

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.02.006.

数字孪生赋能的矿业实践教育自适应模式研究

高如高¹, 张雪丽¹, 谭心悦¹, 袁超¹, 高开欣^{2*}

(1. 湖南科技大学, 湘潭 411201; 2. 中南大学湘雅二医院, 长沙 410011)

摘要:行业数字化、信息化建设是当前我国矿业高质量发展的焦点。但长期以来, 信息化、智能化专业人才的培养存在缺失。因此, 研究数字孪生技术驱动下的矿业工程实践教育自适应模式对于推进国家矿业工程智能化与产教融合具有重要意义。本研究完成了以下工作: 首先, 解析矿业工程实践、数字孪生和自适应模式的内在关联, 提出基于工业物联网的大数据管理框架(BDM)的信息集成与五维模型运作机制。其次, 通过矿业工程实践教育体系要素的数据融合, 结合 Unity 开发平台构建动态交互孪生系统的 UI 可视化, 构建数字孪生仿真培训系统。最后, 基于自适应模式开展人机交互与协同试验。结果表明, 学员可以通过数字孪生显示的模型、动作、数据等信息获取矿山生产环节的实时状态, 通过室内设备仿真操作与现场远程操控的误差在 10% 以下, 且与井下工序重合度较高。在数字孪生技术驱动和交互共享机制支持下, 有望通过信息有序管理和决策实现系统、精准的矿业工程专业人才智慧化培养模式。

关键词:数字孪生技术; 矿业研究; 五维模型; 教育改革; 协同工作

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-0797(2025)02-0029-08

Research on the Adaptive Mode of Mining Engineering Practice Education Driven by Digital Twin Technology

GAO Rugao¹, ZHANG Xueli¹, TAN Xinyue¹, YUAN Chao¹, GAO Kaixin^{2*}

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Second Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410011, China)

Abstract: Industry digitization and information construction are regarded as the core of the high-quality development of Chinese mining industry. However, there is a long-term lack of training for information and intelligent professionals. Therefore, it is of great significance to study the adaptive mode of mining engineering practice education driven by digital twin technology to promote the intellectualization of national mining engineering and industry-education integration. The following work has been completed in this research: Firstly, the internal relationship between mining engineering practice, digital twin and adaptive mode was analyzed, and the information integration and five-dimensional model operation mechanism of big data management framework (BDM) based on industrial Internet of things was proposed. Secondly, based on the data fusion of the elements of the mining engineering practice education system, combined with the Unity development platform, the UI visualization of the dynamic interactive twin system was constructed, so as the digital twin simulation training system. Finally, human-computer interaction and collaborative experiments were carried out based on adaptive mode. The results show that students can obtain the real-time state of the mine production process through the model, action, data and other information displayed by the digital twin technology. The error between the indoor equipment simulation operation and the on-site remote control is less than 10%, and it is highly consistent with the underground process. Driven by digital twin technology and interactive sharing mechanism, it is expected to realize a systematic and accurate intelligent training mode of mining engineering professionals through orderly information management and decision-making.

Key words: digital twin technology; mining research; five-dimensional model; education innovation; collaborative work

0 引言

习近平总书记指出, 发展是第一要务, 人才是第一资源, 创新是第一动力。人才是实现民族振兴、推动国家持续发展的战略资源, 结构合理、素质精

良的人才队伍是实现矿山行业高质量发展的核心支撑^[1]。2020 年 3 月, 国家发展改革委、国家能源局、应急管理部、教育部等八部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》, 提出支持和鼓励高校加强煤矿智能化相关学科专业建设, 推动专业交

基金项目: 国家自然科学基金项目(52404120); 湖南省学位与研究生教学改革研究项目(2024JGYB194); 湖南省普通本科高校教学改革研究项目(202401000883); 湖南省社会科学成果课题(XSP2023JYC206)。

叉融合,培育一批具备矿业工程、软件工程、信息工程、机器人工程、人工智能等知识技能的复合型人才^[2]。当前,我国矿业工程智能化人才培养体系模式相对滞后,师资力量薄弱,实践环节不足,产学研脱节,人员综合素质欠佳,难以满足智能矿山建设和管理对人才的迫切需求。亟需加强产学研协同,改革教育与人才培养体系,培养更多满足行业实际需求的高素质矿业工程智能化人才。

