

## 基于运动姿态感知的综放支架主动控顶空间研究

曾庆良<sup>1</sup>, 雷小万<sup>1</sup>, 孟昭胜<sup>2,3</sup>, 万丽荣<sup>1</sup>, 班新亮<sup>1</sup>, 胡雨龙<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘要:**综放支架是综放采场关键支护与主动放煤装置, 其主动触支顶煤行为可有效引导顶煤智能有序破碎。为开展支架主动扰控顶煤理论及相关研究, 明确综放支架对顶煤的主动触支工作空间, 提出一种综放支架各部件相对空间姿态及绝对空间位姿动态感知方法, 以期提升综放支架对顶煤破碎过程可控性。首先, 借助 Denavit-Hartenberg (D-H) 方法建立了综放支架空间姿态数学模型, 分析得到支架顶梁和放煤机构在各关节节点坐标系与本体坐标系下坐标, 明确了综放支架各关键部件之间的相对姿态及运动耦合关系; 在此基础上建立了综放工作面全局感知模型并求解得到了支架的绝对空间位姿数据, 获得了工作面顶板、底板倾角对综放支架空间支护姿态影响。其次, 提出并计算了综放支架顶梁触支空间和放煤机构支护空间分布模型, 获得了综放支架对顶煤的主动调控范围, 同时使用初值优选的 Levenberg-Marquardt (L-M) 优化算法探究支架主动触顶姿态的调控方法与立柱的有效驱动行程。最后, 搭建了支架姿态数据采集系统, 依托山东省菏泽市赵楼煤矿 7303 综放工作面获取了支架运动过程中真实空间姿态参数数据, 对比理论解算数据与传感器实测数据, 验证了该空间位姿测量方法的可行性与准确性。结果表明, 使用该方法解算的顶梁姿态与传感器测量结果重合率达 98.26%, 为进一步提高支架的空间位姿感知技术提供了研究思路。

**关键词:**智能综放开采; 综放支架; 触支空间; 顶煤调控; 触顶姿态

中图分类号: TD67 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)01-0645-16

## Research on active roof control space of fully mechanized caving support based on motion posture perception

ZENG Qingliang<sup>1</sup>, LEI Xiaowan<sup>1</sup>, MENG Zhaosheng<sup>2,3</sup>, WAN Lirong<sup>1</sup>, BAN Xinliang<sup>1</sup>, HU Yulong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Cofounded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The fully mechanized top-coal caving support is a critical device that serves both as a support mechanism and an active means for top-coal caving in fully mechanized top-coal caving mining operations. Proactive engagement and reinforcement of the top-coal can effectively guide its intelligent and orderly fragmentation. To investigate the theory of active perturbation and control of the top-coal by the support system, as well as to clarify the dynamic interaction and sup-

收稿日期: 2024-05-10 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0552

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U23A20599, 52104164, 52274132)

作者简介: 曾庆良 (1964—), 男, 山东高密人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: qlzeng@sdust.edu.cn

通讯作者: 孟昭胜 (1991—), 男, 山东聊城人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: skdmzs@163.com

引用格式: 曾庆良, 雷小万, 孟昭胜, 等. 基于运动姿态感知的综放支架主动控顶空间研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 645-660.

ZENG Qingliang, LEI Xiaowan, MENG Zhaosheng, et al. Research on active roof control space of fully mechanized caving support based on motion posture perception[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 645-660.



移动阅读

port space between the fully mechanized top-coal caving support and the top-coal, a dynamic perception method has been proposed. This method aims to enhance the controllability of the top-coal fragmentation and caving process by accurately perceiving the relative spatial postures of various components and the absolute spatial position and orientation of the fully mechanized top-coal caving support. Firstly, utilizing the Denavit-Hartenberg (D-H) method, a mathematical model of the spatial posture of the fully mechanized top-coal caving support is established. Through this analysis, the coordinates of the support's canopy beam and top-coal caving mechanism in both the coordinate systems of each joint node and the body coordinate system are determined, thereby elucidating the relative postures and motion coupling relationships among the key components of the fully mechanized top-coal caving support. Building on this foundation, a global perception model for the fully mechanized top-coal caving working face is constructed, allowing for the derivation of absolute spatial position and orientation data of the support. Additionally, the influence of the dip angles of the working face roof and floor on the spatial support posture of the fully mechanized top-coal caving support is analyzed. Secondly, distribution models for the contact support space of the top beam and the support space of the coal caving mechanism in fully mechanized top-coal caving supports were developed and calculated. This process yielded the active regulation range of the fully mechanized top-coal caving support for managing the top-coal. Simultaneously, the Levenberg-Marquardt (L-M) optimization algorithm, initialized with preferred values, was employed to investigate the regulation method for achieving the optimal active contact posture of the support and determining the effective driving stroke of the upright post. Finally, a support posture data acquisition system was established. Utilizing the 7303 fully mechanized top-coal caving working face in Zhaolou Coal Mine, Heze City, Shandong Province, real-time spatial posture parameter data during the movement of the support were collected. By comparing the theoretically calculated data with the sensor-measured data, the feasibility and accuracy of the spatial position and orientation measurement method were validated. The results indicate that the coincidence rate between the Top beam posture calculated by this method and the sensor-measured results reaches 98.26%. This study provides a valuable research direction for further enhancing the spatial position and orientation perception technology of the support.

**Key words:** intelligent fully mechanized caving mining; top coal caving hydraulic support; contact and support space; roof control; touching top attitude

## 0 引 言

我国资源赋存具有典型的多煤、少油、贫气特征,煤炭是我国重要的基础能源和工业原料,保障煤炭工业高质量发展对我国能源安全和经济稳定具有重要支撑作用。在我国丰富的煤层资源赋存中,厚煤层约占 40% 以上,如何安全、高效、智能地实施厚煤层开采是我国煤炭行业需长期探索的重大难题。国家能源局在 2023 年颁布了《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》<sup>[1-2]</sup>,以期科学有序地推进煤矿智能化建设进程。

目前我国针对厚煤层开采主要有分层开采、综放开采及大采高一次采全厚等方式,其中综放开采方法因其前期投入少、回报率高等优势,是我国厚及特厚煤层开采主流解决方案之一<sup>[3-8]</sup>。由于综放开采天然条件限制,顶煤通常在顶板压力、重力及支架反复支撑载荷联合作用下自然垮落,这一过程可控性差且较坚硬煤层难以及时破碎(冒放性差)<sup>[9-10]</sup>,因此为提升综放开采智能化水平,亟需提出主动扰控顶煤的方法,

以提高综放开采顶煤冒放行为的可控性。综放支架是综放开采技术的核心支护装备,一方面其需要支护采场顶板,维护工作面安全作业空间;另一方面其主动支撑-触碰顶煤,直接影响顶煤碎落进程<sup>[11-13]</sup>。随综放支架触顶区域、触顶姿态、触顶速度变化,其会对顶煤形成不同的扰动效果,因此通过研究限定空间条件下综放支架对顶煤的扰动机制,可有助于综放支架主动引导顶煤有序放落,提高综放工作面开采效率<sup>[14-16]</sup>。基于此,笔者提出综放支架空间支护姿态动态感知方法,以期实现对综放支架姿态的实时感知以及明确支架对顶煤的主动调控空间,从而为综放支架智能、主动调控顶板提供理论支撑,以保障综放工作面的安全、高效生产。

为明确综放支架有效控顶区域,必须研究综放支架各部件的空间姿态。鉴于综放支架运行姿态对其智能化管控具有重要意义,国内外众多专家学者针对支架位姿监测在参数解析、视觉感知、虚拟监测、多信号融合感知等领域开展了大量有益研究。在参数解析领域,庞义辉等<sup>[17]</sup>基于液压支架骨架模型,提出

了基于千斤顶行程驱动的液压支架姿态与高度解析方法。路绪良等<sup>[18]</sup>提出一种液压支架逆向运动学分析方法, 并采用粒子群算法求解出液压支架各驱动部件运动轨迹。柳华杰等<sup>[19]</sup>利用传感器获取立柱位移参数, 并通过 GA-Broyden 算法求解液压支架姿态来驱动虚拟样机模型, 实时显示液压支架运动状态。王国法等<sup>[20]</sup>基于支架与围岩的强度、刚度以及稳定性耦合关系, 提出以支架围岩适应性综合评价指数为核心的评价模型。杜毅博<sup>[21]</sup>研究了快速获取液压支架支护状态及模糊综合评价方法, 确定评价关键参数, 建立了模糊综合评价模型。ZHANG 等<sup>[22]</sup>建立了液压支架自主跟机模型, 求解支架支护位姿和推移位姿, 并基于 BP 神经网络实现了支架位姿空间向驱动空间的转换。陈冬方等<sup>[23]</sup>提出了一种基于液压支架倾角的采煤高度测量方法, 通过改变倾角传感器的安装位置以及使用卡尔曼滤波方法提高了测量精度。LI-ANG 等<sup>[24]</sup>建立了两柱掩护式液压支架姿态监测系统, 通过设计光纤布拉格光栅倾角传感器, 获得了液压支架生产过程中的动态姿态。YANG 等<sup>[25]</sup>提出了一种“动态复位”的液压支架姿态和直线度监测方法, 通过激光雷达测量液压支架相对于检测机器人的位姿。在视觉感知领域, WANG 等<sup>[26]</sup>用 3 台 RGB-D 相机获取液压支架群不同角度的点云数据, 使用 SAC-IA 与 ICP 相结合的方法计算单个液压支架的姿态。任怀伟等<sup>[27]</sup>通过在液压支架顶梁上安装深度相机, 利用视觉和图像处理技术获得液压支架的实时支撑高度和顶梁姿态角。张旭辉等<sup>[28]</sup>在液压支架上安装红外 LED 标识板并利用安装在采煤机上的防爆相机进行图像采集, 通过解算获得支架底座姿态。CHEN 等<sup>[29]</sup>提出基于视觉的液压支架位移和姿态角检测方法, 通过双目摄像机对支架进行图像采集与立体校正, 以获取液压支架姿态。在虚拟监测领域, XIE 等<sup>[30]</sup>提出在虚拟现实环境下对液压支架姿态进行感知和预测, 通过模型预测数据与传感器实测数据相对比确定液压支架运行状态。李娟莉等<sup>[31]</sup>提出分布式液压支架群虚拟监测方法, 实时进行驱动数据的运算和传输, 增加了系统的稳定性和计算效率。韩哲等<sup>[32]</sup>提出了一种基于 LoRaWAN 液压支架状态监测系统, 提高了现有监测系统的稳定性和抗干扰能力。王学文等<sup>[33]</sup>基于 VR 和 AR 技术融合, 搭建了综采工作面智能监控体系, 实现综采装备识别跟踪、虚实融合等功能。谢嘉成等<sup>[34]</sup>运用虚拟运动仿真方法研究了销轴间隙对于液压支架横向稳定性的影响, 并为含间隙液压支架位姿求解提供了参考。在多信号融合感知领域, CHEN 等<sup>[35]</sup>提出了基于超声波传感器与倾角传感器融合的

