 DOI: https://doi.org/10.12349/ptc.v4i1.4731

Research on continuous beam deformation monitoring of high-speed rail turnout based on microwave vibration measurement technology

Cheng Wang Yaohua Zheng

Shentie Fangyuan Testing Technology Co., Ltd., Shanghai, 201802, China

Abstract

A large number of deformation and vibration measurements existing in large-span Bridges and large engineering structures often require physical contact structures, resulting in complex installation and limited coverage to meet the comprehensive monitoring requirements of large-scale structures. This paper presents a measurement system based on microwave vibration measurement to the continuous beam of high speed railway. By constructing the measurement system based on microwave vibration measurement technology in the continuous beam of ballastless concrete turnout along the south Yangtze River, the static dynamic deflection change of the turnout continuous beam is analyzed, and the data collected at each measuring point is reconstructed in three dimensions. The results show that the microdeformation data of multiple measuring points can continuously feedback the change law of turnout continuous beam deformation, and can provide clear data changes for different stages of high-speed railway construction process.

Keywords

microwave sensing; microwave vibration measurement; deformation monitoring; turnout continuous beam

基于微波测振技术的高铁道岔连续梁形变监测研究

王澄 郑腰华

申铁方圆检测科技有限公司，中国·上海 201802

摘 要

大跨度桥梁及大型工程结构中存在的大量形变及振动测量，往往需要物理接触结构，导致安装复杂，且覆盖范围有限，难以满足大规模结构的全面监测需求。本文提出了一种基于微波测振技术的测量系统对高速铁路连续梁进行精确形变与振动监测方法。通过在南沿江城际铁路无砟轨道预应力混凝土道岔连续梁搭建基于微波测振技术的测量系统，分析道岔连续梁静动态挠度变化，对各测点采集的数据进行三维重构。结果表明：多个测点的微形变数据，可以连续反馈道岔连续梁形变的变化规律，能够为高速铁路建设过程不同阶段提供清晰的数据变化佐证。

关键词

微波感知；微波测振；形变监测；道岔连续梁

1 引言

高速铁路建造过程中，大跨度桥梁监测系统技术从总体上而言已经趋于成熟和规范，而对于大跨度桥梁结构健康监测与预警系统的设计缺乏整体和规范性的指导原则，还没有建立一个科学、统一的设计标准。因此，针对大跨度桥梁工程结构长期变形监测，为了解决现有监测仪器成本高、便携性差、测试环境要求高、体积和功耗大及适用范围受限等技术问题，需要研发一套完备、高效、高精度、高可靠性、智能化的大型桥梁结构监测系统，获取桥梁关键状态参数和长期跟踪监测性能指标[1]。

当前对高铁道岔连续梁变形监测主要依靠精密水准仪、全站仪进行人工不连续、间断测量，效率低下，且无法获取长时间连续测量结果，难以对施工和后期运维提供关键传感与测量数据，而桥梁上无砟轨道铺设对桥梁连续梁的形变和沉降具有严格的要求。针对桥梁工程中存在的大量形变及振动测量需求，传统形变及振动测试方法除了自身的局限性，它们亦面临一系列难以突破的挑战。所以，研发基于微波测振技术的桥梁形变监测系统是一种突破口。

本文依托南沿江城际铁路站前工程，采用微波雷达振动与形变监测技术和专用仪器在无砟轨道预应力混凝土道岔连续梁施工中应用，实现了大跨度桥梁高铁轨道铺设支撑结构的长时间连续、全天时全天候、多点同步高精度的形变与振动监测关键技术，为解决高速铁路道岔梁结构铺轨过程中的形变控制与调整难题提供了解决方案。

【作者简介】王澄（1979–），男，中国海南澄迈人，本科，高级工程师，从事工程测量技术研究。

2 微波形变与振动测量原理

微波测振是通过发射特定形式的连续波微波信号，并接收目标散射的电磁回波信号，基于相位调制与干涉测量实现多目标振动信息反演，具有高精度、宽量程、低频响应佳、低功耗、高可靠性（全天时、全天候）、微型化等优势。典型的微波测振硬件及测量示意图如图 1 所示，能够准确测量目标的振动或形变位移时域信息。

