

利用毫米波雷达测量系统的高铁车桥振动检测

刘志平¹, 罗翔^{1,2}, 何秀凤³

(1. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 天津市测绘院有限公司, 天津 300381;

3. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对高速铁路桥梁的实时高精度、非接触振动检测需求,以车桥竖向振动理论解析结果为参考提出了毫米波雷达精密测距改进算法,进而基于IWR1443芯片开发了毫米波雷达测量系统并实现了振动信号采集、解码及处理一体化。最后利用该系统开展了京沪线淮河特大桥徐州段32m简支梁桥振动检测试验和动态挠度计算及时频分析。结果显示,广义S变换和标准时频变换提取的三维谱阵揭示了高速列车动载下桥梁振动过程,竖向挠度、跨挠比和振动主频及类型均与理论分析一致且远高于《高速铁路设计规范》现行限值,表明所检测桥梁结构健康状况良好的同时验证了毫米波雷达车桥振动检测的准确性和有效性。

关键词: 高速铁路;简支梁桥;毫米波雷达测量系统;振动检测;动态挠度

中图分类号: P228

文献标志码: A

Vibration Detection of High-speed Railway Bridge Using Millimeter Wave Radar Measurement System

LIU Zhiping¹, LUO Xiang^{1,2}, HE Xiufeng³

(1. Key Laboratory for Resources and Environment Information Engineering of Jiangsu Province, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Tianjin Institute of Surveying and Mapping Co. Ltd. Tianjin 300381, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To meet the real-time, high-precision and non-contact vibration detection requirements of high-speed railway bridge, this paper investigates the theory of vertical vibration model of bridge and the precise ranging algorithm of millimeter wave radar. Based on the IWR1443 millimeter wave radar chip, a millimeter wave radar measurement system is developed to realize the integration of vibration signal measurement, acquisition, decoding and processing. Then the vibration detection

experiment of 32m simply supported bridges in Xuzhou section of SUIHE super large bridge on Beijing-Shanghai line is carried out with this measurement system, and the data are analyzed by time-frequency analysis method. Analysis results show that the three-dimensional spectrum array, which is extracted by the generalized S-transform and the standard time-frequency transform, reveals the bridge vibration process under the dynamic load of the high-speed train. The dynamic vertical deflection, the deflection span ratio, the main frequencies and vibration type of bridge are determined, which are consistent with the theoretical analysis, and the performance of bridge structure is better than current design limit value of high speed railway. This indicates the SUIHE bridge structure is in good health and verifies the accuracy and effectiveness of millimeter wave radar measurement system.

Key words: high-speed railway; simply-supported girder bridge; millimeter wave radar measurement system; vibration detection; dynamic deflection

我国高速铁路营业里程2019年达35 000Km、桥梁占比超过70%且以32m简支梁桥为主,成为名副其实高铁强国^[1~2]。然而,高铁在方便人们出行与助力经济发展的同时,其桥梁结构潜在隐患也危及人们生命财产安全,务必进行结构动力性能测试与振动检测分析^[3~5]。桥梁挠度作为判定桥梁刚度和承载能力的重要参数^[5],是评价桥梁结构健康状况的重要依据。因此,利用各种技术开展挠度测量对新建高铁桥梁工程验收和现役高铁桥梁安全性评价具有重要意义。公路桥梁远比高铁桥梁发展历史长,目前可借鉴的公路桥梁挠度测量方法主要包括倾角仪^[6~7]、液位计^[8]、测量机器人^[9]、GNSS^[10~11]、GNSS

收稿日期: 2020-05-02

基金项目: 国家自然科学基金重点(41730109, 41830110);国家自然科学基金面上项目(41771416)

通信作者: 刘志平(1982—),男,副教授,工学博士、主要从事测量误差理论与反演、导航定位与传感技术研究。

Email: zhpliu@cumt.edu.cn.



与加速度计^[12]点观测技术以及三维激光扫描^[13]、地基干涉雷达^[14]和分布式光纤传感技术^[15]面观测技术。其中,三维激光扫描、地基干涉雷达可流动安装,GNSS、测量机器人需事先安装,其余均需预埋设安装,安装过程须暂停线路运营,不利于实现大规模非接触式振动检测。而且,除GNSS、加速度计能达到数十至数百赫兹采样率外,其余均为低采样率,难以满足高速列车通过简支梁桥短至数秒时间内的高频动态挠度(动挠度)测量需求。

综上,具备高频、高精度且可流动安装的挠度测量技术是大规模非接触式高铁桥梁振动检测的首选。近年来,毫米波器件性能不断提高、成本不断降低、体积不断减小,毫米波通信、毫米波成像及毫米波雷达在高速宽带无线通信、安检、医学检测尤其是自动驾驶等民用领域得到了广泛关注^[16~17]。鉴于工业毫米波达上述优点,而且便于携带、即测即走、无需预埋设安装,本文引入毫米波雷达进行高铁桥梁动挠度测量研究。首先在精密测距改进算法基础上开发了自动化采集与处理的毫米波雷达测量系统,并开展了京沪高铁线路濉河特大桥徐州段的高铁车桥毫米波振动检测试验。进而,对高铁桥梁动挠度响应非平稳信号的理论解析与实测结果进行现代时频分析,同时统计分析桥梁动挠度与跨挠比。研究表明,理论解析与毫米波雷达实测结果相一致,验证了本文毫米波雷达测量系统的正确性和可靠性。

