



Research on Technological Innovation and Reliability Improvement of Core Components for Construction Machinery

Hao Dong*

Weichai Power Co., Ltd. Construction Machinery Engine Research Institute, Weifang 261061, Shandong, China

【Abstract】 To break through the bottleneck problems of construction machinery such as "core components relying on imports, insufficient reliability of basic parts, and short service life", this paper focuses on three core areas: the research and development and performance optimization of core components (engines, hydraulic systems, transmission systems, control systems), the technological breakthrough of key basic parts (high-end bearings, seals, high-strength fasteners), and the improvement of component reliability and service life. It systematically analyzes the technological innovation path and industrial implementation practice. The research shows that through the technical system of "localization of core components + high-endization of basic parts + precise reliability control", the localization rate of core components of construction machinery can be increased from 55% to 80%, the service life of key basic parts can be extended by 50%-80%, and the mean time between failures (MTBF) of the whole machine can be increased by 35%-45%. Combined with cases of enterprises such as Weichai and XCMG, the feasibility of this technical system is verified, providing a reference for the independent control of core components of construction machinery.

【Keywords】 construction machinery; core components; key basic parts; reliability improvement; performance optimization

工程机械核心零部件技术创新与可靠性提升研究

董浩 *

潍柴动力股份有限公司工程机械发动机研究院, 山东潍坊 261061

【摘要】 为突破工程机械“核心零部件依赖进口、基础件可靠性不足、寿命短”等卡脖子问题, 本文聚焦核心零部件(发动机、液压系统、传动系统、控制系统)研发与性能优化、关键基础件(高端轴承、密封件、高强度紧固件)技术突破、零部件可靠性与寿命提升三大核心领域, 系统分析技术创新路径与产业落地实践。研究表明, 通过“核心部件国产化 + 基础件高端化 + 可靠性精准管控”技术体系, 可使工程机械核心零部件国产化率从 55% 提升至 80%, 关键基础件寿命延长 50%-80%, 整机平均无故障工作时间 (MTBF) 提升 35%-45%。结合潍柴、徐工等企业案例, 验证了该技术体系的可行性, 为工程机械核心零部件自主可控提供参考。

【关键词】 工程机械; 核心零部件; 关键基础件; 可靠性提升; 性能优化

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前我国工程机械行业已进入高质量发展阶段，但核心零部件与关键基础件仍存在“进口依赖度高、性能差距大、可靠性不足”等问题。2024 年《中国工程机械核心零部件发展报告》显示，我国高端工程机械发动机进口率达 40%，液压泵、马达进口率超 35%，高端轴承进口率达 60%；同时，国产密封件平均寿命仅为国际品牌的 50%，高强度紧固件断裂故障率较国际水平高 3 倍，严重制约整机性能与国际竞争力。

核心零部件技术突破是实现工程机械自主可控的关键。通过发动机、液压系统等核心部件国产化研发、基础件高端化升级、可靠性技术提升，可推动工程机械从“组装制造”向“核心技术自主”转型，降低对进口部件的依赖，同时提升整机寿命与运维经济性，为基建工程提供高可靠性装备支撑。

1.2 国内外研究现状

国际方面，康明斯（Cummins）推出“X15H 氢燃料发动机”，功率达 530hp，热效率突破 48%，适配大型矿山机械；博世力士乐（Bosch Rexroth）开发“AA4VSO 变量液压泵”，容积效率达 96%，寿命超 10000 小时；舍弗勒（Schaeffler）推出“X-life 系列工程机械轴承”，寿命较普通轴承提升 80%。

国内方面，潍柴动力研发“WP13H 发动机”，热效率达 47.5%，适配 20-30t 挖掘机；徐工集团推出“XG 系列高压液压泵”，国产化率 100%，寿命超 8000 小时；洛阳 LYC 轴承开发“大型转盘轴承”，替代进口应用于 500t 起重机。但国内在核心部件材料（如发动机耐热钢）、基础件精密制造（如密封件唇口加工精度）等方面仍需突破。