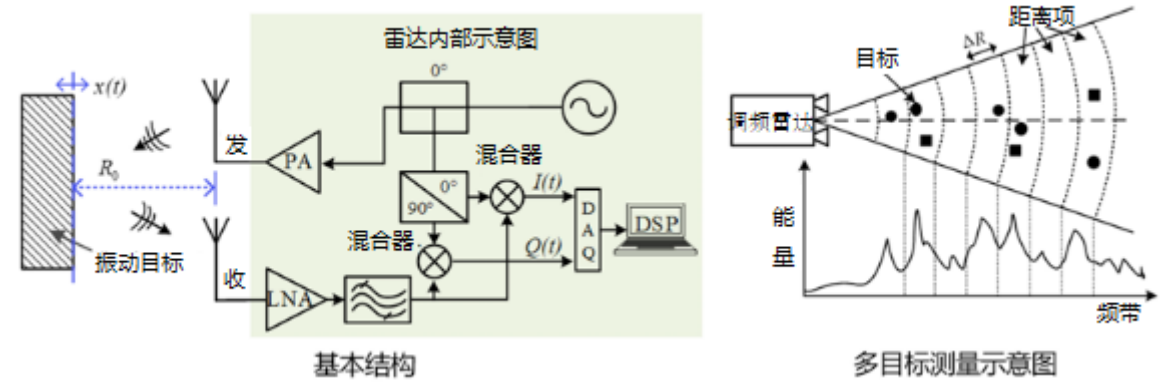


图 1 微波测振基本原理示意图

基于 LFMCW 雷达的振动测量是基于振动会对电磁波信号产生非线性调制的基本原理，通过跨越多扫频周期的干涉相位估计与振动信息反演实现振动位移时域信息的提取。如图 2（a）所示，采用锯齿波频率调制的 LFMCW 雷达进行非接触式振动感知，使用复数形式进行简化描述，以单目标感知为例，每个扫频周期发射信号和接收信号的数学模型可定义为：

$$S_T(t)=A(t)\exp[j(2\pi f_0 t+\pi K t^2+\varphi_0)],$$

$$S_R(t)=B(t)\exp\{j[2\pi f_0(t-2\frac{R_0+x(t)}{c})+\pi K(t-2\frac{R_0+x(t)}{c})^2+\varphi_0]\},$$

其中 $K=\frac{B}{T}$，

式中 A(t) 为发射信号的幅值，B(t) 为接收信号的幅值，f 为信号初始频率，K 为调制斜率，ϕ_0 为初始相位，t 为时间，c 为电磁波传播速度，B 为信号带宽，T 为单个扫频周期时间，为雷达到目标之间的初始距离，x(t) 为目标物体的振动位移[2]。

由于扫频周期往往较短，单个扫频周期时间 T 内振动位移的变化量非常小，因此可假定在一个扫频周期内物体的位移 x(t) 为常数，则第 i 个扫频周期时间内，基带差拍信号可表示为：

$$S_B(iT+t)=C_i\exp\{j[\frac{4\pi K R_0}{c}t+\frac{4\pi f_0 R_0}{c}+\left[\frac{4\pi(f_0+K(t))}{c}x(iT)\right]]\}$$

$$\approx C_i\exp\{j[\frac{4\pi K R_0}{c}t+\frac{4\pi f_0 R_0}{c}+\left[\frac{4\pi f_0}{c}x(iT)\right]]\}$$

$$=C_i\exp[j(2\pi f_B t\varphi_i)]$$

其中 $f_B=\frac{2BR_0}{cT}$，$\varphi_i=\frac{4\pi f_0 R_0+4\pi f_0 x(iT)}{c}$，

式中，Ci 为第 i 个扫频周期基带差拍信号的幅值，f0 为中心载波频率，fB 为差拍频率，ϕi 为 x(iT) 分别为第 i 个扫频周期时间内差拍信号的初始相位和目标振动位移时间序列。通过上述信号模型表示和公式推导，可以看出基带信号的干涉相位信息与目标物体的振动位移时域信息成线性关系。通过基带信号的干涉相位演变追踪可以得到相邻扫频周期振动位移时域信息的变化量为：

$$\Delta x(t)=\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi(t)/\cos\phi$$

