

文章编号: 0253-2697(2010)02-0327-06

基于 C/S 网络模式的管道完整性管理系统

帅 健¹ 王晓霖¹ 牛双会²

(1 中国石油大学机电工程学院 北京 102249; 2 中国石化管道储运分公司仪长输油处 湖北武汉 430077)

摘要: 为便于有效实施管道完整性管理, 开发了基于 C/S 网络模式的管道完整性管理系统。系统中构建了管道完整性数据库, 管理和维护与管道完整性相关的设计、检测、运行和环境等大量管道数据, 采用数据接口技术与外部数据库实现信息共享。以数据库为基础, 该系统包括风险评价、腐蚀缺陷和外部腐蚀防护系统评价等基本模块。利用风险评价模块, 可以进行管道分段、风险评分、风险决策、风险分析, 用腐蚀缺陷评价模块进行内检测缺陷数据统计、剩余强度评价、安全系数曲线绘制和单一缺陷评估, 腐蚀防护系统评价模块可根据检测数据计算涂层破损点密度、电流衰减率、绝缘电阻率等分级评价外防腐层和阴极保护系统的有效性。应用本系统对某输油管道进行了完整性评价, 评价结果基于实际数据, 全面反映了管道的安全状况、风险因素和事故隐患, 满足管道全面完整性管理的基本要求。

关键词: 输油管道; 完整性管理; 数据管理; 风险评价; 剩余强度; 腐蚀防护

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A

A pipeline integrity management system based on Client/Server mode

SHUAI Jian¹ WANG Xiaolin¹ NIU Shuanghui²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Yichang Oil Transportation Department, Sinopec Pipeline Storage & Transportation Corporation, Wuhan 430077, China)

Abstract In order to effectively and conveniently implement pipeline integrity management, a Client/Server-based pipeline integrity management system was developed. The database constructed in the system is able to manage and maintain the mass design, inspection, operation and environment data related to the pipeline integrity. The system can be linked with the external database to share information resources. The management system based on the database can provide such fundamental functions as assessments of risk, corrosion defect and corrosion protection system. The risk assessment module is involved in pipeline segmenting, risk scoring, decision-making and risk analysis. The corrosion defect assessment module conducts the statistic analysis for in-line inspection data, calculation of the residual strength, drawing of safety factor curves and evaluation of a single defect. The corrosion protection assessment module can be used to calculate the damage points density, current attenuation and insulation parameter of the coating according to the inspection data and fractionally evaluate the effectiveness of the coating and cathodic protection. The management system was used to assess the integrity of an oil pipeline using the actual data. The assessed results could reflect the real condition of pipeline safety, risk factors and potential threats overall. This system could meet the fundamental requirement of total pipeline integrity management.

Key words: oil pipeline; integrity management system; data management; risk assessment; remaining strength; corrosion protection

从 2001 年美国机械工程师协会 (ASME) 和美国石油学会 (API) 分别出台气体管道和液体管道完整性管理的国际标准以来^[1-3], 完整性管理得到了世界管道业界的高度重视, 成为普遍认可的管道管理模式。由于管道及其附属设施所构成系统的复杂性, 国外管道公司陆续推出了计算机辅助的管道完整性管理系统, 借助于网络, 帮助管道公司对管线或管网实施全面高效的完整性评价与管理, 如科威特石油公司的 TPIMS^[3]、美国加州燃气管网的 GIS 系统^[4]、法国管网的 PIMSlider^[5] 等。国内也有关于管道数据库^[6] 和

基于地理信息系统的管道可靠性分析方法^[7] 等方面的研究。但与国外先进技术相比, 国内完整性管理起步较晚, 缺乏技术先进、功能齐全和使用方便的软件系统, 制约了管道完整性管理的应用与推广。

笔者在已有软件^[6,8] 基础上, 开发了基于 C/S (Client/Server) 网络模式的管道完整性管理系统, 进一步完善了数据管理功能和管道完整性评价功能。该系统可以作为管道完整性管理的数据支持与分析的信息平台, 方便用户获取与管道完整性相关的检测、评价、维护等各种信息, 并提供风险评价、腐蚀管道

