

北斗卫星定位系统支持下长输管道巡检系统设计探究

余国祯 褚 丰 (中石化石油工程地球物理有限公司北斗运营服务中心, 江苏 南京 211112)

摘 要: 长距离能源管道运输对于我国的能源应用而言有重要意义, 是实现能源有效供给的基础和前提。保障长距离能源管道的安全和稳定, 是实现能源有效供给的关键。文章首先分析了常见长输管道在巡检方式上的不足, 阐述了北斗卫星定位系统可以填补传统巡检方式不足的优势所在, 认为在北斗卫星定位系统的支持下可以实现长输管道系统的精准定位、泄漏点准确检测、全天候监督覆盖, 并进行了巡检系统的结构和模块设计。此系统设计可以有效改善长输管道巡检的智能化水平, 提升巡检效率、数据安全性、管道故障预测水平, 为能源长距离稳定运输提供保障。

关键词: 长输管道; 北斗卫星定位系统; 巡检系统; 设计

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 029-0120-04

Design and Exploration of Long distance Pipeline Inspection System Supported by Beidou Satellite Positioning System

Yu Guoyi, Chu Feng(Beidou Operation Service Center of Sinopec Petroleum Engineering Geophysics Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211112, China)

Abstract: Long distance energy pipeline transportation is of great significance for energy applications in China, and is the foundation and prerequisite for achieving effective energy supply. Ensuring the safety and stability of long-distance energy pipelines is the key to achieving effective energy supply. The article first analyzes the shortcomings of common long-distance pipeline inspection methods and elaborates on the advantages of the Beidou satellite positioning system in filling the gaps of traditional inspection methods. It is believed that with the support of the Beidou satellite positioning system, accurate positioning of long-distance pipeline systems, accurate detection of leakage points, and all-weather supervision coverage can be achieved. The structure and module design of the inspection system are also discussed. This system design can effectively improve the intelligence level of long-distance pipeline inspection, enhance inspection efficiency, data security, pipeline fault prediction level, and provide guarantee for stable long-distance transportation of energy.

Keywords: long-distance pipelines; Beidou Satellite Positioning System; Inspection system; design

GPS 等卫星定位系统服役时间较早, 已经在长输管道巡检等工业领域中得到较为广泛的应用。随着我国北斗卫星定位系统的不断建设和完善, 其在工业领域中也越来越多发挥出定位、数据传输等方面的应用价值, 成为促进工业领域技术升级的力量来源。

1 常见长输管道巡检方式

长输管道广泛应用于石油、天然气等能源的输送, 其线路往往穿越复杂的地形地貌, 如山区、沙漠、河流等。随着管道服役时间的增长, 管道可能会面临腐蚀、第三方破坏、自然灾害等威胁, 这些都可能导致管道泄漏、爆炸等事故。而深埋在城市地下的长输管道, 容易受到电流干扰、城建施工意外破坏, 不仅会造成巨大的经济损失, 还会对环境和人民群众生命财产安全造成重大威胁。所以, 如何及时发现和处理管道存在的问题, 如何确保管道处于安全运行状态, 成为长输管道巡检的重点。传统的长输管道巡检方式存在诸多不足, 如人工巡检、超声波、传感器、声发射、压力法、质量平衡法、基于神经网络的检测法等, 或多或少存在效率低、范围小、定位精度差、成本高、

安全性差的不足, 且难以实现对长距离管道的实时监控和全面覆盖。设计建立长输管道巡检系统, 将长输管道笼罩在监控覆盖之下, 进行全天候不间断数据获取, 成为为之努力的理想状态。

2 北斗卫星定位系统概述

北斗卫星导航系统是我国自行研制的全球卫星导航系统, 拥有自主知识产权, 可实现全天候实时精准服务。北斗系统具备几大优势: ①北斗卫星定位系统由 35 颗卫星组成, 系统覆盖范围广, 北斗三号定位精度达到 10m。②北斗卫星定位系统具备高定位精度和授时精度的同时, 还具备双向短报文通信功能, 保证信息传输的效率和准确性。③能够为集团用户提供大范围的远程监控、数据采集、数据传输等功能。④北斗卫星定位系统采用混合星座定位模式, 抗遮挡能力强, 在亚太等低纬度地区性能优秀, 对卫星的数量需求少, 花小钱办大事。⑤北斗卫星定位系统的兼容性强, 支持与其他卫星导航系统兼容, 支持终端设备同时使用北斗和 GPS 系统, 降低企业应用的成本。⑥北斗卫星导航系统是我国自行研制的全球卫星导航

