

基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究

周云^{1,2}, 危俊杰^{1†}, 李剑³, 郝官旺¹, 郑佳缘¹, 朱正荣¹

[1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北武汉 4300201]

摘要:以国内某高速铁路钢拱桥为研究对象,选取2017—2018年期间59幅C波段Sentinel-1号雷达卫星影像,利用PS-InSAR技术处理影像获得桥梁的视线向(Line of Sight, LOS)位移,根据SAR成像空间几何关系解算出支座的纵向位移。研究表明:支座纵向位移的时空特性与实际桥梁结构相符合,验证了PS-InSAR技术观测桥梁结构位移的可行性。建立支座纵向位移与温度的线性相关模型,并与结构健康监测系统的实测结果进行对比。两者吻合良好,相对误差控制在10%以内,验证了PS-InSAR测量桥梁结构位移的可靠性。利用有限元模拟温度作用下桥梁支座的位移变化,并与PS-InSAR位移时间序列进行对比。两者趋势基本一致,LOS向位移误差在 $[-10, 10]$ mm,验证了PS-InSAR测量桥梁结构位移的准确性。

关键词:结构健康监测;PS-InSAR;大跨桥梁结构;有限元方法;温度变形监测

中图分类号:U446;P236

文献标志码:A

Research on Temperature Deformation Monitoring of Long-span Bridges Based on InSAR Technology

ZHOU Yun^{1,2}, WEI Junjie^{1†}, LI Jian³, HAO Guanwang¹, ZHENG Jiayuan¹, ZHU Zhengrong¹

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd, Wuhan 430201, China]

Abstract: Structural health monitoring is an effective means to ensure the safe operation and maintenance of bridges and optimize the life cycle cost of bridges. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) technology based on spaceborne synthetic aperture radar can realize long-term structural health monitoring of bridges with low cost, light weight and sustainability. In this paper, a high-speed railway steel arch bridge in China is taken as the research object, and 59 C-band Sentinel-1 radar satellite images from 2017 to 2018 are selected. The PS-InSAR technology is used to process the images to obtain the line of sight (LOS) displacement of the bridge, and the longitudinal displacement of the bearing is calculated according to the spatial geometric relationship of SAR imaging. The results show that the spatial and temporal characteristics of the longitudinal

* 收稿日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278306), National Natural Science Foundation of China(52278306);湖南省重点研发计划项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province(2022SK2096);湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912);河南省交通科技项目(2020G11), Transportation Science and Technology Project of Henan Province(2020G11)

作者简介:周云(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: weijj1216@163.com

displacement of the bearing are consistent with the actual bridge structure, which verifies the feasibility of PS-InSAR technology to observe the displacement of the bridge structure. A linear correlation model between the longitudinal displacement of the bearing and the temperature is established and compared with the measured results of the structural health monitoring system. The two are in good agreement, and the relative error is close to 10%, which verifies the reliability of PS-InSAR measurement of the bridge structure displacement. The displacement of the bridge bearing under the action of temperature is simulated by finite element method, and compared with the PS-InSAR displacement time series. The two trends are basically the same, and the LOS displacement error is within $[-10, 10]$ mm, which verifies the accuracy of PS-InSAR measurement of bridge structure displacement.

Key words: structural health monitoring; persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar; long-span bridge structures; finite element method; temperature deformation monitoring

桥梁作为交通运输枢纽,在国民经济的发展中发挥着巨大的作用.由于结构材料老化、环境恶化、车辆超载等因素的影响,桥梁不可避免地出现损伤^[1-2],导致结构承载能力下降,影响桥梁的正常运营,甚至造成重大人员伤亡事故^[3-4].传统的桥梁监测手段主要依赖于定期检测,存在人工成本高、自动化程度低、维修管理决策伴随较强主观性等弊端^[5].桥梁结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 系统虽然能够实时对桥梁结构进行监测,但有限的监测点不能反映全桥整体变形信息,加之传感器电子元件价格高昂、寿命较短,难以覆盖我国量大面广的大跨桥梁.因此,寻找一种低成本、轻量化、可持续的桥梁结构长期健康监测方法迫在眉睫.

星载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 以卫星等空间飞行器为运动平台,具有全天时、全球观测能力^[6].永久散射体干涉测量技术通过统计分析方法,探测出 SAR 影像集时间相关性较高的目标 (即永久散射体, Persistent Scatterer, PS), 然后基于 PS 点的相位时间序列进行建模和分析,分离形变与大气延迟信息^[7]. PS-InSAR 技术无需人工现场工作和传感器设备购置,只需技术人员利用计算机处理目标区域的 SAR 影像数据,通过识别 PS 点的信息实现低成本、轻量化、可持续的长期监测目标.该技术目前已广泛应用于滑坡^[8]、地震^[9]、矿区沉降^[10]、火山^[11]、城市地表沉降^[12]以及城市地铁^[13]和公路沿线沉降^[14]等形变监测任务中.

PS-InSAR 技术也被应用于监测桥梁变形.一些学者通过对事故桥梁的 SAR 影像进行分析,发现桥梁在事故发生前有较大形变产生,验证了基于 InSAR 进行桥梁结构位移观测及灾害预警具有可行性^[15-16];此外,通过将温度参数引入干涉相位模型

中,许多学者发现得到的变形结果与实际更加符合,并且验证了 PS-InSAR 技术具备微小热膨胀位移的观测能力^[17-18];还有学者通过改良得到适用于特定结构类型桥梁的时序 InSAR 方法,进一步得到精确的长期位移监测结果,实现桥梁结构的长期健康监测^[19-20].现阶段, PS-InSAR 技术多应用于大跨桥梁结构的位移监测,关于 PS-InSAR 测量精度评价的相关研究还比较匮乏.

1 基于 PS-InSAR 技术的大跨桥梁位移测量

为验证利用 InSAR 技术进行桥梁的位移监测的准确性,本文面对一座大跨钢桁架拱桥,利用 2017—2018 年 59 幅覆盖研究桥梁的 Sentinel-1 卫星雷达影像数据进行 PS-InSAR 处理,获得桥梁视线向位移.根据 SAR 成像空间几何关系解算出支座的纵向位移,建立起与温度的线性相关模型,与 SHM 系统的温度变形模型对比;同时利用有限元模拟桥梁的位移变化与测量结果对比,如图 1 所示.

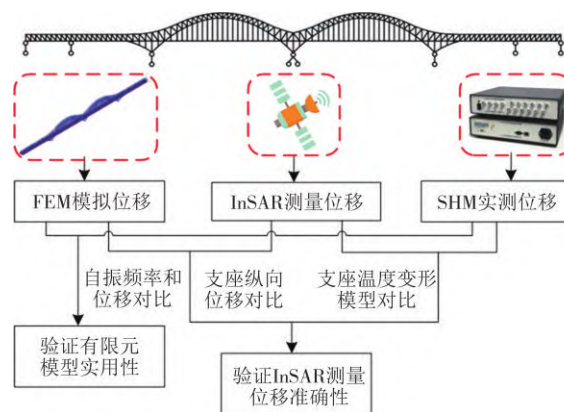


图1 研究思路

Fig.1 Research route

1.1 基本原理

SAR卫星在不同时间对同一区域目标发射雷达波反射得到信号,对两次反射的信号进行干涉并提取其中的变形相位,最后可以通过式(1)将变形相位转化为桥梁LOS位移,如图2所示。

$$\Delta\varphi_{\text{def}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{12} \quad (1)$$

