



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的桥梁群轻量化 结构变形监测与状态评估研究

作者姓名	魏子青
指导教师	周云教授
培养单位	土木工程学院
专业类别	土木工程
专业领域	结构工程

学校代码：

学 号：S230100108

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的桥梁群轻量化 结构变形监测与状态评估研究

国家自然科学基金（52278306）

湖南省重点研发计划（2022SK2096）

湖南省自然科学基金项目（2023JJ70003）

作 者 姓 名：魏子青

指 导 教 师：周云教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 类 别：土木工程

专 业 领 域：结构工程

论文提交日期：2026 年 5 月 14 日

论文答辩日期：2026 年 5 月 21 日

答辩委员会主席：黄远教授

Spaceborne InSAR-Based Lightweight Structural Deformation
Monitoring and Condition Assessment of Bridge Clusters

by

Ziqing Wei

B.E. (Changsha University of Science and Technology) 2023

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisors

Professor Yun Zhou

May, 2026

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的
研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或
集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均
已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保
留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借
阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行
检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

涉密学位论文在解密后适用本授权书。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

随着我国公路与城市交通网络的持续扩展，桥梁数量迅速增长，截至 2024 年底已达 110.81 万座，且大量桥梁进入长期服役阶段。在交通荷载增加、材料性能退化及地基不均匀沉降等多重因素作用下，桥梁结构病害与性能劣化问题日益突出。传统健康监测方法主要依赖人工巡检与现场传感器，虽适用于单桥精细监测，但在城市桥梁群尺度下存在成本高、覆盖有限等不足，难以满足大范围风险识别与早期预警需求。星载 InSAR 技术为桥梁群广域变形监测提供了新的解决路径。基于此，本文围绕城市桥梁群多尺度变形识别、安全评估指标构建、有限元模型校核及时序变形预测等关键问题开展系统研究，旨在构建一种低成本、高效率、可持续的桥梁群变形监测与风险评估方法。本文的主要研究内容如下：

(1) 提出了基于时序 InSAR 的多尺度变形识别与安全评估方法，解决了城市桥梁群在缺乏现场传感器条件下难以实现广域连续监测与安全评估的问题，并开展了工程验证。该方法融合高分辨率光学遥感与气象数据，提取桥梁几何结构参数并反演温度场；基于分布式散射体 InSAR 获取桥梁时序变形，实现无接触连续监测与异常识别。在此基础上，将热膨胀参数引入变形模型，实现温度变形与沉降变形分离，并构建包含沉降量、倾角、角变形及沉降演化特征的多维指标体系，结合层次分析法开展风险分级与安全评估。以长沙市桥梁群为例，综合 COSMO-SkyMed 数据与 GNSS 观测开展应用分析，验证了方法的有效性与工程适用性。

(2) 提出了基于修正有限元模型的安全评估指标验证方法，解决了桥梁安全评估指标在复杂工况下适用性不足的问题，并实现了由单桥向桥梁群的推广应用。依托 ANSYS 平台建立钢拱桥三维有限元模型，通过施加温度荷载模拟结构在实际热环境下的变形响应；选取主梁密度、主梁弹性模量及拱肋弹性模量为关键参数，结合响应面法与优化求解对模型进行修正，提高数值分析与实际力学行为的一致性。在此基础上，设置多级支座沉降工况并与温度效应耦合，提取沉降量、倾角及角变形等关键指标，系统分析评估体系对异常变形及潜在风险的识别能力。结果表明，该指标体系能够有效表征结构异常演化特征，具备良好的工程适用性与可靠性。

(3) 提出了基于季节-趋势高斯过程回归分解与多神经网络融合的时序建模方法，解决了桥梁时序 InSAR 位移数据存在时间间断及演变趋势难以解析的问题。首先，构建季节-趋势高斯过程回归框架，将位移序列分解为趋势项、季节项与残差项，实现长期沉降、周期性温度响应及随机波动的有效分离；其次，针对不同分量特征，分别引入前馈神经网络、长短时记忆网络及液态神经网络进行分量预测，充分发挥各模型在趋势拟合方面的优势，实现精细化建模。在此基础上，通过多模型对比提出 STG-FNN 混合预测模型，兼顾高斯过程的可解释性与神经网络的拟合

能力。结果表明，该方法能够有效填补观测时间间隔，提高桥梁时序变形预测精度与监测时效性。

本研究方法体系在不依赖密集现场传感器的条件下，为城市桥梁群提供了低成本、高效率、可持续的风险普查与状态判别技术，对于推动 InSAR 技术从科学研究向工程化、规模化应用转化具有重要参考价值，也可为城市交通基础设施韧性评估与智慧运维提供关键技术支撑。

关键词：结构健康监测；桥梁群；桥梁变形模式；安全评估；时间序列预测

Abstract

With the continuous expansion of China's highway and urban transportation networks, the number of bridges has increased rapidly, reaching 1.1081 million by the end of 2024, with a considerable proportion entering long-term service. Under the combined effects of increasing traffic loads, material degradation, and uneven foundation settlement, structural deterioration and damage accumulation in bridges have become increasingly prominent. Traditional structural health monitoring methods mainly rely on manual inspection and in-situ sensors. Although effective for single-bridge monitoring, they are limited by high cost and insufficient spatial coverage at the scale of urban bridge networks, making them inadequate for large-scale risk identification and early warning. Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) provides a new solution for large-area deformation monitoring of bridge networks.

In this context, this study systematically investigates multi-scale deformation identification, safety evaluation index construction, finite element model calibration, and time-series deformation prediction for urban bridge networks, aiming to develop a low-cost, efficient, and sustainable monitoring and risk assessment framework. The main contributions are as follows:

(1) A multi-scale deformation identification and safety assessment method based on time-series InSAR is proposed to address the difficulty of large-area continuous monitoring and safety assessment of urban bridge clusters without on-site sensors. High-resolution optical imagery and meteorological data are integrated to extract geometric parameters and reconstruct the bridge temperature field. Distributed Scatterer InSAR (DS-InSAR) is then employed to obtain time-series deformation, enabling non-contact continuous monitoring and anomaly detection. Thermal expansion parameters are incorporated into the deformation model to separate temperature-induced deformation from foundation settlement. A multi-dimensional evaluation index system, including settlement, inclination, angular deformation, and settlement evolution characteristics, is constructed and combined with the Analytic Hierarchy Process (AHP) for risk classification and safety assessment. A case study of bridge networks in Changsha, using COSMO-SkyMed and GNSS data, validates the effectiveness and engineering applicability of the method.

(2) An indicator performance analysis method based on a calibrated finite element model is proposed to address poor applicability of safety indicators under complex

conditions, extending assessment from single bridges to clusters. A three-dimensional FE model of a steel arch bridge is developed in ANSYS, and thermal loads are applied to simulate structural responses under realistic thermal conditions. Key parameters, including girder density, girder elastic modulus, and arch rib elastic modulus, are optimized using the response surface method and optimization techniques to improve model accuracy. Multiple support settlement scenarios coupled with thermal effects are designed to extract key indicators such as settlement, inclination, and angular deformation. The results demonstrate that the proposed index system can effectively characterize abnormal structural behavior and identify potential risks.

(3) A time-series modeling method using seasonal-trend Gaussian process regression decomposition and multi-neural network fusion is proposed to handle temporal discontinuities and difficult trend interpretation in InSAR displacement data. The displacement series is decomposed into trend, seasonal, and residual components to separate long-term settlement, periodic thermal response, and random noise. Different neural networks, including feedforward neural networks, long short-term memory (LSTM) networks, and liquid neural networks, are employed for component-wise prediction, leveraging their respective strengths in trend fitting and temporal modeling. A hybrid STG-FNN model is further developed through comparative analysis, combining the interpretability of Gaussian processes with the predictive capability of neural networks. The results show that the proposed method effectively fills observational gaps and improves prediction accuracy and monitoring timeliness.

Overall, the proposed framework enables low-cost, efficient, and sustainable large-scale monitoring and risk assessment of urban bridge networks without relying on dense in-situ sensors. It provides important support for the transition of InSAR technology from research to large-scale engineering applications and offers valuable technical insights for infrastructure resilience assessment and intelligent maintenance of urban transportation systems.

Key Words: Structural health monitoring; Bridge clusters; Bridge deformation patterns; Safety assessment; Time-series prediction

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
插图索引	VIII
附表索引	X
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及选题意义	1
1.2 InSAR 技术国内外研究现状	4
1.3 时序 InSAR 技术桥梁变形监测	7
1.3.1 基于时序 InSAR 的桥梁变形监测可行性分析	7
1.3.2 基于时序 InSAR 的桥梁状态评估	10
1.3.3 基于时序 InSAR 的桥梁变形时间序列预测	13
1.4 本文研究内容	14
第 2 章 时序 InSAR 城市桥梁群变形监测理论	17
2.1 引言	17
2.2 星载 InSAR 技术基本原理	17
2.2.1 InSAR 技术基本原理	17
2.2.2 DSI 变形监测技术	19
2.2.3 桥梁群 DSI 变形监测方法	21
2.3 变形监测与风险评估框架	24
2.4 基于光学卫星遥感的桥梁信息提取	25
2.5 桥梁综合风险评估方法	27
2.5.1 桥梁纵向沉降模式	27
2.5.2 桥梁横向倾斜	28
2.5.3 桥梁变形综合评价指标	29
2.6 本章小结	34
第 3 章 基于 DSI 的长沙市中小桥梁群状态评估	35
3.1 引言	35
3.2 研究区域与数据处理	35
3.2.1 长沙市桥梁群概况	35
3.2.2 SAR 数据集	37
3.2.3 SAR 影像处理	38
3.3 长沙市桥梁群变形分析	39
3.3.1 长沙市广域变形结果	39

3.3.2 典型桥梁变形分析	42
3.3.3 DSI 变形测量精度验证	44
3.4 桥梁群劣化状态初步评估	46
3.5 桥梁级局域尺度安全评估	48
3.5.1 长沙市桥梁群综合安全评估	48
3.5.2 长沙市桥梁群变形分析	54
3.6 本章小结	57
第 4 章 基于物理驱动的安全评估指标验证	59
4.1 引言	59
4.2 有限元模型的建立	59
4.2.1 桥梁概况	59
4.2.2 桥梁构件单元类型及网格划分	60
4.2.3 桥梁构件边界条件及相关参数设置	62
4.3 基于响应面法的有限元模型修正	63
4.3.1 响应面法修正原理	63
4.3.2 响应面法的应用	65
4.4 桥梁风险评估指标验证	71
4.5 本章小结	72
第 5 章 基于数据驱动的桥梁变形时序预测	74
5.1 引言	74
5.2 基于 STG 的时间序列分解	74
5.3 时间序列预测模型	76
5.3.1 LSTM 模型	76
5.3.2 LNN 模型	77
5.3.3 FNN 模型	78
5.4 桥梁时序预测	80
5.4.1 SAR 影像数据集	80
5.4.2 桥梁时序变形分析	81
5.4.3 时序位移分解结果	82
5.5 时序位移预测结果	84
5.6 本章小结	86
结论与展望	87
参考文献	89
致 谢	99
附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文目录）	100

附录 B（长沙市桥梁群变形监测结果补充图）	101
答辩委员会名单	110

插图索引

图 1.1 近年桥梁事故	1
图 1.2 SAR 卫星观测示意图	4
图 1.3 英国 Tadcaster 桥梁变形结果	7
图 1.4 意大利莫兰蒂大桥变形结果	8
图 1.5 桥梁结构安全评估框架	12
图 1.6 InSAR 与 FEM 结果对比	13
图 1.7 研究内容	16
图 2.1 InSAR 干涉几何模型	18
图 2.2 DSI 处理流程	19
图 2.3 卫星观测示意图	23
图 2.4 桥梁群结构识别研究框架	25
图 2.5 桥梁沉降示意图	27
图 2.6 桥梁横向倾斜示意图	28
图 2.7 桥梁变形指标定义	31
图 2.8 标准化安全指数定义	33
图 3.1 长沙市主要研究桥梁分布	36
图 3.2 DSI 时空基线	37
图 3.3 长沙市地形图	38
图 3.4 长沙市气温数据	39
图 3.5 长沙市广域变形场	39
图 3.6 长沙市桥梁群的变形速度 (mm/y)	42
图 3.7 B20 变形分析	43
图 3.8 B16 变形分析	43
图 3.9 B41 变形分析	44
图 3.10 基于 DSI 技术获得的三汊矶大桥变形结果	45
图 3.11 桥梁三维位移 GNSS 测试结果	46
图 3.12 桥梁变形分析	48
图 3.13 桥梁安全评估结果	53
图 3.14 B12 的沉降与裂缝	53
图 3.15 B13 开裂与沉降情况	54
图 3.16 桥梁纵向沉降曲线	55
图 3.17 桥梁横倾角曲线	57

图 4.1 B16 桥梁全景图	60
图 4.2 主桥立面布置图 (mm)	60
图 4.3 三维先验有限元模型	60
图 4.4 模型部件示意图	62
图 4.5 主梁与东、西支座的边界条件	62
图 4.6 灵敏度分析曲线	66
图 4.7 L/2 处响应面	69
图 4.8 修正前、后实测变形值与计算变形值对比	70
图 4.9 不同工况下有限元模拟值	71
图 5.1 LSTM 处理流程	76
图 5.2 LNN 处理流程	77
图 5.3 FNN 处理流程	78
图 5.4 组合模型 InSAR 时间序列预测流程	80
图 5.5 SAR 卫星观测示意图	81
图 5.6 万家丽高架桥变形速率图 (mm/y)	81
图 5.7 桥梁时间序列变形	82
图 5.8 位移时序分解结果	83
图 5.9 不同模型趋势项预测结果对比	84
图 5.10 不同模型季节项预测结果对比	85
图 5.11 STG-FNN 组合模型预测结果	85

附表索引

表 1.1 桥梁结构健康监测规范总结	2
表 1.2 InSAR 技术特性统计	6
表 2.1 桥梁沉降模式	27
表 2.2 综合评估指标计算	29
表 2.3 桥梁评估指标阈值界限	30
表 2.4 风险评估指标占比	32
表 2.5 桥梁技术状况评定等级	34
表 3.1 长沙市桥梁尺寸识别	36
表 3.2 DSI 与 GNSS 的 LOS 累积位移比较 (单位: mm)	46
表 3.3 桥梁沉降变形结果	49
表 3.4 桥梁横倾变形结果	50
表 3.5 桥梁安全评分	51
表 4.1 桥梁有限元模型网格划分与敏感性分析	61
表 4.2 有限元模型材料参数	63
表 4.3 待修正参数	67
表 4.4 试验样本及结构响应值	67
表 4.5 参数显著性检验值	68
表 4.6 响应面模型的精度验证	69
表 4.7 参数修正前后对比	70
表 4.8 模型测点模拟值修正前后对比	70
表 4.9 FEM 模拟结果	72
表 4.10 FEM 安全评分	72
表 5.1 混合模型预测结果	85

第1章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

桥梁是公路和铁路交通的关键基础设施，在国民经济体系中占据着至关重要的位置。作为连接城市和区域的核心纽带，桥梁的作用不可或缺。根据《2024 年交通运输行业发展统计公报》数据，到 2024 年底，我国公路桥梁总数量已达到 110.81 万座，其中中小跨桥梁约为 90.54 万座，其中 40%以上的桥梁已服役超过 20 年，标志着我国在桥梁数量、规模和建设总量方面位居全球首位^[1]。欧进萍院士指出，桥梁工程结构既可能遭受地震、台风等“要命”的突变损伤作用，又不可避免地承受腐蚀、冻融与疲劳等长期环境侵蚀等致使“短命”的渐变损伤作用。如果忽视这些问题，可能会导致桥梁发生重大故障甚至倒塌，带来严重的后果。如图 1.1 所示，近年来，桥梁安全事故时有发生。例如，2012 年 8 月，江西省广昌市河东大桥发生倒塌事故，产生严重的社会影响，造成 2 人遇难，2 人受伤。2018 年 8 月 14 日，位于意大利热那亚的莫兰蒂大桥发生严重坍塌事故，造成 45 人遇难、15 人受伤。2021 年 12 月 18 日湖北鄂东长江公路大桥广高速花湖互通 D 匝道（跨空匝道桥梁）发生侧翻事故，造成 4 人死亡 8 人受伤。2024 年 7 月 20 日，陕西省柞水大桥发生垮塌，造成 12 人遇难，31 人失联。



a) 江西广昌河东大桥发生倒塌



b) 意大利莫兰蒂大桥坍塌



c) 湖北高速桥发生垮塌



d) 陕西柞水大桥垮塌

图 1.1 近年桥梁事故

近年来，为提升公路桥梁安全耐久水平，加强结构监测与安全预警已成为行业普遍共识。2020 年 12 月，交通运输部印发《关于进一步提升公路桥梁安全耐久水

平的意见》，明确提出到 2025 年特殊桥梁结构健康监测系统全面建立，到 2035 年公路桥梁结构健康监测系统全面建立的工作目标。2022 年，交通运输部对《公路桥梁结构监测技术规范》进行修订，明确公路桥梁结构监测的技术要求。新版规范鼓励引入北斗卫星导航系统、5G 移动通信、人工智能与大数据等新型技术与装备，以推动桥梁结构监测向智能化、信息化方向升级^[2]。2024 年 4 月，交通运输部主管印发了《进一步推动公路桥梁隧道结构监测系统工作实施方案》，明确提出开展中小跨径桥梁轻量化监测系统试点，对全国高速公路及普通国道桥梁隧道实施实时监测，动态掌握结构运行状况，建立健全长效运行机制与安全风险防控体系，提升公路桥梁隧道运行安全水平^[3]。财政部等部门出台《关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型升级》，明确提出推进交通基础设施数字化建设，重点完善感知、管控与服务协同体系，提升基础设施智能化水平，并强调提高财政资金使用效率，以有限投入带动交通基础设施高质量发展。同年，交通运输主管部门印发《关于进一步推进公路桥梁与隧道结构监测系统建设实施方案》，提出在中小跨径桥梁及长大隧道中开展轻量化结构监测试点工程。方案强调依托实时监测技术，对全国高速公路及普通国道桥梁、隧道的运行状态进行连续感知与动态分析，逐步构建覆盖结构安全监测、风险预警及长期运维管理的综合体系，从而提高公路桥梁与隧道的安全保障与风险防控能力。

在此背景下，为保障城市桥梁运行安全，开展全寿命周期结构行为监测尤为关键。桥梁结构健康监测（SHM）通过多源数据采集与分析，可实现结构状态评估与预警^[4]，但现有技术主要适用于单桥精细监测。面对城市桥梁群的渐进损伤与复杂变形高效识别方法仍有待深入研究，尤其在跨桥类型、环境工况与监测数据异构融合方面存在挑战^[5-6]。传统方法受限于传感器布设成本高、覆盖范围有限及数据融合困难等问题，难以全面反映群体结构变形与病害演化过程^[7-9]。因此，亟需发展大范围、低成本、轻量化的桥梁群监测方法，以提升整体监测效率与风险预警能力。

为落实国家在基础设施安全管理方面的相关政策，我国已在桥梁结构健康监测领域逐步构建起较为系统的技术标准体系，具体规范见表 1.1。同时，各省市也陆续出台了相应的地方性标准，对不同桥型的监测项目及实施方法进行了补充。

表 1.1 桥梁结构健康监测规范总结

标准类别	标准编号	标准名称	发布单位
国家标准	GB 50982-2014	《建筑与桥梁结构监测技术规范》	住房和城乡建设部
	JTG/T 3650-01-2022	《公路桥梁施工监控技术规程》	
行业标准	JT/T 1037-2022	《公路桥梁结构监测技术规范》	交通运输部
	JTG 5120-2021	《公路桥涵养护规范》	
	JTG 3363-2019	《公路桥涵地基与基础设计规范》	

续表 1.1 桥梁结构健康监测规范

	JTG 3365-01-2020	《公路斜拉桥设计规范》	
	JT/T 1037-2016	《公路桥梁结构安全监测系统技术规范》	
	JTG/T D65-06-2015	《公路钢管混凝土拱桥设计规范》	
	JTG D60-2015	《公路桥涵设计通用规范》	
行业标准	CJJ 99-2017	《城市桥梁养护技术标准》	住房和城乡建设部
	CJJ 11-2011	《城市桥梁设计规范》	
	JTG/T H21-2011	《公路桥梁技术状况评定标准》	
	T/CECS 529-2018	《大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准》	中国工程建设标准化协会
	T/CECS 652-2019	《结构健康监测系统运行维护与管理标准》	
	T/CCES 15-2020	《桥梁健康监测传感器选型与布设技术规程》	中国土木工程学会
协会标准	T/CECS 765-2020	《结构健康监测系统施工及验收标准》	中国工程建设标准化协会
	T/CECS 333-2012	《结构健康监测系统设计标准》	中国国家铁路集团有限公司
企业标准	Q/CR757-2020	《铁路桥梁运营状态监测技术条件》	
	DB32/T 3562-2019	《桥梁结构健康监测系统设计规范》	江苏省市场监督管理局
	DB41/T 1679-2018	《公路混凝土梁式桥长期监测和预警技术规范》	河南省质量技术监督局
地方标准	DBJ50/T-304-2018	《桥梁结构健康监测系统实施和验收标准》	重庆市住房和城乡建设委员会
	DG/TJ 08-2194-2016	《桥梁结构监测系统技术规程》	上海市住房和城乡建设委员会

随着数字信号处理与遥感观测能力的提升，星载 InSAR 技术被广泛应用于地表形变监测，它属于主动式微波遥感测量手段，其基本原理如图 1.2 所示，该方法通过获取同一区域在不同观测时刻的两景 SAR 影像，并对其进行干涉处理以生成干涉图。为提取有效形变信息，通常需借助外部数字高程模型（DEM）或选取参考干涉对，对干涉相位中的地形分量进行分离与消除^[10]，从而将干涉相位中的地形效应与形变效应分离，最终实现观测目标沿卫星视线方向（LOS）的形变反演。通

通过对差分干涉相位进行解缠、滤波及大气效应校正,可获得高精度的微小地表位移信息。得益于其全天候、昼夜观测能力以及对云层、烟雾和尘埃的良好穿透特性,星载 InSAR 能够实现大范围、长时间、高分辨率的地表形变监测,为传统地面变形监测手段提供了重要补充^[10-13]。因此,基于星载 InSAR 技术开展桥梁结构变形监测,并进一步利用其变形结果进行桥梁安全评估,具有覆盖范围广、成本低、可持续性强等显著优势。目前,InSAR 变形监测技术已在建筑物变形监测^[14-15]、地震形变分析^[16]、高速公路沉降监测^[17]、滑坡变形监测^[18]以及桥梁结构变形监测^[19]等领域得到广泛应用。

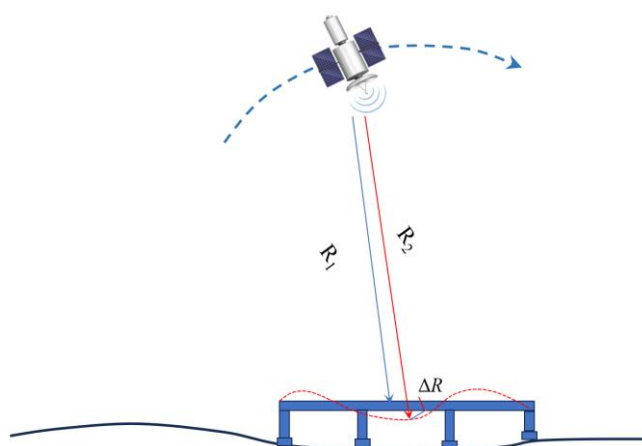


图 1.2 SAR 卫星观测示意图

1.2 InSAR 技术国内外研究现状

近年来,基于星载 InSAR 技术对城市基础设施开展高精度变形监测已经成为热门研究方向。在形变监测领域,通过分析 SAR(合成孔径雷达)传感器获取的多时相影像,已成为提取地表变形信息的关键技术。从轨道特征来看,当前在轨的主流 SAR 卫星多运行于太阳同步轨道;在成像方式上,通常包含聚束、条带及扫描三种工作模式,这构成了数据处理与解译的基础。

自 1969 年以来 InSAR 技术在对地观测领域的发展历程,可以划分为四个主要阶段^[20]:

第一阶段:1969—1990 年,理论探索阶段。1969 年,Rogers 等^[21]首次将干涉测量思想引入雷达观测体系,这标志着 InSAR 技术的萌芽。随着 20 世纪 70 年代数字计算机技术的突破,合成孔径雷达(SAR)的应用得到了有力推动。1974 年,Graham 等^[22]在这一时期率先开展机载雷达干涉测量试验,借助振幅条纹与光学处理手段,成功获取了地表变形数据,并将相关研究成果发表于《Science》。1975 年,中国首次发射返回式遥感卫星,标志着我国进入遥感卫星对地观测时代。虽然在随后的十余年间,该领域整体进展较为缓慢,但仍在此期间诞生了数项具有里程碑意义的技术突破。除了传统的地形测绘任务,SAR 在地表变形监测中也显示出了独

特的优势。1989年, Gabriel 等^[23]首次提出差分干涉测量技术揭示了美国加州地区因土壤吸水导致的地表胀缩现象。第一阶段从总体来看, 由于数据源相对匮乏且处理手段较为滞后, InSAR 技术尚未形成完备的技术体系, 仅处于萌芽与初步探索时期。

第二阶段: 1991—2001 年, 初期飞跃阶段。自 1991 年欧空局 ERS-1 发射以来, 日本 JERS-1 (1992 年)、欧空局 ERS-2 及加拿大 RADARSAT-1 (1995 年) 等多源雷达卫星相继入网, 卫星性能与轨道控制水平的提升大幅推动了影像的实用化进程。1993 年, Massonnet 等^[24]首次将 InSAR 技术用于地震形变监测, 成功反演了 1992 年美国加利福尼亚州 Landers 地震的同震位移场, 并在《Nature》期刊发表相关成果, 引起了学界的广泛关注。1999 年, Hanssen 等^[25]进一步拓展了 InSAR 的应用范围, 实现了对大气水汽分布的高空间分辨率反演, 展示了该技术在大气参数反演方面的潜力。2000 年启动的航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 标志着数字高程模型 (DEM) 发展历程中的一个重要里程碑, 该任务所获取的数据在发布后三年内即实现了全球覆盖^[26]。更重要的是, SRTM 的成功显著优化了 InSAR 影像的配准精度与干涉处理能力, 带动了滤波、解缠等核心算法的突破, 促使重复轨道干涉逐渐演变为 InSAR 技术的主流工作模式。

与此同时, 时序 InSAR 分析方法开始萌芽与发展, 为分析地震活动、火山运动、滑坡演化以及地面沉降等提供了全新视角^[27]。2000 年, Ferretti 等^[28-29]提出了永久散射体干涉测量 (Persistent Scatterer Interferometry, PSI) 技术, 通过识别时间序列上相位稳定的散射点, 建立形变模型, 实现了毫米级的地表形变监测。2002 年, Berardino 等^[30]提出了小基线干涉测量技术, 通过将 SAR 影像组合为多个小基线集, 利用奇异值分解 (SVD) 方法联合解算, 显著提升了低相干区域的形变监测能力。这两种方法均为时序差分雷达干涉测量技术 (MT-InSAR), 之后的各类 InSAR 算法均在此框架上发展、完善。第二阶段, InSAR 技术迎来了快速发展期。随着数据处理能力的显著增强与核心算法的持续突破, 该技术逐步走出初步探索阶段, 开始向系统化、工程化应用方向迈进。

第三阶段: 2002-2013 年, 深度创新阶段。2002 年, 随着搭载 C 波段 ASAR 系统的 Envisat 卫星发射, 欧空局再次推动了对地观测成像技术的发展。该卫星多样化的成像模式 (多极化、多角度、多模式) 成为影像大地测量学进入深度创新期的重要标志。

本阶段时序 InSAR 方法在技术与应用领域上也在不断发展。2003 年, Fornaro 等^[31]提出了合成孔径雷达层析成像 (Tomographic SAR, TomoSAR) 技术, 通过将合成孔径原理拓展至高程方向, 利用多角度观测数据重建目标的第三维信息, 从而实现了对复杂场景 (如城市建筑、森林植被) 的真三维成像与结构解耦。2006 年, Bechor 等^[32]提出了多孔径差分干涉方法 (Multiple Aperture Interferometry, MAI),

显著提升了沿方位向的形变提取精度与效率。2007 年, Hooper 等^[33]提出了 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) 算法, 该算法利用相位的空间相关性来识别永久散射体像元, 无需预先假定形变模型, 即使在缺乏人工建筑的非城镇区域也能提取足够密度的 PS 点, 显著扩展了 PS-InSAR 技术的应用范围。2011 年, Ferretti 等^[34]进一步提出了 SqueeSAR 方法, 通过引入统计同质性分析识别具有稳定相位特征的分布式散射体 (Distributed Scatterers, DS), 在保持形变反演精度的同时显著提高了有效散射点密度, 从而在一定程度上弥补了 PSI 技术在复杂工程结构监测中的不足。进入该阶段, 星载合成孔径雷达 (SAR) 卫星的数量与类型显著增长, 为大地测量领域提供了充足且高质量的数据源。

第四阶段: 2014 年至今, 全面应用阶段。自 2014 年起, InSAR 技术步入全面推广与多元融合的发展新阶段。在卫星平台层面, SAR 成像能力持续演进, 逐步实现了从单极化、固定成像模式向多极化、多模式及多波段的跨越, 影像时空分辨率亦同步提升, 为高精度变形监测奠定了坚实的数据基础。2014 年欧空局 Sentinel-1 卫星的发射, 成为 SAR 对地观测新时代的重要里程碑。此后, ALOS-2、GF-3、Hisea-1 及 LT-A/B 等多星座、多频段 SAR 卫星相继入轨, 进一步丰富了数据源体系。2019-2020 年期间, 随着新一代 SAR 卫星、LiDAR 遥感平台及高分辨率光学卫星的相继投入应用, 同时配合海量遥感数据处理能力的持续提升, 为基于 InSAR 方法开展地表形变监测提供了更加丰富的数据来源与技术支撑。与此同时, InSAR 技术与智能化数据处理方法的深度融合, 正在有效突破传统技术在精度与效率层面的瓶颈制约。

表 1.2 InSAR 技术特性统计

技术	技术核心	优势	适用性
D-InSAR	对形变前后两幅影像进行干涉和差分获取变形信息	大范围、高精度	大尺度突发性变形测量, 如地震、滑坡
PS-InSAR	选择稳定反射特性和高信噪比 PS 点提高解缠精度	时间连续性, 可获取时序变形数据	城市环境和有稳定人造结构地区
SBAS-InSAR	选择小时空基线子集的差分干涉图抑制去相干现象	对基线选择敏感, 不适用于长周期连续监测	大范围和复杂变形模式的地表形变监测
DS-InSAR	同质像元提取及时序 DS 相位优化	大幅提高监测点密度	非人工低相干区域及精密监测需求高场景

表 1.2 梳理了 InSAR 技术的演进历程, 从突破、优势与适用性层面进行了对比。PS-InSAR 技术通过全域筛选稳定散射点, 有效抑制噪声与大气干扰, 实现了高可靠性形变时序反演, 显著推动了近 20 年星载 InSAR 在城市桥梁监测中的应用。但在城市桥梁群场景下, PSI 面临测点密度与连续性局限。SBAS-InSAR 与 DS-InSAR 通过小基线网络与分布式散射体建模, 提升了测点覆盖与反演稳定性, 拓展

了精细化监测潜力。D-InSAR 虽难获连续时序,但在快速巡查中仍有价值。各技术各具优势,鉴于不同地区桥梁群的情况复杂性,综合运用多种 InSAR 技术开展城市桥梁群变形监测与风险评估更符合工程需求,具备更高可行性。

1.3 时序 InSAR 技术桥梁变形监测

桥梁在长期服役过程中,受环境影响其性能易发生退化,为防范垮塌风险、保障交通安全,有必要对桥梁结构开展持续监测。在过去 20 多年里,时序 InSAR 技术在桥梁结构变形监测中的应用研究取得了长足发展。轨道卫星搭载的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)传感器通过周期性对地观测获取数据,能够为地表形变分析提供稳定的数据源。InSAR 技术允许大面积基础设施监测,而无需在现场安装传感器。随着卫星技术的发展和数据处理算法的不断优化,InSAR 技术在桥梁健康监测中的应用逐步显现成熟,成为现代桥梁管理系统的重要组成部分。因此,国内外一些研究学者利用时序 InSAR 技术进行桥梁变形监测^[35-38]。

1.3.1 基于时序 InSAR 的桥梁变形监测可行性分析

基于 SAR 系统重访周期的缩短和影像分辨能力的提高,时序 InSAR 在城市桥梁变形监测中的独特价值日益凸显。其技术路径通常包括:综合分析温度、气象、水文及地质等环境因素与桥梁变形的关系,进而建立适用于特定桥梁的时序 InSAR 监测模型。相关学者做了许多研究,这些研究表明 InSAR 技术在城市桥梁结构长期变形监测的可行性。

2017 年,黄其欢等^[39]通过利用 Sentinel-1A IW 影像对南京大胜关大桥进行 InSAR 监测,发现桥梁纵向位移主要源于热膨胀,InSAR 能够精确获取全桥纵向变形。支座位移与温度的相关模型与传感器数据一致,验证了 InSAR 技术的可靠性。



图 1.3 英国 Tadcaster 桥梁变形结果^[40]

2018 年, Selvakumaran 等^[40]利用 2014—2015 年获取的 48 景 TerraSAR-X 高分辨率数据,基于 SBAS 方法对英国 Tadcaster 桥梁开展了时序形变分析。研究结果表明,在桥梁发生坍塌之前,其结构已呈现出明显的非均匀沉降特征。该现象说

明, InSAR 技术具备识别结构异常演化过程的能力, 可用于捕捉潜在破坏的早期信号, 从而在冲刷风险桥梁的监测与预警中发挥重要作用。

2019 年, Jung 等^[41]提出了一种基于多时相 InSAR 的桥梁变形监测方法。该研究整合了 2013 至 2017 年间获取的多轨 Sentinel-1SAR 影像与单轨 COSMO-SkyMed (CSK) SAR 数据, 对两座斜拉桥的垂直向与纵向位移进行分析, 并据此推算出桥梁的热膨胀响应与长期垂直挠度。研究结果证实了 InSAR 技术在桥梁长期挠度监测方面的应用潜力。

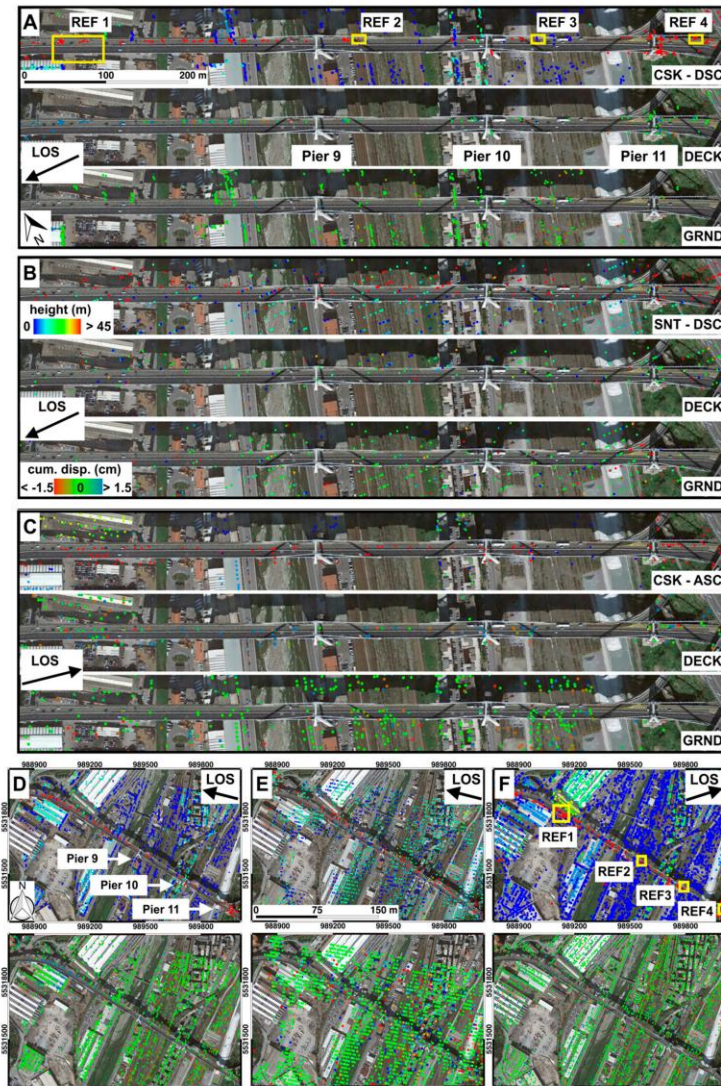


图 1.4 意大利莫兰蒂大桥变形结果^[42]

2019 年, Milillo 等^[42]通过对 2009—2018 年 COSMO-SkyMed 与 Sentinel-1A 影像的 MT-InSAR 时序分析成功追溯了意大利莫兰蒂大桥在坍塌前的形变演变过程。研究识别出自 2015 年起桥墩邻近桥面的持续变形趋势, 并在 2017—2018 年观测到局部区域形变加剧的现象。该研究以毫米级精度验证了 InSAR 技术在桥梁结构健康监测与早期预警中的应用价值。

2021 年, Cusson 等^[43]提出了一种融合 InSAR 技术与位移温度敏感性指标的桥

梁结构行为监测方法。该方法通过评估不同类型桥梁在温度荷载作用下的响应特征，建立了相应的计算模型。研究将卫星观测数据与数值模型结果进行比对，成功识别出异常位移并实现了早期预警，同时展示了可用于三维可视化与变形评估的平台工具。

2022 年，Farneti 等^[44]提出一种 InSAR 后处理方法，实现桥梁变形二维重建与误差量化。该方法利用桥梁方向与变形平面假设，克服了传统 InSAR 难以反映真实运动方向的局限。应用于意大利 Albiano-Magra 桥，成功识别坍塌前变形趋势，为结构健康监测提供了前兆信号。

2023 年，Lasri 等^[45]采用永久散射体干涉测量（PS-InSAR）技术对一座混凝土桥梁进行远程监测，通过处理 Sentinel-1 SAR 影像获取桥梁长期视线向（LOS）位移时间序列，并将 InSAR 监测结果与 GNSS 观测数据进行对比验证。研究结果表明，PS-InSAR 技术能够较好反映桥梁长期变形特征。

2024 年，Lorenz 等^[46]测试星载 InSAR 在大型弯曲公路桥梁变形监测中的适用性，并将获得的结果与经典大地测量等替代测量技术和先进的计算机模拟进行比较，指出 InSAR 技术适用于监测由于损伤或沉降引起的季节性弹性变形和长期非弹性变形。

2025 年，Zhang 等^[47]采用 SBAS 对一座长跨桥梁的基座沉降情况进行监测，并探究了这些沉降模式与各环境因素（包括地质条件、泥沙运移指数（STI）、地形湿润指数（TWI）、降水量及温度之间的关系，表明 SBAS-InSAR 技术能够有效捕捉桥梁基础复杂的变形过程。

2026 年，Dellasanta 等^[48]利用干涉型合成孔径雷达（InSAR）获取桥梁位移时间序列，并同时结合深度学习技术并对坎蒂亚诺大桥（该桥在 2022 年意大利马尔凯地区洪灾期间发生垮塌），所提出的方法能够有效捕捉结构不稳定性的时间演变过程，以进行可扩展、非侵入式桥梁健康监测。

上述研究充分证实了星载 InSAR 技术在道路桥梁及周边区域变形监测中的独特优势与应用潜力。与传统接触式监测方法相比，InSAR 技术无需在桥梁结构上布设任何传感器设备，仅依靠卫星平台定期获取的雷达影像即可实现远距离、大范围的变形信息提取。同时，InSAR 技术具备全天候、全天时的观测能力，能够在恶劣天气条件下持续获取数据，为桥梁结构的长期健康监测提供了稳定可靠的技术支撑。

同时，随着时序 InSAR 技术的进步，其在桥梁变形监测中的应用正逐步由单座结构分析向桥梁群尺度扩展。相较于单桥监测，桥梁群变形监测更关注多类型桥梁在复杂环境与多源荷载共同作用下的整体响应特征及其时空演化规律，其本质在于从离散结构观测向区域尺度结构系统分析的转变。

2019 年，Bianchini Ciampoli 等^[49]提出了基于 InSAR 与 GIS 数据融合的桥梁

网络级自动监测方法,实现对大范围桥梁基础设施的统一识别与状态分析。研究表明,该方法能够有效支撑桥梁群级别的监测与管理,为关键基础设施维护提供技术支持。

2024 年,Quqa 等^[50]提出了一种面向区域尺度桥梁群的监测方法,基于星载 InSAR 时序位移数据与环境因素信息,采用子空间对齐方法实现不同桥梁特征空间的一致化表达,并通过桥梁群体间响应差异识别异常结构,并结合意大利波河铁路桥案例验证了该方法在大范围桥梁异常检测与风险分类中的有效性,可为桥梁群结构健康监测与区域级风险评估提供新的技术思路。

2025 年,Zhou 等^[51]提出了一种改进型 DS-InSAR 方法(RDSI),针对低相干桥梁区域参考点稳定性差及温度估计误差问题,引入薄板样条插值进行桥址气温重建,并结合角反射器与结构约束优化参考点选取。研究表明,该方法能够有效提升桥梁群长期形变监测的精度与稳定性。

2025 年,Caspani 等^[52]提出了一种融合聚类算法的桥梁群 InSAR 监测方法,其基于 MT-InSAR 获取的 PS 点时序位移与空间坐标信息,构建融合时间序列相似性与空间邻近关系的改进 K-means 聚类模型,实现桥梁及周边区域 PS 点的自动分类与异常识别。研究结果表明,该方法能够有效识别桥梁不同结构部位的异常变形模式,可为桥梁群结构健康监测及桥梁管理系统提供技术支持。

现有研究表明,时序 InSAR 技术已经可应用于桥梁群尺度,并在多源数据融合、区域异常识别及智能化分析方面取得进展,能够实现大范围桥梁结构的形变监测与风险筛查。总体而言,该技术具备覆盖广、成本低及自动化程度高等优势,已初步形成“监测-识别-评估”的技术框架,为桥梁群结构健康监测与精细化管理提供了有效支撑,但在机理建模与高精度评估方面仍有待进一步提升。

1.3.2 基于时序 InSAR 的桥梁状态评估

InSAR 技术不仅提供可靠的长期变形数据,更通过后处理实现结构评估与风险预警:一是基于“物理”驱动,即融合有限元模型将位移反演为应力、应变等内在指标;二是基于“数据”驱动,即通过时序分析提取变形速率与趋势,评估桥梁稳定性并识别潜在风险。综合星载 InSAR 技术在时序观测精度、空间测点密度及观测广度上的优势,已有一些研究提出了基于星载 InSAR 技术的桥梁安全评估方法,主要可归纳为基于时序变形分析的安全评估方法,以及基于结构理论的桥梁安全评估两类。

基于时序变形分析的安全评估方法一般利用累计变形量、平均变形速率及变形趋势等作为安全评估指标。

2020 年,De Corso 等^[53]利用 InSAR 技术处理 Morandi 大桥倒塌前的高相干 SAR 影像,获取桥梁关键区域位移信息,并分析其变形速率特征。研究发现桥梁

