

实验验证结果表明,经上述多物理场协同优化设计的高速磁悬浮鼓风机,在 25000 转 / 分的额定转速下稳定运行,其综合性能相较于传统驱动方案节能率超过 30%,运行噪音有效控制在 80 分贝以下,年节电量显著,经济效益与环保效益突出。这一引入神经网络模型案例的成功实施,凸显了多物理场耦合仿真与 AI 深度融合在电磁设计优化环节中的核心价值,提升数值模拟求解速度,加速了电磁设计优化的工作进程,为下一代高性能磁悬浮电机的设计提供了关键的技术路径与范例。

4 结语

多物理场耦合仿真技术已成为磁悬浮电动机电磁设计的核心手段,其在降低损耗、提升稳定性及推动节能技术革新方面展现出显著优势。随着人工智能技术与多尺度建模方法的不断融合,多物理场耦合仿真正朝着智能化与高精度方向演进。神经网络代理模型、深度强化学习等 AI 方法已被引入以替代传统迭代求解过程,在保证计算精度的同时将设计周期大幅度缩短,显著提升了复杂机电系统的优化效率。未来,该领域将加速向智能化、高精度方向发展,为高端装备制造与可持续发展提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 张欣悦.电励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的设计与分析 [D]. 2024.
- [2] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 1.12MW 高速永磁电机多物理场综合设计 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 171-80.
- [3] 刘豪.无槽永磁直线同步电动机的设计研究 [J]. 微特电机, 2015, 43(08): 24-6+31.
- [4] 韩邦成,薛庆昊,刘旭.高速磁悬浮永磁电机多物理场分析及转子损耗优化 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 680-8.
- [5] 秦雪飞.大功率高速永磁电机多物理场综合设计 [D]: 浙江大学, 2023.
- [6] 肖宏远,林定标,陈克平,等.高速电动机制动磁力透平的研制与应用[J].中国机械,2024,(18):23-27.
- [7] 鲍旭聪,王晓琳,彭旭衡,等.高速电机驱动关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6856-6871.
- [8] 陈亮亮.磁悬浮高速飞轮储能系统永磁电机转子强度分析及转子振动控制[D]: 浙江大学,2017.
- [9] 吴新振,王东,郭云珺,等.多相电机定子绕组组合模式对磁动势与参数的影响[J].中国电机工程学报,2014,34(18): 2944-2951
- [10] 杨思怡.基于有限元法的电磁—热耦合仿真及 CAE 技术研究[D].电子科技大学,2023.
- [11] 花为,顾佳磊.现代电机优化方法综述[J].导航与控制,2021,20(5): 13-25.
- [12] Gallardo-Romero E U, Ruiz-Aguilar D. High order edge-based finite elements for 3D magnetotelluric modeling with unstructured meshes[J]. Computers & Geosciences, 2022, 158: 104971.
- [13] 郑轩,彭天健,吴雄伟,等.高功率电磁学中的智能计算技术[J].电波科学学报,2024,39(05):885-904.
- [14] 杨淑媛,杨晨,冯志玺,等.电磁目标表征:知识-数据联合驱动新范式[J].航空兵器,2024,31(02):17-31.
- [15] LI C, WANG X, LIU F, et al. Analysis of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor based on equivalent reluctance network model[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems (TEMS), 2022, 6(2): 135-144.
- [16] 尹文祿.高阶矢量有限元方法在电磁领域中的研究及应用[D].长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [17] 王鑫宸.数据驱动 MOEA/D 及其在高性能电磁结构设计中的应用[D].中国科学技术大学,2023.

Application efficiency analysis of intelligent bulldozer in earthwork construction of plain reservoir

Ruihang Wang¹ Weihan Li¹ Yanqing Ma¹ Hangrui Cao² Xiao Zhang¹

1. China Construction Eighth Engineering Division Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

2. Southwest Construction Engineering Co., Ltd., of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

This study investigates the application efficiency of intelligent bulldozers. First, it defines core application scenarios for earthwork construction in plain reservoirs and outlines an optimized workflow through path planning optimization, equipment coordination, and dynamic parameter adjustments. Subsequently, the research analyzes the performance of intelligent bulldozers and corresponding improvement mechanisms across four dimensions: construction efficiency, quality, cost, and safety/environmental impact. Finally, it identifies challenges at technical, managerial, talent, standardization, and ecological levels, proposing optimization strategies including multi-system integration, promotion of leasing models, and establishment of unified data standards. The findings demonstrate that intelligent bulldozers can significantly enhance earthwork construction efficiency in plain reservoirs, providing support for intelligent engineering practices.

