

固体目标微形变探测仪及其在 高铁桥梁的应用

高卓妍 贾 岩 刘淑一 张祥坤*

(1. 中国科学院国家空间科学中心中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要:微形变量在工程上意义重大,可用以判断目标的健康状态和自然灾害的预警。传统的形变监测手段有位移计、加速度计、GPS、三维激光扫描等,存在设备安装困难、工作效率低、受天气影响较大等缺点。因此,结合调频连续波技术和干涉技术,设计了一款固体目标微形变探测仪,操作简便、便携、可全天时全天候进行监测。首先对系统进行室内测试,验证了形变测量精度可达亚毫米级。再对海安特大桥的某32 m双线简支箱梁进行微形变监测实验,实验中选取了四个典型监测点,在箱梁上单线加载以及荷载速度相同的实验条件下,系统准确测得梁的1/4和1/2跨的位移量,以及上、下行线1/2跨的位移差异。将测得的时程曲线进一步分析,获得了桥梁的自振频率与强振频率。实测结果与理论分析一致,证明了固体目标微形变探测仪的有效性。

关键词:微形变监测;调频连续波技术;干涉;偏载;简支箱梁

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.09.005

Target Micro Deformation Meter and Its Application on High-Speed Railway Bridge

GAO Zhuoyan JIA Yan LIU Shuyi ZHANG Xiangkun*

(1. Key Lab of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and
Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Micro-deformation are important in engineering to determine the health state of a target or to warn of natural disasters. Traditional deformation monitoring methods include displacement meter, accelerometer, GPS, 3D laser scanning, etc. However, they have certain disadvantages, such as installation difficulties, low working efficiency and weather sensitivity. Therefore, a solid target micro deformation Meter (TMDM) is designed. The system combines the frequency modulation continuous wave technology (FMCW) and interferometry, which is easy to operate, portable, and can operate all day long. Firstly, the system is tested in laboratory, and the accuracy of deformation measurement is verified to be up to sub-millimeter. Then the system is used to carry out a micro-deformation monitoring experiment on a 32 m double-line simply supported box girder of Haian Bridge. During the experiment, four typical monitoring points are selected. Under the experimental condition of single line loading and the same loading speeds of the girder, the system accurately measured the displacement of 1/4 span and 1/2 span of the beam and the displacement difference of 1/2 span of the uplink and downlink. The natural frequency and forced frequency of the bridge are obtained by further analysis of the measured time-

* E-mail: zhangxiangkun@mirslab.cn

history curve. The measured results are consistent with the theoretical analysis, proving the effectiveness of the TMDM.

Keywords: Micro-deformation Monitoring; Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); Interferometry; Eccentric Loads; Simply-Supported Box Girder

在工程领域,经常会利用多种仪器测量目标的微形变,进而判断目标的健康状态,如:利用位移计测量桥梁加载状态下的动挠度^[1];利用加速度计对高层建筑物进行振动监测^[2];利用 GPS 或水准测量方法监测矿区的地表形变^[3];利用三维激光扫描技术进行滑坡及建筑物的形变监测等^[4,5]。但是这些传统测量方法均存在不同程度的问题:位移计、加速度计为接触式测量手段,虽然技术成熟,但设备安装困难、工作效率低;GPS 或水准测量的工作量大、测点难以长时间保存;三维激光扫描技术随着目标距离的增加,测量精度有所降低,且受天气影响较大^[6]。通常待测目标的形变量较小,为亚毫米至厘米级,且待测范围较大,因此需要一种精度高、效率高、便携的监测手段。

本课题组研制的固体目标微形变探测仪 (Target Micro Deformation Meter, TMDM) 已入选 2020 年中国科学院自主研制科学仪器产品名录^[7],是一种非接触式微形变监测系统,无需靠近或进入被探测区域,更加安全,可以全天候观测目标,且能够适应雨雪、大雾(霾)、粉尘、大风等各种恶劣复杂天气条件。TMDM 将调频连续波技术(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)与干涉测量技术相结合,实测精度可达亚毫米级。其应用不局限于桥梁、建筑物、高塔、大坝、边坡等区域的微形变监测,也可用于泥石流、塌方、滑坡等自然灾害预警。单独使用,即实孔径雷达(Real Aperture Radar, RAR)模式,可实现对目标的静态微形变监测,适用于桥梁、高塔等目标;与精密导轨配合使用,即成合成孔径雷达

