

# 天然气管道站场机械设备故障溯源与精准化维修技术

姬 航 (国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 天然气管道站场机械设备故障频发且成因复杂, 传统维修模式效率低下。本文系统研究天然气管道站场机械设备故障溯源与精准化维修技术, 梳理站场核心机械设备类型及常见故障模式, 构建“数据采集-特征提取-故障定位-原因溯源”的全流程故障溯源体系, 提出基于状态监测的精准化维修技术方案, 包括预防性维修、预测性维修及针对性维修策略。结合工程案例验证技术方案的可行性与有效性, 旨在提升天然气管道站场机械设备运维管理水平, 保障管网安全稳定运行。

**关键词:** 天然气管道站场; 机械设备; 故障溯源; 精准化维修; 状态监测

**中图分类号:** TE974 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 002-0130-03

## Traceability and Precision Maintenance Technology for Mechanical Equipment Failures in Natural Gas Pipeline Stations

Ji Hang (China Oil & Gas Pipeline Network Corporation Central China Branch, Wuhan Hubei 430000, China)

**Abstract:** Mechanical equipment failures in natural gas pipeline stations occur frequently and have complex causes, while traditional maintenance models are inefficient. This paper systematically studies the traceability and precision maintenance technology for mechanical equipment failures in natural gas pipeline stations. It outlines the core types of mechanical equipment in stations and their common failure modes, establishes a comprehensive fault traceability system encompassing “data collection, feature extraction, fault localization, and cause tracing,” and proposes a precision maintenance technology solution based on condition monitoring, including preventive maintenance, predictive maintenance, and targeted maintenance strategies. Combined with engineering case studies, the feasibility and effectiveness of the proposed technical solution are verified. The study aims to enhance the operational and maintenance management level of mechanical equipment in natural gas pipeline stations, ensuring the safe and stable operation of pipeline networks.

**Keywords:** natural gas pipeline stations; mechanical equipment; fault traceability; precision maintenance; condition monitoring

天然气管道站场作为连接气源与用户的关键节点, 承担着天然气加压、调压、计量、输送等核心功能, 其内部机械设备种类繁多结构复杂, 主要包括压缩机组、调压装置、阀门系统、计量设备等。这些设备长期在高压、高温、腐蚀性介质等恶劣环境下运行, 易出现磨损、泄漏、卡阻、精度下降等故障, 若故障未能及时发现并妥善处理, 可能引发天然气泄漏、爆炸等安全事故, 造成重大经济损失与生态破坏。当前我国天然气管道站场机械设备运维管理仍以传统定期维修模式为主, 该模式基于固定周期开展维修作业, 未充分考虑设备实际运行状态, 存在明显弊端: 一是过度维修现象普遍, 二是维修不及时问题突出, 三是故障溯源能力不足, 导致维修效率低下。精准化维修以设备实际运行状态为核心依据, 通过科学的故障溯源明确故障成因, 针对性制定维修方案, 可有效提升维修效率、降低维修成本。

### 1 天然气管道站场机械设备的常见故障模式

#### 1.1 压缩机组常见故障

压缩机组常见故障包括振动异常、温度过高、泄漏、异响等。振动异常主要成因是转子不平衡、轴承

磨损、联轴器不对中, 其中转子不平衡占比达 45%; 温度过高多由冷却系统故障、润滑油不足或变质导致; 泄漏主要发生在密封件处, 成因包括密封件老化、介质腐蚀、压力波动; 异响则多与部件松动、磨损间隙过大相关。

#### 1.2 阀门系统常见故障

阀门系统常见故障有卡阻、泄漏、开关失灵。卡阻主要是由于介质中的杂质沉积、阀门内部锈蚀导致, 在含硫天然气站场发生率较高; 泄漏分为内漏与外漏, 内漏多由阀座磨损、密封面损坏引起, 外漏则与密封件失效、螺栓松动相关; 开关失灵主要成因是执行机构故障、电气控制系统故障或机械传动部件卡滞<sup>[1]</sup>。

#### 1.3 流量计常见故障

流量计常见故障包括计量精度下降、无显示、数据波动大。计量精度下降主要是由于传感器污染、叶轮磨损、流速不稳定; 无显示多与电源故障、传感器损坏或线路故障相关; 数据波动大则成因包括介质压力或温度波动、管道内气流不稳定、传感器安装不当等<sup>[2]</sup>。

### 2 天然气管道站场机械设备故障溯源体系构建

构建“感知层-数据层-分析层-应用层”四层

故障溯源体系，各层级功能协同衔接，实现故障溯源的全流程覆盖：

### 2.1 感知层

感知层是故障溯源的数据基础，负责采集设备运行状态参数与环境参数。根据不同设备的故障特征，部署对应的传感器：压缩机组部署振动传感器、温度传感器、压力传感器、转速传感器；阀门系统部署位移传感器、压力传感器、扭矩传感器；调压装置部署压力传感器、温度传感器、差压传感器；计量设备（如流量计）部署流量传感器、压力传感器、温度传感器。同时，采集环境参数包括环境温度、湿度、腐蚀性气体浓度等，为故障成因分析提供支撑。传感器数据采集频率根据设备关键程度设定，核心设备关键参数采集频率不低于 10Hz，确保捕捉到设备运行的动态变化<sup>[3]</sup>。

