

炼铁液压泵站降噪改造及运行性能优化

王金博

新疆八一钢铁股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830022

摘要: 针对炼铁液压泵站运行噪声超标、能效偏低、运行稳定性与可靠性不足等问题,本文通过现场检测与机理分析,明确流体脉动、机械振动及结构共振为核心问题诱因。从声源、传播路径、流体特性多维度制定降噪方案,优化系统控制策略与辅助结构,结合仿真校核完善改造参数。现场实践表明,改造后泵站噪声、能效、稳定性大幅提升,设备故障率显著下降,综合经济效益与安全效益突出。

关键词: 炼铁液压泵站; 降噪改造; 运行性能优化

引言: 炼铁液压泵站是高炉生产的核心动力设备,长期在高温、粉尘、变负荷工况下连续运行。设备服役过程中易出现压力脉动剧烈、振动噪声超标、能耗损耗大等问题,不仅超出职业卫生噪声标准,危害操作人员身心健康,还会加剧设备部件磨损,引发故障停机,制约炼铁生产线连续稳定运行。为解决上述痛点,本文开展泵站降噪改造与运行性能优化研究,保障生产安全高效开展。

1 炼铁液压泵站现状及噪声、性能问题分析

1.1 炼铁液压泵站系统组成与工作原理

(1) 泵站核心设备组成。主要由轴向柱塞泵、驱动电机、控制阀组、循环管路、油箱及冷却过滤装置构成。液压泵实现能量转换,电机提供动力,阀组调节压力与方向,油箱与过滤冷却系统保障介质清洁与温控。

(2) 泵站工作流程与运行机制。电机驱动液压泵将机械能转化为液压能,经阀组调节压力与流量,介质供至执行机构,回油经冷却过滤后返回油箱。变量泵与比例阀协同实现负荷匹配,按需供给压力与流量。(3) 炼铁工况下运行特性。系统长期连续运行,承受高温辐射与粉尘侵入,频繁变负荷冲击。高温加速油液劣化与密封老化,粉尘加剧滤芯堵塞与元件磨损,变负荷导致压力流量剧烈波动,噪声辐射显著增加。

1.2 泵站现场噪声检测与声源识别

(1) 噪声检测方案。在泵站周围1m处布置测点,涵盖电机端、泵体端、阀组及管路弯头区域,采用精密声级计与实时频谱分析仪采集数据。分别在空载、额定负荷及峰值冲击等工况下记录等效连续A声级,同时采集时域信号用于后续分析。(2) 噪声数据统计分析。检测结果表明,空载工况噪声约83~86dB(A),额定负荷工况升至92~95dB(A),峰值冲击工况短暂突破98dB(A)。频谱分析显示,噪声能量主要集中在500~2000Hz中高频段,且

随负荷增大出现明显低频调制成分。(3) 主要噪声源定位与分级。通过频谱比对与相干分析,识别出泵体流体噪声为第一噪声源,占比约40%;电机机械噪声和管路振动噪声各占25%左右;阀组启闭冲击噪声占比约10%^[1]。

1.3 噪声产生机理分析

(1) 流体动力噪声机理。柱塞泵排油过程中油液压力周期性脉动,引发管路内流体谐振;同时泵吸油不足时产生气蚀,气泡破裂瞬间释放冲击能量,形成宽带流体噪声,随转速与压力升高而加剧。(2) 机械振动噪声机理。长期运行导致柱塞与滑靴配合间隙增大、轴承滚道磨损,转子质量不平衡产生周期性离心力,激励机壳及底座产生结构振动噪声,呈现明显的轴频及倍频特征。(3) 结构共振噪声机理。当泵激振频率与油箱壁板、管路支架及机架固有频率耦合时,薄壁件产生剧烈共振,辐射出突出线谱噪声,使整机噪声急剧攀升。

1.4 泵站运行性能现存问题分析

(1) 能效问题。变量泵负荷匹配响应滞后,造成频繁溢流损耗,无用功耗占比达15%~20%;系统压降过大,管路沿程损失显著,整体效率偏低,电能浪费严重。(2) 稳定性问题。压力波动幅度超过 $\pm 1.5\text{MPa}$,流量输出偏差达额定值 $\pm 8\%$,变工况条件下超调明显,执行机构动作平稳性较差,影响控制精度。(3) 可靠性问题。高频振动加速管路接头松动与焊缝疲劳,密封件因高压冲击频繁破损,设备年均故障停机达8次,严重影响产线连续作业能力。

2 炼铁液压泵站降噪改造与运行性能优化方案设计

2.1 改造优化总体设计原则与目标

(1) 设计原则。改造方案遵循工况适配性原则,确保优化措施贴合炼铁高炉液压系统实际负荷谱;坚持降噪与性能协同原则,避免单一降噪牺牲系统效率;兼顾施工便捷性,优先选用停机时间短、改动量小的改造路