(Synthetic Aperture Radar, SAR)模式,可获得目标区域的二维高分辨雷达图像,进而实现目标的二维微形变监测,适用于边坡、大坝等目标。

本文首先推导了 TMDM 系统的微形变测量原理,然后重点介绍了自主研发的固体目标微形变探测仪的系统构成、系统参数及性能,再利用高铁简支箱梁的测试结果,证明了该仪器微形变测量的有效性,最后进行了总结。

1 微形变测量原理

TMDM 系统以脉冲重复间隔 (Pulse Repeat Interval, PRI) 为周期向目标发射信号,该信号的频率随时间线性变化。假设一个周期内信号的中心频率为 f_c ,调频斜率为 k ,信号时间为 t ,则发射信号的瞬时频率为

$$f(t) = f_c + kt \tag{1}$$

对信号幅度归一化,发射信号即

$$S_t(t) = \exp[j(2\pi f_c t + \pi k t^2)] \tag{2}$$

发射信号到达目标后被反射回接收天线,设目标与雷达的距离为 R_0 ,光速为 c ,则回波信号为

$$S_r(t) = \exp\left\{j\left(2\pi f_c\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \pi k\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)^2\right)\right\} \tag{3}$$

FMCW 信号可以采用解线频调 (dechirp) 方式来处理,该方法运算简单并且可以简化设备。以发射信号为参考信号,将其与回波信号混频得

$$S_{IF}(t) = \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c R_0}{c} + j\frac{4\pi k R_0^2}{c^2} - j\frac{4\pi k R_0}{c}t\right\} \tag{4}$$

对于静止目标,前两个相位为常数,第三个相位表明了此时的信号为单频信号,频率与目标距

离成正比,即

$$f = -\frac{2kR_0}{c} \tag{5}$$

因此,对 dechirp 后的信号做傅里叶变换即可在频谱得到 sinc 状的窄脉冲,完成脉冲压缩,此时的频域信号为^[8]

$$S_{IF}(f) = \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c R_0}{c} - j\frac{4\pi k R_0^2}{c^2} - j\frac{4\pi R_0}{c}f\right\} \tag{6}$$

其中,第一项为多普勒项,第二项称为剩余视频相位(Residual Video Phase, RVP),第三项称为包络斜置项。为精确处理,后两项均应去除,根据式(5),将后两项合并得

$$\varphi_{res} = \frac{\pi f^2}{k} \tag{7}$$

因此,对式(6)乘以式(8),即可将两残余相位去除。

$$H_{comp} = \exp(-j\varphi_{res}) \tag{8}$$

将干涉原理应用于去除 RVP 后的脉冲压缩信号,即可获得目标的时序微形变。假设以 PRI 为周期的信号发射时间为 η ,当目标在监测过程中有形变产生时,雷达的回波信号为

$$S(\eta) = \exp\left[-j\frac{4\pi f_c R(\eta)}{c}\right] \tag{9}$$

对式(9)取相位,即可计算出目标的时序微形变:

$$R(\eta) = -\frac{c\varphi(\eta)}{4\pi f_c} \tag{10}$$

2 TMDM 系统

TMDM 系统可实现全天时全天候观测;可附加无线通讯功能,实现综合多点布站,实时远距离监测功能;构成简单、重量轻、能耗低,便于携带及野外操作。其硬件主要包含雷达信号收发链路、频率综合模块、数据采集与处理模块和电源模块等,该系统样机如图 1 所示。



图 1 TMDM 系统
Fig.1 The TMDM System

2.1 系统的硬件构成

TMDM 系统的硬件构成如图 2^[9]。在发射链路中,FMCW 信号由直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)生成,经混频器转换为射频信号,后经滤波器、功率放大器、耦合器,由发射天线传输至待测目标。其中,频率综合模块负责生成系统所需的各项频率。该模块的基准频率为 100 MHz,经分频器或锁相介质振荡器(Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator, PDRO)生成 9.2 GHz 的信号,再经四倍频后生成发射链路所需的载频信号。同时,该模块还可以为 DDS 提供 300 MHz 的输出信号带宽。