《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》中提出,要充分发挥海量数据和丰富应用场景优势,适应数字技术全面融入社会交往和日常生活新趋势,促进卫生、教育等公共服务领域的数字化发展要求^[3]。在数据科学教育逐渐普及的时代,矿业工程实践中的数字化与数据来源空前复杂且难以辨识,缺乏智慧化的信息管控与培训模式,导致信息传递缺乏针对性,指导价值不高^[4]。当前,数字孪生技术与人工智能、物联网、虚拟现实等新一代信息技术给教育智库和矿业工程运营带来了巨大的创新性变革^[5,6]。因此,借助数字孪生技术构建高效的信息治理机制与人机交互模式将是矿业工程智能化人才培养转型升级的方向。

针对数字孪生技术在矿业工程中的应用与实践,张帆等^[7]基于数字孪生技术和平行智能理论,提出了矿山数字孪生的概念框架,体系架构,关键技术,基础理论和构建方法体系。杨诚等^[8]应用数字孪生干预下的BIM模型进行信息集成和可视化展现,实现工程项目网格化施工集成管理,实现矿山机械安装数字化全过程管理与可视化数据共享交互。马小平等^[9]提出了物联网技术和矿山实体的深度融合体,利用智能通信,智能控制和智能计算技术进行数字化矿山的计算,构建数字孪生矿山,实现数字孪生矿山和物理矿山的智能交互演化。孟丹等^[10]结合实际案例研究了数字孪生矿山的创新性应用,实现了包括矿山三维可视化,数字采矿,矿山测绘云服务与车辆定位调度等一体化功能。而在矿山信息智库建设与人才培育方面,与数字孪生相关的研究与工作较少。鉴于此,本研究通过构建数字孪生仿真培训系统,实现矿业工程实践教学体系要素的数据融合和UI可视化,然后利用Unity开发平台和五维模型运作机制为培训提供矿山生产环节的实时信息。此外,研究还探索了自适应模式下的人机交互与协同试验,降低室内设备仿真操作与现场远程操控的误差。通过构建人才智慧化培养的系统、精准模式,

从而实现矿业工程实践教育的自适应性。

1 数字孪生技术驱动下矿业工程实践教育的内涵与运作机制

1.1 数字孪生技术驱动下矿业工程实践教育的内涵

数字孪生技术驱动下的矿业工程实践教学是一种基于数字孪生技术的创新型教育模式,其核心内涵在于构建虚拟矿山环境,为人员提供沉浸式、交互式 and 个性化的实践学习体验^[11-13]。而矿业工程实践、数字孪生和自适应模式三者之间存在着内在的关联,共同构成了数字孪生技术驱动下的矿业工程实践教学创新模式。这种新型教育模式通过构建虚拟矿山环境,为人员提供沉浸式、交互式 and 个性化的实践学习体验,突破传统实践教学限制,培养专业人才的综合能力,助力矿业工程行业数字化转型和智能化发展。

1.2 数字孪生技术驱动的五维模型运作机制

数字孪生技术驱动下的矿业工程实践教学所针对的对象是海量的信息与智能化培训模式,因此建立高效智能的信息平台是十分必要的。陶飞等^[14]提出数字孪生五维模型的概念,并对数字孪生五维模型的组成架构及应用准则进行了研究,数字孪生五维模型如式(1)所示:

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (1)$$

其中,PE表示物理实体,VE表示虚拟实体,Ss表示服务,DD表示孪生数据,CN表示PE、VE、Ss和DD之间的连接。结合数字孪生五维模型,可以分析每个维度的内涵与运作机制:

物理实践环境(PE)。作为 M_{DT} 的基础,PE是各管理要素的集合,主要包括实体对象(Entity Object)和工业物联网(Industrial Internet of Things)。

$$PE = (EO, IIoT) \quad (2)$$

虚拟实践场景(VE)。作为 M_{DT} 的引擎,VE是PE在虚拟环境的实时映射,可分为数据映射(Data Mapping, DM)和模型映射(Model Mapping, MM)。

$$VE = (DM, MM) \quad (3)$$

$$DM = (G_v, P_v, B_v, R_v, C_v) \quad (4)$$

DM是EO实践运作过程中产生的孪生数据,包括几何模型 G_v 、物理模型 P_v 、行为模型 B_v 、规则模型 R_v 和能力模型 C_v 。

孪生数据模型 (DD)。DD 是 M_{DT} 的核心, 它涵盖了矿业工程实践的各种数据, 如实践记录、设备数据、地质数据和安全数据。包括物理场景数据 D_p 、虚拟场景数据 D_v 、服务数据 D_s 、知识数据 D_k 和演化数据 D_e 。

$$DD = (D_p, D_v, D_s, D_k, D_e) \quad (5)$$

智慧实践服务 (Ss)。Ss 是 M_{DT} 的目的, 是实现矿业工程实践教育所需的服务集合。包括技术支持 (Technology Support, TS)、用户终端 (User Terminals, UT) 以及功能应用 (Functional Applications, FA)。

