文章编号：1004-4051(2025)11-0036-07 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20252064

智能化趋势下的矿山设计思考与应用

周少兵[1]，刘荣乐[2]，程根祥[1]，樊忠华[2]，张春虎[2]，周新勋[2]，尧金才[2]
（1. 江西铜业集团有限公司，江西 南昌 330096；
2. 中国瑞林工程技术股份有限公司，江西 南昌 330038）

摘 要： 矿山行业在历经人力、机械化与自动化的发展阶段后，虽为社会经济发展奠定了关键资源基础，但仍面临生产效率低下、资源集约化水平不足及安全风险居高不下等挑战。随着大数据、人工智能、5G 等新一代信息技术的发展，智能化已成为推动矿山行业转型升级的重要路径。本文围绕智能化矿山设计方法展开研究，旨在探索以新一代信息技术为支撑的矿山设计新路径，解决传统矿山在生产效率、能源消耗与安全管理等方面的关键问题，推动矿山设计向智能化、高效化与本质安全化方向发展。本文提出在设计阶段采用设计单位主导、矿山企业协同的工作机制，以矿山工艺流程为核心开展系统性规划，融合智能传感、物联网、大数据分析及远程集中控制等技术，对矿山开拓、掘进、破碎、提升等关键环节实施智能化集成设计与改造。在银珠山铅锌银矿与土耳其某铜矿项目中进行了实践应用，研究结果表明：银珠山项目通过引入全断面硬岩掘进机施工开拓巷道，基建周期缩短约 30%；土耳其铜矿项目建成了井下破碎装载与提升系统的智能化无人值守系统，实现作业人员减少 50%、能耗降低 15%、生产效率提升 20%，并显著提升了系统安全性。研究验证了以智能技术为驱动、工艺为主线、协同为保障的矿山设计思路，能够有效解决矿山建设与生产过程中的关键难题，提升整体运行效率与安全水平。结论表明，智能化矿山设计应坚持工艺引领、技术赋能与协同共建原则，分阶段推进智能装备与系统平台的集成应用。本研究为同类矿山的智能化建设提供了可借鉴的技术路径与实践方案，对推动矿山行业实现高质量、可持续发展具有重要的理论价值与工程意义。

关键词： 矿山设计；智能矿山；智能化改造；工艺流程；协同机制
中图分类号： TD212 **文献标识码：** A

Reflections and applications on mine design under the trend of intelligence

ZHOU Shaobing[1], LIU Rongle[2], CHENG Genxiang[1], FAN Zhonghua[2], ZHANG Chunhu[2], ZHOU Xinqing[2], YAO Jincai[2]
(1. *Jiangxi Copper Co., Ltd., Nanchang* 330096, *China*;
2. *China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang* 330038, *China*)

Abstract: Although the mining industry has laid a key resource foundation for socioeconomic development through its evolution from manual to mechanized and automated phases, it still grapples with persistent challenges including low production efficiency, insufficient resource intensification, and

收稿日期： 2025-09-19 **责任编辑：** 刘硕
基金项目： 赣鄱俊才支持计划—主要学科学术和技术带头人培养项目资助（编号：20243BCE51187）
第一作者简介： 周少兵（1970—），男，汉族，高级工程师，长期致力于有色金属资源开发与冶炼技术有关的管理工作，E-mail：1648438937@qq.com。
通讯作者简介： 樊忠华（1984—），男，汉族，硕士，高级工程师，主要从事非煤矿山智能化采矿设计研究等方面的工作，E-mail：fanzhonghua@nerin.com。
引用格式： 周少兵，刘荣乐，程根祥，等. 智能化趋势下的矿山设计思考与应用[J]. 中国矿业，2025，34(11)：36-42.
ZHOU Shaobing, LIU Rongle, CHENG Genxiang, et al. Reflections and applications on mine design under the trend of intelligence[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(11): 36-42.

