

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.009

6-PUS 并联运动模拟器设计及其工作空间分析

夏宁明, 叶秋, 宋代平

(重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要:为满足运动模拟试验所提出的单自由度及多自由度耦合运动高动态、高精度要求,分析 6-PUS 并联运动模拟器结构特性,基于坐标变换和粒子群优化算法,推导该模拟器的正逆运动学模型并通过对比 MATLAB 计算值和 ADAMS 仿真值,验证模型正确性。结合运动学逆解模型与工作空间主要约束条件,运用蒙特卡罗法绘制该模拟器的零姿态工作空间。研究结果证明 6-PUS 并联运动模拟器具有良好的运动性能和应用价值。

关键词:6-PUS; 运动模拟器; 正逆运动学; 蒙特卡罗法; 工作空间

中图分类号:TH112 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0046-05

Design and Workspace Analysis of 6-PUS Parallel Motion Simulator

XIA Ningming, YE Qiu, SONG Daiping

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A 6-PUS parallel motion simulator is designed to meet the high dynamic and high precision requirements of single and multi-degree-of-freedom coupling motion. Its structural characteristics of 6-PUS are described, its forward and inverse kinematics model is derived based on coordinate transformation and particle swarm optimization algorithm, and the correctness of the model is verified by comparing the calculated values of MATLAB and the simulated values of ADAMS. By combining with model of inverse kinematics and the main constraints of the workspace, Monte Carlo method is used to draw the zero-attitude workspace of the simulator. The results show that 6-PUS parallel motion simulator has good motion performance and application value.

Keywords: 6-PUS; motion simulator; forward and inverse kinematics; Monte Carlo method; workspace

0 引言

针对单自由度及多自由度耦合运动的模拟需求,在高速、高精度、高刚度及大承载等试验场合,运动模拟器^[1]凭借其成本效益高、承载能力强、动态响应快以及模拟环境真实等优点,成为并联运动平台主要应用之一^[2]。

并联运动模拟器广泛应用于各种场合。李晓等^[3]就风浪条件下的舰船运动进行模拟器设计及仿真;张建政等^[4]对三向 6 自由度并联地震模拟器进行了分析;XU 等^[5]面对光电封装设备多自由度、宽范围、高精度等挑战,提出一种新型 6 自由度运动模拟平台。王启明等^[6]提出 4 种平面平台型 6-PSS 并联机构用于运动模拟,但 4 种构型导轨与定坐标系 xy 平面的夹角均为 0° 。目前,鲜有文献针对含斜面倾角的并联运动模拟器的构型、运动学分析及后续优化控制等问题进行深入研究。

为满足平台运动模拟诸多需求,以一种含斜面倾角的 6-PUS 并联运动模拟器为研究对象,介绍其结构组成特点,进行正逆运动学分析与工作

空间求解,验证该并联运动模拟器的可行性及实用性,为后续该机构的动力学建模与运动控制奠定了基础。

1 6-PUS 并联运动模拟器描述

6-PUS 并联运动模拟器构型如图 1 所示。该模拟器由动平台、6 条 PUS 支链和基座组成(P 副表示移动副,U 副表示虎克铰,S 副表示球铰副)。6 条 PUS 支链通过连杆上各自的 P 副与基座相连,通过 S 副与动平台相连。可用伺服电机带动丝杠模组,驱动移动副运动,带动连杆使得动平台实现所预设函数规律的运动。