1.3 研究内容与方法

本文围绕三大核心领域展开研究：一是发动机、液压系统、传动系统、控制系统等核心零部件的技术方案与性能优化；二是高端轴承、密封件、高强度紧固件等关键基础件的材料选择与制造工艺；三是零部件可靠性测试方法与寿命提升技术。研究方法采用“文献分析+企业案例调研”，结合近三年行业技术成果与企业应用数据，形成技术体系与发

展建议。

2 工程机械核心零部件研发与性能优化

2.1 发动机技术：从“满足排放”到“高效节能”

发动机作为工程机械“动力心脏”，核心突破“热效率低、油耗高、排放不达标”难题。潍柴动力“WP13H 工程机械发动机”采用“高效燃烧系统+电控高压共轨”技术：燃烧系统优化燃烧室形状（缩口型燃烧室），配合 2500bar 高压共轨喷射，燃油雾化粒径降至 $8\mu\text{m}$ ，热效率提升至 47.5%（传统发动机热效率 38%-42%）；同时搭载“EGR+DPF+SCR”后处理系统，满足国六 b 排放标准。在山东临工 20t 挖掘机应用中，该发动机油耗降低 15%（从 25L/h 降至 21.25L/h），年节省燃油 3.6 万 L，同时排放污染物（ NO_x 、PM）降低 80%，发动机 B10 寿命（10% 故障概率时的寿命）达 15000 小时，较传统机型延长 30%。

玉柴股份“YC6K12N 天然气发动机”针对清洁能源需求，采用“稀薄燃烧+涡轮增压中冷”技术：稀薄燃烧空燃比达 1.8，热效率达 42%；涡轮增压中冷系统提升进气密度，功率达 480hp，适配 30t 级装载机。在山西大同煤矿应用中，该发动机替代燃油机型，年减少碳排放 50t（天然气碳排放较柴油低 25%），燃料成本降低 30%，同时振动噪声降低 10dB，改善操作人员工作环境。

2.2 液压系统技术：从“低压低效”到“高压高效”

液压系统作为工程机械“动力传输核心”，核心突破“压力低、效率低、泄漏多”难题。徐工集团“XG35V 高压变量液压泵”采用“斜盘式结构+陶瓷柱塞”技术：工作压力提升至 35MPa（传统液压泵压力 25-30MPa），容积效率达 95%（传统泵 90%-92%）；陶瓷柱塞表面粗糙度 $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ ，耐磨性提升 50%，减少液压油泄漏（泄漏量 $< 5\text{mL/min}$ ）。在徐工 XE380 挖掘机应用中，该液压泵使挖掘力提升 20%（从 220kN 增至 264kN），作业循环时间缩短 15%（从 12 秒降至 10.2 秒），液压系统故障率从 8% 降至 3%，B10 寿命达 8000 小时，接近国际品牌水平（10000 小时）。

中联重科“电液比例多路阀”针对精准控制需求,采用“阀芯精密加工+电液反馈控制”技术:阀芯配合间隙控制在 0.005-0.01mm,流量控制精度达 $\pm 2\%$;电液反馈控制实现流量实时调节(响应时间 $< 0.1s$),适配起重机变幅、伸缩动作。在中联 ZCC800 起重机应用中,该多路阀使变幅动作平稳性提升 30%,避免重物晃动,同时减少液压油发热(油温降低 10°C),液压系统能耗降低 12%。

2.3 传动系统技术:从“手动换挡”到“智能变速”

传动系统作为“动力分配核心”,核心突破“换挡冲击大、传动效率低”难题。陕西法士特“FT16JZ 液力机械变速箱”采用“双涡轮液力变矩器+智能换挡控制”技术:双涡轮变矩器传动效率达 92%(传统单涡轮变矩器 85%-88%),换挡冲击度降低至 10m/s^3 (传统变速箱 $15\text{-}20\text{m/s}^3$);智能换挡控制基于车速、负载自动选择挡位(如重载时保持低挡位、轻载时切换高挡位),适配装载机、推土机等设备。在山东临工 L956 装载机应用中,该变速箱使换挡时间缩短至 0.8 秒,传动效率提升 7%,燃油消耗降低 10%,同时换挡平顺性提升,操作人员劳动强度降低 40%,B10 寿命达 12000 小时。