其中，Δx(t) 为相邻扫频周期基带信号振动位移的变化量，ϕ 为目标振动方向与雷达波束视线的夹角，进而由位移变化量反演目标振动位移时域信息。

3 工程应用

3.1 工程概况

南沿江城际铁路 2 标无砟轨道预应力混凝土道岔连续梁位于 195~200# 墩，箱梁全长 155.15m，桥梁宽 14.908~18.140m，底宽 11.653~5.238m。设计最高时速 350km/h。

3.2 监测方案

3.2.1 测点布设

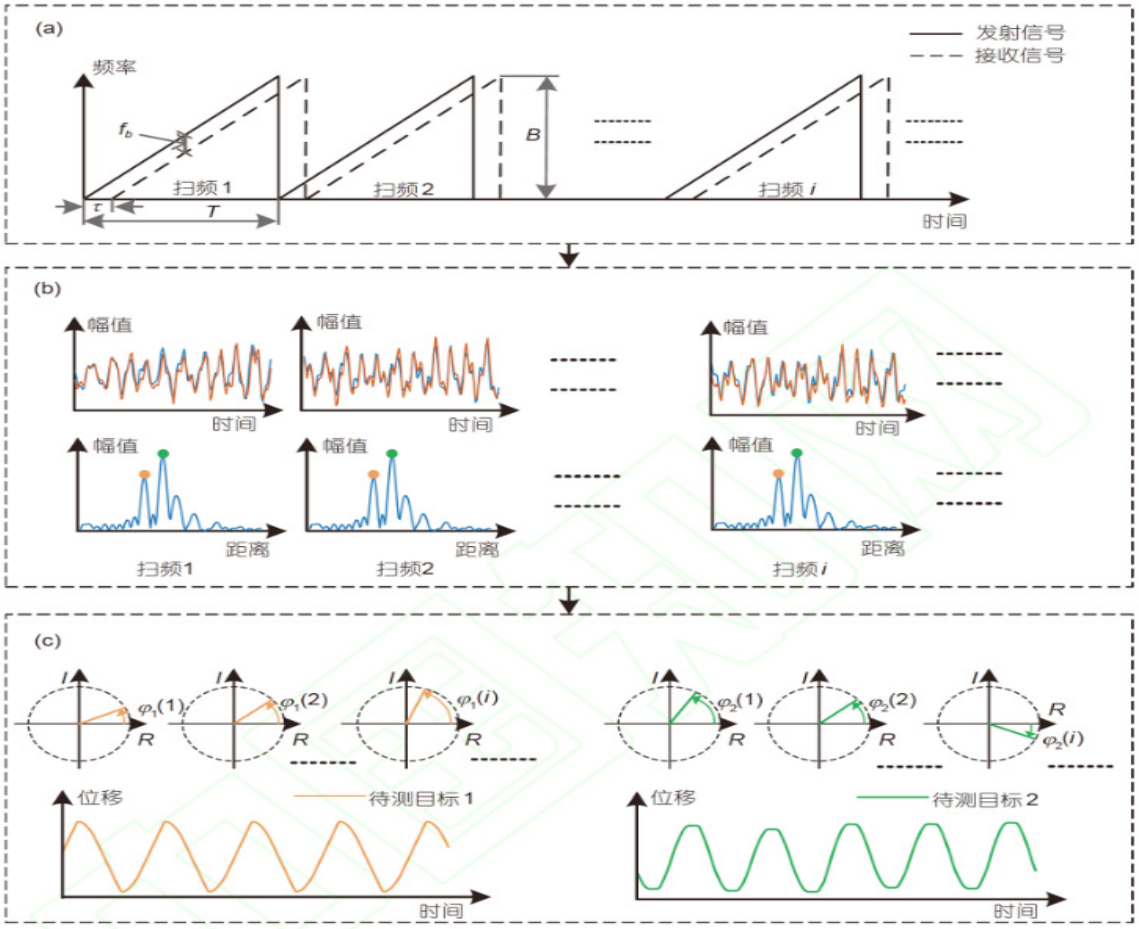
微波测振监测方案采用断面测点等效法，等效测量道岔梁 6 个测量断面，在道岔梁两侧飘檐下侧安装角反射器（观测点），整座道岔梁位移测点共安装 12 个，分别在支点、中跨跨中及边跨 1/4 跨附近设置。

