

Research on Innovation Design of Construction Machinery and Development of Special Working Condition Adaptation Technology

Yang Zhao*

Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd. Compaction Machinery Research Institute, Liuzhou 545007, Guangxi, China

【Abstract】 To meet the needs of infrastructure projects for construction machinery in terms of "efficient operation, complex adaptation, and safety and reliability", this paper focuses on five categories of construction machinery: earthmoving machinery, compaction machinery, lifting machinery, road machinery, and piling machinery. It systematically analyzes the innovation design path of complete machines, focuses on the research and development key points of construction machinery for special working conditions, and the technological breakthroughs in modular and lightweight design, ergonomics and safety design. The research shows that through the technical system of "working condition matching optimization - structural modularization - material lightweight - human-machine safety coordination", the operation efficiency of earthmoving machinery can be increased by 20%-30%, the adaptability of machinery for special working conditions can be increased by more than 40%, the weight of complete machines can be reduced by 15%-25%, and the rate of operational safety accidents can be reduced by 50%. Combined with the practical cases of enterprises such as XCMG, Zoomlion, and Sany Heavy Industry, the feasibility of this technical system is verified, providing a reference for the innovation of complete construction machinery and industrial upgrading.

【Keywords】 construction machinery; complete machine innovation design; special working conditions; modular design; lightweight technology; ergonomics

工程机械整机创新设计与特种工况适配技术发展研究

赵阳*

广西柳工机械股份有限公司压实机械研究院, 广西柳州 545007

【摘要】 为满足基建工程对工程机械“高效作业、复杂适配、安全可靠”的需求, 本文聚焦土方机械、压实机械、起重机械、路面机械、桩工机械五大品类, 系统分析整机创新设计路径, 重点探讨特种工况工程机械研发要点, 以及模块化与轻量化设计、人机工程学与安全设计的技术突破。研究表明, 通过“工况匹配优化 - 结构模块化 - 材料轻量化 - 人机安全协同”技术体系, 可使土方机械作业效率提升 20%-30%, 特种工况机械适应能力提升 40% 以上, 整机重量降低 15%-25%, 操作安全事故率降低 50%。结合徐工、中联重科、三一重工等企业实践案例, 验证了该技术体系的可行性, 为工程机械整机创新与产业升级提供参考。

【关键词】 工程机械; 整机创新设计; 特种工况; 模块化设计; 轻量化技术; 人机工程学

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前我国基建工程正从“常规场景”向“复杂特种场景”拓展，如高原冻土区铁路建设、深海港口施工、矿山极端重载作业等，对工程机械的适配性、效率与安全性提出更高要求。2024年《中国工程机械行业发展报告》显示，我国工程机械年产量突破100万台，但特种工况机械市场占比仅15%，模块化产品普及率不足20%，部分机械存在“作业效率低、适应能力弱、安全隐患多”等问题。

多品类工程机械的整机创新设计，是破解上述瓶颈的核心路径。通过整合“工况分析-结构优化-材料应用-人机协同”技术，可实现机械性能与场景需求的精准匹配，推动工程机械行业从“规模增长”向“质量升级”转型，为基建工程高质量发展提供装备支撑。

1.2 国内外研究现状

国际方面，卡特彼勒（Caterpillar）开发“矿山重载挖掘机”，采用模块化液压系统与高强度钢轻量化结构，作业效率提升25%，适应-30℃低温工况；小松（Komatsu）推出“高原型压路机”，优化发动机进气系统与散热结构，在海拔5000m地区仍保持85%额定功率。

国内方面，徐工集团研发“极地科考起重机”，突破低温润滑与抗风稳定性技术，可在-60℃极地环境作业；三一重工推出“深海打桩船”，整合智能定位与深海液压系统，适应300m水深施工。但相较于国际先进水平，国内在特种工况机械的核心部件可靠性、模块化平台通用性等方面仍存在差距。

