

# 长输管道电气系统及输油站自动化应用策略

柳尧松（山东联合能源管道输送有限公司，山东 烟台 264000）

**摘要：**输油气管道是能源运输的重要方式，随着其输油的自动化水平不断提高，管道电气系统及输油站自动化技术也得到了广泛应用。基于大量文献阅读与长输管道设计方案的分析，对两套系统技术架构以及其在长输管道运行期间的应用策略进行探讨，最终形成智能化、系统化的长输管道运行管理体系。期望本文可为我国石油天然气产业提供技术借鉴、参考价值，推进长输管道智能化升级，为产业可持续发展提供技术维度的保障。

**关键词：**长输管道；输油站自动化；SCADA；电气系统

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 022-0100-03

## Application strategy of electrical system for long-distance pipelines and automation of oil transmission stations

Liu Yaosong(Shandong United Energy Pipeline Transportation Co., Ltd. Yantai Shandong 264000, China)

**Abstract:** Oil and gas pipelines are an important way of energy transportation. With the continuous improvement of their automation level in oil transportation, pipeline electrical systems and oil station automation technology have also been widely applied. Based on extensive literature review and analysis of long-distance pipeline design schemes, this paper explores the technical architectures of two systems and their application strategies during the operation of long-distance pipelines, ultimately forming an intelligent and systematic long-distance pipeline operation management system. It is expected that this article can provide technical reference and reference value for China's oil and gas industry, promote the intelligent upgrading of long-distance pipelines, and provide technical support for the sustainable development of the industry.

**Keywords:** long-distance pipelines; Automation of oil transportation stations; SCADA; electrical system

长输管道运行期间，电气系统与输油站的自动化应用，不论是对于管道安全、稳定性而言或是运营维护便捷性而言都至关重要。其一，电气系统的应用，可以确保管道持续供电、稳定运行，有效降低因电力故障所带来的停运风险。输油站自动化技术，则可以通过实时监测、远程控制管道状态实现管道运行期间的无人值守、少人值守，在增强安全性能同时节约人力成本、运营维护成本。其二，电气系统与输油站自动化技术的应用，能够全面提升管道事故的响应速度，减少管道事故可能引发的环境污染、经济损失，并为降低运营成本提供进一步的数据支持。

### 1 长输管道电气系统与输油站自动化系统概述

#### 1.1 长输管道电气系统

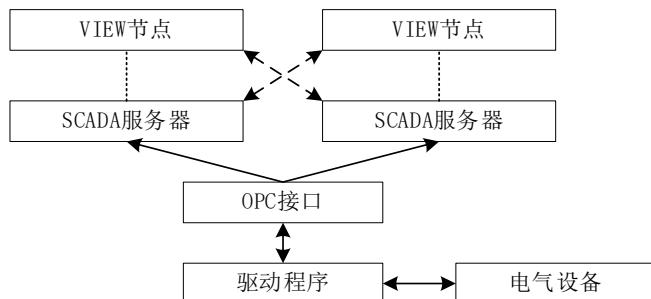


图 1 长输管道电气系统技术图谱结构

长输管道电气系统作为实现油气输送期间管线全链路电力保障、智能控制的核心基础架构，整个电气系统拓扑结构下覆盖VIEW节点、SCADA服务器、OPC接口、驱动程序以及各类电气设备，多个结构联合形成“数据采集→传输→决策→执行”的闭环电气控制体系。图1为长输管道电气系统技术拓扑结构。

#### 1.2 输油站自动化系统

##### 1.2.1 模拟仿真自动化模块

模拟仿真自动化模块是基于动态机理模型（CFD流体仿真、LNG相变模型）等技术构建的“数字孪生”系统，通常硬件覆盖了实时计算服务器、三维可视化引擎。该模块主要应用场景第一是新工艺的验证，第二是输油设备选型优化，第三是支持应急演练，如模拟管道泄漏扩散事件等。

##### 1.2.2 SCADA系统自动化模块

SCADA模块下集成了集成冗余PLC、工业交换机，专门负责执行闭环控制体系以及开展联锁保护。SCADA自动化模块的核心功能包括输油泵联锁控制、油罐液位安全联锁、火气系统联动。

##### 1.2.3 数据管理模块

数据管理模块以分布式时序数据库为核心机构，存储容量通常达PB级。该模块关键技术包括数据压

缩算法、时序数据异常检测以及数据湖架构，可支持关于长输管道安全管理中的管线数据、资产数据管理。

#### 1.2.4 应急管理模块

应急管理模块采取“感知→决策→处置”三级响应机制，模块会通过边缘端部署的振动传感器、红外热成像仪等设备对管道腐蚀、泄漏等故障进行实时监测。该模块配合 ESD 执行端联动系统，一旦出现安全事故，应急模块可被自动触发，紧急切断油气运输，降低泄漏量与安全风险发生概率<sup>[1]</sup>。

