

中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计方法

伊廷华, 郑 旭, 杨东辉, 李宏男

(大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 从桥梁监测的工程需求出发, 深度剖析了中小跨桥梁与大跨径桥梁监测需求的区别, 首次提出了中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计理念, 系统构建了由输入、输出和标定三者组成的监测系统轻量化设计方法和流程, 详细阐述了支撑该方法实现所需的系统识别理论、结构分析理论和承载能力评估理论, 文末对该方法的未来发展进行了初步展望。该方法为规范中小跨径桥梁结构健康监测技术提供了一条切实可行的思路, 推进了桥梁智慧管养的工程实用化进程。

关键词: 桥梁健康监测; 中小跨径桥梁; 轻量化设计; 影响线; 状态评估

中图分类号: U441⁺.4; U446.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0458-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.017

引 言

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[1]规定: 单孔跨径在 5~40 m 之间的桥梁属于中小跨径桥梁。根据交通运输行业发展统计公报^[2]显示, 截至 2021 年底, 中国公路桥梁已达 96.11 万座, 其中中小跨径桥梁 81.92 万座, 总量占比高达 85%。在长期服役过程中, 由于环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应及突变效应等不利因素的耦合作用, 这些桥梁将不可避免地产生结构损伤积累和抗力衰减, 致使各种灾难事故屡有发生^[3-4]。因此, 保障量大面广的中小跨径桥梁服役安全, 已成为桥梁领域的重大需求。

近些年, 随着先进传感和物联网技术的发展, 结构健康监测已成为确保桥梁服役安全的重要手段之一, 其系指利用现场的、无损的、实时的方式采集结构的输入与输出信息, 分析结构性能的波动、劣化或损伤特征, 并为管理和养护提供决策支持的技术^[5]。因结构健康监测具有实时采集外部环境荷载作用、在线把握结构响应特征、识别结构可能损伤形式、揭示结构倒塌破坏机理、优化结构维修养护计划、验证发展既有设计理论这六项独特优势^[6], 与理论分析、数值仿真和模型试验一起被誉为土木工程学科发展的“四轮驱动”^[7]。

众所周知, 大跨径桥梁通常属于路网连接的咽喉枢纽, 一旦发生垮塌, 将会导致整个区域的交通瘫痪, 因此其重要性显而易见。此外, 大跨径桥梁为保

证其跨越能力, 结构形式一般较为复杂, 每座桥梁都需要进行特殊设计^[8]。因此, 对其建立综合全面的结构健康监测系统就显得非常必要。以港珠澳大桥为例, 仅青州航道桥主跨就安装了 277 个不同类型的传感器, 全方位监测其环境与荷载作用(风、温湿度、地震动、车载等)和结构响应信息(振动、形变、应变、索力等)^[9]。交通运输部 2020 年 11 月更是颁布了《公路长大桥梁结构健康监测建设实施方案(征求意见稿)》, 拟在“十四五”期间对中国在役、新建单孔跨径 400 m 以上悬索/斜拉桥梁、单孔跨径 160 m 以上梁桥和单孔跨径 200 m 以上拱桥, 全面建成结构健康监测系统。

然而, 与大跨径桥梁不同, 中小跨径桥梁的数量十分庞大, 其设计和建造一般采用标准化方案^[10], 且结构形式较为简单、失效模式相对明确。因此, 以全面把握结构状态为目标的传统监测系统设计方法并不适用, 亟需建立专门的设计方法。为此, 本文首次提出中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计理念, 系统构建了由输入、输出和标定三者组成的监测系统轻量化设计方法, 详细阐述了支撑该方法实现所需的系统识别、结构分析和承载能力评估理论, 文末对该方法的未来发展进行了展望。

1 轻量化设计理念

1.1 定义和科学内涵

众所周知, 轻量化的概念最初来源于汽车工业,

其目标是实现汽车功能、重量和造价的最佳权衡^[11]。随着工业制造逐步迈向智能化时代,轻量化的概念也开始向其他设计和管理领域不断延伸。与工业产品制造相比,结构健康监测有其鲜明的特点,其系统设计需要综合考虑投资规模、测点布设、设备选型、现场施工、结构分析和维护管理等多个方面。因此,若想实现对中小跨径桥梁结构健康监测系统的合理化设计,必须考虑标准化、低成本和多功能三个方面,这即为本文轻量化设计方法的理念来源。通俗来讲,中小跨径桥梁结构健康监测系統轻量化设计是一种以实现桥梁正常使用和对承载能力极限状态在线评估为目的,利用少量传感器对车辆荷载、结构刚度和关键截面内力进行综合监控的监测系统构建方法。