elevated safety risks. With the advancement of new-generation information technologies like big data, artificial intelligence, and 5G, intelligence has become a significant pathway for promoting the transformation and upgrading of the mining industry. This paper focuses on intelligent mine design methods, aiming to explore new approaches supported by these technologies to address key issues in traditional mining, such as production efficiency, energy consumption, and safety management, thereby advancing mine design toward intelligence, high efficiency, and intrinsic safety. A collaborative mechanism led by design institutes with the participation of mining enterprises is proposed for the design phase. Centered on mining technological processes, systematic planning is conducted, integrating technologies such as smart sensors, the Internet of Things, big data analytics, and remote centralized control to implement intelligent integrated design and transformation of key mine processes including development, excavation, crushing, and hoisting. Practical applications in the Yinzhu Mountain Lead-Zinc-Silver Mine project and a copper mine project in Turkey demonstrate the effectiveness of this approach. In the Yinzhu Mountain project, the adoption of full-face hard rock tunnel boring machines for development roadway construction reduced the infrastructure period by approximately 30%. In the copper mine project in Turkey, an intelligent unmanned system for underground crushing, loading, and hoisting is established, resulting in a 50% reduction in operational personnel, a 15% decrease in energy consumption, a 20% improvement in production efficiency, and a significant enhancement in system safety. The results demonstrate that the proposed mine design approach, driven by smart technologies, guided by technological processes, and supported by collaboration, can effectively address key challenges in mine construction and production, improving overall operational efficiency and safety levels. It is concluded that intelligent mine design should adhere to the principles of process leadership, technology enablement, and collaborative development, promoting the integrated application of smart equipment and system platforms in phases. This study provides a referential technical pathway and practical solution for the intelligent construction of similar mines, offering important theoretical and engineering significance for promoting high-quality and sustainable development in the mining industry.

Keywords: mine design; intelligent mine; intelligent transformation; process flow; collaboration mechanism

0　引　言

矿山行业在经历人工开采与机械自动化开采等阶段后，虽为社会经济发展提供了重要的资源支撑，但仍普遍面临生产效率低下、资源集约化利用水平不足、安全风险突出等系统性挑战[1-3]。具体表现为：开采工艺与装备水平参差不齐，生产过程依赖人工经验决策，数据采集与利用程度低，难以实现精准调度与能耗控制；同时，深部开采诱发的岩体失稳、突水等灾害缺乏有效的智能预警与协同控制手段，安全管理仍处于被动应对状态[4-5]。

在推动矿山智能化转型方面，已有诸多技术探索与实践。例如，在智能通信与远程控制方面，国家电投北露天煤矿通过建设基于无人驾驶的生产调度指挥系统，实现了矿卡、自卸车等设备的有序、高效作业[6]；在数据平台与综合管控方面，杨小聪等[7]针对超大型深井铁矿高效绿色智能开采创建了新理论、新技术和新装备并建立示范矿山；在灾害监测与安全预警方面，蒋普先等[8]开发了一套基于数据处理分析与三维可视化技术的地压检测预警平台，通过集成微震监测系统、应力传感器、地表位移监测等装置，实现了地压安全态势的实时感知与分级预警闭环管理；在能耗管理与优化方面，鞍钢集团探索了人工智能在露天矿能源管控中的应用，为绿色矿山建设提供了路径参考[9]。

然而，现有研究多聚焦于单一系统或特定环节的技术突破，缺乏对整个矿山系统全流程的协同设计与整体架构。这种碎片化建设模式导致系统间数据割裂、业务难以联动，限制了整体智能化效能的发挥。矿山设计作为将先进科技转化为系统生产力的关键环节，亟需由设计单位联合矿山运营方，从顶层设计层面系统整合技术选型、系统集成与业务重构，制定覆盖矿山全生命周期的智能化建设方案。

鉴于此，本文围绕金属矿山智能化转型的系统性需求，以顶层设计方法为指导，研究多系统融合的智能化矿山架构，探讨其在典型矿山场景中的实施路径与关键技术配置，以期为我国金属矿山的智能化建设提供具备整体性、可操作性的设计范式与实践参考。