在接收链路中,将部分发射信号作为下变频时的参考信号,通过与回波信号混频,完成 dechirp 功能。而后,该中频信号经中频滤波、增益控制、中频放大等处理后,传递给数据采集与系统控制模块。该模块主要由现场可编程逻辑电路(Field Programmable Gate Array, FPGA)构成,不仅可以实现回波数据在 CF(Compact Flash)卡中的存储功能,还为 DDS 提供触发信号。

2.2 系统参数及性能

TMDM 系统的主要参数如表 1 所示。利用该系统进行室内精度验证实验,实验中,将角反射器放置在精密导轨上进行步进移动,步进增量为

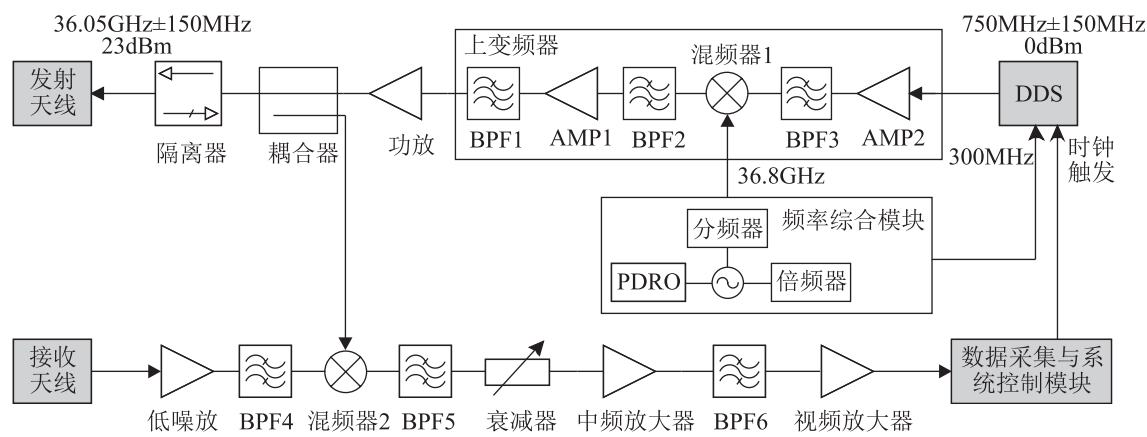


图 2 TMDM 系统的硬件构成

Fig. 2 Hardware Components of TMDM System

1mm,系统获得的时序回波信号的相位如图 3。根据式(10)可计算出角反射器的位移量,再对位移量的误差求得标准差为 56 μm。因此证明,TMDM 系统的实测精度可达亚毫米量级,可以满足高铁桥梁的形变监测需求。

表 1 TMDM 的系统参数

参数	值
起始频率/GHz	35.9
终止频率/GHz	36.2
工作带宽/MHz	300
输出功率/dBm	23
中频带宽/MHz	10
脉冲重复频率/Hz	1000
探测距离/km	≤2
重量/kg	4

3 实验结果

3.1 实验条件

本次实验地点位于南通市如皋南站附近海安特大桥的某一段单箱单室双线简支箱梁,梁长 32.6 m,计算跨度 31.5 m,梁高 2.8 m。实验用车为 16 节编组的和谐号重联动车组 CRH380BL-3554。实验时,将 TMDM 系统放置在桥梁的正下方,以天顶观测的方式监测列车加载时桥梁产生的竖向微形变,实验场景如图 4 所示。

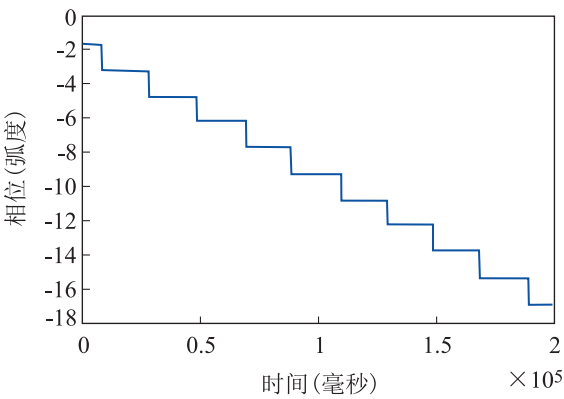


图 3 回波信号相位^[10]