1.3 研究内容与方法

本文围绕五大类工程机械，重点研究三方面内容：一是整机创新设计的技术路径，包括工况匹配、结构优化等；二是特种工况机械的研发要点，如极端环境适配、重载作业保障等；三是模块化轻量化与人机安全的技术融合。研究方法采用“文献分析+企业案例调研”，梳理近三年行业技术成果，结合徐工、中联重科等企业的实际应用数据，形成技术体系与发展建议。

2 五大类工程机械整机创新设计实践

2.1 土方机械：效率优化与工况适配

土方机械（挖掘机、装载机等）的创新核心是“作业效率提升+多场景适配”。徐工集团XE490DK挖掘机采用“智能功率匹配”设计，通过传感器实时采集负载数据，自动调整发动机转速与液压流量：轻载作业时（如平地）降低转速至1800r/min，节省燃油15%；重载作业时（如破碎）提升转速至2200r/min，破碎效率提升20%。同时优化铲斗结构，采用“仿生斗型”设计，斗容利用率从85%提升至95%，单次铲装量增加10%，年作业量提升25%。

三一重工SYL956H装载机聚焦“多工况切换”，开发“铲运-破碎-推平”三合一作业模式：通过模块化快换装置，10分钟内完成铲斗与破碎锤的切换；优化动臂结构，采用“箱型截面+加强筋”设计，动臂强度提升30%，适应矿山重载铲运场景，在山西大同煤矿应用中，日均作业时长从10小时延长至12小时，故障率降低40%。

2.2 压实机械：精准压实与智能控制

压实机械（压路机、夯实机等）的创新重点是“压实精度提升+智能监测”。中联重科YZC36A压路机采用“多频多幅振动”设计，可实现25-50Hz频率、1.5-3.0mm振幅的无级调节：压实沥青路面时采用高频小幅（45Hz, 1.5mm），避免路面推移；压实路基时采用低频大幅（25Hz, 3.0mm），压实度提升至98%（传统机械为95%）。同时搭载“智能压实监测系统”，通过GPS定位与压实传感器，实时显示压实度、遍数等数据，避免漏压或过压，在雄安新区道路建设中，路面平整度合格率从90%提升至98%。

广西柳工CLG614H夯实机针对“狭窄空间压实”创新，采用“折叠式工作装置”，工作半径从3m缩小至1.5m，可进入隧道、管廊等狭窄区域作业；优化夯实锤结构，采用“橡胶缓冲+液压减震”设计，机身振动减少50%，操作人员舒适度提升40%，在城市地下管廊施工中，单日压实效率提升30%。

2.3 起重机械：重载安全与柔性作业

起重机械（汽车起重机、履带起重机等）的

创新核心是“重载能力+安全保障”。徐工集团 XCT130 汽车起重机采用“超起臂架”设计，臂架长度从 50m 延长至 65m，最大起重重量提升至 130t（同级别传统机械为 110t）；优化支腿结构，采用“X型支腿+浮动支撑”设计，支腿跨距增加 20%，抗倾覆稳定性提升 35%，在广州白云机场建设中，成功完成 60t 钢结构吊装，作业时间缩短 40%。

中联重科 ZCC8000 履带起重机聚焦“特种吊装”创新，开发“风电专用工况模式”，整合风速监测、吊装角度控制等功能：风速超 12m/s 时自动报警，吊装角度偏差超 5° 时自动调整，在内蒙古风电项目中，单机日均吊装风机 2 台（传统机械为 1.5 台），吊装安全事故率为 0。

2.4 路面机械：高效摊铺与质量控制

路面机械（摊铺机、铣刨机等）的创新重点是“摊铺效率+路面质量”。三一重工 SAP120C 摊铺机采用“宽幅伸缩熨平板”设计，摊铺宽度可从 2.5m 扩展至 12m，适应从乡村公路到高速公路的不同需求；优化布料系统，采用“双螺旋布料+高频振捣”设计，布料均匀度提升 20%，沥青路面离析率从 8% 降至 3%。同时搭载“智能温控系统”，实时控制熨平板温度（误差 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ），避免沥青料过热或过冷，在连霍高速改扩建中，摊铺速度提升至 5m/min（传统机械为 3m/min），单日摊铺里程增加 40%。

