# 液压支架姿态数字孪生监测虚实同步映射方法研究*

张勇

(北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399)

**摘要**:针对液压支架内部姿态测量准确性低、可靠性差以及维护成本高的问题,开展了液压支架姿态数字孪生监测虚实同步映射方法研究。首先,通过对支架结构进行解析,构建了液压支架内部姿态参数化表达模型,并研究了传感器数据处理关键技术;然后,构建了液压支架运动仿真模型,并将液压支架的参数化表达模型编入仿真系统底层进行初步应用;最后,基于实验室条件对所提出的支架姿态虚实同步映射方法进行了试验验证。试验结果表明,该方法测量的支架内部姿态角误差均控制在2°以内,能够满足实际监测需求。研究成果为液压支架的虚实同步映射提供了新思路,对矿山智能化建设具有一定的意义。

**关键词**:液压支架;传感器融合;数字孪生;点云;虚实映射

**中图分类号**:TD355.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0227-10

**Research on Virtual-Reality Synchronous Mapping Method for Digital Twin Monitoring of Hydraulic Support Attitude**

*ZHANG Yong*

(CCTEG Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

**Abstract**: To address the problems of low accuracy, poor reliability and high maintenance costs in the internal attitude measurement of hydraulic supports, a study on the virtual-reality synchronous mapping method for digital twin monitoring of hydraulic support attitude was carried out. Firstly, by analyzing the support structure, a parametric expression model for the internal attitude of the hydraulic support was established, and the key technologies for sensor data processing were investigated. Then, a motion simulation model of the hydraulic support was established, and the parametric expression model of the hydraulic support was incorporated into the bottom layer of the simulation system for preliminary application. Finally, based on laboratory conditions, test verification was carried out on the proposed virtual-reality synchronous mapping method for support attitude. The test results show that the errors of the internal attitude angles of the support measured by this method are all controlled within 2°, which can meet the actual monitoring requirements. The research results provide new ideas for the virtual-reality synchronous mapping of hydraulic supports and have certain significance for the intelligent construction of mines.

**Key words**: Hydraulic support, Sensor fusion, Digital twin, Point cloud, Virtual-reality mapping

## 0 引言

实现煤矿井下综采设备的精准监测对加速煤炭行业的供给侧结构改革及煤矿智能化的发展起着十分重要的作用[1]。液压支架在综采工作面中负责支撑顶板和保护作业人员安全,姿态角不仅能反映支架是否稳定,还能间接反映支架的工作状况。持续监控支架姿态角变化,有助于判断支架是否存在机械故障、液压系统问题等,并及时进行维修保养,延长设备使用寿命。当液压支架的姿态角处于异常状态时,会直接影响采煤工作的进行,支架的姿态角对煤矿安全生产具有举足轻重的影响[2-3]。液压支架姿态角监测是确保施工安全、提高作业效率、延长设备寿命和提升工程质量的重要手段,在现代矿山施工和隧道建设中发挥着重要的作用。

刘相通等[4]针对现有液压支架姿态监测方法测量参数不全面的难题,提出了一种直接测量与间接测量相结合的液压支架关键姿态参数测量系统,分

* **收稿日期**:2025-01-03

**基金项目**:北京天玛智控科技股份有限公司科技项目(2023-TM-020-J1)

**作者简介**:张勇(1987—),男,江西抚州人,硕士,助理研究员,从事智能开采数字孪生技术研究和产品开发。E-mail:zhangyong@tdmarco.com

析得出了影响液压支架支护姿态的关键参数,其中底座、前连杆、掩护梁和顶梁与水平面夹角及推移步距采用直接测量方式,支护高度、立柱与平衡千斤顶长度采用间接测量方式。李磊等[5]提出了一种基于粒子群优化-极限学习机(PSO-ELM)的综采工作面液压支架姿态监测方法。该方法以液压支架顶梁俯仰角为监测对象,采用倾角传感器和陀螺仪采集液压支架顶梁支护姿态实时信息,并对采集到的数据进行处理,从而求得更加准确的顶梁支护姿态数据。王军[6]提出了基于深度视觉和传感器融合的煤矿综采面液压支架姿态远程智能监测方法,采用该方法对液压支架进行位姿监测时,顶梁方位角测量误差较低,具备较理想的监测精度。逄金生[7]为了提高工作面液压支架稳定性,准确掌握支架支护过程中的姿态,在店坪煤矿 204 工作面 ZY6600-18/37 型掩护式液压支架安装了一套姿态监控系统,通过系统倾角传感器实现支架高度及倾角监测,同时建立了支架姿态模型,对支架姿态变化规律及支撑状态进行监测,从而保证了工作面支架支护效果。

由上述研究可知,当前对于液压支架姿态角的监测多采用接触式测量方法,如倾角传感器。倾角传感器能够直接测量液压支架掩护梁和顶梁的倾角,操作较为简单,但实际井下环境十分复杂,支架数量众多且排布密集,采煤机实时运行,落煤、积水及灰尘使倾角传感器在安装、环境适应性、测量精度、长期可靠性和维护等方面存在诸多问题。这些问题可能导致测量数据不准确或监测系统运行不稳定,难以满足现代智能化矿山对于精确监测和高可靠性的要求[8-9]。因此,将虚拟监测引入液压支架位姿监测,获取液压支架群位姿信息并在虚拟环境中进行重构,将已经出现与可能出现的异常位姿进行预警,指导液压支架的移架动作并进行及时的调架,可为煤炭安全高效生产提供坚实保障[10]。数字孪生技术可以实现液压支架姿态的虚拟监测,通过建立虚拟模型进行虚实同步映射,能够大量减少物理传感器的部署需求。杨崇浩等[11]针对液压支架姿态监测中的远程监测图像质量差、监测结果可靠性低等问题,提出一种用于液压支架姿态监测的数字孪生模型构建方法,在提高监测可靠性的同时,实现了支架异常姿态的准确预警。HAO 等[12]提出了一种基于点云和数字孪生的液压支架群位姿重构方法,并通过试验验证了该方法的可行性。由此可见,数字孪生系统可以通过虚拟仿真和现有传感器的数据交互实现高效监测,减少对物理传感器的过度依赖,从而降低监测系统的维护成本[13-14]。

