



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的城市建筑群变形风险评估指标体系研究

作者姓名	邹少豪
指导教师	周云教授 谈忠坤教授级高工
培养单位	土木工程学院
专业类别	土木水利
专业领域	结构工程

学校代码 _____

学 号 S2301W0129 _____

密 级 公开 _____

湖南大学硕士学位论文

基于星载 InSAR 技术的城市建筑群变形风险评估指标体系研究

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）

湖南省应急厅应急管理科技项目（yjtkjxm_202406）

作 者 姓 名：邹少豪 _____

指 导 教 师：周云教授 _____

谈忠坤教授级高工 _____

培 养 单 位：土木工程学院 _____

专 业 类 别：土木水利 _____

专 业 领 域：结构健康监测 _____

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 _____

Research on Indicator System for Deformation Risk Assessment of Urban Building Clusters Based on Spaceborne InSAR Technology

by

Shaohao Zou

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

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil and Hydraulic

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisors

Professor Yun Zhou

Senior Engineer Zhongkun TAN

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： 2026 年 5 月 20 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： 2026 年 5 月 20 日

导师签名：

日期： 2026 年 5 月 20 日

摘 要

随着我国城市化进程加速，大规模的城市建设和既有建筑的持续老化，使得城市房屋建筑安全问题日益突出，面向大规模建筑群的安全监测与风险评估需求愈发迫切。星载合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）技术虽能提供毫米级广域变形数据，但其变形观测结果与工程领域建筑风险等级之间仍存在显著语义鸿沟。如何实现遥感监测信息向工程判据的有效转译，以支撑城市建筑群的精准风险识别与量化评估，仍是制约其工程化应用的关键问题。针对上述问题，本文以星载 InSAR 时序观测数据为基础，在融合建筑变形机理并对接工程规范的前提下，围绕建筑变形指标体系构建与风险评估方法开展系统研究。主要内容如下：

（1）针对 InSAR 技术在建筑变形评估应用中指标选取与阈值设定依据不清、缺乏统一认知框架的问题，完成风险评估指标阈值体系的系统溯源研究。详细阐述星载 InSAR 技术的发展历程、基本原理及其在城市建筑群宏观变形观测中的特性与局限；系统梳理建筑变形损伤评估指标体系由经验判定向理论分析及数值模拟发展的演进过程；对比分析国内外 20 余部工程领域与遥感领域关于建筑风险评估的规范标准，明确不同指标的物理内涵、理论依据及适用边界。

（2）针对 InSAR 监测数据难以直接转化为工程风险判据及现有评估方法工程可操作性不足的问题，构建面向星载 InSAR 观测的建筑群风险评估方法。定义兼具工程意义与 InSAR 观测适配性的 8 项风险评估指标；通过建筑单元有效归属 PS 点提取、指标标准化处理、层次分析法赋权以及模糊综合评价模型，实现了多指标的有效融合与建筑风险等级的定量表达；在长沙市开展实例应用，获取了建筑群风险空间可视化结果，并通过实地踏勘验证了方法的可靠性。

（3）针对建筑变形与结构损伤之间缺乏明确力学关联机制、评估指标阈值缺乏机理支撑的问题，完成建筑沉降致损伤的非线性有限元分析。通过构建典型填充墙框架结构的三维实体有限元模型，模拟不同沉降工况下结构的非线性损伤演化过程；分析不同沉降阶段下结构应力、应变分布规律及裂缝发展特征，揭示了建筑沉降与结构受力状态及损伤演化之间的内在联系；建立沉降量与结构关键受力状态之间的对应关系，从力学机理层面阐明了评估指标阈值的合理性。

本研究实现了 InSAR 监测信息向建筑结构安全风险的有效转译，为城市级建筑群安全常态化筛查与风险分级管控提供了系统化技术支撑，也为同类研究在数据驱动与工程规范衔接方面提供了实践参考。

关键词：建筑变形；风险评估；InSAR 技术；指标阈值；有限元分析

Abstract

With accelerated urbanization and the continuous aging of existing buildings in China, urban housing safety has become an increasingly prominent issue, leading to an urgent demand for safety monitoring and risk assessment of large-scale building clusters. Although spaceborne Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology can provide millimeter-level, wide-area deformation data, a significant semantic gap still exists between its deformation observation results and the building risk levels in the engineering field. How to effectively translate remote sensing monitoring information into engineering criteria to support precise risk identification and quantitative assessment of urban building clusters remains a critical challenge limiting its engineering application. To address this, this paper conducts a systematic study on the construction of a building deformation indicator system and risk assessment methods, based on spaceborne InSAR time-series observation data, by integrating building deformation mechanisms and aligning with engineering specifications. The main contents are as follows:

(1) To address the unclear basis for indicator selection and threshold determination, as well as the lack of a unified conceptual framework in the application of InSAR technology to building deformation assessment, a systematic retrospective study on the risk assessment indicator-threshold system was completed. The development history, fundamental principles, and observation characteristics of spaceborne InSAR technology in large-scale urban building deformation monitoring were comprehensively reviewed. The evolution of building deformation and damage assessment indicators—from empirical judgment to theoretical analysis and numerical simulation—was systematically summarized. Furthermore, more than 20 standards from both engineering and remote sensing domains were comparatively analyzed to clarify the physical meaning, theoretical basis, and applicability boundaries of different indicators.

(2) To address the difficulty in translating InSAR monitoring data into engineering risk criteria and the limited practical applicability of existing assessment methods, a risk assessment framework for building clusters based on spaceborne InSAR observations was established. Eight risk assessment indicators with both engineering significance and compatibility with InSAR observations were defined. Through effective assignment of PS points to building units, indicator standardization, weight determination using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the application

of a fuzzy comprehensive evaluation model, multi-indicator information was integrated to achieve quantitative expression of building g risk levels. A case study in Changsha was conducted, yielding spatially visualized risk distributions of building clusters, and field investigations further verified the reliability of the proposed method.

(3) To address the lack of a clear mechanical linkage between building deformation and structural damage, as well as the insufficient mechanistic support for indicator thresholds, a nonlinear finite element analysis of settlement-induced structural damage was completed. A three-dimensional solid finite element model of a typical frame–infill wall structure was developed to simulate the nonlinear damage evolution under different settlement conditions. The stress–strain distribution and crack propagation characteristics at different settlement stages were analyzed, revealing the intrinsic relationship between building settlement, structural response, and damage evolution. Additionally, the correspondence between settlement magnitude and key structural response states was established, providing a mechanical basis for the rationality of the proposed assessment indicator thresholds.

This research achieves an effective translation of InSAR monitoring information into building structural safety risks, providing systematic technical support for routine safety screening and hierarchical risk management of urban building clusters, and offering practical reference for similar studies in data-driven and engineering standard integration.

Key Words: Building deformation; Risk assessment; InSAR technology; Indicator thresholds; Finite element analysis

目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	IV
插图索引	VII
附表索引	IX
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 SAR 卫星系统与 InSAR 技术发展历程	3
1.3 星载 InSAR 技术在建筑安全评估领域中应用研究现状	7
1.3.1 InSAR 多尺度地表变形致建筑损伤事后评估研究	7
1.3.2 InSAR 建筑变形监测与风险识别预警方法	10
1.3.3 InSAR 技术建筑风险评估工程化所面临关键问题	13
1.4 现有研究存在的问题	16
1.5 本文研究内容	16
第 2 章 InSAR 建筑变形识别与风险评估理论基础	18
2.1 引言	18
2.2 InSAR 技术基础理论	18
2.2.1 InSAR 技术基本原理	18
2.2.2 PS-InSAR 技术原理	21
2.2.3 InSAR 建筑变形观测特性	22
2.3 建筑沉降变形机理与控制指标阈值体系溯源	24
2.3.1 经验分析方法	26
2.3.2 理论分析方法	28
2.3.3 有限元方法	29
2.4 国内外相关规范与标准对比分析	30
2.4.1 工程领域规范体系	30
2.4.2 现有 InSAR 规范体系	33
2.5 本章小结	34
第 3 章 城市建筑群综合风险评估方法	35
3.1 引言	35
3.2 建筑群变形风险评估方法框架	35
3.3 建筑单元有效归属 PS 点提取	37

3.4 建筑结构变形风险指标阈值体系	38
3.4.1 评估指标体系构建	38
3.4.2 指标计算与标准化	41
3.5 模糊综合评价	44
3.5.1 指标权重确定	44
3.5.2 隶属度函数构建	46
3.5.3 综合风险评估模型	47
3.5.4 综合风险等级评定	48
3.6 本章小结	49
第 4 章 建筑群变形监测与风险评估应用	51
4.1 引言	51
4.2 研究区与数据来源	51
4.2.1 研究区概况（长沙市）	51
4.2.2 SAR 与辅助数据说明	52
4.3 数据处理	53
4.3.1 SAR 影像时序处理	53
4.3.2 PS 点与建筑空间匹配	55
4.4 研究区风险评估结果	56
4.4.1 单项指标统计特征分析	56
4.4.2 综合风险等级判定与结果对比分析	57
4.4.3 风险判定差异成因分析	59
4.4.4 建筑风险评估示例及实地勘探	61
4.5 本章小结	65
第 5 章 典型建筑结构沉降致损伤有限元分析	67
5.1 引言	67
5.2 有限元模型建立	67
5.2.1 ANSYS 有限元方法	67
5.2.2 模型几何参数与材料信息	68
5.2.3 材料本构与损伤准则	70
5.2.4 建模方法与单元类型	72
5.3 工况设计与加载实施	78
5.3.1 沉降工况设置	78
5.3.2 沉降加载方法	79
5.3.3 求解策略与收敛控制	79
5.4 结构响应与损伤演化规律分析	81

5.4.1 模型验证	81
5.4.2 各工况下结构应力分布特征	82
5.4.3 各工况下结构裂缝发展特征	83
5.4.4 结构关键损伤状态的临界沉降阈值	85
5.5 本章小结	87
结论与展望	88
参考文献	90
攻读学位期间的学术或实践成果	104
致谢	105

插图索引

图 1.1 国内房屋倒塌事故	1
图 1.2 InSAR 变形观测示意	3
图 1.3 系列 SAR 卫星与 InSAR 技术提出年份	4
图 1.4 不同空间波长形变信号	9
图 1.5 Liu 等建筑不均匀沉降平面拟合示意图	12
图 1.6 以 InSAR 变形为输入的有限元分析结果	12
图 1.7 独栋建筑物下沉 InSAR 变形信号模拟	15
图 1.8 本文研究内容	17
图 2.1 InSAR 观测几何原理示意图	20
图 2.2 房屋建筑传力体系	22
图 2.3 建筑变形指标示意	25
图 3.1 基于 PS-InSAR 的建筑群变形风险评估方法框架	36
图 3.2 缓冲区设定示意	37
图 3.3 建筑变形指标定义	39
图 3.4 建筑倾斜平面拟合示意	42
图 3.5 标准化风险指数定义	44
图 3.6 隶属度分布函数	47
图 4.1 研究区范围	52
图 4.2 SAR 影像成像时刻对应温度数据	53
图 4.3 PS-InSAR 时空基线图	54
图 4.4 研究区沉降速率	54
图 4.5 建筑归属 PS 点数量分布	55
图 4.6 单项评估指标的风险等级分布统计	56
图 4.7 研究区建筑风险评估结果空间分布与统计特征	58
图 4.8 评估结果相关性分析	59
图 4.9 D 类建筑模糊隶属度分布	59
图 4.10 不同去模糊化方法风险评估结果核密度估计 ($n=3$)	60
图 4.11 不同去模糊化方法风险评估结果核密度估计 ($n \in [3,10]$)	60
图 4.12 示例建筑分布	61
图 4.13 示例建筑①实地勘探情况	63
图 4.14 示例建筑②实地勘探情况	64
图 4.15 示例建筑③实地勘探情况	65

图 5.1 框架结构平面及梁柱截面布置 (单位: mm)	68
图 5.2 填充墙框架结构三维几何模型 (单位: mm)	69
图 5.3 混凝土材料应力-应变关系	70
图 5.4 钢筋应力-应变关系	71
图 5.5 砌体应力-应变关系	72
图 5.6 梁柱截面分区图	74
图 5.7 Willam-Warnke 五参数破坏准则	75
图 5.8 地基模型	76
图 5.9 结构有限元模型图	78
图 5.10 沉降柱分布位置	78
图 5.11 自重作用下结构响应	81
图 5.12 不同沉降幅度下各工况结构 Von Mises 应力云图	83
图 5.13 不同沉降幅度下各工况结构裂缝分布云图	85
图 5.14 钢筋应力达到屈服强度结构竖向位移	86
图 5.15 混凝土应力达到抗压强度结构竖向位移	86

附表索引

表 1.1 常用 InSAR 技术简介与对比	7
表 1.2 已有参考工程规范的研究	13
表 1.3 不同波段 SAR 表现特征及 InSAR 精度支持	13
表 2.1 建筑不同沉降行为的影响因素与特征	24
表 2.2 变形指标定义	26
表 2.3 最大沉降量相关建议值	26
表 2.4 建筑损伤等级分类及相关指标阈值	29
表 2.5 国内外主要工程规范对比	30
表 2.6 不同规范建筑风险评估指标及阈值对比	31
表 3.1 建筑风险评估指标阈值	39
表 3.2 层次分析 1-9 标度法含义	45
表 3.3 综合风险等级判定方法	49
表 4.1 数据介绍	52
表 4.2 研究区建筑归属 PS 点数量统计	55
表 4.3 建筑风险评估指标判断权重矩阵	57
表 4.4 示例建筑变形指标实测值	62
表 4.5 示例建筑评估指标计算结果	62
表 4.6 示例建筑风险评估结果	63
表 5.1 结构材料主要力学性能参数	69
表 5.2 模型单元类型及其用途	73
表 5.3 特殊方向钢筋实常数参数取值	73
表 5.4 梁柱截面各区域钢筋情况	74
表 5.5 工况设置	79
表 5.6 不同沉降施加方法对比	79
表 5.7 不同 N-R 迭代方法对比	80

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

居安方能思危，屋固始可邦宁。城市房屋安全是国家治理体系现代化进程中关乎国计民生的重大议题。改革开放以来，中国完成了人类历史上规模最大、速度最快的城镇化跨越，城镇化率从 1978 年的 17.92% 跃升至 2025 年的 67.89%^[1]。根据第一次全国自然灾害综合风险普查公报数据，全国存量城乡房屋建筑及市政设施超 6 亿栋，扣除农村辅助用房、在建工程以及不属于房屋建筑的杂项后，仍有城乡房屋建筑 3.54 亿栋，总建筑面积达 1280 亿平方米^[2]。随着早期建设的房屋逐渐老化，而新增房屋的速度相对放缓，导致老旧房屋在存量房屋中的占比不断攀升。截至 2022 年年底，我国既有房屋中建成年份超过 30 年的接近 20%，预计到 2040 年，将有近 80% 的房屋进入设计使用年限的中后期，成为“老小区”^[3]。此外，庞大房屋建筑总量下自建房占比居高，由于设计和施工不规范，建筑结构初始缺陷较多。房屋质量“先天不足”，加之受建筑长期服役下结构性能劣化以及各类人为和环境因素扰动耦合作用，城乡房屋建筑安全隐患持续累积、倒塌事故呈多发态势，并表现出一定的空间聚集特征，其分布规律与人口经济密集区存在显著地理重叠^[4]。如图 1.1 所示，2021 年 7 月，苏州市四季开源酒店辅房发生坍塌，造成 17 人死亡、5 人受伤，直接经济损失约 2615 万元；2022 年 4 月，长沙某自建房发生倒塌事故，造成 54 人死亡，9 人受伤，直接经济损失 9077.86 万元；2023 年 7 月，齐齐哈尔市第三十四中学校体育馆由于突发坍塌，造成 11 人死亡，直接经济损失 1254.1 万元。



我国城市住房面临的时代背景和安全管控严峻形势，催生了存量房屋建筑群的结构健康监测与风险评估的重大需求。近年来，国家相关部门相继出台多项政策文件，全面部署房屋安全隐患排查和专项整治行动。2022 年，国务院办公厅印发《全国自建房安全专项整治工作方案》，部署开展“百日行动”，提出力争 3 年完成自建房安全隐患整治，并逐步建立城乡房屋安全管理长效机制^[5]。2024 年，住房和城乡建设部正式提出房屋体检、房屋养老金、房屋保险三项制度，构建“预防-处置-保障”的闭环管理机制，并在全国多地开展试点，为房屋全生命周期安全提供有力制度保障^[6-7]。同年 12 月，中共中央办公厅、国务院办公厅发布的《关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》提出，要提升房屋建筑管理智慧化水平，建立房屋全生命周期安全管理制度，健全房屋建筑安全隐患消除机制^[8]。2025 年 7 月，中央城市工作会议召开，明确提出我国城镇化已从快速增长期转向稳定发展期，城市发展已由大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段，要以“城市更新”为重要抓手，大力推动城市结构优化、动能转换、品质提升^[9]。上述制度体系与城市更新政策的有机衔接，共同构成了存量时代城市高质量发展的韧性基底。围绕城市公共安全建设重大战略需求，岳清瑞等^[10]从城市安全问题所涉及的三大基本要素出发，提出了以“风险源-承灾体-减灾力”为核心的城市安全理论架构，构建了城市安全管理的新路径。城市建筑群作为城市核心“承灾体”，其安全管控运维体系水平直接决定城市“减灾力”实际效能。

对于房屋建筑安全评估与风险排查，建筑结构变形监测至关重要，建筑的变形特征不仅是荷载作用下的表观响应，更是反映结构内部力学行为与性能状态的重要指征，是评估潜在损伤与失效风险的关键依据。目前，传统与新兴建筑变形监测技术日趋成熟，包括大地测量（全站仪、水准仪）光学测量（近景摄影测量、激光点云扫描）接触传感测量（振弦式传感器、光纤光栅阵列）以及空间对地测量（GPS、北斗/GNSS）等，尽管上述方法在单体建筑监测上取得良好的应用成效，然而面对既有的庞大建筑体量，存在布设密度受限、运维成本高昂及响应延迟等系统性缺陷，难以满足城市广域建筑群大范围、常态化风险监测预警需求，亟需寻找一种兼具高效率与成本效益的新型监测方法。

作为当代遥感技术的前沿应用，InSAR 技术以其全天候、全天时作业的能力，覆盖范围广，测量精度高，无需事先布设传感器，且可追溯历史变形等显著优势，弥补了传统离散点状、接触式监测方法的不足，为广域城市建筑变形监测提供了全新方案。在全球各国的高度支持和广泛的工程实际需求持续推动下，合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）卫星系统及 InSAR 技术在过去数十年里取得了长足进步。目前，星载 InSAR 技术已广泛应用于自然灾害评估、农林资源管理、城市建筑和基础设施监测等多个领域^[11]。对于建筑评估，星载 InSAR 技术通探测毫米级精度的建筑及周边环境变形信号，并以具有三维空间信息的时序监测

点形式与建筑结构要素对应相关联，可为建筑在受各类自然或人为扰动作用下的潜在风险识别、早期预警与长期稳定性评估提供可靠时空数据支持，实现城市房屋建筑安全管控从注重被动灾后救助向主动灾前预防转变。随着新一代 SAR 卫星系统性能的提升、InSAR 处理算法的持续精进以及遥感监测技术与结构工程理论的深度融合，基于星载 InSAR 技术的建筑风险监测评估范式正逐步从“大范围趋势分析普查”向“精细化单体结构诊断”演进。然而，仅仅观测到房屋变形并不等同于直接获得房屋风险值，如何将海量 InSAR 变形观测数据转化为符合工程语义的建筑风险评估指标，打通向建筑安全风险等级转译的“最后一公里”，是当前研究核心重点和难题。

1.2 SAR 卫星系统与 InSAR 技术发展历程

InSAR 技术是近 30 年来基于 SAR 技术与干涉测量技术发展起来的一种空间对地观测技术^[12]。其中，SAR 的概念始于 20 世纪 50 年代，是一种通过发射微波脉冲并接收反射信号，进而记录待测地面分辨率单元的幅值和相位信息的主动式微波遥感测量方法，幅值反映了地物目标的散射特性，相位则蕴含了传感器与观测目标间的距离信息。干涉测量技术则源于 1801 年的“杨氏双缝干涉实验”原理，通过对同一区域在不同时间点的两幅 SAR 影像进行复共轭相乘提取同一目标对应的两个回波信号间的相位差，并结合轨道数据与成像几何模型获取目标三维空间位置及变形信息。如图 1.2 所示，卫星沿轨道方向运行，以入射角 θ 斜向观测地面目标。雷达波沿视线向（Line of Sight, LOS 向）往返传播，InSAR 所获取的形变信息本质上为目标点在 LOS 方向上的位移分量 D_{LOS} ，其为该点真实三维位移分量（南北向位移 D_N 、东西向位移 D_E 及垂直向位移 D_U ）的投影组合。

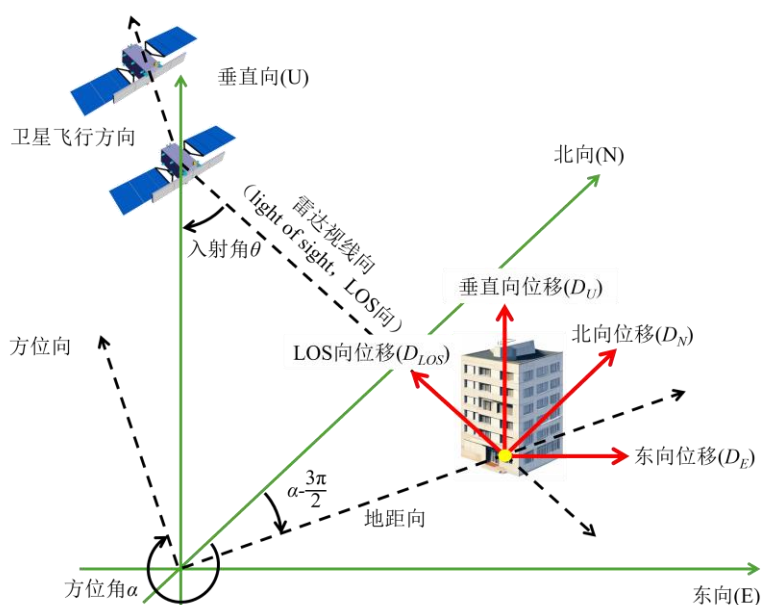


图 1.2 InSAR 变形观测示意

1978 年, 美国航空航天局发射了世界上第一颗载有 SAR 的海洋卫星 Seasat-A, 该卫星为期 105 天的飞行首次获得了大量地球表面雷达干涉测量数据, 标志着 SAR 技术正式进入太空对地观测的新时代。此后, SAR 卫星系统经历了长足发展。20 世纪 80-90 年代, 美国通过航天飞机搭载 SIR-A、SIR-B、SIR-C/X-SAR 等成像雷达, 开展了系列空间雷达遥感试验, 逐步验证了多波段、多极化、多入射角成像的可行性。1995 年, 加拿大发射了首颗商业对地观测卫星 RADARSAT-1, 标志着 SAR 由试验性应用迈向商业化运行, 主要服务于地球环境与资源监测。进入 21 世纪以来, 随着雷达电子技术与航天平台能力的提升, SAR 卫星发展进入快速发展阶段。其技术特征由早期的单极化、单模式、单波段及固定入射角, 逐步向多极化、多模式、多波段及可变入射角方向拓展。典型代表包括意大利 COSMO-SkyMed, 德国宇航局 TerraSAR-X、加拿大 RadarSAT-2、日本 ALOS-PALSAR-2、欧空局 Sentinel-1A/B 以及我国高分三号卫星等一系列高分辨率 SAR 卫星。在观测能力方面, 卫星影像空间分辨率已由早期的十米至数十米级提升至米级(条带模式), 并在聚束及凝视模式下达到亚米级水平; 同时, 星座化部署显著缩短了重访周期, 使 SAR 观测逐步进入高空间分辨率与短重访周期协同发展的新阶段。全球 SAR 数据获取能力得到显著增强, 极大拓展了 InSAR 技术对特定监测需求的适应性, 并有力推动了 InSAR 多样化子技术的衍生。图 1.3 总结了三种常用波段相关 SAR 卫星及系列 InSAR 技术提出年份信息。

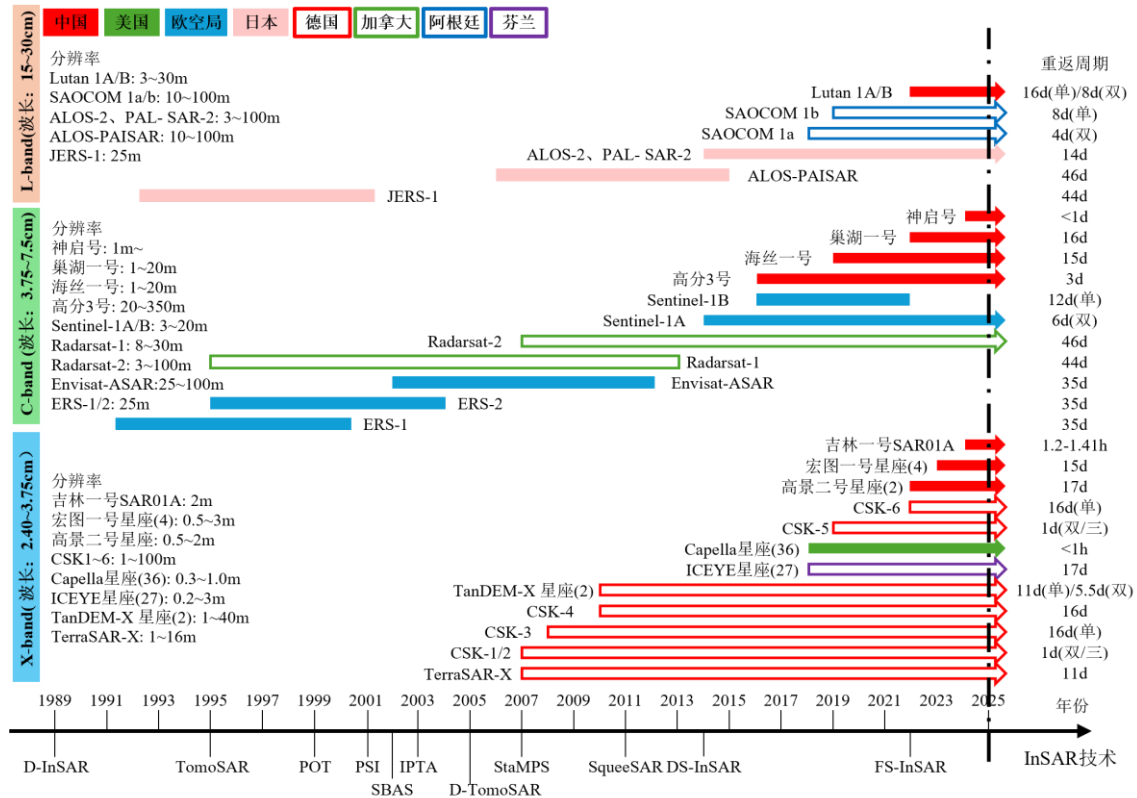


图 1.3 系列 SAR 卫星与 InSAR 技术提出年份

InSAR 技术的概念最初于 20 世纪 60 年代末提出, 主要被用于地形测绘和高程数据的获取。Rogers 等^[13]率先将无线电波干涉测量技术应用到金星和月球表面的观测, 成功提取了月球表面高程信息。Graham^[14]首次提出了 InSAR 在地形制图方面应用的设想, 并利用机载合成孔径雷达数据获取了能满足 1: 25 万地形图精度要求的高程数据, 开创了 InSAR 技术在对地观测中获取地表三维信息的先河。在此基础上, 20 世纪 90 年代初, 差分 InSAR (Differential InSAR, D-InSAR) 技术问世, 通过引入外部数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 或三轨、四轨差分去除地形相位实现了地表变形监测。Grabriel 等^[15]首次提出 D-InSAR 技术, 实现了地面高程和形变信号的分离, 并论证了该技术厘米级的地表形变探测能力, 但其工作未受到足够重视, 直至 Massonnet 等^[16]使用 D-InSAR 技术成功测量了美国加州 Landers 地震形变场后, 其形变监测能力才受到学术界的广泛认可。

传统 D-InSAR 技术监测精度易受大气延迟误差、时空去相干、轨道误差及噪声等因子的影响。为克服这些问题, 20 世纪 90 年代末, 时序 InSAR (Time Series InSAR, TS-InSAR) 技术应运而生, 其本质在于通过多时相 SAR 影像的干涉叠加, 利用多个干涉对的冗余观测以补偿上述系统性误差, 从而更准确地提取地物目标形变信息的时间序列^[17]。最早的为堆叠 InSAR (InSAR-Stacking)^[18], 基本假设是研究区域内的地表形变速率呈线性变化, 通过对一系列解缠后的差分干涉图进行加权平均, 同时估计 LOS 向的平均形变速率, 叠加后的大气误差相位随干涉图的数量呈平方根倍增长而形变相位呈线性增长, 因而提高了信噪比, 且独立观测值越多, 效果越佳。随着技术的演进, 更多精细化 TS-InSAR 方法被提出并得到广泛应用, 具有代表性的包括以单一影像为主影像的永久散射体方法 (Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)^[19]和以多幅影像为主影像的小基线集方法 (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)^[20]。

PS-InSAR 技术通过统计分析方法选取在时间上散射特性相对稳定、回波信号相对较强的永久散射体 (Persistent Scatterer, PS) 作为观测点, 包括建筑物、裸露岩石以及人工角反射器等硬目标, 并采用合理构网方法构建 PS 点稀疏网络, 为后续相位解缠提供稳定的拓扑结构, 而网络中弧段对应其两端 PS 点的相位差, 最终通过对网络弧段的参数化建模解算目标形变信息, 可有效抑制时空失相干、大气效应等引起的测量误差。SBAS-InSAR 技术通过设定时间空间基线阈值, 将满足阈值要求的时间序列 SAR 影像数据分为多个具有较短时空基线的相互独立的干涉子集, 以保证干涉对的相干性, 随后, 基于形变速率的最小范数准则, 利用奇异值分解算法对多个干涉子集的干涉相位进行联合解算从而提取地表形变信息。与 PS 点相对应的是分布式散射体 (Distributed Scatterer InSAR, DS-InSAR) 目标, 多分布在自然场景中如裸地、农田及稀疏植被覆盖区域。这类目标由多个相邻像素的散射贡献形成, 其单像素相位可能不稳定, 但在统计意义上表现出一

定的时空一致性。与之相匹配的 DS-InSAR 核心思想在于,采用同质样本提取算法准确识别同质点,再根据同质点的统计特性进行时序 DS 相位优化,降低噪声影响,最终将优化后的 DS 目标与 PS 目标一起融入传统 PS-InSAR 数据处理框架从而获取高精度、高空间分辨率的时序形变产品,有效弥补了 PS-InSAR 技术在低相干区域监测点密度不足的缺陷。事实上,DS 与 PS 经历了“统一—分化—再统一”的发展历程^[21]。早期的 D-InSAR 及 Stacking-InSAR 技术在处理过程中并未明确区分散射体类型,DS 与 PS 被同时作为观测目标。直至 PS-InSAR 技术的提出,二者的物理界限被明确划分,针对 DS 与 PS 的处理方法也随之分化。此后,尽管 SBAS-InSAR 和 StaMPS 等技术重新引入了 DS-InSAR 的理念,但学术界更多是以相干、非相干目标加以区分。直至第二代永久散射体技术 SqueeSAR^[22]的发布,明确了 DS-InSAR 的基本框架,促使了 DS 与 PS 的再次统一。在此基础上,Goel 等^[23]遵循 SqueeSAR 中 DS 选取方法提出了经典的 DS-InSAR 技术。

由于 SAR 仅在距离向法平面的一维方位向上形成合成孔径,所以 SAR 图像为三维场景在“方位向—距离向”二维平面内的投影,多个斜距相同而高度不同的观测目标散射信号将被压缩到同一分辨单元内从而出现叠掩现象,限制了 SAR 影像在城市建筑密集区域的监测应用^[24~25]。层析 SAR (Tomographic Synthetic Aperture Radar, TomoSAR) 技术通过将合成孔径原理延伸至高程向,利用在距离向法平面内排列的多幅存在细微基线差异的 SAR 影像数据,可有效分离叠掩散射体并重建其高程信息,实现了观测目标“方位—距离—高度三维”高分辨率成像,因此也被称为 3D-SAR 技术^[26]。然而,三维 TomoSAR 成像模型中,观测目标的高度变化被视为一种时间去相干因素而补偿掉了,因而无法获取其时变信息^[27]。在此基础上,Lombardini 等^[28]基于目标线性变形假设对 TomoSAR 模型进行拓展,提出了差分层析 SAR (Differential Tomographic Synthetic Aperture Radar, D-TomoSAR) 技术,可进一步反演目标 LOS 向变形速率,实现了对目标“方位-距离-高度-时间”四维成像,也被称为 4D-SAR 技术。在此基础上,Reale 等^[29]通过将建筑热膨胀系数引入 4D-SAR 成像模型提出了考虑温度非线性变形的 5D-SAR 技术。Zhu 等^[30]则提出了一种 3+M 维 SAR 层析成像模型(M 为指定的目标变形模型阶数),有效分离了建筑的线性变形和季节周期性变形速率,充分展现了 TomoSAR 技术在城市多维动态监测应用中的巨大发展潜力。

不同 InSAR 技术由于在观测目标选择、时序建模假设、干涉组合策略及形变信息提取方式等方面存在差异,其在监测精度、时间连续性及空间覆盖能力等方面亦存在各自的优势与局限(表 1.1)。因此,针对不同工程场景与监测需求,合理选取适宜的 InSAR 技术方法,或融合多源技术开展协同分析,有助于充分发挥各类方法的互补优势,从而提升形变监测结果的可靠性与工程适用性。

表 1.1 常用 InSAR 技术简介与对比

技术	技术核心	优势	缺陷
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	监测精度易受大气延迟及时空失相干影响
InSAR-Stacking	对多幅解缠的差分干涉图进行加权叠加以提高信噪比	可获取变形速率	无法获取变形时间序列，变形非线性特征建模能力弱
PS-InSAR	选择稳定反射特性和高信噪比 PS 点时间连续性，可提高解缠精度	可获取时序变形数据	影像数量要求高，非城区监测点密度不足，空间连续性差
SBAS-InSAR	选择小时空基线子集的差分干涉图抑制去相干现象	空间连续性，可提取非对基线选择敏感，线性变形	不适用于长周期连续监测
D-TomoSAR	利用细微基线差异影像多次观测同一目标解决叠掩现象	“方位-距离-高度-时间”四维成像	影像数量要求高，基线分布不均会引入误差传播
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	DS 目标相位稳定性较差，大数据集计算量大

1.3 星载 InSAR 技术在建筑安全评估领域中应用研究现状

1.3.1 InSAR 多尺度地表变形致建筑损伤事后评估研究

各种人为和自然因素会诱发不同范围和剧烈程度的地表变形，进而造成上部建筑物受损。根据变形影响范围的不同，可将地表变形划分为区域尺度、城市尺度及地壳尺度，相应地，不同尺度下的变形特征及其对建筑结构的影响机制亦存在显著差异。在此基础上，可借助 InSAR 监测数据，对不同空间尺度地表变形作用下的建筑损伤开展事后评估分析。

(1) 区域级尺度：

对于地下矿藏开采、城市管隧施工、城市内基坑开挖、城市填土雨水浸润等导致的地表变形，尽管在诱发机理、影响范围等方面存在一定差异，但在诱发的沉降形式上具有相似性，表现为区域性的“沉降槽”、“沉降盆”或“沉降漏斗”，且可使用相应的预测模型对沉降剖面曲线进行定量描述。此类地表变形包括垂直和水平变形两个分量，基于这两个分量又可导出倾斜、曲率、水平变形、扭曲和剪应变等变形参数^[31]。由于形变范围较大，故建筑损伤评估流程通常为，基于有限的地表形变实测数据认识地表移动规律，在此基础上确定预测参数并选择合适的地表变形预测模型构建地表变形场，最终提取关键变形参数结合规范限值或经验损伤关系对建筑损伤风险进行研判^[32]。

上述评估方法的准确性取决于两个关键因素：

其一在于对地表变形及建筑变形预测的准确性。以隧道开挖引起地表变形预测为例，目前普遍使用的预测模型为 Peck 经验公式^[33]，但其获取的为不考虑上部建筑物或其他结构物影响情况下的天然地表变形。事实上，由于土-结构相互

作用 (Soil Structure Interaction, SSI) 的存在, 即建筑主体结构及其下覆地基土体作为一个变形相互协调与力学响应 (包括静力和动力响应) 双向耦合的整体, 二者在内力、变形等方面存在相互影响和相互制约的现象。而 Peck 公式因未考虑建筑刚度对土体变形的约束作用, 会造成对地表变形量的高估。另外, 地表变形量与建筑物实际变形量并不一致, 尽管已有研究表明地表变形与建筑变形存在一定的同步性, 但由于建筑自身特征及土壤性质的差异, 建筑变形与地表变形间存在着复杂的相对变形关系^[34~35]。针对以上问题, 有学者通过考虑土体与建筑的相对刚度对地表形变预测模型进行了修正^[36]或提出了相关的分析模型用于计算地表变形引起的建筑变形^[37], 虽然在一定程度上考虑了建筑物与地基土之间的制约关系并提高了相应的变形预测精度, 但面向更复杂精细的 SSI 效应所导致地表-建筑变形关系问题仍有待进一步研究。而 InSAR 技术直接观测由于矿藏开采^[38]及地下管隧施工^[39]诱发的地表变形, 进而提取相关变形参数, 可有效提高建筑物损伤评估结果的可靠性。

其二在于评估指标选取及阈值设定的科学性。针对地下煤矿开采诱发的地表变形的建筑损伤评估, 我国特别制定了相应的规程^[40] (简称“三下”规范), 采用倾斜、曲率和水平变形 3 个地表变形值作为划分建筑物损坏等级的依据。“三下”规程以地表变形值硬性划分建筑损伤等级, 未能充分考虑不同建筑的变形抵抗能力差异, 存在一定的局限性。崔希民等^[32,41]对国内外由于矿藏开采活动诱发地表变形导致的建筑物损伤评估方法进行了系统梳理对比, 并在继承“三下”规范以地表形变为核心指标的基础上, 构建了综合考虑建筑物长度这一结构变形抵抗能力影响因素的建筑损害评价分类体系, 完善了该规程在考虑结构自身属性方面的不足, 同时体现了建筑损害评价需从变形阈值判定向结构响应分析转变。

(2) 城市级尺度:

城市地下水超采和工程建设活动将导致不同程度的城市级地表沉降, 作为不可逆的环境和资源损失, 其已成为国内外广泛关注的一项地质灾害。在全球 48 个人口最多的沿海城市中, 几乎所有城市下沉速度都超过了海平面上升速度^[42]。例如, Ao 等^[43]采用 InSAR 技术对中国 82 座城市进行了形变监测, 研究表明, 中国有近一半的主要城市每年地表沉降速度超过 3mm, 而主要原因是地下水超采以及城市上部庞大的建筑体量。

地表沉降将衍生各种次生灾害, 且对城市本身及其上部建筑物与基础设施造成的重大危害不易被察觉, 亟需可靠手段实现有效的预防管理。尽管 InSAR 技术为此提供了有力工具, 但仍面临着重大挑战, 即 InSAR 全形变场的分离。城市级尺度的地表快速下沉产生的长空间波长、大幅度形变信号将掩盖相对较短空间波长、较小幅度的建筑变形, 从而对建筑风险评估造成干扰。为此, Solano 等^[44]率先提出了一种空间频域带通滤波方法, 用于分离不同空间波长形变信号, 并应

用于全球沉降速率最快的墨西哥城，提取了由于地下水抽取导致的城市尺度大幅度沉降所掩盖的城市建筑与基础设施真实变形，如图 1.4 所示。Wang 等^[45]同样采用谱分析方法对国内沉降较为严重的上海市进行了多尺度形变分析，深度解译了不同形变信号的诱发机制。由此可见，开展 InSAR 全形变场分离可提升建筑变形监测的精细化程度，并为结构损伤的物理机制解析提供关键数据支撑。一方面，从多个尺度识别沉降的来源和本质，有效提高了建筑变形机制解译可靠性；另一方面，分离了由于大范围地表运动引起的建筑刚体位移影响，直接提取建筑真实变形，这对于状态评估至关重要。