1　智能矿山设计思考

矿产资源开发正经历从传统模式向数字化、智能化方向的深刻转型。在这一背景下，矿山设计作

为连接地质勘查与实际生产的关键环节，不仅需在既有勘查成果基础上完成资源开发的整体规划，更承担着引领智能化建设方向的重要使命。传统的矿山设计主要聚焦于技术可行性与经济合理性，而在智能化时代，设计工作还需前瞻性地融入信息物理系统、工业互联网、大数据分析等新一代信息技术，构建具备感知、分析、决策与执行能力的智能化矿山体系。因此，有必要在矿山设计阶段就系统思考智能化建设的核心理念、技术路径与实施架构，推动工程设计与智能化深度融合，为矿山全生命周期的高效、安全与绿色发展奠定基础。

工程设计与智能化的有效融合，是实现智能矿山建设目标的关键所在。其核心在于设计单位应以工艺为引领，负责构建统一数据平台与智能决策体系；矿山企业则负责提出生产痛点与运行保障；设备供应商与系统集成商需遵循统一接口标准，确保系统互联与数据互通，避免后期系统孤立、数据割裂等问题。智能矿山设计核心体系如图 1 所示。

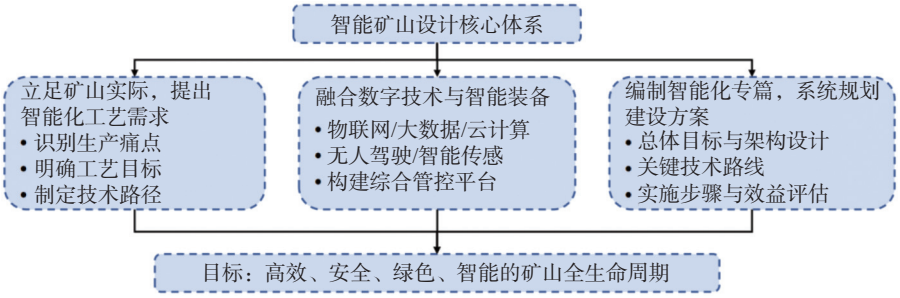


图 1 智能矿山设计核心体系

Fig. 1 Core system of intelligent mine design

1.1 立足矿山实际，提出智能化工艺需求

鉴于不同矿山在矿体赋存条件、地质环境及开采方式等方面存在显著差异，智能化建设必须摆脱“一刀切”的通用模式，充分考量矿山的个性化特征。基于矿山实际提出智能化工艺需求，是实现智能化系统有效落地的重要前提，只有从真实生产痛点出发，才能确保技术方案具备针对性与可实施性，避免技术与场景脱节。在设计阶段，应系统分析矿山生产工艺流程，识别关键环节中存在的效率瓶颈、安全隐患与管理难点，进而明确智能化改造的工艺目标与技术路径。针对高温高压作业环境、选矿回收率偏低等具体问题，可通过智能监测与优化控制等手段提升系统实效性。在统一工业数据平台支撑下，实现从地质资源到选矿脱水的全流程集成管控，推进矿山向自动化、数字化、智能化方向转型，最终达成提升效率、保障安全、优化资源配置的综合目标。

1.2 融合数字技术与智能装备，构建全方位管控体系

矿山生产系统涵盖地质、采矿、运输、选矿等多个复杂环节，传统管理模式难以实现全过程精细化管控。为此，通过融合物联网、大数据、云计算等数字化技术，结合无人驾驶设备、智能传感与工业机器人等先进装备，构建覆盖全流程的智能监控与管控体系，可显著提升矿山生产的透明度、协同性与响应速度，为实现少人化乃至无人化矿山运营奠定基础。具体而言，应在设计中系统建立集数据采集、传输、处理与智能决策于一体的综合管控平台，实现从地质资源建模、生产计划制定、爆破设计优化、配矿调度到运输管理与选矿流程的全链条集成管控与协同决策，从而推动矿山生产向数字化、智能化方向系统演进。

1.3 编制智能化专篇，系统规划建设方案

矿山智能化建设涉及技术、管理、人才等多维度系统性变革，亟需通过专项设计实现统筹规划与规范引导。为此，在设计阶段编制独立的“智能化专篇”，系统阐述智能化建设的总体目标、架构设计、关键技术、实施步骤与效益评估，将有效明确建设的目标定位、技术路线与实施方案。通过重点突出其在提升矿山本质安全、改善作业环境、提高资源综合利用效率、优化生产经营管理等方面的具体措施，可为矿山安全、环保、效率与管理水平的全面提升提供系统保障，确保智能化建设过程有章可循、有据可依。

