



面向智能矿山的GIS框架

任雷平 胡玉玺 赵月川 杨娟利

随着计算机、矿山物联网、通信技术的发展，特别是5G网络的出现，大幅提高了数据传输能力，在信息与通信技术（Information and Communications Technology, ICT）的支持下，智能矿山建设的条件日趋成熟。在矿山建设生产时，可基于现有数据、模型，在计算机中模拟矿山建设和生产等活动。列斐伏尔空间“三元论”从物质、社会和精神3个方面对空间进行了描述，建立空间三元辩证法；智能矿山的建设也可依据空间三元辩证法进行描述，并依据其理论进行指导生产。

依据“三元论”，构成矿山的自然环境和为保障生产由人工建立的生产系统、安全辅助系统共同构成第一元空间，即“物理空间”；人类的行为与生产活动的总和构成第二元空间，即“社会空间”；由计算机、互联网、人工智能、虚拟仿真、数字孪生等技术构建在“物理空间”和“社会空间”之上的虚拟空间，为第三元空间，即“信息空间”。通过建立规则，打通智能矿山第一元物理空间、第二元社会空间和第三元信息空间的连接桥梁，再通过信息空间中的模拟算法回馈物理空间和社会空间，进一步优化智能矿山系统，解决智能矿山在建设、生产、检修、运营中存在的问题，是智能矿山建设的基本工程思路。由于，智能矿山是矿山三元空间的耦合，需要将矿山物理空间中的实体和各实体于生产空间中的活动在第三元“信息空间”中进行统一，建立完整的三元空间之间的关联，以达到在虚拟信息空间中分析问题、发现问题并提出解决问题方案的目的。

地理信息系统（Geographic Information System, GIS）基于地图学和计算机技术，以数字投影的方式，构建起物理空间和信息空间的桥梁。在数字矿山发展基础上，相较于生产管理系统、ERP系统等，GIS系统能够满足对空间实体位置信息及相关属性数据的采集、存储、管理需求，并在空间分析功能的支持下，辅助实现“社会空间”中的部分业务。由于GIS系统的宏观性，缺乏对细节的刻画，需要与建筑物信息模型（Building Information Modeling, BIM）相结合，实现由宏观到微观的转变。笔者将从面向智能矿山的多元空间信息需求、面向智能矿山的GIS架构和关键技术研究3部分进行探讨。

面向智能矿山的多元空间信息需求分析

智能矿山建设是具有复杂数据和业务的巨系统。在建设过程中，包括单一矿山建设、矿山群建设、以选煤厂为主的煤炭精选及发电等一体化的二次加工，并配套以铁路运输、海运等销售，甚至区域性的煤矿建设及协同内容。随着“生态文明建设”和“碳达峰碳中和”的要求，智能矿山的建设还包括开采前的地质勘探、开采中的生态环境保护、开采后的生态环境修复等工作。因此，智能矿山是若干项工作的集成而不是简单的集合，是基于共同的环境信息、基础设施和数据资源的成体系信息系统建设工作，具有大量的共性化内容。

目前，矿山建设基本已完成数字化和自动化改造，在智能化建设进程中，GIS技术需作出相应的改变，以适应矿山智能化建设的需求。笔者从开放

式一体化底座、自适应可视化表达、空间智能化分析和多尺度空间格局分析4个方面进行探讨。

(1) 开放式一体化底座

数字化是智能矿山建设的基础,从数字矿山到智能矿山,针对传感器数据自动获取、数据管理及分析平台建设、数据应用与服务等方面进行大量的探索与实践。智能矿山是体系化的信息系统生态,不同应用系统基于矿山中的生产设施和数据资源,不只是对当前已有的矿山管理应用系统进行简单集成,而是对逐步增长的需求留有充分的扩展空间。由于前期建设过程缺乏统一的数据采集、管理和集成共享标准,造成各系统数据不互通、数据孤岛问题严重。面向智能矿山的GIS要实现数据集成融合与传感互连,减少人员手工采集数据的占比;因此,需要有统一的数据标准、统一的数据平台及开放式的开发框架。而数据规范和标准如何统一,数据底座如何构建,传输过程安全性如何保障,是最核心的问题。

