

基于多源信息融合的天然气管道智能巡护体系构建

李向东

国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司 山西 吕梁 033699

摘要：天然气长输管道作为国家能源战略基础设施，其安全运行面临第三方施工、地质灾害、腐蚀泄漏等多重威胁，传统人工巡护模式在覆盖频率、响应时效和智能研判方面已难以满足日益增长的管廊安全需求。本文立足多源信息融合理论，系统分析了管道巡护中卫星遥感、无人机航拍、光纤传感、地面物联网节点及人工巡查等多模态数据的互补特性，提出了一种面向管道全生命周期的智能巡护体系架构。该体系以信息融合层次模型为牵引，构建包含感知采集、特征对齐、态势生成与决策应用的四层功能结构，重点阐述了时空配准、证据推理、动态贝叶斯网络等融合方法在异常识别与风险预警中的适用逻辑。研究表明，多源信息融合能够有效弥补单一监测手段的局限，通过数据驱动与知识引导的结合显著提升管道巡护的全局感知能力和智能决策水平，为油气管道运维数字化转型提供理论参考。

关键词：天然气管道；多源信息融合；智能巡护；态势感知

引言

天然气管道是连接资源产地与消费市场的“能源动脉”，其总里程已突破数十万公里，且随着管网密度增加和周边环境复杂化，管壁减薄、地基沉降、机械破坏等风险事件呈上升趋势。目前，国内管道企业普遍采用人工徒步巡查为主、固定传感器为辅的运维模式，该模式在人员配置、巡检周期和恶劣天气适应性方面存在明显短板，尤其对于偏远管段和地质灾害高发区，人工可达性差、信息回传滞后，往往导致险情发现不及时、处置方案缺乏数据支撑。近年来，遥感卫星、无人机、分布式光纤、地面振动传感器等监测手段快速普及，单一管道可获取的数据种类和数量呈指数增长。然而，这些数据源在时空分辨率、物理含义、置信度和采集成本上差异巨大，若仅孤立使用，不仅造成信息冗余，还可能因各源误报率不同而相互干扰。因此，亟需构建一套能够有机整合多源异构数据的智能巡护体系，将原始观测转化为可操作的运维决策信息。信息融合理论自 20 世纪 80 年代在军事指挥领域提出以来，已逐步拓展至工业监测、交通管控和灾害预警等领域，其核心思想在于通过多层次、多维度的数据关联与推理，获得比任何单一信源更准确、更稳定的态势估计。本文旨在将该理论系统性地应用于天然气管道巡护场景，从架构设计、融合方法和保障机制三个层面提出完整的体系构建方案，以期为管道企业的智能化升级提供框架性指导。

1 天然气管道巡护现状与需求分析

1.1 巡护任务与外部威胁特征

天然气管道巡护的根本任务是及时发现并排除影响管道本体和附属设施安全的各种隐患。按照威胁来源，可将外部风险归纳为三类：其一是人为活动类，包括管道沿线第三方施工（如挖掘、钻探）、违章占压、恐怖破坏等；其二是自然环境类，如滑坡、洪水冲蚀、冻胀融沉、雷电感应等；其三是本体劣化类，包括防腐层破损、焊缝开裂、应力腐蚀等缓慢演变过程。这些威胁在时间上既有突发性也有渐变性，空间上既有集中点状也有大范围带状分布，要求巡护系统具备高频次、全覆盖和快速响应能力。

1.2 现有巡护方式的局限性

当前主流巡护方式可归为三类：人工徒步巡护、车载巡护和固定站点监测。人工巡护虽具备灵活判断优势，但受人员数量、体力和天气限制，通常每周仅能覆盖重点管段一次，且巡护记录多为纸质或简单电子表格，信息结构化程度低。车载巡护效率较高，但受道路条件约束，难以到达山地、沼泽等复杂地形。固定传感器（如压力变送器、温度探头）仅能反映管道运行参数，对外部环境变化几乎无感知能力。近年推广的无人机巡护改善了视野和速度，但其图像判读依赖人工审核，且飞行受空域管制和续航制约^[1]。总体而言，各巡护手段之间数据割裂，缺乏统一的信息汇聚与分析平台，导致“数据多、知识少”的困境。

1.3 智能化转型的核心需求

基于上述分析，管道巡护的智能化转型需满足四项核心需求：第一，感知全覆盖，即能对管道本体、附属

设施及周边环境进行全天候、多尺度的协同观测；第二，信息实时性，从数据获取到预警输出的延迟应控制在分钟级以内，以应对突发风险；第三，研判准确性，需将各源误报率和漏报率纳入综合推理，通过交叉验证降低虚警；第四，决策可解释性，输出的预警结果应附带置信度和证据链，便于运维人员快速核实。这些需求单靠增加传感器数量无法解决，必须引入系统性的信息融合理论来设计数据流转与知识生成流程。