倒塌区域在事故发生前已存在持续变形现象,表明 DInSAR 技术能够有效识别桥梁潜在失稳风险。

2021 年, Qin 等^[54]提出了一种融合结构知识与 SAR 干涉测量的海桥高精度变形监测方法,通过结合桥梁结构特征与 InSAR 时序变形结果,对桥梁不同部位的变形响应进行分析,并依据结构变形异常程度实现风险识别。研究表明该方法能够有效提高海桥结构变形监测精度,并为桥梁安全阈值判定与风险评估提供依据。

2023 年, Farneti 等^[55]利用 InSAR 处理 CSK 数据获取桥梁时序位移,通过后处理定义二维位移误差阈值,结合数值模拟再现结构损伤扩展至倒塌过程,验证了遥感变形测量与倒塌分析协同的有效性,提出了渐变损伤下桥梁剩余寿命估计方法。

2023 年, 危俊杰等^[56]以国内某高速铁路钢拱桥为例,利用 PSI 技术获得桥梁 LOS 向位移,并根据 SAR 成像几何关系计算支座纵向位移,并验证桥梁损伤与其时序变形结果具有较强相干性。

2023 年, Tonelli 等^[57]利用 MT-InSAR 技术获取桥梁关键部位时序位移,并结合气温与水位等环境因素分析桥梁形变响应特征,识别出局部异常变形区域,表明时序形变分析能够有效反映桥梁结构运行状态。

2023 年, Othmane Lasri 等^[58]基于 PS-InSAR 技术获取混凝土桥梁长期位移时间序列,并通过与 GNSS 监测结果对比验证了 InSAR 形变结果的可靠性,说明时序变形参数可用于桥梁结构长期安全状态评估。

2023 年, Amedeo Nettis 等^[59]探讨了星载 InSAR 技术在桥梁群结构监测中的应用,指出通过长期时序形变监测能够实现区域尺度桥梁异常桥梁筛查与结构健康评估,为桥梁群安全评估提供了新的技术路径。

2023 年, Guzman-Acevedo 等^[60]以墨西哥 Usumacinta 桥为研究对象,利用 InSAR 时间序列获取桥梁半静态位移信息,并结合结构可靠度理论建立桥梁安全评估方法。研究通过将桥梁实测变形结果与结构允许位移及应力极限进行对比,构建了基于变形阈值的结构可靠性评价指标,实现了桥梁运行安全状态的定量评估。

2024 年, Nishio 等^[61]通过获取了 2017 年至 2022 年间,位于日本茨城县的 47 座桥梁的 InSAR 视线(LoS)位移时间序列数据,并对日本多座桥梁的长时序 InSAR 数据进行了定性分析,以评估其结构状况,结果发现桥梁损伤与气温之间存在稳定的相关性。

2025 年, Ren 等^[62]使用 InSAR 时序数据对海桥结构的变形模式进行分类,识别出多种形变模式,这些模式与桥梁结构变化机制有关。该研究表明,长时序 InSAR 数据可以用于提取桥梁结构行为特征,反映潜在损伤或异常趋势。

2026 年, Buelvas 等^[63]总结了 PS-InSAR、SBAS-InSAR 和 DS-InSAR 等主流方法在桥梁沉降、挠度及温度响应监测中的应用效果,同时也展望了多源数据融合、

三维形变反演及智能化分析在桥梁安全评估与预警中的发展方向，表明 SAR 技术在桥梁结构安全评估的工程应用潜力。

此类方法以单个测点的形变时序数据为主要依据开展分析，评估流程较为简明、计算效率较高，因此在工程实践中得到了广泛应用，既可用于桥梁运行状态的定性判别，也可支撑基于变形阈值的定量评估。然而，从现有研究来看，基于时序形变信息进行桥梁安全分级时，往往仅依赖变形幅值或变化速率对安全等级进行划分^[64-66]。这种相对单一的判别依据难以全面反映结构受力与性能演化特征，因而存在一定局限性。

为克服上述方法的局限性，一些研究开始尝试将结构力学理论与星载 InSAR 变形监测技术相结合，探索面向工程力学本质的结构安全评估新思路。即通过反演不均匀沉降、结构倾角及整体旋转等三维变形参数，对结构运行状态进行评估^[67-68]，从而增强了评估方法的工程适用性与可靠性。此外，对这些三维变形指标的时序演化特征进行分析^[69]，有助于将监测结果与现行工程规范相衔接，为结构安全判定提供更加合理的依据。

进一步地，将 InSAR 变形结果引入有限元分析模型，可提升安全评估的可靠度^[70]。有限元还可基于温度场与材料特性进行精细化模拟，与 InSAR 观测相互验证。

2021 年，Schlögl 等^[71]利用时序 InSAR 技术对桥梁变形进行系统分析，揭示了桥梁结构在温度及荷载作用下的时序演化特征。研究表明，InSAR 在桥梁长期变形监测及性能评估方面具有重要应用价值，并为后续与有限元模型的结合提供了数据基础。

2023 年，Eskandari 等^[72]基于欧洲地表形变服务数据，开展了桥梁结构形变监测研究，并结合结构响应分析方法对温度变形特征进行解释。研究表明，InSAR 观测结果能够有效反映桥梁在环境荷载作用下的变形规律。

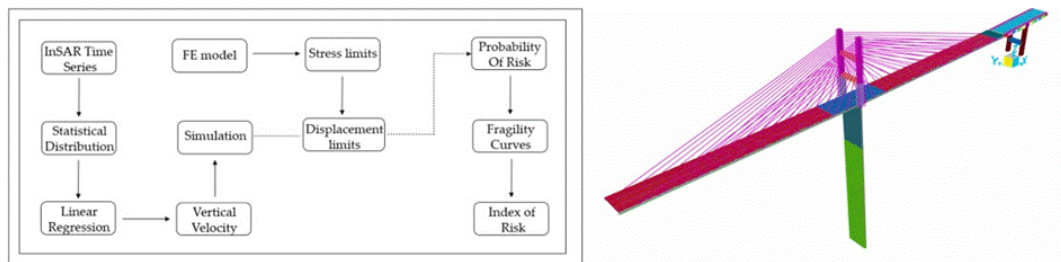


图 1.5 桥梁结构安全评估框架^[73]

2024 年，Guzman-Acevedo 等^[73]将星载 InSAR 时序变形数据与有限元模型相结合，构建了桥梁结构安全评估框架，实现了由观测变形到结构响应及安全指标的映射。研究表明，融合时空变形信息能够有效识别桥梁异常响应，并提升结构安全评估的可靠性与量化水平。

2024 年，Cusson 等^[74]对时序 InSAR 桥梁变形结果与有限元模拟进行了对比分

析,系统评估了温度荷载作用下结构响应的一致性。结果表明,InSAR 反演的周期性变形与有限元计算结果具有良好一致性,可用于桥梁温度响应分析及异常识别验证。

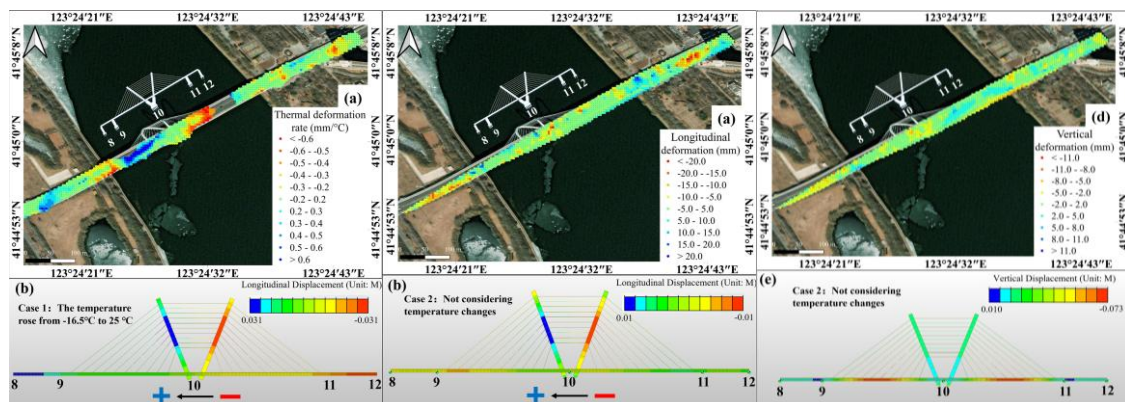


图 1.6 InSAR 与 FEM 结果对比^[75]

2025 年, Wei 等^[75]基于 TS-InSAR 融合多轨观测数据,并结合有限元模型,构建了桥梁结构变形与应力响应的耦合分析方法,实现了由表观形变向结构力学响应的转化。研究表明,多源 InSAR 数据约束下的有限元分析能够有效提升桥梁应力评估的精度,为结构安全状态识别提供了可靠依据。

星载 InSAR 技术能够在大范围、长时间尺度上获取桥梁结构的高精度时序变形信息,而桥梁结构理论则为解释变形产生的力学原因、识别潜在结构风险提供了坚实的物理基础。二者的有机融合,有助于突破传统基于经验阈值或统计特征的评估模式,从构件层面和受力层面对桥梁结构状态进行分析,从而从根本上提高桥梁安全评估结果的科学性与可靠性^[76-77]。

1.3.3 基于时序 InSAR 的桥梁变形时间序列预测

城市桥梁结构长期遭受水流侵蚀、温差循环荷载、冻融等恶劣环境因素的侵袭,导致裂纹、混凝土脱落、钢筋锈蚀等损伤问题日益严重,对结构安全构成了严重威胁。因此,对在役桥梁结构开展长期的风险监测具有极其重要的意义。近年来,随着 InSAR 技术与无人机技术的快速发展,基于 InSAR 时间序列数据的桥梁变形预测在桥梁异常变形识别领域的重要性日益凸显,该技术以机器学习为基础,众多学者围绕这一技术的运用开展了大量深入的研究。

2019 年, Kaloop 等^[78]利用大地测量全球定位系统 (GPS) 评估仁川大桥的安全,并通过小波谱分析与时间序列自回归滑动平均 (ARMA) 模型来预测桥梁的变形结果。

2020 年, Ma 等^[79]提出一种基于深度卷积神经网络的 InSAR 时序形变预测方法,通过学习历史时序变形特征实现未来形变趋势预测,提高了 InSAR 时序变形分析的预测能力,为基础设施长期安全评估与风险预警提供了新的技术手段。

2023 年,冯建强等^[80]在 LSTM 网络的基础上引入 CEEMDAN 分解算法,构建了一种基于 CEEMDAN-LSTM 的桥梁变形时间序列预测模型,利用某大桥南索塔横向的变形时间序列数据对预测模型进行检验分析,结果表明,该预测模型精度高,实用性强。

2024 年,Sowemimo 等^[81]通过开发 RNN 模型,利用 LSTM 和 GRU 架构,并设置时间分布输出层,解决了传统的桥梁状况预测模型往往无法充分捕捉关键变量(如桥梁年龄、交通模式和环境因素)之间的非线性和动态关系。

2025 年,Bai 等^[82]提出一种基于 K 形与完全链接层次聚类的长短期记忆(KCC-LSTM)网络模型,通过结合 K-Shape 聚类与完全链接层次聚类,分别捕捉桥梁变形的时间形态特征与空间邻近特征,生成具有时空关联性的聚类结果;随后将聚类标签作为输入,构建 LSTM 网络进行变形预测。

2025 年,Zhou 等^[83]基于 PSI 技术获取了一座大跨度高速铁路钢特拉斯拱桥的位移时间序列,并基此开发了一种新型混合模型,该模型将基于局部加权回归的改进季节趋势分解与长短期记忆网络相结合,确定了预警的上限和下限阈值,当预测误差超过设定阈值时,可以有效地识别出异常的时空位置。

总体而言,传统基于统计模型的方法受环境因素影响较大,其泛化能力难以满足复杂环境下城市桥梁群变形预测的要求。相比之下,统计模型主要用于在时间序列的线性和平稳性假设下对基础设施变形进行预测。基于人工智能的模型,如深层变压器模型^[84]、人工神经网络(ANN)^[85]、长期短期记忆(LSTM)^[86]、多层感知器(MLP)^[87]、卷积神经网络(CNN)^[88]、支持向量机(SVM)^[89]、液态神经网络(LNN)^[90]和前馈神经网络(FNN)^[91],在预测精度和适应性方面通常优于传统的统计模型,然而,这些模型的性能在很大程度上依赖于数据集的质量和规模,丰富的数据集能够显著提升模型的预测精度与泛化能力。因此,如何通过低成本手段获取足量且有效的数据集,并在此基础上搭建高性能的风险预测模型,有待进一步深入研究。

1.4 本文研究内容

目前,基于星载 InSAR 技术的桥梁变形监测研究仍主要集中于单座桥梁,研究内容多围绕 SAR 影像处理、时序形变反演及结果解译等方面展开,而针对城市尺度桥梁群的系统性研究仍十分有限。现有研究大多仅以单桥或少量典型桥梁为对象,真正面向“桥梁群”开展区域化、体系化监测与安全评估的研究目前仅有少数几篇,尚未形成成熟的理论体系与工程应用框架。由于桥梁群具有结构类型多样、空间分布复杂、环境荷载差异显著等特点,现有方法普遍缺乏对桥梁结构特征及群体关联性的综合考虑,难以准确揭示桥梁群变形机理与风险传播特征,尚无法满足

城市桥梁群安全监测与风险预警的实际工程需求。通过对现有文献总结发现，目前星载 InSAR 桥梁群监测研究主要存在以下不足：

(1) 星载 InSAR 技术获取的桥梁变形结果缺乏与桥梁结构特征及力学行为之间的直接关联，制约了形变信息向真实结构响应的有效映射。现有基于星载 InSAR 的桥梁变形监测研究，多侧重于时序形变信号提取与空间分布分析，缺乏对桥梁结构类型、几何构型及受力特征的系统刻画，导致难以从 InSAR 表观位移中反演桥梁真实受力状态及变形机理。

(2) 面向城市桥梁群的时序 InSAR 数据驱动安全评估方法尚不成熟，现有研究仍主要针对单体桥梁开展分析，缺乏适用于桥梁群的大范围、多类型桥梁协同评估体系。当前方法多依赖将 InSAR 观测位移直接输入数值模型，并通过与规范限值对比实现安全判定，尚未充分考虑桥梁群在复杂环境荷载、结构差异性及群体服役状态耦合作用下的非线性响应特征，难以揭示桥梁真实受力状态及其演化机制。

(3) 现有桥梁变形监测研究中，基于物理驱动的结构响应分析与 InSAR 观测机制之间尚缺乏有效耦合。在桥面、桥墩及支座等关键构件区域，还易受到 layover、阴影效应及散射退化等影响，导致局部结构信息缺失或失真，使得现有物理驱动模型难以充分利用 InSAR 形变信息开展桥梁受力分析与变形机理解释，制约了桥梁结构响应的精细化建模与安全评估。

鉴于此，本文基于国家自然科学基金项目《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》(52278306) 与湖南省重点研发计划项目《基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群多灾害条件下状态评估与预警研究》(2022SK2096) 开展相关研究。针对现有结构健康监测体系在成本投入、运维复杂性及长期稳定性方面的局限性，本文引入星载合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术，对城市桥梁群开展结构变形监测研究，提出一种面向多尺度变形特征提取的桥梁群监测与安全评估方法。该方法在保证监测精度的同时兼顾工程实施可行性，可为城市级桥梁运行安全管理及智慧交通系统建设提供技术支撑，主要研究内容如图 1.3 所示：

(1) 提出了一种基于时序 InSAR 的城市桥梁群多尺度变形识别与状态评估方法，实现了桥梁群时序形变监测、异常变形识别与安全评估。该方法融合光学遥感提取的桥梁群结构几何信息与气象数据反演的温度场，结合 DS-InSAR 获取桥梁时序变形，实现桥梁群连续监测与异常识别；引入热膨胀模型分离温度与沉降变形，构建多维安全评估指标体系，并基于层次分析法实现桥梁风险分级。以长沙桥梁群为例，结合 CSK 时序 SAR 数据与 GNSS 数据验证了方法的有效性。

(2) 提出了一种融合时序 InSAR 监测结果与桥梁结构有限元模型的安全评估验证方法，实现了桥梁异常变形识别与安全状态分析。该方法基于 ANSYS 平台融合结构几何、材料参数及支座边界条件，建立钢拱桥三维有限元模型，模拟温度荷

载作用下的结构响应；选取关键参数并结合响应面方法与优化算法实现模型精度提升。在此基础上，通过设置支座沉降，提取沉降、倾角及角变形等指标，结合综合评估结果验证了方法对桥梁异常变形与风险状态的识别能力。

(3) 提出了一种基于 STG 的桥梁时序位移分解与预测方法，实现了桥梁时序形变的高精度预测。该方法结合自适应时间序列分解算法与神经网络预测模型，采用 STG 方法将桥梁时序 InSAR 位移分解为趋势、季节性与残差项，并分别利用前馈神经网络（FNN）、长短时记忆网络（LSTM）及液态神经网络（LNN）进行时序预测，同时结合有限元结果对分解精度进行验证；在模型对比基础上构建 STG-FNN 混合模型，实现桥梁变形的高精度预测，从而提升桥梁监测时效性。

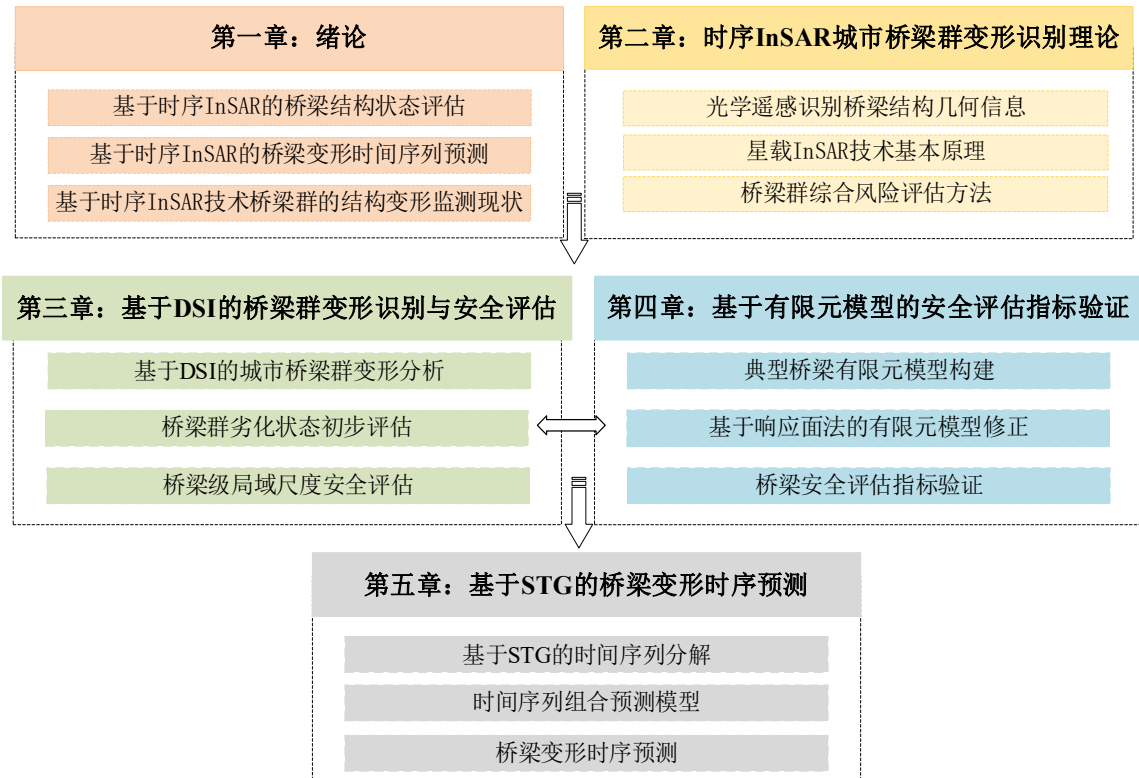


图 1.7 研究内容

第 2 章 时序 InSAR 城市桥梁群变形监测理论

2.1 引言

随着公路与铁路交通网络的持续扩展,桥梁建设规模不断扩大,如何高效、精准地评估桥梁结构健康状态,已成为保障其安全运营、延长服役寿命的核心课题。桥梁结构健康监测通常依托对变形、应力与应变等关键参数的实时采集,以评估结构服役性能并及时识别潜在损伤。传统监测手段往往需要复杂的现场安装与人工测量,成本高、覆盖有限。相比之下,InSAR 技术无需在桥梁结构表面布设传感设备,具备远距离观测能力,可实现毫米级精度的形变获取,因而在城市桥梁变形监测领域得到广泛应用。尽管如此,若仅依赖 InSAR 影像反演得到的位移信息来开展结构安全评估与风险判识,仍存在一定局限性,难以全面支撑复杂工程条件下的可靠分析。针对上述问题,本章节提出了一套基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群变形监测与风险识别方法。本章节将详细阐述该方法的理论框架,重点介绍光学卫星遥感的桥梁信息提取,InSAR 技术的工作原理,以及 DSI 技术与结构健康监测的结合方法。

2.2 星载 InSAR 技术基本原理

2.2.1 InSAR 技术基本原理

InSAR 技术是一种基于主动微波雷达的遥感手段,通过获取同一区域在不同时刻的多景 SAR 复影像,并对其进行处理以获取干涉相位信息,进而实现地表三维结构特征及微小形变的反演。

InSAR 技术实现地表地形与变形反演的核心,是对同一地区的两幅 SAR 影像进行干涉处理,提取回波信号的相位差。根据影像获取方式,可分为两种模式:双天线一次过境模式,在航天飞机或航空平台一次性安装两套位置差异的 SAR 系统,单次飞行同时获取两幅影像,适用于高精度地形测绘。单天线重复过境模式,星载 InSAR 主流模式。卫星搭载一套 SAR 系统,通过精密轨道控制,以固定周期和微小偏移重复观测同一区域,分时获取两幅影像,适用于长期变形监测。SAR 影像以复数形式存储,每个像素包含振幅与相位信息。振幅反映地物散射强度,相位记录雷达波传播路径长度。干涉处理正是通过相位差解算,实现地表信息提取。

InSAR 技术首先应用于反演目标的高程信息,其理想状态下的干涉几何原理如图 2.1 所示。具体的几何参数定义如下: h 定义为目标点 P 至参考椭球面的垂直距离, H 表示为卫星首次过境时轨道面与参考椭球面之间的间距,图中 S_1 与 S_2 分别为卫星两次过境的空間位置, R_1 与 R_2 分别表示两次对应成像位置至点 P 的实际

距离, P_2 为 P 点在参考椭球面的等斜距投影点, 对应投影斜距 R_1' 和 R_2' 分别表示 S_1 和 S_2 到 P_2 的距离, R_2'' 表示 S_2 到 P_1 的距离, B 为 SAR 卫星与观测点间的 (沿雷达视线向) LOS 向距离, 即 S_1 到 S_2 之间的距离, 分解到沿 LOS 向的平行分量 $B_{\parallel}$ 和垂直分量 $B_{\perp}$, θ 为雷达测试角, Δ_r 为位移向量 r 沿 LOS 方向的投影长度。

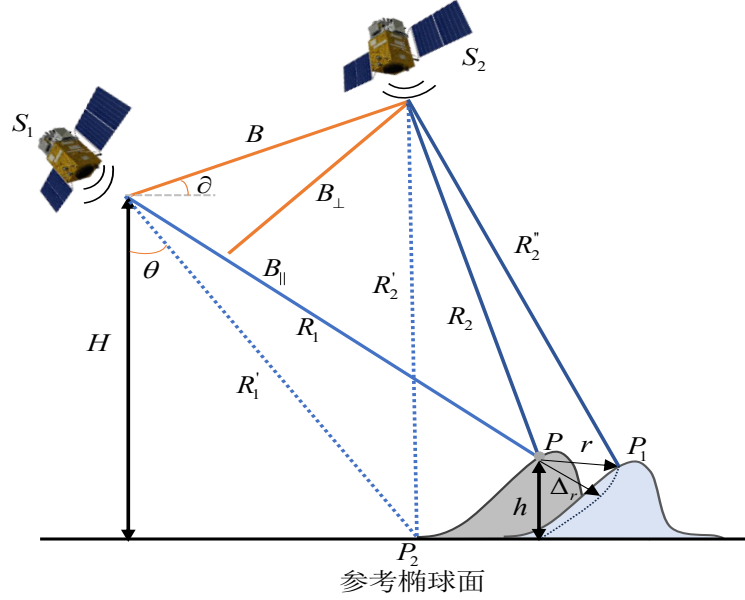


图 2.1 InSAR 干涉几何模型

当两次雷达卫星观测同步进行且地表散射特性保持稳定时, 由于雷达信号采用往返传播路径, 目标点 P 的回波信号相位差所对应的实际距离应为斜距的两倍, 其数学表达如式 (2.1) 所示。

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (2R_2 - 2R_1) \quad (2.1)$$

式中: λ 为雷达波长。

由图 2.2 可知, 干涉斜距的差异主要受两方面因素控制: 一是目标点与参考椭球面之间的空间几何关系, 二是参考基准面的选取策略。除此之外, 两次成像期间发生的地表位移变化以及大气扰动引起的电磁波传播路径延迟, 也会对干涉相位产生影响。因此, InSAR 完整的干涉相位 φ 由五个部分组成: 参考椭球相位 φ_{ref} 、地形相位 φ_{top} 、形变相位 φ_{def} 、大气相位 φ_{atm} 以及噪声相位 φ_{noise} 其数学表达如式 (2.2) 所示:

$$\varphi = \varphi_{ref} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (2.2)$$

在干涉实际相位中, 前三相位为主要控制要素。

参考椭球相位 φ_{ref} 可通过参考椭球面予以去除, 地形相位 φ_{top} 可通过引入数字高程模型 (DEM) 去除, 大气相位 φ_{atm} 与噪声相位 φ_{noise} 可通过相位滤波等方式予以去除, 如式 (2.3) - (2.5) 所示, 将上述相位去除可得到相应的变形相位 φ_{def} 。

$$\varphi_{ref} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (2.3)$$

$$\varphi_{top} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \varepsilon}{S_1 P \sin \theta} \quad (2.4)$$

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta_r \quad (2.5)$$

2.2.2 DSI 变形监测技术

PS-InSAR (PSI) 技术以高相干性、高相位稳定性的永久散射体 (PS 点) 为目标开展桥梁变形监测, 能够有效抑制大气延迟效应和时空失相干现象, 尤其适用于散射能力较强的桥梁结构。然而, 在面对散射特征较弱的桥梁时, PSI 技术可识别的 PS 点数量显著减少, 给相位解缠与变形解算带来了较大困难。

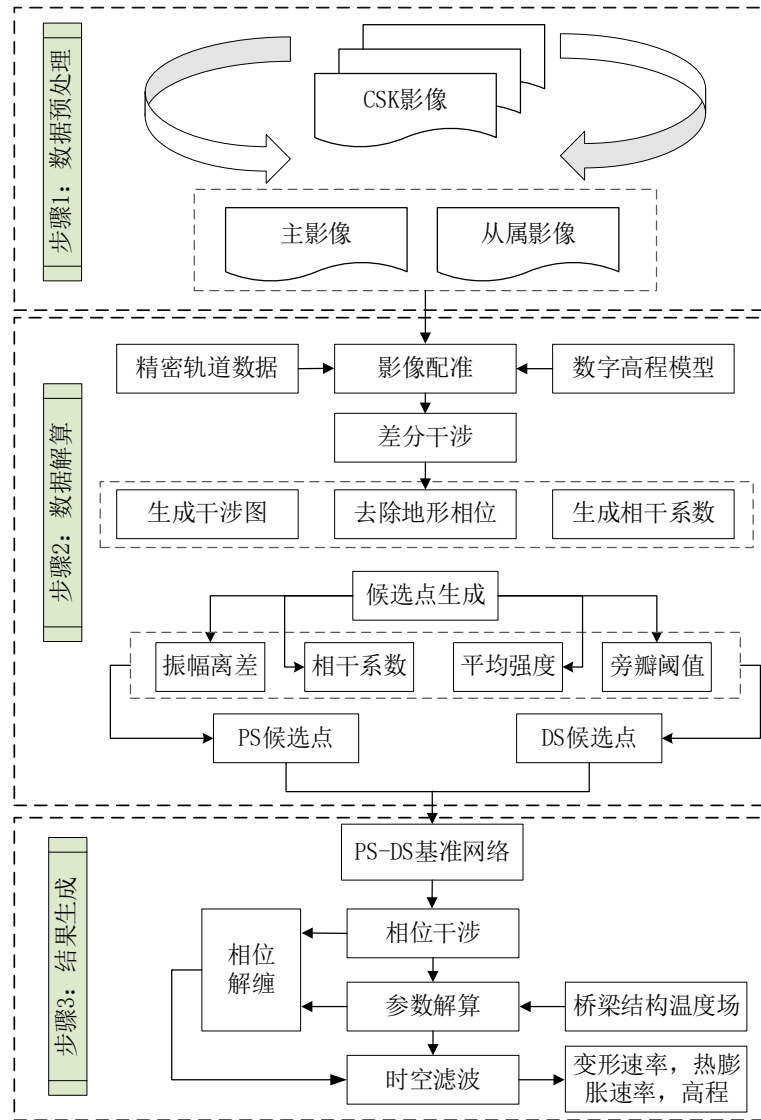


图 2.2 DSI 处理流程

DS-InSAR 技术 (DSI 技术) 是一种时序 InSAR 测量方法, 通过分析多时相

SAR 影像，识别散射特性在时间维度上保持稳定的永久散射体（PS）与分布式散射体（DS），并基于时序点网络的差分处理与参数估计实现地表形变反演^[92]。其中，PS 点通常对应于建筑物边角、金属构件等具有强且稳定后向散射特性的单一散射体；而 DS 点则来源于由多个微散射单元共同组成的区域（如道路、裸地或桥面结构），单个像元的散射特性较弱，但在一定空间范围内具有相似的统计特性。通过同质像元识别方法，可在局部邻域内筛选出散射行为一致的像元集合，并通过统计建模与相位优化提升其相干性，从而将其转化为稳定的 DS 观测点。如图 2.2 所示，DSI 技术主要包含以下 3 个步骤：数据预处理、数据解算及结果生成。

步骤 1：数据预处理。根据最小的时间和空间差异选择主图像。通过基于相干性的方法将从属图像与主图像进行对齐。对齐后，所有图像均经相同区域裁剪后，生成干涉图以结合精确轨道数据和数字高程模型（DEM）进行进一步形变分析。

步骤 2：数据解算。综合幅值偏差指数、平均相干系数、平均强度、旁瓣阈值等指标，选择 PS/DS 点，以第一层网络中检测到的 PS 点为参考对象，在第二层网络中引入 DS 点，增加该区域监测点的密度。

步骤 3：结果生成。通过气象共享数据得到桥梁的大气温度，并基于此数据估算热膨胀系数，同时通过结构几何信息推导高程误差。采用多函数模型联合校正平均速度场与时间序列残差，并运用滑动窗口法剔除异常值与孤立点。最终得出研究时段内的形变速度及累积形变量。

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \cdot v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B \cdot \varepsilon + \varphi_{res} \quad (2.6)$$

式中， λ 代表雷达波长， R 是雷达到地面目标的斜距， θ 表示雷达入射角， B 表示垂直基线， ε 是由桥梁垂直结构位移引起的 DEM 高程误差， t 指时间基线， v 是沿视线（LOS）方向的线性变形速率， φ_{res} 表示残余相位，包括大气相位、非线性变形相位和噪声。温度是影响桥梁长期变形的重要因素，因此，本研究同时考虑热膨胀和季节性环境温度效应改进的组合温度模型，通过 DSI 技术将热膨胀参数引入干涉模型中的非线性变形，方程如式（2.7）下所示：

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \cdot v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B \cdot \varepsilon + \frac{4\pi}{\lambda} T_{tf} \cdot k + \varphi_{res} \quad (2.7)$$

式中， T_{tf} 表示对应于每幅图像获取时 DS 点的桥梁结构温度场， k 是热膨胀系数。

差分处理后的热膨胀相位可以表示为以下公式：

$$\Delta \psi_T^i = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T_{tf}^i k \quad (2.8)$$

在 DS-InSAR 处理流程中，同质像元识别是保证时序反演质量的关键步骤，其核心在于从多时相 SAR 数据中识别出具有相似散射行为的像元集合。对于对应同一散射体的像元，其相位演化与幅度变化通常具有较高一致性，从而在时间与空间维度上呈现出相近的统计特征。在具体实现过程中，一般以某一像元作为参考中心，

在预设邻域范围内对周围像元进行遍历分析。通过结合振幅信息及统计特征，对邻域像元与参考像元之间的相似程度进行判别，从而提取出满足条件的同质像元（SHPs）集合。当前主流方法多基于统计检验框架，对像元间差异进行量化分析，按照是否依赖分布假设，通常可划分为参数检验与非参数检验。

（1）非参数假设检验

在同质像元判别过程中，非参数统计方法通常不依赖具体分布形式，而是通过比较两个样本经验分布之间的差异来进行判断。当两组样本在分布特征上表现出较高一致性时，可认为其散射属性相近，从而归入同一类像元。目前，KS 检验（Kolmogorov-Smirnov 检验）与 AD 检验（Anderson-Darling 检验）是该领域常用的两种非参数检验方法^[93]。

1) KS 检验方法

KS 检验通过计算两样本经验分布函数（EDF）的最大差异，判断其是否同分布。

2) AD 检验方法

AD 检验通过加权方差机制增强了对分布尾部差异的检测灵敏度，弥补了 KS 检验在极端值区域识别能力的不足。与 KS 检验相同，AD 检验采用一致的零假设与备择假设，均基于经验分布与理论分布的对比进行推断。

（2）参数假设检验

在 DS-InSAR 数据处理中，参数化假设检验通常以预设统计分布为前提展开分析。具体而言，首先将像元观测数据假定为符合某种已知概率模型，随后在此基础上构建统计判别准则，对像元间散射特性的相似性进行量化评估。在实际应用中，广义似然比检验（GLR）被广泛用于度量不同假设下的概率差异。

GLR 检验是一类以似然函数为基础构建的统计判别方法，常用于判断观测数据是否符合既定的概率分布模型。在同质像元识别过程中，该方法通过构建目标像元与参考像元的假设模型，对二者的散射特性进行对比分析，并依据似然比统计量实现显著性检验，从而判定其统计一致性。

在相位优化中，广泛采用的技术手段包括最大似然估计（MLE）、特征分解（EVD）以及基于特征分解的干涉相位最大似然估计（EMI）三类方法。其核心原理分别为：MLE 方法以似然函数最大化为目标，通过优化求解获得最可能的相位值。EVD 方法则从复相干矩阵的特征分解入手，依据最大特征值对应的特征向量提取形变信号。EMI 方法可视为 MLE 的改进版本，它在 MLE 基础上引入两个尺度参数，并利用拉格朗日乘子法施加约束，从而提升相位估计的精度。

2.2.3 桥梁群 DSI 变形监测方法

（1）PS 及 DS 点选取。

在 DSI 技术中,选取空间位置稳定的 PS 点构建第一层网络是实现桥梁结构变形精准识别的前提,已有研究表明,雷达回波信号的幅值稳定性可在一定程度上反映 PS 点的稳定性特征^[29]。其中,振幅离差系数 (Amplitude Dispersion Index, ADI) ∂_v 是衡量 SAR 像元幅值稳定性的重要指标,其定义为同一像元在时序 SAR 影像中幅值标准差与平均值的比值,ADI 值越小,说明像元散射特性越稳定,更适合作为 PS 点。基于这一原理,可利用振幅离差指数 ∂_v 高效筛选出分布于桥梁结构上的 PS 点。

在实际应用中,通常采用经验阈值对 PS 点进行筛选:当 $\partial_v < 0.25-0.4$ 时,可认为该像元具有较高的幅值稳定性,可作为 PS 候选点;其中,在城市桥梁等高相干区域,常取较严格阈值,以保证点的稳定性与可靠性。此外,相干系数 (Coherence Coefficient) 也是评价 SAR 像元相位稳定性的重要指标,其反映主从影像间相位相关程度,取值范围为 0~1,相干系数越接近 1,说明像元相位一致性越高、干涉质量越好。

对于不满足上述 PS 筛选条件 ($\partial_v > 0.4$) 的像元,虽然其幅值稳定性较差,但在一定空间邻域内可能仍具有统计同质性,此类像元通常被归类为 DS 点。DS 点的识别不再依赖单像元幅值稳定性,而是通过前文提到的同质像元识别方法构建像元集合,并结合提到的相位优化提高其相干性,从而参与后续时序形变反演。

从散射机制来看,DS 点对应于 SAR 影像中由多个统计特性一致的散射单元共同贡献的像素区域。这类像元不具备明显的主导散射体,后向散射强度较弱,且所有散射单元源自同一地物类型^[94]。在识别过程中,通常以 SAR 影像的强度数据为基础,构建统计检验指标,通过评估邻域像元与中心像元的统计相似性,实现同质像元的有效提取,从而构建时序 InSAR 分析的第二层网络。

$$\partial_v(i, j) = \frac{std[\varphi(i, j)]}{mean[\varphi(i, j)]} \quad (2.9)$$

(2) 温度数据获取。

针对桥梁结构在均匀温度荷载作用下的取值问题,由于在实际工程中,桥梁结构温度的长期监测通常因传感器布设受限而难以实现,且全桥结构温度的获取较为复杂,因此采用机场气象站空气温度作为结构温度场输入是桥梁温度场分析中的常用思路。Zhou 等^[95]针对钢桁拱桥的研究表明,利用邻近桥址气象站共享的温度、风速及降雨等数据,通过瞬态热分析重建桥梁关键构件时变温度场,并将其引入 PSI 热膨胀相位估计过程。研究表明,当采用距桥址较近气象站的共享数据时,能够较好反映桥梁整体温度变化规律;与有限元计算及现场监测结果对比后,热致变形速度相对误差为 -4.52%~4.50%,说明邻近气象数据在桥梁长期整体温度效应分析中具有较好的适用性与可靠性。

(3) 参考点选取与变形分解。

DSI 监测桥梁变形时,参考点选取至关重要,参考点自身发生形变会导致监测结果整体偏移。考虑到桥梁结构(包括桥面、桥墩及支座区域)均可能存在温度胀缩或沉降变形,本文不直接在桥梁结构上选取参考点,而是在桥梁外围稳定区域进行参考点筛选。具体而言,首先利用桥梁 GIS 数据或高分辨率光学影像提取桥梁空间范围,并通过缓冲区分析构建桥梁影响区掩膜;随后在 PS 候选点筛选过程中,剔除位于桥梁及其邻近影响区内的高相干点,仅在远离桥梁结构的稳定地物区域(如稳定建筑物、裸地区域或道路)中,结合振幅离差指数(ADI)及时序相干性指标筛选稳定候选点;最终通过时间序列稳定性检验,选取空间分布均匀且长期形变接近零的点作为参考点集合,以降低桥梁自身变形对 DS-InSAR 结果的影响。

对 DSI 技术输出的变形结果进行校验时,常用的对比数据包括水准测量、GNSS 监测以及原位传感器记录的变形信息等。然而,这些监测手段获取的多为单维度变形分量(如竖向沉降、东西向位移、南北向位移),与 DSI 技术直接观测得到的视线向(LOS)变形在维度上存在本质差异。因此,在进行变形结果比对之前,需将 DSI 获取的 LOS 向变形进行三维分解,从而确保变形监测结果的可比性。

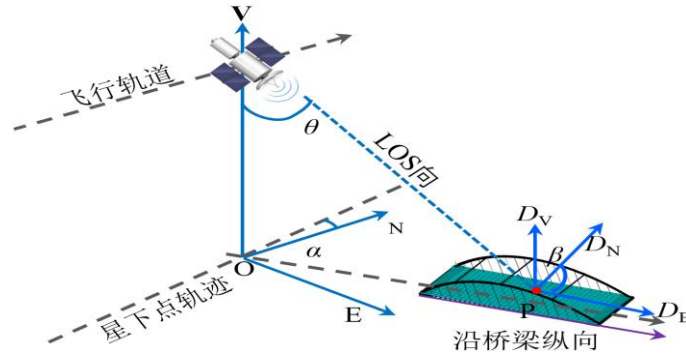


图 2.3 卫星观测示意图

桥梁的 LOS 向变形是其三维分量在 LOS 方向上的投影之和。图 2.3 展示了 SAR 测视成像几何变形示意图,以降轨数据集作为示例。LOS 向变形与三维变形分量之间的关系如下所示:

$$D_{\text{LOS}} = D_V \cos(\theta) + D_N \sin(\theta) \sin(\alpha) - D_E \sin(\theta) \cos(\alpha) \quad (2.10)$$

式中, D_V 、 D_N 、 D_E 分别为垂直、南北与东西方向的位移。 θ 是侧视角, α 是方位角,考虑到目标点的变形方向和 SAR 的空间几何成像关系, β 是桥梁与南北方向之间的夹角,这一关系可以表示如下:

$$D_{\text{LOS}} = D_V \cos(\theta) - D_N \sin(\theta) \sin(\alpha + \beta) - D_E \sin(\theta) \cos(\alpha + \beta) \quad (2.11)$$

本文关注的是桥梁长期整体竖向变形识别,而非支座纵向温度伸缩、风致横向响应或瞬态动力问题。因此,在本文研究场景下,横向变形可忽略^[46],纵向变形作为次要影响项处理,从而将 LOS 向变形近似换算为垂直变形,垂直变形与视线方

向变形的关系可以表达为如下：

$$D_v = \frac{D_{\text{LOS}}}{\cos(\theta)} \quad (2.12)$$

2.3 变形监测与风险评估框架

如图 2.4 所示，基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群变形监测与风险识别框架主要有以下六个步骤。

（1）第一步：基于光学遥感的桥梁结构几何信息提取。利用高分辨率光学卫星观测城市桥梁群，获得不同类型桥梁的地理坐标、几何尺寸以及伸缩缝位置等信息，结合网络共享信息和现场实测结果，获得桥梁材料特性以及边界条件等参数。

（2）第二步：基于雷达遥感的桥梁群时序变形反演。利用多时相 SAR 影像对城市桥梁群进行观测，基于时空基线约束构建干涉网络并完成影像配准，提取稳定散射点并优化干涉相位。在此基础上，通过时序建模与参数估计，获取 SAR 观测周期内桥梁群的时序变形信息。

（3）第三步：基于 DS-InSAR 的桥梁群变形特征分析。针对桥梁群 DSI 变形测试结果，分析了 LOS 向变形以及热膨胀速率的时空分布规律。结合结构形式、支座约束以及材料特性，分析了环境温度对桥梁变形的影响。利用已有研究变形数据，验证 DS-InSAR 城市桥梁群变形监测的准确性和可靠性。

（4）第四步：基于数据驱动的桥梁群劣化状态评估。结合 DS-InSAR 桥梁结构时序变形以及相关城市桥梁监测规范限值，对比分析结构变形特征以及热膨胀速率的实测值和理论值，识别出可能存在安全风险的桥梁目标。为后续桥梁结构安全评估奠定基础，提高评估准确性和效率。

（5）第五步：基于物理驱动的桥梁群评估指标验证。结合光学遥感获取的桥梁几何信息及材料参数，建立桥梁结构有限元模型，开展结构响应分析并获取桥梁变形特征。通过与 DS-InSAR 观测结果对比验证有限元模型的可靠性，并基于不同工况分析结果，为桥梁群结构安全评估提供支撑。