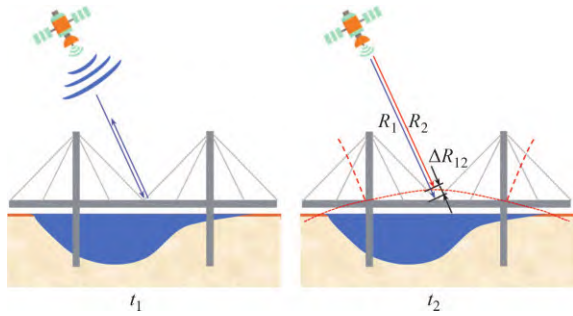


图2 SAR卫星测量桥梁位移基本原理

Fig.2 Principle of bridge displacement measurement by SAR satellite

SAR影像初步干涉得到的相位如式(2)所示^[21],除两次成像期间因为目标移动产生的视线向形变相位外,还包括参考椭球面引起的相位 φ_{ref} 、地面起伏引起的地形相位 φ_{top} 以及两次雷达成像时大气状态变化引起的延迟相位 φ_{atm} 和随机噪声 φ_{noi} 。

$$\psi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (2)$$

为了提取干涉相位中的形变分量,借助卫星精密轨道数据和数字高程模型(DEM)消除 φ_{ref} 和 φ_{top} 。经过差分处理后的相位包括线性形变相位、高程误差以及残余相位。如式(3)所示:

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} tv + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B\varepsilon + \varphi_{\text{res}} \quad (3)$$

式中: λ 为雷达波长; t 为时间基线; v 为沿LOS方向的线性形变速率; R 为雷达到地面目标的斜距; θ 为雷达入射角; B 为垂直基线; ε 为DEM高程误差; φ_{res} 为PS点的残余相位,它包括大气、非线性形变相位和噪声。

大跨桥梁的位移主要受到温度影响,因此,引入温度参数对干涉模型中非线性形变进行建模。由于桥梁结构在竖向高差较大,不能忽略干涉相位中的高程误差部分,差分干涉相位模型如式(4)所示:

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} tv + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B\varepsilon + \frac{4\pi}{\lambda} Tk + \varphi_{\text{res}} \quad (4)$$

式中: T 为温度变化值; k 为热膨胀系数。

对干涉图中的PS点连线构成PS网络,为估计PS点干涉相位模型的参数,对相邻PS进行二次差分

得到差分干涉相位,如式(5)所示:

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t\Delta v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B\Delta\varepsilon + \frac{4\pi}{\lambda} T\Delta k + \Delta\varphi_{\text{res}} \quad (5)$$

式中: Δv 、 $\Delta\varepsilon$ 、 Δk 分别为相邻PS的线性变形速率、高程残差和热膨胀系数的增量。

设置目标函数如式(6)所示:

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp[j\Delta\psi_{\text{obs}}^i - \Delta\psi_{\text{m}}^i(\Delta v, \Delta\varepsilon, \Delta k)] \quad (6)$$

式中: γ 为模型相干系数; N 为干涉对数; $\Delta\psi_{\text{obs}}^i$ 为观测相位差; $\Delta\psi_{\text{m}}^i$ 为式(5)的模型计算值。寻找 γ 最大时对应的 $(\Delta v, \Delta\varepsilon, \Delta k)$ 即为参数的最优估计值,通过PS点的形变相位获得相应位移。

1.2 PS-InSAR技术流程

PS-InSAR技术通过对SAR影像集中具备长期稳定散射特性的点进行干涉处理,提取干涉相位中的形变相位,从而获得PS的变形信息。本次研究面向一座大跨桥梁进行变形时间序列研究,相较于传统的PS-InSAR方法^[22],基于桥梁几何和结构信息,除了线性变形速率之外,还在干涉相位模型中引入了热膨胀系数和高程残差两个参数;并通过桥梁位置处3个参数的分布规律与桥梁的匹配程度来辅助判断解算结果的合理性。具体流程如图3所示。

1)主影像选取:从开源网站下载SAR影像数据,基于数据集的时空基线、多普勒中心偏移选取主

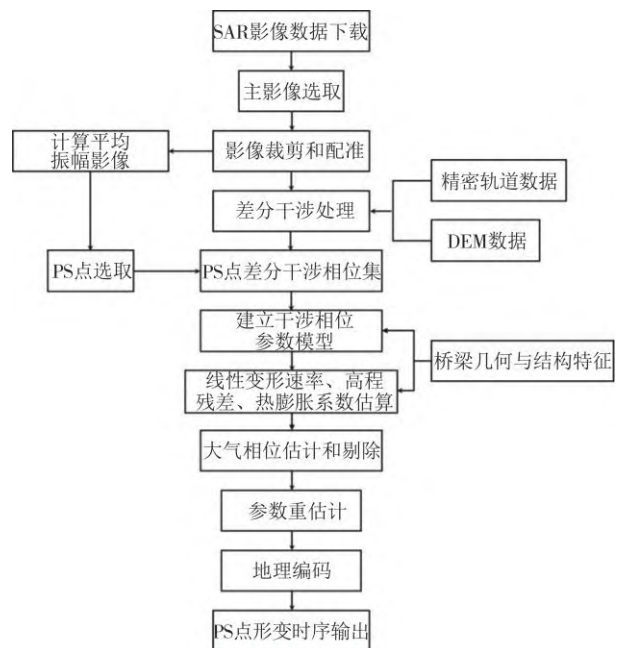


图3 PS-InSAR处理流程

Fig.3 PS-InSAR processing flow

影像.

2)裁剪配准:选择包含桥梁的区域,裁剪合适的尺寸范围;对裁剪后的影像进行坐标定位和重采样,采用相干系数法将所有副影像与主影像进行配准.

3)差分干涉:借助精密轨道矢量,利用干涉几何关系去除参考相位;通过数据重采样将外部 DEM 与 SAR 影像坐标对应,再辅以精密轨道矢量去除地形相位,得到差分干涉序列图.

4)PS点选取:计算影像中各像素振幅的时间序列,计算其标准差和均值并相除得到振幅离差指数,给定该参数的固定阈值筛选得到散射稳定的PS点.

5)干涉相位参数模型的建立:根据桥梁的几何与结构特性,建立如式(4)的参数模型;根据 Delaunay 法对 PS 点连线建立网络,对连线两侧的 PS 点做差分,依据残差项求解基线的模型相干系数,求得满足相干系数最大的参数最优解,再借助参数分布特征评估其合理性.

6)大气相位估计和剔除:根据大气相位在空间上的低频和时间上的高频特性,通过滤波的方法将其从干涉相位中分离;并对剔除大气相位后的干涉相位进行参数重估计,得到 PS 点的形变和高程相位.

7)形变时序输出:根据(6)中的形变相位和高程相位求解各 PS 点的形变时序和真实高程,再通过雷达影像坐标系与地理空间坐标系的几何变换关系,得到含有变形时间序列且与桥梁地理空间位置对应的 PS 点数据.

1.3 InSAR 变形观测几何关系

桥梁的观测几何如图4所示,其中P点为桥梁所在位置.可以得到雷达的视线向位移 D_{LOS} 和桥梁的三维位移的关系,如式(7)所示:

$$D_{LOS} = D_V \cos \theta + D_N \sin \theta \sin \alpha - D_E \sin \theta \cos \alpha \quad (7)$$

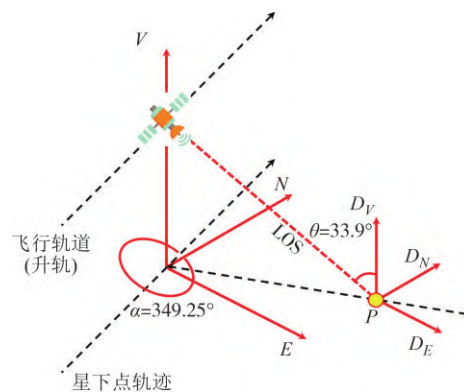
式中: D_V 为竖向位移; D_N 为南北方向位移; D_E 为东西方向位移; θ 为侧视角; α 为航向角.

