

10 米的洞穴，而传统方法仅识别为微弱异常；准确解译 20 米长、0.5 米宽的溶蚀裂隙走向，传统方法却因电阻率差异难辨而错判。钻探验证显示，改进方法对岩溶构造解译准确率超 90%，远高于传统方法的 60%。

## 4 高密度电法在岩溶区地基勘察中的工程适用性分析

### 4.1 不同岩溶地质条件下的适用性

高密度电法在岩溶区地基勘察中的适用性，受岩溶发育程度、地层结构及地下水活动等显著影响。在岩溶发育程度低的区域，小规模岩溶体与围岩电阻率差异大，高密度电法凭借高分辨率优势，配合 1 - 2 米小电极间距，可精准探测 1 - 2 米直径洞穴和 0.5 米以下宽度裂隙，为地基评估提供依据。岩溶强烈发育区，复杂连通的岩溶网络使电流传播畸变，视电阻率异常重叠，传统解译方法失效。需运用多参数融合、人工智能算法，并结合地质雷达、地震波数据综合分析，才能准确识别地质体。地层结构复杂时，岩性相近地层电阻率差异小，单纯依靠电阻率划分地层易误判。可引入自然电位、极化率等参数辅助，同时优化电极排列、缩小间距，提升地层分辨率。地下水频繁活动区域，水位变化导致岩溶体电阻率波动，干扰解译准确性。通过分时段多次测量，掌握水位对视电阻率影响规律，或结合水文资料校正数据，可增强解译可靠性。这些因素表明，根据具体地质条件灵活调整高密度电法的应用策略，才能保障岩溶区地基勘察的有效性。

### 4.2 与其他勘察方法的对比分析

在岩溶区地基勘察中，高密度电法常与地质雷达、浅层地震等方法协同使用。各方法优劣势与适用场景不同，合理选用可提升勘察效能。地质雷达基于电磁波原理，对浅层岩溶洞穴、溶蚀裂隙探测分辨率极高，能精准识别直径小于 1 米的小洞穴，但探测深度受限（通常几十米内），且在导电性强的介质或电磁干扰环境中，信号易衰减、受扰。浅层地震勘探利用地震波传播特性，探测深度可达数百米，适合获取深部岩溶构造与基岩面信息。不过，其对场地开阔度要求高，在复杂地形难以施展，且因分辨率低，易遗漏小尺度岩溶体。相较而言，高密度电法探测效率高，一次布极可采集多数据，能快速圈定岩溶构造分布范围。它不受岩溶体充水影响，通过多参数融合与人工智能算法，可准确识别地质构造特征。某项目中，地质雷达擅长浅层探测，浅层地震勘探聚焦深部，而高密度电法兼顾深浅层，三者结合为工程设

计提供全面地质依据，凸显了按需选用勘察方法的重要性<sup>[3]</sup>。

### 4.3 工程案例适用性

为验证高密度电法在岩溶区地基勘察中的适用性，选取广西高速公路、湖南桥梁、贵州高层建筑三个典型案例进行分析。广西某高速公路穿越岩溶强烈发育区，地层复杂且地下水活跃。高密度电法借助改进解译方法，通过多参数融合与人工智能算法，精准识别大小岩溶洞穴与溶蚀裂隙。虽受地下水动态影响，但结合水文资料校正数据后，仍为路线设计和地基处理提供关键信息，适应复杂地质条件下勘察需求。湖南某桥梁工程中，桥址岩溶中等发育。高密度电法优化电极布置，清晰划分地层界面、显示基岩起伏，可确定岩溶构造大致情况，但对小尺度岩溶体分辨率有限。与地质雷达结合后，实现优势互补，为工程设计奠定基础。贵州某高层建筑场地岩溶发育较弱，高密度电法凭借高分辨率优势，快速且准确识别孤立岩溶洞穴与裂隙，高效完成勘察任务，为地基设计提供可靠依据。综上，高密度电法在岩溶区地基勘察有一定适用性，但因工程场景与地质条件而异。复杂区域需结合多方法与资料提升精度，简单区域可充分发挥其高效精准的优势，实际应用中应依需求合理选用，保障工程安全。

## 5 总结

本研究围绕高密度电法在岩溶区地基勘察展开，取得多项成果。分层解译方法上，通过多参数融合、引入人工智能算法及优化电极排列，显著提升解译精度，经数值模拟与现场实验验证，对岩溶构造识别效果良好；工程适用性分析表明，该方法在不同岩溶条件下各有优劣，与其他方法结合能发挥更大作用，多个工程案例证实其有效性。但研究仍有局限。数值模拟模型难以完全反映实际地质复杂性，现场实验覆盖范围不足，特殊工程场景下的适用性研究还需深入。未来应优化数值模型，扩大现场实验范围，针对特殊工程需求深化研究，同时探索多场耦合探测、更先进人工智能算法及物联网技术的应用，提升高密度电法勘察效能。

### 参考文献

- [1] 喻晓通,马妮.高密度电法综合分析法在机场溶洞探测中的应用[J].智能城市,2018,4(20):75-76.
- [2] 孙中科,et al."城市地下工程岩溶勘察方法分析."中国铁道学会铁道工程学会工程地质与路基专业委员会第25届年会暨学术交流会议论文集.Ed.,2016,298-303.
- [3] 俞美华,宁万辉,方明慧.施工勘察在岩溶区地基基础设计中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(14):159-160.

