

基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控研究

李伟¹, 叶鸥², 刘辉³, 黄天生³

(1. 陕西陕煤林兔一号煤矿有限公司, 陕西 榆林 719000;

2. 西安科技大学 计算机科学与技术学院, 西安 710000;

3. 陕西涌鑫矿业有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 为了保证大型煤矿开采工作的安全性与质量, 利用数字孪生技术优化设计大型煤矿远程智能监控方法; 利用数字孪生技术构建大型煤矿虚拟模型, 在该模型下确定测点位置, 远程采集大型煤矿实时运行数据; 通过对数据特征的提取与匹配, 从煤矿开挖设备和施工环境两个方面, 监测大型煤矿运行状态; 改装大型煤矿远程智能控制器, 以运行状态的监测结果作为控制程序的启动条件, 实现对大型煤矿的远程智能监控任务; 通过与传统监控方法的对比得出结论: 优化设计方法对煤矿开挖设备的监控性能明显升高, 对环境中瓦斯浓度和温度的监测误差分别降低了 0.34% 和 0.19 °C, 控制误差分别降低 0.09% 和 0.145 °C, 同时监控范围扩大 27.4%。

关键词: 数字孪生技术; 大型煤矿; 远程智能监控

Research on Remote Intelligent Monitoring of Large Coal Mines Based on Digital Twin Technology

LI Wei¹, YE Ou², LIU Hui³, HUANG Tianchen³

(1. Shaanxi Erlin Rabbit No. 1 Coal Mine Co., Ltd., Yulin 719000, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, College of Computer Science & Technology, Xi'an 710000, China;

3. Shaanxi Yongxin Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: In order to ensure the safety and quality of large-scale coal mining work, digital twin technology is used to optimize the design of remote intelligent monitoring methods for large-scale coal mines. Using the digital twin technology to construct a virtual model of the large-scale coal mines, determine the location of measurement points under this model, and remotely collect the real-time operational data of the large-scale coal mines. By extracting and matching data features, monitoring the operation status of the large-scale coal mines from two aspects: mining equipment and construction environment. Retrofitting a remote intelligent controller for the large-scale coal mines, the monitoring results of operating status is taken as the starting condition for control program, to realize remote intelligent monitoring tasks for the large-scale coal mines. By comparing with traditional monitoring methods, it can be concluded that the optimized design method significantly improves the monitoring performance of coal mining excavation equipment, reduces the monitoring errors of gas concentration and temperature in the environment by 0.34% and 0.19 °C, respectively, and reduces the control errors by 0.09% and 0.145 °C, respectively. At the same time, the monitoring range is expanded by 27.4%.

Keyword: digital twin technology; large coal mines; remote intelligent monitoring

0 引言

煤矿是指在富煤地区进行煤炭开发的一种地区, 通常可划分为井工煤与露天煤。在距离地面较远的情况下, 人们通常采用在井下开挖巷道来开采煤, 这就是井工矿井。在靠近地面的情况下, 人们通常采用直接剥开地面开采, 这种开采方式称为露天矿。井工煤矿是我国主要的煤炭生产基地。矿井范围包含了一大片地面和与之有关的设施。

矿井是指人们为了开采含煤丰富的地层而进行的一种合理的活动场所, 它一般包括巷道、坑道、工作面等^[1]。煤是一种可燃有机质岩石, 是一种重要的固体燃料。在特定的地质时期, 植被茂盛, 在合适的地质条件下, 逐步积累成厚层状, 再经长期的自然煤化作用, 最终形成了煤层。与中小型煤矿相比, 大型煤矿的开采难度更大、工作量更多, 同时发生安全事故的概率更高。为了保证大型煤矿的开采效率和安全性, 提出大型煤矿远程智能监控方法。

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-06-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501285)。

作者简介: 李伟(1986-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 李伟, 叶鸥, 刘辉, 等. 基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 204-211.

远程控制指的是管理人员在异地, 利用计算机网络的异地拨号或双方都接入 Internet 等方式, 与需被控制的计算机或终端设备进行连通, 利用本地计算机对远方设备进行配置、软件安装程序、修改等工作。而智能监控主要是对远距离场景中的事物和它们的状态展开识别和判断, 并在合适的条件下, 产生报警, 并提醒用户。在大型煤矿场景中, 远程智能监控的目的就是判断煤矿是否存在设备运行故障以及环境异常等现象, 并控制施工设备按照规定程序执行煤矿的开采工作。现阶段发展较为成熟的远程智能监控方法主要包括: 文献 [1] 提出的基于无线传感器的煤矿监控方法、文献 [2] 提出的基于控制安全的煤矿监控方法以及文献 [3] 提出的基于机器视觉的煤矿监控方法, 其中文献 [1] 提出方法主要利用煤矿中的无线传感器设备对环境相关参数进行采集, 并根据传感数据的分析结果生成相应的控制指令。文献 [2] 提出方法是将控制逻辑分级分层管理, 将不同的权利分配给操作命令, 并执行函数锁定, 更加侧重控制指令的安全性。而文献 [3] 提出方法通过监控设备采集煤矿视频图像, 通过对图像内容的分析, 判断输送带是否出现偏移故障, 从而生成针对设备的控制指令。将上述监控方法应用到大型煤矿的远程监控工作中, 存在明显的监测与控制误差大、监控范围小等问题, 为此引入数字孪生技术。

数字孪生技术指的是将物理模型、传感器更新、运行历史等数据进行充分利用, 将多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程集成起来, 在虚拟空间中完成映射, 从而反映出与之相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生是一种超乎实际的概念, 它可以看作是一组相互依存的重要设备之间的数字化映射。利用数字孪生技术优化设计大型煤矿远程智能监控方法, 以期能够在扩大监控范围的同时, 提高对大型煤矿的监控精度。