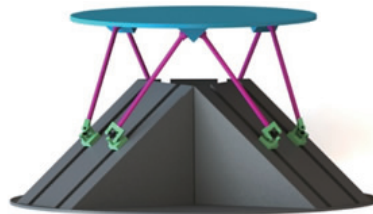


图 1 6-PUS 并联运动模拟器三维模型

第一作者简介:夏宁明(1998-),男,重庆石柱人,硕士研究生,研究方向为机电一体化技术, xiaonm2023@163.com。

为描述机构运动,如图2所示,建立如下坐标系:在运动平台几何中心处建立连体动坐标系 $O_m-x_m y_m z_m$,记为局部坐标系 $\{M\}$; x_m 轴方向垂直平分上球铰点 A_1 和 A_2 的连线, y_m 轴沿 A_2 一侧,并垂直于 x_m 轴, z_m 轴满足右手定则,方向垂直于动平台平面向上;在基座底面的几何中心处建立定坐标系 $O-xyz$,记为全局坐标系 $\{S\}$,坐标轴方向分别与 $\{M\}$ 坐标轴方向相同。过下铰副中心作平行于斜面的直线交于基座,交点为 B_i 。以 B_i 点为坐标系原点,建立定坐标系 $O_{B_i}-x_{B_i} y_{B_i} z_{B_i}$,记为中间坐标系 $\{B_i\}$, x_{B_i} 轴与丝杠轴线重合,方向向下, y_{B_i} 轴垂直于丝杠轴线, z_{B_i} 的方向由右手定则确定。

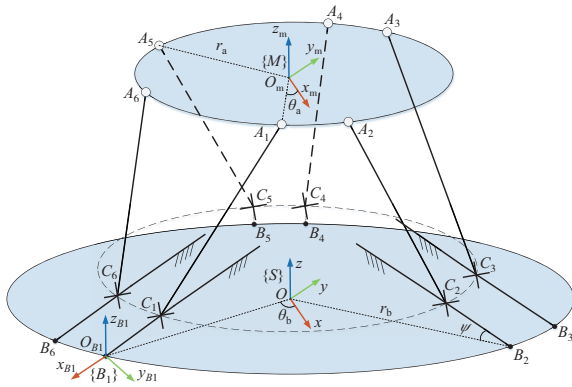


图2 6-PUS 并联运动模拟器结构简图

机构处于初始位形时,构型参数定义如下:各连接点关于 xz 平面对称, A_i, B_i (后文未特别说明,默认 $i=1 \sim 6$) 两两一组分为3组,分别均布在半径为 r_a 和 r_b 的圆周上,呈 120° 对称分布。其中点 B_1 和点 B_2 所在导轨间的夹角为 120° 。 A_1 与坐标系 $\{M\}$ 的 x_m 轴之间的夹角为 θ_a 。 B_1 到系 $\{S\}$ 原点 O 的连线与 x 轴之间的夹角为 θ_b 。丝杠轴线与 xy 平面的夹角为 ψ_i 。点 C_i 与点 B_i 的距离为 x_c 。此外,定义点 C_i 与点 A_i 的距离为定杆长 L ,各滑块驱动量为 λ_i 。

2 模拟器位置逆解分析

2.1 位置逆解模型

定义原点 O_m 为机构运动位姿参考点。定义广义坐标 $\mathbf{q}=[x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 来描述动平台的位姿信息。其中, (x, y, z) 和 (α, β, γ) 分别表示沿 $x_m/y_m/z_m$ 坐标轴的移动和绕3个坐标轴的转动。

位置逆解是指已知 $\mathbf{q}$, 反解得到各移动副的驱动量 λ_i 。系 $\{M\}$ 相对系 $\{S\}$ 的姿态可通过 zyx 欧拉角表示法来描述,则它们之间的旋转矩阵为

$${}^S_M \mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: c 代表 $\cos$; s 代表 $\sin$ 。

铰点 A_i 在系 $\{M\}$ 中的位置矢量 $\mathbf{a}_i$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = [r_a \cos(-\theta_a) & r_a \sin(-\theta_a) & 0]^T \\ \mathbf{a}_2 = [r_a \cos(\theta_a) & r_a \sin(\theta_a) & 0]^T \\ \mathbf{a}_3 = [r_a \cos(2\pi/3 - \theta_a) & r_a \sin(2\pi/3 - \theta_a) & 0]^T \\ \mathbf{a}_4 = [r_a \cos(\theta_a + 2\pi/3) & r_a \sin(\theta_a + 2\pi/3) & 0]^T \\ \mathbf{a}_5 = [r_a \cos(-\theta_a - 2\pi/3) & r_a \sin(-\theta_a - 2\pi/3) & 0]^T \\ \mathbf{a}_6 = [r_a \cos(\theta_a - 2\pi/3) & r_a \sin(\theta_a - 2\pi/3) & 0]^T \end{cases} \quad (2)$$

