

天然气输气管道噪声源形成机理研究

张昌森 王天杰 穆守睿

国家管网集团西气东输公司合肥输气分公司 安徽 亳州 236700

摘要：随着天然气能源在能源结构中占比的持续攀升，天然气输气管道建设规模不断扩大，其运行安全问题与环境影响备受关注。本文聚焦于天然气输气管道噪声源形成机理的研究。首先概述天然气输气管道系统，包括其基本构成、天然气性质对运行的影响以及运行工况特点。接着深入分析噪声源形成机理，涵盖流体动力学噪声、机械振动噪声和电磁噪声。最后提出噪声源控制策略，从声源控制、传播途径控制和受体保护三方面着手，为降低天然气输气管道噪声提供理论依据与实践指导。

关键词：天然气；输气管道；噪声源形成；机理研究

引言：天然气作为重要的清洁能源，其输气管道的安全稳定运行至关重要。然而，在天然气输气管道运行过程中，噪声问题日益凸显，不仅对周边环境造成污染，影响居民生活质量，还可能对管道工作人员的身心健康产生危害，甚至干扰管道设备的正常运行，威胁管道安全。深入探究天然气输气管道噪声源的形成机理，有助于精准识别噪声产生的根源，进而制定科学有效的噪声控制策略。

1 天然气输气管道系统概述

1.1 天然气输气管道的基本构成

天然气输气管道系统是一个复杂且庞大的工程体系，主要由输气管道、压气站、阀门、清管装置以及监控与通信系统等构成。输气管道是核心部分，负责天然气的长距离输送；压气站通过压缩机为天然气增压，确保其有足够动力输送至目的地；阀门用于控制天然气的流量、流向以及切断气流；清管装置可定期清理管道内杂质，保障输送畅通；监控与通信系统则实时监测管道运行状态，实现信息的快速传递与处理，各部分协同工作保障天然气稳定输送。

1.2 天然气的性质及其对管道运行的影响

天然气具有易燃易爆、低密度、可压缩性等性质。易燃易爆特性要求管道在设计、施工和运行中严格遵循安全标准，防止泄漏引发事故；低密度使其在管道中流动时阻力相对较小，但泄漏后易扩散；可压缩性则影响管道的输送能力和压力管理，在输送过程中需合理控制压力，避免因压力波动过大对管道造成损害。

1.3 管道运行工况特点

天然气输气管道运行工况具有复杂性和动态性。其输送压力和流量会随用户需求、气源供应以及季节变化而波动。在高峰用气时段，需提高输送压力和流量以满

足需求；而在低谷时段则相应降低。同时，管道沿线地形地貌差异大，如山区、平原、河流等，不同地形对管道的铺设和运行产生不同影响，增加了运行管理的难度^[1]。

2 天然气输气管道噪声源形成机理研究分析

2.1 流体动力学噪声的形成机理

(1) 湍流噪声。湍流噪声是天然气在管道内呈湍流状态流动时产生的，当流体流速超过临界值，层流边界层被破坏，形成不规则的湍流脉动。这种脉动使流体内部压力和速度随机变化，引发气体的压缩与膨胀，进而产生声辐射。湍流噪声的强度与流速、流体黏度及管道内壁粗糙度密切相关，流速越高、黏度越小、内壁越粗糙，湍流越剧烈，噪声越大。其频谱呈宽带特性，能量分布广泛，是低频段噪声的主要来源之一，对管道周边环境产生持续影响。(2) 涡流噪声。涡流噪声由流体绕过障碍物或流道截面突变时产生，当天然气流经阀门、弯头等部件，流体在障碍物后缘形成交替脱落的涡旋，涡旋的生成、发展和脱落导致局部压力周期性变化，激发声波。涡流噪声的频率与涡旋脱落频率相关，而脱落频率受流体流速和障碍物特征尺寸影响。其频谱具有离散峰值特性，峰值频率随流速增加而升高，在中高频段表现明显，是管道噪声中较突出的高频成分，对声环境质量影响较大。(3) 喷射噪声。喷射噪声源于天然气从高压区域向低压区域高速喷射时产生，当流体通过节流装置如调压阀，压力骤降使流体流速急剧增加，形成高速喷射流。喷射过程中，流体内部存在强烈的剪切应力和速度梯度，导致气体分子剧烈碰撞和湍流混合，引发压力波动并辐射噪声。喷射噪声的强度与压力差、喷口面积和流体密度有关，压力差越大、喷口面积越小、流体密度越大，噪声越强。其频谱以高频为主，能量集中，是高压管道噪声的重要来源。(4) 激波噪声激波噪

声出现在天然气流速达到或超过当地音速时,当流体在管道内加速至超音速,会在喷口或收缩段形成激波面,激波前后气体参数发生突变,产生强烈的压力跃变和能量耗散。这种压力突变激发高频声波,形成激波噪声。激波噪声的强度极高,频谱覆盖范围广,且具有明显的脉冲特性,对管道结构和周边环境危害较大。其产生条件苛刻,但在高压、高速输气管道中仍可能发生,需重点关注和控制。