1 毫米波雷达高铁车桥振动检测

1.1 高铁车桥振动解析模型

高速列车通过简支梁桥时,桥梁受到的外力主要为车体质量变化引起的竖向重力变化,因此竖向振动是简支梁振动的主要成分。假设简支梁为等截面、梁体质量均匀分布、以及运动在弹性范围内满足小变形理论,可建立简支梁强迫振动微分方程。据此,进一步可以推导荷载过桥时、离桥后简支梁挠度响应解析式^[4,18]

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\xi_n \omega_n t} \sin \frac{n\pi x}{L} \cdot (A_n \cos \bar{\omega}_n t + B_n \sin \bar{\omega}_n t) + \sum_{j=1}^{\infty} K_n^{-1} \sin \frac{n\pi x}{L} (A_{jn} \cos j\theta t + B_{jn} \sin j\theta t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{0n}}{K_n} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (1)$$

$$y'(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\xi_n \omega_n t'} \sin \frac{n\pi x}{L} A_{nm} \cos \bar{\omega}_n t' + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\xi_n \omega_n t'} \sin \frac{n\pi x}{L} B_{nm} \sin \bar{\omega}_n t' \quad (2)$$

式中: $t' = t - (L + d_N)/v$, L 为简支梁长度, d_N 为简化荷载力距离; ω_n 、 $\bar{\omega}_n$ 分别为 n 阶固有振动频率和 n 阶有阻圆频率, ξ_n 是阻尼比, K_n 、 A_n 、 B_n 、 A_{nm} 、 B_{nm} 、 A_{jn} 和 B_{jn} 均为参数中间项。

1.2 毫米波雷达精密测距

线性调频毫米波雷达是一类使用短波长电磁波的特殊雷达技术,通过对波长为毫米级的载波进行调频操作,使传输的信号频率随时间成线性变化。

若以 f_0 表示信号初始频率, T_0 表示信号调频周期, B 表示带宽,令调频斜率 $k = B/T_0$,则可得线性调频信号 S 的瞬时表达式为

$$S(t) = A_0 \cos 2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) \quad (3)$$

其中, $0 \leq t \leq T_0$ 。

毫米波雷达进行观测时,发射线性调频信号 S 并被测量对象反射回接收机,之后将发射信号和回波信号输入混频器,获得有效的中频信号 S_{IF} 。假设毫米波雷达与目标距离为 R_0 ,则接收发射信号的时延为 $2R_0/c$, c 为光速,此时中频信号 S_{IF} 其对应的瞬时频率 f_{IF} 为

$$S_{IF}(t) = \frac{2k}{c} R_0 \quad (4)$$

由式(4)可知,所得中频信号的频率大小与目标距离成正比,中频信号的频率估计精度直接影响雷达测距精度。一般地,基于离散傅里叶变换的频率估计受限于频率分辨率,往往只能达到厘米级的粗测距精度,难以满足现代工程测量的毫米级甚至更高精度需求。考虑到在实际频率估计中,只需提取频谱主频并不关心其它位置的谱线,据此思路本文采用频谱细分联合谱线校正的方法来提高主频部分的频谱分辨率与估计精度。

根据频谱细分思路,利用 Chirp-Z 变换^[19]对离散序列的 Z 变换进行细分,则各细分采样点 Z_k 表示为

$$Z_k = A_0 W_0^{-k} e^{j(\theta_0 + k\varphi_0)} \quad (5)$$

式中: N 表示螺旋线上等分角采样点数, $k \in [0, 1, \dots, N-1]$; A_0 表示螺旋线上起始采样点半径; θ_0 表示沿逆时针的起始样点相角; φ_0 表示两相邻采样点之间的角频率差。

将 Chirp-Z 变换参数设为 $A_0 = 1$, $W_0 = 1$, 采样螺旋线会变为单位圆且各采样点 Z_k 均匀分布在单位

圆上,此时对信号频谱进行插值则可提高频率分辨率。其次,顾及真实峰值谱线往往落在主峰值、两侧次大峰值多个谱线之间,以真实峰值谱线为中心建立坐标系,则主峰谱线及两侧次大峰谱线坐标分别为 $(-\epsilon, X_m)$ 、 $(-1-\epsilon, X_{m-1})$ 、 $(1-\epsilon, X_{m+1})$ 。其中,横坐标为谱线索引,纵坐标为频率幅值, ϵ 是主峰谱线与真实谱线的索引差值。至此,为进一步提高频谱估计精度,利用抛物线建立频谱校正方程如下:

$$\begin{cases} X_{m-1} = a(1+\epsilon)^2 + b \\ X_m = a\epsilon^2 + b \\ X_{m+1} = a(1-\epsilon)^2 + b \end{cases} \quad (6)$$

