多模态数据架构下的多层级多阶段基建工程动态预警方法

周 亮[1,*] 朱音洁[1] 张永钢[2] 郭 咏[2]
（1、国网上海市电力公司经济技术研究院，上海 200002；2、江苏伊卡洛斯智能科技有限公司，南通 226001）

摘 要 为了解决多层级多阶段基建工程动态预警产生频繁漏报的问题，本研究提出一种多模态数据架构下的多层级多阶段基建工程动态预警方法。首先设置异构数值参数矩阵，将多层级多阶段的数据处理为多模态数据架构，并使用该结构分类层对多模态数据进行层级序列标注，表征基建工程测点数据。在每个层级中分别设置更新指标，对应不同的指标信度给出不同的支持程度，在更新过程中形成一个反馈机制，构建多层级多阶段自更新方法。为了控制外部环境触发预警条件，监测各个测点的进度偏差率，对应不同数值设置预警触发条件，最终完成对基建工程的动态预警。测试结果表明：搭建预警测试平台后，能够处理挠度值在−100～−80 cm的基建工程数据，预警漏报率最大值为1.42%，预警效果较优。

关键词 多模态数据架构，多层级，多阶段，基建工程，触发条件，漏报率
中图分类号：TU714；U456.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0021

Multi-Level and Multi-Stage Dynamic Early Warning Method for Infrastructure Engineering Under Multimodal Data Architecture

ZHOU Liang[1,*] ZHU Yinjie[1] ZHANG Yonggang[2] GUO Yong[2]
（1.State Grid Shanghai Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Shanghai 200002, China;
2.Jiangsu Icarus Intelligent Technology Co.,LTD, Nantong 226001, China）

Abstract To address the frequent missed detection issues in dynamic early warning systems for multi-level and multi-phase infrastructure projects, a multimodal data architecture-based dynamic early warning method was proposed. Heterogeneous numerical parameter matrices were established to process multi-level and multi-phase data into a multimodal data architecture. Hierarchical sequence labeling of multimodal data was implemented using the structural classification layer of this architecture, thereby characterizing the monitoring point data of infrastructure projects. Update indicators were configured at each hierarchical level, with varying support degrees assigned according to different indicator credibility levels. A feedback mechanism was formed during the updating process, constructing a self-updating methodology for multi-level and multi-phase systems. To control the triggering of warning conditions by external environmental factors, the progress deviation rate of each monitoring point was tracked. Early warning triggering conditions were set based on quantified thresholds, ultimately achieving dynamic warning for infrastructure projects. The test results show that after the construction of the early-warning test platform, it can process the infrastructure engineering data with deflection value of −100 cm to −80 cm, and the maximum rate of early-warning omission is 1.42%, indicating that the early-warning effect is better.

收稿日期：2024-11-17
基金项目：国家电网公司总部科技项目资助（5700-202317609A-3-2-ZN）
[*] **联系作者**：周 亮（1980-），男，汉，浙江镇海人，硕士研究生，高级工程师，主要从事电网工程数字孪生、数字化设计及应用。E-mail：ompanEco@163.com

Keywords　multimodal data architecture, multi-level, multi stage, infrastructure engineering, trigger conditions, underreporting rate

0　引　言

在当今信息化、数字化的时代背景下，基建工程作为国家经济发展的重要支柱，其安全性、稳定性和高效性显得尤为重要[1-2]。大型基建工程通常具有规模庞大、结构复杂、建设周期长的显著特点，涉及项目整体、标段、关键节点等多个层级以及规划、设计、施工、运维等多个建设阶段，这种多层级多阶段的特性使得工程风险呈现动态演化和跨阶段传递的特征。因此，构建一套能够有效整合全过程数据的工程动态预警系统，对于及早识别潜在风险、预防重大事故、保障工程顺利推进具有迫切的现实意义[3-4]。