3.2.2 设备安装

“微波测量仪”设备安装在道岔梁两侧的桥墩，使用制造特殊的安装支架将设备向外侧探出，用于监测道岔连续梁多维形变与振动信息。针对每一个测点，使用了 3 个雷达来监测对应方向的位移信号，其中雷达 1 监测 X 方向的位移信号，雷达 2 监测 Y 方向的位移信号，雷达 3 监测 Z 方向的位移信号。雷达 1 与雷达 2 之间的间隔为 1000mm，雷达 1 与雷达 3 和雷达 2 与雷达 3 之间的间隔均为 800mm。

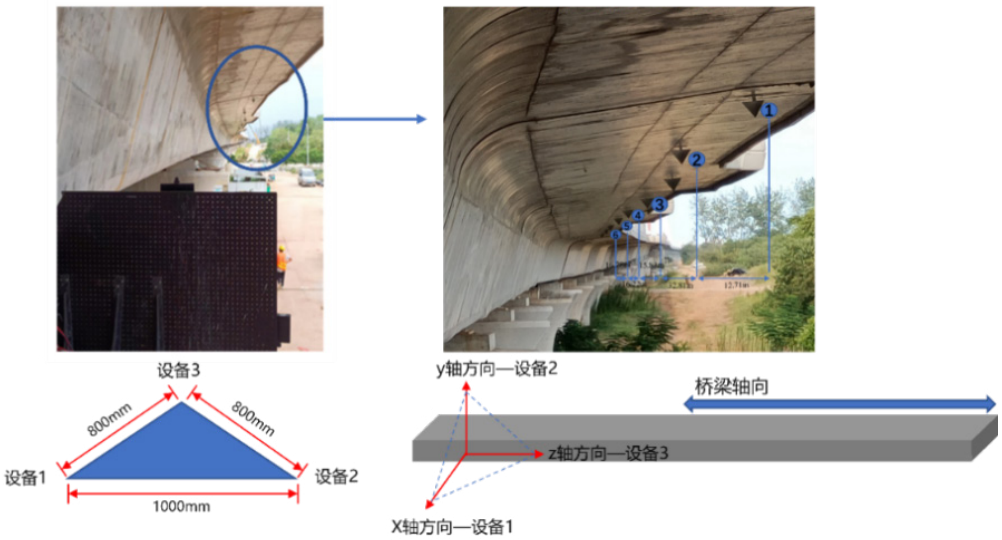
雷达安装如图 3（a）所示。

角反射器俗称靶标，通过与桥梁刚性连接，在增强信号强度的同时用于反馈桥梁的微形变与振动信息，靶标安装具体如图 3（b）所示。



（a）锯齿波调制 LFMCW 雷达发射与接收信号瞬时频率示意图；（b）多扫频周期基带差拍信号及其距离像示意图；（c）多点同步振动位移提取示意图

图 2 基本原理示意图



（a）雷达安装示意图　　（b）靶标安装示意图

图 3 现场桥梁测量设备安装示意图

3.3 监测结果及分析

为分析道岔连续梁静动态挠度变化，对各测点采集的数据进行三维重构以及相应的图形绘制，经数据处理软件分析出各测点在三个维度上的位移结果数据，得出测点 M2、测点 M3 及测点 M4 位移结果数据如表 1。

