

文章编号:1671-6833(2011)01-0026-04

基于车桥耦合振动的桥梁检测方法研究

王凌波, 贺拴海, 蒋培文

(长安大学 公路学院, 西安 陕西 710064)

摘要: 利用车桥耦合振动原理结合车桥相关参数, 提出一种简捷实用的桥梁刚度健康状态快速检测方法. 利用 ANSYS 软件及其 APDL 语言, 编制出单一环境下的车桥耦合振动响应分析模块, 并与参考文献对比验证该模块的正确性. 利用该模块的批处理功能, 研究了车辆以 3 种速度匀速行驶通过跨中刚度减弱的简支梁桥时由于车桥耦合振动引起的车辆竖向加速度峰值的二维变化曲面图. 结果表明, 在 70 km/h 车速下, 该曲面较平滑, 对刚度降低参数变化较敏感, 可通过在测试车辆上预装加速度传感器并采集车辆过桥时的竖向加速度峰值, 反推桥梁刚度状态, 从而快速评估桥梁的大致健康状况.

关键词: 桥梁检测; 车桥耦合振动; 主梁跨中刚度下降; 2 维变化曲面图

中图分类号: U446.3; U441+.3 **文献标志码:** A

0 引言

近年来, 桥梁垮塌事件在世界各地层出不穷, 在役桥梁“老龄化”日趋严重, 旧桥危桥数量明显增多, 如何快速简便的对目前已建桥梁进行健康状况评估就成了一个研究热点. 目前, 国内外众多学者在桥梁检测评定方面进行了大量的研究, 提出了许多不同的检测方法. 但这些检测方法操作较为复杂, 全程消耗时间较长, 对交通影响较大, 对资金或检测人员水平要求较高.

随着电子计算机及相应有限元软件、数学软件的发展, 车辆过桥时的车桥耦合振动响应的研究有了明显的进展^[1-3]. 中外学者对简支梁桥车桥耦合振动问题的理论方法研究已经比较系统化、成熟化, 对连续梁桥、斜拉桥、悬索桥等复杂桥型也已有一定的研究成果. 影响桥梁健康状况的因素较多, 如混凝土开裂、钢筋锈蚀、预应力筋的有效预应力下降等等, 但病害桥梁最终由于承载能力的下降结果均会导致截面开裂, 截面刚度下降. 而截面的刚度不但是评价桥梁健康状况的重要指标, 同样是影响车辆过桥时车桥耦合振动响应的重要因素之一. 笔者针对目前检测方法的不足, 提出一种基于车桥耦合振动理论的桥梁检测方法, 选用重载车辆过桥为研究对象, 通过分析不同车速下主梁跨中附近刚度减弱对车辆竖向振动

加速度峰值的影响来简捷快速的评判桥梁的健康状况.

1 基于车桥耦合振动的检测方法概述

车辆行驶过桥时会和桥梁间产生相互振动, 即车桥耦合振动. 在已知车辆参数(车速、车重、轴距等)与桥梁参数(截面参数、跨径、结构形式等)的前提下, 对系统进行车桥耦合振动动力分析, 可以得到车辆以不同车速行驶过桥时产生的车辆竖向加速度时程曲线, 进而得到车辆竖向加速度的理论峰值. 将该车辆理论竖向加速度峰值与车辆上预装的加速度传感器所测试到的竖向加速度实测峰值进行对比, 即可大致评定出该桥梁的实际健康状况. 其检测方法的操作流程如图 1 所示.

与传统的检测方法相比较, 笔者方法无需在桥面布置复杂的参数采集仪器, 无需租用大量的加载车辆进行试验, 更无需在实验过程中封锁交通. 只需经重载车辆在桥梁上匀速行驶, 即可大致评价在役桥梁的实际健康状况, 简捷且易于操作, 具有良好的发展前景.

2 车辆竖向加速度理论值计算的程序实现

利用 ANSYS 软件内部的 APDL 语言, 根据车辆过桥时的耦合振动特性, 编制出参数化的车桥

收稿日期: 2010-06-19; 修订日期: 2010-09-20

基金项目: 国家西部课题资助项目(2007 318 812 32)

作者简介: 王凌波(1984-), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向为桥梁检测加固, E-mail: nancywlb1984@163.com.

耦合振动宏模块^[4-6].在 ANSYS 环境下按照常规方法建立出桥梁模型后,只需要将该宏作为一个命令在 ANSYS 命令行中输入,便可实现对复杂桥梁的车桥耦合振动分析求解,如图 2 所示.