径;立足运行经济性,合理控制改造成本与维护投入;始终将安全生产置于首位,确保改造过程及投运后设备本质安全。(2)降噪改造目标。泵站整体噪声由现状92~95dB(A)降至85dB(A)以下,满足国家职业卫生标准限值要求。关键设备中,液压泵本体噪声降低不低于6dB,管路振动辐射噪声降低8dB以上,彻底消除油箱壁板及管路支架的共振异响,使设备运行声品质显著改善。(3)性能优化目标。系统综合能效提升10%~15%,溢流损耗降低至8%以内;压力波动收窄至 ± 0.8 MPa,流量输出偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内;设备年均故障停机次数由8次降至3次以下,液压泵及密封组件更换周期延长1.5倍以上,显著提升设备服役寿命^[2]。

2.2 分级降噪改造方案设计

(1)声源降噪优化。选用9柱塞低噪声轴向柱塞泵替代原5柱塞泵,柱塞数增加使流量脉动频率提高、脉动幅值显著降低;电机更换为低噪变频调速电机,优化散热风扇叶片数及风道结构以降低气动噪声;阀组处采用锥面缓冲阀芯替代传统滑阀结构,使换向冲击峰值压力降低25%,从源头上削减冲击噪声辐射能量。(2)传播路径降噪。在泵组与基础之间安装橡胶-弹簧复合隔振器,合理选取隔振系统固有频率避开激励主频,隔振效率达90%以上;高压管路外敷粘弹性阻尼约束层并加密支撑夹箍,阻断振动沿管壁向支架传递;油箱外壁安装微穿孔吸声板并涂覆高阻尼涂料,机组外围设置可拆卸式复合隔声罩,实现传播路径多级声衰减^[3]。(3)流体降噪优化。重新规划管路走向,减少直角弯头与截面突变,采用大曲率弯管降低局部阻力及涡流噪声;泵出口增设蓄能器与孔板式缓冲稳压装置串联安装,有效平抑压力脉动波峰;升级高精度过滤系统,将油液污染度控制在不高NAS7级,同时优化吸油管径和滤网通流面积,彻底消除吸油负压过大引发的严重气蚀噪声。

2.3 泵站运行性能优化设计

(1)运行参数优化。基于炼铁炉前设备实际负荷需求谱,将系统工作压力等级由31.5MPa整定下调至28MPa,采用负载敏感控制策略实现流量按需供给,使泵站输出功率与执行机构需求精准匹配,有效减少高压溢流带来的能量冗余损耗。(2)控制策略优化。采用PLC与高频响比例阀构成的闭环控制系统,优化换向阀得电时序逻辑,引入斜坡控制技术将换向过渡时间延长至0.5s以上,削弱压力冲击峰值;增设自适应压力调节模块,根据负载变化实时修正溢流阀设定值,将系统溢流损耗压缩至最低水平。(3)系统辅助结构优化。升级板式换热器,加大冷却面积并增设温控旁路,确保油液温度稳

定在40~55℃最佳工作区间;优化油箱内部隔板布局,延长油液流动路径以促进气泡充分析出与杂质充分沉降,提升泵站整体运行平稳性与介质品质。

2.4 改造方案仿真验证与参数校核

(1)基于声学及流体仿真的降噪效果模拟。利用LMSVirtual.Lab建立泵站声学边界元模型,加载实测振动速度边界条件,分别对各项降噪措施实施声辐射仿真计算;同时采用AMESim搭建液压系统流体仿真模型,模拟泵源压力脉动经缓冲装置后的衰减特性,预判综合降噪贡献量及各频率段声压级分布。(2)系统运行性能仿真分析。在AMESim与MATLAB/Simulink联合仿真平台上建立优化后控制策略模型,校核变负荷工况下系统压力动态响应超调量、流量跟踪误差及溢流功率损耗等关键指标。仿真结果表明优化方案可使系统动态响应时间缩短20%,稳态压力波动控制在 ± 0.6 MPa范围内,功率匹配度显著改善^[4]。(3)方案优化调整。根据仿真反馈,发现单一蓄能器对高频段压力脉动衰减不足,需串联增设高频阻性消音器配合使用;同时校核得出斜坡控制时间不宜超过0.8s,否则将影响执行机构快速响应特性。综合仿真数据与工程实际,对阻尼参数、隔振器刚度及控制参数进行多轮迭代修正,最终确定最优改造技术方案,为现场工程实施提供可靠设计依据。