结构健康监测通常包括环境与荷载作用(输入)监测和结构响应(输出)监测两部分。若已知输入和输出信息,即可对桥梁系统进行识别。桥梁结构的系统识别可分为基于高频振动信息的动力(模态)参数识别和基于低频变形信息的静力参数识别两类。大跨径桥梁造型复杂,模态参数在环境与荷载激励下变化明显,对其准确辨识对于桥梁性能诊断具有重要意义^[12]。而中小跨径桥梁因结构刚度较大使得振动并不明显,且因其模态解析形式已知和相对稳定,对其进行模态参数识别意义有限。与此对应,基于变形信息的结构静力参数识别仅需利用少量较低频率响应的传感器即可直接识别出结构的刚度等参数,其信噪比高且工程意义非常明确,故应是中小跨

径桥梁结构健康监测系统设计重点考虑的方向。

对于中小跨径桥梁,若以车辆荷载作为输入,以静力变形作为输出,通过识别得到的结构物理参数称之为桥梁的影响系数,其正式定义为:当与桥面垂直的单位荷载位于桥面某一位置时,结构的某一个截面上某一点的响应即为该点对应该荷载位置的影响系数^[13]。若单位荷载沿车道移动,可将不同荷载位置处的桥梁影响系数连接得到影响线,对多个车道的桥梁影响线进行组合,即可得到影响面。图 1 给出了某三跨连续梁中跨某截面的应变影响线和挠度影响线。从图 1 中可以看到,影响系数作为结构的静力指标,从桥梁某截面的响应中可获取反映整个结构的状态特征。因此,可以将影响系数识别作为监测方案设计的目标。基于此,表 1 梳理给出了大跨径桥梁与中小跨径桥梁监测的需求对比。

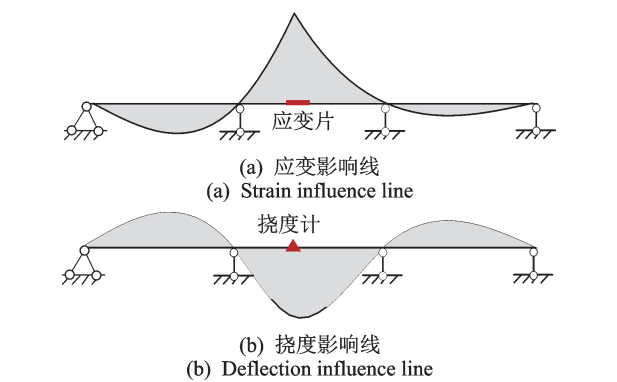


图 1 某三跨连续梁中跨某截面影响线

Fig.1 Influence lines in certain section of a three span continuous beam bridge

表 1 大跨径桥梁与中小跨径桥梁监测需求对比

对比内容	大跨径桥梁(全方位监测)		中小跨桥梁(轻量化监测)	
	桥梁特点	监测方案需求	桥梁特点	监测方案需求
桥梁数量	数量少	单体监测	数量多	集群监测
结构形式	构造复杂	专用方案	构造简单	通用方案
激励特点	车载复杂且与环境荷载同为重要激励源	需全面获取车载和环境荷载信息	车载简单且为主要激励源	仅需准确获取车载信息
响应特点	振动明显	需全面获取动静力参数信息	振动不明显	仅需获取静力参数信息
工程需求	全面把握整体和关键构件性能变化	需以模态参数和物理参数识别为目标	把握整体性能变化	仅需以影响系数识别为目标

1.2 设计目标和方法特点

根据《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)的规定^[14],桥梁设计应满足正常使用极限状态和承载能力极限状态的要求。传统的中小跨径桥梁承载能力评估一般采用荷载试验的方法,即通过测试桥梁在设计荷载作用下的变形值,将

其与理论变形值进行比对来判断结构的承载能力状况。如上节所述,对中小跨桥梁结构健康监测系統,若可实时获取桥梁的静力变形和车辆荷载信息,通过对结构影响系数进行识别,将识别得到的影响系数乘以对应位置的虚拟设计荷载,即可得到结构的虚拟变形值,这样可达到替代传统荷载试验的目的。

因此,中小跨径桥梁结构健康监测的物理量应包括:车载信息、关键位置变形信息和关键截面内力(应变)信息三类。其中,变形测点应布设在桥梁运营时理论最大变形位置处,内力测点应布设在结构内力最不利截面处。

基于上述目标,本文给出了中小跨径桥梁健康监测系統轻量化设计所需的支撑理论(图2),其主要包

括系统识别理论、结构分析理论和承载能力评估理论。通过梳理可以发现,对结构健康监测系统进行轻量化设计有如下优点:1)成本低,仅需少量的传感器和采集设备;2)信息全,既能获取车辆荷载信息,也能获取桥梁响应信息;3)功能多,通过少量传感器信息即可全面把握桥梁结构刚度分布和控制截面内力;4)实时强,可以根据桥梁承载能力的演化在线分级预警。