（6）第六步：基于多源数据融合的桥梁群综合安全详查。针对桥梁群结构变形特征，构建表征整体变形与局部损伤的多维评价指标体系，并融合多源监测信息开展综合分析。在此基础上，建立多指标集成的安全评估方法，实现城市桥梁群结构安全状态的定量评估。

本章将重点介绍城市桥梁群变形监测与风险评估框架的第一步、第二步与第六步的方法理论。

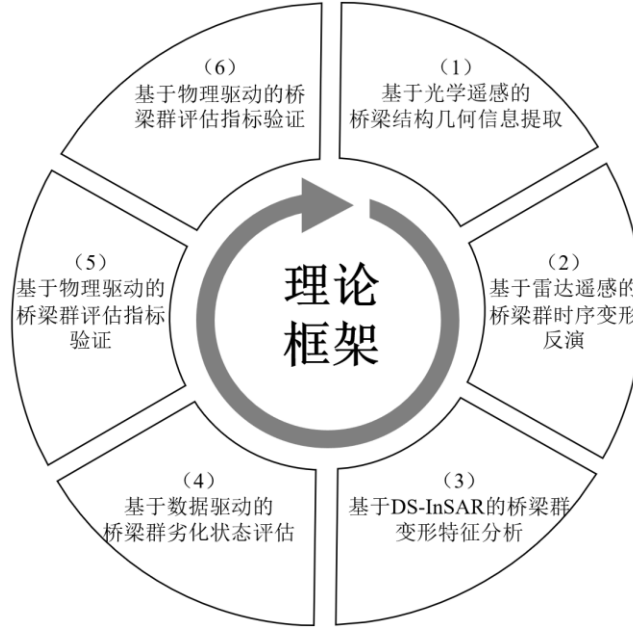


图 2.4 桥梁群结构识别研究框架

2.4 基于光学卫星遥感的桥梁信息提取

为获取桥梁群中各桥梁的关键结构参数，本文基于高分辨率光学卫星影像，对桥梁几何形态与构造特征进行自动识别与量化分析。高分辨率光学遥感通常指空间分辨率达到米级及优于米级的对地观测技术，通过搭载全色与多光谱传感器，实现对地表目标的精细成像与光谱信息获取。典型系统如 WorldView-3、Pleiades-1 及高分二号等，具备高空间分辨率与较强辐射分辨能力，并可通过全色与多光谱影像融合在保持空间细节的同时提升地物判识能力。在此基础上，光学遥感影像凭借其直观的纹理与光谱信息优势，能够有效识别桥梁伸缩缝、支座位置及跨径宽度等结构要素，已在多项研究中得到验证^[96]。需要指出的是，高分辨率光学卫星影像通常呈现 $5 - 20^\circ$ 左右的倾斜观测角度，不仅能够观测桥面结构，还可获取桥墩顶部及部分立面特征，为桥梁结构与构造的初步辨识提供了有利条件。

基于光学遥感的桥梁结构几何信息提取，采用 Canny 算子提取桥梁主梁轮廓。Canny 算子是一种经典的多阶段边缘检测方法，通过高斯滤波抑制噪声，并结合梯度计算与非极大值抑制实现边缘精确定位，同时利用双阈值策略连接弱边缘与强边缘，具有良好的抗噪性与边缘检测精度。基于该方法，可有效提取桥梁主梁的连续边界特征，并通过形态学运算进一步增强线性结构的连通性，从而确定桥梁整体平面形态。桥梁总长度及宽度可由影像中桥梁起止点的像素坐标差计算得到：

$$L(B) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \times R \quad (2.13)$$

式中， (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 分别为桥梁两端在影像中的像素坐标， R 为影像空间分辨率（m/pixel）。

桥梁伸缩缝通常在光学影像中表现为沿桥向分布的高反差细线特征，其位置可通过灰度梯度突变检测与投影分析进行识别。沿桥梁纵向对灰度值进行一维投影，可得到伸缩缝候选位置：

$$s_j = \arg \max \left(\left| \frac{\partial I(x)}{\partial x} \right| \right) \quad (2.14)$$

式中： $I(x)$ 表示沿桥向的影像灰度分布， x 为桥梁沿纵向长度。

桥梁支座作为连接上部结构与桥墩（或桥台）的关键构件，其空间位置与桥墩区域在光学卫星影像上高度重叠。受限于卫星影像分辨率与成像几何条件的制约，支座本体难以从影像中直接识别。针对这一问题，本文采用了一种间接定位策略：基于离轴观测条件下桥墩与梁端连接区域呈现的轴侧投影特征，将桥墩目标检测与桥面伸缩缝识别相结合，对支座所在区域进行空间定位与范围约束^[97]。

具体而言，在桥墩识别方面，首先利用 Canny 算子提取影像中的结构边缘，并结合形态学闭运算增强竖向连续结构特征；随后在桥梁主轴方向约束下，识别与桥梁走向近似垂直且呈规则间距分布的矩形或条状高亮区域，将其作为候选桥墩目标。进一步地，通过连通域分析与几何特征筛选（如长宽比、高度一致性及沿桥轴方向的周期性分布特征），剔除非桥墩干扰目标（如车辆、路灯或阴影），从而实现桥墩位置的可靠提取。

在桥梁斜直判别方面，首先通过主梁轮廓提取结果拟合桥梁主轴方向，并对已识别桥墩中心点进行直线拟合以获得桥墩排列方向；随后计算桥梁主轴方向与桥墩排列方向之间的夹角。当两者夹角接近 90° 时判定为正交桥梁结构，而当夹角显著偏离 90° （如小于 75° 或大于 105° ）时，则判定为斜交桥。基于该角度判据，可有效区分直桥与斜交桥结构形式。

为避免成像投影效应与桥梁几何形态造成的混淆，本文进一步结合桥梁主轴方向与桥墩排列特征，对梁端与桥墩的相对空间关系进行一致性校验，从而提升支座空间定位的可靠性。上述提取的结构参数作为几何先验信息，为后续 InSAR 变形结果的分析解读与结构建模提供了重要支撑。

$$\theta = \arctan(k) = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (2.15)$$

式中： x_i, y_i 为桥面边缘的平面坐标， $\bar{x}, \bar{y}$ 为所有点的坐标均值。需要说明的是，在获得主轴方向 θ 后，将其与桥墩排列方向（同样通过拟合得到）进行对比。若二者夹角接近 90° ，可初步判断为正交桥或近似正交；若夹角明显偏离 90° ，则为斜交桥。

2.5 桥梁综合风险评估方法

本研究基于桥梁结构基本理论，系统归纳城市桥梁群纵向变形模式，引入局部横倾角表征倾斜风险，从结构损伤和整体变形两个层面出发，构建桥梁安全评价指标体系，并建立相应的相对安全度计算模型，从而提升基于 InSAR 观测数据的桥梁安全评估精度与可靠性。

2.5.1 桥梁纵向沉降模式

根据 Barker^[98]提出的桥梁理想化垂直变形模式，归纳桥梁沉降曲线的形态，以四跨连续梁结构为例，本研究将桥梁沉降变形分为图 2.5 所示的 4 种模式。

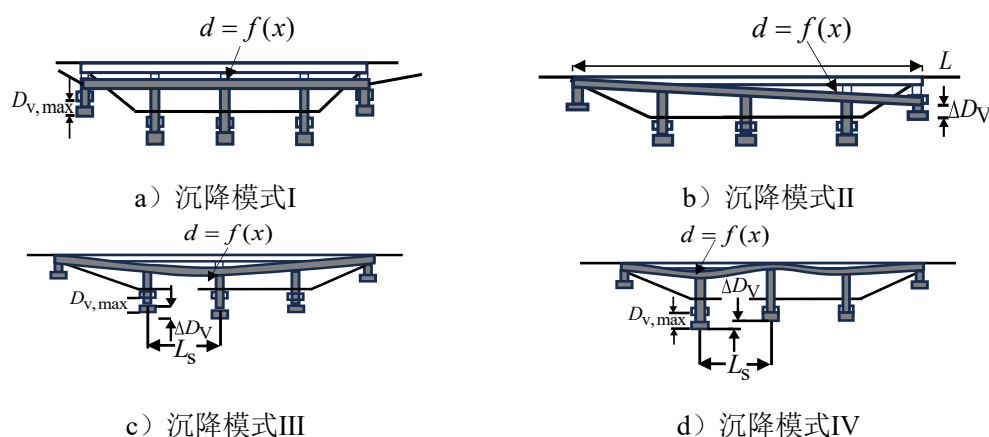


图 2.5 桥梁沉降示意图

沉降模式的特征如表 2.1 所示。

表 2.1 桥梁沉降模式

沉降模式	特征
I	$f'(x) = 0$
II	$f'(x) = c \neq 0, f''(x) = 0$
III	$f'(x) \neq 0, f''(x) \neq 0$
IV	$f'(x)$ 不连续或突变, $f''(x)$ 呈非均匀变化

图 2.5 和表 2.1 是本文后续桥梁变形识别与安全评估的基础分类框架。星载 InSAR 获取的是沿桥梁空间分布的离散视线向位移测点，若仅依据单点最大沉降值进行判断，难以反映桥梁沿纵向的整体变形协调性及结构受力特征。因此，本文基于桥梁纵向沉降曲线的一阶导数、二阶导数及局部突变特征，将桥梁沉降形态划分为整体沉降、整体转角、连续差异沉降和局部突变型差异沉降 4 类，以实现由“点状位移监测”向“结构变形模式识别”的转化。

从结构力学角度看，不同沉降模式对应不同的结构响应机制。沉降模式 I 主要反映桥梁整体下沉，其纵向沉降曲线近似平行移动，通常不引起显著的附加弯曲变

形；沉降模式 II 表现为桥梁整体转角或纵向倾斜，虽然曲率变化较小，但可能影响桥面纵坡、支座受力及行车舒适性；沉降模式 III 表现为连续差异沉降，沉降量沿桥向呈渐变分布，容易引起结构附加弯矩、次内力重分布和桥面线形异常；沉降模式 IV 则表现为局部沉降突变或非均匀变化，通常与支座异常、局部基础沉降、桥台与路基过渡段变形不协调等问题相关，其对结构局部受力和服役性能的影响更为敏感。为了计算上述桥梁沉降模式，本文引入了 3 个量化指标，分别是最大沉降量 $d_{\max}$ 、桥梁纵倾角 η 与桥梁纵向角变形 W_d ，其中最大沉降量 $d_{\max}$ 可直接从桥梁沉降曲线提取，桥梁纵倾角 η 与桥梁纵向角变形 W_d 用下公式计算其中：

$$\eta = \frac{\Delta D_v}{L} = \frac{D_v - D'_v}{L} \quad (2.16)$$

$$W_d = \frac{\Delta D_v}{L_s} = \frac{D_v - D'_v}{L_s} \quad (2.17)$$

式中， L 为桥梁长度， L_s 为桥梁跨度， ΔD_v 为桥梁沿纵向的最大沉降差值。 D_v 与 D'_v 为相同观测时刻桥梁沿纵向的竖向沉降值。

2.5.2 桥梁横向倾斜

水平位移或者对桥梁结构安全的影响十分显著，本文引入局部横倾角指标（图 2.6 所示）。

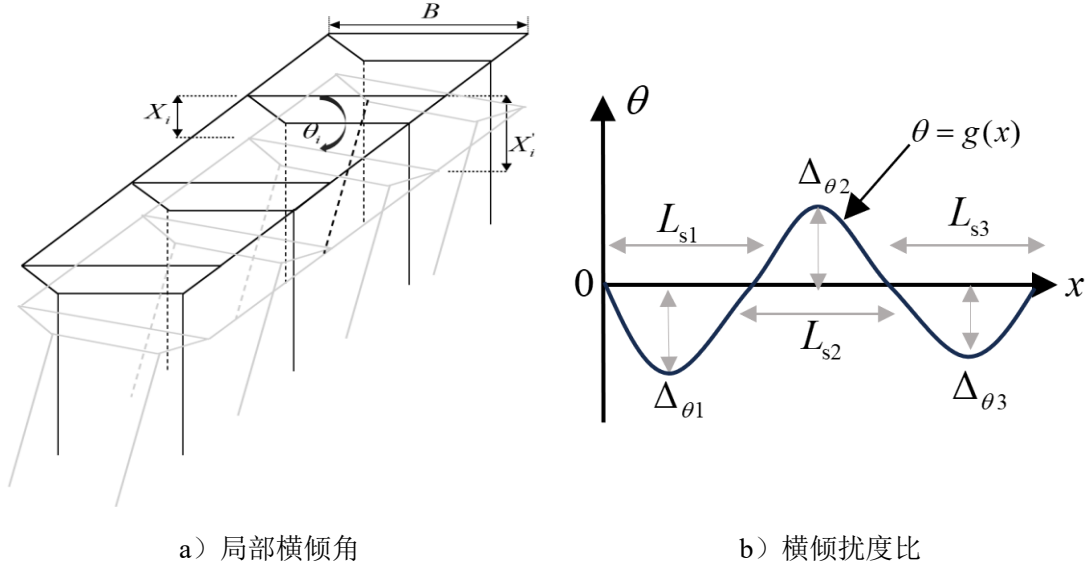


图 2.6 桥梁横向倾斜示意图

局部横倾角可通过式 (2.18) 计算得到。

$$\theta_i = \left| \frac{X_i - X'_i}{B} \right| \quad (2.18)$$

式中， θ_i 为局部横倾角， X_i 与 X'_i 为相同观测时刻桥梁相同横截面处的两侧竖向沉降值， B 为桥梁宽度。

为了计算上述桥梁横向倾斜, 本文引入了 2 个量化指标, 最大横倾角 $|\theta_{\max}|$ 可直接从桥梁横倾曲线提取, 横向角变形 W_i 可用下述公式进行计算:

$$W_i = \frac{\Delta_{\theta}}{L_s} \quad (2.19)$$

式中 Δ_{θ} 为桥梁沿横向的最大横倾角差值, L_s 为桥梁跨度。

同时, 在既有变形指标基础上, 进一步引入近期累积沉降量 S , 沉降速率 V 两项指标, 其中近期沉降用以表征短期变形演化特征; 沉降速率用于刻画变形持续发展的趋势性风险。各指标计算公式如表 2.2 所示。

表 2.2 综合评估指标计算

风险类别	评估指标 I_i	计算公式	规范来源
结构损伤	纵倾角 η	$\eta = \Delta D_V / L$	《城市桥梁养护技术规范》 CJJ 99-2017 ^[99]
	纵向角变形 W_d	$W_d = \Delta D_V / L_s$	Barker ^[98]
	最大横倾角 $ \theta_{\max} $	从桥梁横倾曲线提取	《公路桥梁抗震设计规范》 JTG 2232-2019 ^[100]
	横向角变形 W_i	$W_i = \Delta_{\theta} / L_s$	Barker ^[98]
整体变形	最大沉降量 $d_{\max}$	从桥梁沉降曲线提取	《公路桥梁养护规范》JTG 5120-2021 ^[101]
	累积沉降量 S	近半年各测点沉降增量的累积值	城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233-2015 ^[102]
	沉降速率 V	周期平均沉降速率表征	《公路路基设计规范》JTG D30-2015 ^[103]

2.5.3 桥梁变形综合评价指标

在复杂环境因素及多源荷载的综合影响下, 桥梁结构的变形行为呈现出明显的多类型与多尺度耦合特征。

从桥梁变形对结构安全与运营性能的影响来看, 桥梁变形风险可归纳为两类: 一类为结构安全失效风险, 主要指不均匀沉降、倾斜、扭转等变形引起结构受力状态改变和内力重分布, 导致构件承载能力降低、局部损伤扩展甚至整体安全储备下降; 另一类为运营服役功能退化风险, 主要指桥梁变形超限或持续发展对桥面线形、行车舒适性、支座与伸缩装置协调变形能力以及结构耐久性产生不利影响, 从而削弱桥梁正常运营和长期服役性能。因此, 为全面刻画桥梁变形行为及潜在风险, 本文构建了一套基于层次分析法(AHP)的多指标安全评估体系。本研究通过系统梳

理相关文献及工程规范，如表 1.1 所示，总结提出了如图 2.7、表 2.3 所示的 7 项变形安全评估指标阈值体系。

表 2.3 桥梁评估指标阈值界限

指标名称	单位	安全等级阈值界限			
		I	II	III	IV
最大沉降量 $d_{\max}$	mm	<15	15-30	30-60	>60
累积沉降量 S	mm	<50	50-75	75-100	>100
纵倾角 η	rad	<1/1000	1/1000-1/770	1/770-1/500	>1/500
最大横倾角 $ \theta_{\max} $	rad	<1/1000	1/1000-1/770	1/770-1/500	>1/500
纵向角变形 W_d	rad	<1/1000	1/1000-1/500	1/500-1/250	>1/250
横向角变形 W_i	rad·m ⁻¹	<1/1000	1/1000-1/500	1/500-1/250	>1/250
沉降速率 V	mm·yr ⁻¹	<5	5-10	10-30	>30

本文选用的 7 个桥梁变形评价指标均由桥梁结构范围内时序点的时序形变反演数据提取和计算得到。所选取的桥梁变形指标包括最大沉降量、累积沉降量、纵倾角、最大横倾角、纵向角变形、横向角变形和沉降速率 7 项，均属于桥梁运营期结构变形和空间姿态变化指标。其中，沉降量和沉降速率主要反映桥梁墩台、基础及主梁竖向变形的幅值和发展趋势；纵倾角、横倾角及角变形主要反映桥梁沿纵桥向、横桥向的不均匀变形、支承体系异常、墩台转动及主梁扭转风险。依据指标所依赖的数据特征，可将其划分为变形幅值类指标和变形变化率类指标两类。前者侧重表征桥梁在整个监测期内已经形成的沉降、倾斜及差异变形程度，能够反映墩台、基础、主梁和支承体系在不利工况下的变形响应状态；后者则关注形变随时间推进的变化速度，用于判断桥梁变形过程是否趋于收敛，或是否存在持续发展和进一步恶化的可能。由此，幅值指标与速率指标分别从“当前变形状态”和“后续发展趋势”两个角度揭示桥梁结构的变形风险。进一步结合各指标对应的工程含义、受力机制及桥梁结构变形特征，可将上述 7 项指标归纳为以下 3 个类别。

(1) 竖向沉降变形指标：包括最大沉降量、累积沉降量和沉降速率。最大沉降量是指桥梁在监测周期内单个监测点产生的最大竖向位移值，主要用于表征桥墩、桥台、基础或主梁关键部位的最大沉降幅值；累积沉降量是指自初始监测基准期以来各关键测点沉降值的累计变化量，主要用于描述桥梁长期竖向变形的累积效应；沉降速率则反映单位时间内沉降发展的快慢，是判断桥梁变形是否趋于稳定的重要指标。《公路桥涵养护规范》（JTG 5120-2021）^[101]要求通过初始检查、日常巡查、经常检查、定期检查和特殊检查掌握桥涵技术状况，并将桥梁检查结果作为养护决策依据；《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG/T H21-2011）^[104]采用分层综合评定与单项控制指标相结合的方法，对桥梁构件、部件、上部结构、下部结

构及全桥技术状况进行评定。因此, 本文将最大沉降量 15 mm 作为I级安全等级上限, 15-30 mm 作为II级阈值区间, 30-60 mm 作为III级阈值区间, 超过 60 mm 时判定为IV级; 将累积沉降量 50 mm 作为I级安全等级上限, 50-75 mm 作为II级区间, 75-100 mm 作为III级区间, 超过 100 mm 时判定为IV级。对于沉降速率, 参考桥梁养护检查中对长期变形发展趋势和结构稳定性的关注, 本文以 5mm/y 作为I级上限, 5-10 mm/y 作为II级区间, 10-30 mm/y 作为III级区间, 超过 30 mm/y 时表明沉降发展较快, 桥梁基础、墩台或支承体系可能存在明显不稳定状态, 判定为IV级风险。

(2) 空间姿态变形指标: 包括纵倾角和最大横倾角。纵倾角用于描述桥梁沿纵桥向由于墩台不均匀沉降、桥头基础变形或连续梁线形变化引起的整体倾斜状态; 最大横倾角用于描述桥梁横桥向两侧支承、桥面或梁体之间的相对高差所引起的横向倾斜程度。该类指标能够识别独柱墩桥梁横向偏转、宽桥横向扭转、斜弯桥空间变形、支座脱空及横向不均匀沉降等问题。《大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准》(T/CECS 529—2018)^[105]与《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)^[106]均对梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等不同桥型均提出了主梁挠度、水平位移、梁端纵向位移、索塔变形、索力及结构动力响应等监测要求; 其中, 对于大跨桥梁和复杂桥型, 主梁横向位移、纵向位移和扭转变形均属于重要监测内容。据此, 本文将纵倾角与最大横倾角的I级上限均设定为 1/1000, 1/1000-1/770 为II级区间, 1/770-1/500 为III级区间, 超过 1/500 时判定为IV级。该阈值设置主要用于从整体姿态角度识别桥梁受力体系变化, 当倾角指标持续增大时, 说明桥梁可能存在基础差异沉降、墩台转动、支座约束异常或主梁扭转等问题。

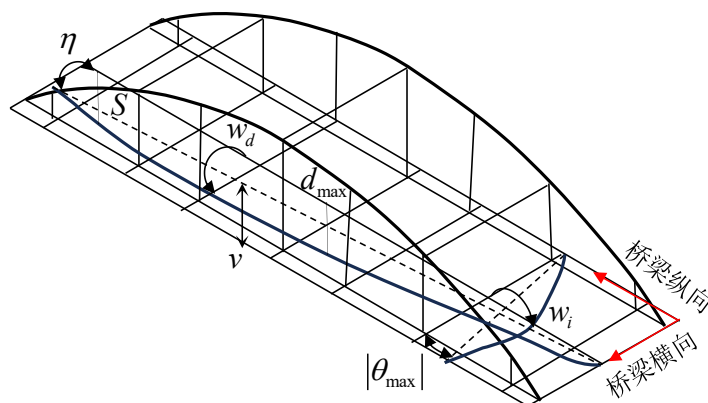


图 2.7 桥梁变形指标定义

(3) 差异沉降与角变形指标: 包括纵向角变形和横向角变形。角变形通常由相邻监测点的差异沉降量与测点间距归一化计算得到, 能够比单点沉降量更敏感地反映桥梁局部不均匀变形。纵向角变形主要用于识别桥台-桥墩、相邻墩台、相邻跨或连续梁支承点之间的纵向差异沉降, 对判断桥头跳车、纵坡突变、梁体线形异常、伸缩缝受力异常等具有重要意义; 横向角变形主要用于识别横桥向支座不均匀沉降、独柱墩横向偏转、宽幅桥梁横向扭转和局部支承脱空等问题。《工程测量

标准》(GB 50026-2020)^[107]和《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982-2014)^[108]均将沉降、位移、倾斜、挠度等作为变形测量的重要内容,《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897-2006)则为沉降监测中的高精度水准测量提供了国家标准依据。本文将纵向角变形和横向角变形的I级上限均设定为 1/1000, 1/1000-1/500 作为II级区间, 1/500-1/250 作为III级区间, 超过 1/250 时判定为IV级。该类指标重点用于识别桥梁沿纵、横两个方向的差异沉降和空间扭转变形, 当角变形达到III级及以上时, 应结合现场巡检、支座检查、墩台复测和主梁线形复测进行研判。

本研究采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重。判断矩阵的构造基于以下信息来源, 系统梳理了《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99-2017)^[99]、《公路桥梁养护规范》(JTG 5120-2021)^[101]及相关研究文献(如 Barker^[98]), 提取各指标在桥梁安全评估中的重要性排序。

确定各项指标的最终权重如表 2.4 所示, 各评价指标的相对重要性采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP) 1-9 标度进行两两比较确定。在该标度体系中, 1 表示两指标同等重要, 3、5、7、9 依次表示前者相对于后者的重要性分别为略微重要、明显重要、强烈重要和极端重要, 而 2、4、6、8 则用于表示相邻判断等级之间的过渡取值。

表 2.4 风险评估指标占比

评估 指标	W_d	W_i	$d_{\max}$	η	$ \theta_{\max} $	V	S	权重 W_i
W_d	1	1/2	1/6	2	3	1/4	1/4	0.06877
W_i	2	1	1/5	2	4	1/3	1/3	0.09610
$d_{\max}$	6	5	1	5	4	2	2	0.33303
η	1/2	1/2	1/5	1	2	1/2	1/5	0.04231
$ \theta_{\max} $	1/3	1/4	1/4	1/2	1	1/3	1/4	0.05647
V	4	3	1/2	2	3	1	1/2	0.16831
S	4	3	1/2	5	4	2	1	0.23501
一致性检验				0.05635 < 0.1				

需要说明的是, 最大沉降量 $d_{\max}$ 在综合评价中权重相对较高, 其原因在于该指标能够直接反映桥梁基础变形及整体受力状态, 是影响结构安全的关键控制因素之一。然而, 不同地质条件下(如软土地基与岩石地基), 桥梁沉降响应及其安全阈值存在显著差异, 单一固定权重难以完全适用于多场景工程需求。

为此, 本文进一步开展了权重敏感性分析。在保持其他指标权重不变的条件下, 对最大沉降权重 $w_{d_{\max}}$ 在一定范围内进行扰动(0.25–0.40), 并对综合安全评价结果进行对比分析。

$$W'_{d\max} = \partial \bullet w_{d\max} \quad (2.20)$$

式中, ∂ 为地质条件修正系数。当桥梁位于软土地基时, 取 $\partial=1.1\sim1.2$; 当位于岩石地基时, 取 $\partial=0.8\sim0.9$

综合评估前, 采用图 2.8 所示对各指标进行无量纲标准化处理, 以消除量纲和尺度差异。

多座桥梁的相对综合安全值按式 (2.21) 计算。式中, V_j 代表安全程度, I_i 代表评估指标, P_i 代表指标占比, n 为指标数量, 下标 i 和 j 分别为指标编号和桥梁编号。

$$V_j = \sum_i^n P_i \times I_i \quad (2.21)$$

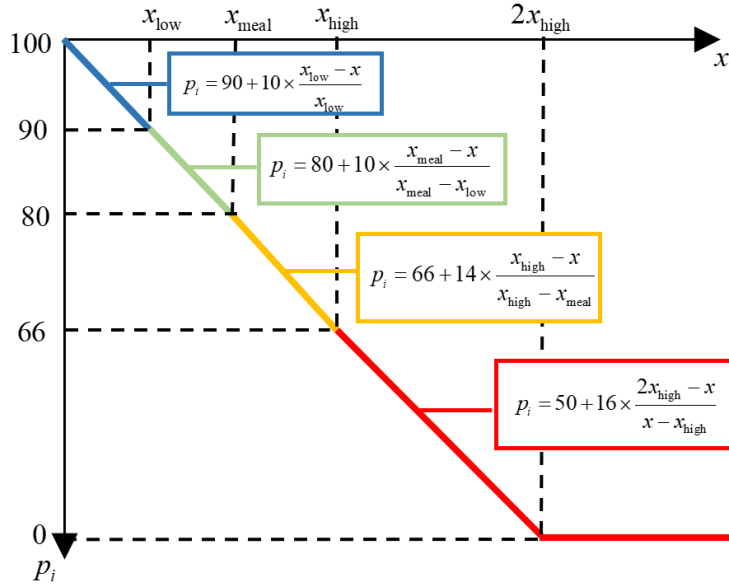


图 2.8 标准化安全指数定义

本文引入 AHP 方法, 以桥梁综合安全水平为总体目标, 将基于 DSI 提取的 7 项关键变形指标作为评估准则, 并以待评估桥梁作为评价对象, 构建桥梁综合安全评估的层次结构模型。综合参考《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99-2017) 和《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21-2011) 中桥梁技术状况评分等级的划分方式, 本文构建了基于星载 InSAR 技术的桥梁综合安全评估等级, 如表 2.5 所示。需要说明的是, 本文评分等级并非对现行规范技术状况等级的直接等同, 而是在规范评分体系基础上, 结合 InSAR 变形监测反映“结构变形异常与发展趋势”的特点, 对桥梁安全状态进行相对分级。其中, 90 分以上对应桥梁变形特征不明显、结构状态接近完好或基本稳定; 80~90 分对应局部存在轻微变形响应, 但整体服役状态仍较好; 60~80 分对应变形响应较为明显, 结构可能存在一定劣化或局部异常, 应开展重点关注与复核; 60 分以下则表明桥梁变形风险较高, 可能已进入

明显异常不安全状态，应结合现场检测、结构验算和养护资料进行进一步评估。

表 2.5 桥梁技术状况评定等级

	>90	80-90	60-80	<60
V_j	I类桥	II类桥	III类桥	IV类桥
桥梁状态	变形不明显 结构状态稳定	存在轻微变形响 应，整体服役状 态良好	变形响应较明显 需要重点关注	变形异常明显 存在较高风险
规范对应关系	对应（CJJ 99- 2017）中 A 级 完好状态	对应（CJJ 99- 2017）中 B 级 良好状态	对应（CJJ 99- 2017）中 C 级 状态	对应（CJJ 99- 2017）中 D 级 状态

2.6 本章小结

本章围绕时序 InSAR 城市桥梁群变形识别理论，立足于城市交通基础设施运维中“大范围普查效率低、微小变形识别难、长时序动态跟踪能力弱”的现实瓶颈，以星载合成孔径雷达干涉测量技术为核心，系统构建了基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群变形监测与风险识别理论体系，融合高分辨率光学遥感先验几何约束、DS-InSAR 精细化形变反演以及多层级桥梁安全评估指标体系，为后续桥梁群安全评估应用研究提供了理论基础。主要结论如下：

（1）构建了基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群变形监测与风险识别总体框架。该框架以光学卫星遥感桥梁结构信息提取为基础，以 DS-InSAR 时序形变解算为核心，融合桥梁变形分析、劣化初步评估、有限元校验及综合安全评估等关键环节，形成了面向城市桥梁群的全过程技术路线，为桥梁群大范围、低成本、长时序监测提供了理论支撑。

（2）系统阐明了星载 InSAR 与 DS-InSAR 桥梁变形监测的基本原理及关键方法。重点分析了 InSAR 干涉测量的成像几何关系与相位组成机理，论述了 DSI 技术在同质像元识别、相位优化、PS/DS 点选取及热膨胀参数建模等方面的核心流程，并明确了桥梁群视线向变形提取与变形分解的理论基础，为复杂城市环境下桥梁微小变形的精细化识别提供了方法依据。

（3）建立了面向桥梁群安全评估的变形模式与综合评价指标体系。针对桥梁纵向沉降与横向倾斜两类典型变形行为，归纳了桥梁纵向沉降模式和横向倾斜模式，提出了最大沉降量、纵倾角、纵向角变形、最大横倾角、横向角变形、近期累积沉降量及沉降速率等关键评估指标，并构建了基于层次分析法的桥梁综合安全评价方法，为后续桥梁群安全等级评定提供了理论依据。

第 3 章 基于 DSI 的长沙市中小桥梁群状态评估

3.1 引言

城市中小桥梁作为城市交通基础设施的重要组成部分，具有数量多、分布广、结构形式相对复杂及服役周期长等典型特征。在长期运营过程中，受交通荷载、温度循环、环境侵蚀等因素共同影响，桥梁结构可能出现刚度退化、局部损伤累积和不均匀沉降等问题，进而对结构安全和正常服役性能产生不利影响。近年来，星载 InSAR 技术的发展为城市尺度基础设施形变监测提供了大范围、周期性和高精度的观测手段，为桥梁群变形识别与长期状态跟踪提供了新的技术途径。然而，现有研究多聚焦于典型单体桥梁或大跨桥梁的变形监测与机理分析，对城市中小桥梁群的批量识别、时序变形提取和多层次安全状态评估仍有待进一步完善。前文已详细阐述了 DSI 变形监测技术原理以及城市桥梁群变形识别与安全评估的理论基础。为充分挖掘 DSI 技术在桥梁安全评估中的应用潜力，本文以长沙市主要桥梁群为例，基于光学遥感获取桥梁基础结构信息，结合 InSAR 反演的时序位移特征，识别桥梁变形响应及其服役状态，并构建综合评价模型，实现桥梁群由宏观变形表征向结构安全风险的定量评估。

3.2 研究区域与数据处理

3.2.1 长沙市桥梁群概况

长沙市位于湖南省东北部，是湖南省的经济和文化中心，且长沙市境内地表水系发达，形成了以湘江长沙段和浏阳河、捞刀河、雷锋河与靳江河为主体的“一江四河”水系格局。长沙市气候为亚热带季风气候，降水充沛，导致强降雨频发，降雨入渗造成地下水径流和水位变化，影响桥梁地基稳定性，另外城市交通荷载众多，部分城市桥梁服役年限已超过 20 年。目前，长沙市桥梁安全管理仍以定期人工检查为主，检测手段在时效性、覆盖范围及定量化程度方面存在一定局限，因此，利用 InSAR 技术开展城市尺度桥梁群变形风险普查与早期预警具有重要必要性。

本研究以长沙市城市河网区域为研究区，研究区内桥梁群共包含 48 座桥梁，依据其空间分布特征，将其划分为 4 个桥梁群单元：沿捞刀河分布桥梁 11 座，沿浏阳河分布桥梁 16 座，沿雷锋河分布桥梁 15 座，沿靳江河分布桥梁 6 座，分别对各桥梁进行编号（见表 3.1）。编号命名规则以 B1-LDH-CBB3 为例，表示为捞刀河上编号为 1 的 3 跨连续梁桥，桥梁的编号由 3 部分组成，其中，编号第一部分表示桥梁编号，分别为 B1-B48，其中编号的第二部分表示桥梁名，LDH 表示捞刀河，LYH 表示浏阳河，LFH 表示为雷锋河，JJH 表示为靳江河，其中编号的第三

部分表示桥梁的结构形式，Simply Supported Bridge（SSB）表示为简支梁桥，Continuous Beam Bridge（CBB）表示为连续梁桥，Steel Arch Bridge（SAB）表示为钢拱桥，Cable-Stayed Bridge（CSB）表示为斜拉桥，后面数字表示桥梁的跨数。

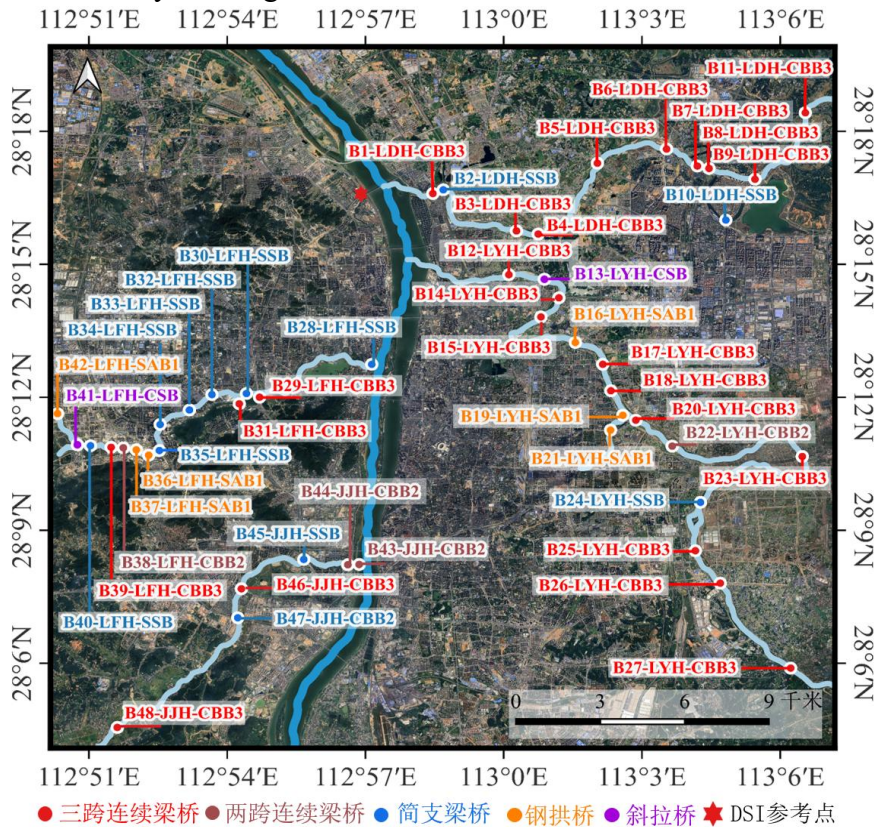


图 3.1 长沙市主要研究桥梁分布

基于研究内容 2.3，本文综合利用自然资源部国家地理信息公共服务平台“天地图”提供的米级分辨率光学卫星影像，提取的桥梁基础信息（见表 3.1），对长沙市主要桥梁的结构类型进行了系统识别与分类，长沙市内大跨度桥梁在研究区内占据主导地位。图 3.1 展示了长沙市 48 座典型研究桥梁在长沙市内的空间分布位置。

表 3.1 长沙市桥梁尺寸识别

桥梁	长度 (m)	宽度 (m)	桥梁	长度 (m)	宽度 (m)
B1-LDH-CBB3	201.56	45.23	B25-LYH-CBB3	220.08	36.38
B2-LDH-SSB	101.20	10.82	B26-LYH-CBB3	340.38	58.60
B3-LDH-CBB3	250.84	25.83	B27-LYH-CBB3	199.02	28.39
B4-LDH-CBB3	190.61	30.27	B28-LFH-SSB	100.38	37.65
B5-LDH-CBB3	186.19	38.62	B29-LFH-CBB3	329.12	48.04
B6-LDH-CBB3	260.55	32.82	B30-LFH-SSB	89.70	19.23
B7-LDH-CBB3	153.43	28.05	B31-LFH-CBB3	402.58	28.21

续表 3.1 长沙市桥梁尺寸识别

B8-LDH-CBB3	209.90	27.72	B32-LFH-SSB	84.47	48.22
B9-LDH-CBB3	212.38	42.35	B33-LFH-SSB	70.01	52.98
B10-LDH-SSB	132.54	21.58	B34-LFH-SSB	74.79	39.51
B11-LDH-CBB3	171.06	30.97	B35-LFH-SSB	65.74	13.80
B12-LDH-CBB3	250.56	24.63	B36-LFH-SAB1	121.27	44.67
B13-LYH-CSB	225.38	32.94	B37-LFH-SAB1	113.54	31.58
B14-LYH-CBB3	235.93	40.84	B38-LFH-CBB2	84.46	23.61
B15-LYH-CBB3	317.10	26.50	B39-LFH-CBB3	151.58	40.71
B16-LYH-SAB1	138.35	39.45	B40-LFH-SSB	118.61	38.48
B17-LYH-CBB3	204.03	27.35	B41-LFH-CSB	153.73	45.12
B18-LYH-CBB3	200.00	20.89	B42-LFH-GAB1	130.83	45.73
B19-LYH-SAB1	80.00	30.61	B43-JJH-CBB2	150.21	32.03
B20-LYH-CBB3	281.00	29.00	B44-JJH-CBB2	176.70	11.54
B21-LYH-GAB1	77.92	31.37	B45-JJH-SSB	96.28	49.81
B22-LYH-CBB2	197.03	29.55	B46-JJH-CBB3	208.75	32.85
B23-LYH-CBB3	219.08	25.65	B47-JJH-CBB2	155.67	25.34
B24-LYH-SSB	117.16	33.84	B48-JJH-CBB3	181.61	25.27

3.2.2 SAR 数据集

本研究共采用 22 景 COSMO-SkyMed (CSK) 条带成像 (StripMap) 模式的升轨 SAR 数据，影像极化方式为 HH，波长 3.1 cm，卫星入射角为 23.9°，卫星航向角度为 168.76°，空间分辨率为 3 m×3 m，数据获取时间覆盖 2022 年 9 月至 2024 年 8 月。

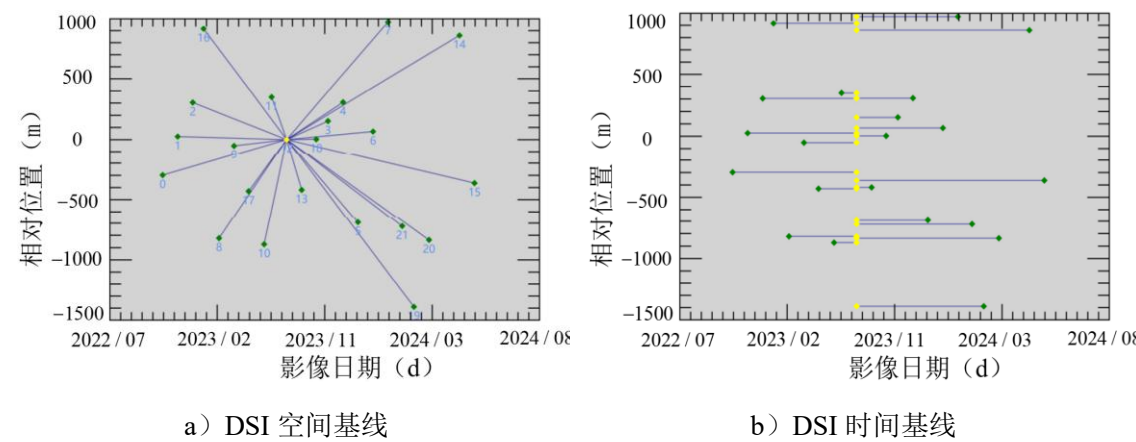


图 3.2 DSI 时空基线

影像的时间基线与空间基线如图 3.2 所示，根据时空基线最小原则，以 2023 年 7 月 12 日获取的影像作为主影像，其余影像作为从影像构建干涉对。考虑到

CSK 卫星影像的成像时刻以 UTC 时间记录为 22:07，且目标桥梁群位于东八区（UTC+8），经时区换算后，该时刻对应的本地时间约为次日清晨 6:07。

3.2.3 SAR 影像处理

长沙市桥梁群分布于地形起伏显著的复杂区域（如图 3.3 所示）。其中，湘江两岸为低平冲积平原，而城市东西两侧及东南部则分布着海拔较高的低山丘陵，整体高程介于 -16 m 至 1596 m 之间。同时，为消除高程差异对桥址温度的影响，采用 USGS Earth Explorer 平台提供的 30 m 分辨率 DEM 数据进行高程校正，以消除高程相位对解算结果的影响。