2 多源信息融合的理论与技术基础

2.1 信息融合的层次模型

信息融合领域经典的 JDL (Joint Directorsof Laboratories) 模型将融合过程划分为信号级、特征级、决策级和态势评估等层次。在管道巡护场景中，信号级融合适用于同类型传感器（如多个振动光纤信号）的时域同步叠加，以提高信噪比；特征级融合则针对不同传感器提取的几何、频谱或纹理特征进行组合，例如将卫星雷达形变特征与无人机影像的边缘特征共同输入分类器；决策级融合是对各独立判读结果进行综合裁决，如采用 Dempster-Shafer 证据理论对“是否发生第三方施工”这一命题分别赋予可信度，再合成最终判断。本文构建的体系以特征级和决策级融合为主体，因为巡护涉及异质数据源，其物理量纲和采样机理差异过大，不宜过早进行信号级混合。

2.2 多源异构数据的特性分析

管道巡护涉及的数据源包括：（1）光学遥感卫星影像，提供大范围地表覆盖变化，空间分辨率米级至亚米级，重访周期数天；（2）合成孔径雷达（SAR）影像，用于地表形变反演，精度可达毫米级，但受植被覆盖影响较大；（3）无人机可见光/红外视频，获取局部高清细节和热异常信息，时空分辨率高但覆盖范围有限；（4）分布式光纤传感，沿管道连续测量振动和温度，采样频率可达千赫兹，但空间定位误差约数十米；（5）地面无线传感器网络，采集土壤含水率、倾斜角、气体浓度等点状参数；（6）人工巡护记录，包含图像、文本和语音等非结构化信息。上述数据在坐标系、时间戳、精度和可靠性方面均不一致，融合前必须进行严格的时空对齐和质量标定^[2]。

2.3 关键融合方法及其适用性

针对管道巡护中的不同子任务，可选用差异化的融合策略。对于连续型状态估计（如管段应力变化），卡尔曼滤波及其扩展形式能够有效融合多源时序观测，通过预测-更新机制递推最优估计值，且计算量较低，适合

边缘端部署。对于离散事件检测（如挖掘机侵入），由于各传感器提供的证据具有不确定性，D-S 证据理论可通过基本概率分配函数表达不同源的可信度，并利用合成规则化解冲突，特别适用于“有/无威胁”的二值或多值分类。对于复杂态势的综合评估，动态贝叶斯网络能够刻画风险因素之间的因果依赖关系，并随时间更新概率分布，从而输出管段整体风险等级。此外，深度学习中的多模态融合网络（如跨模态注意力机制）可用于自动提取高维特征之间的潜在关联，但其可解释性有待增强，需与知识图谱互补使用。

3 智能巡护体系总体架构设计

3.1 设计原则与目标

体系设计遵循四项原则：一是开放兼容，能够接入现有及未来的各类传感器和业务系统；二是分层解耦，各功能模块独立演进，降低升级成本；三是实时优先，关键预警链路时延不超过规定阈值；四是人机协同，自动化融合结果需提供人工复核接口，避免完全“黑盒”决策。体系总目标是将分散的巡护数据转化为统一态势图，实现“一张图”展示管道沿线风险分布，并支持按需生成巡护任务工单和应急方案。

3.2 四层功能架构

本文提出感知采集层、数据融合层、分析推理层和应用服务层四层结构。感知采集层负责接入各类传感器和人工录入终端，执行协议解析、原始数据缓存和初步质量校验，剔除明显错误或超出量程的记录。数据融合层承担核心的时空配准、特征提取和异步数据关联工作，将多源数据统一到相同的地理网格和时间基线之上，生成结构化特征向量集^[3]。分析推理层运用第二章所述的融合方法进行事件检测、状态估计和风险评级，输出包含位置、类型、概率和证据链的预警信息。应用服务层面向运维管理人员提供可视化态势界面、告警推送、巡护路径优化和维修决策建议，并支持与地理信息系统和企业资源计划系统对接。

3.3 数据流与信息流设计

体系内部的数据流遵循“自下而上汇聚、自上而下反馈”的双向模式。上行方向，原始数据从各感知节点经加密通道传至边缘网关，在网关处完成轻量级融合（如时间同步和异常滤除），再汇入云端融合中心进行全局推理。下行方向，应用服务层生成的巡护任务指令和参数配置沿反向路径下发至相应传感器或无人机，实现闭环控制。为保证数据一致性，采用统一数据模型定义管道桩号、经纬度、高程和时间四维坐标，所有融合

