

# 石油天然气管道机械故障诊断技术研究

宋玉祥 李鹏程 孙小龙

国家管网集团北京管道公司山西输油气分公司兴县作业区 山西 吕梁 033600

**摘要:** 随着石油天然气行业的快速发展,管道运输作为最主要的输送方式,其安全性和稳定性日益受到重视。然而,石油天然气管道在长期使用过程中,机械设备易出现故障,影响管道的正常运行。因此,对石油天然气管道机械故障诊断技术进行研究,对于保障管道安全、提高运输效率具有重要意义。本文综述了当前石油天然气管道机械故障诊断技术的研究现状,探讨了常见的故障类型及诊断方法,并对未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 石油天然气管道;机械故障;诊断技术

## 引言

石油天然气管道作为能源输送的重要通道,其机械设备的正常运行直接关系到能源供应的稳定性和安全性。然而,由于管道运行环境的复杂性和机械设备的长期磨损,故障时有发生。这些故障不仅会导致管道运输中断,还可能引发安全事故,造成巨大的经济损失和社会影响。因此,对石油天然气管道机械故障诊断技术进行研究,及时发现并处理故障,对于保障管道安全、提高运输效率具有重要意义。

## 1 石油天然气管道机械故障类型

石油天然气管道作为能源传输的重要通道,其安全稳定运行至关重要。然而,在长期的运行过程中,管道机械设备可能会遭受各种故障,其中腐蚀和渗漏、疲劳裂纹以及振动和噪音是三种常见的故障类型。

### 1.1 腐蚀和渗漏故障

石油天然气管道主要由金属材料制成,这些材料在运行过程中极易受到传输介质的腐蚀。腐蚀作用会导致管道壁厚逐渐减薄,强度随之降低,进而引发渗漏故障。腐蚀类型多种多样,其中均匀腐蚀是管道整个表面均匀受到腐蚀,导致壁厚均匀减薄;点蚀则是管道表面局部区域受到严重腐蚀,形成凹坑;应力腐蚀开裂则是在应力和腐蚀介质的共同作用下,管道产生裂纹并扩展。渗漏故障不仅会造成宝贵的能源损失,还可能引发环境污染和严重的安全事故,因此必须采取有效措施加以防范。

### 1.2 疲劳裂纹故障

石油天然气管道在长期使用过程中,由于承受交变载荷的作用,管道材料易发生疲劳现象,进而产生裂纹。这些裂纹可能起源于管道表面的微小缺陷,也可能源于材料内部的夹杂物或气孔。随着载荷的循环作用,裂纹会逐渐扩展,最终导致管道破裂。疲劳裂纹故障是

管道安全的重要隐患,一旦发生,后果不堪设想<sup>[1]</sup>。因此,必须加强对管道疲劳裂纹的监测和检测,及时发现并处理潜在问题。

### 1.3 振动和噪音故障

石油天然气管道在运行过程中,由于流体流动、机械振动以及外部环境的干扰,易产生振动和噪音。当振动和噪音超过一定限度时,会对管道机械设备造成损害,甚至引发故障。例如,离心压缩机在运行时可能出现喘振现象,泵在抽空时也会产生剧烈振动和噪音,这些都会影响管道的正常运行。因此,必须采取有效措施控制管道振动和噪音,确保管道机械设备的稳定运行。

## 2 石油天然气管道机械故障诊断技术研究

### 2.1 基于信号的检测方法

#### 2.1.1 压力波法

压力波法是一种基于管道泄漏时产生的负压波传播特性的故障诊断方法。当管道发生泄漏时,泄漏点会产生一个瞬时的压力降,形成负压波。这个负压波会沿着管道向两端传播,其传播速度与管道中的介质声速有关。通过在管道两端或关键位置安装压力传感器,可以实时检测到负压波的变化。根据负压波的传播速度和时间差,可以计算出泄漏点的位置。压力波法具有反应迅速、定位准确等优点。它能够在泄漏发生的瞬间即可检测到,并快速定位泄漏点,为后续的抢修工作赢得宝贵时间。因此,压力波法广泛应用于石油天然气长输管道的泄漏检测中,特别是在大口径、高压力的管道中,其优势更加明显。然而,压力波法也存在一定的局限性。例如,当泄漏量较小时,产生的负压波可能较弱,难以被传感器准确检测到;同时,管道中的噪声和干扰(如泵站的启停、阀门的开关等)也可能对检测结果产生影响。因此,在实际应用中,需要结合其他方法进行综合判断,以提高检测的准确性。