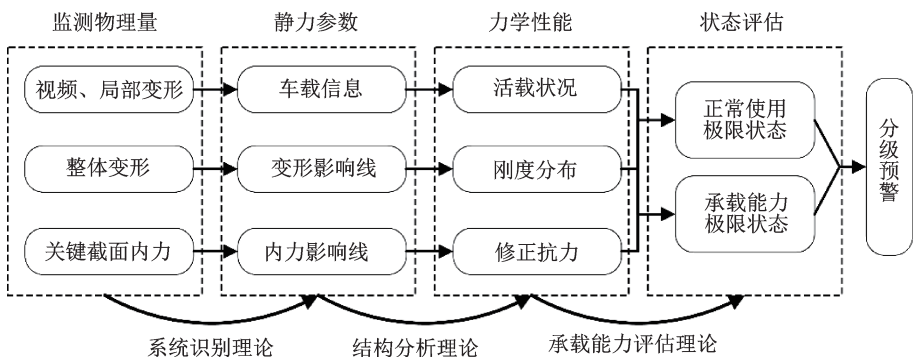


图2 结构健康监测系統轻量化设计支撑理论

Fig. 2 Theoretical framework of lightweight design method for structural health monitoring system

2 轻量化设计方法

基于上述轻量化设计理念和所需的支撑理论,本文构建了由输入、输出和标定三者组成的监测系统轻量化设计方法。

2.1 输入(荷载)信息监测系统设计

车载信息可分为三部分,即:1)重量信息(车辆的总重和轴重);2)位置信息(车辆在桥上的不同时刻的位置);3)几何信息(车辆的轴数、轴距和轮距)。常规的车载信息监测手段分为路面式动态称重系统、桥梁动态称重系统和视频动态称重系统三类。常见的路面式动态称重系统一般为贯穿车道的条形称重模块,当车轴通过称重模块后,通过模块中传感器的响应与荷载的关系即可换算得到轴重。由于这种方式获取车重信息的稳定性易受车辆冲击效应的影响且无法对车辆变道等复杂工况准确识别,使其在实际应用时受到诸多限制。针对这些问题,利用

桥梁局部响应的线性特性来识别车载的桥梁动态称重系统(Bridge Weigh-In-Motion,简称B-WIM)逐渐成为主流^[15]。一套完整的B-WIM系统由车辆轴距探测器和称重传感器两部分组成。这种方式通过车辆过桥时桥梁底部多个应变计的峰值时差和布设间距判断车速和轴距,其可对单个车辆的几何信息和位置信息进行很好地识别,进而可采用称重应变计数据根据Moses^[16]提出的称重算法对车重进行识别。B-WIM系统对车重识别的精度与传感器的数量相关,若需获取车载的空间分布,需在多个车道均布设传感器。为了更好地获取车辆位置信息,应用监控视频对车载识别成为了近几年的热门研究方向^[17]。通过视频对车辆的几何和位置信息进行识别具有成本低、精度高、非接触式等显著优势。表2对这几种车辆动态称重方式的特点进行了对比。

因为视频动态称重系统在车载的几何和位置信息识别方面具有独特的优势,且这种非接触式测量系统的安装维护非常方便,所以非常适合轻量化设计的需求。但该方式只能通过与车辆数据库进行对

表2 不同的车辆动态称重方式对比

Tab. 2 Comparison of different vehicle weigh-in-motion methods

对比内容	路面式动态称重系统	桥梁动态称重系统	视频动态称重系统
系统组成	埋入式称重模块	称重传感器和轴距探测传感器(应变)	高清摄像头
位置信息	仅能识别出车辆通过称重模块时的位置	可识别出车辆的车道分布和平均车速	可全面识别车辆的实时位置分布
几何信息	无法识别	复杂车流分辨能力差	识别结果较好
重量信息	可准确识别通过模块的每一车轴轴重	可准确识别总重和每一车轴轴重	通过对比数据库的车重粗略估计
安装维护	破坏桥面,安装复杂,可维护性差	在主梁下部安装方便,可维护性好	摄像头的安装方便,可维护性好

照来估算车重信息,所以其准确性存在局限。因此,这里提出联合B-WIM系统与视频动态称重系统进行中小跨径桥梁的输入信息监测。图3给出了装配式T梁桥输入监测系统轻量化设计方案示意图。对于这种桥型,B-WIM应变计应布设在腹板位置,且应根据精度需求确定布设数量。对于其他桥型,B-WIM应变计应根据数值分析结果布设在车载敏感位置。对于摄像头,其分辨率应达到视觉识别算法的最低要求,且视野区域能够覆盖所有车道。对于多跨中小跨径桥梁,为减少称重传感器的数量,可仅在桥梁边跨布设B-WIM系统,将称重结果与摄像头识别的位置信息进行对应即可,并可通过多个摄像头采用视野接力的方式实现对车辆的持续追踪。