2 智能矿山设计应用案例

基于前文提出的智能矿山设计理念，本文选取银珠山铅锌银矿与土耳其某铜矿作为典型案例，分别从因矿施策顶层设计、工艺与智能设备融合、本质安全与绿色环保三个维度，系统阐述智能化系统在矿山设计中的具体应用与实践成效。

2.1 银珠山铅锌银矿

银珠山铅锌银矿位于江西省贵溪市冷水镇，为

在建地下开采新矿山，设计规模 3 000 t/d。基于智能矿山设计思考，设计单位与江西铜业集团有限公司（以下简称“江铜集团”）共同确立“系统设计、分步实施”的建设原则，提出以下设计路径与智能矿山总体架构。

在因矿施策顶层设计方面，设计单位承担系统架构设计与平台搭建职责，矿山企业配合提供地质与生产数据，并参与业务逻辑验证，基于银珠山铅锌银矿智能化定位和智能矿山建设指南[10]，牵头构建了以数据驱动为核心、涵盖设备层至决策层的五层智能矿山总体架构，如图 2 所示。该架构统筹规划了从环境感知、过程控制到生产经营的全流程智能化系统，实现了对地质资源、计划编制、爆破设计、配矿优化、铲装运输、选矿处理等环节的一体化管控，充分体现了系统性与可扩展性。

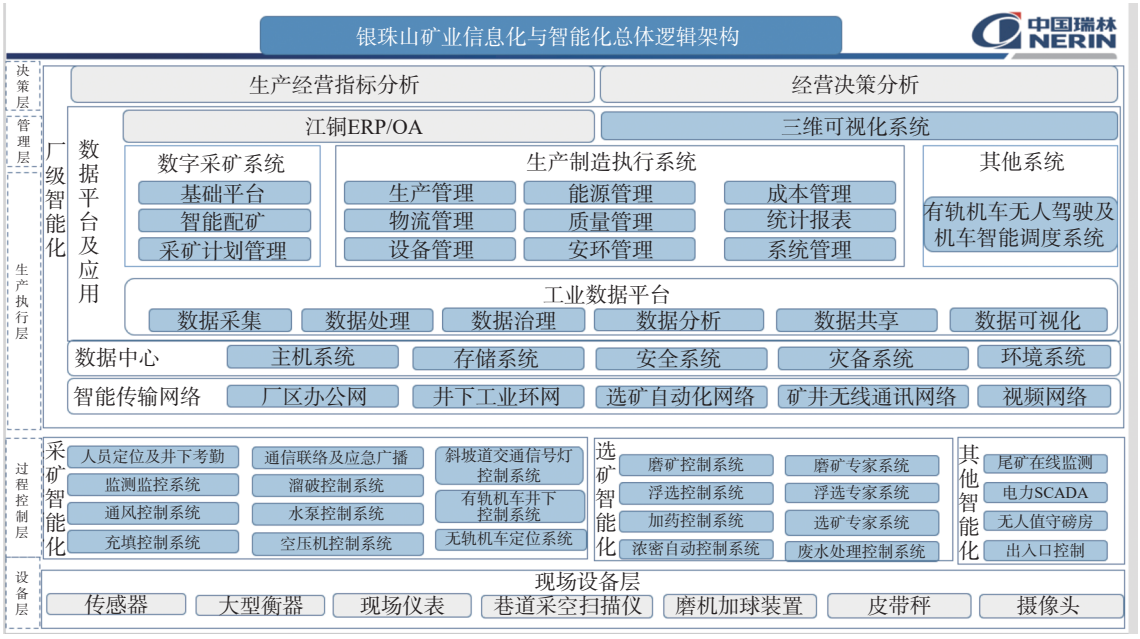


图 2　银珠山铅锌银矿智能矿山总体架构

Fig. 2　The overall architecture of intelligent mine of Yinzhu Mountain Lead-Zinc-Silver Mine