由图4(b)可知,桥梁纵向、横向和东西向、南北向位移的关系如式(8)所示:

$$\begin{aligned} D_N &= D_y \sin \beta - D_x \cos \beta \\ D_E &= D_y \cos \beta + D_x \sin \beta \end{aligned} \quad (8)$$

式中: D_x 为纵向位移; D_y 为横向位移.

联立式(7)、式(8),可以得到,桥梁纵向、横向、竖向位移和视线向位移关系如式(9)所示:



(a) 卫星空间观测几何



(b) 桥梁平面观测几何

图4 InSAR 变形观测几何

Fig.4 InSAR deformation observation geometry

$$D_{LOS} = D_V \cos \theta - D_x \sin \theta \cdot \sin(\alpha + \beta) - D_y \sin \theta \cos(\alpha + \beta) \quad (9)$$

2 研究桥梁基本概况

本次研究的桥梁为某六轨高速铁路大桥,图5为桥梁几何外形.该桥由两跨连续的钢桁架拱和四跨引桥组成,支座采用球面钢轴承,在#7位置,中心桁架支承在固定支座上,边支座支承在两侧桁架上,允许横向运动.在其他桥墩上,中心桁架的支撑允许纵向运动,侧桁架的支撑允许纵向和横向运动.

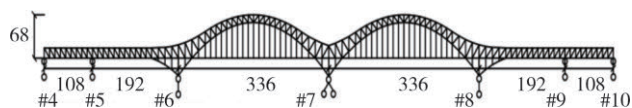


图5 桥梁几何外形(单位:m)

Fig.5 Geometric shape of bridge(unit: m)

该桥相关资料从文献[23-26]获得.文献[23]表明:研究桥梁桥墩采用深桩基础,成桥后竖向沉降可以忽略不计,而且支座竖向受到约束,外界荷载作用下支座竖向位移可以忽略.文献[24]利用SHM获取了桥梁支座长期纵向位移,并利用支座纵向位移计

算得到横向位移,对比可得支座横向位移峰值比纵向位移峰值小两个数量级,因此可以假定桥梁支座位移主要为纵向位移.文献[25-26]表明:列车荷载、环境响应以及温度是影响其纵向位移的三个因素,通过小波变换分解得到各影响因素的位移分量.可以发现相较于温度,列车荷载和环境响应引起的支座纵向位移可以忽略不计,即温度变化是支座纵向位移的主要影响因素,而且支座纵向位移与结构的平均温度呈现出很强的线性关系.

通过对影像成像信息查询发现,选取的 SAR 影像拍摄成像时间均为 UTM(零时区)时间 10:00.而研究桥梁时区位于东八区,时间比零时区早 8 h,对应成像时刻的地方时间为 18:00.此时正值日落前后,可以认为所有选取的影像成像时刻,桥梁都近似处于均匀温度场作用.

桥梁结构的均匀温度一般与气温参数线性相关,斜率取值接近 1^[27].欧洲规范对钢桥均匀温度预测的经验公式中,结构均匀温度与大气温度也为线性关系,而且斜率为 1^[28].影像成像时刻桥梁都处于均匀温度场作用下,所以可以采用成像时刻的实时大气温度来模拟桥梁结构的温度变化.

因为 Sentinel-1 卫星数据采样周期达 14 d,而 SHM 监测采样周期为 10 min^[25].此外,现有的实测桥梁支座位移数据为 2013 年 3 月至 10 月,而 Sentinel-1 卫星自 2014 年以后才开始有目标桥梁所在地区的 SAR 影像,所以不能直接将 PS-InSAR 测量值与 SHM 实测值进行对比.为验证利用卫星监测桥梁结构位移的准确性,本文拟通过以下方法进行校验:

1)获取距离研究桥梁位置最近的温度测站的大气温度信息,选取成像时刻的实时温度作为桥梁结构温度.

2)对桥梁结构有限元模型施加均匀的温度场,将得到的温度变形模型斜率与桥梁实测值进行比较,验证有限元模型的准确性.

3)将有限元模拟变形与 InSAR 测量变形进行比较,验证 InSAR 测量结果的准确性.

3 SAR 影像数据处理

本次选取 2017 年 1 月至 2018 年 12 月期间覆盖该桥梁的 59 景干涉宽幅模式 Sentinel-1 升轨卫星数据.根据气象信息网站 <https://rp5.ru/> 查询得到影像拍摄日期对应的实时大气温度,影像信息如表 1 所示.

表 1 影像信息

Tab.1 Image information

日期	时间基线	空间基线	气温/℃
2017-01-03	-432	42.8	10
2017-01-15	-420	17.1	4
2017-02-08	-396	-7.8	2
2017-02-20	-384	21.5	5
2017-03-04	-372	-8.5	17
2017-03-16	-360	53.8	12
2017-03-28	-348	-1.5	19
2017-04-09	-336	78.8	12
2017-04-21	-324	103.1	20
2017-05-03	-312	104.8	21
2017-05-15	-300	92.1	20
2017-05-27	-288	-10.5	31
2017-06-08	-276	39.8	29
2017-07-02	-252	34.2	25
2017-07-14	-240	34.2	33
2017-07-26	-228	17.8	37
2017-08-07	-216	1.5	34
2017-08-19	-204	37.5	28
2017-08-31	-192	65.1	20
2017-09-12	-180	91.5	27
2017-09-24	-168	35.5	22
2017-10-06	-156	-20.1	18
2017-10-18	-144	-31.5	16
2017-10-30	-132	78.4	12
2017-11-11	-120	32.3	14
2017-11-23	-108	62.8	8
2017-12-05	-96	-88.8	4
2017-12-17	-84	-71.0	1
2017-12-29	-72	-82.1	10
2018-01-10	-60	15.7	2
2018-01-22	-48	56.9	7
2018-02-03	-36	8.7	-1
2018-02-15	-24	-3.1	6
2018-02-27	-12	13.3	15
2018-03-11	0	0.0	18
2018-03-23	12	-10.1	18
2018-04-04	24	-25.4	12
2018-04-16	36	10.4	17
2018-04-28	48	-5.1	26
2018-05-10	60	107.7	22
2018-05-22	72	64.8	19
2018-06-03	84	10.2	25
2018-06-15	96	-8.5	29
2018-06-27	108	-14.6	33
2018-07-09	120	-0.3	30
2018-07-21	132	79.0	34
2018-08-02	144	-35.6	32

续表

日期	时间基线	空间基线	气温/ $^{\circ}\text{C}$
2018-08-14	156	6.9	33
2018-08-26	168	13.8	28
2018-09-07	180	58.0	25
2018-09-19	192	73.9	31
2018-10-01	204	60.4	21
2018-10-13	216	79.3	20
2018-10-25	228	-56.5	17
2018-11-06	240	-68.6	14
2018-11-18	252	34.0	9
2018-11-30	264	8.4	13
2018-12-12	276	-28.4	2
2018-12-24	288	-4.3	10

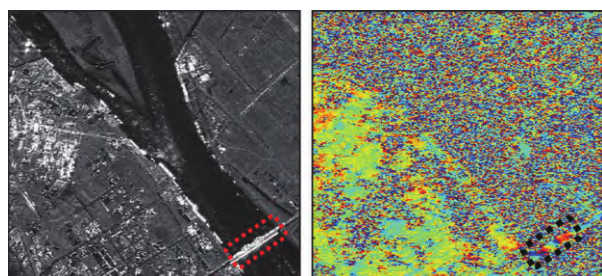
本文采用 SARProz 软件,对上述 SAR 影像进行 PS-InSAR 处理,获取桥梁的 LOS 变形结果. 其中,选取 2018-3-11 期影像为主影像,由于整幅影像覆盖面积过大,为了节约数据处理时间,裁剪为如图 6 所示的正方形影像.