Keywords

intelligent bulldozer; plain reservoir; earthwork construction

智能推土机在平原水库土方施工中的应用效能分析

王瑞樟¹ 李维汉¹ 马延青¹ 曹航瑞² 张潇¹

1. 中建八局第二建设有限公司, 中国·山东 济南 250000

2. 中建八局西南建设工程有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

本文围绕智能推土机的应用效能展开研究。首先界定其在平原水库土方施工中的核心应用场景，并阐述基于路径规划优化、设备协同联动、动态参数调整的作业流程优化路径；进而从施工效率、施工质量、施工成本、施工安全与环境四个维度，分析智能推土机的效能表现及对应的提升机制；最后指出技术、管理与人才、标准与生态层面的挑战，并提出多系统融合定位、推广租赁模式、建立统一数据标准等优化策略。研究表明，智能推土机可显著提升平原水库土方施工效能，为工程智能化实践提供支撑。

关键词

智能推土机；平原水库；土方施工

1 引言

传统推土机存在超挖欠挖、成本高、安全风险大等问题，难以适配智能化需求。依托 GNSS 定位、实时传感等技术的智能推土机，成为突破传统局限的关键设备。本文以智能推土机在平原水库土方施工的应用效能为研究对象，梳理其场景与流程优化方法，分析效能、提出挑战对策，为工程智能化升级提供参考。

2 智能推土机在平原水库土方施工中的应用场景与作业流程优化

2.1 核心应用场景界定

在平原水库土方施工流程中，智能推土机的核心应用场景可围绕施工关键环节进行界定，其应用既贴合平原地形开阔、土方作业量大且施工精度要求高的特点，也与水库土方施工的核心需求深度适配。在平原水库土方开挖作业中，智能推土机可依托 GPS/ 北斗定位系统与地形感知技术，精准识别开挖区域边界与设计深度，避免传统开挖作业中易出现的超挖、欠挖问题，如图 1 所示，同时结合预设开挖路径自动调整作业参数，适配平原地区土层分布相对均匀但作业面广的特性，提升开挖作业的规范性与稳定性；在平原水库

【作者简介】王瑞樟（1994-），男，中国黑龙江绥化人，本科，工程师，从事水利工程研究。

土方填筑与场地平整作业中，智能推土机能够结合水库坝体、库盆等结构对土方压实度、场地平整度的严格要求，通过实时采集作业区域的土方密度、高程数据，动态调整推土力度与行走轨迹，尤其在大面积平整作业中，可依托智能系统实现多台设备的作业轨迹协同，减少人工操作导致的平整度偏差，保障填筑体的结构稳定性与场地的后续使用条件；在土方转运与协同作业中，智能推土机可作为土方流转的关键衔接设备，一方面通过智能调度系统规划最优转运路径，减少在平原开阔作业面内的空驶距离，另一方面与挖掘机、压路机等其他施工设备建立数据共享链路，根据前方开挖进度与后方填筑需求动态调整转运频次与土方量，实现土方开挖、转运、填筑环节的高效衔接，避免单一设备作业脱节导致的施工效率损耗^[1]。



图 1 智能推土机在平原水库土方开挖作业场景

2.2 作业流程优化路径

在平原水库土方施工的作业流程优化中，智能推土机可从路径规划、设备协同与动态调整三个核心方向推进，充分适配平原作业面开阔、土方流转环节多的特点。在施工路径规划优化上，其依托路径优化算法与实时定位，结合平原水库作业区域划分，自动生成最优行驶路线以减少空驶里程，同时通过预设作业循环逻辑提升动作衔接效率，避免单机作业中断；在与其他设备的协同优化方面，智能推土机可与挖掘机、压路机等通过数据共享联动，根据开挖量、填筑需求匹配作业频次与工程量，减少设备间等待时间，在大面积作业中还能实现多机集群化协同，优化整体施工节奏；在动态作业调整上，其借助土壤传感器、高程测量模块实时采集作业数据，若发现土层阻力异常或高程偏差，系统可自动调整推土铲角度、行走速度等参数，无需人工停机干预，减少因参数固定导致的返工或效率损耗，保障施工流程稳定^[2]。