基金项目: 国家科技支撑技术项目“生命线工程安全保障关键技术研究及工程示范”(2006BAK02B01) 资助。

作者简介: 帅 健, 男, 1963 年 8 月生, 2000 年获石油大学博士学位, 现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事油气储运安全和工程力学的教学与研究。E-mail: shuaij@cup.edu.cn

剩余强度评价、防腐层和阴极保护系统有效性评价等功能,可以适时对管道进行全面完整性评价和风险管理。

1 系统功能设计

系统的功能设计必须考虑管道完整性管理的基本要求。管道完整性管理的对象与手段如图 1 所示,管道系统通常由钢质管道本体、涂层和阴极保护系统组成,钢质管道是承压主体,涂层和阴极保护给钢质管道提供双重保护,使其免受腐蚀侵害,保持较长使用寿命。钢质管道本体、涂层和阴极保护系统是完整性管理的对象,完整性管理的基本手段是检测、评价和应对措施。通过检测钢质管道本体、防腐层和阴极保护系统的实际状况,为管道完整性评价提供第一手资料。完整性评价的目的是了解管道在各种情况下的安全承压能力,根据评价结果,采取适当的应对措施,如更换受损害的管道、修复管道上的缺陷、稳定周边环境或降

压运行等,改进和确保管道的完整性。管道完整性管理的核心流程是通过识别影响管道安全的潜在危险,确定危险因素,收集整合相关数据,对管道进行风险评价,制订措施并实施以减缓风险。

管道完整性管理必须有充分的数据来源作支撑,因此,系统必须构建数据库,存储所有完整性管理必须的数据信息,且其存储方式和结构应能保证数据的快速存取、检索和维护。由于管道完整性相关数据十分庞大,如何管理数据,建立高效可靠的数据模型是系统成功的关键,许多文献提出了管道完整性数据管理的重要性及其解决方案^[9-10]。

根据管道完整性管理的要求,系统还需具备风险评价、腐蚀缺陷评价和防腐层与阴极保护有效性评价等基本功能。管道的完整性管理包括了两种程序:即规定的完整性管理程序和基于风险完整性管理程序,在这两种程序中,风险评价都是必不可少的,风险评价作为管道完整性管理的核心内容,直接影响着判别和决策结果,其作用举足轻重;腐蚀缺陷评价是对含缺陷管道进行剩余强度和剩余寿命的评价,包括腐蚀缺陷的统计分析和基于可靠性的评价方法^[11-12],单个腐蚀缺陷可以在开挖中发现,大量的腐蚀缺陷则可以通过内检测器定量检测,腐蚀缺陷评价更多地是建立在内检测技术之上;防腐层与阴极保护的有效性评价,也称为外腐蚀直接评价(ECDA),其特点是非开挖检测,不影响管道运行,易于实行,也是管道完整性评价方法之一。