液压支架姿态监测方法, 并搭建实验台实现了液压支架姿态的监测。赵校朋等<sup>[36]</sup>采用多传感器数据融合技术, 实时监控液压支架运行状态, 实现了支架的故障自诊断和自适应控制。LU 等<sup>[37]</sup>基于陀螺仪、加速度传感器、磁强计等内置传感器的互补特点设计了一套机电惯性感性导航系统组成的液压支架姿态测量系统。张坤等<sup>[38]</sup>提出一种基于超声波测距传感器和九轴姿态传感器信息融合的超前液压支架组姿态感知方法, 实现了对超前液压支架组空间姿态的动态融合感知。

上述学者通过在液压支架不同位置布置角度传感器、行程传感器、超声波传感器、深度相机等智能感知装置, 研究了液压支架的位姿求解与支护状态感知方法, 为液压支架姿态智能感知提供了大量有益借鉴, 但现有研究基本未定量分析综放支架空间位姿的实时变化以及支架对顶煤的有效触支空间。基于此, 笔者提出综放支架空间姿态动态感知方法研究, 通过求解支架在综放工作面的绝对位姿, 分析支架的触顶空间和支护空间, 并探究支架对顶煤的主动调控机理, 明确支架的有效调控驱动行程。

## 1 综放支架空间姿态感知方法

综放工作面支架与围岩空间位置关系如图 1 所示。为明确综放支架对顶煤的有效支护姿态和触支空间, 必须首先求解支架各部件的准确空间姿态。基于此, 依托于山东省菏泽市赵楼煤矿 7303 综放工作面选用的 ZF17000/22/42 型四柱式综放支架开展研究 (5305 工作面采用相同架型), 首先建立其本体空间姿态求解模型, 分析综放支架顶梁和放煤机构在各连杆节点坐标系以及底座本体坐标系下空间相对姿态坐标; 其次, 建立综采工作面液压支架空间姿态感知

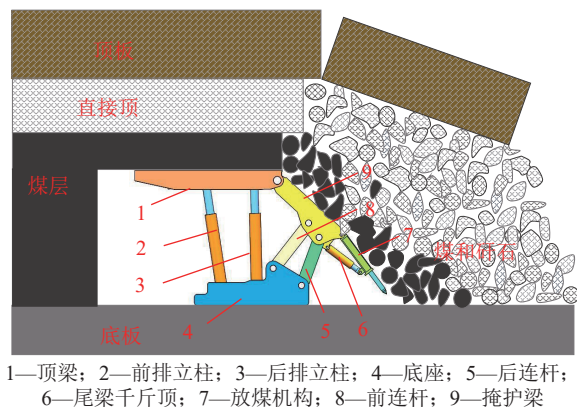


图 1 综放支架与围岩空间位置关系

Fig.1 Spatial position relationship diagram of caving support and surrounding rock

模型,分析基于综放工作面全局坐标系下综放支架空间绝对姿态坐标。

### 1.1 液压支架相对空间姿态分析

综放支架结构关于其中间平面完全对称,可将综放支架在对称平面上视为具有 4 个原动件的三维机构,建立其运动学模型。根据 D-H 理论分别建立综放支架本体坐标系  $\{O_0\}$  与各连杆坐标系<sup>[39-41]</sup>,其中  $\{O_1\}$  为底座坐标系、 $\{O_2\}$  为后连杆坐标系、 $\{O_3\}$  和  $\{O_3'\}$  为掩护梁坐标系、 $\{O_4\}$  为顶梁坐标系、 $\{O_4'\}$  为尾梁坐标系、 $\{O_5\}$  为尾梁插板坐标系,各坐标系原点分别为  $O$ 、 $K$ 、 $J$ 、 $E$ 、 $G$ 、 $M$ 、 $G$ 、 $Q$ 。其中,  $Z_i$  轴沿关节轴方向,  $X_i$  轴为  $Z_i$  轴和  $Z_{i+1}$  轴公垂线方向,并由  $Z_i$  轴指向  $Z_{i+1}$  轴,  $Y_i$  轴按照右手法则确定。如图 2 所示,其中  $A$  为前立柱与底座铰接点;  $B$  为后立柱与底座铰接点;  $C$  为前立柱与顶梁铰接点;  $D$  为后立柱与顶梁铰接点;  $E$  为顶梁与掩护梁铰接点;  $F$  为掩护梁与前连杆铰接点;  $G$  为掩护梁与尾梁铰接点;  $J$  为掩护梁与后连杆铰接点;  $H$  为前连杆与底座铰接点;  $O$  为底座上固定点;  $K$  为后连杆与底座铰接点;  $M$  为顶梁前端点;  $N$  为掩护梁与尾梁千斤顶铰接点;  $P$  为尾梁千斤顶与尾梁铰接点;  $Q$  为尾梁插板末端点。

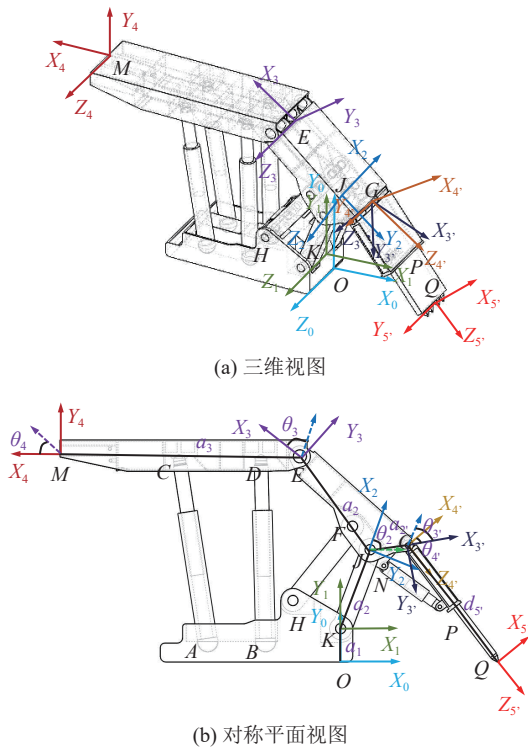


图 2 综放支架连杆坐标系

Fig.2 Coal caving support connecting rod coordinate system

根据综放支架的运动学模型,分别给出顶梁与放煤机构的 D-H 参数(表 1)。

表 1 顶梁 D-H 参数

Table 1 Top beam D-H parameter table

连杆 <i>i</i>	旋转角 $\theta_i/(\circ)$	扭转角 $\alpha_i/(\circ)$	连杆偏距 $d_i/\text{mm}$	连杆长度 $a_i/\text{mm}$
1	$\theta_1(0)$	0	0	$a_1$
2	$\theta_2$	0	0	$a_2$
3	$\theta_3$	0	0	$a_3$
4	$\theta_4$	0	0	$a_4$

注:  $a_i$  为沿  $X_i$  轴,从  $Z_i$  轴移动到  $Z_{i+1}$  轴的距离;  $\alpha_i$  为绕  $X_i$  轴,从  $Z_i$  轴旋转到  $Z_{i+1}$  轴的角度;  $d_i$  为沿  $Z_i$  轴,从  $X_{i-1}$  轴移动到  $X_i$  轴的距离;  $\theta_i$  为绕  $Z_i$  轴,从  $X_{i-1}$  轴旋转到  $X_i$  轴的角度。

两相邻坐标系  $\{O_i\}$  到  $\{O_{i+1}\}$  的变换可通过“绕  $X_i$  轴旋转  $\alpha_i$ →沿  $X_i$  轴平移  $a_i$ →绕  $Z_i$  轴旋转  $\theta_i$ →沿  $Z_i$  轴平移  $d_i$ ”实现,其变换矩阵可表示为

$${}_{i+1}^i T = \text{rot}(x, \alpha_i) \text{trans}(a_i, 0, 0) \text{rot}(z, \theta_i) \text{trans}(0, 0, d_i) \quad (1)$$

由欧拉变换矩阵连乘可算出式(1),即可得  ${}_{i+1}^i T$  的变换通式为

$${}_{i+1}^i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

顶梁的端点所在坐标系  $\{O_4\}$  到支架本体坐标系  $\{O_0\}$  的变换矩阵为

$${}^0 T = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 T = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $(p_x \ p_y \ p_z)^T$  为液压支架顶梁前端点的位置矢量,  $(a_x \ a_y \ a_z)^T$  为顶梁前端点的接近矢量,  $(o_x \ o_y \ o_z)^T$  为顶梁前端点的方向矢量,  $(n_x \ n_y \ n_z)^T$  为顶梁端点的法向矢量。

同理,放煤机构尾梁插板末端点所在坐标系  $\{O_5\}$  到支架本体坐标系  $\{O_0\}$  的变换矩阵为

$${}^0 T = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 T = \begin{bmatrix} \mathbf{T}' & \mathbf{P}' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x' & o_x' & a_x' & p_x' \\ n_y' & o_y' & a_y' & p_y' \\ n_z' & o_z' & a_z' & p_z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $(p_x' \ p_y' \ p_z')^T$  为液压支架放煤机构尾梁插板末端点的位置矢量,  $(a_x' \ a_y' \ a_z')^T$  为放煤机构尾梁插板末端点的接近矢量,  $(o_x' \ o_y' \ o_z')^T$  为放煤机构尾梁插板末端点的方向矢量,  $(n_x' \ n_y' \ n_z')^T$

为放煤机构尾梁插板末端点的法向矢量。

由式 (2)、(3) 联立并代入表 1 中相关参数, 可解得顶梁前端点  $M$  到支架本体坐标系的转换矩阵为

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} c_{234} & -s_{234} & 0 & a_4c_{234} + a_2c_2 + a_1 + a_3c_{23} \\ s_{234} & c_{234} & 0 & a_4s_{234} + a_2s_2 + a_3s_{23} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ ,  $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ ,  $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ ,  $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ ,  $c_2 = \cos \theta_2$ ,  $s_2 = \sin \theta_2$ 。

由式 (2)、(4) 联立并代入表 2 中相关数据, 可解得放煤机构尾梁插板末端点  $Q$  到支架本体坐标系的转换矩阵为

表 2 放煤机构 D-H 参数

Table 2 D-H parameter table of coal caving mechanism

连杆 $i$	旋转角 $\theta_i/^\circ$	扭转角 $\alpha_i/^\circ$	连杆偏距 $d_i/\text{mm}$	连杆长度 $a_i/\text{mm}$
1	$\theta_1(0)$	0	0	$a_1$
2	$\theta_2$	0	0	$a_2$
3'	$\theta_{3'}$	0	0	$a_{3'}$
4'	$\theta_{4'}$	90	0	0
5'	$\theta_{5'}(0)$	0	$d_{5'}$	0

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} c_{23'4'} & 0 & s_{23'4'} & a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23'} + d_{5'}s_{23'4'} \\ s_{23'4'} & 0 & -c_{23'4'} & a_2s_2 + a_3s_{23'} - d_{5'}c_{23'4'} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $c_{23'4'} = \cos(\theta_2 + \theta_{3'} + \theta_{4'})$ ,  $s_{23'4'} = \sin(\theta_2 + \theta_{3'} + \theta_{4'})$ ,  $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_{3'})$ ,  $c_{23'} = \cos(\theta_2 + \theta_{3'})$ ,  $c_2 = \cos \theta_2$ ,  $s_2 = \sin \theta_2$ 。

