

高架桥振动模型分析与健康检测

汪寅章

南京邮电大学 电子与光学工程学院, 江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/TACS.2026050043

摘 要 : 为延长高铁高架桥的使用时间, 提高其维护效率, 降低其检测与维护成本, 首先对高架桥这一常见轨道交通的铁轨进行理论振动模型分析。设置不同参数的车辆模型, 得出其在同一轨道上运行的振动方程, 以代表不同的车辆产生的不同振动, 再利用同步压缩小波变换获取其时频特性与相关谱图。通过与其他研究者的研究相比较, 并从时域和频域等维度分析后认为, 该模型具有合理性和完备性。随后利用自研制振动检测设备采集了河北某地高铁轨道一段时间的振动信号数据, 并回收。通过分析该振动信号, 提取其时频谱特征, 将实测振动信号与振动模型相比较, 认为该段高铁轨道健康状况良好。并且该方法可为高架桥振动和健康检测提供思路。

关 键 词 : 高铁振动; 模型仿真; 实测信号; 车桥检测; 同步压缩小波变换

Vibration Model Analysis and Health Inspection of Viaduct

Wang Yinzhang

Nanjing University of Posts and Telecommunications, School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing, Jiangsu
210000

Abstract : In order to prolong the service time of high-speed railway viaducts, improve their maintenance efficiency and reduce their inspection and maintenance costs, the theoretical vibration model of viaducts, a common rail transit track, is first analyzed. The vehicle models with different parameters are set up, and the vibration equations of the vehicles running on the same track are obtained to represent the different vibrations generated by different vehicles. Then, the time-frequency characteristics and correlation spectra of the vehicles are obtained by using synchronous compressed wavelet transform. Compared with other researchers' research, and analyzed from time domain and frequency domain, the model is reasonable and complete. Then the self developed vibration detection equipment was used to collect the vibration signal data of a high-speed railway track in Hebei for a period of time, and the data was recovered. By analyzing the vibration signal, extracting its time-frequency spectrum characteristics, and comparing the measured vibration signal with the vibration model, it is considered that the high-speed rail track in this section is in good health. And this method can provide ideas for viaduct vibration and health detection.

Keywords : high speed rail vibration; model simulation; measured signal; axle detection; synchronous compression wavelet transform

引言

相关统计数据显示, 截止 2021 年 4 月, 我国铁路营业里程达 14.63 万公里, 高速铁路运营里程达 3.79 万公里, 位居世界第一, 最高速度达到 350 km/h。由于列车以高速运行, 必然会造成较强的环境振动。列车的高速移动必定会给轨道及其承重结构带来一定程度上的振动, 而如果振动频率引起共振或振动幅度较大, 则有可能影响铁路高架桥等交通线路的健康与安全^[1]。那么, 高铁轨道振动状态和车桥健康安全情况则是一个亟待解决的问题。

目前由于国内高铁技术的快速发展, 对于该领域的研究主要集中于国内的研究组。

李小珍等^[2]于 2012 年对简支桥在列车运行下的振动开展了研究, 其构建了桥梁在任意移动荷载列模型作用下其竖向振动的解析表达式。该表达式包含了列车速度、桥梁重量和刚度、阻尼系数等维度, 具有较高的完备性。在随后的研究中^[3], 李小珍等分析了以 250 ~ 385 km/h 运行的列车产生的振动, 利用模型仿真和实测数据得出结论, 列车各部分振动具有一定的周期性, 其原因是车轮和钢轨接缝的周期性碰撞, 同时车体和桥梁的振动加速度级在 80dB 之内。同年, 宋晓东等^[4]对某一段高速铁路的简支箱梁竖向向下振动基频进行分析和研究, 其根据桥梁材质和列车速度等因素判断出, 不同车速下 33.1m 跨度的桥梁基于预应力的基频, 并且指出在车桥设计与建设时应当避免这些基频, 以免列车引起共振, 造成桥梁损伤。这一研究具有一定的实际工程意义。