机构处于零位时,定义动系 $\{M\}$ 原点相对定系 $\{S\}$ 原点的位置矢量为 $\mathbf{P}=[0 \ 0 \ H]^T$,则动系 $\{M\}$ 相对定系 $\{S\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^S_M \mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^S_M \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式也可表达为

$${}^S_M \mathbf{T} = \text{transl}(\mathbf{P}) \cdot \text{trotz}(\gamma) \cdot \text{troty}(\beta) \cdot \text{trotx}(\alpha) \quad (4)$$

铰点 A_i 在定系 $\{S\}$ 中的位置矢量 $\mathbf{A}_i$ 可表示为

$$[\mathbf{A}_i \ 1]^T = {}^S_M \mathbf{T} [\mathbf{a}_i \ 1]^T \quad (5)$$

系 $\{B_i\}$ 原点相对系 $\{S\}$ 原点的位置矢量分别为

$$\begin{cases} {}^S_{B_1} \mathbf{B}_1 = [r_b \cos(-\theta_b) & r_b \sin(-\theta_b) & 0]^T \\ {}^S_{B_2} \mathbf{B}_2 = [r_b \cos(\theta_b) & r_b \sin(\theta_b) & 0]^T \\ {}^S_{B_3} \mathbf{B}_3 = [r_b \cos(2\pi/3 - \theta_b) & r_b \sin(2\pi/3 - \theta_b) & 0]^T \\ {}^S_{B_4} \mathbf{B}_4 = [r_b \cos(2\pi/3 + \theta_b) & r_b \sin(2\pi/3 + \theta_b) & 0]^T \\ {}^S_{B_5} \mathbf{B}_5 = [r_b \cos(4\pi/3 - \theta_b) & r_b \sin(4\pi/3 - \theta_b) & 0]^T \\ {}^S_{B_6} \mathbf{B}_6 = [r_b \cos(\theta_b - 2\pi/3) & r_b \sin(\theta_b - 2\pi/3) & 0]^T \end{cases} \quad (6)$$

定系 $\{B_i\}$ 相对定系 $\{S\}$ 的变换矩阵为

$$\begin{cases} {}^S_{B_1} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_1} \mathbf{B}_2) \cdot \text{trotz}(-\pi/3) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \\ {}^S_{B_2} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_2} \mathbf{B}_2) \cdot \text{trotz}(\pi/3) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \\ {}^S_{B_3} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_3} \mathbf{B}_3) \cdot \text{trotz}(\pi/3) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \\ {}^S_{B_4} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_4} \mathbf{B}_4) \cdot \text{trotz}(\pi) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \\ {}^S_{B_5} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_5} \mathbf{B}_5) \cdot \text{trotz}(\pi) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \\ {}^S_{B_6} \mathbf{T} = \text{transl}({}^S_{B_6} \mathbf{B}_6) \cdot \text{trotz}(-\pi/3) \cdot \text{troty}(\Psi\pi/180) \end{cases} \quad (7)$$

则点 A_i 在系 $\{B_i\}$ 中的位置矢量可表示为

$$[{}^{B_i}A_i \ 1]^T = ({}^S B_i T)^{-1} [A_i \ 1]^T \quad (8)$$

移动副处于初始位置时,下铰点 C_i 在 $\{B_i\}$ 中的位置矢量 ${}^{B_i}C'$ 可表示为

$${}^{B_i}C'_i = [-x_c \ 0 \ 0]^T \quad (9)$$

铰点 C_i 在 $\{B_i\}$ 中的位置矢量可表示为

$${}^{B_i}C_i = {}^{B_i}C'_i + \lambda_i [-1 \ 0 \ 0]^T \quad (10)$$

由于杆长为固定值,可得运动约束方程为^[7]

$$\|{}^{B_i}C_i - {}^{B_i}A_i\| = L_i \quad (11)$$

展开得到移动副位移,即:

$$\lambda_i = {}^{B_i}C'_i(1) - {}^{B_i}A_i(1, i) - \sqrt{L_i^2 - {}^{B_i}A_i^2(2, i) - {}^{B_i}A_i^2(3, i)} \quad (12)$$