然而,多数研究并未充分考虑虚实同步映射。同时,液压支架内部姿态监测主要依赖倾角、推移油缸行程的接触式传感器,测量结果准确性和可靠性较低[15-17],且未考虑井下应用的实用性与成本[18-19]。

为解决上述问题,本文提出了一种液压支架姿态数字孪生监测虚实同步映射方法,主要工作与创新如下:引入点云测量技术实现多个位姿参数的测量,从而有效减少传感器的安装数量,降低系统维护成本;通过将点云信息与传感器信息融合传输至虚拟环境中,能够为虚拟场景提供更加精准有效的数据支撑[20-21];提出了基于关键点坐标的液压支架立柱倾角与伸长量解算方法,设计了液压支架虚实交互界面,实现了液压支架内部姿态的虚拟监测,并通过传感数据实时传输与处理机制获取液压支架位姿特性。研究丰富了液压支架的位姿监测手段,提升了相邻支架间相对位姿监测的准确性与可靠性,可为液压支架单机及群组的位姿监测提供数据支撑,为异常位姿的调整提供分析和指导[22]。

## 1 液压支架虚实映射总体框架

液压支架虚实映射的总体框架主要分为物理层、后端和前端,如图 1 所示。其中,物理层通过倾角传感器和二维激光雷达采集液压支架位姿信息,并将其导入虚拟场景后端;后端对液压支架信息进行参数化解析,基于实时传感器数据进一步解算出传感器未直接测量的构件角度,从而得到支架的全位姿;前端则通过同步连接的方式将后端处理的数据可视化,即搭建 UI 界面实现虚拟的液压支架与真实液压支架的运动状态虚实映射,同步动作。

## 2 液压支架内部位姿的物理监测系统

目前,液压支架的监测主要分为支架内部姿态和支架外部姿态。当支护高度发生改变时,液压支架的前连杆、后连杆、掩护梁、顶梁等构件的角度也随之改变,引起支架内部姿态变化。液压支架外姿态是指不考虑液压支架的内部姿态,以底座为基准,相邻液压支架之间的相对姿态。

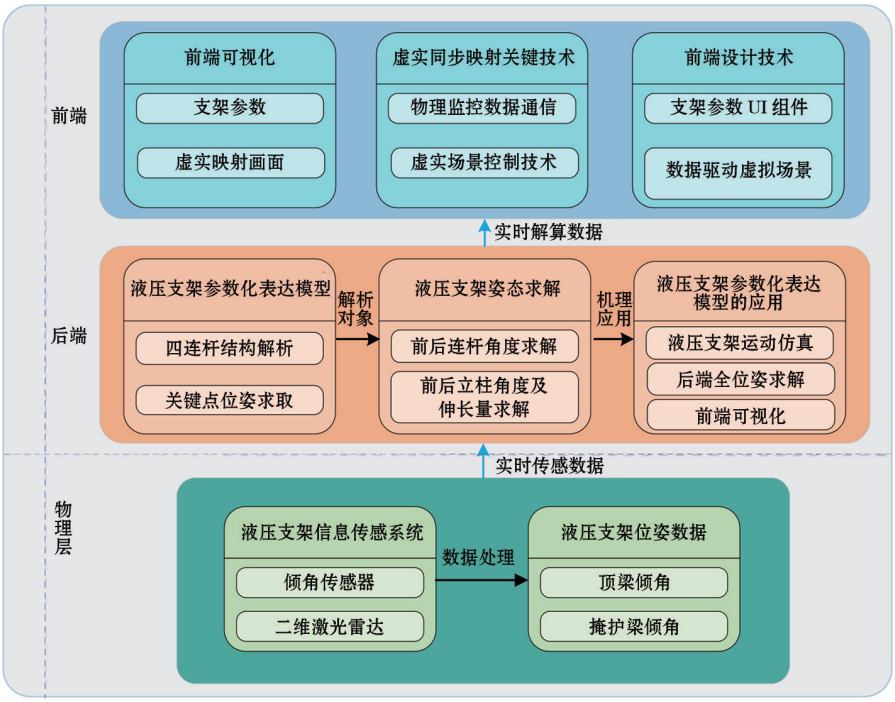



图 1　液压支架虚实映射总体框架

Fig.1　Overall framework of virtual-reality mapping for hydraulic support

## 2.1　传感器的选取和安装

液压支架数字孪生的虚实映射方法的研究和实现需要借助多种硬件设备进行数据融合。为确保监测结果的准确性与实时性,本文采用倾角传感器和二维激光雷达作为传感器,对液压支架内部各构件进行姿态监测。将 SVT610T 倾角传感器及 X4 激光雷达安装在液压支架上,用于获取液压支架对应构件的姿态数据。数据通过串口直接发送至上位机软件,并在上位机软件中解析出液压支架的内部姿态。具体而言,将倾角传感器安装在液压支架顶梁和掩护梁,获取二者的倾角信息;将二维激光雷达安装至支架左前立柱的内侧的靠上方,该位置采集液压支架内部点云效果最佳,经点云处理后可以得到液压支架相关构件的倾角。各传感器安装位置如图 2 所示。

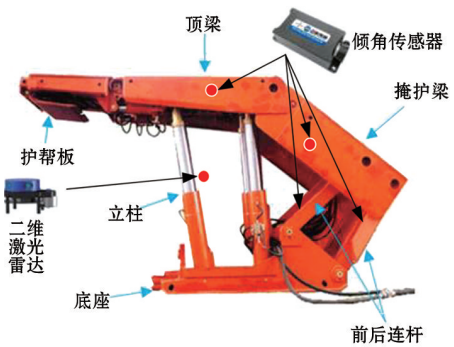



图 2　传感器安装位置

Fig.2　Installation position of sensors

## 2.2　传感器数据处理

将传感器获取的数据通过实时通信接口导入仿真软件 Unity3D,作为后续仿真数据源。该过程主要采用 Visual Studio 编程软件,并借助 PCL 等第三方库进行开发。