①设备层：负责现场信号的实时采集与控制指令的执行，主要由环境参数传感器、设备工况传感器、目标跟踪定位传感器、生产控制设备、通信联络设备、视频采集设备等构成。②过程控制层：负责对银珠山铅锌银矿采选生产工艺过程、生产环境的集中监视和协同控制，同时对现场控制系统进行优化，实现重点环节和区域的无人值守和智能控制。③生产执行层：此层是银珠山智能矿山建设的核心，包括智能传输网络平台、数据中心、工业数据平台、数字采矿系统、生产制造执行系统、有轨机车无人驾驶及机车调度系统。④管理层：江西铜业 ERP、全面预算管理及 OA 为银珠山铅锌银矿提供全面的人力、财务、采购、销售、办公自动化方面的信息管理。同时，构建银珠山铅锌银矿三维可视化系统，实现矿山的数字孪生。⑤决策层：为银珠山铅锌银矿提供生产运营管理及经营战略的辅助决策支持，包括生产经营指标分析、经营决策分析等。

在工艺与智能设备融合方面，传统的金属矿山井下巷道掘进方式多为钻爆法[11-13]，存在工序多、掘进速度低、超欠挖严重、安全性差、工人劳动强度大、作业环境恶劣等问题。该矿创新引入全断面硬岩掘进机（TBM）用于中段巷道掘进。TBM 因其快速、安全、高效等优点，在市政交通水利水电领域得到了广泛应用[12-17]，并在煤炭矿山取得了不错的应用效果[18-21]，但在有色金属矿山领域尚鲜有尝试。TBM 整机长 62 m，重约 120 t，掘进断面直径为 3.53 m，具备快速掘进、作业安全、减少人员等优势，上下中段间设计运用 TBM 掘进斜坡道来实现工作面的转移并在拆机组装硐室进行重新组装，如图 3 和图 4 所示。通过设备与工艺的深度融合，实现了掘进环节的智能化与少人化，为金属矿山高效开拓提供了新的技术路径。

银珠山铅锌银矿在基建阶段主要涉及−240 m、−190 m 中段和−140 m 三个中段的开拓工程。在−240 m 中段采用传统钻爆法施工时，单个作业面的平均月进尺约为 58 m；当独头掘进距离超过 800 m 后，受通风、出渣等条件制约，月进尺下降至约 43 m。相比之下，−190 m 与−140 m 中段采用 TBM 施工，其平均月进尺达到 304 m，而传统钻爆法平均月进尺仅



图 3 江铜 1 号全断面硬岩掘进机

Fig. 3 Jiangxi Copper Group No.1 TBM

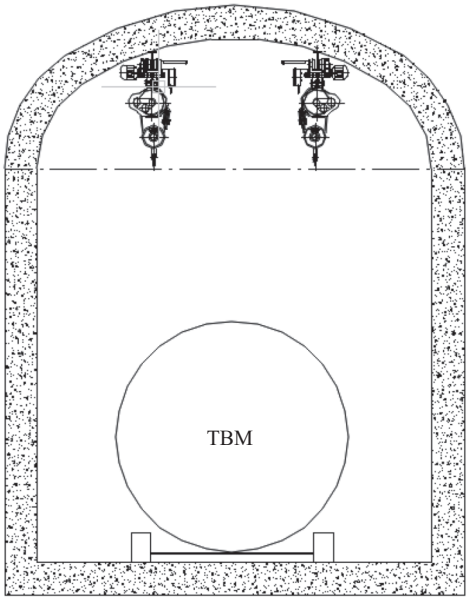


图 4 拆机硐室

Fig. 4 Dismantling chamber

为 58 m, TBM 施工效率显著高于钻爆法。

在本质安全与绿色环保方面，银珠山铅锌银矿通过构建智能通风、环境监测与灾害预警系统，实现对井下高温、有害气体等风险的实时感知与防控。同时，依托集中控制与无人值守系统，有效减少危险岗位作业人员，提升矿山本质安全水平。通过全过程智能化管理，推动矿山实现安全、高效、清洁生产。