$$Ss = (TS, UT, FA) \quad (6)$$

TS 为系统内部功能运行所需的技术服务集合, UT 为建立人—机—环境有机融合的多维信息空间所需的服务支持, FA 是用于矿业工程实践教育过程所需的功能服务。

内在关联 (CN)。CN 是 M_{DT} 的关键, 是实现系统动态运行和虚实空间融合的核心。

$$CN = (PE_DD, PE_VE, PE_Ss, VE_DD, VE_Ss, Ss_DD) \quad (7)$$

图 1 所示为数字孪生五维模型信息集成与执行逻辑。数字孪生五维模型为矿业工程教育机构提供了一个全面的框架, 用于优化矿业工程实践教育。

2 数字孪生技术驱动下的矿业工程实践教育系统构建

2.1 矿业工程实践教育系统结构与框架

我国先后发布了《数字孪生白皮书》和《工业设备数字孪生白皮书》, 将数字孪生技术上升到国家战略层面^[15]。当前, 数字孪生技术在矿业工程智慧化人员培训中落地的应用实例不多, 难以满足当前形势下智能矿山建设与人才培养的需求。本研究以五维模型为基础, 构建了数字孪生驱动的矿业工程实践教育系统框架, 该框架如图 2 所示。其构建流程主要包括 4 个阶段: 整合物理空间要素并采集数据, 构建数字孪生模型, 搭建虚拟空间模型, 最终集成技术服务和用户终端服务, 打造沉浸式、交互式实践教育体验。通过将五维模型运作机制应用于自适应实践, 将 6 个层次融合, 形成了完整的矿业工程实践教育自适应模式框架。

2.2 数字孪生驱动下的 UI 可视化与系统构建

在数字孪生驱动的矿业工程实践教育系统的 UI

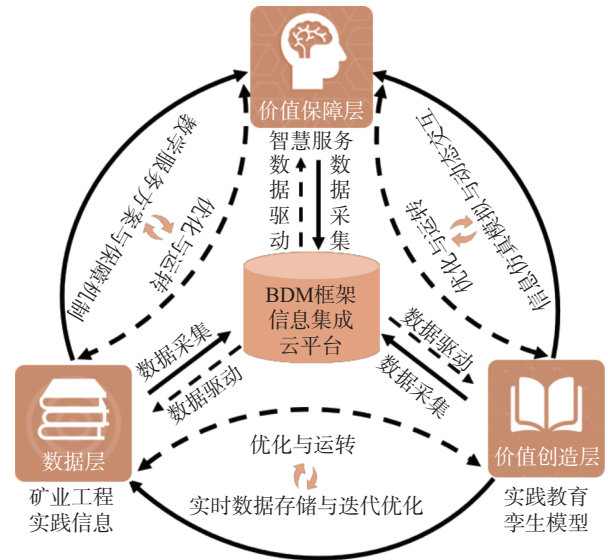


图 1 基于大数据管理的矿业工程实践信息集成云平台

可视化过程中, Unity^{3D} 作为虚拟现实引擎, 承担着构建虚拟矿井环境与人机交互模型的关键角色^[16]。通过三维模型渲染技术, 将真实矿井环境的几何结构、设备设施、作业流程等要素数字化, 并利用材质、光照、阴影等渲染技术, 模拟真实矿井环境的视觉效果, 见图 3。

在图像编码过程中, 采用 Transformer 数学模型进行数据编码与训练^[17]。其计算过程如下:

$$Q = XW^Q \quad (8)$$

$$K = XW^K \quad (9)$$

$$V = XW^V \quad (10)$$

$$\text{attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (11)$$

其中, W^Q , W^K 和 W^V 是用以训练的参数矩阵, 通过计算生成查询矩阵 Q 、键值矩阵 K 和数值矩阵 V , 通过矩阵运算可得出相应的权重分布, 用维度参数 $\sqrt{d_k}$ 进行缩放, 实现归一化。由于 UI 图像通常是比较结构化的图像, 图像语义集中在其中的组件以及组件之间的相互关系, 因此没有必要采用式 (11) 对图像的所有区域两两计算注意力分数。通过 MSA 的时间复杂度来界定, 如式 (12) 所示:

$$\Omega_{MSA} = 4hwC^2 + 2(hw)^2C \quad (12)$$

式中: C 为图像小块的维度, h 和 w 为小块的空间数量, 假设窗口包含 $M \times M$ 个小块, 式 (12) 可以转化为:

$$\Omega_{W-MSA} = 4hwC^2 + 2M^2hwC \quad (13)$$

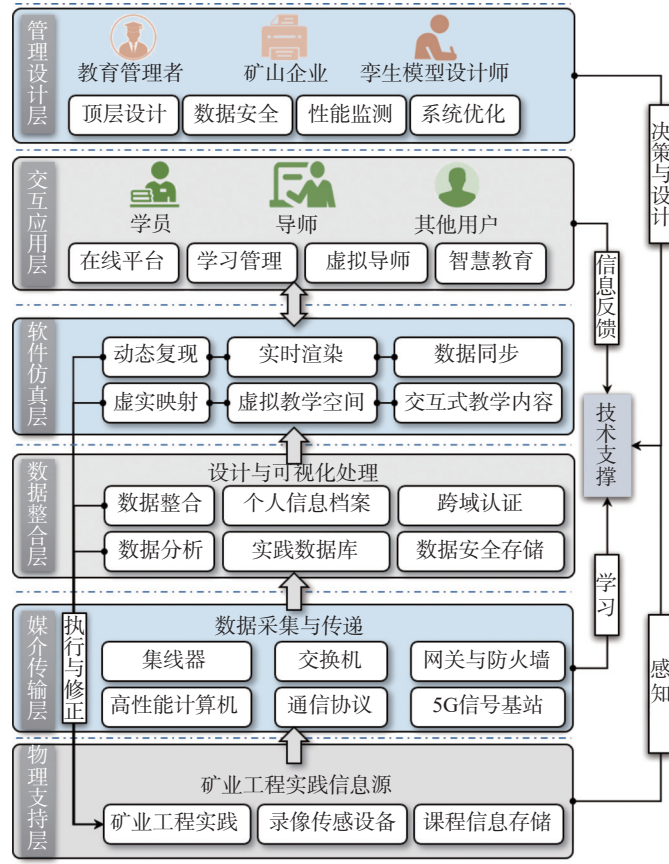


图 2 基于数字孪生的矿业工程实践教育系统框架

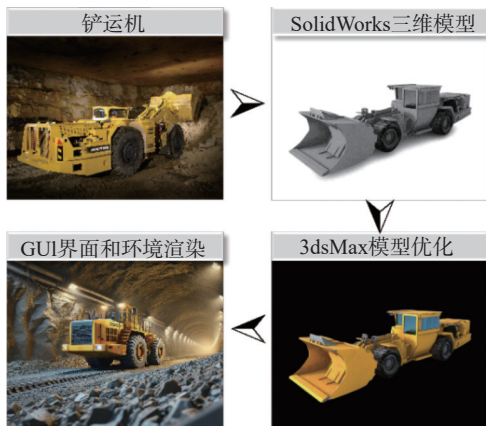


图 3 基于 Unity 3D 的 UI 可视化与建模

如图 4 所示，数字孪生驱动的矿业工程实践培训系统 UI 可视化流程以数据驱动为核心，通过传感器网络采集矿井环境数据并利用云端数据库进行存储管理，并运用 MySQL 数据库构建矿井各管理要素的数据库，并利用五维模型框架对数据进行分析和处理。

系统通过控制脚本实现虚拟空间与物理空间的数据映射，并利用 SolidWork、3DSMax 等建模软件构建矿井各管理要素的几何模型，并进行轻量化处

理后导入 Unity 虚拟平台，同时使用 Python 语言建立管理要素的行为模型、规则模型和能力模型，完成系统逻辑控制脚本设计。系统结合 UGUI 搭建人机交互界面，并使用 Socket 通信机制建立虚拟仿真平台与云端数据库之间的数据通信，实现实时数据获取和监测数据可视化展示。最后，系统根据系统重构事件需求，采用事件驱动方法完成数字孪生矿井场景搭建，并进行虚拟作业流程仿真，为实际矿井作业提供培训和决策依据。

3 基于数字孪生的矿业工程实践教育自适应模式与测试

3.1 基于数字孪生时空模型的自适应训练逻辑

复杂自适应系统理论最早由美国的 J. H. Holland 提出，其核心功能在于通过打造本质协同的运营结构，激发环境内适应性元素之间以及与外界环境的交互机制，从而形成智慧化的信息治理系统^[18]。数字孪生技术驱动的矿业工程实践教育系统自适应训练逻辑，以实时采集的矿井环境、设备设施和作业流程数据为基础，构建虚拟矿井的数字孪生模型，