### 2.2.1　倾角传感器数据处理

本文采用卡尔曼滤波算法对采集的数据进行去噪和干扰信号消除。首先,初始化卡尔曼滤波参数,包括初始状态估计和初始误差协方差矩阵;然后,通过校正确保倾角传感器输出值的准确性,将传感器放置在水平位置,调整输出值至零或接近零,以消除零偏误差,并在传感器处于运动状态时进行校准,评估其动态性能并进行相应的修正;最后,对滤波和校正后的数据作进一步处理分析,通过设定阈值或利用统计方法检测异常值,及时识别并处理可能的故障或异常情况,并通过融合多个位置的测量值来估计支架的姿态信息。

在数据通信方面,倾角传感器与上位机之间通过串口通信,编写 C# 程序读取传感器的数据;借助 TCP/IP 通信协议将传感器数据传输至 Unity3D,虚拟场景接收到传感器数据后,通过调整虚拟支架对应构件的旋转角度或位置,实现运动支架的实时仿真。

### 2.2.2　二维激光雷达数据处理

二维激光雷达输出坐标系为二维极坐标,为对数据进行进一步处理,需要将点的二维极坐标转换

为三维直角坐标,缺失维度数据用 0 填充。

本文采用 PCL 库对三维点云数据进行处理。首先对点云进行裁剪滤波以去除大量无用点云,提取支架构件的有效区域;再通过条件滤波去除离散点云,根据设定的特定条件判断点是否保留。滤波条件设置的依据如下:由于二维激光雷达得到的有用点云为二维的线状点云,其曲率变化小,而液压管路及支架构件连接处等不平整区域的点云曲率变化较大,因此可根据点所处邻域内的曲率变化来筛选目标点云。

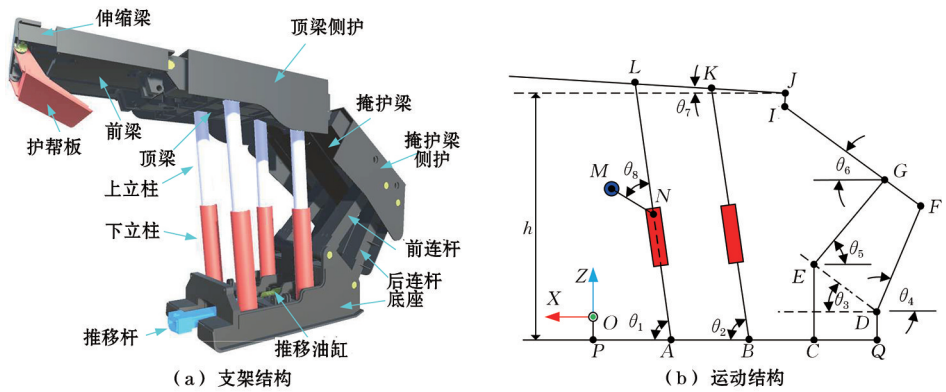
对滤波后的支架点云数据采用随机抽样一致算法进行多条直线拟合,得到各支架构件对应的拟合直线。基于拟合直线的参数计算直线间夹角,进而得到液压支架的顶梁角度和掩护梁角度。

## 3 基于虚实映射的监测后端设计

### 3.1 液压支架的参数化表达模型

由于立柱角度及伸长量不便直接测量,本文基于液压支架结构进行参数化解析,通过推演前后立柱角度,获取支架位姿,为前端可视化提供基础。液压支架解析方法是解决支架传感监测数据不全面问题的基础,只有通过数学方式描述支架复杂的空间位姿,才能清晰求解其运动学位姿。通过支架位姿解析方法将有限的支架位姿数据通过解析模型进行扩展,得到许多无法测量的支架位姿数据,使掌握的支架空间位姿数据更加全面。该解析模型称为液压支架的参数化表达模型。

本文以 ZZ4000/18/38/型液压支架为研究对象,其为四立柱支撑掩护式液压支架。对该支架进行结构解析,首先对其结构进行简化,提取支架主体部件;根据液压支架的组成结构,结合液压支架各构件的运动配合关系,将液压支架的内部姿态变化视为平面运动,简化为平面运动学分析。支架的结构及运动结构简图如图 3 所示。图 3 中,原点 $O$ 为液压底座的台阶上表面的中心,$M$ 为雷达的旋转中心,即雷达点云图的坐标原点。




(a) 支架结构 (b) 运动结构

图 3 液压支架结构及运动结构简图

Fig.3 Sketch of hydraulic support structure and motion structure

### 3.2 液压支架群全位姿参数矩阵构建

液压支架位姿可通过底座姿态角、底座坐标以及液压支架的支护姿态进行描述,构建液压支架全位姿坐标矩阵,如式(1)所示。其中,左上角的 4×4 矩阵为底座位姿状态矩阵 $\boldsymbol{G}_{Q_H}$;最右边一列为支架运行参数向量;$l_1$、$l_2$、$B_1$、$B_2$、$T$ 分别为立柱长度、平衡千斤顶长度、顶梁侧护千斤顶伸长量、护帮千斤顶伸长量和推移千斤顶伸长量,这 5 个参数用于确定支架的运行状态和支护姿态;$n$ 为割煤循环数;$i$ 为支架编号。

$$\boldsymbol{Y}_i^n=\begin{bmatrix} * & * & * & x & l_1 \\ * & * & * & y & l_2 \\ * & * & * & z & B_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & B_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix} \tag{1}$$