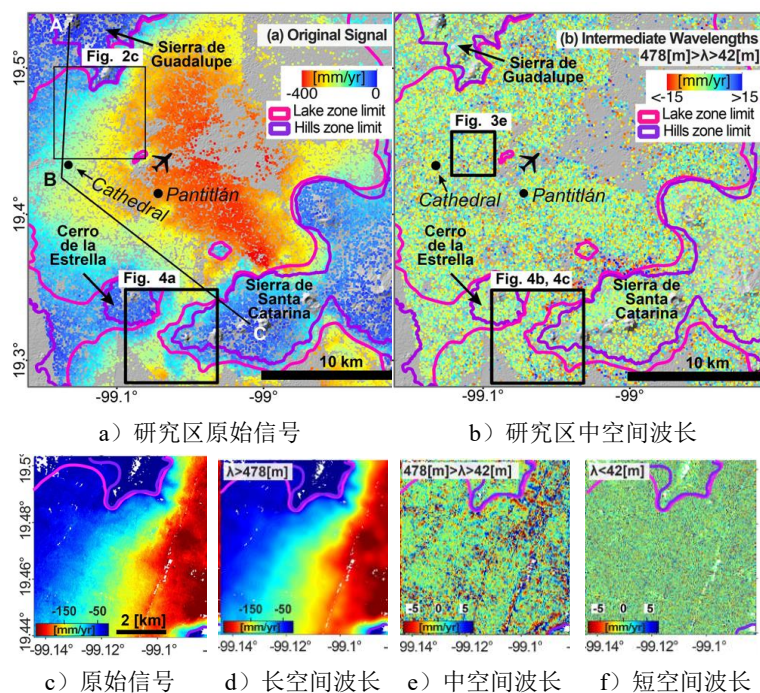


图 1.4 不同空间波长形变信号

(3) 板块级尺度:

大陆漂移的驱动力（如地幔对流）持续推动地球岩石圈板块或块体间发生缓慢、长期的相对运动（碰撞、挤压与张拉），塑造了地球表面的地质特征，并在板块边界处形成了全球主要地震带^[46]。地震是断层面上长期积累的弹性应变能突发释放的结果，引起强烈地面振动的同时伴随着地面裂缝和变形，其本身属于一种自然现象，而引发灾害的载体为建筑。

在土木工程领域，建筑的震害评估主要集中于基于地震动力学的单体建筑结构响应分析，尽管也有学者致力于基于简化代理模型的城市建筑群动力响应分析与损伤预测^[47~48]，但很少有学者关注地表同震变形量与建筑物毁损程度之间的关系。相关研究表明，建筑毁损率及毁损程度与地震导致的地表变形梯度呈明显正相关^[49~50]。在基于 SAR 数据的建筑震害评估中，由于缺乏结构理论支持，则多聚焦于利用地震前后 SAR 影像及其干涉产品开展“像素”或“目标”级震前-同

震强度和相干性等参数变化检测以定性识别毁损建筑^[51]，亦仅有少量研究关注同震变形量与建筑毁损程度的关系。例如：Li 等^[52]构建了以结构类型分类的建筑损伤-同震变形数学回归关系，研究表明，不同结构类型建筑损伤程度与同震变形量间存在函数形式差异，但整体呈显著正相关趋势。Du 等^[53]则认为建筑倒塌趋势与地震时的板块移动方向一致，由此将 LOS 向同震变形分解为地震方向变形，并依据变形大小划分建筑震损等级。

综上，建筑物震害评估仍存在着以下不足：一方面在于，现有研究对同震形变量这一关键数据的利用尚不充分；另一方面在于，InSAR 技术获取的同震变形场亦同时包含地震时的板块运动和建筑物自身变形等多个形变信号，且显然前者量级远大于后者，严重干扰了对建筑真实损伤状态的判断。因此，实现混合形变信号的分离以提取建筑结构的真实变形信息，可更准确表征建筑震损程度，进一步提高评估结果可靠性。

1.3.2 InSAR 建筑变形监测与风险识别预警方法

在城市尺度的结构变形风险筛查预警中，星载 InSAR 技术已成为开展大范围时序监测分析的重要手段。星载 InSAR 技术能够获取建筑变形的时间序列和空间分布信息，兼具时序观测精度与空间覆盖优势。如何将 InSAR 监测数据转化为结构安全信息，现有研究形成了不同的技术路线。

（1）基于单点时序变形的风险识别方法：

根据海恩法则，任何重大事故的发生，其必然存在一定的前期表征。星载 InSAR 技术在建筑长时间序列变形获取方面具有独特优势，可用于建筑事故发生后致因调查溯源与事故发生前风险预警。文献^[54-56]长期监测数据发现，倒塌建筑在事故发生前存在明显的变形加速趋势抑或是时序变形曲线的跳跃性突变。进一步统计特征分析表明，灾变建筑区域监测点时序形变曲线表现出不稳定性，通过分析整体变形趋势和最终演变趋势差异，可有效识别存在潜在风险的建筑^[57]。综上所述，基于 InSAR 技术的建筑变形时间序列分析有望实现对建筑潜在风险隐患的早期识别与风险预警。

InSAR 技术提供时序高精度、空间高覆盖密度（城市区域每平方千米可达数万个监测点，单个建筑结构覆盖数十至数百个监测点）数据的同时，亦带来了挑战：其一，人工逐点判读监测点时序变形信号效率低且易受主观影响；其二，建筑变形物理机制与时序曲线数据特征关联困难，即何为“异常”定义模糊。为此，亟需融合智能识别算法，实现风险建筑及其异常变形模式的自动化或半自动化精准辨识，以充分挖掘 InSAR 技术在城市大范围建筑风险筛查中应用潜力。Kuzu 等^[58]将建筑变形归纳为趋势异常、噪声异常及台阶异常三种位移时间序列信号，并提出基于无监督学习的自动化建筑异常变形检测方法。Raspini 等^[59]通过识别变

形时序曲线最近 150 天内的异常变化时间节点 T_b ，分别计算 T_b 前后变形速率 V_1 、 V_2 ，最后计算差异变形速率 $\Delta V = V_1 - V_2$ ，当 $\Delta V > 10\text{mm/年}$ 时判定为异常点。这两种路径的核心是，均在于将海量 InSAR 数据传统人工定性判读，转化为基于明确规则或模型的智能化定量诊断。

(2) 融合结构理论的风险识别方法：

为了更系统全面地利用建筑变形信息评估建筑安全状态，实现更准确可靠的建筑风险识别排查，一些学者沿用或引入了结构领域诸多变形指标和相关理论。其中，应用最广泛的为基于相对变形理念衍生的系列变形梯度指标。相比于单一点位的绝对变形，此类相对变形指标更能反映建筑的损伤状态。研究表明，建筑物的裂缝开展方向几乎总是垂直于沉降梯度方向，且损伤程度与梯度大小呈现明显正相关性^[60~61]。类似地，相较于沉降速率，利用沉降速率梯度进行建筑风险识别与等级评估，表现出更好的判别能力^[62]。另外，考虑到水平拉伸对建筑的危害性更强，左世城等^[63]提出一种结合垂直向和水平向变形梯度的风险评估方法。

现有研究中利用 InSAR 变形数据由角扭曲（沉降梯度）指标向建筑风险等级转译时，通常采用直接分析法和栅格化坡度分析法两种主流方法。其中，直接分析法利用原始 InSAR 监测点时序变形数据及其空间坐标信息，直接以两点间累计沉降差值与其距离之比计算角扭曲。可最大程度保留变形信息并避免中间处理误差，结果可靠性高，但需配套开发自动化算法以支撑大规模数据处理。栅格化坡度分析法则首先将监测点时序变形数据直接或经插值转化为规则栅格，再借助地理分析系统（Geographic Information System, GIS）坡度分析工具^[64]获取角扭曲。因其依托现有成熟软件化工具，可大范围自动计算、应用门槛低且空间可视化能力强。然而，栅格化过程受栅格尺寸限制会对密集分布的监测点数据进行聚类处理，局部关键变形细节可能被掩盖而导致结果偏差。两种方法均根据计算结果参照既定阈值划分建筑风险等级。截至目前，基于各类变形梯度指标的建筑风险识别方法，其可行性与可靠性均已在实际工程应用中得到了充分验证。

然而，在建筑损伤程度的量化评估上，由于缺乏统一的建筑风险等级分类基准，导致不同研究在评估指标选取及阈值界限设定上不尽相同，难以横向对比。虽然 Cabral 等^[65]通过对沉降梯度观测值进行简单线性分类划分风险等级，具有统计意义，但是不具备理论依据。为此，有学者基于土木工程领域已有研究给出的经验宏观变形阈值，给出了相应的风险分级方法^[66~68]。在此基础上，开发相应的自动化评估流程算法，可实现“建筑级”风险等级的自动评估^[69]。这种方法在一定程度上提高了风险识别的准确性，但完全依赖数据驱动的评估方式忽视了建筑结构本身的物理特性差异，可能导致评估结果存在偏差。另外，变形指标计算时数据处理方法的选择亦会影响与工程规范的有效对接。例如：Drougkas 等^[70]和 Liu 等^[71]均利用了相关拟合方法基于 PS 点构建了反映建筑变形状态的特征平面。

其中, Drougkas 等^[70]基于拟合平面进一步计算了角扭曲、挠度比、倾斜及拉应变, 并在依据已有经验阈值进行风险评估时充分考虑了建筑的结构类型, 但采用不同指标得到的风险评估结果却存在一定差异。而 Liu 等^[71]则基于拟合平面构建了反映建筑倾角的不均匀沉降指数, 研究发现, 使用不均匀沉降指数 0.0009 为阈值可以较好识别出高风险建筑, 而不均匀沉降指数低于 0.0002 的建筑则相对安全, 这显然与工程上常用的 0.002 倾斜限值存在数量级的差异。

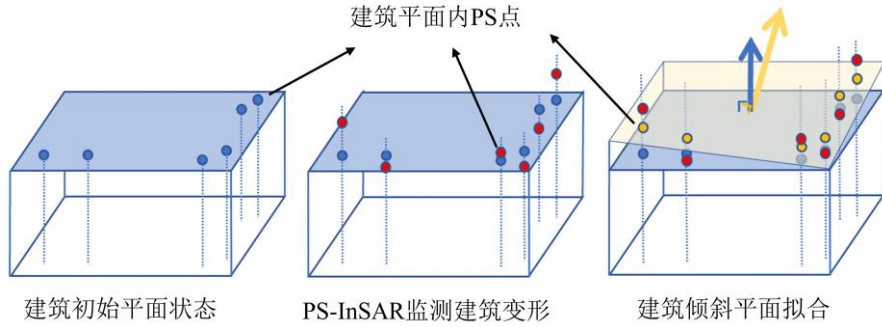


图 1.5 Liu 等^[71]建筑不均匀沉降平面拟合示意图

进一步地, 通过引入结构力学简化模型, 可建立建筑宏观变形与构件微观应变间定量数学关联, 在此基础上使用相关应变指标直接描述材料破坏更能反映建筑损伤。部分学者采用已有的简支深梁^[39]或层压板梁^[72]模型, 结合 InSAR 变形数据计算结构拉应变, 并依据相应的拉应变损伤评估体系研判建筑损伤等级。此外, 还可结合有限元技术以不同时刻下建筑的变形为输入(图 1.6), 分析建筑构件和整体的应力状态, 进而明确建筑在各阶段下的损伤程度^[73]。但此方法目前仍仅限于单体建筑风险评估, 而难以拓展应用于大范围建筑群, 原因为: 一方面其对建筑先验信息的完整性依赖性高; 另一方面完整建模情况下计算资源的需求量庞大。为此, 有必要进一步分析已有理论分析模型在仿真模拟分析中作为代理模型的可行性, 或提出适用性更强的建筑简化代理模型, 工程界已有应用于建筑群地震动力损伤评估的弯剪耦合模型^[48], 具有一定参考意义。

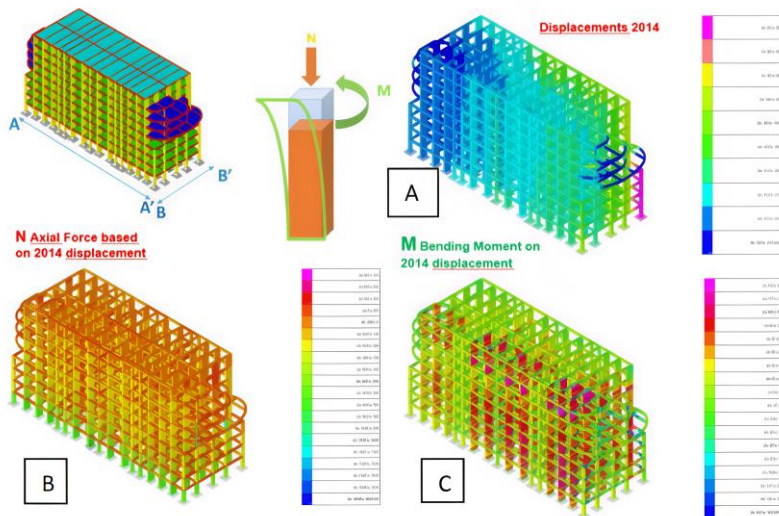


图 1.6 以 InSAR 变形为输入的有限元分析结果^[73]

（3）参考工程规范的风险识别方法

尽管结合 InSAR 技术和结构理论已有多种方法用于建筑安全风险评估，并取得了可观的评估效果。但受技术本身以监测变形为核心的固有限制，现有研究仍多聚焦于数据驱动，且缺乏相应理论支撑，导致评估效果欠佳，漏报和误报率较高。为此，已有学者尝试将监测结果与现有工程规范相结合，以期提高评估结果的可靠性，如表 1.2 所示。可见，利用 InSAR 技术获取建筑变形信息并据此进行风险评估的已有研究中，虽都参考了现行规范，但所选规范却横跨土木、地灾、能源及遥感等多个学科领域，相对应的评估指标与阈值亦相差较大。如何考虑不同领域规范乃至相同领域不同规范之间的兼容性和差异性，建立一套统一的评价标准和框架仍是进一步提高评估效率与准确性亟需解决的一大研究重难点。

表 1.2 已有参考工程规范的研究

文献	参考标准	研究区域	主要指标	风险阈值
Li 等 ^[38]	《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》 ^[40]	安徽矿区	倾斜、地表曲率	详见规范
费等 ^[74]	JGJ 125-2016《危险房屋鉴定标准》 ^[79]	安徽矿区	累计倾斜率、近期沉降及倾斜速率	表格数据
夏等 ^[75]	GB 50292-2015《民用建筑可靠性鉴定标准》 ^[80]	安徽矿区	年沉降速率	24mm/年
Han 等 ^[76]	GB/T 40112-2021《地质灾害危险性评估规范》 ^[81]	郑州城区	年沉降速率	30mm/年
Xu 等 ^[77]	GB/T 40112-2021《地质灾害危险性评估规范》 ^[81]	郑州城区	累计沉降量、年沉降速率	40mm，30mm/年
朱等 ^[78]	T/CECS 1165-2022《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》 ^[82]	长春城区	累计沉降量、累计倾斜率及沉降速率、倾斜速率	详见规范

1.3.3 InSAR 技术建筑风险评估工程化所面临关键问题

（1）监测精度与误差约束：

InSAR 技术监测精度是决定其用于建筑风险评估的可行性与否的关键，主要取决于数据源及数据处理方法的选择，表 1.3 总结了不同波段 SAR 表现特征及 InSAR 精度支持差异。尽管 D-InSAR 技术厘米级及 TS-InSAR 技术的毫米级理论精度甚至更高，已得到实例研究验证^[83]，满足用于建筑安全初步评估的条件。

表 1.3 不同波段 SAR 表现特征及 InSAR 精度支持

波段	分辨率	穿透能力	大气影响	监测精度	
				D-InSAR	TS-InSAR
L 波段	20-50m	强	小	10mm	5-8mm/年
C 波段	5-20m	中等	中等	8mm	2-5mm/年
X 波段	1-5m	弱	大	5mm	2-3mm/年

然而, InSAR 技术在建筑变形监测中的毫米级精度为相对精度, 而非绝对精度, 其相对性体现在时间和空间两个维度。时间上, InSAR 技术是基于影像间相对相位的测量而无法测定影像的绝对相位, 其结果表征为目标点相对于选定参考时刻(通常以数据集首景影像时刻为零变形基准)的位移变化。空间上, 在解算相位反演变形时又需选定一个或一组稳定无变形的目标作空间参考, 所有测点变形量均为相对于参考点的差值。若参考点本身存在微小位移, 则整个场域的变形测量结果会产生一致性偏移, 在多帧变形场拼接时此偏移还会积累为系统性误差^[84]。除前述相对性影响外, InSAR 技术在实际工程应用中, 其测量精度还受多种系统性、随机性误差源共同影响^[85]。鉴于此, 对最终监测结果的精度验证仍是必不可少的环节, 可借助外部监测数据如地面水准测量数据或 GNSS 站点数据对 InSAR 计算结果进行校核。根据《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016)相关规定, 对于以保障建筑安全为目标的变形测量, 建议设定建筑变形允许值的 $1/20 \sim 1/10$ 作为测定的中误差阈值^[86]。对于 InSAR 测量结果误差超出预定阈值的情况, 应当采取相应的措施, 以确保监测和评估结果的可靠性。

(2) 监测点定位不确定性:

InSAR 技术与传统监测方法的显著差异在于监测点位置分布的不确定性。一方面, 执行监测作业前, 传统变形监测中监测点通常依据建筑结构受力特征、变形敏感部位及规范要求进行人工布设, 其位置明确、物理意义清晰且具备良好可控性。而 InSAR 技术 PS 点则由建筑表面几何结构、材料电磁散射特性及观测几何关系共同决定, 本质上为雷达成像过程中形成的稳定散射中心, 通常难以直接对应具体结构构件, 且并不一定严格落于建筑物本体之上。PS 点空间分布具有明显随机性与场景依赖性, 这种特性在大范围监测中具备优势, 但在对单一房屋建筑的监测中却表现出明显的局限性, 易造成监测点密集分布于非目标区域, 而目标建筑上则可能出现监测点稀疏甚至无有效监测点覆盖的情况^[87]。为此, 可基于数值模拟逆向开展不同损伤机制下的结构变形反演, 确定状态评估所需最优监测点数量和位置, 削弱对高密度数据依赖性的同时保证了评估结果的准确性^[88]。

另一方面, 监测任务完成后, 对获取的变形信号进行科学解译是监测数据完成成果转化的关键。其中监测点三维定位精度对于能否准确识别单个变形信号所对应的建筑物特定部分变形至关重要。杨梦诗等^[89]对该问题进行了系统梳理, 发现时序 InSAR 相干点定位精度一般为米级。此外, 由于电磁波的复杂散射特征, 会造成变形信号三维位置与其物理真实性相矛盾, 导致变形起源识别不明, 高阶多次散射信号所反映的真实变形量亦难以确定, 如图 1.7 所示, 限制了 InSAR 技术在单体建筑变形精细化监测中的应用。因此, 确定“散射体—观测场景—建筑结构/构件”之间归属关系, 是当前弥合传统工程观测与 InSAR 观测结果差异, 进而提高建筑风险评估可靠性的关键^[90]。

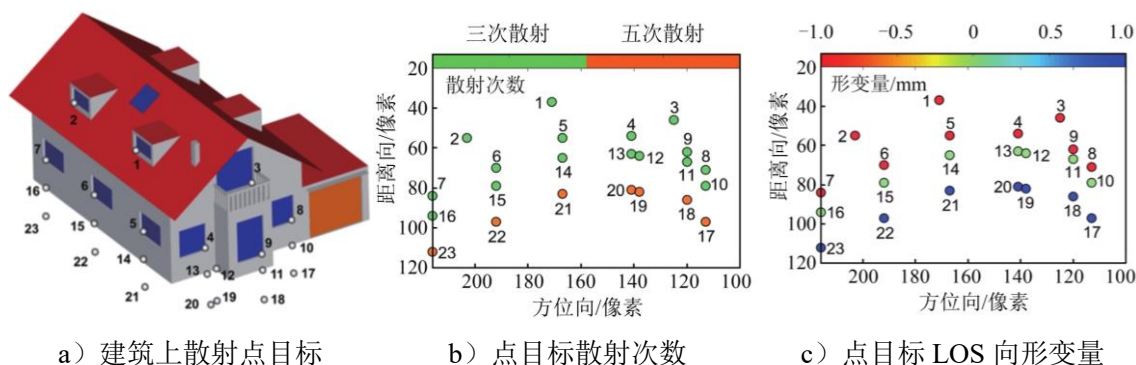


图 1.7 单栋建筑物下沉 InSAR 变形信号模拟^[89]

(3) 监测点空间密度问题

鉴于 InSAR 只能直接获取观测目标一维 LOS 向变形信息，几乎所有的建筑变形指标都需要通过二次处理才能得到。如结合多源数据进行三维形变分解、融合升降轨数据忽略南北向变形作二维分解，获取建筑的竖向和东西向变形信息，在某些情况还可忽略水平位移只考虑竖向位移^[91]。而对于其他评估指标如倾斜、沉降差等，则需要通过建筑区域内两个或多个监测点间的相对变形差异和空间位置信息进一步进行空间分析获取。无论以何种方式利用建筑变形信息进行安全风险评估，均须确保足够的 InSAR 监测点数量。针对监测点密度不足问题，使用高分辨率 SAR 卫星影像数据是最直接有效的解决方案。然而，高分辨率 SAR 数据带来高监测点密度的同时，亦加重了城市高层建筑密集区域的叠掩效应，造成传统 PS-InSAR 无法正确解算建筑表面变形量。此时，结合 TomoSAR 原理处理多视角 SAR 数据分离叠掩 PS 点可一定程度上增加可用监测点^[92]。在相干性、雷达反射率较低的郊区或农村地区，会导致 PS 点密度严重不足，在此情况下，联合探测 PS 点和 DS 点则可以大幅提高监测点密度^[93~94]。另外，亦有学者提出了一种全散射体方法^[95] (Full Scatters InSAR, FS-InSAR)，选择除水体外的所有地物目标进一步提高了地面变形监测点密度。以上方法可归纳为基于 SAR 卫星分辨率及算法处理的监测点密度优化方法^[96]，也是目前主流且可靠的手段。此外，还可采用多轨道^[97]、多波段^[98]及多极化^[99]等 SAR 数据集成方法提高监测点密度。

在可用数据有限导致监测点仍然不足或需要构建连续变形场时，可选择合适的插值法进行补充^[66,68,100]。然而，插值法是一种拟合手段，利用已知的离散数据点，通过不同的数学算法来推断未知点的值。不同的插值方法会得到不同的结果，在已知点密度过低的情况下还会导致插值结果失真，应用时应结合实际情况合理选择插值模型并对结果进行相关验证。此外，受监测点定位精度、地理配准精度与 SAR 卫星分辨率限制以及坐标系统转换误差累积等因素影响，使得监测点与建筑物图层之间不可避免地存在偏移，造成单个建筑物轮廓内可用的监测点数量不足的问题，在情形下，从根源上解决这类问题仍有较大阻力，部分研究通过将建筑物轮廓进行外延增加可用的监测点数量进而进行风险评估^[70]。

1.4 现有研究存在的问题

综合来看,星载 InSAR 技术与城市建筑群广域筛查的融合和应用展现出广阔前景,然而,当前以 InSAR 技术变形监测为核心的建筑安全评估研究仍存在以下关键不足,限制了其从宏观监测向精细化、工程化应用的转化:

(1) 监测数据与建筑单元的空间关联不足。现有研究多聚焦于大尺度地表形变场的宏观解译,侧重于区域沉降漏斗或风险热点的定性圈定,未能将 InSAR 监测到的变形数据精确关联到单个建筑结构,导致建筑变形信息被淹没在区域沉降场中,无法有效识别和诊断单体建筑的变形特征及其潜在风险。

(2) 风险评估体系缺乏系统性与标准化。建筑安全评估的指标选取、参数体系构建及阈值设定,在结构工程、地质灾害、遥感等不同学科之间尚未形成统一的认知框架。且往往依赖研究者经验或特定区域数据,缺乏统一的、可跨区域复用的标准化框架,使得评估方法的可迁移性和可操作性受限。

(3) 建筑变形与结构损伤间定量关系不清晰。InSAR 技术虽能精确测量建筑变形,但由变形量向具体结构损伤程度或安全风险等级的定量映射关系尚不明确,缺乏基于结构机理的统一表达,限制了 InSAR 监测结果向结构安全状态的有效转译,评估结论的可靠性与工程可信度不足。

1.5 本文研究内容

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)、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)、湖南省自然科学基金项目《基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究》(2023JJ70003)、湖南省应急厅应急管理科技项目《基于星载 InSAR 的“长沙市自建房”安全风险排查研究》(yjtkjxm_202406)开展相关研究,重点围绕基于 InSAR 技术的建筑变形监测与安全风险评估问题,针对现有研究中监测结果难以转化为工程风险判据的关键瓶颈,从理论溯源、方法构建与机理分析三个层面开展系统研究,以期打通从遥感 InSAR 监测数据到房屋结构安全评估标准的转化路径,为城市级建筑群安全常态化“体检”与精准化预警提供一套系统化、可量化、工程适配性强的技术体系。主要内容如图 1.7 所示:

(1) 系统梳理国内外建筑变形与结构损伤评估领域的研究进展,分类溯源了既有建筑变形风险评估指标体系。具体而言:依据研究方法的发展脉络,厘清各指标在不同分析方法框架下的演进趋势,并明确各类变形指标的物理内涵及其适用条件;在此基础上,对中国、美国及欧洲等主要国家和地区现行规范标准及相关专著进行对比分析,归纳不同规范中变形限值及损伤判据的差异与共性,揭示

评估指标与阈值设定的来源机制及其工程背景，为后续风险评估模型的建立提供理论依据与规范支撑。

(2) 面向城市尺度建筑群安全评估需求，构建以星载 InSAR 变形监测数据为核心驱动的建筑风险评估框架，实现大范围建筑风险的快速识别与量化评估。具体而言：结合建筑变形机理、工程规范要求及 InSAR 观测数据特性，构建适用于遥感监测条件的建筑变形评估指标体系；引入模糊综合评价理论，并结合层次分析法确定各指标权重，建立多指标融合的风险评估模型，实现 InSAR 变形信息向工程风险语义的定量转译；以长沙市典型区域为研究对象，利用时序 InSAR 监测数据开展实例分析，对建筑风险空间分布特征进行识别与评估，并通过对比分析验证所提方法在区域尺度建筑群风险识别中的有效性与工程适用性。

(3) 开展基于有限元分析的建筑变形响应机制研究，揭示了建筑沉降与结构受力状态及损伤演化之间的量化关系。具体而言：基于 ANSYS 平台构建典型结构形式、几何尺寸及材料属性的填充墙框架结构三维实体有限元模型；模拟不同沉降工况下结构的非线性损伤演化过程，系统分析不同沉降阶段下结构应力、应变分布规律及裂缝发展特征；选取钢筋屈服强及混凝土压碎两个关键状态作为结构性能演化的重要判据，分析沉降量与结构关键受力状态之间的对应关系，从力学机理层面阐明评估指标及其阈值的合理性。

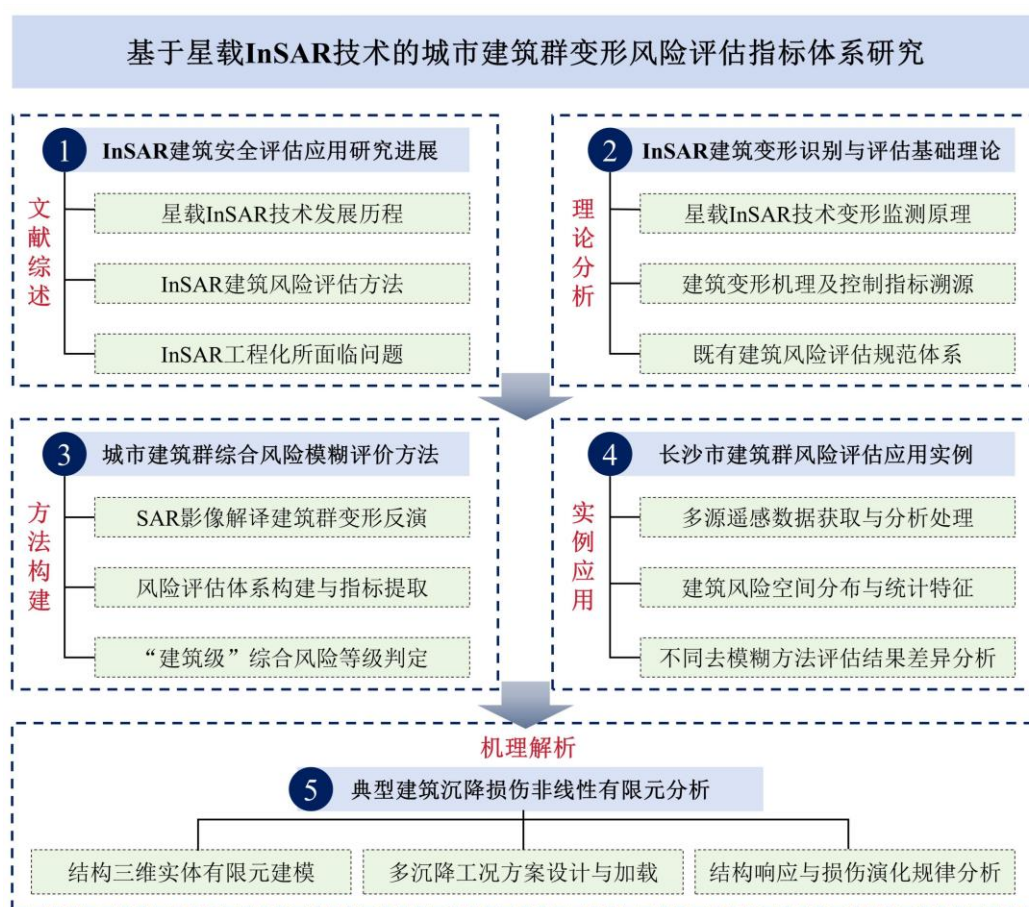


图 1.8 本文研究内容

第 2 章 InSAR 建筑变形识别与风险评估理论基础

2.1 引言

在建筑物服役过程中，由于受直接作用（即荷载，如结构自重、使用荷载、风荷载等）与间接作用（如温度变化、地基沉降、地下水变动、地震作用、周边施工扰动等）的共同影响，必然导致其产生沉降、倾斜、水平位移、挠度、裂缝扩展等几何形态和空间位置的变化，统称为建筑变形。有限范围内的建筑变形属于结构的正常响应，但若变形超出设计允许限值，将会导致建筑服役性能衰退、使用寿命折减甚至直接灾变失稳。在建筑安全风险评估与监测实践中，精确掌握建筑物的时空变形特征至关重要。基于此，本章首先介绍 InSAR 技术的基本原理及其在建筑变形监测中的观测特性；在此基础上，阐释建筑变形的形成机理及其主控影响因素，明确不同类型变形对应的力学本质；进一步结合既有研究与工程实践，梳理建筑变形控制指标体系的形成依据与演变过程；最后，对现行相关规范与标准进行归纳分析，为后续基于 InSAR 数据的建筑安全风险评估方法构建提供理论基础与判据支撑。

2.2 InSAR 技术基础理论

2.2.1 InSAR 技术基本原理

InSAR 技术是近三十年来发展迅速的一种高精度微波遥感技术。该技术通过两次或多次对同一地区进行相干观测获取复数 SAR 影像，可采用单轨双天线模式或重复轨道模式实现数据获取。在数据处理过程中，通过对同一目标在不同观测时刻所对应的复数回波信号进行干涉运算，提取其相位差，并结合精密轨道信息与成像几何关系，实现对地表高程或微小形变的反演。

与传统光学遥感影像相比，SAR 影像具有显著的技术优势。首先，SAR 系统属于主动式微波传感器，通过自身发射电磁波并接收其回波信号获取地表信息，不依赖太阳辐射，因此不受光照条件限制，可实现全天时观测。同时，微波波段对云雾、降水及大气散射具有较强的穿透能力，使其在复杂气象条件下仍具备稳定的数据获取能力，从而实现全天候对地观测。此外，SAR 影像记录的是目标的复数散射信息，包含幅度与相位两部分，其中幅度反映地物的后向散射特性，相位则与雷达至目标的传播路径密切相关。因此，在 SAR 系统中，单视复数影像的每个像素均可表示为一个复数形式^[101]：

$$u = |u| e^{j\phi} = |u| \operatorname{Re}(e^{j\phi}) + j |u| \operatorname{Im}(e^{j\phi}) \quad (2.1)$$

式中， $|u|$ 和 φ 分别表示回波信号的幅度和相位， $|u| \operatorname{Re}(e^{j\varphi})$ 和 $|u| \operatorname{Im}(e^{j\varphi})$ 分别表示复数信号的实部和虚部。

InSAR 技术的核心在于利用两幅或多幅 SAR 复数影像之间的相位差获取地表几何信息。对于同一地区在不同时刻获取的两景 SAR 复数影像回波信号 $u_1 = |u_1| e^{j\varphi_1}$ 、 $u_2 = |u_2| e^{j\varphi_2}$ ，通过复共轭相乘构建干涉复数可得到干涉相位 $\Delta\varphi$ ，即相位差，其反映了雷达视线方向上目标与传感器之间距离变化的差异。

$$I = u_1 \cdot u_2^* = |u_1| |u_2| e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (2.2)$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(u)}{\operatorname{Re}(u)}\right) \quad (2.3)$$

从几何关系上看，两次观测形成的干涉相位本质来源于雷达相位中心到同一地面目标距离差的变化，该距离差在几何上近似等于基线在雷达到目标方向上的投影。在理想情况下，忽略大气延迟、随机噪声和形变的影响，干涉图中随空间变化的干涉条纹将主要反映地形的特征，故 InSAR 技术最初被用于地形测绘，其实质是利用覆盖同一地区的复影像对生成的干涉图即相干相位，借助平台的姿态数据重建地表点高程。

如图 2.1 所示，在重复轨道干涉测量模式下，InSAR 的几何关系可通过二维垂直观测平面进行描述。雷达在两次观测位置 S_1 和 S_2 同一地面目标点 P 进行成像，两轨道间的空间距离由基线 B 表示。基线与水平面的夹角为 α ，此时，可将基线可分解为沿雷达视线方向的平行基线分量 $B_{\parallel}$ 和垂直于视线方向的垂直基线分量 $B_{\perp}$ ， H_i 表示第 i 次观测时卫星高度， θ_i 表示对应的入射角表示卫星至地面目标点 P 的斜距， $i=1,2$ ，分别对应两次观测， h 表示目标点高程。

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.4)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \quad (2.5)$$

假设在两次获取的影像中由于散射特性引起的随机相位贡献基本相同，则干涉图的相位就只与雷达信号传播的路径差有关：

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \quad (2.6)$$

式中， λ 为雷达信号波长。根据观测几何关系，在三角形 $\triangle S_1 P S_2$ 中，结合基线方向与入射角关系，利用余弦定理可得：

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{R_1^2 - R_2^2 + B^2}{2R_1 B} = \frac{(R_1 + R_2)(R_1 - R_2)}{2R_1 B} + \frac{B}{2R_1} \quad (2.7)$$

在实际星载观测条件下，由于卫星轨道高度远大于基线长度，通常满足： $R_1 \gg B$ ，且 $R_1 \gg (R_1 - R_2)$ ，因此可忽略高阶小量，对上述表达式进行近似化简，并结合干涉相位表达式，可得：

$$\sin(\theta - \alpha) \approx \frac{R_1 - R_2}{B} = -\frac{\lambda \varphi}{4\pi B} \quad (2.8)$$

此时，可得出干涉相位差 $\Delta\varphi$ 与地面 P 点的高程值 h 之间的数学关系如下：

$$h = H - R_1 \cos \theta = H - R_1 \cos(\alpha - \arcsin(\frac{\lambda \varphi}{4\pi B})) \quad (2.9)$$

其中， H 、 B 、 α 为 SAR 传感器的观测几何参数，主要由卫星精密轨道数据获取；入射角 θ 及斜距 R 等参数则可由雷达成像几何关系及系统参数计算得到。

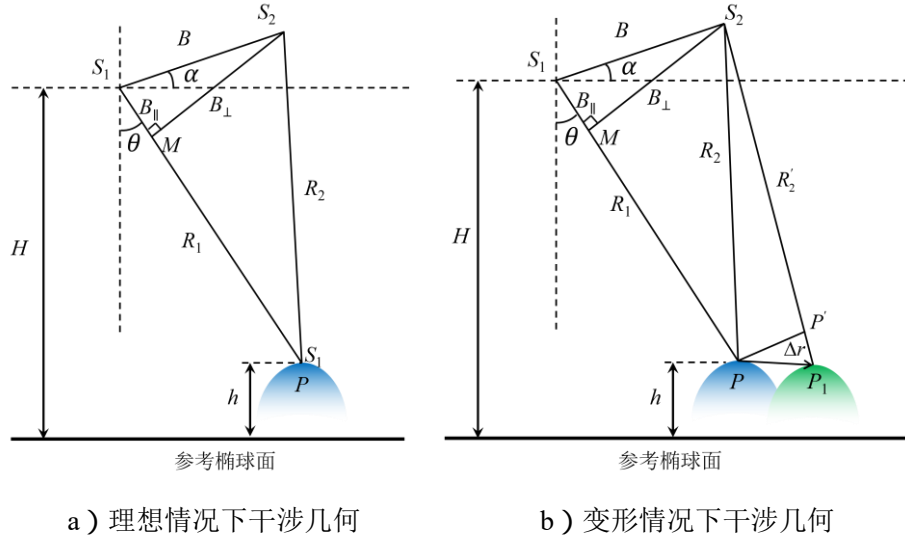


图 2.1 InSAR 观测几何原理示意图

上述推导建立了干涉相位与地表高程之间的定量关系，是 InSAR 获取地形信息的理论基础。然而，在实际观测中，地表目标通常处于动态变化状态，两次观测期间的形变将引入额外的传播路径差，使得干涉相位同时包含地形与形变信息，图。因此，高程反演与形变监测在物理机理上具有一致性，其差异主要体现在相位信息的组成及反演目标的不同。进一步而言，实际获取的干涉相位为多种因素叠加的结果，完整的干涉相位模型如式 (2.10) 所示。

$$\varphi = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (2.10)$$

其中， φ_{flat} 为平地相位，由于卫星轨道并非理想平行，两次成像时传感器相对于参考椭球面的高度差会产生相位贡献，通常通过去平地处理予以消除； φ_{topo} 为地形相位，由目标高程起伏引起，可通过引入外部 DEM 进行模拟和扣除。 φ_{def} 形变相位，由两次观测期间地表沿雷达视线向 (LOS) 的位移 Δr 引起的相位变化，是形变反演的主要信息来源。 φ_{atm} 大气相位，由两次成像时大气条件 (温度、湿度、气压) 差异导致的雷达波传播延迟差异，会引入额外的相位偏移。 φ_{noise} 噪声相位，由系统热噪声、失相关效应等引起的随机相位误差。

2.2.2 PS-InSAR 技术原理

干涉相位的叠加效应促使 InSAR 技术的研究与应用逐渐由传统的地形测量拓展至地表形变监测领域。形变监测的核心目标，是在已知或可消除地形相位的前提下，从多分量干涉相位中分离出形变相位，并建立其与地表沿雷达视线方向位移之间的定量关系，这一思想构成了 D-InSAR 与系列时序 InSAR 技术的理论基础。不同于 D-InSAR 对 SAR 影像中所有像元进行统一处理的计算模式，PS-InSAR 技术核心思想是在长时间序列 SAR 影像集中识别出后向散射特性高度稳定的点状目标，即永久散射体（PS），并仅对这些点进行时序干涉分析。因此，PS-InSAR 技术能够最大限度地克服失相关噪声的影响，并利用时序分析来分离大气相位和形变相位，从而显著提高形变监测的精度与稳定性。

PS-InSAR 技术的形变反演流程通常包括以下几个核心环节：

（1）数据预处理与干涉堆栈构建。作为典型的单主影像多时相 InSAR 技术，PS-InSAR 数据处理首先需要构建合理的干涉基线网络。通常根据时空基线长度、多普勒中心频率等指标，以最小化所有干涉对的总去相干效应为目标，从覆盖同一研究区的 N 景（通常不少于 20 景）影像集中选取 1 景影像作为主影像，其余影像分别与主影像进行精密度配准与重采样，并结合外部 DEM 去除地形相位，形成以主影像为核心的 $N-1$ 组干涉对，构建差分干涉图堆栈。

（2）PS 候选点探测与网络构建。选择高质量的 PS 候选点是确保解算精度的关键。通过统计分析所有 SAR 影像的幅度信息或者相位信息，可以找出不受时间、空间效应影响的 PS 点。常用方法包括幅度相关法、相位分析法、信号杂波比法和相干性统计法及这些方法的组合等^[102]。在获得 PS 候选点后，通常采用 Delaunay 三角剖分算法构建空间网络，将相邻 PS 点连接形成弧段结构。该网络为后续相位解算提供稳定的拓扑约束，每条弧段对应于两端 PS 点之间的相位差。

（3）差分相位建模与弧段参数解算。传统 PS-InSAR 时序分析框架下，通常假设研究区在监测周期内以线性形变为主，而采用线性干涉相位模型。此时，对于任一主副影像干涉对，PS 弧段的差分干涉相位如式（2.11）所示^[19]。但在高层建筑和大跨结构密集的城市场景中，该模型难以刻画建筑物受温度影响产生的非线性形变，易导致形变反演偏差。为此，可在模型中引入温度相位项以提高形变反演精度如式（2.12）所示^[103]。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T \cdot \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B}{R \sin \theta} \cdot \Delta h + \Delta\varphi_{res} \quad (2.11)$$

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T \cdot \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B}{R \sin \theta} \cdot \Delta h + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta Temp \cdot \Delta\alpha + \Delta\varphi_{res} \quad (2.12)$$