对此，研究者们进行了积极探索。文献[5]监测了工程地压的各项数据，将多因素、多源数据进行融合处理，并根据融合数据表现出的耦合关系作为工程稳定结构，将不符耦合关系的数据作为预警数据，建立突变失稳模型。但该方法在实际的融合处理中缺乏统一的多模态架构支撑，容易被数据稀疏点干扰，构建的失稳模型无法准确反映工程实际状态，预警结果出现偏差。文献[6]采用云技术与物联网集成的方式，输出工程施工的进度预警指标，将进度监控与预警架构关联处理。该架构依赖固定缓冲区处理工序数据，在复杂施工环境下难以适应多阶段演进特征，进度监控指标与实际施工状态脱节，削弱了预警效果。文献[7]根据工程结构的自振频率，采用双驱动的模式在健康与危险模态之间建立非线性主成分分析过程以完成预警。但在进行时域参数归一化处理时，缺失容许性控制机制，造成预警参数与工程实际指标难以匹配。文献[8]利用多输出的预测方法关注工程各个结构的测点，并在预警驱动和测点数据间建立映射关系，使用结构分析法建立预警监测结构。但在建立变形服役性态映射关系时，因无法根据环境动态响应，变形因子更新滞后于现场变化，致使预警系统出现漏报。

为了解决上述预警方法应用在多层级多阶段基建工程中容易产生预警偏差漏报问题，进一步提升预警效果，本文研究了多模态数据架构下的多层级多阶段基建工程动态预警方法。

1　多模态数据架构下的多层级多阶段基建工程动态预警方法

1.1　基于多模态数据架构表征测点数据

多模态数据是多源异构数据的集合，即不同来源、不同类型的数据通过不同的编码方法和模型进行融合，产生一个新的模态。多模态数据架构是基于多模态数据融合和多模态分析技术构建而成，其核心思想是通过对不同来源、不同类型的数据进行编码、转换、融合及处理[9]，所以在表征工程测点数据时，将传统的基建工程监测手段与机器学习相结合，实现对数据的高效处理和深度挖掘，以海量多源异构数据为基础，设置异构数值参数矩阵，可表示为：

$$K=\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：K表示设置的异构数值参矩阵；f_x、f_y分别表示不同水平方向挖掘得到的工程稀疏点；c_x、c_y分别表示不同水平方向的工程融合数据。

由矩阵输出的数据可知，该部分多源异构数据存在无序序列，所以在使用多模态数据架构时，将其内部的架构结构作为分类层，使用该结构分类层对多模态数据进行层级序列标注，具体实现方式：首先，通过设置异构数值参数矩阵，将来自不同传感器（如应力计、位移监测设备）的多源异构工程数据（包括时间序列、测点编号和物理参数）进行初步编码和转换。该矩阵充当分类层的底层结构，处理无序序列数据，生成一个统一的多模态数据架构。然后，分类层利用该架构的内在逻辑对数据进行层级序列标注。按照监测日期和测点编号，对数据进行时序和空间维度的序列划分，即在架构内部构建一个标签序列：每个数据点根据其所属层级和阶段（如规划、施工、运维）被打上标签，形成层级化序列标注。

按照多模态数据的监测日期、测点编号在架

构内生成一组新的模态，融合处理示意图如图1所示。

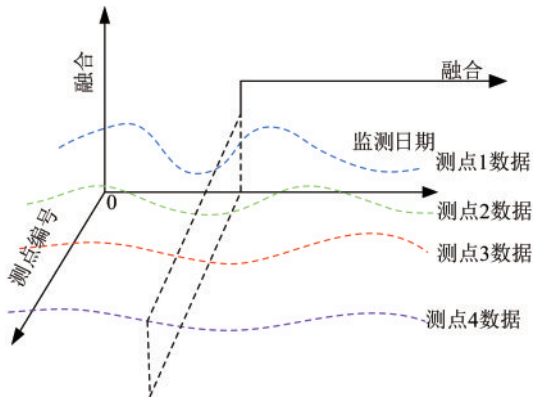


图1 测点多模态数据融合架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-mode data fusion architecture

在图1所示的数据架构上，多模态数据在融合过程中，将各传感器采集到的多源异构数据进行融合处理，生成一组新的模态。多模态数据融合的时序同步策略如下：所有传感器数据以监测日期为唯一时间戳，统一时间基准监测日期和测点编号，进行时序划分。针对采样不一致的情况，固定窗口重采样采用30 min滑动时间窗口，包括6个连续采集周期。尺度归一化将应力数据量纲和位移数据量纲转换为同一单位。融合对齐策略如下：对每个数据点根据所属层级（宏观/中观/微观）和阶段（规划/施工/运维）打标签，标签作为融合权重分配依据。当同一测点不同传感器数据标签冲突时，按施工阶段优先级对齐。