2.2 机械振动噪声的形成机理

(1) 压缩机噪声压缩机是天然气输气管道中的核心动力设备,其运行过程中产生的噪声主要源于机械振动与气动噪声的耦合。机械振动方面,压缩机内部转子不平衡、轴承磨损或齿轮啮合不良等机械故障,会引发周期性振动,通过机座和管道传递至周围环境。同时,压缩机活塞的往复运动或叶轮的高速旋转,使气体周期性压缩与膨胀,产生气动脉动,进一步激发结构振动。此外,压缩机进出口的气流压力波动与管道内天然气湍流相互作用,也会加剧振动噪声的产生。其噪声频谱具有宽频特性,低频段以机械振动噪声为主,高频段则包含气动噪声成分,且噪声强度随压缩机转速和负荷增加而增大,对管道沿线声环境造成显著影响。(2) 阀门噪声。阀门作为管道系统中的关键控制部件,其噪声产生主要与流体通过阀门时的压力突变和结构振动有关,当天然气高速流经阀门时,阀瓣、阀座等部件的局部阻力导致流体压力急剧下降,形成湍流和涡流,引发气动噪声。同时,阀门开启和关闭过程中,流体对阀瓣的冲击力以及阀杆的往复运动,会产生机械振动噪声。此外,阀门结构的共振现象会进一步放大噪声,尤其是在特定流速和压力条件下,阀门部件的固有频率与流体脉动频率接近时,共振效应显著增强噪声水平。阀门噪声的频谱特性取决于阀门类型和流体参数,调节阀和截止阀通常产生较高频噪声,而闸阀则以低频噪声为主。(3) 管道系统振动噪声。管道系统振动噪声是由天然气流动、设备振动以及外部激励共同作用的结果,天然气在管道内流动时,因湍流、涡流或压力波动产生的气动力,会激发管道壁面的振动,尤其是当气动力频率与管道固有频率接近时,易引发共振,导致噪声显著增强。同时,压缩机、泵等设备的振动通过管道支架传递至管路系统,进一步加剧管道振动。此外,外部因素如地震、交通荷载或施工振动等,也可能通过地基传递至管道,引发附加振动噪声。管道系统振动噪声的频谱特性复杂,包含低频的结构振动成分和高频的气动噪声成分,其传播范围广,对管道沿线居民生活和设备运行安全均构成

潜在威胁。

2.3 电磁噪声的形成机理

(1) 电动机噪声。电动机噪声是天然气输气管道系统中电磁噪声的主要来源之一,其形成机理涉及电磁力、机械振动与空气动力三方面耦合作用。在电磁层面,定子绕组通入交流电后产生旋转磁场,与转子磁场相互作用形成电磁力波,该力波以电机固有频率振动,引发定子铁芯和机座的周期性形变,产生电磁噪声。机械方面,电机转子不平衡、轴承磨损或装配误差会导致机械振动,与电磁振动叠加后增强噪声辐射。空气动力因素则源于电机冷却风扇高速旋转产生的气流湍流,以及电机进出风口的气流压力脉动,形成气动噪声。电动机噪声频谱呈现宽频特性,低频段以电磁振动噪声为主,高频段则包含气动噪声和机械振动噪声成分,其强度与电机功率、转速及负载状态密切相关,大功率高速电机运行时噪声尤为显著。(2) 变压器噪声。变压器噪声主要由铁芯磁致伸缩效应和绕组电磁力作用引发,铁芯在交变磁场作用下发生周期性形变,即磁致伸缩现象,导致铁芯片间产生摩擦和振动,形成低频噪声。同时,绕组中通过负载电流时,漏磁场与载流导体相互作用产生电磁力,引发绕组振动,其频率为电源频率的两倍(100Hz或120Hz),并通过绝缘油和油箱传递至外部环境。此外,变压器冷却系统(如风扇、油泵)的运行也会产生空气动力噪声。变压器噪声频谱以100Hz及其谐波为主,低频成分显著,传播距离远且穿透力强。其噪声水平受变压器容量、铁芯材料、绕组结构及负载率等因素影响,大型电力变压器运行时噪声可达65-85dB(A),对周边环境造成明显干扰^[2]。