$\lambda_i = f_i(\mathbf{q})$ 即为 6-PUS 并联运动模拟器的位置逆解显式解模型,通过 6 个 PUS 支链协调运动,可实现动平台所预定的运动轨迹。

2.2 位置逆解模型验证

给定机构结构参数如表 1 所示。时间范围 $t \in (0, 10 \text{ s})$, 为验证位置逆解的准确性,考虑多自由度工况如下:

$$\begin{cases} y = 20t \\ z = 100 \sin(\pi t/5) \\ \beta = 15 \sin(\pi t/5) \end{cases} \quad (13)$$

表 1 6-PUS 并联运动模拟器结构参数

参数	数值	参数	数值
r_a/mm	290.00	L/mm	600.00
r_b/mm	957.95	$\theta_a/(\circ)$	7.00
x_c/mm	513.17	$\theta_b/(\circ)$	55.21
H/mm	750.00	$\Psi/(\circ)$	35.00

当以上参数已知,代入公式即可求出滑块位移变化。将所建立的三维模型导入 ADAMS 虚拟样机中进行仿真,ADAMS 仿真结果与 MATLAB 理论值计算结果如图 3 所示。

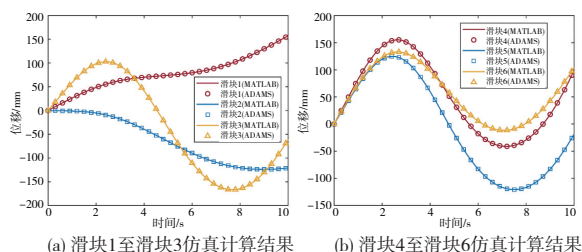


图 3 位置逆解对比结果

从图 3 中可以看出,各滑块位移变化曲线具

备较高拟合度。计算两者最大误差不到 5×10^{-5} , 方均根误差为 1.68×10^{-5} , 故验证了位置逆解理论模型的正确性^[8]。

3 模拟器位置正解分析

3.1 位置正解模型

由于该并联运动模拟器结构复杂,位置正解一般不采用解析解法,通常采用数值解法。近年来,智能优化算法被广泛应用于并联机构正运动学求解当中^[9-11]。本文采用粒子群智能算法(PSO)^[12]对该模拟器进行位置正解分析,其优化求解关键步骤如下。

1) 确定需要优化的目标函数

$$F_i = f_i(\mathbf{q}) - \lambda_i \quad (14)$$

2) 设定适应度函数

$$W = \sum_{i=1}^6 |F_i| \quad (15)$$

3) 设定位置和速度变化公式分别为

$$\begin{cases} v_{t+1} = \omega v_t + c_1 \text{rand}(p_{\text{best},t} - x_t) + c_2 \text{rand}(g_{\text{best},t} - x_t) \\ x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: v_t 为当前粒子速度; x_t 为当前粒子位置; ω 为惯性权重; c_1 为自我学习因子; c_2 为群体学习因子; $p_{\text{best},t}$ 为当前粒子最优效率; $g_{\text{best},t}$ 为当前全局最优解。其中,为加快算法收敛速度, ω 采取自适应动态调整策略。

4) 当达到最大迭代次数 N 时,终止迭代。

3.2 位置正解模型验证

设定 (x, y, z) 和 (α, β, γ) 的搜索范围分别为 $[-200 \text{ mm}, 200 \text{ mm}]$ 和 $[-20^\circ, 20^\circ]$, 并给定粒子群算法相关参数如表 2 所示。

表 2 粒子群算法参数

参数	数值	参数	数值
ω	0.2~0.8	可行解维数	6
c_1	1.5	N	200
c_2	1.5	种群大小	50

给定 5 组滑块位移如表 3 所示。利用 PSO 算法求解各组,正解结果如表 4 所示,适应度曲线如图 4 所示。

表 3 各滑块位移量

单位:mm

组号	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
1	114.602 2	-94.308 7	-50.755 4	64.923 1	-20.295 7	74.555 0
2	55.083 3	57.290 5	110.519 5	118.886 1	101.890 3	93.489 1
3	88.647 5	62.043 5	55.683 0	2.668 4	98.637 9	66.694 4
4	10.565 6	156.044 3	196.152 9	31.406 4	87.612 4	-29.007 0
5	109.403 5	-27.492 9	82.201 5	77.268 9	84.553 8	43.752 7