若利用方程式(6)消去其抛物线系数 a, b ,则可导出谱线索引差值 ϵ 的参数估计式如下:

$$\hat{\epsilon} = \frac{X_{m-1} - X_{m+1}}{2(X_{m+1} + X_{m-1} - 2X_m)} \quad (7)$$

1.3 毫米波雷达测量系统构建

毫米波雷达硬件采用了美国德州仪器(Texas Instruments, TI)公司生产的IWR1443工业级毫米波雷达芯片,工作频段为77~81GHz。该芯片包括射频模块、信号控制模块和信号处理模块,是一个成本低体积小的单片FMCW毫米波雷达传感器,便于携带、即测即走、无需预埋安装。此外,芯片集成了Cortex-R4F嵌入式实时信号处理器,内嵌一个用于雷达数据后处理的硬件加速器,支持用户进行编程修改和传感器重构。

本文利用IWR1443芯片构建了毫米波雷达测量系统。首先,通过UART串口连接IWR1443与上位机,基于用户开发工具(software development kit, SDK)及硬件开发程序(code composer studio, CCS)实时触发调用硬件设备、实时查看硬件内存数据等,以开发模式对毫米波雷达进行代码调试工作。其次,在CCS中完成精密测距代码开发调试工作并编译为Bin文件,继而利用TI配套软件UniFlash将用户Bin文件烧录到芯片,系统会自动加载烧录代码。再次,IWR1443需要通过串口实现与上位机的信息交互,为此开发了RadarSPA软件,该软件著作权登记号为2020SR0147005,软件界面如图1所示。

RadarSPA软件是集毫米波雷达控制指令输入和雷达数据输出双串口一体化的软件,具体功能包括输入串口接收、输入串口设置、输出串口设置、数据显示选项、串口状态监控、数据传输分析和状态栏共7个模块,具体运行步骤包括雷达与上位机连接、串口与路径设置、雷达指令发送、雷达测量反馈、雷

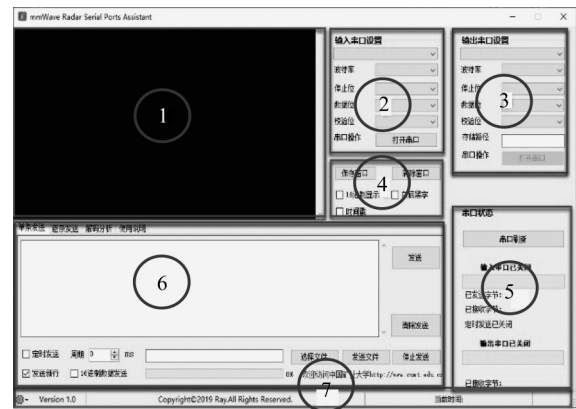


图1 RadarSPA软件界面

Fig. 1 The interface of RadarSPA software

达测量终止和数据接收与解码分析。以中国矿业大学环测楼某反射目标为精密测距目标进行精度测试,设置采样率250Hz、目标距离约7.3m,所得4组测距时序长度均为10 000。统计结果表明4组测距序列中误差分别为0.077mm、0.076mm、0.076mm和0.075mm,优于0.1mm的精度。为节省篇幅,图2显示了其中1组测距频数分布,与理论分布曲线基本吻合。

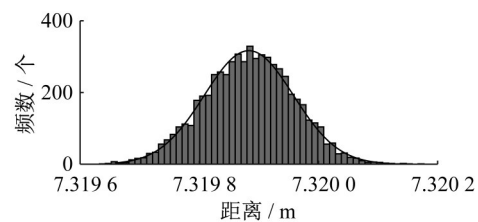


图2 雷达测距频数直方图

Fig. 2 Frequency distribution histogram of Radar ranging

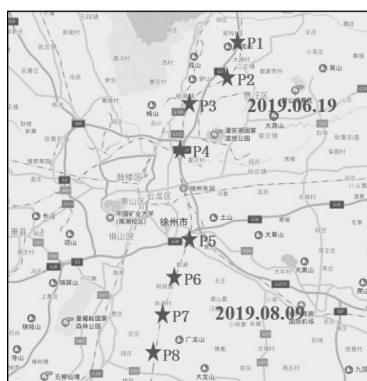
2 高铁桥梁动挠度测量结果分析

2.1 振动检测试验方案

京沪客运专线列车设计行车速度最高达380km·h⁻¹,高速铁路正线长1 318km,桥梁长1 060km,全线简支梁桥占比高。其中,濉河特大桥全长超过65km,全线以32m混凝土简支箱梁为主。选取濉河特大桥徐州段为试验对象,以徐州东站为中点分别朝南、北等间隔10km,各设置4个观测点,并自北向南编号为P1~P8,观测点位沿濉河特大桥布设位置、测点编号如图3a所示。其中,P1~P4号点于2019年6月19日、P5~P8号点于2019年8月9日分别实施两次高铁振动检测试验,目标距离3m~15m、测距中误差均优于0.1mm。检测现场如图3b