在以往的研究中,主要采用图像分析方法和雷达反射波等方法检测高铁车桥等健康状况。现有的系统通常需要布置多组、多种传感器^{[4][5]},包括温度传感器、应力传感器、位移传感器等。这种系统具有一定的复杂度,成本较高,维护较难。相对而言,北京交通大学杨叶^[6]等设计了基于图像采集技术的嵌入式 GPU 平台检测系统,此研究通过该平台采集数据和构建数据集,为在不同外界条件下的健康检测和异物判定提供了数据基础,其在初步的测试中整体准确率达到 96% 以上。刘志平等^[7]利用毫米波探底雷达这种设备检测高速铁路桥梁振动情况,同时与理论模型做对比,从振动波形等信息判断桥梁健康与安全状况。

基于以上调研,本研究提出一种根据套高架桥振动波形检查其健康状况的方式。本研究采用自研制的振动检测设备采集高架桥振动信号,通过振动加速度时频分析等方式分析采集到的信号,并与构建的振动模型做对比,以判定高速铁路高架桥等车桥结构的使用状况,从而为车桥检修提供一定参考。

一、模型构建与仿真

高架桥振动主要由列车经过轨道时的外力引起,根据受迫振动原理,轨道所受外力主要为列车重力等竖直方向的力,所以其主要受迫振动为竖直方向振动。假设高架桥及轨道处于健康状态,则其密度 ρ 不随轨道坐标位置变化而变化,保持为一个定值。当列车匀速运行时列车速度为 v ,由于每一节列车车厢长度近似相等,所以可以将列车对某一轨道定点的压力看作似周期压力^[8]。

在似周期激励下的轨道受迫振动的一般振动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

在初始状态为 0 的条件下的解析解为:

$$x(t) = x_1(t) + Be^{-\xi\omega_d t} \left[\sin \theta \cos \omega_d t + \frac{\omega_d}{\omega_n} (\xi \sin \theta - \lambda \cos \theta) \sin \omega_d t \right] + B \sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

其中, $x_1(t)$ 为自由振动,持续时间较短,并且会快速衰减,

在本研究中忽略不计; $B = \frac{P_0}{k}$ 为静位移, p_0 为振力幅, k 为弹性系数; ξ 为阻尼系数; $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$, ω_n 为固有圆频率。

设相每一节车厢长度为 L ,则 x_0 点受迫振动周期为 $t_0 = \frac{L}{v}$ 。设一列列车有 n 节车厢。

当列车靠近采集点时,采集点振动主要为采集前置点的受迫振动引起的伴随受迫振动的自由振动,其具体形式为(2)式中的第二项。该振动本质上属于瞬态响应,当列车到达采集点或受迫振动持续了较长时间后,则主要振型被受迫振动这一稳态响应取代,即为(2)式中的第三项。

当 $0 \leq t < \frac{nL}{v}$ 时,采集点振动主要是由车厢载荷引起的受迫振动;当 $t \geq \frac{nL}{v}$ 时,采集点振动主要为列车载荷离开后轨道的伴随自由振动。

由振型叠加原理,对 n 节车厢引起的振动叠加,其振动响应解析式为:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{nL} Be^{-\xi\omega_d t} \left[\sin \theta \cos \omega_d t + \frac{\omega_d}{\omega_n} (\xi \sin \theta - \lambda \cos \theta) \sin \omega_d t \right] + \sum_{n=1}^{nL} B \sin \left(\omega \frac{L}{v} - \theta \right) \quad (3)$$

对上述解析式所描述的模型进行仿真波形绘制,波形图如图 1 所示。

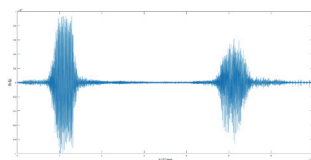


图 1 仿真信号时域振动波形图

在仿真波形中,假设有两列列车经过振动采集点,时常共 70s。两列列车的质量分别为 m_1 、 m_2 ,且 $m_1 > m_2$;列车长度分别为 L_1 、 L_2 ,且 $L_1 < L_2$,二者速度均为 v ,匀速行驶。从图中可以看出,对振幅做归一化处理后列车 2 由于质量较小,其振幅也相对小于列车。

