李爱群, 丁幼亮, 王浩, 等. 桥梁健康监测海量数据分析与评估——“结构健康监测”研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2012(8): 118-130. DOI: 10.1007/s11431-012-4818-5.

LI Aiqun, DING Youliang, WANG Hao, et al. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data-progress in research/development of “Structural Health Monitoring” [J]. Science China: Technological Sciences, 2012(8): 118-130. DOI: 10.1007/

- s11431-012-4818-5.
- [9] JANG S, JO H, CHO S, et al. Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation[J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(5/6): 439-459. DOI: 10.12989/sss.2010.6.5_6.439.
- [10] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测监测系统研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(5): 544-548. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2003.05.003.
- LI Aiqun, MIAO Changqing, LI Zhaoxia, et al. Health monitoring system for the Runyang Yangtse River Bridge[J]. *Journal of Southeast University(Nature Science Edition)*, 2003, 33(5): 544-548. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2003.05.003.
- [11] 胡俊亮, 钟继卫, 黄仕平, 等. 基于可靠度指标的桥梁安全评估分级方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(4): 550-555. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2003.05.003.
- HU Junliang, ZHONG Jiwei, HUANG Shiping, et al. A method for bridge safety assessment based on reliability index [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(4): 550-555. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2003.05.003.
- [12] 任远, 黄侨, 林阳子. 大跨径斜拉桥综合评估系统的研制与开发[J]. *南京航空航天大学学报*, 2007, 39(4): 535-539. DOI: 10.3969/j.issn:1005-2615.2007.04.025.
- REN Yuan, HUANG Qiao, LIN Yangzi. Study and development of comprehensive assessment system of long span cable-stayed bridges [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, 39(4): 535-539. DOI: 10.3969/j.issn:1005-2615.2007.04.025.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范: JTG H11—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for maintenance of highway bridges and culvers; JTG H11—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standards for Technical condition evaluation of highway bridges; JTG/T H21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁养护技术规范: CJJ 99—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code of maintenance for city bridge; CJJ 99—2003 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [16] U. S. Department of Transportation. Bridge inspector's reference manual; FHWA NHI 12-049 [S]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2012.
- [17] U.S. Department of Transportation. Recording and coding guide for the structure inventory and appraisal of the nation's bridges; FHWA-PD-96-001 [S]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1995.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide manual for bridge element inspection (first edition) [S]. Washington DC: AASHTO, 2011.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges; JTG/T J21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials. The manual for bridge evaluation [S]. Washington DC: AASHTO, 2011.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Load test methods for highway bridge; JTG/T J21—01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [22] LIU J. The detection evaluation and reinforcement research of Kan-kan River Bridge [J]. *Engineering*, 2015, 7(7): 462-468. DOI: 10.4236/eng.2015.77042.
- [23] 栾旭光, 黄方林, 贾承林. 基于 BS5400 规范的老龄铁路铆接钢桥疲劳寿命评估[J]. *噪声与振动控制*, 2009, 29(2): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn:1006-1355.2009.02.007.
- LUAN Xuguang, HUANG Fanglin, JIA Chenglin. Fatigue lifespan evaluation of old steel railway bridges based on BS5400 standard [J]. *Noise and Vibration Control*, 2009, 29(2): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn:1006-1355.2009.02.007.
- [24] 杨朝辉, 张丽芳, 艾军, 等. 国内外大跨径钢箱梁桥养护规范对比研究[J]. *交通标准化*, 2013(13): 8-11. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2013.13.007.
- YANG Zhaohui, ZHANG Lifang, AI Jun, et al. Comparative study on specification for long span steel girder maintenance at home and abroad [J]. *Transportation Standardization*, 2013(13): 8-11. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2013.13.007.
- [25] YIN Z H, LI Y F, GUO J, et al. Integration research and design of the bridge maintenance management system [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 5429-5434. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1007.
- [26] 任远. 大跨径斜拉桥养护管理系统的数字化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- REN Yuan. Digitization research on maintenance and management of long-span cable-stayed bridges [D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2008.