2.2 土耳其某铜矿

土耳其某铜矿位于土耳其卡斯塔莫努省，是中国瑞林工程技术股份有限公司直接面向土耳其矿方承担设计的矿山。土耳其方对设计标准要求较高，在设计之初，就提出在井下需要实现井下破碎装载系统、提升系统采用智能化无人值守系统。项目设计贯彻“因矿施策”理念，重点推进提升、破碎与装载系统的智能化与无人化，全面提升矿山的安全与效率水平。

在“因矿施策”顶层设计方面，该矿以提升系统为核心，构建了涵盖破碎装载、箕斗计量与集中控制的智能化提升体系。通过统一控制平台，将原属独立环节的破碎、装载与提升系统进行集成，实现全流程协同运行与无人值守，显著提升了系统整体效能。

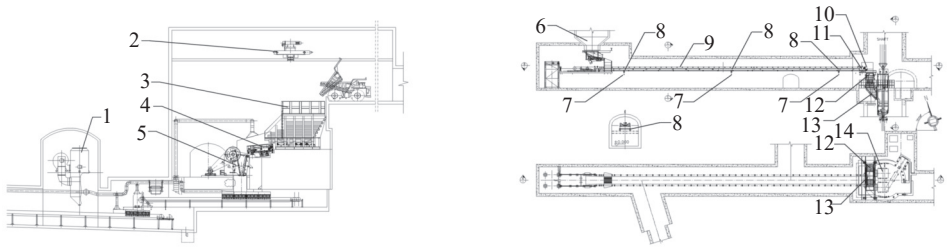
在工艺与智能设备融合方面，该矿主提升系统采用德国西马格全数字电控设备，具备四象限运行与多重冗余保障功能，可实现自动化提升与故障状态下的半载持续运行。提升现场安装情况如图 5 所示。井下破碎站选用 CJ612 型颚式破碎机与液压给矿机，配套料位与运行状态监测仪表，实现破碎环节的无人化运作。箕斗装载系统则采用具备输送与计量双功能的胶带机，通过西门子称重单元与液压驱动，实现高精度装载与快速卸矿，破碎硐室设备及箕斗装载系统如图 6 所示。

在本质安全与绿色环保方面，整个提升机的自动控制系统通过以太网和工业现场总线将基础自动化、过程自动化及 MMI、提升信号及装卸载系统、液压制动系统软连接，构成符合工业标准的局域网。形成提升机的分布式控制系统。在提升系统中设置完善的联锁控制与视频语音通讯机制，确保人员提升过程的安全可控，如图 7 所示。破碎站与装载系统均实现无人化运行，从根本上杜绝相关环节的人



图 5 提升现场安装情况

Fig. 5 Installation conditions of lifting on-site



（a）破碎硐室设备　　（b）箕斗装载系统

1-除尘器；2-起重机；3-往复式矿机；4-振动筛；5-颚式破碎机；6-振动给料机；7-支撑梁；8-称重单元；9-计量装矿胶带机；10-液压马达；11-物料检测传感器；12-分配小车；13-溜槽；14-箕斗。