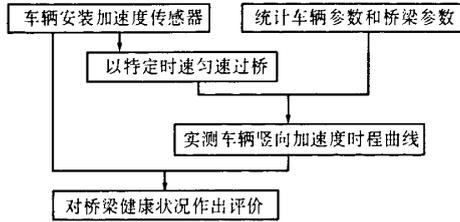


图 1 笔者检测方法操作流程

Fig.1 The flowchart of testing method

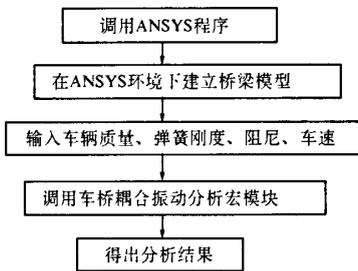


图 2 车辆竖向加速度求解流程图

Fig.2 The solving flowchart of vehicle acceleration peak value

2.1 1/2 车辆模型匀速通过简支梁时的车桥耦合振动分析

1/2 车辆模型作用下的简支梁车桥耦合振动分析模型如图 3 所示,车辆简化为两系的弹簧-阻尼-质量系统.车辆和桥梁的技术参数按照文献[7]取值,具体数据如表 1~表 2 所示.

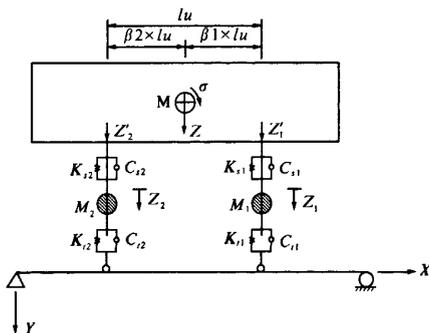


图 3 二分之一车辆模型作用下的简支梁

Fig.3 Simply supported beam with 1/2 vehicle module

利用笔者计算模块进行计算分析,并且与参考文献[7]中的插图对比,如图 4~图 5 所示.

表 1 车辆技术参数

Tab.1 Bridge parameters

车辆模型	1/2 车辆模型
前后轴轮对质量/kg	4 330
前后轴一系垂向刚度/(N · m ⁻¹ × 10 ⁶)	4.28
前后轴一系垂向阻尼/(kg · s ⁻¹ × 10 ⁴)	9.8
前后轴二系垂向刚度/(N · m ⁻¹ × 10 ⁶)	2.535
前后轴二系垂向阻尼/(kg · s ⁻¹ × 10 ⁴)	19.6
车体质量/(kg × 10 ⁴)	3.85
车体转动刚度/(kg · m ² × 10 ⁶)	2.446

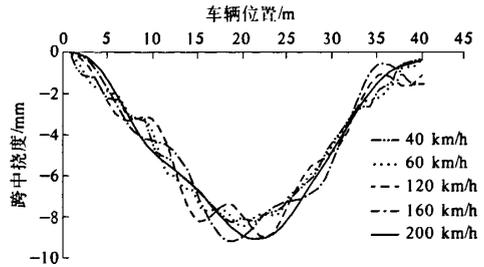


图 4 笔者方法分析结果

Fig.4 The results of the analysis method

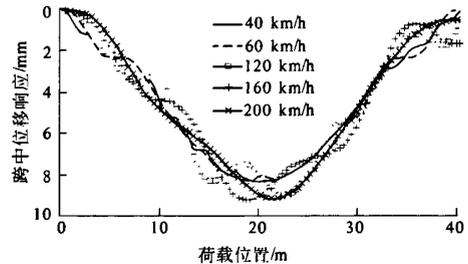


图 5 参考文献[7]分析结果

Fig.5 The results of reference[7]

由以上对比结果可以看出,利用 ANSYS 内部 APDL 语言编写车桥耦合振动宏模块,对软件进行二次开发.该方法思路明确,操作简便,充分利用了大型有限元通用程序 ANSYS 的强大功能,无需多次整体迭代,适用于各种形式的桥梁.通过与 1/2 车辆模型的车桥耦合振动相应参考文献的对比可以发现,该方法计算结果与参考文献结果吻合,并具有良好的精度^[8-10].