3 智能推土机应用效能的多维度分析

3.1 施工效率效能分析

在平原水库土方施工的效率维度中，单位时间土方作业量、作业时长利用率与设备出勤率是核心评价指标，三者共同反映智能推土机对施工进度的推动作用。从提升机制来看，智能推土机的自动作业功能可大幅减少人工操作的反应

间隙，尤其在平原开阔作业面内，无需频繁依赖人工判断作业路径与动作衔接，能持续保持稳定作业节奏；其搭载的智能系统可实时规避人为操作中易出现的路径偏差、动作冗余等问题，避免因操作失误导致的作业中断或重复作业，间接提升单位时间内的有效作业量；同时，智能推土机的故障预警功能与低故障率特性，能降低设备因突发故障导致的停机时间，结合连续作业模式，进一步提高作业时长利用率与设备出勤率，适配平原水库土方工程量大、需快速推进的施工需求。

3.2 施工质量效能分析

施工质量效能的评价需聚焦土方平整度、压实度达标率与施工偏差率，这三项指标直接关系平原水库坝体稳定性、库盆蓄水能力等核心功能。智能推土机对质量的保障机制主要依托精准定位与实时监测调整实现：其集成的 GPS/北斗双模定位系统精度可达厘米级，能严格按照平原水库土方施工的设计标高与边界要求作业，有效控制施工偏差率，避免传统推土机因人工视线误差导致的超挖、欠填或边界偏移，如图 2 所示；同时，智能推土机配备的土壤压实传感器与高程测量模块，可实时采集作业区域的土方密度与地表高程数据，若发现压实度未达设计标准或平整度超出允许误差，系统会自动调整推土铲压力、行走速度等参数，动态修正作业行为，确保土方填筑区域的压实度达标率，为平原水库后续蓄水与长期运行提供质量保障^[3]。



图 2 智能推土机的设备细节与作业场景

3.3 施工成本效能分析

施工成本效能可通过单位土方施工成本、设备维护成本与人工成本三项指标衡量，智能推土机主要通过减少资源浪费与优化投入结构实现成本优化。在人工成本方面，智能推土机支持远程操控与半自主作业模式，单台设备仅需少量人员进行监控与应急操作，相比传统推土机需 1-2 名操作人员全程跟进，可大幅减少人工投入，尤其在多台设备集群作业时，人工成本节约效果更显著；在设备维护成本上，智能系统的实时状态监测功能可提前预警发动机、液压系统等关键部件的潜在故障，避免因故障扩大导致的高额维修费用，同时其作业动作的规范性可减少设备过度磨损，延长易损件使用寿命，降低维护频次与成本；此外，智能推土机对施工

质量的精准控制，能避免因质量不达标导致的返工重筑，减少土方、燃油等资源浪费，间接降低单位土方施工成本，契合平原水库土方工程规模大、成本控制需求高的特点^[4]。

3.4 施工安全与环境效能分析

施工安全与环境效能的评价需关注安全事故发生率、燃油消耗率及噪声/扬尘污染程度，智能推土机通过技术革新实现安全与环保双重提升。在安全层面，其远程操控功能可让操作人员远离平原水库土方施工中的高风险区域，减少人员直接暴露于机械碰撞、土方坍塌等风险的概率，显著降低安全事故发生率；部分智能推土机还配备碰撞预警系统，能识别作业范围内的人员、其他设备或障碍物，自动减速或停机，进一步强化安全防护。在环境层面，智能推土机的发动机采用电控节能技术，可根据作业负载自动调节动力输出，避免传统推土机“大油门空转”导致的燃油浪费，降低燃油消耗率；同时，其作业路径的优化与动作的精准性，能减少土方随意堆放与过度推运，降低施工过程中扬尘产生量，且部分机型配备的降噪装置可削弱作业噪声，减轻对平原水库周边生态环境与居民生活的影响。