对各测点计算完成的 X、Y、Z 方向的位移数据，软件呈现测点位移变化的曲线图，测点 M2 合成数据曲线图如图 4 所示：

测点位移变化的曲线图，如图 5 所示，设备 1 采集的测点 M2 的单点数据，可以发现：微形变振幅区间约为 4.7mm，且形变规律符合因 24 小时温度变化（设备平均 30 s 采集一次数据，24 小时约为 2880 个数据点）带来的桥梁形变规律。

采集的多个测点的单点微形变数据，不难发现，单点采集的数据符合变化规律，并能够反映道岔连续梁在未做铺轨工序每天 24 小时结构随温度及支架沉降变化的形变状态。如图 6 所示，采集的多个测点的单点微形变数据，数据显示，单点采集的数据符合变化规律，并能够反映每天 24 小时结构随温度变化的形变状态。图 6 纵轴为形变位移，单位 mm；横轴为时间，单位 h。

如图 7 所示，两台设备采集的多个测点的单点数据，可以发现：数据点可以连续反馈道岔连续梁形变的变化规律，为高铁路线建设过程不同阶段提供了清晰的数据变化佐证。图 7 纵轴为形变位移，单位 mm；横轴为时间，单位 h。

通过构建微波感知技术形成的非接触形变与振动监测系统，结合先进的反演构建算法，实现在铁路道岔连续梁不同的建筑阶段，进行简洁、实时、高精度的形变与振动数据收集，结合整体测试过程对比和精度验证，微波测振技术在铁路道岔连续梁形变与振动监测方面可行。

基于微波感知技术形成的非接触形变与振动监测系统或者方案，有效减少传统验收测试过程光学设备的种种缺陷，提高作业效率；也可简单、连续同步反馈高铁铁轨铺设过程对道岔连续梁形变与振动的变化趋势；为高铁道岔连续梁在铺轨及建设验收方面提供整体安全后期评估及实时评估建立了可能。

表 1 分析结果

测点编号	左右（X 方向）位移（mm）	上下（Y 方向）位移（mm）	前后（Z 方向）位移（mm）
测点 M2	0.856	0.876	0.878
测点 M3	0.856	0.876	0.878
测点 M4	0.856	0.876	0.878