图4 数字孪生驱动的矿业工程实践培训系统

并结合时空数据模型，将虚拟环境与真实矿井环境进行同步映射。数字孪生时空模型（Spatial-temporal Data Model, SDM）是关于元素、属性和时间的三维张量模型，可以实现与 Unity^{3D} 平台的搭接，其中元素属性符合连续随机变量的特性，而时间要素符合截断正态分布。在空间中，元素的维度由不同的数字孪生实例（Digital Twin Instance, DTI）组成，属性的维度包含多个属性 DTI_i（A），时间维度由不同时间的空间维度的积累组成，在 t_i 处由多维 DTI（A）组成的 SDM 可以表示为一个从 T₁ 到 T_n 的增量空间矩阵：

$$SDM(t_i) = \begin{bmatrix} DTI_1(A)_{i1} & \dots & DTI_n(A)_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DTI_n(A)_{in} & \dots & DTI_n(A)_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

考虑到矿井实际环境的变化较多，采用多时间线的方法来训练和验证 SDM 模型，从而避免重复调试，其中时间属性具有有限的数学期望和方差 E(X_i) = μ，D(X_i) = σ²，分布函数如下：

$$F_n(x) = P\left\{ \frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \leq x \right\} \quad (15)$$

模型的初始训练阶段，可用的数据较少，利用历史数据填补空缺值来满足最低培训要求。然而，用小规模数据计算的方差 σ 是不准确的。因此，模型采用历史数据的方差以及符合正态分布的训练目标函数 f(x)，其下限为 a，上限为 b。目标函数

f(x) 如下：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, (a \leq x \leq b) \quad (16)$$

初始阶段截断正态分布训练公式如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \mu &= \frac{\sum_{i=1}^n Data(t_i)}{n} \\ \sigma^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n \left(Data(t_{i-n}) - \frac{Data(t_{i-n})}{n} \right)^2}{n} \\ a &= \frac{\min(Data(t_i))}{n} \\ b &= \frac{\max(Data(t_i))}{n} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

其中，Data(t_i) 为实时数据，μ 为对应平均值。图5所示为数字孪生五维模型驱动下的矿业工程实践教育系统执行逻辑，系统会根据人员的学习目标和操作行为，动态调整训练内容和难度，例如，当虚拟环境中出现操作失误时，系统会及时提供针对性的指导和解决方案，并根据人员的学习进度，智能推荐更具挑战性的训练任务。同时，系统还可以根据个体差异，提供个性化训练方案，例如，针对不同技能水平的学员，系统会提供不同难度的训练内容和操作步骤。这种自适应训练逻辑，能够有效提高学习效率和操作水平。