系统, 安全保密程度高, 保证了企业的数据安全。长距离输送管道需要经常巡检, 及时发现泄漏点和安全隐患, 传统常规巡检方式的效率低、覆盖范围小、检测时间长、定位精度低, 北斗卫星定位系统可为长输管道提供泄漏点的精准定位, 可以通过北斗短报文通信技术实现管道状态数据、泄漏情况数据的精准传输, 优势可有效填补传统方式的不足。

3 北斗卫星定位系统支持下的长输管道巡检系统设计

3.1 北斗卫星定位长输管道巡检系统构成

基于北斗卫星定位系统的长输管道巡检系统, 包括北斗定位、泄漏点检测、云服务平台、用户终端等部分, 如下图 1 所示, 通过数据的融合完成对长输管道的 24h 全天候检测。

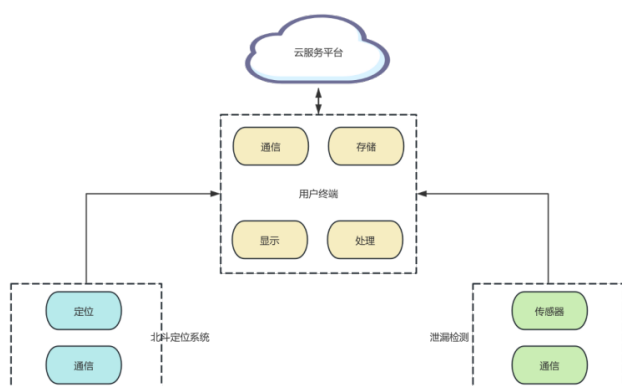


图 1 北斗卫星定位长输管道巡检系统

泄漏检测装置可以是传感器, 可以搭载传感器、检测设备的无人机或巡检机器人车等, 主要作用是循着长输管道所在路线进行管道内输送对象的检测、管道电位检测等作业, 及时发现和获取可能泄漏的点位信息, 并将所采集数据通过北斗卫星定位系统传输会管理平台。北斗卫星定位系统的主要作用是在泄漏检测装置发现泄漏点时, 向运维管理平台提供精准定位和检测装置要传输的泄漏情况相关数据。用户终端通过与系统的实时通信, 第一时间获取通过北斗系统传输来的泄漏情况和精准定位信息, 并依据信息赶赴泄漏点进行运维处理。长输管道的数据和泄漏信息、处理信息会实时上传到云服务平台, 保留历史数据供后续进行数据统计、整理。

3.2 长输管道泄漏风险因素识别

以城市燃气长输管道为例, 造成燃气管道泄漏的最常见原因是管道腐蚀, 然后是自然环境影响和人为因素破坏。管道腐蚀的出现与管道服役时间、工作环境、管道自身质量性能等均有关系。管道腐蚀的出现往往伴随着穿孔、断裂、泄漏。土地的自然沉降、气

象灾害等是影响管道的自然环境因素, 可能引发管道内燃气泄漏、管道破裂。城市内市政建设、房地产施工等社会活动, 往往是导致管道出现意外穿孔、断裂进而泄漏的主要原因。北斗卫星定位系统支持下的长输管道巡检系统需要具备识别风险因素, 判断管道故障类型及原因的能力, 为人工维护、排险提供更全面的预测和诊断辅助, 提高长输管道的运行稳定和安全。

国内外许多学者都尝试过建立城市燃气管道泄漏风险的评价模型, 用于综合分析燃气泄漏的可能性、预测故障类型。这种故障树模型为北斗卫星定位系统支持下的长输管道巡检系统提供了识别风险的模型支持。