式中， λ 是电磁波的波长， T 与 B 是两景影像间的时间基线和空间基线， Δv 是 PS 点间的变形速率差， R 是卫星与观测目标的斜距， θ 是雷达波的入射角， Δh

是两 PS 点的高程残差, $\Delta Temp$ 是两景影像获取时刻对应的温度差, $\Delta \alpha$ 是两 PS 点的温度变形系数差, $\Delta \phi_{res}$ 是 PS 点间干涉相位残差。

此时, 采用式 (2.13) 可将上述参数求解的问题转化为解非线性函数的最优解的问题, 其核心思想是搜索一组 $(\Delta v, \Delta h, \Delta \alpha)$ 使得依据模型构建的相位与实测缠绕相位之间的残差最小, 即最大化模型的时间相干性。

$$\gamma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \exp(j\Delta\phi_{obs}^i - \Delta\phi_m^i(\Delta V, \Delta h, \Delta \alpha)) \quad (2.13)$$

式中, γ 为弧段的时序相干系数, $\Delta\phi_{obs}^i$ 和 $\Delta\phi_m^i$ 分别表示观测值和拟合值, j 为虚数单位, $N-1$ 表示差分干涉图总数量。

(4) 形变反演。在完成所有弧段上的相对参数估计后, 以选定的某一稳定参考点为基准, 通过空间积分或最小二乘平差方法, 解算出每个 PS 点相对于该参考点的绝对线性形变速率和绝对高程误差。在此基础上, 将线性形变分量与高程误差分量从原始相位中剔除后, 所得的残余相位 $\Delta\phi_{res}$ 主要包含非线性形变、大气延迟相位及随机噪声。利用这三者在时空域的不同分布特性 (大气相位在时间上呈高频、空间上呈低频特征, 而非线性形变在时间上通常呈低频特征) 通过时空滤波方法将其分离。最终, 将线性形变与非线性形变叠加, 即可获得各 PS 点完备的时间序列形变结果^[104]。

2.2.3 InSAR 建筑变形观测特性

图 2.2 展示了一般房屋建筑组成要素、传力路径以及 InSAR 技术观测下 PS 点分布示意。作为一种主动式的建筑风险筛查工具, 星载 InSAR 技术建筑变形观测具有以下特点及局限性:

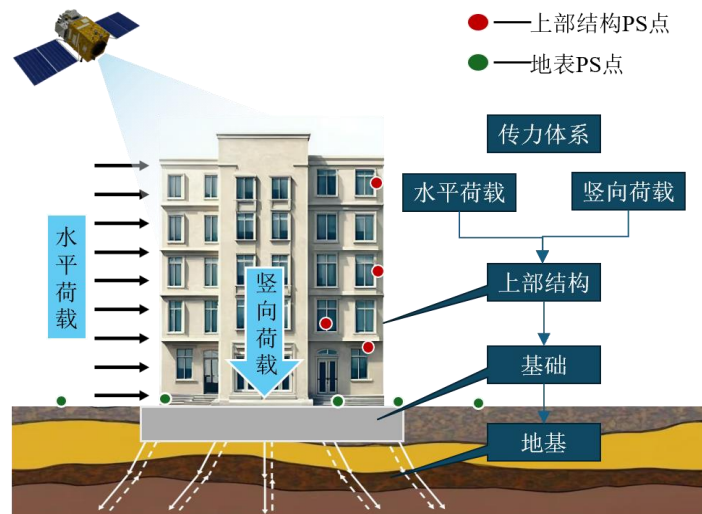


图 2.2 房屋建筑传力体系

(1) 关注外观变形, 难以识别结构内部损伤与细微表观缺陷。InSAR 技术通过捕捉建筑表面散射信号进行变形识别, 利用时序 InSAR 技术开展建筑结构变

形监测已然具备优于 5mm 的精度且至少可达到《建筑变形测量规范》(JGJ 8-2016)中规定的三级精度标准^[105~106]。但由于房屋建筑通常为封闭式结构,雷达波无法穿透墙体、楼板等围护结构,因此该技术探测范围局限于建筑表面结构或外观整体变形,而难以识别内部结构的变形和状态特征。此外,现有星载 SAR 系统米级空间分辨率无法有效捕捉如裂缝或小尺度细微表面损伤。

(2) 长周期持续采样,但重访周期长导致采样频率偏低。InSAR 技术凭借其主动微波遥感的特性,不受光照和天气限制,可实现全天时、全天候观测。同时,卫星自发射后即以固定轨道和稳定重访周期(如 Sentinel-1 卫星为 12 天)对目标区域进行周期性持续采样,积累了大量历史存档数据,支持建筑过往数十年变形趋势的回溯分析,有效解决了传统监测方式历史基线数据缺失的问题。然而,受限于 SAR 卫星固定重访周期(通常为数天至数十天),导致其时间采样频率不足以捕捉风振等短周期动态响应或施工扰动引起的快速变形,而更适合于建筑长期缓慢变形监测与渐变损伤评估。

(3) 变形方向敏感度不均衡,且易受入射方向遮挡影响。SAR 卫星侧视成像机制赋予其大范围捕获地表特征的优势,单次过境成像可覆盖数百甚至数千平方公里区域(如 Sentinel-1 卫星宽幅成像模式可覆盖约 250 公里宽的地表条带)。但其较小入射角使得 InSAR 技术对垂直方向变形敏感度高,但水平方向(特别是南北向)敏感度较低,因此特别适用于大范围建筑沉降观测^[107~108]。此外,城市高层建筑密集区域易发生叠掩和阴影效应,导致低矮建筑、楼间地面等区域无法被 SAR 卫星有效观测到,形成观测盲区;同时,不同入射方向的 SAR 卫星对同一建筑的监测效果差异较大,将进一步影响变形信息的完整性和评估的全面性;

(4) 瞬时成像易受瞬态环境荷载干扰,影响异常识别。SAR 卫星成像近乎瞬间完成,卫星重访过境时,不同时间节点下建筑所在场地温度、风速等环境荷载存在差异,使得 InSAR 技术观测的变形结果包含此类荷载作用下的建筑瞬态结构响应。虽然风振变形和日照温度变形在小体型房屋建筑中表现不明显,但对于高层建筑和大跨空间结构,这两类变形相较于其他变形(如地基沉降)通常更为显著。特别是,在高层、低层及大跨空间结构建筑交错分布的城市区域,高层建筑顶部更突出的竖向温度变形与水平向风振变形以及大跨空间结构水平向温度变形会掩盖低层建筑或地表异常变形趋势,进而导致异常风险识别困难及评估结果可靠性降低,在实际应用中需针对上述干扰性变形采取相应的控制与补偿措施。

(5) 数据处理路径和参数设置缺乏统一标准化,易导致结果差异。目前 InSAR 技术在建筑变形观测中的应用缺乏统一的标准化规范,不同研究者在数据选取、相干性阈值、主影像选择、时间基线约束、滤波策略、相位解缠、模型参数设定以及形变分解方法等方面采取的处理路径并不完全一致,最终会导致监测点提取结果、形变量级及风险判定结论存在差异。这种结果的不确定性和可比性差,是

当前 InSAR 技术在工程应用和风险评估中面临的一个重要挑战，也反映了遥感领域在标准化方面的不足，限制了其在建筑风险筛查中的规模化应用。

针对上述局限性，可通过多源数据融合、观测几何优化及模型改进等手段进行综合提升：将 InSAR 观测与传统接触式监测、高分辨率光学影像及 GNSS 等技术相结合，通过升降轨联合观测及多视角形变分解增强三维变形表达能力，以弥补其在内部损伤、高频变形和水平向变形方面的不足。针对环境荷载干扰问题，可在干涉相位模型中引入温度项实现定量分离^[103]，或利用温度变形的周期性特征进行时域剔除^[109]；而对于风振等高频位移，则可通过时间序列平滑及剔除高层顶部不稳定 PS 点降低其影响^[68]，并在必要时引入高频监测手段进行补充^[110]。此外，应进一步推动 InSAR 处理流程与参数设置的标准化，以提升监测结果的一致性与工程应用可靠性。

2.3 建筑沉降变形机理与控制指标阈值体系溯源

建筑沉降的主要来源是地基土在外荷载作用下产生的附加应力诱使土体压缩变形^[111]。基础搁置于地基上，二者变形必然是协调的。然而，从岩土工程的角度，由于地基土存在回弹再压缩现象，地基的实际变形往往略小于基础沉降量。作为连接建筑上部结构与地基的媒介，基础的变形行为直接影响上部结构的内力状态，因此，结构工程中更加关注基础最终沉降量^[112]。建筑沉降通常被分为均匀沉降、整体倾斜及差异沉降三种类型。尽管建筑不同类型沉降的诱发因素有多个方面，且不同作用将导致建筑沉降变形特征的显著差异，如表 2.1 所示，但其本质仍在于对地基土应力状态或土壤性质的改变。

表 2.1 建筑不同沉降行为的影响因素与特征

分类	影响因素	作用机理	沉降行为	变形特征
内部因素	建筑重量	附加应力下土体瞬时变形及长期主固结和蠕变	均匀沉降	与建筑重量正相关，长期存在
	结构形态	建筑体型、刚度突变等导致荷载分布梯度差	差异沉降	随时间推移而趋于稳定
	施工偏差	材料、工艺等导致实际/设计荷载分布不符	差异沉降	随建筑高度累积而放大
外部因素	地质条件	地质结构和土壤物理特性直接影响沉降行为	均匀、差异沉降	建筑跨越非同质土层时将发生差异沉降
	气候变化	冻融循环影响土壤密度和结构	均匀、差异沉降	季节性波动变形
	地下水位波动	水位变化改变土体有效应力	均匀、差异沉降	与水位变化正相关，存在滞后性
	邻近工程扰动	开挖引发周围土体应力重分布	差异沉降	瞬时变形突增
	地震导致液化	地基土部分或完全丧失抗剪强度	均匀、差异沉降	触发条件敏感，多发生于饱和松散砂土地基

均匀沉降作为一种相对安全的沉降模式，此情况下，建筑保有原本承载体系，不会产生附加应力或应力集中，但沉降量过大会影响建筑的使用性能。对于刚度较大的中低层建筑，其在差异沉降作用下呈现整体“刚体”倾斜，通常主要影响建筑视觉效果及建筑内相关设备的正常使用，而对于高层刚性建筑，倾斜会在重力作用下引起较大的附加应力和位移，或与水平荷载作用相耦合导致重力二阶效应放大，严重时会造成建筑倾覆倒塌。差异沉降是导致建筑结构安全性和使用功能降低的关键因素。其本质在于，基础发生差异位移时，迫使建筑上部结构产生与之相协调的强制被动变形，并作为“位移荷载”在建筑超静定体系内部引发额外的、超出设计预期的附加内力与变形。当附加效应超过结构或构件的承载能力极限或正常使用极限时，将引发裂缝扩展、结构渐进性损伤累积甚至整体失稳破坏。此外，差异沉降还会影响建筑的整体稳定性，降低抗震性能，增加地震灾害风险^[113~114]。

在上述作用机制下，建筑沉降变形不仅体现为结构响应结果，同时也是结构安全状态与损伤演化的重要表征参数。围绕沉降变形与结构损伤之间的关系，国内外学者已开展了长期而系统的研究，不同阶段研究逐步形成了多种分析与评价方法，呈现出由经验判别向理论推导、数值模拟及物理试验相结合的多维发展趋势。在此过程中，建筑沉降变形与结构损伤之间的映射关系不断得到修正与完善，逐步形成了以变形控制为核心的评估指标体系，现行规范亦在持续的工程实践中趋于成熟，为基于 InSAR 监测数据开展建筑风险评估提供了重要的理论依据。图 2.3 及表 2.2 系统梳理与归纳了相关变形指标定义。

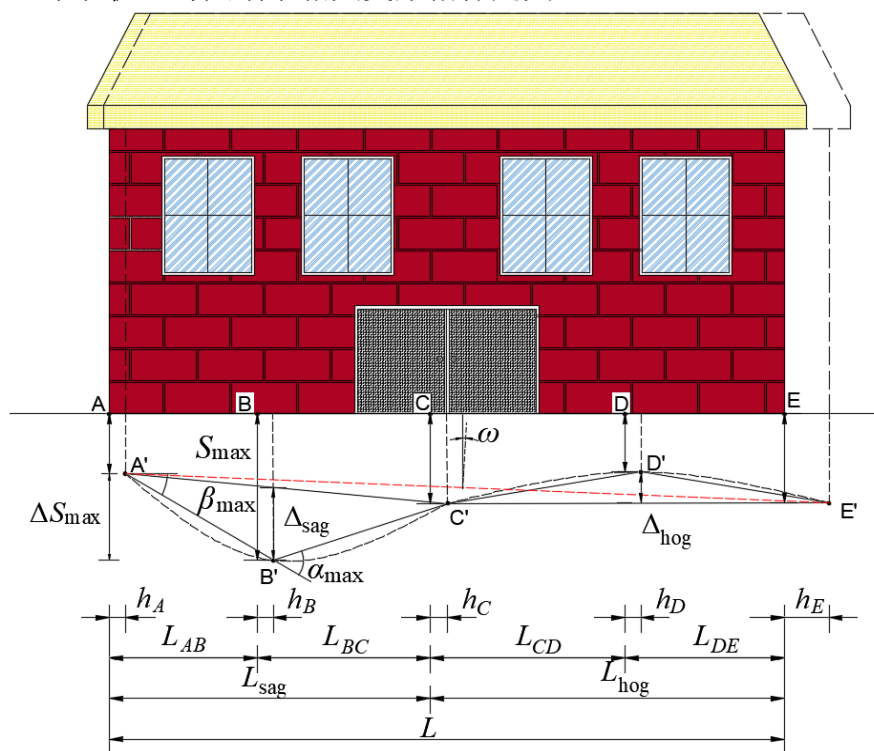


图 2.3 建筑变形指标示意

表 2.2 变形指标定义

指标名称	符号	定义
累计沉降	S_i	指定点的累计沉降量
水平位移	h_i	指定点的水平位移量
沉降差	ΔS	相邻两点累计沉降的差值
拉应变	ε	两点的水平位移差与两点间距离的比值
坡度	θ	两点沉降差与两点间距离之比
角扭曲	β	连接两点的直线相对于倾斜直线的转角
倾斜	ω	建筑的整体刚性倾斜
相对挠度	Δ	凹陷(Δ_{hog})/凸起(Δ_{sag})部分的最大挠度
挠度比	Δ / L	凹陷/凸起部分最大挠度与该部分长度之比

2.3.1 经验分析方法

早期的研究一般采用实证经验分析方法，即通过对大量监测实例进行观察并归纳统计分析，建立变形参数与相应损伤等级之间的数学经验模型，且集中于建筑自重作用下以竖向沉降变形累计导致结构破坏为主的变形损伤关系研究，相对应的指标亦多为建筑的宏观变形参数。对于建筑的最大沉降，表 2.3 汇总了部分学者给出的相关限值建议。

表 2.3 最大沉降量相关建议值

年份	研究者	相关建议
1947	Meyerhof ^[115]	框架结构，可承受 25-50mm；损伤 75mm
1956	Skempton 等 ^[116]	粘土，独立基础 75mm；筏板基础 75-125mm 砂土，独立基础 50mm；筏板基础：50-75mm
1962	Sower ^[117]	承重墙结构 25-50mm；框架结构 50-100mm
1967	Terzaghi 等 ^[118]	砂土，一般建筑 25mm；筏板基础 50mm
2002	Poulos 等 ^[119]	粘土 75-135mm；砂土 50-75mm
2014	Coduto ^[120]	一般建筑 12-50mm；工业建筑 25-75mm

可见，由于地基土压缩性、建筑基础类型及上部结构等方面的不同，相应的最大沉降量建议值差异较大。事实上，尽管 Meyerhof^[115]提出建筑最大沉降量限值建议，但其最终强调的是为避免因基础相对变形过大而导致的建筑损坏。Terzaghi^[121]通过对几座欧洲建筑的观测分析发现，一般建筑可在 20mm 的沉降差下而不发生开裂，该指标亦被纳入美国及欧洲等相关标准规范^[122~123]，并在各地区广为使用。后续，Terzaghi 等^[118]研究又发现，砂土地基下建筑差异沉降一般为总沉降 75%，因此，给出了 25mm 的最大沉降限制。可见，对总沉降的限制其本质仍为对差异沉降的控制。

为了更好地描述差异沉降导致的建筑相对变形，Skempton 等^[116]定义了角扭曲（Angular Distortion）并基于对 98 座建筑物（主要是框架结构）的研究发现，

当角扭曲大于 $1/300$ 时建筑出现建筑性损伤, 角扭曲超过 $1/150$ 时会发生结构性破坏, 并建议建筑应避免出现大于 $1/500$ 的角扭曲以防止开裂。考虑到不同结构的变形模式差异, 框架结构中梁柱为主要承重构件, 差异沉降导致相邻柱间产生相对位移, 其上部结构承受较大的附加剪力, 破坏模式以剪切效应主导; 而对于砌体承重结构, 其整体沉降趋势常表现为“盆式”下沉(类似于均布荷载作用下简支梁挠度曲线), 损伤主要受弯曲变形产生的张拉应力控制。为此, Polshin 等^[124]定义了坡度与挠度比, 分别以描述框架结构和砌体结构建筑在差异沉降下可能发生的剪切破坏与弯曲破坏。相较于坡度, 角扭曲指标计算时剔除了建筑的刚体倾斜影响, 因而更能体现建筑在差异沉降作用下受到的局部剪切效应, 而挠度比则通过描述建筑的相对弯曲程度反映建筑的受拉效应。在此基础上, 有学者针对建筑沉降与损伤关系开展了大量工作, 但由于建筑沉降允许值的界定受多方面因素影响, 难以在同一指标体系中完全囊括, 导致不同研究所给出的相应评估指标阈值间存在差异。综合来看, 建筑沉降允许值的界定主要受以下因素影响:

(1) 建筑自身变形承受能力。建筑变形承受能力受建筑体型、结构类型以及基础类型等因素影响各有差异。在 Polshin 等^[124]的研究中发现, 长高比大的建筑其整体刚度较小, 相应的变形承受能力相对较弱, 并给出了允许挠度比与建筑长高比间的关系。根据 Sowers^[117]提供的建筑总沉降、倾斜及沉降差的相关建议值, 可以看出, 对于采用柔性上部结构(如钢框架)或刚性基础(如筏板基础)的建筑, 其抗变形承受能力较强, 能够承受更大的总沉降值和沉降差。Ang 等^[125]的研究亦发现, 相比于框架结构, 剪力墙结构对差异沉降更敏感, 并给出了相应的角扭曲和差异沉降量建议值。

(2) 建筑沉降特征。对于沉降速率对建筑损坏程度的影响, 已有研究^[126]表明, 缓慢沉降的建筑物能承受略高的差异沉降, 但仅在极快或极慢时才影响明显。事实上, 缓慢发展的沉降可能被结构材料的蠕变或松弛作用所吸收, 从而减少损害的易发性。而根据 Burland 等^[127]的分析, 由于土层对建筑变形的约束作用, 建筑凸起沉降时中性轴将位于结构底部, 凹陷沉降时中性轴位于结构中部, 故建筑在凸起情况下更容易受到损害。由 Meyerhof^[128]总结不同结构类型不同极限状态下的角扭曲限值建议亦可发现, 无筋承重墙上凸的限值是下陷的 $1/2$ 。

(3) 建筑使用功能。通常, 差异沉降导致的结构安全问题较少, 其主要影响更多体现在建筑使用性能的降低及附属构件损伤等方面。例如, Bjerrum^[129]在给出的角扭曲建议值时主要考虑了内部设备的使用状态, Coduto^[120]在设定相关阈值时还充分考虑了装饰装修材料的敏感性。总体而言, 民用建筑与工业建筑在使用需求上的差异决定了其变形控制标准存在显著差别, 前者往往受使用舒适性及装修损伤控制的影响, 而后者则更多受生产设备精度及运行稳定性约束, 因此相应的差异沉降允许值亦存在较大差异。

已有部分国家建议将差异沉降作为一种荷载工况纳入结构设计过程中予以考虑,从而增强建筑对潜在不均匀沉降风险的抵抗能力。然而,差异沉降的分布及其演化具有显著的随机性和不确定性,传统确定性限值方法难以全面反映其风险特征。为此,概率统计与可靠度分析方法被用于差异沉降控制指标的定量化取值研究,以支撑差异沉降在结构与极限状态评估中的合理取值。Zhang 等^[130]通过对全球范围内 380 座建筑的分析,建立了可直接用于全概率与常规设计或确定极限状态的允许沉降概率分布,并提供了安全系数为 1.5 及超越概率为 0.05 时不同建筑类别的允许最大沉降和角扭曲建议值表格。

值得注意的是,以往学者进行地基不均匀沉降限值与建筑损伤的关联性研究时,往往以倾斜通常不引起裂缝等原因剔除了建筑自身刚体倾斜的影响(如角扭曲),关于建筑倾斜与建筑损伤关系的研究亦较少。后有学者对此进行了重新审视,系统分析了二者间相互关系。Charles 等^[131]指出,倾斜主要影响建筑视觉效果与使用性能,并基于大量观测研究建立了低层建筑倾斜由可觉察到高风险的分级阈值界限。Namazi 等^[132]则认为倾斜会在自重作用下引起结构附加拉应力,削弱建筑对差异沉降的承受能力,同样给出了相应的多级损伤倾斜阈值,其结果与 Charles 等^[131]所得结论高度一致。

2.3.2 理论分析方法

基于经验分析总结的宏观变形指标,尽管具有较好的参考价值,但难以对各种影响建筑变形允许值界定的因素进行全面考虑。特别是,角扭曲的定义在后续研究中被赋予了不同的物理意义(如坡度),可能发生混淆,造成对损伤等级的误判。为此,学界逐步发展出基于临界应变理论的微观损伤理论分析方法,研究重点亦从建筑物自重诱发的沉降问题,扩展至受地下工程施工、采矿活动等外部扰动因素影响下的结构响应与损伤评估。理论分析基于合理假设构建建筑简化力学计算模型,以模型本构关系为约束建立建筑宏观变形与结构微观应变间数学关系,进而结合既有损伤分级体系给出评估标准。

在建筑损伤等级分类方面,尽管 Skempton 等^[116]将建筑损伤分为视觉性、建筑性以及结构性 3 个等级,但并未明确给出建筑损伤指标。为此, Burland 等^[133]基于上部结构墙体裂缝发展特征及其修复难易程度,进一步细化了建筑损伤等级分类。基于此分类标准,系统建立了各类评价指标与建筑损伤等级间相互关系,并给出了相应的分级界限阈值,如表 2.4 所示。

在等效模型方面, Burland 等^[133]将建筑物简化为受中心点荷载的简支各向同性弹性深梁,该深梁模型使用相对简便且能满足对建筑结构类型、材料以及变形模式(主要是凹陷和凸起)的差异性描述。该模型在后续得到其他学者的沿用与发展,但其对建筑参数的过度简化导致在建筑体型差异表征及建筑存在多种变形

模式耦合时的适用性不足，且忽略了建筑不同构件间承载差异及相互作用机制。为此，Finno 等^[138]通过假设楼板抵抗弯曲变形、承重墙与柱抵抗剪切变形，提出了一种适用于多层建筑的层压板梁模型，可同时考虑弯剪耦合变形。Namazi 等^[139]则提供了一种厚板模型，可进一步反映建筑在三维变形模式下的扭转行为。

表 2.4 建筑损伤等级分类及相关指标阈值

研究者	适用对象	类别/指标	损伤分类及相应阈值					
Skempton 等 ^[116]	一般建筑	损伤程度	视觉性		建筑性		结构性	
Burland 等 ^[133]	一般建筑	损坏等级	可忽略	非常轻微	轻微	中等	严重	非常严重
		裂缝情况	<0.1mm	<1mm	<5mm	5~15mm	15~25mm	>25mm
Rankin 等 ^[134]	一般建筑	最大沉降	<10mm		10~50mm		50~75mm	>75mm
		坡度	<1/500		1/500~1/200		1/200~1/50	>1/50
Boscardin 等 ^[135]	单层砌体	拉应变/%	<0.05	0.05~0.075	0.075~0.15	0.15~0.3		>0.3
		角扭曲/%	<1.1	1.1~1.6	1.6~3.3	3.3~6.7		>6.7
Schuster 等 ^[136]	一般建筑	DPI 凹陷	<10	10~15	15~30	30~60	60~85	>85
		DPI 凸起	<5	5~10	10~25	25~50	50~80	>80
Namazi 等 ^[132]	单层建筑	倾斜	<1/120	1/120~1/100	1/100~1/70	1/70~1/50		>1/50
Day ^[137]	木框架	差异沉降	<3cm	3~4cm	4~5cm	5~8cm	8~13cm	>13cm
		角扭曲	<1/300	1/300~1/240	1/240~1/175	1/175~1/120	1/120~1/70	>1/70

对于损伤评估指标，鉴于建筑开裂受临界拉应变控制，早期研究大多聚焦于拉应变指标，后续考虑到实际情况中建筑往往受水平拉伸与竖向剪切的复合作用影响，而研究表明建筑对拉应变和剪切变形的承受能力存在一定的相互削弱关系，即初始水平应变的存在会降低建筑对附加剪切变形的承受能力，反之亦然^[135,140]。为此，Son 等^[141]出利用平面应变力学公式结合剪切应变与拉伸应变计算主应变，以考虑这种耦合效应。Schuster 等^[136]则给出一种将主应变值进行归一化以百分制表达的简化评估（DPI）模型，可更直观表征建筑物损伤等级。

2.3.3 有限元方法

无论是经验分析所提出的建筑变形控制指标，还是理论分析的临界应变指标，其本质上都在于对差异沉降所引发的结构附加内力与建筑自身抗力间关系的衡量。不同的是，经验分析中的建筑变形指标未能量化这种附加效应，但在某种程度上可视为其间接宏观表征。相比之下，基于临界应变的理论分析方法则通过力学模型实现了附加内力的显式表达，因而更能反映建筑的损伤机理，但对理论模型的选取要求严苛，且简化模型难以满足全面反映多元复杂建筑结构损伤演化机制的差异性和具体表征。另外，地基土-结构间的相互调节作用无法准确量化将导致评估结果的偏差，已有考虑土-结构相互作用的有限元研究表明，土体对建筑变形的约束作用减少了建筑可能发生的差异沉降，这意味着理论分析方法一定程度

上造成了对建筑损伤程度的高估^[142]。为此,开展精细化有限元模拟,在对建筑结构与地基土进行完整建模的情况下可实现对土-结构相互作用进一步解耦,并有助于直观评估结构整体的损伤状态与演化机理。截至目前,针对沉降所引发的各类建筑结构响应进行了深入的仿真模拟研究,系统分析了不同结构类型建筑在不同沉降场下的结构响应,如框架结构的梁、柱及节点应力分布规律^[143~144],砌体和砖混结构墙体的裂缝发展趋势^[145~147]等。

综合来看,以建筑变形为输入的结构损伤有限元分析已得到广泛应用,建筑变形与结构损伤特征间的映射关系亦得到了进一步完善,但仍缺乏关于建筑损伤等级与相应变形阈值间量化关系的系统性基准仿真试验研究。此外,理论分析和有限元分析的本质都在于以材料破坏描述建筑损伤,关键参数材料临界应变通常由试验结论得出,除材料本身固有的离散性外,其性能、力学指标及表观形态将随服役时间推移而发生不可逆、非线性的累积性劣化衰退,该过程的主要致因包括环境作用(物理、化学及生物侵蚀老化)、荷载累积效应(静载徐变/松弛、动载疲劳)以及其他人为干扰(不当维修、意外损伤),如何定量描述这种材料时变退化特征仍有待深入研究^[148]。

2.4 国内外相关规范与标准对比分析

2.4.1 工程领域规范体系

沉降变形诱发的建筑安全问题是工程领域长期关注的焦点。然而,由于不同国家及地区的地质条件、设计理念、安全标准及工程实践存在差异,不同国家以及同一国家不同地区对建筑沉降变形允许值的规定往往不尽相同,所考虑的因素与侧重点亦有所差异。为揭示不同规范在沉降变形限值设定方面的异同,并明确其对工程实践的指导意义,在此系统梳理中国、美国、欧洲及其他主要国家在建筑安全鉴定领域的规范标准和相关专著 20 余本。表 2.5 和表 2.6 中展示了相关国家已有涉及地基基础沉降限制的具有代表性的规范建议。

表 2.5 国内外主要工程规范对比

地区	规范/来源	指标选取	特殊规定
中国	GB 50007-2011 ^[149]	沉降、沉降差、(局部)倾斜	指标依据地基变形特征分类选取
	DBJ11-501-2009 ^[150]	累计沉降、倾斜	区分高层与多层,考虑地基类型和高宽比
	JGJ 125-2016 ^[79]	沉降(速率)、倾斜(增速)	适用建成 2 年后建筑,区分高层与中低层
美国	ASCE/SEI 7-16 ^[151]	差异沉降	考虑建筑重要性等级和损坏影响大小
	EM 1110-1-1904 ^[152]	平均沉降、挠度比和角扭曲	考虑地基土、建筑体型、结构类型
欧洲	EN 1997-1:2004 ^[123]	总沉降、差异沉降、角扭曲	考虑沉降模式影响
澳大利亚	AS2870-2011 ^[153]	差异沉降	阈值设定考虑结构类型和建筑跨度
加拿大	加拿大规范 ^[154]	总沉降、角扭曲、挠度比	区分结构形式,考虑沉降模式影响

续表 2.5 国内外主要工程规范对比

荷兰	荷兰规范 ^[155]	裂缝、沉降速率、倾斜	适用于一般浅基础建筑使用阶段
新加坡	新加坡规范 ^[156]	总沉降、相对运动	考虑建筑层数与年份划分风险等级
中国	香港规范 ^[157]	总沉降、角扭曲、倾斜	临近地下施工建筑规定三级预警阈值
苏联	HTY-127-55 ^[158]	总沉降、沉降差、挠度比	考虑建筑体型, 我国 74 规范主要参考源

表 2.6 不同规范建筑风险评估指标及阈值对比

指标	来源	阈值设定	适用对象
累计沉降	欧洲 EN 1997-1:2004 ^[123]	50mm	一般建筑
	中国 GB 50007-2011 ^[149]	200mm	简单高层
	中国 DBJ 11 501-2009 ^[150]	30~120mm	多层建筑
		60~159mm	高层建筑
	美国 EM1110-1-1904 ^[152]	50mm	一般建筑
	新加坡规范 ^[156]	25~50mm	浅基础低层建筑
	香港规范 ^[157]	30mm	一般建筑
	中国 GB 50911-2013 ^[159]	10~30mm	一般建筑
沉降速率	荷兰规范 ^[155]	每年 4mm	浅基础建筑
	中国 JGJ 125-2016 ^[79]	每月 4mm	单层和多层建筑
	中国 GB 50292-2015 ^[80]	每月 2mm	一般民用建筑
	中国 GB 50911-2013 ^[159]	1~3mm/d	一般建筑
	中国 GB 50144-2019 ^[160]	0.05mm/d	工业建筑
	中国 GB 50497-2019 ^[161]	2~3mm/d	一般建筑
倾斜	Coduto ^[120]	0.2%	一般建筑
	中国 GB 50007-2011 ^[149]	0.2%~0.4%	多层和高层建筑
	中国 JGJ 125-2016 ^[79]	1%~3%	多层建筑
		0.5%~0.7%	高层建筑
	中国 GB 50497-2019 ^[161]	0.2%	一般建筑
倾斜增速	中国 JGJ 125-2016 ^[79]	每月 0.05%	高层建筑
	中国 GB 50497-2019	0.01%/d	一般建筑
水平位移	Coduto ^[120]	7~20mm	一般建筑
	中国 JGJ 125-2016 ^[79]	10mm	单层和多层建筑
沉降差	美国 ACI 318-89 ^[122]	20mm	一般建筑
	欧洲 EN 1997-1:2004 ^[123]	20mm	一般建筑
	中国 GB 50007-2011 ^[149]	0.002l~0.003l (l 代表相邻柱基间距离)	框架结构
	苏联 HNTY-127-55 ^[158]	0.002l	框架结构
	澳大利亚 AS 2870-2011 ^[153]	10mm 与跨度的 1/2000 取小值	砌体结构
		40mm 与跨度的 1/300 取小值	框架结构
	中国 GB 50911-2013 ^[159]	0.001l~0.002l	一般建筑

续表 2.6 不同规范建筑风险评估指标及阈值对比

角扭曲	欧洲 EN 1997-1:2004 ^[123]	凹陷沉降 1/500, 凸起折减 1/2	一般建筑
	中国 GB 50007-2011 ^[149]	0.002~0.003	砌体承重结构
	加拿大规范 ^[154]	损坏 1/250~1/150; 开裂 1/500	框架结构
	美国 EM 1110-1-1904 ^[152]	开裂 1/500, 结构性破坏 1/150	一般建筑
	香港规范 ^[157]	1/500	一般建筑
挠度比	苏联 HNTY-127-55 ^[158]	当长高比不大于 3 时, 0.0003~0.0004	多层砌体结构
		当长高比不小于 5 时, 0.0005~0.0007	多层砌体结构
	加拿大规范 ^[154]	凹陷沉降 1/2500~1/1250, 凸起折减 1/2	砌体承重结构
	美国 EM 1110-1-1904 ^[152]	砂土 1/1000; 黏土 1/500	框架结构

对上述规范标准规定进行综合对比分析, 结果表明:

(1) 累计沉降。主要为防止差异沉降的发展, 国内对总沉降量的限制相对宽松。在《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)^[149]中仅对高层及高耸结构限制了总沉降量,《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ11501-2009)^[150]则分别针对高层和多层建筑给出了更详细的限值规定。一般建筑和地基土条件下国际上常用建议值为 25~30mm。

(2) 沉降速率。国内规范相较于国外更为关注的评估指标, 且更强调近期趋势的敛散性。《建筑变形测量规范》(JGJ8-2016)^[86]则将其作为建筑稳定状态的评估依据; 国外对沉降速率的限制较为宽松, 除荷兰规范^[155]外, 未见其他对沉降速率给出相关规定, 这与 Grant 等^[126]的研究有关, 即沉降速率仅在极端条件下影响建筑的沉降允许值。在沉降速率阈值设定方面, 国内《危险房屋鉴定标准》(JGJ125-2016)^[79]与《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292-2015)^[80]分别给出每月 4mm 和每月 2mm, 差异主要源于评估结果对应的危险程度不同, 前者代表需要修缮加固, 而后者代表需要立即停用或拆除; 另外, 考虑到建筑自建成到使用过程中两年即可完成大部分沉降并趋于稳定, 故荷兰规范每年 4mm 和国内规范每月 4mm 的阈值对于稳定状态评估在一定程度上差异不大。

(3) 倾斜率及倾斜速率。对于刚性建筑, 差异沉降会导致上部结构出现整体倾斜, 国内对建筑的倾斜限制要严于国外, 对高层的限制严于中低层建筑, 并对高层建筑单独设置了倾斜率增速阈值规定, 主要是为了防止建筑倾斜超限。

(4) 差异沉降。国内外对差异沉降的控制存在较大差异, 国外对角扭曲与挠度比等指标设定了相关阈值的同时还限制了 20mm 的差异沉降量。国内与苏联规范^[158]相同, 注重比例的限制而未规定绝对差异沉降量, 并根据地基变形特征有针对性地制定了不同的控制指标, 此分类控制思想亦在加拿大规范^[154]中得以体现。

(5) 水平位移。国内外关于建筑基础允许水平位移量的建议较少, 基础水平位移通常为地下开挖等活动导致地基失稳诱发的, 其危害较自重作用下竖向沉降

更大，学术界采用拉应变指标量化其对建筑影响程度。在建筑上部结构尺度，水平位移表现为建筑在水平荷载作用下产生的侧向位移，通常采用层间位移角作为控制指标。

(6) 沉降模式。地基变形模式是影响建筑沉降允许值的一个关键因素，以往的研究证明，建筑对凸起沉降的承受能力比对凹陷沉降的承受能力低得多，现有规范如欧洲 EN1997-1-2004^[123]及加拿大规范^[154]，规定凸起沉降的建议允许值为凹陷沉降的 50%，国内规范则没有提及这一点。

(7) 其他影响因子。根据前述讨论，建筑材料性能及其整体完整性将随使用年限增加而退化，仅新加坡规范^[156]在设定阈值界限时考虑了建筑年份。另外，美国 ASCE/SEI7-16^[151]则根据建筑的重要性等级划分了不同的控制阈值。

2.4.2 现有 InSAR 规范体系

国内关于 InSAR 的规范大多侧重于 InSAR 技术进行地表形变监测时数据处理过程的标准化和系统化，以确保监测结果的准确可靠。其中以行业标准《时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范》(CH/T 6006-2018)^[162]及国家标准《基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范》(GB/T 44146-2024)^[163]的规定最为详尽。

关于利用 InSAR 技术对房屋建筑进行风险评估及预警，国内已有相关规程指南。其中，深圳市应急管理联合会团体标准《InSAR 沉降监测预警规范》(T/SZEMA0002-2023)^[164]规定了 InSAR 沉降监测的技术流程、风险筛查、现场复核、预警及建议措施等，并根据建筑特征规定了四类优先监测的建筑关键部位，选取近 3 年累计沉降量及近 2 个月平均沉降速率作为房屋建筑风险筛查标准。另一部中国工程建设标准化协会标准《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》(T/CECS1165-2022)^[82]则根据近 3 年累计沉降量、累计倾斜率及近 1 年月沉降速率、月倾斜速率 4 个评估指标分别进行建筑安全风险评价，并取其其中的最高等级作为最终评估结果。该规范给出的建筑变形阈值与国家有关建筑风险评估的现行标准存在差异，其主要是考虑了星载 InSAR 建筑变形观测的特点与数据处理方法的选择，由大量工程应用实例统计分析得到。

此外，2025 年金融行业标准《基于合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术的建筑物保险风险减量应用规范》(JR/T 0328-2025)^[165]正式发布，该规范沿用了《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》(T/CECS 1165-2022) 的建筑风险评估方法体系，但其将 InSAR 技术拓展至保险领域，覆盖承保前风险评估、承保后动态监测与防灾防损、出险后责任界定等全流程风险减量管理，标志着 InSAR 技术在建筑安全评估领域的应用已从工程监测延伸至金融保险行业。

2.5 本章小结

本章围绕基于 InSAR 技术的建筑变形监测与风险评估问题，从观测原理、变形机理及评估指标体系等方面开展系统理论分析，旨在为后续基于 InSAR 数据的建筑风险评估方法研究提供理论支撑和工程依据。主要包括：

（1）深入剖析了 InSAR 技术的基本原理，并针对其在复杂城市场景建筑变形监测中的特性与局限性提出了改进方案。介绍了 InSAR 技术的基本理论，包括干涉几何原理及其相位组成，并重点分析了 PS-InSAR 技术的核心处理流程；针对传统相位模型在温度形变分离与反演过程中精度不足的局限性，引入考虑温度相位影响的扩展相位模型，从而提高建筑变形反演结果的稳定性与可靠性；针对城市尺度建筑变形监测这一特定化场景，深入分析了 InSAR 技术的观测特性与数据特征，明确了其在建筑变形观测中的适用条件与局限性。

（2）系统阐释了建筑沉降变形的力学机理，并分层次溯源了建筑变形损伤评估指标及其阈值体系的演进。通过建筑沉降变形的力学机理分析，明确了均匀沉降、整体倾斜和差异沉降等典型沉降模式对结构受力状态及安全性能的影响差异；依据研究方法的发展脉络，对建筑变形损伤评估指标及其阈值体系的百年演进历程进行了分层次溯源分析；在此基础上，阐明了不同指标的物理内涵、理论依据、适用边界及阈值确定的主要影响因素，为后续面向 InSAR 监测数据的建筑风险评估指标体系构建提供了理论支撑。

（3）全面梳理了国内外多领域建筑安全评估规范标准，阐明了 InSAR 技术规范与现行建筑规范在工程应用中的衔接与适配特征。系统梳理国内外工程领域建筑安全评估规范标准 20 余部，总结了不同规范在评估指标选取、损伤阈值设定及影响因素考量等方面的共性特征与差异规律；对于国内现行 InSAR 技术规范，特别是面向建筑风险评估相关规程，其指标构成与阈值设定在星载 InSAR 观测的工程适应性方面具有明确指向，并与现行建筑规范在应用目标与数据基础上形成互补关系。

第3章 城市建筑群综合风险评估方法

3.1 引言

星载 InSAR 技术具备大范围、可持续、非接触观测优势,实现了由单点离散监测向全域连续感知的转型。在城市尺度的建筑结构变形风险筛查中,星载 InSAR 技术已成为开展大范围时序监测分析的重要手段。然而,现有研究多停留于采用 InSAR 技术获取的趋势性变形指标如累计沉降、沉降速率开展点、面尺度的异常定性识别层面,难以有效表征建筑结构受力状态及其复杂变形响应特征。在“建筑级”风险定量评价方面,如前述 2.3 节、2.4 节所示,围绕沉降对建筑安全性的影响机理,国内外工程领域已形成较为成熟的理论研究成果与标准规范体系。然而,相关指标多源于传统工程监测与结构分析方法,并主要应用于结构设计、既有建筑安全鉴定及局部精细化监测等工程场景,尚未建立与 InSAR 观测数据特征相适配的指标计算方法与系统化评估框架。为此,本章旨在结合结构变形机理与工程规范指标,构建适用于 InSAR 观测特征的建筑变形风险评估指标体系,提出面向城市尺度的建筑级综合风险评估方法框架,实现 InSAR 监测信息向结构安全状态的定量转译,并提升区域建筑群风险识别的科学性与工程可行性。