1 大型煤矿远程智能监控方法设计

优化设计大型煤矿远程智能监控方法的基本工作原理为: 利用数字孪生技术构建与监控大型煤矿对象结构相同、功能相同的虚拟模型, 通过对模型的模拟与分析确定真实大型煤矿下容易发生安全事故的位置, 以此作为远程智能监控点位置^[2]。在硬件设备和远程通信网络的支持下, 收集大型煤矿的实时运行数据, 通过对数据的分析判断当前煤矿的安全状态, 以此作为远程控制程序的启动条件, 最终从煤矿开采设备和煤矿开采环境两个方面, 实现对大型煤矿的远程智能监控任务。

1.1 利用数字孪生技术构建大型煤矿虚拟模型

在大型煤矿开挖施工过程中, 数字孪生模型主要由开挖设备、环境以及施工人员等部分组成, 为实现数字空间对实体空间的同步映射, 首先要对相应的物理装置进行建模, 再利用虚拟服务来实现数据驱动下的多个空间同时操作, 因此确定数字孪生技术下, 构建的大型煤矿虚拟模型架构如图 1 所示。

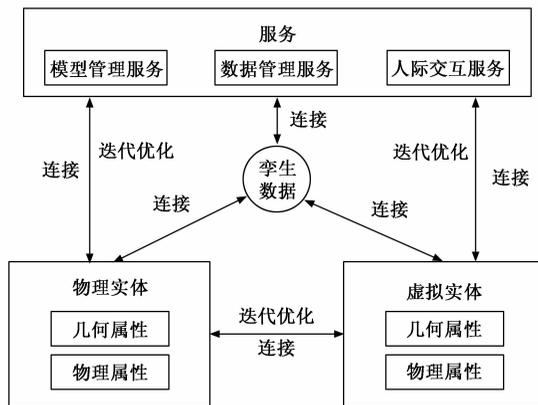


图 1 数字孪生技术下煤矿模型架构

从图 1 中可以看出, 构建的大型煤矿虚拟模型由服务、孪生数据、物理实体以及虚拟实体 4 个部分组成, 其中物理实体就是真实环境中大型煤矿物体, 它是一个多个子系统相互配合、相互协调的系统。并利用部署在物理实体上的传感器, 实时驱动虚拟体的运行, 从而对该物理对象的实时状态进行监控, 物理实体也是虚拟模型的对标对象, 虚拟实体也就是模型构建目标, 在虚拟空间中反映出物理实体的属性、运动规律^[3]。而孪生数据反映的是物理实体和虚拟实体之间的映射关系, 服务是虚拟模型相关功能的有机连接与运行需要虚拟服务的支撑。实体对象和虚拟对象之间以虚拟连接作为桥梁, 将基于规范协议的实体和虚拟主体间的数据链接起来, 在保持真实的基础上, 实现“虚实交互”, 确保两个主体间的时间和空间上的一致性。大型煤矿虚拟场景的构建流程如图 2 所示。

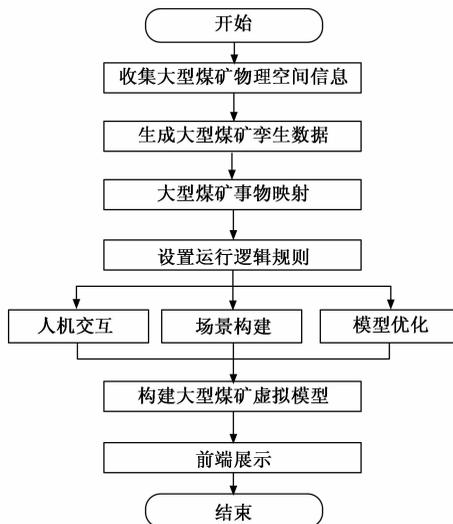


图 2 大型煤矿虚拟模型构建流程图

在大型煤矿虚拟模型构建过程中, 首先利用传感器设备获取煤矿中所有实体对象的位置信息和几何结构信息, 将其标记为 $X_{physics}$, 那么对应的虚拟模型构建结果可以表示为:

$$M = \{W_{\text{physics}}, W_{\text{virtually}}, F, D, L\} \quad (1)$$

公式 (1) 中参数 W_{physics} 、 $W_{\text{virtually}}$ 、 F 、 D 和 L 分别表示物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据以及各部分之间的连接, 其中 W_{physics} 和 $W_{\text{virtually}}$ 之间的关系可以表示为:

$$W_{\text{virtually}} = \kappa_{\text{mapping}} W_{\text{physics}} \quad (2)$$

其中: 参数 κ_{mapping} 代表大型煤矿物理空间与虚拟空间之间的映射系数, 另外孪生数据 D 的具体取值为:

$$D = X_{\text{physics}} + \kappa_{\text{mapping}} X_{\text{physics}} \quad (3)$$

孪生数据包括煤矿环境数据、设备结构与运行数据等, 能够反映煤矿开挖运行过程中的所有动态过程。同理可以得出虚拟模型中服务与连接的量化表示结果, 将其代入到公式 (1) 中, 即可得出大型煤矿中各个组成对象的虚拟模型构建结果, 最终考虑组成对象在实体空间中的分布情况以及几何结构, 按照一定的缩放比例, 将其布设到虚拟环境中^[4]。为满足大型煤矿的开挖功能, 需要设备各个虚拟实体的属性, 刚体是具备物理属性的物体, 在引力的作用下会发生自由落体, 在虚拟环境中, 它可以与其他物质产生互动。选中需要设置的对象, 弹出刚性元件, 为对象添加组件即可获得刚体属性。在刚性参数的设定上, 尽可能地设定与要求不相关的参数, 从而降低了模型的运算量^[5]。在给了一个刚性的属性之后, 再给相关联的物体加一个碰撞体的属性, 同时具有刚体和碰撞体属性的物体能触发碰撞效果, 在进行煤矿开挖模拟时, 与场景中的组成元件能够产生相应的碰撞效果, 而不会穿透模型。最后, 可以添加控制器充当用户的漫游体验视角, 并编写出相应的控制脚本, 利用鼠标控制方向、键盘控制移动方式, 从而实现 3D 机房的用户视角巡视功能, 并在虚拟世界中与模型产生各种交互^[6]。除此之外, 还需要在构建的虚拟模型中加设远程通信接口, 保证虚拟环境中的实时数据能够成功传输到监控终端。综合几何结构、运动机理、远程通信等方面得出大型煤矿虚拟模型的构建结果。

