

# 矿产资源项目全生命周期数字化监测管理关键技术

刘 峰

矩阵资源（浙江）有限公司 浙江宁波 315832

**摘 要：**本次研究以矿产资源开发中数字化监测管理技术为研究对象，对其进行分析和验证，并综合现场数据、以往研究数据和仿真结果提出一种多源数据驱动智能监测管理模式。在研究中，矿区的开采进度、资源回采率等关键指标被详细监测，并通过数字化平台实时获取与分析。模拟数据显示，资源的开采速度与资源的回采率是正向关联的，数字化技术的使用，使资源的回采率增加了5%，与传统技术相比，生态恢复的速度提高了10%。在安全性上，利用实时数据预警可以提前发现潜在风险并降低事故发生概率。该研究证实数字化技术对提高资源回采率、减少环境影响和增强矿区安全性等具有关键性作用，可为矿产资源全生命周期治理提供技术支持。

**关键词：**数字化监测；矿产资源；资源回采率；生态恢复

## 引言

在世界范围内对矿产资源开发要求越来越高的情况下，矿产资源项目所面临的管理挑战也越来越复杂。全生命周期的管理，作为提高矿产资源利用效率和环境保护标准的关键策略，已经变成了该行业的焦点。数字化技术的飞速发展给矿业监测及管理带来了全新的解决思路，特别是随着大数据、物联网以及遥感技术的运用，矿产项目监测、评价以及决策的过程更加有效和准确。通过对工程全生命周期数据进行综合集成与实时分析，既有利于提高资源回采率与安全性，又可以有效地达到环境保护与生态修复的目的。所以数字化技术为矿产资源项目全生命周期管理赋能已经成为推动矿业现代化发展的关键所在。

## 一、矿产资源项目全生命周期特征分析

### （一）生命周期分阶段特征

矿产资源项目全生命周期由勘查、开发、利用、闭矿、生态修复几个环节组成。每一个环节都有着自己独特的管理目标和挑战。如勘查阶段着重对资源进行勘查和评价，开发阶段着重对矿山建设和生产工艺进行设计和优化，利用阶段着重对资源高效回采和提高资源利用率等<sup>[1]</sup>。闭坑阶段涵盖了矿区停产准备和环境保护工作，生态修复阶段主要集中在生态环境恢复和植被恢复方面。所以生命周期管理要求在不同的阶段都要制定出对应的战略，以保证矿产资源开发具有可持续性。

**作者简介：**刘峰（1977.01—），男，汉族，上海嘉定人，硕士学历，任职于矩阵资源（浙江）有限公司，研究方向：矿产资源项目开发。

## （二）项目管理复杂性与数据融合需求

矿产资源项目管理的复杂性来源于其多阶段和多环节的特点，所涉及的管理包括资源勘查、开采、运输、环境监控和后期恢复。每个阶段生成的数据类型与来源都是多种多样的，例如遥感影像、实时传感器数据以及工程日志。如何对这些多源异构数据进行有效地集成和分析，以形成一个统一管理平台已经成为项目管理所面临的重大难题。数据融合既要应对海量数据存储和传输的挑战，又要使用先进分析算法来支持动态调整决策过程以及风险预警。

## 二、数字化监测对矿产项目的作用与技术支撑路径

### （一）核心影响因素分析

矿产资源开发中安全、环保、资源回采率及政策合规性等问题是关系到工程能否成功的核心问题。安全监控要求对地质灾害、矿山事故和其他危险进行实时监控；环境保护主要关注矿业活动可能对环境造成的不良影响，例如水土流失和粉尘污染等问题；资源的回采率直接决定了项目使用效率，并对经济收益产生直接影响；政策的合规性决定了矿产资源项目必须遵守相应的法律法规，以免造成环境污染及非法开采<sup>[2]</sup>。所以，数字化监测技术能够通过准确的实时数据采集与分析，有效地协助管理者对上述核心影响因素进行监测与优化。

### （二）数字化关键技术支撑路径

为了实现矿业的数字化管理，我们需要依赖众多的尖端技术，如大数据分析、物联网技术、遥感监控、区块链技术以及人工智能等。利用大数据技术对大量矿产资源项目数据进行处理，为决策提供准确支持；物联网利用传感器网络进行实时监测，保证对生产及环境条件

进行动态掌控；遥感技术为矿区的地质结构和环境状况提供了宏观角度的信息；区块链技术保障了数据安全透明，尤其适用于资源交易与合规性监控；通过模式识别和预测分析，人工智能算法有助于提高矿产资源管理的智能化程度<sup>[3]</sup>。