图6 裁剪区域
Fig.6 Cut region

图 7 为裁剪区域影像通过计算平均振幅影像和差分干涉得到的结果. 钢拱桥具有良好的散射特性,在强度影像中桥梁位置颜色高亮. 干涉图中桥梁纵向变化连续.

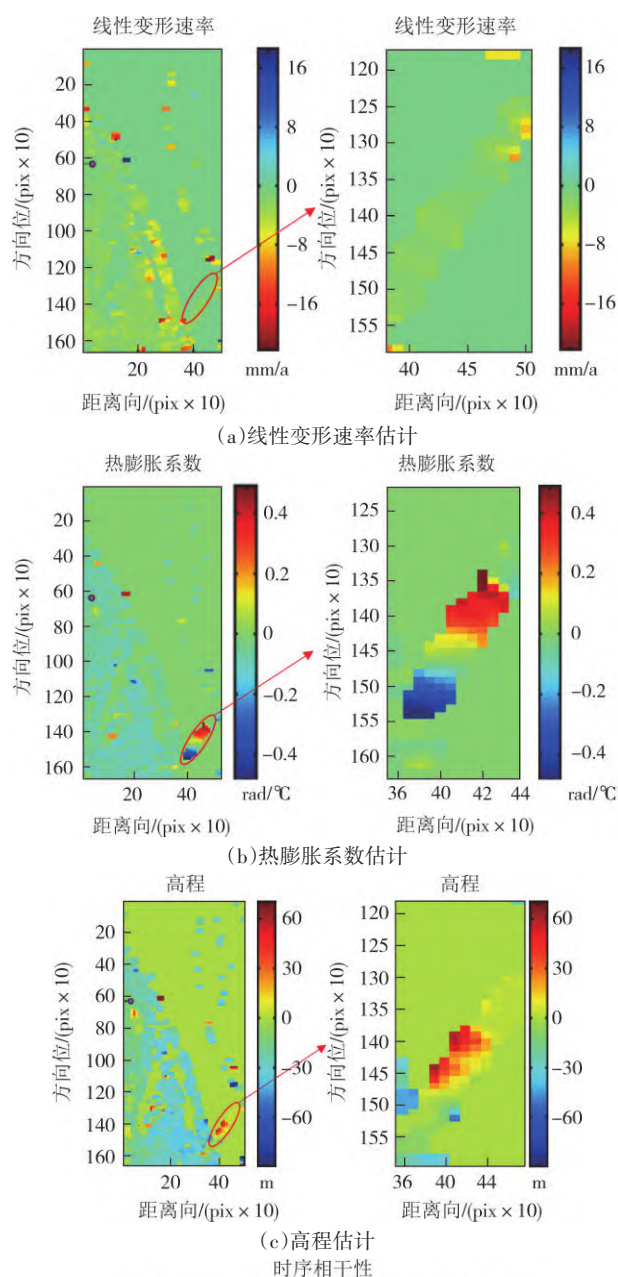
差分干涉相位由线性变形速率、高程以及热膨



(a)强度影像 (b)干涉相位图
图7 影像初步处理结果

Fig.7 Preliminary image processing results

胀系数贡献相位组成. 由图 8(a)可以看出沿桥梁纵向,线性变形速率很小;图 8(b)中热膨胀系数绝对值



(a)线性变形速率估计

(b)热膨胀系数估计

(c)高程估计

时序相干性

(d)时序相干性

(e)时序相干性

(f)时序相干性

(g)时序相干性

(h)时序相干性

(i)时序相干性

(j)时序相干性

(k)时序相干性

(l)时序相干性

(m)时序相干性

(n)时序相干性

(o)时序相干性

(p)时序相干性

(q)时序相干性

(r)时序相干性

(s)时序相干性

(t)时序相干性

(u)时序相干性

(v)时序相干性

(w)时序相干性

(x)时序相干性

(y)时序相干性

(z)时序相干性

(aa)时序相干性

(ab)时序相干性

(ac)时序相干性

(ad)时序相干性

(ae)时序相干性

(af)时序相干性

(ag)时序相干性

(ah)时序相干性

(ai)时序相干性

(aj)时序相干性

(ak)时序相干性

(al)时序相干性

(am)时序相干性

(an)时序相干性

(ao)时序相干性

(ap)时序相干性

(aq)时序相干性

(ar)时序相干性

(as)时序相干性

(at)时序相干性

(au)时序相干性

(av)时序相干性

(aw)时序相干性

(ax)时序相干性

(ay)时序相干性

(az)时序相干性

(ba)时序相干性

(bb)时序相干性

(bc)时序相干性

(bd)时序相干性

(be)时序相干性

(bf)时序相干性

(bg)时序相干性

(bh)时序相干性

(bi)时序相干性

(bj)时序相干性

(bk)时序相干性

(bl)时序相干性

(bm)时序相干性

(bn)时序相干性

(bo)时序相干性

(bp)时序相干性

(bq)时序相干性

(br)时序相干性

(bs)时序相干性

(bt)时序相干性

(bu)时序相干性

(bv)时序相干性

(bw)时序相干性

(bx)时序相干性

(by)时序相干性

(bz)时序相干性

(ca)时序相干性

(cb)时序相干性

(cc)时序相干性

(cd)时序相干性

(ce)时序相干性

(cf)时序相干性

(cg)时序相干性

(ch)时序相干性

(ci)时序相干性

(cj)时序相干性

(ck)时序相干性

(cl)时序相干性

(cm)时序相干性

(cn)时序相干性

(co)时序相干性

(cp)时序相干性

(cq)时序相干性

(cr)时序相干性

(cs)时序相干性

(ct)时序相干性

(cu)时序相干性

(cv)时序相干性

(cw)时序相干性

(cx)时序相干性

(cy)时序相干性

(cz)时序相干性

(da)时序相干性

(db)时序相干性

(dc)时序相干性

(dd)时序相干性

(de)时序相干性

(df)时序相干性

(dg)时序相干性

(dh)时序相干性

(di)时序相干性

(dj)时序相干性

(dk)时序相干性

(dl)时序相干性

(dm)时序相干性

(dn)时序相干性

(do)时序相干性

(dp)时序相干性

(dq)时序相干性

(dr)时序相干性

(ds)时序相干性

(dt)时序相干性

(du)时序相干性

(dv)时序相干性

(dw)时序相干性

(dx)时序相干性

(dy)时序相干性

(dz)时序相干性

(ea)时序相干性

(eb)时序相干性

(ec)时序相干性

(ed)时序相干性

(ee)时序相干性

(ef)时序相干性

(eg)时序相干性

(eh)时序相干性

(ei)时序相干性

(ej)时序相干性

(ek)时序相干性

(el)时序相干性

(em)时序相干性

(en)时序相干性

(eo)时序相干性

(ep)时序相干性

(eq)时序相干性

(er)时序相干性

(es)时序相干性

(et)时序相干性

(eu)时序相干性

(ev)时序相干性

(ew)时序相干性

(ex)时序相干性

(ey)时序相干性

(ez)时序相干性

(fa)时序相干性

(fb)时序相干性

(fc)时序相干性

(fd)时序相干性

(fe)时序相干性

(ff)时序相干性

(fg)时序相干性

(fh)时序相干性

(fi)时序相干性

(fj)时序相干性

(fk)时序相干性

(fl)时序相干性

(fm)时序相干性

(fn)时序相干性

(fo)时序相干性