图 6　破碎硐室设备及箕斗装载系统配置

Fig. 6　Crushing chamber equipment and skip loading system configuration

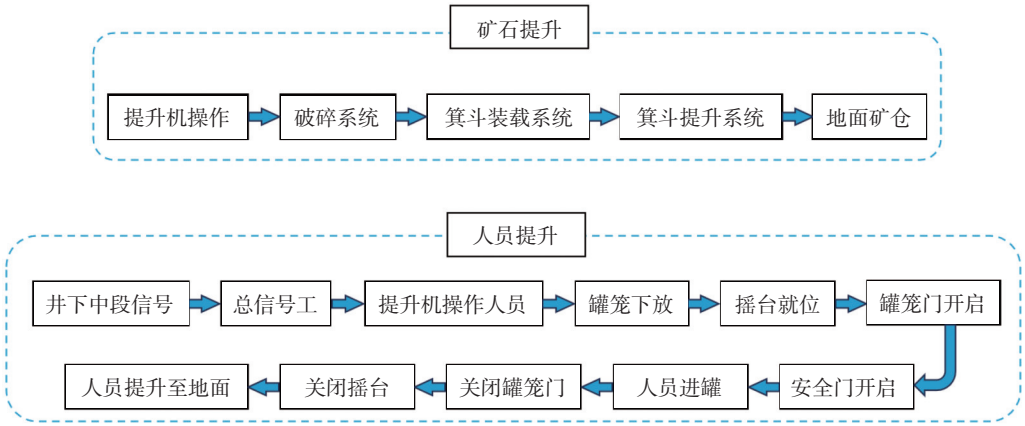


图 7　提升系统自动化控制流程

Fig. 7　Automation control process of lifting system

身伤害风险。通过全流程自动化与智能化改造，该矿在保障安全生产的同时，有效降低能耗与环境影响，契合绿色矿山建设要求。

3　结　论

1）本文探讨了智能化趋势下的矿山设计思路：因矿施策，从全局出发，以工艺需求为引导，有机融合智能设备，注重突破矿山面临的难点，设计阶段即由设计单位联合矿山企业，明确各方在系统集成与数据治理中的职责，规划出技术合理、经济可行的智能矿山方案，避免后期系统信息孤岛问题。

2）为大幅提升矿山基建速度与井下作业安全水平，探索了全断面硬岩掘进机在银珠山铅锌银矿巷道开拓中的应用。在此基础上，系统构建了以数据驱动为核心、融合人工智能算法的智能矿山整体架构，规划出一条逐步减少人工干预的智能化建设路径。

3）从项目设计初充分考虑智能矿山建设理念，明确了“整体规划、分步智能”的技术路径，针对土耳其某铜矿设计和矿山运行情况，就矿山的提升系统、破碎系统，箕斗装载系统的智能化设计进行了设计研究，减少了装载和提升运输环节人员投入，也提升了安全性，可为相似矿山提供借鉴参考。

4）本研究仍存在一定局限性，所提出的智能矿山设计方法在两类典型矿山中虽已取得良好应用效果，但其在极复杂地质条件或多矿体协同开采场景中的适应性仍需进一步验证；此外，在数据标准化、系统互操作性与智能决策算法的泛化能力方面，仍有待深入优化。未来研究将聚焦于构建矿山数字孪生平台，推动多系统协同控制与智能决策深度融合，并探索低碳导向的智能矿山技术路径，以提升系统整体的自适应性与可持续性。

参考文献（References）：

[1] 鞠建华，韩见，鞠方略. 中国智能矿山发展趋势与路径分析[J]. 中国矿业，2023，32(5)：1-7.
JU Jianhua，HAN Jian，JU Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. China Mining Magazine，2023，32(5)：1-7.

[2] 范振林，马正己. 中国矿业高质量发展问题探讨[J]. 中国国土资源经济，2022，35(8)：17-26.
FAN Zhenlin，MA Zhengji. Discussion on high-quality development of China’s mining industry[J]. Natural Resource Economics of China，2022，35(8)：17-26.

[3] 王连成，邵安林，曲福明，等. 金属矿山开采技术发展现状与展

望[J]. 工程科学学报, 2025, 47(5): 971-983.
WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(5): 971-983.

[4] 于英娜, 郭伟. 矿山环境治理恢复瓶颈及解决方案[J]. 中国金属通报, 2019(8): 265-266.
YU Yingna, GUO Wei. Bottlenecks and solutions for mine environmental governance and restoration[J]. China Metal Bulletin, 2019(8): 265-266.

[5] 姜传军. 吉林省非煤矿产资源开采安全风险管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[6] 刘树栋, 石践, 李忠飞, 等. 国家电投北露天煤矿智能矿山建设进展[J]. 中国矿业, 2025, 34(3): 104-111.
LIU Shudong, SHI Jian, LI Zhongfei, et al. Progress of intelligent mine construction in North Open-pit Coal Mine of National Electric Power Investment Corporation[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(3): 104-111.

[7] 杨小聪, 尹升华. 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备研究现状与展望[J]. 工程科学学报, 2024, 46(12): 2147-2158.
YANG Xiaocong, YING Shenghua. Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(12): 2147-2158.

[8] 蒋普先, 周锐, 陈光俊, 等. 矿山地压安全监测预警平台[J]. 中国矿业, 2025, 34(S1): 225-229.
JIANG Puxian, ZHOU Rui, CHEN Guangjun, et al. Mine ground pressure safety monitoring and early warning platform[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(S1): 225-229.