### 2.1.2 压力梯度法

压力梯度法是通过检测管线入口与出口处的压力梯度来判断管道是否存在泄漏或堵塞的方法。在正常情况下,管道中的压力是沿着流动方向逐渐降低的,形成一定的压力梯度。当管道发生泄漏或堵塞时,这种压力梯度会发生变化。通过实时监测管道入口和出口处的压力,并计算压力梯度,可以及时发现管道的异常状况。压力梯度法适用于长距离、大口径的石油天然气管道泄漏检测,特别是对于那些难以直接安装传感器的区域,如海底管道、穿越山区的管道等<sup>[2]</sup>。然而,压力梯度法受管道运行工况的影响较大。例如,当管道中的流量、压力等参数发生变化时,压力梯度也会相应变化。因此,在应用压力梯度法时,需要对管道的运行工况进行充分了解和析,以排除工况变化对检测结果的影响。

### 2.1.3 质量平衡法

质量平衡法是通过计算管道进出的质量流量偏差来判断管道是否存在泄漏的方法。在正常情况下,管道进出的质量流量应该是平衡的。当管道发生泄漏时,进出的质量流量将不再平衡,通过计算偏差值可以判断泄漏的程度和位置。质量平衡法适用于连续运行的石油天然气管道系统,特别是对于那些流量相对稳定的管道。然而,质量平衡法的准确性依赖于流量计的准确性。因此,需要对流量计进行定期校准和维护,以确保检测结果的准确性。同时,当管道中存在多个泄漏点时,质量平衡法可能难以准确判断每个泄漏点的位置和泄漏量。此外,对于间歇运行的管道或流量波动较大的管道,质量平衡法的应用也受到一定限制。

## 2.2 直接检测方法

### 2.2.1 人工巡检法

人工巡检法是通过技术人员沿着管道线路进行巡检,观察管道表面是否存在异常现象(如油污、油气浓度、声音、火焰、气味等),并使用专用仪器(如检漏仪、测温仪等)对管道进行检测的方法。人工巡检法适用于地形复杂或难以安装传感器的区域,如城市燃气管道、山区管道、穿越河流或铁路的管道等。通过人工巡检,可以及时发现管道的异常状况,并采取相应的处理措施。然而,人工巡检法也存在一些缺点。首先,巡检效率较低,需要耗费大量的人力和时间;其次,巡检频率有限,难以实现对管道的实时监测;最后,人工巡检受天气、环境等因素的影响较大,可能影响巡检效果。为了提高巡检效率和准确性,可以采用无人机巡检、智能巡检机器人等新技术辅助人工巡检。

### 2.2.2 管道机器人检测法

管道机器人检测法是利用管道机器人代替工人进入复杂的管内环境,进行管道内的检测维护任务的方法。管道机器人可以携带各种检测仪器(如摄像头、超声波探测器、磁粉探测器等),对管道内部进行全面的检测。管道机器人检测法适用于长距离、大口径、复杂工况下的石油天然气管道检测,如城市地下管道、海底管道、穿越山区的管道等。通过管道机器人检测,可以准确地发现管道内部的缺陷和异常状况(如腐蚀、裂纹、堵塞等),为后续的维修工作提供有力的依据。然而,管道机器人检测法也存在一些局限性。首先,需要将管道停工并排空,这可能对管道的正常运行产生影响;其次,管道机器人的成本较高,且需要专业的操作和维护人员;最后,对于一些特殊形状的管道或存在严重堵塞的管道,管道机器人可能难以进入进行检测。为了克服这些局限性,可以不断改进管道机器人的设计和性能,提高其适应性和可靠性。

## 2.3 无损检测技术

无损检测技术是在不破坏被检测对象的前提下,利用其物理性质的变化来检测其内部或表面缺陷的方法。无损检测技术具有非破坏性、准确性高、检测速度快等优点,是石油天然气管道故障诊断的重要手段之一。

### 2.3.1 漏磁检测技术(MFL)

漏磁检测技术是使用永磁铁或电磁铁将铁磁性管道的管壁磁化到饱和状态,当管壁存在异常时(如腐蚀、开裂、壁厚减薄等),磁场会穿出管壁产生漏磁。通过磁敏探头检测漏磁场,就可以发现管道的缺陷。漏磁检测技术适用于金属(特别是铁磁性材料)管道的腐蚀、开裂等缺陷的检测,特别是对于那些难以直接观测或接触的管道部位(如埋地管道、海底管道等)。漏磁检测技术可以准确地定位缺陷的位置和大小,并可以对缺陷进行定量分析。然而,漏磁检测技术也受管道直径和壁厚的影响较大。当管道直径较大或壁厚较薄时,漏磁场的检测可能受到干扰或限制;同时,对于非铁磁性材料的管道(如塑料管道、复合材料管道等),漏磁检测技术也不适用<sup>[3]</sup>。为了提高漏磁检测技术的准确性和适用性,可以不断优化磁化装置和磁敏探头的设计,提高检测的灵敏度和分辨率。

