

压力管道检验大数据分析与安全预警应用研究

崔 闯

中国特种设备检测研究院 北京 100029

摘 要：压力管道检验工作逐步向数字化方向推进，检验过程产生多类型、大体量业务数据。本文围绕压力管道检验大数据来源、数据治理、技术落地等内容开展研究，梳理当前大数据在压力管道安全预警环节存在的现实问题，探索多源数据融合、边缘感知、数字孪生协同下的安全预警实现路径，提出适配行业现状的应用优化方向，推动压力管道安全管理由事后处置向事前预判转型，为压力管道数字化安全管控提供参考。

关键词：压力管道；检验；大数据分析；安全预警

引言

压力管道分布覆盖工业生产、城市公用设施多个领域，设备数量持续增长，传统依靠人工开展检验、风险研判的模式逐渐显现局限。数字化感知设备、分布式存储、智能分析技术不断落地，检验数据的规模与维度持续扩充，利用大数据手段挖掘检验数据内在关联，搭建安全预警体系成为行业发展主要方向。本文从数据基础、现存短板、落地路径几个层面展开论述，探究大数据分析在压力管道安全预警中的实际应用模式。

1 压力管道检验大数据的来源与构成

压力管道检验大数据覆盖管道从制造投用到报废全周期，数据产生主体包含检验机构、管道使用单位、现场感知设备等多个主体，不同渠道产出的数据类型存在明显区分。管道基础档案类数据包含管道敷设走向、材质参数、敷设环境、附属设备信息，这类数据大多形成于建设阶段，部分老旧管道存在纸质档案数字化转化而来的数据条目，是开展数据分析的底层基础。检验业务类数据来自定期检验、在线检测、无损检测等作业环节，包含现场采集得到的缺陷记录、厚度检测结果、腐蚀相关检测记录，由现场检验终端完成录入，是反映管道本体损伤状态的核心数据源。运行工况类数据来自管道日常运行过程，由现场传感设备持续采集，涵盖介质压力、温度、流量、阴极保护相关参数，该类数据具备时序连续特征，数据生成频次高，数据总量随监测时长持续增加^[1]。环境关联数据包含管道沿线地质条件、周边建构筑物分布、第三方活动相关感知信息，多由无人机巡检、光纤感知设备完成采集，用于判断外部因素对管道运行带来的影响。不同来源的数据在存储格式、

字段定义、更新频率上存在差异，部分数据以结构化表格形式存储，图像、传感信号类数据以非结构化形式保存。多类数据分散存储在不同业务系统内部，各系统之间缺少常态化的数据互通通道。检验业务数据大多在检验作业完成后批量上传，运行感知数据按照秒级或者分钟级持续回传，两类数据的时间维度很难直接对齐。

2 压力管道检验大数据应用的现实基础与现存短板

2.1 大数据技术落地的行业基础

各类数字化硬件的普及，为压力管道检验大数据应用提供硬件支撑。现场检验智能终端得到大范围推广，检验人员在作业现场直接完成信息录入，检测结果可以直接同步上传业务平台，减少纸质记录二次录入带来的信息偏差问题。各类感知终端部署数量持续提升，光纤传感、物联网采集节点布置在管道关键管段，实现工况参数、外部扰动信号的自动采集，不需要完全依靠人工巡检获取状态信息。存储与算力基础设施建设持续推进，云存储、分布式计算架构逐步引入特种设备检验业务领域，能够承接检验业务、在线监测产生的海量数据存储与处理任务。部分行业平台已经完成检验报告、设备档案的集中入库，积累起规模可观的原始数据集。技术层面，多模态数据处理、信号识别相关技术持续迭代，能够对检测图像、时序传感信号开展解析处理，把原始信号转化为可以用于风险研判的有效信息。行业内部已经形成数据驱动安全管理的发展共识，管道使用单位、检验机构逐步接受从传统经验判断转向数据研判的工作模式，业务端愿意开放部分业务数据用于安全风险。硬件条件、数据积累、业务认知三个方面共同构成大数据分析与安全预警落地的现实基础。