### 三、数字化仿真与管理策略建模分析

#### (一) 多源数据驱动的仿真建模框架

数字化矿产资源管理仿真建模框架是以多源数据融合分析为支撑。将勘探数据、生产数据、环境监测数据和政策法规数据进行集成，构建综合动态仿真模型，可以对矿产资源开发中的各关键指标进行综合评价。

#### (二) 数值模拟与参数校核方法

##### 1. 岩土物理参数校核

岩土物理参数的获取对于数字化仿真模型至关重要，是矿山边坡设计、设备选型和排水方案设计等的基础。通过实验室测量和现场采样，可以获得岩土的密度、孔隙度、渗透性等基础物理参数。以密度数据为例，该数据是三维地质模型中的体积资源量转换为吨位资源量的直接依据。假设岩土密度为 $\rho$ ，其计算公式如下：

$$\rho = \frac{M}{V}$$

其中，M是岩土样本的质量，V是其体积。根据不同矿区的岩土性质，校核结果应与实际勘探数据相符，以保证模拟的可靠性。

##### 2. 矿山可视化模拟

矿山可视化模拟是指利用计算机三维建模、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、数据可视化等技术，对矿山的地质结构、开采过程、设备运行、安全管理等进行数字化建模和动态模拟，以直观、交互的方式呈现矿山全生命周期信息。矿山可视化模拟对于矿山的勘探、开发和建设等阶段具有重要意义。

##### 3. 环境影响模拟

环境影响模拟是矿产开发不可忽视的一部分，其核心意义在于生态保护、经济效益优化等。环境损失率L可通过以下公式计算：

$$L = \frac{A_t}{A_0}$$

其中， $A_t$ 为开发后受影响区域面积， $A_0$ 为开发前的总面积。通过连续监测数据，可对环境变化进行预测并采取相应的修复措施。通过短期、中期和长期三个时间纬度的模拟，能够有效地实现提前预警、降低应急成本，优化全生命周期治理预算，生成可持续的土地利用方案。

在矿山开发、生产等过程中，常见的环境影响主要包括水系统污染、土壤污染、粉尘污染等。通过对研究

区域的模拟分析，可建立地下水水流场模型和溶质运移模型，是研究污染物的迁移规律、确定污染范围及污染物浓度分布的重要手段，为地下水资源管理和地下水污染修复提供依据<sup>[4]</sup>。针对巷道粉尘污染问题，可通过数值模拟研究了地下巷道中粉尘的扩散动态，建立了粉尘浓度分布预测模型，并提出采用高压风幕控制巷道粉尘污染，该研究表明当高压风幕送风速度与角度合适时，巷道各段除尘效率可达87.3%<sup>[5]</sup>。

##### 4. 矿山开采模拟

矿山开采模拟是利用计算机仿真技术对矿山开采全过程进行数字化模拟和动态推演的先进技术手段，整合了地质学、岩石力学、采矿工程和计算机科学，实现从勘探到闭坑的全生命周期模拟，并构建虚实交互的矿山运营体系。

#### (三) 仿真分析与预警机制研究

为了更好地应对矿产资源开发过程中的潜在风险，仿真分析与预警机制成为矿山管理中的重要组成部分。表1为三个关键指标的模拟数据表，展示不同情况下的开采扰动、环境影响、资源回采率与安全风险指数变化。

表1 开采扰动与环境影响仿真数据表

时间 (年)	开采扰动 (%)	环境影响损失率 (%)	资源回采率 (%)	安全风险指数
2020	5	2	85	1.2
2021	7	3.5	88	1.1
2022	10	4.2	90	1
2023	12	5	92	0.9
2024	14	6	95	0.8

### 四、数字化监测与管理的关键工程技术

#### (一) 智能传感与现场监测网络布设技术

为实现矿区环境和作业状态实时传感，该研究以高密度布点为原理搭建智能传感网络。传感器的布放优先选择边坡、井下通道和排土场等高危区域，通过低功耗广域通信协议LoRa和NB-IoT进行高频率的数据回传<sup>[6]</sup>。网络层面上，该系统通过多通道冗余设计和动态自愈机制保证了极端环境中监测数据传输同样保持稳定和完整。模拟的数据表明，传感节点的稳定工作效率维持在98%或更高，这满足了高可靠性的工程监测要求。

#### (二) 矿区三维建模与动态可视化集成技术

为了支持矿山生产和管理直观化要求，可利用激光雷达点云扫描和高精度摄影测量技术建立矿区的三维数字孪生模型。模型集成实时监测数据，通过可视化平台动态呈现采坑深度、开采进度、边坡角度等关键要素，实现“可视+可算+可控”的一体化管理。该体系支持跨阶段的模型比较分析，易于跟踪资源变化和结构演化。