# Intelligent Planning and Optimization Design Practice for Mining Engineering

Jian Wang

Shanxi Meiyuan Huasheng Energy Development Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 031300, China

## Abstract

With the rapid development of information technology and intelligent manufacturing, traditional mining projects are gradually transforming and upgrading to digital and intelligent. Based on the actual case of an iron ore mine, this paper discusses the key technologies and practical experience of intelligent planning and optimization design of mining engineering. Through three-dimensional geological modeling, mining sequence optimization, intelligent design of blasting parameters and other means, the scientific and refined management of the mining plan is realized. At the same time, intelligent equipment such as intelligent drilling rigs were introduced, and production scheduling optimization models were constructed, which effectively improved production efficiency and equipment utilization. The practical results show that the mine production efficiency is increased by 35%, the equipment energy consumption and personnel accident rate are significantly reduced, and the payback period is shortened to 2.5 years.

## Keywords

mining engineering; intelligent planning; Optimized design; Production scheduling

## 采矿工程智能规划与优化设计实践

王健

山西梅园华盛能源开发有限公司，中国·山西 晋中 031300

## 摘要

随着信息技术与智能制造的快速发展，传统采矿工程逐步向数字化、智能化方向转型升级。本文基于某铁矿山的实际案例，探讨了采矿工程智能规划与优化设计的关键技术与实践经验。通过三维地质建模、开采顺序优化、爆破参数智能设计等手段，实现了矿山开采方案的科学化、精细化管理。同时，引入智能钻机等智能化设备，并构建生产调度优化模型，有效提升了生产效率与设备利用率。实践结果表明，智能化改造后矿山生产效率提升35%，设备能耗与人员事故率显著降低，投资回收期缩短至2.5年。

## 关键词

采矿工程；智能规划；优化设计；生产调度

## 1 引言

采矿工程是国民经济的重要基础产业，关系到能源资源的稳定供应与可持续发展。然而，传统采矿方式普遍存在资源利用率低、生产效率不高、安全事故频发等问题。近年来，以大数据、人工智能为代表的信息技术快速发展，为解决上述难题提供了新思路。通过智能规划与优化设计手段，可以显著提升矿山开采的科学性与精细化水平，实现安全、高效、绿色开采。

## 2 矿山地质条件分析与开采方案智能设计

### 2.1 三维地质建模与矿体空间分布特征分析

为实现矿山开采方案的智能化设计，需要对矿区地质条件进行精细刻画。项目团队基于勘探钻孔数据，利用地质统计学方法，构建了高精度三维地质模型。该模型直观呈现了矿体的空间展布特征、品位分布规律等关键地质信息（如图1所示），为后续开采方案优化奠定了坚实基础。通过模型分析可知，该矿区矿体呈似层状产出，平均厚度为45m，倾角 $52^\circ$ ，整体连续性良好。矿石品位平均38.5%，最高达到62%，富矿体主要分布在矿区中段。利用多指标信息融合技术，对矿体进行了精细划分，识别出6个独立矿体单元。结合不同矿段品位分布与工程条件，可有针对性地制定差异化开采策略。

