

油气运输管道智能调度技术研究

薛傑文 江俊杰 马海文 沈 睿 (龙泉驿华油兴能天然气有限公司, 四川 成都 610000)

杨诗怡 (四川华油集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 全球能源格局中, 油气管道运输至关重要, 自然经济增长与能源需求变化使其面临压力, 传统调度有局限, 智能调度借助物联网等技术, 实现全流程智能运作, 可精准感知、分析与决策, 优化运输各要素, 高效应对突发, 推动行业智能化发展。基于此, 本文将结合油气运输管道智能调度技术关键要素, 针对油气运输管道智能调度模型与算法进行全面分析, 进而针对油气运输管道智能调度系统设计与实现展开研究, 旨在为相关人员提供参考帮助。

关键词: 油气运输管道; 智能调度技术; 模拟; 设计与实现

0 引言

在全球能源格局里, 油气资源极为重要, 油气管道运输因高效等特性成为长距离输送首选, 但随着经济发展与能源需求变化, 其面临输送效率、市场响应等压力。传统人工与简单自动化调度有局限, 无法处理海量数据、应对突发状况。智能调度技术借助物联网等兴起, 可实现全流程智能化, 构建预测与优化模型, 应对事故并优化成本、效率与能耗。其研究应用对企业与国家能源安全意义重大, 本研究将深入探索关键环节以推动行业智能化发展。

1 油气运输管道智能调度技术关键要素

1.1 数据感知与采集技术

压力传感器依据管道压力范围与精度要求选型, 中低压管道选用扩散硅压力传感器, 特殊高压长输管道则以蓝宝石压力传感器为佳, 其能精准适配不同压力环境。流量传感器依管道口径和流体特性而定, 涡轮流量计适合清洁单相且流量适中管道, 电磁流量计针对具导电性的原油管道效果显著, 超声波流量计利于大口径管道测量。

温度传感器选用上, 中低温管道常采用铂电阻温度传感器, 高温管道如加热输送原油管道则选取热电偶温度传感器。管道沿线分支点、合流点布设传感器监测流量分配与压力平衡, 长距离直线段每 20–50 km 设压力和温度传感器分段监控。

1.2 数据传输与通信技术

数据传输网络架构采用分层设计, 感知层运用 ZigBee 等低功耗短距离无线技术构建传感器网络, 如泵站内传感器以 ZigBee 组网传数据至采集节点, 通过冗余节点和自愈网络保障可靠性。传输层依场景选光

纤、4G/5G 或卫星通信等构建混合网络, 如城市周边用光纤与 4G/5G 结合, 偏远地区则卫星与光纤骨干网配合, 同时优化网络拓扑与流量管理, 如环形光纤网络保障可靠性, 流量整形使重要数据优先传输。核心层以高性能以太网交换机和服务器集群处理、存储和分发数据, 并利用防火墙、IDS 与数据备份恢复技术保障安全稳定。

通信协议选择方面, 局域网络常用 PROFINET 等工业以太网协议, 其有高带宽、低成本等优势且兼容性好, 如泵站自动化控制, 但安全性弱, 需加强防护; 无线通信协议依场景而定, 低功耗短距离用 ZigBee 等, 长距离高速率用 4G/5G 等, 且无线协议需抗干扰并加密与认证保障安全, 如 4G/5G 用 AES 加密、SIM 卡或数字证书认证。安全加密技术方面, 敏感数据用 AES 对称加密, 非对称的 RSA 用于数字签名与密钥交换, 未来抗量子计算的 QKD 技术也有应用前景^[1]。

1.3 数据处理与分析技术

海量数据清洗、整理与存储方面, 数据清洗针对噪声数据, 压力的可设阈值结合移动平均法, 流量的用中值滤波算法处理; 异常值检测靠模型结合多数据综合判断, 传感器漂移致异常则定期校准; 重复数据依时间戳等标识去除。整理与结构化时, 数据标准化统一格式与编码, 分类编码后构建目录存储。基于大数据分析, 时域特征提取压力、流量均值等及自相关函数, 频域特征用傅里叶变换的频率成分等。规律挖掘中, 关联规则挖掘如压力流量关系, 设备状态与运行参数关联, 助力调度决策与故障预防; 聚类分析依管道路段或设备故障类型分组, 以便制定差异化策略与了解故障规律。