3.2 建筑群变形风险评估方法框架

在工程安全评估领域,由于结构状态的复杂性、监测数据的不确定性以及评价指标的多样性,传统确定性评价方法难以全面准确地反映实际风险,具体表现为:第一,指标冲突。不同监测指标可能呈现不一致甚至相互矛盾的风险指示,而实际工程中结构又常处于“接近阈值”或“多指标共同作用”的模糊状态,导致单一指标难以对结构风险作出明确判定,进而增加了评估结果的不确定性与复杂性;第二,指标孤立。现有基于 InSAR 技术的建筑风险评估研究,多通过对各项变形指标设定固定阈值并取最大风险等级作为最终结果,其本质仍属于单指标评估范畴的定性判别,部分次要风险指标对建筑的影响贡献度缺失,未能有效反映多指标协同作用下的综合风险水平,且绝对化的阈值划分忽略了建筑作为延性结构在损伤发展过程中所具有的连续渐变演化特性^[78];第三,多指标融合不足。部分研究虽尝试通过指标线性叠加实现风险定量化表达,但指标权重多采用等比例分配或经验赋值方式,缺乏统一的理论依据与工程支撑,难以真实反映建筑结构对不同变形指标的响应敏感性差异,从而限制了风险评估结果的可信度^[167]。

针对上述问题,模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)方法基于模糊数学理论,通过隶属度函数量化模糊信息,并与层次分析法(Analytic

Hierarchy Process, AHP)、熵权法(Entropy Weight Method, EWM)等权重确定方法相结合,可有效解决多准则决策中定性认知与定量数据的融合难题^[168]。《危险房屋鉴定标准》(JGJ125-99)^[169]首次系统性引入了模糊综合评判方法,采用构件、房屋组成部分和房屋整体三层次四等级的评判思路,以各层次危险构件百分数作为基础输入,分别计算地基基础、上部承重结构和围护结构三个组成部分的隶属度,再按固定权值进行加权合成,最后依据最大隶属度原则确定房屋整体危险等级。此后,该方法在我国房屋安全评估领域得到了广泛应用和持续发展,相关研究已拓展至传统民用建筑(砖石^[170]、砖木^[171]、混凝土结构^[172]等)、大跨空间建筑^[173]及新型装配式建筑^[174]等不同类型单体建筑的安全性及抗震性能评估。与此同时,该方法亦与 InSAR 技术融合,在城市尺度建筑安全风险评估中得到初步探索,为整合多源监测数据、实现建筑群风险的多指标综合评判提供了有效技术路径^[175]。

基于此,本研究以星载 InSAR 变形监测数据为核心,提出一套整合层次分析法与模糊综合评价的建筑风险评估流程,如图 3.1 所示,该流程主要包括 3 个环节:(1) SAR 影像解译与建筑变形反演。利用 PS-InSAR 技术结合研究区外部 DEM 及温度数据作为先验参数进行高分辨率 SAR 影像解译,反演研究区建筑群时序变形信息及 PS 点三维空间坐标;(2) 建筑风险变形指标提取。将 PS 点云与基于光学遥感影像获取的城市建筑矢量轮廓数据进行空间匹配,剔除非建筑目标或异常 PS 散射点等干扰信号,依据建筑归属 PS 点集变形和空间三维位置信息计算相应的建筑结构风险变形评估指标;(3) 建筑综合风险模糊评价。引入层次分析法与模糊综合评价理论,构建带动态权重惩罚机制的多方法联合风险判定模型,进行城市尺度建筑群的“建筑级”结构变形风险评估。

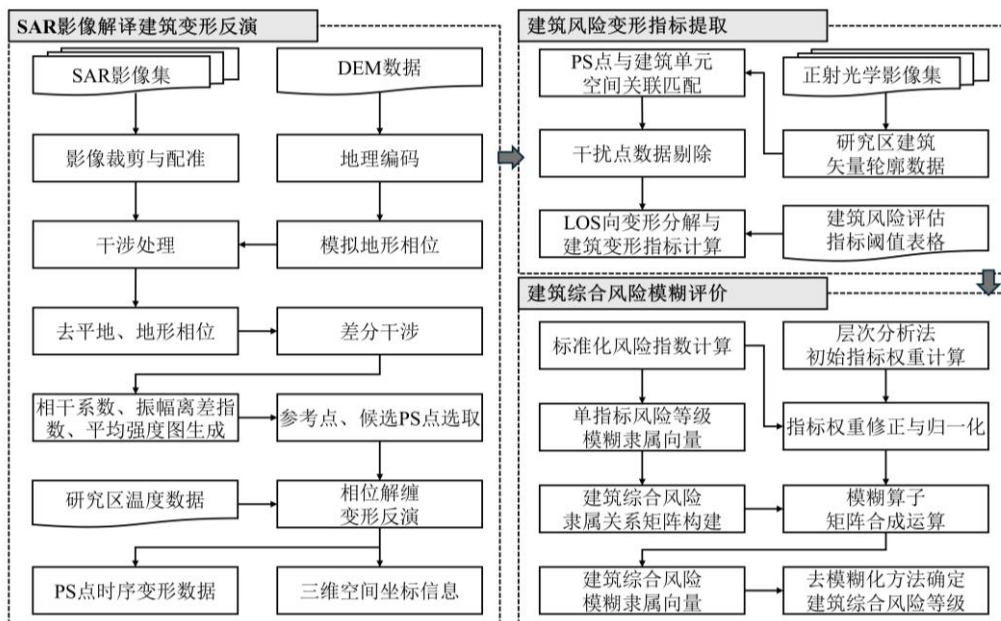


图 3.1 基于 PS-InSAR 的建筑群变形风险评估方法框架

3.3 建筑单元有效归属 PS 点提取

为了实现单体建筑物的变形分析与风险评估,需要使用城市 GIS 建筑矢量轮廓数据,并将其与 PS 点云进行空间匹配。现有开源城市建筑矢量数据集多为历史数据,其底座轮廓与城市实际建筑分布存在较大偏差。为解决这一问题,本研究利用 Google Earth 高分辨率光学影像,结合深度学习方法,构建了研究区建筑矢量轮廓数据,从而有效弥补了公开数据集与实际应用场景之间的差异。

由于监测点定位误差、地理配准精度与 SAR 卫星分辨率限制等因素使得监测点与建筑物图层间不可避免地存在偏移,直接进行匹配将导致部分本属于该建筑的 PS 点被遗漏。针对该问题,本文综合考虑既有与本文所采用 X 波段 Cosmo-SkyMed 卫星影像数据波段特性、空间分辨率相同的研究处理方法^[68],以及《建筑安全星载干涉雷达监测技术规程》(T/CECS 1165-2022)^[82]相关建议,对每个建筑轮廓建立了 3m 的缓冲区以扩大匹配范围,如图 3.2 所示。一方面可有效保留因误差偏移至建筑外围但实际反映建筑变形的 PS 点;另一方面捕获建筑周边与结构地基稳定性相关的地表 PS 点变形信息,从而保证单体建筑变形分析数据的完整性。值得指出的是,缓冲区尺度的选取并不存在统一的固定取值标准,但需在 PS 点覆盖率及其与建筑匹配关系物理真实性之间综合权衡。过小可能导致匹配不足并增加漏检风险,而过大则可能在建筑密集区域引入 PS 点跨建筑匹配,使得 PS 点与真实建筑变形信号物理对应关系解译困难,进而影响后续评估指标的准确性。选取 3m 作为缓冲区尺度,是基于对建筑轮廓偏差、PS 点定位误差及建筑边界与 PS 点分布不完全重合等因素,并保证较高覆盖率的同时避免物理对应关系失真,以平衡漏检与误匹配的综合考量。

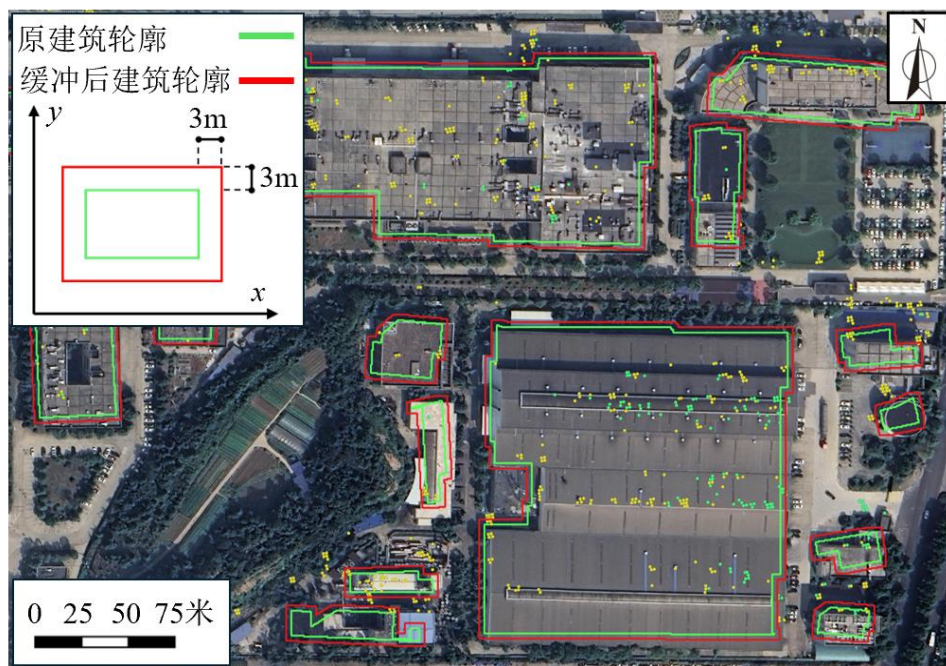


图 3.2 缓冲区设定示意

同时,考虑到高层建筑顶部存在较大温度竖向变形及风振水平变形,其变形幅值与建筑高度正相关,量级可与结构沉降变形量相当。但此类变形结构在正常服役荷载作用下的响应,并不直接反映地基沉降或结构安全状态,直接计算将导致评估指标失真。针对温度变形,尽管 2.2 节已明确采用含温度相位项模型进行初步校正,但其通常基于大气温度数据而仅能分离建筑整体因温度变化产生的均匀热胀冷缩形变。对于建筑由于向阳面/背阴面温差、竖向温度梯度等局部非线性热响应,仍存在残余误差。对于结构风振水平变形,受 SAR 影像时间分辨率及雷达视线向对水平变形敏感度低的限制,难以有效分离该变形分量。现行工程中常将建筑高度大于 27m 的住宅建筑以及建筑高度大于 24m 的其他民用建筑归为高层建筑;从温度变形机理看,建筑物受温度变化作用时,其自由伸缩量可近似表示为 $\Delta L = \alpha \cdot H \cdot \Delta T$, 其中 ΔL 为温度变形; α 材料热膨胀系数; H 为建筑高度; ΔT 为外界温差;常用建筑材料中,混凝土热膨胀系数约为 $7 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$,钢材约为 12×10^{-6} ,在相同温差条件下,建筑物高度越大,顶部热致位移量也越大;当高度达到 30m、温差为 10~20℃时,自由热胀量可达毫米级,足以对评估指标计算结果产生明显影响。同时,鉴于 PS-InSAR 结合 DEM 反演得到的是 PS 点绝对高程,该值同时包含建筑物所处地表高程与建筑本身高度两部分信息。若直接以绝对高程设阈值,会将位于高地势低层建筑上的 PS 点误判为高层建筑点,或将位于低地势高层建筑上的 PS 点漏判。综上,本文构建 PS 点相对高度指标(PS 点绝对高程与 DEM 提取地表高程之差)以表征 PS 点在建筑结构中的空间位置,并统一选取 30m 作为高程差阈值。当 PS 点相对高度超过该阈值时,将其判定为可能位于建筑顶部的干扰点并予以剔除,从而降低非沉降因素对评估结果的影响。

3.4 建筑结构变形风险指标阈值体系

3.4.1 评估指标体系构建

对于建筑沉降变形风险评估,其核心在于明确沉降变形特征与结构损伤程度间映射关系。为实现 PS-InSAR 监测形变信息向建筑结构工程风险状态的有效转译,在第 2 章系统梳理工程规范、既有研究成果并结合 InSAR 建筑变形监测机理分析的基础上,在此构建了如图 3.3 与表 3.1 所示的建筑变形风险评估指标体系。所选取的 8 项指标均可基于建筑单元内 PS 点时序形变反演结果计算获得,并在计算来源上可分为基于变形量的指标与基于变形速率的指标两大类。其中,基于 PS 点反演变形量构建的指标刻画的是整个观测时间跨度内建筑结构可能经历的最不利变形状态,属于时刻量表征;而基于 PS 点反演变形速率构建的指标则描述的是建筑变形随时间演化的稳定性与发展趋势。二者分别从结果状态和演化过程两个层面对建筑变形风险进行互补描述。

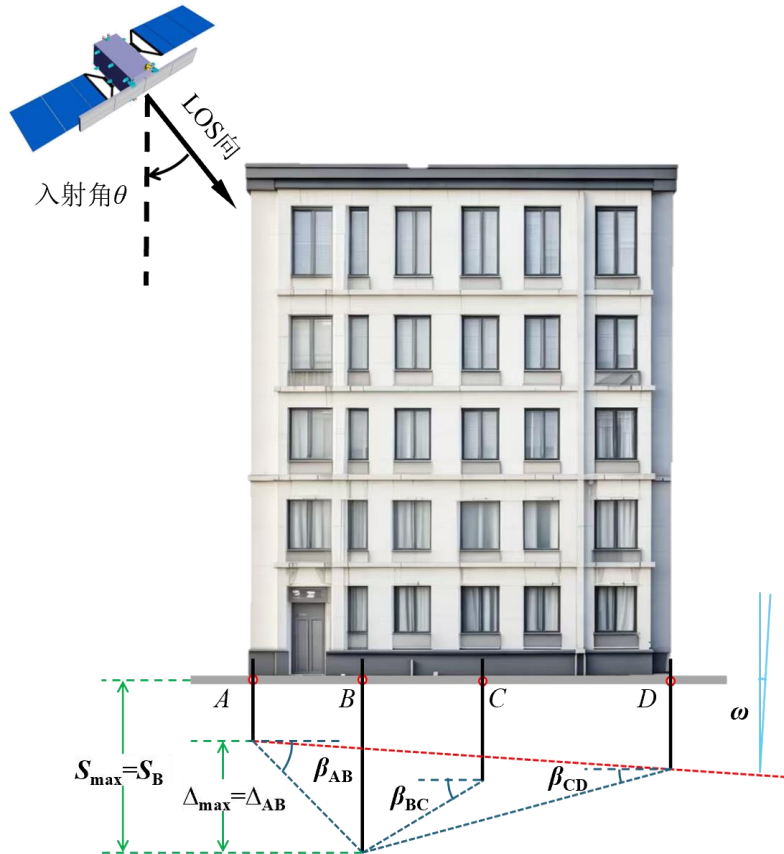


图 3.3 建筑变形指标定义

表 3.1 建筑风险评估指标阈值

指标名称	符号	单位	风险等级阈值界限			
			A	B	C	D
累计沉降	S	mm	<25	25~50	50~100	>100
差异沉降	Δ	mm	<10	10~20	20~40	>40
沉降梯度	β	$\text{rad} \times 10^{-3}$	<2	2~4	4~6	>6
沉降速率	V	$\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$	<5	5~10	10~20	>20
差异沉降速率	Δ_v	$\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$	<2	2~4	4~8	>8
沉降速率梯度	β_v	$\text{rad} \cdot \text{yr}^{-1} \times 10^{-4}$	<1	1~2	2~4	>4
倾斜度	ω	$\text{rad} \times 10^{-3}$	<1	1~2	2~4	>4
倾斜速率	ω_v	$\text{rad} \cdot \text{yr}^{-1} \times 10^{-4}$	<1	1~2	2~4	>4

在此基础上，根据指标所反映的物理含义与工程机理，8 项指标可进一步划分为以下 3 类。

（1）整体变形指标：包括累计沉降量和沉降速率，当建筑单元内仅存在单个 PS 点（ $n \geq 1$ ）时即可计算。用于描述建筑整体竖向沉降幅值及其时间演化特征，是建筑变形监测与安全评估中的基本控制指标。

（2）空间差异变形指标：包括差异量指标（差异沉降量、差异沉降速率）及梯度指标（沉降梯度、速率梯度），是识别不均匀沉降和局部变形集中的核心指标，需至少两个 PS 点（ $n \geq 2$ ）可计算。差异量用于描述建筑内部不同位置在沉降幅值及发展速度上的差异程度，为不均匀沉降的宏观控制指标，梯度则通过将

差异量与 PS 点空间距离进行归一化,在力学机理上可视为微观剪切应变或转角变形的数值表达。

(3) 刚体姿态变形指标:包括倾斜度和倾斜速率,需至少三个非共线 PS 点 ($n \geq 3$) 参与平面拟合计算。反映建筑在不均匀沉降作用下的空间姿态变化及发展趋势,揭示建筑整体稳定性和持续倾斜风险。

在指标阈值设定方面,变形量类指标以结构工程领域的规范限值与经验成果为主要依据,以体现结构变形与损伤状态之间的对应关系。根据表 2.3 相关总结,对于常规建筑,地基沉降处于 25~50mm 范围内通常不会引起结构性破坏,而当沉降超过 75~125mm 时,结构可能出现明显功能退化及结构性损伤。基于此,累计沉降量以 25mm 作为 A 类正常使用状态的控制上限,以 50mm 作为 B 类结构进入风险状态的判别界限,并将 100mm 以上界定为 D 类高风险区间。差异沉降量阈值综合国际通用标准与经典研究结论设定,国际上通常将 20mm 作为建筑发生一般性损伤的判别界限^[122~123];结合 Skempton 等^[116]关于 35~45mm 差异沉降将引发结构性损伤的经典研究结论,分别取 20mm 与 40mm 作为结构进入损伤阶段及可能发生严重结构性损伤的分级阈值。对于沉降梯度,国内外规范与相关研究普遍以 0.002 作为建筑不发生开裂的控制界限,而当梯度达到 1/250~1/150 (0.004~0.0067) 时建筑将发生结构性破坏^[129,149]。据此,将 $2 \times 10^{-3} \text{rad}$ 作为正常使用状态的控制上限, $4 \sim 6 \times 10^{-3} \text{rad}$ 对应显著局部变形与损伤状态, $6 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以上则表征结构接近或进入破坏边缘。倾斜度阈值依据工程通用限值与国家标准设定,工程实践中常以 1/500 作为建筑倾斜控制标准,《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)^[149]则针对一般多层及高层建筑,给出了 0.002~0.004rad 的控制范围。据此本文分别取 0.002rad 与 0.004rad 作为结构进入倾斜风险及高风险状态的判别界限。

对于速率类指标,由于建筑内力变化与变形幅度直接相关,工程领域对此规定较少,且不同规范间因观测周期差异导致相关限值相差较大。与之相对,变形速率作为 InSAR 技术可直接获取的关键参数,广泛用于判识建筑变形发展趋势与稳定性。因此,速率类指标阈值以既有 InSAR 研究成果为核心参考,并结合工程规范基准限值进行适当约束确定。同时,考虑到 InSAR 反演速率为年尺度平滑结果,对短期突发变形的敏感性有限,且建筑实际沉降呈现前期瞬时沉降快,后期固结、蠕变沉降趋缓的非线性演化特征,整体上对速率类指标阈值进行了适度从严收紧,以增强风险识别的前瞻性。例如,沉降速率核心参考《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292-2015)^[80]中 2mm/月的界限阈值,换算为年尺度后取 20mm/年作为 D 类高风险等级下限。类似地,其余速率类指标在参考 InSAR 研究成果的基础上^[63,69,108,167],引入工程规范控制限值并结合变形量类指标的分级逻辑统一设定,用于识别不均匀沉降、局部变形集中及倾斜的持续演化特征。

需要说明的是, 本文 A~D 风险分级借鉴了工程规范如《危险房屋鉴定标准》(JGJ125-2015)^[79]的分级思路, 但所定义的风险等级并不等同于规范中的危房等级。二者区别在于: 规范中的危房等级需结合建筑结构损伤、材料性能、受力状态等多方面因素, 通过现场抵近探查确定; 而本文主要依据建筑变形数据, 以 InSAR 远程观测方式代替传统抵近探查, 提供一种工程高风险预警等级作为城市建筑群安全初筛的依据。经本体系初筛判定为高风险的建筑, 需严格按照国家现行相关规范开展专项结构检测与安全性鉴定。

3.4.2 指标计算与标准化

鉴于现有建筑沉降与安全评价指标体系通常基于竖向变形观测数据构建, 而 InSAR 技术直接观测到的是卫星与目标间一维 LOS 向变形及变形速率。通常可假设研究区 PS 点相对参考点的水平向变形为零, LOS 向变形 D_{LOS} 均由竖直向沉降变形产生。此时, 累积沉降 S 可通过式 (3.1) 由 PS 点 LOS 向变形分解得到。式中, θ 为 SAR 卫星发射电磁波的入射角。

$$S = \frac{D_{LOS}}{\cos \theta} \quad (3.1)$$

差异沉降 Δ_{ij} 为建筑范围内两点间沉降量 S_i 、 S_j 差值的绝对值, 通过式 (3.2) 得到;

$$\Delta_{ij} = |S_i - S_j| \quad (3.2)$$

沉降梯度 β_{ij} 为建筑范围内两点间差异沉降 Δ_{ij} 与两点间几何距离 L_{ij} 的比值, 通过式 (3.3) 得到。

$$\beta_{ij} = \frac{|S_i - S_j|}{L_{ij}} = \frac{\Delta_{ij}}{L_{ij}} \quad (3.3)$$

对于建筑结构的倾斜, 工程上包含对主体结构与地基基础的测定, 前者由建筑顶部相对于底部的水平偏移与建筑高度的比值确定, 后者由建筑基础两端点的沉降差与两点间的水平距离比值确定。对于整体刚度较好的建筑, 如低层建筑及部分高层建筑, 在基础不均匀沉降作用下结构几乎呈刚体转动, 建筑主体结构与地基基础的倾斜近似相等^[86]。

然而, 由于 InSAR 技术对水平变形敏感度低, 且其获取的 PS 点空间分布具有不确定性, 无法与规范要求的特定基础端点监测位置精确对应, 导致 InSAR 建筑倾斜测定与现有规范测量方法对标困难。鉴于此, 可采用一种基于刚性建筑“基础-主体”变形等效原理的折衷方案。不再强调单点精确对应, 而是将建筑视作一个整体, 通过拟合基于 InSAR 获取的建筑平面内 PS 点云为空间平面表征建筑整体倾斜特征^[71,166]。本研究中, 通过拉格朗日乘子法将建筑平面内 PS 点集拟合为

一个三维空间平面，如图 3.4 所示。并以该拟合平面与初始状态平面 $Z=0$ 之间的夹角作为建筑整体倾斜的量化指标。

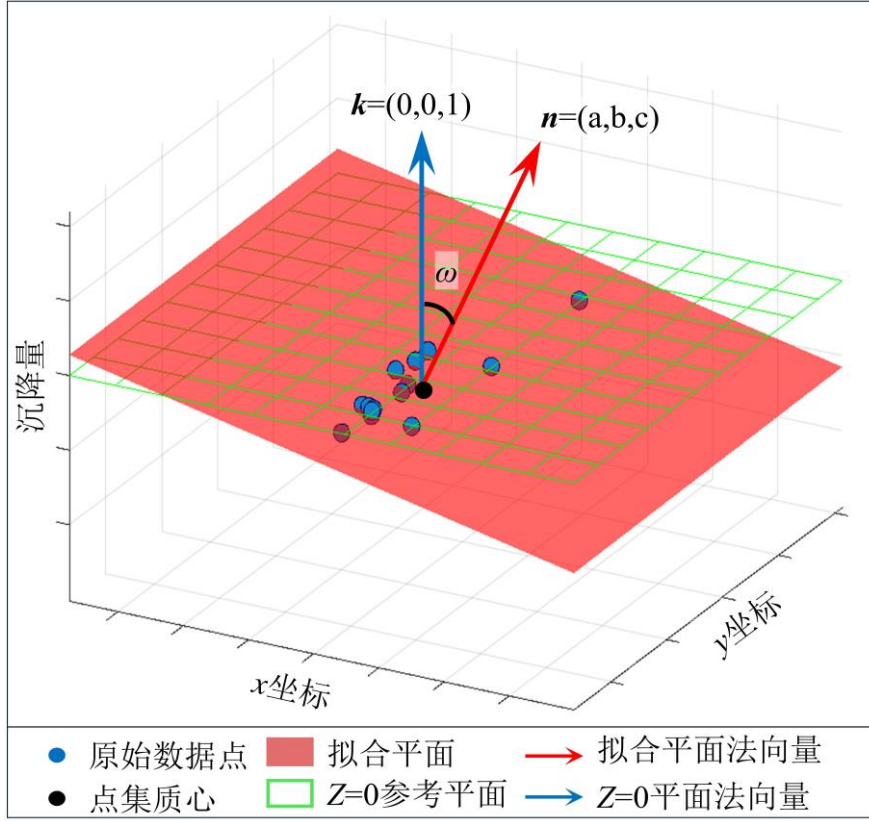


图 3.4 建筑倾斜平面拟合示意

设建筑平面内共获取 n ($n \geq 3$) 个 PS 点，其三维坐标记为 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ ， $i=1,2,\dots,n$ ；其中， x_i 、 y_i 分别为建筑内 PS 点平面几何 x 、 y 坐标（由经纬度坐标经投影转换至统一笛卡尔坐标系获得）， z_i 为对应 PS 点累计沉降值。假设拟合平面法向量为 $n = (a, b, c)$ ，则平面方程可表示为：

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3.4)$$

引入单位法向量约束条件 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ，此时，点 p_i 到平面的代数距离可由式 (3.5) 表示为

$$\delta_i = ax_i + by_i + cz_i + d \quad (3.5)$$

以所有点到拟合平面的距离平方和最小为优化目标，则目标函数可由式 (3.6) 定义为：

$$J(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i + d)^2 \quad (3.6)$$

引入拉格朗日乘子 λ ，构造拉格朗日函数如式 (3.7) 所示：

$$\mathcal{L}(a, b, c, d, \lambda) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i + d)^2 + \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1) \quad (3.7)$$

对 d 求偏导并令其为零：

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial d} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i + d) = 0 \quad (3.8)$$

可得：

$$d = -(a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z}) \quad (3.9)$$

其中， $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ， $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ， $\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$ ，为点集的空间质心。

将 d 代入目标函数式 (3.6)，并对 (a, b, c) 求极值，可将问题转化为如式 (3.10) 所示的特征值问题：

$$\mathbf{C} \mathbf{n} = \lambda \mathbf{n} \quad (3.10)$$

其中， $\mathbf{C}$ 为点集的协方差矩阵：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 & \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) & \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

当 $\mathbf{n}$ 取 $\mathbf{C}$ 的最小特征值对应的特征向量时，目标函数 J 取得最小值。因此，该特征向量即为拟合平面的法向量。此时，建筑整体倾斜角 ω 可定义为拟合平面法向量 $\mathbf{n} = (a, b, c)$ 与初始状态平面 $Z = 0$ 法向量 $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$ 之间的夹角，如式 (3.12) 所示，且 $\|\mathbf{n}\| = 1$ ， $\|\mathbf{k}\| = 1$ 。

$$\omega = \arccos \left| \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}}{\|\mathbf{n}\| \|\mathbf{k}\|} \right| = \arccos |c| \quad (3.12)$$

类似地，根据上述流程，可基于 PS 点 LOS 向变形速率实现建筑沉降速率、差异沉降速率、速率梯度及倾斜速率相关指标的提取。

在此基础上，进一步将 PS-InSAR 技术提取的原始形变监测值转化为可用于综合评判的标准化信息，以明确各指标对应的实际风险程度。鉴于不同变形指标在量纲形式和数值范围上的差异，采用分段线性函数将各项指标的实际测量值映射到一个统一的、无因次的连续数值空间——标准化风险指数 (I_x ，且 $I_x \in [0, 4]$)，以便于后续计算和结果的直观表达，如图 3.5 所示。其中， x 为指标实测值， x_{low} 、 x_{med} 、 x_{high} 分别为该指标 A 级与 B 级、B 级与 C 级、C 级与 D 级的界限阈值。

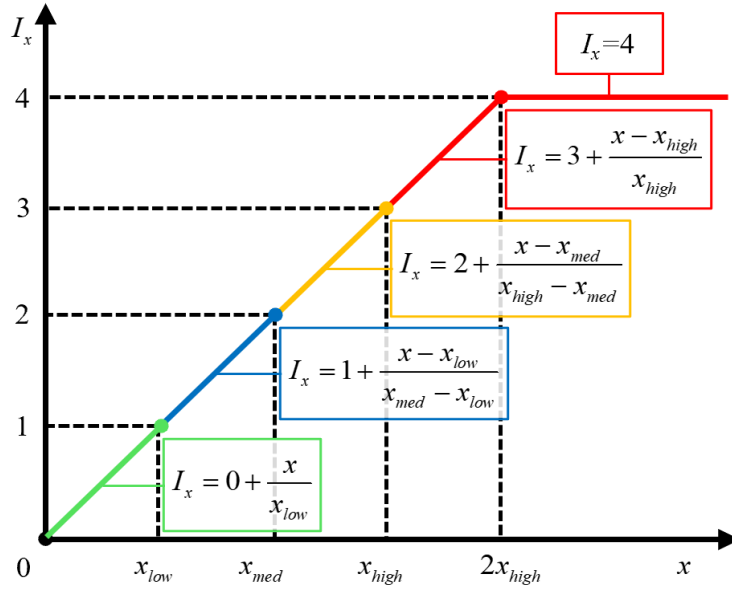


图 3.5 标准化风险指数定义

3.5 模糊综合评价

首先通过 AHP 结合超标加权机制,系统确定各项形变指标的客观权重;继而,依据前述 3.2.3 节建筑各指标标准化风险指数计算值,利用模糊隶属函数量化其对不同风险等级的归属程度,以刻画风险的渐变特性;最后,通过模糊矩阵合成运算,融合单指标权重与隶属度信息,计算出综合风险隶属向量并引入去模糊化方法确定建筑最终风险等级,实现了从多维变形数据到合理风险判定的结构化转换。

3.5.1 指标权重确定

在建筑综合安全风险评估中,由于各项变形指标对建筑整体风险的影响并非均等,且其重要性关系难以通过纯数据驱动直接获得。例如,工程上通常认为差异沉降较均匀沉降对结构更为不利,但该认识需进一步量化为综合评价中的权重参数。如何科学确定各形变指标对整体风险的相对贡献度,是构建客观、可靠评估模型的首要关键。层次分析法作为一种典型的结构化多准则决策方法,其核心思想是通过构建层次结构模型、形成判断矩阵、求解特征向量并进行一致性检验,将定性认知转化为定量权重。

为实现判断矩阵向指标权重的量化转化,常用计算方法主要包括和法(归一化法)、根法(几何平均法)及幂法(特征向量法)。本研究采用幂法,其基本思想是通过逐步迭代求取判断矩阵的最大特征值对应的特征向量作为各指标相对权重的最优估计^[176]。具体计算步骤为:

(1) 判断矩阵构建。采用如表 3.2 所示的 1-9 标度法独立地对各项指标进行两两重要性比较,构造判断矩阵 A ,如式 (3.13) 所示。其中, n 为指标个数。

表 3.2 层次分析 1-9 标度法含义

标度	含义
1	两指标重要性相同
3	指标 i 重要性稍高于指标 j
5	指标 i 重要性明显高于指标 j
7	指标 i 重要性远高于指标 j
9	指标 i 与指标 j 相比, 重要性极高
2, 4, 6, 8	介于上述重要度中值

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

(2) 初始化向量。对于判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 选取任一初始非零向量:

$$\mathbf{v}^{(0)} = (1, 1, \dots, 1)^T \quad (3.14)$$

(3) 迭代计算。对于 $k = 0, 1, 2, \dots$, 执行如式 (3.15) - (3.17) 迭代, 其中, $\max(\mathbf{u}^{(k+1)})$ 表示向量 $\mathbf{u}^{(k+1)}$ 中绝对值最大的分量, 标准化后得到的 $\mathbf{v}^{(k+1)}$ 即为第 $k+1$ 步迭代的特征向量近似值。

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = A\mathbf{v}^{(k)} \quad (3.15)$$

$$m^{(k+1)} = \max(\mathbf{u}^{(k+1)}) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{v}^{(k+1)} = \frac{\mathbf{u}^{(k+1)}}{m^{(k+1)}} \quad (3.17)$$

(4) 收敛判断。计算相邻两次迭代的特征向量的差值, 直至满足式 (3.18) 的条件时迭代停止。其中, ϵ 为预设的精度阈值。

$$\|\mathbf{v}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k)}\| < \epsilon \quad (3.18)$$

(5) 权重提取。对最终的主特征向量 $\mathbf{v}^{(k+1)}$ 进行归一化即为权重向量 $\mathbf{w}$, 如式 (3.19) 所示。此时, 其对应的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 由式 (3.20) 计算。

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{v}^{(k+1)}}{\sum_{i=1}^n v_i^{(k+1)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.19)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\mathbf{w})_i}{w_i} \quad (3.20)$$

(6) 一致性检验。计算一致性指标 CI 与一致性比率 CR 进行一致性检验，当 $CR < 0.10$ 时通过检验。其中， RI 是随机一致性指数，可通过查表获得（ $n=8$ 时， $RI=1.41$ ）。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.21)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.22)$$

通过上述流程，可完成判断矩阵特征向量的求解，实现指标相对重要性的定量表达，为后续模糊综合评价提供可靠的权重向量。

3.5.2 隶属度函数构建

为克服传统确定性评价方法在阈值边界处引发风险等级突变的问题，使其更符合建筑结构风险渐进演化的客观规律，本文引入模糊数学中的隶属度概念，对建筑结构风险状态进行连续化表征。模糊综合评价的核心在于通过隶属函数刻画评价对象对不同风险等级的归属程度，从而将原本“非此即彼”的离散判定转化为具有过渡特征的连续表达。在隶属函数的具体构建中，常见形式包括三角形函数、高斯函数及梯形函数等。本文选用梯形隶属函数作为基本模型，该函数不仅能够较好地反映指标在某一区间内“完全隶属”的特征，同时在区间边界处具有线性过渡特性，适用于描述建筑结构风险的渐变过程。

针对建筑结构风险的实际演化特征，本文对不同等级的隶属函数形式进行了差异化设计，以增强其工程适用性：A 级采用偏小型半梯形函数（式 3.23）；D 级采用偏大型半梯形函数（式 3.24）；B 级、C 级采用中间梯形函数（式 3.25）。

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq c \\ \frac{x-c}{d-c}, & c < x \leq d \\ 1, & x > d \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (3.25)$$

其中, x 为待模糊化评估指标, 本文采用前述 3.2.3 节计算得到的标准化风险指数 $I_{x,i}$ 作为隶属度函数的输入变量。 a 、 b 、 c 、 d 为隶属函数的特征参数, 其取值遵循以下原则: 当标准化风险指数位于某一风险等级阈值中间时, 其对应该等级的隶属度为 1.0, 等级划分最为明确; 当标准化风险指数临近两等级边界时, 其对相邻两等级的隶属度均为 0.5, 风险状态模糊性最大。此时, $I_{x,i}$ 在不同风险等级下对应的相关特征参数取值及函数图像如图 3.6 所示。

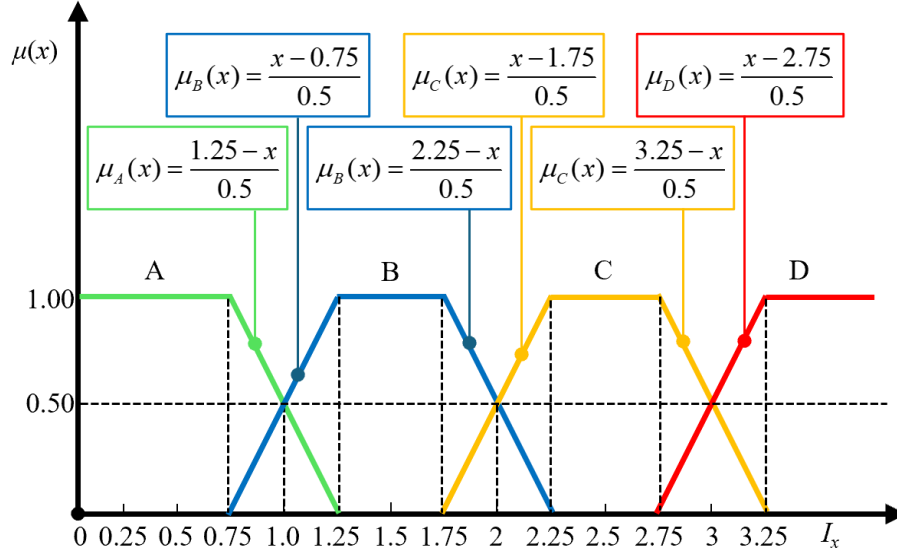


图 3.6 隶属度分布函数

3.5.3 综合风险评估模型

在完成各变形指标标准化、权重确定及隶属度建模后, 需进一步对多指标风险信息进行综合融合, 以实现建筑结构变形风险的整体判别。传统模糊综合评价通常采用固定权重对各指标隶属度进行加权合成, 但该处理方式在建筑结构风险评估中可能低估局部指标严重超限对整体结构安全的主导性影响。

鉴于此, 本研究在模糊合成前, 引入了基于标准化风险指数的动态权重惩罚机制。具体而言, 在保持层次分析法所确定的基础权重向量不变的前提下, 当某指标风险指数显著高于均值时, 其超标倍数直接转化为权重放大因子, 依据各指标标准化风险指数相对于平均值的超限程度, 对相应指标权重进行放大与归一化处理, 如式 (3.26)、(3.27) 所示。同时, 通过归一化处理, 可对因建筑有效归属 PS 点数量不足而无法提取的变形指标自动赋权为零, 提升了评价模型在实际工程应用中的适用性。

$$w'_i = w_i \times \frac{I_{x,i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{x,i}} \quad (3.26)$$

$$\bar{w}_i' = \frac{w_i'}{\sum_{i=1}^n w_i'} \quad (3.27)$$

其中, $I_{x,i}$ 为第 i 项指标的标准化风险指数, n 为建筑单元实际可用的有效评估指标数量, w_i 第 i 项指标由 AHP 法确定的初始权重, w_i' 为经过惩罚调节后的中间权重, $\bar{w}_i'$ 为最终用于模糊合成的修正归一化权重。由修正归一化权重生成最终权重向量如式 (3.28) 所示。

$$W = [\bar{w}_1', \bar{w}_2', \dots, \bar{w}_8'] \quad (3.28)$$

对于第 i 项指标, 其风险指数 $I_{x,i}$ 经梯形隶属函数计算后, 得到对 A、B、C、D 四个等级的隶属度向量 $r_i = [\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D]_i = [r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}]$, 将 8 个指标向量纵向堆叠形成隶属关系矩阵 R , 如式 (3.29) 所示。其中, r_{ij} 表示第 i 项指标对第 j 风险等级的隶属度, 满足 $r_{ij} \in [0, 1]$, 且 $\sum_{j=1}^4 r_{ij} = 1$ 。

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{81} & r_{82} & r_{83} & r_{84} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

模糊合成运算是模糊综合评价的核心环节, 通过将因素权重向量 W 与模糊关系矩阵 R 经特定算子 “ $\circ$ ” 复合运算, 形成建筑综合风险模糊隶属度向量 B , 如式 (3.30)、式 (3.31) 所示。本文采用加权平均型模糊算子 ($\bullet, \oplus$) 进行矩阵合成, 对各指标隶属度按权重线性累加以兼顾所有指标贡献, 避免 “取小取大” 类算子可能造成的信息丢失。

$$B = W \circ R = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4] \quad (3.30)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^8 \bar{w}_i' \cdot r_{ij}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (3.31)$$

3.5.4 综合风险等级评定

建筑综合风险的隶属度向量 B 需去模糊化以确定最终等级, 一般采用最大隶属度原则 (Maximum Membership Degree Principle, MMDP) 及加权平均原则 (Weighted Average Principle, WAP) [177]。MMDP 以隶属度最大等级作为评定结果, 操作简便, 但当隶属度差异较小或分布接近时容易失效。相比之下, WAP 通过引入评分集向量与隶属度向量加权求和, 得到连续的综合风险得分, 并根据得分区间划分等级, 不仅保持等级划分的明确性, 也能够量化风险程度, 便于建筑间相对风险排序。此外, 在评价等级之间并非等价、判别过程需体现风险或后

果的不对称性的评估场景中，如工程结构安全评估和灾害风险排序，非对称贴近度法（Asymmetric Closeness Degree Principle, ACDP）被广泛应用，并在实践中证明能够有效提高评估的可信度^[178]。