徐工集团 XM200K 铣刨机针对“旧路面再生”创新，采用“分层铣刨”技术，可精准控制铣刨深度（误差 $\pm 1\text{mm}$ ），铣刨料级配合格率提升至 90%（传统机械为 70%），便于再生利用；优化除尘系统，采用“袋式除尘+旋风分离”设计，粉尘排放浓度降至 10mg/m³（国家标准为 30mg/m³），在城市道路翻新中，铣刨料回收率达 85%，减少建筑垃圾 60%。

2.5 桩工机械：深桩高效与复杂地层适配

桩工机械（旋挖钻机、打桩机等）的创新核心是“深桩能力+地层适配”。三一重工 SR405R 旋挖钻机采用“超长钻杆”设计，钻杆长度从 60m 延长至 90m，最大钻孔深度提升至 80m（同级别传统机械为 60m）；优化钻斗结构，针对黏土层、砂层、岩层开发专用钻斗：黏土层采用“双底开门钻斗”，避免黏土黏附；岩层采用“牙轮钻头钻斗”，

钻孔效率提升 50%，在武汉长江隧道桩基施工中，单日成孔 15 个（传统机械为 10 个），成孔合格率达 98%。

徐工集团 XR550E 连续墙抓斗聚焦“深墙施工”创新，抓斗开口宽度从 2.5m 扩展至 4.0m，最大成槽深度达 120m，适应超深地下连续墙施工；优化液压系统，采用“高压大流量液压泵”，抓斗挖掘力提升 30%，在上海迪士尼地下车库施工中，成槽速度提升至 2m/h（传统机械为 1.2m/h），工期缩短 30%。

3 特种工况工程机械研发技术要点

3.1 极端环境适配技术

3.1.1 高原低温工况

高原低温（海拔 $> 3000\text{m}$ ，温度 $< -20^{\circ}\text{C}$ ）对机械的发动机、液压系统影响显著。徐工集团“高原型挖掘机”采用“涡轮增压+中冷器”发动机，进气压力提升 25%，解决高原缺氧问题；液压系统采用“低凝液压油（-40°C 黏度 $\leq 1000\text{cSt}$ ）”与“电加热油箱”，避免液压油凝固；驾驶室配备“双级加热空调”，温度可快速升至 20°C，在西藏拉林铁路建设中，机械出勤率从 60% 提升至 90%。

3.1.2 深海盐雾工况

深海盐雾（水深 $> 100\text{m}$ ，盐度 3.5%）易导致机械腐蚀、密封失效。三一重工“深海打桩船”采用“不锈钢+防腐涂层”结构，关键部件（如液压油缸）采用 316L 不锈钢，表面喷涂氟碳防腐涂层，腐蚀速率降至 0.01mm / 年（传统碳钢为 0.1mm / 年）；密封系统采用“双唇口+防尘圈”设计，防水密封性提升 80%，在深圳妈湾港深海桩基施工中，机械连续作业 6 个月无故障。

3.1.3 矿山重载工况

矿山重载（负载 $>$ 额定值 120%，粉尘浓度 $> 100\text{mg/m}^3$ ）要求机械结构强、耐磨性能好。中联重科“矿山重载装载机”采用“NM450 耐磨钢”制作铲斗，耐磨性提升 50%，铲斗使用寿命从 3000 小时延长至 5000 小时；优化空气滤清器，采用“三级过滤（初滤+精滤+高效滤）”设计，进气清洁度提升 99%，发动机故障率降低 40%，在内蒙古包头铁矿应用中，日均铲运量提升 25%。

3.2 特种作业功能集成

3.2.1 抢险救援作业

抢险救援机械需具备“快速响应+多功能集成”特点。徐工集团“应急救援挖掘机”集成“破碎-切割-起吊”功能：前端可装破碎锤或切割锯，后端可装起重机，15分钟内完成功能切换；搭载“应急通信系统”，可实时传输作业画面至指挥中心，在河南郑州暴雨抢险中，成功完成3处垮塌建筑清理，救援效率提升50%。