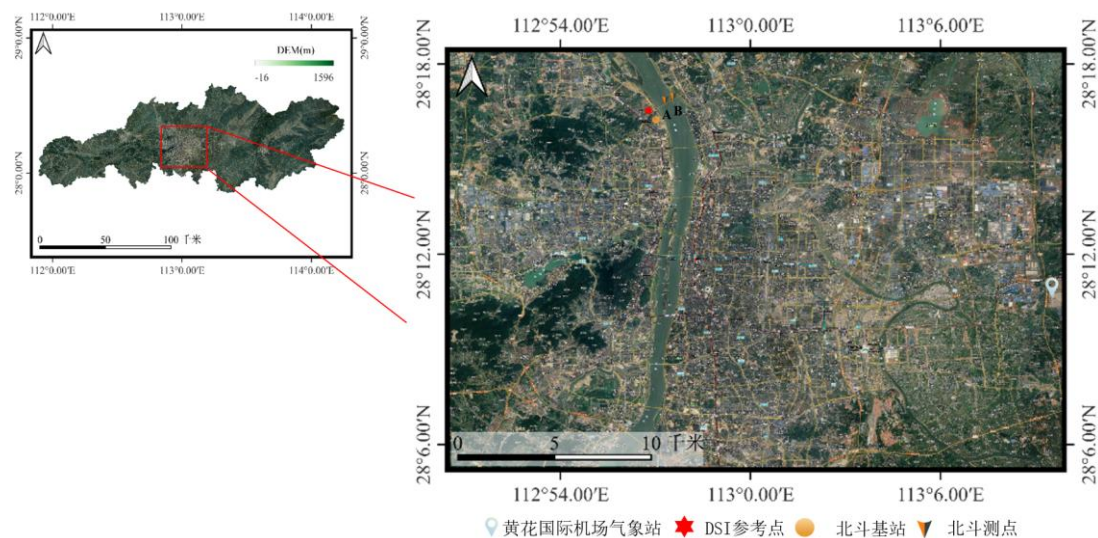


图 3.3 长沙市地形图

本研究依据前文 DSI 计算流程图，采用分层阈值策略对散射点进行筛选与优化，以兼顾点位质量与空间覆盖密度：（1）以振幅离差指数（ADI） ≤ 0.4 和平均相干系数（ACC） ≥ 0.3 作为永久散射体（PS）点的初选条件，在有效抑制低稳定性散射点的基础上获取高可靠性参考点集；（2）在完成大气相位屏（APS）修正后，将相干系数阈值提高至 0.6，以实现 PS 点的密度加密和质量提升，从而构建第一层构网；（3）针对分布式散射体（DS）点的识别，本文进一步引入点目标分析质量参数 GammaPTA 进行筛选。GammaPTA 可理解为点目标分析过程中用于衡量候选散射点相位稳定性和模型拟合可靠性的综合质量指标，其取值通常介于 0~1 之间，数值越大表示散射点的相位稳定性和反演可靠性越高。本文参考相关 DS-InSAR 处理经验及文献^[109]，将 GammaPTA ≥ 0.5 作为 DS 候选点筛选阈值，用于保留具有一定相位稳定性的分布式散射点，并构建求解的第二层加密点网。

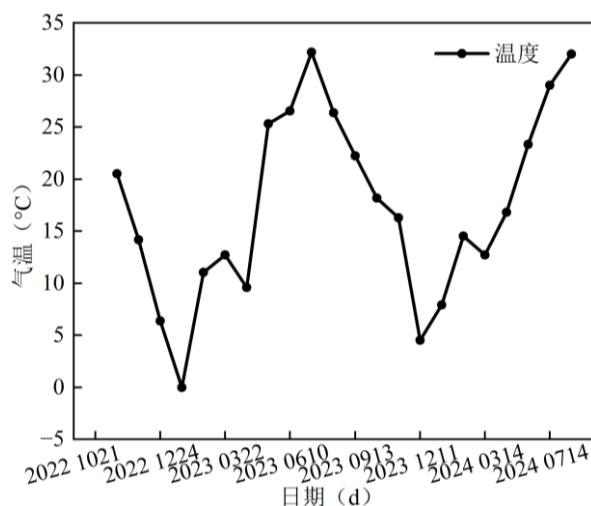


图 3.4 长沙市气温数据

本研究中影像子集的变形求解参考点如图 3.3 所示，利用所提 DSI 技术处理 22 景 CSK 影像，热膨胀相位估计采用 SAR 成像时刻的桥址区域气温（如图 3.4 所示）。

3.3 长沙市桥梁群变形分析

3.3.1 长沙市广域变形结果

图 3.5 展示了基于 CSK 高分辨率 SAR 数据反演得到的长沙市在 2022 年 10 月至 2024 年 8 月期间的地表形变速率分布结果。

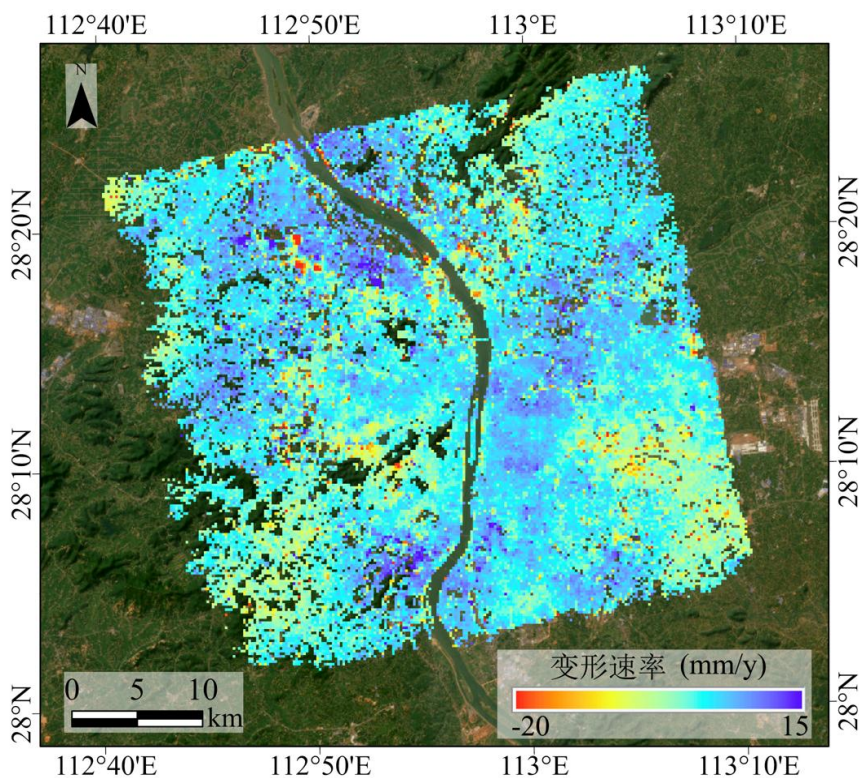
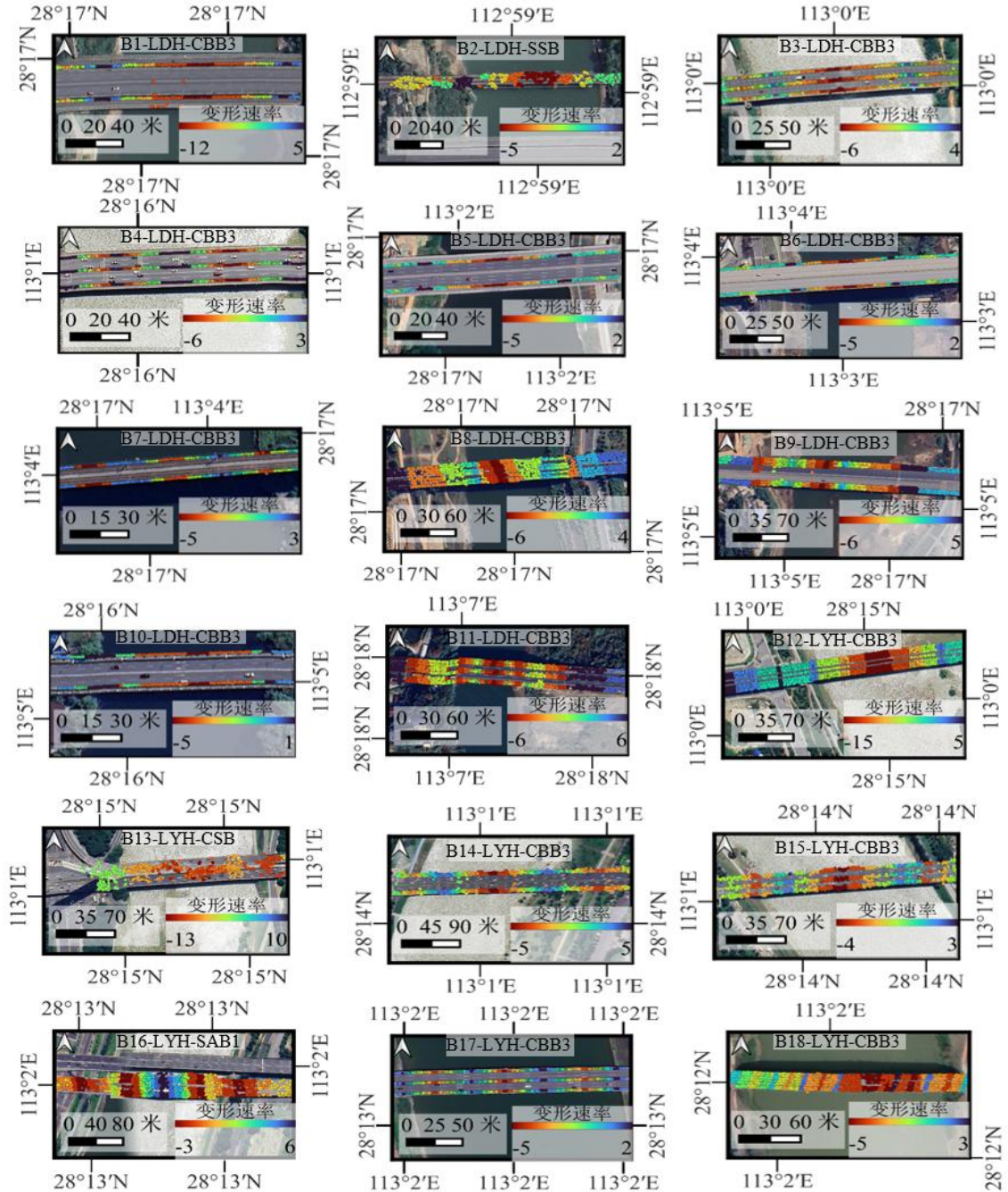
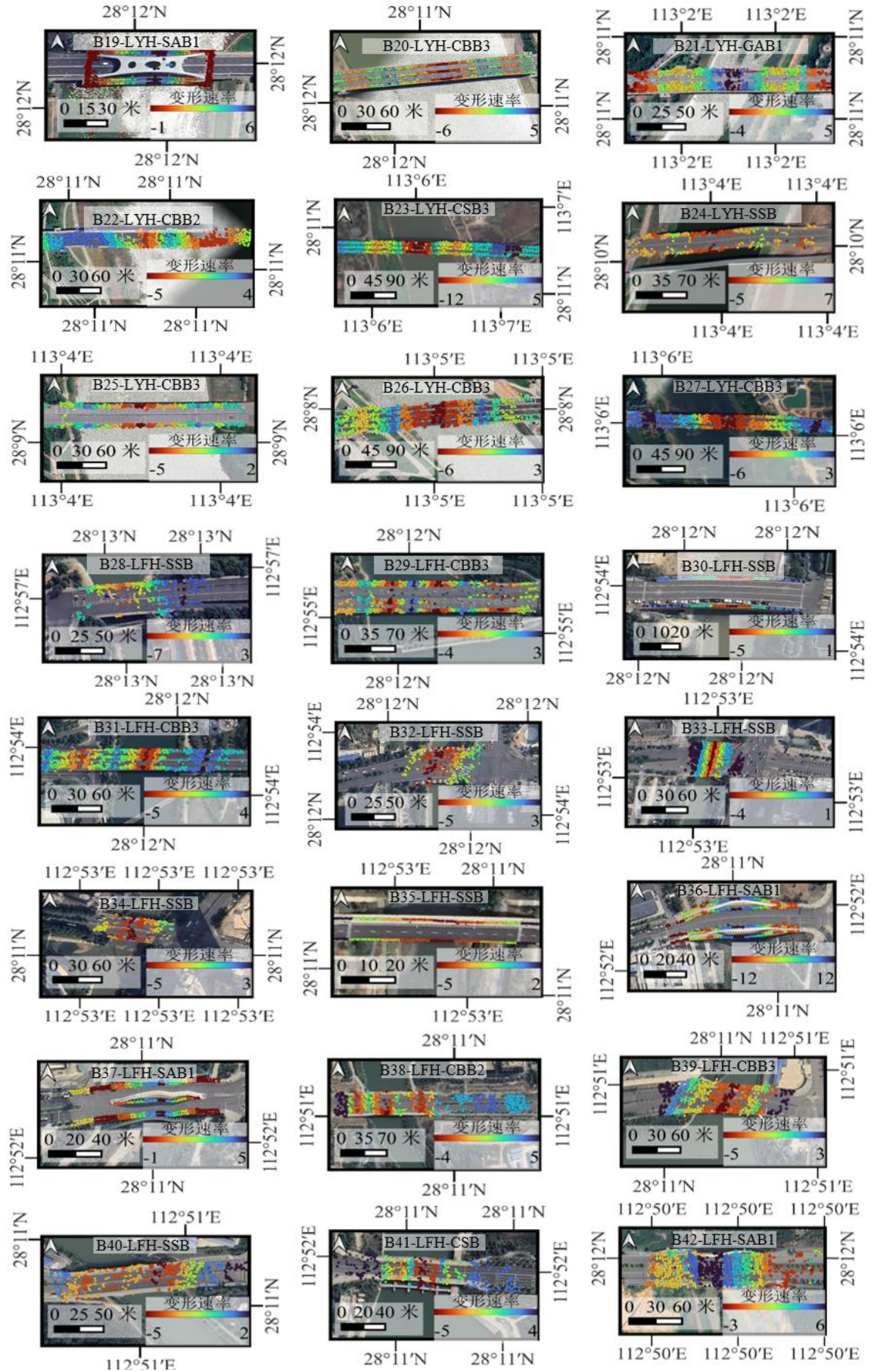


图 3.5 长沙市广域变形场

其中,不同颜色用于区分视线方向(LOS)上的位移趋势,红色表示远离卫星方向的运动,蓝色表示向卫星方向的运动。图中每一个着色像元均对应识别得到的散射体点。从整体空间分布来看,各时段提取的散射点点密度较高,能够较为完整地刻画研究区域的宏观形变格局。进一步分析可知,散射点主要集中分布于建筑物、桥梁结构、道路及河堤等稳定散射区域,其空间分布形态与光学遥感影像所反映的地表结构特征具有较好一致性,从侧面验证了散射点定位结果的可靠性与精度。





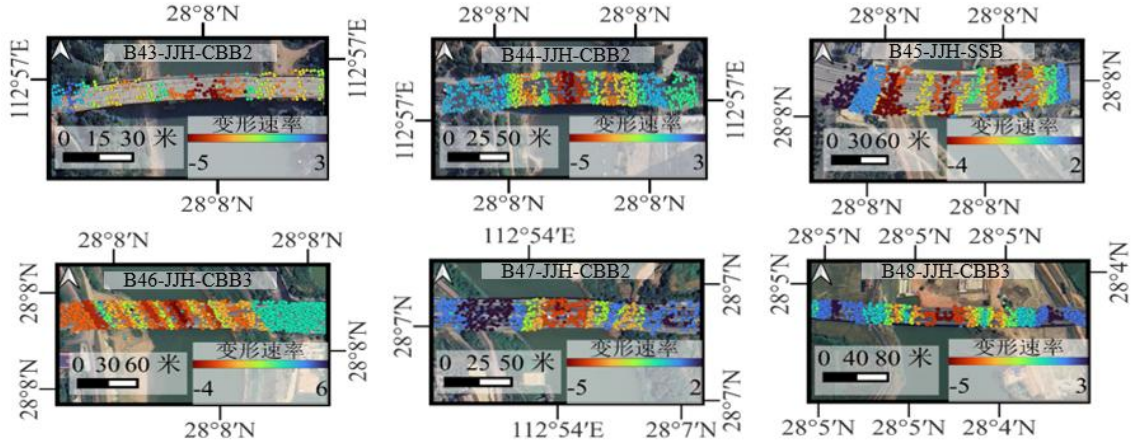


图 3.6 长沙市桥梁群的变形速度 (mm/y)

既有研究表明,长沙市主城区地表形变主要受软土压缩固结及城市工程活动诱发的竖向沉降主导^[110]。因此可将 LOS 向变形按式 (2.12) 分解至竖直方向。研究区竖向变形速率分布如图 3.5 所示,其中以远离卫星方向的沉降变形为负值、以靠近卫星方向的抬升变形为正值;结果表明,研究区域最大沉降速率为-19.6 mm/y,最大抬升速率为 12.2 mm/y,最大沉降量为 40.4 mm,最大抬升量为 29.9 mm。

从图 3.5 所示的长沙市变形结果中提取本研究范围内的 48 座桥梁变形,48 座桥梁的变形速率图(如图 3.6 所示)。其中,红色时序点和蓝色时序点分别代表远离和靠近卫星的 LOS 向变形,选取典型桥梁进行变形详细分析。

3.3.2 典型桥梁变形分析

基于 DSI 技术获取的长沙市桥梁群高精度形变监测结果,选取了 3 座代表性桥梁(B20-LYH-CBB3, B16-LYH-SAB1, B41-LFH-CSB)进行详细分析。

(1) B20-LYH-CBB3 (浏阳河上编号为 B20 的 3 跨连续梁桥): 基于 DSI 技术获取的高精度形变监测结果,图 3.7 a) 呈现了连续梁桥沿雷达视线(Line-of-Sight, LOS)方向的形变速率,即桥梁 B20,沿桥梁纵向(以 A 点为起点指向 B 点)的 LOS 向变形时间序列,通过连续梁桥变形特征的对比分析可以发现不同结构部位的形变响应与气温变化具有显著相关性,并呈现一致且规律性的空间分布特征。跨中区域 LOS 向变形与气温呈负相关,而支座及其附近区域则表现为正相关,反映了温度作用下支承约束引起的差异性热变形。其最大沉降速率均出现在跨中位置,沿桥向向支座逐渐减小,体现了连续梁结构典型的温度弯曲变形特征。此外,伸缩缝处形变速率较大,表明其对温度荷载更为敏感,易产生局部显著变形。

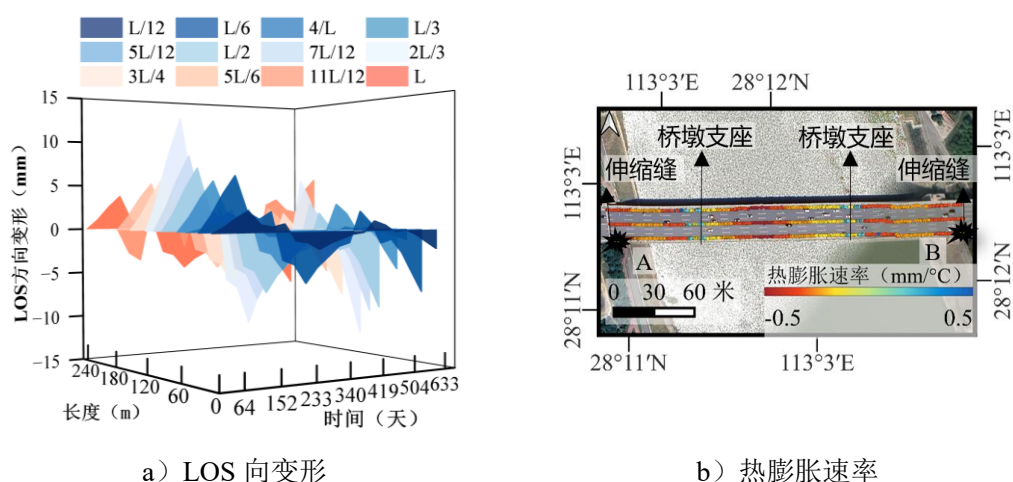


图 3.7 B20 变形分析

B20 的热膨胀速率如图 3.7 b) 所示。结合高分辨率光学遥感影像，可有效识别桥梁伸缩缝位置。主桥的热膨胀速率均呈现从桥梁跨中向支座处逐渐减少再向伸缩缝逐渐增大的趋势，这表明在单位温度变化下，离固定支座越远的位移越明显。

(2) B16-LYH-SAB1 桥(浏阳河上编号为 B16 的钢拱桥)：如图 3.8 a) 所示，B16 拱桥沿桥梁纵向的视线向(LOS)变形结果表明，不同空间位置处的变形与空气温度变化均表现出显著的负相关关系，其中跨中区域对温度变化的响应最为敏感。这一现象表明，在温度作用主导下，钢拱桥沿纵向呈现出较为稳定且具有代表性的热变形响应模式。

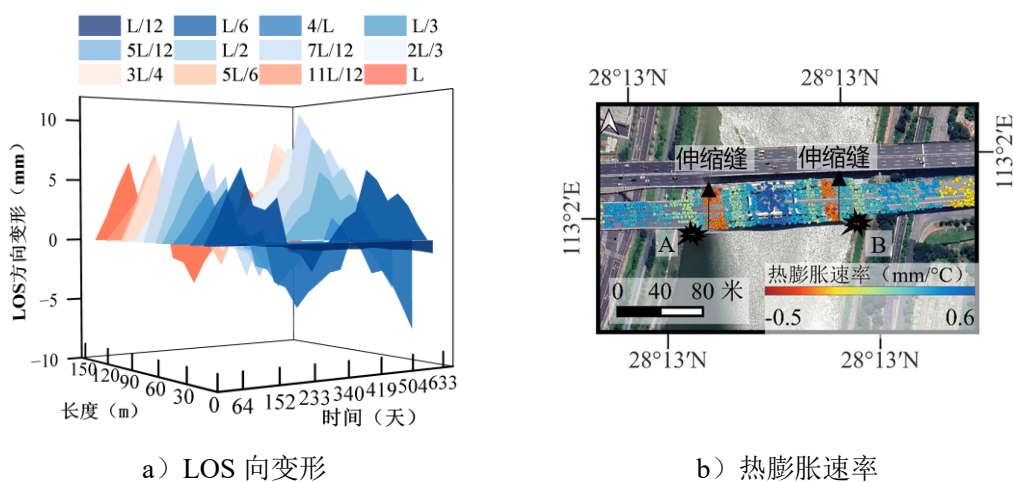


图 3.8 B16 变形分析

B16 的热膨胀速率分布如图 3.8 b) 所示，结果显示温度变形在桥梁中跨附近呈现近似对称分布特征，其中跨中位置的热膨胀速率达到约 $0.6\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ ，明显高于两侧拱脚及支座附近区域。在温度升高条件下，由于钢箱拱肋材料热膨胀效应的影响，拱桥结构整体产生向上的变形响应，表现为桥面在跨中区域产生向上的位移趋势。这一变形特征与拱桥在温度荷载作用下的受力与变形机理高度一致。进一步对不同桥梁的变形结果进行对比分析可知，不同桥型(拱桥与连续梁桥)在变形速率及空间分布特征上存在明显差异，这种差异主要源于桥梁结构体系形式、支座约束

条件以及材料热力学特性的不同，反映了不同桥型对温度荷载响应机制的本质差别。

(3) B41-LFH-CSB 桥（雷锋河上编号为 B41 的斜拉桥）：如图 3.9 a) 所示，A 点至 B 点方向 B41 桥的 LOS 变形时间序列对气温变化的响应特征存在显著差异。B41 各位置处的 LOS 变形整体与气温呈正相关关系，反映出结构体系对温度荷载的响应机制不同。图 3.9 b) 给出了 B41 桥的热膨胀速率分布，B41 为 $-0.5 \sim 0.4 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 。受深桩基础与桥塔约束影响，桥塔区域热膨胀速率较低，对气温变化的敏感性较弱；相比之下，跨中及伸缩缝区域热响应显著增强。B41 跨中位移与气温呈负相关，而两侧伸缩缝表现出方向相反的热响应特征，主要由主缆热伸长及支座竖向约束共同作用所致；由于主缆和桥塔的热膨胀，悬索桥的桥面在温度升高时易发生向下变形。

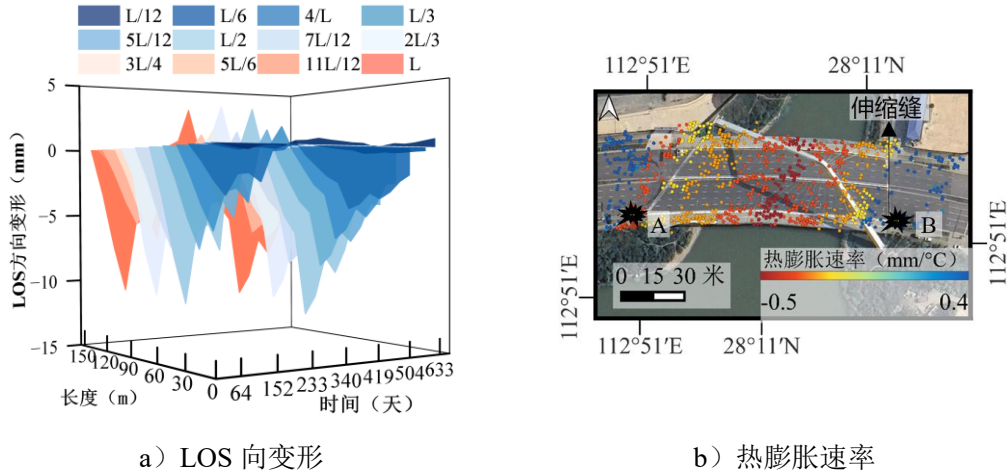


图 3.9 B41 变形分析

3.3.3 DSI 变形测量精度验证

为验证 DS-InSAR 技术在桥梁变形监测中的精度与可靠性，本文引入 GNSS 监测数据作为对比基准。GNSS 通过接收多颗卫星信号，计算地面接收机与卫星之间的距离，从而获取监测点的空间坐标，其在变形与振动监测中的性能已被证实与 GPS 具有相当精度^[51]。因此，在三汉矶大桥 A 点和 B 点布设 GNSS 监测站，对 DS-InSAR 反演结果进行对比验证。如图 3.10 a) 所示，基于 DS-InSAR 技术获取的桥梁变形结果中，PS 点空间分布与桥梁结构高度吻合，最大 LOS 向变形主要集中于伸缩缝区域，反映出桥梁对温度变化的典型响应特征；同时，变形速率相对于桥梁中心呈现明显的对称分布特征。进一步地，提取关键点 A 与 B 的 LOS 向时序位移，如图 3.10 b)，用于与 GNSS 观测结果进行定量对比分析。

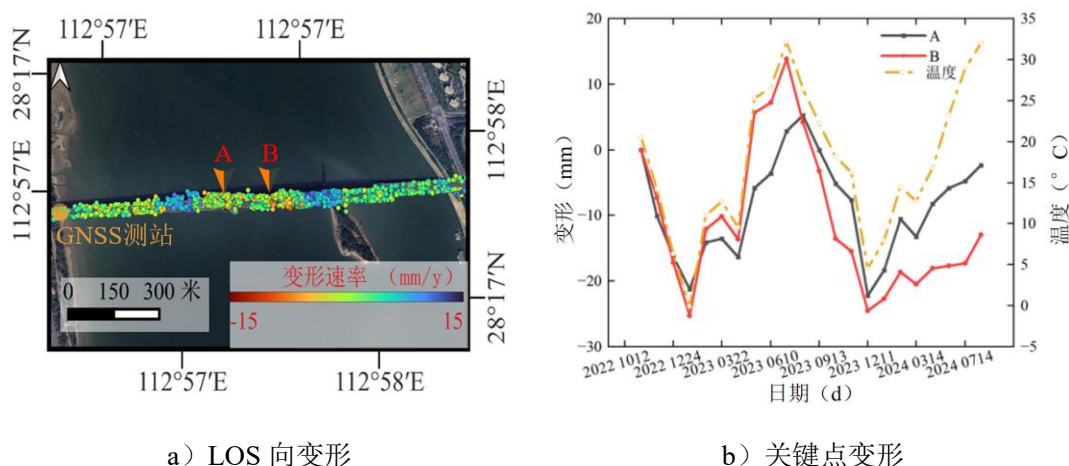
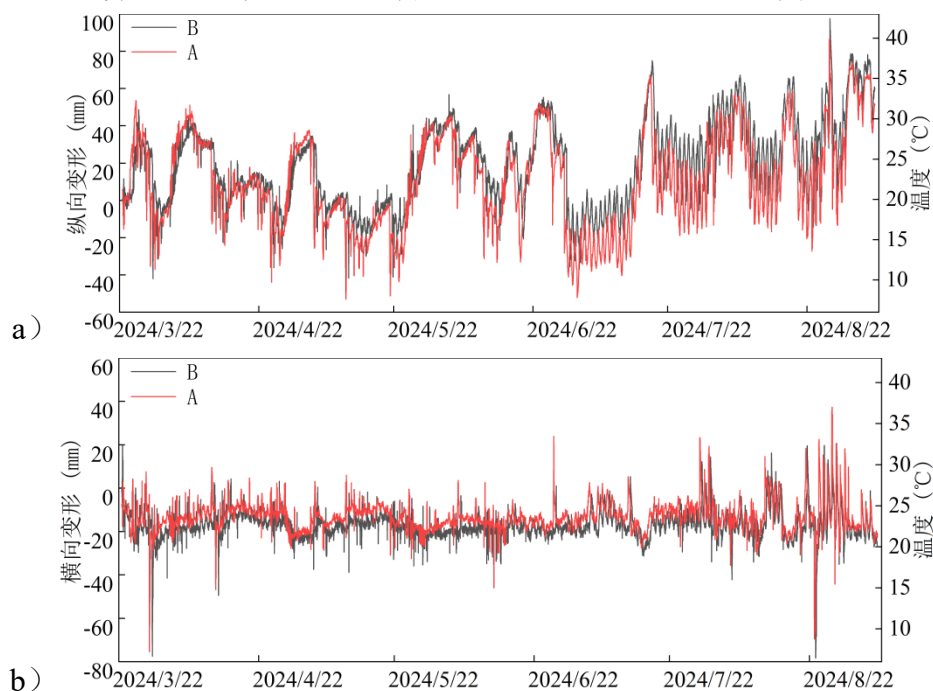


图 3.10 基于 DSI 技术获得的三汊矶大桥变形结果

GNSS 以 30 分钟的采样间隔, 于 2024 年 3 月 22 日至 2024 年 9 月 6 日期间, 分别获取了两个测点在竖向、南北和东西方向上的位移 (图 3.11)。GNSS 测得的桥梁的 LOS 向位移可以通过公式 (2.11) 获得。如图 3.11 所示, A 点和 B 点位置如图 3.10 a) 所示, 其最大纵向位移分别为 86.86 mm 和 97.62 mm, 最大垂直位移分别为 51.73 mm 和 97.67 mm。这一变形模式与三汊矶大桥中的 DSI 计算结果一致, 显示出从中跨向东西桥塔的变形呈减小趋势。相比之下, 温度驱动的最大横向位移在 A 点和 B 点也呈现类似趋势, 分别为 33.85 mm 和 37.38 mm。本研究比较了 2024 年 3 月和 8 月期间 GNSS 数据与 CSK 卫星数据的 LOS 位移。该空间分布特征与 DSI 计算结果基本一致, 说明温度驱动变形由中跨向两侧桥塔逐渐减小。



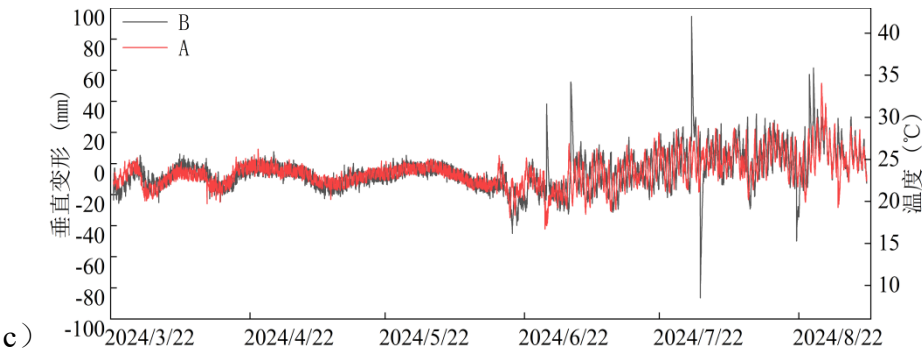


图 3.11 桥梁三维位移 GNSS 测试结果
a) 纵向位移 b) 横向位移 c) 垂直位移

需要特别注意的是，GNSS 和 InSAR 都提供相对位移测量。GNSS 从稳定的基站捕获相对位移，而 InSAR 则从高相干参考点测量位移。此外，InSAR 的 LOS 变形分解成三个方向的位移不可避免地导致过度估算。因此，为验证 DSI 方法的准确性，回收基于 GNSS 的 LOS 累积变形。利用 GNSS 技术，记录了在 SAR 图像获取时刻的桥梁位移。如表 3.2 所示，基于 GNSS 的 LOS 变形与 InSAR 导出的 LOS 变形进行了比较。在 2024 年 4 月 8 日至 2024 年 5 月 10 日期间，两种技术计算的位移方向一致，即累积位移的正负相同。由表最后一列 GNSS 与 DSI 结果的对比可知，两种方法之间的最大差异发生在 B 点，差异为 1.01 mm，进一步验证了 DSI 方法的准确性。

表 3.2 DSI 与 GNSS 的 LOS 累积位移比较（单位：mm）

日期	位置	D_N	D_E	D_V	GNSS	DSI	GNSS/ DSI
2024/7/14	A	3.59	-13.51	2.68	2.81	-4.78	2.35/
2024/8/15		5.13	-7.43	4.99	5.16	-2.33	2.45
2024/7/14	B	-5.50	-21.23	-19.61	-26.80	-17.26	5.3/
2024/8/15		-17.65	-15.23	-16.45	-21.50	-12.93	4.33

3.4 桥梁群劣化状态初步评估

为对桥梁群变形状态进行初步识别，本节从桥梁温度响应和长期变形趋势两个方面构建判别指标，即热膨胀响应系数和年变形速率。二者分别用于表征桥梁结构在温度荷载作用下的周期性伸缩特征，以及在长期服役过程中的累积变形发展趋势。

（1）基于热膨胀响应系数的判别。桥梁结构在温度变化作用下会产生周期性伸缩变形，其变形幅值与结构材料、跨径长度、支承约束状态及边界条件密切相关。本文将热膨胀响应系数定义为桥梁时序位移与同期温度变化之间的线性回归斜率，单位为 $\text{mm}/^\circ\text{C}$ ，用于表征单位温度变化引起的桥梁位移响应强度。该指标并非规

范中直接给出的固定限值，而是依据相应规范^{[111]-[112]}中关于温度作用及材料线膨胀系数的设计原则，结合研究桥梁的结构尺度、InSAR 观测方向和实际温度-位移拟合结果综合确定。考虑到城市中小桥梁温度变形通常应表现为稳定、可恢复的周期性响应，本文将热膨胀响应系数 $0.9 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 作为异常响应判别参考值。当该指标超过 $0.9 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 时，说明桥梁对温度变化的位移响应偏大，可能与支座约束异常、伸缩缝工作不畅、边界条件改变或局部结构变形放大有关，需结合现场检测进一步核查。

(2) 基于年变形速率的判别。年变形速率用于描述桥梁在监测期内累积沉降或抬升的长期变化趋势，其值由 InSAR 时序位移结果进行线性拟合得到，单位为 mm/y 。与热膨胀响应系数主要反映季节性可逆变形不同，年变形速率更侧重刻画桥梁是否存在持续性、累积性或不可逆的变形发展。本文参考桥梁养护检测中对墩台沉降、梁体线形和长期变形趋势的关注，并结合前文建立的桥梁变形安全等级阈值体系，将 $10 \text{ mm}/\text{y}$ 作为桥梁长期变形异常的初步判别值。当年变形速率超过 $10 \text{ mm}/\text{y}$ 时，表明桥梁在研究期内存在较明显的持续变形趋势，可能与基础沉降、墩台位移、支承体系异常或周边环境扰动有关，应列为重点关注对象。

在上述判别准则基础上，本文选取长沙市斜拉桥 B13 和钢拱桥 B36 作为典型案例进行验证分析，如图 3.12 所示。结果表明，B13 和 B36 的最大热膨胀响应系数分别为 $0.98 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.96 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ ，均高于本文设定的异常响应参考值 $0.9 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ ，说明两座桥梁对温度变化的位移响应相对敏感，可能存在支承约束或边界条件异常。与此同时，两座桥梁的最大年变形速率分别达到 $13.15 \text{ mm}/\text{y}$ 和 $12.91 \text{ mm}/\text{y}$ ，均超过 $10 \text{ mm}/\text{y}$ 的长期变形异常判别值，表明其变形不仅具有季节性温度响应特征，还存在一定的持续累积趋势。

进一步结合沉降时序曲线分析，如图 3.16 所示，B13 和 B36 在研究时段内整体表现为持续下沉趋势，且未呈现明显收敛特征，说明该类变形并非单纯由短期温度波动引起，而可能反映出结构或基础状态的持续变化。综合热膨胀响应系数、年变形速率和沉降时序特征，可初步判断 B13 与 B36 均具有异常变形特征，需在后续养护管理中开展重点复测、现场检查及结构状态评估。

基于上述方法，本文进一步对长沙市 48 座桥梁开展初步筛查。结果显示，4 座连续梁桥（B1、B12、B23 和 B25）、1 座钢拱桥（B36）和 1 座斜拉桥（B13），上述桥梁被识别为疑似变形异常桥梁。需要说明的是，单一指标阈值判别能够快速发现潜在异常对象，但难以全面反映桥梁在复杂环境荷载和结构边界条件共同作用下的真实服役状态。因此，后续将进一步引入多指标融合评估方法，综合沉降幅值、变形速率、热膨胀响应、结构类型和空间分布特征等信息，构建城市桥梁群安全评估体系，以提升评估结果的可靠性和工程适用性。

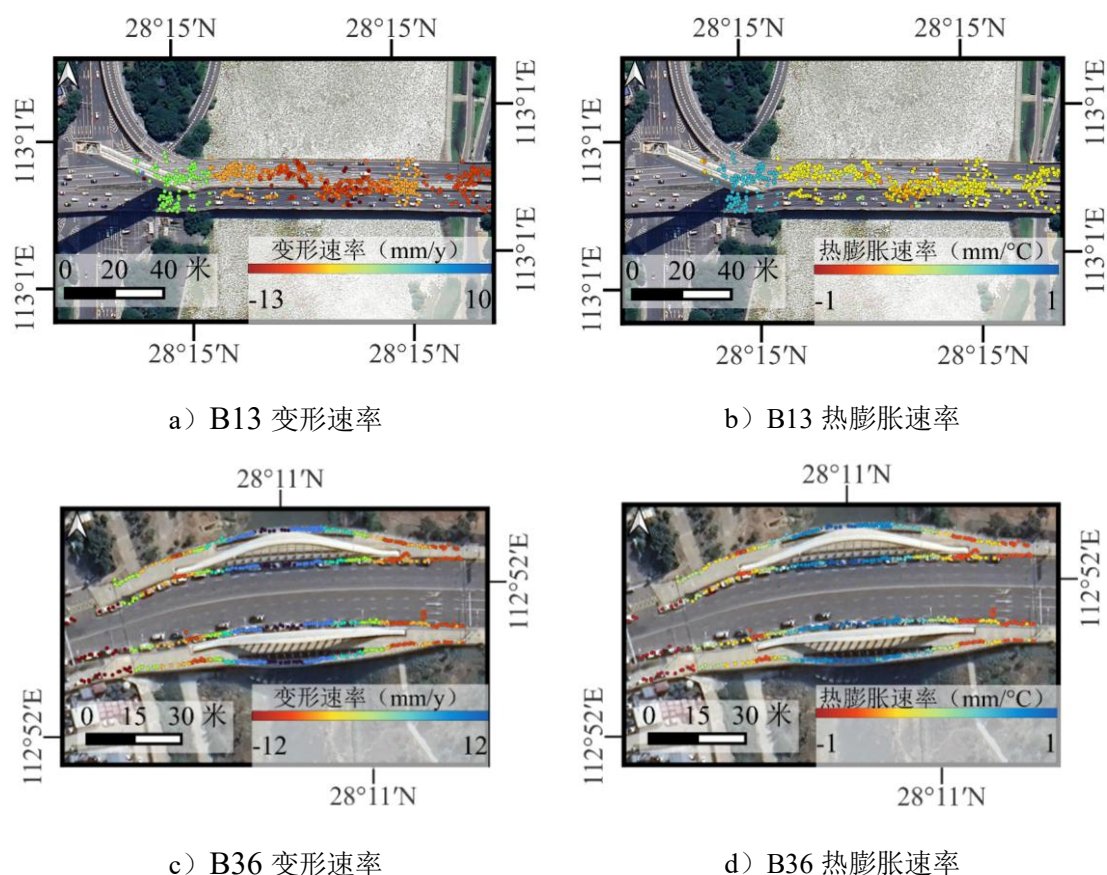


图 3.12 桥梁变形分析

3.5 桥梁级局域尺度安全评估

3.5.1 长沙市桥梁群综合安全评估

为深入揭示桥梁结构的时空变形规律，基于图 3.5 所示的桥梁沉降场，进一步提取各监测时刻的沉降值，构建时序沉降曲线。具体处理方法如下：对于桥梁纵向的沉降分布，取桥梁两侧边缘在同一横断面处的沉降观测值的算术平均值，作为该断面的纵向沉降代表值；桥梁横倾角则依据式 (2.18) 计算，表征横断面两侧的相对沉降差异。依据上述方法，绘制得到桥梁纵向沉降时序曲线及横倾角演化曲线，具体见附录。根据第 2.5.1 节提出的桥梁纵向沉降模式判别方法，对各目标桥梁的纵向沉降曲线及其结构变形特征进行了分析，如表 3.3 所示。表 3.4 对相应的横倾变形指标进行了计算与汇总。针对最大横倾角超过 $1/1000$ 的桥梁，进一步计算其横倾挠度比，以综合表征桥梁横向倾斜的空间变化幅度及其潜在结构影响。

基于第 2 章提出的桥梁安全评估模型及相应评估指标阈值体系，本文对 48 座在役桥梁结构安全状态进行了定量评价，开展基于星载 InSAR 监测数据的结构安全状态定量评价。评估结果汇总于表 3.5，其中 I 类桥 37 座，II 类桥 9 座，III 类桥 2 座。

表 3.3 桥梁沉降变形结果

桥梁 编号	沉降 模式	$d_{\max}$ (mm)	S (mm)	V (mm/y)	$\eta_{\max}$ (rad)	W_d (rad)
B1	III	-13.32	-45.27	-11.69	1/13550	1/3139
B2	III	-8.18	-28.06	-5.61	1/7815	1/3907
B3	IV	-10.38	-34.51	-6.9	1/25408	1/3176
B4	IV	-10	-30.58	-6.12	1/25426	1/3178
B5	IV	-12.43	-39.78	-7.96	1/15232	1/2539
B6	II+III	-15.85	-53.48	-10.7	1/16317	1/2040
B7	IV	-10.3	-31.83	-6.37	1/15127	1/3025
B8	IV	-10.67	-35.09	-7.02	1/20551	1/2936
B9	IV	-10.8	-37.16	-7.43	1/20193	1/2885
B10	III	-9.12	-29.66	-5.93	1/9060	1/3020
B11	IV	-12.1	-36.94	-7.39	1/14506	1/2418
B12	IV	-19.25	-65.07	-13.29	1/5625	1/2006
B13	III	-22.57	-74.23	-13.15	1/5347	1/1667
B14	IV	-14.11	-45.31	-9.06	1/17193	1/2149
B15	IV	-14.92	-50.63	-10.13	1/21912	1/2191
B16	IV	8.41	20.34	5.07	1/10709	1/2142
B17	IV	-13.41	-43.31	-8.66	1/15474	1/2211
B18	IV	-14.03	-44.59	-8.92	1/14600	1/2086
B19	IV	6.65	24.59	5.52	1/5675	1/1892
B20	IV	-15.68	-53.75	-10.75	1/18563	1/2063
B21	III	-17.62	-58.32	-11.66	1/4624	1/1541
B22	IV	-14.37	-48.38	-9.68	1/14399	1/2057
B23	II+III	-13.98	-52.12	-11.40	1/17928	1/3076
B24	IV	-8.22	-24.06	-4.81	1/10827	1/3609
B25	II+III	-18.56	-68.64	-12.68	1/7641	1/1862
B26	IV	-11.54	-40.38	-8.08	1/31044	1/2822
B27	IV	-12.83	-42.74	-8.55	1/16179	1/2311
B28	III	-8.42	-27.86	-5.57	1/9850	1/3283
B29	IV	-6.89	-25.71	-5.14	1/50850	1/4623
B30	III	-11.12	-35.04	-7.01	1/8404	1/2801
B31	IV	-7.46	-25.46	-5.09	1/32678	1/2514
B32	III	-6.56	-20.53	-4.11	1/13312	1/4437