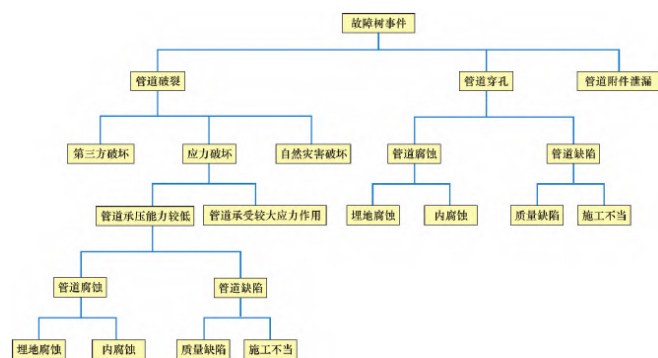


图 2 城市燃气管道泄漏故障树

3.3 北斗卫星支持长输管道巡检系统模块设计

3.3.1 终端采集模块：精准定位与数据获取的前端枢纽

①北斗定位子模块：北斗卫星导航系统的静态定位精度 $\leq 10\text{cm}$, 动态定位精度 $\leq 2\text{m}$ 。定位模块利用北斗的高精度定位功能, 为手持设备、无人机、智能机器人等巡检终端提供实时坐标信息, 并在平台上精准显示巡检轨迹, 便于后续追踪。巡检终端为集成北斗双模接收机, 兼容 BDS+GPS/GLONASS, 支持多频点信号接收, 可以提升山区、隧道等复杂环境中定位的稳定性。在无地面网络覆盖区域中, 终端可以利用北斗的短报文通信功能, 实现定位数据与巡检信息的应急回传。巡检人员手持终端参与巡检时, 可以通过定位模块获得实时定位, 确保巡检路线无盲区; 利用无人机、巡检机器人等远程巡检时, 可以利用北斗定位功能自主预设航线和路线, 实现自主巡检, 线路定位误差不会超过 5m。

②传感数据采集子模块：巡检终端可以通过应力传感器、温度传感器、泄漏检测传感器等提前部署的传感设备, 采集管道压力、温度、形变等本体数据; 通过摄像头、红外热成像仪等设备, 采集管道外观及周边环境的实时视觉数据。依赖北斗卫星定位系统的授时精度, 传感器数据与北斗时间同步, 并与高精度定位信息关联, 形成数据的“时空-状态”一体化同

步效果,确保数据可溯源、可准确追踪。

3.3.2 网络传输模块:数据流通的通信桥梁

①多网络融合传输子模块:多网络融合传输模块可以根据长输管道的巡检现场网络条件,自适应选择合适的传输链路,保障数据实时性与可靠性。在良好地面网络覆盖区里,采用 4G/5G、Wi-Fi 传输,在带宽 10Mbps 以上网络中可以确保高清视频与实时数据的高速传输。巡检终端搭载 ATK-LORA-01 芯片,相同能耗下可使通信模块比普通无线射频的通信范围扩大 3~5 倍,尤其适合巡检无人机在空中巡检时获取、传输数据。在弱网络或无网络区里,模块自主切换到北斗短报文链路,进行单次通信容量不超过 120 汉字的数据传输,或利用卫星通信链路完成数据传输,传输过程中优先传输定位坐标、告警信息等关键数据。M100 芯片是一款常见的拓展兼容北斗网络的插针式、小体积、低功耗终端模块,无需巡检人员做复杂的设置和操作,就能够方便使用远程、无线、网络化的北斗短报文通信。这款芯片可以支持巡检无人机在空中飞行时实时将信息通过北斗卫星进行传输,有效提升弱网络或无网络区的信息传输效率。



图 3 M100

此外,模块还需设计数据缓存机制和空间,用于存储时网络中断的本地数据,存储容量需大于 1TB。模块还需有网络恢复后自动续传数据的功能,保证数据流通效率。

②数据加密与安全子模块:为了防止定位、告警信息等关键数据在保障传输过程中被恶意篡改或泄露,提高数据的完整性与安全性,可采用国密 SM4 算法对数据进行加密,加密速率不应低于 100Mbps。为了保证公共网络中的数据传输通道安全,可部署 VPN 虚拟专用网络,用双向身份认证提高数据安全系数。

3.3.3 平台处理模块:数据智能分析的核心引擎

①北斗定位数据处理子模块:巡检过程中获取的原始定位数据不可避免存在谐波等干扰因素,影响定位精度和数据可用性。平台处理模块可优先进行滤波、纠偏、融合,提升数据精度和质量。卡尔曼滤波算法

可以消除定位噪声,提高动态定位误差至 1m 以内。北斗定位数据与地理信息系统 GIS 数据对比,可以对定位点进行空间匹配,自动识别巡检终端是否进入危险区域,提高对巡检人员的安全防护等级。轨迹异常检测模型可以结合历史巡检轨迹库和机器学习算法,识别巡检终端是否出现了漏检、误检行为,辅助提高巡检数据的获取准确度。

