

天然气压缩机噪声源识别与综合治理技术研究

崔文波¹ 韦建中¹ 黄晓宇² 毛忠智³ 唐正兵³ 许凤先³

1. 中石化石油工程技术服务有限公司 北京 100000

2. 中石化中原石油工程设计有限公司 河南 郑州 450000

3. 四川三元环境治理股份有限公司 四川 成都 610000

摘要: 天然气压缩机运行中噪声问题突出, 本文深入研究了噪声源识别与综合治理技术。对机械、流体、电磁噪声源分类解析, 构建传统与现代结合的识别方法体系。剖析噪声产生机理, 从往复运动部件、阀组系统等方面阐述机械噪声, 从进排气系统、冷却系统等说明流体噪声, 从电机电磁力波、电力电子特性分析电磁噪声。提出声源控制、传播路径控制及综合集成治理技术, 为天然气压缩机噪声治理提供理论与技术支持。

关键词: 天然气压缩机; 噪声源识别; 噪声产生机理; 综合治理技术; 智能化治理

引言: 天然气作为重要能源, 在工业生产中应用广泛。天然气压缩机作为关键设备, 其运行产生的噪声问题日益凸显。噪声不仅影响工作环境质量, 还可能对设备自身及周边人员健康造成危害。目前, 天然气压缩机噪声治理面临噪声源复杂、传播路径多样等挑战。深入研究噪声源识别技术, 明确噪声产生机理, 构建综合治理技术体系, 对于有效降低天然气压缩机噪声, 提升工业生产环境质量, 保障人员健康具有重要意义。

1 天然气压缩机噪声源识别技术

1.1 噪声源分类与特性解析

1.1.1 机械噪声源

天然气压缩机运行噪声主要分为机械、流体动力、电磁三种类型。机械噪声由设备内部运动构件的周期性撞击与摩擦振动诱发, 活塞往复运动形成的冲击噪声呈现清晰的周期性, 声压级随曲轴转动角度呈现规则起伏; 曲轴连杆机构振动噪声覆盖频段较宽, 振动能量沿机体结构传递至外壳并向外辐射; 轴承摩擦噪声与齿轮啮合噪声均属于接触型机械噪声, 前者受润滑条件影响明显, 后者与齿轮加工精度、啮合刚性存在直接关联; 阀片启闭带来的撞击噪声具备瞬时高频特征, 频谱中包含基频与多次谐波成分^[1]。

1.1.2 流体噪声源

流体噪声依托气体动力作用生成, 进排气气流脉动噪声由压力容器与管路内部压力波动激发, 频谱特征与压缩机转速、管路布置形式高度关联; 冷却风扇气动噪声由叶片表面气流分离形成的涡流脱落导致, 噪声强度随叶片端部转速提升呈现指数级上升; 气体流经阀门截面产生的湍流噪声具备随机分布特征, 能量主要集中在中高频区间; 燃料气爆燃噪声多出现于极端运行工况,

由混合气非均匀燃烧带来的压力突变诱发。

1.1.3 电磁噪声源

电机定子与转子磁场相互作用过程中, 气隙磁场周期性变化会在定子铁芯内部产生交变电磁作用力, 促使铁芯结构振动并向外辐射噪声, 噪声频率与电机极对数、运行转速保持对应关系。变频器驱动电机运行时, 内部电力电子元件以高频开关模式工作, 产生大量谐波电流, 谐波电流流经电机绕组会引发额外电磁振动与噪声, 频谱特征随变频器开关频率与调制方式发生改变。

1.2 噪声源识别方法体系构建

1.2.1 传统识别技术

近场声压测量方式通过密集布设测点获取空间声场分布特征, 结合等声压线绘制结果完成声源初步定位; 频谱分析方式借助傅里叶变换拆解噪声信号的频率构成, 依靠特征频率匹配锁定对应噪声来源; 声强测量方式依托双传感器探头完成声强矢量测量, 能够削弱环境反射噪声带来的干扰, 提升现场辨识结果的可靠性。

1.2.2 现代识别技术

声全息成像技术借助波数域重建算法实现声场三维可视化呈现, 精准捕捉设备表面声源分布位置; 工作振型分析将振动检测数据与有限元计算模型结合, 梳理结构振动与噪声辐射之间的内在关联; 近场声学显微技术搭载高分辨率声学传感阵列, 在亚波长尺度下捕捉声源细节特征; 多物理场耦合分析整合声学、振动、流体动力学模型, 完成噪声生成与传播全过程的联合模拟计算。

