

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210832

# 一种四自由度运动平台及其姿态控制方法\*

张 琨<sup>1</sup> 霍建霖<sup>2</sup> 赵志启<sup>1</sup> 张 镭<sup>1</sup>

(1.河南大学物理与电子学院 开封 475001; 2.河南省特种设备安全检测研究院 开封 475001)

**摘要:** 为了减少无人机飞行控制算法调试的困难,需要一种地面试验设备以托举并限制飞行器的运动。为此提出了一种由绳索和丝杠复合驱动的四自由度运动平台,该平台垂直方向的直线运动由电机驱动丝杠提供,3个旋转方向的运动由4个电机拉动绳索驱动。为了实现该平台的位置和姿态控制,建立了该平台的动力学模型。由于平台各方向不同的动力学特性,使用模糊控制器实现的姿态补偿方法提高了系统的跟踪性能。通过仿真实验表明,该系统各方向调节时间小于0.2 s,位置跟踪误差为0,具有响应速度快、抗干扰能力强、定位精度高等优点,可以辅助完成飞行器控制系统的调试工作,具有重要的应用价值。

**关键词:** 并联平台;动力学模型;绳索驱动;姿态控制;模糊控制器

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## A 4-DOF motion platform and its attitude control method

Zhang Kun<sup>1</sup> Huo Jianlin<sup>2</sup> Zhao Zhiqi<sup>1</sup> Zhang Lei<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. Henan Institute of Special Equipment Safety Inspection and Testing, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** In order to reduce the difficulty of adjusting the flight control algorithm of unmanned aerial vehicles, ground test equipment is needed to lift and limit its movement. Therefore, a 4-DOF motion platform driven by ropes and a leading screw is proposed. The vertical linear motion of the platform is provided by the motor-driven lead screw, and the motions in three rotation directions are driven by four motors pulling the ropes. In order to realize the position control of the platform, the dynamic model of the platform is established. Due to the different dynamic characteristics of the platform in each direction, the attitude compensation method realized by the fuzzy controller is used to improve the tracking performance. The simulation results show that in each movement direction, the settling time is less than 0.2 seconds and the position tracking error is zero. So, the system has the advantages of fast response, strong anti-interference ability, and high positioning accuracy. It can assist in the adjustment of a copter's control system and has great application significance.

**Keywords:** parallel platform; dynamic model; rope driven; attitude control; fuzzy controller

## 0 引 言

由于无人机应用场景越发复杂,对其飞行控制算法进行设计和调试也逐渐面临更多挑战。为方便在实验室的调试工作,需要开发能够对其进行托举和支撑的运动系统。葛畅、高佳佳等设计了相关的无人机测试装置,但该系统无驱动机构,无法实现对无人机飞行控制器在特定条件下的单独测试<sup>[1-2]</sup>。Petrasinovic等<sup>[3]</sup>提出使用Stewart平台进行飞行模拟,但其设计难度较大且造价较高。由于一般情况下无人机的姿态和高度这4个自由度位于控制内环

中,相较于位置控制更为关键,因此一种能够驱动其进行升降及三轴转动的运动平台可以实现飞行控制模块硬件在环路中(hardware in the loop, HIL)的仿真。绳索驱动并联机器人以绳索的拉力实现末端执行器在空间的运动,具有有效负载大、动态响应快和工作空间大的优势<sup>[4-5]</sup>。根据这些优点,本文提出了一种绳索和丝杠共同驱动的四自由度运动平台,平台与丝杠通过球铰连接,丝杠在其伺服电机驱动下可牵引平台做升降运动,4根绳索连接了上平台和滑轮组。绳索与滑轮之间长度的变化改变平台的姿态。

由于该平台4个自由度的运动互相耦合,且具有两种

收稿日期:2022-07-26

\* 基金项目:河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS032)资助

驱动方式,其中绳索仅提供拉力,平台的动力学模型又具有高度的非线性,因此如何实现其姿态控制是需要深入研究的问题。传统 PID 控制器虽然结构简单,但其对复杂非线性系统的适应性较差。因此本文在探讨该平台的控制方法时,比较了基于反解的单驱动器闭环控制和基于姿态补偿的传统 PID 控制及模糊控制方法,实现了平台运动的高精度及高响应速度。