3.2 人机交互测试与系统可靠性验证

以井下铲运机操作为例进行现场操作与远程人机交互测试，图6所示为井下铲运机作业流程，数

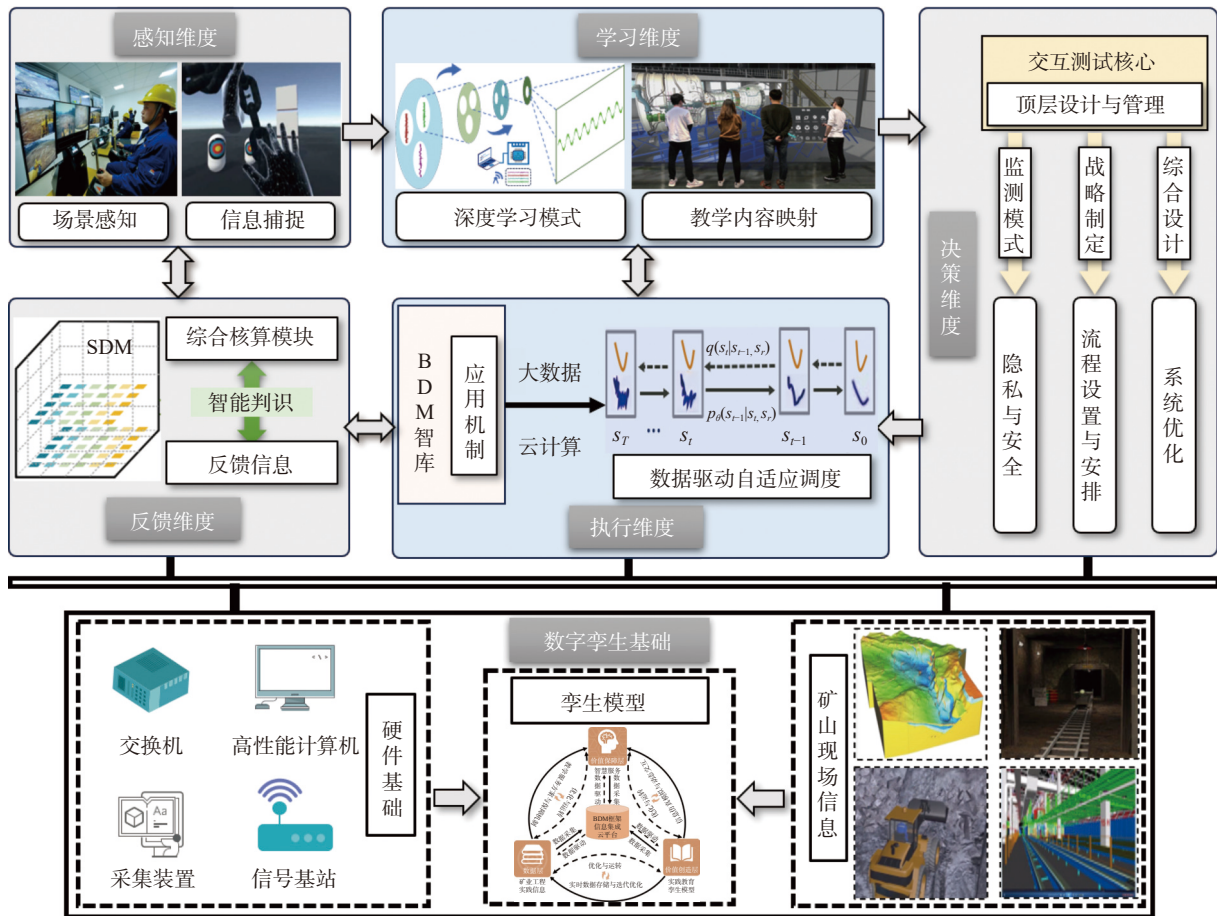


图5 基于数字孪生的矿业工程实践教育自适应模式执行逻辑

字孪生驱动的矿业工程实践培训系统中，采用增强现实技术进行井下铲运机操作的人机交互协作，首先通过摄像头捕捉操作员视野，并将虚拟的铲运机模型叠加到现实场景中，操作员通过手柄控制虚拟铲运机，系统根据虚拟铲运机的运行数据，在数字孪生模型中模拟真实的井下环境，例如地形、障碍物、照明等。操作员通过增强现实设备，直观地观察虚拟铲运机在现实环境中的运行状态，并进行操作训练。系统会根据操作员的行为数据，实时进行安全预警和碰撞检测等，并结合 SDM 模型，对训练过程中的操作行为进行数据监控和评估，训练过程概率分布如图 6 所示，操作员在进行操控时，其精度会集中在一个特定的范围内，并呈现出正态分布的趋势，由于实际环境的限制，操作精度不会无限地向两端延伸，而是会受到截断，形成一个概率截断正态分布。在自适应训练初始的 10 min，概率分布峰值较高，达到 0.023；随后在 20~30 min 阶段，峰值低于 0.01，达到相对稳定期；在 60 min 阶段，人员操作又呈现一定的差异化，概率峰值达到

0.014。说明人员操作精度随着训练时长趋于稳定，但训练时间过长后会产生一定的波动。从图 6 情况来看，整体符合正态分布。

虚实误差 (Real-virtual Error) 是数字孪生模型的准确性判断基础和优化目标，记录为 E_{RV} 。根据 SDM 的验证时间表， E_{RV} 分为实时误差 E_r 和最终误差 E_f 。 E_r 的验证时间线是从铲运机远程人机交互开始到结束全过程与实际井下空间铲运机并行操作数据采集后进行核算所得。表 1 所示为式 (17) 计算所得的测试过程中 SDM 模型相关自适应参数。

基于数字孪生的铲运机人机交互自适应训练，通过室内设备仿真操作与现场远程操控的对比测试，利用 SDM 模型核算发现，二者操作误差控制在 10% 以下，表明系统能够有效模拟真实矿井环境，并提供与实际操作高度一致的训练体验。这得益于系统利用数字孪生技术构建的虚拟矿井环境与真实环境的同步映射，以及自适应训练机制对操作员行为的实时监测和反馈，帮助操作员掌握精准的操作技巧，提升操控技能，为实际作业提供可靠保障。