三一重工“SD22H 推土机传动系统”针对重载需求,优化“终传动齿轮+履带驱动轮”设计:终传动齿轮采用 20CrNiMoH 高强度钢,表面渗碳层深度 1.5-2mm,硬度达 HRC58-62,承载能力提升 30%;履带驱动轮采用“锻造+表面淬火”工艺,耐磨性提升 50%。在湖南长沙矿山应用中,该传动系统使推土机牵引力提升 25%(从 220kN 增至 275kN),适应重载推土作业,同时传动系统故障率从 10% 降至 4%,年减少维修成本 2 万元。

2.4 控制系统技术:从“简单控制”到“智能协同”

控制系统作为“设备大脑”,核心突破“响应慢、控制精度低”难题。徐工集团“XG-ECU 智能控制系统”采用“32 位双核处理器+CAN 总线”技术:处理器运算速度达 100MHz,支持 100+ 传感器信号采集(如发动机转速、液压压力、操作手柄位移);CAN 总线传输速率达 500kbps,实现发动机、液压系统、传动系统协同控制(如操作手柄位移信号触发发动机转速提升、液压流量调节)。

在徐工 XE550 挖掘机应用中,该系统使操作响应时间缩短至 0.2 秒(传统系统 0.5 秒),平地精度从 $\pm 5\text{cm}$ 提升至 $\pm 3\text{cm}$,同时支持“自动挖掘”模式(设定挖掘深度后自动完成铲斗动作),作业效率提升 20%。

中联重科“起重机智能控制系统”针对吊装安全需求,集成“负载限制+姿态控制”功能:负载传感器实时监测起重量(精度 $\pm 1\%$),当超额定负载 10% 时自动切断动作;姿态传感器监测起重机支腿沉降、臂架角度,当姿态偏差超 5° 时自动报警。在浙江杭州奥体中心吊装作业中,该系统成功避免 2 起超载风险,吊装精度提升至 $\pm 2\text{cm}$,确保钢结构精准对接。

3 工程机械关键基础件技术突破

3.1 高端轴承技术:从“普通精度”到“精密长效”

轴承作为“旋转部件核心”,核心突破“精度低、寿命短、发热严重”难题。洛阳 LYC 轴承“大型转盘轴承”(适配 500t 起重机)采用“双列滚珠+整体式保持架”设计:滚动体采用 GCr15SiMn 高碳铬轴承钢,表面超精研加工(粗糙度 $Ra \leq 0.01 \mu\text{m}$),径向跳动控制在 0.05mm 以内;整体式保持架采用高强度尼龙材料,避免保持架断裂导致的轴承卡死。在中联重科 ZCC500 起重机应用中,该轴承承载能力达 5000kN,转速达 5r/min, B10 寿命达 20000 小时,较传统轴承延长 80%,同时运行温度降低 15°C ,避免高温导致的润滑失效。

舍弗勒(中国)“X-life 系列圆锥滚子轴承”(适配工程机械变速箱)采用“优化接触角+表面涂层”技术:接触角优化至 15° ,承载能力提升 25%;表面喷涂 DLC(类金刚石)涂层,摩擦系数降低 30%,磨损量减少 40%。在陕西法士特变速箱应用中,该轴承使变速箱传动效率提升 2%,寿命达 15000 小时,较普通轴承延长 50%,同时减少润滑脂消耗(从 100g/100 小时降至 70g/100 小时)。

3.2 高端密封件技术:从“易泄漏”到“长效密封”

密封件作为“防泄漏关键”,核心突破“耐油差、耐高温、寿命短”难题。中密控股“工程

机械液压密封件”采用“PTFE + 丁腈橡胶复合结构”：PTFE 层耐油温度达 200℃（传统橡胶密封件 120℃），耐液压油腐蚀性能提升 80%；丁腈橡胶弹性体确保密封接触压力稳定（接触压力 > 0.5MPa），泄漏量 < 0.1mL/h。在徐工 XG35V 液压泵应用中，该密封件使液压泵泄漏率降低 90%，寿命达 8000 小时，较传统密封件（4000 小时）延长 100%，同时在 -30℃ 低温环境下仍保持良好弹性，适应极端工况。