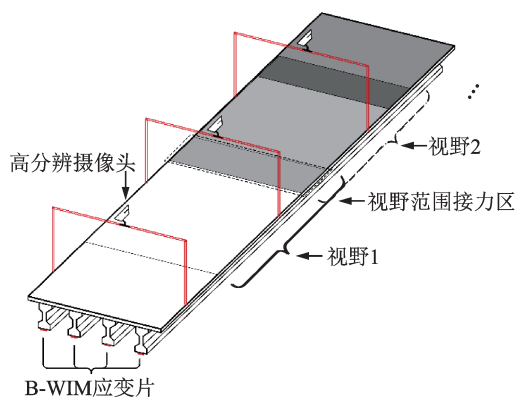


图3 输入信息监测系统轻量化设计

Fig.3 Light-weight design method for input information monitoring system

2.2 输出(响应)信息监测系统设计

输出信息监测系统轻量化设计包括科目确定、测点选择和设备选型三个步骤。因为轻量化设计应以影响系数识别为目标,所以监测科目应以静力变形为主,具体可分为整体变形和局部变形监测两大类。局部变形监测主要指对结构应变的监测,其可获取结构某一区域刚度的变化情况;整体变形监测主要包括结构挠度、转角和曲率三种物理量的监测,

它获取的是结构的整体刚度变化情况,这三种物理量可以相互转换,如下式所示:

$$\kappa(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{v''(x)}{\left[1 + (v''(x))^2\right]^{3/2}} \approx v''(x) = \theta'(x) \quad (1)$$

式中 $\kappa(x)$ 为桥梁主梁 x 位置处的曲率; $\rho(x)$ 为曲率半径; $v(x)$ 为挠度; $\theta(x)$ 为转角。

因为这三种物理量存在转换关系,所以可选取任意一种作为监测科目。考虑结构曲率在实际监测时一般难以直接获取,而空间转动较为复杂且转角测试精度较低,所以可选取挠度作为监测科目。

应变虽然只能反映结构的局部刚度,但根据应力-应变关系可知,应变本身是结构内力的反映。为了有效把握结构关键截面的内力,也需对关键截面的应变进行监测。

由上可知,输出信息监测系统应以挠度和应变作为监测科目,其测点位置与结构自身受力特点有关。桥梁挠度监测测点应布设在荷载作用下结构理论变形最大位置处,而应变监测测点应布设在结构的最不利内力位置处。这里对三类主要中小跨径桥梁(简支梁桥、连续梁桥和拱桥)的控制截面进行了测点设计,如图4所示。其中,简支梁桥需在跨中截面最大正弯矩处布设应变计和挠度计;连续梁桥需在支点最大负弯矩、跨中最大正弯矩和边跨最大正弯矩处布设应变计,在跨中和边跨最大变形处布设挠度计;拱桥需在拱顶最大正弯矩和拱脚最大负弯矩处布设应变计,在拱顶最大变形处布设挠度计。对于其他桥型或进行过加固改造的桥梁,应根据其具体受力特点,按最不利的原则选择测点。

现阶段桥梁响应监测主要包括电、机械、光三类传感器,其中:电类传感器是将被测量直接转变为电信号输出,主要包括加速度计、应变计等;机械类传感器是将被测量转变为机械量,在监测应用中可通过电类传感器将机械量转变为电信号输出,传感器