Fig. 3 Phase of Received Signal^[10]



图 4 实验场景

Fig. 4 Experimental Scene

为了说明高铁列车过桥时,简支箱梁不同位置产生的动力响应,实验时 TMDM 系统的监测位置由图 5 的示意图说明。其中长方形为简支箱梁的底板,梁长为 l ,1、3、4 号监测点位于简支箱梁的 $l/2$ 跨,2 号监测点位于 $l/4$ 跨。同时,监测点对应的实际位置也在图 4 中加以标注。不同监测点的工况总结在表 2 中。

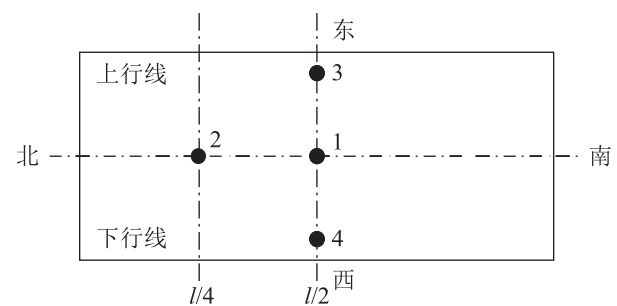


图 5 实验监测点示意图

Fig. 5 Experimental Monitoring Point Diagram

表 2 不同监测点的工况

Tab. 2 Conditions of Different Monitoring Points

监测点	时间	速度 km/h	运行方向	运行线
1	11:13	320	由南至北	上行线
2	12:10	320	由北至南	下行线
3	13:51	350	由南至北	上行线
4	14:46	350	由南至北	上行线

3.2 实验结果

3.2.1 时域结果

将 1、2 号监测点的结果进行对照,可以比较当列车以相同速度经过简支梁时,梁的 $l/2$ 跨和 $l/4$ 跨产生的位移,测量结果如图 6a 所示。1、2 号监测点的最大位移量分别为 0.89 mm、0.57 mm。理论上,低阻尼情况下,单个移动恒定荷载以非共振速度通过简支梁产生的振动位移解析式为^[11]:

$$y_i(x,t) = y_0 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{l} \frac{1}{n^2(n^2 - \alpha^2)} \quad (11)$$

$$\left(\sin n\omega t - \frac{\alpha}{n} e^{-\omega_d t} \sin \omega_n t \right)$$

$$y_0 = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (12)$$

其中, y_0 为在刚度为 EI 的简支梁跨中 $l/2$ 处加载一个恒定荷载 P 时产生的位移, α 为速度参数, n 为整数表示振型, ω_n 为第 n 阶圆频率, ω_b 为临界阻尼圆频率, ω 为荷载激励圆频率。由于桥梁的一阶振型对位移的贡献最大,为简化讨论,只考虑 $n=1$ 的情况。再将 $x_1 = l/2$ 和 $x_2 = l/4$ 分别代入式(11)可得