3 桥梁局部刚度下降对车辆竖向振动加速度的影响分析

笔者研究了 40、70 和 120 km/h (低速、中速和高速)3 种速度下刚度减弱对车辆竖向振动加速度的影响.由于简支梁刚度下降一般均由跨中开始,假定刚度下降段中心在跨中,下降段长度由 0 变化到 15 m,步长 1 m,刚度下降比例由 0 变化到 0.5,步长 0.05,经排列组合,每个速度下共 16

$\times 11 = 176$ 个工况. 运用笔者基于 ANSYS 的车桥耦合计算模块进行批处理运算, 研究当跨中刚度下降参数(下降段长度与下降比例)与车辆行驶速度变化时的车桥耦合振动响应规律, 并将车辆竖向加速度峰值计算结果绘制成 2 维曲面变化图以方便研究. 其中, 计算涉及的简支梁参数如表 3 所示.

表 2 1/2 模型选用桥梁技术参数

Tab.2 1/2 model parameters of simply supported beam

桥梁模型	跨径/ m	单位长度质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗弯刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)
简支梁	32	5.41×10^3	3.5×10^{10}

表 3 笔者算法选用桥梁技术参数

Tab.3 Parameters of simply supported beam with order method

桥梁模型	跨径/ m	单位长度质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗弯刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)
简支梁	30	6.732×10^3	1.646×10^{10}

分析结果如图 6 所示:

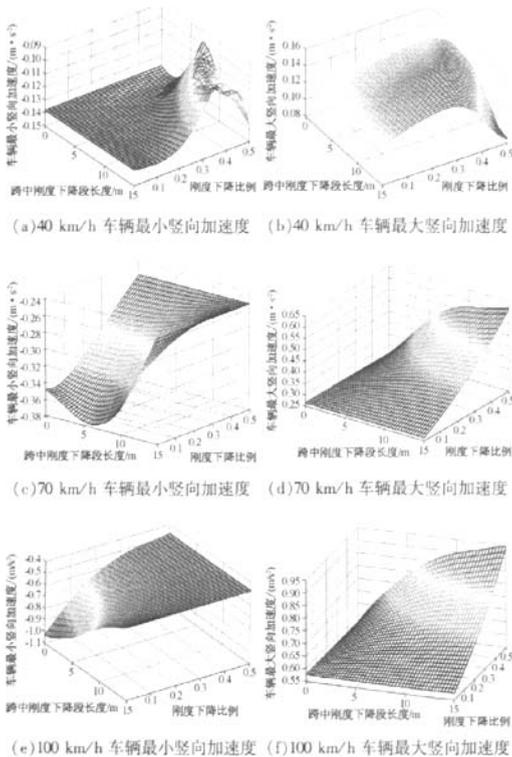


图 6 各速度下车辆竖向加速度变化图

Fig.6 Vertical acceleration variations in each speed

由以上各图可以看出:

(1) 当车辆以 40 km/h 行驶过桥时, 车辆最

小竖向加速度图示曲面凹凸不平, 在刚度下降段较小和刚度折减度较低时, 加速度变化趋势不明显; 虽然在刚度下降段处于 5 ~ 10 m 而刚度折减达到 0.3 以上时, 加速度会有阶段性大幅度提升, 但随后又会出现剧烈而无规律的下降; 车辆最大竖向加速度图示曲面光滑平整, 在整个刚度范围和数值变化的过程中, 加速度变化趋势明显; 但在刚度下降段处于 5 ~ 10 m 而刚度折减达到 0.3 ~ 0.4 之间时, 加速度会达到一个峰值, 随后出现明显的加速度回落.

(2) 当车辆以 70 km/h 行驶过桥时, 车辆最小竖向加速度图示曲面光滑平整, 在刚度下降过程中, 加速度变化明显呈直线下降趋势, 加速度变化与刚度下降幅度有良好的对应关系; 车辆最大竖向加速度图示曲面光滑平整, 在刚度下降过程中, 加速度变化明显呈直线上升趋势, 加速度变化与刚度下降幅度有良好的对应关系.

(3) 当车辆以 100 km/h 行驶过桥时, 车辆最小竖向加速度图示曲面光滑平整, 在刚度下降段较小和刚度折减度较低时, 加速度变化趋势比较明显; 但在刚度下降段处于 10 m 以下而刚度折减只有 0.4 以下时, 加速度数值变化不明显, 无法判别本刚度变化范围内的真实状态; 车辆最大竖向加速度图示曲面光滑平整, 在刚度下降过程中, 加速度变化明显呈直线上升趋势, 加速度变化与刚度下降幅度有良好的对应关系.