4 智能推土机应用面临的挑战与优化策略

4.1 技术层面的挑战与对策

在技术层面，智能推土机在平原水库土方施工中面临的挑战与施工场景的特殊性深度关联。平原水库土方作业中可能出现的深坑开挖场景，易导致 GNSS 信号被遮挡或丢失，影响智能系统的定位精度；同时，长时间连续作业与复杂工况可能降低智能系统的运行稳定性，而平原地区局部存在的软基、夹层土等复杂地质条件，也会增加智能推土机作业参数匹配的难度。针对这些问题，可通过多系统融合定位技术弥补单一信号的不足，确保深坑等场景下的定位连续性；采用系统冗余设计，对核心控制模块、传感器等关键部件设置备份，提升系统抗干扰能力与故障容错性；此外，还需结合平原水库地质特点，加强设备硬件的耐候性与适应性改造，并优化作业算法，使其能根据土壤湿度、密实度变化自动调整推土力度与行走模式，适配复杂地质条件^[5]。

4.2 管理与人才层面的挑战与对策

在管理与人才层面，智能推土机的应用需突破传统模式的制约。智能推土机较高的初始采购成本，会增加项目前期投资压力，导致部分施工单位在决策时存在顾虑；同时，传统水利土方施工的管理模式更依赖人工调度与经验判断，与智能设备所需的数字化、精细化管理流程不匹配，易造成设备效能浪费；而既懂水利施工工艺、又掌握智能设备操作与维护技术的复合型人才短缺，也会限制智能推土机功能的

充分发挥。对此，可推广智能推土机租赁模式，降低项目前期资金投入门槛，灵活匹配施工周期内的设备需求；变革项目管理流程，引入智能调度平台，实现设备作业数据与施工进度、质量目标的联动管理，替代传统人工调度方式；同时，建立系统的培训与人才培养体系，联合设备厂商、高校与施工企业，开展“水利施工工艺+智能设备操作”的复合型培训，通过理论教学与现场实操结合，提升人员专业能力。

4.3 标准与生态层面的挑战与对策

在标准与生态层面，行业数据互通性与标准统一性不足的问题较为突出。目前水利工程智能施工领域尚未形成统一的数据标准，不同厂商生产的智能推土机，其作业数据的格式、接口存在差异，导致智能推土机与其他施工设备、项目管理平台之间的数据难以高效互通，形成“数据孤岛”；这种互通性差的问题，会阻碍平原水库土方施工中多设备协同作业与整体流程的智能化升级。为解决这一问题，需由行业主管部门或协会牵头，联合科研机构、设备厂商与施工企业，共同推动建立水利工程智能施工数据接口标准，明确数据采集范围、格式规范与传输协议；同时，构建开放、协同的产业生态，鼓励设备厂商开放数据接口，支持不同品牌、类型的智能设备与管理平台实现数据共享，促进智能推土机与水利施工全流程的深度融合，形成从设备研发到现场应用的完整生态链条。

5 结语

综上所述，在平原水库土方施工中，智能推土机适配性强且效能突出，可覆盖土方开挖、填筑平整、转运协同场景，通过路径优化、设备协同、动态调整优化传统流程；在效率、质量、成本、安全环保上均有显著提升，能解决传统施工痛点。针对应用中技术、管理人才、标准生态层面的挑战，也有可行优化策略。综上，智能推土机可推动平原水库土方施工向智能化转型，为水利工程智能装备应用提供借鉴。

参考文献

- [1] 胡帅,王宇向,尤轲,等.推土机铲运物料体积智能检测方法研究[J].土木工程与管理学报,2025,42(03):112-120.
- [2] 李腾.智慧赋能,山推大马力推土机征战云南矿山[J].今日工程机械,2023,(03):56-57.
- [3] 范旺霖.湖陂灌溉排洪闸及防汛道路施工分析[J].内蒙古水利,2023,(04):50-52.
- [4] 姬浩翔,李金妹,李昕洁.浅析小型水库除险加固技术与材料应用[J].中国设备工程,2025,(20):268-270.
- [5] 陈秋凤.影响新安水库除险加固工程造价的主要因素分析[J].广西水利水电,2025,(05):156-157+164.