对比融合后的模态与触发阈值，超出阈值的模态即为基础工程施工过程中存在的不稳定状态或安全隐患。按照架构所标记的层级，构建多层级多阶段自更新方法。

1.2 构建多层级多阶段自更新方法

使用上述表征的基建工程测点数据，并根据基建工程施工现场实际情况，将数据分为不同层级，并在每个层级中分别设置更新指标[10-11]。通过多层级多阶段自更新方法有效处理层级化序列标注中层级间的约束关系。将分类层生成的层级序列数据输入到自更新方法中，每个层级独立设置更新指标。这些指标通过信度函数量化支持度，形成层级间的约束关系。明确基建工程预警的多层级结构包括宏观层面、中观层面和微观层面。以施工不同阶段为更新周期，在施工前期，对工程灾害风险进行规则处理，设置的风险指标为“峰值加速度”，按照概率分配的原理将峰值加速度与风险指标之间相匹配，形成一个完整的层级间的约束关系。设定的加速值的层级约束条件可表示为

$$\begin{cases} 0 \leqslant m(A) \leqslant 1 \\ m(\Phi)=0 \\ \sum\limits_{A \subseteq \Phi} m(A)=1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：$m(A)$表示层级结构内的风险分配支持度函数；Φ表示支持度；A表示层级结构中的任意一个子集。

在该控制条件下，将数据更新动作设定为定期收集项目相关的各种数据，如基建成本、工程进度、材料质量、工程安全等[12]。在施工中期，主要对施工风险进行更新，设置的更新指标为“施工动峰值加速度”和“工程调整动时程”。为了确保实际更新数据基础始终准确可靠，输出施工中期的指标信度数值。指标信度定义为层级结构内风险分配的支持程度量化值，用于衡量特定更新指标在预警系统中的可信水平。指标信度的评估依据为多层级多阶段自更新框架的数据质量，而非历史准确性或专家经验，这确保了评估过程的客观性和可重复性。传感器采集的多源异构数据质量通过多模态架构的预处理进行优化，将无序序列转化为层级序列标注，消除了噪声干扰，从而为信度计算提供可靠输入。基于概率分配理论，计算指标信度数值：

$$Bel(A)=\sum_{B \subseteq A} m(B) \tag{3}$$

式中：$Bel(A)$表示层级结构的信度函数；B表示冲突参数；$m(B)$表示施工过程冲突指标参数B的支持度函数。

在实现模型更新时，以基建项目的实际情况和历史数据对更新模型进行调整和优化，以提高更新的准确性和效率[13]。在施工后期，设置的更新指标为“基建动时程”和“动峰值加速度”。针对每个层级中的具体情况设置更新阈值，按照冲动系数的融合效果，对应不同的信度给出不同的支持程度，在更新过程中形成一个反馈机制，融合反馈机制过程如图2所示。

图2中n表示信度层级。按照图2所示的机

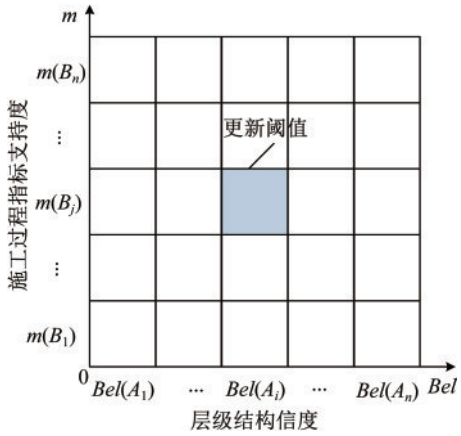


图2　融合反馈机制

Fig.2　Fusion feedback mechanism

制结构，第i个层级结构通过收集和分析更新后的反馈信息，评估第j个更新的支持度。根据反馈结果对多层级多阶段的测点工程数据进行持续改进，最后，对各个层级的数据进行监测，及时进行修正。这样，更新基建数据就能不断适应项目的变化和发展，实现一个自更新的过程。对应不同阶段和不同施工层级设置预警触发条件，最终实现自更新过程。