续表 3.3 桥梁沉降变形结果

B33	III	-5.92	-21.63	-4.33	1/12455	1/6227
B34	III	-5.89	-19.83	-3.97	1/13479	1/6740
B35	III	-4.88	-16.33	-3.27	1/14222	1/7111
B36	III	-20.18	-64.27	-12.34	1/3016	1/1338
B37	IV	5.52	22.77	4.35	1/12719	1/3180
B38	IV	-6.98	-22.41	-4.48	1/12785	1/4262
B39	IV	-5.67	-21.09	-4.22	1/28709	1/5742
B40	III	-9.69	-30.53	-6.11	1/10691	1/3564
B41	IV	-9.58	-30.56	-6.11	1/16392	1/3278
B42	IV	4.39	19.17	4.23	1/13326	1/3332
B43	IV	-8.36	-27.72	-5.54	1/19005	1/3801
B44	IV	-9.39	-30.97	-6.19	1/19032	1/3172
B45	III	-9.56	-29.52	-5.9	1/10761	1/3587
B46	IV	-10.15	-32.02	-6.4	1/21480	1/3069
B47	IV	-10.16	-30.14	-6.03	1/15746	1/3149
B48	IV	-9.52	-30.93	-6.19	1/19911	1/3319

表 3.4 桥梁横倾变形结果

梁编号	$ \theta_{\max} $ (rad)	W_i (rad/m)	桥梁编号	$ \theta_{\max} $ (rad)	W_i (rad/m)
B1	1/1278	2.39×10^{-5}	B25	1/757	4.20×10^{-7}
B2	1/1270	2.12×10^{-5}	B26	1/1676	1.28×10^{-5}
B3	1/1678	1.45×10^{-5}	B27	1/2089	1.10×10^{-5}
B4	1/1986	1.17×10^{-5}	B28	1/2465	9.05×10^{-6}
B5	1/2206	9.39×10^{-6}	B29	1/2516	7.5×10^{-6}
B6	1/2112	9.01×10^{-6}	B30	1/2099	1.14×10^{-5}
B7	1/2811	6.26×10^{-6}	B31	1/2977	6.66×10^{-6}
B8	1/1708	1.41×10^{-5}	B32	1/1841	1.25×10^{-5}
B9	1/1708	1.34×10^{-5}	B33	1/2294	7.81×10^{-6}
B10	1/2364	9.95×10^{-6}	B34	1/2090	8.16×10^{-6}
B11	1/1910	1.12×10^{-5}	B35	1/2902	5.89×10^{-6}
B12	1/629	6.61×10^{-7}	B36	1/6317	7.95×10^{-6}
B13	1/515	1.07×10^{-7}	B37	1/2492	8.87×10^{-6}

续表 3.4 桥梁横倾变形结果

B14	1/1480	1.50×10^{-5}	B38	1/2569	8.18×10^{-6}
B15	1/1598	1.36×10^{-5}	B39	1/2192	9.86×10^{-6}
B16	1/1951	9.13×10^{-6}	B40	1/1877	1.04×10^{-5}
B17	1/2043	1.18×10^{-5}	B41	1/2135	9.94×10^{-6}
B18	1/1883	1.29×10^{-5}	B42	1/2018	1.04×10^{-5}
B19	1/1486	1.90×10^{-5}	B43	1/2088	1.05×10^{-5}
B20	1/1899	1.13×10^{-5}	B44	1/2296	9.75×10^{-6}
B21	1/1438	1.88×10^{-5}	B45	1/2524	8.52×10^{-6}
B22	1/1720	1.45×10^{-5}	B46	1/2115	1.10×10^{-5}
B23	1/2131	1.23×10^{-5}	B47	1/2014	1.11×10^{-5}
B24	1/1813	1.30×10^{-5}	B48	1/2207	9.473×10^{-6}

表 3.5 桥梁安全评分

桥梁	$d_{\max}$	Δ_d	V	$\eta_{\max}$	W_d	$ \theta_{\max} $	W_i	桥梁评分
B1	30.35	21.37	13.06	4.19	6.57	4.83	9.61	89.98
B2	31.44	22.11	15.05	4.18	6.69	4.82	9.59	93.88
B3	30.94	21.79	14.61	4.21	6.65	5.01	9.60	92.81
B4	31.03	21.99	14.87	4.21	6.65	5.1	9.60	93.45
B5	30.47	21.53	14.24	4.2	6.6	5.16	9.60	91.80
B6	28.98	19.66	13.33	4.21	6.53	5.13	9.60	87.44
B7	30.96	21.92	14.79	4.2	6.64	5.26	9.60	93.37
B8	30.87	21.76	14.57	4.21	6.64	5.02	9.60	92.67
B9	30.84	21.66	14.42	4.21	6.63	5.02	9.60	92.38
B10	31.23	22.03	14.94	4.18	6.64	5.19	9.60	93.81
B11	30.55	21.67	14.44	4.2	6.59	5.08	9.60	92.13
B12	26.12	17.1	12.45	4.15	6.53	4.01	9.59	79.95
B13	23.81	15.12	12.72	4.15	6.51	3.64	9.57	75.52
B14	30.09	21.26	13.86	4.21	6.55	4.93	9.6	90.5
B15	29.73	20.36	13.49	4.21	6.56	4.98	9.6	88.93
B16	31.39	22.49	15.23	4.19	6.55	5.09	9.6	94.54
B17	30.25	21.36	14	4.2	6.56	5.12	9.6	91.09
B18	30.11	21.29	13.91	4.2	6.54	5.07	9.6	90.72
B19	31.79	22.28	15.08	4.16	6.51	4.93	9.59	94.34

续表 3.5 桥梁群安全评分

B20	29.12	19.59	13.31	4.21	6.54	5.08	9.60	87.45
B21	27.56	18.51	13.06	4.14	6.42	4.91	9.59	84.19
B22	30.03	20.92	13.65	4.20	6.54	5.02	9.60	89.96
B23	30.01	19.95	13.07	4.20	6.56	5.14	9.61	88.54
B24	31.43	22.31	15.31	4.19	6.68	5.05	9.60	94.57
B25	26.98	16.33	12.83	4.17	6.52	4.30	9.58	80.71
B26	30.67	21.50	14.20	4.22	6.63	5.01	9.60	91.83
B27	30.38	21.38	14.04	4.20	6.57	5.13	9.60	91.30
B28	31.39	22.12	15.06	4.19	6.66	5.21	9.60	94.23
B29	31.73	22.23	15.21	4.22	6.72	5.22	9.60	94.93
B30	30.77	21.77	14.57	4.18	6.62	5.13	9.60	92.64
B31	31.60	22.24	15.22	4.22	6.60	5.28	9.60	94.76
B32	31.81	22.48	15.53	4.20	6.72	5.06	9.60	95.40
B33	31.95	22.43	15.46	4.20	6.76	5.17	9.60	95.57
B34	31.96	22.52	15.58	4.20	6.77	5.13	9.60	95.76
B35	32.19	22.69	15.80	4.20	6.77	5.27	9.60	96.52
B36	25.49	17.28	12.91	4.10	6.47	5.46	9.61	81.32
B37	32.05	22.37	15.46	4.20	6.65	5.21	9.60	95.54
B38	31.71	22.39	15.42	4.20	6.71	5.23	9.60	95.26
B39	32.01	22.46	15.50	4.22	6.75	5.15	9.60	95.69
B40	31.10	21.99	14.88	4.19	6.68	5.07	9.60	93.51
B41	31.12	21.99	14.88	4.21	6.66	5.14	9.60	93.60
B42	32.30	22.55	15.49	4.20	6.66	5.11	9.60	95.91
B43	31.40	22.13	15.07	4.21	6.69	5.13	9.60	94.23
B44	31.16	21.97	14.85	4.21	6.65	5.17	9.60	93.61
B45	31.13	22.04	14.95	4.19	6.68	5.22	9.60	93.81
B46	30.99	21.91	14.78	4.21	6.65	5.13	9.60	93.27
B47	30.99	22.01	14.91	4.20	6.65	5.11	9.60	93.47
B48	31.13	21.97	14.85	4.21	6.66	5.16	9.60	93.58

进一步对初筛存在风险桥梁，在综合考虑结构损伤与整体变形特征的综合安全评估如图 3.13 所示。评估结果表明，B12 桥梁的综合安全评分为 79.98，B13 桥梁的综合安全评分为 75.46，对应本文建立的 InSAR 技术评估等级中的 III 级技术状况。该等级表明桥梁已出现一定程度的不可恢复形变，结构性能可能存在潜在退化

风险。建议对该桥开展专项检测，进一步明确损伤部位与程度，并据此实施针对性维护或加固措施。其余 4 座桥梁均处于Ⅱ级技术状况，表明其结构状态整体良好，变形行为在正常波动范围内。上述分析结果表明，本文提出的桥梁变形评估指标体系能够有效克服传统安全评估方法过度依赖单一宏观变形指标的局限性，在结构损伤与整体变形耦合方面具有更强的判识能力，从而显著提升了基于星载 InSAR 技术开展桥梁安全评估的稳定性与工程适用性。

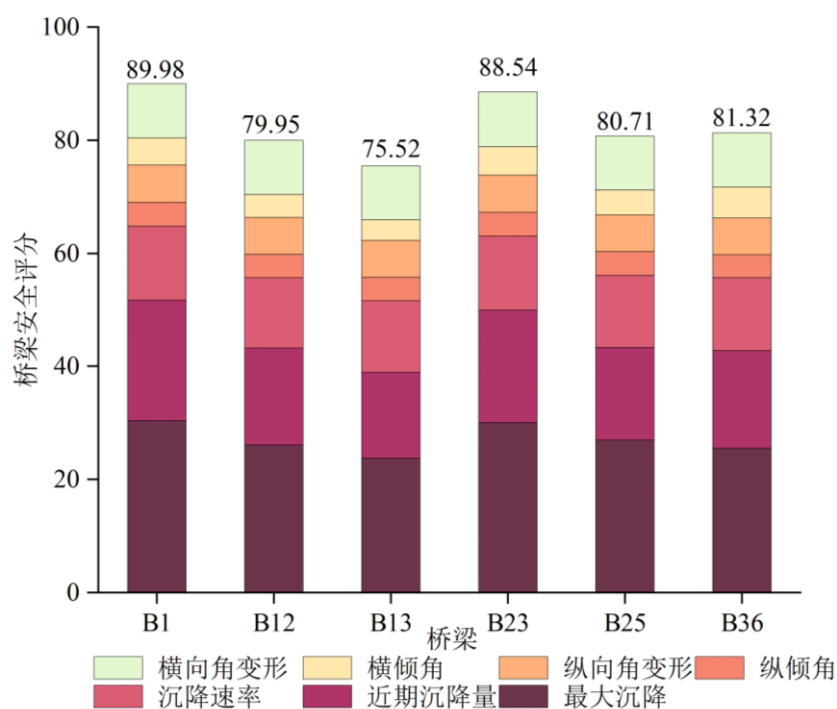


图 3.13 桥梁安全评估结果

为了进一步验证桥梁安全评分结果的准确性，对 B12 与 B13 桥进行实地踏勘，并将其与检测报告进行对比。



图 3.14 B12 的沉降与裂缝

其中根据已掌握的 B12 的检测报告可知，如图 3.14 所示，B12 桥疑似开裂，其左、右幅箱内各跨顶板均发现多条纵桥向裂缝，裂缝长度在 6.0 m-20.0 m 之间，缝宽在 0.04 mm-0.16 mm 之间，最大裂缝宽度超过《城市桥梁养护技术规范》(CJJ99-

2017) 相关规定限值, 主桥盆式支座钢体均出现较显著锈蚀现象, 个别支座出现极限转角。此外, 如图 3.15 所, B13 桥在 2024 年最大沉降超过 20 mm, 结构上部疑似出现明显开裂。



图 3.15 B13 开裂与沉降情况

3.5.2 长沙市桥梁群变形分析

(1) 桥梁纵向沉降分析。取初筛出现疑似风险桥梁的沉降曲线进一步进行分析。图 3.16 结果表明, 不同桥梁在纵向沉降分布形态上存在显著差异, 反映出其基础变形特征及结构响应机制具有一定的异质性。其中 B1、B13 与 B36 的沉降函数, 呈现出明显的沉降模式Ⅲ特征。即桥梁沿纵向呈现连续性的非均匀沉降分布, 沉降量由桥台向跨中区域逐渐增大, 具有较明显的差异沉降特征。该类变形模式表明桥梁纵向线形协调性已受到一定程度破坏, 结构体系内部易产生附加弯矩及次内力重分布, 从而对主梁、支座及梁端连接部位的受力状态造成不利影响。

B12 的沉降曲线表明, 该桥沿纵向沉降分布不规则, 且在桥梁支座附近出现较大沉降, 呈现典型的沉降模式Ⅳ特征, 即沿桥纵向存在不规则差异沉降。该模式通常反映桥墩或桥台基础的不均匀沉降较强, 且沉降在空间分布上缺乏连续性与协调性。相较于模式Ⅲ, 模式Ⅳ更容易诱发结构内力突变和局部应力集中, 尤其可能对支座区、墩顶及梁端连接区域产生更为显著的不利影响。

其余 2 座桥梁的纵向沉降形态则总体表现为沉降模式Ⅱ与沉降模式Ⅲ的叠加特征, 呈现出整体倾斜与局部弯曲共同存在的变形响应。其中, B25 与 B23 的纵向沉降曲线分别表现出向右侧支座和左侧支座偏斜的整体倾斜特征, 说明两者均存在一定程度的偏移。由于该类变形以整体位移为主, 难以引发显著的附加应力集中。

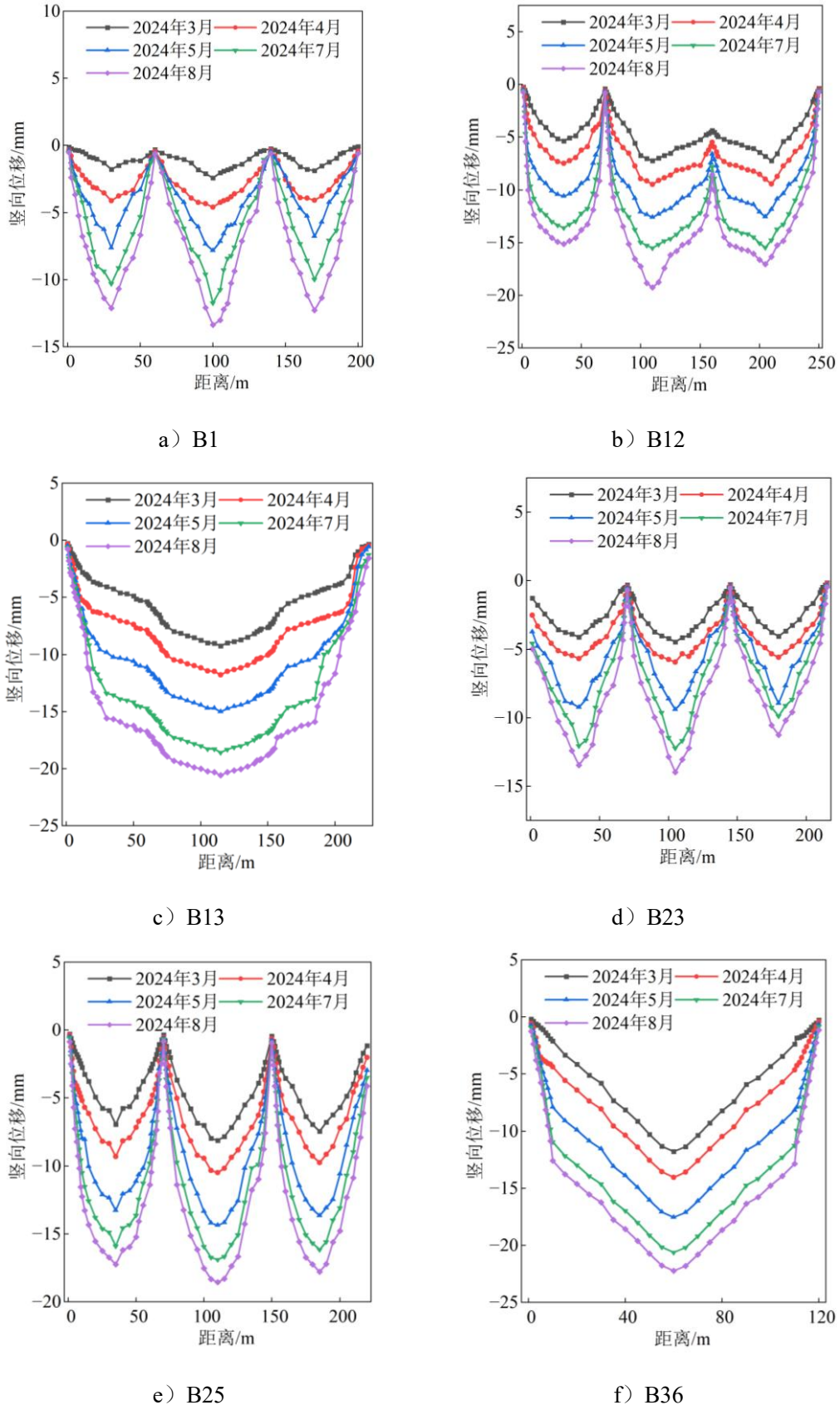
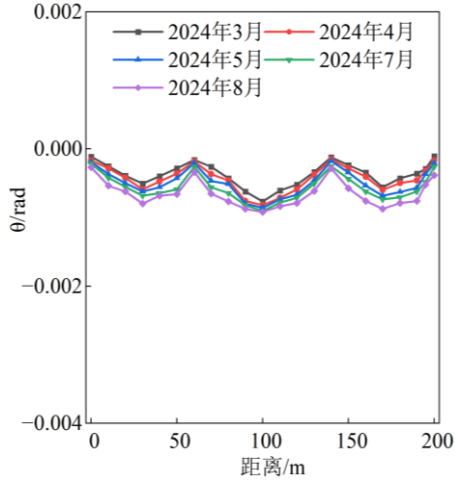


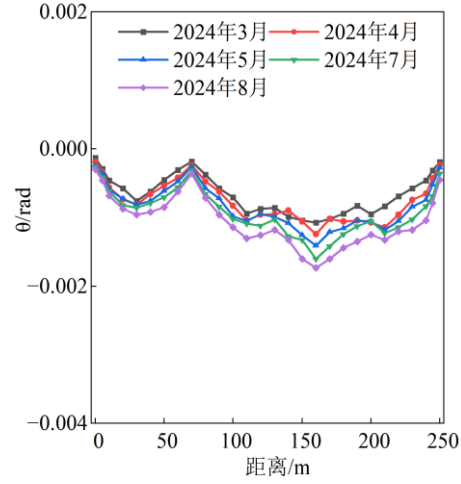
图 3.16 桥梁纵向沉降曲线

(2) 桥梁横向倾斜分析。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)

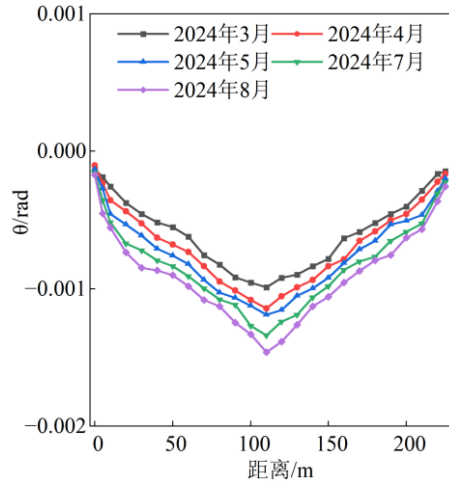
及《城市桥梁养护技术规范》（CJJ 99-2017）相关要求，桥面宽度较大的桥梁，其横向倾斜通常应控制在 1/1000 以内。图 3.17 给出了初筛风险桥梁沿纵向的横倾角曲线分布特征（其余桥梁横倾曲线见附录 B）。桥梁横向倾斜（横倾角）是桥梁局部稳定性的重要指标，对桥面行车舒适性及结构安全具有直接影响。根据《公路桥梁设计规范》（JTGD60-2015）及《城市桥梁养护技术规范》（CJJ99-2017），桥面宽度大于 15 m 的桥梁，其横向最大倾斜角通常不应超过 1/1000。本文采用 1/1000 作为桥梁横倾角参考阈值，用于初步识别潜在横向变形风险桥梁。



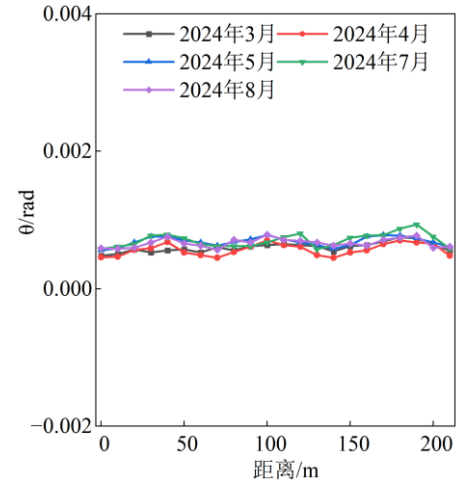
a) B1



b) B12



c) B13



d) B23

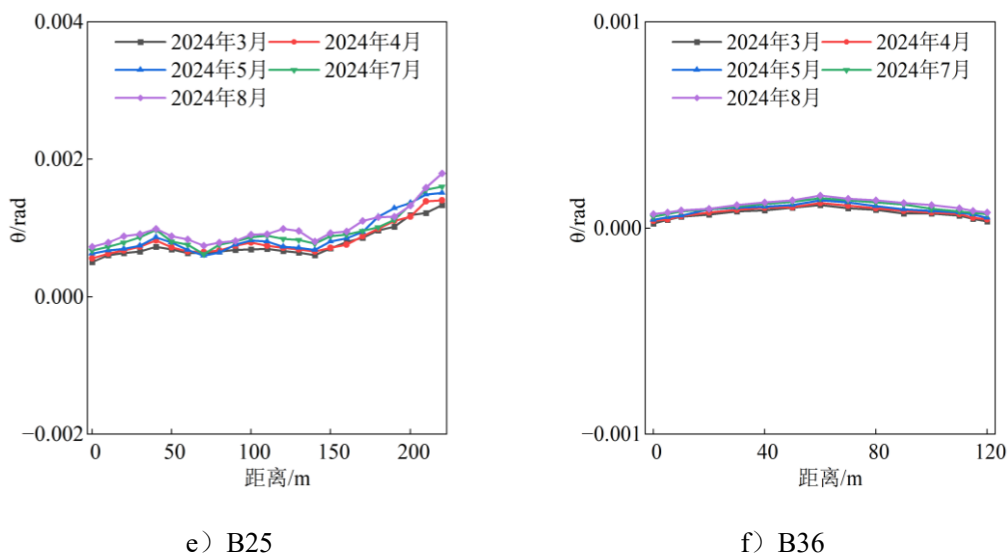


图 3.17 桥梁横倾角曲线

分析结果表明，B12、B13 与 B25 的最大横倾角相对较大，说明上述桥梁在局部区段存在一定程度的横向姿态偏移。其中，B12 和 B13 的横倾角曲线沿桥纵向呈现出一定起伏变化，反映出桥梁横向变形在空间分布上并不完全均匀；B25 则整体表现出较为连续的横倾变化趋势，表明其横向变形具有一定整体性。然而，进一步计算结果显示，这 3 座桥梁的横倾挠度比均处于较低水平，说明虽然其横倾角绝对值相对较大，但沿桥纵向的横向变形梯度有限，尚未表现出显著的横向不协调变形特征。该结果进一步表明，仅依据单一最大横倾角指标对桥梁横向变形风险进行评估，可能会放大局部姿态变化的影响，而难以全面反映桥梁横向变形的真实风险水平，因此有必要引入横倾挠度比等表征空间差异特征的指标进行辅助判断。此外，B1、B36 与 B23 的最大横倾角均小于 $1/1000$ ，其横倾角曲线整体较为平缓，表明桥梁基本未发生显著的横向倾斜，结构横向稳定性好。

3.6 本章小结

本章将第 2 章所提相关方法，应用于中国长沙桥梁群变形监测与风险评估，开展变形监测与风险评估应用研究。应用结果表明，该方法能够多角度解析桥梁异常变形行为及其引发的风险特征，有效提升了星载 InSAR 技术在桥梁群安全评估中的可靠性。相关成果的应用，不仅有助于增强城市桥梁群对潜在风险的抵御能力，也为未来城市建设广覆盖、低投入、可长期运行的桥梁群变形监测与风险预警体系提供了理论依据与实践参考。主要结论如下：

(1) 基于 DSI 技术对 2022 年 10 月至 2024 年 8 月长沙市桥梁群及周边区域的变形场进行了反演，获得了研究区域地表变形与 48 座桥梁的时序变形结果。结果表明，研究区整体变形以沉降为主，最大沉降速率为 -19.6 mm/y ，最大抬升速率

为 12.2 mm/y，最大沉降量和最大抬升量分别为 40.4 mm 和 29.9 mm。桥梁散射点空间分布与桥梁结构位置具有较好一致性，说明 DSI 技术能够有效提取城市桥梁群的变形信息，为大范围桥梁群状态识别与安全评估提供可靠的数据基础。

(2) 通过对连续梁桥、钢拱桥和斜拉桥等典型桥梁的变形特征分析发现，不同桥型在温度荷载作用下表现出明显差异化的时空变形响应。连续梁桥的热变形主要受支座约束与伸缩缝影响，钢拱桥在跨中区域表现出较强的温度敏感性，斜拉桥则受桥塔、主缆及支承体系共同作用，呈现更复杂的局部热响应特征。GNSS 实测结果与 DSI 反演结果对比表明，两者获得的 LOS 向累积位移方向一致，最大差异约为 1.01 mm，验证了 DSI 技术在桥梁细部变形监测中的可靠性和精度。

(3) 基于热膨胀响应系数、年变形速率、纵向沉降模式、横向倾斜特征及综合安全评分等指标，对长沙市 48 座主要桥梁开展了桥梁群状态评估与风险识别。结果显示，B1、B12、B13、B23、B25 和 B36 共 6 座桥梁被识别为疑似变形异常桥梁，其中 B12 和 B13 综合安全评分分别为 79.98 与 75.46，被评定为 III 级技术状况，其余 4 座为 II 级技术状况。研究表明，多指标融合评估方法能够弥补单一宏观变形指标评价桥梁风险的不足，更全面地反映桥梁结构变形特征与潜在风险状态，从而提升星载 InSAR 技术在城市桥梁群安全评估中的工程适用性。

第 4 章 基于物理驱动的安全评估指标验证

4.1 引言

第三章基于 DSI 技术对长沙市 48 座城市桥梁开展群体变形监测与安全状态评估,识别出部分疑似风险桥梁,并初步验证了多指标综合评估方法在桥梁群风险识别中的适用性。然而,星载 InSAR 监测结果主要反映桥梁宏观变形,难以直接揭示结构内部受力机制及不同荷载作用下的响应规律。因此,有必要选取典型桥梁开展有限元分析,从结构力学角度进一步验证前文评估指标体系的科学性与合理性。本文选取城市中小跨度桥梁中具有代表性的钢管混凝土拱桥为研究对象,基于 ANSYS 平台建立三维精细化有限元模型,并结合 DSI 长期变形监测结果对关键参数进行校准与修正,以提高模型对实际服役状态的表征能力。在此基础上,分析桥梁在不同外部驱动荷载及不利荷载组合下的空间变形响应特征,计算最不利工况下的相关变形评估指标,并与第二章提出的桥梁群综合评估指标体系进行对比分析。通过数值模拟与 InSAR 监测结果相互印证,从结构力学角度进一步检验本文桥梁安全评估方法的合理性、可靠性与工程适用性。

4.2 有限元模型的建立

4.2.1 桥梁概况

为进一步验证前文所提出桥梁变形监测与安全评估方法在典型桥梁结构中的适用性,并从结构力学角度分析钢管混凝土拱桥在外部荷载作用下的变形响应特征,本文选取位于湖南省长沙市浏阳河上的某座钢管混凝土拱桥作为研究对象。该桥属于城市中小跨度钢管混凝土拱桥,结构形式典型,受力体系较为复杂,能够较好地代表同类桥梁在温度变化及不利荷载作用下的空间变形特征,可为后续有限元建模、参数修正及安全评估指标验证提供工程对象基础。

本文研究对象位置见图 4.1,主桥为单跨无铰钢箱拱桥,拱轴线为悬链线形式,拱肋为类双层结构,跨径为 138.0m,矢跨比取 1/4,拱轴系数 $m=1.347$,拱轴线采用二次抛物线形,主桥面宽 39.8m。

主拱由两条分离式钢箱拱肋组成,两拱肋通过 3 道横撑相联系,选用 Q235 钢材,灌注 C40 混凝土。主桥横梁及纵梁均采用钢结构,桥面板为 C40 混凝土空心板,设双向预应力,其中纵向预应力使用 $\phi j15-9$ 钢绞线,横向预应力采用 $\phi j15-3$ 扁索,两侧下层悬臂部分为 5m 宽的非机动车道、人行通道。全桥共设 17 对吊杆,吊杆采用 GJ15-19,外直径为 100mm 的钢绞线专用吊杆。



图 4.1 B16 桥梁全景图

两侧拱脚设置承台和群桩基础来支撑主拱肋。上部结构采用单箱三室现浇预应力混凝土箱梁结构；下部结构中，桥墩为无盖梁双柱式形式，支座选用盆式支座，基础均采用钻孔灌注桩。主桥两侧为双缝，其它为单缝。目标桥梁的主桥部分的立面布置图如图 4.2 所示。

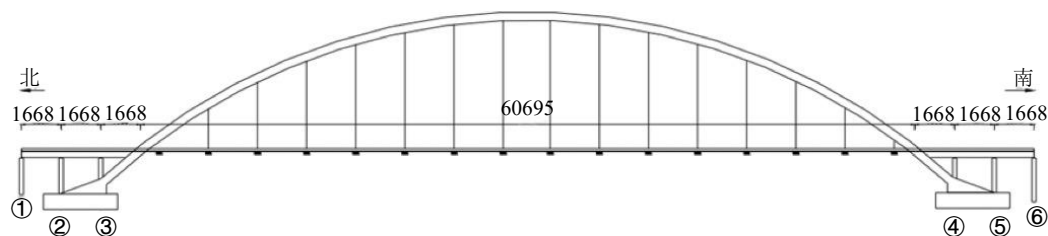


图 4.2 主桥立面布置图 (mm)

4.2.2 桥梁构件单元类型及网格划分

利用商业有限元分析软件 ANSYS22.0，本文建立了目标桥梁的先验有限元模型。图 4.3 完整展示了该桥的有限元模型，以便能够直观地呈现模型的整体结构以及各部件的配置。精细三维模型由 4024 个单元和 983 个节点组成，包含 6 种不同类型的单元。

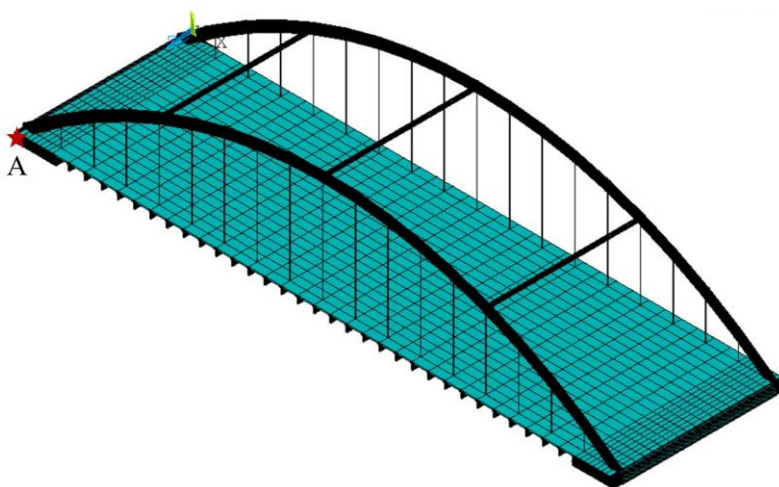


图 4.3 三维先验有限元模型

常用的桥梁结构分析通常采用“杆系级”和“板壳级”建模方法，这两种方法主要关注桥梁的整体刚度、受力分布和变形等力学特性，从而为精细化分析提供更加可靠的数据支持^[113]。本文所建立的三维精细模型将用于结构分析。这种方法不仅保证了模型的一致性，还提高了分析过程的效率和准确性。

(1) 单元类型设定

有限元模型包含具有边界条件的单元：用于桥面板的 Shell63 单元，用于系杆与吊杆的 Link10 单元，用于钢结构组件的 Beam188 梁单元（包括横梁、纵梁、钢管与横撑），以及用于配重的 MASS71 点单元。

(2) 网格划分

表 4.1 桥梁有限元模型网格划分与敏感性分析

区域	单元类型	网格尺寸 (m)	跨中竖向位移 (mm)	拱顶位移 (mm)	相对变化率 (%)	计算时间 (h)
主梁	六面体	3.0	15.23	18.45	-	0.8
主梁	六面体	2.0	15.68	18.87	3.2	1.9
主梁	六面体	1.0	15.72	18.90	0.2	8.3
拱肋	六面体	2.0	8.14	9.75	-	2.1
拱肋	六面体	1.0	8.18	9.78	0.5	9.5
横梁/纵梁	四面体	2.0	2.47	3.12	-	0.7
桥面板	四面体	2.0	4.03	4.85	-	0.9
吊杆锚固区	六面体	1.0	1.21	1.32	-	0.5

在几何模型构建完成后，需要对其进行网格划分，以生成可用于数值分析的有限元模型。本研究针对钢梁部分采用映射网格技术进行四边形单元划分，旨在准确还原结构的几何特征。对于拱肋等几何形态较为复杂的构件，则选用六面体单元进行离散，这种单元类型有助于更精确地模拟其受力行为，提升计算的精度与数值稳定性。通过应用映射网格技术，在几何形状规则的区域建立了节点间的有序分布与映射关系，从而确保了网格的整体质量和单元形态的规整性，进一步提高了几何逼近精度以及后续求解过程的收敛性能。由表 4.1 结果所示，在网格尺寸的选取上，本文首先采用 2m 的单元尺寸对全桥模型进行试算，结果表明计算精度与耗时均处于可接受范围；随后尝试将网格加密至 1m，虽然计算结果与前者较为接近，但计算时间显著增加。综合考虑计算资源与精度需求，最终确定采用 2m 的网格尺寸进行后续分析，模型各组成部分的网格划分情况如图 4.4 所示。

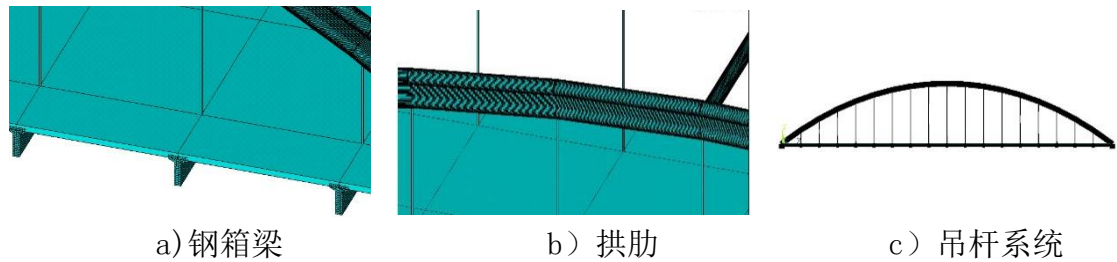


图 4.4 模型部件示意图

4.2.3 桥梁构件边界条件及相关参数设置

横向限位支座通过约束桥梁横向平移自由度(UX 、 UY)及全部转动自由度(UZ)限制桥梁横向位移和旋转；双向活动支座则通过约束竖向平移自由度(UZ)及所有转动自由度(UX 、 UY 、 UZ)来模拟支座的受力行为。节点约束(D 命令)用于直接限制关键节点的平移和旋转自由度，耦合点(CP 命令)用于将桥梁局部节点与参考节点耦合，实现整体运动协调与约束力传递。通过这些约束设置，可真实再现实际结构中支座对主梁的约束功能，同时保证桥梁在外部荷载作用下的整体受力传递和变形规律。在构建有限元模型时，主梁底板与支座的约束关系通过节点直接约束(D 命令)和耦合点(CP 命令)实现，其具体设置如图 4.5 所示。

具体而言，东侧固定支座对应的节点被完全约束在三向平移自由度上，以模拟基座固定，防止梁体任意平移或旋转。西侧固定支座对应的节点同样约束了三向平移自由度，实现桥梁另一端的固定效果。横向限位支座对应的关键节点约束了横向平移(UY)及竖向平移(UZ)，而纵向自由度(UX)保持可动，从而允许梁沿纵向伸缩，同时限制横向和竖向位移，以模拟实际桥梁横向限位支座的功能。

为了保证局部节点的约束行为能够与整体结构协调，模型中采用耦合点(CP 命令)将各关键节点与参考节点连接。具体而言，支座与拱肋处节点分别耦合，保证固定支座的约束在整体结构中传递一致，确保横向限位支座的约束力正确传递至桥梁整体。

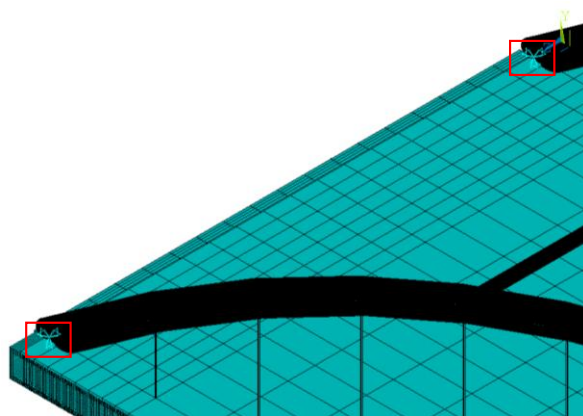


图 4.5 主梁与东、西支座的边界条件

在有限元温度变形分析中，准确地描述力学参数对于评估变形结果至关重要。

力学参数如钢筋与混凝土的泊松比、弹性模量、热膨胀系数和温度梯度等，直接影响着桥梁的变形和系统响应的准确性。这些参数不仅决定了材料在温度变化下的行为，还影响到最终结构的力学性能。目标桥梁中的析参数见表 4.2。

表 4.2 有限元模型材料参数

参数	取值
材料（钢筋和混凝土）	Q235、Q355、C30、C40
泊松比（钢筋）	0.3
泊松比（混凝土）	0.2
弹性模量（钢筋）	$2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$
热膨胀系数	$1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
比重（钢筋）	$7.85 \times 10^{-5} \text{N/mm}^2$

4.3 基于响应面法的有限元模型修正

有限元模型的准确性通常受制于结构复杂性、材料参数不确定性及边界条件简化等多重因素，导致仿真结果与实际结构响应之间存在偏差。为缩小这一差距、提升模型的预测能力，必须开展模型修正研究。响应面法（Response Surface Methodology, RSM）^[114]作为一种高效的优化工具，能够在模型修正过程中建立输入参数与输出响应之间的近似映射关系，从而显著降低高维参数空间的搜索成本，提高修正效率。

4.3.1 响应面法修正原理

响应面法（RSM）作为一种基于统计学的模型修正手段，通过建立设计参数与结构响应之间的近似数学模型，替代耗时的有限元反复计算，有效提升了修正效率。该方法的基本流程包括待修正参数筛选、试验设计、响应面构建及优化求解四个环节，其中试验设计是决定响应面精度的关键。

（1）待修正参数筛选与试验设计

基于结构力学分析与工程经验，优先选择对结构响应敏感的参数作为修正对象，如弹性模量 E 、密度 ρ 、关键几何尺寸等。引入灵敏度分析可进一步量化各参数的影响程度，剔除不敏感参数，使修正过程更加高效。试验设计的合理性直接影响响应面模型的拟合质量与计算成本。常用的试验设计方法有全因子设计^[115]、中心复合设计（CCD）、BBD 设计^[116]、D-最优设计^[117]、正交设计^[118]及均匀设计^[119]等。本研究选用 CCD 设计，该方法的布点，通过在实验的中心位置和各变量方向上额外增加一些实验点，来更全面地捕捉不同因素对结果的影响。通过对响应的多次插值，能够较好地构建出响应面模型。其中，中心点位于各因素水平的中心位置，用于估计实验误差并检验模型拟合优度，轴点分布于各因素轴向上，用于探测因素

在高低水平时的响应变化，角点自全因子设计，用于估计主效应与交互效应。通过上述布点，CCD 方法能够构建包含线性项、交互项及二次项的完整响应面模型，更准确地反映参数与响应之间的非线性关系。该方法适用于设计变量较少（通常 ≤ 6 ）的工程问题，具有试验点经济、信息丰富、拟合精度高等优点，因而在结构模型修正中得到广泛应用。

（2）参数显著性检验

完成待修正参数的初步筛选后，需进一步通过显著性检验识别出对结构响应具有实质性影响的关键参数，剔除冗余变量，以优化修正模型的复杂度与计算效率。常用的显著性检验手段包括工程经验判断、灵敏度定量分析以及基于统计推断的 F 检验（ANOVA）^[119]。F 检验的核心原理是比较引入新变量前后模型误差平方和的变化量，判断该变量的引入是否显著降低了模型的预测误差。设已有回归模型包含 $m-1$ 个自变量，其残差平方和为 SSE_{m-1} ；若增加第 m 个自变量后，新模型的残差平方和降至 SSE_m ，则可通过以下 F 统计量检验该变量的显著性：

$$F = \frac{(SSE_{m-1} - SSE_m) / df_1}{SSE_m / df_2} \quad (4.1)$$

式中， $df_1 = 1$ 表示新增自变量带来的自由度增加量， $df_2 = n - m + 1$ 为引入新变量后模型的剩余自由度， n 为样本总数。

若计算得到的 F 值大于显著性水平 F_α 对应的临界值 $F_\alpha(1, n - m + 1)$ ，则可判定该自变量对模型具有显著贡献，应予保留；反之，则可考虑将其剔除。

（3）响应面函数形式的选择与拟合

响应面法（RSM）的核心在于通过有限的样本点构建设计参数与目标响应之间的近似函数关系。这一近似函数的数学形式（即基函数类型）直接决定了模型的拟合精度、外推能力以及计算成本。目前工程实践中常用的响应面模型可归纳为以下三类：

1) 多项式回归模型：包括一阶线性模型、二阶交互模型及高阶多项式模型。其优点是形式简单、系数求解便捷（通常采用最小二乘法），且具有明确的物理可解释性。缺点是对于强非线性或高维问题的逼近能力有限。

2) Kriging 模型：基于高斯过程回归，能够提供预测值的同时给出估计方差，适用于确定性仿真数据的插值。其对非线性问题的适应能力强，但建模过程相对复杂，计算成本较高。

