

2025 年度甘肃省科学技术奖公示材料

项目名称：高海拔季冻区交通廊道冻融变形监测分析关键技术及应用

申报奖种：甘肃省科技进步奖

项目简介：

(一) 主要技术内容

随着全球气候变暖，特别是人类工程活动的延伸，像青藏铁路、兰新高铁等大型交通廊道工程引发了其周围冻土环境的变化。我国季节性冻土区所覆盖的高速铁路网超过 7000 km，涉及哈大、哈齐、沈丹、兰新、京张、京沈等 10 多条高速铁路，高速铁路建设和运营将不可避免地面临冻融灾害的威胁。在冻融作用及行车动载的长期循环振动下，冻土区铁路沿线的隧道围岩或路基易产生变形，从而引发一系列的冻融变形灾害。本项目面向国家季冻区交通廊道建设与安全运营的重大需求，依托国家自然科学基金（“基于数据同化的高铁路基冻胀变形分析与时空整体预报研究”、“祁连山北部基岩河道宽度及共对构造抬升的响应研究”）、国家重点研发计划（“星载 SAR 综合环境监测高精度数据处理与反演技术”、“GNSS 云处理系统软件性能动态测试”），主要技术内容如下：

(1) 多源数据驱动的冻融变形分析方法

通过多技术协同监测获取的大量数据，探讨气温、降水、日照等气象因素对冻融区微变形的影响程度和作用机制，分析冻融区微变形或路基变形在不同时空尺度上的变化特征。研究冻融循环过程中，土体的物理力学性质（如含水率、密度、孔隙比等）与微变形之间的内在联系，建立相应的关系模型，为理解冻融区微变形的机理提供依据。主要技术内容包括：①INSAR 技术与冻胀模型耦合的冻融区高铁路基微变形同化分析方法；②顾及环境影响因子的时序 InSAR 形变模型及相关物理参数反演方法；③结合 SBAS-INSAR 与 TRIGRS 模型的冻融滑坡危险性评价数据同化方法；④观测数据与机理模型优化融合的数据同化方法。

(2) 寒区复杂不确定环境下冻融微变形预报方法

根据冻融微变形机理和监测数据特征，选择合适的数学模型和算法，基于物理过程的数值模型、数据驱动的机器学习模型（如人工神经网络、支持向量机等）或两者相结合的数据同化模型，建立冻融微变形预报模型；利用大量的监测数据对预报模型进行训练、验证和优化，调整模型参数，提高模型的准确性和泛化能力，使其能够适应寒区复杂不确定环境下的冻融微变形预报。主要技术内容包括：①监测数据不确定性度量的最小模糊熵估计；②高铁路基冻胀变形预测的改进动态 GM-MARKOV 模型和组合模型；③顾及不确定性影响的变形概率

预测模型。

(3) 多技术协同的冻融区微变形精细化监测

将全球导航卫星系统（GNSS）、合成孔径雷达干涉测量（InSAR）、无人机测量技术等多种监测技术进行有机结合，发挥各自技术的优势，实现对冻融区微变形的全方位、高精度监测。优化各技术的参数设置和数据采集频率，以适应冻融区复杂的环境条件和微变形监测的要求，提高监测数据的质量和可靠性。主要技术内容包括：①基于时序差分干涉组合优化的高铁冻融区微形变解算方法，面向地表动态演变的多因子耦合时序 InSAR 形变解算方法；②基于模糊聚类分析的多频 GNSS 最优线性组合确定方法，顾及树木散射的 GNSS 信号全路径传播功率衰减模型及应用；③融合了激光雷达（LiDAR）、摄影测量、数值模拟等多领域技术，研究基于点云数据的冻土工程变形精细化监测与建模技术，实现冻土区域地表形变、土体结构变化的高精度感知与动态建模。

(4) 研发面向微变形监测应用的高性能无人机微型 SAR 系列化装备

针对当前国产无人机微型 SAR 系统集成研制难度大、成像分辨率低等难题，实现了面向地表微变形监测的二维有源相控阵体制微型 SAR 载荷系统设计。主要技术内容：①自主研发了轻量化、高性能、高集成度的 Ka 波段系列化微型 SAR 载荷装备；②建立了基于小型无人机平台的高精度 SAR 稳定成像方法，突破了复杂大气扰动下无人机航迹姿态高频突变导致的 SAR 影像散焦问题，实现了对不同波段无人机微型 SAR 回波观测数据的高分辨率精聚焦成像，显著提升了高铁构筑物和沿线环境微变形监测的精度和能力。

(二) 主要技术创新点

1、提出了多源观测数据与机理模型优化耦合的冻融变形同化分析方法，解决了“观测与机理”协同分析技术难题，揭示了冻融微变形的时空响应机制。

2、构建了寒区复杂不确定环境下冻融变形预（报）警的理论框架和方法，提出了监测数据不确定性度量的最小模糊熵估计方法及顾及不确定环境的冻融变形概率预报方法，提高了高铁路基冻胀形变趋势精确预测。