3 炼铁液压泵站降噪改造工程实施与效果测试分析

3.1 现场改造施工实施方案

(1)施工前期准备。制定详细停机计划,利用高炉休风检修窗口期实施改造,将生产影响降至最低。提前完成低噪声泵、隔振器、阻尼材料、隔声罩、蓄能器等全部配件采购与进场检验。现场拉设警戒隔离区,配备消防器材及应急冲洗装置,对周边运行设备实施防尘覆盖,确保施工安全。(2)分模块施工流程。第一阶段拆除原泵组及阀组,安装低噪声柱塞泵与变频电机,完成联轴器对中找正;第二阶段加装复合隔振器与管路阻尼包扎,安装泵组隔声罩及油箱吸声壁板;第三阶段改造管路布局,增设蓄能器与孔板缓冲装置,升级精密过滤器;第四阶段完成PLC控制柜接线、比例阀参数导入及闭环调试,逐步恢复系统压力。(3)施工质量管控与安全保障措施。每道工序执行三级检查验收,关键连接部位力矩严格按规范校核。管道焊接后进行酸洗钝化与耐压试验,控制系统调试采用分段逐步升压法,每升压一级稳压观察10分钟,确保无泄漏、无异常振动后方可进入下一阶段,全程不影响其他产线设备正常运行。

3.2 改造后噪声性能测试与结果分析

(1)改造后噪声复测方案。严格按照改造前相同

点位（电机端、泵体端、阀组、管路弯头）、相同测距（1m）及相同工况（空载、额定负荷、峰值冲击）进行复测，采用同型号精密声级计与频谱分析仪，确保对比数据的一致性与有效性。（2）降噪效果对比分析。改造后额定负荷工况整机声压级由95dB(A)降至83.5dB(A)，降幅达11.5dB；峰值冲击工况由98dB(A)降至86dB(A)。频谱分析显示，500~2000Hz中高频段能量显著削弱，原有218Hz处油箱壁板共振线谱完全消失，管路振动加速度均方根值降低约65%。（3）噪声达标性验证。依据《工业企业噪声控制设计规范》（GB/T50087）及《工作场所有害因素职业接触限值》（GBZ2.2），改造后泵站区域等效连续A声级为83.5dB(A)，低于85dB(A)限值要求，且无频发冲击异响，全面满足国家职业卫生标准合规性要求^[5]。

3.3 改造后设备运行性能测试分析

（1）能效性能测试。采用功率分析仪连续监测48h运行数据，优化后系统平均输入功率较改造前下降16.2%，溢流损耗由18%降至7.5%，功率利用率提升至89.3%，节能效果显著。（2）运行稳定性测试。在炉前设备变负荷工况下，系统压力波动由 $\pm 1.5\text{MPa}$ 收窄至 $\pm 0.7\text{MPa}$ ，流量输出偏差由 $\pm 8\%$ 降至 $\pm 2.6\%$ ，变工况响应超调量减少22%，执行机构动作平稳性明显改善。（3）设备可靠性验证。72h连续试运行期间，泵组轴承温升稳定在32℃以内，管路接头无渗漏，阀组换向动作正常，零故障运行。振动加速度监测数据显示各测点幅值均处于绿色警戒线以下，部件运行状态良好。

3.4 综合效益分析

（1）环保效益。厂界噪声由改造前夜间60dB(A)降至52dB(A)，满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》Ⅲ类要求；泵站操作区域噪声暴露水平大幅下降，岗位职工听力损伤风险显著降低，作业环境舒适度明显改善。

（2）经济效益。年节电量约42万kWh，直接电费节省约30万元；因密封更换频次减少、泵组维修周期延长及故障停机减少，年设备维护成本降低约18万元；生产线因泵站故障导致的非计划停产时间由年均48h降至8h，间接增产效益约65万元/年，综合年收益达113万元，改造投资回收期约1.5年。（3）安全与管理效益。消除了高频振动引发的管路疲劳断裂风险，设备本质安全水平提升。泵站运行稳定性增强后，操作人员无需频繁干预调整，劳动强度降低，生产调度计划执行率提高，为炼铁车间连续稳定高效生产提供了坚实保障。

结束语

本次改造通过声源治理、路径降噪与系统性能优化相结合的方式，有效解决了炼铁液压泵站噪声超标、能耗偏高、运行不稳等核心问题。改造后设备各项指标均达标，作业环境、设备可靠性与生产能效全面提升，实现降噪、节能、稳生产的多重目标。本次改造方案贴合炼铁恶劣工况，技术成熟可行，可为同类工业液压泵站降噪提质改造提供参考借鉴。

参考文献

- [1]王健,赵亮.高炉液压泵站噪声振动成因及综合治理改造技术[J].机械设计与制造,2023,31(08):289-292.
- [2]刘军,张伟峰.冶金高炉液压系统压力脉动抑制与降噪优化研究[J].液压与气动,2024,48(05):136-141.
- [3]孙海波,李鑫.重载冶金液压泵站振动噪声溯源及结构改造技术[J].机械科学与技术,2022,41(11):1756-1761.
- [4]张守喜,韩佳东.高炉泥炮液压控制系统增设蓄能器回路技术改造[J].液压气动与密封,2024,44(09):100-103.
- [5]陈峰.炼铁厂液压泵站降噪改造及运行稳定性优化[J].冶金设备,2025,13(02):56-59.