基于上述考虑,提出系统的功能设计如图 2。系

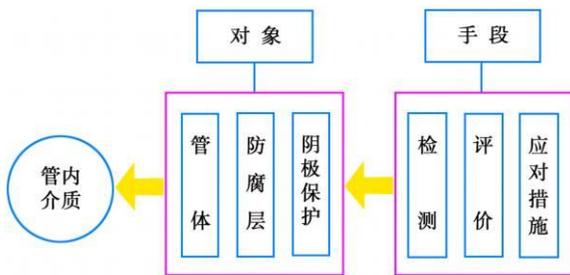


图 1 管道完整性管理系统的对象与手段

Fig. 1 Objects and methods of pipeline integrity management system

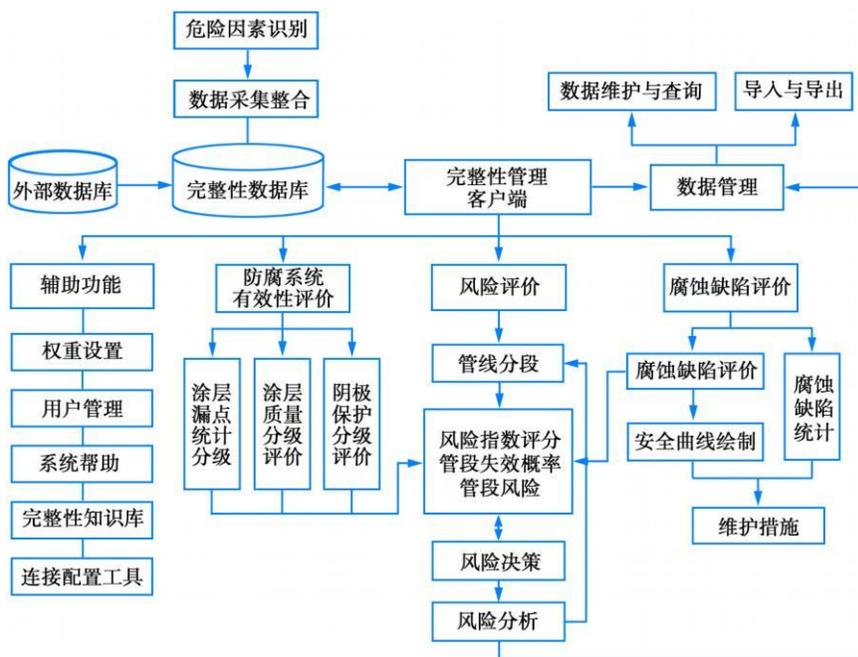


图 2 管道完整性管理系统的功能架构

Fig. 2 Function framework of pipeline integrity management system

统以完整性数据库为基础, 风险评价、腐蚀缺陷评价和腐蚀防护系统有效性评价为必备功能, 既进行数据管理, 也要提供全面的完整性评价功能。而且, 要形成一套实用的管道完整性管理系统, 还应包括诸如图表分析、用户权限设置、使用帮助、完整性知识库等辅助功能。

2 C/S 网络模式

作为管道完整性管理的信息平台, 必须利用管道公司的现有计算机和网络资源。国内长输管线大多建有覆盖管道全线的局域网, 实现对长输管线的监控管理和信息发布, 显然, 单机版的管道完整性管理系统很难发挥信息平台的作用, 采用 C/S 模式可充分利用已有网络资源。

基于 C/S 模式的系统设计基本思想是把应用分布在客户机和服务器上, 通过多机合作实现一个完整的功能。该方式改变了传统的单机应用方式, 其优点为: ①充分利用两端硬件优势, 将任务合理分配到 Client 端和 Server 端, 降低系统的通讯开销, 保证客户端的响应速度; ②数据操作和事务处理能力强; ③客户端有完整的应用程序, 交互性好, 对信息安全的控制能力强, 用户群相对固定, 有较高的保密性。

基于 C/S 模式, 局域网内的用户不受部门和地域的限制, 在系统授权的前提下, 通过客户端软件访问完整性管理系统, 并在其角色许可的范围内使用该系统, 多用户协作实现完整性管理的目标。在这种分布协作方式下, 完整性管理渗透到公司各个部门乃至站场, 相关部门和用户承担着完整性管理的不同任务, 使完整性管理的各个环节得以落实, 同时也保证了数据信息的及时更新和准确。此外, 数据的存储、组织和备份由服务器统一管理, 保证了数据资源的同步性和安全性。

C/S 模式还可以满足管道完整性评价中的大量计算要求, 如防腐层电流衰减率、绝缘电阻系数等计算需要求解非线性方程组、含缺陷管道剩余强度评价计算等可能占用较多的系统资源。C/S 模式将计算任务分解到各个客户端, 有效地起到减轻服务器运算负荷、保证数据处理响应速度的作用。

3 数据管理

根据管道运行管理的实际情况, 收集与完整性管理相关的数据资料, 这些资料包括: 设计、材料和施工数据, 运行、维护和检测数据, 管道路由、周边环境和人口数据, 以及事故和危害后果数据等。对于新建管线,

数据较为齐全, 可以直接收集采用; 而对于老管线, 应当考虑管线在运行期间的信息变更, 将收集的数据加以分析对照, 提取可用数据, 剔除无效数据, 确保数据信息更新后的有效性, 如果缺乏数据, 则应考虑对管道进行基线检测, 以得到完整性管理所需的各项基础数据。