3) BP 神经网络模型：通过多层前馈网络结构实现输入到输出的非线性映射，理论上可逼近任意连续函数。但需要大量训练样本，且存在过拟合与局部极小值问题。

在桥梁结构分析中，设计参数（如材料特性、几何尺寸、边界条件）与结构响

应（如位移、应力、应变）之间的关系通常呈现适度的非线性特征。二阶多项式模型恰好能够在捕捉这类非线性关系的同时，保持较低的计算复杂度和良好的可解释性，因而成为桥梁工程领域响应面建模的首选方案。二阶多项式模型的数学表达式可展开为以下形式：

$$\hat{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.2)$$

式中， $\hat{y}(x)$ 表示响应面模型预测的结构响应值， x_i 表示第*i*个设计参数， β_0 表示常数项，即所有参数取中心值时的响应基准； β_i 为线性项系数反映各参数的主效应， β_{ii} 为二次项系数描述参数的曲率效应， β_{ij} 为交互项系数表征不同参数之间的耦合作用，*k*为设计参数的总个数。

二阶多项式模型的系数求解常采用最小二乘法，通过最小化响应面预测值与样本点计算值之间的残差平方和，获得各回归系数的最优估计。该方法建立的响应面模型能够较好地刻画结构响应与设计参数之间的映射关系，在参数个数有限的有限元模型修正问题中表现出良好的适用性与计算效率。

（4）响应面模型验证与优化

模型构建完成后，需通过决定系数 R^2 、均方根误差（RMSE）及相对误差等指标评价其拟合精度与预测能力，确保响应面模型能够可靠地替代原始有限元模型进行后续的参数优化与敏感性分析。其中， R^2 系数是最常见的评价指标，其计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n [y_{\text{FEM}}(j) - y(j)]^2}{\sum_{j=1}^n [y(j) - \bar{y}]^2} \quad (4.3)$$

式中， $y_{\text{FEM}}(j)$ ， $y(j)$ 分别是响应面模型和相应有限元模型的计算结果； $\bar{y}$ 是有限元结果的平均值；*n*表示样本的总数。

R^2 系数[0,1]反映的是模型拟合度。 R^2 值越接近 1，其模型精度越高，反之，精度越低。

4.3.2 响应面法的应用

在有限元模型的修正过程中，实测数据是优化和修正的关键依据。本研究以 DSI 技术获取的桥梁长期变形监测数据作为修正基准。具体而言，输入数据包括 21 组温度-变形组合，涵盖桥梁在不同时间点的温度变化；输出结果为有限元模型中桥梁的修正位移场和应力响应。通过将实测温度-变形数据与模型输出结果进行比较，采用逐步迭代优化的方法修正模型参数，实现了对桥梁实际响应的逼真模拟。

该 DSI 数据具有高精度、非接触和大范围覆盖的优势，能够连续监测主桥边跨与主跨的竖向沉降位移及纵向热膨胀变形信息，精确反映桥梁在复杂服役环境下的时序响应规律。

在修正流程中，实测数据被用于构建优化目标函数，通过与有限元仿真输出的对比分析，驱动模型参数向真实值逼近。基于实测响应基准的迭代优化，显著提升了修正后有限元模型的仿真精度，使其能够更准确地复现桥梁结构的实际力学行为。本节工作为后续桥梁结构状态评估与风险识别提供了可靠的数值模型支撑，奠定了方法基础。

(1) 待修正参数筛选与试验设计

有限元模型修正的精度与效率高度依赖于待修正参数集的合理选取。本研究基于结构力学机理与工程实践经验，初步选取了 6 个可能对桥梁结构响应产生显著影响的参数作为修正候选，包括刚度参数（主梁混凝土弹性模量 E_1 ，吊杆弹性模量 E_2 、钢箱拱肋内填混凝土弹性模量 E_3 ）和质量参数（主梁混凝土密度 ρ_1 、吊杆密度 ρ_2 、钢箱拱肋内填混凝土密度 ρ_3 ）。

为量化各参数对模型响应的影响程度并识别主导结构行为的关键变量，开展了参数灵敏度分析（见图 4.6）。灵敏度分析采用单参数扰动方法，即在保持其他参数不变的条件下，分别对单一参数进行一定范围内的扰动，分析其变化对模型输出的影响。各参数均以初始有限元模型中的取值作为基准值，通过引入标准化参数进行统一表征，其定义为修正后参数值与初始值之比，从而消除不同物理量纲的影响，实现各参数敏感性的可比性。

在此基础上，构建以模型计算结果与参考响应之间偏差为核心的目标函数，用于表征结构响应对参数变化的敏感程度。目标函数综合反映结构关键响应量（如位移或变形特征）与基准状态之间的差异，其数值变化越显著，表明对应参数对结构响应的影响越敏感。

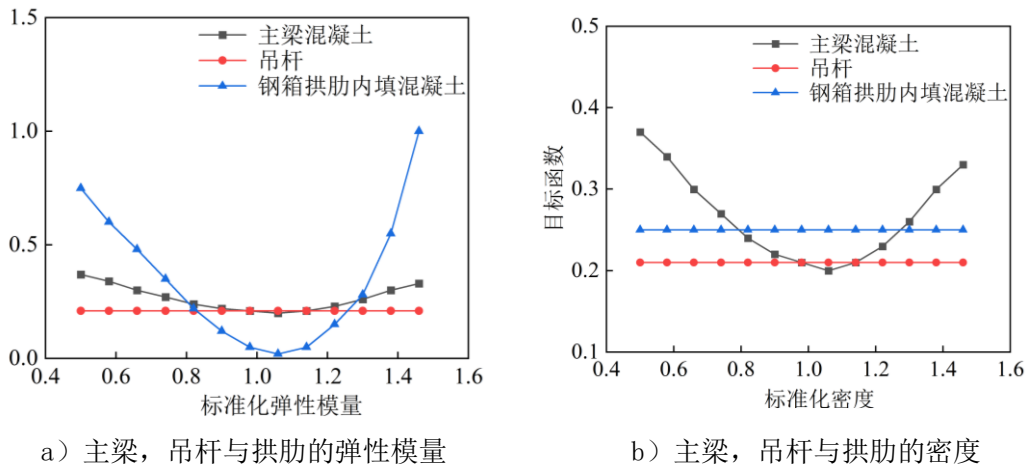


图 4.6 灵敏度分析曲线

图 4.6 结果表明：目标函数对主梁混凝土密度 ρ_1 、主梁混凝土弹性模量 E_1 以

及钢箱拱肋内填混凝土弹性模量 E_3 表现出较高敏感性，即上述参数的微小变化即可引起结构响应的明显改变；相比之下，吊杆及拱肋密度参数对目标函数影响较小，敏感性相对较低。因此，在后续模型修正过程中，应优先选取高敏感性参数作为主要修正变量，以提高参数识别效率与模型修正精度。

综合考虑桥梁结构材料的固有离散性及施工工艺过程的不确定性，参考相关研究^[120]，将各待修正参数的变动范围设定为初始值的 $\pm 20\%$ 。各参数的初始取值及修正范围汇总于表 4.3，为后续试验设计与参数优化提供了明确的搜索空间。

表 4.3 待修正参数

待修正参数	主梁混凝土密度 X_1	主梁混凝土弹性模量 X_2	钢拱肋混凝土弹性模量 X_3
	(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)
初始值	2500	32500	32500
上限值	2700	39000	39000
下限值	2300	26000	26000

为建立设计参数与结构响应之间的映射关系，本研究采用 Design Expert 软件开展试验设计。设计变量选取为前期灵敏度分析识别出的三个关键参数：主梁密度 ρ_1 、主梁弹性模量 E_1 及拱肋弹性模量 E_3 。依据各参数的修正范围（表 4.3），采用中心复合设计（CCD）方法生成具有代表性的样本点组合。为全面表征桥梁结构的变形行为，选取全桥三个关键断面的竖向位移作为结构响应指标，上述竖向位移是基于 DS-InSAR 技术反演获得的桥梁实际变形数据，分别为（ R_1 ）支座处、 R_2 （ $L/4$ ）与 R_3 （ $L/2$ ）及的竖向变形。

表 4.4 试验样本及结构响应值

样本点号	X_1 (kg/m^3)	X_2 (MPa)	X_3 (MPa)	R_1 (mm)	R_2 (mm)	R_3 (mm)
1	2300	26000	26000	-1.325	2.464	5.496
2	2700	26000	26000	-1.258	2.811	6.066
3	2300	32500	26000	-0.733	2.697	5.441
4	2700	32500	26000	-0.513	3.718	7.103
5	2300	26000	39000	-1.232	2.280	5.089
6	2700	26000	39000	-1.165	2.675	5.749
7	2300	39000	39000	-0.656	2.562	5.137
8	2700	39000	39000	-0.464	3.598	6.847
9	2300	32500	32500	-0.912	2.488	5.209
10	2700	32500	32500	-0.723	3.366	6.637
11	2500	26000	32500	-1.243	2.476	5.452
12	2500	39000	32500	-0.568	3.132	6.093
13	2500	32500	26000	-0.861	2.991	6.075
14	2500	32500	39000	-0.779	2.866	5.783
15	2500	32500	32500	-0.818	2.910	5.893

上述三个位置涵盖了桥梁结构的主要变形特征点，能够有效反映整体变形形态。基于初始有限元模型，对各样本点的参数组合进行数值仿真计算，提取三个关键断面对应的竖向位移值。通过上述过程，获得了用于响应面建模的完整样本数据集，具体包括设计变量的取值组合及其对应的结构响应值。所有样本数据汇总于表 4.4，为后续响应面模型的构建与精度验证提供了基础数据支撑。

(2) 参数显著性检验

为定量评估各设计参数对结构响应的贡献程度，确保后续模型修正聚焦于主导因素，本研究引入方差分析（ANOVA）中的 F 检验方法，对各参数的统计显著性进行严格判别。该方法的理论基础在于通过分解总变异，构造 F 统计量并计算对应的 P 值，以此判断各参数的影响是否具有统计意义。判别准则为：若某参数的 P 值小于或等于 0.05 的显著性阈值，表明在 95%置信水平下，该参数对结构响应具有显著影响；反之，若 P 值大于 0.05，则其影响相对较小，可在后续分析中予以简化。从表 4.2 数据可以看出，所选取的所有参数 P 值对结构响应均表现出显著的敏感性。这一结果为后续模型修正中参数集的确定提供了统计依据，确保了修正过程聚焦于真正主导结构响应的关键参数。

表 4.5 参数显著性检验值

评价指标	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)
A= ρ_1	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B=E ₁	<0.0001	<0.0001	<0.0001
C=E ₃	<0.0001	<0.0001	0.000742
AB	0.0482	0.1210	0.1790
AC	0.1574	0.2396	0.2944
BC	0.2305	0.1664	0.2235
A ²	0.0236	0.0175	0.0445
B ²	0.0077	0.0098	0.0225
C ²	0.01012	0.01351	0.01140

(3) 响应面函数的拟合

基于前期试验设计获取的样本数据及其对应的结构响应结果，通过 Design Expert 软件的响应面分析功能，采用逐步回归法进行处理，并采用最小二乘法确定回归系数。经过上述分析过程，构建了待修正参数与结构响应之间的响应面模型。其具体表达式见式（4.4）~式（4.6）所示。

1) 支座处变形 R₁

$$\begin{aligned}
 R_1 = & -0.8271 + 0.0818X_1 + 0.3814X_2 - 0.0286X_3 \\
 & + 0.0416X_1X_2 - 0.0139X_1X_3 - 0.0732X_2X_3
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$+0.0504X_1^2-0.1148X_2^2+0.0479X_3^2$$

2) L/4 跨处变形 R_2

$$\begin{aligned} R_2= & 2.8937+0.04075X_1+0.3446X_2-0.1257X_3 \\ & +0.1988X_1X_2-0.0418X_1X_3-0.0475X_2X_3 \\ & +0.0653X_1^2-0.1136X_2^2+0.0668X_3^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

3) L/2 跨处变形 R_3

$$\begin{aligned} R_3= & 5.8713+0.6678X_1+0.3152X_2-0.2036X_3 \\ & +0.3238X_1X_2-0.0637X_1X_3-0.0274X_2X_3 \\ & +0.0763X_1^2-0.1126X_2^2+0.0823X_3^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

为分析多因素对目标响应的协同作用，引入三维响应面进行可视化表达。以 R_3 函数为例，通过构建其与主要交互变量之间的映射关系，可揭示输入参数变化对响应结果的影响规律（如图 4.7 所示）。图中以两个自变量作为平面坐标，响应值作为高程信息，通过连续曲面形式描述系统输出随参数变化的演化趋势。该方法不仅能够刻画变量间的耦合效应，还可用于识别潜在的非线性特征及其对结果的贡献程度。

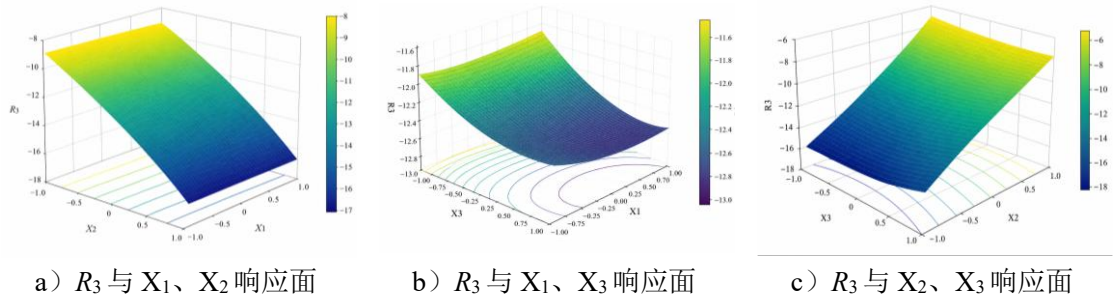


图 4.7 L/2 处响应面

(4) 响应面模型验证

利用响应面模型替代复杂的桥梁有限元模型进行迭代优化，可高效求解待修正参数的最优值。将优化获得的参数组合代入初始有限元模型，即可实现模型的更新与校准，提升其仿真精度。

需要强调的是，响应面模型的应用前提是其预测精度满足要求。在实施模型修正前，必须对响应面模型的可靠性进行验证，确保其能够在参数变化范围内准确复现有限元计算结果。只有通过验证的响应面模型，其优化结果才具有实际意义，修正后的有限元模型方能可靠地用于后续结构分析，如表 4.6 所示。

表 4.6 响应面模型的精度验证

响应面模型精度	R_1	R_2	R_3
R^2	0.9861	0.9978	0.9995

综上所述，结合式 (4.4)~式 (4.6) 获得的桥梁响应面模型，选取主梁支座处、L/4 与 L/2 截面处的竖向位移实测数据，设定修正目标值，并以此构建优化目标函

数。其构建思路是最小化各结构响应的相对误差平方和。在钢拱桥有限元模型修正过程中，目标函数即为响应面模型值与实测值之间相对误差平方和的函数，如式（4.7）所示：

$$\min f(a) = \sum_{i=1}^k \left(1 - \frac{R_{fi}}{R_{ti}}\right)^2 \tag{4.7}$$

式中： $R_{fi}(i=1,2,\dots,k)$ 是位移的模拟值（即式（4.4）~式（4.6））， R_{ti} 是截面位移的实测值。

表 4.7 参数修正前后对比

参数	主梁混凝土密度 X_1	主梁混凝土弹模 X_2	拱肋弹性模量 X_3
	(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)
修正前	2500	32500	32500
修正后	2615	33702	35506
相对误差（%）	4.6%	3.70%	9.25%

注：表中相对误差为：（修正后-修正前）/修正前。

本研究借助 MATLAB 平台，采用 fmincon 优化函数对响应面模型构建的目标函数进行迭代求解，获得使目标函数最小化的关键参数 ρ_1 ， E_1 与 E_3 的最优取值。修正前后参数的对比见表 4.7。

表 4.8 模型测点模拟值修正前后对比

参数	支座处变形（mm）	L/4 处变形（mm）	L/2 处变形（mm）
测量值	2.590	1.922	4.825
修正前	0.972	3.080	6.392
修正后	2.185	2.848	6.125
相对误差（%）	15.8%	7.5%	4.2%

注：表中相对误差为：（修正后-修正前）/修正前。

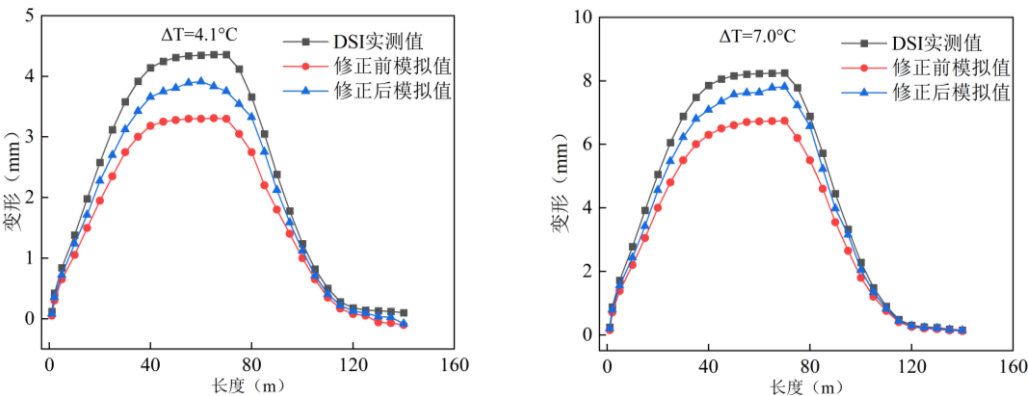


图 4.8 修正前、后实测变形值与计算变形值对比

将优化得到的参数组合回代至初始有限元模型，重新计算关键测点的竖向位

移，并与修正前的计算结果及 DSI 实测数据进行对比。修正前后竖向位移的数值对比见表 4.8，直观的曲线对比如图 4.8 所示。从图中可以清晰地看到，修正后的有限元模型在关键测点处的计算结果与 DSI 实测数据吻合良好，位移响应的偏差显著减小，表明模型修正有效提升了仿真精度。

4.4 桥梁风险评估指标验证

为客观验证本文所提出的风险评估指标对桥梁结构异常变形的识别能力，本研究基于已修正的有限元模型，设计了一系列人为沉降工况。具体而言，在 A 端支座（位置如图 4.3 所示）处分别施加 25 mm（工况I）、50 mm（工况II）、100 mm（工况III）及 150 mm（工况IV）的竖向沉降位移。参照《公路桥涵地基与基础设计规范》^[121]中关于该桥梁支座不均匀沉降 50mm 的限值规定，工况II恰好达到规范阈值，工况III、IV分别为限值的 2 倍和 3 倍，可模拟较严重和极端支座沉降工况。

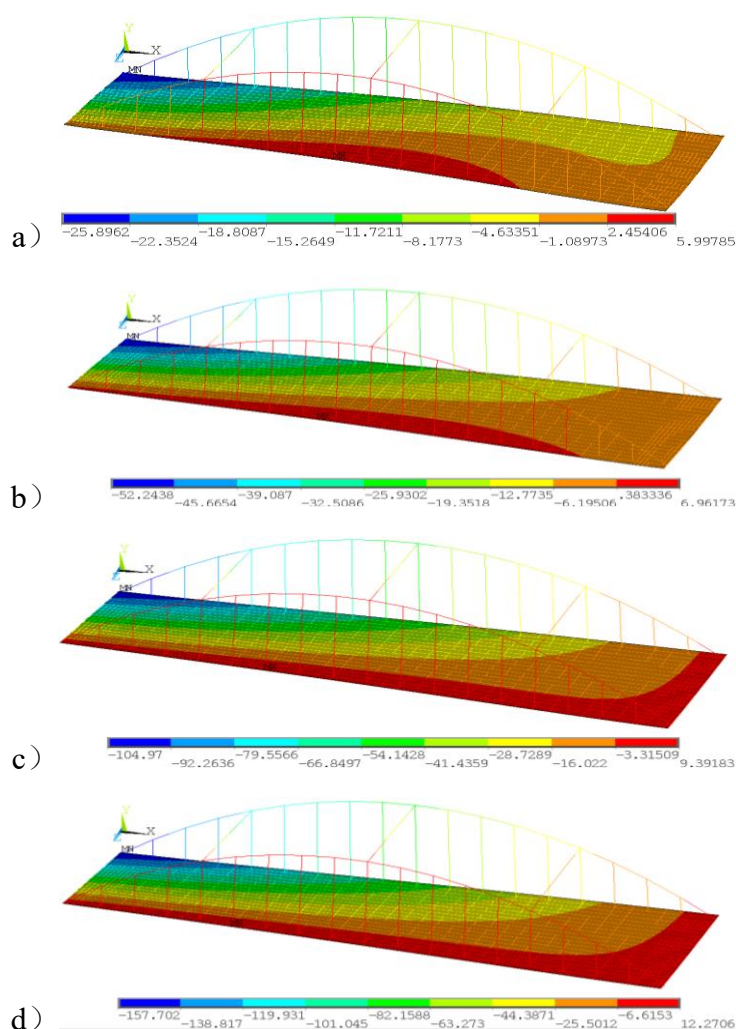


图 4.9 不同工况下有限元模拟值

a) 25mm; b) 50mm; c) 100mm; d) 150mm

在上述沉降工况的基础上，开展结构变形分析，提取各工况下桥梁关键断面的空间变形模式，并计算最不利荷载条件下的多项变形评估指标。不同工况下有限元模型的模拟结果如图 4.9 所示。

从图中可以观察到：工况 I（25 mm 沉降）引起的结构变形较小，各项指标处于正常波动范围；工况 II（50 mm 沉降）对应的变形响应有所增大，部分指标接近规范预警线；工况 III 与工况 IV（100 mm 与 150 mm 沉降）则导致显著的异常变形，多项评估指标均超过预警阈值，直观反映了结构的危险状态。由表 4.9 所示结果表明，本文所提出的风险评估指标能够有效识别不同量级的支座沉降引起的结构异常变形，对超限工况具有灵敏的响应能力，验证了其在桥梁安全评估中的实用价值。

有限元模拟下的桥梁进行结构安全评估（见表 4.10），其中工况 III 与工况 IV 下的桥梁评估均低于 60 分，由本文 2.5.3 节建立的技术状况评定等级的分类，后两种工况均为 IV 类桥，为不合格等级。进一步验证了本评估指标的准确性。

表 4.9 FEM 模拟结果

工况	$d_{\max}$ mm	S mm	V mm/y	$\eta_{\max}$ rad	W_d rad	$ \theta_{\max} $ rad	W_i rad/m
I	-25.89	-74.23	-13.15	1/4347	1/1067	1/515	1/3456
II	-51.18	-91.51	-17.56	1/2356	1/699	1/482	1/1725
III	-104.96	-190.15	-24.28	1/1725	1/357	1/233	1/1333
IV	-157.44	-265.25	-33.42	1/1125	1/238	1/155	1/898

表 4.10 FEM 安全评分

桥梁	$d_{\max}$	Δ_d	V	$\eta_{\max}$	W_d	$ \theta_{\max} $	W_i	桥梁评分
I	22.81	14.08	11.56	4.25	6.51	3.64	9.47	72.32
II	15.34	11.62	10.83	4.05	5.69	3.49	9.05	60.07
III	8.46	0	8.26	3.98	5.11	1.11	8.88	35.80
IV	0	0	4.78	3.85	4.48	0	8.11	21.22

4.5 本章小结

为了验证本文提出的桥梁风险评估指标对异常变形的识别能力，本章基于 ANSYS，构建全桥三维精细有限元模型。为了提高模型精度，结合 DSI 长期变形监测数据，采用响应面法（RSM）对模型进行修正，并通过灵敏度分析筛选关键参数。为了全面反映桥梁在多工况下的结构响应，利用中心复合设计（CCD）生成试验样本，构建高精度响应面模型，实现有限元模型优化与更新。为了验证风险评估

指标的实用性,开展多工况结构变形分析与指标验证,为桥梁异常变形识别提供可靠数值支撑。本章主要结论如下:

(1) 利用 ANSYS 软件成功建立了 B16 桥梁的精细有限元模型。通过合理选择单元类型 (SHELL63、BEAM188、LINK10 等结构单元) 与网格划分策略 (2m 全局网格), 构建了能够准确反映钢拱桥几何特征、材料属性及边界条件的先验精细 FEM, 为后续开展桥梁结构变形分析奠定坚实基础。

(2) 通过响应面法对有限元模型进行参数修正, 建立了高精度响应面模型。利用灵敏度分析方法筛选关键修正参数, 并基于中心复合设计 (CCD) 进行试验设计, 结合 F 检验 (模型 R^2 精度达 0.9861~0.9995), 显著降低了有限元模型误差。在此基础上, 修正后的关键参数使模型的位移相对误差分别降至 4.2%, 大幅提高了模型的预测准确性。

(3) 为验证本文风险评估指标的实用性, 基于修正有限元模型设计了支座沉降 (25/50/100/150 mm) 与温度耦合工况。模拟表明: 25 mm 沉降变形正常; 50 mm 沉降变形接近阈值; 100 mm 沉降与 150 mm 沉降 (超限 50%) 多项指标显著超限。工况 II、III 安全评分低于 60 分, 判定为 IV 类不合格桥梁。结果验证了所提指标对异常变形的灵敏响应能力及工程实用价值。

第 5 章 基于数据驱动的桥梁变形时序预测

5.1 引言

星载 InSAR 为城市桥梁群提供了非接触、广域的长期监测手段，但工程应用仍存在局限。卫星重访周期长、时间分辨率低，难以满足桥梁早期预警的时效性要求。传统物理驱动方法依赖荷载与边界假设，对不均匀沉降、支座劣化等早期变形特征建模精度不足，面对大规模桥梁群时计算效率偏低。现有数据驱动异常识别多基于变形速率等长期指标，以事后分析为主，对潜在损伤的超前预警能力有限。如何从时序 InSAR 数据中高效提取结构退化的微弱异常信号，成为实现从变形监测到健康诊断跨越的核心问题。为此，本章提出一种数据驱动的桥梁异常识别方法：采用自适应时序分解将位移分解为趋势、周期与残差项，对各分量分别建立预测模型，并结合有限元模型验证分解精度；通过集成预测与残差判别实现结构状态综合评估。该方法不依赖复杂力学模型，计算高效，可有效识别早期异常，为基于星载 InSAR 的城市桥梁群安全预警提供新的技术路径。

5.2 基于 STG 的时间序列分解

STG (Seasonal-Trend Decomposition using Gaussian Process Regression) 是一种基于高斯过程回归的时间序列分解方法，能够将原始序列分解为趋势项、季节项和残差项三个组成部分。与传统的分解方法（如 STL）相比，STG 方法具有更强的灵活性和不确定性量化能力。它通过为趋势和季节成分分别指定不同的高斯过程先验，能够灵活地捕捉各种复杂的时间序列模式，同时提供分解结果的后验分布，实现对分解成分的置信区间估计。基本的加性模型可以表示为：

$$Y(t) = f(t) + S(t) + \varepsilon(t) \quad (5.1)$$

趋势项 $f(t) \sim GP(0, k_{\text{trend}}(t, t'))$ ，季节项 $S(t) \sim GP(0, k_{\text{seasonal}}(t, t'))$ ，STG 采用迭代求解结构，包括外循环与内循环。内循环通过交替执行去趋势后的高斯过程季节平滑与去季节后的高斯过程趋势平滑来逼近季节性 $f_{\text{seasonal}}(t)$ 与趋势项 $f_{\text{trend}}(t)$ 。外循环则在内循环后基于残差更新鲁棒权重，以降低异常值影响。在每一次外循环迭代中，依据前一轮的带的残差项 $\varepsilon(t)$ ，计算权重函数 W_t ：

$$W_t = B \left(\frac{R_t}{6 \cdot MAD} \right) \quad (5.2)$$

式中，MAD 为残差的中位数绝对偏差，定义为：

$$MAD = \text{median}(|\varepsilon_t - \text{median}(\varepsilon)|) \quad (5.3)$$

$B(\bullet)$ 为双权函数，其表达式为：

$$B(\mu) = \begin{cases} (1-\mu^2)^2 & |\mu| \leq 1 \\ 0 & |\mu| > 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

该权重函数可以有效抑制异常值在后续高斯过程拟合中的影响。残差较大的观测点将被赋予较小权重，从而降低其对趋势项和季节项估计的干扰。

内循环的目标是分解计算得到季节性与趋势项，给定外循环传入的鲁棒权重 W_t ，内循环的迭代更新为：

(1) 去趋势并利用高斯过程周期核回归以估计季节项。估计当前趋势并将原序列去趋势，然后对去趋势后的序列直接应用具有周期核的高斯过程回归进行整体平滑，该过程通过周期核函数自动捕捉各季节位置的共性特征，无需对每个季节位置的子序列分别处理，也无需额外的低通滤波步骤，即可直接获得光滑的季节项估计。

$$f(t)^k = k_T(t, t') [K_T(t, t') + \sigma_\epsilon^2 I]^{-1} y_T^{(k)} \quad (5.5)$$

式中，趋势核函数 $k_T(t, t') = \sigma_T^2(t \cdot t')$ ； $K_T(t, t')$ 为趋势核函数的协方差矩阵， I 为单位矩阵， $y_T^{(k)} = [Y_{t1} - f_{t1}^k, \dots, Y_{tm} - f_{tm}^k]$ 。

(2) 去季节并对去季节序列进行趋势平滑以估计趋势项。利用式(5.6)计算并去除季节项，对剩余序列进行 GP 平滑以估计趋势分量。

$$S_t^k = k_s(t, t') [K_s(t, t') + \sigma_\epsilon^2 I]^{-1} y_s^{(k)} \quad (5.6)$$

式中， $y_s^{(k)} = [Y_{t1} - f_{t1}^k, \dots, Y_{tm} - f_{tm}^k]$ ， $K_s(t, t')$ 为季节核函数的协方差矩阵， I 为单位矩阵，季节核函数计算公式如下

$$k_s(t, t') = \sigma_s^2 \cdot \exp \left(-\frac{2 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-t')}{\rho} \right)}{l_s^2} \right) + \sigma_\epsilon^2 \cdot \delta_{tt'} \quad (5.7)$$

式中， ρ 为周期长度； l_s 为长度尺度控制季节模式的变化速率， σ_s^2 为季节项的信号方差， σ_ϵ^2 为噪声方差。

(3) 计算残差并更新（供下一次内循环或外循环使用）。根据残差计算结果判断是否继续迭代。

$$\epsilon_t^k = Y_t - f_t^k - S_t^k \quad (5.8)$$

内循环通常会迭代多次，直至季节和趋势项收敛。外循环与内循环交替进行，使得 STG 不仅能够捕捉时间序列的长期趋势和周期性波动，还能有效抑制异常点

对分解结果的干扰。

5.3 时间序列预测模型

5.3.1 LSTM 模型

LSTM 是一种改进的循环神经网络单元，其基本结构由记忆单元及输入层、遗忘层和输出层组成，通过引入门机制有效控制信息的保留与遗忘，在建模具有长期依赖关系的时序方面具有显著优势，如图 5.1 所示^[122]。

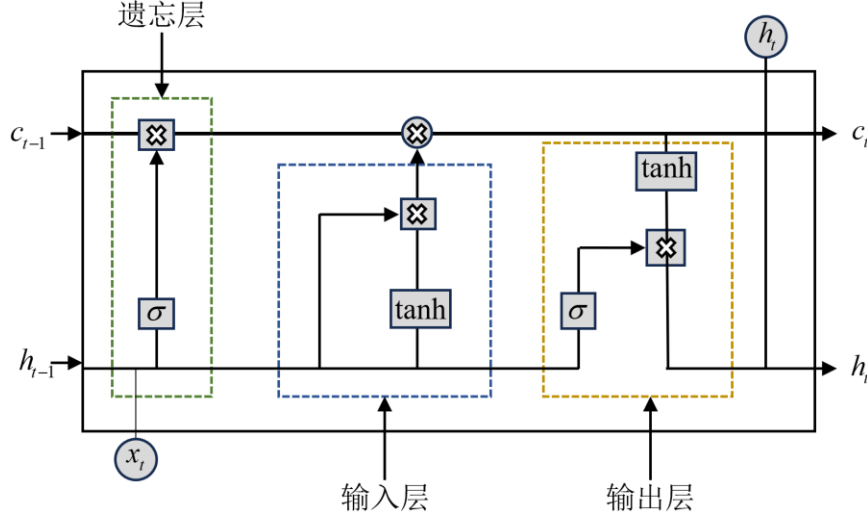


图 5.1 LSTM 处理流程

式中， x_t 表示时刻 t 的输入向量， h_{t-1} 和 h_t 分别对应前一时刻 $t-1$ 和当前时刻 t 的隐藏状态， c_{t-1} 和 c_t 表示单元在相邻时刻的记忆状态。 σ 为激活函数，通常采用 Sigmoid 作为门控激活函数，同时结合双曲正切函数 ($\tanh$) 对信息进行映射^[123]。遗忘层 f_t 用于调节历史记忆状态 c_{t-1} 的保留比例，输入层 i_t 决定当前输入对记忆单元更新的贡献程度，输出层 o_t 控制记忆状态向隐藏状态的传递过程，从而实现对时序信息的动态筛选与表达^[124]。

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (5.9)$$

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (5.10)$$

$$\tilde{c}_t = \sigma(W_c[h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (5.11)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (5.12)$$

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5.13)$$

式中， W_f ， W_i ， W_c 与 W_o 分别是遗忘层、输入层、候选记忆单元以及输出层对应的权重矩阵； b_f ， b_i ， b_c 以及 b_o 为相应的偏置项， $\odot$ 为 Hadamard 乘积， $\tilde{c}_t$ 为候选

记忆单元。

在时刻 t ，LSTM 单元的输出结果可以表示为：

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (5.14)$$

LSTM 网络通过其内部输入门、遗忘门与输出门的协同机制，有效缓解了梯度弥散问题，提升了模型训练的稳定性与鲁棒性。该机制使得 LSTM 能够选择性地记忆长期历史信息，从而捕捉时间序列中跨越多步的依赖关系。此外，LSTM 对输入数据的平稳性要求较低，无需严格的预处理，具有较强的泛化能力，适用于非平稳、非线性特征的桥梁变形时序数据建模。

5.3.2 LNN 模型

液态神经网络 (LNN) 以非线性门控形式的一阶常微分方程作为核心动力学描述，用以取代传统神经网络中固定的激活函数机制^[125]。LNN 通过构建微分方程来刻画单个神经元的动态演化过程，使网络能够以连续时间形式响应输入信号，从而更精细地捕捉输入变化所带来的细微影响^[126]，从机理上看，其信息传递方式在一定程度上类似于生物神经系统中神经元与突触之间的动态交互过程^[127]。其处理流程如图 5.2 所示。每个神经元 $x_i(t)$ 的状态是随时间演化的，通常由以下公式描述：

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -g_i \sigma(x_{leak} - x_i(t)) + \sum_{j=1}^n \omega_{ij} I_j(t) \quad (5.15)$$

式中， g_i 为神经元的导电性，表示离子通道的开闭程度， x_{leak} 是漏电流电位，通常为常数， σ 为激活函数，通常选择非线性激活函数， ω_{ij} 是突触权重，表示神经元间连接的强度； $I_j(t)$ 是外部输入，通常是其他神经元的输出，其中：

$x_i(t)$ 的动态变化是通过输入的电流 $I_j(t)$ 和外部环境的影响来决定的。下述公式描述了膜电位的变化率，即神经元如何响应外部刺激，其中 $E_j(t)$ 表示神经元 j 和神经元 i 之间的电位差。

$$I_j(t) = \omega_{ij} E_j(t) \quad (5.16)$$

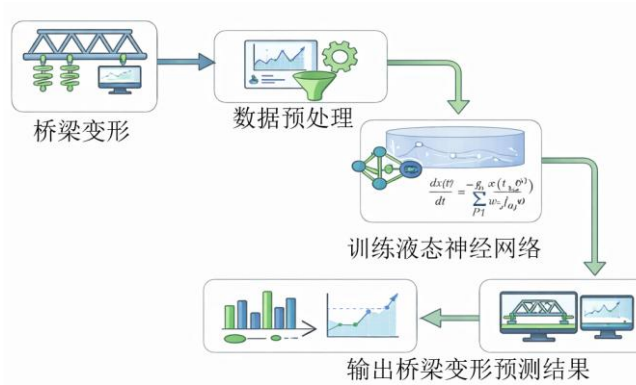


图 5.2 LNN 处理流程

在 LNN 中，突出传递是通过以下函数进行建模的：

$$I_{ij}(t) = \omega_{ij}(E_{ij}(t) - x_i(t)) = \omega_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (5.17)$$

式中， $I_{ij}(t)$ 表示为神经元 j 到神经元 i 的突触电流。

为了预测桥梁的变形，可以将每个时刻的变形数据作为输入 $I_j(t)$ ，神经元通过上述的动态演化公式来更新其状态 $x_i(t)$ 。模型通过学习历史变形数据的模式，预测未来一段时间内的桥梁变形。

5.3.3 FNN 模型

FNN 是人工神经网络中最基础且应用最广泛的架构之一，它由输入层、一个或多个隐藏层和输出层组成，如图 5.3 所示，信息单向传播且没有反馈回路。由于其强大的非线性函数逼近能力，FNN 被广泛应用于回归、分类和预测任务中。在本研究中提出一种带有迭代校正策略的 FNN 框架，用于预测时序 InSAR 的趋势项分量。

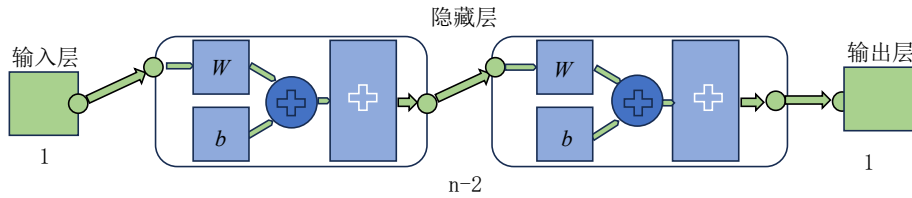


图 5.3 FNN 处理流程

针对桥梁 InSAR 位移时序的预测问题，FNN 凭借其对复杂非线性关系的强大拟合能力，能够有效捕捉结构变形的时序规律。FNN 是一种模拟生物神经系统工作机制的非线性建模工具，基本构成为一组相互连接的“神经元”节点，节点之间通过权重相连，且信息严格单向传播，构成了由输入层、若干隐藏层以及输出层组成的前向传播网络。

在一般形式下，改网络包含 n 个层（第一层为输入层，中间 $n-2$ 为隐藏层，最后一层为输出层），则每层神经元的输出均由前一层的输出通过权重矩阵、偏置向量以及非线性激活函数映射而得。假设第 1 层神经元的输出记作向量 $h^{(n)}$ ，计算公式如下^[128]：

$$h^{(n)} = W^{(n)} \cdot a^{(n-1)} + b^{(n)} \quad (5.18)$$

$$a^n = f^n(h^n) \quad (5.19)$$

式中， $W^{(n)}$ 是从第 $n-1$ 层到第 n 层的权重矩阵， $b^{(n)}$ 是第 n 层的偏置向量， f^n 表示第 n 层的激活函数（常用函数包括 Sigmoid、ReLU 或 Tanh 函数等）， $h^{(n)}$ 为其线性组合的结果， a^n 为该层的输出结果。

FNN 模型的训练通常依赖反向传播计算误差信息，并借助梯度下降方法逐步

优化网络权重，对网络中的权重矩阵 $W^{(n)}$ 和偏置向量 $b^{(n)}$ 进行迭代更新与参数寻优，旨在最小化模型预测输出与实测位移时序之间的差异，从而提升网络的预测精度与泛化能力。

这一过程的核心在于构建能够量化预测误差的目标函数，即损失函数。针对桥梁 InSAR 位移时序预测这一典型的回归任务，常用的损失函数为均方误差（Mean Square Error, MSE）。该函数通过计算预测位移值与真实监测位移之间差异的平方和，从整体上衡量模型的拟合效果。设训练样本总数为 n ，对于第 i 个样本，FNN 网络的预测输出为 $\hat{y}_i$ ，对应的真实位移时序值为 y_i ，则均方误差损失函数可定义为：

$$\ell = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \|y_i - \hat{y}_i\|^2 \quad (5.20)$$

针对桥梁 InSAR 位移时序的建模任务，FNN（前馈神经网络）展现出独特的优势。与传统时序分析方法（如 ARIMA、季节分解等）不同，FNN 不依赖于对时间序列的显式统计假设（如平稳性、正态性或线性特征），而是通过其深层前向传播结构自动学习输入数据与输出位移之间的隐含映射关系，从而具备强大的非线性动态行为拟合能力。这一特性使其特别适用于桥梁结构在复杂环境下的变形规律挖掘，能够有效捕捉 InSAR 监测数据中蕴含的非平稳、非线性演化特征。更为重要的是，FNN 作为一种灵活的监督学习框架，能够自然地融合多维影响因子作为输入特征，实现多源信息驱动下的位移时序预测。在实际桥梁工程中，结构变形往往受到多种因素的耦合作用，如环境温度变化、湿度、以及荷载状况等。

组合模型预测 InSAR 变形流程如图 5.4 所示，主要步骤为：

步骤 1：InSAR 时序位移分解。利用上述前文提到的 STG 方法将 InSAR 时序位移分解成 3 个独立可相加的成分：趋势项 f_t ，季节性 S_t 以及残差项 ε_t 。

步骤 2：时序分量预测。结合步骤 1 获得的 f_t 与 S_t ，通过 FNN（前馈神经网络）与 LSTM（长短时间记忆网络）预测趋势项 f_t 与季节性 S_t 。

步骤 3：组合预测结果。利用加性模型对 f_t 与 S_t 的预测结果进行组合，作为时序 InSAR 位移的预测结果。

对原始非平稳时间序列实施分解处理后，预测任务可转化为趋势预测与季节预测两个并行的子任务。趋势项因其较高的信噪比和良好的稳定性，有效降低了模型学习过程的复杂程度；季节项则借助其周期性规律实现快速外推，在保证预测精度的同时显著减少了计算资源的消耗。

