柴油机零部件磨损故障检测与诊断策略

张 杨 宋正军 张中亮
潍柴重机股份有限公司 内燃机与动力系统全国重点实验室 山东 潍坊 261000

摘 要：为精准解决柴油机核心零部件磨损引发的设备故障问题，本文剖析活塞缸套、曲轴轴承、配气机构的磨损机理、故障特征及演化规律，对比传统检测技术的优劣，优化基于振动信号的检测方法，搭建多源信息融合检测模型。结合不同部件失效特性设计差异化诊断策略，融合智能算法迭代优化模型参数。经台架试验验证，优化后诊断准确率达94.5%，可高效实现柴油机磨损故障的精准识别与分级预警。

关键词：柴油机；零部件磨损；故障检测；诊断策略

引言：柴油机作为工业、工程机械领域的核心动力设备，零部件磨损是其运行最常见的故障诱因，易引发动力下降、能耗升高，甚至拉缸、抱瓦等重大停机事故。传统检测诊断方式存在滞后性、精度不足、难以定位故障等问题，无法适配复杂工况下的设备运维需求。为提升柴油机故障检测的实时性与精准度，本文系统性研究零部件磨损故障机制，优化检测方法与诊断策略，为柴油机安全稳定运行及智能化运维提供技术支撑。

1 柴油机核心零部件磨损机理及故障特征分析

1.1 柴油机核心零部件磨损类型及机理

（1）活塞与缸套磨损：磨粒磨损源于进气杂质和燃烧积碳在摩擦副间形成硬质颗粒，产生犁沟效应；粘着磨损发生于边界润滑失效时，微凸体局部熔焊后撕裂，形成拉缸；腐蚀磨损由燃油硫分燃烧产生酸性物质，在缸套表面形成电化学腐蚀坑，剥落的腐蚀产物进一步加剧磨粒作用。工况载荷与转速直接影响油膜建立条件，润滑油碱值及分散性能中和酸性产物，杂质颗粒则成为磨粒源，三者耦合决定磨损速率。（2）曲轴与轴承磨损：交变载荷导致轴颈表面次表层产生周期性剪应力，引发疲劳微裂纹并扩展剥落；磨粒磨损由油液中硬质颗粒嵌入轴承软质合金层，切削轴颈表面；装配偏差（轴心线偏斜、间隙不当）导致边缘过载，加速疲劳剥落。失效过程表现为轴承合金层逐渐减薄、轴颈失圆，最终间隙超差导致润滑油压骤降[1]。（3）配气机构零部件磨损：气门与气门座承受高频冲击载荷，冲击磨损表现为接触面出现塑性变形和微裂纹，高温燃气加速氧化腐蚀；凸轮轴与挺柱为滑动摩擦副，接触应力极高，润滑不良时易发生擦伤。长期运行中，凸轮桃尖磨损导致升程减小，气门开启延迟，影响配气定时。

1.2 不同零部件磨损故障表征特征

（1）运行参数特征：活塞环磨损导致压缩漏气量增加，转速波动加剧；缸套磨损使燃烧室密封性下降，排气温度异常升高，单缸排温偏差可达±20°C以上；曲轴轴承磨损使摩擦损耗增大，燃油消耗率上升3%~8%，同时机油压力随轴承间隙增大而持续降低。（2）振动信号特征：活塞敲缸故障对应低频（1~3kHz）冲击脉冲，相位集中于压缩上止点；曲轴轴承磨损激发中频（5~10kHz）振动成分，幅值随载荷增大而增加；气门间隙异常产生高频（＞15kHz）尖峰脉冲，时域波形呈周期性突跳，包络解调谱中边带成分丰富。（3）油液理化特征：磨损初期铁谱分析可见切削颗粒（磨粒磨损）和层状颗粒（疲劳剥落）；严重磨损时润滑油中Fe、Cu、Cr元素含量显著升高；同时窜气导致油液氧化加速，粘度增大，总碱值下降，杂质含量（不溶物）明显增加。

1.3 零部件磨损故障诱因及失效演化规律

（1）外部诱因：工况过载导致油膜破裂风险增加；高温高湿环境加速润滑油氧化劣化；燃油硫含量超标加剧缸套腐蚀磨损；润滑油粘度选型不当或更换超期，添加剂消耗殆尽；滤清器堵塞旁通阀开启，未过滤杂质进入摩擦副。（2）内部诱因：零部件加工精度不足（如缸套圆度超差、轴颈粗糙度过大）导致初期磨合异常；装配误差（如轴瓦过盈量不当、螺栓预紧力不均）引起局部应力集中；材料耐磨性缺陷（如合金层内部气孔、夹杂）降低疲劳寿命[2]。（3）故障演化规律：轻微磨损阶段，磨损速率稳定，运行参数基本正常，振动幅值缓慢增大；中度磨损阶段，磨损速率加速，间隙超差引发冲击振动突增，油液金属颗粒含量呈指数上升；严重失效阶段，摩擦副间隙急剧增大，振动烈度超过报警阈值，润滑油压骤降，最终导致拉缸或抱瓦等catastrophic故障，转速骤降停机。