(2) 自适应可视化表达

可视化是从抽象数据中发现隐含规律并进行信息传递的有效手段,也是智能矿山环境下为各种智能化服务提供技术支撑的重要环节。从二维、三维可视化到数字孪生矿山的建设历程中,面对不同数据类型,不同呈现载体、不同尺度和不同业务应用的可视化表达方法研究贯穿始终。随着矿山管理呈现出向精细化管理的发展趋势,可视化手段需满足不同尺度矿山设备及环境的管理需求。面向智能矿山的GIS需打破传统GIS平台及数据多尺度可视化专业壁垒,降低应用门槛,其核心问题在于如何实现矿山宏大的自然场景与设备精细建模的多尺度表达自动转化,如何实现复杂数字和逻辑关系的直观化展示,以及多种可视化表达方式的快速选取。

(3) 空间智能化分析

人工智能技术的发展为智能矿山建设带来了新的机遇和挑战,智能化矿山通过信息空间发现问题、分析问题并提出问题的不同解决方案,并针对

不同的解决方法进行结果推演,寻求最优解,以提高矿山的运营效率,降低运营成本。在GIS应用中,以空间分析、仿真模拟作为主要功能,将GIS与AI相结合,提升GIS的应用范围和能力。但是,面对智能矿山复杂的业务场景,传统的空间分析算法和仿真模拟功能难以应对智能矿山分析和仿真需求,应结合矿山业务需求,开发服务于矿山环境的空间分析模型,适用于区域范围内矿山集群管理及资源调度需求,还需在此基础上进一步仿真模拟,以实现在矿山生产中的自动化决策控制。因此,如何解决矿山第一元物理空间和第三元信息空间实时采集数据和推演数据的双向同步,成为GIS领域面临的巨大问题。

(4) 轻量化决策分析

辅助决策是GIS系统的核心功能之一,基于位置信息和空间格局分布的辅助决策方法,在大范围分析决策中应用成熟,矿山环境作为独立的生态系统,通过类比自然界中物质流、能量流、大气环流等对整体生态的作用和影响,建立空间位置与矿山环境中风流、水流、煤流、电流等的关系,并基于此实现故障监测、设备报警识别、安全评估等。因此,构建合适的模型,并实现轻量化的决策分析,减少人员干预,降低行业门槛,更好地赋能智能矿山建设,是应该主要研究的问题。

基于GIS的智能矿山总体架构

在建设过程中,主要包含3部分内容:①通过建立矿山第一元物理空间和第二元社会空间到信息空间的映射,将矿山基础时空信息和矿山生产所涉及的“人、机、料、法、环”等要素进行数据采集,并进行融合,转换为满足计算机系统存储、加工、分析与应用需求的数据;②通过信息融合对矿山第一元物理空间和第二元社会空间进行数学建模与可视化表达,在第三元信息空间中进行推演,分析问题、发现问题并提出解决问题方案;③在信息空间

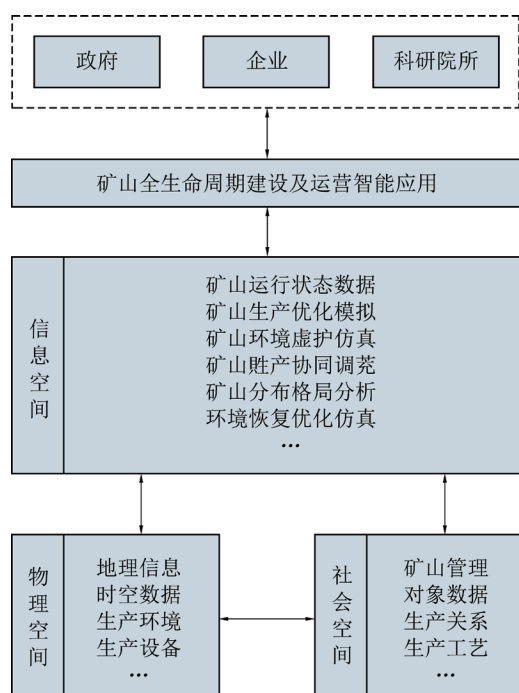


图1 三元空间下智能矿山建设基本工程逻辑

中通过依据智能矿山操作系统开发的各类智能应用及分析模型，推演结果，并双向同步到第一元物理空间和第二元社会空间，优化矿山系统，解决智能矿山在建设、生产等环节中存在的问题，三元空间下智能矿山建设基本工程逻辑如图1所示。

