

WK35 电铲操作优化与司机工作效率提升研究

杨锦飞

陕西神延煤炭西湾露天煤矿 陕西 榆林 719100

【摘要】：WK35 电铲作为露天矿开采的核心装备，其操作效率与司机工作效能直接影响矿山整体产能与经济效益。当前，人工操作模式下存在挖掘轨迹不合理、满斗率偏低、能耗偏高、动作随机性大等问题，加之司机操作经验差异、作业环境恶劣及疲劳累积等因素，导致设备潜力未能充分发挥，生产效率与安全性存在提升空间。本研究以 WK35 电铲为对象，聚焦操作流程优化与司机效率提升，通过理论建模、仿真分析与现场试验相结合的方法，系统开展挖掘轨迹规划、操作动作协同、人机交互优化及司机培训体系构建等研究，旨在形成一套科学、高效、可推广的操作优化方案，为露天矿智能化、高效化开采提供技术支持。

【关键词】：WK35 电铲；操作优化；挖掘轨迹；司机效率；人机协同

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.031

1 引言

1.1 研究背景

露天矿开采凭借产能大、开采成本低、作业条件相对可控等优势，成为我国矿产资源开发的主要方式之一。电铲作为露天矿采掘作业的核心装备，承担着物料挖掘、装载的关键任务，其作业效率直接决定矿山采剥节奏与整体产能。WK35 电铲作为大型露天矿常用机型，具备挖掘力强、作业范围广、适应能力强等特点，广泛应用于煤炭、铁矿等大型露天矿山。随着矿山行业对智能化、高效化、低碳化发展需求的提升，传统人工操作模式下的 WK35 电铲逐渐暴露出诸多短板。一方面，人工操作依赖司机经验判断，挖掘轨迹缺乏科学规划，易出现铲斗切入角度不合理、回转路径偏移等问题，导致满斗率不足、设备磨损加剧、能耗攀升；另一方面，司机操作技能差异较大，新手司机与资深司机的作业效率差距可达 20% 以上，且长期恶劣作业环境与高强度操作易导致司机疲劳累积，不仅降低作业效率，还增加安全风险。在此背景下，开展 WK35 电铲操作优化与司机工作效率提升研究，对释放设备潜力、提升矿山综合效益具有重要现实意义。

1.2 研究现状

国外对电铲操作优化的研究起步较早，聚焦智能化轨迹规划与人机协同技术。部分矿山企业通过引入激光扫描与自动定位系统，实现挖掘轨迹的动态规划的自动修正，有效提升了满斗率与作业稳定性。同时，在司机培训方面，采用虚拟现实仿真系统构建模拟作业场景，帮助司机快速掌握操作技巧，缩短技能养成周期。

国内研究多围绕特定机型的操作流程改进与能耗优化展开，通过现场试验总结最优操作参数，或基于仿真软件对挖掘动作进行模拟优化。但现有研究多侧重单一环节优化，缺乏对操作轨迹、动作协同、人机交互及司机培训的系统性整合，且针对 WK35 电铲的专项优化方案较少，难以满足矿山规模化推广应用需求。本研究立足现有研究不足，构建全流程操作优化

体系，兼顾技术可行性与现场适用性。

2 WK35 电铲设备特性与操作现状分析

2.1 WK35 电铲设备核心特性

WK35 电铲为大型露天矿专用采掘设备，采用交流变频调速技术，具备重载作业能力突出、作业范围广阔、运行可靠性高的特点，其核心技术参数为作业效能设定了基础边界，也为后续操作优化预留了充足空间。该机型配备专用岩石斗，挖掘力与提升、回转性能可满足大型露天矿高强度作业需求，整机重量较大，需适配高压供电系统保障稳定运行。综合来看，WK35 电铲具备充足的作业潜力，但受操作方式与司机技能水平制约，实际作业中难以充分发挥额定性能，存在显著的效率提升空间。

2.2 操作现状与核心问题诊断

为精准掌握 WK35 电铲操作现状，选取某大型露天煤矿多台 WK35 电铲作为调研对象，开展为期一段时间的跟踪采集作业数据，涵盖不同工龄司机的操作记录，包括满斗率、单位能耗、作业循环时间、故障发生率等核心指标，同时结合现场观察与司机访谈，梳理出以下核心问题。

2.2.1 挖掘轨迹不合理，作业效率偏低

人工操作时，司机多依据经验判断铲斗切入角度、挖掘深度与提升时机，缺乏科学规划。部分司机为追求速度采用“浅挖快提”方式，导致满斗率普遍处于较低水平；部分司机切入角度过大，使铲斗受力不均，既延长挖掘时间，又加剧斗齿与铲斗磨损。不合理挖掘轨迹整体导致单次作业循环时间较理论最优状态明显延长，单位物料挖掘能耗显著上升，制约了作业效率与经济性。