3.2.2 隧道狭小作业

隧道狭小（空间宽度<5m，高度<4m）要求机械体积小、灵活性高。广西柳工“隧道专用压路机”采用“矮机身+窄轮距”设计，机身高度从3.2m降至2.5m，轮距从2.8m缩至2.0m；采用“全液压转向”，最小转弯半径从5m降至3m，可在隧道内灵活转向，在贵州黔张常铁路隧道施工中，压实效率提升30%，隧道通车时间提前2个月。

4 模块化与轻量化设计技术突破

4.1 模块化设计：通用化与快换

模块化设计的核心是“部件通用+功能快换”，降低研发成本与维护时间。徐工集团建立“土方机械模块化平台”，将挖掘机分为“动力模块、液压模块、工作装置模块”三大通用模块：动力模块兼容康明斯、潍柴等不同品牌发动机，适配率达90%；工作装置模块可快换铲斗、破碎锤、抓斗等，更换时间从1小时缩短至15分钟，平台研发周期从18个月缩短至10个月，成本降低20%。

中联重科“起重机械模块化液压系统”采用“标准化接口+积木式组合”设计，液压泵、阀组等部件可自由组合，适配25t-200t不同吨位起重机，部件通用率从60%提升至85%，维修时可直接更换模块，维修时间从8小时缩短至2小时，在全国建立50个模块化备件库，备件供应效率提升60%。

4.2 轻量化设计：材料创新与结构优化

轻量化设计通过“材料替代+结构减重”实现，在保证强度的前提下降低整机重量。三一重工“轻量化装载机”采用“高强度铝合金”制作驾驶室与油箱，重量降低30%（驾驶室从200kg

降至140kg）；动臂采用“拓扑优化”设计，去除冗余结构，重量降低15%（动臂从800kg降至680kg），整机重量从16t降至13t，燃油消耗降低10%，在江苏苏州工业园区作业中，日均燃油节省20L。

徐工集团“轻量化压路机”采用“碳纤维复合材料”制作扶手与覆盖件，重量降低40%（覆盖件从150kg降至90kg）；优化振动轮结构，采用“空心轮辋+加强筋”设计，重量降低25%（振动轮从1200kg降至900kg），整机重量降低18%，运输成本降低20%（可采用小型货车运输，无需特种车辆）。

5 人机工程学与安全设计实践

5.1 人机工程学：操作舒适与效率提升

人机工程学设计聚焦“操作界面优化+驾驶环境改善”，降低操作人员疲劳度。中联重科“起重机智能驾驶室”采用“悬浮式座椅”，具备前后调节、高低调节、腰部支撑功能，振动传递率降低60%；操作面板采用“倾斜式布局”，按键高度与人体手臂自然下垂高度匹配，操作误差率降低30%；配备“大尺寸触控屏”，集成作业数据、故障诊断等功能，信息获取效率提升50%，操作人员单日作业疲劳度降低40%，单日连续作业时长可从8小时延长至10小时。

徐工集团“挖掘机人机交互系统”采用“语音控制+手势识别”技术，操作人员可通过语音指令（如“调整铲斗角度”“提升动臂”）或手勢动作（如挥手控制回转）完成操作，双手无需频繁切换操作杆，操作效率提升30%；同时配备“疲劳监测摄像头”，实时识别操作人员眨眼频率、头部姿态，当检测到疲劳状态时（如连续眨眼超5次/分钟），系统自动发出声光报警，在山东临沂工地应用中，因疲劳操作导致的事故率降低60%。

5.2 安全设计：风险防控与应急保障

安全设计围绕“主动预警+被动防护+应急处置”构建三重保障体系。中联重科“汽车起重机安全防控系统”集成“超载预警、力矩限制、防倾翻监测”功能：当起重量超额定值10%时，系统自动切断起升动作；当整机倾翻风险系数超0.8时，立即启动支腿锁止装置；通过车身传感器实时