底座位姿状态矩阵 $\boldsymbol{G}_{Q_H}$ 如式(2)所示。

$$\boldsymbol{G}_{Q_H}=\begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma+c\gamma s\alpha s\beta & s\alpha s\gamma+c\alpha c\gamma s\beta & p_x \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma+s\alpha s\beta s\gamma & -c\gamma s\alpha+c\alpha s\gamma s\beta & p_y \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:$\alpha$、$\beta$、$\gamma$ 分别为液压支架底座的俯仰角、横滚角、偏航角;$(p_x,p_y,p_z)$为底座位置坐标;s 为正弦函数的缩写;c 为余弦函数的缩写。用 $r_{ij}$ 表示第 $i$ 行第 $j$ 列的元素,则俯仰角、横滚角、偏航角分别如式(3)所示。

$$\begin{cases} \alpha=\arctan\left(\dfrac{r_{32}}{r_{33}}\right) \\ \beta=-\arcsin(r_{31}) \\ \gamma=\arctan\left(\dfrac{r_{21}}{r_{11}}\right) \end{cases} \tag{3}$$

### 3.3 液压支架后连杆的姿态求解

通过倾角传感器可以测量液压支架的掩护梁角度与顶梁角度;通过二维激光雷达可以测量液压支架的前连杆角度、掩护梁角度与顶梁角度,其中,当支护高度过低时,后立柱的油缸体会遮挡雷达扫描前连杆,导致无法直接获取前立柱的信息。因此本文将掩护梁角度与顶梁角度作为已知信息,推导液压支架的其他构件信息,即前连杆角度、后连杆角度、前后立柱角度以及对应的伸长量。

(1) 通过四连杆结构求解前连杆角度和后连杆角度。已知掩护梁倾角 $\theta_6$ 和顶梁倾角 $\theta_7$,推导求解前连杆倾角 $\theta_5$ 和后连杆倾角 $\theta_4$,根据四连杆的几何运动关系,可得以下关系式。

$$\begin{cases} l_{DE}\cos\theta_3+l_{DF}\cos\theta_4=l_{EG}\cos\theta_5+l_{FG}\cos\theta_6 \\ l_{DE}\sin\theta_3+l_{EG}\sin\theta_5=l_{DF}\sin\theta_4+l_{FG}\sin\theta_6 \end{cases} \tag{4}$$

式中,$l$ 为线段长度。由式(4)求解可得:

$$\theta_5=\arcsin\left(\frac{c}{\sqrt{a^2+b^2}}\right)+\arccos\left(\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \tag{5}$$

$$\theta_4=\arccos\left(\frac{l_{FG}\cos\theta_6+l_{EG}\cos\theta_5-l_{DE}\cos\theta_3}{l_{DF}}\right) \tag{6}$$

其中参数 $a$,$b$,$c$ 表示为:

$$a=2l_{EG}\sin\theta_5(l_{DE}\sin\theta_3-l_{FG}\sin\theta_6) \tag{7}$$

$$b=-2l_{EG}\cos\theta_5(l_{DE}\cos\theta_3-l_{FG}\cos\theta_6) \tag{8}$$

$$c=l_{DF}^2-l_{EG}^2-(l_{FG}\sin\theta_6-l_{DE}\sin\theta_3)^2-(l_{FG}\cos\theta_6-l_{DE}\cos\theta_3)^2 \tag{9}$$

(2) 通过关键点求取立柱的姿态角与伸长量。为了更清晰地表达液压支架内部各构件的姿态,需确定液压支架关键位置点坐标,从而求得立柱的姿态。在结构简图中建立坐标系,通过计算得到掩护梁与后连杆销轴中心点 $F$ 的坐标。

$$\begin{cases} x_F=-l_{PQ}-l_{DF}\cos\theta_4 \\ z_F=l_{OD}+l_{DF}\sin\theta-l_{OP} \end{cases} \tag{10}$$

通过 $F$ 点的坐标可以求得顶梁和掩护梁连接销轴中心点 $I$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_I=x_F+l_{FI}\cos\theta_6 \\ z_I=z_F+l_{FI}\sin\theta_6 \end{cases} \tag{11}$$

通过 $I$ 点的坐标可以求得后立柱与顶梁连接销轴中心点 $K$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_K=x_I-l_{IJ}\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta_7\right)+l_{JK}\cos\theta_7 \\ z_K=z_I+l_{IJ}\sin\left(\frac{\pi}{2}-\theta_7\right)+l_{JK}\sin\theta_7 \end{cases} \tag{12}$$

通过 $K$ 点的坐标可以求得前立柱与顶梁连接销轴中心点 $L$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_L=x_K+l_{KL}\cos\theta_7 \\ z_L=z_K+l_{KL}\sin\theta_7 \end{cases} \tag{13}$$

由图 3 可知前立柱与底座连接销轴中心点 $A$ 的坐标和后立柱与底座连接销轴中心点 $B$ 的坐标。

$$\begin{cases} x_A=-l_{PA} \\ z_A=-l_{OP} \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} x_B=-l_{PB} \\ z_B=-l_{OP} \end{cases} \tag{15}$$

根据前后立柱的上下销轴的位置即可求得前立柱的倾角 $\theta_1$ 与后立柱的倾角 $\theta_2$,其计算表达式如下:

$$\theta_1=\arctan\frac{z_L-z_A}{x_L-x_A} \tag{16}$$

$$\theta_2=\arctan\frac{z_K-z_B}{x_K-x_B} \tag{17}$$

根据上述公式,可以求得在支护高度变化前后,支架前后立柱的上下销轴的位置。变化前的位置参数为上文已求得的 $K$、$L$、$A$、$B$ 点的对应坐标,变化后的相应位置点坐标为 $(x'_K,z'_K)$、$(x'_L,z'_L)$、$(x'_A,z'_A)$、$(x'_B,z'_B)$,则前后立柱的伸长量 $\Delta l_1$ 与 $\Delta l_2$ 的表达式如下:

$$\Delta l_1=\sqrt{(x'_L-x_A)^2+(z'_L-z_A)^2}-\sqrt{(x_L-x_A)^2+(z_L-z_A)^2} \tag{18}$$

$$\Delta l_2=\sqrt{(x'_K-x_B)^2+(z'_K-z_B)^2}-\sqrt{(x_K-x_B)^2+(z_K-z_B)^2} \tag{19}$$