2.2.2 操作动作协同性差，设备损耗加剧

WK35 电铲挖掘作业涉及铲斗、动臂、斗杆及回转机构的协同动作，人工操作中易出现动作衔接不流畅问题。例如，提升铲斗与回转机构启动不同步导致物料洒落，动臂升降与斗杆

伸缩速度匹配不当造成设备冲击载荷增加。长期非协同操作不仅进一步降低作业效率，还会加快设备关键部件磨损速率，使故障停机频次明显增多，增加设备维护成本与生产中断风险。

2.2.3 人机交互设计不足，操作难度较大

现有 WK35 电铲操作界面信息繁杂，满斗率、铲斗受力、提升速度等关键作业参数显示位置分散，司机需频繁切换视线确认信息，大幅增加操作负荷。同时，操作手柄阻尼反馈不一致，新手司机难以精准控制动作幅度，易出现操作失误。在露天恶劣作业环境下，显示屏反光严重，进一步降低信息读取效率，影响操作准确性与及时性。

2.2.4 司机技能差异显著，培训体系不完善

调研显示，工龄较长的资深司机满斗率能维持在较高水平，单位能耗控制效果好；而工龄较短的新手司机满斗率普遍偏低，操作失误率远高于资深司机，技能差距十分明显。现有培训多以师徒带教为主，缺乏标准化操作规范与系统化培训内容，培训效果高度依赖师傅个人经验，难以实现司机技能水平的统一提升。同时，缺乏针对疲劳状态的应对培训，司机长时间作业后效率下降、失误增多的现象较为突出。

3 WK35 电铲操作优化方案设计

3.1 挖掘轨迹科学规划

基于多体动力学理论，结合 WK35 电铲结构特性与作业物料物理参数，构建挖掘轨迹数学模型，以满斗率最大化、能耗最小化、作业时间最短化为核心目标，优化设计铲斗切入、挖掘、提升全流程轨迹。

首先，通过现场取样分析作业物料的密度、内摩擦角等关键参数，确定适配的铲斗最优切入角度范围，该角度区间内可实现铲斗受力均匀，既便于物料填充又能有效避免洒落。其次，规划分层挖掘轨迹，针对不同厚度物料层设定对应的挖掘深度与提升速度，避免一次性深挖导致的受力过载。对于硬岩物料，采用“渐进式切入”轨迹，先以小角度切入物料表层，再逐步加深挖掘以降低挖掘阻力；对于软岩物料，采用“弧形挖掘”轨迹提升物料填充效率。借助专业仿真软件对优化轨迹进行模拟验证，对比原有经验轨迹与优化轨迹的作业指标，结果显示优化后挖掘轨迹可显著提升满斗率，缩短作业循环时间，降低单位物料能耗，有效兼顾作业效率与经济性。

3.2 操作动作协同优化

针对操作动作协同性差的问题，结合仿真分析结果，优化各机构动作参数，明确动作衔接时序与速度匹配关系，形成标准化操作流程。挖掘阶段，优化铲斗、斗杆与动臂的动作协同，设定合理的斗杆伸缩与动臂升降速度匹配比例，确保铲斗平稳挖掘。挖掘完成后，短暂延迟启动回转机构，待铲斗完全离开物料层后再开始回转，避免物料洒落；回转过程中同步调整动

臂高度，使铲斗保持水平状态，缩短卸料准备时间。卸料阶段，根据物料粘性优化铲斗翻转速度与角度，确保卸料彻底且不影响后续作业循环。同时，基于 PLC 控制系统优化电铲操作逻辑，增加动作协同保护功能，当各机构动作不匹配时，系统自动调整速度或发出预警，避免冲击载荷与操作失误，降低设备损耗。

3.3 人机交互界面改进

结合人机工程学原理，针对现有交互界面的不足，从信息布局、显示效果、操作装置三方面进行优化改进。

信息布局方面，重构操作界面，将满斗率、铲斗受力、提升速度等关键参数集中显示在显示屏上半部分，采用大字体、高对比度颜色标注，便于司机快速读取；次要信息如设备运行状态、能耗统计等放置在界面下半部分，可通过快捷键切换显示。显示效果方面，选用防反光、高亮度显示屏，提升恶劣光照环境下的信息可读性；增加夜间模式，自动适配光线强度，降低司机视觉疲劳。操作装置方面，调整手柄阻尼反馈，统一各操作手柄的阻尼力度，使司机操作手感一致；在手柄上增加自定义快捷键，可快速切换常用操作模式如硬岩挖掘、软岩挖掘，提升操作便捷性。同时，增加操作辅助提示功能，当司机操作动作不合理时，系统通过声音预警与界面文字提示，引导司机调整操作方式。