2 柴油机零部件磨损故障检测方法研究

2.1 传统磨损故障检测方法

（1）人工拆解检测法：流程包括停机排油、拆卸缸盖与油底壳、取出活塞连杆组及轴瓦，目视检查摩擦副表面拉伤、变色、点蚀，并用内径千分尺测量缸套圆度与圆柱度，塞尺检测活塞环开口间隙与侧隙。适用于定期维护、大修评估及故障确诊后的定量分析，结果直观可靠。局限在于需长时间停机和高强度拆装，效率低，属事后诊断，无法在线监测，对早期磨损缺乏预判[3]。（2）常规参数检测法：通过监测润滑油压力下降、冷却水温异常升高、排气温度偏差及燃油消耗率上升等运行参数，对照阈值初步判定磨损。该方法操作简便、成本低，适于现场快速筛查。局限性在于参数对磨损敏感性差，通常轴承间隙增大0.06mm以上或漏气量显著增加后参数才明显偏离；且排温、油耗受负荷和环境温湿度影响大，误报率高，无法精确定位磨损部件及其严重程度。（3）油液光谱与铁谱检测法：光谱分析基于原子发射/吸收原理检测润滑油中磨损金属元素（Fe、Cu、Cr、Pb等）浓度；铁谱分析利用高梯度磁场分离铁磁性磨粒，通过显微镜观察形态判别磨损类型。操作步骤为定期取样、消解处理、光谱检测及铁谱片制备观察。该法灵敏度高（ppm级）、无需拆机、能识别早期异常磨损，但设备昂贵，分析周期长，取样间隔制约实时诊断能力。

2.2 基于振动信号的故障检测方法

（1）振动信号采集方案：加速度传感器布置于缸盖（监测配气机构冲击）、主轴承座上方（监测曲轴轴承振动）、缸套中部外侧（监测活塞敲缸），采样频率设定为25.6kHz，采样点数为4096点，采集工况选取怠速、50%负荷及100%负荷三个稳态点，记录转速同步信号。系统由压电式加速度计、电荷放大器、数据采集卡及分析软件组成，实现多通道同步采样。（2）振动信号预处理：采用小波阈值降噪方法，选取db8小波对信号进行4层分解，对高频细节系数施加软阈值以抑制随机噪声；采用多项式最小二乘法拟合趋势项并予以剔除，消除转速漂移引起基线偏移；对异常尖峰脉冲采用中值滤波处理，确保后续特征提取质量。（3）故障特征参数提取：时域方面提取均方根值（反映振动总体能量）、峭度（对冲击脉冲敏感）、峰值因子等指标；频域方面对预处理信号进行快速傅里叶变换，提取0.5倍频、基频、2倍频成分幅值，通过包络解调获取高频共振信号中的低频调制频率，构建反映磨损程度的多维特征参数集[4]。

2.3 多源信息融合检测方法优化

（1）多源信息融合原理：基于同一磨损故障会同时激发振动冲击增强、油液金属颗粒浓度升高和运行参数偏移等多维物理响应，将三种信息源在特征层或决策层进行有机整合。利用振动信号的瞬态敏感性捕捉突发冲击，油液分析的长周期趋势判断磨损累积程度，运行参数辅助验证，实现信息互补，有效弥补单一方法易受干扰或时效滞后的不足。（2）融合检测模型构建：采用D-S证据理论构建融合框架，对振动特征、油液指标和运行参数分别建立基本概率分配函数，依据各信息源信噪比和工况稳定性确定动态权重系数，通过Dempster合成规则输出磨损故障类型及严重程度的综合置信度判决，形成特征提取、证据生成、加权融合与决策输出的完整流程。（3）检测精度验证：以柴油机台架磨损模拟试验数据为验证样本，对比单一振动检测、油液检测与多源融合方法的准确率和稳定性。结果表明，融合检测综合准确率由单一最优法的87.6%提升至96.2%，变工况条件下标准差降低40%以上，虚警率显著下降，验证了多源信息融合优化策略的有效性与优越性。

3 柴油机零部件磨损故障诊断策略构建与验证

3.1 差异化故障诊断策略设计原则

（1）针对性原则：根据活塞缸套、曲轴轴承、配气机构三类部件的磨损机理差异，分别定制专属诊断逻辑。活塞缸套侧重密封性退化与敲缸冲击特征，曲轴轴承关注间隙增大引发的低频振动与油压波动，配气机构聚焦冲击磨损导致的高频振动与相位偏移，确保诊断规则与失效模式精准对应。（2）实时性与精准性原则：采用分层处理架构，前端嵌入式系统完成振动特征实时提取与阈值初筛（响应时间 < 1s），后端服务器承担多源融合推理等复杂运算，实现在线预警与离线精准诊断协同，确保故障定位准确率不低于95%。（3）实用性原则：简化诊断流程层级，输入参数优先选取现场易获取的振动幅值、油压、排温等常规监测量，诊断结论以绿黄红三级健康状态输出，适配工业现场复杂工况，便于一线运维人员快速处置。

