

# Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mechanisms for Key Mechanical Equipment in Natural Gas Stations

Yongtao Guo Xiaofang Lv Botao Zhao

State Pipeline Network Group Beijing Pipeline Co., Ltd., Hengshui, Hebei, 053600, China

## Abstract

As a crucial node in the natural gas transmission and distribution system, the operational status of key mechanical equipment in natural gas stations directly impacts the safety and stability of the supply system. Under prolonged high-load operating conditions, equipment such as compressor units, valve actuators, and cooling systems are prone to faults like abnormal vibration, bearing wear, and sealing failure. To enhance the operational reliability of natural gas station equipment, this paper analyzes the operational characteristics of key mechanical equipment, investigates typical failure mechanisms, and establishes a fault diagnosis and early warning system based on multi-source monitoring data. The study demonstrates that data-driven fault warning methods can achieve dynamic identification of equipment operating conditions and preemptive risk alerts, effectively improving the operation and maintenance management of natural gas station equipment and providing technical support for the intelligent operation and maintenance of the natural gas transmission and distribution system.

## Keywords

Natural gas field station; Key mechanical equipment; Fault diagnosis; Status monitoring; Early warning mechanism

# 天然气场站关键机械设备故障诊断与预警机制研究

郭永涛 吕晓方 赵伯涛

国家管网集团北京管道有限公司, 中国·河北衡水 053600

## 摘要

天然气场站作为天然气输配系统的重要节点,其关键机械设备运行状态直接影响天然气供应系统的安全性与稳定性。压缩机组、阀门执行机构及冷却系统等设备在长期高负荷运行条件下,易出现振动异常、轴承磨损及密封失效等故障问题。为提高天然气场站设备运行可靠性,本文围绕关键机械设备运行特征,分析典型故障机理,并构建基于多源监测数据的故障诊断与预警机制。研究表明,基于数据驱动的故障预警方法能够实现设备运行状态的动态识别与风险提前预警,从而有效提升天然气场站设备运维管理水平,为天然气输配系统智能化运维提供技术支持。

## 关键词

天然气场站; 关键机械设备; 故障诊断; 状态监测; 预警机制

## 1 引言

随着我国天然气管网规模不断扩大,天然气场站在天然气输配系统中的枢纽作用日益凸显。场站内部压缩机、阀门执行机构及冷却系统等关键机械设备通常处于连续高负荷运行状态,一旦发生故障,将直接影响天然气输送安全与系统稳定运行。传统设备维护方式主要依赖人工巡检与定期检修,该方式在故障早期识别与状态评估方面存在明显局限。随着工业传感技术、数据分析技术以及智能监测平台的不断发展,基于状态监测的故障诊断与预警技术逐渐成为天然气场站设备运维的重要技术手段。基于此,本文围绕天然气场站关键机械设备运行特点,对设备典型故障机理、状态

监测方法以及预警机制构建路径进行系统研究,以期提升天然气场站设备运行安全性与运维管理水平。

## 2 天然气场站机械设备类型及功能

天然气场站是天然气输配系统中的核心设施,其主要功能包括天然气增压、调压、计量、过滤以及输送等。场站内配置的关键机械设备主要包括天然气压缩机、冷却系统设备、阀门执行机构以及润滑系统设备等。其中,天然气压缩机是场站的核心动力设备,其主要作用是通过机械压缩方式提高天然气压力,使天然气能够在长距离输气管道中保持稳定输送状态。在天然气场站长期运行过程中,各类机械设备通常处于高压、高速及连续运行状态,设备内部零部件承受较大的机械负荷与热负荷。例如,在压缩机运行过程中,曲轴、连杆、轴承及密封组件需要在高速旋转状态下保持稳定运行,一旦润滑条件不足或机械结构出现磨损,便可能导致