派克汉尼汾（中国）“旋转轴唇形密封件”（适配发动机曲轴）采用“聚氨酯材料 + 优化唇口结构”技术：聚氨酯材料耐磨性是传统丁腈橡胶的 3 倍，耐温范围 -40℃ -150℃；唇口采用“双唇角设计”，接触面积增加 20%，密封可靠性提升 50%。在潍柴 WP13H 发动机应用中，该密封件使曲轴漏油故障率从 5% 降至 0.5%，寿命达 15000 小时，较传统密封件延长 50%。

3.3 高强度紧固件技术：从“易断裂”到“高强度长效”

高强度紧固件作为“结构连接核心”，核心突破“强度低、耐疲劳差”难题。中车戚墅堰所“12.9 级工程机械螺栓”采用“42CrMoV 钢 + 等温淬火”工艺：抗拉强度达 1200MPa（传统 8.8 级螺栓 800MPa），屈服强度达 1080MPa；等温淬火使晶粒细化至 10 μm 以下，疲劳寿命提升 80%（疲劳循环次数从 10⁶ 次增至 1.8×10⁶ 次）。在三一重工 SY135 挖掘机动臂连接应用中，该螺栓避免动臂振动导致的断裂故障（传统螺栓年断裂率 3%），同时拧紧扭矩精度控制在 ±5%，确保连接可靠性，螺栓寿命达 10000 小时。

江苏申源集团“高强度螺母”采用“螺纹精密滚轧 + 表面磷化处理”技术：螺纹精度达 6g 级，配合间隙控制在 0.02-0.05mm；磷化处理提升耐腐蚀性（盐雾试验 480 小时无锈蚀，传统螺母 240 小时）。在徐工 XE380 挖掘机车架连接应用中，该螺母使螺栓松动率从 8% 降至 1%，避免因松动导致的结构异响，同时耐候性提升，适应矿山高粉尘、高湿度环境。

4 工程机械零部件可靠性与寿命提升技术

4.1 材料优化技术：从“通用材料”到“专用高性能材料”

材料优化是提升零部件可靠性的基础。潍柴动力“发动机活塞材料”采用“ZL114A 铝合金 + 陶瓷涂层”技术：ZL114A 铝合金抗拉强度达 320MPa，高温硬度（300℃）达 80HB（传统铝合金 60HB）；活塞顶部喷涂陶瓷涂层（厚度 0.1mm），耐温达 800℃，抗热疲劳性能提升 50%。在 WP13H 发动机应用中，该活塞避免高温导致的顶部烧蚀故障，寿命从 8000 小时延长至 12000 小时，同时减少活塞与气缸壁的摩擦（摩擦系数降低 20%），燃油消耗降低 3%。

徐工集团“液压泵壳体材料”采用“QT600-3 球墨铸铁 + 时效处理”技术：QT600-3 球墨铸铁抗拉强度达 600MPa，延伸率 3%，硬度达 HB220-250；时效处理消除内应力（内应力 < 50MPa），避免壳体变形导致的密封失效。在 XG35V 液压泵应用中，该壳体变形量控制在 0.03mm 以内（传统壳体 0.08mm），密封面平面度误差 < 0.01mm，液压泵泄漏量进一步降低至 3mL/min 以下，B10 寿命从 8000 小时延长至 9500 小时，接近国际品牌水平。

4.2 制造工艺升级：从“粗放加工”到“精密制造”

制造工艺升级是提升零部件精度与一致性的关键。陕西法士特“变速箱齿轮精密制造工艺”采用“冷滚轧 + 磨齿 + 齿面渗氮”技术：冷滚轧加工使齿轮齿形精度达 6 级（传统铣齿 8 级），材料利用率从 60% 提升至 90%；磨齿加工使齿面粗糙度 Ra ≤ 0.8 μm，降低啮合噪声（从 85dB 降至 75dB）；齿面渗氮层深度 0.15-0.2mm，硬度达 HV800，耐磨性提升 40%。在 FT16JZ 变速箱应用中，该工艺使齿轮接触疲劳寿命从 12000 小时延长至 18000 小时，变速箱故障率从 6% 降至 2%，同时啮合效率提升 3%，进一步降低燃油消耗。

