

露天煤矿采剥、运输、排土工序协同调度优化探析

刘小红

中国神华能源股份有限公司哈尔乌素露天煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：露天煤矿的高效运营依赖于采剥、运输、排土三大核心工序的无缝衔接与深度协同。本文首先系统剖析了三大工序之间紧密耦合、相互制约的内在逻辑关系，揭示了采剥是源头、运输是纽带、排土是归宿的完整作业链。在此基础上，深入分析了当前协同调度实践中普遍存在的四大核心问题：信息孤岛导致的全局感知缺失、静态计划与动态扰动间的失配、多目标冲突引发的决策困境，以及内排空间释放与采剥进度的时空错配。针对这些问题，本文摒弃了泛泛而谈的方法论，直接提出了四套具体、可落地的协同调度优化方案，包括：建立“双轨制”生产计划体系以实现长短周期协同；实施“分区-定向”排土管理策略以精准匹配采剥产出；推行“主干道+环形路网”交通组织模式以保障运输流畅；构建“三级联动”应急响应机制以快速处置动态扰动。这些方案共同构成了一个从战略规划到战术执行再到应急保障的完整协同调度框架。

关键词：露天煤矿；工序关系；协同调度；优化方案；分区排土；交通组织

引言

露天煤矿作为我国能源供给的关键支柱，其生产模式正经历从粗放式向精细化、智能化的深刻变革。在这一进程中，采剥、运输、排土三大工序不再是孤立的作业单元，而是构成了一个高度耦合、相互依存的有机整体。采剥作业决定了矿石与剥离物的产出量、品位及时空分布，是整个生产链条的源头活水；运输系统作为连接采场与卸点（破碎站、排土场）的物流动脉，其效率直接决定了系统的周转能力与成本结构；排土作业则不仅是剥离物的最终归宿，更是矿区土地复垦、生态修复及内排空间有效利用的关键环节，关乎矿山的可持续发展。这三大工序环环相扣，任何一个环节的失衡都将引发连锁反应，制约整体效能的发挥。然而，在传统管理模式下，各工序往往由不同部门独立规划、分散执行，形成了“铁路警察，各管一段”的局面，导致资源浪费、效率低下、成本高昂。因此，深入理解工序间的内在关联，精准识别协同障碍，并据此构建科学有效的优化方案，已成为提升露天煤矿核心竞争力、实现高质量发展的迫切需求。本文将遵循“关系分析—问题诊断—方案提出”的逻辑脉络，对露天煤矿采剥、运输、排土工序的协同调度优化进行系统性探析，并重点提出一系列具体、可操作的优化方案。

1 采剥、运输、排土三大工序的内在关系分析

露天煤矿的开采是一个典型的线性流程，但其内部却蕴含着复杂的非线性反馈机制。三大工序之间的关系可以从以下三个维度进行解构：

1.1 采剥工序：生产的源头与约束条件

采剥是露天开采的起始环节，其核心任务是通过穿孔、爆破、铲装等作业，将覆盖在煤层之上的岩土（剥离物）和煤炭本身从原生矿体中分离出来。采剥工序的状态直接定义了后续所有作业的输入边界：（1）物料供给：采剥的产量、品位、块度以及工作面的空间位置，共同构成了运输系统的“货源”。电铲的数量、型号及其工作效率，决定了单位时间内可提供的物料总量^[1]。（2）时空约束：采场的工作线推进方向、台阶高度、平盘宽度等参数，限定了卡车的进出路线、调车空间及作业安全距离，对运输路径规划提出了硬性要求。（3）成本源头：采剥环节的能耗、设备折旧及人工成本，是总生产成本的重要组成部分，其效率直接影响项目的经济可行性。

1.2 运输工序：系统的纽带与效率瓶颈

运输工序承担着承上启下的关键角色，其任务是将采剥产出的物料（煤炭或剥离物）高效、安全地运送至指定卸点。它是连接采场与排土场/破碎站的物理纽带，也是整个生产链条中最易形成瓶颈的环节：（1）物流中枢：运输系统必须同时响应来自多个采掘点和多个卸载点的需求，进行动态的车辆指派与路径规划。其调度策略直接决定了卡车的空驶率、等待时间及平均运距，是吨公里成本的核心影响因素。（2）信息载体：在智能化矿山中，运输车辆（尤其是无人驾驶矿卡）成为移动的数据采集节点，实时回传路况、设备状态、物料信息等，为全局调度提供数据支撑。（3）安全焦点：运输道路通常是露天矿安全事故的高发区，交叉口冲突、重车下坡失控、能见度低等问题都对运输安全构成严峻挑战。