2 油气运输管道智能调度模型与算法

2.1 管道运行状态预测模型

数据预处理时,先对流量、压力时间序列数据进行平稳性检验,如 ADF 检验,不平稳则差分处理并再次检验,同时修正异常值,进行标准化(Z-Score 法)或归一化,使数据量纲统一,便于模型训练。模型选择与训练方面,平稳数据可选 ARMA 模型,通过 ACF 和 PACF 确定自回归阶数 p 和移动平均阶数 q 用最小二乘法估计系数并训练,以 MSE、MAE 评估,经训练集、验证集和测试集优化参数。非平稳数据经差分平稳后采用 ARIMA 模型,确定差分阶数 d 后同理训练评估^[2]。

在管道故障预测中,特征工程提取压力、流量变化率等动态特征及交互特征,整理历史故障数据并编码分类特征。模型构建与训练时,神经网络如 MLP 依特征确定输入层节点数,设多层隐藏层学习非线性关系,输出层依故障类型确定节点数并用 softmax 转换,以反向传播和 SGD 等优化算法训练。时间序列相关预测可用 RNN 及其变体,如 LSTM 处理时序信息。SVM 则组合特征向量,选 RBF 核函数映射高维空间,调参训练,以准确率、F1 值等评估对比择优。

精度评估有定量指标 RMSE 和 MAPE,以及定性的预测值与真实值对比图和相关系数。自适应调整机制包括模型参数更新,如 ARIMA 用 RLS 算法、神经网络用自适应学习率算法,还可定期重新训练;也可依精度和新数据特征优化模型结构,如神经网络加正则化或调整结构,ARIMA 转 SARIMA 以提升精度与适应性。

2.2 智能优化调度算法

基于线性规划构建基本调度模型,目标函数有成本最小化,即,遗传算法应用时,编码与初始化环节,可采用二进制或实数编码。以二进制编码为例,为管道网络流量控制节点编码,染色体长度由节点数与编码位数确定。初始种群随机生成,二进制编码基因位随机取 0 或 1,实数编码在参数允许范围取值。适应度函数设计方面,成本最小化时,输送量最大化时,多目标可线性加权或用其他多目标方法,且对违反约束染色体惩罚。

遗传操作与进化中,选择操作有轮盘赌、锦标赛等;交叉操作如单点交叉交换父代染色体;变异操作依概率改变基因值。通过多次操作使种群进化,逼近最优调度方案。模型与算法设有实时更新与动态调整机制,数据驱动模型更新借助传感器网络实时监测

采集数据并预处理,定期重新估计调度模型参数并调整遗传算法参数。事件触发的算法调整在故障事件处理时,依故障改约束条件后重启遗传算法求解,可预测故障提前规划;市场需求变化时,依需求数据改目标函数或约束条件,重新求解调整泵站和管道流量分配^[3]。

2.3 应急调度决策模型

基于传感器数据的实时监测中,压力与流量异常监测通过沿线布置传感器,设定阈值,如某输油管道正常压力 3MPa-5MPa、流量 100m³/h-150m³/h,超出范围则报警,借助数据滑动窗口分析均值、方差等统计特征辅助诊断。声学振动监测利用传感器采集信号,依据泄漏产生特定频率(如 20kHz-100kHz 声波)和振动幅度建立正常模型,对比差异判断泄漏,再经傅里叶变换、小波分析等频谱分析精准定位。故障定位算法方面,基于压力波传播,依据压力波在管道两端传播时间及已知速度和管道长度计算故障点位置,如某 100km 管道,压力波速度 1000m/s,两端传感器接收时间差可算出故障距离;同时考虑衰减反射修正模型,复杂网络采用多传感器协同定位。

基于信号特征匹配则利用预先建立的特征库,当实时信号与库中特征匹配度达标确定故障,也可借助 SVM、神经网络等机器学习算法分类定位。应急资源需求评估时,维修材料与设备需求依故障类型和程度而定,小泄漏用密封胶、卡子等简单材料,大泄漏或破裂需新管道、焊接设备等,并结合管道规格材质调整。

3 油气运输管道智能调度系统设计与实现

3.1 系统总体架构设计

在管道沿线关键处设压力、流量、温度等传感器,如压力传感器每秒采集数据监测异常,长距离复杂地形采用分布式布局并保证传感器高可靠性。泵站、阀门等设备安装状态传感器,如泵机的振动、轴温、功率传感器,阀门的开度、扭矩传感器,数据经有线或无线(如 WSN 技术)传至采集中心。数据传输与预处理方面,骨干传输用光纤网络,偏远或临时点用 4G/5G 无线网络,且设冗余网络与加密处理保障可靠安全。