- [27] JIAO Y, LIU H, CHENG Y, et al. Fuzzy neural network-based damage assessment of bridge under temperature effect [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014(1): 1-9. DOI: 10.1155/2014/418040.
- [28] SASMAL S, RAMANJANEYULU K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 1430-1443. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.017.
- [29] LIU D, LEI Y, BO L. Fuzzy-entropy theory comprehensive evaluation method and its application in building construction safety [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 43: 137-142. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.024.
- [30] 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, 29(1): 50-54. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2001.01.011.
- LAN Hai, SHI Jiajun. Degree of grey incidence and variable weight synthesizing applied in bridge assessment [J]. *Journal of Tongji University (Nature Science Edition)*, 2001, 29(1): 50-54. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2001.01.011.
- [31] TOTH E. Asymmetric error functions for reducing the underestimation of local scour around bridge piers; application to neural networks models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(7): 04015011. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000981.
- [32] LIAO R, ZHANG Y, YANG L, et al. A cloud and evidential rea-

- soning integrated model for insulation condition assessment of high voltage transformers [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014, 24 (7): 913–926. DOI: 10.1002/etep.1738.
- [33] WANG G, XU C, LI D. Generic normal cloud model [J]. *Information Sciences*, 2014, 280(280): 1–15. DOI: 10.1016/j.ins.2014.04.051.
- [34] HAN X, YAN Y, CHENG C, et al. Monitoring of oxygen content in the flue gas at a coal-fired power plant using cloud modeling techniques [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2014, 63(4): 953–963. DOI: 10.1109/TIM.2013.2287117.
- [35] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 5–15.
- XIE Jijian, LIU Chengping. *Fuzzy mathematics method and its application* [M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006: 5–15.
- [36] 魏召兰, 黄显彬, 刘国军, 等. 区间数模糊综合评判方法在桥梁评估中的应用 [J]. *地震工程与工程振动*, 2014(3): 237–244. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.03.237.weizl.031.
- WEI Zhaolan, HUANG Xianbin, LIU Guojun. The application of the improved interval number fuzzy comprehensive method in bridge evaluation [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 163–167 (3): 3285–3291. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.03.237.weizl.031.
- [37] 汪培庄. 模糊集与随机集落影 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985: 101–129.
- WANG Peizhuang. *Fuzzy sets and random colony* [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985: 101–129.
- [38] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架 (Ⅷ) — 变权综合原理 [J]. *模糊系统与数学*, 1995(3): 1–9.
- LI Hongxing. Factor space theory and mathematical framework of knowledge representation (Ⅷ) — variable weight synthesis principle [J]. *Fuzzy systems and mathematics*, 1995(3): 1–9.
- [39] WU Q, LI B, CHEN Y. Vulnerability assessment of groundwater inrush from underlying aquifers based on variable weight model and its application [J]. *Water Resources Management*, 2016: 1–15. DOI: 10.1007/s11269-016-1352-4.
- [40] 尚鑫, 徐岳, 马保林, 等. 基于神经网络的混凝土斜拉桥健康状态评估 [J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(8): 79–83. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2011.08.018.
- SHANG Xin, XU Yue, MA Baolin, et al. Health condition assessment of concrete cable-stayed bridges based on ANN [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(8): 79–83. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2011.08.018.
- [41] WANG W, CHEN G, HARTNAGEL B. Real-time condition assessment of the Bill Emerson Cable-stayed bridge using artificial neural networks [J]. *Proc Spie*, 2007, 6529: 65291P–65291P–11. DOI: 10.1117/12.715244.
- [42] 嵇一, 王菲. 基于人工神经网络的混合梁斜拉桥智能诊断方法研究 [J]. *铁道工程学报*, 2011, 159(12): 57–63. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2011.12.013.
- GAO Yi, WANG Fei. Research on intelligent diagnosis methods of a hybrid girder cable-stayed bridge based on artificial neural networks [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2011, 159(12): 57–63. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2011.12.013.