1.2 远程采集大型煤矿实时运行数据

在构建的大型煤矿数字孪生虚拟模型下, 确定实际大型煤矿监测点的设置位置, 具体包括开挖设备实体、安全调度实体等, 在监测点位置上安装传感器设备, 用于收集大型煤矿实时运行数据^[7]。需要采集的运行数据可以分为设备运行数据和环境数据两个部分, 其中设备运行数据的采集对象具体包括开挖设备主轴转速、设备实际工作位置、给进速度、负载电流等, 以大型煤矿中的开挖设备为例, 其运行转速数据的采集结果为:

$$x_{\omega} = \frac{2\pi \cdot p \cdot n}{60} \quad (4)$$

式中, p 和 n 分别表示开挖设备内部发电机转子转动的磁极对数和转数, 同理可以得出大型煤矿中所有工作设备的实时运行数据采集结果^[8]。而大型煤矿环境数据的采集对象包括: 瓦斯气体含量、风量、温度等, 将上述数据采集结果记为 x_{gas} 、 $x_{\text{Air volume}}$ 和 x_T 。为保证大型煤矿实时运行数据的采集质量, 需要对异构数据进行归一化处理, 处理结

果为:

$$x = \frac{f_{\text{max}}(x) - x}{f_{\text{max}}(x) - f_{\text{min}}(x)} \quad (5)$$

式中, $f_{\text{max}}()$ 和 $f_{\text{min}}()$ 分别为最大值和最小值的求解函数^[9]。将处理完成的异构数据通过远程通信网络传输给监控终端, 监控终端实际接收到的远程采集数据结果为:

$$x_{\text{receive}} = x \cdot \kappa_{\text{modulation-demodulation}} \cdot \kappa_{\text{transmission}} \quad (6)$$

其中: x 为大型煤矿虚拟模型空间下运行数据的初始采集与处理结果, $\kappa_{\text{modulation-demodulation}}$ 和 $\kappa_{\text{transmission}}$ 分别对应的是远程传输信道的调制解调系数和传输系数^[10]。通过上述流程完成大型煤矿实时运行数据的远程采集工作。

1.3 监测大型煤矿运行状态

采用特征提取与匹配的方式, 在构建的大型煤矿虚拟模型中, 以远程采集的煤矿实时运行数据为研究对象, 得出大型煤矿运行状态的监测结果。

1.3.1 施工设备运行状态

大型煤矿环境中施工设备的运行状态可以分为停机状态、生产状态、故障状态 3 种, 停机状态表示施工设备未执行任何操作指令, 生产状态证明设备正执行施工操作, 且设备运行参数正常, 而故障状态则表示设备启动, 但无法正常执行相应操作, 或设备运行参数存在异常^[11]。在优化设计的大型煤矿远程智能监控过程中, 首先需要判断设备的基本运行状态, 以开挖设备为例, 在故障状态下其运行特征为:

$$\begin{cases} f_{\text{within}} = \frac{1}{2}x_{\omega} \left(1 + \frac{j}{d} \cos\theta\right)M \\ f_{\text{outside}} = \frac{1}{2}x_{\omega} \left(1 - \frac{j}{d} \cos\theta\right)M \\ f_{\text{framework}} = \frac{1}{2}x_{\omega} \left(1 - \left(\frac{j}{d}\right)^2 \cos\theta\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中, j 和 d 分别表示开挖设备内部直径和节径, θ 为接触角, M 为开挖设备中包含的内部元件数量, 计算结果 f_{within} 、 f_{outside} 和 $f_{\text{framework}}$ 分别对应的是开挖设备内圈、外圈和架构在故障状态下的工作频率^[12]。同理可以得出故障状态下开挖设备其他参数的运行特征, 以此作为施工设备运行状态监测的比对标准。在此基础上, 利用公式 (8) 提取大型煤矿中开挖设备的运行特征。

$$\begin{cases} \tau_{\text{mean value}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} x_i^2}{N_x} \\ \tau_{\text{kurtosis}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \tau_{\text{mean value}})^4}{(N_x - 1)\tau_{\text{avg}}} \\ \tau_{\text{skewness}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \bar{x})^3}{(N_x - 1)\tau_{\text{avg}}} \end{cases} \quad (8)$$

其中: N_x 表示采集的设备运行数据量, τ_{avg} 为运行数据的均方根特征量, 特征提取结果 $\tau_{\text{mean value}}$ 、 τ_{kurtosis} 和 τ_{skewness} 分别为均值特征、峭度特征和偏斜度特征^[13]。将公式 (7) 的

特征提取结果与设置的设备故障标准特征进行匹配, 得出当前设备运行状态的监测结果。

$$s = \frac{\tau_{set} \cdot \tau_{extract}}{\|\tau_{set}\| \cdot \|\tau_{extract}\|} \quad (9)$$

其中: τ_{set} 为设置的设备故障状态下的运行标准特征, $\tau_{extract}$ 表示当前大型煤矿环境下开挖设备的实际运行提取特征, 变量 $\tau_{extract}$ 的计算公式如下:

$$\tau_{extract} = \bar{\omega}_1 \tau_{mean\ value} + \bar{\omega}_2 \tau_{kurtosis} + \bar{\omega}_3 \tau_{skewness} \quad (10)$$

式中, $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 和 $\bar{\omega}_3$ 分别表示均值、峭度和偏斜度特征的权重值。联立公式 (8)、公式 (9) 和公式 (10), 得出特征匹配度的度量结果, 若得出匹配度取值高于阈值 τ_0 , 说明当前开挖设备处于故障状态, 若提取特征取值为 0, 证明当前设备处于停机状态, 否则认为开挖设备处于生产状态^[14]。按照上述方式, 可以得出大型煤矿虚拟模型下, 所有设备运行状态的监测结果。