仿真场景验证结果表明：所建立的模型具有亚米级的空间精度，为管理者实现桌面或者移动端的远程操控和预测分析提供了支持。

### （三）基于时序数据的智能诊断与异常识别技术

考虑到矿山运营过程中的大量时序监测数据，采用了长短期记忆网络（LSTM）模型来构建一个智能的安全隐患识别系统。该系统通过对地压、瓦斯浓度和设备运行参数的动态学习和趋势建模可以有效地识别可能存在的异常模式和风险事件。以地表沉降预测为例，该模型经2023年仿真测试达到预测误差低于常规方法，明显优于常规阈值告警法<sup>[7]</sup>。该智能诊断系统为矿山预警机制提供了技术支撑，实现了从“事后响应”向“事前预判”的转变。

### （四）远程协同与智慧调度平台建设技术

在云边协同架构支持下，可以构建了以数据汇聚、任务调度、智能分析和远程控制为主要功能的智慧矿山调度平台。该平台实现了现场感知终端、边缘计算节点和云端数据中心之间的无缝对接，具有分布式计算能力和灵活的任务分配安排机制。通过可视化的界面，管理人员可以远程发布作业指令，调配资源，审查运行状态等，从而实现了跨地区的协同调度。该平台同时整合了应急响应模块，AI系统在发现高风险异常时，会自动推送到管理层终端，启动联动处理机制以有效提高矿区突发事件处置能力。

## 五、现场应用与效果评估分析

### （一）典型试点项目现场监测数据汇总

在某矿区进行的数字化监测试点项目中，现场收集了多项关键监测数据，涉及开采进度、资源回采率与生态恢复情况。表2为部分时间点的实测数据。

表2 试点项目现场监测数据表

时间 (年)	开采进度 (%)	资源回采率 (%)	生态恢复 (%)
2020	30	80	5
2021	45	83	8
2022	60	85	12
2023	75	87	18
2024	85	90	25

该数据展示了矿山开采过程中开采进度与资源回采率和生态恢复的改善之间的关联。表2中可以明显看到，随着开采进度的增加，资源回采率逐步提升，同时生态恢复进程也在稳步推进。

### （二）实施技术成效定量评估

将传统手段和数字化监测方法与现场数据进行比较，对实施技术效果进行评价。在地表沉降监测中，数字化技术为实时监测预警提供精度较高，降低人工监测盲点

的方案，保证数据实时性和准确性。从资源回采率方面来看，数字化管理对资源回采率有很好的促进作用，与传统方法相比，资源的回采率有大的提高。在生态修复方面，通过实时的监测和数据分析，修复工作得以如期进行，与传统方法相比，恢复面积增加了大约10%。综合评价，数字化技术在提高开采效率的同时，对环境保护与资源管理也起到显著效果，减少潜在生态风险与隐患。

## 结论

本次研究以某矿区数字化监测管理技术为例，并结合仿真分析结果，表明了数字化技术对于矿产资源全生命周期管理具有显著优势。采用实时监测与数据融合相结合的方法，对矿区开采进度、资源回采率、生态恢复等主要指标进行有效监测及优化。实测数据表明，运用数字化监测手段后，随着开采进度的增加，开采效率和资源回采率分别提升了约5%和10%。在生态修复领域，数字化技术的应用加速了修复进程，与传统手段相比，恢复的总面积增长了大约15%。从安全性角度来看，预警系统对潜在的风险进行了有效地辨识，增强了整个矿区作业的安全性。数字化技术在提高资源管理效率的同时还可以减少对环境的影响，保障矿产资源开发的可持续性。

## 参考文献

- [1]张西军, 田宏博, 袁浩, 等. 基于“一网统管, 跨省通办”模式下的矿产资源综合管理平台设计与实现[J]. 城市勘测, 2024(1): 60-63.
- [2]吴健, 孟俊俊, 黄光辉. 露天矿山矿产资源开发利用与生态复绿三维可视化系统的设计与实现[J]. 中国信息界, 2024(3): 252-255.
- [3]羊飞蓉. 大数据下矿产资源调查所档案数字化管理的策略创新[J]. 兰台内外, 2023(31): 7-9.
- [4]白杰, 徐世光, 黄建国, 等. 基于GMS软件对某矿区松散层孔隙水污染的数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(01): 97-103.
- [5]Wang, J., Du, C., Du, S. et al. Dust dispersion law and high-pressure air curtain control technology of crossheading during the process of ore unloading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 230, 105234.
- [6]林蔚. 矿山地质资源数字化管理分析[J]. 中国金属通报, 2024(4): 107-109.
- [7]Blachowski, J., Jaroslaw, W., Walerysiak, N. et al. Monitoring of Post-Mining Subsidence using Airborne and Terrestrial Laser Scanning Approach[J]. Archives of Mining Sciences, 2024, 69(3).