- [43] 黄侨, 唐海红, 任远. 基于模糊理论的大跨度桥梁评估理论研究 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27(1): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2010.01.013.
- HUANG Qiao, TANG Haihong, REN Yuan. Study of assessment theory of long-span bridges based on fuzzy theory [J]. *Journal of Highway & Transportation Research & Development*, 2010, 27(1): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2010.01.013.
- [44] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. *计算机研究与发展*, 1995(6): 15–20.
- LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership cloud and cloud generator [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 1995(6): 15–20.
- [45] WU J, YUAN S, JI S, et al. Multi-agent system design and evaluation for collaborative wireless sensor network in large structure health monitoring [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(3): 2028–2036. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.06.098.
- [46] SIVILEVICIUS H. Application of expert evaluation method to determine the importance of operating asphalt mixing plant quality criteria and rank correlation [J]. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2011, 6(1): 48–58. DOI: 10.3846/bjrbe.2011.07.
- [47] 王能谋. 既有桥梁的评估理论及其应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010. DOI: 10.7666/d.y1687274.
- WANG Nengmou. *Assessment theory of existing bridges and its application* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. DOI: 10.7666/d.y1687274.
- [48] 黄志伟, 黄侨, 任远. 基于程度分析的中小桥梁评估方法 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2012, 42(2): 358–362. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.02.031.
- HUANG Zhiwei, HUANG Qiao, REN Yuan. Assessment method of existing bridge with mid-small span based on degree analysis theory [J]. *Journal of Southeast University (Nature Science Edition)*, 2012, 42(2): 358–362. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.02.031.
- [49] ESTES A C, FRANGOPOL D M, FOLTZ S D. Updating reliability of steel miter gates on locks and dams using visual inspection results [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(3): 319–333. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.10.007.
- [50] GATTULLI V, CHIARAMONTE L. Condition assessment by visual inspection for a bridge management system [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2005, 20(2): 95–107. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2005.00379.x.
- [51] 文志平, 刘婷, 张丰, 等. 基于 GIS 与灰色关联分析的水位方案综合评价模型 [J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2012, 39(1): 101–106. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9497.2012.01.021.
- WEN Zhiping, LIU Ting, ZHANG Feng, et al. Comprehensive evaluation model for normal water level scheme based on GIS and grey correlation analysis [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2012, 1: 022. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9497.2012.01.021.
- [52] YIN Z H, YU B, LIN J. Security risk evaluation on long span bridge structure based on grey fuzzy theory [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 433: 1005–1008. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.433-435.1005.
- [53] XUE P, MAO D. Weighting-grey relative degree assessment model of concrete structure durability and its application [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 236: 627–631. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.236-237.627.
- [54] LIU S, XIE N, YUAN C, et al. Systems evaluation: methods, models, and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, Inc, 2011.
- [55] DAN D H, Zhao Y M, Yang T, et al. Health condition evaluation of cable-stayed bridge driven by dissimilarity measures of grouped

- cable forces [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(1):1212-1215. DOI:10.1155/2013/818967
- [56]任远,刘小玲,黄侨,等.斜拉桥恒载索力长期变化趋势分析与评估[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(6):103-108. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.019
- REN Yuan, LIU Xiaoling, HUANG Qiao. The long-term trend analysis and assessment of the cable forces due to dead load in cable-stayed bridges [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(6):103-108. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.019
- [57]LIU XL, HUANG Q, REN Y, et al. Extraction of cable forces due to dead load in cable-stayed bridges under random vehicle loads[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2015, 31(3):407-411. DOI:10.3969/j.issn.1003-7985.2015.03.019
- [58]宗周红,牛杰,王浩.基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展[J].*土木工程学报*, 2012(8):121-130. DOI:10.15951/j.tmgxb.2012.08.019
- ZONG Zhouhong, NIU Jie, WANG Hao. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(8):121-130. DOI:10.15951/j.tmgxb.2012.08.019
- [59]张新占.桥梁管理系统研究[D].西安:长安大学,2004.
- ZHANG Xinzhao. Research on bridge management system [D]. Xi'an: Changan University, 2004.