### 2 长输管道电气系统与输油站自动化系统的应用策略

#### 2.1 长输管道电气系统应用策略

##### 2.1.1 VIEW 节点的分层数据处理原理

VIEW 节点的布置，可基于边缘计算架构在管道沿线阀室、泵站部署，专门负责实现数据预处理、本地决策、协议转换功能。一方面，对于对协议转换机制，可采用 OPC UA 协议（如 over TLS 1.3 工业通信协议），将电气系统下的 RTU 设备 Modbus RTU 数据向标准化的 ISON 格式转换。例如，针对长输管道沿线的温度传感器，在传感器采集数据后，可将 4~20mA 电流信号利用 ADC 进行转换，随后基于 OOC UA 服务器向 SCADA 系统发送。另一方面，对于 VIEW 节点的本地逻辑闭环控制，可围绕 IEC 61850-7-4 标准开发“紧急切断逻辑”，专门用于异常数据的快速识别。例如，VIEW 节点检测到长输管道沿线某压力变送器数据中管道压力  $> 3.5 \text{ MPa}$  时，此刻快速通过电液联动执行机构关闭阀门。控制逻辑，可使用有限状态机（FSM）模型，将状态转移条件同长输管道的压力参数、流量信号进行动态绑定<sup>[2]</sup>。

##### 2.1.2 基于 SCADA 服务器的数据融合处理与安全防护

长输管道电气系统运行阶段，可基于 SCADA 服务器实现 RTU、PLC 等多源数据的融合处理，同时部署基于深度学习的入侵攻击检测功能。多源数据融合方面，SCADA 可以集成电器系统下 PLC 模块、RTU 模块以及来自传感器获取的气象数据，如风速数据、湿度数据等，形成长输管道参数运行的动态模型。这一过程，使用卡尔曼滤波算法，在 VIEW 节点实现数据标准化处理后对多源数据进行信号降噪，有效提升信噪比 10~12dB。安全防护机制方面，可在 SCADA 服务器内部署基于 DNN 深度学习模型的入侵检测功能，对数据网络流量特征进行实时分析。

##### 2.1.3 基于 OPC 接口的协议适配

基于 OPC 接口的协议适配，是利用协议转换引擎来解决电气系统下多个异构系统互连的问题，实现各系统的无缝连接。具体实现期间，首先，利用协议栈

映射技术，围绕 IEC 61850（智能电力系统通用标准）标准，将 DCS 系统生成的 AO 信号向 SCADA 系统下的 AI 通道映射。例如，DCS 输出 4~20mA 的电流信号，让该信号经过 OPC DA 接口后转换为 Modbus RTU 寄存器值，实现数据无缝映射。其次，使用时钟同步强化功能，围绕 IEEE 1588 协议（主从同步系统协议），使用 GPS 时钟源同步电气系统拓扑结构下全网电气设备的时钟，同步后确保精度达  $\pm 1 \mu\text{s}$  水平。最后，使用边缘计算卸载功能，通过 MQTT 协议向云平台推送预处理、聚合后的数据，例如针对某一条长输管道每小时油品流量均值进行计算，设置 3600s 计算周期，这一过程中数据压缩率将达到  $> 60\%$ ，有效降低数据传输对广域网带宽的占用率。

##### 2.1.4 驱动程序与电气设备的协同控制原理

驱动程序层，负责通过硬件资源优化配置来实现对电气设备的精准控制，这一过程下的核心功能涉及变频器动态调速、防爆设备冗余供电、设备状态数字孪生。首先，系统对于变频器的动态调速，主要依据 ABB ACS880 驱动器的 FOC 磁场定向控制方法，对离心泵转速进行实时调节。例如，在系统判断某长输管道下输油量下降 20%，此刻启动驱动程序，控制变频器进入 V/f 模式从而节约能耗。这一过程中，主要控制参数集中于转矩补偿系数、磁通感测器增益。其次，防爆设备冗余供电实现逻辑下，需为电气系统下电液执行机构配置双路 UPS 电源，随后利用二极管 ORing 电路实现毫秒级切换，保证在管线突发事件下实现快速切断。最后，设备状态数字孪生，是利用部署在控制中心的 PI System 数据库建立电动机寿命预测模型，通过对电动机运行期间的振动频谱分析来提取轴承故障特征频率，如  $\text{BPFO}=0.4 \times \text{RPM}$  等，从而实现提前预警电动机轴承的磨损故障。

##### 2.1.5 长输管道电气系统核心配置推荐

结合当前石油天然气公司长输管道的建设规模、输油需求以及管理需求，建设电气系统期间，推荐参照表 1 进行设备配置<sup>[3]</sup>。

### 2.2 输油站自动化系统应用策略

#### 2.2.1 模拟仿真自动化模块

模拟仿真自动化模块，可以通过动态机理模型（流体仿真、设备热力学模型等）实现长输管道的工艺优化、设备选型验证。具体应用期间，石油天然气企业可基于仿真软件建立油品混输模型，随后在模型内输入油品黏度、温度、流速等一系列关键参数，软件自动预测顺序输送时混油截面的位置（误差  $< 3\%$ ）。例如，长输管道原油顺序输送中，可在模拟不同流速下混油扩散规律的基础上，指导石油天然气公司优化