经以上分析, 对该简支梁桥进行健康评价时, 可以在重载车辆上加装加速度传感器, 令其以 70 km/h 附近的行驶速度匀速过桥, 并采集加速度传感器的响应数据, 将该数据与理论值进行对比, 即可得到桥梁刚度的实际状态, 从而大致评价桥梁结构的实际健康状况, 达到快速检测的目的.

4 结论

利用大型通用有限元程序 ANSYS 及其 APDL 语言开发了车桥耦合振动计算模块, 并与 1/2 车辆模型的车桥耦合振动参考文献进行对比来验证该模块的正确性.

运用本模块的批处理功能, 通过百余个工况下的计算数据详细分析了简支梁桥跨中刚度下降参数(包括下降段长度及下降比例)与车辆行驶速度同时变化时的车辆加速度的变化规律, 利用 MATLAB 对数据进行了处理并给出了相应的 2 维变化曲面图.

通过以上分析可以发现, 简支梁桥车桥耦合

振动过程中,车辆竖向加速度峰值受主梁刚度降低和车速变化的共同影响.在车速40 km/h时,车辆最大、最小加速度变化趋势与刚度变化无良好对应关系,不适于作为桥梁评价的依据;在车速70 km/h时,车辆最大、最小加速度变化趋势与刚度变化均呈现良好的对应关系,理论上可以方便快捷的作为桥梁健康评定的准则;在车速100 km/h时,车辆最小加速度在刚度变化不大时,对应关系不明显,车辆最大加速度变化与刚度变化呈现良好对应关系,所以本速度时车辆最大加速度可以单独作为桥梁刚度变化的评价手段.

综上所述,简支梁桥车桥耦合振动时的车辆加速度峰值变化规律受到车辆行驶速度的影响程度较大,当车速在中速(70 km/h前后)时,利用笔者基于车桥耦合振动的检测方法对车辆最大、最小加速度峰值进行采集,可以简捷、快速的对简支梁桥健康状况作出评定.

建议在后续的研究中,增加影响车桥耦合振动的动力评定参数以及对各种跨径简支梁的实用检测车速进行统计,明确本检测方法的实用车速范围,更加准确的实现桥梁健康状况快速检测的目的.

参考文献

- [1] 张雄,王天舒.计算动力学[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [2] 宋一凡.公路桥梁动力学[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [3] 曹雪琴.桥梁结构动力分析[M].北京:中国铁道出版社,1987.
- [4] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [5] 邓凡平.ANSYS10.0有限元分析自学手册[M].北京:人民邮电出版社,2007.
- [6] 博弈创作室.APDL参数化有限元分析技术及其应用实例[M].水利水电出版社,2004.
- [7] 沈火明,肖新标.求解车桥耦合振动问题的一种数值方法[J].西南交通大学学报,2003,38(6):658-662.
- [8] 交通部第二公路勘察设计院.公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)[M].北京:人民交通出版社,1998:1-5.
- [9] 陈榕峰.公路桥梁车桥耦合主要影响因素仿真分析方法研究[D].西安:长安大学公路学院,2007.
- [10] 肖新标,沈火明.移动荷载作用下桥梁的系统仿真[J].振动与冲击,2005,24(1):121-123.

A Bridge Testing Method Based on Coupled Vibration of Vehicle-bridge

WANG Ling-bo, HE Shuan-hai, JIANG Pei-wen

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on theory of Coupled Vibration of Vehicle-Bridge and characters of vehicle and bridges, this paper proposes an easy way to judge the state of health of bridges' stiffness. This paper uses ANSYS with APDL language to program the module for vehicle-bridge coupled dynamical analysis in a single environment, which is verified in agreement with classic references. The paper based on module batch processing does a research when a vehicle passes weaken stiffness bridges in three uniform speeds, the change trend for vehicle acceleration peak value of the control section by coupled vibration of vehicle-bridge, and draws their 2D interactions trend figures. The results show that because the curved surface of figure is quite smooth and sensitive to rigidity reduced parameter variations in 70 km/h speed, engineers can calculate the actual stiffness by collecting vehicle acceleration peak value when vehicle pass the bridges, so as to rapidly evaluate the approximate state of health of bridges.

Key words: bridge testing; coupled vibration of vehicle-bridge; girder stiffness reduction in mid-span; 2D interactions trend figures