3 天然气输气管道噪声源控制策略

3.1 声源控制

(1) 优化设备设计。优化设备设计是降低声源噪声的核心手段。针对压缩机,可采用低噪声叶轮与蜗壳设计,通过优化流道型线减少气动湍流,同时选用低振动轴承并增设弹性支座,从机械结构上抑制振动传递;阀门设计需采用流线型阀瓣与多级降压结构,避免流体压力骤变引发涡流噪声,并选用低噪声执行机构减少机械冲击;电动机与变压器需优化电磁方案,通过降低磁通密度波动和绕组电磁力幅值,减少磁致伸缩振动,同时采用低噪声冷却风扇与导流结构,降低气动噪声。设备设计阶段融入噪声控制目标,可实现源头降噪20%-30%。(2) 改进工艺参数。改进工艺参数可动态调节噪声产生条件。压缩机运行中,通过变频调速技术控制转速,避开结构共振频率区间,同时优化进气压力与流

量匹配,降低气动脉动强度,减少气动噪声;阀门操作时,采用缓开缓闭控制策略,避免流体冲击引发瞬态噪声,并通过多级调压将单次压力降分解为多次小压力降,削弱涡流噪声;管道输送环节,通过流速控制将湍流强度维持在临界值以下(通常 $\leq 0.1\text{m/s}$),并优化管径与壁厚匹配,降低流体与管道壁面的摩擦噪声。工艺参数优化可实现运行噪声降低5-15dB(A)。

3.2 传播途径控制

(1) 安装消声器。在管道关键节点(如压缩机出口、阀门下游)安装消声器是阻断噪声传播的有效手段。针对中高频气流噪声,可选用阻性消声器,利用多孔吸声材料(如玻璃棉)将声能转化为热能;对于低频噪声,需采用抗性消声器,通过亥姆霍兹共振腔或扩张室结构反射和干涉声波;复合式消声器则结合两者优势,实现宽频降噪。设计时需根据噪声频谱特性匹配消声器类型,并确保足够安装长度以提升降噪效果。(2) 设置隔声屏障。在管道沿线敏感区域(如居民区、学校)设置隔声屏障,可阻断噪声的直线传播路径。屏障材料应选用高密度、高吸声系数的复合结构(如金属外壳+岩棉内衬),其高度需覆盖噪声源至受声点的第一菲涅尔区,长度延伸至噪声影响范围外。通过计算声影区范围确定屏障位置,结合地形优化布局,可降低屏障后区域噪声5-15dB(A),显著改善周边声环境质量。(3) 管道隔振与减振。管道隔振通过在支架与管道间安装弹性元件(如橡胶隔振器、弹簧阻尼器),阻断设备振动向管道的传递。针对高频振动,选用高刚度橡胶隔振器;低频振动则需低固有频率的弹簧阻尼系统。同时,在管道弯头、三通等振动敏感部位增设减振环或约束阻尼层,通过摩擦耗能降低振动幅值。合理设计隔振系统固有频率(通常低于设备激振频率30%以上),可实现振动隔离率达80%以上,有效抑制结构噪声辐射。

3.3 受体保护

(1) 合理规划布局。合理规划布局是从空间维度

降低噪声对受体影响的关键策略,在管道设计阶段,应结合区域声环境功能区划,将压缩机站、阀门室等高噪声设施远离居民区、学校、医院等敏感目标,确保噪声衰减距离满足标准要求。同时,利用地形(如山体、绿化带)或建筑物作为天然屏障,阻断噪声传播路径。对于已建管道,可通过调整沿线土地利用性质(如将敏感区域规划为工业用地),或设置隔离带(如种植乔木林)进一步降低噪声影响。(2) 个人防护措施。个人防护措施是保障敏感受体健康的最后一道防线,对于管道沿线居民,可提供隔音窗、耳塞或耳罩等防护用品,其中隔音窗通过双层玻璃和密封结构可降低室内噪声10-20dB(A),耳塞/耳罩则适用于短期暴露场景。企业需定期为巡检人员配备主动降噪耳机,通过反向声波抵消技术实现实时降噪。同时,加强噪声危害宣传教育,指导居民合理调整作息(如夜间关闭窗户),避免长时间暴露于高噪声环境。通过技术防护与行为干预相结合,可显著降低噪声对个体健康的潜在风险^[3]。

结束语

天然气输气管道噪声源的形成机理复杂多样,涵盖流体动力学噪声、机械振动噪声及电磁噪声三大类。流体动力学噪声源于气体湍流、涡流及激波效应,机械振动噪声则与设备设计缺陷、材料疲劳及装配误差相关,电磁噪声则多见于电动机、变压器等电气设备。研究显示,通过优化设备结构、改进工艺参数、安装消声器及隔声屏障等综合措施,可有效降低噪声水平。

参考文献

- [1]刘淼,谭静怡,刘亚杰.某燃气公司集输站噪声超标原因分析及治理[J].中国卫生工程学,2022,21(2):211-212.
- [2]史亮,刘平,张文琦,王伟,苏容,杨杰.天然气管道压缩机噪声治理及效果评价[J].石油化工应用,2022,41(6):52-56.
- [3]赵志浩,于畅,任义梁,尹鹏飞,刘一鸣,高峰.天然气管道噪声模拟研究[J].节能,2023,42(4):15-18