

引用格式:朱宏磊,侯立强,蒋鹏飞,等.港口引桥形变的建筑信息模型(BIM)与多源遥感协同感知方法[J].工业建筑,2026,56(5):201-207.
ZHU Honglei, HOU Liqiang, JIANG Pengfei, et al. A Synergistic Method for Deformation Sensing of Port Approach Bridges Based on BIM and Multi-Source Remote Sensing[J]. Industrial Construction, 2026, 56(5): 201-207 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG26020903

港口引桥形变的建筑信息模型(BIM)与多源遥感协同感知方法

朱宏磊¹ 侯立强¹ 蒋鹏飞² 顾磊³

(1. 中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司, 济南 250102; 2. 兖矿能源集团股份有限公司济宁三号煤矿, 山东济宁 272069; 3. 河海大学机电工程学院, 江苏常州 213200)

摘要 为精准分离港口引桥形变中“地基沉降”与“结构损伤”的贡献,实现损伤的物理归因,通过构建“多源感知-物理建模-偏差诊断”融合方法框架,研究了一种协同时序InSAR地基沉降监测、高分辨率光学影像阴影分析与建筑信息模型(BIM)参数化力学模拟的港口引桥一体化形变协同感知与损伤诊断方法。首先在统一时空基准下,利用时序PS-InSAR技术提取地基时序沉降场,基于改进归一化阴影指数(NSI)反演引桥支柱顶部相对形变;再将LOD350级BIM模型转化为参数化梁格力学模型,以地基沉降和温度荷载为输入计算理论形变响应;最后通过构建损伤风险指数(DRI)量化观测形变与理论形变的偏差,实现损伤预警与定位,并结合实际工程案例完成闭环验证。结果表明:本方法形变监测平均绝对误差约1.14 mm,均方根误差约1.46 mm,88%的数据误差不大于2 mm,损伤识别准确率达93.7%,可实现“大范围预警-局部定位-现场核实-修复验证”的全链条诊断。可见,该方法有效突破了单一遥感技术难以解释形变成因的局限,实现了从“现象感知”到“机理解释”的跨越,为港口引桥等长线状钢结构基础设施的智慧化运维提供了可靠的技术范式。

关键词 BIM;多源遥感;损伤诊断;数字孪生

A Synergistic Method for Deformation Sensing of Port Approach Bridges Based on BIM and Multi-Source Remote Sensing

ZHU Honglei¹ HOU Liqiang¹ JIANG Pengfei² GU Lei³

(1. Power China SEPCO1 Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250102, China; 2. Coal Mine, Yankuang Energy Group Company Limited, Jining 272069, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: In order to accurately separate the contributions of foundation settlement and structural damage to the deformation of port approach bridges and realize the physical attribution of structural damage, an integrated framework of "multi-source perception - physical modeling - deviation diagnosis" was adopted to develop a synergistic method combining time-series PS-InSAR-based foundation settlement monitoring, high-resolution optical image shadow analysis, and BIM-based parametric mechanical modeling. First, under a unified spatiotemporal datum, time-series PS-InSAR technology was applied to extract the foundation settlement field, while an improved Normalized Shadow Index (NSI) was used to invert the relative deformation at the tops of bridge piers. Second, an LOD350-level

第一作者:朱宏磊,硕士,高级工程师,主要从事数智化建造、智慧运维等相关技术研究。

电子信箱:zhuhonglei@sepco1.com

收稿日期:2026-02-09

BIM model was converted into a parametric beam-grid mechanical model, and foundation settlement as well as thermal loads were taken as inputs to calculate the theoretical deformation response. Finally, a Damage Risk Index (DRI) was constructed to quantify the deviation between monitored and theoretical deformations, enabling damage early warning and localization. Closed-loop verification was further performed using an actual engineering case. The results showed that the proposed method achieved a mean absolute error (MAE) of approximately 1.14 mm and a root mean square error (RMSE) of approximately 1.46 mm in deformation monitoring, with 88% of data points having an error no greater than 2 mm and a damage identification accuracy of 93.7%. This method also supports the full-chain diagnostic process of "large-scale early warning - localized positioning - on-site verification - repair validation". It is concluded that this method effectively overcomes the limitations of single remote sensing techniques in interpreting deformation causes, achieves the transition from "phenomenon perception" to "mechanism interpretation", and thus provides a reliable technical paradigm for the intelligent operation and maintenance of long linear steel-structure infrastructures such as port approach bridges.