数据存储与管理层,实时数据库选 InfluxDB 等,依时间序列数据模型分布式存储管道实时运行和设备状态数据,优化存储结构并设保留策略,关系数据库用 MySQL 等存储管道基础、设备、用户、调度策略

等结构化数据,规范化表结构设计并建索引。数据管理与维护包括定期备份实时与关系数据库,增量与全量结合且异地存储,同时验证恢复测试确保可用性。

3.2 功能模块详细设计与实现

油气运输管道智能调度系统功能模块涵盖数据采集、智能调度、数据存储与管理、用户交互,数据采集功能模块中,传感器数据采集子模块针对各类传感器开发适配硬件接口与驱动程序,如压力传感器依通信协议实现连接、采集与数据转换,经优化提高效率与稳定性,同时创建数据采集线程管理数据读取、处理与存储,保障及时性。数据传输子模块依据系统网络架构与传输需求选定如 TCP/IP、UDP 等网络通信协议并实现,加以优化提升性能且采用加密技术与身份认证保障传输安全。

智能调度功能模块里,优化调度子模块构建基于线性规划和遗传算法的模型,确定目标函数与约束条件后编写代码求解并可动态调整。应急调度子模块结合规则与模型进行故障诊断与报警,利用机器学习自学习优化,依据诊断结果生成应急方案并能实时调整执行。

数据存储与管理功能模块的数据库操作子模块设计统一且具有通用性与扩展性的数据存储与查询检索接口,通过多种优化手段提升存储与查询效率。数据备份与恢复子模块制定全量与增量备份策略并执行,验证备份数据,设计恢复机制以应对数据库故障。用户交互功能模块的可视化界面子模块采用分层布局与模块化设计,展示管道多方面信息并遵循人机工程学原则,实现数据动态更新与交互功能。

3.3 系统集成与测试

硬件集成方面,传感器与数据采集设备集成需确保连接稳固正确,如对 RS485 接口传感器检查多方面连接设置并单独测试功能,需优化通信参数与采样频率。数据采集设备与服务器集成应保障连接可靠,测试数据传输并监控,出现问题借助网络抓包工具分析调整。软件集成中,功能模块集成依架构确定接口规范与数据交互格式,测试交互情况并关注协同工作能力与性能表现,系统软件与第三方软件集成则先研究 API 文档再进行兼容性测试。

系统测试包含多个层面,单元测试里数据采集功能模块对传感器数据采集子模块和数据传输子模块分别测试,前者针对不同传感器驱动测试功能与异常处理,后者测试不同网络环境传输可靠性且采用测试

驱动开发理念,智能调度功能模块对优化调度子模块和应急调度子模块构建场景测试并利用代码覆盖率工具。集成测试包括功能模块集成测试,重点检测模块协同工作能力,排查接口问题与性能瓶颈,系统整体集成测试置于模拟真实环境,考察稳定性、可靠性、适应性与可扩展性。

4 结语

总而言之,在油气运输管道智能调度技术的探索历程里,从理论构建到系统实践,涵盖数据采集、智能算法、集成测试等多方面,为管道高效安全运行筑牢根基。其突破提升运输效率、降低成本与能耗,增强安全性可靠性,面对复杂需求与环境能灵活应对,推动油气行业可持续发展。随着新兴技术革新,仍需融合前沿技术,攻克极端环境数据采集、大规模网络调度算法优化等难题,注重系统协同与智能化深化,助力能源行业迈向智能化新征程。

参考文献:

- [1] 杜雷. 油气生产物联网在油气输送管道中的应用 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(4):68-71.
- [2] 邵奇, 梁永图, 田中山. 基于模糊 PID 的长输管道调节阀压力控制系统研究与仿真 [J]. 油气田地面工程, 2023, 42(12):1-7.
- [3] 丛瑞, 冯骋, 沈晨, 王秀宇, 黄申, 刘恩斌. 油气管道数字孪生技术应用 [J]. 油气田地面工程, 2022, 41(10):108-113.

作者简介:

薛傑文 (1991—), 男, 汉族, 重庆永川人, 本科, 工程师, 研究方向: 油气储运。

江俊杰 (1994—), 男, 汉族, 四川南充人, 本科, 工程师, 研究方向: 油气储运。

马海文 (1992—), 女, 汉族, 四川遂宁人, 本科, 工程师, 研究方向: 地面建设。

杨诗怡 (1989—), 女, 汉族, 四川成都人, 硕士, 工程师, 研究方向: 油气储运。

沈睿 (1989—), 女, 汉族, 四川资中人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 油气储运。