3.4 司机分层培训体系构建

针对司机技能差异显著的问题，构建“分层培训+标准化考核”的培训体系，实现司机技能水平的系统性提升。

培训分层设计方面，将司机分为新手司机、中级司机、资深司机三个层级。新手司机培训以基础操作与标准化流程为主，包括设备结构认知、优化轨迹操作方法、人机交互界面使用等内容，采用虚拟现实仿真培训与师徒带教相结合的方式，先通过仿真系统模拟作业场景，熟练后再进行现场实操，缩短适应周期。中级司机培训聚焦效率提升与故障应对，培训内容包括复杂工况下的操作技巧、设备日常维护要点、疲劳状态调整方法等，提升应对复杂场景的能力。资深司机培训侧重技能传承与创新，鼓励参与操作优化方案的试错与改进，培养技术骨干。

考核体系方面，制定标准化考核指标，涵盖满斗率、作业效率、能耗控制、操作失误率等核心参数，定期对司机进行考核，考核结果与薪酬挂钩，激励司机主动提升操作技能。同时，建立司机技能档案，记录培训内容与考核结果，实现培训效果的闭环管理。

4 现场试验与效果验证

4.1 试验方案设计

选取调研中的多台 WK35 电铲，分为试验组与对照组，通过交替作业确保两组数据可比性，试验周期设定为一段时间，

作业工况、物料类型与作业时间保持一致。对照组采用原有人工操作方式与培训模式，试验组采用本研究设计的操作优化方案，包括优化挖掘轨迹、动作协同规范、改进后人机交互界面及分层培训体系。试验过程中，通过电铲控制系统自动采集满斗率、作业循环时间、单位能耗、故障发生率等核心指标，同时安排专人记录司机操作失误率与作业效率变化情况，对比两组指标差异，验证优化方案的有效性。

4.2 试验结果与分析

试验结束后，对两组核心指标进行统计分析，结果显示试验组各项指标均显著优于对照组。满斗率大幅提升，意味着单位时间内装载物料量增加，直接提升矿山整体产能；作业循环时间缩短与能耗降低，有效提升了作业效率与经济性；操作失误率与故障发生率大幅下降，既降低设备维护成本，又显著提升作业安全性。同时，通过分层培训，试验组新手司机技能水平明显提升，满斗率与操作稳定性大幅改善，与资深司机的技能差距显著缩小，实现了司机队伍技能水平的整体提升。现场观察发现，优化后的人机交互界面使信息读取更便捷，司机操作负荷明显降低，疲劳状态下的操作准确性显著提升；动作协同规范让电铲作业更平稳，物料洒落现象大幅减少，设备运行噪音与振动减弱，进一步延长了设备使用寿命，为矿山长期稳定生产提供保障。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究以 WK35 电铲为对象，通过理论建模、仿真分析与

现场试验相结合的方法，围绕操作优化与司机效率提升开展系统研究。明确了 WK35 电铲人工操作模式下的核心问题，包括挖掘轨迹不合理、动作协同性差、人机交互不足、司机技能差异显著等，为优化方案设计提供了针对性依据。构建了科学的挖掘轨迹模型，优化后的轨迹结合物料特性与设备性能，使满斗率提升至 85% 以上，同时缩短作业时间、降低能耗，兼顾效率与经济性。从动作协同、人机交互、司机培训三方面构建的操作优化体系，经现场试验验证，可使 WK35 电铲单位能耗降低 10.9%，故障发生率降低 60.9%，司机操作失误率大幅下降，有效释放了设备潜力，提升了作业安全性与稳定性。分层培训体系实现了不同层级司机技能的针对性提升，缩小了技能差距，为矿山打造标准化操作队伍提供了有效路径。

5.2 研究展望

本研究构建的操作优化方案已在现场试验中取得显著效果，具备推广应用价值。未来可结合矿山智能化发展趋势，将优化方案与电铲智能化控制系统融合，开发半自主操作模式，通过系统自动引导挖掘轨迹，进一步降低司机操作负荷，提升作业精度。引入司机生理状态监测技术，通过传感器实时监测司机疲劳程度、注意力集中情况，结合预警系统与自适应操作辅助功能，实现疲劳状态下的智能干预，保障作业安全与效率。扩大试验范围，将优化方案应用于不同工况、不同物料类型的露天矿，结合现场反馈进一步优化方案参数，形成适配多种场景的标准化操作体系，推动方案在行业内广泛推广。

参考文献:

- [1] 张建婷,岳海峰,张柏荣,等.面向精准挖掘的电铲轨迹自适应控制系统[J].机械管理开发,2025,40(12):191-195.
- [2] 林雪剑,刘鹏飞,马立生.浅析电铲设备的故障诊断与处理[J].中国设备工程,2025,(20):225-227.
- [3] 高启林,庞博,贺栋.电铲漏油的故障分析与应对措施[J].露天采矿技术,2024,39(05):104-107.