Keywords: BIM; multi-source remote sensing; damage diagnosis; digital twin

港口引桥作为连接码头与后方堆场的物流生命线,多为大跨度钢结构廊道。其服役过程长期承受车辆动载、风荷载、腐蚀及地基不均匀沉降等多因素耦合作用,结构安全面临严峻挑战^[1]。传统人工巡检与全站仪、水准仪等点式测量方法存在效率低、覆盖有限、难以全天候连续监测等固有缺陷。

遥感技术的迅猛发展为基础设施大范围、连续监测提供了全新解决方案。根据最新综述,我国已构建了多载荷协同观测的陆地卫星网络,具备高时空分辨率与全天候数据获取能力^[2]。其中,星载合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术凭借其毫米级精度、广覆盖和全天候优势,已成为地表形变监测的核心手段^[3],其基本原理是通过计算两次过境 SAR 影像的相位差提取形变信息^[4-5]。该技术已在矿区沉降^[6]、城市地面沉降^[7]及大型桥梁形变监测^[8]等领域得到验证与应用。光学遥感则可通过分析地物阴影、纹理等特征变化反演结构的局部变形。

然而,研究明确指出,单一遥感技术难以精准诊断形变成因的根本局限,在于其无法分离不同物理机制的形变贡献^[9]。从技术机理看,InSAR 的观测结果是地基沉降、结构变形等多机制信号的几何叠加,信号混杂且解耦困难^[9]。这一局限在工程实践中直接导致诊断偏差:例如在评估隧道施工影响时,单一 InSAR 技术因无法区分地基与结构形变,导致约 71% 的案例高估建筑损伤^[10];在矿区监测中,即便优化算法也难以分辨采矿沉降与设施自身变形^[11]。同样,在输电线路等线性工程中,光学与 InSAR 技术各有盲区,单一手段均无法实现隐患的

全面早期识别^[12]。这些研究共同印证,遥感技术能高效感知形变“现象”,却难以解释其“机理”,尤其无法分离“地基沉降”与“结构损伤”的贡献,制约了其在结构健康精准诊断中的深度应用。

与此同时,建筑信息模型(BIM)为基础设施提供了融合几何、语义与物理属性的高保真数字化载体,是构建数字孪生(Digital Twin)的理论基础^[13]。当前,BIM 与遥感/测绘技术的融合多集中于:1)与倾斜摄影测量^[14]及激光点云^[15]在几何层面的整合;2)与地理信息系统(GIS)的语义信息集成^[16];3)在施工阶段与力学仿真结合进行过程模拟与优化^[17]。值得注意的是,BIM 在运维期结构健康监测领域的应用已展现潜力^[18]。然而,如何将蕴含材料属性、连接关系等物理信息的 BIM 运维模型,动态转化为服务于结构健康诊断的参数化力学分析工具,并通过融合多源、异构的遥感观测数据,实现形变“物理机理”反演与损伤归因,仍是亟待突破的研究空白。

因此,本文旨在解决这一关键问题:如何在统一时空基准下,协同利用多源遥感(时序 InSAR、光学阴影)的广域形变感知能力与 BIM 模型的物理机理仿真能力,实现港口引桥“地基-结构”一体化形变的协同感知与机理解释。为此,提出一种创新的“多源感知-物理建模-偏差诊断”融合方法框架,并以实际工程案例验证其有效性。

1 研究方法

1.1 技术路线

本研究的技术路线是一个贯穿“多源感知—物理建模—偏差诊断—现场验证”的闭环流程,其核

心在于观测数据与物理机理的深度融合,如图 1 所示。主要包括以下阶段:

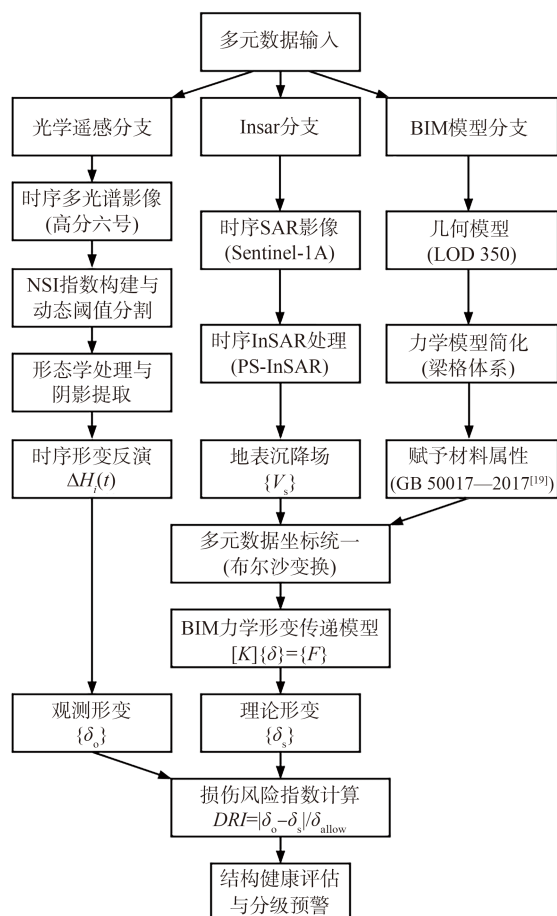


图 1 形变协同感知技术路线

Fig. 1 Technical roadmap of deformation synergistic perception

1)多源数据采集与坐标统一:同步获取 SAR 与高分辨率光学影像,并与 BIM 模型统一至高精度空间基准;2)形变信息协同反演:基于 PS-InSAR (Permanent Scatterer InSAR, PS-InSAR) 技术提取地基时序沉降场,基于归一化阴影指数反演引桥支柱顶部相对形变;3)BIM 力学建模与响应分析:将 BIM 模型转化为参数化力学模型,以 InSAR 沉降场及温度荷载为输入,计算理论结构响应;4)损伤诊断与定位:对比观测形变与理论形变,计算损伤风险指数,实现异常识别与风险分级;5)现场核查与验证:通过加密测量精确定位损伤,并经现场处置后复测完成闭环验证。

1.2 多源数据坐标统一与预处理

多源遥感数据与 BIM 模型的协同分析,首先依赖于时空基准的精确统一,这是实现几何与物理信息深度融合的先决条件^[20]。为此,本研究在引桥沿

线及周边布设不少于 20 个地面控制点 (GCPs),采用布尔沙七参数模型进行坐标转换^[21],将所有数据统一至 2000 年国家大地坐标系 (CGCS2000)^[22] 与 1985 年国家高程基准^[23]。通过最小二乘平差,实际配准精度满足亚米级工程监测的数据融合需求。

对 Sentinel-1 SAR 数据,采用成熟的 PS-InSAR 策略进行时序处理^[24],实施精密轨道与大气相位校正,获取高可靠性地表时序沉降场 $\{V_s(x, y, t)\}$ 。对高分多光谱光学影像进行辐射定标与大气校正,确保地物反射率的真实性。

1.3 基于改进阴影指数的上部结构形变反演

针对引桥细长支柱及其阴影特征,且在临水环境中增强阴影检测的鲁棒性并减弱水体影响,构建归一化阴影指数 (Normalized Shadow Index, NSI)^[25],实现高精度、自适应的支柱阴影自动化提取,进而反演上部结构形变。

1)阴影指数构建:对蓝、绿、红、近红外波段进行主成分分析,提取阴影分量第一主成分 (First Principal Component, PCA1)。结合改进的归一化多波段水体指数 (Normalized Difference Multi-Band Water Index, NDMBWI) 构建初始阴影指数 (Shadow Index, SI) 并归一化。

$$S = P \times W \quad (1a)$$

$$W = \frac{3\rho_G - \rho_B + 2\rho_R - 5\rho_{NIR}}{3\rho_G + \rho_B + 2\rho_R - 5\rho_{NIR}} \quad (1b)$$

$$NSI = \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (1c)$$

式中: S 、 P 、 W 分别为初始阴影指数、阴影分量第一主成分、归一化多波段水体指数; ρ_G 、 ρ_B 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 分别为绿光、蓝光、红光与近红外波段反射率; NSI 、 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别为归一化阴影指数以及当前分析窗口内初始阴影指数 S 的最大值与最小值。