首先，在工业环网、信息网、视频专网及无线通信网络的支持下，对矿山物理空间的环境、设备和社会空间中的人类组织和生产活动进行动态监测和实时感知，构建“人、机、料、法、环”全方位监测体系，获取实时数据；其次，通过数据平台将矿山复杂的多源异构时空大数据进行融合，构建矿山不同尺度下的实体信息空间数字孪生模型，基于空间智能分析技术，实现矿山运行中的实时数据监测、现状分析、动态模拟、智能决策、辅助设计和双向控制，并通过开放式开发框架，为各级用户提供二次开发环境，确保系统体系的统一性；最后，通过对矿山生产中采、掘、机、运、通等不同业务的深度应用，以及面向政府、企业、科研院所等不同用户的需求应用，提升矿山全生命周期建设及运营效率。面向智能矿山的GIS框架如图2所示。

基于 GIS 的智能矿山关键研究内容

开放式一体化底座构建

开放式一体化底座构建主要包含统一数据平台和统一开发框架2部分内容。智能矿山统一数据平台将矿山环境下不同来源、不同采集方式、不同形式的多源异构数据进行融合，主要分为基础时空地理数据和矿山感知管理数据两大类数据。其中，基础时空地理数据主要包括栅格数据、二维矢量数据及三维模型数据等，是智能矿山的数字底板，需做好GIS与BIM的融合工作，宏微观互补，该部分内容已在智慧城市的建设进程中取得重大研究进展，可迁移至矿山环境使用；矿山感知管理数据以物联网感知数据为主，覆盖矿山建设、生产等各方面。矿山感知数据具有数量大、来源广、结构复杂、协议各异等特点，如何将基础时空数据和感知数据进行融合和管理，是提升数据价值的主要研究内容。

面向智能矿山的GIS本质是基于统一数据平台的开放式二次开发框架，为各种用户群体提供优质的服务与良好的用户体验。此外，平台开放式服务应具有轻量化的开发框架和满足定制化开发需求的能力。现阶段需重点解决3个问题：①提供基础的时空数据资源，以地图服务为主，辅以三维场景、时空数据管理、矿山实体数据管理等；②提供矿山应用功能服务，包括资源管理服务、业务流程服务、知识服务、专家知识库等；③提供标准的应用开发框架，包括规范标准、开发工具、接口服务、计算存储服务。

自适应可视化表达

基础时空地理数据是智能矿山GIS系统建立的数字底板。基于位置信息进行数字孪生时，需重点解决矿山三维环境全面透彻的可视化表达；需建立能够统一现实世界和信息空间的三维立体空间孪生框架，对整个矿山三维立体空间进行统一描述；



图2 面向智能矿山的GIS框架

并集成融合矿井、巷道、管线、设备、地质等多类要素的感知数据,实现矿山多尺度表达的全空间可视化。

现阶段需重点解决3个问题:①三维模型自动轻量化及应用,实现大型矿用设备表面模型、设备精细模型和高精度地质模型的,保证模型加载和存储空间的优化,并保证场景切换的流畅性,达到虚拟现实融合的目的;②基于矢量瓦片的可视化渲染,基于矢量瓦片技术,实现以用户为中心的可视化裁剪,保证加载效率,减少非必要资源的加载与传输,在并行渲染可视化技术的支撑下,实现三维