### 3.4 液压支架的参数化表达模型应用

本节基于液压支架参数化表达模型,构建数字孪生仿真模型并实现其仿真运动。将二维激光雷达实际测量值传入数字孪生仿真模型,迭代推演得到可靠姿态数据,实现支架的虚实映射。具体过程如下。

(1) 构建数字孪生仿真模型。首先,使用 NX 建模软件对液压支架的各个构件进行建模,并组装成完整的液压支架装配体模型;然后将装配好的液压支架模型导出为 stl 格式文件,再将这些文件导入 3ds max 中进行处理,得到 fbx 格式文件;最后,将 fbx 模型导入 Unity3D 中。

完成基底模型的加载后,需通过定义构件间的父子关系并编写运动控制脚本,建立支架各部件之间的运动关系,从而实现液压支架的仿真动作。在运动关系中,子物体会随父物体的运动而发生相应移动,因此需要依据支架构件的实际运动配合关系来确定父子关系。在 Unity 的 Hierarchy 视图中,

可通过拖拽方式将子物体直接置于父物体对象下，从而建立父子关系。液压支架各构件父子关系如图4所示。

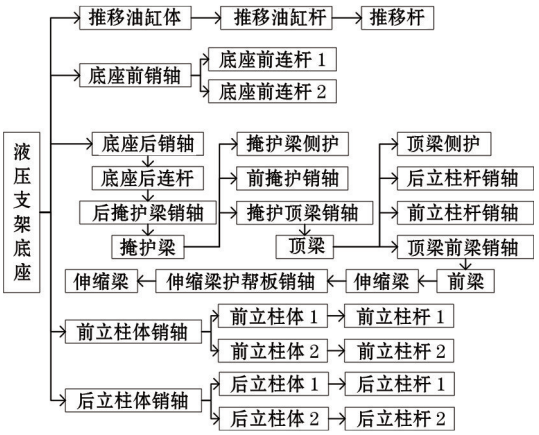



**图4 液压支架各构件的父子关系**

**Fig.4 Parent-child relationship of hydraulic support components**

在完成液压支架各构件父子关系定义后，根据支架构件之间的运动关系编写C#运动脚本，即可实现数字孪生模型的仿真动作。

(2) 后端推演。将液压支架的参数化表达模型编入仿真系统底层，虚拟场景后端接收到物理层的角度信息后，经过后端推演得到未测量到的液压支架构件的角度信息。

(3) 前端可视化。将液压支架姿态信息的测量值和推导值传递至前端进行可视化，并通过数据驱动前端数字孪生仿真模型位姿同步。

## 4 基于虚实映射的监测前端设计

在上述后端参数化表达模型的支持下，对二维激光雷达测量数据进行严格推演，并依据推演结果支持前端同步动作，从而实现前端虚拟数字孪生仿真模型与物理液压支架位姿同步的虚实映射机制。虚实映射的监测前端设计丰富了液压支架的监测手段，提高了支架位姿监测的全面性，同时也提高了液压支架的虚实交互性。

### 4.1 前端设计内容

液压支架的前端包含可视化液压支架参数和直观呈现物理场景与虚拟场景虚实同步映射的画面。支架参数的可视化主要通过前端接收后端发送的支架各构件位姿数据，并通过UI组件呈现。

### 4.2 虚实同步映射关键技术

虚实同步映射关键在于“以实控虚”，即实现Unity3D创建的虚拟场景与实际液压支架内置可编程逻辑控制器(PLC)间的单向数据通信。通过数据通道将物理液压支架PLC的监控数据实时传输至虚拟场景，驱动虚拟场景同步运行，实现对支架运行过程的虚拟全景监测。

Unity3D虚拟场景与支架内置PLC间的数据通道基于S7.net脚本搭建。首先，在Unity3D虚拟场景内添加C#通信脚本，定义连接端PLC的IP地址以及各监控变量的DB数据块地址等参数；在进行虚实映射时，通过调用plc.Read()与plc.Write()函数，即可实现对PLC内DB块数据的实时读取及写入，完成Unity3D与PLC之间的单向数据通信。最终实现液压支架虚实同步映射的“以实控虚，虚实结合”。

### 4.3 虚实映射的监测前端设计

虚实映射的监测前端设计主要包括液压支架的前端可视化支架参数和物理场景与虚拟场景虚实同步映射的画面。支架参数可视化通过前端接收后端发送的支架各构件位姿数据，并以UI中的Text和InputField的方式呈现。液压支架的虚实交互界面如图5所示，图中支架参数模块显示当前支架的相关构件的参数，包含支架序号、掩护梁倾角、顶梁倾角、前后连杆倾角、前后立柱角度以及伸长量等。

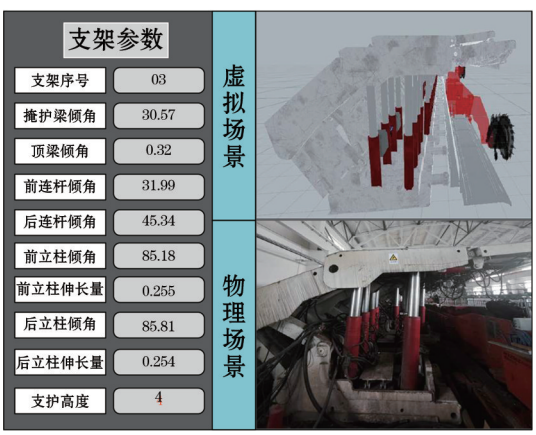



**图5 液压支架的虚实交互界面**

**Fig.5 Interactive interface between virtual and reality of hydraulic support**

物理场景与虚拟场景虚实同步映射是以数据驱动的方式来实现可视化的。具体实现路径为：物理场景接收动作指令并执行相应动作，并将监控数据发送至前端；雷达测量支架构件数据发送至后端进行解算；解算出的液压支架全位姿参数发送至前端，并通

过 Transform 组件中的 Rotation 和 Translate 方法,控制前端虚拟液压支架各构件按照对应的角度或位移进行旋转和移动,实现对物理支架姿态的实时同步。