2)自适应阴影提取:引入归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 构建动态阈值模型,实现阴影的自适应分割。阴影像元判据为

$$NSI > -0.4 \times NDVI + 1 \quad (2)$$

其中 $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$

3)形变反演:基于 NSI 与式 (2) 的判据获取二值阴影图 [式 (2) 成立赋值为 1, 反之赋值为 0], 进而结合 BIM 模型提供的支柱先验位置进行空间约束与形态学细化,精确量测阴影长度 L_s 。结合太阳高度角 θ_s , 反演支柱顶部时序相对形变:

$$\Delta H(t) = L_s(t) \tan \theta_s - L_s(t_0) \tan \theta_{s0} \quad (3)$$

式中: $\Delta H(t)$ 为 t 时刻相对于初始时刻 t_0 的支柱顶部相对形变(向上为正); $L_s(t)$ 、 $L_s(t_0)$ 分别为 t 时刻与 t_0 时刻的二值阴影图中量测的阴影长度; θ_s 、 θ_{s0} 分别为对应时刻的太阳高度角,由此得到的 $\Delta H(t)$ 即为上部结构的观测形变序列,用于后续损伤诊断分析。

1.4 基于BIM的力学形变传递模型

将BIM模型(LOD350)简化为以梁、柱单元构成的空间梁格体系力学模型。依据GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[19]赋予Q355钢材材料属性(弹性模量 $E=2.06\times10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$)。采用矩阵位移法作为求解器,其基本控制方程为:

$$[K]\{\delta\}=\{F\} \tag{4}$$

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为节点位移向量; $\{F\}$ 为节点荷载向量。对于形变成因诊断,荷载 $\{F\}$ 主要包含两部分:由InSAR沉降场 $\{V_s\}$ 转化而来的支座强制位移,以及由温度变化引起的温度荷载 $\{F(T)\}$ 。将二者作为输入,求解方程即可得到在已知外部因素驱动下的理论形变响应 $\{\delta_s(t)\}$ 。

1.5 损伤风险指数构建

为定量诊断超出地基沉降与温度效应解释范

围的结构性损伤,定义损伤风险指数为:

$$DRI=\frac{|\delta_o-\delta_s|}{\delta_{allow}} \tag{5}$$

式中: δ_o 为通过多源遥感融合反演得到的观测形变; δ_s 为BIM力学模型计算的理论形变; δ_{allow} 为规范^[19]允许挠度值,依据GB 50017—2017^[19]取计算跨度 L 的 $1/600$ 。 DRI 量化了观测值与理论预期值的归一化偏差。本研究设定:当 $DRI\geq 0.3$ 时,触发“关注阈值”预警,提示应重点关注;当 $DRI\geq 0.8$ 时,触发“高风险阈值”预警,表明形变已超出规范^[19]允许值。

2 试验与分析

2.1 试验数据

以我国北方某港口钢结构引桥(全长2.3 km)为研究对象,试验所用多源数据详情如表1所示。为进行方法验证,自2024年1月起,以约50 m为间距沿引桥布设47个测点,按季度周期进行精密水准测量,共获取8周期数据作为验证基准。所有数据均在统一时空基准下进行融合分析。

表1 试验数据源

Table 1 Experimental data sources

数据类型	具体参数	用途说明
SAR数据	Sentinel-1A, 32景, 2022—2025年, 升降轨	PS-InSAR处理, 获取时序地基沉降场
光学数据	高分六号, 18景, 4 m分辨率, 2022—2025年	NSI阴影分析, 反演支柱顶部相对形变
BIM模型	施工图级, LOD350, Revit格式	力学分析基础模型, 简化为梁格体系
验证数据	季度精密水准测量, 47个测点, 8周期	形变监测精度验证的基准真值
现场数据	全站仪加密测量, 人工巡检记录	损伤定位与修复效果验证

2.2 形变监测精度与可靠性验证

为验证本方法的监测精度,将反演得到的全部8周期共376组(47点 $\times$ 8周期)形变数据与精密水准测量结果进行对比分析,统计结果如表2所示。可见:本方法的平均绝对误差为1.14 mm,均方根误差为1.46 mm,且误差不大于2 mm的数据占比高达88%。误差分布随机,无显著系统性偏差,证明了该方法具备高精度监测能力。