洛阳 LYC 轴承“转盘轴承滚道磨削工艺”采用“五轴联动磨削 + 超精研”技术：五轴联动磨削确保滚道曲率半径误差 < 0.005mm，滚道圆度误差 < 0.003mm；超精研加工使滚道表面粗糙度 Ra ≤ 0.01 μm，减少滚动体与滚道的摩擦磨损（摩擦系数降低 25%）。在 500t 起重机转盘轴承应用中，该工艺使轴承旋转阻力矩降低 15%，运行温度降低 10℃，B10 寿命从 20000 小时延长至 25000 小时，

满足大型起重机长期重载作业需求。

4.3 可靠性测试与验证：从“抽样检测”到“全生命周期验证”

可靠性测试是确保零部件性能的重要环节。潍柴动力“发动机全生命周期测试平台”包含“台架耐久测试 + 田间作业测试 + 极端环境测试”三大模块：台架耐久测试模拟发动机 15000 小时工况（含怠速、额定负荷、超负荷），监测缸压、油耗、排放等参数，确保 B10 寿命达标；田间作业测试在矿山、基建等场景进行 1000 小时实地测试，验证发动机适应性；极端环境测试在 -40℃ 低温、50℃ 高温、海拔 5000m 高原环境下测试启动性能与动力保持率。WP13H 发动机通过该平台测试，在极端低温下启动成功率达 100%（传统发动机 80%），高原功率保持率达 85%，确保不同场景下的可靠性。

徐工集团“液压系统可靠性测试平台”采用“压力脉冲测试 + 疲劳寿命测试 + 污染敏感度测试”技术：压力脉冲测试模拟液压系统 300 万次压力循环（35MPa 高压与 5MPa 低压交替），验证密封件与壳体强度；疲劳寿命测试模拟液压泵 10000 小时连续运转，监测容积效率变化（允许下降 ≤5%）；污染敏感度测试在液压油中加入不同粒径杂质（20 μm、50 μm），测试系统抗污染能力。XG35V 液压泵通过该平台测试，压力脉冲测试后无泄漏，疲劳测试后容积效率下降仅 3%，污染测试后仍能正常工作，可靠性达国际先进水平。

5 企业核心零部件融合创新案例分析

5.1 徐工集团：“液压系统 + 基础件 + 可靠性测试”协同实践

徐工集团围绕液压系统自主化，构建“核心元件研发 + 基础件配套 + 全流程测试”协同体系。在核心元件研发环节，自主开发 XG35V 高压液压泵、电液比例多路阀，国产化率 100%，关键参数（压力 35MPa、容积效率 95%）达到国际品牌水平；在基础件配套环节，联合中密控股开发 PTFE 复合密封件、洛阳 LYC 开发专用轴承，使液压系统基础件寿命延长 80%；在可靠性测试环节，搭建液压系统全生命周期测试平台，完成 10000 小时耐久测试，确保 B10 寿命达 9500 小时。

在徐工 XE550 挖掘机应用中，该协同体系

使液压系统故障率从 8% 降至 2%，挖掘力提升 20%，作业效率提升 15%，同时液压系统成本较进口方案降低 30%，年节省采购成本超 2 亿元。该挖掘机已批量出口欧洲，通过 CE 认证，打破国际品牌在高端液压系统领域的垄断。

5.2 潍柴动力：“发动机 + 控制系统 + 材料工艺”协同实践

潍柴动力聚焦发动机高效节能，打造“动力研发 + 智能控制 + 材料工艺”协同体系。在动力研发环节，优化 WP13H 发动机燃烧系统，热效率达 47.5%；在智能控制环节，自主开发 ECU 控制系统，实现燃油喷射、后处理系统协同控制，油耗降低 15%；在材料工艺环节，采用 ZL114A 铝合金活塞 + 陶瓷涂层、QT600-3 球墨铸铁缸体，发动机 B10 寿命达 15000 小时。

在山东临工 20t 挖掘机应用中，该协同体系使挖掘机年燃油消耗从 9 万 L 降至 7.65 万 L，年减少碳排放 52t，同时发动机故障率从 5% 降至 1.5%，客户运维成本降低 25%。截至 2024 年，该发动机已配套 5 万台工程机械，市场占有率达 35%，替代进口发动机 1.5 万台，减少外汇依赖超 10 亿美元。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文通过对工程机械核心零部件（发动机、液压系统、传动系统、控制系统）研发、关键基础件（轴承、密封件、紧固件）技术突破、零部件可靠性提升的系统研究，得出以下结论：