## 5 试验验证

本研究依托实验室现有煤矿综采成套试验平台,包括 20 台 ZY4000/18/38 型液压支架及配套刮板输送机和采煤机(长度为 30 m)。该平台可为所提出的液压支架数字孪生仿真模型虚实同步映射方法提供试验条件,支持综采装备位姿研究。试验条件如图 6 所示。

液压支架的内部姿态监测试验主要分为两部分:(1)使用倾角传感器测量液压支架内部姿态,即各构件的姿态角,将其作为参考值;(2)使用二维激光雷达测量支架内部姿态,包括顶梁倾角和掩护梁倾角,并将数据导入 Unity3D 计算得出各构件的虚拟映射姿态角,与倾角传感器所测数据进行对比分析,得出虚实映射值与参考值之间的误差。

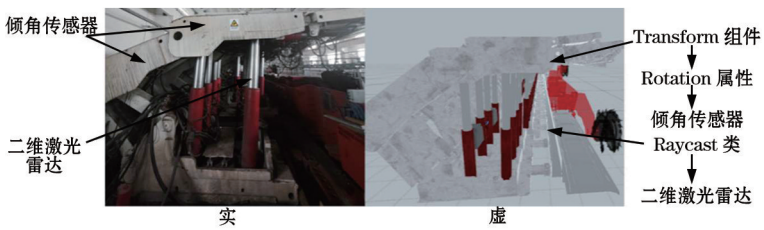



**图 6 试验条件**

**Fig.6 Experimental conditions**

将传感器和二维激光雷达安装在液压支架的对应位置采集数据,得到液压支架的掩护梁倾角和顶梁倾角,见表 1。通过将雷达扫描的数据导入 Unity3D 可以得到液压支架的前后连杆角度,将虚实映射值与倾角传感器测得的前后连杆角度数据作对比,见表 2。

**表 1 掩护梁倾角和顶梁倾角测量值**

**Table 1 Measurement values of the inclination angles of the cover beam and roof beam**

| 支架序号 | 掩护梁倾角/(°) | | 顶梁倾角/(°) | | 支架序号 | 掩护梁倾角/(°) | | 顶梁倾角/(°) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 传感器值 | 雷达值 | 传感器值 | 雷达值 | | 传感器值 | 雷达值 | 传感器值 | 雷达值 |
| 1 | 29.98 | 29.61 | 0.73 | 1.74 | 11 | 29.59 | 29.11 | 1.43 | 1.01 |
| 2 | 29.51 | 28.47 | 0.78 | 0.84 | 12 | 28.82 | 28.27 | 0.36 | 0.09 |
| 3 | 30.08 | 29.75 | 1.56 | 1.33 | 13 | 29.91 | 30.15 | −0.18 | −0.32 |
| 4 | 30.72 | 30.62 | −1.39 | −1.09 | 14 | 30.93 | 31.10 | 0.76 | −0.05 |
| 5 | 29.39 | 29.24 | −0.32 | −0.05 | 15 | 29.13 | 29.46 | 1.77 | 1.35 |
| 6 | 29.51 | 28.91 | 1.02 | 0.98 | 16 | 30.15 | 30.46 | 1.46 | 1.07 |
| 7 | 30.88 | 30.37 | 0.43 | 1.37 | 17 | 30.68 | 31.01 | −1.98 | −1.74 |
| 8 | 32.49 | 32.16 | −0.18 | 0.08 | 18 | 30.17 | 30.65 | 0.49 | 0.03 |
| 9 | 31.30 | 31.15 | −0.79 | −0.45 | 19 | 31.00 | 32.37 | 1.37 | 1.68 |
| 10 | 30.66 | 30.36 | 0.24 | −0.03 | 20 | 28.50 | 29.22 | 1.28 | 0.95 |

**表 2 前后连杆倾角的虚实映射值与倾角传感器测量值**

**Table 2 The virtual-reality mapping values and measurement values of the inclination sensor of inclination angles for the front and rear link camber**

| 支架序号 | 前连杆倾角/(°) | | 后连杆倾角/(°) | | 支架序号 | 前连杆倾角/(°) | | 后连杆倾角/(°) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 传感器测量值 | 虚实映射值 | 传感器测量值 | 虚实映射值 | | 传感器测量值 | 虚实映射值 | 传感器测量值 | 虚实映射值 |
| 1 | 31.31 | 30.88 | 44.73 | 44.35 | 11 | 30.86 | 30.32 | 44.33 | 43.85 |
| 2 | 30.83 | 29.61 | 43.95 | 43.22 | 12 | 29.99 | 29.38 | 43.56 | 43.02 |
| 3 | 31.42 | 31.05 | 44.83 | 44.50 | 13 | 31.22 | 31.51 | 44.65 | 44.91 |
| 4 | 32.17 | 32.05 | 45.50 | 45.39 | 14 | 32.41 | 32.61 | 45.72 | 45.90 |
| 5 | 30.64 | 30.47 | 44.13 | 43.98 | 15 | 30.34 | 30.72 | 43.87 | 44.20 |
| 6 | 30.77 | 30.09 | 44.25 | 43.65 | 16 | 31.51 | 31.87 | 44.91 | 45.23 |
| 7 | 32.35 | 31.76 | 45.66 | 45.13 | 17 | 32.13 | 32.51 | 45.46 | 45.81 |
| 8 | 34.25 | 33.86 | 47.39 | 47.03 | 18 | 31.53 | 32.08 | 44.93 | 45.42 |
| 9 | 32.85 | 32.67 | 46.11 | 45.95 | 19 | 32.49 | 32.92 | 45.79 | 46.18 |
| 10 | 32.09 | 31.75 | 45.43 | 45.12 | 20 | 29.64 | 30.45 | 43.25 | 43.96 |

基于雷达测得的掩护梁倾角与顶梁倾角数据，推导出前连杆角度与后连杆角度，并将其与倾角传感器实测值进行比较，获得液压支架主体结构的倾角误差，如图 7 所示。其中，图 7(a)、图 7(b)为二维激光雷达与倾角传感器测得的掩护梁、顶梁倾角误差，图 7(c)为虚实映射与倾角传感器测量值之间的前后连杆倾角误差。