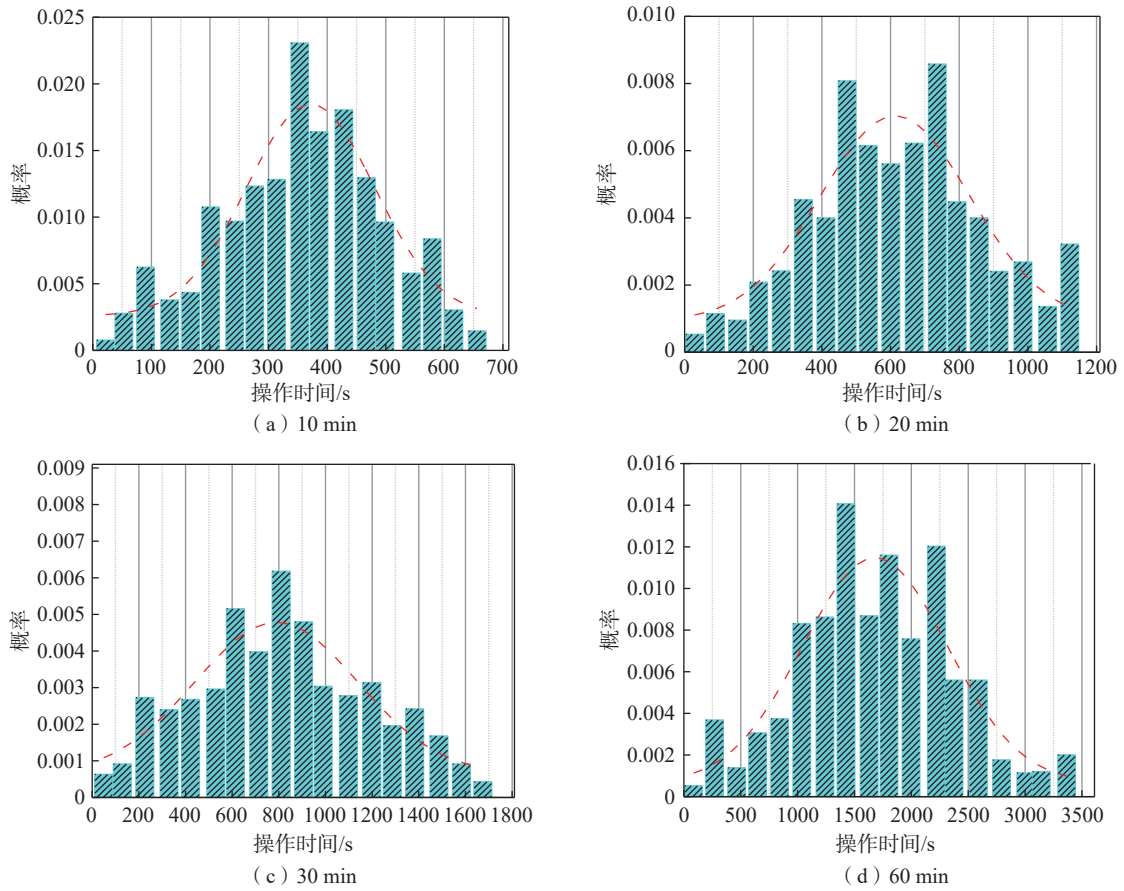


图6 不同操作时长下SDM模型分布概率

表1 铲运人机交互训练SDM模型参数

训练时长	井下实际操作参数			虚拟并行操作参数			最终误差 E_f
	μ_1	a_1	b_1	μ_2	a_2	b_2	
10 min	1779.21	1693.52	1934.78	1708.89	1607.10	1899.63	0.0991
20 min	1799.46	1693.52	1934.78	1731.89	1607.10	1899.63	0.0370
30 min	1774.13	1624.31	1934.78	1787.01	1607.10	1950.48	0.0275
60 min	1775.24	1624.31	1934.78	1810.78	1607.10	1977.13	0.0310

4 结论

本研究基于数字孪生技术构建矿业工程实践教学自适应模式，并通过实证研究验证了其有效性：

1) 研究通过解析矿业工程实践与数字孪生的内在关联，提出了基于工业物联网的大数据管理框架的信息集成与五维模型运作机制，并构建了动态交互孪生系统的UI可视化，实现了数字孪生仿真培训系统的构建。

2) 数字孪生驱动的矿业工程实践教学自适应模式能够提高人才培养质量。实证研究表明，学员可以通过数字孪生显示的模型、动作、数据等信息获取矿山生产环节的实时状态，通过SDM模型核算，

室内设备仿真操作与现场远程操控的误差在10%以下，且与井下铲运机现场操作重合度较高，表明该模式能够有效提升学员的学习效果和操作技能。

3) 在数字孪生技术驱动和交互共享机制支持下，该模式能够实现系统、精准的矿业工程专业人才智慧化培养模式，有望有效解决长期以来信息化、智能化专业人才培养缺失的问题，推动国家矿业工程智能化与产教融合发展。

参考文献：

[1] 中国煤炭科工党委. 深入实施人才强企战略 为高质量发展提供坚强人才保护证-国务院国有资产监督管理委员会 [EB/OL][2021-10-13]<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/>

n16303206/c29971883/content.html.