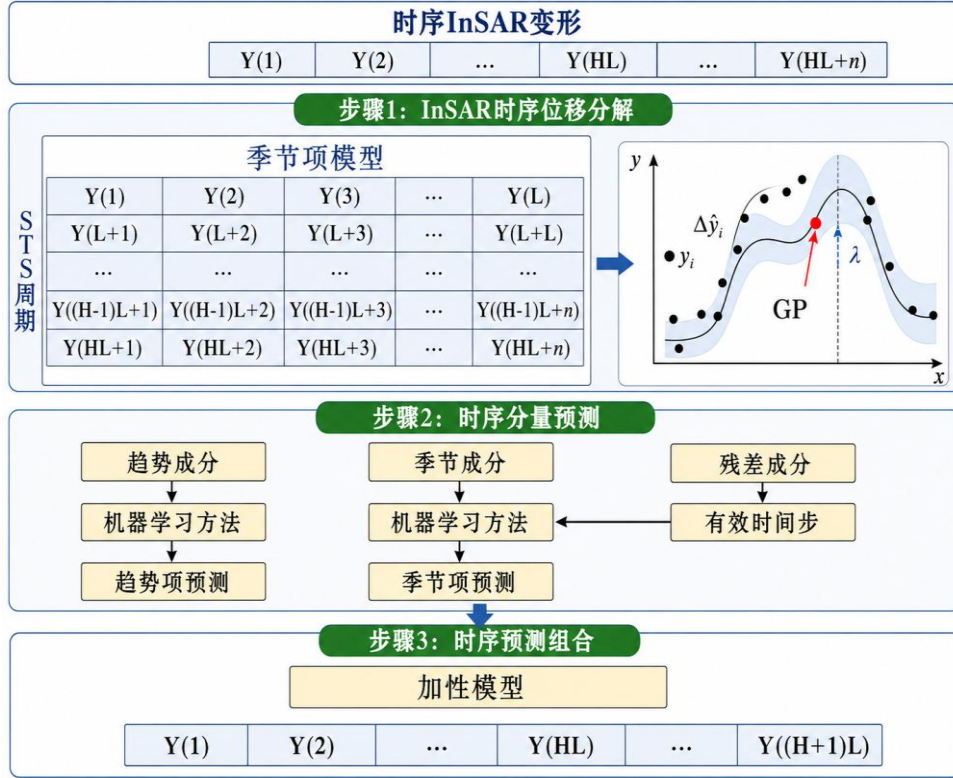


图 5.4 组合模型 InSAR 时间序列预测流程

5.4 桥梁时序预测

5.4.1 SAR 影像数据集

为评估桥梁的长期变形特性，本研究选取长沙市万家丽高架桥—三一大道段作为典型研究对象。针对该桥梁所在区域，获取了 71 景 Sentinel-1 卫星合成孔径雷达（SAR）影像（如图 5.5 所示），以开展高精度的长期位移监测。Sentinel-1 影像具有全天候、全时段观测能力，并可在复杂城市环境中实现毫米级的竖向形变监测，这使其成为城市桥梁长期健康监测的理想数据源。通过对这些影像进行时间序列分析，可提取桥梁在服役期间的竖向沉降及微小变形信息，为桥梁结构健康评估、维护决策以及城市桥梁群管理提供科学依据。

该数据集包含 2015 年 1 月 15 日至 2020 年 12 月 25 日期间采集的 71 景升轨条带模式影像。为消除地形相位，采用 NASA 提供的 30 米分辨率 SRTM DEM 数据进行校正，并通过多项式拟合方法去除轨道误差。

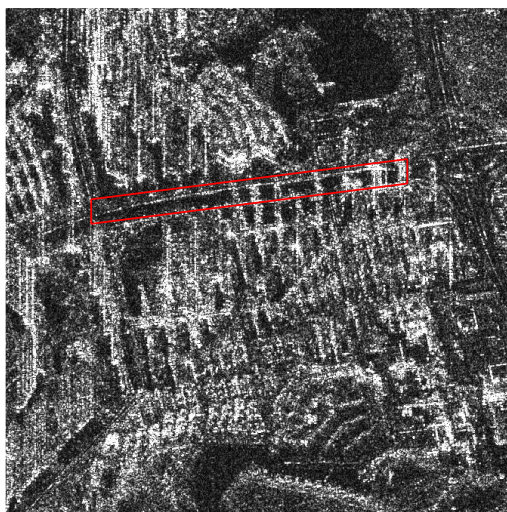


图 5.5 SAR 卫星观测示意图

5.4.2 桥梁时序变形分析

本研究基于 DS-InSAR 技术处理 71 景 Sentinel-1 影像数据, 获取了万家丽高架桥沿视线方向 (LOS) 的变形速率场。在整体分析过程中, 对桥梁沿线多个典型区段开展了对比分析, 以识别潜在异常变形区域。计算结果如图 5.6 所示。从整体空间分布来看, 多数桥梁区段的变形速率分布规律与结构受力特征基本一致: 在伸缩缝及跨中位置, 变形速率相对较大, 而在跨中与支座之间的过渡区域, 变形速率相对较小, 整体符合桥梁在温度荷载及常规运营作用下的正常变形模式。

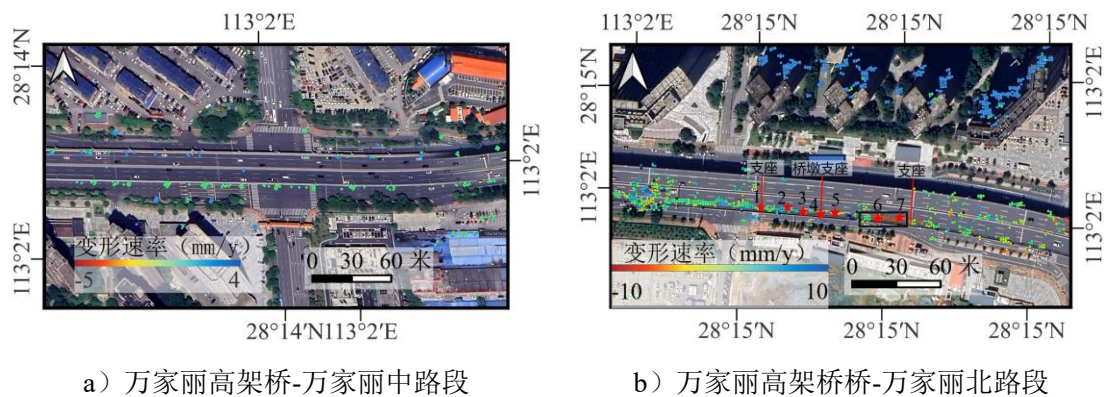


图 5.6 万家丽高架桥变形速率图(mm/y)

在对多个区段进行对比分析后发现, 取 2 个典型桥梁段变形进行分析, 其中, 万家丽高架桥-万家丽中路段整体变形速率处于合理范围内, 未表现出明显异常特征; 而万家丽高架桥-万家丽北路段 (如图中红色框选区域) 则表现出显著偏大的变形速率, 局部最大值可达约 10 mm/y, 明显高于桥梁其他区段的平均水平, 呈现出潜在异常变形特征。

为进一步分析该异常区段的变形机理, 提取了该区域沿桥梁纵向的 LOS 向位移分布特征, 并对其时空变化规律进行了深入分析, 结果如图 5.7 所示。相关分析为后续异常变形识别及成因判别提供了依据。

为进一步揭示该异常区段的变形演化规律，本文提取了桥梁该端区域沿桥梁纵向的 LOS 向变形时序，并对其变形特征进行了深入分析，结果如图 5.6 所示。从时空分布特征来看，1~4 号支座（见图 5.6 b）附近的变形总体呈现出以年为周期的季节性变化特征，说明该区域变形受周期性环境因素影响较为明显；而在 5~7 号支座（见图 5.6 b）附近，则表现出持续性的异常沉降特征。结合现场调查结果分析可知，该侧区域长期受地铁开挖施工影响，推测其为导致该桥梁区段发生异常变形的重要诱因。

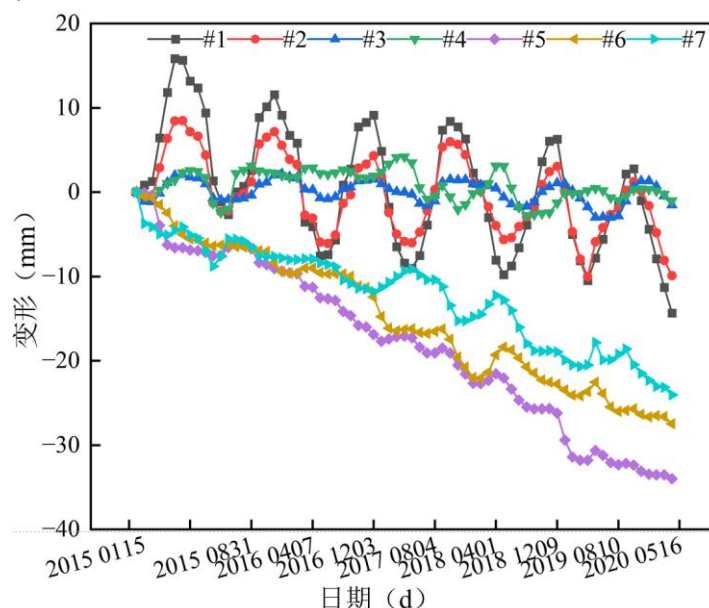


图 5.7 桥梁时间序列变形

5.4.3 时序位移分解结果

为进一步量化桥梁各监测点的长期变形特征，并揭示异常区段的时空演化规律，本文对提取的 LOS 向时序位移序列进行了 STG（趋势-季节-残差）分解。通过该方法，可以将桥梁变形信号拆解为长期趋势、季节性变化以及随机扰动三部分，从而更清晰地分析各监测点的变形规律及异常特征。分解结果如图 5.8 所示。

从分解结果来看，桥梁沿线不同位置的位移组成表现出明显的空间分异特征。1~3 号位置附近的位移总体呈现出较为显著的季节性变化特征，说明该区域变形受周期性环境因素影响较为明显；其中季节项具有稳定的年周期变化规律，周期约为 12 个月，且不同年份相近时段的变形响应具有较好一致性。与此同时，该区段趋势项整体表现为缓慢变化，表明桥梁结构在季节性波动背景下仍存在一定程度的累积变形。相比之下，在 4~5 号位置附近，季节项贡献明显减弱，位移序列则主要表现为持续性的趋势性下沉特征，说明该区域长期缓慢异常变形更加突出。其中，6~7 号位置的趋势项幅值相对更大，持续沉降特征更为显著，表明该区段可能为异常变形的集中发育区域。残差项整体呈现无明显规律的不规则波动特征，幅值相对较小，可视为观测噪声及局部随机扰动的综合反映。结合图 5.7 的变形分析

结果可知，桥梁前段 1~4 号位置附近总体以季节性波动为主，而中后段 5~7 号位置附近则以持续性异常沉降为主。

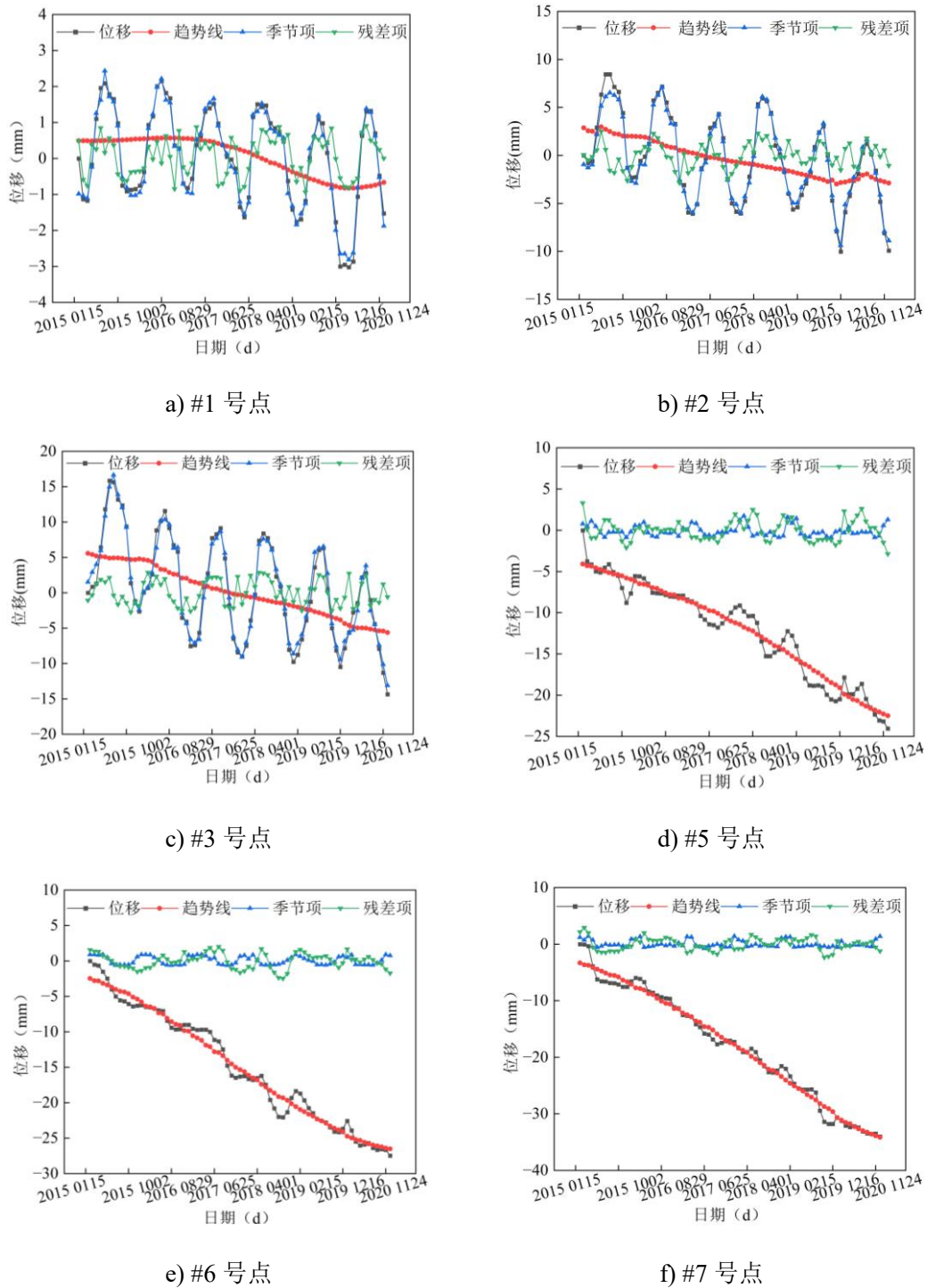


图 5.8 位移时序分解结果

由此可见，STG 分解不仅能够揭示桥梁时序位移中不同变形成分的贡献，还可有效区分由温度等周期性环境因素引起的正常季节性变形与由外部扰动或结构状态变化引起的持续性异常沉降。因此，本文后续将以趋势项变化特征作为异常变形识别的重要依据，并结合现场调查及周边施工活动，对持续沉降

的可能成因进行进一步分析，为桥梁异常变形判别和风险评估提供支撑。

5.5 时序位移预测结果

为了实现桥梁 LOS 向时序位移的高精度预测，本研究采用三种混合模型(STG-LSTM、STG-LNN、STG-FNN) 分别对位移序列进行预测。具体流程如下：首先，将原始 LOS 时序位移序列按 STG 方法分解为趋势项、季节项和残差项三个独立组成部分；然后对趋势项和季节项分别建立预测模型进行训练与预测；最后将预测结果通过加性模型组合，得到最终的时序位移预测结果。

在模型训练与预测中，本文采用按时间顺序划分训练集和测试集的方式构建时序预测样本，以避免随机划分导致的未来信息泄露。研究区共采用 2015 年 1 月 15 日至 2020 年 12 月 25 日期间的 71 景 Sentinel-1 升轨 SAR 影像获取桥梁 LOS 向时序位移。其中，2015 年 1 月 15 日至 2019 年 10 月 20 日的 58 期数据作为训练集，2019 年 11 月 14 日至 2020 年 12 月 25 日的 13 期数据作为测试集，训练集与测试集比例约为 81.7%: 18.3%。根据训练集与测试集文件统计，本文共选取 7164 个有效监测点样本，每个监测点均包含 58 期训练时序数据和 13 期测试时序数据，用于 STG-LSTM、STG-LNN 和 STG-FNN 模型的训练与预测性能评价。

各模型超参数设置如下：对于 LSTM、LNN 与 FNN 模型均采用 Python3.9 语言和 Pytorch 深度学习框架构建，选用具有自适应学习率特性的 Adam 优化算法，通过调整网络层数、隐藏层节点数和训练轮次来最小化均方误差损失函数。经过网格搜索优化发现，LSTM 模型在批量大小 128、训练轮次 50、双层 64 个隐藏节点下性能最优；LNN 模型在批量大小 128、训练轮次 200、双层 128 个隐藏节点下性能最优；FNN 模型在批量大小 128、训练轮次 48、双层 256 个隐藏节点下性能最佳。以 3、5 和 6 号支座的 LOS 位移时序为例，分别应用三种混合模型进行预测。通过将原始时序分解为趋势项与季节项，非平稳时序预测问题被转化为趋势预测和季节预测的组合任务。趋势项具有稳定性和高信噪比，有利于降低预测复杂度；季节项则通过其周期性规律实现快速外推，从而提高预测效率并降低误差。

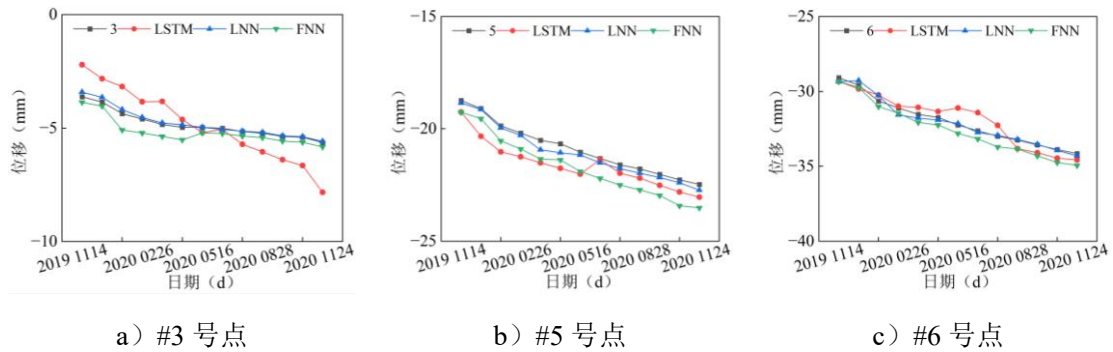


图 5.9 不同模型趋势项预测结果对比

(1) 趋势项预测。根据图 5.9 可知，LSTM 在趋势项长期预测中误差较大且

随时间增加,稳定性较差,可能因对长跨度趋势捕捉不足。相比之下,LNN 和 FNN 误差较小且增长平缓,表现更稳定,其中 LNN 预测误差低且增长平滑,适应性更强,是长期趋势预测的首选。FNN 虽然稳定性略逊,但整体仍较平稳。总体来看,LSTM 在短期预测可能具有一定优势,但在长周期时序预测中,LNN 和 FNN 提供更准确、可靠的结果,尤其是 LNN 在趋势项预测中表现最佳。

(2) 季节项预测。根据图 5.10 可知,LSTM 在季节项预测中波动较大,尤其在季节转换期误差显著,说明其对高频季节性变化敏感,但稳定性较差。相比之下,LNN 和 FNN 预测平稳,能够准确捕捉季节性趋势和周期波动,误差较小且过渡期曲线平滑,显示出更强的适应性和稳定性。总体来看,尽管 LSTM 在短期预测可能捕捉更多细节,但在处理长期季节性变化时,LNN 和 FNN 更可靠,能够有效提取季节规律并提供稳健的预测结果。

为了进一步验证了 STG 方法在时序 InSAR 位移预测的可靠性和准确性,采用 MAE 和 RMSE 作为预测性能评价指标,通过求整体所有时序点的位移预测误差于表 5.1。结果表明 LNN 与 FNN 更能够捕捉输入与输出序列间的长期依赖关系,因此采用 STG-FNN 模型进行桥梁位移时序预测更优。

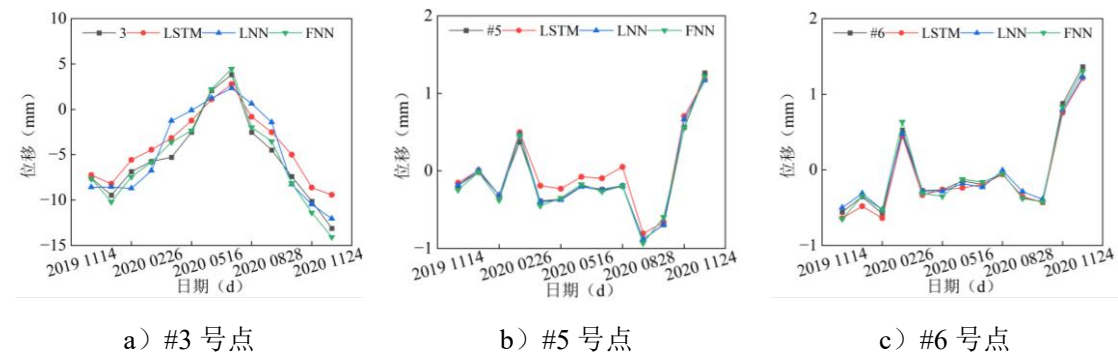


图 5.10 不同模型季节项预测结果对比

表 5.1 混合模型预测结果

方法	趋势项			季节项		
	STG-LSTM	STG-LNN	STG-FNN	STG-LSTM	STG-LNN	STG-FNN
MAE	0.134	0.0278	0.0445	0.093	0.0532	0.0180
RMSE	0.166	0.0556	0.0720	0.143	0.0850	0.0351

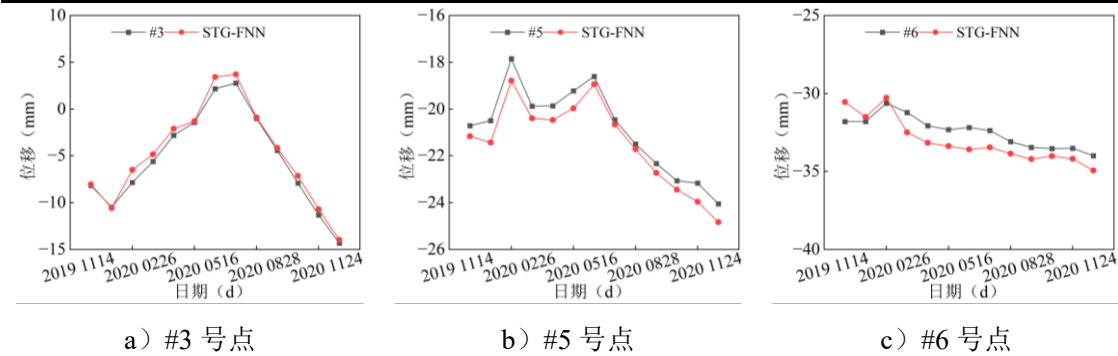


图 5.11 STG-FNN 组合模型预测结果

(3) 组合模型预测。不同支座的时序位移预测结果如图 5.11 所示, 混合模型的预测结果与 InSAR 计算结果吻合良好, 预测精度较高, 验证了 STG-FNN 方法在时序 InSAR 位移预测的可靠性和准确性。该方法不仅能实现精准预测与异常检测, 同时该技术更能有效填补卫星观测数据的时间空白, 提升监测的时效性和可靠性, 同时为物理建模与数据驱动方法的整合开辟了新途径。

5.6 本章小结

采用时序 DSI 技术处理 71 景 Sentinel-1 升轨数据, 获得了桥梁 LOS 向时序位移。提出了一种结合时序分解方法与单一预测方法的混合预测模型。通过预测实现了桥梁位移的变形预测, 可用于桥梁风险的早期预警。主要结论如下:

(1) 利用 DS-InSAR 技术获取了研究区桥梁在 2015 年 1 月 15 日至 2020 年 12 月 25 日期间的时序位移数据。从时间维度分析, 桥梁沿视线方向 (LOS) 的形变整体呈现出较为稳定的周期性波动特征, 推测主要与季节性环境因素变化有关; 从空间分布来看, 形变在桥梁结构上的分布与支座位置具有一定对应关系, 支座邻近区域往往表现出相对更为明显的变形响应, 反映出结构受力与约束条件对形变空间分布的影响。

(2) 引入基于高斯过程回归的季节趋势分解, 实现 InSAR 时序位移的分解与不确定性量化。针对传统分解方法 (如 STL) 对异常值敏感且难以提供置信区间的问题, 本文引入基于高斯过程回归的季节-趋势分解方法 (STG), 通过构建趋势项与季节项的高斯过程先验, 并结合迭代重加权机制抑制异常点影响, 实现 InSAR 时序位移的鲁棒分解。同时, 利用高斯过程的后验分布特性, 对趋势项、季节项及残差项进行不确定性量化。

(3) 提出“分解-并行预测”的混合驱动框架, 突破长周期预测精度瓶颈。针对卫星重访周期长及单一模型难以兼顾趋势与周期特征的问题, 构建 STG 与多模型 (LSTM、LNN、FNN) 融合的预测策略。通过将原始非平稳序列分解为趋势项与季节项并分别建模预测, 最终基于组合模型实现集成重构。结果表明, 该框架在长周期预测中显著优于端到端单模型, 其中 LNN 在趋势预测中表现出更优稳定性, FNN 在季节项建模中具有高精度。

结论与展望

城市桥梁作为交通基础设施体系的重要组成部分，其运行安全直接关系到区域交通网络的稳定性与可靠性。随着城市桥梁规模的持续扩大，传统依赖人工巡检或局部监测的手段已难以满足大范围、多目标结构健康监测的实际需求，亟需发展具备轻量化、广覆盖及高效率特征的新型监测技术体系。合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术凭借其非接触观测、全天候运行及大范围覆盖能力，在桥梁变形监测中展现出良好的应用潜力，能够获取结构的时空连续变形信息。然而，仅依赖 InSAR 反演结果仍难以直接实现对桥梁结构状态的精准判识与定量评估。因此，针对上述问题，基于国家自然科学基金项目《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》（52278306）与湖南省重点研发计划项目《基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群多灾害条件下状态评估与预警研究》（2022SK2096）基金资助，本文围绕城市桥梁群轻量化、广域化与低成本健康监测的需求，系统开展桥梁群多尺度变形识别、安全状态评估及位移预测研究，并以长沙市桥梁群为研究对象进行了工程验证。主要结论如下：

（1）构建了基于时序 InSAR 的城市桥梁群多尺度变形识别与安全评估理论框架，解决了城市桥梁群长期、连续、非接触式健康监测中难以区分温度效应与结构沉降、以及传统单指标评估不足的问题。本文面向城市桥梁群轻量化与广域化健康监测需求，构建了融合 DS-InSAR 时序变形反演、结构温度效应分离及多指标安全评估的多尺度分析框架，并以长沙市 48 座桥梁为对象开展工程验证，实现了桥梁群 LOS 向连续变形监测与异常识别。结果表明，该方法能够有效分离温度变形与沉降效应，提升桥梁风险判识的准确性与可靠性，弥补传统单一指标评估的不足，在城市桥梁群结构安全评估与分级管理中具有良好的应用潜力。

（2）建立并修正了钢管混凝土拱桥精细有限元模型，验证了桥梁安全评估指标的有效性，解决了有限元模型关键参数不确定性导致变形预测精度不足的问题。基于 ANSYS 平台，本文建立了包含钢箱梁、拱肋、横撑及吊杆等关键构件的三维有限元模型，并采用响应面法对模型关键参数进行了修正。结果表明，响应面模型拟合精度较高，模型 R^2 达到 0.9861~0.9995，修正后位移相对误差降至 4.2%，显著提高了有限元模型的预测能力。在此基础上，通过设置支座不均匀沉降工况，提取多项结构变形指标。结果表明，本文建立的评估指标体系能够较好区分桥梁在不同损伤程度下的安全状态。

（3）揭示了桥梁时序变形的时空演化特征，并提出了面向异常识别与早期预警的位移预测方法，解决了传统方法难以在长周期数据中高精度预测桥梁变形并及时识别异常的问题。针对 SAR 卫星重访周期较长的问题，基于“先分解再组合”

的思想提出了时序 InSAR 位移预测的混合模型。通过分解原始时序获得趋势项、季节项以及残差项，将非平稳时序的预测问题转化为趋势项预测与季节项预测的组合任务，并结合 LSTM、LNN 和 FNN 构建混合预测模型。结果表明，所提出方法能够有效提高桥梁时序位移预测精度与模型稳定性，实现对桥梁异常变形趋势的动态识别与提前预警。

尽管本文围绕城市桥梁群的变形识别、安全评估与时序预测开展了较为系统的研究，并取得了一定成果，但受数据条件、研究范围及方法体系的限制，仍有进一步深化的空间。未来可从以下几个方面继续开展研究。

(1) 进一步完善“环境-荷载-结构”耦合作用下的桥梁变形机理研究。本文已将温度因素引入 InSAR 变形模型，并结合有限元方法开展了温度荷载与支座沉降耦合分析，但对于降雨、地下水变化、冲刷、交通荷载及周边施工扰动等多因素耦合作用的长期影响仍研究不足。未来可在更长时间尺度和更复杂服役环境下建立桥梁多场耦合分析模型，从而更加深入揭示桥梁异常变形的形成机制。

(2) 进一步提升桥梁群安全评估模型的普适性与泛化能力。本文以长沙市桥梁群为研究对象开展了工程验证，但不同地区桥梁在结构型式、地质环境、服役条件及病害演化机制等方面存在差异。后续可扩大研究区域与样本规模，针对不同桥型、不同环境背景和不同劣化特征开展分类型研究，逐步完善风险指标体系、权重设置方法及安全分级标准，增强评估方法的可推广性。

(3) 进一步优化桥梁时序预测与智能预警方法。本文提出的 STG 混合模型已在桥梁位移预测中表现出较好效果，但对更复杂非线性扰动、突变响应及桥梁群时空关联性的刻画仍有提升空间。未来可进一步引入图神经网络、Transformer 及物理信息驱动模型，构建兼顾时空相关性与力学约束的桥梁群预测模型，以提升异常识别的前瞻性和预警结果的鲁棒性。

参考文献

- [1] 交通运输部.2024 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL] (2025-06-10)https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁结构监测技术规范: JT/T 1037—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [3] 交通运输部. 关于进一步推动公路桥梁隧道结构监测系统工作实施方案(2024-2030 年)[EB/OL]. 2024.
- [4] 伊廷华. 结构健康监测教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [5] 茹继平, 李杰. 结构工程基础研究 20 年——来自国家自然科学基金委员会的报告[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 1-9.
- [6] 余忠儒, 单德山, 孙榕徽. 基于种群的桥梁结构健康监测研究综述与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 1-22.
- [7] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 25-45.
- [8] Kang X, Zhu B, Cai Y, et al. A concise review of state-of-the-art sensing technologies for bridge structural health monitoring[J]. Sensors, 2025, 25(17): 5460.
- [9] 彭容新, 邱文亮, 滕飞. 寒区近海混凝土桥梁性能衰退机理与损伤行为评估方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 129-146.
- [10] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [11] 周云, 陈建炜, 郝官旺, 等. 融合 InSAR 技术与大数据的城市建筑群结构变形风险评估的一项案例研究[J]. 土木工程学报, 2026, 59(3): 15-31.
- [12] Zhou Y, Chen J, Hao G, et al. Deformation Monitoring of High-Rise Building Clusters: Acquiring Deformation Coefficients by Combining Satellite Imagery and Persistent Scatterer Interferometry[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024, 2024(1): 2326106.
- [13] Wang L, Teng C, Jiang K, et al. D-InSAR monitoring method of mining subsidence based on Boltzmann and its application in building mining damage assessment[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(1): 353-370.
- [14] Infante D, Di Martire D, Confuorto P, et al. Assessment of building behavior in slow-moving landslide-affected areas through DInSAR data and structural analysis[J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109638.
- [15] Macchiarulo V, Milillo P, DeJong M J, et al. Integrated InSAR monitoring and

- p>structural assessment of tunnelling-induced building deformations[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(9): e2781.
- [16] 缪阿丽, 祝涛, 张艺. 2021 年青海玛多 7.4 级地震的江苏流体井水位同震响应特征[J]. 地震研究, 2023, 46(1): 68-73.
- [17] Zhao R, Li Z, Feng G, et al. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: With emphasis on climatic factors modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 276-287.
- [18] Zhou Y, Zhou X, Zou S, et al. Building Cluster Safety Risk Assessment in Slow - Moving Landslide Areas Based on SBAS - InSAR Deformation Monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2025, 2025(1): 1239563.
- [19] 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, 2023, 42(4): 25-37.
- [20] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805-1834.
- [21] Rogers A E E, Ingalls R P. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry[J]. Science, 1969, 165(3895): 797-799.
- [22] Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [23] 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.
- [24] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [25] Hanssen R F, Weckwerth T M, Zebker H A, et al. High-resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements[J]. Science, 1999, 283(5406): 1297-1299.
- [26] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): RG2004.
- [27] Sandwell D T, Price E J. Phase gradient approach to stacking interferograms[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B12): 30183-30204.
- [28] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [29] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.

- [30] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [31] Fornaro G, Serafino F, Soldovieri F. Three-dimensional focusing with multipass SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 507-517.
- [32] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): L16311.
- [33] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B7).
- [34] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [35] Qin X, Liao M, Yang M, et al. Monitoring structure health of urban bridges with advanced multi-temporal InSAR analysis[J]. Annals of GIS, 2017, 23(4): 293-302.
- [36] Xiong S, Wang C, Qin X, et al. Time-series analysis on persistent scatter-interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) derived displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A observations[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 546.
- [37] Bao L, Xing X, Chen L, et al. Time Series Deformation Monitoring over Large Infrastructures around Dongting Lake Using X-Band PSI with a Combined Thermal Expansion and Seasonal Model[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021(1): 6664933.
- [38] Qin X, Ding X, Liao M, 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.
- [39] 黄其欢, 丁幼亮, 王一安, 等. 基于 InSAR 的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2017, 47(3): 584-589.
- [40] Selvakumaran S, Plank S, Geiß C, et al. Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 463-470.
- [41] Jung J, Kim D, Palanisamy Vadivel S K, et al. Long-term deflection monitoring for

- p>bridges using X and C-band time-series SAR interferometry[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1258.
- [42] 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.
 - [43] Cusson D, Rossi C, Ozkan I F. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(1): 189-204.
 - [44] Farneti E, Cavalagli N, Costantini M, et al. A method for structural monitoring of multispan bridges using satellite InSAR data with uncertainty quantification and its pre-collapse application to the Albiano-Magra Bridge in Italy[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(1): 353-371.
 - [45] Lasri O, Giordano P F, Limongelli M P, et al. Remote monitoring of a concrete bridge using PSInSAR[J]. CE/Papers, 2023, 6(5): 893-899.
 - [46] Lorenz R, Petryna Y, Lubitz C, et al. Thermal deformation monitoring of a highway bridge: combined analysis of geodetic and satellite-based InSAR measurements with structural simulations[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(5): 1237-1255.
 - [47] Zhang K, Xiao W, Zhu H, et al. Analysis of uneven settlement of long-span bridge foundations based on SBAS-InSAR[J]. Remote Sensing, 2025, 17(2): 248.
 - [48] Della Santa F, Sisici F, Anjom F K, et al. Bridge Failure Risk Prediction Using Geospatial Data Processing via Multi-Head Attention Deep Learning Model[J]. IEEE Access, 2025, 14: 679-692.
 - [49] Ciampoli L B, Gagliardi V, Calvi A, et al. Automatic network level bridge monitoring by integration of InSAR and GIS catalogues[C]//Multimodal sensing: technologies and applications. SPIE, 2019, 11059: 154-161.
 - [50] Quqa S, Palermo A, Ubertini F, et al. Regional-scale bridge condition monitoring using InSAR displacements and environmental data[J]. Structural Health Monitoring, 2025, 24(4): 2271-2291.
 - [51] Zhou Y, Hao G, Qin X, et al. A refined DS-InSAR technique for long-term deformation monitoring of low-coherence bridge groups[J]. Engineering Structures, 2025, 335: 120335.
 - [52] Caspani V F, Tonelli D, Bado M F, et al. Bridge Monitoring with Satellite InSAR Technology and Clustering Algorithm[J]. Measurement, 2025, 258: 118939.
 - [53] De Corso T, Mignone L, Sebastianelli A, et al. Application of DInSAR technique

- p to high coherence satellite images for strategic infrastructure monitoring[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2020: 4235-4238.
- [54] Qin X, Li Q, Ding X, et al. A structure knowledge-synthetic aperture radar interferometry integration method for high-precision deformation monitoring and risk identification of sea-crossing bridges[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 103: 102476.
- [55] Farneti E, Cavalagli N, Venanzi I, et al. Residual service life prediction for bridges undergoing slow landslide-induced movements combining satellite radar interferometry and numerical collapse simulation[J]. Engineering Structures, 2023, 293: 116628.
- [56] 周云, 危俊杰, 李剑, 等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 39-50.
- [57] Tonelli D, Caspani V F, Valentini A, et al. Interpretation of bridge health monitoring data from satellite InSAR technology[J]. Remote Sensing, 2023, 15(21): 5242.
- [58] Lasri O, Giordano P F, Limongelli M P. Remote Structural Health Monitoring of Concrete Bridge Using InSAR: A Case Study[C]. Structural Health Monitoring 2023: Designing SHM for Sustainability, Maintainability, and Reliability—Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford, USA: DEStech Publications, 2023: 2561-2568.
- [59] Nettis A, Massimi V, Nutricato R, et al. On the use of satellite-based interferometry for structural monitoring of bridge portfolios[J]. Procedia structural integrity, 2023, 44: 1996-2003.
- [60] Guzman-Acevedo G M, Quintana-Rodriguez J A, Gaxiola-Camacho J R, et al. The structural reliability of the Usumacinta bridge using InSAR time series of semi-static displacements[J]. Infrastructures, 2023, 8(12): 173.
- [61] Nishio M, Sawayama R, Kumura T, Kinoshita K. Correlation Analysis of InSAR Displacement Data and Inspection Data Towards Multiple Bridge Monitoring in Transportation Network[C]. Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring. Potsdam, Germany: NDT.net, 2024: 1707-1714.
- [62] Ren L, Liu C, Ou J. Deformation Pattern Classification of Sea-Crossing Bridge InSAR Time Series Based on a Transfer Learning Framework[J]. Remote Sensing, 2025, 17(21): 3567.
- [63] Armando B M H, Tran M Q, Pereira S, et al. A Systematic Review of the Practical Applications of Synthetic Aperture Radar (SAR) for Bridge Structural

- Monitoring[J]. Sustainability, 2026, 18(1): 514.
- [64] Zhou L, Li X, Pan Y, et al. Deformation monitoring of long-span railway bridges based on SBAS-InSAR technology[J]. Geodesy and Geodynamics, 2024, 15(2): 122-132.
 - [65] 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, 2018, 2672(45): 76-86.
 - [66] Giordano P F, Kwapisz M, Miano A, et al. Monitoring of a multi - span prestressed concrete bridge using satellite interferometric data and comparison with on - site sensor results[J]. Structural Concrete, 2025, 26(5): 5430-5453.
 - [67] Zhu M, Wan X, Fei B, et al. Detection of building and infrastructure instabilities by automatic spatiotemporal analysis of satellite SAR interferometry measurements[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1816.
 - [68] Tung H, Chen H Y, Hu J C, et al. Transient deformation induced by groundwater change in Taipei metropolitan area revealed by high resolution X-band SAR interferometry[J]. Tectonophysics, 2016, 692: 265-277.
 - [69] Liu Y, Cao W, Shi Z, et al. Evaluation of post-tunneling aging buildings using the InSAR nonuniform settlement index[J]. Remote Sensing, 2023, 15(14): 3467.
 - [70] Yang X, Zhou Y, Li X, et al. Effect of temperature changes on bearing motion of long-span steel truss continuous girder bridge[J]. Construction and Building Materials, 2024, 430: 136440.
 - [71] Schlögl M, Widhalm B, Avian M. Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 172: 132-146.
 - [72] Eskandari R, Scaioni M. European Ground Motion Service for bridge monitoring: Temporal and thermal deformation cross-check using Cosmo-SkyMed InSAR[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023, 48: 1235-1241.
 - [73] Guzman-Acevedo G M, Vazquez-Becerra G E, Quintana-Rodriguez J A, Gaxiola-Camacho J R, et al. Structural Health Monitoring and Risk Assessment of Bridges Integrating InSAR and a Calibrated FE Model[J]. Structures, 2024, 63: 106353.
 - [74] Cusson D, Stewart H. Satellite Synthetic Aperture Radar, Multispectral, and Infrared Imagery for Assessing Bridge Deformation and Structural Health—A Case Study at the Samuel de Champlain Bridge[J]. Remote Sensing, 2024, 16(4): 614.
 - [75] Wei L, Wang S, Wang X, Tang L, Liu B, Li X, et al. Deformation and Stress Status

- p of a Cable-Stayed Bridge Revealed by Incorporating Ascending-Descending Time Series Interferometric SAR Fusion and Finite Element Modeling[J].
- IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*
- , 2025, 18: 13372-13387.
- [76] Wu G M, Yi T H, Yang D H, et al. Early Warning Method for Bearing Displacement of Long-Span Bridges Using a Proposed Time-Varying Temperature–Displacement Model[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(9): 04021068.
- [77] Del Soldato M, Solari L, Raspini F, et al. A Multi-Sensor Approach for Monitoring a Road Bridge in the Valencia Harbor (SE Spain) by SAR Interferometry (InSAR)[J]. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 2016, 41: 235-238.
- [78] Kaloop M R, Hussan M, Kim D. Time-series analysis of GPS measurements for long-span bridge movements using wavelet and model prediction techniques[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(11): 3505-3521.
- [79] Ma P, Zhang F, Lin H. Prediction of InSAR time-series deformation using deep convolutional neural networks[J]. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(2): 137-145.
- [80] 冯建强, 宋昆仑. 基于 CEEMDAN-LSTM 的桥梁变形时间序列预测研究[J]. *地理空间信息*, 2023, 21(7): 40-43.
- [81] Sowemimo A D, Chorzepa M G, Birgisson B. Recurrent neural network for quantitative time series predictions of bridge condition ratings[J]. *Infrastructures*, 2024, 9(12): 221.
- [82] Bai Z, Shen C, Wang Y, et al. Bridge deformation prediction using KCC-LSTM with InSAR time series data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025: 1-12. DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3552665.
- [83] Zhou Y, Hao G, Chen J, et al. Time series forecasting and anomaly detection of bridge deformation based on PS-InSAR technique and seasonal-trend decomposition[J]. *Structural Health Monitoring*, 2025: 14759217251365289.
- [84] Wang J, Li C, Li L, et al. InSAR time-series deformation forecasting surrounding Salt Lake using deep transformer models[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159744.
- [85] Hayati N, Widodo A, Kurniawan A, et al. Small baselines techniques of time series InSAR to monitor and predict land subsidence causing flood vulnerability in Sidoarjo, Indonesia[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 2124-2150.
- [86] Liu C, Pan J, Wang J. An LSTM-based anomaly detection model for the

- p>deformation of concrete dams[J]. Structural Health Monitoring, 2024, 23(3): 1914-1925.
- [87] Radman A, Akhoondzadeh M, Hosseiny B. Integrating InSAR and deep-learning for modeling and predicting subsidence over the adjacent area of Lake Urmia, Iran[J]. GIScience & Remote Sensing, 2021, 58(8): 1413-1433.
 - [88] Cheng M Y, Cao M T, Huang I F. Hybrid artificial intelligence-based inference models for accurately predicting dam body displacements: A case study of the Fei Tsui dam[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(4): 1738-1756.
 - [89] Kang F, Liu X, Li J. Temperature effect modeling in structural health monitoring of concrete dams using kernel extreme learning machines[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 987-1002.
 - [90] Wang X, Zhu F, Huang C, et al. Robust beamforming with gradient-based liquid neural network[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(11): 3020-3024.
 - [91] Zhou Y, Zhu S, Zhou X, et al. Spaceborne-InSAR monitoring framework for large-span spatial structures based on temperature-based structural identification theory[J]. Engineering Structures, 2026, 358: 122573.
 - [92] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 78-89.
 - [93] 马悦. 融合小波约束的序贯 DS-InSAR 在废弃矿区地表形变长时序监测中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2025.
 - [94] 蒋弥, 丁晓利, 李志伟. 时序 InSAR 同质样本选取算法研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4767-4776.
 - [95] Zhou Y, Hao G, Chen J, et al. Long-term deformation monitoring of a steel-truss arch bridge using PSI technique refined by temperature field analysis[J]. Engineering Structures, 2024, 311: 118164.
 - [96] Chen C, Qin Q, Zhang N, et al. Extraction of bridges over water from high-resolution optical remote-sensing images based on mathematical morphology[J]. International journal of remote sensing, 2014, 35(10): 3664-3682.
 - [97] Chen C, Fu J, Lu N, et al. Knowledge-based identification and damage detection of bridges spanning water via high-spatial-resolution optical remotely sensed imagery[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(12): 1999-2008.
 - [98] Barker R M, Duncan J M, Rojiani K B, et al. Manuals for the design of bridge

- foundations: Shallow foundations, driven piles, retaining walls and abutments, drilled shafts, estimating tolerable movements, and load factor design specifications and commentary[M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 1991.
- [99] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁养护技术规范: CJJ 99—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [100] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG 2232—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [101] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁养护规范: JTG 5120—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [102] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [103] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [104] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [105] 中国工程建设标准化协会. 大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准: T/CECS 529—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [106] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [107] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 工程测量标准: GB 50026—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [108] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与桥梁结构监测技术规范: GB 50982—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [109] Lin S Y. Urban hazards caused by ground deformation and building subsidence over fossil lake beds: a study from Taipei City[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 2890-2910.
- [110] 杨建成, 何阳, 刘一鸣, 等. InSAR 技术支持下的长沙市 2015—2021 年地面沉降监测分析[J]. *测绘通报*, 2023(7): 125-130.
- [111] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [112] 陕西省住房和城乡建设厅. 城市桥梁监控监测技术规程: DB61/T 5027—2022[S]. 西安: 陕西省住房和城乡建设厅, 2022.
- [113] 顾箭峰, 咎建航, 杨宏印, 等. 基于响应面法的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥有限元模型修正[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2026, 42(1): 37-46.