所示,将毫米波雷达布设在简支梁跨中正下方,天线竖直指向梁体底部,利用RadarSPA软件实时采集、

传输和存储振动检测信号,同时人工检核过车时刻等信息。



a 测点沿高铁线路位置分布



b 毫米波雷达振动检测现场

图3 测点位置分布和振动检测现场

Fig.3 Location of measuring points and scene of vibration detection

2.2 动挠度响应测量结果

利用RadarSPA软件将毫米波雷达信号进行解码即可获得高铁简支梁桥跨中测距时间序列。图4给出了测点P6以11:05:00为起始时刻连续观测的雷达测距时程曲线。由图4可知,P6在时刻11:06:

21、11:08:20、11:10:51、11:15:41存在明显的距离变化,持续时间约10s左右。对比人工记录的列车过车时刻,可判断该测点在4个时刻有列车通过所测简支梁桥。

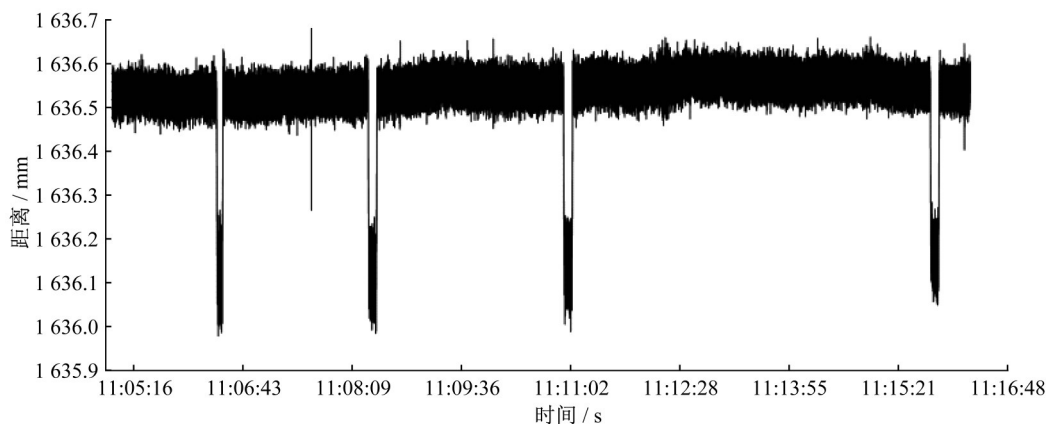


图4 毫米波雷达测距时程曲线(P6跨中)

Fig.4 Ranging time curve of point No.6 by millimeter wave radar

为讨论桥梁动挠度信号特性,利用本文1.1节车桥振动解析式计算CRH型列车通过简支梁产生的跨中动挠度响应解析结果(车速 $300\text{Km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、16节车厢,其余车辆参数见文献[4])。同时,取桥梁无车辆活载时雷达测距平均值作为零基准,雷达测距序列减去零基准后可得桥梁动挠度响应。图5分别给出了P6在11:10:49至11:11:07共18s的理论解析和雷达实测的跨中动挠度响应曲线。

图5中,跨中动挠度最大值分别为0.78mm和0.65mm;列车在桥梁上连续通过时桥梁产生规则振动,

两者振幅分别为0.23mm和0.32mm;荷载列离开桥梁后,两者均能看出桥梁做响应衰减的自由振动,振幅逐渐减小直至达到稳定状态。解析解结果与实际观测结果相接近,说明试验结果真实可靠,可以反映列车荷载作用下桥梁结构响应的实际情况。

为满足高速铁路运行安全和舒适度要求,《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)规定对于设计速度 $350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,跨度小于40m的梁体竖向活载跨挠比不低于1600。分别提取各试验测点过车产生的动挠度和跨挠比(挠度与跨径之比,简支梁桥跨径为32m),表1给出了实测