由于采集的数据来源不同, 数据格式多种多样, 且记录方式各不相同, 如纸质文件、电子文档、数据库、CAD、GPS、GIS 数据等, 因此必须进行分类和整合。将资源数据按类型划分为设计、检测、运行和环境 4 类, 其中设计数据包括管线基本信息、管材性能参数、防腐层、输送介质、桩位、高程、埋深、站场等, 管道一旦建成, 设计数据很少发生变化, 可视其为基本不变数据。检测数据包括内外检测数据, 如腐蚀缺陷、防腐层破损点、阴极保护电位等。运行数据包括运行压力、温度、水压试验、事故、维修记录等。环境数据则包括管线周边建设活动情况、人口分布、土壤状况、外部干扰结构等。这 3 类数据随管道的生产运行情况实时变化, 故视为可变数据。此外, 数据库还包括防腐等级、管道剩余强度、风险分布等评价结果数据, 危害因素、评分指标、等级划分等评价属性数据, 以及分段信息等动态数据。管道跨度大, 分布范围广, 要清晰准确记录管线沿程的各种信息, 需要建立统一的线性参考体系, 以标定各种事物和属性处于管道上的相对位置。通常情况下, 线路上的里程碑或转角桩在建成后固定不变, 可被用作定位参考系, 标定管道及沿途所有单元的里程信息。

根据数据整合结果和完整性管理需要, 建立统一的信息分类编码系统, 将数据信息要素化、标准化和层次化, 设计清晰合理的数据结构。由于多数管道公司建有管道生产管理等信息系统, 其中包含大量与管道完整性相关的数据, 如实时变化的运行压力、阴保电位等。因此, 采用数据接口技术连接外部数据库, 实现数据库间信息互访, 达到避免数据重复录入、降低数据维护成本和资源共享的目的。

4 主要功能模块

4.1 风险评价

风险评价流程如图 3, 主要包括管线分段、风险评价、风险决策、风险分析 4 个子模块。

(1) 管线分段: 风险评价必须将管道分段, 长输管线分段往往是一项艰巨而繁重的工作, 且关系到风险评价的合理性。笔者提出了基于风险截面的管道分段方法, 该方法首先将管道全线的所有站场、里程碑和截断阀看作初始截面, 记录相邻截面间的管材、腐蚀状

况、人口等级等管道主要信息。在截面管理程序中,用户根据分段要求,通过设置截面标志,选出风险截面,实现管线分段,进而对管段进行风险评价。根据管道运行情况,用户可以适时添加或删除截面,这样不仅减少了分段和风险评价的工作量,也能动态地反应管线变化情况。

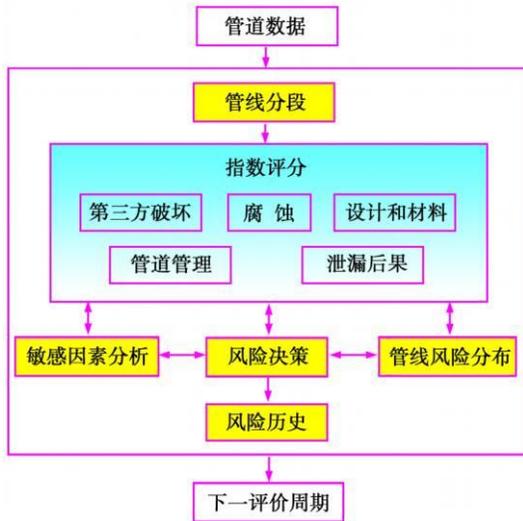


图 3 风险评价模块流程

Fig. 3 Program flow of risk assessment module

(2) 风险评价: 风险是事故发生的可能性与事故造成的后果的严重程度的综合度量。按下式计算:

$$R = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^4 (\alpha_i P_i)}{100} \right] \times H$$

式中: R 为相对风险值; $i=1, 2, 3, 4$, 分别对应第三方破坏、腐蚀、设计和误操作 4 项危害因素; P_i 对应第三方破坏、腐蚀、设计和误操作指数的具体评分值; H 为泄漏冲击指数; α_i 为危害因素的权重, 一般需要参考管道事故统计确定。