### 1.2 综放支架绝对空间位姿分析

赵楼煤矿 7303 工作面煤层整体走向以 N、NE 向为主, 面内宽缓褶曲发育, 整体趋势西北高东南低, 工作面的俯角为  $5^\circ$ 、倾斜角为  $3.5^\circ$ , 回采走向平均长为 995.35 m、面长平均为 231.7 m, 正常情况下采高为 3.5 m(最大采高不大于 4.0 m, 最小不低于 2.8 m), 由于工作面存在一定倾角, 导致支架在推移过程中存在偏扭行为。将直接底和基本底简化为底板, 将煤层与煤夹矸层简化为煤层, 根据煤层与顶、底板信息建立综放支架支护顶煤空间位姿模型, 并选取底板与综放支架接触点  $S$  建立综采工作面全局坐标系  $\{S\}$ , 以水平指向采空区为  $X$  轴, 竖直指向顶煤为  $Y$  轴, 沿工作面水平方向为  $Z$  轴, 建立模型如图 3 所示。

在支架本体坐标系  $\{O_0\}$  下无法表示出综放支架的航向偏角与横向翻滚角, 为了准确表达出支架在空间中的位置与姿态, 将综放支架各点在本体坐标系下

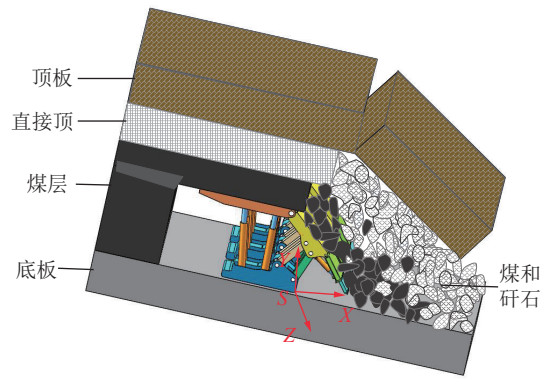


图 3 综放工作面全局坐标系

得到的坐标值和位置矢量通过坐标转换, 得到综放支架在工作面全局坐标系下的坐标和位置矢量, 即空间中的绝对位姿。将图 2 中支架本体坐标系  $\{O_0\}$  在工作面全局坐标系  $\{S\}$  中进行投影如图 4 所示。

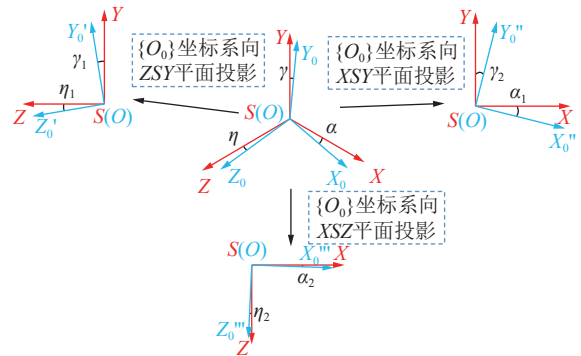


图 4 “本体”-“全局”坐标系转换关系

Fig.4 “Ontology” - “global” coordinate system transformation relationship

求解支架本体坐标系  $\{O_0\}$  转换至工作面全局坐标系  $\{S\}$  的转换矩阵时, 定义滚动角度  $\chi$  为绕  $X$  轴旋转角, 俯仰角度  $\phi$  为绕  $Z$  轴旋转角, 偏航角度  $\psi$  为绕  $Y$  轴旋转角, 从支架本体坐标系  $\{O_0\}$  到工作面全局坐标系  $\{S\}$  需经过 3 次单轴旋转, 即先绕全局坐标系的  $X$  轴旋转  $\chi$ 、再绕  $Y$  轴旋转  $\psi$ 、最后绕  $Z$  轴旋转  $\phi$ , 旋转矩阵求解如下:

$$\mathbf{R}(\chi, \phi, \psi) = \text{rot}(z, \phi)\text{rot}(y, \psi)\text{rot}(x, \chi) = \begin{bmatrix} c\phi c\psi & c\phi s\psi s\chi - s\phi c\chi & c\phi s\psi c\chi + s\phi s\chi & 0 \\ s\phi c\psi & s\phi s\psi s\chi + c\phi c\chi & s\phi s\psi c\chi - c\phi s\chi & 0 \\ -s\psi & c\psi s\chi & c\psi c\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $\text{rot}(x, \chi)$ ,  $\text{rot}(y, \psi)$  和  $\text{rot}(z, \phi)$  分别表示绕  $X$  轴旋转  $\chi$ 、 $Y$  轴旋转  $\psi$  和  $Z$  轴的旋转  $\phi$ ;  $\mathbf{R}(\chi, \phi, \psi)$  为支架本体坐标系到全局坐标系的组合旋转矩阵。式 (7) 中,  $s\chi = \sin \chi$ ,  $s\psi = \sin \psi$ ,  $s\phi = \sin \phi$ ,  $c\chi = \cos \chi$ ,  $c\psi = \cos \psi$ ,  $c\phi = \cos \phi$ 。故顶梁前端点  $M$  转换至全局坐标系下的

变换矩阵为

$$T_{\text{abs}} = \mathbf{R}(\chi, \phi, \psi)_4^0 \mathbf{T} \quad (8)$$

由式 (5)、式 (7)、式 (8) 可得顶梁前 endpoint  $M$  在全局坐标系下的法向矢量为

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} c_{234}c\phi c\psi - s_{234}(c\chi s\phi - c\phi s\chi s\psi) \\ s_{234}(c\chi c\phi + s\chi s\phi s\psi) + c_{234}c\psi s\phi \\ s_{234}c\psi s\chi - c_{234}s\psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

$M$  点在全局坐标系下的方向矢量为

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} c\phi c\psi(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2 + a_4c_{234}) - (c\chi s\phi - c\phi s\chi s\psi)(a_3s_{23} + a_2s_2 + a_4s_{234}) \\ (c\chi c\phi + s\chi s\phi s\psi)(a_3s_{23} + a_2s_2 + a_4s_{234}) + c\psi s\phi(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2 + a_4c_{234}) \\ c\psi s\chi(a_3s_{23} + a_2s_2 + a_4s_{234}) - s\psi(a_1 + a_3c_{23} + a_2c_2 + a_4c_{234}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

同理, 尾梁 endpoint  $Q$  转换至全局坐标系下的变换矩阵为

$$T_{\text{abs}} = \mathbf{R}(\chi', \phi', \psi')_5^0 \mathbf{T} \quad (13)$$

由式 (6)、(7)、(13) 可得尾梁 endpoint  $Q$  在全局坐标系下的法向矢量为

$$\begin{bmatrix} n_x' \\ n_y' \\ n_z' \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} c_{23'4'}c\phi'c\psi' - s_{23'4'}(c\chi's\phi' - c\phi's\chi's\psi') \\ s_{23'4'}(c\chi'c\phi' + s\chi's\phi's\psi') + c_{23'4'}c\psi's\phi' \\ s_{23'4'}c\psi's\chi' - c_{23'4'}s\psi' \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} p_x' \\ p_y' \\ p_z' \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} c\phi'c\psi'(a_1 + a_3c_{23'} + a_2c_2 + d_5s_{23'4'}) - (c\chi's\phi' - c\phi's\chi's\psi')(a_3s_{23'} + a_2s_2 - d_5c_{23'4'}) \\ (c\chi'c\phi' + s\chi's\phi's\psi')(a_3s_{23'} + a_2s_2 - d_5c_{23'4'}) + c\psi's\phi'(a_1 + a_3c_{23'} + a_2c_2 + d_5s_{23'4'}) \\ c\psi's\chi'(a_3s_{23'} + a_2s_2 - d_5c_{23'4'}) - s\psi'(a_1 + a_3c_{23'} + a_2c_2 + d_5s_{23'4'}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 2 综放支架触支空间求解

相较于普通综采液压支架, 综放支架可通过前排立柱、后排立柱、尾梁千斤顶、尾梁插板千斤顶等 4 个驱动机构实现顶梁和放煤机构的空间位置调节, 可将顶梁前端活动范围的集合和放煤机构尾梁插板的末端活动范围的集合分别作为两机构的工作空间。通过求解顶梁与放煤机构的工作空间可确定支架对顶煤的有效触支空间, 有效触支空间内支架可对顶煤进行主动扰动和调控, 以期控制顶煤破碎形态和破碎位置。

### 2.1 综放支架各部件几何约束分析

本节通过建立综放支架的几何约束模型, 求解其几何约束关系, 为后续求解支架工作空间提供相关参数。综放支架在分析其运动学时区别于一般工业机器人, 各连杆绕铰接点旋转的角度大小, 不仅受各连杆可转动范围的限制, 且因液压支架几何结构的约束, 各连杆旋转角度大小的取值存在相互约束。故通过建立综放支架几何运动关系, 确定各连杆绕铰接点转动角度取值范围及相互约束关系。

$$\begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} -c_{234}(c\chi s\phi - c\phi s\chi s\psi) - s_{234}c\phi c\psi \\ c_{234}(c\chi c\phi + s\chi s\phi s\psi) - s_{234}c\psi s\phi \\ s_{234}s\psi + c_{234}c\psi s\chi \end{bmatrix} \quad (10)$$

$M$  点在全局坐标系下的接近矢量为

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} s\chi s\phi + c\chi c\phi s\psi \\ c\chi s\phi s\psi - c\phi s\chi \\ c\chi c\psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

$M$  点在全局坐标系下的位置矢量为

$Q$  点在全局坐标系下的方向矢量为

$$\begin{bmatrix} o_x' \\ o_y' \\ o_z' \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} s\chi's\phi' + c\chi'c\phi's\psi' \\ c\chi's\phi's\psi' - c\phi's\chi' \\ c\chi'c\psi' \end{bmatrix} \quad (15)$$

$Q$  点在全局坐标系下的接近矢量为

$$\begin{bmatrix} a_x' \\ a_y' \\ a_z' \end{bmatrix}_{\text{abs}} = \begin{bmatrix} c_{23'4'}(c\chi's\phi' - c\phi's\chi's\psi') + s_{23'4'}c\phi'c\psi' \\ s_{23'4'}c\psi's\phi' - c_{23'4'}(c\chi'c\phi' + s\chi's\phi's\psi') \\ -s_{23'4'}s\psi' - c_{23'4'}c\psi's\chi' \end{bmatrix} \quad (16)$$

$Q$  点在全局坐标系下的位置矢量为

以综放支架中间对称平面建立液压支架杆系结构如图 5 所示, 并在表 3 中列出 ZF17 000/22/42 型综放支架相关结构参数。为了便于表述以及统一, 综放支架杆系模型各铰接点仍用图 2 中对应字母进行标识, 并定义液压支架各连杆倾角为以底座为基准, 该连杆与平行于底座的基准线所形成的夹角。

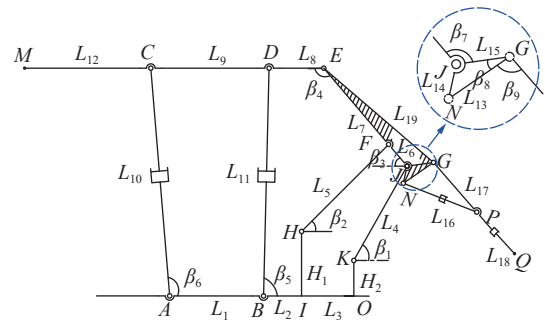


图 5 综放支架杆系结构

Fig.5 Rod system structure of coal caving support

根据几何约束关系, 在矢量环  $IHFJKO$ 、 $BDE-JKO$ 、 $ACDB$  中分别建立闭环矢量方程, 可得关于未知变量  $\beta_1 \sim \beta_6$  的非线性方程组如下

