

浅谈石油天然气管道失效数据库建立研究及展望

赵联祁（国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司（广东省管网公司），广东 广州 510000）

摘要：石油天然气管道安全运行对国家能源安全和社会稳定至关重要。当前国外失效数据库因统计标准差异难以直接指导国内管道风险管理，而国内失效数据系统建设尚不完善。本文围绕油气管道失效数据库的建立展开研究，首先分析了国内外研究现状，阐述了建立国内数据库的必要性；接着详细介绍了研究内容，包括危害因素识别与数据库模型建立、失效概率动态评估方法、失效后果评估方法以及动态风险评估模型；最后对数据库的未来发展方向进行了展望，旨在为我国油气管道失效数据库的建立提供理论支撑和实践指导，从而提高我国油气管道的风险管理水平。

关键词：石油天然气管道；失效数据库；风险评估；动态模型

中图分类号：TE88 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）027-0133-03

A Brief Discussion on the Establishment, Research, and Prospects of Oil and Gas Pipeline Failure Databases

Zhao Lianqi (China Oil & Gas Pipeline Network Corporation South China Branch (Guangdong Provincial Pipeline Network Company), Guangzhou Guangdong 510000, China)

Abstract: The safe operation of oil and gas pipelines is crucial to national energy security and social stability. Currently, foreign failure databases are difficult to directly apply to domestic pipeline risk management due to differences in statistical standards, while the development of domestic failure data systems remains incomplete. This paper focuses on the establishment of oil and gas pipeline failure databases. First, it analyzes the current research status both domestically and internationally and elaborates on the necessity of establishing a domestic database. Next, it details the research content, including hazard factor identification and database model construction, dynamic failure probability assessment methods, failure consequence evaluation methods, and dynamic risk assessment models. Finally, it provides an outlook on the future development direction of such databases, aiming to offer theoretical support and practical guidance for the establishment of oil and gas pipeline failure databases in China, thereby enhancing the risk management level of the country's oil and gas pipelines.

Keywords: oil and gas pipelines; failure database; risk assessment; dynamic model

目前国外虽已建立失效数据库，但由于失效数据库管理组织均有自己的失效数据统计标准和流程，对于国内油气管道风险定量评估及管控指导意义有限，国内在管道历史失效数据统计分析方面已开展相关工作，主要是国内某管道局、某研究院在内的一些单位都进行了油气管道事故资料收集的相关工作，缺少功能齐全、数据丰富的失效数据库，因此建立国内油气管道失效数据库具有重大意义。

1 国内外研究现状

目前油气管道大部分处在环境条件恶劣地区，服役年限的持续增长不可避免地加剧了管道本体材料的老化问题，与此同时，全球能源需求的持续高涨正驱动管道输送系统向更高运行压力与更大管径规格方向发展，显著提升了其失效风险。鉴于输送介质普遍具有易燃、易爆且扩散性强的危险特性，一旦发生泄漏，不仅严重威胁周边人员生命安全与生态环境，还将引发巨额的经济损失。

尽管美国在管道安全管理领域拥有相对成熟的法

规体系与先进技术，且其管道事故总量近年呈现下降态势，但重大恶性事故仍未根绝。例如，2011年宾夕法尼亚州阿伦敦（Allentown）天然气管道爆炸事故致5人遇难、约50栋建筑损毁，并紧急疏散500余名居民；2012年马萨诸塞州斯普林菲尔德（Springfield）发生的同类事故则导致21人受伤及数十栋建筑严重破坏。据美国管道与危险材料安全管理局（PHMSA）统计，2010-2020年期间，美国输气管道平均每年发生约120起重大事故，造成一定的人员伤亡和经济损失。

虽然管道运营企业在设计、施工及运行各环节均建立了严密的规章制度并严格执行，并采用了多种技术手段进行风险防控，然而管道周边环境始终存在超出管理边界的不可控因素。这些不利因素的累积与耦合效应，最终可能突破现有防护措施，引发管道失效事故。因此，系统识别油气输送管道潜在的失效诱因，对各类风险实施精准评估，并重点管控高风险环节，是提升管道系统整体安全性与运行可靠性的关键所在。

2 研究内容

本研究基于油气管道失效数据库,构建失效概率动态模型与失效后果模拟模型。结合实例研究与计算机仿真技术优化模型参数,制定油气管道风险阈值标准。引入动态风险评估算法与多指标风险分级体系,实现风险等级的实时判定,优化管道风险管理效能。基于上述研究,构建适应的管道失效数据库框架,为本土数据库建设提供技术支撑。

2.1 油气管道危害因素识别与失效数据库模型建立

对比美国、加拿大、欧洲各国油气管道事故的统计数据,分析发达国家管道事故管理的先进做法及其在事故定义、原因分类等方面存在的差异。美国 PHMSA 将管道事故原因分为外部干扰、腐蚀、操作失误等类别,且对每类原因的定义和统计范围都有明确规定;加拿大 NEB 的分类则更注重自然及地质灾害因素的统计;欧洲各国在原因分类上虽有差异,但普遍重视材料/建造因素的分析。