上式综合考虑了风险因素、风险因素权重以及失效后果, 将风险描述为度量失效性和危害性的综合指标, 即失效概率和失效后果的乘积。其中, 失效概率表示了各管段失效可能性的大小, 失效后果则反映了风险事故的危害程度。模型中, 4 项失效指数和泄漏冲击指数的评分方法, 借鉴管道风险管理手册^[13], 并结合我国管道特点进行修正。风险评价要求对所有管段完成上述模型评分, 以得到管道全线相对风险的详细分布。

(3) 风险决策: 根据风险评价结果, 将管段风险按相对水平划分为高、较高、中等、较低、低 5 个级别, 并按相对风险值大小排序。根据相对风险分布、失效概率和失效后果, 对高风险管段制订防治措施, 重新进行

其风险状态评价。如果风险降低至可接受水平, 则该管段的本次风险评价结束, 否则, 重新制定维护措施, 并再次评价, 直到风险降到许可范围为止。

(4) 风险分析: 风险评价结束后, 系统自动生成管道风险、失效概率、失效后果、指数评分结果、敏感因素和风险历史分布等图表, 以便风险分析、风险预测和制订防治计划之用。

4.2 腐蚀缺陷评价

根据腐蚀管道剩余强度评价方法对比研究^[14-15], 采用 ASME B31G-91、DNV RP-F101 和 PCORRC 3 种方法评价缺陷管道的剩余强度。腐蚀缺陷评价包括缺陷统计、剩余强度计算、安全曲线绘制和单缺陷评估 4 个子模块, 评价流程如图 4 所示。

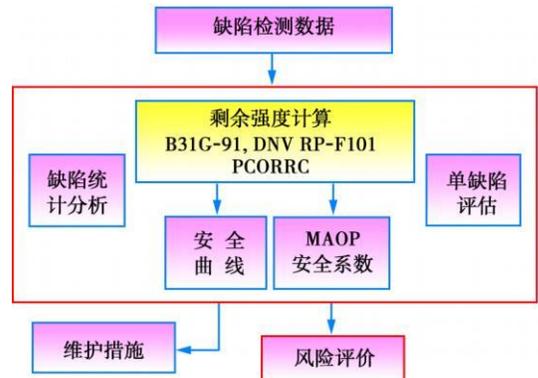


图 4 腐蚀缺陷模块流程

Fig. 4 Program flow of corrosion defect assessment module

剩余强度的评价结果为缺陷处的最大许可操作压力(MAOP)、失效压力和安全系数, 评价结果还将用于风险评价。用户可以根据管材性能, 选择相应的评价标准, 对内检测发现的批量缺陷或人工发现的个别缺陷进行剩余强度评价。

4.3 外部腐蚀防护系统的有效性评价

对防腐层和阴极保护进行检测和评价可了解管道外腐蚀状况。常用的外防腐层测试技术有: 管中电流-电压法、交流电流衰减法、PEARSON 检测法、阴极保护电位分布测试法、直流电压梯度测试技术(DCVG)和密间隔电位检测(CIPS)等。系统采用分级评价方法^[16], 针对常用检测手段, 根据检测数据计算防腐层破损点密度、电流衰减率和绝缘电阻系数, 将防腐层划分为良、中、差、劣 4 个等级。根据阴极保护电位, 将阴极保护效果划分为合格、欠保护、过保护、无保护 4 级。据此制订防腐层的维修措施和计划, 评价结果还将用于风险评价。外部腐蚀防护系统的有效性评价流程如图 5 所示。