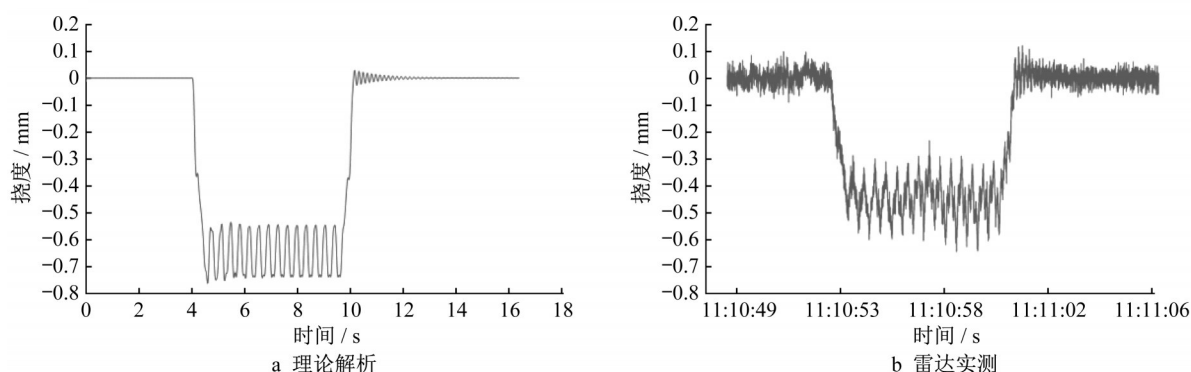


图5 P6跨中动挠度响应

Fig.5 Dynamic deflection of point No.6

表1 各点实测动挠度及跨挠比统计结果

Tab.1 Dynamic deflection and deflection span ratio

测点	车次	动挠度(单位:mm)			跨挠比(单位: 10^4)		
		min	max	mean	max	min	mean
P1	1	0.32	0.81	0.58	9.86	3.95	5.53
	2	0.37	0.95	0.69	8.67	3.35	4.64
	3	0.21	0.83	0.56	15.0	3.84	5.67
	4	0.44	0.99	0.71	7.20	3.25	4.53
P2	1	0.47	0.86	0.67	6.78	3.71	4.75
	2	0.31	0.74	0.52	10.2	4.30	6.16
	3	0.44	0.88	0.68	7.29	3.65	4.70
P3	1	0.13	0.89	0.51	25.4	3.58	6.29
	2	0.31	1.07	0.72	10.3	2.98	4.45
	3	0.14	0.83	0.49	22.4	3.85	6.57
	4	0.29	1.18	0.70	11.0	2.72	4.59
P4	1	0.37	1.01	0.72	8.64	3.18	4.43
	2	0.34	0.92	0.60	9.38	3.40	5.31
	3	0.45	0.97	0.68	7.16	3.29	4.73
	4	0.22	0.79	0.52	14.5	4.04	6.16
P5	1	0.28	0.54	0.41	11.5	5.93	7.81
	2	0.26	0.55	0.40	12.3	5.83	7.96
P6	1	0.31	0.67	0.53	10.2	4.78	6.04
	2	0.29	0.63	0.52	11.2	5.08	6.15
	3	0.32	0.65	0.56	10.3	4.92	5.71
	4	0.30	0.66	0.51	10.8	4.85	6.28
P7	1	0.31	0.59	0.46	10.4	5.39	6.99
	2	0.34	0.60	0.47	9.39	5.36	6.81
	3	0.36	0.59	0.47	8.98	5.44	6.79
	4	0.30	0.51	0.40	10.6	6.31	8.07
P8	1	0.33	0.80	0.57	9.71	3.99	5.58
	2	0.29	0.78	0.52	11.2	4.11	6.14
	3	0.35	0.84	0.59	9.06	3.83	5.39
	4	0.37	0.79	0.57	8.68	4.07	5.65

动挠度和跨挠比。由表1可以看出,各测点动挠度在不同过车阶段变化较小,而不同测点挠度差异较大,这可能与各测点桥梁状态不同有关。其中,实测动挠度最大点出现在P3点,动挠度最大值为1.18mm,其对应的跨挠比为 2.72×10^4 ,远大于规范给出的最小限值1600,表明观测桥梁满足规范要求且有较大的安全余量,桥梁健康状态良好。

2.3 动挠度响应时频分析

为揭示高铁桥梁动挠度时间、频率、幅值三维变化过程及特征,须采用能够处理非平稳信号的现代时频分析方法。鉴此,分别利用广义S变换(GST)^[20]和标准时频变换(NTFT)^[21]时频方法提取时频振幅谱。图6给出了P6在观测时段内GST和NTFT方法独立所得的时频分析结果。从图6可看出,两种方法均在列车通过的时间段内出现了明显的频谱变化,其余时段频谱平稳,表明列车经过是引起桥梁振动频率变化的主要来源,其余因素影响较小;其次,两种时频分析方法检测出的4次列车通过时刻以及振动频率变化过程完全吻合,验证了两种时频方法进行桥梁动挠度响应信号处理的准确性和可靠性。

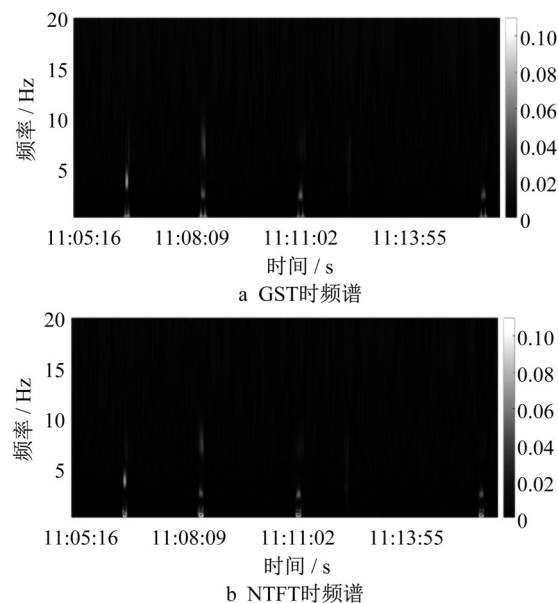


图6 测点P6全时段动挠度响应时频分析(幅度单位:mm)
Fig.6 Time-frequency analysis of dynamic deflection in P6 by Millimeter Wave Radar