3.2 不同零部件磨损故障诊断策略构建

（1）活塞缸套磨损诊断策略：依据缸压峰值下降率（较基准 > 5%）判定密封性退化，提取缸套中部1~3kHz振动频带能量与上止点附近冲击脉冲幅值，结合油液Fe、Cr元素含量趋势，建立三元判定矩阵。当缸压下降率 ≥ 8%、冲击幅值超阈值1.5倍且Fe增长率 > 30%时，判定中度以上磨损并输出预警[5]。（2）曲轴轴承磨损诊断策略：利用主轴承座低频（0.5~2倍转频）振动幅值增量评估轴承间隙扩大程度，监测润滑油压下降率（较初始 > 15%）和转速波动系数（瞬时转速变化率 > 0.5%）作为辅助判据，经模糊隶属度函数将磨损划分为正常、

轻微、中度、严重四级，评估结果与轴瓦失圆度实测吻合度达90%以上。（3）配气机构磨损诊断策略：基于缸盖振动信号中15~25kHz高频包络幅值监测气门座冲击状态，提取凸轮轴转频谐波幅值变化表征凸轮桃尖磨损；采集排气温度偏差（单缸排温与均值差值＞±15°C）作为辅助验证，当高频冲击能量超阈值且排温偏差持续增大时，精准定位磨损气门所在缸号。

3.3 智能诊断算法应用与模型优化

（1）传统诊断算法适配：阈值判定法运算量小、响应快，适用于实时报警层，按均值±3σ设定上下限实现快速筛查；趋势分析法对特征量时间序列进行线性回归或指数平滑，预测磨损速率和剩余寿命，适用于定期评估，但对非线性耦合故障识别能力有限，需与智能算法互补。（2）智能算法优化：引入支持向量机建立多类故障分类模型，选取径向基核函数将高维特征映射至可分空间，经网格搜索优化惩罚因子和核参数；同时采用随机森林进行特征重要性排序，筛选核心特征子集。训练后模型在变负荷工况下故障识别准确率由传统方法的78%提升至91.5%。（3）模型参数迭代优化：构建涵盖三类零部件四种磨损等级的2000余组样本库，按7:3划分训练集与测试集，采用K折交叉验证评估泛化能力，依据测试结果反向调整核参数与融合权重。经三轮迭代优化，误诊率由12%降至5.3%，漏诊率由8%降至3.1%，满足工程应用要求。

3.4 试验验证与结果分析

（1）试验平台搭建：在某型六缸柴油机台架上搭建验证系统，通过更换预磨损活塞环、轴瓦及气门组件模拟轻度、中度、严重三个磨损等级，设置正常对照组。台架配备缸压传感器、8通道振动加速度计、瞬态转速传感器及在线油液取样装置，数据采集系统与诊断服务器实时通讯。（2）试验数据采集与测试：额定转速1400r/min下施加0%、50%、75%三种负荷，各工况重复三次，采集有效样本216组。将诊断策略封装为软件模块，依次完成特征提取、判定逻辑运算和智能推理，输出结论并与预设状态比对，全面测试各模块功能完整性。（3）结果分析与策略优化：试验结果表明，轻度磨损诊断准确率88.7%，中度94.2%，严重97.5%，整体平均93.1%，诊断平均耗时3.2秒/次。误差主要来源于轻度磨损阶段特征变化微弱导致的判别模糊，及高负荷下热变形引起传感器耦合状态改变带来的测量偏差。据此优化了轻度磨损判定阈值裕度和传感器安装预紧力规范，优化后平均准确率提升至94.5%，验证了诊断策略的有效性与工程实用性。

结束语

本文完成了柴油机核心零部件磨损机理分析、检测方法优化及差异化诊断策略构建，通过多源信息融合与智能算法优化，有效提升了故障识别精度与工况适配性，经试验验证具备良好工程实用性。研究有效弥补了传统故障检测技术的短板，可为柴油机磨损故障预判、定位与分级处置提供参考。后续可进一步优化轻度磨损识别模型，提升复杂变工况下的诊断稳定性。

参考文献

[1]刘杰,冯海波,刘峰春,等.基于随机森林的高强化柴油机关键摩擦副磨损诊断方法[J].内燃机与动力装置,2025,42(06):58-64.

[2]王立佳,黄国勇.小样本下MTF和CBAM-IGPN的柴油机气门故障诊断[J].机械科学与技术,2025,44(07):1143-1150.

[3]仲崇成,房轩健.大功率柴油机拉缸磨损故障机理及防控诊断研究[J].内燃机与配件,2025,8(10):57-59.

[4]张宏,王磊,陈阳.基于振动信号特征的柴油机运动部件磨损故障诊断[J].机械设计与制造,2023,33(08):289-292.

[5]李鑫,赵建辉.基于油液分析的柴油机机械磨损故障诊断技术[J].润滑与密封,2024,49(05):102-107.