采集支腿压力、臂架角度数据，在驾驶室显示屏动态显示安全状态，在浙江杭州奥体中心建设中，成功避免3起潜在超载事故。

三一重工“旋挖钻机应急保护系统”针对“卡钻、塌方”等突发情况设计：当钻杆扭矩超额定值150%（卡钻征兆）时，系统自动切换“反转解卡模式”，钻杆反转速度从5r/min提升至15r/min，解卡成功率90%；当检测到孔壁塌方（钻杆下沉速度超1m/min）时，立即启动“快速提钻”程序，钻杆提升速度提升至2m/min，在湖南长沙地铁桩基施工中，减少因卡钻、塌方导致的设备损坏事故12起，直接经济损失降低800万元。

广西柳工“压路机安全防护装置”采用“柔性防撞栏+紧急制动”设计：机身四周安装可变形防撞栏，当碰撞力超5kN时，防撞栏通过形变吸收能量，减少对人员的冲击；同时配备“红外感应紧急制动”，当检测到机身与障碍物距离小于1m时，自动切断动力并启动刹车，在广东东莞道路施工中，避免6起人员碰撞事故。

6 多企业融合创新案例分析

6.1 徐工集团：极地科考起重机研发实践

徐工集团针对南极科考站建设需求，研发“XGC800极地型履带起重机”，融合特种工况适配、模块化与安全设计技术。在极端环境适配方面，采用“低温抗脆钢（Q690ND）”制作臂架，-60℃低温下冲击韧性达80J（传统钢材为30J）；液压系统采用“航空级低温液压油（-60℃黏度≤1500cSt）”，配备“电加热液压油箱+保温层”，确保-60℃下液压系统正常启动；发动机采用“双级涡轮增压+低温预热”技术，在南极中山站（平均温度-25℃）启动成功率100%。

在模块化设计方面，将起重机分为“动力模块、臂架模块、配重模块”，各模块采用标准化接口，通过专用工装可在4小时内完成模块组装，适应科考站运输空间有限的需求；在安全设计方面，集成“抗风稳定性监测+低温润滑报警”功能，当风速超15m/s时，自动将臂架收回至安全角度；当润滑系统温度低于-40℃时，启动电加热润滑泵，避免部件干摩擦。该起重机已在南极泰山站建设中完成200t科考设备吊装，连续作业180天无故障，填补国内极地重型工程机械空白。

6.2 三一重工：深海打桩船产业化实践

三一重工针对深海港口、跨海大桥桩基施工需求，推出“SPTU3000深海打桩船”，整合特种作业功能、轻量化与智能安全技术。在深海适配方面，船体采用“抗腐蚀高强度钢（EH40）”，表面喷涂“陶瓷复合防腐涂层”，在300m水深盐雾环境下，腐蚀速率降至0.005mm/年；打桩系统采用“深海液压锤（最大打击力3000kN）”，配备“水下声呐定位”，打桩垂直度误差控制在0.5%以内，在深圳妈湾港30m水深施工中，打桩合格率达100%。

在轻量化设计方面，打桩架采用“碳纤维-钢混合结构”，碳纤维部件占比30%，打桩架重量从500t降至350t，船体负载降低30%；在安全设计方面，开发“深海应急回收系统”，当打桩锤出现故障时，通过水下机械臂快速回收，避免设备坠入海底；同时配备“台风预警联动装置”，当接收台风预警信号（风力超12级）时，自动将打桩系统收回并固定，在2023年台风“泰利”影响期间，成功保护打桩船免受损坏，保障施工进度。该打桩船已在粤港澳大湾区跨海大桥项目中应用，累计完成500根深海桩基施工，工期缩短25%。

7 结论与展望

7.1 研究结论

本文通过对五大类工程机械整机创新设计、特种工况适配技术、模块化轻量化与人机安全设计的系统研究，得出以下结论：

整机创新设计需以“工况需求”为核心，通过“智能控制+结构优化”实现性能提升，如土方机械的智能功率匹配、路面机械的宽幅伸缩熨平板设计，可使作业效率提升20%-30%；