表 3 ZF17000/22/42 综放支架结构参数  
Table 3 Structural parameters of ZF17000/22/42  
caving support

序号	参数	符号	数值
1	AB/mm	$L_1$	1 045
2	BI/mm	$L_2$	445
3	IO/mm	$L_3$	875
4	HI/mm	$H_1$	1 475
5	KO/mm	$H_2$	670
6	KJ/mm	$L_4$	1 520
7	HF/mm	$L_5$	1 720
8	FJ/mm	$L_6$	530
9	EF/mm	$L_7$	1 570
10	DE/mm	$L_8$	710
11	CD/mm	$L_9$	1 470
12	AC/mm	$L_{10}$	监测量
13	BD/mm	$L_{11}$	监测量
14	CM/mm	$L_{12}$	2 395
15	NG/mm	$L_{13}$	520
16	NJ/mm	$L_{14}$	275
17	GJ/mm	$L_{15}$	535
18	NP/mm	$L_{16}$	监测量
19	GP/mm	$L_{17}$	1 450
20	PQ/mm	$L_{18}$	监测量
21	EG/mm	$L_{19}$	2 250
22	后连杆倾角/(°)	$\beta_1$	待测量
23	前连杆倾角/(°)	$\beta_2$	待测量
24	掩护梁倾角/(°)	$\beta_3$	待测量
25	顶梁倾角/(°)	$\beta_4$	待测量
26	后立柱倾角/(°)	$\beta_5$	待测量
27	前立柱倾角/(°)	$\beta_6$	待测量
28	$\angle FJG/(^\circ)$	$\beta_7$	104
29	$\angle JGN/(^\circ)$	$\beta_8$	30
30	$\angle NGP/(^\circ)$	$\beta_9$	$\beta_9 = \arccos \frac{L_{13}^2 + L_{17}^2 - L_{16}^2}{2L_{13}L_{17}}$

$$\begin{cases} f_1(\beta_i) = L_5 \cos \beta_2 + L_6 \cos \beta_3 - L_3 - L_4 \cos \beta_1 = 0 \\ f_2(\beta_i) = H_1 + L_5 \sin \beta_2 - L_6 \sin \beta_3 - H_2 - L_4 \sin \beta_1 = 0 \\ f_3(\beta_i) = L_{11} \cos \beta_5 + L_8 \cos \beta_4 + (L_7 + L_6) \cos \beta_3 - L_2 - \\ L_3 - L_4 \cos \beta_1 = 0 \\ f_4(\beta_i) = L_{11} \sin \beta_5 - L_8 \sin \beta_4 - (L_7 + L_6) \sin \beta_3 - H_2 - \\ L_4 \sin \beta_1 = 0 \\ f_5(\beta_i) = L_{10} \cos \beta_6 + L_9 \cos \beta_4 - L_1 - L_{11} \cos \beta_5 = 0 \\ f_6(\beta_i) = L_{10} \sin \beta_6 - L_9 \sin \beta_4 - L_{11} \sin \beta_5 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

在监测获取前、后排立柱长度  $L_{10}$ 、 $L_{11}$  后, 通过求

解非线性方程组 (18), 即可获得此时液压支架各部件间的几何约束关系, 即未知变量  $\beta_1 \sim \beta_6$  的值。

角  $\beta_1 \sim \beta_6$  为分析几何约束时液压支架各关键部件倾角, 角  $\theta_1 \sim \theta_5$  为分析液压支架运动学时各节点坐标系间转换角度, 通过两者之间数学定义, 可推导得二者之间转换关系如下

$$\begin{cases} \theta_1 = 0 \\ \theta_2 = \beta_1 \\ \theta_3 = \pi - \beta_1 - \beta_3 \\ \theta_4 = \beta_3 + \beta_4 \\ \theta_{3'} = \beta_1 + \beta_3 + \beta_7 - \pi \\ \theta_{4'} = \beta_8 + \beta_9 - \frac{\pi}{2} \\ \theta_{5'} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

根据式 (19) 的转换关系, 在求解出综放支架各部件之间几何约束关系后, 即可通过转换得到液压支架各节点坐标系间相互转换参数。

## 2.2 基于 L-M 算法的几何约束求解

本小节使用 MATLAB 作为运算平台, 鉴于最小二乘法在求解非线性方程组时具有快速、准确的特点, 选取最小二乘法中初值优选的 L-M 优化算法进行非线性方程组的解算<sup>[42]</sup>。求解综放支架在不同支护高度、顶梁不同俯仰、放煤机构不同摆角等相关变量影响下支架的几何约束情况以及各连杆的转角范围。L-M 优化算法详细步骤如下:

步骤 1: 用向量函数  $F(\beta)$  表示式 (18), 通过正态分布函数在参数区间范围内设置优选的初始参数向量  $\beta_0$ , 初始阻尼因子  $\lambda$ , 迭代终止条件  $\zeta$  及迭代次数  $k=0$ 。

步骤 2: 计算当前参数向量  $\beta_k$  对应的残差向量  $r_k$ , 雅可比矩阵  $J_k$  以及参数的增量向量  $\delta_{\beta_k}$ , 其中:  $r_k =$

$$F(\beta_k), J_k = \frac{\partial F}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\beta_i}, \delta_{\beta_k} = (J_k^T J_k + \lambda I)^{-1} J_k^T r_k。$$

步骤 3: 更新参数向量  $\beta_{k+1}$ , 并计算新的残差向量  $r_{k+1}$ 。其中:  $\beta_{i+1} = \beta_i + \delta_{\beta_i}$ ,  $r_{k+1} = F(\beta_{k+1})$ 。

步骤 4: 判断收敛性, 若满足  $r_{k+1} \leq \zeta$  或  $\delta_{\beta_k} \leq \zeta$  则结束迭代, 输出解向量  $\beta_{k+1}$ , 若不满足则进行下一步。步骤 5: 调整阻尼因子  $\lambda$ ; 若  $\|r_{k+1}\| < \|r_k\|$ , 则减小阻尼因子  $\lambda$ ; 若  $\|r_{k+1}\| \geq \|r_k\|$ , 则增大阻尼因子  $\lambda$ 。更新迭代次数  $k=k+1$ , 并返回步骤 2。

使用初值优选的 L-M 优化算法求解不同前、后排立柱长度下, 综放支架各关键构件几何约束角度的变化情况, 研究前、后排立柱长度对各约束角度的影响, 确定各关键构件相对于底座的位置。使用随机取值函数, 在前、后排立柱的取值范围内进行随机取值组合, 并使用 L-M 优化的最小二乘法求解各连杆的约束角度大小, 其结果如图 6 所示。

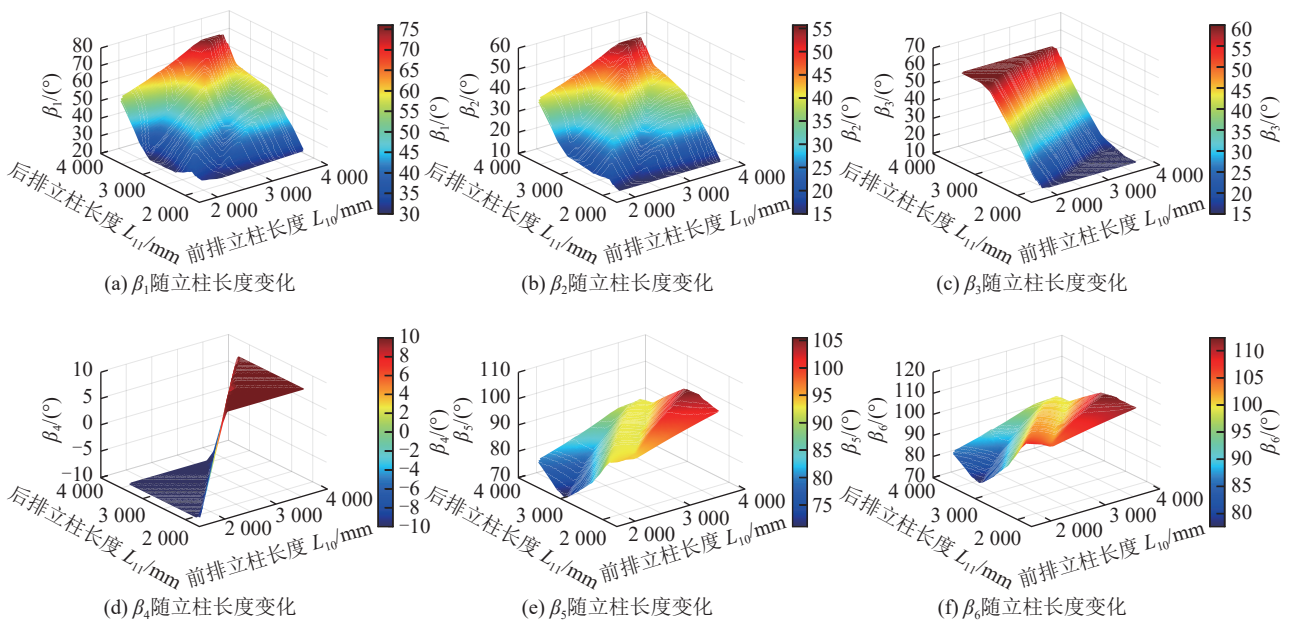


图 6 各部件几何约束角度随前、后排立柱长度变化情况

Fig.6 The geometric constraint angle of each component changes with the length of the front and rear columns.

根据支架结构参数,当前、后排立柱分别在最小长度(1 650 mm)至最大长度(3 600 mm)之间随机取值时,液压支架几何约束角度随前、后排立柱长度变化情况如下:

由图 6a、图 6b 可得,后连杆几何约束角度  $\beta_1$  和前连杆几何约束角  $\beta_2$  在随前、后排立柱长度的变化过程中具有相似的变化趋势,均随前、后排立柱长度的增加整体增大;当后排立柱长度保持不变时,随着前排立柱长度的增大而缓慢增大;当前排立柱长度保持不变时, $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别在后排立柱长度为 2 650 mm、3 500 mm 处形成转折节点,在转折节点后角度变化速率均增大。当前、后排立柱长度同时增大时, $\beta_1$ 、 $\beta_2$  迅速增大且在前、后排立柱长度均为最大时取得最大值分别为  $76^\circ$ 、 $55^\circ$ 。

由图 6c 可得,掩护梁几何约束角度  $\beta_3$  在后排立柱长度不变时,随前排立柱长度的增大缓慢减小。在前排立柱长度保持不变时, $\beta_3$  随后排立柱长度的增大而快速增大,且在后排立柱达到最大长度值时取得最大值  $60^\circ$ 。

由图 6d 可得,顶梁几何约束角度  $\beta_4$  在前排立柱长度保持不变时,随后排立柱长度增大而缓慢减小至最小值  $-10^\circ$ ,此时顶梁处于极限“低头”状态。在后排立柱长度保持不变时, $\beta_4$  随前排立柱长度的增大而缓慢增大至最大值  $10^\circ$ ,此时顶梁处于极限“抬头”位置。