自更新反馈机制的核心目标是使模型动态适应工程环境变化，同时避免被噪声或短期波动误导。该机制通过多层级多阶段架构和信度评估策略实现这一平衡。机制利用信度函数量化更新指标的支持度。在反馈循环中，每个层级（如宏观、中观、微观）独立设置更新指标（如施工前期的“峰值加速度”、中期的“施工动峰值加速度”），并基于冲突参数计算信度值。信度值反映数据一致性和风险可信水平。只有信度值达到预设阈值时，更新操作才被触发，这确保了机制对实际工程变化快速响应，而忽略随机噪声或短期干扰。该机制根据不同建设阶段（启动、实施、收尾）的风险容忍度和环境动态性，更新指标更频繁地评估信度，并设置较低的信度阈值以加速适应新变化；在稳定阶段，则采用较高信度阈值和保守更新频率，抑制对短期波动的反应，动态调整更新权重，确保机制既敏捷又稳健。

该机制中的风险分配函数受严格规则约束，所有子集支持度总和归一化为1。这一设计防止支持度评估因噪声影响而任意漂移，确保更新决策稳定可靠。机制隐含遗忘机制，通过冲突参数动态重置数据权重。在反馈过程中，冲突参数分析不仅评估当前数据可信度，还间接标记旧或不相关数据（如过时风险指标）。当工程进入新阶段被高信度验证时，系统自动降低旧冲突参数的支持度权重，实现焦点向当前环境迁移。这避免了历史数据积累导致的模型过度反应，同时确保短期波动不被错误记忆。

1.3　设置预警触发条件

在上述多层级多阶段的基建工程结构下，将测点数据实现自更新后，对应设定多阶段预警机制。在处理基建工程预警的过程中，设置合适的预警触发条件是至关重要的一环。这包括项目启动阶段、实施阶段和收尾阶段。在项目启动阶段，主要进行风险评估和预警系统的初步搭建，针对每个预警指标，设定具体的触发条件[14]。针对基建工程初期存在的隐患，针对工程进度项目设定“工程进度滞后超过10%”为触发条件。对于工程材料项目，可以设定“连续三次抽检合格率低于90%”为触发条件。这些触发条件应当既不过于宽松，导致预警系统频繁误报，也不过于严格，导致重要风险被忽视。将工程进度与工程原材料作为预警条件，将进度滞后超过10%与抽检合格率低于90%中的数值作为对应的预警阈值，将预警条件对应表征的测点。通过多层级自更新方法间接补偿静态阈值应对不同项目类型、不同阶段的风险容忍度差异。虽然阈值固定，但数据层持续更新，并根据更新指标的信度支持度形成反馈循环，使预警更贴合实际风险水平。这种设计在保持阈值静态的前提下，通过数据层动态优化，应对了不同阶段的风险变化。为了消除外部环境对预警产生的干扰，监测各个测点的进度偏差率，数值关系可表示为

$$\lambda_i = \frac{\Delta d_i}{T_i} \times \frac{\sum \Delta t_i}{PB} \tag{4}$$

式中：λ_i表示进度偏差率；PB表示基建工程汇入缓冲；Δt_i表示工程当前工期；Δd_i表示监测测点当前进度偏差累计值；T_i表示监测项目的进度工期。

按照上述的数值关系，当λ_i数值大于0时，将设置好的预警触发条件嵌入基建工程的预警系统，能够实时监控各测点指标，并在达到触发条件时自动发出预警。当λ_i数值小于0时，预警反馈实时监测项目状态，自动分析数据并识别潜在风险。通过对250 h基建工程历史监测数据进行Pareto极值分析，取跨中挠度监测值的统计极值