②管道状态智能分析子模块:管道状态分析是实现管道故障的早期预警与智能诊断的基础,模块功能实现依赖于多源数据的综合应用分析。传感器数据、历史维修记录、巡检红外视频自动识别数据等是重要的数据来源,也是建立三维管道数字孪生模型的基础。基于多源数据和模型,可以利用神经网络算法预测管道泄漏、腐蚀等风险,可以利用北斗卫星定位系统完成“物理管道-虚拟模型”实时映射,让巡检人员可以远程、无视土层阻碍直观展示管道状态变化,提前预判管道潜在的故障和问题。

3.3.4 应用展示模块:人机交互与决策支持的可视化界面

①北斗-GIS 可视化子模块:基于北斗定位和 GIS 系统的融合,实现管道及巡检信息的空间化、动态化展示。系统采用 Web GL 技术构建三维管道地理信息模型,支持从 1:100 到 1:10000 多尺度浏览,实时显示巡检终端、设备的三维位置分布;设计时空数据看板,巡检人员可以通过拉动时间轴、叠加地图的方式查看历史巡检轨迹,了解管道过往告警事件的分布,了解长输管道相对脆弱的部位,提高巡检工作的质量和效率。系统支持按定位区域快速检索数据的功能,检索响应时间可以缩短到 3s 以内。

②移动巡检应用子模块:系统应用层为巡检人员提供移动端操作入口,支持巡检人员通过终端进行任务接收、数据采集与现场交互等操作。终端可以支持离线地图下载;支持获取来自北斗定位自动推送的附近管道巡检项目清单,支持清单逐项检查以避免漏检;支持现场拍照、标注、上传功能,照片的定位误差可以在 5m 以外。

3.3.5 管理与运维模块:系统运营的支撑保障

①巡检任务管理子模块:巡检人员可以通过终端系统制定巡检计划、分配巡检任务、追踪巡检进度的全流程管理;也可以根据巡检任务、巡检计划自动生成巡检路线,系统优化后的路径巡检效率可以比人工设定路径提高 30%。巡检人员还可以根据路线分配小组人员,实时监控各个巡检点的任务完成情况,对超时未检区域触发告警,结合定位数据、巡检任务、管道情况追溯原因。

②系统运维管理子模块：巡检系统的稳定运行关键在于硬件、软件及数据的稳定运行。系统部署北斗设备状态监测模块，可以实时监控接收机、天线等硬件的工作参数，通过信号强度、功耗等数据预测判断监测设备出现故障的概率。系统还建立了数据备份、恢复机制，每小时对北斗定位数据、管道状态数据进行异地灾备，确保数据连续、准确、可靠性。

4 北斗卫星定位系统支持下长输管道巡检系统应用前景

北斗卫星定位系统作为我国自主研发卫星系统，必将在各行各业中越来越多发挥作用和优势，而多产业方向的应用也比较助推我国自主产权卫星发展得更长远。基于北斗卫星进行定位的长输管道巡检系统，有助于我国流体长距离输送管道巡检的智能化，对我国相关能源运输领域的发展有重要意义。巡检系统借助北斗卫星实现了通信技术、定位技术的拓展和兼容，增加了数据采集和传输的通道，避免了单一数据来源影响数据准确性，也避免了单一数据传输通道影响数据传输的安全和效率，使长输管道的运维具有数据方面的优势。

5 结语

综上，北斗卫星定位系统可以为长输管道的巡检

系统设计实现提供技术支持，解决传统管道巡检系统的不足。文中首先分析了常见长输管道在巡检方式上的不足，阐述了北斗卫星定位系统可以填补传统巡检方式不足的优势所在，然后从巡检系统的构成、风险因素识别故障树、5个主要系统模块设计进行阐述，希望系统未来可以有更好地发展应用前景。

参考文献：

- [1] 明桂嘉, 欧美娅, 罗艺, 等. 基于北斗的无人机氢气运输管道巡检系统 [C]// 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十四届中国卫星导航年会论文集——S01 卫星导航应用. 成都信息工程大学资源环境学院; 2024: 8-17.
- [2] 周中伟, 龚小飞, 黄强, 等. 基于北斗精准定位技术的城市燃气管道泄漏检测方法 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2022, 39(06): 50-53.
- [3] 刘雨晴, 米烨彤. 北斗精准服务在燃气领域应急管理的应用与展望 [J]. 卫星应用, 2022, (05): 46-52.
- [4] 王杰. “北斗”卫星技术天然气管线智能巡检系统 [J]. 广东蚕业, 2019, 53(1): 2.
- [5] 喻海榕, 陈钧, 李莲香, 等. 基于北斗卫星定位系统的双模数传输卤管道巡检系统 [J]. 油气田地面工程, 2019, 38(7): 5.