3、构建了对地观测系统（北斗/GNSS、InSAR）协同观测的冻融区微变形精细化监测技术，提出了基于点云数据的高铁冻融区工程精细化微变形监测与建模方法，实现了高铁冻融区微变形量毫米级监测。

4、研制了面向微变形监测应用的高性能无人机微型 SAR 系列化装备，突破了复杂大气扰动下无人机航迹姿态高频突变导致的 SAR 影像散焦问题，提升了高铁构筑物和沿线环境微变形监测的精度和能力。

(三) 知识产权

项目具有完全自主知识产权，获得计算机软件著作权 1 项，申请发明专利 4 项，学术专著 2 部，发表期刊论文 18 篇，其中 SCI/EI 收录 15 篇。

(四) 经济效益及社会效益

本项目研制的高铁冻融区微变形精细化监测技及应用，中铁二局集团有限公司测量中心、中核勘察设计研究有限公司中铁隧道集团一处有限公司测量分公司等单位将该成果运用于铁路选线、冻土区路基沉降、桥梁墩台位移等微变形隐患监测中，在“避免了因变形问题导致的返工和工程延误、缩短工程周期、提前投入运营”方面取得间接经济效益达 1.3 亿元，并已在“2020 珠峰高程测量”、“引大入秦工程”、“甘肃天水、定西市的地质灾害普适型监测预警和应急监测”、“自然源部地质勘察管理司 CORS 站网地面稳定性变化监测能力滇西地区试点”及“冻土区兰新高铁边坡工程项目”等多个重大工程中推广应用，涉及测绘、铁路、地震、水利水电、地质灾害、工程勘察设计等多个行业和领域，取得间接经济效益上亿元，尤其在提升寒区冻融变形监测能力与防治方面，社会效益明显。

主要完成单位及创新推广贡献

1: 兰州交通大学（排名第一）

对本项目的贡献：对创新点（1）-（3）做出了主要贡献，兰州交通大学承担了复杂环境下北斗/GNSS 冻融变形监测、冻融变形机理分析与预报的研究工作。针对传统数学模型的变形分析方法没有考虑冻融变形环境诱发因素，难以准确预测高铁路基冻胀变形问题，项目在冻土力学与数据同化框架下，提出了 PS-INSAR 技术与机理模型优化耦合的高铁冻融区路基微变形同化分析方法，提出了结合 SBAS-INSAR 与 TRIGRS 模型的滑坡危险性评价数据同化方法，构建了基于多源数据的复杂遮挡环境下 GNSS 卫星可见性时空预报技术流程，提出了顾及树木散射的 GNSS 信号全路径传播功率衰减模型，提出了基于模糊聚类分析的多频 GNSS 最优线性组合确定方法；提出了最小模糊熵估计方法，推导了基于贝叶斯理论变形模型参数不确定性分析的递推公式，对变形模型参数的不确定性进行定量计算，定量研究了季冻区工程冻害变形预报的不确定性。

2: 中国科学院空天信息创新研究院（排名第二）

对本项目的贡献：对创新点（1）、（2）、和（4）做出了主要贡献，中国科学院空天信息研究院承担冻土区 INSAR 监测技术、相关地学参学反演及设备研究工作。针对高铁冻融区季节性环境变化带来的区域性微变形监测应用需求，提出了面向地表动态演变的多因子耦合时序 InSAR 形变解算方法；构建了季节性时序 InSAR 干涉组合优化监测技术流程，提出了基于高相干性干涉对网络的时序 InSAR 形变解算方法，实现了对高铁冻融区地表时序形变的高精度

提取；自主研发了轻量化、高性能、高集成度的 Ka 波段系列化微型 SAR 载荷装备，显著提升了高铁构筑物和沿线环境微变形监测的精度和能力，实现了无人机微型 SAR 技术的自主创新与国产化。

3. 中铁隧道局集团有限公司（排名第三）

对本项目的贡献：对创新点（2）（3）做出了主要贡献，中铁集团隧道局参与了冻土区工程变形监测与分析技术及项目推广应用工作，提出了长大隧道深竖井边角交会测量方法，研发思位智慧测量管理系统，推进冻融变形监测分析与预报技术在铁路工程、水利水电工程中的应用。

4. 中国测绘科学研究院（排名第四）

对本项目的贡献：对创新点（1）（2）做出主要贡献。中国测绘科学研究院参与冻土变形机理分析建模、融变形监测数据处理及概率预报方面的研究工作，推进冻融变形监测分析与同化技术在珠峰高程测量、CORS 网地面变形监测项目中的应用。

5. 兰州大学（排名第五）

兰州大学：对创新点（1）做出主要贡献。兰州大学负责野外冻土环境气象数据采集，处理祁连山冻土环境监测数据，提出了祁连山地区构造抬升与变形的关系，推进冻融灾害分析与防治决策分析领域的应用。