(fp)时序相干性

(fq)时序相干性

(fr)时序相干性

(fs)时序相干性

(ft)时序相干性

(fu)时序相干性

(fv)时序相干性

(fw)时序相干性

(fx)时序相干性

(fy)时序相干性

(fz)时序相干性

(ga)时序相干性

(gb)时序相干性

(gc)时序相干性

(gd)时序相干性

(ge)时序相干性

(gf)时序相干性

(gg)时序相干性

(gh)时序相干性

(gi)时序相干性

(gj)时序相干性

(gk)时序相干性

(gl)时序相干性

(gm)时序相干性

(gn)时序相干性

(go)时序相干性

(gp)时序相干性

(gq)时序相干性

(gr)时序相干性

(gs)时序相干性

(gt)时序相干性

(gu)时序相干性

(gv)时序相干性

(gw)时序相干性

(gx)时序相干性

(gy)时序相干性

(gz)时序相干性

(ha)时序相干性

(hb)时序相干性

(hc)时序相干性

(hd)时序相干性

(he)时序相干性

(hf)时序相干性

(hg)时序相干性

(hh)时序相干性

(hi)时序相干性

(hj)时序相干性

(hk)时序相干性

(hl)时序相干性

(hm)时序相干性

(hn)时序相干性

(ho)时序相干性

(hp)时序相干性

(hq)时序相干性

(hr)时序相干性

(hs)时序相干性

(ht)时序相干性

(hu)时序相干性

(hv)时序相干性

(hw)时序相干性

(hx)时序相干性

(hy)时序相干性

(hz)时序相干性

(ia)时序相干性

(ib)时序相干性

(ic)时序相干性

(id)时序相干性

(ie)时序相干性

(if)时序相干性

(ig)时序相干性

(ih)时序相干性

(ii)时序相干性

</

中间小两边大,与桥梁的变形特征基本一致;图8(c)中桥梁中间两跨高程明显大于两侧,和桥梁的几何特征基本一致;图8(d)中桥梁位置处像素的颜色很深,对应的时间相干性较大,模型解算值接近实际观测值;因此,本次PS-InSAR求解得到结果置信度较高.图9为PS研究区域的PS点分布情况以及2017-07-26期LOS向位移测量结果.



图9 PS点分布以及2017-7-26期变形(单位:mm)

Fig.9 PS point distribution and deformation of 2017-7-26
(unit:mm)

4 InSAR 测量结果分析

4.1 支座纵向位移时空特性分析

由前文对目标桥梁的文献调研可知,桥梁支座长期位移主要是纵向位移,竖向和横向位移可以忽

略不计.因此根据式(9)可得支座纵向位移与LOS向位移的关系如式(10)所示:

$$D_x = -D_{\text{LOS}} / [\sin \theta \sin(\alpha + \beta)] \quad (10)$$

通过式(10)将PS-InSAR获得的LOS向位移转化为纵向位移.得到各支座2017—2018年间支座纵向位移时间序列如图10所示.沿桥方向各支座纵向位移的空间分布如图11所示.(每条线代表一幅SAR影像对应日期的支座纵向位移连线).由图10可知:

1)以#7支座为中心,两侧对称位置处的支座的纵向位移具有明显的对称性.这是由于桥梁本身结构以及支座形式以#7支座为中心对称,并且成像时刻桥梁近似处于均匀温度作用下.对称结构在对称荷载作用下,产生的位移也会出现对称性.

2)#7支座两端的支座纵向位移与温度变化趋势高度一致,且具有明显的季节性变化特征.这是由于温度是影响目标桥梁支座纵向位移的主要因素.其中#4、#5、#6支座纵向位移与温度呈正相关,#8、#9、#10支座纵向位移与温度呈负相关,这是由于#7支座固定,两端支座由于温度变化,纵向位移发生的方向相反,所以相关性的正负相反.

3)沿桥纵向支座位移呈线性分布.距离跨中越远,其变形越大.这是由于桥梁#7支座纵向受到约束,两端支座纵向可以自由运动.在均匀温度作用下,支座纵向位移与#7支座距离成线性关系,距离越远,支座纵向位移越大.

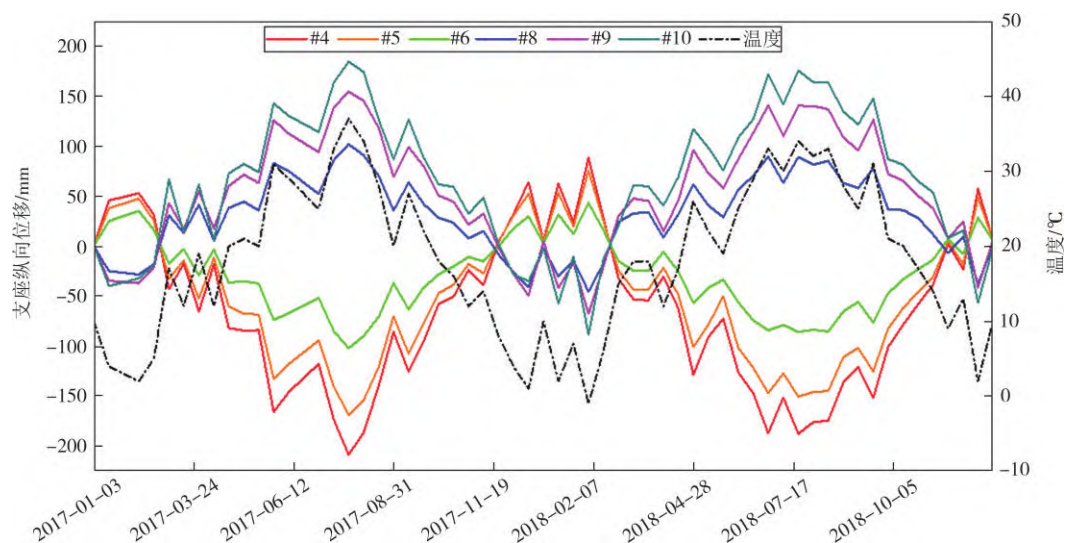


图10 各支座纵向位移时间序列图

Fig.10 Time series of longitudinal displacement of each bearing

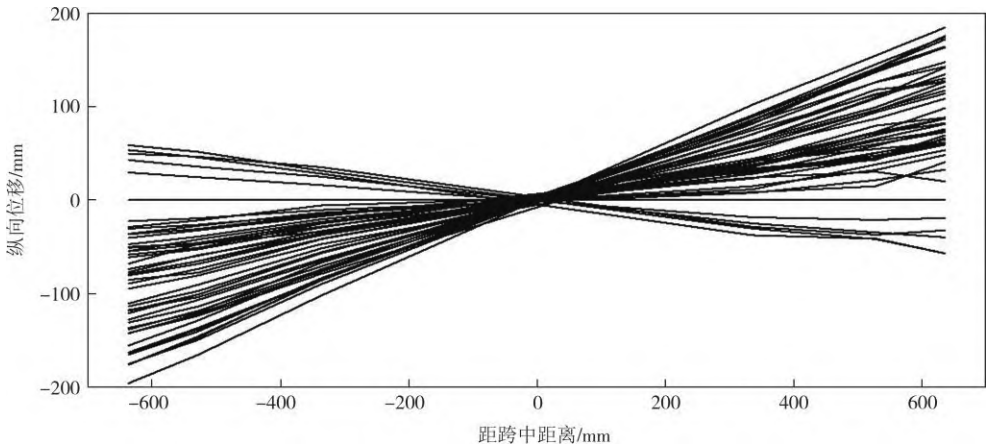


图 11 桥梁支座纵向位移空间分布图

Fig.11 Spatial distribution of longitudinal displacement of bridge bearing

综上所述,InSAR 获取的支座纵向位移的时空特性均与实际桥梁结构变形特征相符合,验证了 PS-InSAR 技术具备监测大跨桥梁位移的可行性.

4.2 支座纵向位移与温度相关性分析

支座纵向位移主要受温度影响,且呈现明显的线性关系,为此建立支座纵向位移与温度的相关性模型,如图 12 所示.