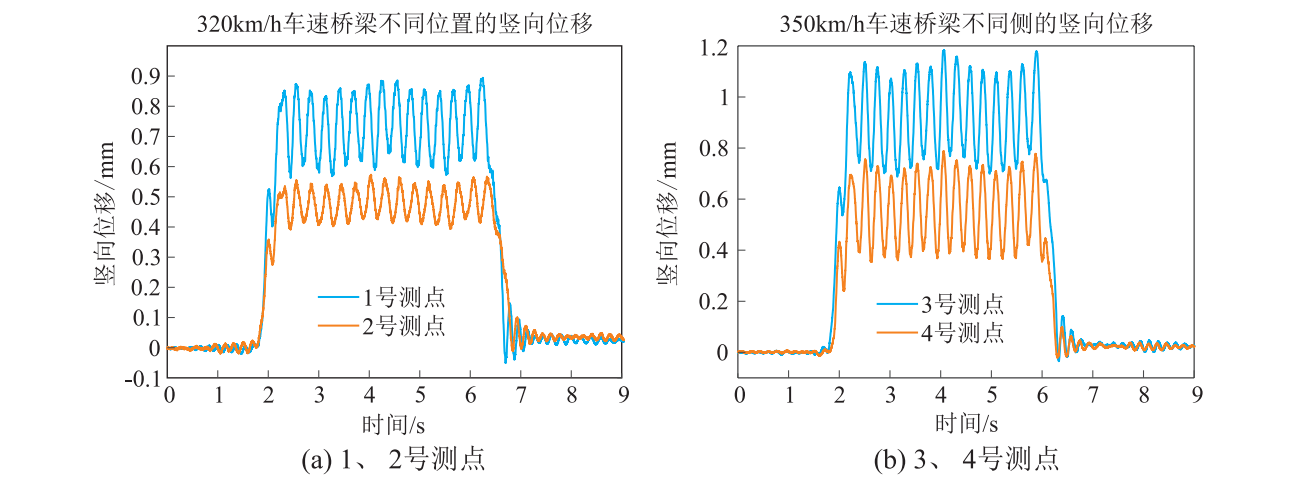


图 6 测点的位移

Fig. 6 Deformation of Monitoring Points

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{4})}{\sin(\frac{\pi}{2})} = 0.7 \tag{13}$$

实测 1 号、2 号监测点的位移之比为 0.64,考虑到高阶振型、运行线的不同,以及桥梁施工等多重因素,认为实测结果具有合理性。

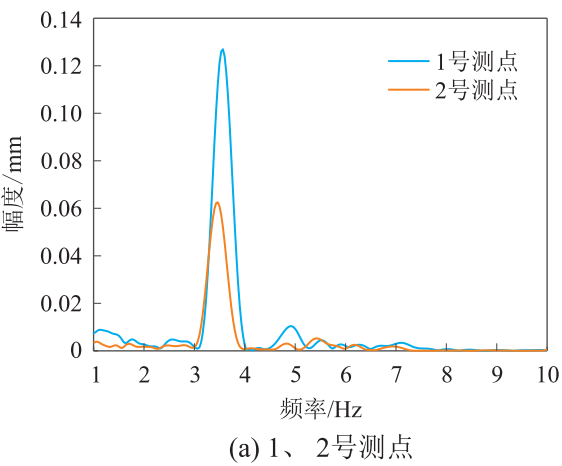
当列车以完全相同的加载方式经过简支桥梁时,TMDM 系统在 3、4 号监测点的测量结果如图 6b 所示。桥梁在列车运行侧产生的位移较大,这是由于在双线高铁桥上进行单线加载,偏心作用使箱梁产生了扭转变形,进而使上下行侧的竖向位移有所不同^[12,13],使用 TMDM 系统可以准确捕捉到这一特点。

3.2.2 频域结果

为了减少频谱泄露,对图 6 的位移时程曲线加相同的 Kaier-Bessel 窗,再进行傅里叶变换,得到两组数据的频谱如图 7 所示。

振幅较大且频率较小的频点为强振频率,振幅较小且频率较大的频点为自振频率。理论上,强振频率与列车速度和车厢长度有关^[14]:

$$f_{forced} = \frac{v}{3.6d} \approx 0.0111v \tag{14}$$



其中, v 为列车运行速度,单位为 km/h, d 为车厢长度。我国动车车厢长度一般为 25 m,则可得第二个约等式。

图 7a 中两曲线的特征频点有所差异。1、2 号监测点的列车速度为 320 km/h,代入式(14),得理论强振频率为 3.55 Hz,实测强振频率分别为 3.567 Hz、3.467 Hz,与理论值的差异较小。二者的差异是由于两次测量时列车的运行线不同,使桥梁的动力响应稍有差别,但两实测值均稳定在理论值附近,可认为强振频率的测量准确。

图 7b 中,由于两次测量时列车加载的方式完全相同,测量的横向位置均为跨中,因此频谱的吻合性很强。两监测点的实测自振频率分别为 5.267 Hz、5.3 Hz,符合 32 m 简支箱梁的自振频率通常值^[14]。两监测点的实测强振频率分别为 3.833 Hz、3.867 Hz,由式(14)可知,速度为 350 km/h 的荷载造成的理论强振频率为 3.885 Hz,与实测值相符,测量准确。