### 2.2 数据层

数据层负责数据的传输、存储与预处理。通过工业以太网、无线传感网络等方式，将感知层采集的数据传输至数据中心，采用分布式数据库存储海量运行数据与历史故障数据。数据预处理包括数据清洗、数据标准化、数据融合等操作，去除异常数据、噪声数据，统一数据格式与单位，融合多源传感器数据，为后续分析提供高质量数据支撑。同时，建立设备全生命周期数据库，记录设备采购、安装调试、运行、维护、故障、维修等全流程信息，为故障溯源提供历史数据参考。

### 2.3 分析层

分析层是故障溯源的核心层级，通过特征提取与故障诊断算法实现故障定位与成因分析。特征提取是从预处理后的数据中提取与故障相关的特征参数，如压缩机组振动数据的峰值、有效值、峭度、偏度等时域特征，以及频谱分析后的频率特征；阀门系统的开关时间、扭矩变化率等特征。故障诊断算法采用“传统算法+智能算法”相结合的方式：传统算法包括阈值分析法、频谱分析法、小波分析法，适用于简单故障的快速诊断；智能算法包括神经网络、支持向量机、随机森林等，适用于复杂多因素导致的故障诊断。通过算法分析实现故障类型的识别与故障位置的定位，再结合设备结构原理、运行历史、环境参数等，深入分析故障成因。

### 2.4 应用层

应用层负责故障溯源结果的展示与应用。通过可视化平台，展示设备运行状态、故障预警信息、故障溯源结果，包括故障类型、故障位置、成因分析、责任认定等；生成故障溯源报告，为维修方案制定提供依据；同时，将溯源结果反馈至设备运维管理系统，更新设备故障模式库与维修知识库，持续优化故障溯

源算法与维修策略<sup>[4]</sup>。

## 3 天然气管道站场机械设备精准化维修技术方案

### 3.1 预防性维修技术

预防性维修技术，适用于设备关键部件存在潜在故障风险但尚未发生故障的场景。基于设备运行数据与历史故障数据，识别易损部件与潜在故障点，制定针对性的预防性维护计划。例如，针对压缩机组轴承磨损故障，根据轴承运行时间、振动数据、油液分析结果，在轴承达到临界磨损状态前进行更换；针对阀门系统密封件老化问题，根据密封件使用环境与运行时间，定期进行密封件检查与更换。预防性维修需严格控制维护周期与维护内容，避免过度维护，通过状态监测数据动态调整维护计划。

### 3.2 预测性维修技术

预测性维修技术，是精准化维修的核心技术，适用于设备运行状态可实时监测的核心设备。通过部署智能监测系统，实时采集设备运行参数，利用故障诊断算法预测设备剩余使用寿命，提前制定维修计划。例如，采用油液分析技术监测压缩机组润滑油中的金属颗粒含量水分粘度等指标，预测轴承、齿轮等运动部件的磨损状态；利用振动监测技术实时监测泵体振动数据，通过趋势分析预测泵轴磨损与叶轮不平衡故障；采用红外热成像技术检测阀门系统温度分布，预判密封件失效与内部泄漏故障。预测性维修可实现“故障早发现早处理”，最大限度缩短停机时间，降低维修成本<sup>[5]</sup>。

### 3.3 针对性维修技术

针对性维修技术，适用于故障已发生的场景，基于故障溯源结果制定个性化维修方案。根据故障类型、故障位置、故障成因，选择最优维修方式，包括部件更换、修复、调试、校准等。例如，对于压缩机组转子不平衡故障，若成因是积尘则进行转子清洁，若成因是磨损则进行转子修复或更换，之后进行动平衡调试。针对性维修需确保维修过程规范，维修后进行设备试运行与性能检测，验证维修效果。

### 3.4 精准化维修保障体系

为确保精准化维修技术有效落地，构建完善的保障体系：一是技术保障，加强智能监测设备故障诊断算法的研发与应用，提升故障溯源与维修决策的科学性；建立维修技术标准与规范，明确各类设备故障的维修流程、技术要求、质量标准。二是人员保障，组建专业的运维团队，加强运维人员的技术培训，提升故障溯源与精准化维修操作能力。三是信息化保障，搭建一体化运维管理平台，实现数据采集、分析、故障溯源、维修决策的信息化、智能化，打通各环节数据壁垒，提升运维管理效率。