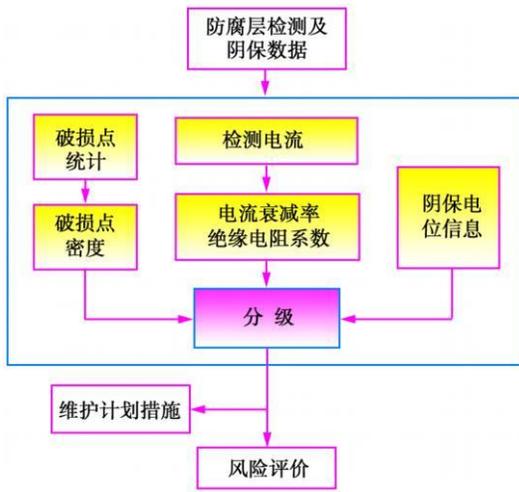


图 5 腐蚀防护系统评价流程

Fig. 5 Program flow of external corrosion assessment module

5 应用

基于 C/S 模式的管道完整性管理信息系统, 以工程实用为目的, 从基础数据、管道风险、管体缺陷和防腐系统 4 个方面实现管道的完整性管理与评价, 主要针对原油和成品油管道, 也可在气体管道上应用。以某输油管道为例, 数据库整合各类管道基础数据约 3 万行, 包含信息约 20 万条, 运行压力和温度、维修和生产建设等数据与生产执行系统同步, 管道完整性总体评价结果如下:

(1) 风险评价: 管道全长约 750 km, 依据人口、管材、泵站、敏感地区和阀室划分为 103 段, 全线风险分布结果如图 6 所示。高风险管段 4 个(占管道全长 4.6%), 较高风险管段 29 个(占 32.8%), 其余管段为

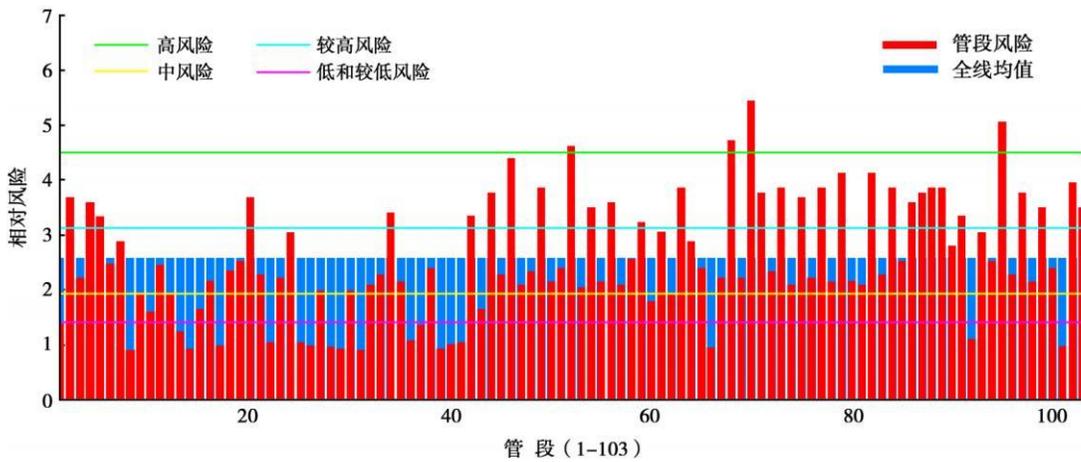


图 6 管线相对风险分布

Fig. 6 Relative risk distribution of pipeline

中、低风险。评价结果表明, 管线总体风险水平较低, 处于可接受范围, 河流穿越、浅埋和高人口密度是导致高风险的主要因素。

(2) 防腐系统有效性评价: 依据土壤电阻率、土壤腐蚀速率和 pH 值评价土壤腐蚀性, 其中强腐蚀性 2 处、弱腐蚀性 28 处, 分布于 300 ~ 450 km。管道全线采用环氧粉末喷涂, 依据破损点密度、电流衰减率和绝缘电阻系数评价, 全线防腐层性能优良, 26 处防腐性能较差, 均已修复。对近半年的阴极保护电位评价, 除 4 处过保护外, 全线阴保合格。

(3) 腐蚀缺陷评价: 由于管道未进行内检测, 因此没有腐蚀缺陷数据。如果今后管道进行内检测, 可直接导入检测数据, 进行管道安全评价; 对于开挖或日常管理中发现的个别缺陷, 可采用系统中的单缺陷评定功能评估是否需要修理该缺陷。