2.2 数据治理层面存在的主要问题

多源数据标准化程度不足是现阶段突出问题。不同机构建设业务系统时采用各自的数据字段定义,同一检测指标存在多种记录格式,档案数据、检验检测数据、在线监测数据之间缺少统一映射关系,跨系统开展数据合并时需要投入大量人力完成格式转换工作。老旧管道历史档案数字化过程中,原始档案本身信息不全,补录工作缺少统一指引,造成数据集内部出现大量不完整记录。数据质量管控机制没有实现全流程覆盖。数据采集阶段缺少自动化校验手段,人工录入环节容易出现信息偏差,数据入库之前缺少统一校验流程,错误数据直接存入数据库。数据更新机制不完善,管道经过维修改造之后,基础档案信息没有同步更新,平台内保存的管道信息与现场实际状态出现偏差^[2]。不同主体之间存在数据壁垒。检验机构、使用单位、监测服务商各自持有部分数据,缺少常态化的数据交换机制,完整的全周期数据集很难形成。部分单位对于数据对外流转存在顾虑,数据开放程度有限,不同来源的数据无法完成关联匹配,单一类数据源只能反映管道局部状态,限制大数据分析的输出效果。

2.3 安全预警落地过程中的现实制约

从数据到预警结果的转化链路还不够成熟。现有系统大多侧重数据存储展示,数据分析更多停留在简单统计层面,缺少面向压力管道复杂损伤演化规律的分析能力。预警逻辑构建大多依靠人为设定固定阈值,很难适配不同材质、不同工况管道的差异化特征,固定阈值模式下容易出现预警输出过多或者漏输出的情况。样本分布存在不均衡现象,管道失效事件样本数量偏少,大量数据集以正常工况下的数据为主,损伤演化不同阶段的数据样本占比差距较大,直接影响预警输出结果的可靠性。预警输出之后,缺少完整闭环链路,预警信息完成推送之后,处置进度、处置反馈信息没有回传至分析系统,分析模型无法根据实际处置情况完成迭代优化。复合型业务人才供给存在缺口,能够同时掌握压力管道检验业务逻辑,又熟悉大数据处理技术的人员数量有限。技术开发人员对管道损伤演化、现场检验业务逻辑理解不足,业务从业人员对大数据技术的认知有限,两类人员之间存在认知鸿沟,造成技术开发和实际业务需求出现脱节,技术方案很难贴合现场实际作业场景。

3 压力管道检验大数据分析与安全预警的应用路径

3.1 多源检验数据融合治理体系搭建

开展多源数据融合治理,首要工作是建立统一的数据描述框架,对管道基础信息、检验检测记录、在线监测时序数据、环境感知数据做统一字段定义,明确每一类信息的采集口径、存储格式、更新周期,为跨来源数据对接提供统一标准。针对存量历史数据,开展档案数字化清洗工作,对缺失字段开展甄别区分,区分无法复原的历史缺失信息与可以通过现场复核补全的信息,不做无依据的虚构补录。新增检验业务全部依托现场智能终端完成采集,在终端内置基础逻辑校验规则,在采集源头降低错误数据入库的概率。搭建分层的数据处理流程,原始数据完成接入之后,依次开展噪声过滤、重复条目剔除、字段对齐工作,完成不同时间维度数据的匹配对应,把离散分布的档案、检验记录、时序监测数据按照管道里程、设备编号完成关联绑定,形成单条管道全周期聚合数据集^[3]。区分结构化文本记录、图像检测文件、长时序传感信号等不同类型数据,采用差异化存储方案,兼顾数据读取效率与存储成本。建立动态的数据质量管控机制,把质量校验嵌入数据接入、存储、调用全流程。数据入库阶段设置逻辑校验规则,识别异常数值、逻辑冲突条目并做标记;数据使用过程中,结合现场检验反馈持续校验数据集和现场实物的一致性;管道实施维修、改造、更换作业之后,触发档案信息同步更新流程,保证库内数据和现场实体状态保持同步。

3.2 面向压力管道场景的大数据分析能力构建

大数据分析能力建设需要贴合压力管道业务场景,不直接套用通用大数据处理模式,围绕管道本体损伤演化、工况异常变化、外部环境扰动三个方向搭建分析能力。依托治理完成的聚合数据集,挖掘不同数据之间的内在关联,挖掘检验检测得到的腐蚀、缺陷信息和运行工况参数、环境条件之间的对应关系,识别管道状态发生变化的数据特征信号。针对时序类运行监测数据,开展时序特征解析,识别压力、流量、阴极保护参数出现的持续偏移、突变、异常波动等信号,把原始海量时序信号转化为可识别的状态特征,提取管道运行过程中的异常变化线索。针对无损检测产出的图像类数据,开展信号解析,提取图像内部反映损伤的特征信息,完成和同管段历史检验记录的比对,识别损伤发展变化趋势。开展多源特征联合分析,不依靠单一类数据做状态判断。单一检验数据只能反映特定时间点管道本体状态,在线监测数据只能反映工况变化,环境感知数据记录外部扰动,把多类特征做联合解读,降低单一数据源带来的判断偏差。同一管段的历史多轮检验记录做纵向对