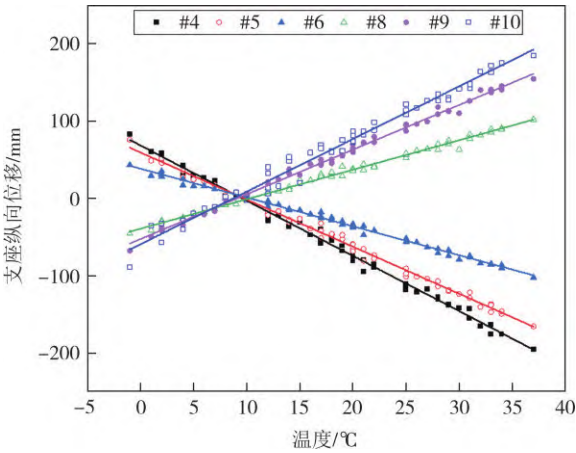


图 12 纵向位移与温度的相关性

Fig.12 Correlation between longitudinal displacement and temperature

经过线性拟合得到#4~#10(无#7 支座)线性相关系数分别为 0.997、0.997、0.996、0.996、0.997、0.990, 支座纵向位移与温度的线性相关方程如表 2 所示.

单位温度变化引起的支座纵向位移分别为 7.13 mm、6.08 mm、3.72 mm、3.81 mm、5.77 mm、6.80 mm. 可以看出支座纵向位移和温度呈现明显的线性相关,并且对称支座处的线性模型斜率数值近似相等,符合对称桥梁结构在近似均匀温度作用下的变形特征.

表 2 支座纵向位移与温度线性相关方程

Tab.2 Bearing longitudinal displacement and temperature linear correlation equation

位置	InSAR
#4	$d=-7.13T+68.56$
#5	$d=-6.08T+61.92$
#6	$d=-3.72T+40.48$
#8	$d=3.81T-35.04$
#9	$d=5.77T-49.47$
#10	$d=6.80T-56.66$

为探究基于 PS-InSAR 技术获取的桥梁支座温度线性变形模型的真实可靠性,与 SHM 实测结果^[29]进行对比. 线性模型的对比主要是斜率的对比,即在发生单位温度变化时,对应支座发生纵向位移大小的对比,结果如表 3 所示. 可以看到,与 SHM 实测值的相对误差接近 10% 以内. 因此,PS-InSAR 技术能够获得温度作用下桥梁支座的纵向位移,并且可以建立较为准确的温度变形模型. 验证了 InSAR 获取大跨桥梁位移的可靠性.

表 3 温度变形模型斜率对比

Tab.3 Slope comparison of temperature deformation model

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
InSAR	7.13	6.08	3.72	3.81	5.77	6.80
SHM	7.32	6.05	4.21	4.42	6.12	7.48
误差/%	2.60	-0.50	11.64	13.80	5.72	9.09

注:误差=(SHM-InSAR)/SHM.

5 有限元模拟与对比

5.1 桥梁有限元模型

使用 ANSYS 2020 R1 建立桥梁的三维有限元分

析模型.全桥采用BEAM188单元模拟桁架拱、横向连接杆件、主梁加劲大小纵梁、吊杆,采用SHELL181单元模拟主梁桥面系和主梁横隔板.如图13所示.

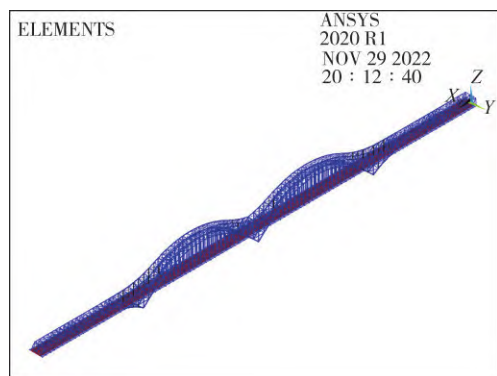


图13 桥梁有限元模型

Fig.13 Bridge finite element model

全桥共59 918个节点,112 706个单元,其中梁单元58 370个,壳单元54 336个.有限元模型的边界条件设置为:桥梁中间墩中间支座处完全约束(纵向 X 、横向 Y 、竖向 Z),上下游侧支座处约束竖向(Z 方向)、纵向(X 方向);其他桥墩中间支座处约束竖向(Z 方向)、横向(Y 方向),上下游侧支座处约束竖向(Z 方向).

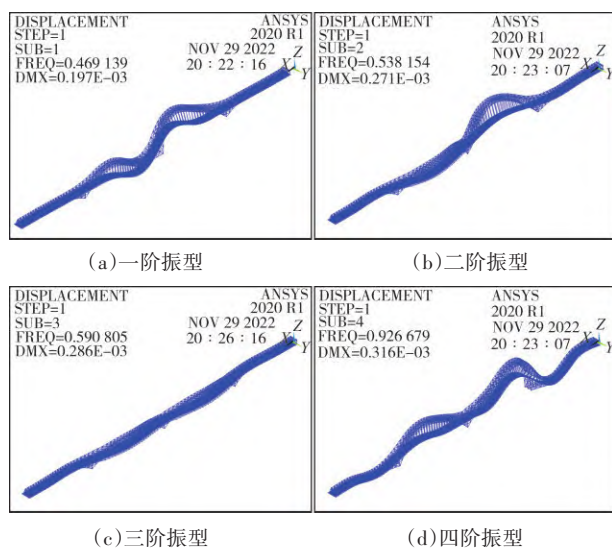
通过与文献[30]对比,利用模态分析模块求解前四阶频率和实测值对比如表4所示,振型如图14所示.前四阶频率误差在 $\pm 10\%$ 范围以内,验证了该有限元模型的准确性.

表4 桥梁模态对比

Tab.4 Bridge modal comparison

阶数	实测值/ Hz	振型特征	计算值/ Hz	误差/%
第一阶	0.508	竖向反对称+横向反对称	0.469	-7.68
第二阶	0.512	横向反对称+扭曲	0.538	5.08
第三阶	0.558	横向正对称	0.591	5.91
第四阶	0.965	竖向正对称	0.927	-3.94

由前文可知,SAR影像成像时刻桥梁近似处于均匀温度场,而且温度是影响支座纵向位移的主要因素.通过对有限元模型施加变化的均匀温度场,得到各支座的纵向位移.建立支座纵向位移与温度的线性相关模型,获取相关模型的斜率.与文献[29]中的实测值和有限元模拟值对比结果如表5所示.与文献中的有限元模拟值相比,斜率基本一致,与实测值的误差在10%之内.因此可以利用有限元模型模拟桥梁结构的长期位移.



(a)一阶振型

(b)二阶振型

(c)三阶振型

(d)四阶振型

图14 桥梁前四阶振型

Fig.14 The first four modes of vibration of bridge

表5 温度变形模型斜率对比

Tab.5 Slope comparison of temperature deformation model

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
ANSYS	7.630	6.329	3.996	3.996	6.329	7.629
文献实测值	7.317	6.049	4.210	4.420	6.121	7.479
文献模拟值	7.632	6.336	4.032	4.032	6.336	7.632
误差/%	-4.28	-4.63	5.08	9.59	-3.40	-2.01

注:误差=(文献实测值-ANSYS)/文献实测值

5.2 InSAR测量与有限元模拟变形比较

为了探究利用PS-InSAR技术测量位移的准确性,将PS-InSAR求解过程的温度时间序列,以变化的均匀温度场的形式施加至有限元模型节点,来模拟桥梁结构的温度变化.各支座的变形时间序列的测量值与计算值对比如图15所示,可以看出两者的时间序列变化趋势一致,数值拟合程度较好.在LOS向,各支座位移InSAR测量值与模拟值的误差如图16所示.其误差主要分布在 $[-10, 10]$ mm,表明PS-InSAR技术测量位移精度达到了mm级.因此,利用PS-InSAR技术能够较准确地对桥梁结构长期位移进行监测.