1.3.2 施工环境安全状态

施工环境的安全状态监测主要就是监测当前大型煤矿中的瓦斯浓度是否达到爆炸阈值、温度是否高于施工的最佳舒适值、通风情况是否满足施工标准^[15]。瓦斯浓度的监测值可以表示为:

$$c_{gas} = \frac{x_{gas}}{V} \quad (11)$$

其中: V 为大型煤矿空间的瓦斯含量的监测体积, 将远程采集的瓦斯含量数据代入到公式 (11) 中, 即可得出大型煤矿中瓦斯浓度参数的监测结果。按照上述方式, 可以得出通风量、温度等环境监测参数的输出结果, 设置瓦斯浓度的极限值为 5%, 通风量和温度的极限值分别为 1 m^3 和 $25.5\text{ }^\circ\text{C}$, 若大型煤矿中的监测值低于设置的极限值, 证明当前煤矿施工环境正常, 否则认为当前大型煤矿施工环境异常, 需要启动远程智能控制程序。

1.4 改装大型煤矿远程智能控制器

大型煤矿远程智能控制器是煤矿控制程序的执行单元, 要求优化设计的智能控制器能够实现对煤矿中所有开挖设备的控制, 同时还能控制煤矿环境。优化设计方法中改装的智能控制器结构如图 3 所示。

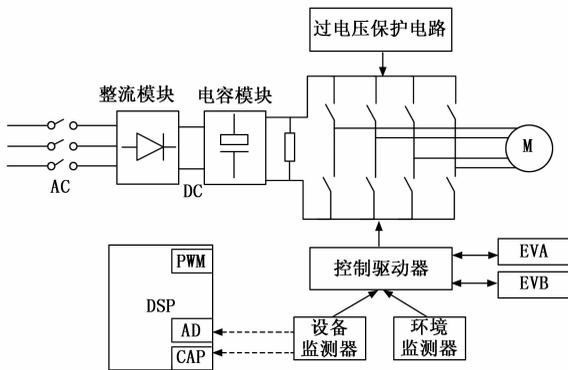


图 3 大型煤矿远程智能控制器结构图

从图 3 中可以看出, 改装的大型煤矿远程智能控制器内部包含两个事件管理器, 分别为 EVA 和 EVB, 该元件由两个 16 比特的通用计时器、8 个 16 比特的脉宽调制信道、3 个采集单元和 16 比特的模数变换器组成。可扩充的外存容量是 192 K, 包含 64 K 的程序存储容量、数据存储容量和输入输出容量^[16]。具备 SCI 接口, SPI 接口和 CAN 接口。大型煤矿远程智能控制器采用多总线结构, 置入多处理单元和硬件乘法器元件, 使得智能控制器不仅具备了高速的数据处理能力, 而且还具备了逻辑控制功能, 可以很好地实现比较复杂的控制算法。智能控制器芯片本身的 FLASH、RAM 无法满足四向伺服控制系统的需求, 因此, 必须从外部进行数据存储、程序存储等外部扩充^[17]。图 4 表示智能控制器中的 DSP 元件, 主要用来完成每个位置伺服周期内的位置速度控制、每个插补周期的直线插补、圆弧插补以及加减速控制的算法, 并对外部 8 路限位开关信号及 4 路原点信号进行中断处理, 并读取外部编码器的计时器值, 获得编码器反馈的位置增量, 从而确定开挖设备电机的旋转方向、角位置和转速。另外, 在大型煤矿远程智能控制器中内置一个驱动器, 其工作原理如图 4 所示。

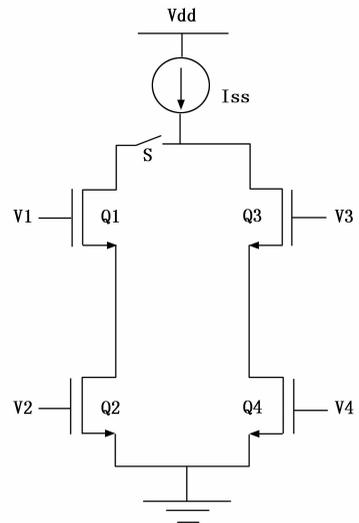


图 4 大型煤矿远程智能控制器驱动电路图

驱动器以大型煤矿开挖设备以及环境的状态监测结果为驱动指令, 若发现设备或环境出现异常, 闭合驱动器开关, 产生驱动信号, 将大型煤矿远程智能控制器调整至启动状态^[18]。最终连接驱动元件与控制核心元件, 完成大型煤矿远程智能控制器的改装。

1.5 实现大型煤矿远程智能监控

在数字孪生技术的支持下, 大型煤矿的远程智能监控原理如图 5 所示。

在开挖设备远程控制过程中, 确定大型煤矿的期望挖煤量与施工时间, 得出开挖设备工作速度的期望值为:

$$v_{Excavation-Expectations} = \frac{N_{coal}}{\Delta t_{Downloading}} \quad (12)$$

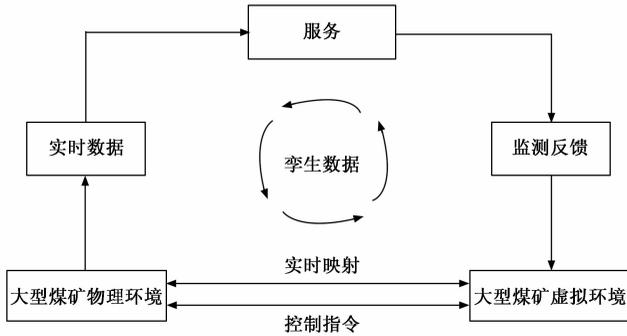


图 5 数字孪生技术下大型煤矿远程智能监控原理图

其中: N_{coal} 表示挖煤量, $\Delta t_{\text{Downloading}}$ 对应的是挖煤时间, 结合当前开挖设备工作速度的监测结果, 可以得出开挖设备工作速度的控制量为:

$$\Delta v_{\text{Excavation}} = v_{\text{Excavation-Expectations}} - v_{\text{Excavation}}(t) \quad (13)$$