表 4 末端位姿正解值

组号	x/mm	y/mm	z/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$
1	0.0	150.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	100.0	2.0	7.0	0.0
3	-5.0	-15.0	70.0	-7.0	-3.0	6.0
4	-36.7	-143.8	70.1	9.3	-3.1	6.8
5	13.2	57.5	66.0	2.7	4.8	9.5

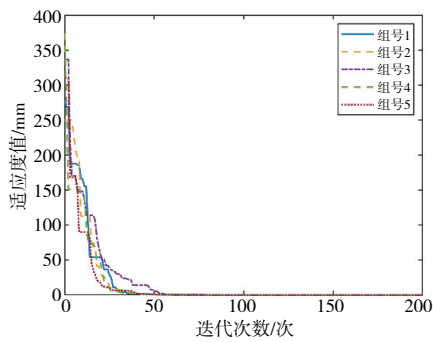


图 4 各组 PSO 算法适应度变化曲线

结合图 4 和表 4 可知,采用 PSO 算法能较快收敛到精确的位置正解值,由此验证了位置正解分析的正确性。

4 模拟器工作空间分析

6-PUS 运动模拟器的六维工作空间难以描述,本文定义的可达工作空间是姿态角均为零值,运动参考点可达位置的集合。

考虑到 6-PUS 并联运动模拟器自身结构特点,其工作空间约束条件主要有以下几个方面。

1) 铰副转动角度约束

定义铰副转动角度 θ_{ai} 、 θ_{ci} 分别为杆单位向量 $\mathbf{e}_i$ 与上、下铰副底座面的单位法向量 $\mathbf{n}_{ai}$ 、 $\mathbf{n}_{ci}$ 间的夹角。限定铰副转动范围为 $\pm 35^\circ$, 则存在以下关系:

$$\begin{cases} \theta_{\min} \leq \theta_{ai} = \arccos(\mathbf{n}_{ai} \cdot \mathbf{e}_i) \leq \theta_{\max} \\ \theta_{\min} \leq \theta_{ci} = \arccos(\mathbf{n}_{ci} \cdot \mathbf{e}_i) \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

2) 滑块移动距离约束

限定滑块移动距离 $\lambda_{\max} = -\lambda_{\min} = 200 \text{ mm}$, 则有以下关系:

$$\lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max} \quad (18)$$

3) 非奇异性约束

对式求导可得:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{q}) = \mathbf{f}'(\mathbf{q}) = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \quad (19)$$

式中, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 为雅可比矩阵,其表达式为

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x} & \frac{\partial f_6}{\partial y} & \frac{\partial f_6}{\partial z} & \frac{\partial f_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_6}{\partial \beta} & \frac{\partial f_6}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (20)$$

在工作空间内,要求无奇异位形或避免过于靠近奇异位形。当 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 行列式的值等于零或接近于零时,表明机构处于奇异位形。由此,提出非奇异约束条件如下:

$$\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})) \geq 0.001 \quad (21)$$

x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的范围为 $-350 \sim 350 \text{ mm}$, 形成正方体搜索空间。采用蒙特卡罗方法^[13]求解工作空间。在搜索空间内随机生成 10 万个点,判断点是否满足逆解方程和约束条件,若满足则保留该点,不满足则舍弃。将保留点用 MATLAB 绘制出来,即为 6-PUS 并联运动模拟器的工作空间^[14]。

由图 5 可知,该模拟器的可达工作空间轴测图形似“伞状”,投影到三视图下的形状呈现对称

性,原因在于该模拟器在结构布置上关于 xz 平面对称。

由图 5(b)—图 5(d)可知,动平台参考点沿着 x 轴、 y 轴、 z 轴的运动范围分别为 $x \in [-272.2 \text{ mm}, 318.4 \text{ mm}]$ 、 $y \in [-278.8 \text{ mm}, 285.1 \text{ mm}]$ 、 $z \in [-300.7 \text{ mm}, 203.4 \text{ mm}]$ 。该模拟器的工作空间较大,内部点集连续,未出现空洞区域,不含奇异位形^[15]。这表明该模拟器运动性能良好,能够满足运动模拟试验需求。