由图 6e、图 6f 可得,在前排立柱长度保持不变时,前排立柱几何约束角度  $\beta_5$  和后排立柱几何约束角度  $\beta_6$  随后排立柱长度的增加而缓慢增大。在后排立柱

长度保持不变时,随着前排立柱长度的增大而快速增大。在前排立柱长度为最大值,后排立柱长度为 2 350 mm 时, $\beta_5$ 、 $\beta_6$  取得最大值分别为  $106^\circ$ 、 $113^\circ$ 。

### 2.3 综放支架支护空间求解

本小节基于前文所求解各节点坐标系转换角与几何约束角之间的转换关系,建立前、后排立柱长度变化引起的各节点坐标系转换角变化关系,从而确定各角度的取值范围,最终通过 Monte Carlo 法建立顶梁前端中点与尾梁末端中点的工作空间,进一步对综放支架的工作空间进行求解,从而得到支架主动触支顶煤的有效触支空间。

图 7 为各坐标转换角度值与前、后排立柱长度或尾梁千斤顶长度的关系图( $\theta_1$  与  $\theta_5$  的值均为 0,故不进行作图):

图 7a 为坐标系  $\{O_1\}$  到  $\{O_2\}$  的相对旋转角度  $\theta_2$  随前、后排立柱长度变化的情况, $\theta_2$  随前、后排立柱长度的增大而增大, $\theta_2$  的最小转角在前、后排立柱均为最小长度 1 650 mm 附近产生,最大转角在前后排立柱均为最大长度 3 600 mm 附近产生,且有多种组合可取得最小转角  $30^\circ$  以及最大转角  $76^\circ$ 。

图 7b 为坐标系  $\{O_2\}$  到  $\{O_3\}$  的相对旋转角度  $\theta_3$  随前、后排立柱长度变化的情况, $\theta_3$  随着前排立柱长度的增大而增大,随后排立柱长度的增大而减小, $\theta_3$  的最小转角在前、后排立柱长度均接近最大值 3 600 mm 时候取得为  $44^\circ$ , $\theta_3$  的最大转角值在前排立柱接近最大长度 3 600 mm 和后排立柱长度接近最小长度 1 650 mm 时取得为  $133^\circ$ 。

图 7c 为坐标系  $\{O_3\}$  到  $\{O_4\}$  的相对旋转角度  $\theta_4$  随

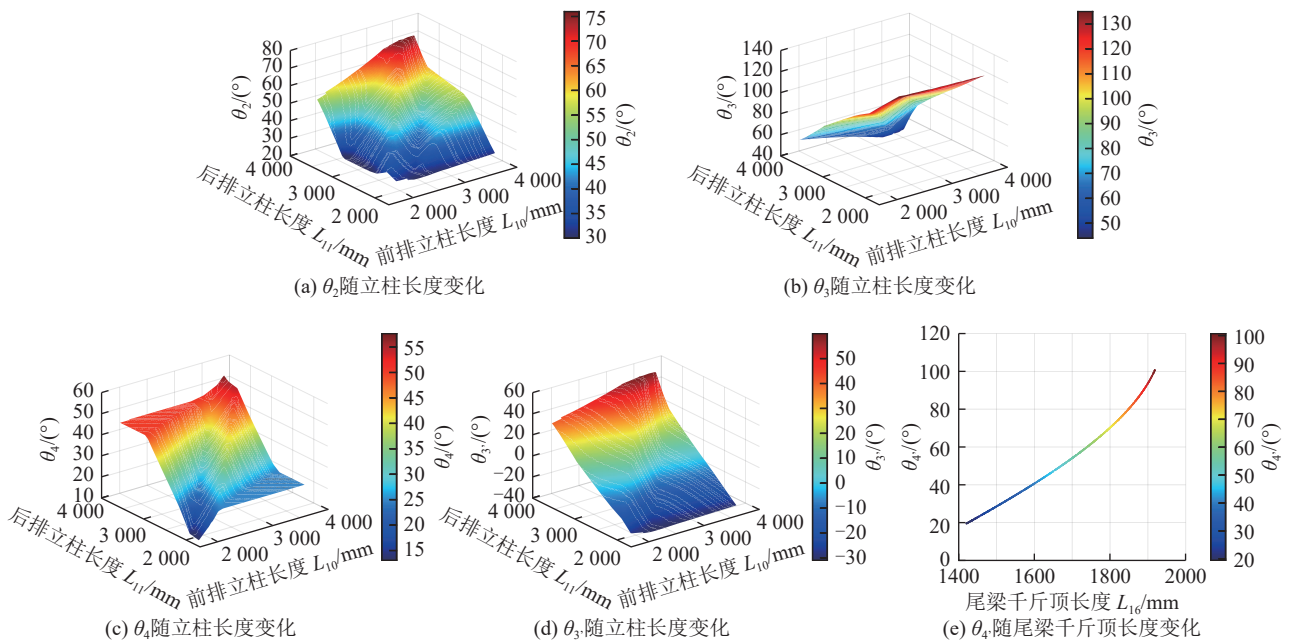


图 7 各相对转角随立柱及尾梁千斤顶长度变化图

Fig.7 The relative rotation angle with the column and the tail beam jack length change diagram.

前、后排立柱长度变化的情况,  $\theta_4$  随前、后排立柱长度的增大而增大, 且后排立柱的单位长度增量引起的  $\theta_4$  增量远大于前排立柱,  $\theta_4$  在前、后排立柱长度均接近最小值 1 650 mm 时取得最小转角为 12.7°, 在前、后排立柱长度均接近最大值 3 600 mm 时取得最大转角为 58°。

图 7d 为坐标系  $\{O_2\}$  到  $\{O_3\}$  的相对旋转角度  $\theta_3$  随前、后排立柱长度的变化情况,  $\theta_3$  随着前排立柱长度的增大而缓慢减小, 随后排立柱长度的增大而迅速增大,  $\theta_3$  的最小转角在前排立柱长度取最大值 3 600 mm 和后排立柱取最小值 1 650 mm 时取得为 -29.5°, 最大转角值在前后排立柱长度均为 3 600 mm 时取得为 60°,  $\theta_3$  在顺时针时取负值, 逆时针时取正值。

图 7e 为坐标系  $\{O_3\}$  到  $\{O_4\}$  的相对旋转角度  $\theta_4$  随尾梁千斤顶长度的变化情况,  $\theta_4$  的大小变化只与尾梁千斤顶长度  $L_{16}$  的变化有关,  $\theta_4$  随着  $L_{16}$  的增大而增大, 在  $L_{16}$  取最小值 1 420 mm 时取得最小转角为 19.5°, 在  $L_{16}$  取最大值 1 920 mm 时取得最大转角 101°,  $\theta_4$  在顺时针时取负, 逆时针时取正。

结合 2.1 节所求解的综放支架各连杆之间几何约束关系, 以及各节点坐标系转换角的范围, 使用 Monte Carlo 法分别求解顶梁前 endpoint  $M$  点与尾梁末端点  $Q$  点的工作空间<sup>[43]</sup>, 并在全局坐标系  $\{S\}$  中进行表达。由  $M$  点的工作空间点云图 (图 8) 可得顶梁前 endpoint  $M$  在综放支架各连杆的几何约束下所能达到的位置集合, 当顶梁处于极限“抬头”状态时可取得顶梁前端

点  $M$  的全局坐标系下的坐标为 (-4 934, 4 375, 347), 此时取得最大高度为 4 375 mm; 当顶梁处于极限“低头”状态时  $M$  点的坐标为 (-4 790, 815, 35), 此时取得最小高度值为 815 mm; 顶梁前 endpoint  $M$  在  $X$  轴上投影的最大前探距离在坐标为 (-5 113, 1 256, 76) 时取得为 5 113 mm; 顶梁前 endpoint  $M$  在  $X$  轴上投影的最小前探距离在坐标为 (-4 090, 3 862, 295) 时取得为 4 090 mm。

同理, 由  $Q$  点的工作空间点云图 (图 9) 可得尾梁末端点  $Q$  在各连杆的几何约束下所能达到的位置集合, 尾梁千斤顶与尾梁插板千斤顶的长度  $L_{16}$ 、 $L_{18}$  均取最大值时, 尾梁末端点  $Q$  在全局坐标系下的坐标为 (557, 2 420, 204), 此时取得  $Q$  点最大高度为 2 420 mm; 尾梁千斤顶与尾梁插板千斤顶的长度  $L_{16}$ 、 $L_{18}$  均取最小值时  $Q$  点坐标为 (2 338, 307, 12), 此时取得最小高度值为 307 mm,  $Q$  点在  $X$  轴上投影的最小值在坐标为 (522, 1 766, 143) 时取得为 522 mm,  $Q$  点在  $X$  轴上投影的最大值在坐标为 (2 909, 619, 38) 时取得为 2 909 mm。

### 3 综放支架主动控顶姿态调控分析

本节基于前文求解的综放支架对顶煤的主动触支空间, 分析综放支架主动控顶姿态调控方法。综放支架对顶煤的主动调控效果取决于顶梁的触顶姿态和触顶位置, 而综放支架的前、后排立柱作为支架的驱动机构, 支架各关键部件的空间姿态均随其长度的变化而发生联动。通过前、后排立柱长度的调控即可