本文中，分别采用前述 3 种去模糊化方法评定建筑风险等级，并对评估结果进行相互对比校验。其中，对于加权平均原则，取各风险等级标准化风险指数界限值构成评分集向量 $\mathbf{K} = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$ ，依据式 (3.32) 计算建筑综合风险得分 D ，（ $D \in [1, 4]$ ），并以表 3.3 所示的区间划分确定建筑综合风险等级。对于非对称贴近度，其定义如式 (3.33) 所示，其中， $\mu_A(v_k)$ 、 $\mu_B(v_k)$ 分别表示模糊集 A 与模糊集 B 在风险等级 k 处的隶属度； p 为贴近度调节参数，为任一正实数，用于控制对隶属度差异的敏感程度，本文取 $p=1$ ，以降低隶属度估计误差对评价结果的影响，保证风险等级判定的稳定性。应用非对称贴近度对进行等级评判时首先需要模糊向量 $\mathbf{B}$ 及其特征模糊子集进行标准化处理，再代入式 (3.33) 中计算二者非对称贴近度值，最终取最大值对应的风险等级为评估结果，具体计算流程可参考文献^[179]。

$$D = \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}^T = \sum_{j=1}^4 b_j \cdot k_j \quad (3.32)$$

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \mu_A^p(v_k) - \mu_B^p(v_k) \right|^k \quad (3.33)$$

表 3.3 综合风险等级判定方法

风险等级	综合风险得分区间
A 类风险	$1.0 \leq D < 1.5$
B 类风险	$1.5 \leq D < 2.5$
C 类风险	$2.5 \leq D < 3.5$
D 类风险	$3.5 \leq D \leq 4.0$

3.6 本章小结

针对现有基于 InSAR 的建筑风险评估研究多聚焦于单一变形指标分析与区域风险定性判定，难以综合反映多指标耦合影响及建筑个体差异的问题，本章以 InSAR 监测数据为基础，以建筑单元为对象，提出了一套面向城市建筑群的综合风险评估方法。主要内容如下：

（1）考虑 PS 点空间定位偏差与城市复杂变形干扰，提出建筑单元有效归属 PS 点提取方法。考虑到 PS 点数据空间定位偏差固有局限，采用基于缓冲区设定的建筑轮廓与 PS 点空间匹配，以确保单体建筑变形分析数据的完整性；同时，

针对城市场景建筑复杂变形特征，提出基于高程差阈值的干扰数据点剔除方法，保障评估指标计算准确性与评估结果可靠性。

（2）结合建筑沉降变形机理与 InSAR 观测特性，构建面向建筑单元的变形风险评估指标体系。结合建筑沉降变形机理及相关规范要求，构建适配 InSAR 观测特性的 8 项建筑结构风险量化指标体系，涵盖整体变形、空间差异变形与刚体姿态变形三个维度，实现 InSAR 变形信息向工程风险语义的标准化转译；并详细阐述了各项指标的计算方法及标准化处理过程，进一步明确了各指标的物理意义及工程判别依据。

（3）融合层次分析法与模糊综合评价理论，建立建筑综合风险等级定量判定方法。引入层次分析法与模糊综合评价理论，建立了多指标融合的建筑风险评估框架；提出基于标准化风险指数的动态权重惩罚机制，以增强局部指标严重超限对整体风险的主导效应；进一步介绍了最大隶属度原则、加权平均原则及非对称贴近度法三种去模糊化方法理论，以实现建筑风险等级的定量化判定。

第 4 章 建筑群变形监测与风险评估应用

4.1 引言

在城市复杂建成环境中，建筑物类型多样、结构差异显著且空间分布密集，使得建筑安全风险的精细化识别面临较大挑战。近年来，基于星载 InSAR 技术的大范围地表形变监测已取得显著进展，在城市尺度形变信息获取方面展现出高时空分辨率与广域覆盖能力。然而针对建筑单元尺度的风险量化评估，现有研究仍存在评估指标体系不统一、评价方法可操作性与可迁移性不足等问题，制约了 InSAR 技术在建筑安全评估中的工程化应用。为充分挖掘 InSAR 技术在城市尺度建筑变形监测与风险识别中的应用潜力，并验证本文第三章所构建多指标综合风险评估方法的有效性，本文选取长沙市典型区域作为研究对象，开展基于时序 PS-InSAR 技术的建筑群变形信息提取与风险评估研究。依据所构建的指标体系与综合评价模型，完成研究区建筑风险等级的定量划分与空间分布特征分析，并对识别的高风险建筑开展实地踏勘与验证，以检验评估结果的可靠性与所提方法的工程适用性。

4.2 研究区与数据来源

4.2.1 研究区概况（长沙市）

长沙市地处湘江中下游河谷阶地，属典型冲积-洪积软土区，区域内第四系淤泥质粘土覆盖广泛，地层结构复杂。湘江及其支流贯穿城区，地下水受季节性降雨、河流水位波动及城市建设活动影响明显。长沙市作为我国中部地区重要区域中心和省会城市，全市总面积为 11818km²，经度为 111°53'E~141°15'E，纬度为 27°51'N~28°41'N。随城镇化与城市更新进程加快，长沙市城市建设规模持续扩大市区建成区面积达 1043.99km²，常住总人口规模超千万人。快速开发背景下，城区住房结构多样，除大量商品房、保障性住房和新建小区外，自建房、城中村与老旧建筑存量庞大。据排查，全市范围内已排查自建房数量逾 40 万栋，其普遍存在的设计与施工质量缺陷与复杂地质水文环境叠加，使得建筑结构安全隐患在长期服役过程中持续累积。

2022 年，长沙望城发生“4·29”特别重大居民自建房倒塌事故，造成 54 人遇难，直接经济损失 9077.86 万元。周云等^[56]对事故进行了系统溯源分析，指出在缺乏传统监测历史基线数据的情况下，InSAR 技术成为回溯建筑历史真实变形过程的唯一方式，并在事故分析中成功还原了违规加层后的沉降演进趋势。该事故不仅暴露出城市存量建筑，尤其是自建房和老旧建筑在长期安全监管中的突出

隐患，也凸显了利用 InSAR 技术开展城市尺度建筑群变形风险普查与早期识别预警的必要性与技术优势。

4.2.2 SAR 与辅助数据说明

为支撑城市尺度建筑群结构变形监测与风险评估，本研究系统整合了多源遥感数据及各项辅助数据，相关数据来源、用途如表 4.1 所示。其中，SAR 影像采用意大利 Cosmo-SkyMed 卫星降轨条带模式下获取的 X 波段高分辨率影像数据，时间跨度为 2022 年 9 月至 2025 年 8 月，共计 35 景。影像极化方式为 HH，波长 3.1cm，空间分辨率为 3m，卫星入射角为 23.9°，影像数据覆盖范围如图 4.1 所示。

表 4.1 数据介绍

数据类型	数据来源	数据用途
SAR 影像	Cosmo-SkyMed 卫星	反演研究区时序变形结果
数字高程模型	COP-DEM_GLO-30	模拟并去除地形相位
温度数据	网络气象大数据平台	分离热膨胀引起的温度相位
光学遥感影像	Google Earth	提取研究区建筑矢量轮廓

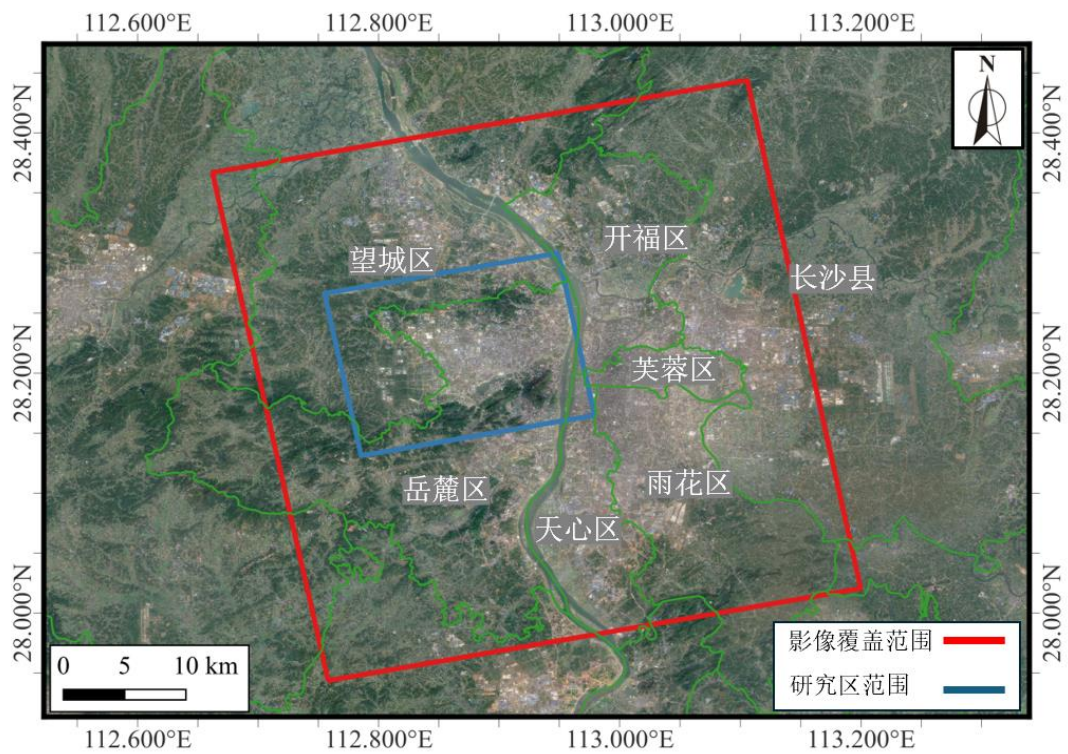


图 4.1 研究区范围

为干涉处理过程精确模拟并去除地形引起的相位成分，本研究采用了欧洲空间局提供的哥白尼数字高程模型（Copernicus Digital Elevation Model, COP-DEM）中分辨率为 30 米的 COP-DEM_GLO-30 数据作为关键辅助数据以确保变形反演结果的准确性。温度数据用于作为先验参数融入 PS-InSAR 相位解算模型，用于分离建筑物及地表因温度变化产生的热膨胀变形相位。相关数据通过网络气象大数

据平台获取，来源于欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的历史再分析网格温度数据，时间分辨率为小时级。选取 GMT+8 时区凌晨 6 时的温度数据，与所选 Cosmo-SkyMed 卫星过境长沙市上空的 SAR 影像成像时刻同步，如图 4.2 所示。

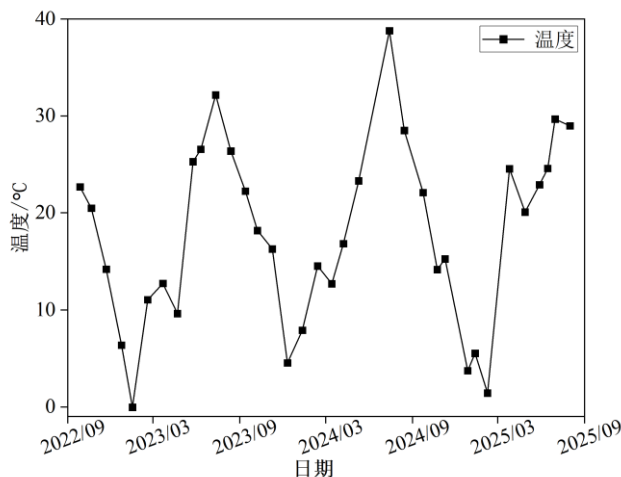


图 4.2 SAR 影像成像时刻对应温度数据

为实现 PS-InSAR 时序形变点与单体建筑的精准空间匹配，本研究基 Google Earth 平台获取的亚米级分辨率光学正射影像，完成研究区单体建筑轮廓矢量提取工作。具体而言，采用一种面向光学遥感影像建筑精细分割的 SPR-Net 模型实现建筑物自动化识别，在模型批量分割结果的基础上，辅以人工目视解译完成轮廓校正与一致性检查，最终得到研究区全覆盖的单体建筑轮廓矢量多边形。所用 SPR-Net 模型以 SegFormer 为骨干网络，采用层次化 Transformer 编码结构逐级提取多尺度建筑语义特征；针对遥感影像密集建筑群场景下建筑边界提取精度不足的问题，模型引入双阶段伪多模态增强策略强化建筑边缘表达，通过编码器浅层的拉普拉斯变换增强边缘特征响应，在解码器阶段利用初步预测结果引导特征重加权，实现建筑边界的自适应校准；输出阶段结合感受野注意力卷积完成局部拓扑结构精细化建模，在保证全局语义一致性的同时，实现了多尺度建筑边界的高精度分割，完全适配本研究的建筑轮廓提取需求。由于正射光学影像为近垂直成像视角，建筑屋顶与底座平面投影基本重合，提取的建筑轮廓矢量与建筑实际落地范围具有较高的空间匹配精度，可用于作为建筑将 PS 点空间关联至单体建筑，实现建筑级评估的辅助数据。

4.3 数据处理

4.3.1 SAR 影像时序处理

将选取的 35 景 SAR 影像统一裁剪至以 28.22°N、112.86°E 为中心、面积约 296km²的区域范围内，并基于 PS-InSAR 技术反演研究区的时序形变信息。以 2024

年1月12日成像影像作为主影像,其余影像作为副影像构建干涉时空基线网络(图4.3),经标准化处理流程共获取 864507 个有效 PS 监测点。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^[181],因此可将 LOS 向变形按式(3.1)分解至竖直方向。研究区竖向变形速率分布如图 4.4 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,研究区最大沉降速率为-10.6mm/年,最大抬升速率为 10.2mm/年,最大累积沉降量为 40.4mm,最大累积抬升量为 29.9mm。

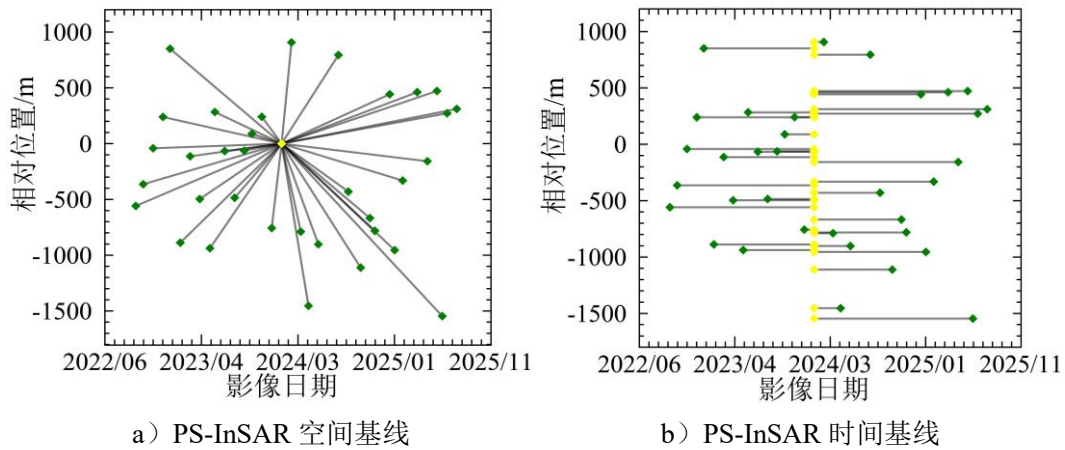


图 4.3 PS-InSAR 时空基线图

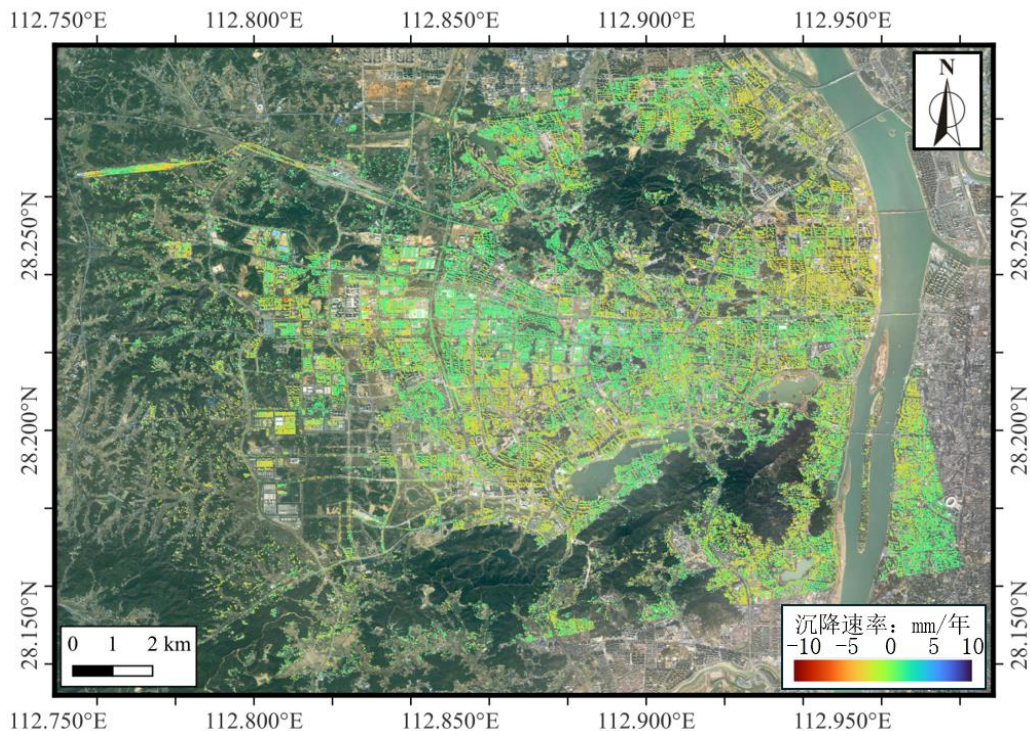


图 4.4 研究区沉降速率

此外,基于深度学习算法从光学影像中自动提取初始建筑图斑共计 40223 个。尽管正射光学影像成像视角近似垂直,建筑屋顶与底座平面投影基本重合,所提取建筑底座矢量整体精度较高。但受影像分辨率、遮挡及算法误判等因素影响,

部分建筑轮廓与实际位置及 PS 点云所刻画的结构边界仍存在一定偏差，同时存在对部分非结构构筑物（如临时棚屋）的误提取。经进一步结合 PS-InSAR 形变处理区域范围及结构属性约束，对建筑轮廓进行手动适配与修正后，最终形成用于风险评估的有效建筑单元 27693 个。

4.3.2 PS 点与建筑空间匹配

根据前 3.1 节所述方法，首先将研究区 DEM 高程与 PS 点高程进行对比，设定高程差阈值以初步剔除高层建筑顶部 PS 点，以规避高层建筑上部结构因温度变形及风振效应等正常结构响应对建筑变形风险评估的干扰。随后，对获取的建筑矢量轮廓施加 3m 缓冲区并与 PS 点进行空间关联，仅保留落入建筑缓冲区内的 PS 点；各建筑单元内归属的有效 PS 点集合被视为独立样本，用于后续变形指标计算。经上述处理，共获得 455582 个有效 PS 点，分布于研究区 20396 个建筑单元内，建筑检测覆盖率为 73.65%，平均每栋建筑包含 13 个有效归属 PS 点，单体建筑内 PS 点数量最大值达 1872 个。图 4.5 展示了研究区建筑有效归属 PS 点的空间分布特征，表 4.2 给出了相关统计汇总结果。

表 4.2 研究区建筑归属 PS 点数量统计

统计	建筑轮廓总量	建筑归属 PS 点数量			
		$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n\geq 3$
数量	27693	7297	1357	1345	17694
比例	100%	26.35%	4.95%	4.86%	63.89%

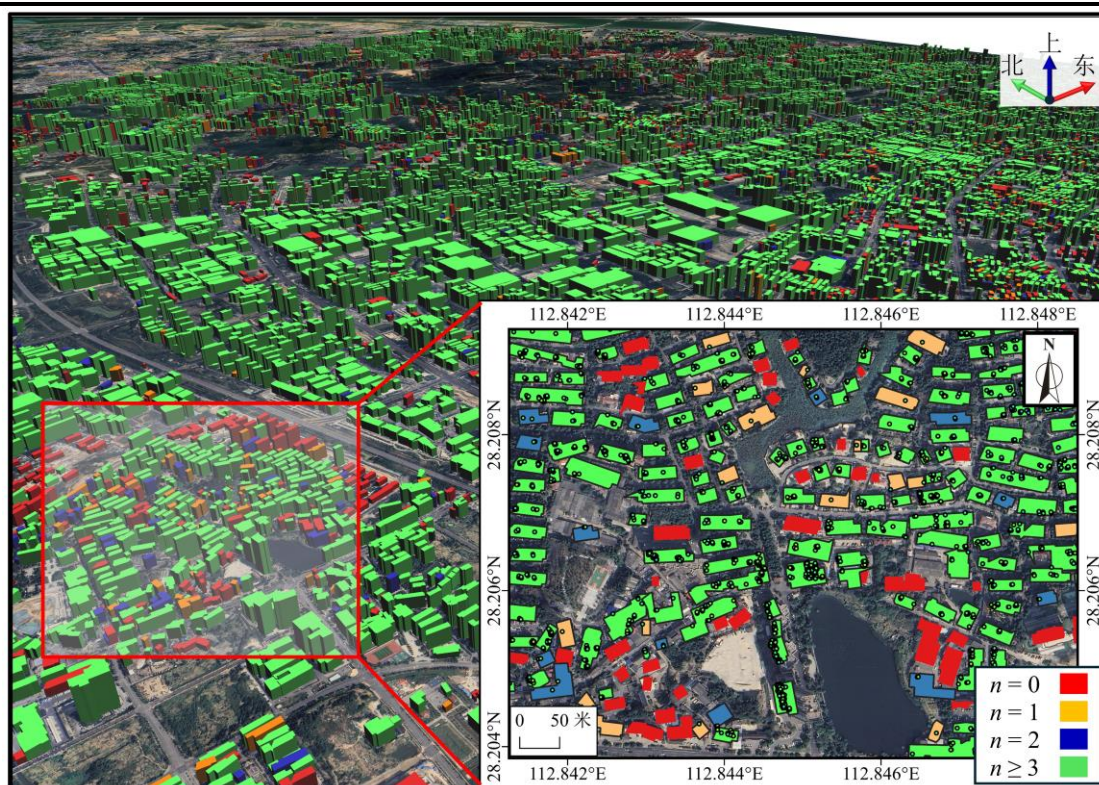


图 4.5 建筑归属 PS 点数量分布

4.4 研究区风险评估结果

4.4.1 单项指标统计特征分析

基于所提出的建筑综合风险评估方法，对研究区内 20396 个有效检测建筑单元（即建筑归属 PS 点数量 $n>0$ ）开展批量分析，提取各建筑单元对应的 8 项变形风险评估指标。通过将指标计算结果与表 3.1 中给定的等级界限阈值进行对比，初步统计得到研究区建筑群在各单项指标下所处风险区间的分布特征，其结果如图 4.6 所示。

根据单项指标角度的统计分析结果，研究区建筑在累计沉降量与沉降速率指标下普遍处于低风险区间，表明在所分析时段内区域尺度地表变形整体处于稳定演化阶段，并未发生显著的持续性大幅沉降。此时，仅依靠单点时序趋势类指标难以有效识别潜在风险建筑。相比之下，基于建筑单元内部相对变形特征构建的空间变异类指标（如沉降梯度、倾斜等）表现出更高比例的中高风险识别结果，且高风险建筑主要由上述指标所识别。该现象表明，研究区内建筑变形呈现为低幅值、高差异的局部变形特征，即潜在风险更多以空间差异性变形的形式显现，而非表现为显著的整体沉降趋势。此外，各指标风险分布的不一致性进一步说明，单一指标难以全面反映建筑安全状态，不同指标在风险识别中具有互补作用。特别是在 InSAR 监测条件下，受观测方向及数据特性的影响，不同指标对结构响应的敏感性存在差异。因此，有必要通过多指标融合方法对各类信息进行综合表达，从而提高建筑风险识别的完整性与可靠性。

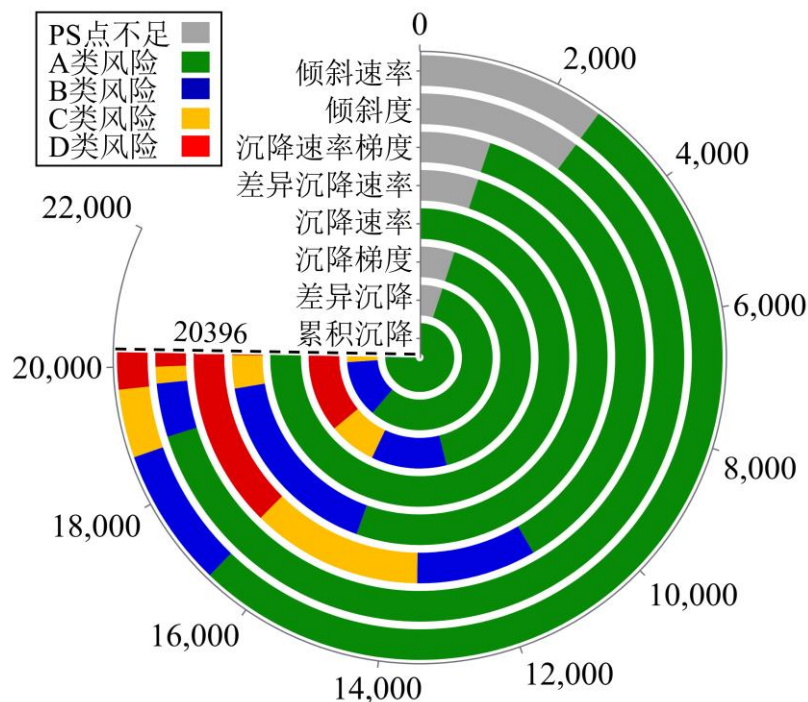


图 4.6 单项评估指标的风险等级分布统计

4.4.2 综合风险等级判定与结果对比分析

依据所构建建筑变形风险等级评价体系，采用层次分析法建立判断矩阵，并结合结构受力机理与 InSAR 监测特性，对各指标重要性进行两两比较。总体上，变形量指标直接反映结构受力状态，较变形速率指标赋予更高重要性等级；在具体指标层面，空间差异变形指标作为导致建筑结构损伤和功能退化的关键因素，其重要性被赋予最高权重，整体变形与刚体倾斜类指标次之。此外，鉴于梯度及倾斜类指标对 PS 点空间分布较为敏感，指标计算结果易受局部点位影响，存在一定的不确定性，故对其相对重要性进行适当下调，以兼顾工程意义与应用场景适用性。在此基础上，经 3.4.1 节所述幂法迭代后，得到 8 项指标的初始权重如表 4.3 所示。同时，对判断矩阵进行一致性检验，其一致性比例 $CR=0.03972<0.1$ ，满足一致性要求，表明指标权重结果合理可靠，可用于后续建筑综合风险评估。

表 4.3 建筑风险评估指标判断权重矩阵

指标	累计沉降	差异沉降	沉降梯度	沉降速率	差异沉降速率	沉降速率梯度	倾斜度	倾斜速率	权重
累计沉降	1	1/2	2	2	2	3	1	2	0.170352
差异沉降	2	1	3	3	1/2	5	2	3	0.223265
沉降梯度	1/2	1/3	1	1	1/2	2	1	1	0.084768
沉降速率	1/2	1/3	1	1	1/2	2	2	1	0.097634
差异沉降速率	1/2	2	2	2	1	4	2	2	0.194858
沉降速率梯度	1/3	1/5	1/2	1/2	1/4	1	1/3	1/2	0.042818
倾斜度	1	1/2	1	1/2	1/2	3	1	2	0.107971
倾斜速率	1/2	1/3	1	1	1/2	2	1/2	1	0.078335

进一步地，按照 3.3 节、3.4 节所述流程，依次获取待评估建筑单元的标准化风险指数、单指标隶属度、修正归一化权重向量及综合隶属关系矩阵，并通过模糊矩阵合成对研究区建筑单元的多项变形风险信息进行统一融合，形成研究区建筑群的综合风险模糊隶属度向量。最后，分别采用最大隶属度法（MMDP）、非对称贴近度法（ACDP）及加权平均原则（WAP）三种去模糊化方法对研究区建筑风险等级进行判定，获得了研究区建筑群的综合风险等级空间分布图谱及数量统计特征，如图 4.7 所示。

总体来看，三种方法均显示研究区建筑整体以 A、B 类低风险等级为主，其空间分布未呈现明显集聚特征，表现出较强随机性。然而，不同去模糊方法在中高风险等级（C、D 类）细分结果上存在一定差异。其中，MMDP 与 ACDP 的评估结果较为接近，均识别出数量较多的 D 类风险建筑，而基于 WAP 的结果下 D 类建筑数量显著减少，B、C 类建筑占比相应提高，其风险等级分布形态更符合城市建筑群中建筑数量随风险等级升高而逐级递减的一般统计特征。

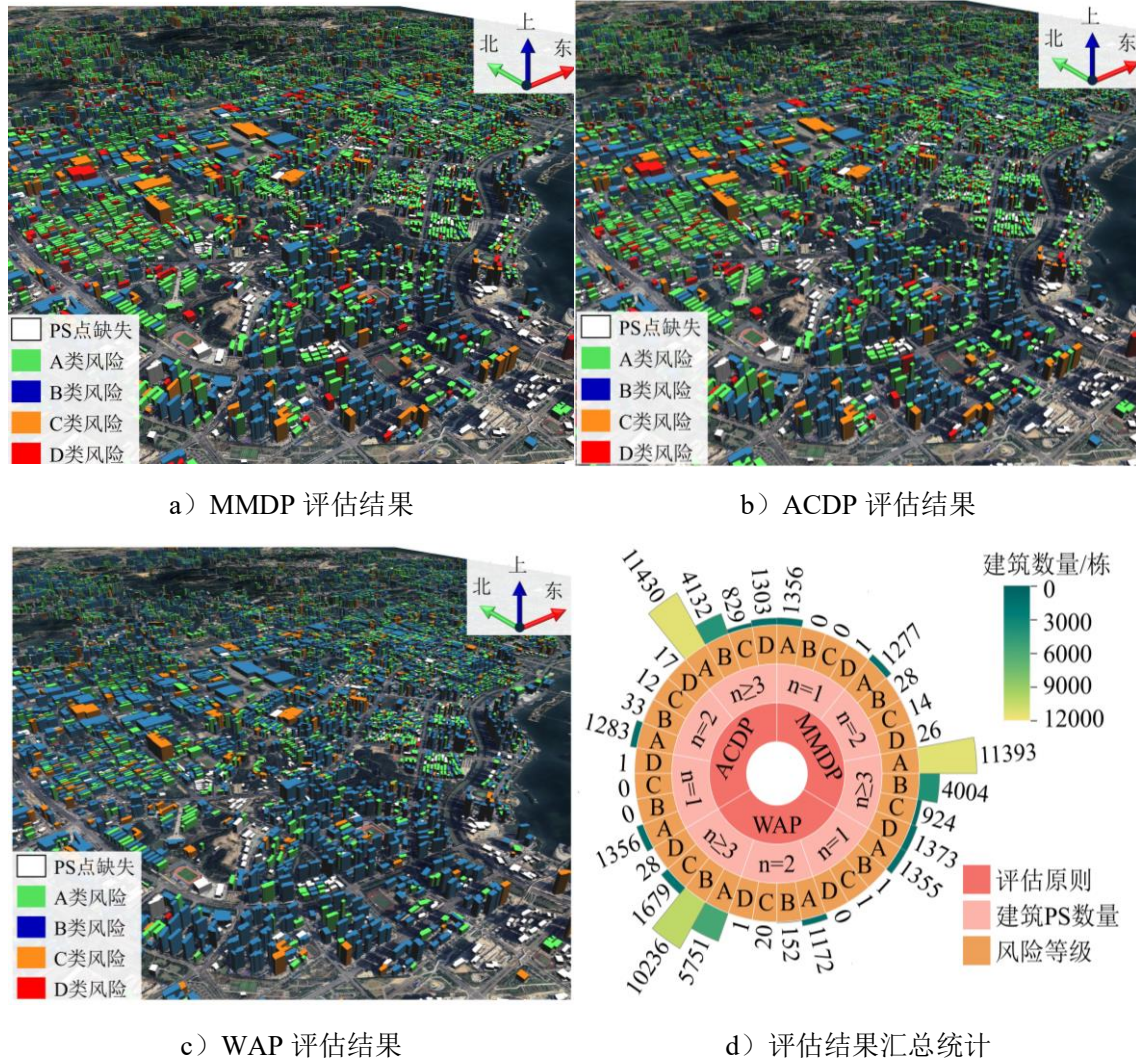


图 4.7 研究区建筑风险评估结果空间分布与统计特征

值得指出,上述差异并非来源于不同方法在风险建筑总体识别能力上的优劣,其本质上反映了不同去模糊规则对不确定性边界的判别侧重差异。统计结果表明,三种去模糊方法识别出的 C 类与 D 类风险建筑总量基本一致(图 4.7d)。同时,根据三种方法下各建筑单元对应风险等级结果进行 Pearson 相关性分析(图 4.8)可知, WAP 与 MMDP、ACDP 的识别结果相关系数分别为 0.7215 和 0.7271,而 MMDP 与 ACDP 间相关系数达 0.8744。这表明,不同方法在“建筑是否存在潜在风险”及“潜在风险建筑空间分布位置”的识别层面具有良好一致性,可稳定地从大规模建筑群中筛查出结构状态相对不稳定或存在潜在风险的建筑子集。该一致性结果从侧面验证了本文所构建方法论框架在城市尺度建筑风险筛查中的鲁棒性与可靠性。综合考虑风险等级的连续性与分布规律,本文以 WAP 的计算结果作为主判定依据,因其更能体现建筑风险随指标变化的连续过渡特征,且在高风险识别上表现出良好的稳定性;而 MMDP 与 ACDP 则作为辅助方法用于交叉验证,用于识别需重点复核的建筑单元。

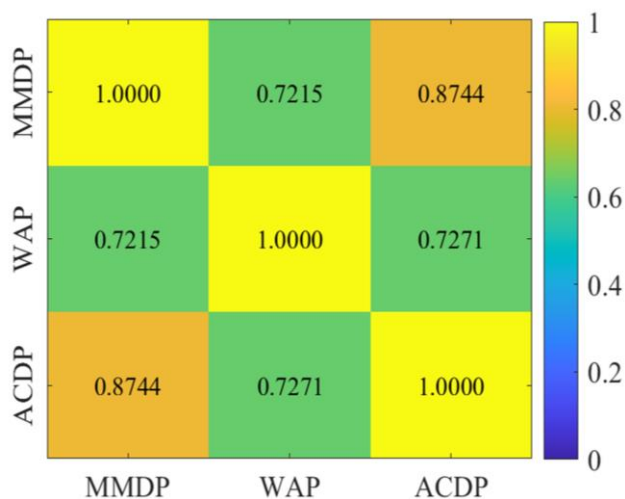


图 4.8 评估结果相关性分析

4.4.3 风险判定差异成因分析

为探明不同去模糊方法判定结果差异成因，对由 MMDP 与 ACDP 判定为 D 类风险的建筑单元进行回溯分析发现，该类建筑的综合风险模糊隶属向量普遍呈现出 A 类与 D 类隶属度同时偏高、而 B 与 C 类隶属度较低的双峰型结构特征，如图 4.9 所示。此情形下，MMDP 及 ACDP 因对极值具有较高的判别敏感性，从而倾向于给出更为保守的风险判定结果。

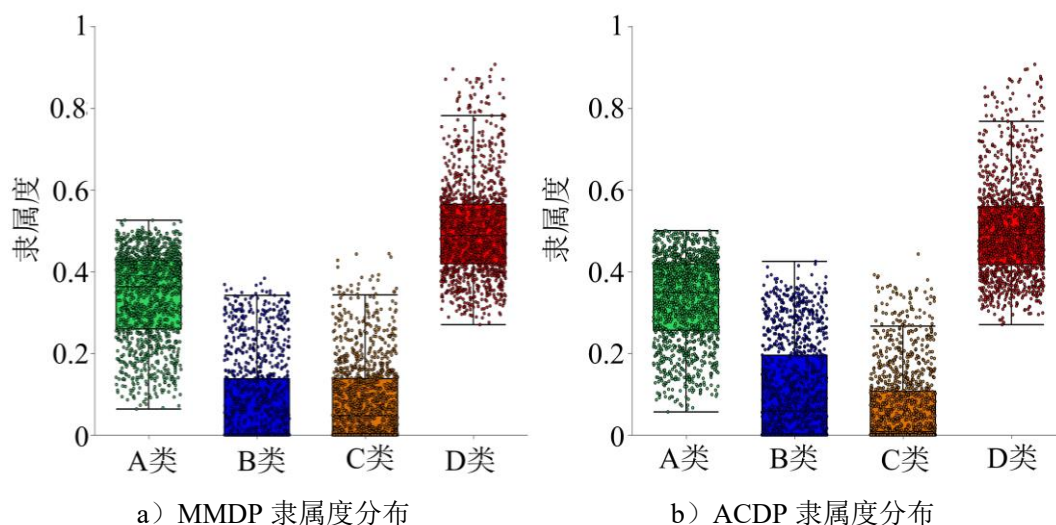


图 4.9 D 类建筑模糊隶属度分布

进一步结合建筑归属 PS 点数量及其空间分布特征分析表明，由隶属度分布“中间断层”导致的异常风险判定结果主要集中于两类建筑单元：其一为归属 PS 点数量接近算法下限的建筑，有限点集条件下空间拟合稳定性较弱，导致倾斜类指标误差被放大，从而出现物理意义上不合理的异常高值。其二为 PS 点空间分布高度集中的建筑，受 PS 点分布不均及定位偏差影响，部分建筑上存在 PS 点平面距离很小的情况，此时，微小的形变差异在以点间距离为分母计算梯度指标时

被显著放大。此外，当 PS 点在建筑平面内高度集中而非均匀覆盖时，即使 PS 点总数满足算法下限，其所能表征的建筑整体变形信息仍可能存在偏差。

为进一步明确建筑单元内有效 PS 点数量对风险评估结果的影响机制，本文选取倾斜指标计算所需的最小 PS 点数量 ($n=3$) 及研究区建筑归属 PS 点数量中位数 ($n=10$) 作为参考阈值，分别对 MMDP、WAP 与 ACDP 三种去模糊化方法的评估结果进行核密度估计分析。结果显示，以倾斜指标计算下限 ($n=3$) 时为分析对象时，如图 4.10 所示，尽管满足该条件的建筑单元数量较少，导致其在 D 类风险评估结果中的核密度显示不甚明显，但仍可观测到 MMDP 与 ACDP 方法在高风险评估结果 (C、D 类) 的核密度值高于 WAP 评估结果。当选取 PS 点数量处于 $n \in [3,10]$ 范围内的建筑单元进行分析时，如图 4.11 所示，三种去模糊方法判定为高风险 (C、D 类) 的建筑分布密度均有不同程度提升，其中 MMDP 与 ACDP 方法的增幅最为明显，显著高于 WAP 方法。上述结果表明，PS 点数量不足是导致研究区呈现 A-D 双峰型隶属度分布特征的重要原因之一。

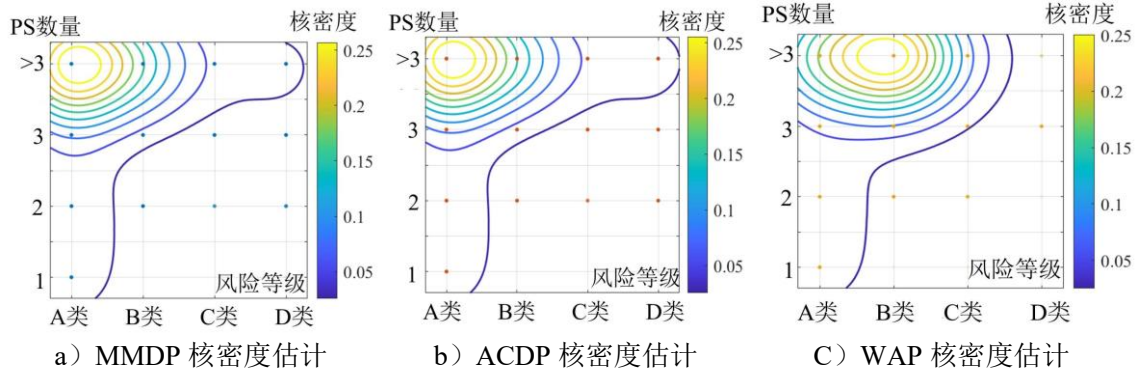


图 4.10 不同去模糊化方法风险评估结果核密度估计 ($n=3$)