作为基准。分析显示当λ_i数值突破零值界限时，对应工程结构失稳概率显著上升至85%以上，此现象在10组统计节点数据中均呈现稳定规律，因此采用该阈值设定。

此时，形成的动态预警过程如图3所示。

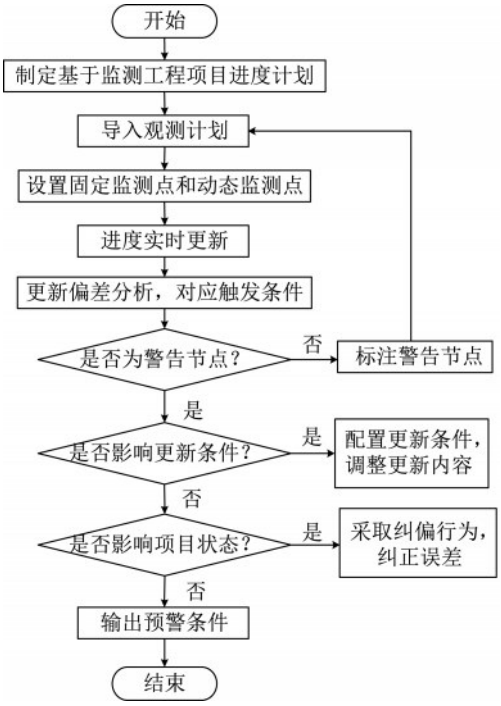


图3 动态预警过程

Fig.3 Dynamic early warning process

按照上图的动态预警流程，在预警收尾阶段对预警系统进行总结和反馈，为下一个层级提供预警参考[15]。基于上述处理最终完成动态预警。

2 实例测试

本次实例测试依托某大型城市地下交通隧道工程项目实施，该工程位于城市中心区，总长度为5.2 km，最大埋深为35 m，涉及盾构施工、支护结构安装及应力平衡调控等多个关键阶段；工程规模要求严格，选用防水等级IP66、额定抗压110 MPa的空芯包体应力计，通过孔壁应变法实时监测土层应力变化，覆盖施工全周期250 h，在工程支柱结构、人为支撑点及地基薄弱区共布设20个三维应力测点。多层级多阶段的基建工程会产生多种类型的施工场，这就使得施工开采破坏原有的土层应力平衡，地基结构和安全保障位置结构产生新的应力分布，基建工程的应力主要分布在支柱或是人为支撑结构中，所以在搭建基建工程的测试环境时，需进行地压监测。结合基建工程的规模要求，应力检测仪器选用空芯包体应力计，并根据应力计输出的数值，采用孔壁应变法计算得到工程的三维应力数值，确定得到基建工程的测量点。按照多层级的需求，采用三维应力计的参数如表1所示。

表1 三维应力计参数

Table 1 Parameters of three-dimensional stress meter

参数序号	参数名称	参数详情
CX-01	防水等级	IP66
CX-02	额定抗压	110 MPa
CX-03	防水工作电压	DC8.0V
CX-04	采集频率	≥5 min
CX-05	主应力测量范围	0~40 MPa
CX-06	测温分辨率	0.062 5 ℃
CX-07	综合误差	≤1.5%F.S

使用上表参数的应力计，确定基建工程的测量点，判断工程结构是否存在失稳情况。判断结束后，将失稳数据处理为变形观测序列，处理过程可表示为

$$d(i)=\frac{\sum_{t=1}^{T}d_i(t)}{Td_s(i)^3} \tag{5}$$

式中：$d(i)$表示输出的变形观测序列；T表示工程结构观测周期；$d_s(i)$表示工程数据的偏度数值；$d_i(t)$表示基建工程的波动频率。

根据工程数据的偏度数值，在基建工程结构内标记测点，标记的20个测点分布如图4所示。

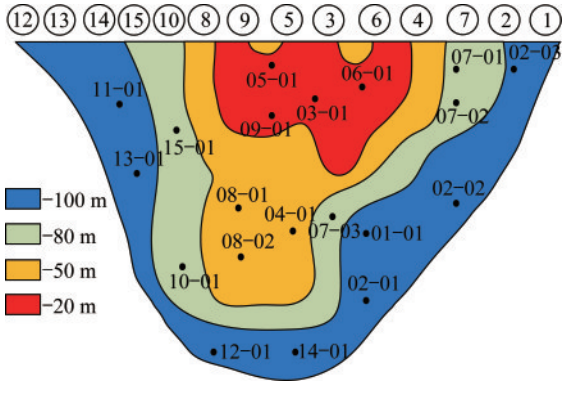


图4 标记的工程测点分布

Fig.4 Distribution of engineering survey points marked

整理图4测点所对应的数据，定义以地面为数值0，负数值则是预处理后，采用Pareto极值分析，取跨中挠度的监测值作为基准，使用邻近深度的工程数据不断与其进行比对，确定得到黄色预

警阈值的基准值，并使用MATLAB平台输出超出黄色预警阈值的超出量，将该部分超出量作为测试数据。选用工程地质灾害的预警方法、基于双驱动智能架构的预警方法以及所设计的预警方法参与测试。