1.2.3 复合识别策略

复合识别思路依托多种技术手段协同发力, 声源定位与贡献量评估借助声功率率检测量化各类声源的辐射强度; 时频特征拆解借助小波变换等工具, 捕捉非稳态

噪声随时间变化的特征；多源协同识别模型搭建包含机械、流体、电磁噪声的混合声源数据库，依靠模式匹配方式完成复杂工况下声源的精准判定^[2]。

2 天然气压缩机噪声产生机理研究

2.1 机械噪声产生机理

2.1.1 往复运动部件动力学特性

活塞往复运动惯性力是机械噪声核心诱因之一。活塞在气缸内做变速直线运动时，质量分布不均导致惯性力随曲轴转角周期性变化，交变力通过连杆传递至曲轴箱，激发结构振动并辐射噪声。连杆机构作为动力传递枢纽，连接处存在局部刚度突变，振动能量传递中发生反射与叠加，形成特定频段噪声峰值。轴承载荷与摩擦特性对噪声影响显著，滚动轴承接触区弹性变形产生周期性摩擦激励，滑动轴承油膜压力波动通过轴颈传递至壳体，两类摩擦噪声频谱均与转速强相关。

2.1.2 阀组系统动态特性

阀片运动轨迹建模揭示气阀启闭非线性特征。阀片在气体压力与弹簧力共同作用下往复运动，闭合速度峰值出现在接近阀座时刻，冲击能量通过阀座传递至气缸盖，形成瞬态辐射噪声。阀座冲击能量与阀片质量、闭合速度及材料阻尼系数相关，能量值与阀片升程平方成正比。气体通过阀口时高速气流形成剪切层，涡流生成、发展、脱落过程主导流体噪声，涡脱落频率与阀口流速呈线性关系。

2.2 流体噪声产生机理

2.2.1 进排气系统声学特性

压力脉动传播受管道截面突变、弯头及阀门等局部阻抗影响显著。脉动压力波遇阻抗不连续点发生反射与透射，形成驻波效应，部分频段压力波动幅度增强。管道模态分析表明，系统固有频率与压力脉动频率重合时引发共振，噪声级显著升高。消声器内部流场特性显示，穿孔板消声器穿孔率与孔径影响声阻抗匹配，扩张腔体长度决定有效消声频段。

2.2.2 冷却系统气动噪声

风扇叶片流场存在明显压力梯度，叶片前缘吸力面与后缘压力面压差驱动气流绕流，尾缘发生分离形成涡街^[3]。涡脱落频率与斯特劳哈尔数相关，落入人耳敏感频段时产生显著气动噪声。声辐射效率需综合叶片几何与流场速度，薄翼型叶片高速下易激发高阶模态振动，提升声辐射效率。

2.3 电磁噪声产生机理

2.3.1 电机电磁力波分析

定子齿槽转矩源于铁芯开槽引发的磁阻周期性变

化。转子旋转时气隙磁导周期性变化导致齿槽转矩脉动，通过机座传递至外壳形成线谱噪声。气隙磁场中定子绕组磁动势与转子永磁体磁场相互作用产生空间谐波，高次谐波电磁力波是宽频电磁噪声主要来源。电磁力波频谱呈现离散线谱与连续谱叠加形态，线谱频率为电机极对数与转速乘积，连续谱由磁路饱和等非线性因素引发。

2.3.2 电力电子噪声特性

开关器件动作噪声源于 IGBT 等功率器件快速开通与关断，电流电压突变引发电磁干扰，通过散热器与机壳形成辐射噪声。变频器输出电流包含丰富谐波，谐波次数与开关频率相关，高次谐波在绕组中产生附加振动噪声。电磁屏蔽效能取决于屏蔽体材料、厚度及孔缝尺寸，多层屏蔽结构可显著提升高频屏蔽效果。

3 天然气压缩机综合治理技术体系

3.1 声源控制技术

3.1.1 机械噪声控制

机械噪声控制聚焦压缩机运行过程中机械振动引发的噪声，通过结构优化与部件选型实现源头降噪。优化平衡重设计可有效降低压缩机运行时的惯性振动，减少振动传递引发的噪声辐射。应用弹性联轴器能够缓冲轴系传动过程中的冲击与振动，削弱振动能量传递路径，降低传动环节产生的噪声。选取低噪声轴承可减少轴承运转过程中的摩擦与振动，从部件层面抑制噪声产生。开展阀片轻量化设计可降低阀片运动惯性，减少阀片与阀座的冲击碰撞，进而控制阀系噪声释放。

3.1.2 流体噪声控制

流体噪声控制针对压缩机气流运动过程中产生的噪声，通过消声结构优化与气流组织调整实现降噪。优化抗性消声器结构可精准匹配气流噪声的频率特性，增强低频噪声消声效果，削弱气流脉动引发的噪声。开发阻性消声材料可提升对高频噪声的吸收能力，通过材料自身的声能损耗实现噪声衰减^[4]。优化管道系统模态可避免管道与气流脉动产生共振，减少管道振动引发的噪声辐射。调整气流组织设计可降低气流流速与压力突变，减少湍流噪声与射流噪声的产生。