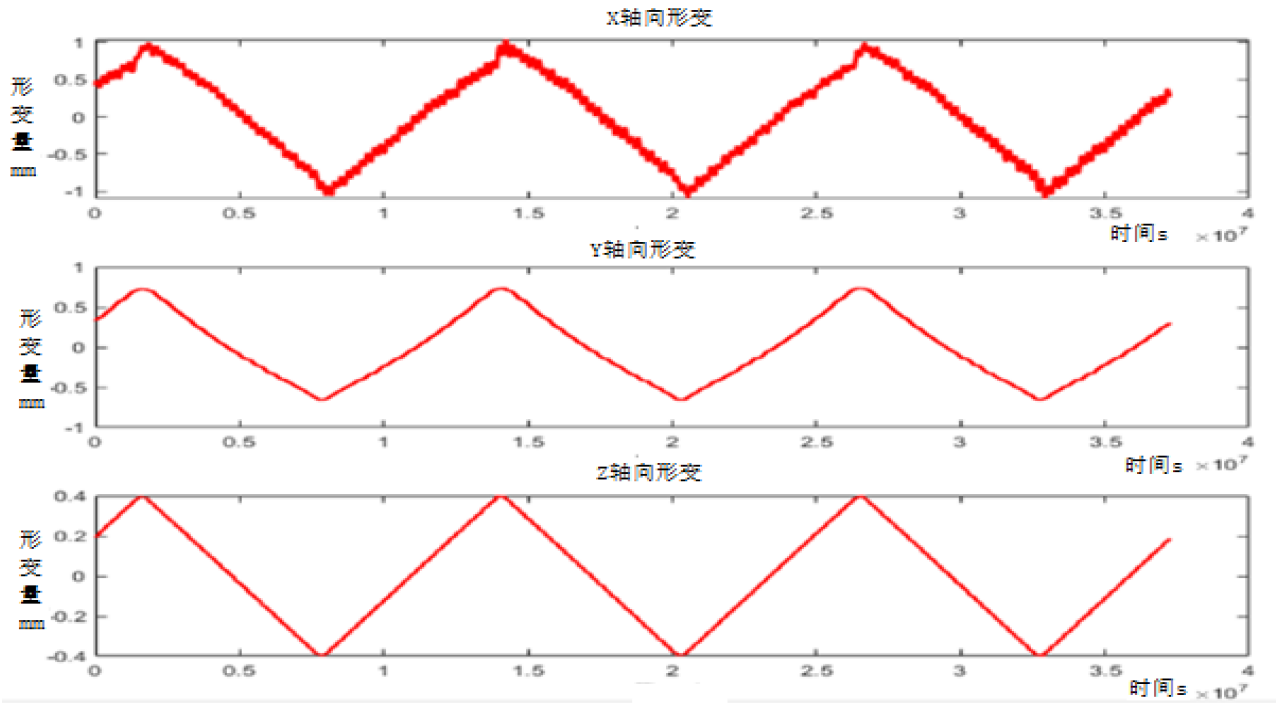


图 4 测点 M2 合成数据曲线图

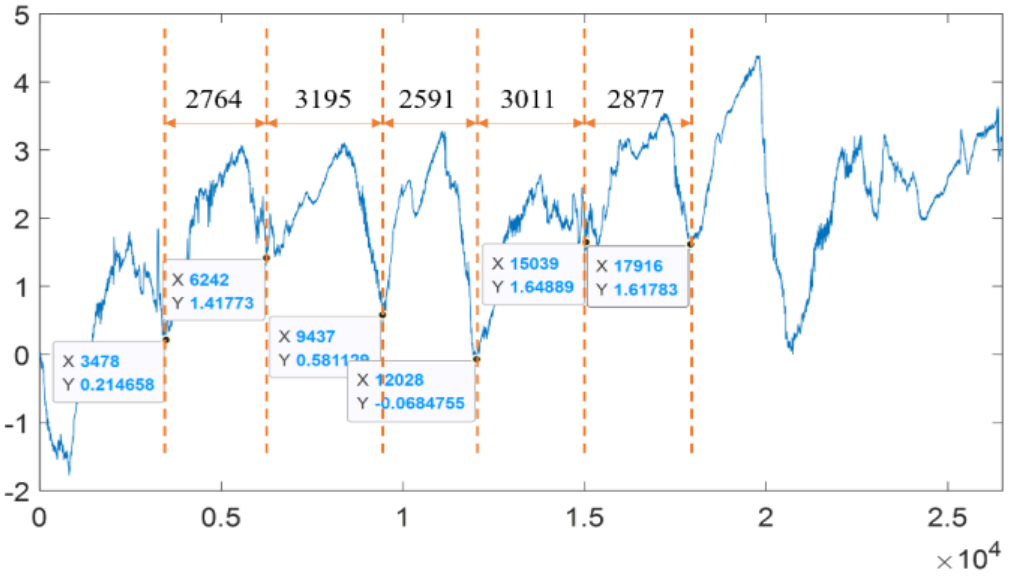


图 5 测点 M2 位移曲线图

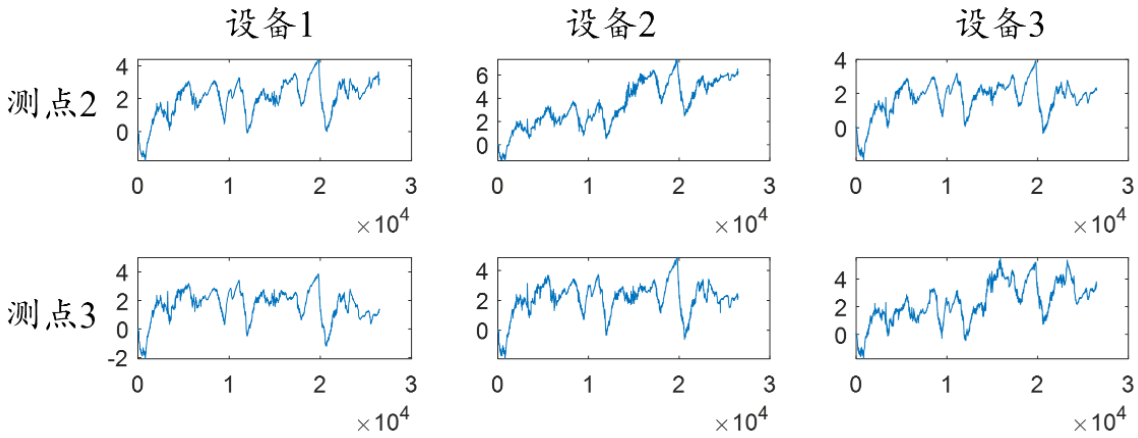