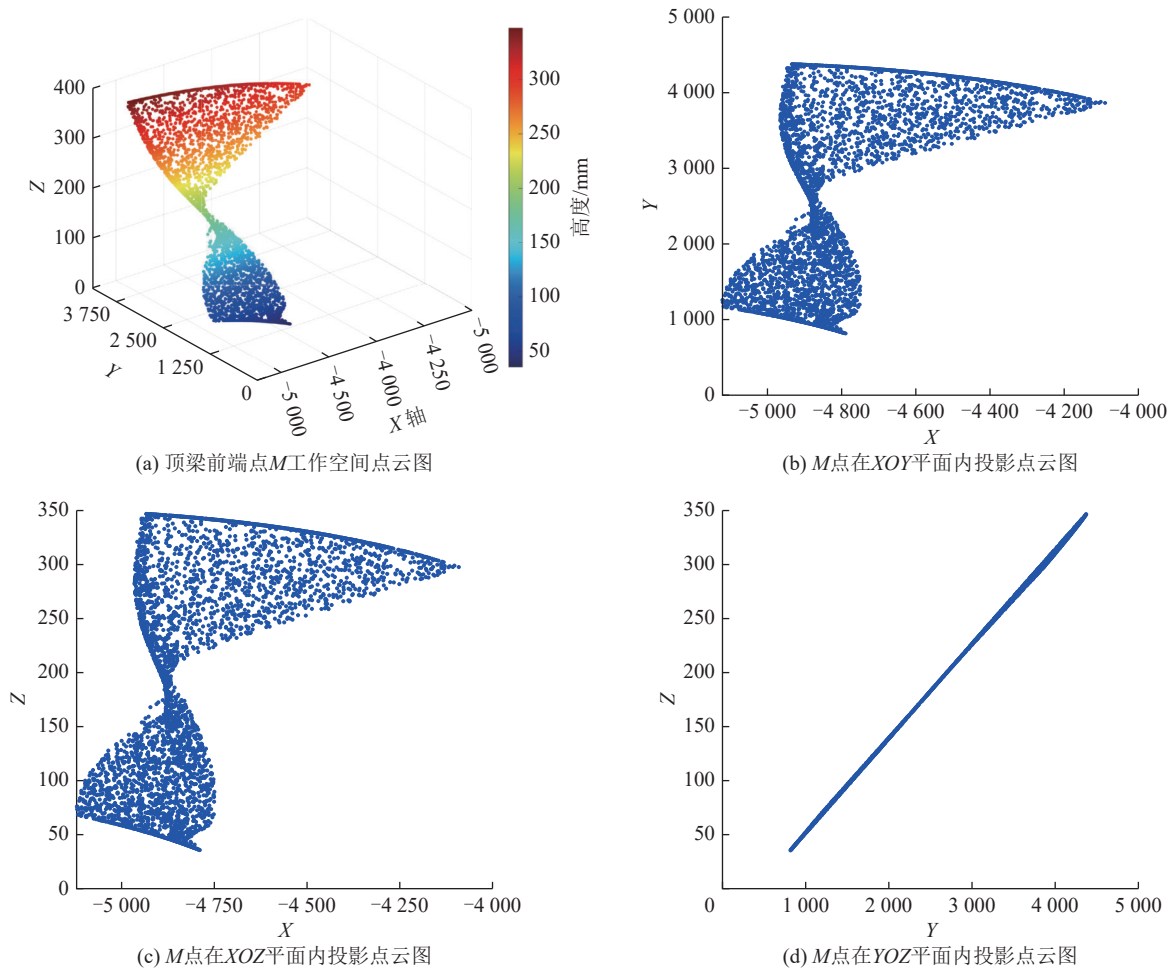


图 8 顶梁前端点 M 工作空间点云图

Fig.8 Top beam front end point M workspace points cloud diagram

实现顶梁触顶姿态的主动控制。

求解液压支架前、后连杆、掩护梁、顶梁、前排立柱、后排立柱等 6 个关键部件倾角随前排立柱驱动变化曲线如图 10 所示,随后排立柱驱动变化如图 11 所示。

如图 10 所示,将前排立柱驱动调节各部件倾角的全过程划分为调控有效区域和调控失效区域,在图中以浅黄色表示有效区域、浅绿色表示失效区域,前排立柱驱动对于各部件可调控范围表现为:

1) 后排立柱的伸出长度对前排立柱驱动调节前、后连杆倾角与掩护梁倾角的驱动行程范围产生显著影响。在后排立柱伸出长度处于中间行程时,前排立柱驱动全行程可调控;在后排立柱伸出长度处于极小或极大时,前排立柱驱动局部行程可调控或不可调控。且掩护梁倾角随前排立柱驱动行程的增大而减小;前、后连杆倾角随着后排立柱的伸出长度而变化,当后排立柱伸出长度小于半行程时,随着前排立柱的驱动行程增加,倾角先减小后增大;而当后排立柱伸出长度大于半行程时,倾角则先增大后减小。

2) 前排立柱驱动部分行程可调控顶梁倾角。当后排立柱伸出长度小于半行程时,前排立柱驱动前行程可调控顶梁倾角,且随着后排立柱伸出长度增大可调控范围增大;当后排立柱伸出长度大于半行程时,前排立柱驱动后行程可调控顶梁倾角,且随着后排立柱伸出长度增大可调控范围减小。调控过程中顶梁倾角随前排立柱驱动行程的增大而增大。

3) 前排立柱驱动全行程可调控后排立柱倾角,且在不同后排立柱长度下,前排立柱调节仍有效;后排立柱伸出长度小于半行程时,随着前排立柱驱动行程增大,后排立柱倾角先减小后增大;后排立柱伸出长度大于半行程时,随前排立柱驱动增大,后排立柱倾角先增大后趋于平稳。

4) 后排立柱伸出长度对前排立柱驱动调节前排立柱倾角的驱动行程范围产生影响。在后排立柱伸出长度小于半行程时,前排立柱驱动前部行程可调控前立柱倾角;在后排立柱伸出长度大于半行程时,前排立柱驱动全行程可调控。调控过程中随前排立柱驱动行程增大,前排立柱倾角表现为先增大后减小。

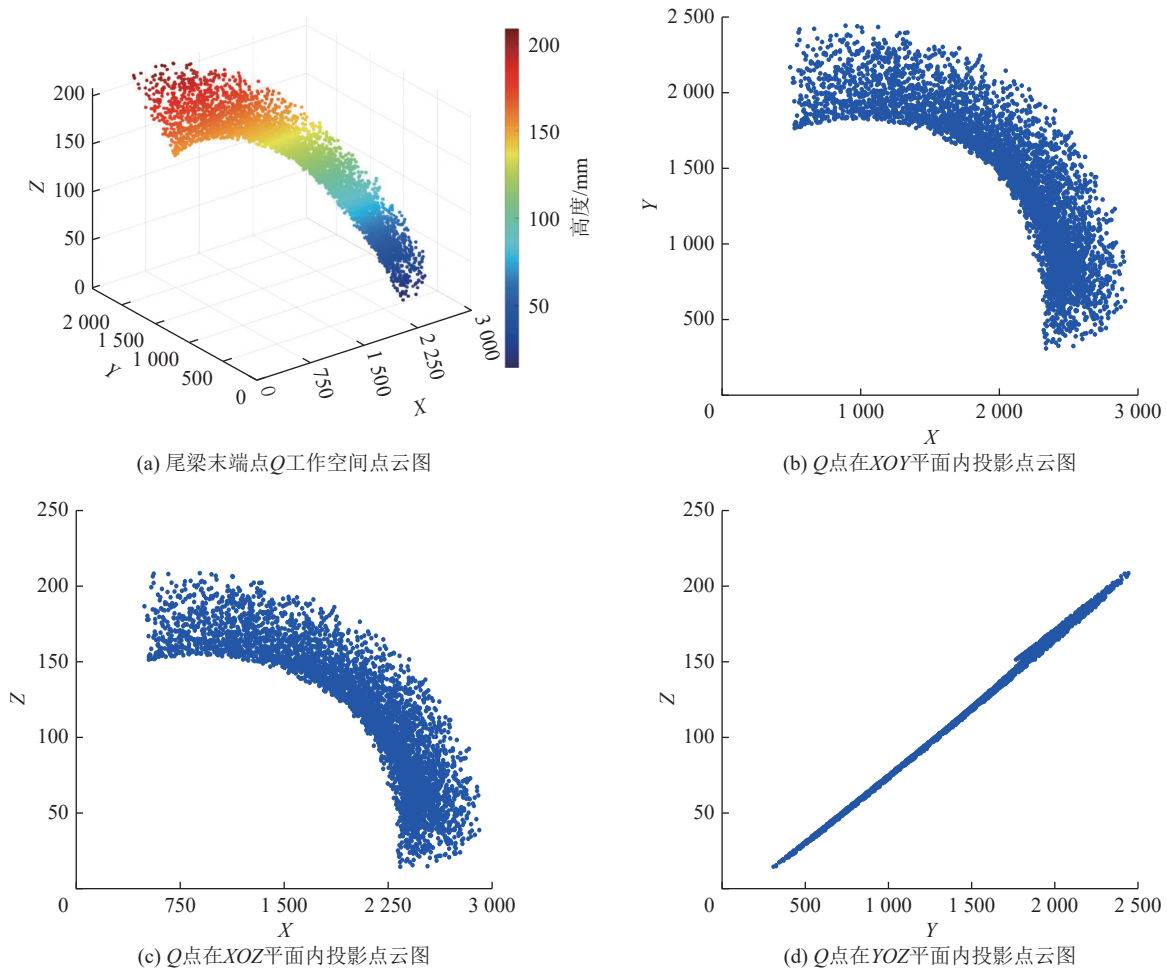


图 9 尾梁末端点 Q 工作空间点云图

Fig.9 Tail beam end point Q workspace points cloud diagram

如图 11 所示, 将后排立柱驱动调节各部件倾角的全过程也划分为调控有效区域和调控失效区域, 并以浅黄色表示有效区域、浅绿色表示失效区域, 后排立柱驱动对于各部件可调控范围表现为:

1) 前排立柱伸出长度对后排立柱驱动调节前、后连杆倾角与掩护梁倾角的驱动行程范围产生影响。前排立柱伸出长度小于半行程时, 后连杆倾角随后排立柱驱动全行程可调; 此外, 后排立柱驱动部分行程可调控前、后连杆倾角和掩护梁倾角。调控过程中各部件倾角均随后排立柱驱动行程的增大而增大。

2) 后排立柱驱动部分行程可调控顶梁倾角。当前排立柱伸出长度小于半行程时, 后排立柱驱动前行程可调控顶梁倾角, 且随前排立柱伸出长度增大可调控范围增大; 当前排立柱伸出长度大于半行程时, 后排立柱驱动后行程可调控顶梁倾角, 且随前排立柱伸出长度增大可调控范围减小。调控过程中顶梁倾角随后排立柱驱动的增大而减小。

3) 后排立柱驱动全行程可调控前、后排立柱倾角, 且在不同前排立柱长度下, 后排立柱调节仍有效。前

排立柱伸出长度小于半行程时, 随后排立柱驱动行程增大, 前、后排立柱倾角先减小后增大; 前排立柱伸出长度大于半行程时, 随后排立柱驱动行程增大, 后排立柱倾角先增大后减小且变化波动小, 而前排立柱倾角先减小后增大且变化波动较大。

由上述分析可得, 前、后排立柱可对顶梁在一定区域内进行调控: 在前排立柱伸出长度处于前半行程时, 后排立柱可在前半行程对顶梁进行调控; 在前排立柱伸出长度处于后半行程时, 后排立柱可在后半行程对顶梁进行调控。且随着后排立柱长度的增大, 顶梁倾角减小。前排立柱对顶梁姿态的可调控范围与后排立柱相似, 且随着前排立柱长度的增大, 顶梁倾角增大。

#### 4 试验验证

本节通过搭建实时数据采集系统, 采集支架工作过程中前后排立柱长度信息、顶梁倾角信息等, 用于综放支架姿态实时解算、顶煤调控实时感知。搭建采集系统包括: 激光传感器、9 轴倾角传感器、位移传感