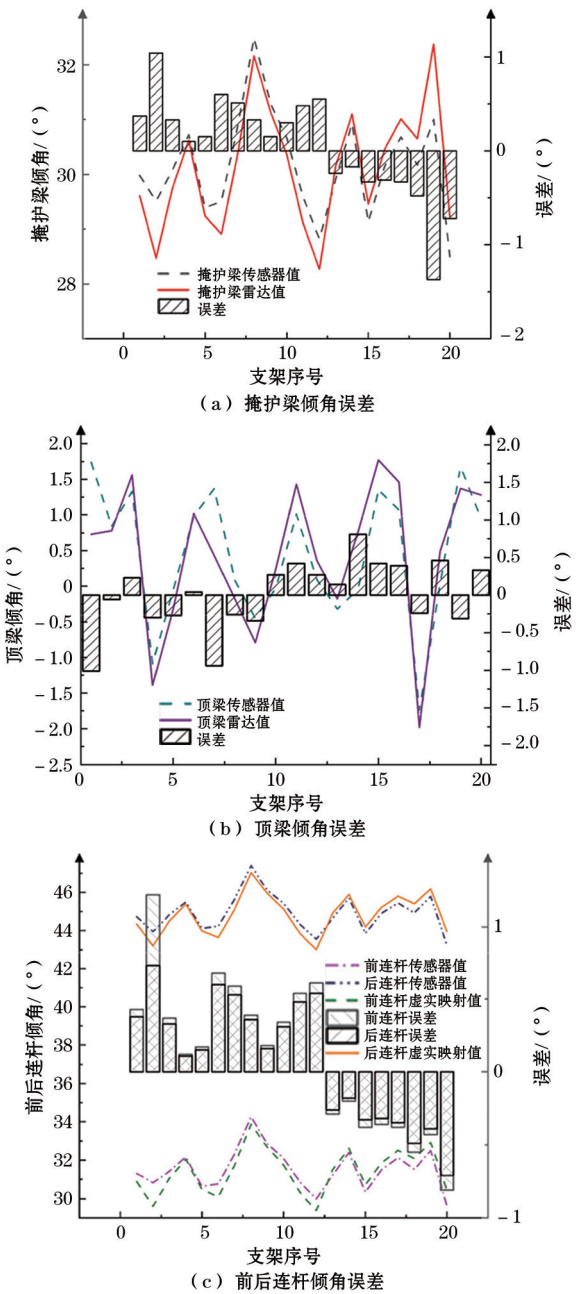



**图 7 液压支架主体结构倾角误差**

**Fig.7 Inclination angle errors of the main structure of the hydraulic support**

由图 7 可以明显地看出，液压支架的构件倾角误差存在以下明显的异常值：2 号和 19 号液压支架的掩护梁倾角误差分别为 1.04°和－1.37°，1 号液压支架的顶梁误差为－1.01°，2 号液压支架的前连杆倾角误差为 1.22°。出现异常值的主要原因是液压支架的底板存在明显的不平整现象，而底板的角度作为支架构件倾角的基准角度，其偏差直接影响了后续测量结果。进一步分析液压支架构件倾角误差，结果见表 3。

**表 3 液压支架各构件倾角误差**

**Table 3 Inclination anlge errors of each components of hydraulic support**

| 误差参数 | 排除异常值 | | 不排除异常值 | |
|---|---|---|---|---|
| | 最大误差/(°) | 平均绝对误差/(°) | 最大误差/(°) | 平均绝对误差/(°) |
| 前连杆倾角误差 | 0.81 | 0.40 | 1.22 | 0.43 |
| 掩护梁倾角误差 | 0.72 | 0.34 | 1.37 | 0.43 |
| 顶梁倾角误差 | 0.81 | 0.30 | 1.01 | 0.32 |
| 后连杆倾角误差 | 0.73 | 0.38 | 0.73 | 0.38 |

由表 3 可知，不排除异常值时，液压支架倾角的最大误差波动范围为[0.73°，1.37°]，液压支架倾角误差最大不超过 2°，平均绝对误差波动范围为[0.32°，0.43°]；排除异常值后，液压支架倾角的最大误差波动范围为[0.72°，0.81°]，液压支架倾角误差最大不超过 1°，平均绝对误差波动范围为[0.30°，0.40°]，整体呈明显的降低趋势。

## 6 结论

(1) 在 Unity3D 场景中设计了液压支架的虚拟交互界面，通过集成支架构件参数与虚实画面，直观呈现了液压支架的姿态变化。构建了基于已知支架信息的前后端交互系统，依托后端模型实时解算，并将结果与实际物理场景中液压支架的关键位姿进行对比，有效提升了虚实映射的效率和准确性。

(2) 提出了基于传感器与雷达融合的液压支架数字孪生仿真模型虚实同步映射方法。该方法实现了支架内部姿态的精确测量，误差控制在 2°以内，能够有效避免因单一传感器故障或煤尘浓度过高而导致的监测失准。试验结果表明，基于传感器融合的虚实映射方法显著提升了测量精度，动态监测误差由传统方法的±2.1°降低至±0.7°，静态误差由±0.5°优化至±0.2°。

(3) 本文以液压支架底座为基准，利用雷达测量得到的掩护梁角度与顶梁倾角，推导出了液压支架主体结构其余构件(包括前连杆角度、后连杆角

度、立柱的伸长量与倾角)的解析公式,并与倾角传感器参考值进行对比验证,确保了模型的准确性。相较于传统的全传感器方案,本系统传感器数量减少 40%(从 5 组降至 3 组),单台支架布线成本降低 35%。实验室连续 72 h 测试显示,系统数据丢包率低于 0.2%,姿态更新频率达 10 Hz,满足实时监测要求。

**参考文献**(References):


[1] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化:煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):349-357.