可视化调度;③基于数据驱动的自动制图及场景更新,与传统的地质模型相对稳定不变不同,矿山环境随着采掘工作面的推进,三维地质模型细节会更加丰富,经历着“灰-黑-白”的发展趋势,因此,基于数据驱动的模式更新和自动制图技术,能够为矿山生产提供保障。

双向同步的空间智能分析

空间智能分析是提升面向智能矿山的GIS智能化水平的关键,只有空间智能分析得到提升,才能



更好地通过信息空间发现问题、分析问题和解决问题，提高矿山的运营效率及大尺度范围内的空间格局分析。传统的空间分析、仿真模拟、选址分析均只需矿山物理空间至信息空间的单向同步，在信息空间中对基于物理空间的数据进行分析、模拟、决策、设计。而控制作为矿山生产的核心，需要依赖双向同步的空间智能，实现对物理空间的自动化决策控制，提高矿山生产效率。

现阶段需重点研究3个问题：①基于人工智能技术的GIS分析能力提升，通过人工智能技术提升GIS在空间分析、动态模拟、智能决策、辅助设计的能力，尤其是普适性算法研究；②基于精准定位的智能控制，矿山环境复杂但相对封闭，对现实中涉及位置移动和状态更新的可移动机器的智能控制（如巡检机器人、无人矿卡驾驶等）提供了便利的条件，对于露天矿环境，自动驾驶技术发展蓬勃，但在地下矿井和选煤厂环境下，由于GPS定位信息的缺失，需对高精度定位技术进行进一步研究，实现全矿井的高精度人员及设备定位；③基于多源数据融合的多尺度空间分析，研究构建大到全国范围乃至世界范围内的煤矿分布趋势分析及矿山群经济分析方法体系，小到单个矿详细的地理信息系统及在局部环境下的智能分析应用方法体系，并将GIS与BIM融合，高分辨率遥感影像与无人机高精度相片的数据融合，提供更精确的环境信息数据。

基于流模型的轻量化决策

决策分析是GIS应用的核心目的，只有提高决策分析的能力，才能更好地将数据分析的结果进行应用。类比自然界风、水、沙的流动对环境的影响，在矿山微生态环境中，通过对煤矿中的风流、水流、电流、煤流等流动方向和特征进行研究，建立分析模型，探讨物质流和能量流模型和故障诊断、安全监测、生产决策等环节的相关决策方法，减少人员主管干预，实现轻量化决策。

现阶段需重点解决3个问题：①多层级物质流、能量流模型构建，通过建立矿山环境和设备的层级模型，并结合矿山生产运行中的风流、水流、电流、煤流等物质流的流动方向，建立合理的物质流和能量流模型，并与决策模型相结合，建立单一决策分析模型；②多模型耦合分析，在单模型的基础上，综合研究多模型之间的耦合关系，深入挖掘内部联系，为故障诊断、报警识别、安全监测等决策分析，提供支持；③轻量化决策模型开发，研究构建基于物联网信息采集及智能分析模型的辅助决策方法体系，实现数据驱动，并逐步降低人员对分析过程的干预及矿山运行的干预，最终实现轻量化分析决策。

结 语

在“碳达峰碳中和”的目标要求下，智能矿山建设是矿山企业转型的必然之路。在列斐伏尔三元空间条件下，要实现矿山的智能化转型，其核心是建立矿山“一元物理空间”和“二元社会空间”到“三元信息空间”的映射，并通过智能分析技术和数字孪生技术，在信息空间提出问题、发现问题并最终给出解决方案，指导智能矿山的建设。在此过程中，GIS以其对空间信息强大的表达和描述能力，能够有效建立起三元空间的关联。此外，对开放式一体化生态、自适应可视化表达、空间智能化分析、轻量化决策分析等领域有了新需求，需进一步针对核心问题，进行全方位深入的研究，才能切实地解决智能矿山建设中的痛点问题。

■ 责任编辑：李艾稣

作者简介：

第一作者：任雷平，工程师，硕士，主要从事煤矿智能化建设相关工作。E-mail: renleiping@cctegitc.com.

作者单位：中煤科工集团信息技术有限公司