对此波形图做同步压缩小波变化,其时频谱图如图 2 所示。

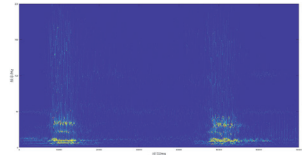


图 2 仿真信号时频谱图

从该时频谱图可以看出,仿真列车产生的振动主要集中在 10Hz 和 30Hz 左右,该结果与文献^[9]分析内容一致,并且强振动信号在时间域上与时域振动波形吻合,那么我们认为该仿真模型具有较高的参考性。

二、实测数据分析

本研究根据自研制的振动勘测设备设计高铁车桥健康检测方案。在河北某地高铁高架桥附近放置了若干自研制的振动检测设备,设备距离列车轨道约 14m,用以收集高速列车经过时产生的振动信号。设备有稳定的 5G 通信模块和超长电池寿命,可支持长时间的振动检测和通信。采集器以埋藏方式放置在高铁线路附近。设备运行后持续采集周边环境的振动数据,根据既定程序,每间隔 1 小时将数据块发送到云端服务器。数据块信息包括基本振动数据、采集开始时间、经纬度坐标、存储器剩余空间等等。随后利用基于 matlab 开发的 GM_Tools 地震波处理软件进行管理和分析。

采集完毕后回收解析设备数据,查看全部采集到的时段的信号波形,筛选出设备位置合适、数据完整、没有损坏的、具有代表性的实测数据段进行分析,最终选定两个设备中同一时段采集到的振动信号。为便于分析,将截取的数据段的起始时间点设为相对时间零点,两组信号分别命名为 A、B,截取的一段信号如图 3 示。

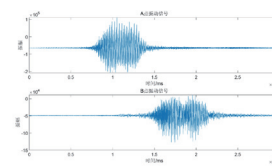


图 3 实测信号时域振动波形图

实测数据振动幅度与模拟波形接近,且在强振幅信号前后都有明显的列车靠近和离开采集点的过程,即振动幅度较小、持续时间较长的自由振动振动信号。

对实测信号做同步压缩小波变化,其时频谱图如图4所示。

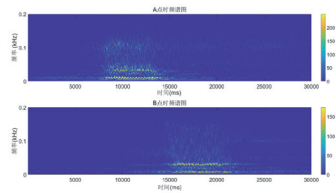


图4 实测数据时频谱图

实测振动信号的主要频率集中在10Hz和30Hz两个频点左右,该结果与模拟结果一致。

为了进一步分析高铁振动信号的其它振动特征,对模拟信号做二阶差分求导,再绘制其时频谱图。如图5所示。

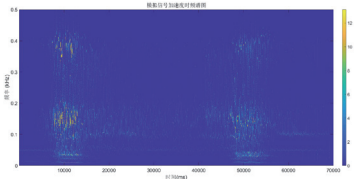


图5 模拟信号的加速度时频谱图

从加速度的时频谱图可以看出,高铁高架桥所受竖向冲击力的频率主要在150Hz和350Hz左右,结合文献^[10]中对车轨耦合以及地面振动的研究,在列车质量较大的情况下会出现两个压力频点,其中350Hz的较高频率频点为大质量引起的叠加振动频率。多种受力作用下的车桥轨道会产生多个频率的振动,若与车桥轨道的基频相对应、产生共振现象,将会对桥梁健康和安全造成威胁^[11]。从检测角度而言,应加强对大质量列车对桥梁压力的检测。

结合《城市区域环境振动测量方法》计算和分析二者的振级。根据国家《城市区域环境振动测量方法》^[12],振级定义公式为:

$$VAL = 20 \log_{10} \frac{a_0}{a} \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

其中,a为振动加速度有效值, $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 为基准加速度。模拟数据和实测数据的竖向加速度有效值和振级如表1所示。

表1 各组数据竖向加速度有效值和相应振级

	模拟信号	实测信号 A	实测信号 B
加速度有效值	1500.208 mm/s ²	1491.546 mm/s ²	1506.043 mm/s ²
振级	76.447dB	74.378dB	77.043dB