为进一步分析桥梁动挠度信号时频变化细节,对2.2节解析和实测挠度响应进行时频分析,图7分别给出了相应分析结果。对比图7a~7d,动态挠度响应结果均存在三个明显的能量集中的频带范围(图中红圈部分),不同时频方法、解析与实测结果均具有一致性。其中,低频带0~1Hz出现在列车进入和离开桥梁的时刻且持续时间较短,结合图5分析认为该频段是由列车荷载上桥时的瞬时冲击导致的冲击频率;中频

带2~4Hz从列车进桥开始持续至列车离开桥梁,是由列车规则排列的轮轴对桥梁的周期性荷载产生的竖向激振频率;高频带6~8Hz略滞后激振频率且在列车离桥后仍持续了一段时间,是由荷载列离桥后的桥梁自由振动导致的自振频率。综上,两种时频方法均能够有效地提取桥梁振动主频及类型。表2统计了P1~P8测点的桥梁振动信号主频信息,以便深入地进行毫米波雷达车桥振动检测分析。

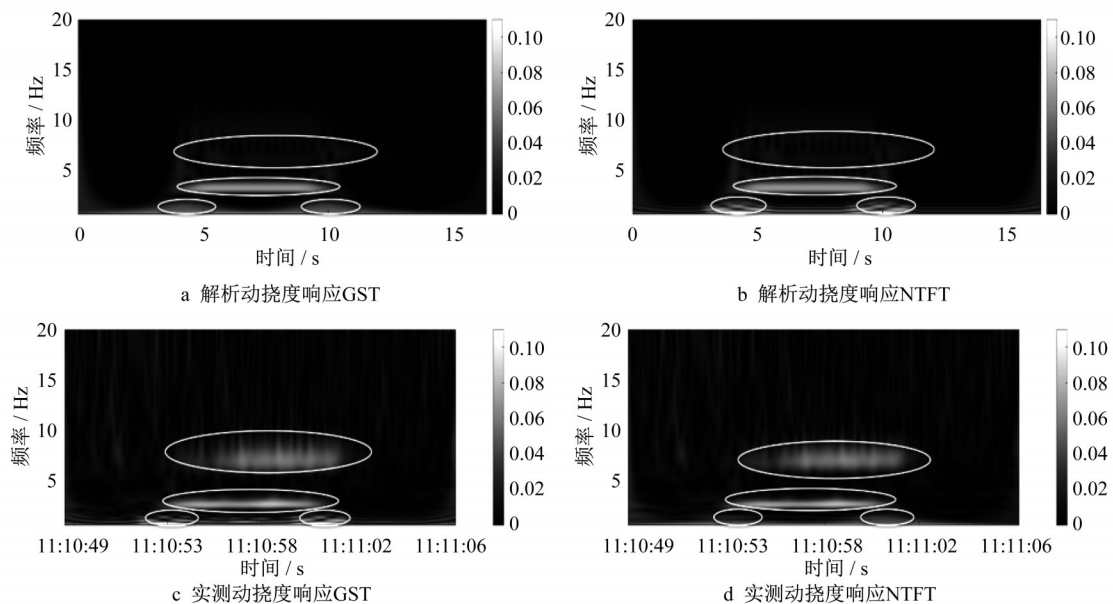


图7 解析和实测动挠度响应时频分析结果(幅度单位:mm)

Fig.7 Time-frequency analysis of deflection by both theory and Millimeter Wave Radar