根据我国新老管道事故统计,指出现阶段管道事故管理的不足。我国在事故定义上不够统一,部分事故因定义模糊未被纳入统计;在原因分类方面,缺乏详细的划分标准,导致数据的可比性和可用性较低。

借鉴欧美管道事故管理经验,结合我国管道特点,确立涵盖外部干扰、腐蚀、材料/建造、自然及地质灾害、操作不当及未知因素的多维事故归因框架。外部干扰主要包括第三方施工破坏、人为打孔盗油等;腐蚀可分为内腐蚀和外腐蚀,内腐蚀与输送介质性质有关,外腐蚀则受土壤、大气等环境因素影响;材料/建造因素涉及管道材料质量不合格、焊接工艺缺陷等;自然及地质灾害如地震、洪水、滑坡等会对管道造成破坏;操作不当包括误操作、维护保养不及时等。

构建本土化管道失效数据库是精准风险评估的基础支撑。因此,有必要规范我国管道失效事故调查与数据收集。在危害因素识别的基础上,提出油气管道失效数据库模型,该模型应包含管道基本信息(如管径、材质、铺设年代等)、事故信息(如发生时间、地点、原因等)、后果信息(如人员伤亡、经济损失、环境影响等)以及检测与维修信息等。并在使用的过程中不断完善符合我国国情的油气管道基础失效概率和基础失效后果,实现动态循环。例如,通过对新发生事故数据的分析,更新基础失效概率和后果的计算方法,使数据库能够更准确地反映实际情况。

2.2 油气管道失效概率动态评估方法

定量风险评估需依赖大量历史失效数据支撑,然而我国还没有建立起失效事故统计上报机制,公开数据亦缺乏特定管道的详细失效记录,难以准确刻画特

定条件下管道的失效可能性。参考国外管道失效数据库,如美国 PHMSA 数据库、加拿大 NEB 数据库等,充分调研国内外油气管道失效案例的历史统计数据,计算各类失效因素作用下的油气管道基本失效概率。

由于统计数据源于历史事故记录,所得基础失效概率仅反映管道的平均状态,难以真实体现特定管道的即时失效风险。若直接应用于特定管线的风险评估,易产生偏差,结果可靠性不足。因此,有必要借助修正机制对基础失效概率进行动态调整与实时更新,赋予评估结果动态特性。

采用关联管道系统损伤机理、周边环境及管理规程的修正系数,对基础失效概率实施动态校正与实时迭代,以精准表征具体管道在特定状态及工况下的失效风险。例如,对于一条铺设在腐蚀严重区域的管道,其腐蚀因素的修正因子应大于1,以提高基本失效概率;而对于一条有完善第三方防护措施的管道,外部干扰因素的修正因子应小于1,以降低基本失效概率。修正因子的确定可通过专家打分、现场试验、数值模拟等方法综合得出。

2.3 油气管道失效后果评估方法

油气管道失效的后果,主要表现为一旦引发火灾或爆炸事故,会对周围人员和财产造成巨大影响,且停输会对下游用气企业和居民生活产生影响。建立油气管道失效后果模型,首先需调研和收集管道失效案例中的泄漏量、泄漏时间、直接经济损失、维抢修成本、停产损失、人员伤亡等数据,归纳总结各泄漏程度所对应的基础失效后果。例如,小剂量泄漏可能仅造成局部环境污染,经济损失较小;而大量泄漏引发爆炸,则可能导致多人伤亡和巨额财产损失。

2.4 基于实时数据的油气管道动态风险评价模型

常规风险评价技术只能判定管道的固定风险状态,无法充分整合多种实时变化因素对风险态势演变的考量。为提高油气管道作业现场对事故等突发事件的处理能力,保证油气管道的安全运行,构建基于实时数据的动态风险评模型,克服传统静态固有风险评价不能预测事故的缺点,建立实时风险评价指标体系。

多维度风险矩阵法将失效概率和失效后果划分为不同等级,形成矩阵,每个矩阵元素对应一个风险等级。例如,高失效概率和高后果对应的风险等级为极高,需立即采取措施降低风险;低失效概率和低后果对应的风险等级为低,可进行常规监测。该模型可深度融合管道安全运行要求、人力资源配置方案及 HSE 管理体系规定,并通过构建相应指标体系,将风险评估成果全面落实到实际工作环节。它满足了风险管理的实时性、动态性与前瞻性需求,可作为日常风险管

理工作的指导依据。

3 展望

油气管道失效数据库作为管道完整性管理的核心基础设施,其价值远未完全释放。面向未来智能化、精细化、协同化的管道安全管理需求,数据库的演进将聚焦于以下几个关键方向:

3.1 从“数据仓库”到“智能认知引擎”的跃迁

①深度知识融合与推理:下一代数据库将超越简单的数据存储与查询功能,深度融合材料科学、腐蚀机理、流体力学、地质工程等多学科知识图谱。通过引入图计算和因果推断技术,构建失效事件的“逻辑链”,实现从“现象记录”到“根因推演”的智能化分析,主动识别潜在的系统性风险模式。例如,通过分析多条管道的腐蚀失效数据,结合材料科学知识,可推断出某种材质管道在特定土壤环境下的腐蚀规律,提前预警类似管道的腐蚀风险。②自适应学习与预测优化:集成在线机器学习框架,使数据库具备持续学习和自我优化的能力。基于实时采集的管道运行数据(如SCADA、光纤传感、In-line Inspection数据)与历史失效数据的动态交互,数据库能够不断修正预测模型参数,提升失效概率预测、剩余寿命评估的时效性和准确性,实现预测模型的“自进化”。当新的失效案例发生时,数据库可自动学习该案例的特征,调整模型参数,使后续的预测更加准确。

3.2 多源异构数据的深度同化与价值挖掘

①全生命周期数据融合:打破设计、制造、施工、运维、检测、维修等环节的数据孤岛,实现管道“生老病死”全链条数据的结构化接入与关联分析。特别关注将非结构化数据(如检测报告文本、维修记录描述、事故现场图片/视频)通过先进的NLP和计算机视觉技术进行深度解析与知识抽取,形成可量化、可分析的维度。例如,利用计算机视觉技术对事故现场图片进行分析,提取泄漏点位置、管道损坏程度等信息,转化为结构化数据存入数据库。②“数字孪生”驱动的动态映射:构建基于物理模型和数据驱动的管道数字孪生体,将失效数据库作为其核心“知识库”和“经验库”。通过孪生体实时映射物理管道的状态,数据库能提供更贴合实际的失效场景模拟、维修方案预演和应急响应推演支持。例如,当管道某个部位的应力出现异常时,数字孪生体可结合数据库中的历史失效数据,模拟该部位可能发生的失效模式,并预测失效后果,为制定维修方案提供依据。

3.3 人机协同的失效分析与决策支持

①增强分析赋能:利用自然语言生成技术,将复杂的失效统计分析结果、风险预测结论自动转化为易

于理解的洞察报告和可视化叙事,降低专业门槛,提升决策效率。例如,数据库可自动生成某条管道的风险评估报告,用图表和简洁的文字说明管道的主要风险点、失效概率及可能的后果,使决策者能够快速掌握关键信息。②智能辅助诊断与决策推演:开发基于专家系统与案例推理的智能辅助工具,结合数据库中的海量案例和知识,为现场工程师提供失效诊断的智能建议和维修策略的备选方案,支持更快速、更精准的应急响应和维修决策。当现场出现管道泄漏时,工程师可输入相关参数,智能辅助工具会从数据库中查找类似案例,提供可能的泄漏原因和维修方法,帮助工程师快速解决问题。

4 结语

未来的油气管道失效数据库,将不仅仅是历史的记录者,更是管道安全风险的“先知者”、完整性决策的“智慧大脑”和行业知识协同的“信任基石”。其发展有赖于数据科学、人工智能、材料工程、网络安全等多领域技术的交叉融合,以及行业监管机构、运营商、研究机构、技术服务商的通力协作与范式创新。持续投入与迭代升级,将推动管道安全管理迈入更智能、更主动、更韧性的新阶段。

参考文献:

- [1] 张强,杨玉锋,于瑶,等.液化天然气接收站失效数据对比分析[J].煤气与热力,2025,45(02):29-33.
- [2] 户英杰,王艳,严荣松,等.美国城镇燃气管道数据库建设和事故分析[J].城市燃气,2024(11):30-36.
- [3] 姜开,孙庆峰,王学谦,等.基于失效数据统计的油气管道失效概率评估方法[J].港口航道与近海工程,2024,61(03):71-75.
- [4] 张强,戴联双,杨玉锋,等.国外油气管道失效数据库对比分析与启示[J].安全,2023,44(06):27-32+105.
- [5] 马健彰,帅健,王旭,等.天然气管道不同孔径泄漏失效概率量化方法研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(01):136-142.
- [6] 齐龙.长输管道风险评价技术现状及改进探讨[J].石油和化工设备,2022,25(10):5-7.
- [7] 张强,杨玉锋,贾韶辉,等.油气管道失效数据库对比分析与研究[J].石油工业技术监督,2021,37(03):30-33.
- [8] 王新,刘建平,张强,等.油气管道定量风险评估技术发展现状及对策[J].油气储运,2020,39(11):1238-1243.
- [9] 马鑫龙.基于管道单元识别的城镇燃气管网失效及风险管理研究[D].天津:天津大学,2018.