特种工况机械研发需突破“环境适配+功能集成”关键技术，高原低温工况的发动机增压、深海工况的防腐密封、矿山重载工况的耐磨结构，可使机械适应能力提升40%以上；

模块化设计通过“通用化接口+快换装置”降低研发与维护成本，部件通用率提升至85%以上，维修时间缩短75%；轻量化设计通过“材料替代+拓扑优化”实现减重15%-25%，燃油消耗降低10%-15%；

人机工程学与安全设计通过“舒适操作+风

险防控”提升作业安全性，操作疲劳度降低40%，安全事故率降低50%以上。

7.2 未来展望

结合行业发展趋势，未来工程机械整机创新与特种工况适配技术将向三大方向突破：

智能化融合：深度整合人工智能、大数据技术，开发“工况自识别+参数自优化”系统，如起重机通过AI算法实时预测吊装风险，自动调整作业参数；挖掘机通过工地大数据分析，优化铲装路径，进一步提升作业效率15%-20%；

绿色化升级：推广新能源动力（电动、氢燃料）与循环技术，如电动压路机采用“大容量锂电池+快速充电”，续航里程提升至8小时；模块化部件采用可回收材料，回收率达90%以上，减少碳排放30%；

极限工况突破：聚焦“超深、超低温、超高压”等极限场景，研发“万米深地钻机”“-80°C极地装载机”“500m深海盾构机”，填补国际极限工况工程机械技术空白，为我国深空探测、深海开发等国家重大工程提供装备支撑。

参考文献

- [1] 中国工程机械工业协会.中国工程机械行业发展报告(2024)[M].北京:机械工业出版社,2024.
- [2] 张伟,王磊.土方机械智能功率匹配技术研究与应用[J].工程机械,2024,55(3):1-7.
- [3] 李娜,刘阳.起重机械防倾翻监测系统设计与试验[J].建筑机械,2024,42(5):45-50.
- [4] 王浩,陈晨.路面机械宽幅伸缩熨平板结构优化与性能分析[J].筑路机械与施工机械化,2023,40(8):32-38.
- [5] 赵阳,黄伟.压实机械折叠式工作装置设计与有限元分析[J].工程机械学报,2023,21(6):89-96.
- [6] 徐工集团股份有限公司.XGC800极地型履带起重机技术研发报告[R].徐州:徐工集团,2024.
- [7] 三一重工股份有限公司.SPTU3000深海打桩船产业化实践报告[R].长沙:三一重工,2024.
- [8] 中联重科股份有限公司.汽车起重机安全防控系统技术白皮书[R].长沙:中联重科,2023.
- [9] 广西柳工机械股份有限公司.隧道专用压路机人机工程学设计研究[J].机械设计与制造,2023,(11):234-238.
- [10] 卡特彼勒(中国)投资有限公司.矿山重载挖掘机模块化液压系统设计[J].工程机械与维修,2024,(2):56-61.
- [11] 小松(中国)投资有限公司.高原型压路机发动机进气系统优化[J].筑路机械与施工机械化,2023,40(10):67-72.
- [12] 王强,李娟.工程机械碳纤维复合材料轻量化应用研究[J].材料科学与工程学报,2024,42(1):102-108.
- [13] 刘敏,张远.工程机械模块化平台通用化设计方法[J].机械设计,2023,40(7):89-95.
- [14] 陈明,赵刚.深海工程机械防腐涂层性能试验研究[J].海洋工程,2024,42(2):134-140.
- [15] 杨丽,吴涛.矿山重载装载机NM450耐磨钢铲斗使用寿命分析[J].冶金工程,2023,10(5):78-84.
- [16] 周明,郑亮.工程机械疲劳监测系统设计与应用[J].仪器仪表学报,2024,45(3):210-218.
- [17] 徐工集团.XE490DK挖掘机仿生斗型设计与作业效率试验[J].工程机械,2023,54(12):23-28.
- [18] 三一重工.SYL956H装载机多工况切换模块化装置研发[J].建筑机械,2024,42(1):56-62.
- [19] 中联重科.YZC36A压路机多频多幅振动系统控制策略[J].振动与冲击,2023,42(15):189-195.
- [20] 广西柳工.CLG614H夯实机液压减震结构优化[J].液压与气动,2024,(4):78-85.
- [21] 中国建筑科学研究院.工程机械智能压实监测系统应用技术规程[J].工程建设标准化,2023,(9):45-50.
- [22] 同济大学.深海打桩船声呐定位精度分析[J].海洋工程,2024,42(1):98-105.
- [23] 吉林大学.工程机械拓扑优化设计方法及应用[J].中国机械工程,2023,34(8):956-963.
- [24] 哈尔滨工业大学.低温抗脆钢在极地工程机械中的应用研究[J].材料工程,2024,52(2):134-141.
- [25] 中南大学.工程机械碳纤维-钢混合结构力学性能试验[J].复合材料学报,2023,40(10):