【作者简介】郭永涛(1982—),男,中国河北藁城人,本科,工程师,从事天然气设备研究。

振动异常或温度升高等问题。因此,对关键机械设备进行实时监测与状态评估,对于保障天然气场站安全运行具有重要意义。

### 3 天然气场站关键机械设备典型故障分析

#### 3.1 离心压缩机系统故障机理

压缩机作为天然气场站的核心动力设备,其运行状态直接决定天然气输送系统的稳定性与效率。在天然气增压输送过程中,压缩机长期处于高转速、高压及连续运行状态,内部关键部件如转子、轴承、密封结构以及气阀组件承受较大的机械载荷与热载荷。当设备运行时间不断累积时,机械磨损、润滑状态恶化以及结构疲劳等因素会逐渐显现,从而引发一系列典型故障。其中,轴承磨损是压缩机运行过程中最常见的故障类型之一。当润滑油品质下降或润滑系统供油不足时,轴承表面容易产生磨粒磨损或疲劳剥落,进而导致转子运转稳定性下降,并引发振动幅值增加。随着振动持续加剧,压缩机转子系统可能出现不平衡状态,从而进一步扩大设备故障影响范围。在压缩机运行监测过程中,振动信号是判断设备健康状态的重要指标。通过在压缩机轴承座位置布置振动传感器,可实时采集设备运行过程中的振动速度、振动频率及振动加速度等参数。当设备出现轴承磨损或转子不平衡时,其振动频谱通常会呈现明显的特征频率变化,从而为设备故障诊断提供重要依据。

#### 3.2 辅助机械设备故障特征

在天然气站运行系统中,增压压缩机作为核心动力设备,主要包括往复式压缩机与离心式压缩机,其运行状态直接影响管网输送效率与系统稳定性。受气体流量波动、压力变化及连续高负荷运行等因素影响,压缩机内部易产生机械疲劳与性能衰减问题。往复式压缩机的典型故障主要集中在气阀、活塞及密封系统。气阀在频繁启闭过程中易发生阀片疲劳与密封失效,导致排气效率下降;活塞及活塞环磨损会引发内泄漏,降低容积效率;密封系统老化则可能造成气体外泄风险。同时,曲柄连杆机构不平衡或润滑不足会引起振动增大与轴承温升。

离心式压缩机故障则多表现为气动失稳与转子系统异常。在低流量运行条件下,易发生喘振现象,导致压力与流量剧烈波动,并伴随明显振动与噪声;叶轮在长期高速运转及气固颗粒冲刷作用下,可能产生磨损或腐蚀,影响气动性能;轴承磨损及转子不平衡则会进一步加剧振动问题,降低机组运行稳定性。而润滑与冷却等辅助系统对压缩机运行同样具有重要影响。润滑不足会加剧关键部件磨损,冷却效果下降则易导致温度异常升高。因此,应通过振动、温度及压力等多参数监测手段,对设备运行状态进行动态评估,实现故障的早期识别与预警。

## 4 天然气场站关键机械设备状态监测与故障诊断技术

### 4.1 多源传感监测技术在设备状态识别中的应用

在天然气场站设备运行管理过程中,单一监测手段往往难以全面反映设备真实运行状态,因此构建多源传感监测体系成为现代天然气场站设备管理的重要技术路径。多源传感监测系统通常由振动传感器、温度传感器、压力传感器以及流量传感器等组成,通过对设备关键运行参数进行实时采集,可以形成完整的设备运行数据链,为故障诊断提供可靠的数据基础。以压缩机系统为例,在轴承座、机壳及关键连接部位安装振动传感器,可以实时获取设备运行振动信号;在润滑油系统与轴承部位安装温度传感器,则能够监测设备运行过程中温度变化情况,从而判断设备是否处于正常工作状态。