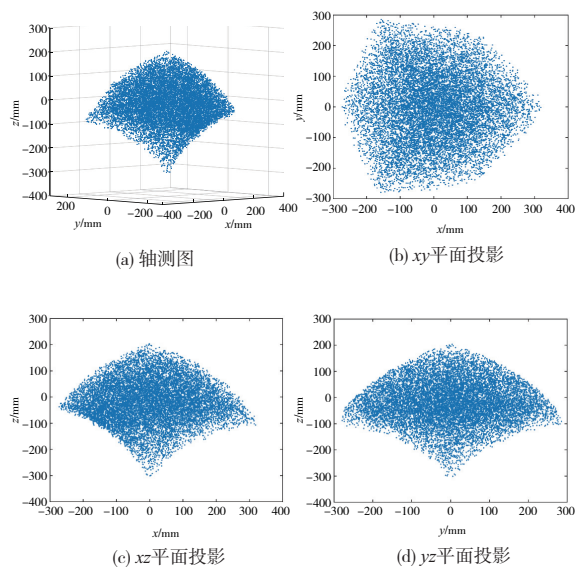


图5 工作空间点云图

5 结语

本文主要针对所研究的 6-PUS 并联运动模拟器进行正逆运动学分析和定姿态工作空间绘制。分析结果表明:该模拟器运动性能较为良好,对运动平台运动模拟,驾驶员体感测试等工程实际应用具有一定理论参考意义。

参考文献:

- [1] 宋国峰,程忠涛,袁立鹏,等. 运动模拟器及其运动平台系统的发展现状及应用前景[J]. 机械设计与制造,2008(6):230-232.
- [2] ZHANG Y, CAI C G, LIU Z H, et al. Space-to-plane decoupling method for six-degree-of-freedom motion measurements [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12):125005.

- [3] 李晓,彭利坤. 风浪条件下六自由度舰船运动模拟器运动仿真[J]. 自动化应用,2017(11):54-57.
- [4] 张建政,高峰,赵现朝,等. 六维并联地震模拟器机构的动力学分析与仿真[J]. 上海交通大学学报,2011, 45(9):1263-1268.
- [5] XU H W, ZHOU H B, TAN S X, et al. A six-degree-of-freedom compliant parallel platform for optoelectronic packaging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(11):11178-11187.
- [6] 王启明,张汉祖,蒋江月,等. 平面平台型 6-PSS 并联机构选型与参数优化[J]. 农业机械学报,2022, 53(5):449-458.
- [7] 王琰,郭飞飞,梁俊侨,等. 2T1R 印花定位双模式并联机器人机构设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(4):71-77.
- [8] 谢志江,程清,丁军,等. 双支链六自由度并联机构尺度设计与性能分析[J]. 中国机械工程,2022, 33(14):1680-1690.
- [9] FENG Y. Application of an improved GA-BPNN algorithm for wireless sensor network in hydrological forecasting [J]. Chemical Engineering Transactions, 2016(51):553-558.
- [10] 郭忠峰,赵启航. 3-UPS/UR 并联机构运动学分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):139-143.
- [11] ZHANG S Z, YUAN X L, DOCHERTY P D, et al. An improved particle swarm optimization algorithm and its application in solving forward kinematics of a 3-DoF parallel manipulator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(5):896-907.
- [12] 蒲志新,林靖皓,郭建伟,等. 6-UPS 并联机床性能分析及优化[J]. 机械设计与研究,2025,41(1):123-127.
- [13] 王韬略,林光春,全红鹏,等. 2T1R 并联机构的运动学及工作空间分析[J]. 机械设计,2022,39(3):10-18.
- [14] 胡凯文,张龙. 一种四自由度并联机构的运动学及工作空间分析[J]. 机械设计与制造,2025(4):66-71.
- [15] 王芮雪,田宝俊,李瑞琴,等. 基于 3-UPS/PPR 的推拿机器人运动学分析及仿真[J]. 机械传动,2025, 49(2):161-169.

收稿日期:2023-12-14