层级序列标注/分类层的具体实现模型为双向长短期记忆网络模型。分类层特征向量由监测日期、测点编号及应力值、位移量等物理参数构成。每个数据点的特征维度固定为5维，包含时间戳、空间标识及三个物理参数值。依据监测采集频率，序列标注采用滑动窗口处理，窗口大小设置为6个连续采集周期，即30 min的时间跨度，以确保数据连续性。空间窗口则按测点编号分组，每组覆盖同一支护结构或工程区域的相邻测点。

采用基于时序的线性插值法处理缺测数据：若单个窗口内缺失数据点数量不超过窗口大小的20%，则利用该窗口内前后有效数据的平均值进行填充。在30 min时间窗口内，若缺失数据点超过6个，则该窗口数据标记为无效，不参与标注训练。

训练过程采用有监督学习，训练数据来源于250 h监测期内48个测点采集的时序数据，总计超过23 000条有效记录。标签根据工程层级和建设阶段人工标注。训练时，将70%数据用于模型训练，30%用于测试。训练迭代次数设置为1 000次，学习率为0.001，使用梯度下降法优化损失函数。训练完成后，模型可对输入的多模态数据自动输出对应的层级和阶段标签，形成层级序列标注。

本文设计的自更新与反馈机制的阈值设定依据如下：信度阈值采用历史极值统计确定。通过分析250 h历史监测数据的分布特征，当进度偏差率突破零值界限时，工程失稳概率达85%以上，据此将信度阈值固定为0.85。

滞回防抖设定冲突参数动态重置机制依据如下：当新阶段信度≥0.85时，旧阶段参数支持度权重自动衰减50%，减少历史数据干扰。

设置基建工程多模态数据更新频率：施工前期，峰值加速度指标数据每24 h更新；施工中期，动峰值加速度等双指标数据每12 h更新；施工后期，动时程等复合指标数据每8 h更新。更新频次与阶段风险容忍度负相关，后期风险敏感度更高。

设置基建工程施工进度稳定性控制依据：信度累加特性使支持度随数据量增加趋稳。连续5次更新后，信度标准差从初始0.15降至0.02。

该自适应策略可以将外部环境变化反映为冲突参数增量，因此具有环境鲁棒性，证据如下：20个测点覆盖工程支柱与薄弱区，进度偏差率零值阈值在10组异形结构数据中均保持85%失稳概率，符合要求，具有鲁棒性。

综合250 h的预警数据，利用参与测试的预警方法对其进行预警处理，将黄色预警数据作为预警标准，选用工程地质灾害的预警方法为对比方法1（文献[5]），基于双驱动智能架构的预警方法为对比方法2（文献[7]），而所设计的预警方法为方法3。将三种预警方法输出数据的预警挠度范围作为对比指标，整理三种预警方法的鲁棒适应性，对比结果如图5所示。

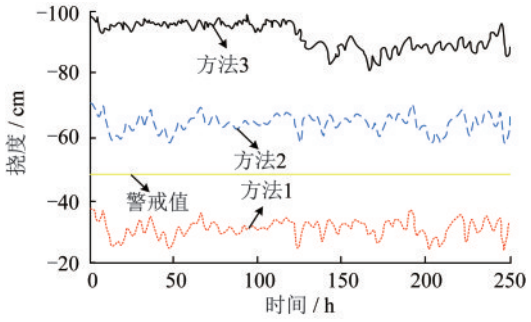


图5　输出的预警挠度范围

Fig.5　Output warning deflection range

根据图5输出的结果，黄色预警数据基本集中在挠度为-50 cm左右。在处理相同的预警数据集时，预警方法1能够输出挠度为-30 cm的数据，无法顺利输出需要预警的各个挠度的基建工程数据，实际的预警范围较小，对于大挠度的基建工程并不适用。方法2能够顺利输出需要预警的黄色预警数据，并且能够处理挠度数值为-60 cm的基建数据，实际的预警范围较窄。而方法3不仅能够顺利输出目标黄色预警数据，还能够处理挠度值在-100~-80 cm的基建工程数据，预警处理的范围最广，实际的预警适用性最佳。由上述结果可知，在鲁棒性方面，本文方法相比基线方法的提升幅度达到40 cm以上。该方法的容许挠度限值和黄色预警阈值满足《地下工程防水技术规范》（GB 50108）最高防护标准和《工程结构可靠性设计统一标准》（GB 50153）安全储备要求规定的传感器量程/误差与结构安全限值。