## 1 运动学分析

绳索和丝杠共同驱动的四自由度运动平台结构如图 1 所示。

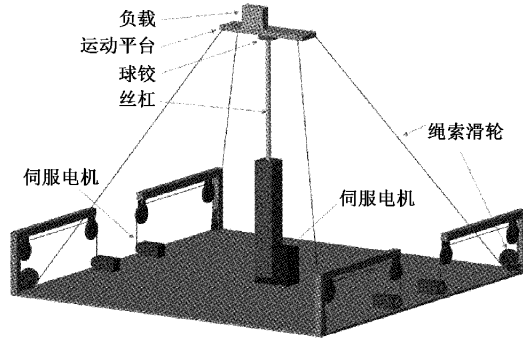


图 1 四自由度运动平台结构图

当绳索的条数  $n$  与运动平台自由度数  $m$  之间满足:

$$m = n + 1 \quad (1)$$

并联机构完全约束<sup>[6]</sup>。因此平台的 3 个旋转自由度可由 4 根绳索完全约束。

四自由度运动平台参考坐标系和相关参数如图 2 所示,固定于地面的静止坐标系为  $\{O\}$ , 固连在运动平台的坐标系为  $\{P\}$ 。 $\{O\}$  的原点  $O$  在丝杠外套筒底部中心,  $\{P\}$  的原点  $P$  固定在球铰的中心。向量  ${}^O\mathbf{l}_i = \overrightarrow{A_i B_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为坐标系  $\{O\}$  中第  $i$  根绳索的位置矢量。向量  ${}^P\mathbf{a}_i = \overrightarrow{PA_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为坐标系  $\{P\}$  中从原点  $P$  到第  $i$  根绳索与平台连接点的位置矢量。向量  ${}^O\mathbf{b}_i = \overrightarrow{OB_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为坐标系  $\{O\}$  中从原点  $O$  到第  $i$  根绳索与滑轮连接点的位置矢量, 向量  ${}^P\mathbf{p} = \overrightarrow{OP}$  为坐标系  $\{P\}$  原点  $P$  在坐标系  $\{O\}$  中的位置矢量。向量  ${}^O\mathbf{b}_i, {}^P\mathbf{a}_i$  为固定常量。上平台的姿态和位置将随着  ${}^O\mathbf{p}, {}^O\mathbf{l}_1, {}^O\mathbf{l}_2, {}^O\mathbf{l}_3, {}^O\mathbf{l}_4$  长度的改变而变化。在已知平台姿态和丝杠伸长求矢量  ${}^O\mathbf{l}_i$  的长度为运动学位置反解, 而在已知矢量  ${}^O\mathbf{l}_i$  和  ${}^O\mathbf{p}$  的长度求平台姿态为运动学位置正解。

### 1.1 运动学位置反解

设  $\boldsymbol{\theta} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  是描述平台姿态的欧拉角,  ${}^O\mathbf{R}$  是平台坐标系  $\{P\}$  到  $\{O\}$  的旋转矩阵<sup>[7-8]</sup>。则有:

$${}^O\mathbf{l}_i = {}^O\mathbf{b}_i - {}^O\mathbf{p} - {}^O\mathbf{a}_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$${}^O\mathbf{a}_i = {}^O\mathbf{R} {}^P\mathbf{a}_i \quad (3)$$

第  $i$  根绳索的长度可以表示为:

$${}^O l_i = \| {}^O\mathbf{l}_i \|, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

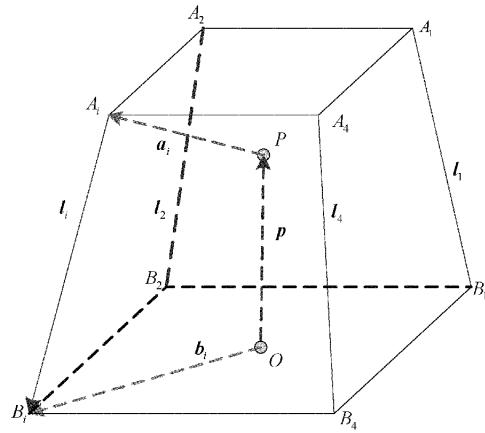


图 2 坐标系和系统结构参数

当运动平台的初始姿态为 0 时, 4 根绳索长度相同。设为初始长度  $l_0$ , 则绳长变化量与绕线滚筒转动角度的关系为:

$$\Delta^O l_i = {}^O l_i - l_0 = r_i \mu_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