推广应用情况：

本项目能有效解决高铁冻融区微变形监测、分析与预警过程中存在的监测难、机理分析难及预警难等难题，在冻融变形监测分析与冻融灾害预警方面发挥有效的作用。本项目研制的高铁冻融区微变形精细化监测技及应用，已在“2020 珠峰高程测量”、“引大入秦工程”、“甘肃天水、定西市的地质灾害普适型监测预警和应急监测”、“冻土区兰新高铁边坡工程项目”等多个重大工程中推广应用，涉及测绘、铁路、地震、水利水电、地质灾害、工程勘察设计等多个行业和领域。

主要知识产权证明目录:

知识产权类别	知识产权名称	授权或申请号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
软件著作权	思位智慧测量管理系统 V1.0	2023SR0704221	2023/1/17	11291392	中铁隧道局集团有限公司工程测量实验分公司	杜志刚; 方正; 万俊林; 赵建; 郝全超; 张伟东; 恒正坤; 王伟伟; 张宏娜
发明专利	综合 CORS 网和多源数据的地面形变连续监测方法	CN114046774B	2022/4/8	5057611	中国测绘科学研究院	王伟; 章传银; 党亚民; 杨强
发明专利	基于升降轨 SAR 卫星的长时序二维形变快速解算方法	CN115291215B	2022/12/20	5656822	中国科学院空天信息研究院	邓云凯; 向卫; 刘大成; 王吉利; 张勇
发明专利	长大隧道深竖井边角交会测量方法	CN109211183B	2021/5/25	4442225	杜志刚	杜志刚; 徐辉; 王建林; 吕红权; 邢庭松; 顾德山
发明专利	基于长时间滑动聚束的图像域动目标检测方法	CN115657031B	2023/3/7	5767072	中国科学院空天信息研究院	邓云凯; 向卫; 张衡; 刘大成; 王吉利

主要完成人情况对项目主要贡献:

排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献	曾获科技奖励情况
1	魏冠军	教授	兰州交通大学	兰州交通大学	全面主持项目研发与推广应用的工作, 负责项目冻融机理与同化、点云数据处理等工作。完成创新点 1、2 和 3 的研究工作, 对该项目研究的贡献率为 60%。	参与完成《大型设备安装精密测量方法的研究》项目被评为“甘肃省测绘科技进步三等奖”, 2013 年; 参与“大中城市地理国情综合统计与分析方法研究——以兰州市为例, 甘肃省测绘科技进步奖, 一等奖, 2017 年。
2	杨维芳	教授	兰州交通大学	兰州交通大学	负责项目冻融变形监测与预报研发工作。完成创新点 2 和 3 的研究工作; 对该项目研究的贡献率为 50%。	参与的“面向空间数据多尺度表达的空间关系理论及其工程应用”获甘肃省科技进步一等奖, 2023 年; 参与的“地理空间数据版权保护关键技术及应用”获甘肃省科技进步一等奖, 2020 年。

3	章传银	研究员	中国测绘科学研究院	中国测绘科学研究院	负责项目冻融机理与同化研发工作。完成创新点 1 和 3 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 40%。	海岛礁测绘关键技术及重大工程应用，国家科技进步二等奖（排名 3），2016 年。GPS 激光测距主动式定位关键技术及系统，卫星导航定位一等奖（排名 2），2016。
4	向卫	副研究员	中国科学院空天信息创新研究院	中国科学院空天信息创新研究院	负责项目冻融变形精细化监测与冻融机理同化及装备研发工作。创新点 1、3 和 4 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 40%。	无
5	杜志刚	教授级高工	中铁隧道局集团有限公司	中铁隧道局集团有限公司	负责项目冻融变形监测及分析预报工作。完成创新点 2 和 3 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 35%。	主持完成的《长大隧道控制测量关键技术研究及应用》被评为 2022 年度中国地理信息产业协会科技进步一等奖，2022 年；主持完成的《高速铁路特长隧道精密测量关键技术及应用》被评为 2023 年中国测绘学会科学技术二等奖，2023 年。
6	李琼	高级实验师	兰州大学	兰州大学	负责项目冻融变形机理研发工作。完成创新点 1 和 2 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 30%。	无
7	李毓照	副教授	兰州交通大学	兰州交通大学	负责项目冻融变形监测与分析研发工作。完成创新点 3 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 25%。	无
8	杨强	副研究员	中国测绘科学研究院	中国测绘科学研究院	负责项目冻融变形机理与同化研发工作。完成创新点 1 和 3 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 25%。	无
9	党宇	工程师	国家测绘产品质量检验检测中心	兰州交通大学	负责项目冻融变形监测与分析研发工作。完成创新点 1 和 4 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 20%。	无
10	寇瑞雄	讲师	兰州交通大学	兰州交通大学	负责项目冻融变形监测与分析研发工作。完成创新点 3 和 4 的研究工作，对该项目研究的贡献率为 25%。	无