将处理的各项数据定义为预警指标数据，按照处理指标数据的加权调和的均值来定义预警产

生的漏报，数值关系可表示为

$$F=\frac{(\delta^2+1)PR}{\delta^2(P+R)} \tag{6}$$

式中：δ表示基建工程数据的加权调和参数；P表示所有挠度的工程数据；R表示设置的黄色预警数据。

将上述数值比值作为预警效果，比值越大则表示预警出的数据最多，预警过程中产生的漏报也就越少，整理250 h基建工程的数据，并每隔25 h作为一个预警漏报节点，整理三种预警方法的漏报，数值结果如表2所示。

表2 三种预警方法的漏报率

Table 2 Missing rates of three early warning methods

漏报统计节点	预警方法名称		
	方法1/%	方法2/%	方法3/%
LBJD-01	4.43	2.59	0.96
LBJD-02	4.58	3.47	0.55
LBJD-03	4.55	3.14	1.42
LBJD-04	4.23	3.14	0.56
LBJD-05	4.49	2.54	1.03
LBJD-06	4.16	3.12	0.56
LBJD-07	4.69	2.66	0.79
LBJD-08	4.84	3.87	1.17
LBJD-09	4.22	3.29	0.92
LBJD-10	4.56	3.34	0.98

按照上述定义的漏报数值结果，对应不同预警方法实际输出的预警数值量，计算预警漏报率。结合表2统计的预警漏报率结果可知，选取相同的统计节点后，方法1在处理相同数量的数据时，预警漏报率在4.48%左右，预警漏报的数据量较大。方法2在预警相同数量的基建工程时，预警漏报率数值在3.12%左右，预警漏报的数据较少。而方法3输出的预警漏报率最大值为1.42%，与上述两种采用单一模态简单融合的预警方法相比，本文采用的多模态预警方法的预警漏报数据量最小，预警效果最佳。

基于20个测点生成的23 000条有效记录构建四分类混淆矩阵，矩阵维度严格遵循国际标准组织ISO 5725-3规范，定义真正例为挠度<−50 cm且被正确预警的样本，假负例为满足预警条件但未被系统捕获的漏报样本；250 h监测周期内每25 h划分一个验证节点，10个独立节点共执行30组配对样本检验，采用相同节点相同时段漏报数值的双尾t检验，检验水准α=0.05，检验统计量计算中纳入样本量权重因子：节点最小样本量3 450条，最大样本量3 912条；加权调和参数δ取值依据监测节点重要性分级设定，主支撑区δ=1.25，过渡区δ=0.75，薄弱区δ=0.50，其数值权重分配通过3 000次蒙特卡洛仿真确定；最终漏报率计算结果经方差膨胀因子校正，10组节点数据p值均小于0.001，证实方法3与两种对比方法的漏报差异具有高度统计显著性。

3 结 语

本研究通过多模态数据架构、信度驱动自更新机制以及进度偏差率动态触发方法，建立了多层级多阶段基建工程动态预警方法，其核心创新在于利用异构数值参数矩阵实现测点数据的多模态融合，解决了传统方法因数据扰动导致的表征失真问题。实验结果表明该方法降低了预警漏报率，在复杂工程环境中具有可靠性。该方法的应用对城市地下空间开发具有直接指导意义，也可应用于桥梁、大坝等全生命周期工程健康监测。现有实例仅覆盖单一隧道工程类型，未来研究将在异形结构工程中验证架构普适性。

参 考 文 献

[1] 崔双双，吴限，王宏志，等. 面向云边端协同的多模态数据建模技术及其应用[J]. 软件学报，2024，35(3)：1154-1172.
Cui Shuangshuang, Wu Xian, Wang Hongzhi, et al. Multimodal data modeling technology and its application for cloud-edge-device collaboration [J]. Journal of Software, 2024, 35 (3): 1154-1172. (in Chinese)

[2] 宋清蔚，朱万成，徐晓冬，等. 岩石破坏过程实时监测预警软件系统——搭建与初步应用[J]. 金属矿山，2022(10)：155-164.
Song Qingwei, Zhu Wancheng, Xu Xiaodong, et al. Real time monitoring and early warning software system for rock failure process——build up and preliminary application [J]. Metal Mine, 2022 (10): 155-164. (in Chinese)