- [114] Ren W X, Chen H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(8): 2455-2465.
- [115] Montgomery D C. 实验设计与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [116] 郭勤涛, 张令弥, 费庆国. 用于确定性计算仿真的响应面法及其试验设计研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(1): 55-61.
- [117] 马成良, 张海军, 李素平. 现代试验设计优化方法及应用[M]. 郑州大学出版社, 2007.
- [118] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J]. *数理统计与管理*, 2004, 23(3): 69-80.
- [119] 吕栋雷, 曹志耀, 邓宝, 等. 利用方差分析法进行模型验证[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(8): 46-48.
- [120] 方淑君, 单交龙, 张利勇, 等. 基于响应面法的钢管混凝土系杆拱桥有限元模型修正 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(10): 4114-4122. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20232083.
- [121] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [122] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long Short-Term Memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [123] 库向阳, 王邵鹏. 基于卷积-LSTM 网络的广告点击率预测模型研究[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(2): 193-197.
- [124] 刘干, 林士桢, 肖双双. 基于 LSTM-CNN 的露天矿粉尘浓度预测模型[J]. *工矿自动化*, 2026, 52(1): 73-79.
- [125] Gleeson P, Lung D, Grosu R, et al. c302: a multiscale framework for modelling the nervous system of *Caenorhabditis elegans*[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 373(1758).
- [126] Lee C, Park Y, Yoon S, et al. Brain-inspired learning rules for spiking neural network-based control: a tutorial[J]. *Biomedical Engineering Letters*, 2025, 15(1): 37-55.
- [127] Quintana Velázquez F M, Pérez Peña F, Galindo Riaño P L. Bio-plausible digital implementation of a reward modulated STDP synapse[J]. *Neural Computing and Applications*, 2022, 34(18): 15649-15660. DOI: 10.1007/s00521-022-07220-6.
- [128] Deng F, Zhao J, Cai Y. Blocked WDD-FNN and applications in optical encoder error compensation[J]. *Sci. China Inf. Sci.*, 2020, 63(7).

致 谢

落笔至此，意味着我在湖南大学的求学之路即将画上句号。曾无数次想象过写致谢的场景，以为会有“轻舟已过万重山”的狂喜，真到了此刻，心中却只有平静与无尽的感激。

饮水思源，师恩难忘。感谢我的导师周云，您对我提供的帮助贯穿从论文开题的反复推敲，到最终成稿的全过程，以严谨的治学态度和悉心细腻的决心雕琢我的学术成长，培养我对论文形式字斟句酌的习惯，回首一封封邮件，一条条语音，每一次研究进展都离不开您的支持与指导。研究过程中每当遇到难点而陷入僵局，但周老师总会耐心热情地解决问题，在每个难以跨越的障碍前及时解决问题，在每次取得进展时给予我鼓励并指明后续研究规划，在往后工作中，学生将继续秉持您的治学精神，不负师恩。

共砚同窗，情深谊长。感谢郝官旺博士在科研中给予的耐心解答与指导，感谢罗先明博士、周晓枫博士、朱师琪博士、肖寒博士、颜博超博士、叶一宁博士的多方协助，感谢杨晨烨、邹少豪、刘迎澳、张阳、陈祎林、刘森森、曹爽、徐骢荣、雷霆、刘程、李子卿、黄一钊等同门在各项工作中的团结协作。特别感谢室友高长天、顾文龙三年来的互帮、互助、互促与支持。

亲情似海，润物无声。感谢我的家人，十余载求学路上，你们始终无条件的支持与理解，为我筑起最坚实的后盾。特别感谢欧阳雯佩在我难过时的陪伴与鼓励，愿今后仍能与你携手同行，共创美好未来。

行文至此，毕业将至，湖大三载，受益良多。怀念课题组的每一次组会、研讨、试验、出差、聚餐、出游。祝恩师身体健康、生活美满、桃李满天、工作顺利、学术长青！愿课题组成果涌现、蒸蒸日上、勇夺一流！

万般不舍，终有别离。湖大，再见！

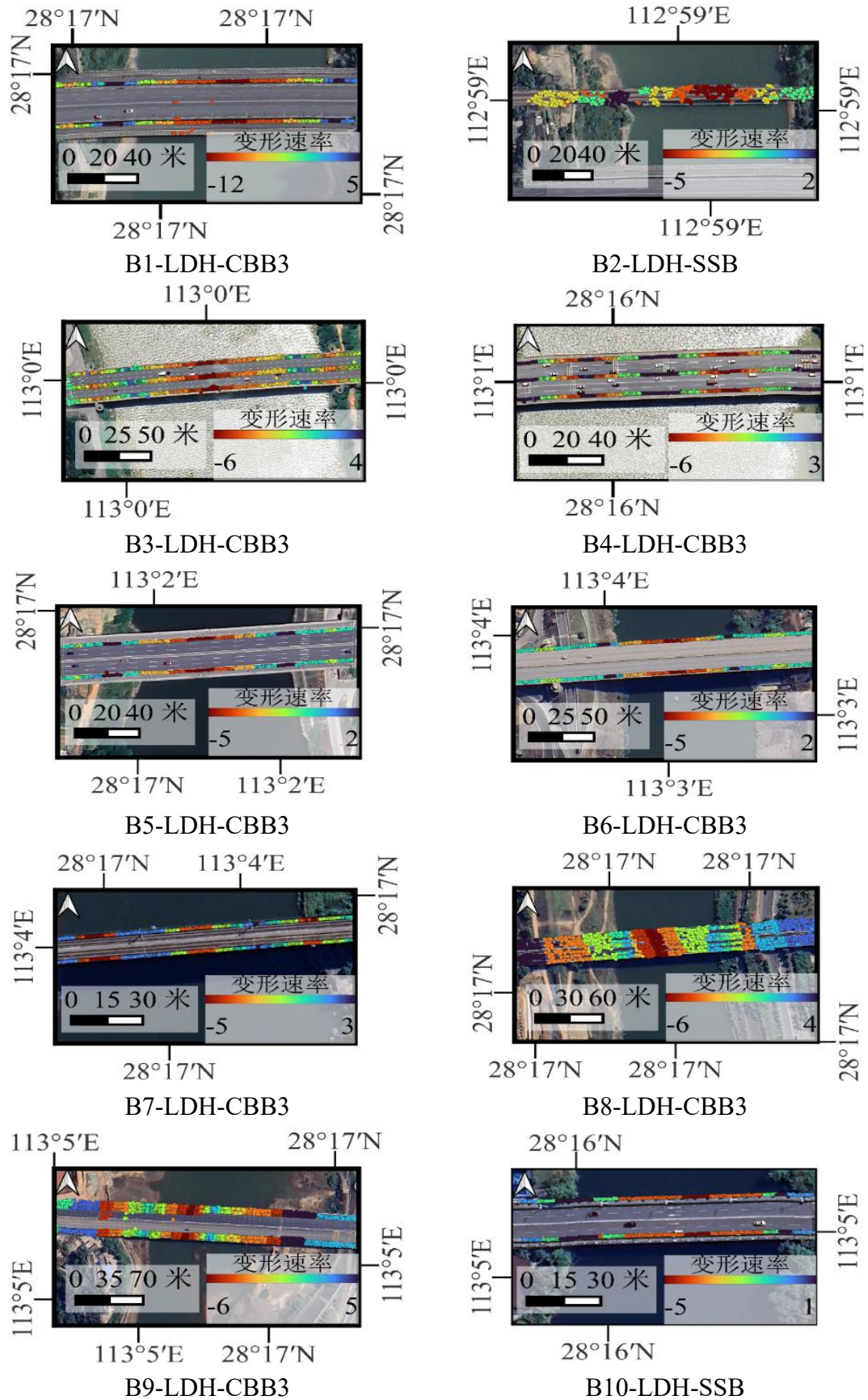
魏子青

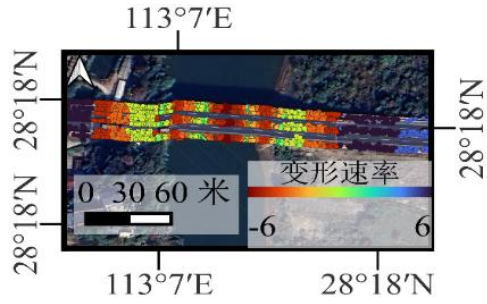
2026 年 4 月于湖南大学

附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文目录）

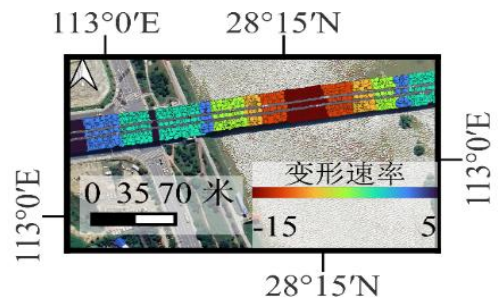
- [1] 周云,魏子青,郝官旺,邹少豪,余加勇等. 基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群结构变形识别与状态评估研究 [J]. 中国公路学报.(已录用)
- [2] Yun Zhou, Xiaowan Xu, Guanwang Hao, **Ziqing Wei**, Yingao Liu, Fan Yi. Temperature-based structural identification of long-span bridges using InSAR observation and meteorological shared data. Advances in Structural Engineering, 2025, 0(0): 1-23.

附录 B（长沙市桥梁群变形监测结果补充图）

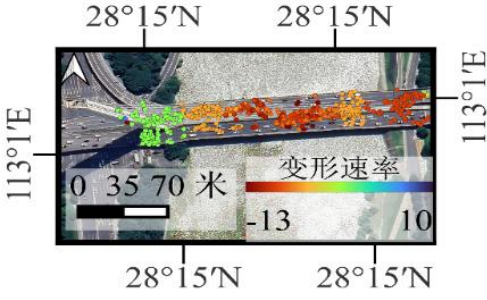




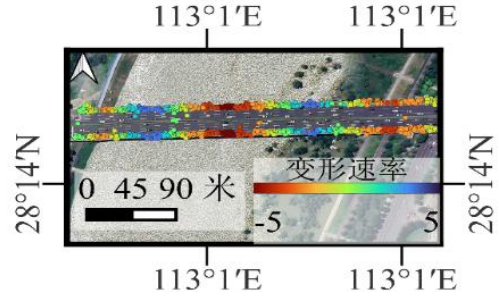
B11-LDH-CBB3



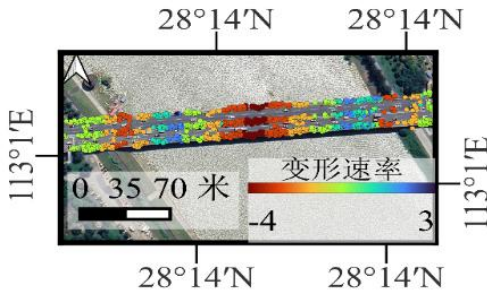
B12-LDH-CBB3



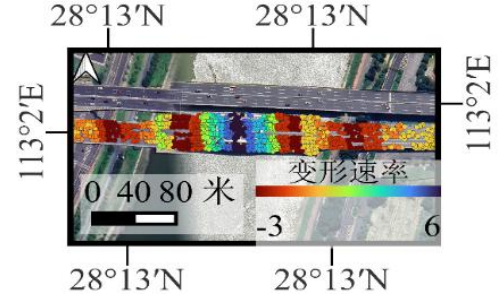
B13-LYH-CSB



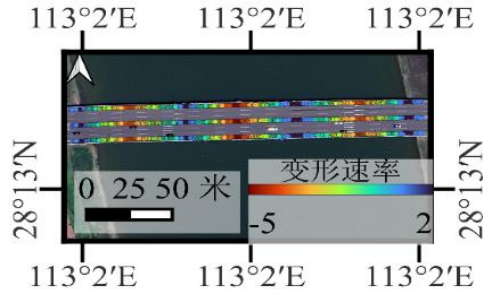
B14-LYH-CBB3



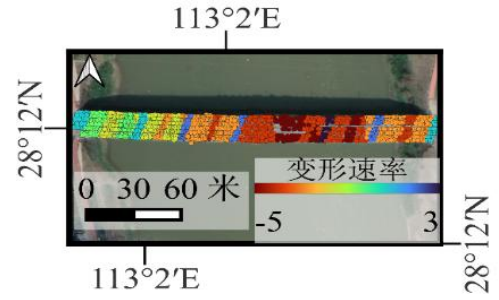
B15-LYH-CBB3



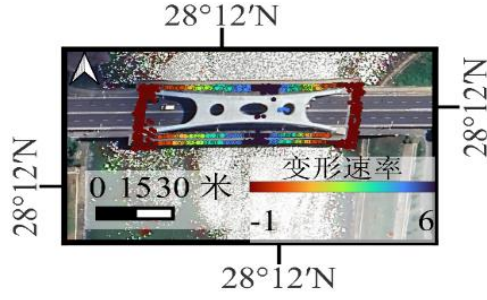
B16-LYH-SAB1



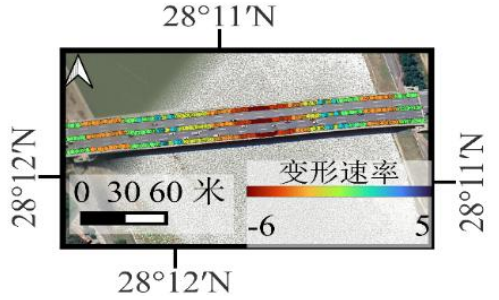
B17-LYH-CBB3



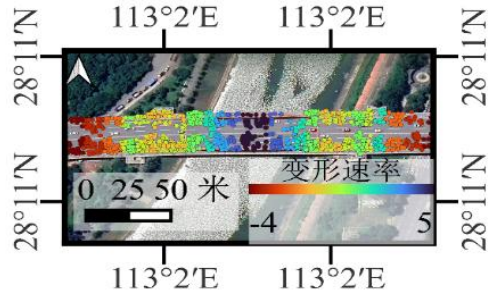
B18-LYH-CBB3



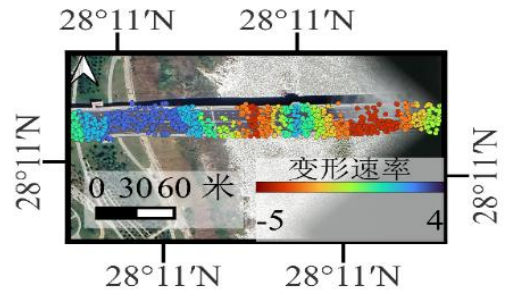
B19-LYH-SAB1



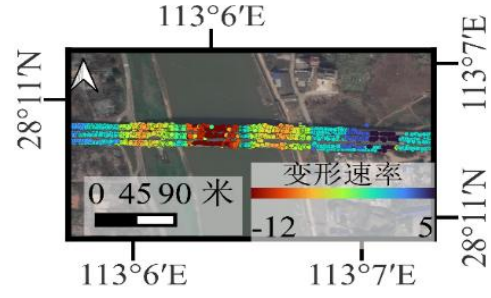
B20-LYH-CBB3



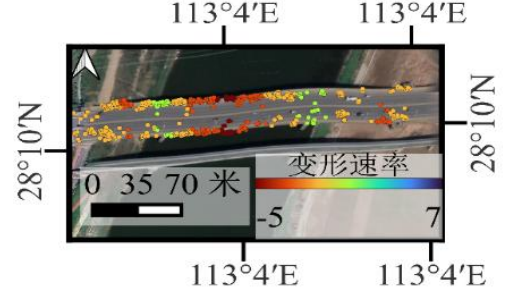
B21-LYH-GAB1



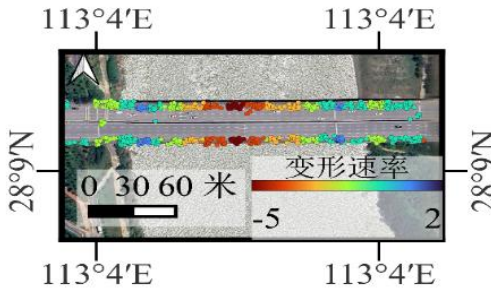
B22-LYH-CBB2



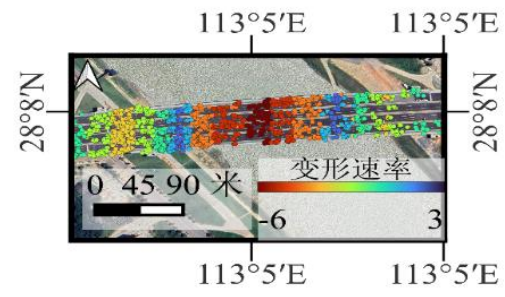
B23-LYH-CBB3



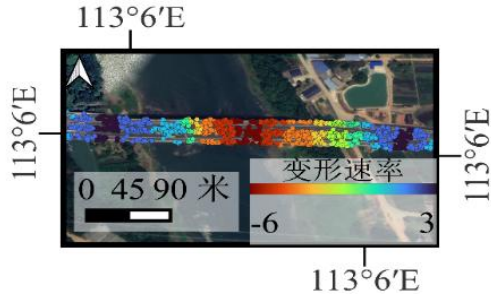
B24-LYH-SSB



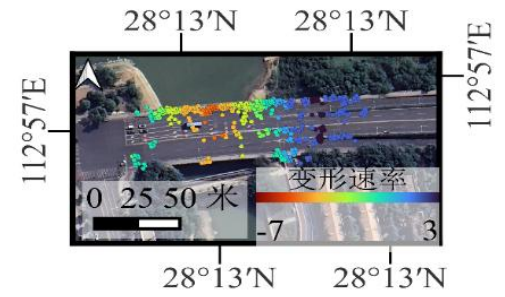
B25-LYH-CBB3



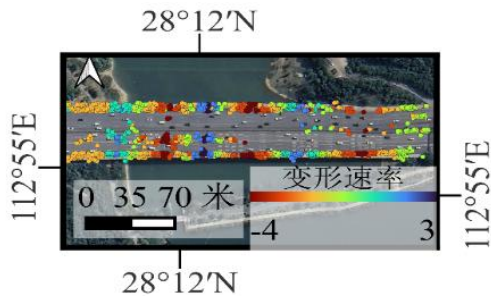
B26-LYH-CBB3



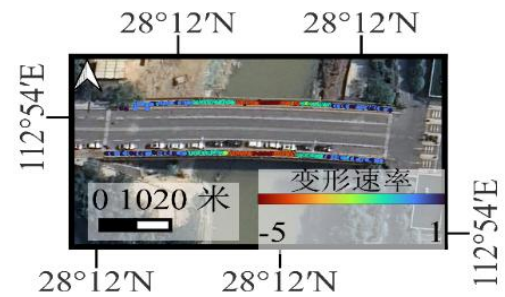
B27-LYH-CBB3



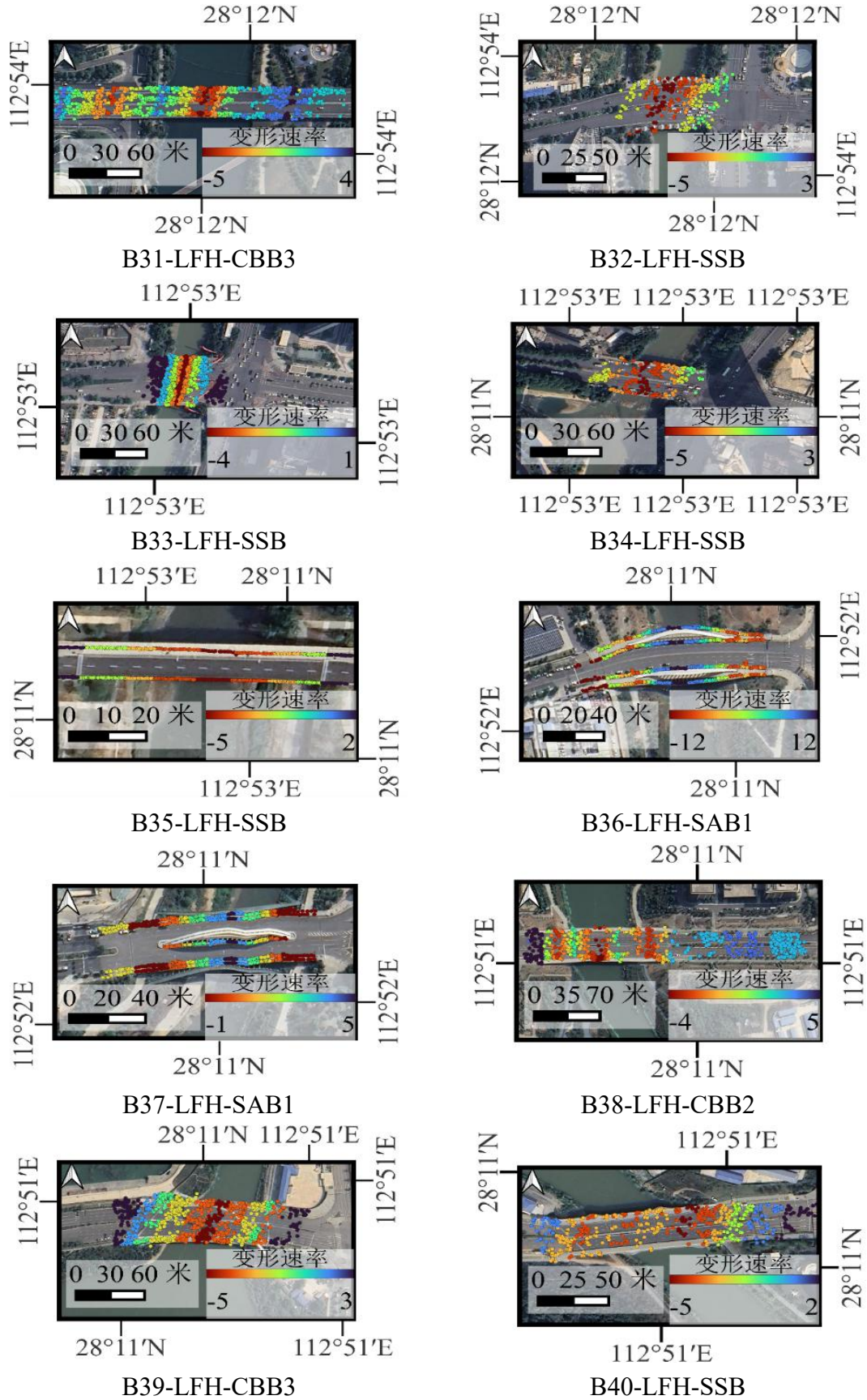
B28-LFH-SSB

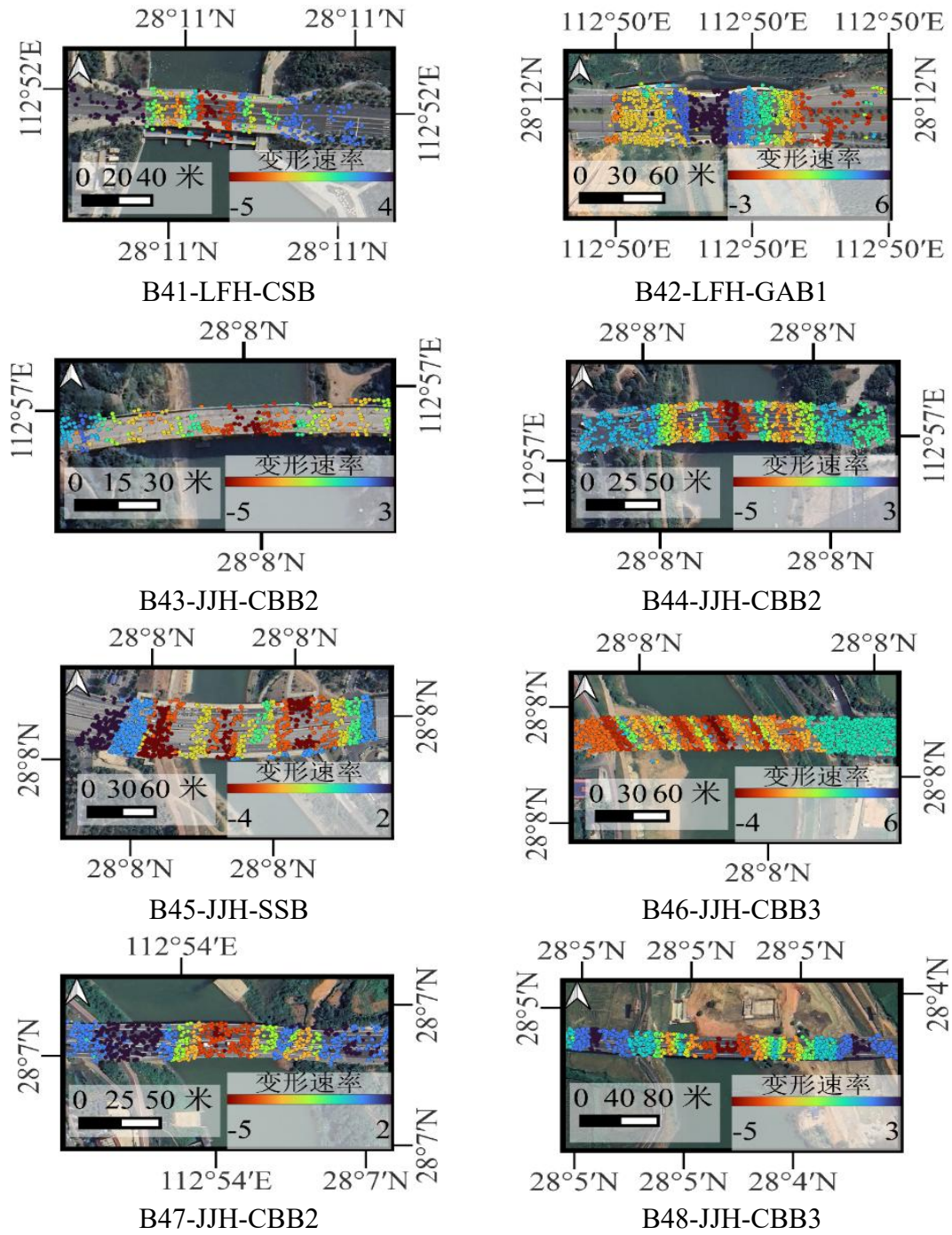


B29-LFH-CBB3

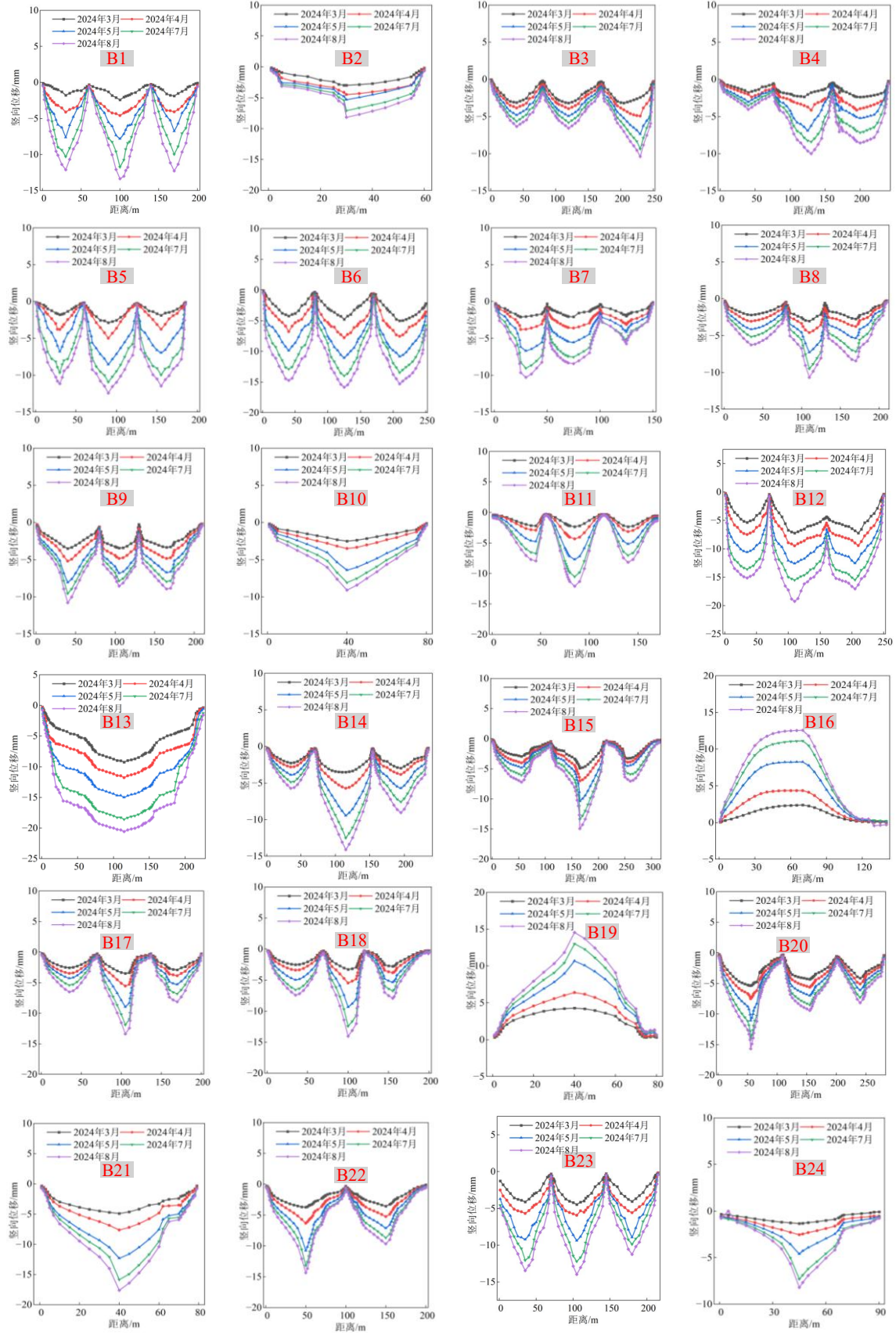


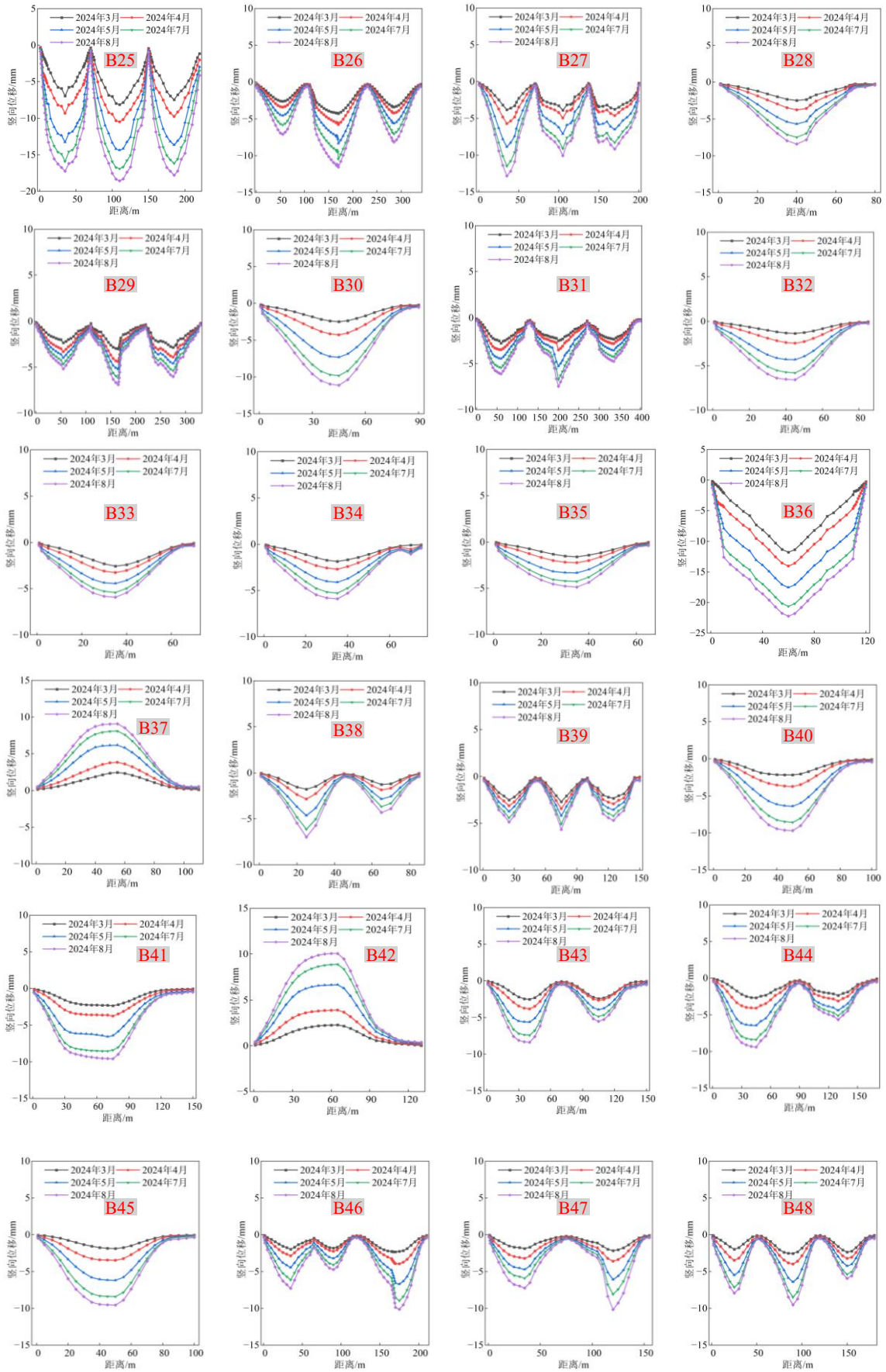
B30-LFH-SSB



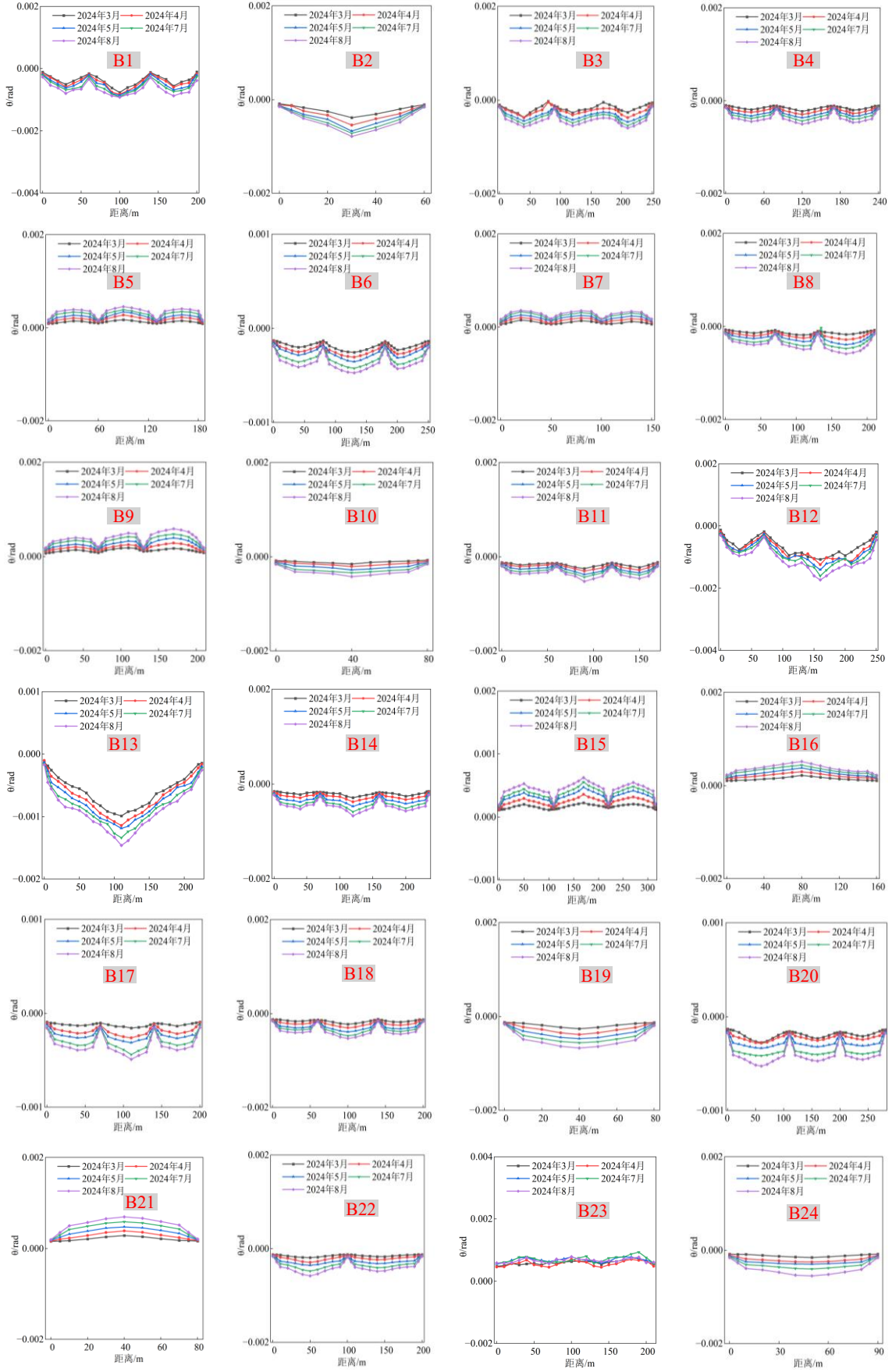


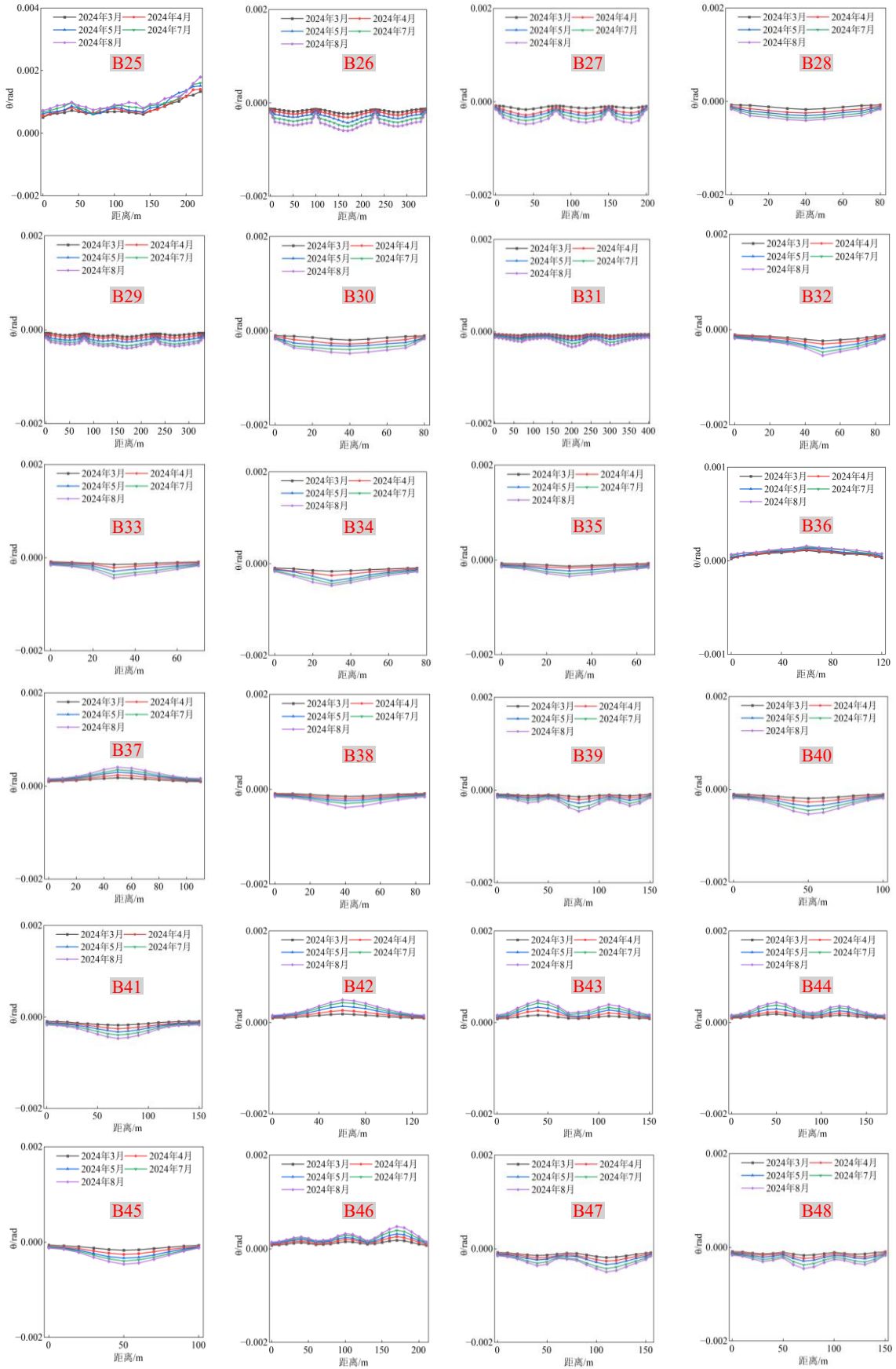
长沙市桥梁群变形速率图(mm/y)





长沙市桥梁群沉降曲线图





长沙市桥梁群横倾曲线图

答辩委员会名单

答辩委员会	姓名	职称	工作单位
主席	黄远	教授	湖南大学
委员	易伟建	教授	湖南大学
委员	余加勇	副教授	湖南大学
秘书	刘艳芝	副教授	湖南大学