1.3 排土工序：生产的归宿与生态接口

排土工序是露天开采的末端环节，负责接收并处置采剥过程中产生的大量剥离物。它不仅是生产的终点，更是矿山与生态环境交互的界面：（1）容量约束：排土场（无论是外排还是内排）的剩余容量是硬性的物理上限。一旦容量饱和，整个采剥作业将被迫中断，凸显其作为系统“蓄水池”的重要性。（2）内排驱动：随着开采深度的增加，内排（将剥离物直接排入已采空的矿坑）成为降低成本、保护环境的必然选择。内排空间的可用性、位置和容量，反过来又严格制约着采场的开采顺序和工作线布局，形成了“采剥创造排土空间，排土空间引导采剥方向”的闭环反馈。（3）生态责任：排土作业的质量直接关系到后续的土地复垦与生态修复效果。科学合理的排土工艺和堆置参数，是实现“开采一块、治理一块”绿色矿山理念的基础。

综上所述，三大工序构成了一个“采剥定源、运输承流、排土归宿”的完整闭环。任何割裂看待、独立优化的做法，都无法触及系统效率提升的根本。

2 协同调度面临的核心问题与挑战

尽管协同调度的重要性不言而喻，但在实际操作层面，仍面临着一系列深层次的挑战：

2.1 信息孤岛与全局感知缺失

传统的露天矿生产管理系统通常由地质建模、生产计划、设备监控、安全监测等多个独立子系统组成。这些系统间缺乏统一的数据标准和高效的接口，导致采剥计划、设备实时位置、道路拥堵状况、排土场精确容量等关键信息无法实现跨部门、跨工序的实时共享^[2]。调度中心如同“盲人摸象”，只能基于局部或滞后的信息进行决策，难以形成对全矿生产态势的全局性、前瞻性洞察，使得协同调度沦为一句空话。

2.2 静态规划与动态扰动的失配

目前多数矿山的调度仍采用班前或日初制定静态计划的模式。然而，露天矿生产环境充满不确定性，如设备突发故障、爆破效果不佳、恶劣天气（雨雪、大雾）、边坡位移预警、交通意外等动态扰动事件频发。一旦发生此类事件，原有的静态计划迅速失效。而依赖人工经验进行调整，往往反应迟缓、效率低下，且难以保证调整方案的全局最优性，严重削弱了协同调度的鲁棒性和实用性。

2.3 多目标冲突与决策困境

协同调度本质上是一个复杂的多目标优化问题。核心目标通常包括：最小化总运输成本（吨公里）、最大化设备（电铲、卡车）利用率、均衡各工作面负荷、

缩短平均运距、减少无效空驶、降低燃油消耗与碳排放等。这些目标之间存在天然的冲突。例如，为了最小化运输成本，可能会将所有卡车集中指派给最近的采-卸对，但这会导致其他工作面设备闲置，造成资源浪费。如何在众多相互制约的目标之间找到最佳平衡点，是协同调度模型设计与求解的核心难点。

2.4 内排空间释放与采剥进度的时空错配

对于大型深凹露天矿，内排是降本增效、绿色开采的关键。然而，内排空间的形成完全依赖于采剥工作的持续推进，二者之间存在着严格的时空逻辑关系。如果采剥工作未能按计划释放出足够的内排空间，或者内排空间的释放节奏（何时、何地、多大）与剥离物的产出节奏不匹配，就会造成运输路线混乱、运距剧增，甚至出现“有料无处可排”或“有空间无料可排”的尴尬局面。这种时空错配是制约协同调度整体效能发挥的最大障碍之一。

3 协同调度优化方案

针对上述四大核心问题，本文提出以下四套具体、可操作的优化方案：

3.1 建立“双轨制”生产计划体系，实现长短期协同

解决静态规划与动态扰动失配、长期战略与短期执行脱节的问题。具体方案内容包括：（1）长期滚动计划（战略层）：以月度或季度为周期，制定详细的采剥工程位置图和内排空间释放计划。该计划明确每个时间段内，哪些区域的采场需要完成剥离，从而释放出对应位置和容量的内排空间。此计划作为全矿协同的“宪法”，具有刚性约束力。（2）短期动态指令（战术层）：以班次（8小时）或更短的时间窗口（如2小时）为周期，根据长期计划的框架和实时的生产状态（如设备可用性、道路状况、天气），生成具体的作业指令。指令精确到每一台电铲在哪个工作面、挖掘哪一类物料（矿/岩），以及每一辆卡车在哪个时间段被指派从哪个采掘点到哪个排土场（内排/外排）^[3]。（3）协同机制：短期指令必须严格服从长期计划设定的内排空间释放节点。若因扰动导致某区域采剥滞后，则短期指令需立即调整，优先调配资源追赶进度，或临时调整其他区域的排土流向，确保内排空间按时“交割”。