表2 毫米波雷达动挠度测量的主频提取结果

Tab.2 Main frequency of deflection by Millimeter Wave Radar								Hz
测点主频车次方法	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	GST	0.9±0.1	0.6±0.1	0.6±0.3	0.7±0.1	0.8±0.2	0.9±0.2	0.8±0.2
		2.7±0.1	3.1±0.2	3.2±0.2	3.2±0.1	2.4±0.3	2.7±0.3	2.3±0.2
		6.2±0.5	6.6±0.2	6.3±0.2	8.3±0.4	7.5±0.5	7.3±0.6	6.5±0.6
	NTFT	0.9±0.1	0.5±0.1	0.7±0.3	0.7±0.2	0.8±0.1	1.0±0.1	0.9±0.1
		2.8±0.4	3.0±0.2	3.1±0.2	3.7±0.3	2.4±0.2	2.6±0.2	2.1±0.2
		6.0±0.5	6.4±0.6	6.4±0.4	8.0±0.5	7.5±0.4	7.9±0.6	6.6±0.5
2	GST	0.6±0.4/	0.7±0.1	0.7±0.1	0.7±0.2	0.8±0.2	0.5±0.1	0.8±0.1
		3.2±0.2/	2.2±0.4	3.1±0.3	3.7±0.2	2.1±0.4	3.4±0.4	2.4±0.3
		6.7±0.3	7.0±0.2	6.6±0.5	8.1±0.7	6.6±0.7	7.2±0.6	6.3±0.7
	NTFT	0.8±0.1	0.9±0.1	1.0±0.1	0.6±0.2	0.8±0.2	0.8±0.1	0.7±0.1
		3.0±0.2	2.2±0.2	3.2±0.2	3.2±0.3	2.2±0.2	3.6±0.3	2.4±0.2
		6.6±0.4	7.0±0.5	6.5±0.3	8.0±0.6	6.6±0.5	7.3±0.4	6.5±0.4
3	GST	0.6±0.2/	0.9±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1		0.8±0.3	0.8±0.1
		3.3±0.1/	3.2±0.7	3.3±0.3	3.4±0.5		2.5±0.2	2.7±0.2
		6.5±0.4	6.5±0.5	6.6±0.5	8.0±0.4		7.2±0.6	6.8±0.6
	NTFT	0.8±0.1	0.8±0.1	0.9±0.2	0.7±0.1		0.8±0.1	0.8±0.2
		3.3±0.3	3.1±0.2	3.2±0.3	3.5±0.3		2.4±0.2	2.4±0.2
		6.4±0.4	6.5±0.5	6.5±0.5	8.3±0.6		7.3±0.5	6.9±0.6
4	GST	0.7±0.1/		0.9±0.1	0.8±0.2		0.8±0.1	0.8±0.1
		3.2±0.2/		3.2±0.3	2.6±0.4		2.3±0.3	3.2±0.2
		6.5±0.1		6.9±0.5	8.1±0.5		7.0±0.4	6.7±0.4
	NTFT	0.8±0.1		0.8±0.1	0.7±0.3		0.8±0.1	0.7±0.1
		3.2±0.3		3.1±0.2	2.7±0.3		2.3±0.3	3.2±0.2
		6.6±0.4		6.3±0.3	7.8±0.6		7.2±0.5	7.0±0.2

由表2可知,不同测点的动挠度测量序列均存在三个主频分布,分别位于0~1Hz、2~4Hz、6~8Hz的区间内,结合前述分析可认为其分别对应列车冲击产生的冲击频率、列车规则轮轴周期性荷载产生的竖向激振频率和桥梁自振频率。其次,车桥共振研究表明^[4],列车竖向激振频率可由列车速度 v 和列车长度 d 进行估计 $f=v/(3.6d)$ 。我国京沪高铁列车车厢长度约25m,主要营运时速有250km·h⁻¹、300km·h⁻¹、350km·h⁻¹,其对应的激振频率理论值分别为2.78Hz、3.33Hz、3.89Hz,表2实测激振频率与理论值相近。此外,我国高速铁路设计中主要通过控制简支梁的竖向自振频率避开列车激振频率来避免产生共振现象,本次试验所得简支梁结构自振频率的多点实测值均在6Hz以上,高于《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)规定的基频限值3.03Hz和无需动力检算的频率阈值4.68Hz且有充足余量;实测自振频率与激振频率的互差均高于3Hz,表明所检测桥梁产生共振的可能性较小,结构健康状态良好。

3 结论

(1)介绍了高铁车桥振动解析模型,提出了频谱细分与谱线校正改进的毫米波雷达精密测距算法,并基于IWR1443芯片开发了毫米雷达测量系统。该系统支持采样率高达250Hz、动态测距精度达0.08mm,完全满足高速铁路列车桥振动的实时高效、非接触振动检测需求。

(2)利用毫米波雷达测量系统对京沪高铁潍河特大桥开展了高铁车桥振动检测试验,获得了与理论解析挠度相吻合的高铁简支梁桥竖向实测动态挠度响应曲线。而且,8个测点的竖向动态挠度和跨挠比计算结果显示,跨挠比(最小值为 2.72×10^4)远大于相关规范限值1600,表明所检测桥梁满足现行规范要求且有较大的安全余量。

(3)利用GST和NTFT两种时频分析方法得到了一致的桥梁动挠度响应时频特性,进而提取了高速列车动荷载下桥梁振动主频并得出简支梁桥梁冲击频率(<1Hz)、激振频率(2~4Hz)、自振频率(6~8Hz)类型。8个测点的简支梁桥自振频率实测值均高于6Hz,且与列车激振频率差值均高于3Hz,表明所检测桥梁满足现行安全规范。

作者贡献说明:

刘志平:提出研究思路、实验方案/数据采集和论文撰写。

罗翔:实验数据采集/处理、文献查新和论文撰写。

何秀凤:论文修改。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2020年[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2020
- [2] 孟鑫, 王一千, 王巍, 等. 不同刚度的32m简支箱梁动力性能试验分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(9): 31.
MENG Xin, WANG Yigan, WANG Wei, *et al.* Dynamic performance analysis of 32m simply supported box girder with different stiffness [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 31.
- [3] 杨宜谦, 姚京川, 孟鑫, 等. 时速300~350km高速铁路桥梁动力性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 14.
YANG Yiqian, YAO Jingchuan, MENG Xin, *et al.* Experimental study on dynamic behaviors of bridges for 300~350km·h⁻¹ high speed railway [J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 14.
- [4] 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): 709.
SONG Xiaodong, QIU Xiaowei, LI Xiaozhen, *et al.* Lower vertical frequency limit for simply supported box girder on moscow-kazan high speed railway line [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 709.
- [5] 荆国强, 王波, 柴小鹏, 等. 高速铁路桥梁动力响应监测数据分析方法及其应用[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 31.
JING Guoqiang, WANG Bo, CHAI Xiaopeng, *et al.* Analysis method and its application of dynamic response monitoring data of high speed railway bridges. [J] Bridge Construction, 2018, 48(2): 31.
- [6] HE Xianlong, YANG Xueshan, ZHAO Lizhen. New method for high-speed railway bridge dynamic deflection measurement [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(7): 05014004.
- [7] YAN Yu, LIU Hang, LI Dongsheng, *et al.* Bridge deflection measurement using wireless mems inclination sensor systems [J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2013, 6(1): 38.
- [8] LIU Yang, DENG Yang, CAI C. S. Deflection monitoring and assessment for a suspension bridge using a connected pipe system: a case study in China [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22: 1408.
- [9] 余加勇. 基于GNSS和RTS技术的桥梁结构健康监测[J]. 测绘学报, 2015, 44(10): 1177.
YU Jiayong. GNSS and RTS Technologies based strural

- health monitoring of bridges [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(10): 1177.
- [10] 刘志平, 何秀凤, 张书毕, 等. 结构变形监测的单频GPS动态三差法[J]. 同济大学(自然科学版). 2011, 39(7): 1074.
LIU Zhiping, HE Xiufeng, ZHANG Shubi, *et al.* Dynamic triple-difference method for single frequency GPS deformation monitoring [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*. 2011, 39(7): 1074.
- [11] TANG Xu, LI Xingxing, ROBERTS G W, *et al.* 1 Hz GPS satellites clock correction estimations to support high-rate dynamic PPP GPS applied on the Severn suspension bridge for deflection detection [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 28.
- [12] 熊春宝, 路华丽, 朱劲松, 等. 基于GPS-RTK和加速度计的桥梁动态变形监测试验[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 69.
XIONG Chunbao, LU Huali, ZHU Jinsong, *et al.* Dynamic deformation monitoring of bridge structures based on GPS-RTK and accelerometers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12): 69.
- [13] 徐进军, 郭鑫伟, 廖骅, 等. 基于地面三维激光扫描的桥梁挠度变形测量[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(6): 609.
XU Jinjun, GUO Xinwei, LIAO Hua, *et al.* The test on bridge deflection deformation monitoring by terrestrial laser scanning [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(6): 609.
- [14] 徐亚明, 王鹏, 周校, 等. 地基干涉雷达IBIS-S桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 845.
XU Yaming, WANG Peng, ZHOU Xiao, *et al.* Research on dynamic deformation monitoring of bridges using ground-based interferometric Radar IBIS-S [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 845.
- [15] ZHANG Congrui, GE Yongxiang, HU Zhongchun, *et al.* Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 1.
- [16] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学: 信息科学. 2016, 46(8): 1086.
HONG Wei, YU Chao, CHEN Weixin, *et al.* Millimeter wave and terahertz technology [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, 46(8): 1086.
- [17] 贾海昆, 池保勇. 硅基毫米波雷达芯片研究现状与发展[J]. 电子与信息学报, 2019, 41: 1.
JIA Haikun, CHI Baoyong. The status and trends of silicon-based millimeter-wave Radar SOCs [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41: 1.
- [18] 李小珍, 张志俊, 刘全民. 任意移动荷载列作用下简支梁桥竖向振动响应解析分析[J]. 振动与冲击, 2012(20): 142.
LI Xiaozhen, ZHANG Zhijun, LIU Quanmin. Vertical dynamic response analysis of a simply supported beam bridge under successive moving loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012(20): 142.
- [19] SCHERR S, AYHAN S, FISCHBACH B, *et al.* An efficient frequency and phase estimation algorithm with CRB performance for FMCW Radar applications [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(7): 1868.
- [20] 陈学华, 贺振华, 黄德济, 等. 时频域油气储层低频阴影检测[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 215.
CHEN Xuehua, HE Zhenhua, HUANG Deji, *et al.* Low frequency shadow detection of gas reservoirs in time-frequency domain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 215.
- [21] LIU Lintao, HSU Houtse. Inversion and normalization of time-frequency transform [J]. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2012, 6(1): 67.