其中: $v_{\text{Excavation}}(t)$ 为 t 时刻开挖设备工作速度的监测结果。按照上述方式可以实现对开挖设备加速与减速控制操作, 同理能够实现对煤矿中其他工作设备的控制^[19]。而在大型煤矿环境的控制主要是通过空调和通风机设备的启停实现的, 当煤矿中的瓦斯含量高于正常值时, 利用控制器启动通风机, 通风机转速可以表示为:

$$v_{\text{ventilate}} = V(c_{\text{secure}} - c_{\text{gas}}) \cdot \gamma \quad (14)$$

公式 (14) 中变量 c_{secure} 表示煤矿瓦斯浓度的安全值, 也就是设置的极限值, γ 为通风效率, 用来表示通风机在单位时间内能够通过的空间量, 同理可以实现对煤矿中其他环境参数的控制。在实际大型煤矿的远程智能监控过程中, 需要利用数字孪生技术对煤矿设备以及环境的实时状态进行反馈与更新, 确定煤矿最新的运行状态监测结果, 判断远程控制程序是否终止。

2 监控性能测试实验分析

以测试优化设计基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控方法的监测与控制性能为目的, 采用对比测试的方式设计监控性能测试实验, 此次实验分别从煤矿开挖设备监控和煤矿环境监控两个方面进行, 煤矿开挖设备监控就是判断在优化设计方法作用下, 是否能够精准判断设备的运行状态, 并控制该设备按照指令完成相应任务, 而煤矿环境监控性能测试就是判断优化设计输出的环境监测结果是否与真实煤矿环境一致, 且能够在短时间内将煤矿环境恢复至安全状态。此次实验设置的传统煤矿远程智能监控方法为: 基于无线传感器的煤矿监控方法和基于控制安全的煤矿监控方法, 为保证监控性能之间的可比性, 要求对比方法与优化设计方法的监控对象相同, 最大程度的保证实验变量的唯一性, 最终通过与对比方法的对比, 体现出优化设计方法在监控性能方面的优势。

2.1 大型煤矿实验环境

此次实验选择了一个具有单斜结构的大型煤田矿井为试验环境。岩层方向为北东—南西, 向西北方向倾斜, 一

般为 12 度, 部分地区低于 3 度, 最高达到 21 度。断层构造发育良好, 并受岩浆岩的侵染。该地区的地质情况属于中度。大型煤矿矿山以山西组—上石炭纪太原群为主, 共有 16 个煤层, 其中可开采层为 4 层, 平均可开采层厚 11.2 米, 对煤炭资源的利用具有重要意义。主控煤层的平均厚度在 280 米左右, 可开采的煤层含煤率在 5.2% 左右。该矿区煤质较稳定, 属于中等变质的烟煤, 主要有瓦斯煤、焦煤和肥煤^[20]。根据前期钻孔取样得到的数据, 以及矿井历年瓦斯鉴定结果, 可以看出, 所选择的大型煤矿都具有一定的瓦斯含量, 属于中沼气煤矿, 各个煤层都存在着爆炸危险性和自然发火倾向。针对大型矿井的地质特征, 提出了竖井分块、集中下落的开采方法, 并提出了综合放顶煤开采方法。

2.2 配置大型煤矿远程智能监控方法运行环境

为了满足数字孪生技术对建模的要求, 必须要有一个适当的数字空间建模环境, 此次试验使用的是 Visual Components 工具, 该工具可以让自动化设备制造商、系统集成商以一种快速且高效的方式, 对工厂内部的整体可视化制造流程进行构建, 同时还具备了快速设计 3D 机械设备的支撑及组件库。Visual Components 工具是一款全面的数字规划工具, 能够模拟离散物流、机器人离线编程和 PLC 虚拟调试三大功能。同时, 它还提供了 OPCUA 通信接口, 实现了虚拟调试、数字孪生的在线监测等功能。可视化组件可以提供一个标准的 OPCUA 通信界面, 以支持大量数据通信, 同时保证数据的安全性。Visual Components 工具的运行需要硬件设备的支持, 大型煤矿远程智能监控方法的硬件运行环境有显示层和功能层两部分组成, 显示层装设的实 LED 显示屏, 用来现实数字孪生虚拟环境以及大型煤矿的实时监测与控制结果, 功能层包括煤矿现场计算机、设备数据采集器等。大型煤矿远程智能监控方法运行环境配置完成后, 需要对其进行简单调试, 判断硬件设备连接与通电是否正常、软件程序是否能够成功调度, 保证优化设计的监控方法能够在配置的实验环境中正常运行。

2.3 设定大型煤矿初始状态与控制目标

设置大型煤矿中开挖设备的初始值, 便可实现对设备初始状态的控制, 而煤矿初始环境的设置, 需要控制通风设备和空调设备的工作参数。在大型煤矿环境中设置多个监测点, 各测点的初始状态和控制目标设定结果如表 1 所示。

表 1 中设定的大型煤矿初始状态即为大型煤矿的监测真实值, 将监控方法输出结果与表 1 数据进行比对, 得出反映方法监测与控制性能的测试结果。

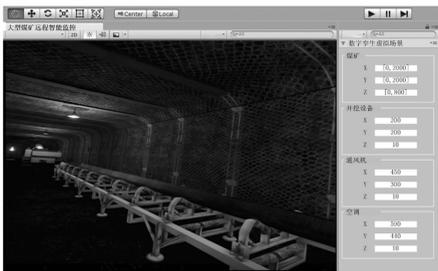
2.4 描述监控性能测试实验过程

在配置需要的实验环境下, 开发并运行优化设计的大型煤矿远程智能监控方法, 由于优化设计方法应用了数字孪生技术, 因此实验采取虚拟与现实相结合的操作方式, 即根据虚拟空间的反馈结果生成控制指令, 控制指令作用在