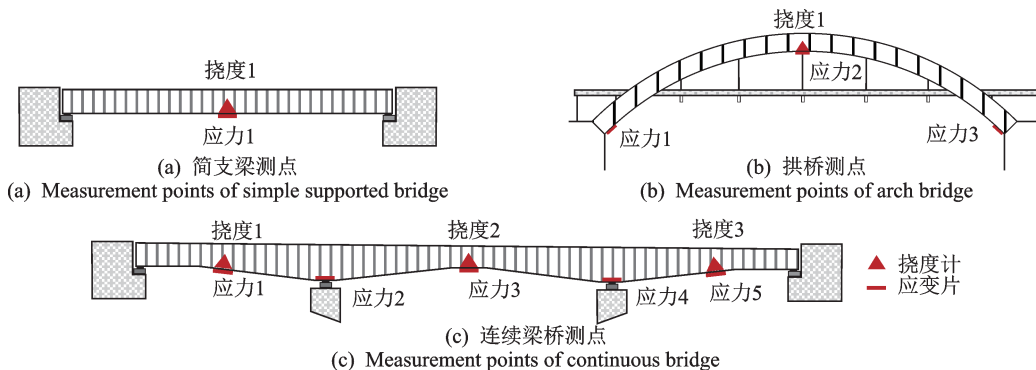


图4 输出信息监测系统轻量化设计

Fig.4 Light-weight design method for output information monitoring system

主要包括千分表和百分表等;光类传感器是通过光敏元件测出光信号的变化,可通过光电信号转换以电信号输出,或者直接输出光信号,常见传感器主要包括光纤光栅和全站仪等。在实际监测时,应综合考虑传感器的量程、频率响应、灵敏度、精度、分辨率等进行合理选型^[18]。传感器量程应根据结构的理论状态来确定,一般可选理论极限状态变形的1.5~2倍;频率响应可根据车速和影响系数分辨率来确定,其关系如下式所示:

$$f = \frac{v}{R} \quad (2)$$

式中 v 为车速; R 为系统识别时两个识别影响系数之间的间距; f 为传感器的采样频率。对于普通公路桥而言,为保证影响系数分辨率达到0.5 m,传感器的采样频率宜高于50 Hz。

2.3 监测系统标定方法

在监测系统投入运营之前,应对其进行标定,该过程即是对桥梁所有响应监测量对应的影响系数进行精确识别的过程。具体标定流程如下:

(1)选择适宜的标定车辆。车重不宜低于30 t,车上配备车辆位置指示器(位置分辨率不应低于0.01 m)。常用的位置指示器包括全球导航卫星系统、滚轮式位置指示器、激光式位置指示器等。

(2)测量标定车辆的几何信息。准确测量出单个车轴两车轮之间轮距和相邻车轴之间的轴距,距离精度不应低于待识别影响系数的分辨精度。

(3)对标定车辆进行称重。准确称出车辆的各个轴重 A_i 和总重 W_{GV} ,称重精度不应低于0.01 t。

(4)采用标定车辆进行测试。选取车流较少的时段,将车辆怠速依次通过桥梁各个车道,测试过程中应确保无其他车辆干扰。

$$L = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \cdots & A_2 & 0 & \cdots & A_3 & \cdots & \cdots & A_k & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & A_1 & 0 & \cdots & A_2 & 0 & \cdots & A_2 & \cdots & \cdots & A_k & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & A_1 & 0 & \cdots & A_2 & 0 & \cdots & A_2 & \cdots & \cdots & A_k \end{bmatrix}_{m \times (m+c-1)} \quad (4)$$

式中 A_i 为车辆第 i 轴的轴重; k 为车轴总数; m 为响应的总采样点数; c 为车辆前轴和后轴经过同一位置时的采样点数差。

因此,影响系数的识别问题可转化为求解线性方程组(3)的典型反问题。在实际中,由于加载工况不同,该方程组可能为欠定、正定或超定形式,为了避免影响系数求解时对噪声过拟合,通常采用正则化方法对其进行求解,常用的正则化方法包括吉洪诺夫正则化、截断奇异值分解、迭代正则化等^[22]。

(5)对测试结果分析和存档。应用识别出的局部应变影响线对车载识别系统进行标定并存档。

由于桥梁在服役过程中性能会不断劣化,当遇到以下情况之一时应考虑重新标定:

(1)通过响应时程反演得到单车车重时程出现较大变化,或同类型车辆车载出现大于20%规律性突变,显示称重系统不准确。

(2)距上次标定的时间超过三年。

3 轻量化设计支撑理论

上述轻量化设计方法需要系统识别、结构分析和承载能力评估理论的支撑方可实现。

3.1 系统识别理论

系统识别理论的目的是从监测数据中识别桥梁运营时的状态参数。桥梁影响系数和车载信息可相互转换,若已知其中一个即可对另外一个进行识别。在进行系统标定时车载信息已知,可对影响系数进行识别;系统运营时影响系数已经过标定,可对车辆进行称重。具体识别理论如下:

3.1.1 影响系数识别

当桥梁的输入(车辆重量、位置和几何信息)和输出(挠度、应变时程等)数据均已知,可以对桥梁的影响系数进行识别^[19-20]。桥梁在车辆激励下的静力响应实质上是多个车轴与影响系数乘积的延时叠加,从数学角度上可看作车载与影响系数函数的卷积,将该过程离散化,可得到车-桥静力相互作用的矩阵模型^[21],如下式所示:

$$R = L\Phi \quad (3)$$

式中 R 为桥梁静力响应向量; Φ 为影响系数向量; L 为荷载信息矩阵,其表达式如下式所示:

3.1.2 车辆荷载识别

对于车辆的几何信息,可采用计算机视觉分类算法对常见车辆进行分类,通过比对数据库中标准的车辆信息对其进行识别。对于位置信息,可采用计算机视觉目标追踪算法对其进行捕获^[23]。在识别出车辆的几何和位置信息后,可采用局部应变通过Moses^[16]提出的称重算法对车重 W_{GV} 进行识别,如下式所示:

$$W_{GV} = \frac{v \int \varepsilon(t) dt}{\int I(x) dx} \quad (5)$$

式中 $\epsilon(t)$ 为待称重车辆过桥时称重传感器的应变时程; $I(x)$ 为桥梁应变影响系数相对位置的函数。

为进一步得到车辆轴重分布,可采用下式进行识别:

$$E = \sum_{k=1}^K \left(\epsilon_k - \sum_{i=1}^N A_i I_{K-C_i} \right)^2 \quad (6)$$

式中 ϵ_k 为第 k 个采样点的桥梁应变响应; A_i 为总轴数为 N 的车辆第 i 轴轴重; I_{K-C_i} 为第 i 轴对应的影响系数; K 为应变总采样点数; C_i 为前轴与第 i 轴经过同一位置时的采样点数差。

通过使桥梁局部响应 ϵ_k 和利用影响线 I_{K-C_i} 及轴重 A_i 预测响应的残差平方和 E 最小,即可得到轴重 A_i 。为便于求解,可将该公式转换为线性方程组进行求解。图5梳理出了车载识别理论所需的算法。

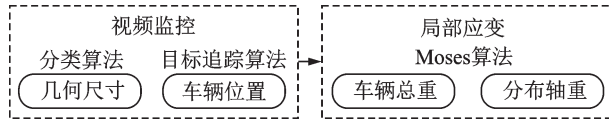


图5 车载信息识别算法

Fig. 5 Vehicle information identification algorithm

3.2 结构分析理论

桥梁影响系数属于结构的固有特性,其中:整体变形影响系数实质上是各个截面刚度的反映,而应变影响系数则反映该点内力-荷载关系。这些信息与影响系数的显式关系需要通过结构分析理论进行挖掘。

3.2.1 基于影响系数的刚度估计

桥梁影响系数与结构的柔度矩阵直接相关^[24],其本质是结构在不同位置抗弯刚度的一种反映^[25]。根据弯矩-曲率关系和互等定理^[13],可建立基于不同影响线的刚度估计理论,如下式所示:

$$EI(x) = \frac{M(x)}{\kappa(x)} = \frac{M(x)}{v''(x)} = \frac{M(x)}{\theta'(x)} = \frac{\overline{M}_p(x)}{DIL''(x)} = \frac{\overline{M}_M(x)}{RIL''(x)} = \frac{MIL^x(t)y^x}{SIL^x(t)} \quad (7)$$

式中 $EI(x)$ 为结构抗弯刚度沿桥位置 x 的分布; $M(x)$ 为荷载作用下的结构弯矩函数; $DIL(x)$ 为挠度影响线; $\overline{M}_p(x)$ 为单位集中荷载作用在挠度计位置处的弯矩函数; $RIL(x)$ 为转角影响线; $\overline{M}_M(x)$ 为单位集中力偶作用在转角计位置处的弯矩函数; $SIL^x(t)$ 为传感器在桥 x 位置处的应变影响线; $MIL^x(t)$ 和 y^x 为弯矩影响线和应变计距中性轴的距离。

对于边界简支的桥梁,式(7)分子中的弯矩函数可通过理论计算求出,进而可采用识别得到的影响系数直接估计刚度;而对于一般的刚性或者半刚性边界的桥梁,进行刚度估计需首先求出结构边界的旋转刚度,通过该刚度获得外荷载作用下支座的附加力矩,然后将一般支撑的梁结构转换为简支梁结构来进行求解即可^[26]。

3.2.2 基于影响系数的结构响应预测

根据影响系数的定义,可通过其对结构在任意荷载作用下的响应进行预测。当总个数为 N 且第 i 个荷载大小为 A_i 的等效点荷载作用在桥梁上时,根据桥梁第 i 个荷载位置对应的 j 点影响系数 φ_i^j ,可预测得到桥梁 j 点位置的响应 R^j 如下式所示:

$$R^j = \sum_{i=1}^N A_i \varphi_i^j \quad (8)$$

3.3 承载能力评估理论

如何快速高效地评估出桥梁的承载能力具有重要工程意义。根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)^[27],对于结构抗力小于荷载作用代表值的桥梁需进行荷载试验。《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015)^[28]规定桥梁的承载能力一般由校验系数 η 来反映,其定义如下:

$$\eta = \frac{S_e}{S_s} \quad (9)$$

式中 S_e 为试验荷载作用下主要测点的实测弹性变位或应变值; S_s 为试验荷载作用下主要测点的理论计算变位或应变值。

通俗来讲,校验系数 η 为某一布载形式下结构的实测变形值与理论值之比。在传统荷载试验中,该系数需结合桥梁最不利截面的响应特点和可实施的加载车辆工况进行预先布载和现场加载来获得,该过程需要长时间中断交通和耗费大量的人力物力。利用本文提出的轻量化设计方法,只需识别出桥梁的影响系数就可以根据式(9)预测得到 S_e ,并可换算得到承载能力检算系数 Z ,从而实现了承载能力实时评估的目的,具体流程如图6所示。这里以混凝土桥梁为例,给出两种极限状态承载能力的评估方法:

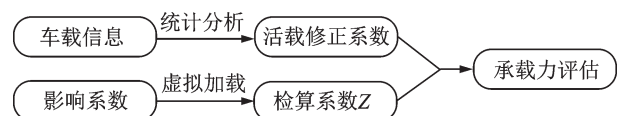


图6 桥梁承载能力评估理论流程

Fig. 6 Flowchart of bridge load bearing capacity evaluation theory

3.3.1 正常使用极限状态评估

为检验桥梁是否处于正常使用极限状态,可通过监测影响系数换算得到的检算系数 Z 来验算限制应力和荷载作用下的变形是否满足要求。

其中,限制应力应满足如下关系:

$$\sigma_d < Z\sigma_L \quad (10)$$

式中 σ_d 为计入活载影响修正系数的截面应力计算值; σ_L 为限制应力。

在满足限制应力要求的同时,荷载作用下变形应满足如下关系:

$$f_{dl} < Zf_L \quad (11)$$

式中 f_{dl} 为计入活载影响修正系数的荷载变形计算值; f_L 为极限变形值。限制应力和荷载作用下变形验算中参数的具体取值可参考文献[27]进行选取。

3.3.2 承载能力极限状态评估

为检验桥梁是否处于承载能力极限状态,可通过结构的荷载效应与抗力间的关系来确定:

$$\gamma_0 S \leq R(f_d, \xi_c a_{dc}, \xi_s a_{ds}) Z (1 - \xi_e) \quad (12)$$

式中 γ_0 为结构的重要性系数; S 为荷载效应函数; $R(\cdot)$ 为抗力效应函数; f_d 为材料强度设计值; a_{dc} 为构件的混凝土几何参数值; a_{ds} 为构件的钢筋几何参数值; Z 为监测影响系数换算得到的检算系数; ξ_e 为承载能力恶化系数; ξ_c 为配筋混凝土结构的截面折减系数; ξ_s 为钢筋的截面折减系数;公式(12)中参数的具体取值可参考文献[27]进行选取。

4 展 望

本文提出了中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计理念,建立了相应的设计方法,给出了相关的支撑理论,建议未来加强以下方面研究:

(1)进一步完善相关支撑理论,主要包括:1)研究从桥梁响应中准确剔除温度效应、动力效应等非静载因素引起结构变形的的方法,以提高影响系数的识别精度;2)探索密集车流、车辆变道等复杂工况下车载信息的精确识别方法,以提高车载识别的精度和可靠性;3)发展基于影响系数的桥梁状态精细评估理论,揭示不同类型桥梁影响系数的变化与结构整体性能或局部性能退化之间的关系。

(2)制定专门化的技术标准:对不同结构形式的中小跨径桥梁开展大规模现场测试,结合试验结果和工程经验编制内容全面、适用性好、可操作性强的轻量化监测技术指南,并制定涵盖系统设计、实施、验收、维护和管理行业标准。

(3)研发标准化的技术装备,主要包括:1)设计系列吨位、标准尺寸和配备高精度定位装置的车辆,

以用于监测系统的准确标定;2)研究耐久好、成本低、频率响应和精度等符合要求的先进传感元件,以用于监测数据的可靠获取;3)开发具备桥梁多级别实时预警、自动生成承载能力评估报告等功能的工程化软件,为桥梁运营管理提供支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.2021年交通运输行业发展统计公报[R].北京:中华人民共和国交通运输部,2022.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transport industry in 2021[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2022.
- [3] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of recent bridge failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 144-150.
- [4] Xu F Y, Zhang M J, Wang L, et al. Recent highway bridge collapses in China: review and discussion[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 04016030.
- [5] 伊廷华.结构健康监测教程[M].北京:高等教育出版社,2021.
YI Tinghua. Structural Health Monitoring [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [6] 中国工程建设标准化协会.大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准:T/CECS 529—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
China Engineering Construction Standardization Association. Early warning threshold standard for structural health monitoring system of long-span bridge: T/CECS 529—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [7] 李惠,欧进萍.斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I):系统设计[J].土木工程学报,2006,39(4):39-44.
LI Hui, OU Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (I): design methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 39-44.
- [8] 葛耀君.桥梁工程:科学、技术和工程[J].土木工程学报,2019,52(8):1-5.