图 6 测点微形变数据曲线图

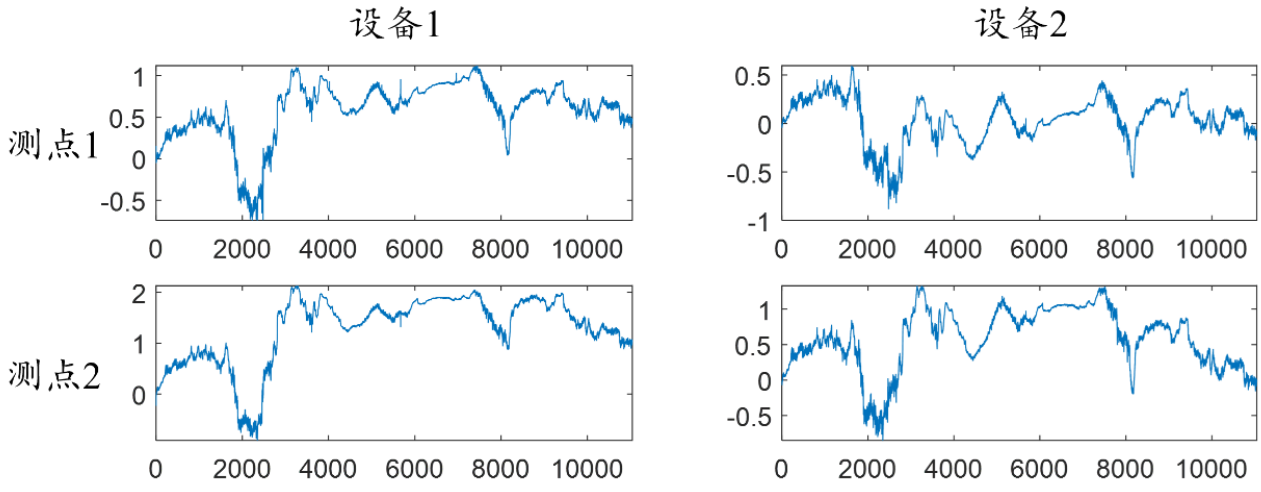


图 7 测点微形变数据曲线图

3.4 精度验证测试

为监测桥梁梁体的平面形变和垂直形变，根据安装在桥梁横板底部的靶标，对应在桥梁防撞墙上埋设 CP Ⅲ点，CP Ⅲ点作为水准测量观测点，同时也作为全站仪坐标法观测点。