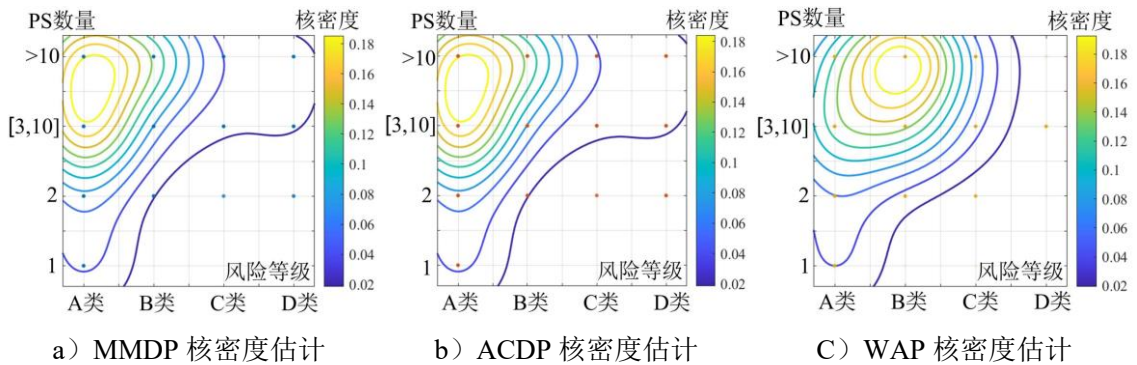


图 4.11 不同去模糊化方法风险评估结果核密度估计 ($n \in [3,10]$)

值得指出，上述指标放大效应在一定程度上引起了部分变形参数工程含义的偏移，同时也进一步暴露出既有建筑允许变形与风险分级阈值体系在面向星载 InSAR 建筑风险判定时的适配性不足问题。现有建筑允许变形及风险分级阈值多基于传统地面监测体系建立，其监测点位置明确且布设于结构关键受力部位。而星载 InSAR 技术受观测 LOS 向一维性、散射体定位偏差及多次散射效应等因素影响，其变形反演结果与规范指标在工程含义上并非完全等价。因此，构建面向

InSAR 技术体系的适配性建筑风险指标阈值框架,是后续工程化应用中亟需解决的重要问题,其实现依赖于大样本监测案例与现场勘探数据支撑,并通过对 InSAR 形变指标与真实结构响应之间映射关系的持续迭代修正加以完善。

4.4.4 建筑风险评估示例及实地勘探

为规避单一方法判定偏差及个别指标异常波动引发的风险误判,本文构建多方法融合的风险判定规则:以三种方法评定结果的一致性为核心判据,当均判定为高风险时,将该建筑认定为重点管控对象;并基于加权平均原则(WAP)计算综合风险得分并开展相对风险排序,作为工程管控优先级的参考依据;对于呈现 A-D 双峰型隶属结构的建筑,识别为风险归属不确定对象,纳入重点人工复核范围,以降低误判风险。

为直观展示本文所提评估方法的完整计算流程,同时验证方法对风险建筑的识别可靠性,选取 3 栋经上述三种方法联合评定为高风险等级的建筑作为示例,系统演示从 PS 点时序监测数据到建筑综合风险等级的完整转译过程,并结合实地踏勘结果验证方法的准确性,示例建筑在研究区的空间分布如图 4.12 所示。基于 InSAR 监测结果,提取 3 栋示例建筑的各项变形风险评估指标实测值(表 4.4),依次经图 3.5、图 3.6 及 3.3.4 节所述方法,计算建筑标准化风险指数、单指标隶属度、修正归一化权重及综合隶属度,结果如表 4.5 所示。在此基础上,基于综合隶属度向量,分别采用 MMDP、ACDP 及 WAP 对建筑风险等级进行判定,评估结果如表 4.6 所示。

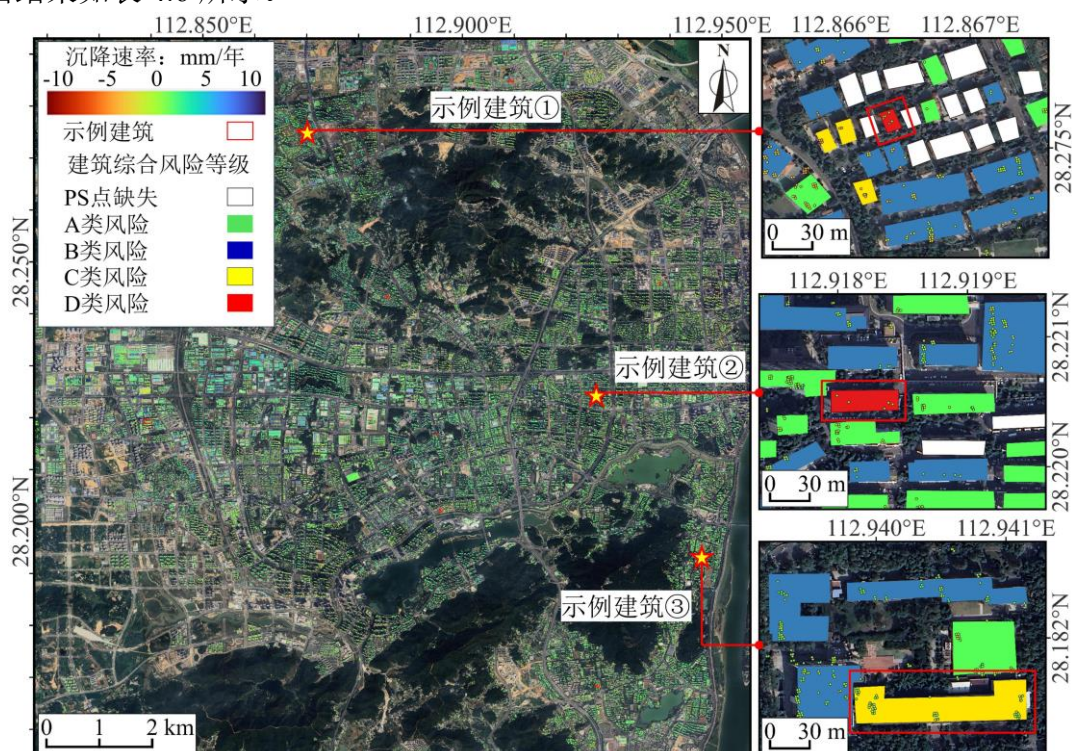


图 4.12 示例建筑分布

表 4.4 示例建筑变形指标实测值

指标/建筑编号	单位	建筑①	建筑②	建筑③
累计沉降	mm	14.05	5.08	8.61
差异沉降	mm	16.74	2.95	7.62
沉降梯度	rad×10 ⁻³	9.731	0.286	11.187
沉降速率	mm·yr ⁻¹	5.31	0.19	1.25
差异沉降速率	mm·yr ⁻¹	3.56	0.10	1.73
沉降速率梯度	rad·yr ⁻¹ ×10 ⁻⁴	0.760	0.013	5.796
倾斜度	rad×10 ⁻³	8.332	25.227	0.057
倾斜速率	rad·yr ⁻¹ ×10 ⁻⁴	9.145	10.528	0.014

表 4.5 示例建筑评估指标计算结果

示例建筑指标	标准化风险指数	单指标隶属度	修正归一化权重	综合隶属度
建筑①	累计沉降	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0348	
	差异沉降	[0.00 1.00 0.00 0.00]	0.0647	
	沉降梯度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.2235	
	沉降速率	[0.38 0.62 0.00 0.00]	0.0385	[0.0492 0.1283
	差异沉降速率	[0.94 0.06 0.00 0.00]	0.0421	0.0025 0.8199]
	沉降速率梯度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.1680	
	倾斜度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.2319	
	倾斜速率	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.1965	
建筑②	累计沉降	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0395	
	差异沉降	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0751	
	沉降梯度	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0139	
	沉降速率	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0042	[0.1499 0.0000
	差异沉降速率	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0111	0.0000 0.8501]
	沉降速率梯度	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0061	
	倾斜度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.4927	
	倾斜速率	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.3574	
建筑③	累计沉降	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0642	
	差异沉降	[0.98 0.02 0.00 0.00]	0.1861	
	沉降梯度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.3583	
	沉降速率	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0267	[0.4333 0.0469
	差异沉降速率	[0.77 0.23 0.00 0.00]	0.1844	0.0000 0.5198]
	沉降速率梯度	[0.00 0.00 0.00 1.00]	0.1615	
	倾斜度	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0067	
	倾斜速率	[1.00 0.00 0.00 0.00]	0.0121	

表 4.6 示例建筑风险评估结果

建筑编号	最大隶属度原则	加权平均原则		非对称贴进度原则	
		得分	等级	非对称贴进度值	等级
建筑①	D 类	3.59	D 类	[0.4008 0.4547 0.3093 0.6986]	D 类
建筑②	D 类	3.55	D 类	[0.5474 0.4131 0.3576 0.8069]	D 类
建筑③	D 类	2.61	C 类	[0.5719 0.3849 0.2920 0.5870]	D 类

注：其中，非对称贴进度原则以贴进度值最大值对应的评价值为评估结果。

根据变形指标计算与评估结果，示例建筑①存在严重倾斜的同时伴随一定差异沉降。根据实地调研结果，可显著观察到建筑主体与其附属结构建筑发生严重分离，建筑结构主体墙体与相邻砖砌围护墙体出现竖向贯通分离裂缝，两个结构单元界面完全脱开（图 4.13a）；建筑竖向承重墙体与相邻砖柱间，出现从室外地坪延伸至构件上部的竖向贯通裂缝（图 4.13b）；建筑首层外墙勒脚部位与室外地坪间，出现沿墙长方向连续分布的贯通性水平脱开裂缝，主体结构 with 室外土体间存在明显竖向错位（图 4.13c）；建筑室外围护墙体出现全墙贯通的斜向剪切裂缝，裂缝沿墙体厚度方向贯穿，属于典型的沉降型结构性损伤（图 4.13d）。



图 4.13 示例建筑①实地勘探情况

对于示例建筑②，InSAR 监测及评估结果显示建筑整体存在较为显著的倾斜情况。实地探勘结果表明，上下结构单元出现贯通性水平脱开裂缝，上层主体结构与下层围护墙体完全分离，层间连接失效，为建筑不均匀沉降引发整体倾斜、上下层变形不协调所致，属于倾覆趋势引发的典型结构性损伤（图 4.14a）；建筑阳角部位上下结构层间出现显著水平脱开裂缝，上下结构完全错位，为结构整体倾斜引发阳角应力集中、层间连接断裂所致（图 4.14b）；建筑主体外墙与室外散水、路面间出现贯通性水平、竖向脱开裂缝，基础部位与周边地坪存在显著错位，散水结构伴随多处开裂破损，为建筑主体持续不均匀沉降、与周边地坪变形不协调所致（图 4.14c）。



图 4.14 示例建筑②实地勘探情况

示例建筑③的 InSAR 监测及评估结果显示，该建筑存在显著不均匀沉降情况。实地踏勘发现，建筑多层红砖外墙出现跨楼层竖向贯通裂缝，裂缝沿竖向连续延伸，砖体接缝处开裂显著，为建筑整体不均匀沉降引发的墙体竖向拉裂损伤（图 4.15a）；建筑室内楼梯间承重墙体出现斜向剪切裂缝，裂缝自门洞上角向上延伸至墙顶，表明沉降损伤已延伸至建筑室内主体结构（图 4.15b）；建筑结构阳角部位出现竖向贯通裂缝，裂缝沿竖向贯穿多层结构构件，构件饰面与砌体均出

现明显破损开裂（图 4.15c）；建筑首层窗下墙出现竖向贯通裂缝，裂缝自窗台压顶底部向下延伸，贯穿墙面饰面层（图 4.15d）。



图 4.15 示例建筑③实地勘探情况

4.5 本章小结

本章以长沙市主城区为研究区，对前文第 3 章构建的建筑安全风险综合评估方法开展了完整的工程实例应用与实地验证，完成了从时序 InSAR 变形数据获取到建筑风险等级判定、再到现场复核的全流程工作。相关工作有望为未来开展广域城市建筑 InSAR 风险评估、实现建筑安全常态化体检、风险分级管控提供理论支撑与实践参考。主要结论如下：

（1）完成研究区建筑时序变形信息反演与单指标风险分布解析，揭示了研究区建筑群低幅值高差异的变形特征。基于 Cosmo-SkyMed 卫星高分辨率 SAR 影像数据，采用 PS-InSAR 技术反演了研究区建筑群时序变形信息，结合建筑轮廓缓冲区匹配与高程差阈值剔除方法，实现了建筑单元有效归属 PS 点的提取与 8 项变形指标的计算。在此基础上，通过单指标风险识别结果的统计分析，揭示了研

究区建筑普遍存在的低幅值、高差异变形特征，单一指标难以全面表征建筑真实风险状态，从而凸显了多指标综合风险评估的必要性。

(2) 进行研究区建筑群全样本多指标融合风险评估与方法对比验证，厘清了不同去模糊化方法的结果差异机制。依据本文构建的评估方法体系，完成了研究区建筑群的全样本风险等级评定；通过三种去模糊化方法的评估结果相关性验证，初步证实了方法对高风险建筑的识别准确性；同时，深入分析了不同去模糊方法判定结果差异的机制，发现差异核心源于部分建筑 PS 点数量不足、空间几何条件异常引发指标计算失真，进而导致模糊隶属向量出现 A-D 双峰型结构特征，为后续评估方法与指标阈值体系的优化完善提供了重要依据。

(3) 开展高风险建筑实地踏勘与损伤特征记录分析，验证了本文所提评估方法的可靠性与工程适用性。选取 3 栋经多方法联合判定为高风险的典型建筑开展现场复核与损伤特征分析，结果表明，本文方法识别的高风险建筑均存在与地基不均匀沉降直接相关的结构性损伤，损伤特征与 InSAR 监测的变形规律、评估指标的异常特征高度契合，充分证明本文所提建筑风险评估方法能够准确识别高风险建筑及其损伤模式，具有良好的可靠性与工程适用性。

第 5 章 典型建筑结构沉降致损伤有限元分析

5.1 引言

建筑变形是反映结构受力状态与性能退化的重要表征，也是判定结构潜在损伤与失效风险的重要依据。然而，在建筑风险评估实践中仍存在评估指标体系复杂、阈值设定不统一以及缺乏力学依据等问题。国内外相关规范和研究涉及多个学科领域，不同指标及其阈值之间存在较大差异，尚未形成统一、系统的评价框架。由于建筑变形与结构损伤之间的定量关系尚不明确，使得基于 InSAR 变形指标开展建筑安全评估仍缺乏充分的力学支撑。此外，不同结构类型建筑对变形的耐受能力存在显著差异，采用统一阈值进行风险判定难以客观反映建筑实际安全状态。因此，亟需从结构力学机制出发，研究建筑变形与损伤演化之间的关系，为建立分类化、力学约束明确的建筑风险评估指标体系提供依据。建筑沉降作用下的结构响应受沉降模式、结构形式及尺度等多因素影响，传统试验方法难以系统覆盖大量工况组合。相比之下，有限元方法能够通过参数化建模灵活设置不同沉降情景，对结构受力与损伤演化过程进行系统分析。鉴于填充墙框架结构是我国民用建筑中最常见的结构形式，本章以典型填充墙框架结构为研究对象，建立有限元模型，通过设置不同柱脚沉降工况模拟结构响应过程，分析沉降作用下结构位移、应力及损伤演化特征，探讨沉降量与结构损伤之间的关系，为城市建筑沉降风险评估提供力学依据。

5.2 有限元模型建立

5.2.1 ANSYS 有限元方法

有限元方法（Finite Element Method, FEM）的核心思想是“化整为零，积零为整”，即将连续体结构离散为有限数量的单元，通过节点连接形成整体结构模型，并依据结构力学基本控制方程建立单元与整体结构之间的力学关系。通过在单元内部引入插值函数，将连续问题转化为有限自由度的离散问题，从而实现对复杂工程结构受力与变形行为的数值求解。随着有限元理论的发展及计算机技术的进步，基于有限元方法开发的通用分析软件得到了快速发展，为复杂工程问题的数值模拟提供了重要工具。

其中，ANSYS 作为大型通用多物理场有限元软件，因其求解稳定、模块齐全及兼容性强，在工程结构数值模拟领域得到了广泛应用。针对本研究所涉及的钢筋混凝土填充墙框架结构非线性分析问题，ANSYS 软件具有良好的适用性。一方面，软件提供了适用于混凝土、钢筋及砌体材料的多种本构模型，能够较为

合理地描述材料在复杂受力状态下的非线性行为；另一方面，其丰富的单元类型库能够满足混凝土、钢筋以及结构接触界面等不同构件的模拟需求。此外，其参数化设计语言能够灵活定义模型参数并实现批量工况计算，对于多工况结构响应分析具有明显优势。综上，本文选用 ANSYS 作为有限元分析平台，对典型填充墙框架结构在不均匀沉降作用下的受力响应及损伤演化过程进行数值模拟分析。

5.2.2 模型几何参数与材料信息

填充墙框架结构由于具有整体受力性能良好、结构布置灵活以及施工方便等特点，在我国多层民用建筑中得到了广泛应用。该结构体系中，框架梁、柱及楼板构成主体承重结构，主要承担建筑物的竖向荷载及水平作用；填充墙则主要起围护及空间分隔作用，通常不作为主要承重构件，但在结构受力过程中会对框架产生一定约束作用，从而对结构整体刚度及受力状态产生影响。因此，在研究地基不均匀沉降作用下结构受力性能时，选取填充墙框架结构作为研究对象具有较好的工程代表性。

本文选取典型多层钢筋混凝土填充墙框架结构作为分析对象，建立 3 跨×2 开间×3 层的结构三维有限元模型。结构平面布置如图 5.1a 所示，纵横向柱间距均为 6m，各层层高均为 4m。上述柱网尺寸及层高参数均符合我国多层民用建筑中常见的结构布置形式，能够较好反映实际工程结构的基本尺度特征。结构主体承重体系为钢筋混凝土框架结构，框架梁、框架柱及楼板均采用钢筋混凝土构件。梁柱的截面尺寸及配筋形式如图 5.1b、c 所示，该配筋方案参考常见钢筋混凝土框架结构设计取值确定，以保证模型在受力分析中的合理性。楼板厚度取 100mm，并沿两个正交方向按最小配筋率 0.2%进行配筋，以满足基本构造要求。

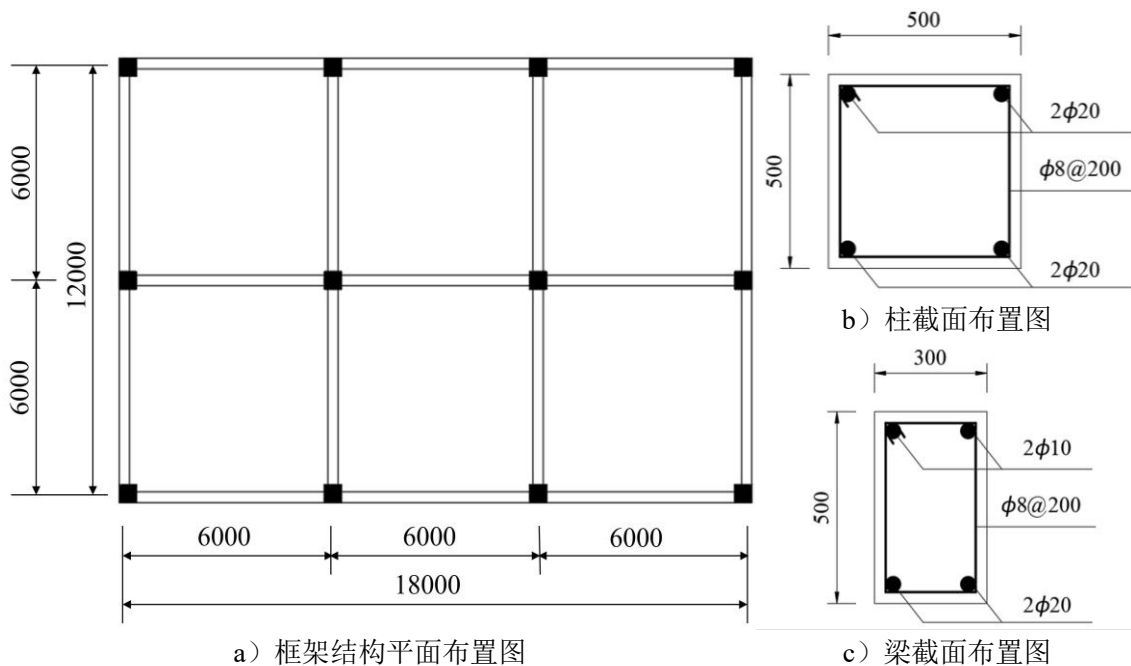


图 5.1 框架结构平面及梁柱截面布置（单位：mm）

填充墙采用砌体结构形式，在结构体系中主要作为围护构件存在，不承担主体结构竖向荷载，常因采光通风及空间布局需求在某一方向形成开敞空间而呈现非连续分布特征，体现“非承重构件服从使用功能”的工程原则。基于此，本文在保证结构基本受力特征的前提下对模型进行合理简化，采用沿长轴方向满布填充墙、另一方向不设置填充墙的方式，如图 5.2 所示，以等效反映门窗洞口及开间需求对填充墙刚度的削弱作用。墙体材料采用普通烧结砖砌体，并与砂浆共同形成砌体墙体结构，厚度取 100mm。

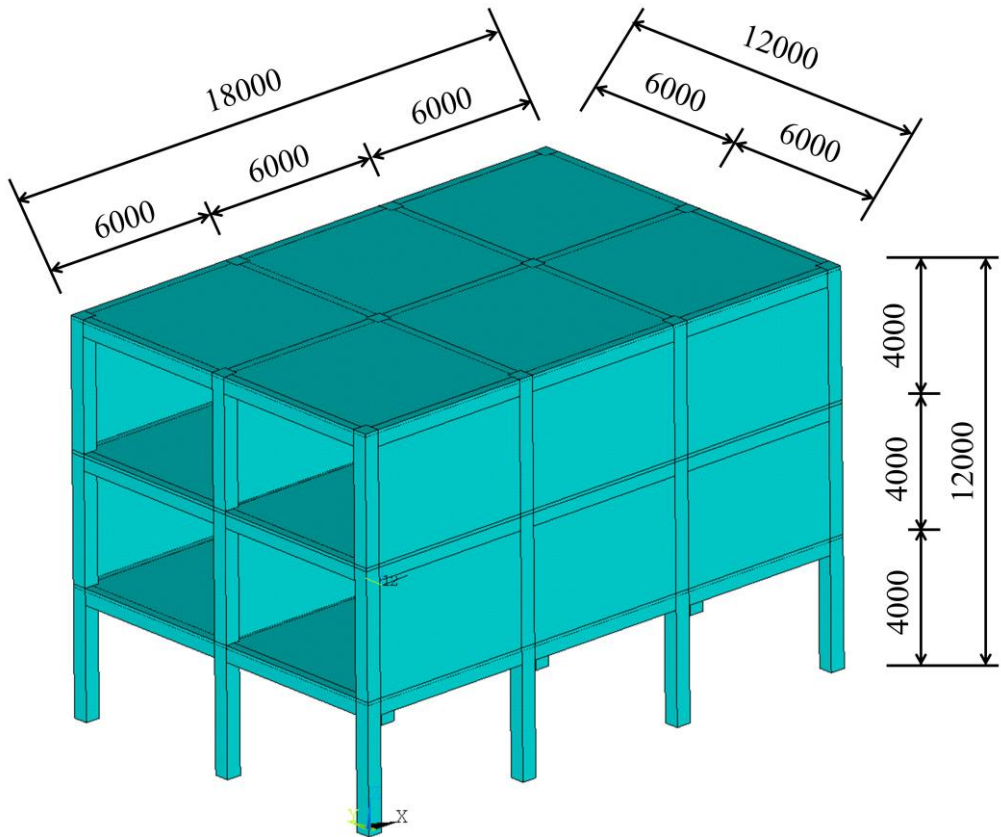


图 5.2 填充墙框架结构三维几何模型（单位：mm）

框架混凝土、钢筋以及砌体材料的主要力学性能参数如表 5.1 所示。相关材料参数参考现行规范推荐值及工程常用取值进行选取，从而保证有限元模型在构件构造与材料性能等方面均具有一定的工程代表性和合理性，为后续结构受力分析提供基础。

表 5.1 结构材料主要力学性能参数

材料	材料型号	弹性模量(MPa)	密度(kg/m ³)	泊松比	抗压强度(MPa)	抗拉强度(MPa)
混凝土	C30	3.0×10 ⁴	2500	0.2	14.3	1.43
钢筋	HPB300	2.06×10 ⁵	7800	0.3	--	300
砌体	烧结砖 MU10、砂浆 M5	2.4×10 ³	1800	0.2	1.5	0.14

5.2.3 材料本构与损伤准则

(1) 混凝土本构:

在结构非线性有限元分析中,合理选取混凝土本构模型是准确反映结构受力性能的重要前提。混凝土材料在受压状态下表现出明显的非线性特征,其应力-应变关系通常经历弹性阶段、非线性强化阶段以及峰值阶段。本文采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[18]推荐的抛物线-水平直线模型(Rusch 模型)来描述混凝土单轴受压本构关系,如式(5.1)所示,并在有限元软件 ANSYS 中通过多线性各向同性强化模型(Multilinear Isotropic Hardening, MISO)进行实现。

抛物线-水平直线模型(Rusch 模型)是一种广泛应用于混凝土受压本构关系描述的简化模型,该模型通过抛物线函数描述了混凝土在峰值应力之前的应力-应变关系,并在峰值后采用水平直线来简化表现,这在一定程度上反映了混凝土达到峰值强度后的塑性流动行为。根据公式计算得到若干离散应力-应变数据点,并将其输入到 ANSYS 的 MISO 材料模型中,以构建混凝土材料的多线性应力-应变关系曲线,如图 5.3 所示。

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f_c, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (5.1)$$

式中: σ 为混凝土应力; ε 为混凝土应变; f_c 为混凝土峰值应力(对应混凝土抗压强度); ε_0 为混凝土峰值应变(本文取 $\varepsilon_0 = 0.002$); ε_{cu} 为混凝土极限压应变(本文取 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$)。

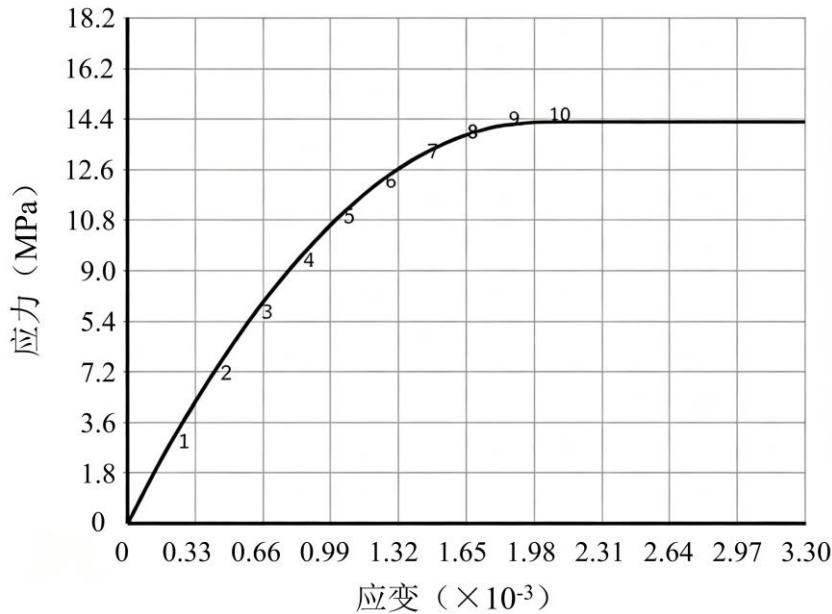


图 5.3 混凝土材料应力-应变关系

(2) 钢筋本构:

在钢筋混凝土结构中,钢筋通常处于单轴受力状态,其应力-应变关系可采用理想弹塑性模型或具有强化阶段的弹塑性模型进行模拟。本文以理想弹塑性模型作为钢筋的本构关系,即钢筋达到屈服强度前呈线弹性行为,屈服后应力保持不变而应变持续发展,如式(5.2)所示。在 ANSYS 中,通过双线性等向强化模型(Bilinear Isotropic Hardening, BISO)定义钢筋的屈服强度、弹性模量及切线模量以描述其弹塑性行为。具体而言,对于 HPB300 钢筋,其屈服强度取为 300MPa,切线模量取为 0,相应的钢筋材料应力-应变关系如图 5.4 所示。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & 0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (5.2)$$

式中: σ_s 为钢筋应力; ε_s 为钢筋应变; E_s 为钢筋弹性模量; f_y 为钢筋屈服强度; ε_y 为钢筋屈服应变 ($\varepsilon_y = f_y / E_s$); ε_u 为钢筋极限应变。

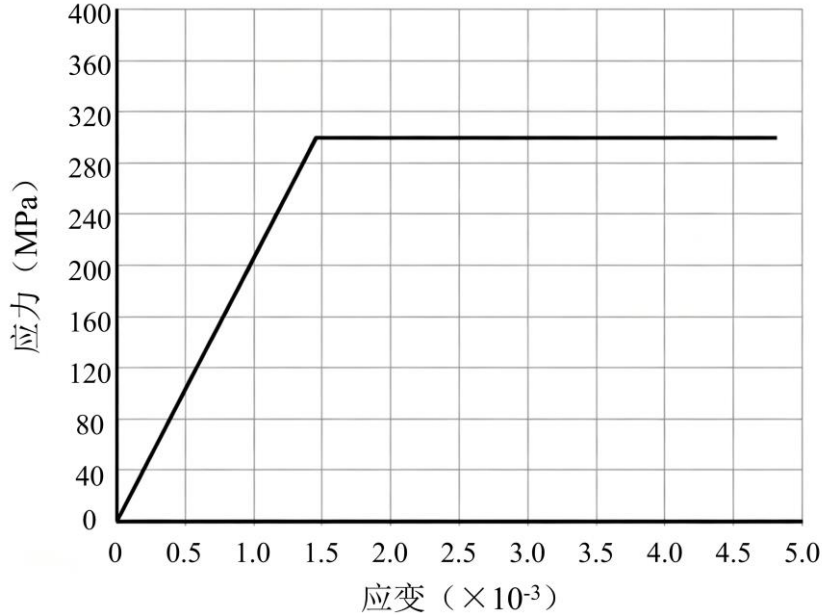


图 5.4 钢筋应力-应变关系

(3) 砌体本构:

砌体材料由砖块与砂浆组成,属于典型的非均质复合材料,在受压过程中表现出明显的开裂、强化及软化行为。在砌体结构本构关系的研究方面,国内外学者已开展了大量工作,根据建模方法不同可分为基于宏观经验、宏观力学以及损伤演化的本构模型三类。进一步从数学表达形式来看,砌体本构函数常见形式包括对数型、指数型、分段函数型及多项式型等。但由于砌体材料组成复杂且受砖块、砂浆及砌筑方式等多因素影响,目前尚未形成统一的本构表达形式。综合现有研究成果,本文采用施楚贤教授基于提出的分段式砌体本构模型^[182],如式(5.3)所示,并在 ANSYS 中通过多线性随动强化模型(Multilinear Kinematic Hardening, MKIN)实现,由此得到砌体材料的应力-应变关系曲线图 5.5 所示。

$$\frac{\sigma}{f_m} = \begin{cases} 1.96 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 0.96 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2, & 0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1 \\ 1.2 - 0.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, & 1 < \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1.6 \end{cases} \quad (5.3)$$

式中： σ 为砌体应力； ε 为砌体应变； ε_0 为砌体峰值应变； f_m 为砌体抗压强度平均值。

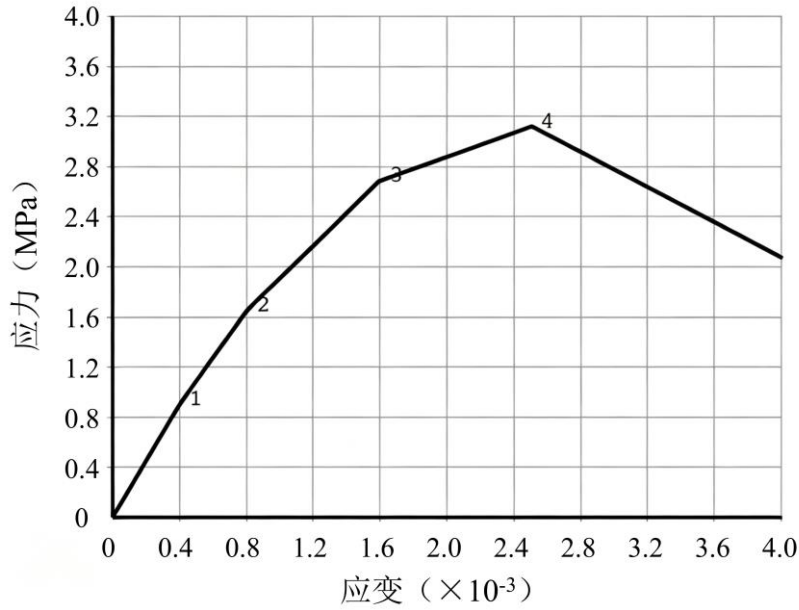


图 5.5 砌体应力-应变关系

5.2.4 建模方法与单元类型

钢筋混凝土是一种由混凝土与钢筋组成的复合材料，两者通过粘结作用协同受力。在荷载作用下，混凝土会出现开裂、压碎等非线性行为，同时钢筋与混凝土之间还存在粘结滑移等复杂相互作用。与普通均质材料结构建模相比，钢筋混凝土结构有限元分析不仅需要描述混凝土的非线性力学特性，还需要合理模拟钢筋与混凝土的协同工作关系，因此建模过程更为复杂。根据钢筋与混凝土在模型中的表示方式不同，主要包括整体式、分离式以及组合式三种建模方法。

整体式建模方法将整体式模型是将钢筋弥散于整个混凝土单元中，假定钢筋与混凝土之间完全粘结，无相对滑移。该方法将钢筋混凝土视为一种由单一材料构成的连续均匀复合材料，通过调整单元的材料参数来综合反映钢筋和混凝土对刚度的贡献。该方法建模过程简单、计算效率较高，适用于结构整体受力分析，但难以反映钢筋与混凝土之间的粘结滑移行为。分离式建模方法则分别建立混凝土实体单元与钢筋杆单元，通过节点耦合或嵌入式约束等方式实现钢筋与混凝土之间的协同工作，该方法能够较真实地反映钢筋与混凝土之间的相互作用，但建模过程较为复杂，计算规模也相对较大。组合式建模方法则在关键受力区域采用分离式建模，在其他区域采用整体式建模，以兼顾计算精度与计算效率。

鉴于本文主要研究填充墙框架结构在不均匀沉降作用下的整体受力性能及损伤演化规律，关注结构的宏观响应而非钢筋与混凝土之间的局部粘结行为，因此采用整体式建模方法进行有限元分析。有限元分析过程中，单元类型的选择直接影响计算结果的精度与计算效率。根据本文研究对象的结构特点及受力形式，在 ANSYS 软件中共选取五种单元类型进行建模，包括两种实体单元、一种弹簧单元以及两种接触单元。各单元类型及其主要用途如表 5.2 所示。

表 5.2 模型单元类型及其用途

单元类型	单元名称	主要用途
实体单元	SOLID65	模拟钢筋混凝土梁、柱、楼板及填充墙
	SOLID45	模拟加载刚性垫块
接触单元	CONTA173	定义接触面
	TARGE170	定义目标面
弹簧单元	COMBIN14	模拟地基弹簧

(1) SOLID65 单元—梁、柱、板及填充墙：

SOLID65 单元区别于普通实体单元的主要特点在于其能够模拟混凝土材料的非线性损伤行为。该单元采用弥散裂缝模型描述混凝土开裂过程，当单元积分点处的主拉应力超过混凝土抗拉强度时，单元将在垂直于主拉应力的方向产生裂缝，并导致该方向刚度发生折减，但仍可在裂缝平行方向传递应力及部分剪切应力。同时，当单元积分点处的压应力超过混凝土抗压强度时，单元将发生压碎破坏，其刚度显著降低，从而反映混凝土受压破坏后的承载能力退化。此外，SOLID65 单元还可结合材料本构关系考虑混凝土在非线性阶段的塑性变形特性，从而较为真实地反映钢筋混凝土结构在受力过程中的损伤演化行为。此外，通过在实常数中输入各方向的配筋率，可以在单元内部等效考虑钢筋对结构刚度和承载能力的增强作用，从而实现钢筋混凝土结构的弥散钢筋建模。钢筋方向与单元坐标系之间的关系可通过两个角度进行定义，其中 θ 为钢筋方向在 X-Y 平面上的投影与 X 轴的夹角， ϕ 为钢筋方向与 X-Y 平面的夹角。对于矩形截面梁、柱及楼板等规则构件，特殊方向钢筋的角度设置可参照表 5.3 进行。

表 5.3 特殊方向钢筋实常数参数取值

钢筋方向	θ	ϕ
与 X 轴平行	0°	0°
与 Y 轴平行	90°	0°
与 Z 轴平行	0°	90°

需要指出的是，SOLID65 单元实常数中定义的配筋率为体积配筋率。在有限元计算过程中，钢筋按照该体积配筋率等效弥散分布于单元内部，以反映钢筋对混凝土整体力学性能的贡献。因此，在确定实常数参数之前，需要根据梁、柱截

面的实际配筋分布情况对截面进行合理分区，并按照各分区内钢筋的实际配置计算相应的配筋率。在本文中，梁柱截面分区示意图及对应钢筋分布情况分别如图 5.6 和表 5.4 所示，而对于楼板构件，其钢筋通常以双向分布形式布置，主要沿板平面两个正交方向承担受力，而沿板厚方向一般不设置受力钢筋。可直接在 X、Y 两个方向定义钢筋配筋率而无需对截面进行分区处理。砌体填充墙作为非配筋砌体，在 SOLID65 单元实常数中不定义任何钢筋参数。

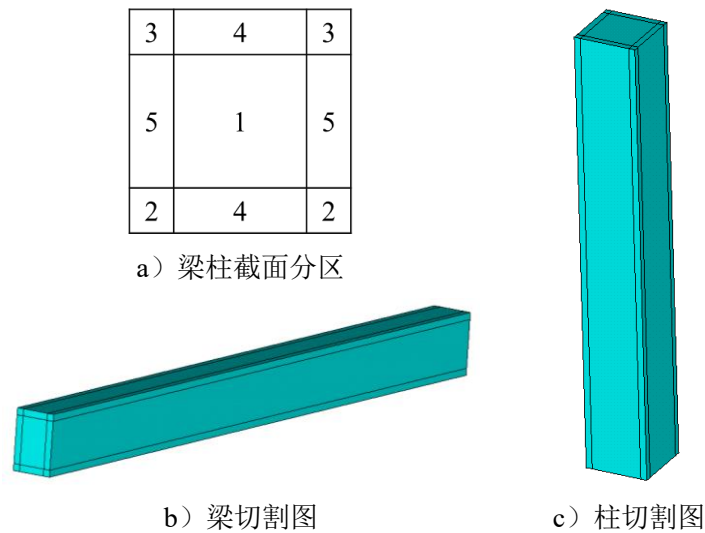


图 5.6 梁柱截面分区图

表 5.4 梁柱截面各区域钢筋情况

编号	框架柱	框架梁
1	素混凝土	素混凝土
2	受压纵筋	受拉纵筋
3	受压纵筋	架立筋
4	箍筋区	箍筋区
5	箍筋区	箍筋区

此外，ANSYS 针对 SOLID65 单元内置了 Willam-Warnke 五参数破坏准则以描述材料在多轴应力状态下的极限强度面，其在偏平面上为三轴对称的光滑凸曲面，在子午面上采用二次抛物线形式，如图 5.8 所示。Willam-Warnke 五参数破坏准则不仅适用于混凝土材料，同样适用于砌体结构的非线性分析。其原因在于砌体与混凝土同属准脆性材料，受力过程中均表现出开裂、压碎等相似的破坏特征，破坏机理具有本质一致性，大量数值模拟实践已证实 SOLID65 单元结合该准则在砌体分析中具有良好的适用性^[183]。然而，两者在材料组成上仍存在明显差异：混凝土可视为相对均匀的连续介质，而砌体由砖块与砂浆砌筑而成，界面效应显著，整体性及抗剪能力相对较弱。因此，在采用同一破坏准则的前提下，需要通过调整相关参数以反映两类材料在裂缝发展阶段的力学差异。在 ANSYS 中，SOLID65 单元通过裂缝张开剪力传递系数与裂缝闭合剪力传递系数控制裂缝面两侧的剪切传递能力。综合已有研究成果^[185]，本文中混凝土裂缝张开与闭合剪力传递系数分

别取 0.5 与 0.95，而砌体对应取值分别为 0.3 与 0.85。可见，本文中混凝土主体框架与砌体填充墙虽均采用 SOLID65 单元及统一 Willam-Warnke 破坏准则，但二者的力学差异通过材料本构、钢筋配置及裂缝剪力传递系数的不同设置得以体现。