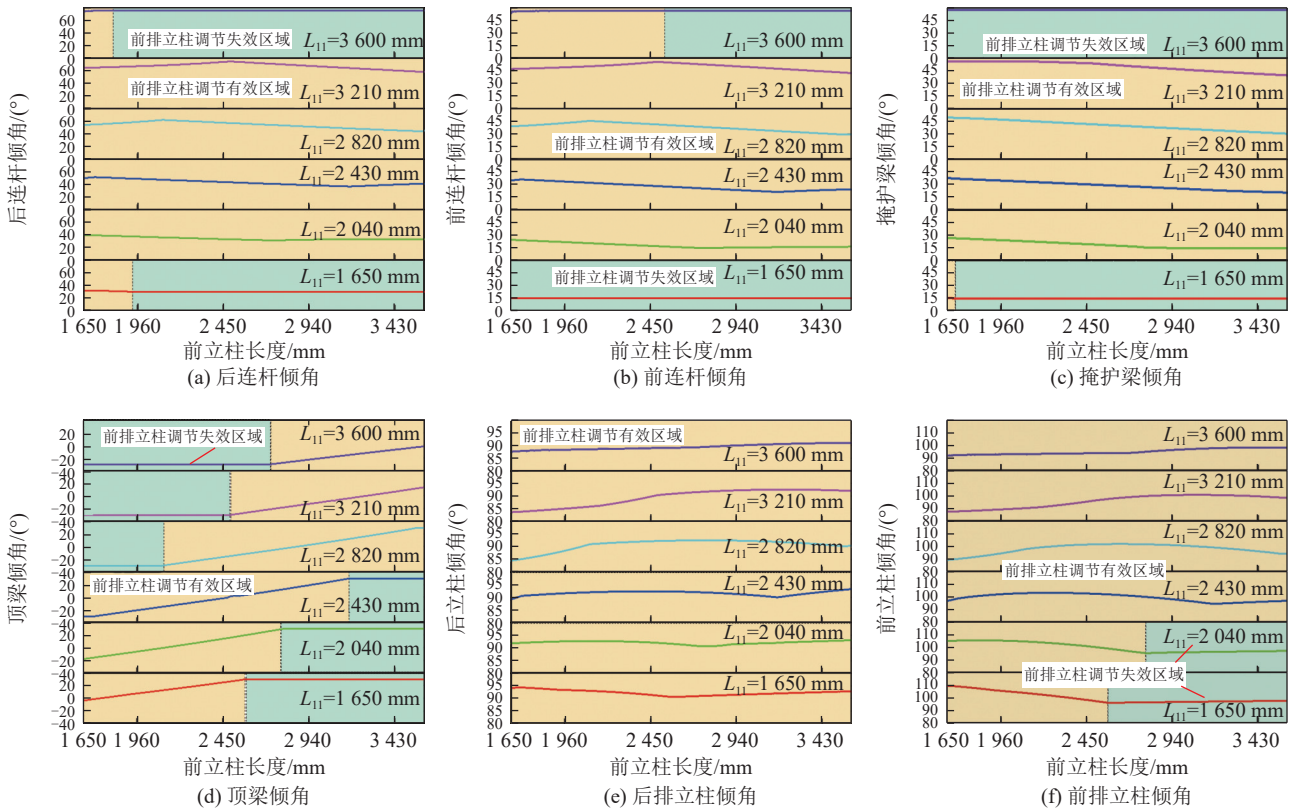


图 10 各关键部件倾角随前立柱驱动变化

Fig.10 Variation diagram of the inclination angle of each key component with the driving of the front column

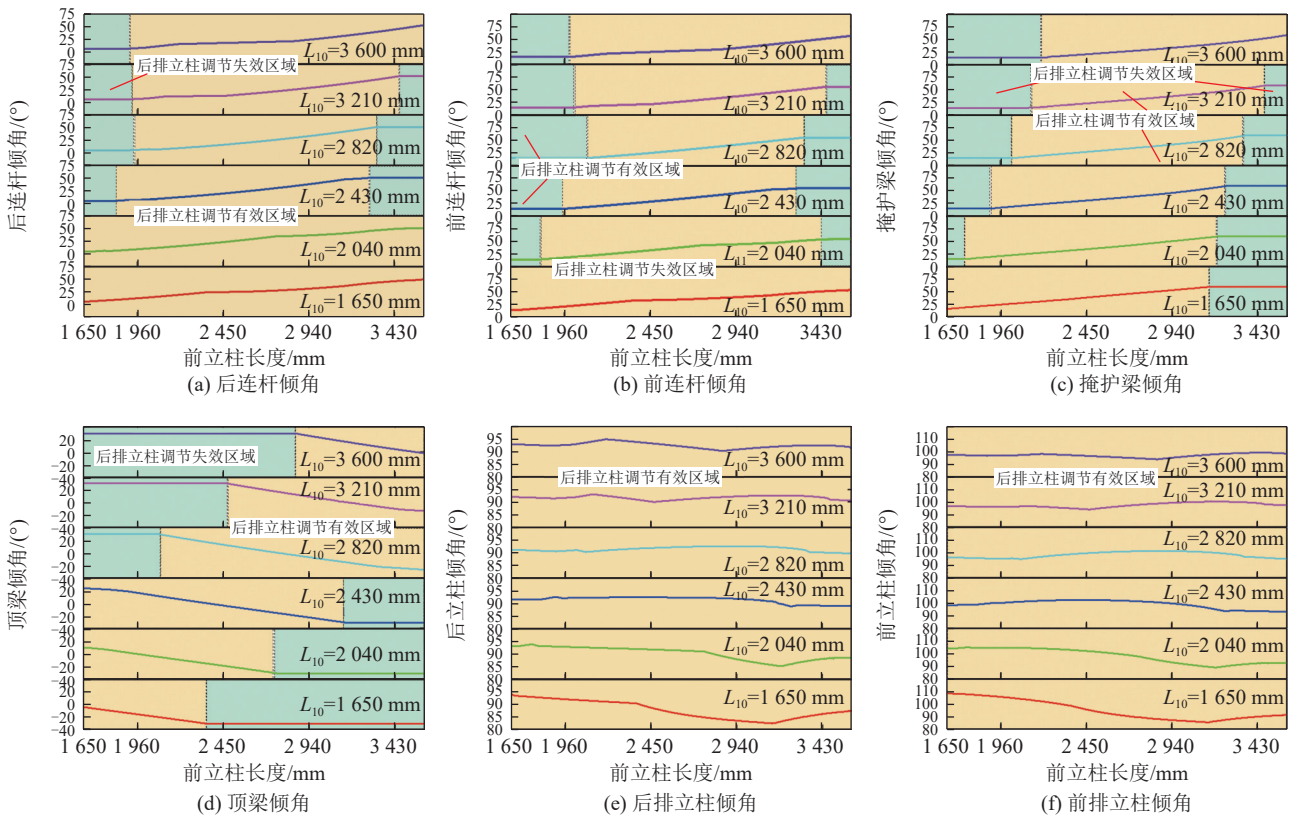


图 11 各关键部件倾角随后立柱驱动变化图

Fig.11 Dip angle of each key component is followed by the driving change diagram of the column

器、角度传感器、采集器、远传模块、集中器、电源等关键设备,如图 12 所示。

将数据采集系统的各传感器和采集器、集中器、远传模块等封装成为满足井下防爆要求的设备,同时将各个模块通过电缆进行连接调试,调试成功后,在位于山东省菏泽市赵楼煤矿所属车间及井下开展实验,以进一步研究上述支架位姿求解方法与顶煤调控方法的准确性及可行性。实验中所用支架与理论部

分使用支架型号相同,均为 ZF17000/22/42 型四柱式综放支架。试验现场布置如图 13 所示,通过激光传感器实时采集综放支架前、后排立柱长度,并将数据传输至安装于顶梁的采集器,采集器内置倾角传感器可同时采集顶梁倾角信息,各采集器中数据通过远传模块传输至集中器下行串口中,采集器上行串口连接上位机进行数据传输,至此完成各综放支架数据采集全过程。因实验过程中激光传感器的安装存在位置

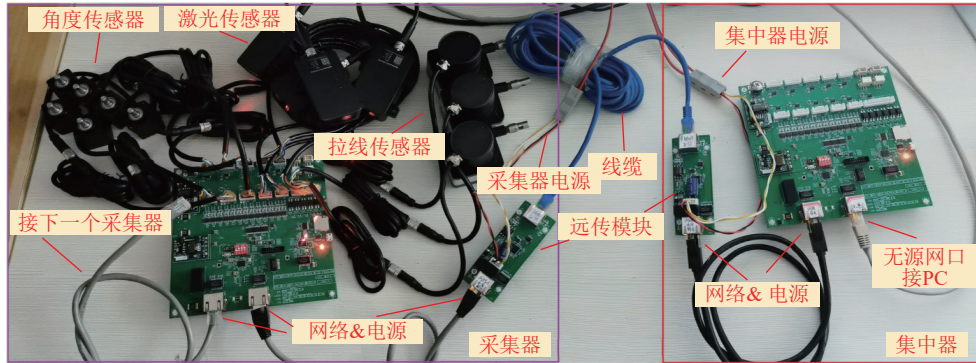


图 12 数据采集系统各部件图

Fig.12 Data acquisition system components diagram



图 13 综放支架位姿检测试验系统

Fig.13 Coal caving support pose detection test system

误差,故在求解程序中设置补偿函数进行安装误差补偿。

通过在综放支架上安装各类型传感器可获取综放支架各种姿态信息,本试验选取采集数据中前、后排立柱长度信息、顶梁倾角信息作为主要试验数据。所采集各数据在未处理之前均为传感器的编码值,解算程序在调用数据时,首先按照传感器相应解码方式进行解码,再借助补偿函数消除安装误差,最后使用数据进行综放支架姿态实时解算,对比顶梁姿态解算结果与倾角传感器所测得数据,验证求解的准确性。通过姿态解算程序求解综放支架上升与下降过程中支架各部件姿态变化情况如图 14 所示。

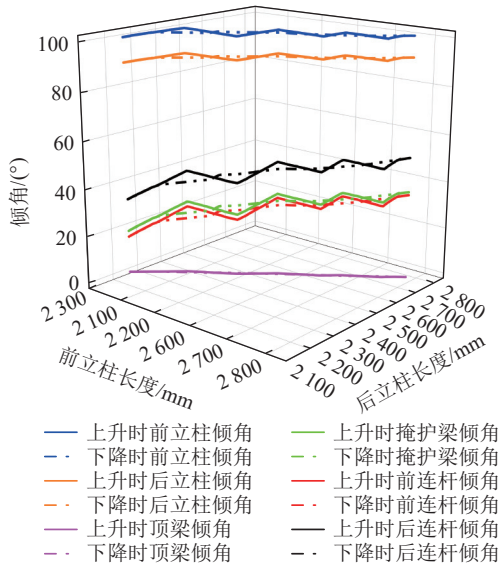


图 14 综放支架下降-上升过程中各部件姿态变化

Fig.14 Posture change diagram of each component during the descending-rising process of coal caving support

对比顶梁姿态解算结果与倾角传感器测量所得的 170 组数据,其结果如图 15 所示。

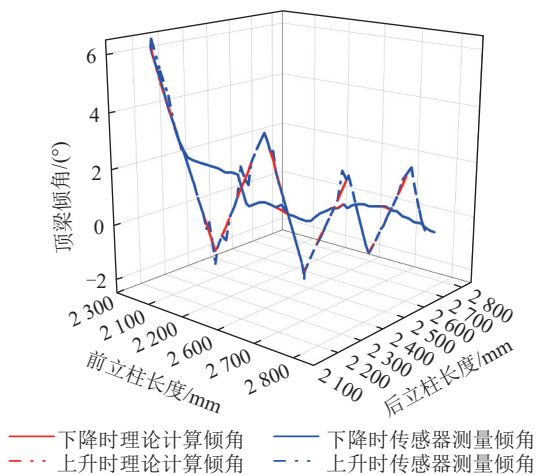


图 15 解算数据与传感器数据对比

Fig.15 Solution data and sensor data comparison diagram

由图 15 可知,顶梁姿态解算数据与传感器测量数据高度重合,并通过计算可得这 170 组数据的解算结果与传感器测量结果的重合率为 98.26%,这表明在综放支架下降-上升实验过程中,使用本文提出方法解得的综放支架姿态与传感器测量姿态重合度极高,验证了该方法的可行性与准确性。为后续研究工作奠定精确、快速的综放支架空间位姿解算基础。

### 5 结 论

1) 提出了综放支架空间位姿动态感知方法,通过关节坐标系传递以及空间坐标系转换分析,给出了支架在综采工作面的精确位置及空间姿态;求解了支架顶梁与放煤机构工作空间,确定了支架主动扰控顶煤的触支空间,提高了综放支架对顶煤的主动管控性能。

2) 基于初值优选的 L-M 算法分析了综放支架本体几何约束关系,获得了前、后排立柱单一驱动条件下支架各关键部件姿态映射规律以及调控敏感度。结果表明,前、后排立柱对顶梁姿态调控呈线性分布,二者长度差值越大,有效调控区域越小;当前排立柱从最小长度 1 650 mm 伸长至最大长度 3 600 mm 时,后排立柱线性调控范围差值从 800 mm 先增至 1 550 mm,后减至 900 mm。依据顶梁姿态对支架排立柱行程不同敏感效果,可为支架快速、准确调控顶煤状态提供依据。

3) 搭建了综放支架姿态相关数据实时采集系统,并在地表和井下开展支架升降架姿态分析实验,所提出的空间位姿求解结果与传感器实测数据重合度为 98.26%,表明所述方法准确、可行。

### 参考文献(References):

[1] 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 Youjin, 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.