[9] 解治宇, 马连成, 张岩, 等. 人工智能技术在金属露天矿能源管控中的应用探讨[J]. 冶金与材料, 2022, 42(4): 100-104, 107.
XIE Zhiyu, MA Liancheng, ZHANG Yan, et al. Discussion on the application of artificial intelligence technology in energy control of metal open pit mines[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(4): 100-104, 107.

[10] 有色金属行业智能矿山建设指南(试行)[N]. 中国有色金属报, 2020-05-09(2).

[11] 肖广波. 地下矿山井巷掘进新技术的探讨[J]. 有色金属设计, 2023, 50(3): 13-16.
XIAO Guangbo. Discussion on new technology of underground mine workings excavation[J]. Nonferrous Metals Design, 2023, 50(3): 13-16.

[12] 刘活. 光面爆破在矿山井巷基建中的应用探讨[J]. 中国锰业, 2021, 39(5): 29-34.
LIU Huo. A discussion on the application of smooth blasting in mine tunnel construction[J]. China Manganese Industry, 2021, 39(5): 29-34.

[13] 欧阳亦渺, 陈荣铛, 欧阳后热. 地下矿山工程井巷掘进爆破技术及实施要点的思考[J]. 中国设备工程, 2018(22): 153-154.
OUYANG Yimiao, CHEN Rongdang, OUYANG Houre. Thoughts on the blasting technology and implementation points of underground mine engineering tunnel excavation[J]. China Plant Engineering, 2018(22): 153-154.

[14] 于勇, 贺维国, 李腾飞. 深江铁路珠江口隧道总体方案及关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2024(11): 101-108.
YU Yong, HE Weiguo, LI Tengfei. Overall design and key technologies of the pearl river estuary tunnel on the Shenzhen-Jiangmen Railway[J]. Railway Standard Design, 2024(11): 101-108.

[15] 张建华, 王宏伟, 陈培新, 等. 杭州地铁4号线盾构下穿电力隧道直接切桩沉降分析[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 144-152.
ZHANG Jianhua, WANG Hongwei, CHEN Peixin, et al. Surface settlement analysis of shield passing through power tunnel and directly cutting pile foundation of Hangzhou Metro Line4[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1): 144-152.

[16] 邓选滔, 李甫福. 珠三角水资源配置工程B2标盾构机选型及应用分析[J]. 广东水利水电, 2022(5): 89-93.
DENG Xuantao, LI Pufu. Selection and application analysis of shield machine for bid B2 of water resources allocation project in the Pearl River Delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2022(5): 89-93.

[17] 陈叔, 吴志昊, 邹坤秘. 特殊复杂地质条件下穿越城区铁路隧道的盾构机选型[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(5): 36-42.
CHEN Shu, WU Zhihao, ZOU Kunmi. Selection of shield machine for crossing urban railway tunnels under special and complex geological conditions[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2021, 34(5): 36-42.

[18] 姜涛. 华阳集团EQS3000型全断面盾构机试用[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(3): 99-101.
JIANG Tao. Trial application of EQS3000 full section shield machine in Huayang Group[J]. Coal and Chemical Industry, 2022, 45(3): 99-101.

[19] 程凯, 王海风. TBM型盾构机在新景公司保安分区8#煤回风巷的应用[J]. 山东煤炭科技, 2020(5): 123-125.
CHENG Kai, WANG Haifeng. Application of TBM-type shield machine in 8# coal return air lane in security zone of Xinjing Company[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2020(5): 123-125.

[20] 王磊. 盾构机在马兰矿西翼下组煤施工系统中的应用[J]. 矿业装备, 2020(1): 86-87.
WANG Lei. Application of shield tunneling machine in the construction system of coal formation under the West Wing of Malan Mine[J]. Mining Equipment, 2020(1): 86-87.

[21] 柴文军. TBM盾构机在阳煤集团大断面岩巷中的研究与应用[J]. 煤矿现代化, 2019(3): 47-50.
CHAI Wenjun. Research and application of TBM shield machine in large section rock roadway of Yangmei Group[J]. Coal Mine Modernization, 2019(3): 47-50.