InSAR测量值与有限元计算值存在一定的误差,主要与影像精度、温度选取以及变形分解有关.由于本次PS-InSAR处理采用的影像为C波段的Sentinel-1影像,分辨率较低.选取得到的稳定PS点数量较少,因此在估计支座纵向位移时候选取的点有限,且各PS点定位精度难以保证.此外,虽然影像成像时刻正值日落前后,假设桥梁温度均匀分布,但

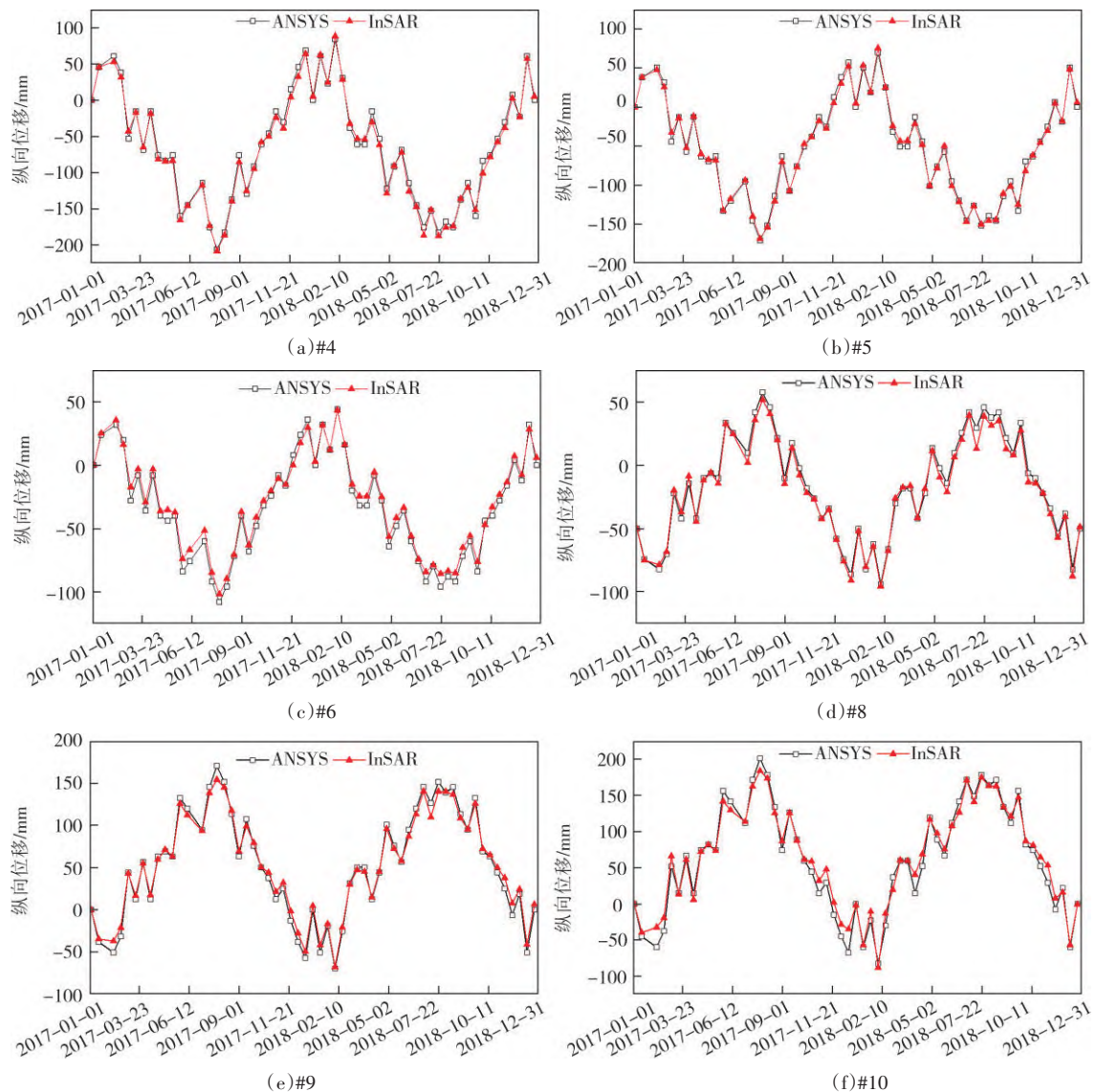


图15 桥梁支座纵向位移对比

Fig.15 Comparison of longitudinal displacement of bridge bearings

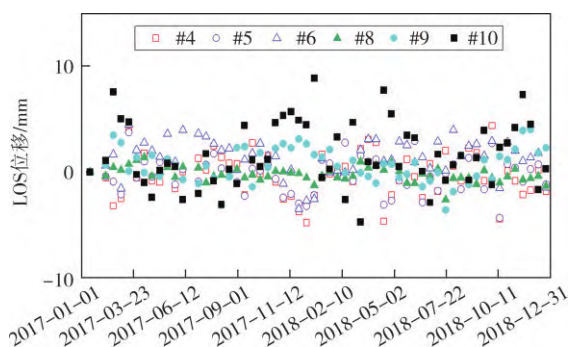


图16 LOS向支座位移误差

Fig.16 LOS bearing displacement error

实际桥梁真实温度仍会存在一定的不均匀分布特性,因此选用成像时刻的实时大气温度代表桥梁温度会存在一定误差.最后,在LOS向位移分解得到纵向位移时,本文假设横向和纵向位移忽略不计.而选

取计算支座纵向位移的PS点大多数是钢桁架上部的测点,其竖向没有受到约束,可以发生变形.特别是钢桁架拱顶位置,由于其高度较高,因此在桥梁竖向的温度变形较大,不能忽略其对LOS向位移的影响.选取2017-7-26期PS点的变形数据,在GIS软件中三维展示LOS向变形如图17所示.可以明显看出#6、#7、#8支座之间的,同一水平位置处桥上和钢桁架拱顶位置的LOS向变形不一致.

为验证竖向位移对LOS向位移产生影响,利用有限元计算M点的三维变形,分别利用式(9)和式(10)求得LOS向位移.有限元计算得到的横向变形较小,且LOS向位移对桥梁横向位移的敏感度较小,因此在LOS变形计算中不予考虑.计算结果如图18所示.

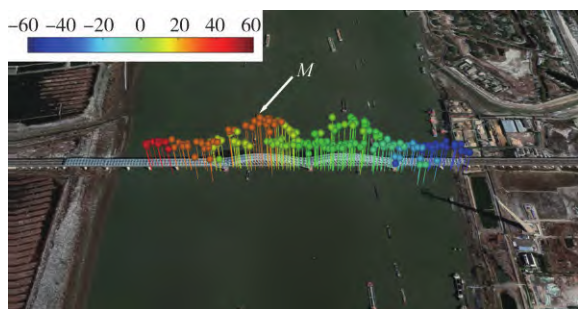


图17 2017-7-26期PS点LOS向变形空间分布(单位:mm)

Fig.17 Spatial distribution of LOS deformation of PS points in 2017-7-26(unit: mm)

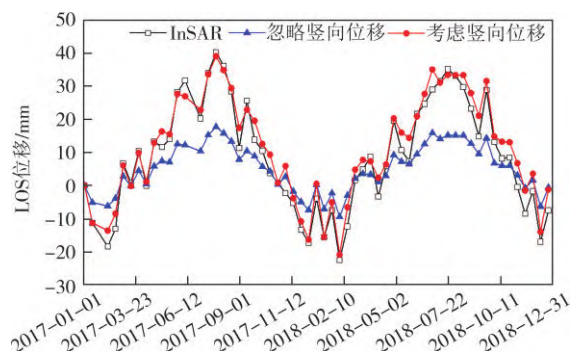


图18 M点LOS向位移对比

Fig.18 Comparison of LOS displacement of point M

可以看出,对于位于钢桁架拱顶的 M 点,如果忽略竖向位移,则得到变形在LOS向的投影会产生较大的误差.考虑竖向变形得到的LOS向变形计算值与InSAR测量值吻合较好,验证了PS-InSAR求解变形的准确性.另外,提供了一种LOS位移分解的思路,利用有限元模拟真实结构三维位移的关系,进而得到结构真实三维位移的测量结果.