其中,  $r_i$  是绕线滚筒半径,  $\mu_i$  是滚筒转动角度。

### 1.2 运动学位置正解

根据式(2)和(4), 可构造函数  $F_i(\boldsymbol{\theta})$ :

$$F_i(\boldsymbol{\theta}) = \| {}^O\mathbf{l}_i \| - {}^O l_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式(6)由 4 个非线性方程组成, Newton-Raphson 迭代公式为:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \boldsymbol{\theta} - \mathbf{J}_\theta^{-1} \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

式中:  $\boldsymbol{\theta}^*$  为下一次迭代的欧拉角。其中  $\mathbf{J}_\theta$  表示为:

$$\mathbf{J}_\theta = [\mathbf{J}_{\theta 1}, \mathbf{J}_{\theta 2}, \mathbf{J}_{\theta 3}, \mathbf{J}_{\theta 4}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_{\theta i} = \left[ \frac{\partial F_i(\boldsymbol{\theta})}{\partial \phi}, \frac{\partial F_i(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta}, \frac{\partial F_i(\boldsymbol{\theta})}{\partial \psi} \right], \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

$\mathbf{J}_\theta$  不是方阵, 可以通过 Moore-Penrose 伪逆进行计算<sup>[9]</sup>。设  $\mathbf{J}_\theta^-$  是  $\mathbf{J}_\theta$  的伪逆, 即:

$$\mathbf{J}_\theta^- = \mathbf{J}_\theta^T (\mathbf{J}_\theta \mathbf{J}_\theta^T)^{-1} \quad (10)$$

经过有限次迭代得到平台姿态  $\boldsymbol{\theta}^*$  可以参与到平台的姿态补偿控制中。

## 2 动力学分析

采用 Newton-Euler 公式<sup>[10]</sup>表示的惯性参考系中的平动动力学方程为:

$$m \dot{\mathbf{v}}_e = \mathbf{f}_i + \mathbf{f}_q + \mathbf{f}_d + m \mathbf{g} \quad (11)$$

式中:  $m$  为平台及负载质量,  $\mathbf{v}_e$  为平台质心处速度,  $\mathbf{f}_i$  为第  $i$  根绳上拉力,  $\mathbf{f}_q$  为丝杠驱动力,  $\mathbf{f}_d$  为阻尼力,  $\mathbf{g}$  为重力加速度。由于平台只有垂直方向可直线运动, 式(11)中矢量在向垂直方向投影后可简化为标量方程。

在平台坐标系下表示的转动动力学方程为:

$$\mathbf{I}_p \dot{\boldsymbol{\omega}}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times (\mathbf{I}_p \boldsymbol{\omega}_p) = \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_g + \mathbf{M}_d \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{M}_p$  是在坐标系  $\{P\}$  中 4 根绳索的总力矩;  $\mathbf{M}_g$  是在坐标系  $\{P\}$  中平台和负载所受的重力力矩,  $\mathbf{M}_d$  为阻尼

力矩。

在已知输入力和力矩条件下,使用数值方法求解式(11)和(12)表示的微分方程可得加速度、速度及位置等运动状态。

### 3 控制器设计

PID 控制器具有结构简单、鲁棒性强、易于参数调整等多方面的优点,使用 PID 控制器的绳长和高度反馈控制系统框图如图 3 所示。在给定平台姿态和垂直方向的高度后,运动学反解解算出该姿态所需的 4 根绳长,与通过伺服电机编码器反馈的绳长比较后作为限幅 PID 控制器的输入信号。为了时刻保证 4 根绳索均为拉紧状态,在控制器输出上添加设定的预紧力常值,以此作为伺服电机的力矩指令以驱动平台旋转<sup>[11]</sup>。伺服电机编码器输出转换为绳长后作为位置反馈参与控制过程。而垂直方向的高度则直接采用位置闭环来实现。