进一步选取某点位(K1+200)的时序数据绘制曲线(图2)。结果显示,本方法反演结果(虚线)与精密水准测量结果(实线)高度吻合,且二者均清晰呈现出与季节相关的周期性波动,这与钢结构热胀冷缩的物理规律完全相符。该结果不仅印证了表2的统计精度,更证明了本方法能可靠地捕捉结构在复杂环境下的真实力学行为。

表2 形变监测精度统计分析

Table 2 Statistical analysis of deformation monitoring accuracy

统计指标	数值	说明
总数据点数量	376	所有期次监测数据总量
平均绝对误差(MAE)/mm	1.14	整体测量精度
均方根误差(RMSE)/mm	1.46	误差波动程度
最大绝对误差/mm	2.5	最差情况精度
误差 ≤ 2 mm数据占比/%	88	精度可靠性

2.3 损伤的早期预警、发展追踪与精准定位

1)异常识别与早期预警。

基于高精度的形变监测数据,计算全线各点位的损伤风险指数(DRI)。图3展示了两个关键时期的DRI空间分布热力图。对比可见,在2024年10月17日[图3(a)],全线DRI值普遍较低(<0.2),结构

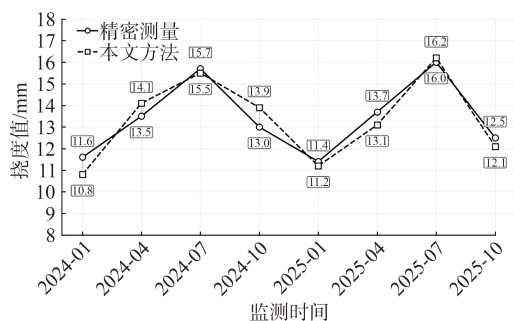
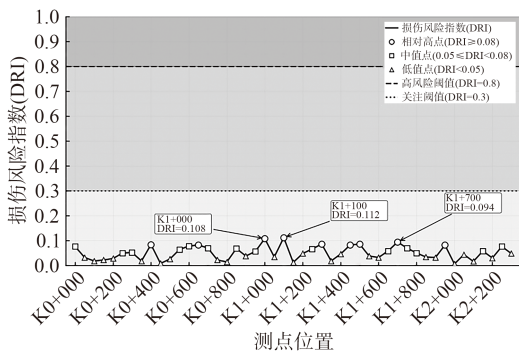
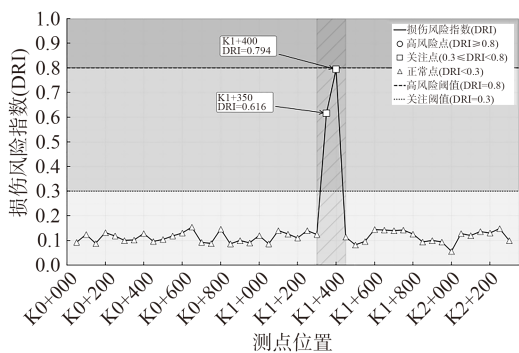


图2 典型点位时序挠度曲线对比(以K1+200点位为例)
Fig. 2 Comparison of time-series deflection curves at typical monitoring points (e.g., K1+200)

状态整体健康。而至2025年7月18日[图3(b)],在K1+350至K1+450区段出现了一个显著增强的DRI高值异常区,其中局部DRI值已高达0.794,与高风险阈值(0.8)非常接近。该异常区的出现,直观展示了本方法对大范围潜在风险的早期发现与空间定位能力。



(a) 2024年10月17日



(b) 2025年7月18日

图3 全线损伤风险指数(DRI)空间分布热力图

Fig. 3 Spatial distribution heatmaps of DRI along the entire route

2) 损伤发展过程追踪。

为深入分析异常发展过程,绘制异常点位(K1+400)的时序挠度曲线(图4)。结果显示,自2024年

10月(第三周期测量)起,该点位的观测形变开始出现偏差,且偏差量随时间逐步增大。值得注意的是,在整个异常发展过程中,本方法反演结果(虚线)与精密测量结果(实线)始终保持高度同步,这强有力地证实了图4所揭示的异常趋势是真实、可靠的,而非监测误差所致。