## 4 工程案例

### 4.1 工程概况

某天然气管道压气站承担着天然气长距离输送的加压任务，站内核心设备为4台离心式压缩机组，型号为API 617，单机功率15MW，运行压力10MPa，运行温度80℃。该站场投入运行5年来，压缩机组多次出现振动异常温度过高故障，传统维修模式下，故障定位时间平均为8h，维修停机时间平均为24h，维修成本较高，且故障反复发生。为解决上述问题，该站场引入本文提出的故障溯源与精准化维修技术体系，开展设备运维升级改造。

### 4.2 故障溯源与精准化维修实施

首先，在压缩机组关键部位部署振动传感器、温度传感器、压力传感器、转速传感器，共24个，搭建数据采集与分析平台，实现运行参数的实时监测与数据存储；建立压缩机组全生命周期数据库，整合设备采购、安装调试、运行维护、故障维修等历史数据。

2024年8月，监测系统发出压缩机组#2振动异常预警，振动峰值达4.5mm/s，超出正常阈值3.0mm/s。启动故障溯源流程：数据采集阶段，采集#2机组转子、轴承、联轴器等部位振动数据，同步采集转速、温度、压力等参数；数据预处理后，提取振动数据的时域特征与频域特征，发现振动峰值对应频率为50Hz，与转子不平衡特征频率一致，初步定位故障为转子不平衡；结合设备运行记录与油液分析结果，发现机组已连续运行6个月未进行转子清洁维护，油液中粉尘含量超标，判断故障成因为转子积尘导致不平衡。

基于故障溯源结果，制定针对性维修方案：采用在线清洗技术对转子进行清洁，无需拆卸机组；清洗完成后进行转子动平衡调试；同步检查空气过滤系统，更换过滤精度更高的滤芯，避免粉尘再次进入机组。维修过程耗时4h，较传统维修模式缩短20h。

同时，基于监测数据与历史故障数据，对压缩机组易损部件制定预防性维护计划：轴承每运行8000h进行油液分析与振动监测，根据结果判断是否更换；空气过滤系统每3个月检查一次，每6个月更换滤芯；转子每6个月进行一次清洁维护。

### 4.3 实施效果分析

引入故障溯源与精准化维修技术体系后，该站场压缩机组运维效果显著提升，具体成效对比数据如表

表1 实施效果

评价指标	实施前(年均)	实施后(年均)	改善幅度
故障发生次数	12次	3次	75%
故障定位平均时间	8h	1.5h	81.25%
单次维修平均停机时间	24h	4h	83.33%
年均维修成本	120万元	45万元	62.5%
设备平均运行效率	85%	96%	12.94%

1所示。

从表1可以看出，实施故障溯源与精准化维修技术后，该站场压缩机组故障发生次数大幅减少，故障定位时间与维修停机时间显著缩短，维修成本降低62.5%，设备运行效率提升至96%。同时，故障反复发生的问题得到有效解决，保障了站场的安全稳定运行。该案例验证了本文提出的故障溯源与精准化维修技术体系的可行性与有效性，为同类天然气管道站场机械设备运维管理提供了实践参考。

综上所述，天然气管道站场机械设备故障溯源与精准化维修技术是提升站场运维管理水平、保障管网安全稳定运行的关键支撑。本文通过系统研究，得出以下主要结论：一是天然气管道站场核心机械设备常见故障模式多样，成因复杂，主要与设备磨损、介质腐蚀、压力波动、维护不当等因素相关，需建立科学的故障溯源体系实现精准归因；二是构建的“感知层-数据层-分析层-应用层”四层故障溯源体系，通过多源数据采集与智能算法分析，可实现故障的快速定位与精准溯源，为精准化维修提供可靠依据；三是提出的预防性维修、预测性维修、针对性维修相结合的精准化维修技术方案，结合完善的保障体系，可有效提升维修效率、降低维修成本、减少故障发生次数。工程案例实践表明，故障溯源与精准化维修技术体系的应用可显著提升天然气管道站场机械设备运维效果。

### 参考文献：

- [1] 杜广纯. 油田企业机械设备故障检修与预防举措[J]. 中国设备工程, 2023(16):168-170.
- [2] 赵越. 极端气候条件下钻井机械设备的适应性改造与防护措施[J]. 石油和化工设备, 2025,28(10):193-195,189.
- [3] 董超群, 岳涛, 谢帅, 等. 基于可靠性分析的天然气压缩机故障维修策略研究[J]. 压缩机技术, 2025(4):7-10.
- [4] 宋玉祥, 李鹏程, 孙小龙. 石油天然气管道机械故障诊断技术研究[J]. 工程研究与实用, 2025,6(13).
- [5] 王宇航, 谷文渊, 张红叶, 等. 天然气压缩机的故障处理[J]. 石化技术, 2024,31(7):75-76,151.

### 作者简介：

姬航(1986-), 男, 汉族, 陕西榆林人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 天然气管道站场机械设备领域。