- [2] 发展改革委.关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知[EB/OL].[2021-10-13].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm.
- [3] 新华社.中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL][EB/OL].[2021-10-13].http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [4] 董晶,许浩,吴丹.数据科学教育的信息学科特色之路——《iDSCC报告》解读与思考[J].图书情报知识,2023,40(2):49-56.
- [5] 李海峰,王炜.数字孪生教育应用的教学模式探究--基于美国,瑞士和芬兰数字孪生教育应用的案例分析[J].现代教育技术,2021,31(7):9.
- [6] 郑浩,王娟,王书瑶,等.认知数字孪生体教育应用:内涵,困境与对策[J].现代远程教育,2021. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8700.2021.01.002.
- [7] 张帆,葛世荣.矿山数字孪生构建方法与演化机理[J].煤炭学报,2023,48(1):510-522.
- [8] 杨诚,李亮,裴嘉,等.BIM技术在数字化矿山运维管理阶段的应用[J].工程技术研究,2023,8(7):133-135.
- [9] 马小平,杨雪苗,胡延军,等.人工智能技术在矿山智能化建设中的应用初探[J].工矿自动化,2020,46(5):7.
- [10] 孟丹,刘建业,杨博,等.数字孪生在矿业数字化转型中的应用[J].有色金属(矿山部分),2021,73(6):9-18,31.
- [11] 李禹锡.数字孪生在矿业数字化转型中运用分析[J].中国

金属通报,2023(7):210-212.

- [12] 彭瑾.基于数字孪生的物联网工业系统设计研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(9):94-96.
- [13] 龙赛琴,曾令斌,刘子浩,等.一种基于CloudSim的分级云存储仿真模型[J].计算技术与自动化,2019,38(3):5.
- [14] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
- [15] 王福,李哲,高化,等.社会化问答服务模式的场景化创新机理和实现路径研究[J].现代情报,2021,41(7):11.
- [16] 赵墨波.数字孪生驱动的协作机器人状态监测方法研究[J].煤矿机械,2023,44(8):210-212.
- [17] 庄伟卿,曹勇博.基于改进的时空图卷积网络的交通流预测模型研究[J].系统科学与数学,2024,44(1):217-235.
- [18] Wang Y, Han X, Yang J.Revisiting the blended learning literature: Using a complex adaptive systems framework[J]. Journal of Educational Technology & Society, 2015, 18(2): 380-393.

作者简介:

高如高(1989-),男,湖南益阳人。副教授,硕士生导师,博士(博士后),从事采矿工程与矿业系统工程理论研究。E-mail: gaorgcsu@163.com

通信作者:高开欣(1994-),女,博士,工程师,毕业于中南大学安全工程专业,研究方向:安全信息素养教育研究。E-mail: 507971@csu.edu.cn

(收稿日期:2024-12-30)

(上接第28页)

5 结论

通风对地下采矿安全至关重要,本研究旨在综合考虑安全、能源、维护和成本等因素对轴流式通风机进行优化设计。

通过实验测量验证方法,并利用结果推导出风扇的性能曲线,确定安全操作区域和失速情况。实验设计研究了各种参数,确定了转速,迎角和叶尖比为关键因素。回归方法将这些参数与风扇性能联系起来,优化表明将叶片数量从18个减少到16个,并减小叶尖间隙,可以将性能提高9%,在噪音、成本、重量和能耗方面都有显著改善。

参考文献:

- [1] 高沁亮.煤矿主通风机变频调速系统设计与应用[J].江西

煤炭科技,2023(3):220-222.

- [2] 卢辉.南山煤矿孤岛工作面采空区防火通风技术研究[D].安徽理工大学,2021.
- [3] 申丑孩.短壁连采工作面通风系统设计及流场数值模拟[J].现代矿业,2018,34(8):186-190.
- [4] 卢辉,袁树杰,马瑞峰,等.基于Ventsim的南山煤矿孤岛工作面均压通风方案研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(8):125-130.
- [5] 马东华,左淳,等.基于CFD的独头巷道排炮烟通风参数优化的数值模拟研究[J].价值工程,2023,42(17):103-107.

作者简介:

刘康宁(1992-),男,河北保定人,2015年毕业于华北科技学院机械设计制造及其自动化专业,本科,工程师,从事煤炭行业工作。E-mail: 845895313@qq.com

(收稿日期:2024-4-4)