表 1 大型煤矿初始状态与控制目标设定表

测点 编号	初始状态				控制目标			
	开挖设备 转速/ (r/min)	开挖 设备 状态	环境瓦 斯浓度 /%	环境 温度 /℃	开挖设备 转速/ (r/min)	开挖 设备 状态	环境瓦 斯浓度 /%	环境 温度 /℃
1	2 500	异常	1.7	31	1 000	生产	0.8	24.5
2	4 900	异常	2.5	32.5	1000	生产	0.8	24.5
3	1 500	生产	1.9	30.5	0	停机	0.8	24.5
4	3 800	异常	2.3	29.8	1 000	生产	0.8	24.5
5	0	停机	2.4	28.6	1 000	生产	0.8	24.5
6	0	停机	2.1	31.7	1 000	生产	0.8	24.5

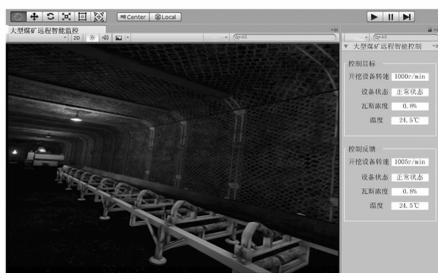
大型煤矿真实环境中, 并根据真实环境的变换更新数字孪生虚拟空间, 所以此次实验的直接监测对象为大型煤矿对应的数字孪生虚拟空间。图 6 表示的是基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控方法的运行界面。



(a) 大型煤矿的数字孪生虚拟场景



(b) 远程智能监测



(c) 远程智能控制

图 6 大型煤矿远程智能监控方法运行界面

按照上述方式在控制器的支持下, 完成对大型煤矿的远程智能监控任务, 并将实时控制结果反馈给监控终端。同理可以实现对比监控方法的开发, 并得出对应的远程智能监控结果。

2.5 设置监控性能量化测试指标

根据实验目的, 将性能测试实验分成设备监控性能测试、环境监控性能测试以及监控范围测试三部分, 设置大型煤矿开挖设备远程监控性能测试的测试指标为: 设备状态监测精准度和设备状态成功控制率, 上述指标的测试结果:

$$\begin{cases} \eta_{\text{Equipment-Monitoring}} = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{device}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{Equipment-Control}} = \frac{N_{\text{success}}}{N_{\text{device}}} \times 100\% \end{cases} \quad (15)$$

其中: 变量 N_{correct} 、 N_{device} 和 N_{success} 分别表示的是状态监测正确的设备数量、大型煤矿中安装的开挖设备总数量以及成功控制的设备数量。计算得出 $\eta_{\text{Equipment-Monitoring}}$ 和 $\eta_{\text{Equipment-Control}}$ 取值越大, 证明对应方法的设备监控性能越优。环境监测性能的量化测试指标包括: 瓦斯浓度监测误差和温度监测误差, 环境控制性能测试指标为瓦斯浓度控制误差和温度控制误差, 其中环境监测性能的测试结果:

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{monitor-gas}} = |c_{\text{monitor}} - c_{\text{set}}| \\ \epsilon_{\text{monitor-T}} = |T_{\text{monitor}} - T_{\text{set}}| \end{cases} \quad (16)$$

其中: c_{monitor} 和 c_{set} 分别表示瓦斯浓度的监测结果和设置值, T_{monitor} 和 T_{set} 对应的是温度的监测值与实际值, 另外环境控制误差的测试指标结果如下:

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{control-gas}} = |c_{\text{control}} - c_{\text{target}}| \\ \epsilon_{\text{control-T}} = |T_{\text{control}} - T_{\text{target}}| \end{cases} \quad (17)$$

式中, 变量 c_{control} 、 T_{control} 、 c_{target} 和 T_{target} 分别表示瓦斯浓度和温度的控制值和控制目标值。计算得出 $\epsilon_{\text{monitor-gas}}$ 和 $\epsilon_{\text{monitor-T}}$ 的值越小, 说明对应方法的环境监测精度越高, $\epsilon_{\text{control-gas}}$ 和 $\epsilon_{\text{control-T}}$ 取值越小, 证明对应方法的环境控制效果越优。另外控制范围的测试指标为监测面积, 该指标的计算公式为:

$$A_{\text{monitor}} = \pi \left(\sqrt{(x_c - x_{\text{farthest}})^2 + (y_c - y_{\text{farthest}})^2} \right)^2 \quad (18)$$

公式 (18) 中 (x_c, y_c) 为监测中心位置坐标, $(x_{\text{farthest}}, y_{\text{farthest}})$ 表示监测范围中距离监测中心最远点的位置坐标。计算得出监测面积 A_{monitor} 越大, 说明对应方法的监测范围越广。

2.6 监控性能测试实验结果与分析

2.6.1 大型煤矿设备监测性能测试结果

统计相关数据, 通过公式 (15) 的计算, 得出 3 种大型煤矿远程智能监控方法在开挖设备监控中的性能测试结果, 如图 7 所示。

从图 7 中可以直观的看出, 与两种传统监控方法相比, 优化设计方法的设备状态监测精准度和成功控制率均得到明显提升, 提升量约为 13.9% 和 34.6%。

2.6.2 大型煤矿环境监测性能测试结果

3 种大型煤矿远程智能监控方法下, 煤矿环境监测性能的测试结果如表 2 所示。

将表 1 和表 2 中的数据代入到公式 (16) 中, 计算得出两种传统方法的平均瓦斯浓度监测误差分别为 0.37% 和 0.27%, 平均温度监测误差分别为 0.45℃ 和 0.25℃, 而优