从表中可以看出,实测数据振级与模拟数据误差较小。当桥梁受损或产生共振现象时,其振级将远大于理论模拟值^[7]。设备放置距离轨道20m,根据其采集到的高铁振动信号,被检测的两列列车产生的振动噪声的振级,低于《城市区域环境振动测量标准》所规定的30m外振级低于80dB的要求,故不会对周边环境造成影响。振级主要用于噪声防治方面研究,本文不予过多阐述。

由文献^[1]可知,列车竖向激振频率可由列车速度v和列车车长度d进行估计 $f = v / (3.6d)$ 。我国目前主要客运列车车厢长度约为26m左右,稳定运行速度一般为350km/h,其对应共振基频为3.74Hz。从图2可以看出,测试段轨道振动主频为10Hz,频率较

低的次峰信号频率也在6Hz左右,远高于理论值。从目前测试和分析结果来看,实地测试的该段高铁线路桥梁健康状况良好。

三、结论

本研究通过模拟数据和实测数据对比,对河北某段高速铁路桥梁振动情况进行检测,并以其判定桥梁的健康状况,研究结果如下:

与其它研究相对比,利用列车振动方程构建的简化振动模型能较好地模拟和表达列车经过高铁轨道某一点时产生的振动情况,这一点为后续实测数据的分析和对比提供了理论支撑。高速列车产生的振动信号主要集中在10Hz和30Hz两个频点,其中10Hz频率的信号强度最大,为主峰信号;30Hz的频率信号相对较弱,但也会对车桥轨道产生影响。在列车质量较大时,车桥轨道受到的似周期压力会出现多个频率的情况,即如图5所示,有150Hz和350Hz两个频率的压力对轨道造成振动影响。从共振角度考虑,多个频率的周期振动会对车桥轨道的防护造成压力,需要对多个共振频点进行检测和防护。从实际采集到的数据来看,被采集段的高铁轨道健康状况良好,振动和受力情况在安全指标内,且有一定的安全余量。

本研究尚有不足之处。除了文中所述参数外,还有材料的弹性系数、车辆质量分布、车辆结构对振动的影响等方面没有考虑,高铁振动模型还有待进一步优化。同时对于高架桥振动的检测数据有待补充和完善,对于不同的轨道和车辆,需要较大的历史数据作为检测和基础,该方面需要进一步补充。

参考文献

- [1] 宋晓东, 邱晓为, 李小珍, 等. 莫-喀高速铁路简支箱梁竖向下限基频研究 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4):6.
- [2] 李小珍, 张志俊, 刘全民. 任意移动荷载作用下简支梁桥竖向振动响应解析分析 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(20):6.
- [3] 李小珍, 陈桂媛, 朱艳, 赵宇. 高速铁路轨道-桥梁-土体系统的振动传递特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(17):58-64+72.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2019.17.008.
- [4] 梅琴. 高速铁路大跨度桥梁钢轨伸缩调节器区轨道结构健康监测系统设计及应用 [J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(05):33-37.
- [5] 陈兴权, 王莹, 杨宏印, 王亚飞, 李培涛. 某重载铁路连续刚构桥梁健康监测方案设计 [J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(05):557-561.DOI:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202009012.
- [6] 杨叶. 基于嵌入式GPU平台的铁路异物入侵检测系统研究 [D]. 北京交通大学, 2021. DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.001613.
- [7] 刘志平, 罗翔, 何秀凤. 利用毫米波雷达测量系统的高铁车桥振动检测 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(04):561-568.
- [8] 杨飞, 吴细水, 孙宪夫, 魏子龙, 柯在田, 杨爱红. 钢轨轧制不顺顺激扰下的动车组动力响应特性 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(02):267-276+294.
- [9] 包乾宗, 许杰, 许明瑞. 高铁地震信号时频特征对比分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(05):805-812.DOI:10.13209/j.0479-8023.2019.076.
- [10] 贾颖绚. 基于解析的车轨耦合模型及地铁对环境的振动影响研究 [D]. 北京交通大学, 2009.
- [11] 李小珍, 邱晓为, 刘德军, 等. 时速400 km/h铁路常用跨度预应力混凝土简支梁竖向基频限值研究 [J]. 工程力学, 2018, 35(5): 204-213.
- [12] GB/T 10071-1988, 城市区域环境振动测量方法 [S].