3.4.1 采用精密水准测量

利用每公里观测高差中误差为 ±0.3mm 的徕卡 LS10 电子水准仪测量测点标高，采集的测点垂直方向的数据。测点 M2 ~ M4 数据显示，所有测点误差都在 1mm 以内，满足无砟轨道梁体徐变控制标准要求。

3.4.2 采用全站仪坐标法

利用测角精度为 ±0.5″ 、测距精度为 ±（1mm+1ppm）的徕卡 TS60 全站仪测量测点二维坐标，采集的测点 X、Y 方向的数据。测点 M2 ~ M4 数据显示，所有测点累计位移小于 1mm ，满足梁体横向变形的相对位移不大于 1mm 的要求。

将微波监测设备和现有成熟监测设备结果进行比较，微波测量仪测量的三个维度与传统的精密水准测量、全站仪测量结果接近，进一步证实了微波远程形变监测技术应用于高速铁路连续梁形变监测的可行性与精度的可靠性。

表 2 分析结果

测点编号	沉降变化量（mm）		
	本周变量	本周日变化速率	累计变量
M2	-0.31	-0.01	-0.38
M3	-0.24	-0.01	-0.14
M4	-0.75	-0.03	-0.15

说明：1. 沉降“-”表示沉降，“+”表示上升。

表 3 分析结果

测点编号	X 方向（mm）		Y 方向（mm）	
	X 本次位移	X 累计位移	Y 本次位移	Y 累计位移
M2	-0.19	-0.54	-0.06	-0.99
M3	-0.04	0.79	-0.04	-0.23
M4	-0.10	0.29	-0.10	0.62

说明：位移“-”表示上升，“+”表示沉降。

4 结论

①基于微波感知的形变与振动测量技术简称“微波测振”技术，是一种新的非接触式形变与振动监测技术，具有高精度、宽量程、低频响应佳、低功耗、高可靠性（全天时、全天候）、微型化及环境适应性强等优势。

②微波感知技术形成的非接触形变与振动监测系统，可轻量化、实时、高精度的反馈高铁道岔连续梁结构验收实施过程中各断面的形变与振动数据收集，减少传统验收测试过程光学设备的种种缺陷，提高作业效率，为高铁整体建设安全提供有力佐证。

③基于微波非接触感知能力及柔性场景适应性，微波感知技术形成的非接触形变与振动监测系统可延伸至高铁建设涉及形变与振动采集的其他项目；另外也可将技术及方案应用于高铁路基、桥梁、轨道等的安全监测，为高速铁路整体搭建安全运营提供科学数据源及改进依据。

参考文献

[1] 冯正霖，对我国桥梁技术发展战略的思考，中国交通报，20150520.

[2] 熊玉勇，李松旭，吴高阳等.基于毫米波感知的形变及振动多点同步测量理论与方法，中国科学：技术科学，2021.51.

[3] 熊玉勇，李松旭，彭志科.基于微波感知的挠性结构动态响应监测，振动与冲击，2020第39卷.

[4] 王静，芜湖长江大桥梁体挠度随拉索损伤变化规律研究,石家庄铁道大学硕士论文,20140101.

[5] 张弥，夏禾，冯爱军.轻轨列车和高架桥梁系统的动力响应分析[J].北京交通大学学报，1994(1):1-8.

[6] 宋超智，陈翰新等.大国工程测量技术创新与发展，北京：中国建筑工业出版社出版，2019.

[7] 刘春,程起军,李俊义,等.基于地基干涉雷达的大型桥梁动态挠度监测与分析[J].1，工程勘察，2017,45(1): 53-58.

[8] 张恒，姚森杰，董曦.基于步进频连续波雷达的多目标识别方法[J].舰船电子对抗，2015，38(4):66-69.

[9] 岳建平,田林亚等.变形监测技术与应用[M].北京:国防工业出版社，2014:35-42.

[10] TB 10621-2014《高速铁路设计规范》.北京：中国铁道出版社，2014.

[11] Q/CR 9230-2016《铁路工程沉降变形观测与评估技术规程》.北京：中国铁道出版社，2016.