比,捕捉缺陷尺寸、腐蚀范围随时间产生的变化,得到损伤发展速率相关特征,为风险趋势判断提供支撑。

3.3 安全预警体系的闭环运行模式设计

安全预警体系核心目标是实现风险的提前识别,完成从被动处置向主动预判转变,整套体系需要构建数据接入分析研判分级推送处置反馈迭代优化完整运行闭环。分析模块持续接收经过治理的多源数据,持续开展状态研判,根据风险的影响范围、发展趋势划分不同预警等级,不同等级预警匹配对应的处置响应路径。预警信息除输出风险位置、风险类型之外,同步附带支撑该条预警输出的相关原始数据线索,把对应的检验记录、监测特征信号一并输出,为现场处置人员开展核实工作提供参考,减少现场人员二次查阅大量原始资料的工作量。预警信息支持多渠道分发,根据风险等级推送至不同责任主体,完成向管道运维人员、检验业务端、管理端的信息分发^[4]。预警下发之后,系统跟踪处置全流程,记录核实时间、现场复核得到的实际情况、采取的处置措施,记录风险最终处置结果。现场复核结果分为预警属实、预警误报两类,全部反馈回分析模块。属实的预警记录补充进入业务数据集,丰富风险特征样本;误报的预警开展溯源,定位误报来自数据质量问题还是分析逻辑缺陷,针对性完成修正。

3.4 大数据安全预警技术的落地实施路径

大数据与安全预警体系建设不能一步到位完成全范围铺开,采用分步推进的实施路径。优先选取高风险管段、高后果区域管道作为先行落地对象,优先完成该部分管道档案、多轮检验记录、在线监测数据归集,完成小范围试点运行,在试点运行过程中暴露数据、分析、业务对接层面存在的各类问题,完成方案迭代,再逐步扩大覆盖范围,降低整体建设风险。硬件层面推进感知网络与检验业务系统协同建设,新建管道同步配套数字化感知采集节点,存量管道优先在风险较高管段增补感

知设备,提升原始数据的采集能力。推广现场检验智能终端的普及,保证检验业务产生的数据第一时间完成数字化留存,减少纸质档案二次转录带来的数据损耗。边缘计算节点部署在管道现场端,完成原始信号初步过滤处理,只把处理之后的有效数据回传平台,降低网络传输压力,实现异常信号本地快速识别响应。推进数字孪生与大数据分析的协同应用,搭建管道虚拟镜像,把检验大数据、实时监测数据映射到虚拟模型之上,实现管道全周期状态可视化呈现,把大数据分析输出的预警结果直接映射到空间位置,直观展示风险分布,辅助运维人员开展决策判断^[5]。同步重视数据安全防护,对管道检验、运行相关敏感业务数据做加密存储与传输,做好访问权限管控,防范数据泄露、数据篡改问题。

结语

压力管道检验大数据的应用,是管道安全管控数字化转型的重要方向。行业现阶段在硬件基础、数据积累方面已经具备一定条件,但在数据治理、分析转化、闭环运行层面仍存在诸多待解决问题。通过搭建多源数据融合治理框架,构建适配业务场景的分析能力,完善预警闭环运行模式,分步开展落地实施,能够释放检验大数据的价值,助力压力管道安全管理水平提升。

参考文献

- [1] 陈贵堂,叶常青.压力管道材料老化机理及其检验检测方法的创新研究[J].中国设备工程,2026(1):180-182.
- [2] 刘喜文,杨新健,邻楚婷.基于物联网的压力管道检验检测系统设计与应用[J].石油化工设备,2026,55(1):48-53.
- [3] 曹志祥.压力管道数字化检验流程优化与实践研究.中国科技期刊数据库工业C,2026(1):057-060.
- [4] 宋明非.工业锅炉压力容器安全检验要点分析[J].今日制造与升级,2026(5):194-196.
- [5] 张杰,严文雯.关于无损检测技术在压力管道检验中的运用[J].西部特种设备,2026,9(1):9-14.