[2] 国家能源局.国家能源局关于加快推进能源数字化智能发展的若干意见[EB/OL].[2024-05-10].[http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-03/28/c\\_1310707122.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-03/28/c_1310707122.htm).

[3] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.

[4] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-13.  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustain-

- able mining of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 1-13.
- [5] 冯国瑞, 白锦文, 马俊彪, 等. 残采区群柱遗煤资源绿色开采与地下空间开发技术挑战[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 91-100.  
FENG Guorui, BAI Jinwen, MA Junbiao, et al. Technical challenge of coal pillars resource green mining and underground space developing in the residual mining area[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 91-100.
- [6] 曾庆良, 徐鹏辉, 孟昭胜, 等. 冲击载荷下四柱支撑掩护式液压支架动态响应特征分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 437-445.  
ZENG Qingliang, XU Penghui, MENG Zhaosheng, et al. Dynamic response characteristics analysis of four column chock shield support under impact load[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 437-445.
- [7] 谢云跃, 孟昭胜, 曾庆良, 等. 深井冲击载荷下液压支架底板比压分布特性[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 982-989.  
XIE Yunyue, MENG Zhaosheng, ZENG Qingliang, et al. Analysis of distribution characteristics of study on floor specific pressure of hydraulic support for deep mining based on impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 982-989.
- [8] 陈绍杰, 张立波, 李振华, 等. 采煤沉陷区土地建筑利用研究进展与展望[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 101-118.  
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, LI Zhenhua, et al. Research progress and prospect of building utilization in coal mining subsidence areas[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 101-118.
- [9] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 7-39.  
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 7-39.
- [10] 杨科, 池小楼, 刘钦节, 等. 大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3045-3053.  
YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Qinjie, et al. Cataclastic regenerated roof and instability mechanism of support in fully mechanized mining face of steeply dipping seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3045-3053.
- [11] 孟昭胜, 曾庆良, 万丽荣, 等. 掩护式液压支架顶梁承载特性及其适应性研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 1162-1170.  
MENG Zhaosheng, ZENG Qingliang, WAN Lirong, et al. Supporting performance and canopy adaptability of shield support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1162-1170.
- [12] 罗生虎, 田程阳, 伍永平, 等. 大倾角煤层综放开采顶煤破坏运移规律与支架稳定性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(1): 25-35, 47.  
LUO Shenghu, TIAN Chengyang, WU Yongping, et al. Migration laws of top coal failure and stability analysis of support on fully mechanized top coal caving mining in steeply dipping coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 25-35, 47.
- [13] 韩宇峰, 王兆会, 唐岳松. 厚煤层综放开采顶煤分区破坏特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 99-107.  
HAN Yufeng, WANG Zhaohui, TANG Yuesong. Study on zone failure characteristics of top-coal in fully-mechanized top-coal caving mining of thick coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 99-107.
- [14] 胡相捧, 马斌. 软岩条件初撑阶段液压支架非理想位态形成机理[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(4): 560-568.  
HU Xiangpeng, MA Bin. Formation mechanism of non-ideal posture of hydraulic support at setting stage in the soft rock condition[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 560-568.
- [15] 李桂臣, 邵泽宇, 孙元田, 等. 煤矿掘采空间垮塌岩体稳定性与救援通道构建[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 11-20.  
LI Guichen, SHAO Zeyu, SUN Yuantian, et al. Stability of collapsed rock body in coal mine excavation space and construction of rescue channel[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 11-20.
- [16] MENG Z S, MA C, XIE Y Y. Influence of impact load form on dynamic response of chock-shield support[J]. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2023, 25(3): 168316.
- [17] 庞义辉, 刘新华, 王泓博, 等. 基于千斤顶行程驱动的液压支架支护姿态与高度解析方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1231-1242.  
PANG Yihui, LIU Xinhua, WANG Hongbo, et al. Support attitude and height analysis method of hydraulic support based on jack stroke drive[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1231-1242.
- [18] 路绪良, 闫海峰, 张霖. 液压支架逆向运动学分析[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(10): 43-47.  
LU Xuliang, YAN Haifeng, ZHANG Lin. Inverse kinematics analysis of hydraulic support[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(10): 43-47.
- [19] 柳华杰, 郑晓雯, 彭阳, 等. 基于 GA-Broyden 混合算法液压支架运动状态仿真及监测研究[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(3): 135-137.  
LIU Huajie, ZHENG Xiaowen, PENG Yang, et al. Research on motion state simulation and monitoring of hydraulic support based on GA-broyden hybrid algorithm[J]. *Coal Technology*, 2019, 38(3): 135-137.
- [20] 王国法, 庞义辉. 基于支架与围岩耦合关系的支架适应性评价方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1348-1353.  
WANG Guofa, PANG Yihui. Shield-roof adaptability evaluation method based on coupling of parameters between shield and roof strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1348-1353.
- [21] 杜毅博. 液压支架支护状况获取与模糊综合评价方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S1): 260-266.  
DU Yibo. Supporting condition acquisition and fuzzy comprehensive evaluation method for hydraulic support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 260-266.
- [22] ZHANG L, WANG Z B, TAN C, et al. A fruit fly-optimized Kalman filter algorithm for pushing distance estimation of a hydraulic powered roof support through tuning covariance[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(10): 299.
- [23] 陈冬方, 李首滨. 基于液压支架倾角的采煤高度测量方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 788-793.  
CHEN Dongfang, LI Shoubin. Measurement of coal mining height based on hydraulic support structural angle[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 788-793.

- [24] LIANG M F, FANG X Q, LI S, et al. A fiber Bragg grating tilt sensor for posture monitoring of hydraulic supports in coal mine working face[J]. *Measurement*, 2019, 138: 305–313.
- [25] YANG X J, WANG R F, WANG H F, et al. A novel method for measuring pose of hydraulic supports relative to inspection robot using LiDAR[J]. *Measurement*, 2020, 154: 107452.
- [26] WANG B B, XIE J C, WANG X W, et al. A new method for measuring the attitude and straightness of hydraulic support groups based on point clouds[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(12): 11739–11757.
- [27] 任怀伟, 李帅帅, 赵国瑞, 等. 基于深度视觉原理的工作面液压支架支撑高度与顶梁姿态角测量方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 72–81, 93.  
REN Huaiwei, LI Shuashuai, ZHAO Guorui, et al. Measurement method of support height and roof beam posture angles for working face hydraulic support based on depth vision[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 72–81, 93.
- [28] 张旭辉, 王冬曼, 杨文娟. 基于视觉测量的液压支架姿态检测方法[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(3): 56–60.  
ZHANG Xuhui, WANG Dongman, YANG Wenjuan. Position detection method of hydraulic support based on vision measurement[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(3): 56–60.
- [29] CHEN H Y, CHEN Q, CHEN H Y, et al. Measurement of displacement and top beam attitude angle of advanced hydraulic support based on visual detection[J]. *Measurement*, 2023, 219: 113264.
- [30] XIE J C, WANG X W, YANG Z J, et al. Attitude-aware method for hydraulic support groups in a virtual reality environment[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(14): 4805–4818.
- [31] 李娟莉, 李梦辉, 谢嘉成, 等. 分布式实时运行数据驱动的液压支架群虚拟监测关键技术[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(10): 1023–1033.  
LI Juanli, LI Menghui, XIE Jiacheng, et al. Key technologies of virtual monitoring driven by distributed real-time running data for hydraulic support group[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(10): 1023–1033.
- [32] 韩哲, 杜毅博, 任怀伟, 等. 基于 LoRaWAN 的液压支架状态监测系统[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(8): 89–93, 100.  
HAN Zhe, DU Yibo, REN Huaiwei, et al. Hydraulic support condition monitoring system based on LoRaWAN[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(8): 89–93, 100.
- [33] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究及试验[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 969–985.  
WANG Xuewen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research and test on key technologies of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 969–985.
- [34] 王学文, 崔涛, 谢嘉成, 等. 考虑销轴间隙的液压支架运动虚拟仿真方法[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 186–193.  
WANG Xuewen, CUI Tao, XIE Jiacheng, et al. Virtual simulation method of hydraulic support motion considering pin shaft clearance[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 186–193.
- [35] CHEN H Y, CHEN H Y, XU Y J, et al. Research on attitude monitoring method of advanced hydraulic support based on multi-sensor fusion[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110341.
- [36] 赵校朋, 付振, 王朕, 等. 基于多传感融合的液压支架诊断与控制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(S1): 188–191.  
ZHAO Xiaopeng, FU Zhen, WANG Zhen, et al. Research on fault diagnosis and control of hydraulic support based on multi-sensor fusion[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(S1): 188–191.
- [37] LU X L, WANG Z B, TAN C, et al. A portable support attitude sensing system for accurate attitude estimation of hydraulic support based on unscented Kalman filter[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5459.
- [38] 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及实验验证[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S1): 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(S1): 345–356.
- [39] 钱东海, 王新峰, 赵伟, 等. 基于旋量理论和 Paden-Kahan 子问题的 6 自由度机器人逆解算法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(9): 72–76, 81.  
QIAN Donghai, WANG Xinfeng, ZHAO Wei, et al. Algorithm for the inverse kinematics calculation of 6-DOF robots based on screw theory and paden-kahan sub-problems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 72–76, 81.
- [40] 赵智远, 徐振邦, 何俊培, 等. 基于工作空间分析的 9 自由度超冗余串联机械臂构型优化[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 51–63.  
ZHAO Zhiyuan, XU Zhenbang, HE Junpei, et al. Configuration optimization of nine degree of freedom super-redundant serial manipulator based on workspace analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 51–63.
- [41] XIE G S, XU Y, XU P H, et al. Chatter stability analysis of a six-axis milling robot[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(7): 3551–3561.
- [42] RIBÁRIK G, JÓNI B, UNGÁR T. Global optimum of microstructure parameters in the CMWP line-profile-analysis method by combining Marquardt-Levenberg and Monte-Carlo procedures[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(7): 1508–1514.
- [43] FU W Z, REN W L, CHEN J. Variance extrapolation method for neural-network variational Monte Carlo[J]. *Machine Learning: Science and Technology*, 2024, 5(1): 015016.