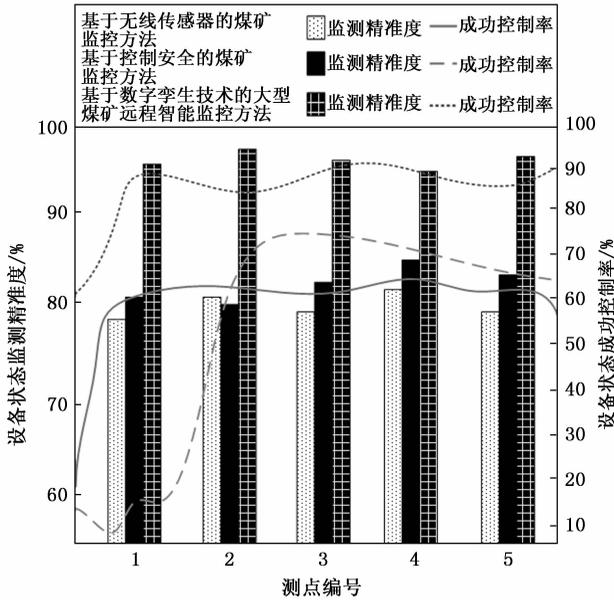


图 7 大型煤矿设备监测性能测试结果

表 2 大型煤矿环境监测性能测试数据表

测点编号	基于无线传感器的煤矿监控方法输出监测数据		基于控制安全的煤矿监控方法输出监测数据		基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控方法输出监测数据	
	环境瓦斯浓度/%	环境温度/℃	环境瓦斯浓度/%	环境温度/℃	环境瓦斯浓度/%	环境温度/℃
1	1.2	31.5	1.3	31.3	1.6	31.1
2	2.3	32.1	2.3	32.2	2.5	32.4
3	1.4	30.9	1.6	30.7	1.8	30.6
4	2.0	30.0	2.2	29.9	2.2	29.8
5	2.0	29.2	2.1	28.9	2.4	28.5
6	1.8	31.1	2.4	31.4	2.0	31.7

化设计方法得出的瓦斯浓度与温度的平均监测误差分别为 0.07% 和 0.07℃。

2.6.3 大型煤矿环境控制性能测试结果

在 3 种大型煤矿环境控制程序下，收集程序运行 1 小时后的环境数据，得出反映大型煤矿环境控制性能的测试结果，如表 3 所示。

表 3 大型煤矿环境控制性能测试数据表

测点编号	基于无线传感器的煤矿监控方法下的控制结果		基于控制安全的煤矿监控方法下的控制结果		基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控方法下的控制结果	
	环境温度/℃	环境瓦斯浓度/%	环境温度/℃	环境瓦斯浓度/%	环境温度/℃	环境瓦斯浓度/%
1	0.9	24.8	0.9	24.2	0.8	24.5
2	0.9	24.6	0.8	24.7	0.8	24.3
3	0.7	24.4	0.6	24.5	0.6	24.5
4	0.5	24.2	0.8	24.3	0.8	24.4
5	0.6	24.3	0.7	24.1	0.6	24.4
6	0.4	24.7	0.5	24.8	0.8	24.5

通过与表 1 中控制目标数据的对比以及公式 (17) 的计算，得出 3 种监控方法控制下，瓦斯浓度的平均控制误差为 0.20%、0.12% 和 0.07%，温度控制误差的平均值分别为 0.20℃、0.23℃ 和 0.07℃，由此可以看出，优化设计方法具有更优的控制性能。

2.6.4 大型煤矿监控范围测试结果

通过公式 (18) 的计算，得出 3 种方法监控范围的测试对比结果，如图 8 所示。

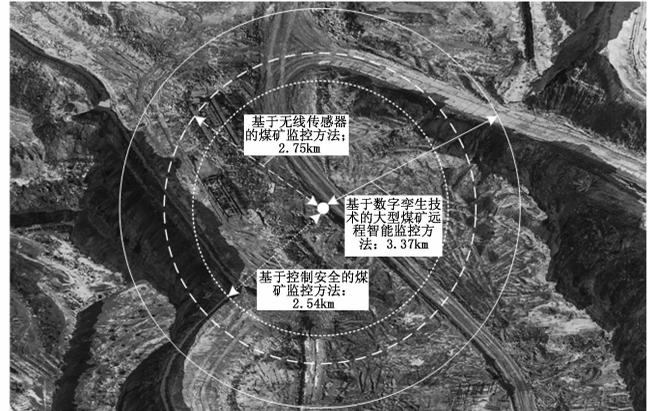


图 8 大型煤矿监控范围测试对比结果

从图 8 中可以直观的看出，优化设计基于数字孪生技术的大型煤矿远程智能监控方法的监控范围更大，监控范围扩大约 27.4%。

3 结束语

目前煤炭行业正处于高速发展时期，如果有关人员要想确保煤炭开采工作的质量，就必须在煤矿开采工作中，强化对大型煤矿远程智能监控方法的设计和应用，24 小时对煤矿开采工作进行监控，如果煤矿开采工作中发生了安全事故，可以在第一时间发出警告，并加以处理，这样才能确保煤矿开采人员的生命安全，提高煤炭企业的经营效益，进而推动煤炭企业的迅速发展。

参考文献:

- [1] 张佳乐, 宋占锋, 王久强. 基于无线传感器的煤矿井下有害气体安全监控系统 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (11): 130-132.
- [2] 程玉龙. 基于控制安全的东林煤矿主要通风机监控系统改造 [J]. 煤矿安全, 2022, 53 (11): 109-112.
- [3] 吴丽. 基于机器视觉的煤炭带式输送机的智能监控方法 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (7): 202-205.
- [4] 陈志军. 灵新煤矿综采工作面视频监控系统应用优化与探索 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (S1): 146-149.
- [5] 栗继祖, 徐丽丽, 郭彦豫, 等. 智能化煤矿监控与巡视作业行为模式与认知机理研究综述 [J]. 中国煤炭, 2021, 47 (1): 57-63.
- [6] 王天龙, 马斌, 董洪波. 煤矿用自动化钻机远程监测系统研制 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50 (1): 80-85.