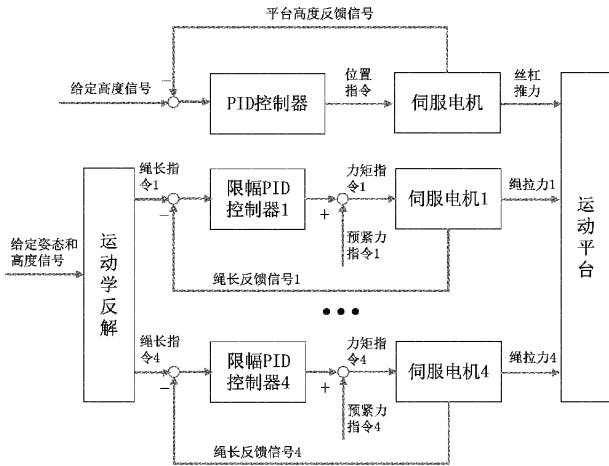


图 3 基于 PID 控制器的系统框图

由于运动平台结构和负载质量的不对称,平台在各个转动方向上的动力学特性也是不相同的。图 3 所示的控制系统由于无法检测平台的实际姿态而无法对各个方向的不同特性进行补偿。因此在已知绳长的反馈信号后,可以通过运动学正解求出平台的实际姿态参与到反馈当中<sup>[12]</sup>。这样可以对 3 个姿态通道的控制器分别调整 PID 参数以满足不同旋转方向的性能要求。添加了正解补偿的控制器结构框图如图 4 所示。

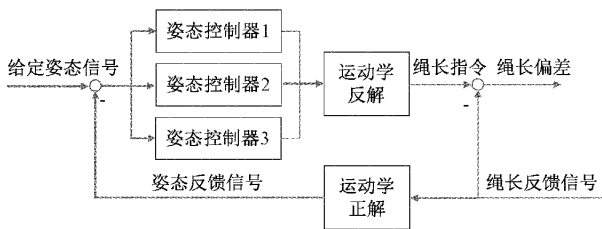


图 4 基于正解补偿的控制器结构框图

如果能在运动平台上安装陀螺仪以反馈平台姿态,则

陀螺仪可以替代正解模块直接参与系统的控制,如图 5 所示。

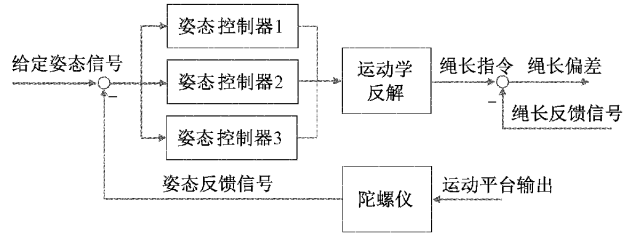


图 5 基于陀螺仪的姿态补偿控制器结构框图

运动平台动力学方程表现出高度的非线性,使用传统 PID 控制器不能得到较好的控制效果。因此使用模糊 PID 控制器<sup>[13-14]</sup>作为 4 个自由度各个方向的位置和姿态控制器。控制器结构如图 6 所示。调整  $k_e, k_d, k_i, k_p$  的参数可以适应不同方向的动态特性要求<sup>[15]</sup>。模糊控制器输入 In1, In2 和输出 U 的论域均为  $[-1, 1]$ 。输入的模糊子集为  $\{N, Z, P\}$ , 输出的模糊子集为  $\{NB, NM, Z, PM, PB\}$ 。