通过多源传感器所采集的数据,可以建立设备运行状态特征参数模型。当设备运行状态正常时,各类监测参数通常保持在稳定范围内,而一旦设备内部结构发生异常,例如轴承磨损或转子不平衡等情况,振动、温度及压力等参数往往会出现明显变化。因此,通过对多种参数进行综合分析,可以有效提高故障识别的准确性。在实际运行管理中,天然气场站通常依托 SCADA 监控系统或设备状态监测平台,将各类传感器数据进行集中采集与处理,实现设备运行状态的实时监控。运维人员可以通过监控系统对设备运行数据进行可视化分析,并对异常数据进行及时处理,从而避免设备故障进一步扩大。通过建立系统化的设备监测体系,可以有效提升天然气场站设备管理的精细化水平,为后续故障诊断与预警机制构建奠定重要基础。

### 4.2 基于数据分析的设备故障诊断方法

随着信息技术与工业智能化的发展,基于数据分析的设备故障诊断方法逐渐成为天然气场站设备运维的重要技术手段。传统设备维护主要依赖人工巡检与定期检修方式,这种方式虽然能够发现部分设备问题,但在故障早期识别方面存在一定局限。相比之下,基于数据分析的故障诊断方法可以通过对设备运行数据进行连续分析,从而识别设备潜在故障趋势,实现预测性维护。该方法通常通过建立设备运行数据模型,对设备正常运行状态下的参数特征进行统计分析,并形成设备健康基准模型。当设备运行参数偏离正常范围时,系统能够自动识别异常状态,并发出预警信号。

在天然气场站设备故障诊断实践中,常用的数据分析方法包括频谱分析、趋势分析以及机器学习分析等。频谱分析主要用于识别设备振动信号中的特征频率,通过分析振动频谱中出现的异常频率,可以判断设备内部是否存在轴承损坏或转子不平衡等问题。趋势分析则通过对设备运行参数的长期变化进行统计分析,从而识别设备性能下降的趋势。这

种基于数据驱动的故障诊断方法不仅能够提高设备故障识别效率，还能够显著降低人工巡检工作量，从而提升天然气场站整体运维管理水平。为进一步提高天然气场站设备状态监测与故障识别效率，需要构建完整的设备状态监测与故障诊断流程体系。通过对设备运行数据进行实时采集、数据处理、特征分析以及状态评估，可以实现设备运行状态的动态识别，并在故障发生之前形成预警信号。天然气场站关键机械设备故障诊断与预警技术流程如图1所示。

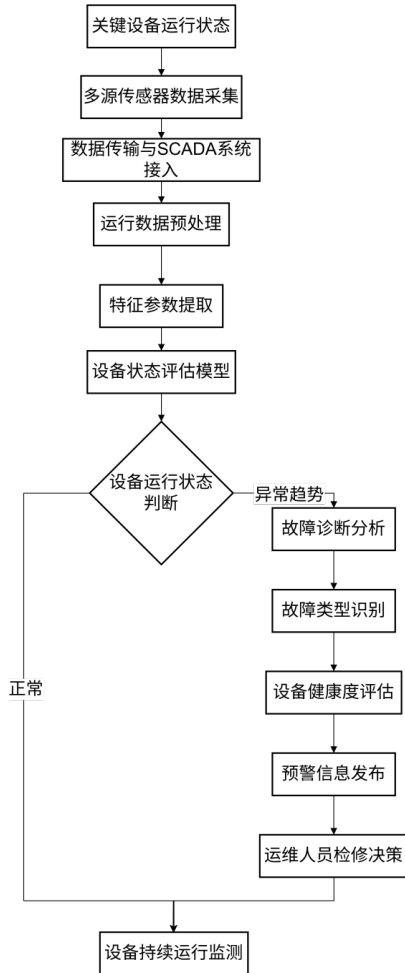


图1 天然气场站关键机械设备故障诊断与预警流程示意图

## 5 天然气场站关键机械设备故障预警机制构建

### 5.1 设备健康状态评价模型构建

在天然气场站设备运行管理过程中，仅依靠单一参数对设备状态进行判断往往难以全面反映设备真实运行情况，因此需要建立综合性的设备健康状态评价模型，对设备运行状态进行系统化评估。设备健康状态评价模型通常通过整合振动、温度、压力、流量以及能耗等多种运行参数，对设备整体运行状态进行量化分析，并以健康度指数的形式反映设备当前运行水平。通过该模型，运维人员可以直观判断设备是否处于正常运行区间，从而为设备维护决策提供科学依据。