3.1.3 电磁噪声控制

电磁噪声控制围绕压缩机电机运行产生的电磁噪声，通过结构改进与电路优化实现源头管控。应用斜极转子结构可削弱电机运行过程中的电磁转矩脉动，减少电磁振动与噪声的产生。研发电磁屏蔽材料可阻断电磁噪声的传播路径，降低电磁噪声对周边环境的影响。设计谐波抑制电路可抑制变频器输出的谐波分量，减少谐

波引发的电磁噪声。制定变频器低噪声控制策略可优化变频器运行参数,降低变频器自身运行产生的电磁噪声。

3.2 传播路径控制技术

3.2.1 隔振技术体系

主动隔振系统采用压电作动器与加速度传感器构成闭环控制,对 100Hz 以上振动实现 20dB 衰减;被动隔振器依据设备质量与频率选型,金属橡胶隔振器高频性能优于常规橡胶隔振器;管道隔振支架采用双层隔振结构,降低振动传递率;浮筑基础通过弹性垫层与质量块组合,使基础振动加速度级降低 15~20dB。对压缩机机组整体采用浮筑隔振平台,配合柔性接头与隔振吊钩隔断振动传递路径,可大幅减少振动向地面、墙体及管道扩散,从传播环节切断固体声诱发的结构辐射噪声。

3.2.2 吸声技术体系

多孔吸声材料注重孔隙率与流阻匹配,聚酯纤维吸声棉 1000Hz 处吸声系数达 0.92;微穿孔板结构优化孔径与板厚,拓宽吸声频带;空间吸声体采用锥形与球形组合,提升混响场吸声效率;防火吸声涂层以水性聚氨酯为基材、嵌入空心玻璃微珠,兼顾防火与中高频吸声性能。在压缩机房墙面、屋面均匀布置复合吸声模块,可快速吸收室内反射声与混响声,降低室内声能叠加,使机房内噪声分布更均匀,避免局部声压级过高。

3.2.3 隔声技术体系

模块化可拆卸隔声罩采用装配式框架,面板填充梯度密度吸声材料,隔声量达 35-40dB;双层隔声结构通过空气层与阻尼层复合,隔声性能提升 8-10dB;声学密封技术采用复合密封条,噪声泄漏量控制在 0.1L/s 以下;隔声门斗采用双道门与吸声帘组合,降低门洞噪声泄漏 12-15dB。结合石化行业防爆、泄压、通风要求优化隔声罩布局,设置专用消声通风通道与应急泄压口,在保证隔声效果的同时,满足设备散热、安全运行与日常检修需求。

3.3 综合治理技术集成

3.3.1 多技术协同优化

多技术协同优化打破单一技术的局限性,实现噪声治理效果的提升。构建声源-路径-受体协同控制模式,统

筹声源降噪、路径阻断与受体保护,形成全方位的噪声治理体系。融合主动-被动控制技术,结合主动控制的精准性与被动控制的稳定性,适配不同工况下的噪声治理需求。开展结构-流体-电磁多场耦合治理,综合考虑各场域之间的相互影响,实现多类型噪声的协同控制。

3.3.2 智能化治理系统

智能化治理依托在线监测与自适应调控实现精准高效管控。构建噪声在线监测网络实时采集数据,掌握噪声动态规律;开发自适应控制算法自动调节治理参数,实现动态适配;应用数字孪生技术构建仿真模型,模拟治理效果并优化方案;集成智能运维系统实现设备实时监控与预防性维护,保障系统长期稳定运行^[5]。依托声学模拟软件开展预评估,可在设计阶段预判治理效果,大幅提升工程实施成功率与经济性。系统可实时联动通风、泄压与消防设施,在降噪同时保障机组全天候安全稳定运行。

结束语

天然气压缩机噪声源识别与综合治理技术研究,在噪声源分类解析、识别方法体系构建、产机理剖析及治理技术提出等方面取得成果。通过声源控制、传播路径控制及综合集成治理,可有效降低压缩机噪声。实际应用中,需根据具体工况与需求,灵活选用合适技术,实现噪声治理效果最大化。同时,持续优化治理技术,提升治理水平,对于推动天然气压缩机行业绿色发展,营造良好生产环境具有积极作用。

参考文献

- [1]史亮,刘平,张文琦,等.天然气压缩机噪声治理及效果评价[J].石油化工应用,2022,41(6):52-56.
- [2]李喆,郭明,陈磊,等.天然气集气站压缩机噪声治理技术应用研究[J].山东化工,2024,53(16):174-177.
- [3]邹丽蓉,张军峰,林奇,等.某天然气处理厂压缩机噪声分析及治理方案[J].油气田环境保护,2021,31(2):30-35.
- [4]何希州,董超群,廖平,等.天然气净化厂环境噪声超标分析及治理方案[J].油气田地地面工程,2025,44(12):37-43.
- [5]师红杰,刘伟锋.天然气集气站压缩机降噪排气散热解决方法应用研究[J].仪器仪表用户,2024,31(10):82-84.