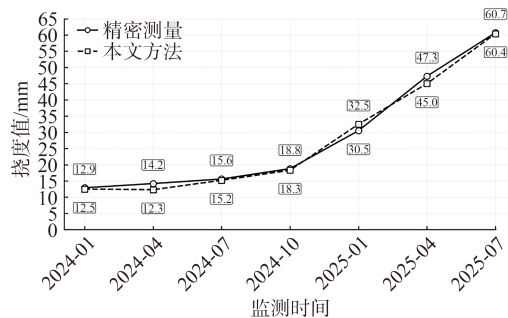


图4 异常点位(K1+400)时序挠度曲线对比
Fig. 4 Comparison of time-series deflection curves at an abnormal point (K1+400)

3) 损伤精确定位与现场验证。

为精确定位损伤核心,于2025年7月19日对预警区段(K1+300 ~ K1+440)实施加密测量,将测点间距加密至20 m。加密测量结果(图5中实线)清晰显示,损伤峰值位于K1+380点位,其DRI高达1.384,已超过高风险阈值。随即仔细巡查K1+380点位附近引桥情况,发现钢桁架下弦节点板存在螺栓松动现象。运维人员随即对该处螺栓进行紧固处理。

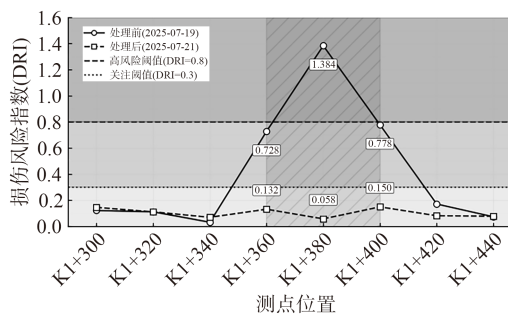


图5 K1+350 ~ K1+450加密测量段处理前后DRI对比
Fig. 5 Comparison of DRI before and after treatment in the intensified measurement section (K1+350 ~ K1+450)

4) 修复效果验证与闭环完成。

修复完成后,于2025年7月21日对同一区段进行复测。结果(图5中虚线)显示,全线DRI值均迅速回落至正常水平,与修复前的异常峰值形成鲜明对比。此举完成了“算法预警→加密定位→现场核实→工程处置→效果复验”的完整技术闭环,充分

验证了本方法从诊断到修复指导的全流程实用性与有效性。

2.4 对比试验与性能分析

为客观评估本方法的综合性能,将其与工程中常用的人工巡检、单一 InSAR 监测方法进行对比,结果如表3所示。可见:本方法在形变监测精度($\pm 2.5\text{ mm}$)、损伤识别准确率(93.7%)、监测频率(近实时)及自动化程度上均显著优于传统方法,其在诊断深度、预警能力和长期运维价值上的巨大提升,体现了多源数据与物理模型融合的协同优势。

表3 不同监测方法性能对比
Table 3 Performance comparison of different monitoring methods

监测方法	形变监测精度/mm	损伤识别准确率/%	监测频率	自动化程度
人工巡检	± 5.0	65.2	月度	低
单一 InSAR 监测	± 3.5	78.5	周次	中
本文融合方法	± 2.5	93.7	近实时	高
精密水准测量(基准)	± 1.0	—	季度	低

3 讨论

本研究成功实现了港口引桥形变从监测到机理解释的跨越,但仍有若干问题值得深入探讨。首先,多源数据(光学阴影、InSAR)的不确定性会通过力学模型传递,最终影响 DRI 指数的置信度,未来需研究其误差传播模型与概率化诊断方法。其次,本案例将 DRI 预警阈值设为 0.3,有效实现了早期预警,该阈值的普适性及其与结构安全等级、运维策略的自适应关系需在更多工程案例中验证。再次,本研究将复杂钢结构简化为梁格模型,虽能满足工程诊断需求,但对于局部应力集中或非线性损伤(如裂缝)的精细模拟仍需借助更复杂的有限元模型。

值得深入探讨的是,本文提出的“多源感知-物理建模-偏差诊断”方法论框架具有普遍的适用性。其核心逻辑为利用遥感进行大范围现象感知,利用参数化模型进行机理仿真,通过对比观测与仿真结果来诊断异常。故可将该方法拓展至综合管廊、长距离输电线路、高速铁路轨道等同类线性基础设施的健康监测^[2]中,为构建统一、智能的基础设施数字孪生运维体系提供了可复用的关键技术支撑^[13]。

4 结论

针对港口引桥形变成因诊断难题,本文提出并

验证了一种多源遥感与 BIM 力学模型协同感知的方法,主要结论如下:

1)提出了融合时序 InSAR、光学阴影分析与 BIM 参数化建模的协同感知框架,实现了对港口引桥“地基-结构”一体化形变的高精度、全天候监测,并能可靠捕捉结构的热胀冷缩效应,为异常诊断奠定了可靠的数据基础。

2)通过将 BIM 模型转化为力学分析工具并构建损伤风险指数(DRI),实现了形变数据与物理机理的深度融合。本方法能够有效识别、量化并动态追踪结构性损伤的萌生与发展过程,实现了从现象描述到机理解释的质变。

3)通过完整的工程案例验证,本方法能够实现“大范围时序预警(热力图)→局部加密定位(锁定 K1+380)→现场核查验证(螺栓松动)→修复效果评估(DRI 归零)”的全链条、闭环式智能诊断,显著提升了基础设施运维的精准性、主动性与科学性。

4)与传统方法对比,本方法在监测精度、自动化水平及损伤诊断深度上均表现出显著优势,为长线状钢结构基础设施的数字化、智慧化管养提供了具有广泛应用前景的新范式。

参考文献

[1] NEGI P, KROMANIS R, DORÉE A G, et al. Structural health monitoring of inland navigation structures and ports: a review on developments and challenges[J]. Structural Health Monitoring, 2024, 23(1): 605-645.

[2] 梁顺林,白瑞,陈晓娜,等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报,2020,24(6):618-671.

[3] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733.

[4] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B5): 4993-4999.

[5] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183-9191.

[6] 谷海波,李敏. 基于 InSAR 的矿山变形监测与参数反演研究进展[J]. 中国矿业, 2025, 34(6): 233-243.

[7] 周志伟,鄢子平,刘苏,等. 永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(8):928-931.

[8] 周云,郝官旺,危俊杰,等. 基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述[J]. 工程力学, 2025, 42(4): 25-37.

[9] 田馨,廖明生. InSAR 技术在监测形变中的干涉条件分析[J]. 地球物理学报,2013,56(3):812-823.

- [10] MILLILO P, GIARDINA G, DEJONG M J, et al. Multi-temporal InSAR structural damage assessment: the London Crossrail case study [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 287.
- [11] 张志亮, 曾琪明, 杨立功. 利用结合土地覆盖类型的自适应 DS-InSAR 方法监测矿区地表形变[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(2): 265-276.
- [12] 赵华伟, 周林, 谭明伦, 等. 基于光学遥感和 SBAS-InSAR 的川渝输电网滑坡隐患早期识别[J]. *自然资源遥感*, 2023, 35(4): 264-272.
- [13] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [14] 刘莎莎, 朱庆, 汤圣君, 等. 室内三维点云与 BIM 集成的建筑施工进度监测方法 [J]. *地理信息世界*, 2019, 26(5): 107-112.
- [15] 邢旺, 方正, 徐毅, 等. 多源数据融合的 BIM 逆向建模技术在历史文化街区保护中的应用 [J]. *测绘通报*, 2025(8): 159-163, 178.
- [16] 戴梦云, 付晓梦, 李晨阳, 等. 地理信息与建筑信息模型本体融合与应用研究 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2025, 17(增刊1): 74-80.
- [17] 刘靖宇, 吴波, 李勇, 等. 基于 BIM-FEM 框架的基坑开挖影响邻近隧道参数化建模与安全仿真 [J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2025, 7(3): 45-56.
- [18] CHEN L J, LU Q C, TANG P, et al. BIM-based structural health monitoring and damage diagnosis for building maintenance [J]. *Automation in Construction*, 2020, 119: 103299.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [20] NAPOLITANO A, HANSSEN R, HAGENAH L, et al. Estimation and integration of 3D PS-InSAR data for enhanced structural health interpretation using BIM-based models [C]//*Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Bellingham: SPIE, 2025: 1-10.
- [21] 潘国荣, 汪大超, 周跃寅. 两种大转角空间坐标转换模型研究 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(1): 61-67.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地理信息 基于坐标的空间参照: GB/T 30168—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 国家大地测量基本技术规定: GB 22021—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20.
- [25] 张雍, 江洪, 郭家. 顾及水域的 Sentinel-2 数据地形阴影检测方法研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2024, 39(2): 492-501.