在实际应用中，设备健康度评价通常采用多指标加权分析方法，将不同监测参数进行归一化处理，并根据各参数对设备运行状态影响程度设置相应权重。例如，在压缩机设备运行过程中，振动参数通常是最重要的状态指标，因此其权重值相对较高，而温度参数和效率参数则作为辅助指标参与综合评估。通过对各监测指标进行综合计算，可以得到设备健康度指数。当健康度指数处于较高水平时，说明设备运行状态稳定；当健康度指数逐渐下降时，则表明设备可能存在潜在故障风险，需要及时进行检查与维护。

在设备健康状态评价过程中，还需要结合设备运行历史数据与典型故障案例进行分析。通过建立设备运行数据库，可以对不同运行阶段的设备参数进行对比分析，从而识别设备性能变化趋势。例如，当设备振动值在一段时间内持续上升，或设备运行效率逐渐下降时，系统便可通过健康度模型判断设备可能处于性能退化阶段。通过这种数据驱动的设备健康评价方法，可以有效提高设备状态识别的准确性，为天然气场站设备预警机制的建立提供重要支撑。

### 5.2 故障预警系统实现路径

在设备状态监测与健康评价模型基础上，天然气场站可以进一步构建智能化故障预警系统，实现设备运行风险的提前识别。故障预警系统通常依托于场站自动化控制平台，通过实时采集设备运行数据并进行分析处理，对设备运行状态进行持续评估。当监测数据超过预设阈值或健康度指数低于安全范围时，系统将自动触发预警机制，并向运维人员发送报警信息，从而提示相关人员及时采取维护措施。

在预警系统设计过程中，需要根据不同设备类型与运行特征设置相应的预警阈值。例如，对于压缩机设备而言，振动幅值、轴承温度以及润滑油压力等参数均属于关键监测指标，当其中任一参数超过安全范围时，系统便会自动生成预警信号。通过对大量设备运行数据进行学习与分析，可以建立设备故障预测模型，从而实现对设备未来运行状态的预测。例如，通过机器学习算法对历史故障数据进行训练，可以识别不同故障类型对应的运行特征，并在设备出现类似特征时提前发出预警信号。通过这种预测性维护模式，可以有效减少设备突发故障发生概率，提高天然气场站设备运行安全性与可靠性。

## 6 结语

天然气场站关键机械设备的运行可靠性直接影响天然气输配系统的安全与稳定。本文通过分析天然气场站压缩机与输气泵等关键设备的典型故障机理，构建了基于多源数据监测的故障诊断与预警机制，并提出设备健康度评价模型。研究表明，通过振动监测、温度监测及数据驱动分析方法，可以实现设备故障的早期识别与预警，从而降低设备突发故障风险。如今随着智能监测技术与数字孪生技术的发展，天然气场站设备运维管理将更加智能化与数据化，为天

然气输配系统安全运行提供更加可靠的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 洪慧恩.石油机械设备的管理与维护方法分析[J].石油石化物资采购,2022,(15):25-27.DOI:10.12316/j.issn.1674-0831.2022.15.009.
- [2] 常勇智,邱亚泽,郑振,等.基于非线性关联维特征提取的机械自动化监测系统[J].计算机与数字工程,2014,42(12):2311-2315.
- [3] 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.
- [4] 徐志诚.石油天然气工程中机械设备的故障诊断技术研究[J].漫科学(下旬刊),2025,(2):13-15.
- [5] 李彬.天然气场站设备管理问题与安全对策[C]//中国城市燃气协会安全管理工作委员会.2022年第五届燃气安全交流研讨会论文集(下册).中国浙江省嘉兴市,2023:308-309. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.008262.