### 2.3.2 超声检测技术(UT)

超声检测技术是利用超声波在介质中传播的特性来检测管道缺陷的方法。将超声波探头与管壁垂直入射布置,超声波在遇到缺陷(如腐蚀、裂纹、夹杂物等)时会发生反射或散射。通过接收并分析这些反射或散射信号,可以判断缺陷的位置、形状和大小。超声检测技术

适用于各种材质的管道检测,包括金属、非金属、复合材料等。它具有灵敏度高、对缺陷的量化准确、检测速度快等优点,能够准确地发现管道内部的缺陷和异常状况。同时,超声检测技术还可以对缺陷进行定位和定量分析,为后续的维修工作提供有力的依据。超声检测技术还可以与其他无损检测技术(如漏磁检测技术、射线检测技术等)相结合,形成综合检测方案,提高检测的准确性和可靠性。然而,超声检测技术也存在一些局限性。首先,超声波的传播受到介质性质的影响较大,如介质的密度、声速、衰减系数等。因此,在不同类型的管道中,超声波的传播特性可能存在差异,需要对检测参数进行调整和优化。其次,对于复杂形状的管道或存在严重腐蚀的管道,超声波的检测可能受到干扰或限制。例如,在管道弯曲处或壁厚变化处,超声波的传播路径可能发生改变,导致检测信号失真或无法准确接收。最后,超声检测技术的操作需要一定的专业技能和经验。操作人员需要熟悉超声波的传播特性、检测仪器的使用方法和缺陷的判断标准等,以确保检测结果的准确性。

### 3 未来发展趋势

#### 3.1 智能化诊断技术的应用

随着人工智能和大数据技术的持续进步,智能化诊断技术在石油天然气管道机械故障诊断中的应用将愈发广泛。未来,将见证智能化诊断系统的全面升级,这些系统将深度融合机器学习、深度学习等先进技术,对管道机械设备进行全天候、全方位的实时监测。智能化诊断系统能够自动分析设备运行数据,识别异常模式,并在故障发生前发出预警。例如,通过监测管道的振动频率、温度变化等参数,系统可以预测潜在的机械故障,如轴承磨损、密封泄露等。同时,系统将不断学习并优化算法,提高故障诊断的准确性和效率,减少误报和漏报,为维修人员提供更加精准的决策支持。

#### 3.2 多源信息融合技术的应用

多源信息融合技术将为石油天然气管道机械故障诊断带来革命性的变化。未来,将看到更多种类的传感器被应用于管道监测,如振动传感器、声学传感器、压力传感器等。这些传感器将提供丰富多样的数据,为故

障诊断提供全面、准确的信息基础。通过多源信息融合技术,可以将这些来自不同传感器的数据进行整合和分析,提取出对故障诊断有价值的特征<sup>[4]</sup>。例如,将振动信号和声学信号进行融合,可以更准确地判断管道内部是否存在异物或结构损伤;将压力数据和流量数据进行融合,可以及时发现管道泄露或堵塞等异常情况。这种技术的应用将大大提高故障诊断的可靠性和准确性,为管道的安全运行提供有力保障。

#### 3.3 远程监测和预警系统的建立

未来,远程监测和预警系统将成为石油天然气管道维护的重要手段。通过物联网技术,可以将管道机械设备与远程数据中心相连,实现实时数据的传输和监控。一旦系统检测到异常数据或潜在故障,将立即触发预警机制,通过多种渠道及时通知维修人员。维修人员可以远程查看设备状态,分析故障原因,并制定相应的维修计划。这样不仅可以大大提高故障诊断的及时性和准确性,还可以减少现场勘查的时间和人力成本,提高工作效率。同时,远程监测和预警系统还可以为管道的安全管理提供数据支持,为决策制定提供更加科学的依据。

#### 结语

石油天然气管道机械故障诊断技术是保障管道安全、提高运输效率的重要手段。本文通过对当前石油天然气管道机械故障诊断技术的研究现状进行综述,探讨了常见的故障类型及诊断方法,并对未来发展趋势进行了展望。未来,随着智能化诊断技术、多源信息融合技术和远程监测预警系统的不断发展,石油天然气管道机械故障诊断技术将迎来更加广阔的发展前景。

#### 参考文献

- [1]杜鹏.探析天然气管道运行中常见设备故障及处理对策[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(02):55-56.
- [2]古自强,韩刚,李华,等.天然气管道压缩机组故障预测与健康研究[J].油气田地面工程,2024,43(09):58-62.
- [3]王立国.天然气管道运行中常见设备故障及处理对策[J].现代工业经济和信息化,2022,12(08):324-326.
- [4]蔡智,王竞辉.天然气管道运行中常见设备故障及处理对策[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(05):36-37.