[2] 王国法.煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J].煤炭科学技术,2022,50(1):1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology,2022,50(1):1-27.

[3] 高有进,杨艺,常亚军,等.综采工作面智能化关键技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2021,49(8):1-22.
GAO Youjing, YANG Yi, CHANG Yajun, et al. Status and prospect of key technologies of intelligentization of fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology,2021,49(8):1-22.

[4] 刘相通,李曼,沈思怡,等.液压支架关键姿态参数测量系统[J].工矿自动化,2024,50(4):41-49.
LIU Xiangtong, LI Man, SHEN Siyi, et al. Measurement system for key attitude parameters of hydraulic support[J]. Journal of Mine Automation,2024,50(4):41-49.

[5] 李磊,许春雨,宋建成,等.基于 PSO-ELM 的综采工作面液压支架姿态监测方法[J].工矿自动化,2024,50(8):14-19.
LI Lei, XU Chunyu, SONG Jiancheng, et al. Attitude monitoring method for hydraulic support in fully mechanized working face based on PSO-ELM [J]. Journal of Mine Automation,2024,50(8):14-19.

[6] 王军.基于深度视觉和传感器融合的煤矿综采工作面液压支架姿态远程智能监测[J].煤矿机械,2024,45(9):193-196.
WANG Jun. Remote intelligent monitoring of hydraulic support posture in coal mine fully mechanized mining face based on depth vision and sensor fusion [J]. Coal Mine Machinery,2024,45(9):193-196.

[7] 谭金生.矿用液压支架姿态监控系统应用分析[J].机械管理开发,2024,39(8):247-248+251.
TI Jinsheng. Application analysis of mining hydraulic support attitude monitoring system [J]. Mechanical Management and Development,2024,39(8):247-248+251.

[8] 王国法,赵国瑞,胡亚辉.5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J].煤炭学报,2020,45(1):16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence [J]. Journal of China Coal Society,2020,45(1):16-23.

[9] 王晔,姚旭龙,于光远,等.基于多维数据挖掘的智能矿山安全隐患分析与管理[J].矿业研究与开发,2025,45(10):173-181.
WANG Ye, YAO Xulong, YU Guangyuan, et al. Analysis and management of safety hazards in intelligent mines based on multidimensional data mining[J]. Mining Research and Development,2025,45(10):173-181.

[10] 任怀伟,赵国瑞,周杰,等.智能开采装备全位姿测量及虚拟仿真控制技术[J].煤炭学报,2020,45(3):956-971.
REN Huaiwei, ZHAO Guorui, ZHOU Jie, et al. Key technologies of all position and orientation monitoring and virtual simulation and control for smart mining equipment [J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3):956-971.

[11] 杨崇浩,白国长.基于数字孪生的液压支架姿态监测[J].机床与液压,2023,51(22):39-44.
YANG Chonghao, BAI Guochang. Attitude monitoring of hydraulic support based on digital twin[J]. Machine Tool & Hydraulics,2023,51(22):39-44.

[12] HAO Zixiang, XIE Jiacheng, WANG Xuewen, et al. A method for reconstructing the pose of hydraulic support group based on point cloud and digital twin [J]. Measurement,2024,225:113977.

[13] ZENG Qingliang, XU Penghui, MENG Zhaosheng, et al. Posture and dynamics analysis of hydraulic support with joint clearance under impact load[J]. Machines,2023,11(2):159.

[14] 迟焕磊,袁智,曹琰,等.基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):153-161.
CHI Huanlei, YUAN Zhi, CAO Yan, et al. Study on digital twin-based smart fully-echanized coal mining workface monitoring technology[J]. Coal Science and Technology, 2021,49(10):153-161.

[15] 张坤,廉自生,谢嘉成,等.基于多传感器数据融合的液压支架高度测量方法[J].工矿自动化,2017,43(9):65-69.
ZHANG Kun, LIAN Zisheng, XIE Jiacheng, et al. Height measurement method of hydraulic support based on multi-sensor data fusion[J].Journal of Mine Automation,2017,43(9):65-69.

[16] 谢嘉成,杨兆建,王学文,等.虚拟现实环境下液压支架部件无缝联动方法研究[J].工程设计学报,2017,24(4):373-379.
XIE Jiacheng, YANG Zhaojian, WANG Xuewen, et al. Research of seamless linkage method for hydraulic support components under VR environment[J]. Chinese Journal of Engineering Design,2017,24(4):373-379.

[17] 黄鹤松,王飞,田成金,等.基于倾角传感器的矿用液压支架测高系统设计[J].煤炭科学技术,2018,46(3):124-129+193.
HUANG Hesong, WANG Fei, TIAN Chengjin, et al. Design on height measuring system of mine hydraulic powered support based on inclination sensor [J]. Coal Science and Technology,2018,46(3):124-129+193.

[18] 徐温博.液压支架相对位姿检测及数据在线显示技术[D].青岛:山东科技大学,2020.
XU Wenbo. Relative position and posture detection and online data display technology of hydraulic support [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.

[19] 张坤,孙政贤,刘亚,等.基于信息融合技术的超前液压支架姿态感知方法研究及实验验证[J].煤炭学报,2023,48(增刊1):345-356.
ZHANG Kun, SUN Zhengxian, LIU Ya, et al. Research and experimental verification of attitude perception method of advanced hydraulic support based on information fusion technology [J]. Journal of China Coal Society,2023,48(Suppl.1):345-356.

[20] 葛世荣,张晞,薛光辉,等.我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J].中国工程科学,2023,25(5):146-156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(5):146-156.

[21] 任满翊.无人化智能煤矿建设探索与实践[J].工矿自动化,2022,48(增刊1):27-29.
REN Manyi. Exploration and practice of unmanned intelligent coal mine construction [J]. Journal of Mine Automation,2022,48(Suppl.1):27-29.

[22] 王彬彬.基于三维点云的液压支架位姿监测方法[D].太原:太原理工大学,2022.
WANG Binbin. Position and attitude monitoring method of hydraulic upport based on 3D point cloud [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2022.