- GE Yaojun. Bridge engineering: science, technology and engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 1-5.
- [9] Yan Y, Mao X Q, Wang X, et al. Design and implementation of a structural health monitoring system for a large sea-crossing project with bridges and tunnel[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 1-13.
- [10] 中华人民共和国交通运输部.公路工程技术标准:JTJ B01—2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTJ B01—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [11] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究与进展[J].汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.
FAN Zijie, GUI Liangjin, SU Ruiyi. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 1-16.
- [12] 伊廷华,周广东,曲春绪,等.结构运营模态测-辨相和理论[J].土木工程学报,2020,53(10):72-81.
YI Tinghua, ZHOU Guangdong, Qu Chunxu, et al. Intercoordination theory of testing and identification for structural operational modes[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 72-81.
- [13] 龙驭球,包世华,袁驷,等.结构力学I——基本教程[M].四版.北京:高等教育出版社,2018.
LONG Yuqiu, BAO Shihua, Yuan Si, et al. Structural Mechanics I—Fundamental Theory [M]. Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [14] 中华人民共和国交通运输部.公路工程结构可靠性设计统一标准:JTG 2120—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of highway engineering structures: JTG 2120—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [15] 任伟新,左小晗,王宁波,等.非路面式桥梁动态称重研究综述[J].中国公路学报,2014,27(7):45-53.
REN Weixin, ZUO Xiaohan, WANG Ningbo, et al. Review of non-pavement bridge weigh-in-motion [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2014, 27(7): 45-53.
- [16] Moses F. Weight-in-motion system with instrumented bridge[J]. Transportation Engineering, 1979, 105(3): 233-249.
- [17] Khuc T, Catbas F N. Structural identification using computer vision-based bridge health monitoring[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(2): 04017202.
- [18] 伊廷华,李宏男,顾明,等.基于MATLAB平台的传感器优化布置工具箱的开发及应用[J].土木工程学报,2010,43(12):87-93.
YI Tinghua, LI Hongnan, GU Ming, et al. Development of MATLAB based optimal sensor placement toolbox and its application[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 87-93.
- [19] Zheng X, Yang D H, Yi T H, et al. Bridge influence line identification from structural dynamic responses induced by a high-speed vehicle[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2020, 27(7): e2544.
- [20] Chen Z W, Yang W B, Li J, et al. Bridge influence line identification based on adaptive B-spline basis dictionary and sparse regularization[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2019, 26(6): e2355.
- [21] Zheng X, Yang D H, Yi T H, et al. Bridge influence line identification based on regularized least-squares QR decomposition method[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 6019004.
- [22] Zheng X, Yang D H, Yi T H, et al. Development of bridge influence line identification methods based on direct measurement data: a comprehensive review and comparison[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109539.
- [23] Xia Y, Jian X D, Yan B, et al. Infrastructure safety oriented traffic load monitoring using multi-sensor and single camera for short and medium span bridges[J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2651.
- [24] Chen Z W, Cai Q L, Li J. Stress influence line identification of long suspension bridges installed with structural health monitoring systems[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(4): 1640023.
- [25] Zeinali Y, Story B A. Impairment localization and quantification using noisy static deformation influence lines and iterative multi-parameter Tikhonov regularization [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 109: 399-419.
- [26] Zheng X, Yi T H, Yang D H, et al. Stiffness estimation of girder bridges using influence lines identified from vehicle-Induced structural responses[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, 147(8): 4021042.
- [27] 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

- ing capacity of highway bridges: JTG/T J21-2011 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [28] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21-01-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- 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, 2015.

Lightweight design method for structural health monitoring system of short- and medium-span bridges

YI Ting-hua, ZHENG Xu, YANG Dong-hui, LI Hong-nan

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: There are huge amount of short and medium-span bridges in transportation system and their collapse occurs frequently. How to reasonably design a structural health monitoring system for short and medium-span bridges has become a major demand in traffic engineering. Considering the engineering requirements of bridge monitoring, this paper deeply analyzes the difference between the monitoring requirements of short and medium-span bridges and large-span bridges, and puts forward the lightweight design concept of the structural health monitoring system for short and medium-span bridges for the first time. The lightweight design method and process including input monitoring, output monitoring and system calibration are systematically constructed. The supporting theories including system identification theory, structural analysis theory and load carrying capacity evaluation theory are detailed. At the end of the paper, a preliminary outlook for the future development of the method is given. This method provides a practical idea for standardizing the structural health monitoring technology of short and medium-span bridge, and promotes the practical process of intelligent bridge management.

Key words: health monitoring of bridges; short-and medium-span bridge; light-weight design; influence line; performance assessment

作者简介: 伊廷华(1979—),男,博士,教授。电话:(0411)84706050; E-mail: yth@dlut.edu.cn。