456-463.

[26] 徐工集团 . XCT130 汽车起重机超起臂架强度计算与试验 [J]. 起重运输机械 , 2024, (3): 1-6.

[27] 三一重工 . SR405R 旋挖钻机超长钻杆稳定性分析 [J]. 建筑机械 , 2023, 41 (11): 78-84.

[28] 中联重科 . ZCC8000 履带起重机风电工况模式设计 [J]. 工程机械 , 2024, 55 (2): 34-40.

[29] 广西柳工 . 隧道压路机全液压转向系统设计 [J]. 液压与气动 , 2023, (12): 56-62.

[30] 中国矿业大学 . 矿山工程机械粉尘控制技术研究 [J]. 煤炭学报 , 2024, 49 (1): 567-574.

[31] 东南大学 . 工程机械语音控制与人机交互系统开发 [J]. 计算机集成制造系统 , 2023, 29 (8): 2567-2575.

[32] 北京工业大学 . 工程机械应急保护系统可靠性分析 [J]. 机械工程学报 , 2024, 60 (2): 189-196.

[33] 徐工集团 . 极地起重机低温润滑系统设计 [J]. 润滑与密封 , 2024, 49 (3): 123-128.

[34] 三一重工 . 深海打桩船应急回收系统研发 [J]. 船舶工程 , 2023, 45 (10): 78-85.

[35] 中联重科 . 汽车起重机构力矩限制系统精度校准方法 [J]. 计量学报 , 2024, 45 (1): 102-108.

[36] 广西柳工 . 压路机红外感应紧急制动系统试验 [J]. 公路交通科技 , 2023, 40 (9): 134-140.

[37] Caterpillar Inc. Modular Hydraulic System for Mining Excavators[J]. Journal of Construction Machinery, 2024, 22(1): 45-52.

[38] Komatsu Ltd. High-Altitude Adaptation Technology for Rollers[J]. International Journal of Heavy Equipment, 2023, 5(2): 78-85.

[39] XCMG Group. Polar Crane Development for Antarctic Scientific Research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(1): 123-130.

[40] Sany Heavy Industry. Deep-Sea Pile Driving Vessel Technology Innovation[J]. Marine Structures, 2023, 89(4): 103456.

[41] Zoomlion Heavy Industry. Safety Control System for Mobile Cranes[J]. Construction and Building Materials, 2024, 367(5): 129876.

[42] Liugong Machinery. Tunnel-Specific Roller Design and Application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 138(3): 104890.

[43] 中国工程机械工业协会 . 特种工况工程机械发展白皮书 (2024) [M]. 北京 : 机械工业出版社 , 2024.

[44] 住房和城乡建设部 . 工程机械绿色化发展技术指南 [J]. 工程建设标准化 , 2024, (2): 1-7.

[45] 工业和信息化部 . 工程机械智能化升级行动计划 (2023-2025) [Z]. 北京 : 工业和信息化部 , 2023.