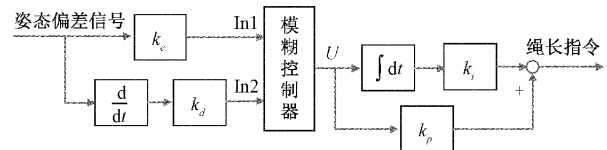


图 6 模糊 PID 控制器结构框图

模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则

U	In1		
	N	Z	P
N	NB	NM	Z
In2	Z	NM	PM
P	Z	PM	PB

模糊控制器的隶属度函数如图 7 所示。

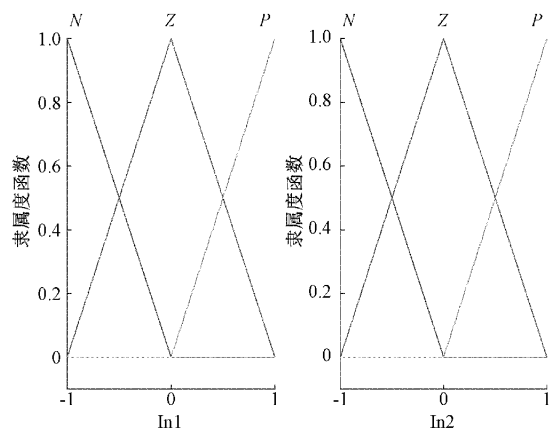


图 7 隶属度函数

### 4 仿真分析

为了验证四自由度并联运动平台控制器的控制效果,特构建了如图 3 和 5 所示的仿真模型。其中运动平台的系统模型由 MATLAB 中 Simscape 的 Multibody 工具箱搭建,系统仿真框图如图 8 所示。

平台主要参数如表 2 所示。

首先测试如图 3 所示只有位置闭环的控制器性能。因为控制平台姿态的限幅 PID 控制器将 4 个绳长的偏差指令转换为 4 个伺服电机的驱动力矩指令,因此 4 路控制器参数需要相同或相近以保证拉力响应的一致。

给定周期为 8 s,脉冲宽度为 1 s,幅值为 0.1 rad 和 100 mm 的方波作为单自由度姿态和位置指令,既出现在 1、3、5 和 7 s 处持续 1 s 的绕  $x$ 、绕  $y$ 、绕  $z$  和垂直上升的方波信号,平台的输出如图 9 所示。由图 9 可以发现,仅采用位置控制时,由于负载偏离平台中心而造成平台各方向动

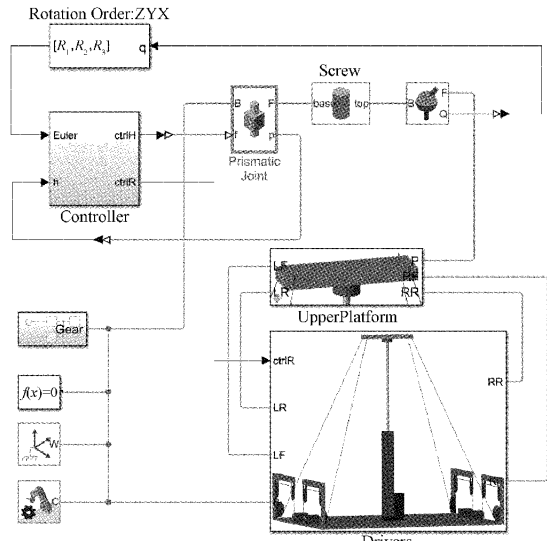


图 8 Simscape 仿真框图

表 2 平台主要参数

名称	参数	单位
上平台绳索连接点坐标	$A_1 = [0.050; 0.175; 0]$	m
	$A_2 = [-0.050; 0.175; 0]$	
	$A_3 = [-0.050; -0.175; 0]$	
	$A_4 = [0.050; -0.175; 0]$	
下平台卷轴中心坐标	$B_1 = [0.750; 0.750; 0]$	m
	$B_2 = [-0.750; 0.750; 0]$	
	$B_3 = [-0.750; -0.750; 0]$	
	$B_4 = [0.750; -0.750; 0]$	
球铰中心初始位置	$p = [0; 0; 1]$	m
球铰中心距平台中心距离	$p_c = 0.03$	m
负载质量	$m_k = 0.4$	kg
负载重心距平台中心位置	$p_k = [-0.05; -0.02; 0.05]$	m
上平台质量	$m_p = 2.16$	kg
上平台惯量	$I_{px} = 0.001872$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
	$I_{py} = 0.028872$	
	$I_{pz} = 0.0306$	