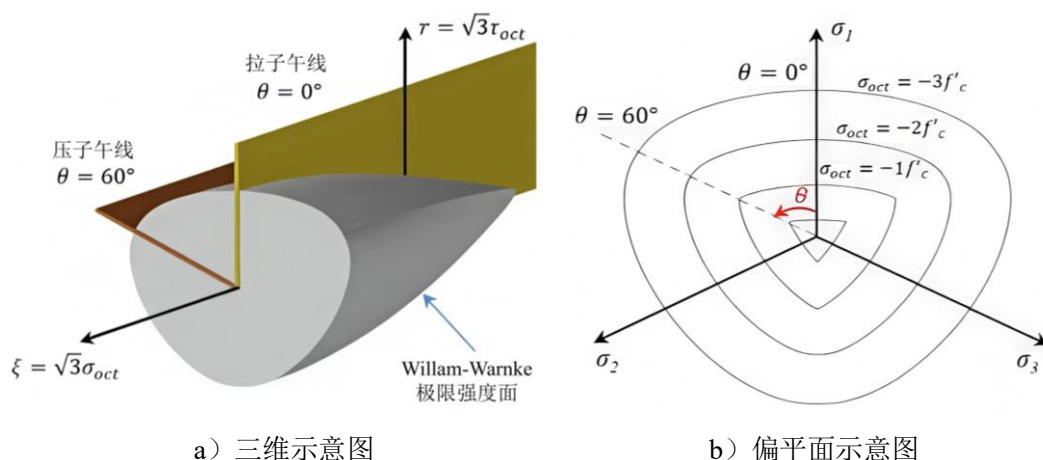


图 5.7 Willam-Warnke 五参数破坏准则

(2) CONTA173、TARGE170 单元—主体框架与填充墙接触：

在填充墙框架结构的有限元分析中，框架与填充墙之间的界面力学行为对结构整体受力性能具有重要影响。填充墙属于非承重围护构件，通常采用砌体材料砌筑于框架梁柱围成的空腔内，与框架的连接并非完全刚性：框架柱预留拉结筋伸入填充墙，墙顶与梁底采用斜砌砖顶紧或后塞口填充，二者的力学边界本质是法向可承压、不可受拉，切向可通过摩擦传递剪力的单边接触边界。因此，为更加合理地描述这种界面相互作用关系，本文在参考已有相关研究的基础上^[184-185]，采用面-面接触单元对框架与填充墙之间的界面进行模拟。针对填充墙框架结构的界面力学特征，通常将刚度较大的框架梁柱（钢筋混凝土）表面定义为目标面（TARGE170），刚度较小的砌体填充墙表面定义为接触面（CONTA173）。在建模过程中，目标单元与接触单元采用相同的实常数编号进行定义，以确保两接触面能够正确配对，从而建立有效的接触关系。在接触界面的切向行为模拟方面，框架与填充墙之间的剪力传递主要依赖界面摩擦作用，综合已有研究成果及工程规范^[185]，本文取界面摩擦系数为 0.7。

接触问题本质上属于强非线性问题，其非线性主要来源于接触状态的不断变化以及接触力的迭代求解。ANSYS 针对接触问题提供了多种不同的接触算法，包括罚函数法、增广拉格朗日法、一般拉格朗日法、多点约束法以及混合法等。本文采用增广拉格朗日算法，该方法在罚函数法的基础上引入拉格朗日乘子修正项，通过迭代更新拉格朗日乘子，使接触约束逐渐逼近严格满足的状态。与单纯的罚函数法相比，增广拉格朗日法能够有效减少接触面穿透现象，同时又避免了一般拉格朗日法所带来的额外未知量问题，因此在保证计算精度的同时具有较好的数值稳定性和收敛性能。在接触行为模式的设置方面，本文采用不分离接触模

式。该设置能够较好地反映工程中填充墙在自重及竖向荷载作用下始终与框架梁柱保持压紧状态，同时又允许界面产生一定程度摩擦滑移的实际受力特征。

(3) COMBIN14 单元—地基弹簧：

在实际工程中，结构基础通常通过地基与土体共同作用，其受力性能不仅取决于上部结构特性，还与地基土体的变形与刚度密切相关。因此，在结构有限元分析中，合理模拟地基的力学特性对于准确反映结构整体受力行为具有重要意义。目前，在结构有限元分析中常见的地基模拟方法主要包括固定支座法和弹性支承法^[186]。其中，固定支座法通过在基础底部施加完全约束来模拟地基支承，其建模方法简单、计算效率高，但难以反映土体的变形特性。相比之下，弹性支承法通过在结构基础与地基之间设置弹性支承单元，以弹簧刚度的形式模拟地基反力，从而能够在一定程度上考虑地基土体的变形影响，故在工程分析中应用较为广泛。

文克勒（Winkler）地基模型是弹性支承法的理论基础，也是目前工程界应用最广泛的线性弹性地基模型，该模型将地基土体等效为由无数相互独立、互不影响的线性弹簧组成，即忽略土体内部剪应力及横向变形的传递关系。假定地基表面任意一点的竖向沉降仅与该点所受的压应力成正比，而与相邻位置的应力与变形无关。其基本表达式如式（5.4）所示，其中， K 为地基基床系数（又称地基反力系数），表征地基土的刚度特性； $P(x, y)$ 为地基表面 (x, y) 点处的法向压应力； $S(x, y)$ 为地基表面 (x, y) 点处的竖向沉降量。

$$P(x, y) = K \cdot S(x, y) \quad (5.4)$$

COMBIN14 单元是一种典型的两节点弹簧阻尼单元，通过关键选项的不同设置可灵活模拟不同形式的力学行为。在本文建立的有限元模型中，仅考虑地基竖向变形影响，因此采用 COMBIN14 轴向弹簧单元模拟地基弹性支承。模型中对节点的 X、Y 方向位移进行约束，仅保留 Z 方向自由度，从而形成一维文克勒地基模型，如图 5.8 所示。在地基静力分析中通常忽略阻尼效应，仅保留弹簧刚度参数，并根据各有限元节点所对应的影响面积，将文克勒地基模型中的地基基床系数等效换算为节点弹簧刚度，以模拟地基对结构的弹性支承作用。

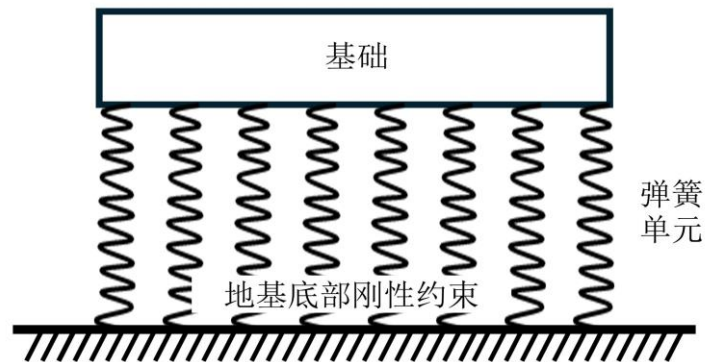


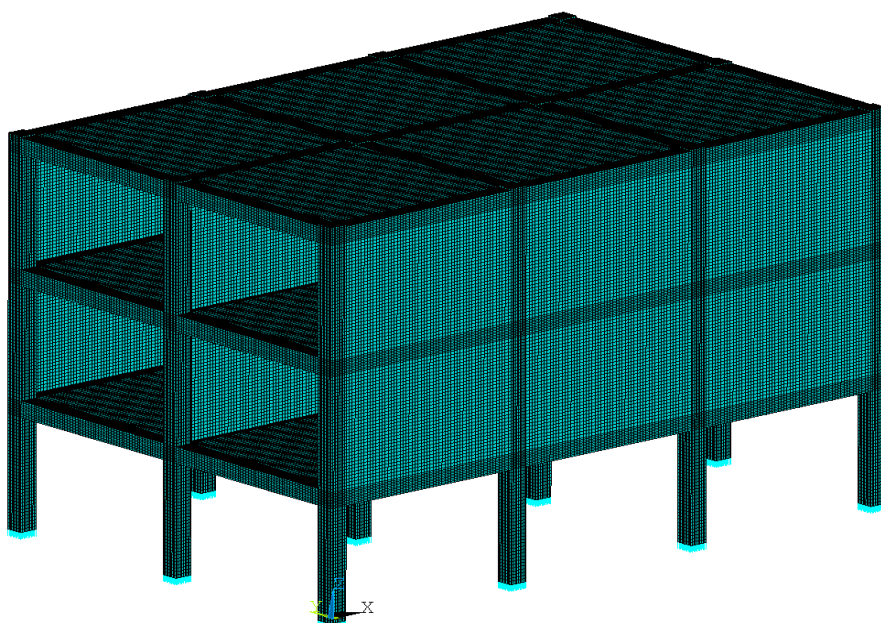
图 5.8 地基模型

（4）SOLID45—刚性垫块：

SOLID45 单元为 ANSYS 中的基本三维实体结构单元，支持塑性、蠕变、热膨胀、应力刚化及大变形等非线性特性。其计算效率较高，在弹性或小塑性变形范围内具有较好的数值稳定性，因此常用于描述受力较为简单或仅起传力作用的实体构件。在本文有限元模型中，SOLID45 单元用于模拟支座及集中力作用处的刚性垫块。由于荷载通过有限面积的接触面传递至结构，若直接施加于混凝土节点，易产生应力奇异或局部应力集中，从而影响计算精度与收敛性。通过设置 SOLID45 刚性垫块，并与相邻混凝土单元共用节点实现位移协调，可使荷载在局部区域内得到合理扩散，从而避免应力集中并使传力路径更接近实际受力状态。

（5）网格划分与模型建立：

在完成各类材料参数与结构几何参数输入后，对结构整体模型进行网格划分并生成有限元模型。网格划分过程中需在计算精度与计算效率之间进行综合权衡，网格尺寸过大会降低结构响应分析结果的准确性，而过小则会显著增加计算规模与求解时间。同时，单元形状对求解稳定性与结果精度具有重要影响，因此在建模过程中应尽量避免产生畸形或不规则单元。为保证框架梁、柱、板及填充墙连接区域网格划分的规整性，在网格划分前对节点区域进行了适当的几何切割处理。同时考虑到梁柱节点区是结构内力传递与应力集中的关键部位，其受力状态较为复杂，需要采用更精细的网格以提高分析精度。综合上述因素，本文对梁柱节点区域进行局部网格加密，网格尺寸取 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ；其余受力变化相对平缓的区域采用较大的网格尺寸以提高计算效率，网格尺寸取 $100\text{mm} \times 50\text{mm}$ ；最终采用扫掠（Sweep）方式在预设单元尺寸条件下进行网格划分，生成的有限元模型如图 5.9 所示，共包含 564552 个单元和 710358 个节点。



a) 结构三维模型

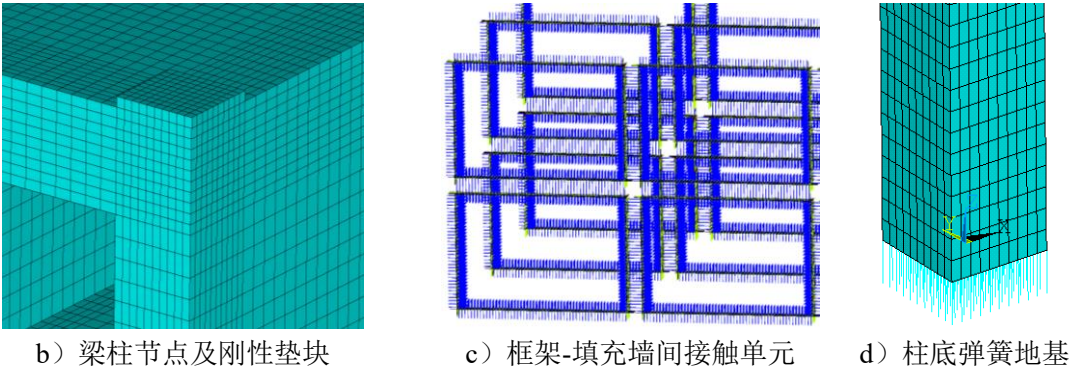


图 5.9 结构有限元模型图

5.3 工况设计与加载实施

5.3.1 沉降工况设置

在完成有限元模型建立与参数定义后，需进一步明确分析工况及加载方式。为使数值分析结果具有良好的工程代表性，工况设计应综合考虑实际工程中基础不均匀沉降的典型模式，同时兼顾不同工况之间的层次性与相对独立性。在此基础上，结合结构平面布置的对称特征，在保证分析完整性的前提下对沉降位置进行合理归类，以减少重复计算并提高分析效率。

本文以单柱沉降作为基本工况，用以模拟局部柱基失效或局部软弱土层引起的差异沉降情形。鉴于所研究框架结构在平面上沿两个主轴方向均具有对称性，可将柱位按其空间位置划分为角柱、边柱及中柱等典型类型。基于对称性原则，选取具有代表性的 4 种柱位作为沉降施加位置，其余对称位置的响应可通过结构对称关系推知。各工况对应的具体沉降位置及柱编号如图 5.10、表 5.5 所示。

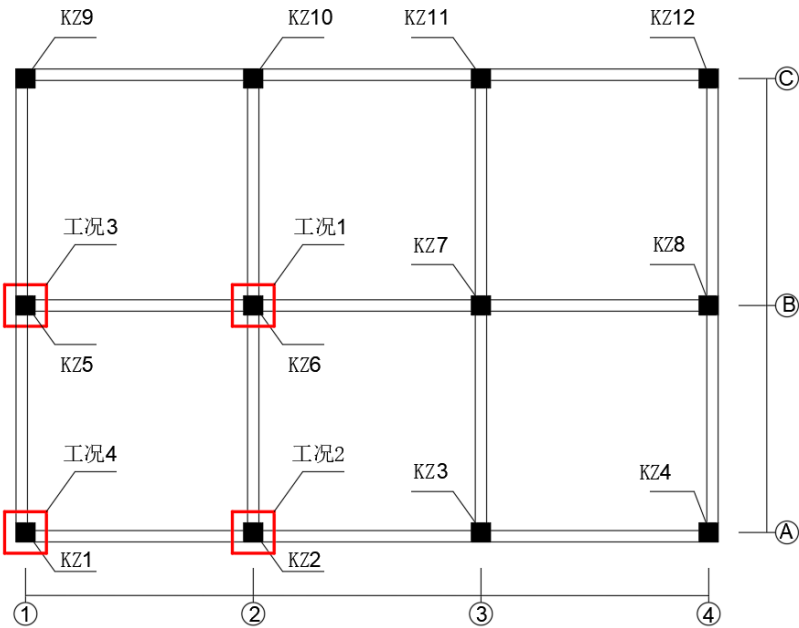


图 5.10 沉降柱分布位置

表 5.5 工况设置

工况编号	沉降柱位	柱编号
工况 1	中柱	KZ6
工况 2	短跨边柱	KZ2
工况 3	长跨边柱	KZ5
工况 4	角柱	KZ1

5.3.2 沉降加载方法

在确定基础沉降的施加方法时，不同的地基模拟思路对应不同的加载策略。常用两种沉降施加方法的实施逻辑、优劣对比如表 5.6 所示。基于对两种方法的比较与试算结果，并结合本文旨在分析结构在不同差异沉降模式下的受力与变形特征以及评估结构差异沉降承载能力的研究目标，提出一种改进的差异沉降施加方法：在所有柱底布置弹簧单元以模拟地基柔性支承条件，施加沉降时仅保留发生沉降的柱基为竖向弹簧支承，其余柱底施加竖向约束；通过在沉降柱顶部逐步加载竖向荷载，使下部弹簧发生压缩变形以形成沉降。该方法在数值实现与力学合理上兼顾了传统固定支座法与弹性支承法的优点。一方面，通过保留弹簧作为柔性边界，可避免柱底悬空的不现实边界条件，贴合工程实际受力状态；另一方面，通过调整柱顶荷载实现对目标沉降量的间接控制，无需反复调节弹簧刚度，同时避免了柱底直接强制位移可能引起的局部拉应力或单元失稳问题。

表 5.6 不同沉降施加方法对比

方法对比	固定支座法	弹性支承法
实施逻辑	柱底施加固定位移约束，直接强制沉降	柱底设置地基弹簧，调整弹簧刚度间接控制沉降
优势	原理简单、操作便捷；小沉降幅度下沉降量精符合荷载自上而下传递、地基压缩沉降机理；还原精准可控，位移输入即为实际沉降。	结构与地基的变形协调特性（土-结构相互作用）
缺陷	大沉降下底层柱易提前受拉破坏，沉降变形无目标沉降量无法直接精准控制，需反复试算调整弹簧刚度；忽略土-结构相互作用	精准模拟特定沉降值操作难度大

需要说明的是，本研究各试验工况仅考虑结构自重荷载而不计入可变荷载，该设定主要基于本文研究目标及单因素变量控制原则。尽管可变荷载是实际工程中引发差异沉降的诱因之一，但对于研究结构在既定沉降模式及幅度下的结构响应，其影响作用相对次要。若引入可变荷载，其大小、分布及加载顺序均将成为新的独立变量，不仅增加试验工况数量，还会导致试验结果受多变量耦合影响，从而降低结果的可解释性。

5.3.3 求解策略与收敛控制

与线性问题不同，非线性有限元分析需要通过逐步加载并不断修正结构刚度矩阵的方式逼近平衡状态，其求解过程通常依赖增量法、迭代法或二者的组合（混合法）。ANSYS 非线性求解中常用的牛顿-拉夫森（Newton-Raphson, N-R）迭代

法即属于混合法范畴,其基本思想是在每个迭代步中依据不平衡力修正刚度矩阵,直至残差满足收敛要求。根据刚度矩阵更新方式的不同,N-R 方法可分为完全 N-R 法、修正 N-R 法、初始刚度法及不对称完全 N-R 法。不同方法存在适用条件与计算效率上存在差异,如表 5.7 所示。ANSYS 提供了自动选择迭代策略的功能,可根据问题类型与收敛状态动态调整,从而在计算成本、收敛速度及求解稳定性之间取得平衡。本文亦采用该自动迭代选择策略。

表 5.7 不同 N-R 迭代方法对比

N-R 类型	刚度矩阵更新策略	计算成本	收敛速度	求解稳定性
完全 N-R 法	每次平衡迭代后更新	高	快	中等
修正 N-R 法	每个子步内更新,每次平衡迭代不变	中等	中等	高
初始刚度法	所有平衡迭代中保持刚度矩阵不变	低	慢	最高
不对称完全 N-R	考虑刚度矩阵不对称性,每次迭代更新	最高	快	低

非线性求解的收敛问题一直是有限元分析的难点,其收敛性主要取决于有限元模型质量与计算参数设置。在前处理模型建立阶段,如前 5.2.4 节所述,通过合理的网格划分和单元参数设置提高模型数值稳定性。在求解阶段,对自动时间步长、线性搜索与预测器以及最大平衡迭代次数等多种求解控制参数进行了相关调整。然而,上述参数通常需通过反复试算确定,且其作用主要为辅助改善收敛性能,而收敛准则的设定才是影响计算结果可靠性的关键因素。ANSYS 提供了多种收敛判据,包括基于力、位移、弯矩及转角的收敛控制。其中,力收敛准则与位移收敛准则是最常用的两种方式,分别如式 (5.5)、式 (5.6) 所示。

$$\frac{\|R\|_p}{\|F\|_p} \leq \text{TOL}_F \quad (5.5)$$

$$\frac{\|\Delta u\|_p}{\|u\|_p} \leq \text{TOL}_U \quad (5.6)$$

式中, R 残差力向量; Δu 为位移增量向量; F 为参考力向量; u 为总位移; TOL_F 、 TOL_U 分别为力、位移收敛容差; $\|\cdot\|_p$ 表示向量 p 范数,其中 $p=1,2,\infty$ 分别对应 L1 范数、L2 范数和无穷范数。

由于混凝土开裂过程中产生的刚度突变和应力重分布将导致残差振荡,采用默认收敛容差设置往往难以获得稳定收敛解。已有研究表明,适当放宽收敛容差是一种有效的数值策略,在合理范围内放宽收敛容差,模型仍能准确预测初始开裂荷载、极限承载力及最终破坏模式^[187]。基于上述考虑,本文采用分阶段收敛控制策略,在加载前期采用基于力与位移的双重收敛准则,并采用 L2 范数进行控制,收敛容差分别取 0.005 (力) 和 0.05 (位移);随着荷载增大,计算难以满足上述双重准则时,改为采用单位移收敛准则控制继续求解。

5.4 结构响应与损伤演化规律分析

5.4.1 模型验证

在正式进行差异沉降模拟前，需对有限元模型的合理性与可靠性进行初步验证。由于缺乏实体试验数据对模型参数进行校正，本文仅对模型进行基本的结构力学响应合理性定性验证。具体而言，在施加沉降工况前，首先仅施加结构自重荷载，对模型整体变形与内力分布进行初步分析，以检验模型约束条件、构件连接关系及整体受力状态是否合理。计算结果表明，在自重作用下，结构变形与应力分布相对均匀对称。结构整体竖向沉降变形特征表现为中部较大、边跨较小的盆式沉降形态（图 5.11a）：中柱沉降量最大，为 16.45mm；角柱最小，为 12.48mm；同轴相邻柱最大差异沉降为 1.69mm。与此同时，框架梁柱节点、填充墙存在轻微开裂现象（图 5.11b），但由于最大 Von Mises 应力、应变分别为 5.14MPa（图 5.11c）和 0.00145（图 5.11d），远小于混凝土抗压强度 14.3MPa 及峰值应变 0.002，表明结构整体仍处于弹性工作阶段，裂缝由主拉应力主导。综合来看，结构整体变形模式、应力分布特征及局部开裂规律均与框架结构在重力荷载作用下的一般受力机理相一致，且未出现异常变形或局部失稳现象，说明所建立的有限元模型具有较好的合理性，在此基础上开展差异沉降加载分析具有一定的可靠性。

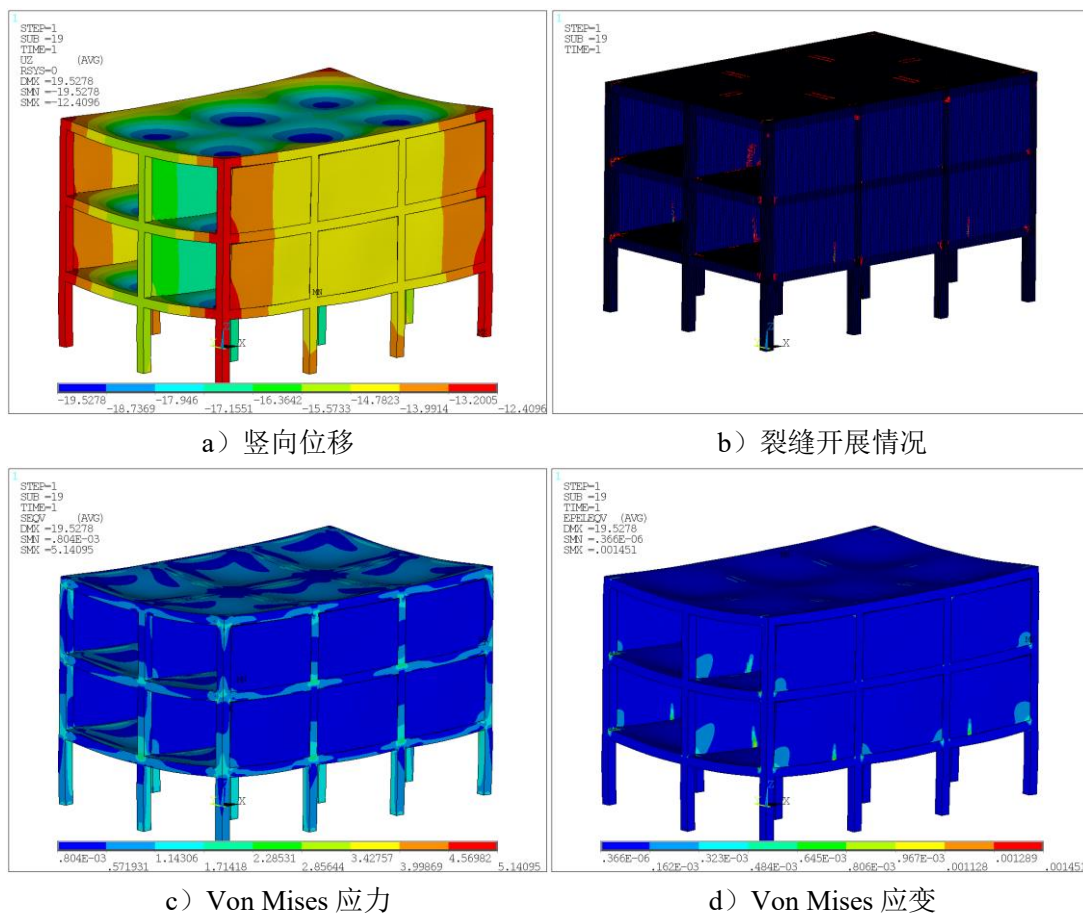
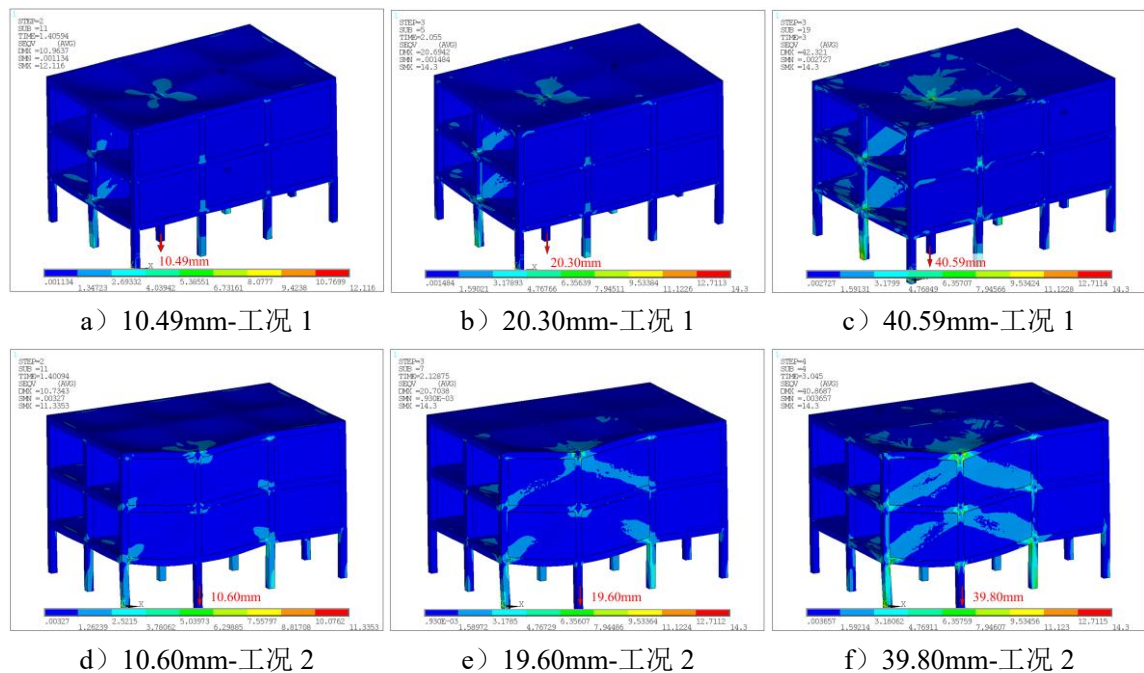


图 5.11 自重作用下结构响应

5.4.2 各工况下结构应力分布特征

图 5.12 展示了不同沉降柱在不同沉降幅度下的 Von Mises 应力分布云图。结果表明，在单柱沉降作用下，上部框架结构发生显著的内力重分布，近沉降柱端梁底受拉、远端梁底受压，远端梁顶受拉而近端梁顶受压，并呈现显著局部化特征：结构整体应力水平随沉降量增大而逐渐提高，但荷载效应主要集中在沉降柱相邻跨范围内，隔跨构件的应力水平显著下降，上部结构的应力随着层高的增加而减小，表明不均匀沉降对结构的影响具有明显的空间衰减效应。

在不同沉降幅度水平下，结构应力分布及损伤演化呈现出阶段性特征。在 10mm 沉降阶段（图 5.12a、d、g、j），结构整体应力水平较低，内力重分布主要局限于柱脚、梁柱节点及柱顶楼板等局部区域，钢筋与混凝土应力均未达到材料强度限值，结构未出现明显非线性响应，整体仍处于弹性工作阶段。随着沉降发展至 20mm（图 5.12b、e、h、k），沉降柱相邻跨构件弯曲效应显著增强，应力集中区范围明显扩大，沉降柱上部梁底及相邻柱上部梁顶受拉钢筋应力达到屈服强度并发生屈服，结构由弹性阶段进入弹塑性阶段，并在关键截面形成塑性铰，局部跨通过塑性变形实现内力重分配，具备一定延性耗能能力。当沉降进一步发展至 40mm 时（图 5.12c、f、i、m），高应力区域逐渐连通并形成带状或片状分布，受影响范围显著扩大，结构整体受力不利程度进一步加剧。沉降柱相邻跨范围内钢筋基本进入完全屈服状态，沉降柱顶部混凝土应力达到其抗压极限并发生明显压碎破坏，塑性铰区发展充分并呈扩展趋势；相比之下，远离沉降柱的隔跨构件应力水平仍低于屈服强度，说明结构损伤主要集中于沉降柱相邻跨内，而整体结构体系尚未完全失效，仍保留一定剩余承载能力。



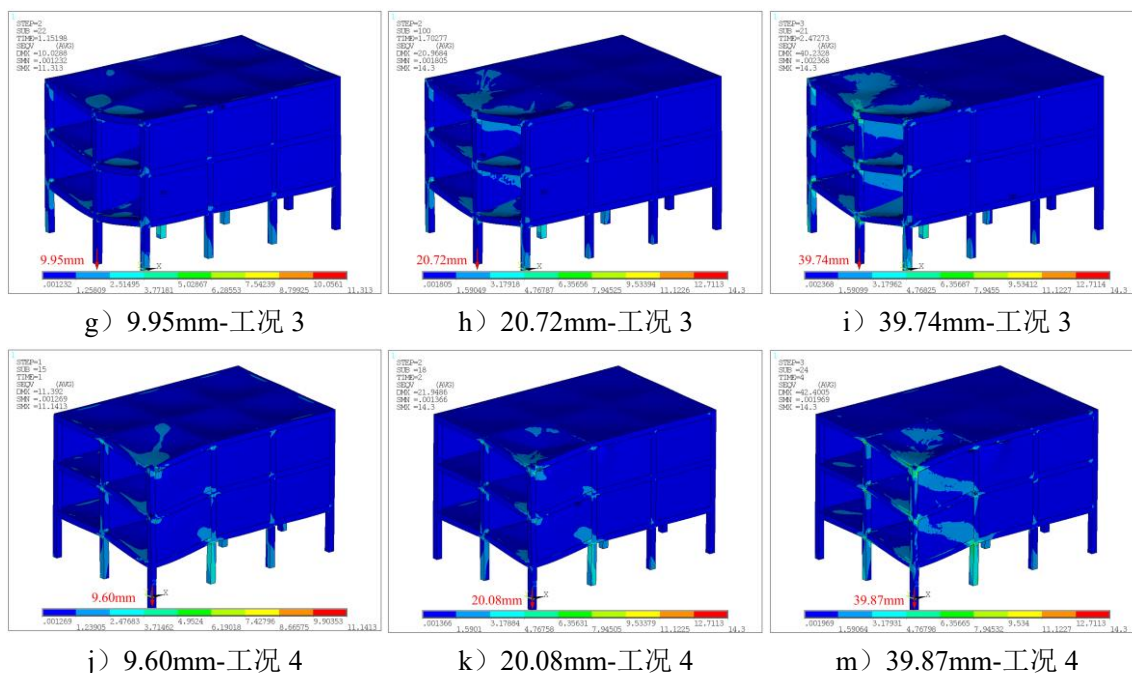


图 5.12 不同沉降幅度下各工况结构 Von Mises 应力云图

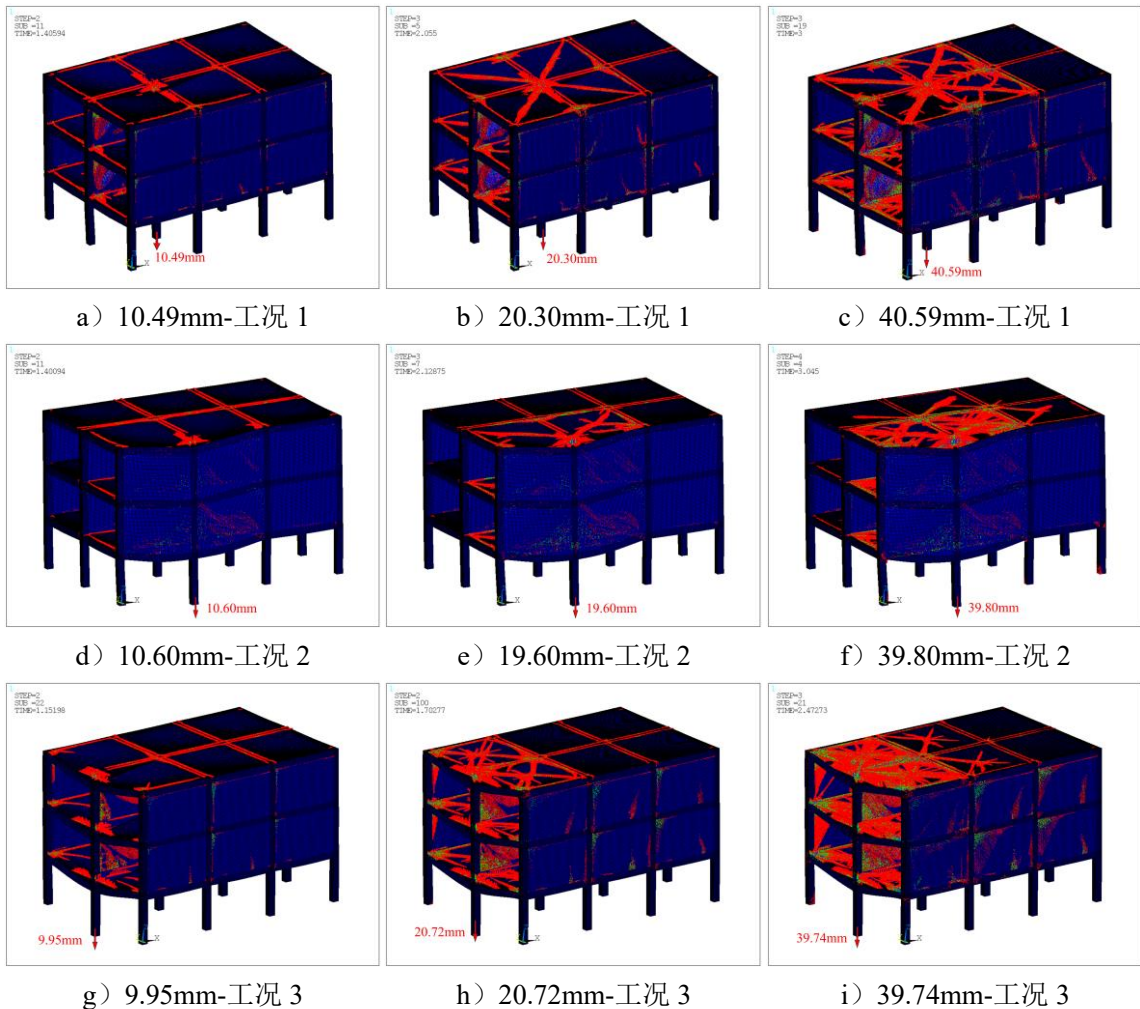
对不同沉降柱工况下结构应力分布差异进行对比分析可以发现，尽管各工况在关键沉降阈值上表现出较好的一致性，但其应力分布形态及损伤发展路径存在明显差异，反映出沉降作用位置对结构受力响应的显著影响。当沉降发生于中柱时，由于结构在该位置具有较强的双侧约束，内力可在相邻跨范围内实现快速重分布并形成局部平衡体系。相应地，高应力区主要集中于沉降柱两侧相邻跨范围内，沿结构纵向呈对称分布特征，但应力影响范围相对有限，表现出明显的局部化特征。而当沉降发生于边柱或角柱时，由于结构边界约束减弱，内力难以在局部区域内闭合，需向结构内部更大范围传递以维持整体平衡。在此过程中，高应力区呈现显著的非对称分布特征，并沿结构纵向向内侧扩展，应力影响范围明显大于中柱沉降工况。

5.4.3 各工况下结构裂缝发展特征

图 5.13 展示了不同工况下在不同沉降幅度时的结构裂缝分布云图。裂缝云图以混凝土单元积分点的开裂状态为表征（第一、第二及第三裂缝分别以红、绿、蓝色轮廓表示），能够直观反映结构损伤的演化过程。需要指出的是，在差异沉降施加之前，结构在自重作用下已形成初始应力场，楼板与框架梁上部交界区域处于双向受拉状态，当主拉应力超过混凝土抗拉强度时，将沿纵横梁方向产生微裂缝。该类裂缝属于正常使用极限状态下的允许现象，不作为结构损伤判据。本文以此作为初始状态，重点分析差异沉降诱发的新增裂缝及其演化特征。

在 10mm 沉降阶段（图 5.13a、d、g、j），除初始状态下的板-梁交界处微裂缝外，结构整体未出现明显新增裂缝，仅在沉降柱相邻填充墙角部出现局部微裂

缝。沉降柱周边楼板作为双向受力构件，在沉降柱与相邻柱之间沿两个正交方向（X 向和 Y 向）均产生弯矩作用，两个方向的弯矩叠加，形成主弯矩，出现沿对角线方向的微裂缝，并由沉降柱角部向相邻柱方向短距离延伸。当沉降发展至 20mm 时（图 5.13b、e、h、k），裂缝云图显示开裂区域显著扩大，裂缝形态呈现出明显的规律性。沉降柱相邻跨填充墙在附加剪力作用下形成斜压杆受力机制，墙体中部沿主拉应力方向出现斜裂缝，并由墙-框接触角部向中部延伸；楼板裂缝由沉降柱向相邻柱沿对角线呈放射状扩展并逐渐贯通；同时，沉降柱上部梁底及相邻跨梁顶区域出现明显弯曲裂缝，裂缝向节点区发展并表现出初步连通特征。当沉降进一步增大至 40mm 时（图 5.13c、f、i、m），裂缝进入充分发展阶段。填充墙形成沿对角线贯通的“八”字形主裂缝；楼板裂缝由单一对角线扩展为双对角线发展，部分工况下形成以板中心向四角扩展贯通型“X”形裂缝；梁端、节点及柱顶区域出现多向开裂（绿色及蓝色轮廓），表明同一积分点发生多方向裂缝并相互连通，形成贯穿梁高及节点核心区的主裂缝，结构局部已形成明显塑性铰。与此同时，远离沉降柱的隔跨区域裂缝发展仍较为有限，体现出损伤的空间局部化特征。



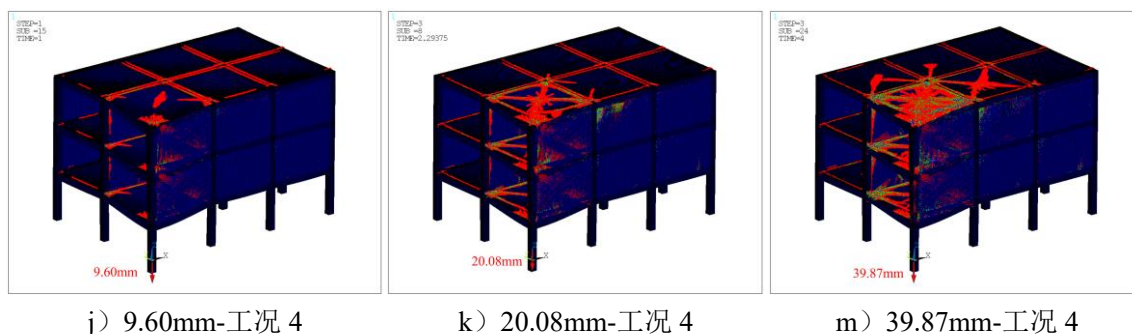


图 5.13 不同沉降幅度下各工况结构裂缝分布云图

进一步对比不同沉降柱工况下的裂缝发展特征发现，其空间分布与前述应力场演化规律具有良好一致性。当沉降发生于中柱时，裂缝呈双向对称辐射状分布，以中间柱为中心向四周跨层延伸，裂缝覆盖相邻两跨框架梁与两侧柱，且未向隔跨明显扩展；相比之下，边柱及角柱沉降工况中，裂缝除集中于相邻跨外，还在隔跨楼板中出现不同程度的发展，整体呈现由沉降侧向结构内部扩展的趋势。

5.4.4 结构关键损伤状态的临界沉降阈值

考虑到星载 InSAR 技术主要以建筑表观结构（如屋面）作为散射体目标进行视线向位移反演，其观测结果本质上反映的是建筑上部结构位移信息。为明确遥感建筑表观变形观测与结构实际基础沉降之间的对应关系，并进一步从结构力学角度量化关键受力状态与沉降量之间的内在联系。在此选取弥散钢筋应力首次达到 300MPa 屈服强度（标志结构进入弹塑性工作阶段）以及混凝土 Von Mises 应力首次达到 14.3MPa 抗压强度（标志局部压碎破坏发生并引起结构刚度显著退化）两个关键状态，提取各工况对应特征状态下结构沿沉降柱纵向（ x 轴方向）平面内框架梁、柱顶面节点竖向位移，结果分别如图 5.14、图 5.15 所示。