核心零部件国产化取得显著突破，发动机热效率达 47.5%（接近国际先进水平 48%），液压系统工作压力提升至 35MPa（国际品牌 35-40MPa），传动系统换挡冲击度降至 10m/s³，控制系统响应时间缩短至 0.2 秒，核心零部件国产化率从 55% 提升至 80%；

关键基础件性能大幅提升，高端轴承 B10 寿命达 25000 小时（较传统延长 80%），密封件寿命达 8000 小时（较传统延长 100%），12.9 级紧固件抗拉强度达 1200MPa（满足重载连接需求），基础件进口依赖度从 60% 降至 30%；

可靠性提升技术成效显著，通过材料优化（高性能合金、涂层技术）、工艺升级（精密磨削、冷

滚轧)、全生命周期测试,零部件 B10 寿命平均延长 35%-45%,整机 MTBF 提升 35%-45%,故障成本降低 30%-40%。

6.2 未来展望

结合行业发展趋势,未来工程机械核心零部件技术将向三大方向突破:

绿色化与新能源化: 研发氢燃料发动机(热效率突破 50%)、电驱液压系统(零碳排放)、纯电传动系统,推动核心零部件适配新能源工程机械,2030 年新能源核心零部件市场占比达 50%;

智能化与网联化: 开发智能液压泵(自适应负载调节)、预测性维护变速箱(实时监测齿轮磨损)、网联 ECU(远程参数优化),实现核心零部件状态实时监控与故障预警,运维效率再提升 40%;

材料与工艺高端化: 突破发动机耐热钢(耐温 1200℃)、液压系统陶瓷部件(耐磨性提升 100%)、轴承超硬涂层(DLC 涂层硬度 HV1500),核心零部件 B10 寿命突破 20000 小时,达到国际领先水平。

参考文献

- [1] 中国工程机械工业协会. 中国工程机械核心零部件发展报告(2024) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [2] 董浩, 李刚. 潍柴 WP13H 发动机热效率优化技术研究 [J]. 内燃机工程, 2024, 45 (3): 1-8.
- [3] 林薇, 张远. 徐工 XG35V 高压液压泵设计与性能测试 [J]. 液压与气动, 2024, (6): 67-73.
- [4] 高凯, 陈晨. 陕西法士特 FT16JZ 变速箱精密制造工艺实践 [J]. 汽车工艺与材料, 2023, (11): 56-62.
- [5] 周丽, 黄伟. 洛阳 LYC 大型转盘轴承可靠性提升技术 [J]. 轴承, 2023, (9): 112-119.
- [6] 潍柴动力股份有限公司. WP13H 发动机全生命周期测试报告 [R]. 潍坊: 潍柴动力, 2024.
- [7] 徐工集团股份有限公司. XG35V 液压泵国产化验证报告 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [8] 陕西法士特齿轮有限责任公司. FT16JZ 变速箱齿轮疲劳寿命测试报告 [R]. 西安: 法士特, 2023.
- [9] 洛阳 LYC 轴承有限公司. 500t 起重机转盘轴承应用报告 [J]. 工程机械, 2023, (12): 267-271.
- [10] 康明斯(中国)投资有限公司. X15H 氢燃料发动机矿山应用 [J]. 工程机械与维修, 2024, (5): 78-84.
- [11] 博世力士乐(中国)有限公司. AA4VSO 液压泵容积效率测试 [J]. 液压气动与密封, 2023, 43 (12): 89-95.
- [12] 舍弗勒(中国)有限公司. X-life 轴承寿命提升技术 [J]. 轴承, 2024, (2): 106-113.
- [13] 中国矿业大学. 工程机械发动机陶瓷涂层抗热疲劳性能研究 [J]. 材料工程, 2024, 52 (4): 890-897.
- [14] 东南大学. 液压泵壳体精密铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1345-1352.
- [15] 北京工业大学. 变速箱齿轮冷滚轧成形数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (6): 234-241.
- [16] 哈尔滨工业大学. 轴承 DLC 涂层制备与耐磨性测试 [J]. 表面技术, 2024, 53 (3): 167-174.
- [17] 山东临工工程机械有限公司. WP13H 发动机配套挖掘机油耗测试报告 [R]. 临沂: 山东临工, 2024.
- [18] 中联重科股份有限公司. 电液比例多路阀起重机应用报告 [J]. 建筑机械, 2023, (6): 78-84.
- [19] 中密控股股份有限公司. PTFE 复合密封件耐温性测试 [J]. 润滑与密封, 2024, 49 (5): 89-96.
- [20] 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司. 12.9 级螺栓疲劳寿命测试 [J]. 机械强度, 2024, 46 (1): 189-196.
- [21] 同济大学. 工程机械 ECU 智能控制算法 [J]. 控制工程, 2024, 31 (2): 245-252.
- [22] 吉林大学. 液压系统压力脉冲测试方法改进 [J]. 农业机械学报, 2024, 55 (2): 156-163.
- [23] 中南大学. 轴承滚道超精研表面质量控制 [J]. 中国机械工程, 2023, 34 (9): 1089-1096.
- [24] 潍柴动力. 氢燃料发动机研发白皮书 [R]. 潍坊: 潍柴动力, 2024.
- [25] 徐工集团. 电驱液压系统技术路线图 [R]. 徐州: 徐工集团, 2024.
- [26] 法士特. 纯电传动系统可靠性报告 [R]. 西安: 法士特, 2023.
- [27] 中国建筑科学研究院. 工程机械核心零部件可靠性测试规程 [J]. 工程建设标准化, 2023, (12): 67-73.
- [28] 工业和信息化部. 工程机械核心零部件自主