3.2 实施“分区-定向”排土管理策略，精准匹配采剥产出

解决内排空间与采剥进度时空错配、排土场容量利用不均的问题。具体方案内容包括：（1）空间分区：将整个采场和排土场（尤其是内排场）划分为若干个地理上相邻、逻辑上对应的“采-排单元”。例如，将南帮采

区与南侧内排区划为一个单元，北帮采区与北侧内排区划为另一个单元。（2）定向排弃：明确规定每个“采-排单元”内的剥离物，原则上必须排弃到本单元对应的内排区内。这能最大限度地缩短运距，并确保采剥创造的空间被就近、及时地利用。（3）动态调剂：当某个单元的内排空间提前饱和或采剥严重滞后时，调度中心可启动“跨区调剂”机制。但调剂必须遵循“就近原则”和“容量优先原则”，并记录在案，用于后续对长期计划的修正。例如，南帮的富余剥离物可优先调剂至尚未饱和的东帮内排区，而非远端的外排场。

3.3 推行“主干道+环形路网”交通组织模式，保障运输流畅

解决运输道路拥堵、交叉口冲突、重车下坡安全风险高的问题。具体方案内容包括：（1）主干道单向循环：在矿区内部构建一条或多条环形主干道，规定重载卡车（从采场到排土场）和空载卡车（从排土场返回采场）分别在不同的车道或不同时间段内单向行驶，彻底消除对向车流的正面冲突。（2）支线接入标准化：各采掘工作面和排土场通过标准化的支线接入主干道。支线设计应避免急弯陡坡，并设置足够长的缓冲区和会车平台^[4]。（3）智能信号控制：在主干道与主要支线的交叉口，部署智能交通信号灯。信号灯根据实时车流量、车辆类型（重/空）和优先级（如救援车辆）进行动态配时，确保主干道车流的连续性，减少卡车在交叉口的等待时间。

3.4 构建“三级联动”应急响应机制，快速处置动态扰动

解决信息孤岛导致的扰动响应迟缓、处置效率低下的问题。具体方案内容包括：（1）一级响应（现场自愈）：赋予一线操作员（如卡车司机、电铲司机）一定的自主决策权。例如，当发现前方道路因小型塌方暂时中断时，司机可根据预设的备选路线库，自主选择绕行路线，并将事件信息自动上报。（2）二级响应（调度干预）：调度中心收到扰动信息后，立即启动预案。对于影响范围较大的事件（如主力电铲故障、主干道严重

堵塞），调度员利用数字孪生平台，在几分钟内重新计算并下发新的车辆指派和路径规划指令，将影响降至最低。（3）三级响应（计划修正）：若扰动事件持续时间长、影响深远（如重大设备损坏需数日维修），则由生产技术部门牵头，召集采、运、排三方负责人，共同评估影响，并对“双轨制”中的长期滚动计划进行正式修订，确保后续生产的有序衔接。

4 结语

露天煤矿采剥、运输、排土工序的协同调度优化，是一项复杂的系统工程。本文通过厘清三大工序间“源头-纽带-归宿”的内在逻辑，精准识别了信息孤岛、动态失配、多目标冲突和内排错配四大核心挑战，并摒弃了抽象的理论探讨，直接提出了四套具体、可操作的优化方案：“双轨制”生产计划体系、“分区-定向”排土管理策略、“主干道+环形路网”交通组织模式以及“三级联动”应急响应机制。这四套方案并非孤立存在，而是相互支撑、有机统一的整体。“双轨制”提供了协同的顶层设计，“分区-定向”确保了物料流的精准匹配，“交通组织”保障了物流的物理畅通，“应急机制”则赋予了系统强大的韧性。通过实施这些具体的方案，露天煤矿能够有效打破工序壁垒，构建一个从战略规划到战术执行再到应急保障的完整、高效、鲁棒的协同调度体系，为实现安全、高效、绿色、智能的高质量发展目标奠定坚实基础。

参考文献

- [1]张周爱,金磊,李新鹏,等.露天煤矿合理生产能力规划方法研究[J].采矿技术,2026,26(02):227-234.
- [2]魏志丹.我国露天煤矿连续化采剥工艺应用现状及发展趋势[J].智能矿山,2026,7(01):106-110.
- [3]黄俊婷,王忠鑫,冯建朝,等.露天煤矿采剥作业链关键生产环节数据解析和系统优化[J].煤矿安全,2025,56(09):34-43.
- [4]仲召林.露天煤矿全区采剥排土规划设计研究[J].矿业装备,2024,(10):67-69.