结果均挂载到该坐标体系上。此外,设置知识库模块存储历史事件特征、融合规则模板和专家经验,供分析推理层动态调用,以提升融合结果的环境适应性。

4 体系核心功能与实现路径

4.1 多源数据预处理与对齐

预处理是实现有效融合的先决条件。首先,对光学和雷达卫星影像进行辐射定标、几何校正和地形校正,消除大气和地形影响;其次,对无人机视频进行帧提取和图像拼接,并使用差分 GPS 辅助定位获得精确外方位元素;然后,对光纤传感信号进行去噪和特征峰值提取,将时域波形转换为事件时间-位置序列。时空对齐采用双重策略:空间上,以管道中心线为基准,建立缓冲区间,将各源观测点投影至沿管道里程的线性坐标;时间上,由于卫星过境和无人机飞行具有周期性,而光纤传感为连续流,故采用异步数据关联方法,对非同步观测赋予时间衰减权重,使融合结果反映当前时刻的最大可能态势。

4.2 融合推理与异常检测机制

在异常检测环节,采用分层递阶融合策略。第一层为特征级融合,对各源提取的变化检测指标(如 NDVI 异常、形变速率突变、振动频谱能量跃升)进行主成分分析和降维,形成综合异常指数。第二层为决策级融合,对每个预设的风险类别(如挖掘、泄漏、滑坡),分别构造证据体,各证据体依据传感器历史性能赋予基础可信度,再使用 D-S 合成规则计算联合可信度^[4]。当联合可信度超过动态阈值时,触发异常告警;若证据冲突严重(如光学图像显示施工而振动信号无反应),则转入冲突化解模块,通过查询知识库中的先验冲突解决策略或请求人工干预,避免误报。

4.3 态势评估与风险预警分级

态势评估侧重于从单点异常上升至区域风险认识。本文设计三级评估体系:第一级为管段级实时状态评分,综合当前融合异常指数和历史退化趋势;第二级为整条管道风险热力图,按里程划分网格,累计各管段的风险贡献并考虑上下游耦合关系(如泄漏后扩散影响);第三级为预测性评估,利用动态贝叶斯网络根据当前观测更新未来时间窗口内风险概率,支持“前瞻性预警”。预警分级采用红橙黄蓝四色,分别对应立即处置、限时复核、加强关注和常规状态,每级预警附带建

议响应措施和预期处置时效。

4.4 决策支持与智能调度

应用服务层中的决策支持模块主要包括巡护任务优化和应急处置辅助两部分。巡护任务优化根据融合态势图动态调整无人机和人工的巡查频率及路线,对高风险管段加密飞行,对低风险管段适当降低频次,以平衡资源消耗与覆盖完整性。应急处置辅助则基于融合证据链生成事件报告草案,并调用历史相似案例的处置方案,供指挥人员参考。此外,体系提供“人机交互融合”接口,允许现场人员补充文字描述或现场照片,这些非结构化信息经自然语言处理和图像识别后反哺融合引擎,形成增量学习闭环。

5 结语

本文针对天然气管道巡护痛点,构建基于多源信息融合的智能巡护体系。以 JDL 层次模型为指导,设计感知采集、数据融合、分析推理与应用服务四层架构,明确时空对齐、证据合成及动态贝叶斯推理等方法在异常检测与风险评估中的应用逻辑。体系推动巡护从“单一数据源判断”转向“多源互补增强”,在不显著增加硬件成本前提下,通过数据关联与智能推理提升覆盖性、及时性与准确性。实际效果依赖数据质量、模型合理性及知识库完备性,需结合具体管道环境调优参数。未来方向包括轻量化融合算法支持边缘计算、小样本下模型泛化能力提升及融合结果可解释性评价。随着物联网、云计算与 AI 发展,该体系有望走向工程落地,支撑管网安全高效运行。

参考文献

- [1] 王涛,张建军,李华.基于多源数据融合的油气管道风险评价方法综述[J].油气储运,2022,41(5):513-520.
- [2] 陈敏,刘洋,赵刚.分布式光纤传感与卫星 InSAR 融合的管道形变监测技术研究[J].石油学报,2023,44(8):1345-1356.
- [3] 孙志强,吴迪,周明.基于 D-S 证据理论的管道第三方破坏预警决策融合模型[J].中国安全科学学报,2021,31(12):98-105.
- [4] 杨晓峰,黄丽萍,郑凯.动态贝叶斯网络在长输管道腐蚀剩余寿命预测中的应用[J].化工机械,2024,51(2):210-218.