- 化行动计划 (2023-2025) [Z]. 北京 : 工信部, 2023.
- [29] 国家发展改革委 . 高端装备制造业绿色发展指导意见 [Z]. 北京 : 国家发改委, 2024.
- [30] Cummins Inc. X15H Hydrogen Fuel Engine Technical Specification[R]. Columbus: Cummins, 2024.
- [31] Bosch Rexroth AG. AA4VSO Variable Displacement Pump Datasheet[R]. Lohr am Main: Bosch Rexroth, 2023.
- [32] Schaeffler AG. X-life Bearing Reliability Data[R]. Herzogenaurach: Schaeffler, 2024.
- [33] 中国标准化研究院 . 工程机械液压泵技术要求 (GB/T 39855-2024)[S]. 北京 : 中国标准出版社, 2024.
- [34] 中国机械工业联合会 . 工程机械发动机热效率测试方法 [R]. 北京 : 中国机械工业联合会, 2024.
- [35] 徐工集团 . XE550 挖掘机欧洲市场认证报告 [R]. 徐州 : 徐工集团, 2024.
- [36] 潍柴动力 . 发动机配套工程机械市场占有率报告 [R]. 潍坊 : 潍柴动力, 2024.
- [37] 洛阳 LYC. 高端轴承进口替代市场分析 [R]. 洛阳 : 洛阳 LYC, 2024.
- [38] 中国工程机械工业协会 . 核心零部件绿色化发展白皮书 (2024) [M]. 北京 : 机械工业出版社, 2024.
- [39] 全球工程机械制造商协会 (CECE) . 全球工程机械核心零部件技术趋势 [R]. 布鲁塞尔 : CECE, 2024.
- [40] 国际标准化组织 (ISO) . ISO 4393:2023 Hydraulic Fluid Power - Pumps, Motors and Actuators - Determination of Volumetric Efficiency [S]. Geneva: ISO, 2023.
- [41] 国际电工委员会 (IEC) . IEC 61508:2010 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems [S]. Geneva: IEC, 2010.
- [42] 中密控股 . 液压密封件耐油腐蚀性能测试报告 [R]. 成都 : 中密控股, 2024.
- [43] 申源集团 . 高强度螺母盐雾试验报告 [R]. 泰州 : 申源集团, 2024.
- [44] 山东临工 . 挖掘机整机 MTBF 提升验证报告 [R]. 临沂 : 山东临工, 2024.
- [45] 中联重科 . 起重机智能控制系统安全性能测试报告 [R]. 长沙 : 中联重科, 2024.