表 1 长输管道电气系统推荐核心配置

推荐设备类型	关键配置参数	性能指标
VIEW 节点设备	ARM Cortex-A72 处理器 (存储 128GB)	数据预处理延迟 $\leq 50\text{ms}$
OPC 网关设备	支持 IEC 61850/MQTT 协议	协议转换兼容率 $\geq 99\%$
SCADA 服务器	双路 Xeon Platinum 8380	吞吐量 $\geq 10$ 万点 /s
DCS 冗余 PLC	西门子 S7-1500R/H	切换时间 $< 1\text{s}$
ABB 变频器	3000kW 功率, 支持矢量控制模式	能耗降低 $\geq 20\%$

批次的切换时间窗口,有效减少混油损耗。与此同时,本模块的仿真结果可直接指导电气系统进行有效调度。例如,当模拟显示泵机组需降速运行,此刻利用 SCADA 系统自动触发变频器调节转速的驱动程序,同时 VIEW 节点对电机电流波动进行同步监控,确保各设备始终运行在安全范围内。

### 2.2.2 SCADA 系统自动化模块

SCADA 模块,可利用冗余 PLC 结合智能算法的形式实现工艺联锁控制。应用期间,可采用 Triconex SIL2 认证安全仪表系统,由石油天然气企业技术人员设定油罐液位、压力等关键参数连锁阈值。系统运行期间,若发现储油罐液位达到 90% 时,则自动触发收油阀关闭驱动程序,同时联动输油泵降频运行。关于同电气系统的联动,SCADA 系统可以直接控制电气设备开展各种动作。例如,系统当检测到管道压力出现异常时,此刻 SCADA 服务器立即向电液执行机构发送指令,触发紧急切断阀关闭。这一过程中,VIEW 节点亦会实时记录故障数据,并将数据同步至电气维护系统。

### 2.2.3 数据管理模块

数据管理模块的应用,旨在通过时序数据库+智能分析工具,对长输管线线路、资产数据实现高效管理。具体实现期间,数据管理模块会使用数据库存储全站的运行数据(温度、振动频谱等),利用孤立森林等算法实现异常数据快速识别<sup>[4]</sup>。例如,当系统识别到输油泵振动值超过阈值,此刻数据管理模块自动生成异常状态并对设备进行标记,一并生成维护工单发送至运维单位。

### 2.2.4 应急管理模块

应急模块,旨在通过“监测→决策→处置”三级响应机制来应对长处管道运行阶段的突发事件。这一过程,会在输油管道关键节点部署振动传感器、红外热成像仪,对管道腐蚀、泄漏等情况进行持续监测。一旦识别到管道泄漏时,系统基于贝叶斯网络模型快

速动态评估风险等级,并触发对应的风险等级预警(低、中、高)。对于同电气系统的联动,应急场景下,应急管理模块会联动电气设备的紧急操作。例如,一旦触发泄漏报警,应急管理模块识别事故后立即将数据同步至电气系统,电气系统自动切断区域电源,一并启动柴油发电机保障管线的应急照明<sup>[5]</sup>。

## 3 结语

综上,本文对长输管道运行阶段对电气系统、输油站自动化系统的应用策略加以探讨。在介绍两套系统架构基础上,对于电气系统,深度分析输油管道运行阶段对 VIEW 节点、SCADA 服务器、OPC 接口、驱动程序与电气设备协同控制的引用,并给出电气系统设计期间的推荐配置。对于输油站自动化系统,则针对模拟仿真自动化、SCADA 系统自动化、数据管理以及应急管理模块的具体应用加以探讨。石油天然气公司在建设长输管道期间,可借鉴本文进行电气系统、输油站自动化系统方案的优化,推进长输管道运行管理的“智能化”发展,保障管道运行的安全、稳定。

## 参考文献:

- [1] 徐冉. 基于新能源技术的石油平台电气设备漏电安全保护系统研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (01): 207-209.
- [2] 夏晨冷, 于明池, 李小磊, 等. 天然气长输管道系统的电气设备管理措施 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45(03): 32-33.
- [3] 张朋. 智能化技术在输油站数字化改造与无人值守输气站建设中的应用研究 [J]. 信息系统工程, 2025, (01): 58-61.
- [4] 夏照江. 长输管道站场防爆电气系统与雷电防护整合优化 [J]. 中国化工贸易, 2024, 16(14): 115-117.
- [5] 杨光, 任韩慧, 程亚刚. 提高输油管道企业 35kV 变电站电气设备预防性试验有效性的研究 [J]. 中国化工贸易, 2024(32): 100-102.