4 总结与展望

本文介绍了课题组自主研发的一款固体目标微形变探测仪,并利用该系统对盐通高铁沿线

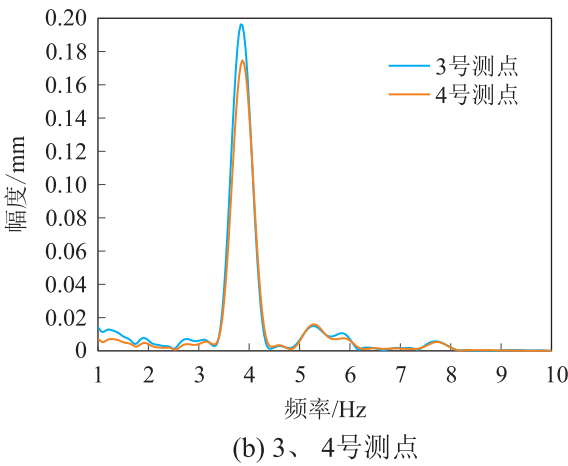


图 7 测点的频谱

Fig. 7 Spectrum of Monitoring Points

的某 32m 单箱单室双线简支箱梁进行了微形变监测实验。实验中选取了 4 个代表性监测点,用以分析列车单线加载时高铁桥梁的形变特点。将实测结果与理论分析对比,得到了以下结论:

1)荷载以相同速度在相同运行线上进行单线加载时,桥梁上、下行侧的产生竖向位移有所差异,强振频率和自振频率相同。

2)荷载以相同的速度分别在上、下行线运行时,桥梁的强振频率稍有差异,但均与理论值一致;梁的 $l/2$ 跨和 $l/4$ 跨产生的位移成比例关系。

TMDM 系统可以准确测得高铁桥梁加载时产生的微形变,进而分析其振动特点,将在桥梁安全监测领域有很好的应用价值。

参考文献

- [1]姚京川. 高速铁路常用跨简支箱梁运营性能检定[J]. 中国铁道科学,2017,38(2):34-41.
- [2]刘芬,王庆,阳媛,等. 基于加速度计的高层建筑振动监测研究[J]. 传感器与微系统,2020,39(12):36-39.
- [3]范忻. 基于 SBAS-INSAR 技术的城郊煤矿矿山地表形变监测研究[J]. 地矿测绘,2021,37(2):25-29.
- [4]徐进军,王海城,罗喻真,等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 岩土力学,2010,31(7):2188-2191,2196.
- [5]杨永林,杨超,潘东峰,等. 利用三维激光扫描技术进行万寿寺塔变形监测[J]. 测绘通报,2020(5):119-122.
- [6]LIU X, WANG P, Lu Z, et al. Damage Detection and Analysis of Urban Bridges Using Terrestrial Laser Scanning (TLS), Ground-Based Microwave Interferometry, and Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-

InSAR)[J]. Remote Sensing. 2019,11(5),580.

- [7]张祥坤,固体目标微形变探测仪[J]. 中国科学院院刊,2020,35(Z1):123-123.
- [8]保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [9]邵泽龙,高卓妍,张祥坤. 桥梁振动监测雷达的设计与实现[J]. 测绘通报,2018(4):78-82.
- [10]邵泽龙. 基于 FMCW GBSAR 的微形变监测技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
- [11]夏禾,张楠,郭薇薇,等. 车桥耦合振动工程[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [12]夏禾,陈英俊,张焜,等. 列车提速情况下铁路双线简支钢桁梁动力响应分析[J]. 铁道学报,1996(5):79-86.
- [13]陈留剑,李运生,张彦玲. 某单箱双室道岔连续梁偏载效应研究[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(3):23-26,18.
- [14]孟鑫,刘鹏辉,姚京川,等. 高速铁路 32 m 简支箱梁动力特性试验分析[J]. 铁道建筑,2016(1):10-15.

作者贡献说明

高卓妍:撰写文章初稿,数据处理,现场实验;

贾 岩:数据处理,现场实验;

刘淑一:整理资料,现场实验;

张祥坤:实验规划,论文审阅及修改。

作者简介



张祥坤:研究员,博导;代表性成果:微波成像雷达、成像高度计、全极化微波散射计等微波遥感器研制,发表相关论文 50 余篇;主要研究方向:微波遥感成像理论与技术,雷达微形变测量等。