[3] 朱武，张勤，朱建军，等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发[J]. 岩土工程学报，2022，44(7)：1341-1350.
Zhu Wu, Zhang Qin, Zhu Jianjun, et al. Real-time

monitoring and early warning technology for huge landslides [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1341-1350.(in Chinese)

[4] 周立.基于云贝叶斯网络盾构下穿铁路近接施工安全风险动态评价[J].工业建筑, 2023, 53(11): 226-233.
Zhou Li. Dynamic evaluation of construction safety risk for approaching excavation near connection of shield tunnel undercrossing high-speed railway under shield based on cloud bayesian network [J]. Industrial Construction, 2023, 53(11): 226-233.(in Chinese)

[5] 覃事河,段斌,周相,等.水电工程地质灾害实时监测预警系统设计及应用[J].人民长江, 2023, 54(10): 105-112.
Qin Shihe, Duan Bin, Zhou Xiang, et al. Designing of real-time monitoring and early-warning system of geological hazards for hydropower engineering [J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 105-112.(in Chinese)

[6] Cusson D, Rossi C, Ozkan I F. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(1): 189-204.

[7] 陈结,杜俊生,蒲源源,等.冲击地压"双驱动"智能预警架构与工程应用[J].煤炭学报, 2022, 47(2): 791-806.
Chen Jie, Du Junsheng, Pu Yuanyuan, et al. "Dual-driven" intelligent pre-warning framework of the coal burst disaster in coal mine and its engineering application[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 791-806.(in Chinese)

[8] Ghahari S F, Baltay A, Celebi M, et al. Earthquake early warning for estimating floor shaking levels of tall buildings [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2022, 112(2): 820-849.

[9] 曾韬睿,邬礼扬,金必晶,等.基于stacking集成策略和SBAS-InSAR的滑坡动态易发性制图[J].岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2266-2282.
Zeng Taorui, Wu Liyang, Jin Bijing, et al. Landslide dynamic susceptibility mapping based on stacking ensemble strategy and SBAS-InSAR [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2266-2282.(in Chinese)

[10] 费汉强,马增,潘懿,等.基于实时动态全球定位测量的边坡监测预警研究[J].矿业研究与开发, 2023, 43(7): 54-59.
Fei Hanqiang, Ma Zeng, Pan Yi, et al. Study on slope monitoring and early warning based on real-time dynamic global positioning measurement [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 54-59.(in Chinese)

[11] 田会静,秦亮,王天祥,等.打桩船沉桩施工定位与碰撞预警实时监控系统开发与实现[J].水运工程, 2023(S2): 129-133.
Tian Huijing, Qin Liang, Wang Tianxiang, et al. Development and implementation of real-time monitoring system for pile sinking construction positioning and collision early warning of pile driving barge [J]. Port & Waterway Engineering, 2023(S2): 129-133.(in Chinese)

[12] 陈结,刘博,朱超,等.基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究[J].煤炭科学技术, 2023, 51(2): 116-129.
Chen Jie, Liu Bo, Zhu Chao, et al. Early-warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 116-129.(in Chinese)

[13] 李名川,李邵军,肖亚勋,等.深部地下实验室扩挖岩爆监测与动态防控技术研究[J].工程地质学报, 2022, 30(3): 751-759.
Li Mingchuan, Li Shaojun, Xiao Yaxun, et al. Rockburst monitoring and dynamic prevention of enlarging excavation in deep underground laboratory [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 751-759.(in Chinese)

[14] 李冬雪,朱冀涛,刘岩,等.新一代基建工地安全智能管控平台设计与规划[J].中国测试, 2022, 48(S2): 133-138.
Li Dongxue, Zhu Jitao, Liu Yan, et al. Design and planning of a new generation of safety intelligent control platform for electric power construction site[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(S2): 133-138.(in Chinese)

[15] 段晓晨,孟春成,吴曼茜,等.地铁车站土建工程施工进度三维动态优化控制[J].地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1678-1688.
Duan Xiaochen, Meng Chuncheng, Wu Manxi, et al. 3D dynamic optimal control of civil engineering construction schedule of metro station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(5): 1678-1688.(in Chinese)