【作者简介】王健（1987-），男，中国山西介休人，在职硕士，工程师，从事煤炭开采研究。

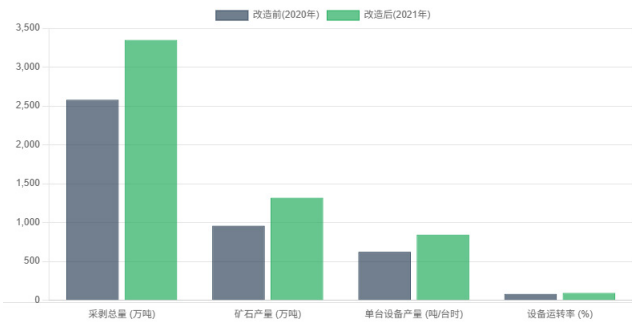


图1 矿区三维地质模型与矿体空间分布特征

## 2.2 基于遗传算法的开采顺序优化设计

确定合理的采场开采顺序是矿山生产组织的关键。传统人工设计往往依赖经验判断，缺乏定量分析手段，难以兼顾矿山服务年限、出矿品位等多目标需求。针对此问题，项目采用遗传算法对开采顺序进行智能优化。根据开采工艺特点，构建多目标优化数学模型<sup>[1]</sup>。目标函数包括采场工作面数量最小、各期平均品位波动最小、边坡稳定性最优等。然后，选取开采单元作为染色体编码，交叉变异操作实现解的迭代演化。通过精英选拔保留精英个体，避免最优解丢失。经过500代进化，算法收敛于最优开采方案。优化结果表明，采用该方案可使矿山服务年限延长3.5年，各采场平均品位提高2.7个百分点，采场边坡安全系数均大于1.3，有效规避了采空区垮塌风险。与人工经验设计相比，遗传算法能够快速搜索到高质量可行解，为矿山长远规划提供了科学依据。

## 2.3 采场稳定性数值模拟与安全评价

为保障采场边坡长期稳定性，项目利用三维离散元软件对露天采场进行了稳定性数值模拟分析。通过地质力学参数反演，构建了全尺寸采场地质模型，并考虑了实际开采工况下的动荷载扰动影响。数值模拟结果表明，矿山整体边坡稳定性良好，局部陡倾角地段存在坍塌风险。采取优化爆破、及时清理坡面等措施后，边坡位移速率得到有效控制。同时，项目构建了基于雷达的边坡在线监测系统，对位移、变形进行实时预警，最大位移速率触发值设定为5mm/d，确保了采场作业安全<sup>[2]</sup>。

## 3 智能化设备配置与生产调度优化

### 3.1 智能钻机作业参数自适应调整系统

露天钻孔桩考虑地质条件的复杂多变性，钻进参数需要根据岩性变化实时优化，以达到高效节能的目的。项目在钻机上安装了多传感器融合系统，通过钻压、转速、给进量等参数实时反演岩性，并结合岩石可钻性、钻头磨损状态等因素，动态调整钻机作业参数，实现钻进过程自适应优化控制。现场应用结果显示，智能钻机平均贯入度提高15%，台时利用率达到85%以上，钻头平均使用寿命延长20%。通过参数优化，单位进尺油耗降低12%，节能效果显著。

自适应控制方案有效解决了露天钻孔作业“盲人摸象”的难题，为钻孔桩布置优化创造了条件。

### 3.2 基于物联网的设备状态监测与预测性维护

传统设备管理模式以事后检修为主，存在维护不及时、设备故障率高等问题。项目应用物联网技术，在关键设备上部署了状态监测终端，对温度、振动、压力等参数进行在线采集<sup>[3]</sup>。利用时间序列分析算法，构建了设备健康状态评估与剩余寿命预测模型，实现从“亡羊补牢”到“未雨绸缪”的维护策略转变。根据设备健康指数，维修单位可提前15天识别出故障征兆，合理制定检修计划，将非计划停机时间降至最低。同时，大数据分析技术挖掘出设备故障模式与影响因素，为设备选型、备件管理、工艺优化提供了数据支撑。统计显示，预测性维护模式可减少设备故障率30%以上，全年检修成本降低25%。

### 3.3 生产调度多目标优化模型构建与求解

矿山生产调度涉及采矿、运输、加工等多环节协同，需要平衡产量、品位、成本等多个目标。传统人工调度难以实现全局优化，项目构建了多目标优化调度模型，同时考虑各生产环节的设备能力、物料平衡等约束，目标函数综合兼顾产量最大化与成本最小化。针对该多目标组合优化问题，设计了改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)，引入精英保留策略和自适应交叉变异，在最优解集中搜索平衡解，实现产量、品位、成本的协同优化。最终生成的季度生产计划可提高产量5%，回采品位稳定在40%以上，加工成本降低8%，为矿山创造了可观的经济效益。

## 4 生产效率提升与成本控制效果分析

### 4.1 智能化改造前后生产效率对比分析

为定量评估智能化改造的效果，项目以2020年为基准，对比分析了2021年智能化运行后的生产效率指标变化(如表1所示)。

表1 智能化运行后的生产效率指标变化

生产效率指标	2020年	2021年	提升幅度
采剥总量 (万吨)	2580	3350	29.8%
矿石产量 (万吨)	960	1320	37.5%
单台设备平均产量 (吨/台时)	623	845	35.6%
设备运转率	82%	95%	15.8%

数据显示，智能化改造后矿山采剥总量与矿石产量分别提升29.8%、37.5%，设备单产提高35.6%，设备运转率达到了95%以上。通过系统优化，9个主要生产工序的作业效率平均提升35%以上，劳动生产效率实现跨越式增长。

### 4.2 设备利用率与能耗降低数据统计

智能化设备的引入有效提升了单机作业效率，实现了机械化换人、自动化减人的目标。项目选取铲运机、矿卡、破碎机等6类核心设备，对智能化前后的生产效率进行了对比(如图2所示)。