- [7] 方崇全. 监控分站冗余的煤矿供电监控系统 [J]. 煤矿安全, 2021, 52 (3): 133-136.
- [8] 何帅印, 王 宁, 高 彬. 基于 KJ83X (A) 安全监控系统智能化开发应用研究 [J]. 中国矿业, 2021, 30 (S2): 149-152.
- [9] 陈 义, 张宇驰, 李 鸿. 煤矿液压支架监控系统的设计 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (3): 209-211.
- [10] 荣 雪, 黄友锐, 储怡然, 等. 基于 OPC UA 的煤矿安全生产监控系统信息模型 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (3): 112-117.
- [11] 张 斌, 李博文. 基于布控球技术的煤矿视频监控系统研究与应用 [J]. 中国煤炭, 2022, 48 (S1): 47-50.
- [12] 符大利. 基于数字孪生驱动的综合采工作面远程监控系统 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (4): 175-178.
- [13] 张旭辉. 打造数字孪生行业生态, 突破采掘装备远程控制 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43 (1): 2.
- [14] 王亚彬, 王 帅, 王金幅, 等. 基于数字孪生的装备保障关键技术研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (28): 12233-12241.
- [15] 杨传书. 数字孪生技术在钻井领域的应用探索 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50 (3): 10-16.
- [16] 陈向飞. 煤矿安全监控系统逻辑控制自动检测装置设计 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (6): 154-158.
- [17] 霍俊杰. 露天煤矿大型设备远程监控平台及其关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2021, 47 (S1): 91-95.
- [18] 刘媛媛. 煤矿安全监控系统技术现状及智能化发展趋势 [J]. 矿业安全与环保, 2021, 48 (4): 104-108.
- [19] 屈世甲, 武福生, 贺耀宜. 煤矿安全监测监控体系中边缘计算模式研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (5): 247-252.
- [20] 杜志勇, 毛志浩, 周至哲. 露天煤矿智能安全监控及运输调度集成系统研究 [J]. 工矿自动化, 2021, 47 (S1): 106-109.
- (上接第 191 页)
- [2] 唐 猛, 李海华, 谢灵运, 等. 多中继物理层网络编码系统加密设计及安全性能研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2021, 43 (4): 652-662.
- [3] 周宏林, 刘静波, 凌 乐. 基于虚拟 Modbus RTU 技术的双以太网双主站冗余发电机励磁控制器设计 [J]. 电工电能新技术, 2020, 39 (2): 57-63.
- [4] 冯一飞, 丁 楠, 叶钧超, 等. 领域专用低延迟高带宽 TCP/IP 卸载引擎设计与实现 [J]. 计算机工程, 2022, 48 (9): 162-170.
- [5] 邓佳伟, 张梅娟, 王 琪, 等. PowperPC 架构下 USB3.0 的 IP 核软硬件协作验证 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (5): 37-41.
- [6] 王 赞, 景 博, 黄以锋, 等. 基于 DSP+FPGA 架构的 DWT-SVM 机载设备故障诊断方法研究 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (10): 83-87.
- [7] 谭 坚, 罗巧玲, 王丽一, 等. 基于 SMT 求解器的微处理器指令验证数据约束生成技术 [J]. 计算机研究与发展, 2020, 57 (12): 2694-2702.
- [8] 郝振和, 焦继业, 李雨倩. 基于 AHB 总线的 RISC-V 微处理器设计与实现 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (20): 52-58.
- [9] 朱智宇, 郭凯乐, 武宇轩, 等. 面向光通信应用的 CMOS 28 Gbps 低功耗高抖动容限 CDR 电路设计 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2022, 23 (2): 77-82.
- [10] 唐宽锋, 戴宇杰. 一种带有新型预加重的基于 LVDS 的 SPI 隔离通信驱动电路 [J]. 南开大学学报 (自然科学版), 2020, 53 (3): 17-20.
- [11] 尹安琪, 郭渊博, 汪 定, 等. 可证明安全的抗量子两服务器口令认证密钥交换协议 [J]. 通信学报, 2022, 43 (3): 14-29.
- [12] 彭 平, 张剑云, 周青松, 等. 级联式信道化和异构服务器的 ESM 系统组合架构 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (5): 107-112.
- [13] 陈郑平, 梅 峥, 林静怀, 等. 面向调控业务的多级一体化数据交换系统设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (4): 195-201.
- [14] 李龙飞, 王剑峰, 刘 欢, 等. 硬件支持的多虚拟机数据交换及动态带宽分配方法 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (1): 93-98.
- [15] 官 铮, 熊 磊, 贾 镛, 等. RoF-DAS 架构下具有差错重传的预约式 WLAN MAC 协议研究 [J]. 通信学报, 2020, 41 (3): 102-111.
- [16] 龚黎华, 陈振泳, 徐良超, 等. 基于高维单粒子态的双向半量子安全直接通信协议 [J]. 物理学报, 2022, 71 (13): 35-42.
- [17] 任天宇, 王小虎, 郭广鑫, 等. 基于多级身份验证和轻量级加密的电力物联网数据安全系统设计 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (6): 12-19.
- [18] 夏晓峰, 向 宏, 肖震宇, 等. 基于国产密码算法的数控网络的认证与验证模型研究及安全评估 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (8): 1846-1852.
- [19] 赵毅强, 宋凯悦, 何家骥, 等. 基于安全授权密钥的增强型逻辑加密算法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (5): 1-6.
- [20] 尹安琪, 曲彤洲, 郭渊博, 等. 格上基于密文标准语言的可证明安全两轮口令认证密钥交换协议 [J]. 电子学报, 2022, 50 (5): 1140-1149.
- [21] 李燕萍, 曹 盼, 石 杨, 等. 非平行文本下基于变分自编码器和辅助分类器生成对抗网络的语音转换 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2020, 59 (3): 322-329.
- [22] 罗森林, 杨俊楠, 潘丽敏, 等. 面向信息与通信技术供应链网络画像构建的文本语义匹配方法 [J]. 北京理工大学学报, 2021, 41 (8): 864-872.
- [23] 马广瑶, 黄德璐, 王建军. 基于预测误差编码的加密域可逆数据隐藏算法 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (5): 138-143.
- [24] 李雪莲, 张夏川, 高军涛, 等. 支持属性和代理重加密的区块链数据共享方案 [J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49 (1): 1-16.