上述完整性评价结果, 基于管道实际数据, 全面反

映了管道的安全状况、风险因素和事故隐患, 为制订管道维护措施、检测计划和完整性管理方案提供了依据。

6 结论

(1) 开发了基于 C/S 模式的管道完整性管理系统, 局域网内的各个部门和用户, 在其权限许可范围内协作完成完整性管理的各项工作。系统安全可靠、响应速度快。

(2) 在数据收集与整合的基础上, 构建了完整性数据库, 统一管理大量复杂的管道数据, 采用数据接口技术实现信息的共享与同步。系统提供风险评价、腐蚀缺陷评价和外部腐蚀防护系统有效性评价等功能模块, 完整性评价基于真实数据, 结果可靠, 能够满足管道全面完整性管理与评价的基本需要。

(3) 系统应用效果良好, 具有较好的推广价值, 其进一步发展方向包括开发管道完整性管理的智能决策

和分析方法,利用 GIS、WEB 等技术实现完整性管理信息的动态展示、分析和发布等。

参 考 文 献

- [1] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31. 8S-2001 Managing system integrity of gas pipeline[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2001.
- [2] American Petroleum Institute. API 1160-2001 Managing system integrity for hazardous liquid pipeline[S]. Washington, D. C.: API Publishing Services, 2001.
- [3] Porter T R, Al-Nasser E. Pipeline integrity management at Kuwait oil company; 2006 ASME International Pipeline Conference, Calgary, AB, Canada, September 25-29, 2006[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [4] Hitchcock C, Sun J, Nishenko S, et al. GIS-Based seismic hazard mapping for pipeline integrity management; 2006 ASME International Pipeline Conference, Calgary, AB, Canada, September 25-29, 2006[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [5] Kutrowski K, Bos R, Piccardino J R, et al. Implementation of a pipeline integrity management system at TIGF (France)- The added value of the pipeline threats and mitigations module; 2008 ASME International Pipeline Conference, Calgary, AB, Canada, September 29-October 3, 2008[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [6] 王晓霖, 帅健, 左尚志. 长输管道完整性数据管理及数据库的建立[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(11): 45-47.
Wang Xiaolin, Shuai Jian, Zuo Shangzhi. Integrity data management and establishment of database in long-distance pipeline[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2008, 27(11): 45-47.
- [7] 马立平, 李允. 地理信息系统辅助油气管道安全可靠分析[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 126-129.
Ma Liping, Li Yun. Geographic information system-assisted safe reliability analysis of oil-gas pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 126-129.
- [8] 帅健, 党文义, 卜文平. 油气管道完整性评价与管理软件[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 108-110.
Shuai Jian, Dang Wenyi, Bu Wenping. Software for integrity assessment and management of oil and gas pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(5): 108-110.
- [9] Palmer J. Software project management, database utilization trends in pipeline integrity[J]. Pipeline and Gas Journal, 2004, 231(10): 30-31.
- [10] Park N, Sanders C. Transportation: Improved database management yields pipeline integrity benefits[J]. Oil & Gas Journal, 2007, 105(22): 62-65.
- [11] 帅健, 许葵. 腐蚀管线失效概率的评定方法[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 86-89.
Shuai Jian, Xu Kui. Assessment method for failure probability of corroded pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 86-89.
- [12] 帅健. 腐蚀管线的剩余寿命预测[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 89-93.
Shuai Jian. Prediction method for remaining life of corroded pipelines[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2003, 27(4): 89-93.
- [13] Muhlbauser W K. Pipeline risk management manual[M]. 3rd Edition. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004: 21-174.
- [14] 帅健, 张春娥, 陈福来. 腐蚀管道剩余强度评价方法的对比研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 122-125.
Shuai Jian, Zhang Chun'e, Chen Fulai. Comparison study on assessment methods for remaining strength of corroded pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 122-125.
- [15] 何东升, 郭简, 张鹏. 腐蚀管道剩余强度评价方法及其应用[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 126-128.
He Dongsheng, Guo Jian, Zhang Peng. Assessment method of remaining strength of corroded pipeline and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 126-128.
- [16] Liu Bing, Zhang Hong, He Renyang, et al. A new method for evaluating the performance of coatings on pipelines; 2006 ASME International Pipeline Conference, Calgary, AB, Canada, September 25-29, 2006[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007.

(收稿日期 2009-04-05 改回日期 2009-11-16 编辑 张 怡)