- [60]XIONG Wen, XIAO Rucheng, DENG Lu, et al. Methodology of long-term real-time condition assessment for existing cable-stayed bridges [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(1):111-125. DOI:10.1260/1369-4332.13.1.111.
- [61]THOMPSON P. PONTIS: the maturing of bridge management systems in the USA [C]//*Proceeding of the Second International conference on Bridge Management*. London: Thomas Telford, 1993:971-978. DOI:10.1680/bm2.19263.0100
- [62]HAWK H, SMALL E. The BRIDGIT bridge management system [J]. *Structural Engineering International*, 1998, 8(4):309-314. DOI:10.2749/101686698780488712.
- [63]PARKE G, DISNEY P, BAKHT B, et al. Development of bridge management system (BMS) in Japan and USA [C]//*Bridge Management 5: Inspection, Maintenance, Assessment and Repair: Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Management*, organized by the University of Surrey. London: Thomas Telford, 2005:37-43.
- [64]李昌铸.公路桥梁管理系统(CBMS2000)的开发与应用[J].*公路交通科技*, 2003, 20(3):84-90. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2003.03.022.
- LI Changzhu. Development and application of CBMS2000 [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(3):84-90. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2003.03.022.
- [65]贺志勇,戴少平,袁辉明. CBMS 在高速公路桥涵养护管理中的应用[J].*中外公路*, 2010, 30(1):194-196. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2010.01.032.
- HE Zhiyong, DAI Shaoping, YUAN Huiming. The application of CBMS to the highway bridge management [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2010, 30(1):194-196. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2010.01.032.
- [66]欧进萍.重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的应用[J].*中国科学基金*, 2005, 19(1):8-12. DOI:10.3969/j.issn.1000-8217.2005.01.002.
- OU Jinping. Research and practice of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China [J]. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 2005, 19(1):8-12. DOI:10.3969/j.issn.1000-8217.2005.01.002.
- [67]WENZEL H. Health monitoring of bridges [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008:175-178.
- [68]PINES D, AKTAN A. Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States [J]. *Progress in Structural Engineering and materials*, 2002, 4(4):372-380. DOI:10.1002/pse.129.
- [69]CHEN Z W, XU Y L, WANG X M. SHMS-based fatigue reliability analysis of multiloading suspension bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(3):299-307. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000460.
- [70]李西芝.大跨斜拉桥养护管理与健康监测的数据融合技术与方法研究[D].南京:东南大学,2013.
- LI Xizhi. Research on data fusion between maintenance management and health monitoring systems for long-span cable-stayed bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [71]刘小玲,黄侨,任远,等.带反馈机制的桥梁监测数据处理流程框架[J].*公路*, 2016,(7):104-107.
- LIU Xiaoling, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. With feedback mechanism of bridge monitoring data processing framework [J]. *Highway*, 2016,(7):104-107.
- [72]杨杰,李爱群,李兆霞.桥梁结构健康监测的数据融合框架[J].*防灾减灾工程学报*, 2008(3):292-297. DOI:10.3969/j.issn.1672-2132.2008.03.006.
- YANG Jie, LI Aiqun, LI Zhaoxia. Data fusion framework for bridge structural health monitoring [J]. *Journal of Disaster and Mitigation Engineering*, 2008,(3):292-297. DOI:10.3969/j.issn.1672-2132.2008.03.006.
- [73]聂功武,孙利民.桥梁养护巡检与健康监测系统信息的融合[J].*上海交通大学学报*, 2011, 45(增刊1):104-108.
- NIE Gongwu, SUN Limin. Integration of inspection and structural health monitoring system for bridge management [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(Sup1):104-108.
- [74]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.
- LIU Xiaoling. Study on application of multi-source information fusion technology in condition assessment of steel cable-stayed bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [75]LIU X, HUANG Q, REN Y. Anomaly detection algorithm for stay cable monitoring data based on data fusion[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2016, 23(3):39-43. DOI:10.11916/j.issn.1005-9113.2016.03.003.