6 结论

本文基于PS-InSAR技术处理了2017—2018年间59幅覆盖某桥梁的Sentinel-1雷达影像,实现对该桥梁的长期位移监测,通过对桥梁时序位移分析得出以下结论:

1)利用PS-InSAR技术获得的桥梁支座纵向位移在空间上呈现出对称性,并且沿桥梁纵向呈线性分布.在时间上与温度变化趋势高度一致,且具有明显的季节性变化特征.符合桥梁结构变形特征,验证了PS-InSAR技术测量桥梁变形的可行性.

2)建立PS-InSAR技术获得的支座纵向位移与温度的线性模型,并与SHM实测值进行比较,线性模型斜率相对误差接近10%以内,验证了PS-InSAR

技术获取桥梁位移的可靠性.

3)将PS-InSAR测量值和有限元的计算值进行对比,发现两者变化趋势一致,在LOS向位移误差在 $[-10, 10]$ mm.验证了PS-InSAR可以较为准确地测得桥梁结构位移.

4)利用竖向位移和纵向位移的有限元计算值反算LOS向位移,与PS-InSAR的测量值进行对比,两者吻合较好,验证了利用有限元模型将LOS位移反演为真实三维位移的可行性.

本研究采用C波段的SAR影像进行PS-InSAR处理,其空间分辨率较低,相应PS点的数量有限.此外,大气温度与桥梁真实温度场存在差异,利用均匀温度场模拟实际变形会产生一定偏差.在SAR影像数据精度有限情况下,利用更符合实际的桥梁温度场,获得更加准确的变形是未来的重要研究方向.

参考文献

- [1] DENG L, YAN W C, NIE L. A simple corrosion fatigue design method for bridges considering the coupled corrosion-overloading effect[J]. Engineering Structures, 2019, 178: 309-317.
- [2] 彭建新, 胡守旺, 张健仁. 考虑温室效应的氯盐环境下RC桥梁锈胀开裂性能预测[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 103-110.
PENG J X, HU S W, ZHANG J R. Corrosion-induced crack performance prediction of RC bridge under chloride attack considering effect of global warming[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 103-110. (in Chinese)
- [3] 黄盛楠, 陆新征, 郑建春, 等. 超载导致钢筋混凝土拱桥倒塌的破坏模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊2): 122-127.
HUANG S N, LU X Z, ZHENG J C, et al. Overload-induced progressive collapse simulation for a reinforced concrete arch bridge[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Sup.2): 122-127. (in Chinese)
- [4] 李翠华, 杨利斌, 傅志华, 等. 无锡市312高架桥倾覆事故分析[J]. 工程力学, 2021, 38(9): 203-211.
LI C H, YANG L B, FU Z H, et al. Forensic analysis of the Wuxi 312 Viaduct overturning collapse[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 203-211. (in Chinese)
- [5] 张一鸣. 面向大跨度桥梁结构健康监测的多源数据预测方法及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZHANG Y M. Multi-source data prediction method for health monitoring of long-span bridge structure and its application[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [6] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载SAR技术发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 1-33.
DENG Y K, YU W D, ZHANG H, et al. Forthcoming spaceborne SAR development[J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 1-33. (in Chinese)

- [7] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1):8-20.
- [8] 贺黎明, 裴攀科, 吴立新, 等. 基于时序 InSAR 的矿区滑坡前地表运动特征分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(9):1314-1321.
- HE L M, PEI P K, WU L X, et al. Analysis of surface movement characteristics before landslide in mining area based on time series InSAR [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(9): 1314-1321. (in Chinese)
- [9] 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等. 2022 年泸定 MW 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(1): 36-46.
- HAN B Q, LIU Z J, CHEN B, et al. Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding MW 6.6 earthquake revealed by InSAR observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1):36-46. (in Chinese)
- [10] CHEN Y, YU S W, TAO Q X, et al. Accuracy verification and correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in monitoring mining surface subsidence[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21):4365.
- [11] MENG Z G, SHU C Z, YANG Y, et al. Time series surface deformation of Changbaishan Volcano based on sentinel-1B SAR data and its geological significance[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1213.
- [12] GUO L, GONG H L, LI J W, et al. Understanding uneven land subsidence in Beijing, China, using a novel combination of geophysical prospecting and InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16):e2020GL088676.
- [13] GHEORGHE M, ARMA I, DUMITRU P, et al. Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(7):2644-2663.
- [14] SHI X G, NIU F J, QU T T, et al. Stability analysis of Shiwei-Labudalin Highway in Inner Mongolia, northeastern China using Sentinel-1 InSAR [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 202:103647.
- [15] SOUSA J J, BASTOS L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(3):659-667.
- [16] MILILLO P, GIARDINA G, PERISSIN D, et al. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1403.
- [17] LAZECKY M, HLAVACOVA I, BAKON M, et al. Bridge displacements monitoring using space-borne X-band SAR interferometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1):205-210.
- [18] CUSSON D, TRISCHUK K, HÉBERT D, et al. Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges: validation case study on the north channel bridge in Ontario, Canada [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 2672(45): 76-86.
- [19] QIN X Q, DING X L, LIAO M S, et al. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 156: 27-50.
- [20] 段伟, 吕孝雷. 一种新的桥梁区域时序 InSAR 相位解缠方法[J]. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(2): 251-258.
- DUAN W, LÜ X L. A new phase unwrapping algorithm of time series InSAR for large bridges [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 36(2): 251-258. (in Chinese)
- [21] 刘国祥, 陈强, 罗小军. 永久散射体雷达干涉理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- LIU G X, CHEN Q, LUO X J. Theory and method of radar interferometry with permanent scatterers [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [22] MORA O, MALLORQUI J J, BROQUETAS A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2243-2253.
- [23] XIA C Y, ZHONG T Y. Numerical analysis of the Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge subjected to non-uniform seismic excitations [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(5): 1297-1306.
- [24] ZHAO H W, DING Y L, NAGARAJIAH S, et al. Longitudinal displacement behavior and girder end reliability of a jointless steel-truss arch railway bridge during operation [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2222.
- [25] DING Y L, WANG G X, SUN P, et al. Long-term structural health monitoring system for a high-speed railway bridge structure [J]. *The Scientific World Journal*, 2015, 2015: 1-17.
- [26] WANG G X, DING Y L, SONG Y S, et al. Detection and location of the degraded bearings based on monitoring the longitudinal expansion performance of the main girder of the Dashengguan Yangtze Bridge [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(4): 04015074.
- [27] 刘永健, 刘江, 张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5):59-78.
- LIU Y J, LIU J, ZHANG N. Review on solar thermal actions of bridge structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 59-78. (in Chinese)
- [28] Eurocode 1: actions on structures-part 1-5: general actions-thermal actions[S]. Belgium, Brussels: European Committee for Standardization.
- [29] ZHU Q X, WANG H, SPENCER B F J. Investigation on the mapping for temperature-induced responses of a long-span steel truss arch bridge [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022: 1-18.
- [30] 徐伟周. 基于振动监测的高速铁路桥梁安全预警方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- XU W Z. Research on safety early warning method of high-speed railway bridges based on vibration monitoring [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)