可见，在不均匀沉降作用下，受竖向荷载沿结构高度逐层向下累积及结构整体变形协调效应的共同影响，结构竖向位移沿高度呈递减分布特征。其中，由于框架柱以轴压受力为主且轴向刚度较大，其整体压缩变形有限，柱顶与柱底之间的位移差值仅为亚毫米级。相较于 InSAR 毫米级的监测精度，该差异基本可以忽略。相比之下，框架梁的变形由弯曲和剪切主导，使得上下层梁的竖向变形差大于框架柱，但仍处于毫米级范围内。因此，在结构整体性良好且变形以竖向沉降为主的条件下，InSAR 观测获得的建筑屋顶竖向位移可近似等效表征地基沉降响应。此外，各工况下钢筋应力达到屈服强度时对应沉降量的均值约为 12mm，基本对应《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011）^[149]中框架结构相邻柱基沉降差限值 $0.002l$ （ l 为相邻柱柱距）的控制水平。而混凝土应力达到抗压强度时对应沉降量约为 18~20mm，其数值范围接近规范中 $0.003l$ 所对应的非结构性构件开裂控制限值。超过该阈值后，结构整体刚度将显著退化，内力传递路径发生重构，损伤累积加速，结构逐步进入实质性破坏阶段。

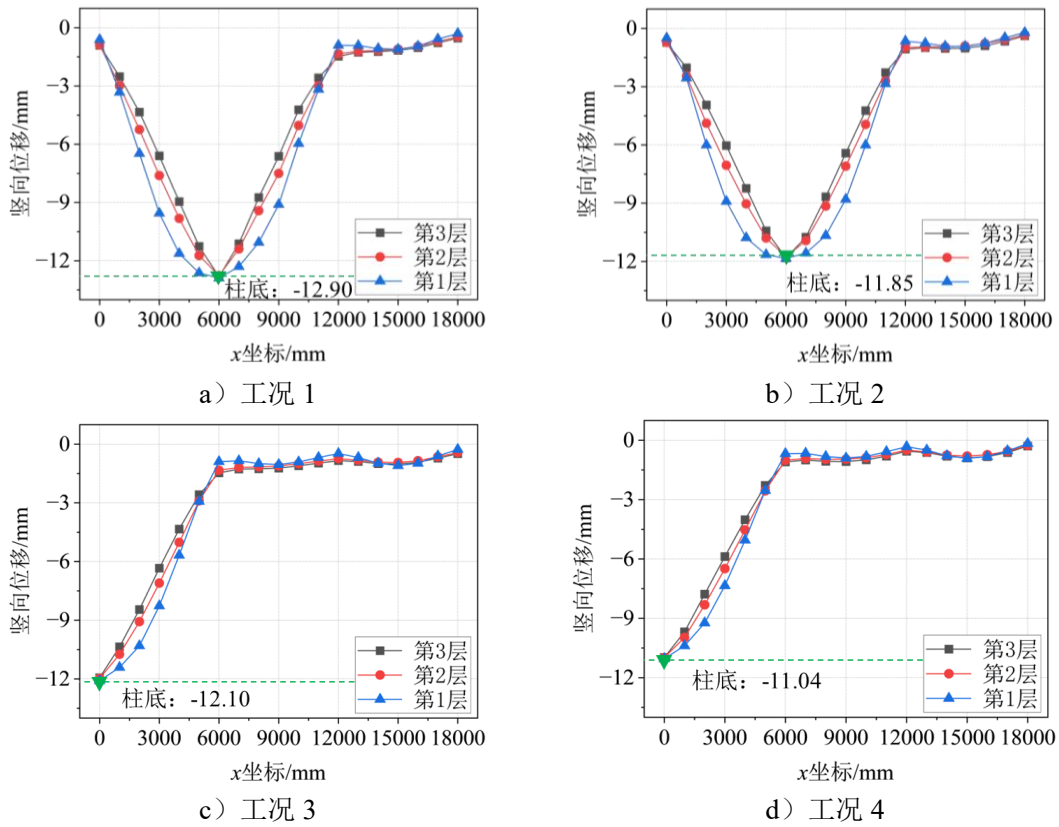


图 5.14 钢筋应力达到屈服强度结构竖向位移

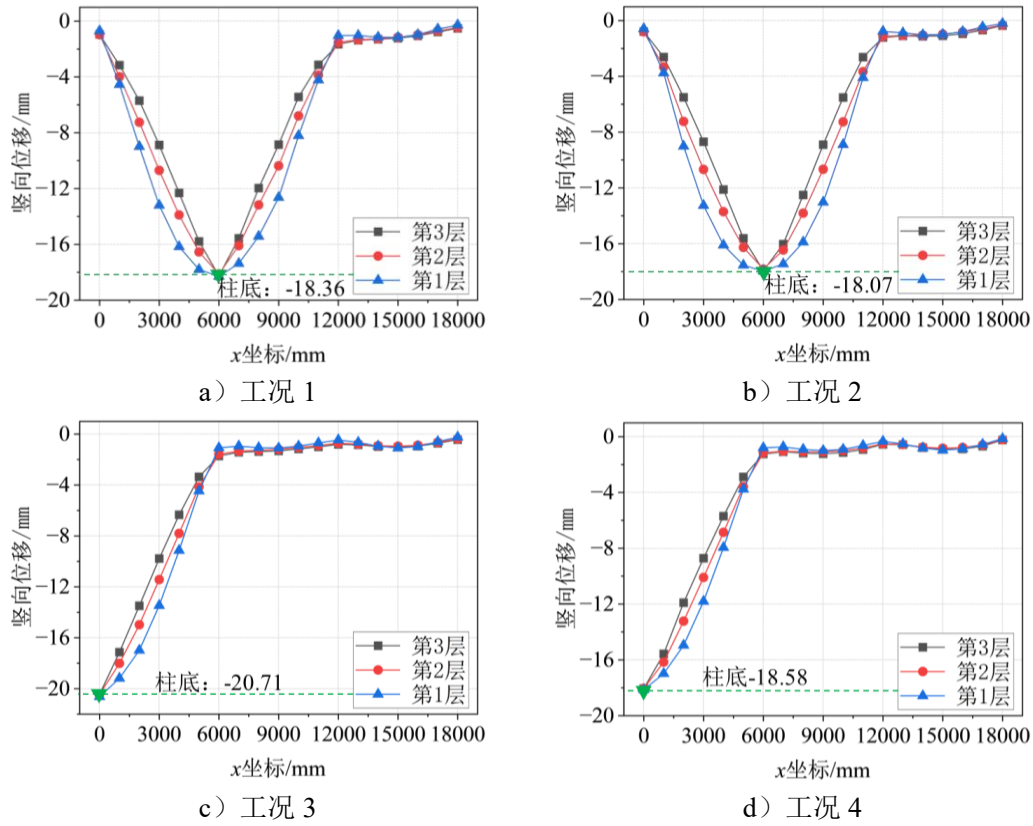


图 5.15 混凝土应力达到抗压强度结构竖向位移

上述分析结果表明, 结构进入关键受力状态的沉降阈值具有较好稳定性, 主要受结构自身承载能力控制, 而沉降位置的影响相对有限。因此, 上述两类沉降水平可分别作为结构由弹性阶段向损伤发展阶段转变, 以及由损伤发展阶段向严重损伤阶段演化的关键控制阈值。

5.5 本章小结

本章针对基于 InSAR 的建筑沉降风险评估缺乏系统力学支撑的核心问题, 以我国民用建筑中常见填充墙框架结构为研究对象, 基于 ANSYS 平台开展了不均匀沉降作用下的非线性损伤有限元全过程精细化数值模拟, 深入探讨了不同沉降工况下结构的受力响应与损伤演化规律, 旨在明确沉降量与结构损伤程度的定量映射关系, 为城市建筑沉降风险评估提供力学依据。主要研究工作与结论如下:

(1) 构建了典型填充墙框架结构有限元模型, 通过改进沉降施加方法实现了沉降过程的合理模拟与力学响应的有效控制。构建了考虑材料非线性、框架-填充墙接触作用及地基弹性支承的三维实体有限元模型; 详细阐述了模型的几何建模、网格划分、材料参数定义、边界条件设置等关键环节; 基于结构对称性, 选取角柱、边柱及中柱等 4 种代表性柱位作为沉降施加位置, 并提出一种改进弹性支承加载策略, 可有效兼顾固定支座法的沉降可控性与弹性支承法的力学真实性。

(2) 开展多沉降工况的结构非线性损伤分析, 揭示了不同工况下结构应力分布与裂缝演化规律。单柱沉降下结构响应呈显著局部化特征, 应力与裂缝集中于沉降柱相邻跨, 并随层高及跨距的增加而逐渐衰减; 结构损伤演化具有明确阶段性: 10mm 沉降时结构整体以弹性响应为主, 仅出现微小拉裂缝; 20mm 沉降时钢筋屈服、混凝土局部压碎, 裂缝显著扩展, 结构处于弹塑性阶段并形成塑性铰; 40mm 沉降时高应力区连通, 裂缝充分发展并贯通, 结构发生实质性破坏。

(3) 验证了 InSAR 观测量与结构真实沉降响应之间的等效关系, 明确了结构关键损伤状态下对应的差异沉降阈值。结构上下层梁柱变形差异分析结果表明: 在结构整体性良好且变形以竖向沉降为主的条件下, InSAR 观测获得的建筑屋顶竖向位移可近似等效表征地基沉降响应。进一步以钢筋屈服、混凝土压碎为结构关键损伤状态判据, 确定了钢筋屈服 (约 12mm) 和混凝土压碎 (约 18~20mm) 的沉降阈值, 与《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011) 沉降差限值 0.002l 与 0.003l 吻合良好, 为遥感监测数据向结构安全状态的转化提供了力学依据。

结论与展望

随着城市存量房屋规模持续扩大，老旧房屋和自建房结构性能随服役时间推移而劣化，城市房屋建筑安全管理面临重大挑战。基于星载 InSAR 技术开展建筑群变形监测与风险评估，已成为城市建筑安全常态化体检的重要技术路径。然而，在向建筑单元尺度的风险量化转化过程中，仍存在 InSAR 监测成果难以直接服务工程判定、评估指标体系与结构损伤机理脱节等问题。为此，在国家自然科学基金项目（52278306）、湖南省重点研发计划项目（2022SK2096）、湖南省自然科学基金项目（2023JJ70003）、湖南省应急厅应急管理科技项目（yjtjxm_202406）的资助下，本文围绕基于 InSAR 技术建筑变形安全风险评估问题，开展了从理论溯源、方法构建、实例验证，再到结构响应机理分析的系统研究，以期为基于 InSAR 数据驱动的建筑安全评估提供理论与实践支持，推动该领域研究的规范化及实用化落地。具体研究内容和成果如下：

（1）完成 InSAR 技术与建筑变形风险评估指标体系的系统溯源，厘清了技术适配边界与指标演进逻辑。系统梳理了星载 InSAR 技术的发展历程、干涉几何原理、PS-InSAR 核心处理流程，明确了其在建筑变形监测中的核心观测特性、适用条件与工程化瓶颈。深入分析建筑结构沉降变形的力学机理，并总结指标阈值从经验分析、理论推导到数值模拟的演进脉络，揭示了差异沉降是引发结构损伤的核心诱因与控制指标。对比国内外 20 余部规范，明确了工程规范以结构损伤控制为核心、遥感规范以数据标准化为核心的本质差异。研究表明，开展星载 InSAR 建筑风险评估时，指标选取与阈值设定需兼顾工程适用性与观测数据特性。

（2）完成城市建筑群 InSAR 风险评估框架构建与验证，实现了遥感数据向工程风险的定量转译。构建包含 8 项指标的建筑结构变形风险评估体系，提出基于缓冲区设定与高程差阈值的干扰点剔除机制，形成建筑有效归属 PS 点匹配方法，进一步融合层次分析法与模糊综合评价理论，构建了带动态权重惩罚机制的多方法联合风险判定模型，实现了遥感数据向工程风险等级的定量转译。以长沙市典型区域为研究区，完成 27693 个建筑单元的风险评估，检测覆盖率达 73.65%；单指标分析揭示了研究区建筑“低幅值、高差异”的变形特征，凸显了多指标综合评估的必要性；不同方法评估结果高度一致，表明所提方法可精准识别出风险建筑。对联合判定为高风险的建筑进行实地踏勘，结构性损伤与 InSAR 监测变形规律高度契合，验证了该评估框架的可靠性与工程适用性。

（3）完成建筑不均匀沉降致损伤的有限元全过程模拟，阐明了建筑变形与结构受力状态及损伤演化之间的内在联系。构建考虑材料非线性、框架-填充墙间接触作用与地基弹性支承的填充墙框架结构三维实体有限元模型，并提出了兼顾沉

降可控性与力学真实性的改进弹性支承沉降加载方法；多工况模拟结果揭示了单柱不均匀沉降下结构应力与裂缝发展的局部化特征及阶段性演化规律；随着沉降量由 10mm 增至 40mm，结构损伤从带微小拉裂缝的整体弹性工作阶段，逐步发展到钢筋屈服、混凝土局部压碎、裂缝显著扩展并形成塑性铰的弹塑性阶段，最终在高应力区连通、裂缝充分发展并贯通，导致结构发生实质性破坏；进一步以钢筋屈服、混凝土压碎为关键判据，通过柱底与柱顶沉降差异对比分析，验证了 InSAR 观测量与结构真实沉降响应之间的等效关系，并明确了对应关键差异沉降阈值（钢筋屈服约 12mm、混凝土压碎 18~20mm），与现行《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011）相关限值高度吻合。

尽管本文围绕 InSAR 监测数据在建筑安全风险评估中的应用开展了较为系统的研究，但仍有进一步深入与拓展空间，主要体现在以下几个方面：

（1）多源数据融合与天空地一体化协同监测体系构建，本文主要依赖单星 PS-InSAR 时序变形监测数据开展风险评估，但单一数据源在时间连续性、空间分辨率及观测精度方面均存在一定局限。后续可先开展多源 SAR 数据融合研究，融合不同波段、不同重访周期的 SAR 卫星数据，优化时序变形反演精度，提升建筑单元有效 PS 点的覆盖度；在此基础上，逐步融合高分辨率光学影像、无人机倾斜摄影数据与 GNSS、裂缝计等地面监测数据，构建多源数据互补的监测评估模式，形成“广域 InSAR 普查-重点区域无人机详查-高风险建筑地面精准核验”的全链条监测体系。通过数据互补与交叉验证，以提升建筑变形监测的三维精度和时间分辨率，从而提升变形监测与风险评估的可靠性。

（2）精细化指标体系构建与区域自适应阈值调整，本文基于典型工程经验与规范约束构建了统一的建筑变形指标体系与分级阈值，但未充分考虑不同区域地质条件、建筑结构类型、基础形式、服役年限等因素对建筑抗变形耐受力的影响。而不同结构类型、不同地质条件下的建筑，其变形致损的临界阈值存在显著差异未来可结合多区域、多类型建筑样本，结合实地检测数据与数值模拟结果，构建分场景分类化分级指标体系，实现由统一阈值向分类自适应阈值的转变，从而提高评估结果的工程适用性与泛化能力。

（3）结构变形响应与风险指标定量关系的深化，本文通过有限元分析验证了差异沉降与结构应力分布及裂缝发展的关联性，但目前仍以定性或半定量分析为主。后续研究可在更复杂结构模型与多工况条件下，进一步建立“变形指标-结构响应-损伤程度”之间的定量映射关系，例如构建沉降差异与裂缝宽度、构件应力水平之间的函数关系，从而为风险等级划分提供更加坚实的力学依据。推动构建以结构物理力学模型为约束，多源监检测及城市环境数据为支持的“数据+物理”双驱动评估框架，实现房屋建筑全生命周期的智能化动态风险评估预警，推动城市治理从被动响应向前瞻预警转变。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2025年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202602/t20260228_1962662.html, 2026-02-28
- [2] 中华人民共和国应急管理. 第一次全国自然灾害综合风险普查公报[EB/OL]. <https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/W020240508313655815475.pdf>, 2024-05-08
- [3] 廖睿灵. 给房屋做体检、交养老金、上保险[N]. 人民网·人民日报海外版, 2024-06-20(04). <http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/images/2024-06/20/04/rmrbhwb2024062004.pdf>.
- [4] Jin N, Yue Q, Huang S, et al. An urban-scale building safety screening framework based on critical parameters exploration from Chinese case studies[J]. Journal of Building Engineering, 2026: 115476.
- [5] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发全国自建房安全专项整治工作方案的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/27/content_5692543.htm, 2022-05-27
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 加快推进城镇房屋安全管理三项制度试点[EB/OL]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6931473.htm, 2024-02-14
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 一体化推进城市体检和城市更新[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2025/art_82822f6dedb547b798b889521b6466b3.html, 2025-5-20
- [8] 中共中央办公厅, 国务院办公厅关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991173.htm, 2024-12-05
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平: 在中央城市工作会议上的讲话[EB/OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202601/content_7054826.htm, 2026-01-15
- [10] 岳清瑞, 陆新征, 许镇, 等. 城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架[J]. 工程力学, 2023, 42(7): 19-27.
- [11] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.

- [12] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [13] Rogers A E E, Ingalls R P. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry[J]. Science, 1969, 165(3895): 797-799.
- [14] Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王霞迎,赵超英,尹慧芳. 地表形变时间序列InSAR监测法综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1430-1437.
- [18] Sandwell D T, Price E J. Phase gradient approach to stacking interferograms[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B12): 30183-30204.
- [19] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [20] 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.
- [21] Li H, Dong J, Wang Y, et al. Monitoring surface deformation using distributed scatterers InSAR[J]. Journal of Geodesy & Geoinformation Science, 2024, 7(1).
- [22] 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.
- [23] Goel K, Adam N. A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5454-5468.
- [24] 孙希龙. SAR层析与差分层析成像技术研究[D]. 国防科学技术大学,2012.
- [25] 廖明生,魏恋欢,张路. TomoSAR 技术在城市形变监测中的应用[J]. 上海国土资源, 2013, 34(4): 7-11
- [26] Pasquali P, Prati C, Rocca F, et al. A 3-D SAR experiment with EMSL data[C]. 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'95.

- Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Firenze, Italy: IEEE, 1995: 784-786 vol.1.
- [27] 张月,庞蕾,徐西桂,等. 差分层析SAR技术研究现状分析[J]. 测绘通报, 2019, (1): 5-12
- [28] Lombardini F. Differential tomography: a new framework for SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 37-44.
- [29] Reale D, Fornaro G, Pauciuillo A. Extension of 4-D SAR imaging to the monitoring of thermally dilating scatterers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(12): 5296-5306.
- [30] Zhu X X, Bamler R. Let's do the time warp: Multicomponent nonlinear motion estimation in differential SAR tomography[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 735-739.
- [31] Peng S. Surface subsidence engineering[M]. New York: SME, 1992.
- [32] 崔希民,张兵,彭超. 建筑物采动损害评价研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1718-1728.
- [33] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: State of the Art Volume. Mexico City, 1969: 225-290.
- [34] 阎跃观,师晓波,刘吉波,等. 矿区地表与建(构)筑物移动变形关系实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 158-165.
- [35] Deck O, Heib M A, Homand F. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 435-448.
- [36] Potts D M, Addenbrooke T I. A structure's influence on tunnelling-induced ground movements[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 1997, 125(2): 109-125.
- [37] Deck O, Singh A. Analytical model for the prediction of building deflections induced by ground movements[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(1): 62-84.
- [38] Li Y, Yang K, Zhang J, et al. Research on time series InSAR monitoring method for multiple types of surface deformation in mining area[J]. Natural Hazards, 2022, 114(3): 2479-2508.

- [39] Giardina G, Milillo P, DeJong M J, et al. Evaluation of InSAR monitoring data for post - tunnelling settlement damage assessment[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(2): e2285.
- [40] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,等.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S].北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [41] 崔希民,车宇航,赵玉玲,等. 采动地表移动变形与建筑物损坏程度评价的再认识[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 145-153.
- [42] Tay C, Lindsey E O, Chin S T, et al. Sea-level rise from land subsidence in major coastal cities[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(12): 1049-1057.
- [43] Ao Z, Hu X, Tao S, et al. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities[J]. *Science*, 2024, 384(6693): 301-306.
- [44] Solano-Rojas D, Wdowinski S, Cabral-Cano E, et al. Detecting differential ground displacements of civil structures in fast-subsiding metropolises with interferometric SAR and band-pass filtering[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 15460.
- [45] Wang R, Yang M, Yang T, et al. Decomposing and mapping different scales of land subsidence over Shanghai with X-and C-Band SAR data stacks[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 478-502.
- [46] 梁光河,杨巍然. 从南大西洋裂解过程解密大陆漂移的驱动力[J]. *地学前缘*, 2022, 29(01): 316-341.
- [47] 林旭川. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J]. *城市与减灾*, 2017 (3): 18-22.
- [48] Lu X, McKenna F, Cheng Q, et al. An open-source framework for regional earthquake loss estimation using the city-scale nonlinear time history analysis[J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(2): 806-831.
- [49] 于贵华,徐锡伟,陈桂华, 等. 汶川 8.0 级地震地表变形局部化样式与建筑物破坏特征关系初步研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3027-3031.
- [50] 谭莎莎,杨莹辉,许强,等. 2025年1月7日西藏定日县MS 6.8级强震地表同震形变特征与房屋建筑震损分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2025. 52(2): 212-222.
- [51] Plank S. Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR-A comprehensive review and outlook to Sentinel-1[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4870-4906.

- [52] Li Q, Wang W, Wang J, et al. Exploring the relationship between InSAR coseismic deformation and earthquake-damaged buildings[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 262: 112508.
- [53] Du Y N, Feng D C, Wu G. InSAR-based rapid damage assessment of urban building portfolios following the 2023 Turkey earthquake[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 103: 104317.
- [54] Ferretti A, Ferrucci F, Prati C, et al. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique[C] IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120), 2000,7: 3219-3221 vol.
- [55] Diao X, Wu K, Chen R, et al. Identifying the Cause of Abnormal Building Damage in Mining Subsidence Areas Using InSAR Technology[J]. IEEE Access, 2019, 7: 172296-172304.
- [56] 周云,陈嘉豪,易伟建,等. 某砌体结构房屋倒塌事故分析与倒塌全过程仿真模拟[J]. 土木工程学报, 2024, 58(7): 14-27.
- [57] Rodríguez-Antuñano I, Martínez-Sánchez J, Cabaleiro M, et al. Anticipating the Collapse of Urban Infrastructure: A methodology based on earth observation and MT-InSAR[J], 2023, 15(15): 3867.
- [58] Kuzu R S, Bagaglini L, Wang Y, et al. Automatic detection of building displacements through unsupervised learning from InSAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 6931-6947.
- [59] Raspini F, Bianchini S, Ciampalini A, et al. Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7253.
- [60] Cascini L, Ferlisi S, Fornaro G, et al. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi - temporal DInSAR technique[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(8): 1709-1716.
- [61] Cabral-Cano E, Osmanoglu B, Dixon T, et al. Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico[J]. IAHS-AISH publication, 2010, 339: 255-259.
- [62] Barra A, Reyes-Carmona C, Herrera G, et al. From satellite interferometry displacements to potential damage maps: A tool for risk reduction and urban planning[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 282: 113294.

- [63] 左世诚,董杰,廖明生. 时序InSAR形变梯度估计与城市建筑物风险评估: 以北京平原为例[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 171-183.
- [64] Horn B K P. Hill shading and the reflectance map[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(1): 14-47.
- [65] Cabral Cano E, Díaz Molina O, Delgado Granados H. Subsistencia y sus mapas de peligro: un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México[J], Boletín de la sociedad Geológica Mexicana 2011, 63(1): 53-60.
- [66] Sanabria M P, Guardiola-Albert C, Tomás R, et al. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study[J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014, 14(5): 1341-1360.
- [67] Cigna F, Tapete D. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 112161.
- [68] Ma P, Zheng Y, Zhang Z, et al. Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 114: 103076.
- [69] Shahbazi S, Barra A, Gao Q, et al. Detection of buildings with potential damage using differential deformation maps[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 218: 57-69.
- [70] Drougkas A, Verstrynghe E, Van Balen K, et al. Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(5): 2317-2336.
- [71] 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.
- [72] Frangopol D M, Saydam D, Kim S. Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review[J]. Structure and infrastructure engineering, 2012, 8(1): 1-25.
- [73] D'Aranno P J V, Marsella M, Scifoni S, et al. Advanced DInSAR analysis for building damage assessment in large urban areas: an application to the city of Roma, Italy[C]. SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XV. SPIE, 2015, 9642: 108-116.

- [74] 费毕刚,韩鹏飞,朱茂,等. 基于星载InSAR技术的城市房屋安全风险识别[J]. 城市勘测, 2021(3): 71-76.
- [75] 夏锐,李铁,张景发,等. 基于SBAS-InSAR技术的M矿区沉降监测与建筑群安全性研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(3):175-183.
- [76] Han L, Cao L, Wu Q, et al. Identification of surface deformation-sensitive features under extreme rainfall conditions in Zhengzhou city based on multi-source remote sensing data[J], 2023, 13(24): 13063.
- [77] Xu J, Gu S, Li J J, et al. Monitoring and risk assessment of urban surface deformation based on PS-InSAR technology: a case study of Nanjing city[J]. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, 2024.
- [78] 朱茂,葛春青,班勇,等. 基于InSAR的城市建筑安全监测技术研究[J]. 工业建筑,2024,54(2):51-57.
- [79] 危险房屋鉴定标准:JGJ 125-2016[S]. 北京: 中国 建筑工业出版社, 2016.
- [80] 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [81] 地质灾害危险性评估规范: GB/T 40112-2021[S].北京:中国标准出版社, 2021.
- [82] 建筑安全星载干涉雷达监测技术规程: T/CECS 1165-2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [83] Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1142 1153.
- [84] Wang Y, Feng G, Li Z, Et al. A multi-frame deformation velocity splicing method for wide-area InSAR measurement based on uncontrolled block adjustment: a case study of long-term deformation monitoring in Guangdong, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 301: 113929.
- [85] Hanssen R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001.
- [86] 建筑变形测量规范: JGJ 8-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [87] 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.
- [88] Kuai H, Macchiarulo V, Sharma S, et al. MT-InSAR optimisation for structural health monitoring [C]. European on Structural Health Monitoring. Potsdam: German Society for Non-Destructive Testing, 2024: 29753.

- [89] 杨梦诗,廖明生,常玲,等. 城市场景时序 InSAR 形变解译:问题分析与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1643-1660.
- [90] 廖明生,王茹,杨梦诗,等. 城市目标动态监测中的 时序InSAR分析方法及应用[J]. 雷达学报, 2020, 9 (3): 409-424.
- [91] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Resolving three dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133: 1-17.
- [92] Balz T, Wei L, Jendryke M, et al. TomoSAR and PS-InSAR analysis of high-rise buildings in Berlin [C].2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2012: 447-450.
- [93] Goel K, Adam N. Fusion of Monostatic/Bistatic InSAR stacks for urban area analysis via distributed scatterers[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 733-737.
- [94] Shi G, Lin H, Ma P. A Hybrid method for stability monitoring in low-coherence urban regions using persistent and distributed scatterers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(10): 3811-3821.
- [95] Zhang Y, Kang Y, Wei J, et al. SAR interferometry on full scatterers: mapping ground deformation with ultra-high density from space[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 302: 113965.
- [96] Ma P, Lin H, Wang W, et al. Toward fine surveillance: a review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021, 10(1): 207-230.
- [97] Ren T, Gong W, Gao L, et al. An interpretation approach of ascending-descending SAR data for landslide identification[J], Remote Sensing, 2022, 14 (5): 1299.
- [98] Bovenga F, Wasowski J, Nitti D O, et al. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 272-285.
- [99] Wang G, Deng K, Chen Q, et al. Distributed scatterer processing based on binary partition trees with multi-baseline PolInSAR data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(21): 5367.
- [100] Bianchini S, Pratesi F, Nolesini T, et al. Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide-affected area:

- the Volterra (Italy) case study[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4678-4701.
- [101] 廖明生,王腾. 时间序列InSAR技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [102] 范锐彦,焦健,高胜,等. InSAR时序分析高相干目标选取方法比较研究[J]. , 2016, 18(6): 805-813.
- [103] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas González M, et al. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 100: 84-91.
- [104] 吴文清. 面向建构物安全监测的时序InSAR点云处理理论与方法研究[D]. 中南大学, 2024.
- [105] 赵亿,钱乐,杨魁. 探讨InSAR技术在城市建筑物沉降监测中的精度[J]. 城市勘测, 2015(3):115-119.
- [106] Yang K, Yan L, Huang G, et al. Monitoring building deformation with InSAR: experiments and validation[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2182.
- [107] De L S. Partieel funderingsherstel van woningblokken [D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [108] Van W H W. A feasibility study of building monitoring and forensic engineering with interferometric synthetic aperture radar[D]. Delft: Delft University of Technology, 2014.
- [109] 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.
- [110] Wu S, Zhang B, Ding X, et al. Radar interferometry for urban infrastructure stability monitoring: from techniques to applications [J]. Sustainability, 2023, 15(19): 14654.
- [111] 张振海. 建筑物地基沉降的规律与特征分析[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 5-12.
- [112] 邱明兵. 建筑地基沉降控制与工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [113] 费扬,陈龙伟. 考虑地基侧向永久位移的钢筋混凝土框架结构地震反应分析. 力学与实践, 2023, 45(5): 1067-1078.
- [114] Stefano M, Pintucchi B. A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6: 285-308.
- [115] Meyerhof G G. The settlement analysis of building frames[J]. The Structural Engineer, 1947, 25(9): 369-409.

- [116] Skempton A W, Macdonald D H. The allowable settlements of buildings [J] .
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1956, 5(6): 727-768.
- [117] Sowers G F. Shallow foundation: chapter 6[M]. New York:McGraw-Hill, 1962:
525-641.
- [118] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2nd ed. New
York: John Wiley, 1967.
- [119] Poulos H G, Carter J P, Small J C. Foundations and retaining structures-research
and practice[C]. 15th International Conference on Soil Mechanics and
Foundation Engineering. Istanbul, Turkey: Balkema, 2002: 2527-2606.
- [120] Coduto D P. Foundation design: principles and practices[M]. London:Pearson
Education Limited, 2014.
- [121] Terzaghi C. Settlement of structures in Europe and methods of observation [J].
Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1938, 103(1):
1432-1448.
- [122] Building code requirements for reinforced concrete: ACI 318-89[S]. Detroit, MI:
American Concrete Institute, 1992.
- [123] Eurocode 7: geotechnical design: EN 1997-1-2004 [S]. European Committee for
Standardization, 2004.
- [124] Polshin D E, Tokar R A. Maximum allowable non-uniform settlement of
structures [C].4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation
Engineering. London, England: Butterworth' s Scientific, 1957: 402-405.
- [125] Ang T L, Masri K J. Behaviour of residential structures on problematic
ground[C].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
Langkawi, Malaysia:IOP Publishing, 2019: 012010.
- [126] Grant R, Christian John T, Vanmarcke Erik H. Differential settlement of
buildings[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100 (9):
973-991.
- [127] Burland J, Wroth C. Settlement of buildings and associated damage[C].
Proceedings of the Conference on Settlement of Structures. London, England:
Pentech Press, 1974: 611-654.
- [128] Meyerhof G G. Limit states design in geotechnical engineering[J]. Structural
Safety, 1982, 1(1): 67-71.
- [129] Bjerrum L. Discussion [C]. Proceedings of 21 European Conference on Soil
Mechanics 2nd Foundation Engineering. Oslo, Norway: Norwegian
Geotechnical Institute, 1963: 1-3.

- [130] Zhang L, Ng A M Y. Limiting tolerable settlement and angular distortion for building foundations[J]. Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering, 2007: 1-11.
- [131] Charles J A, Skinner H D. Settlement and tilt of low-rise buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004, 157 (2): 65-75.
- [132] Namazi E, Mohamad H. Potential damage assessment in buildings undergoing tilt [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2013, 166(4): 365-375.
- [133] Burland J, Broms B, Mello V. Behaviour of foundations and structures [C]. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1977: 495-546.
- [134] Rankin W J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects[C]. Engineering Geology Special Publications. London: Geological Society, 1988: 79-92.
- [135] Boscardin Marco D, CORDING Edward J. Building response to excavation-induced settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115 (1): 1-21.
- [136] Schuster M, Kung G T C, Juang C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [137] Day Robert W, Boone Storer J. Discussion and closure: ground-movement-related building damage [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(5): 462-465.
- [138] Finno R J, Voss Frank Jr. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1199-1210
- [139] Namazi Eshagh, Mohamad Hisham. Assessment of building damage induced by three-dimensional ground movements[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (4) : 608-618.
- [140] Burland J B. Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations[C]. 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Tokyo, Japan: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1995: 1189 1202. 22

- [141] Son Moorak, CORDING Edward J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (2) : 162-177.
- [142] Negulescu C, Foerster E. Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10 (9): 1781-1792.
- [143] 李谊. 不同不均匀基础沉降形式对框架结构影响的有限元分析[J]. 中外建筑, 2016 (5): 161-163.
- [144] Chen H, Guo Y, Alqawzai S, et al. Study on uneven settlement and correction of steel frame structures based on numerical simulation method[J]. Plos One, 2024, 19(5): e0303249.
- [145] Pande G N, Middleton J, Lee J S, et al. Numerical simulation of cracking and collapse of masonry panels subject to lateral loading [C]. Proceeding of 10th International Block/Brick Masonry Conference. Calgary, Canada: International Masonry Society, 1994: 107-115.
- [146] 赵欣. 不均匀沉降对砌体结构的影响分析[D]. 济南:济南大学, 2014.
- [147] 吴文斌. 盾构隧道下穿既有砖混结构的变形影响及其破损评估[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [148] Dong Z, Wu G, Zhu H, et al. Mechanism and control of the long-term performance evolution of structures [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(5): 1039-1048.
- [149] 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [150] 北京地区建筑地基基础勘察设计规范: DBJ11 501-2009[S]. 2016版. 北京: 北京市规划委员会, 2017.
- [151] Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-16[S]. Reston,USA: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [152] Engineering and design settlement analysis: EM 1110 1-1904[M]. Washington, DC: Department of the Army U. S. Army Corps of Engineers, 1990.
- [153] Residential slabs and footings:AS2870-2011[S]. Sydney,NSW:the Council of Standards Australia, 2011.
- [154] Foundation engineering manual[S]. 5th ed. Vancouver, BC: Canadian Geotechnical Society, 2023.
- [155] Funderingen onder gebouwen[S]. Nederland::Kennis Centrum Aanpak Funderingsproblematiek, 2022.

- [156] Framework on performance based impact assessment associated with ERSS and tunnelling works [S]. Singapore: Building and Construction Authority, 2021.
- [157] Code of practice for foundations 2017[S]. Hong Kong,China:Buildings Department, 2017.
- [158] 程季达. 房屋和工业结构物天然地基设计标准及技术规范HNTY127-55[M]. 北京: 建筑工程出版社, 1957.
- [159] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911-2013 [S]. 北京:中国建筑工程出版社,2013.
- [160] 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144-2019[S]. 北京:中国建筑工程出版社,2019.
- [161] 建筑基坑工程监测技术规程:GB 50497-2019[S]. 北京: 中国计划出版社,2019.
- [162] 时间序列InSAR地表形变监测数据处理规范: CH/T 6006-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [163] 基于InSAR技术的地壳形变监测规范: GB/T 44146-2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [164] InSAR沉降监测预警规范: T/SZEMA 0002-2023[S]. 深圳: 深圳市应急管理联合会, 2023.
- [165] 基于合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的建筑物保险风险减量应用规范: JR/T 0328-2025[S]. 北京: 国家金融监督管理总局, 2025.
- [166] Chen Y C, Lin Y N, Teo T A, et al. Enhancing urban resilience through Tomo-PSInSAR-based structural health monitoring[J]. GIScience & Remote Sensing, 2025, 62(1): 2482329.
- [167] Li M H, Gao X N, Yang M S, et al. Evaluating the stability of architectural heritage from the perspective of InSAR: a practical study on Jianchuan Ancient Town[J]. Heritage Science, 2024, 12(1): 394.
- [168] Zhong C, Yang Q, Liang J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation with AHP and entropy methods and health risk assessment of groundwater in Yinchuan Basin, northwest China[J]. Environmental Research, 2022, 204: 111956.
- [169] 中华人民共和国建设部. JGJ 125-99 危险房屋鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1999.
- [170] 胡炳南. 建筑物采动破坏程度的模糊综合评判[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 1993 (3): 23-27.
- [171] 王强. 砖木结构房屋抗震性能评价方法研究[D]. 中国地震局兰州地震研究所,2009.

- [172] 林拥军,肖恬煦,张曾鹏,等. 基于层次分析法-隶属度理论的混凝土框架结构安全性模糊综合评价方法[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 28-38.
- [173] 熊仲明,冯成帅. 大跨钢结构安全性模糊综合评估方法的应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 128-133.
- [174] 陈学昊. 基于模糊综合评价法的装配式混凝土结构质量评价研究[D]. 西南交通大学, 2023.
- [175] 叶子祺,王冠军,周海怡,等. 基于层次分析法的城市危险房屋安全综合评价方法[J]. 土木工程, 2022, 11(6): 797-804.
- [176] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9-26.
- [177] 胡守忠,顾建勤. 模糊综合评价法及应用[J]. 中国纺织大学学报, 1995, (1): 74-80.
- [178] 刘仁争,田康生,彭富强,等. 基于非对称贴近度的预警雷达情报质量评估[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 130-135.
- [179] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(2): 25-29.
- [180] 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, 0(7): 125-130.
- [181] 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [182] 刘桂秋,颜友清,施楚贤. 砌体受压本构关系统一模型的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(11): 6-9.
- [183] 李英民,韩军,刘立平. ANSYS在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, (5): 90-96, 105.
- [184] 周海水. 带填充墙框架结构非线性有限元分析[D]. 南昌大学, 2009.
- [185] 胡合江. 基于ANSYS的框架砌体填充墙温度应力分析[J]. 土木工程, 2016, 5(3): 68-73.
- [186] 刘畅,郑刚. 地基不均匀沉降对上部结构影响的弹性支承分析法[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(04): 124-128.
- [187] Dahmani L, Khennane A, Kaci S. Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software[J]. Strength of materials, 2010, 42(2): 232-240.

攻读学位期间的学术或实践成果

1. 学术论文

- [1] 周云,邹少豪,周晓枫,等. 基于星载InSAR技术的房屋建筑安全风险评估指标体系综述[J]. 建筑结构学报, 2026, 47(01): 1-25.
- [2] 周云,邹少豪,曹爽,等.基于星载InSAR对地观测的城市建筑群变形风险模糊评估理论与应用研究[J]. 建筑结构学报, 1-19[2026-05-11].
<https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2026.0087>.
- [3] 周云,陈建炜,邹少豪,等. 基于星载 InSAR技术的城市建筑群变形监测与安全风险评估研究综述[J]. 土木工程学报, 2026, 59(04):47-70.
- [4] Zhou Y, Zhou X F, **Zou S H**, 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: 1239563.
- [5] 周云,魏子青,郝官旺,邹少豪,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)
- [6] 周云,陈祎林,陈建炜,郝官旺,邹少豪,等. 一种基于InSAR位移测量的多颗SAR卫星角反射器跟踪控制方法、跟踪控制系统以及跟踪式角反射器. 发明专利. CN 119472454 B, 2025-04-25

致谢

时光荏苒，落笔至此，三年的研究生学习与科研工作即将画上句号。回首这段求学之路，有迷茫亦有笃定，有艰辛亦有收获。本论文完成的全过程，离不开诸多师长、同学与亲友的支持与帮助，在此谨致以诚挚的感谢。

首先，我要将最深切的感谢献给我的导师周云教授。犹记最初面对 InSAR 技术与土木工程交叉研究的无从下手，是周老师一步步引导我锚定研究核心，厘清研究逻辑；从论文选题的初步构思，到研究方案的反复论证，从实验数据的艰辛获取与细致分析，再到论文撰写过程中的字斟句酌，乃至最终定稿的每一个环节，他都倾注了大量心血，给予我高屋建瓴的学术指导、耐心细致的修改意见和无微不至的生活关怀。周老师严谨求实的治学态度、深厚广博的学术造诣、敏锐独到的科研洞察力以及诲人不倦的师德风范，不仅是我学习的楷模，更是我科研道路上最宝贵的精神财富和指路明灯。其次，感谢郝官旺博士、周晓枫博士、陈建炜师兄、易凡师兄在科研中给予的耐心解答与指导，感谢课题组罗先明博士、朱师琪博士、肖寒博士的多方协助，感谢汪柏煊、冷建波、徐晓婉、李婷、刘迎澳、魏子青、杨晨烨、陈祎林、张阳、刘森森、曹爽、雷霆、徐骢荣、刘程、黄一钊、李子卿等各位同门师兄弟，在各项工作中的团结协作、在科研攻关中与我共同探讨、相互启发，共同解决问题，以及彼此间的鼓励与支持，与大家共同度过的这段求学生涯，是我人生中弥足珍贵的记忆。

感谢我的家人与挚友，你们无条件的理解、默默的支持与始终的陪伴，是我能够心无旁骛完成学业与研究工作最坚实的后盾。你们的包容与鼓励，陪我度过了每一个攻坚克难的日夜，让我始终保有前行的勇气与动力。

最后，感谢这段始终没有放弃的自己。论文的完成不是终点，而是我职业生涯的新起点，我会带着所有的收获与感激，继续脚踏实地，稳步前行。

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	李鹏	高工	湖南省建筑设计院
秘书	刘艳芝	副教授	湖南大学