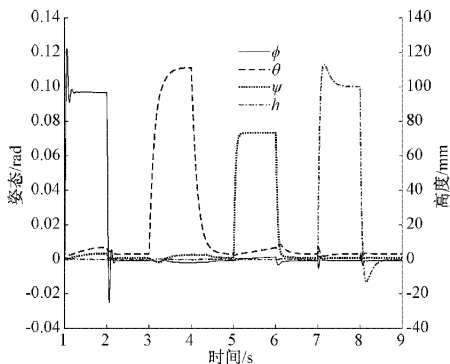


图 9 单方向方波信号跟踪效果

力学特性不同,因而各方向控制效果存在差异,单方向的阶跃指令会产生较大的牵连运动。此外,绕  $y$  轴和绕  $z$  轴转动的跟踪精度很低。

为了减小单个方向控制效果的差异,采用如图 5 所示的姿态补偿方法,使用经典 PID 控制器得到的各方向平台输出如图 10 所示。可以看出在添加姿态补偿之后,尽管有偏心负载的影响,各方向的动态响应都有所提高。对于给定阶跃信号的输入,系统都是无静态误差的,但是绕  $y$  和垂直运动方向超调量较大,且各方向牵连运动仍很明显。在使用模糊 PID 控制器之后,系统响应如图 11 所示,各方向调节时间小于 0.2 s,位置跟踪误差为 0。由此可以

看出运动平台的动态特性得到了明显的改善,而且各方向的牵连运动都被控制器压制的很好。

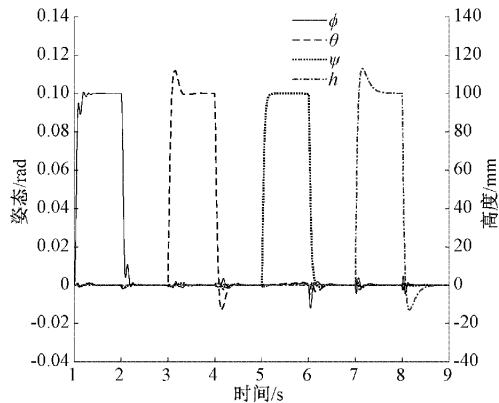


图 10 经典 PID 控制器姿态补偿后单方向跟踪效果

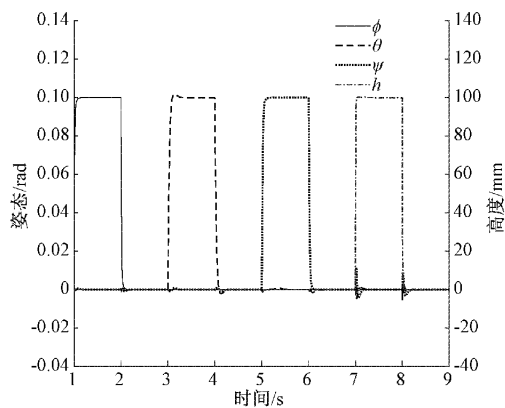


图 11 模糊 PID 控制器姿态补偿后单方向跟踪效果

## 5 结 论

为了减少无人机飞行控制算法调试的困难,提出了一种由绳索和丝杠复合驱动的四自由度测试平台。该平台可以托举并限制飞行器的运动,其垂直方向由电机驱动丝杠提供,3 个旋转方向由 4 个电机拉动绳索驱动。虽然平台各方向具有不同的动力学特性,但在添加了所设计的模糊 PID 控制器进行姿态补偿后,该 4 自由度绳驱并联运动平台能够实现高动态性和高精度的位置和姿态伺服控制。该平台结构紧凑,运动范围广,垂向刚度大,可以有效的保证旋翼无人机的调试,加快系统开发的速度。

## 参考文献

- [1] 葛畅,何振鹏,年哲,等. 四旋翼无人机姿态测试平台设计及运动控制研究[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 136-140.
- [2] 高佳佳,高嵩,曹凯,等. 四旋翼飞行姿态测试平台设计及稳定性分析[J]. 计算技术与自动化, 2018, 37(3): 42-49.
- [3] PETRASINOVIC M D, GRBOVIC A M, PETRASINOVIC D M

Real coded mixed integer genetic algorithm for geometry optimization of flight simulator mechanism based on rotary stewart platform [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(14): 1:28.

- [4] ZHANG F, SHANG W, ZHANG B, et al. Design optimization of redundantly actuated cable-driven parallel robots for automated warehouse system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 56867-56879.
- [5] GAO Z, ZHANG D. Performance analysis, mapping, and multiobjective optimization of a hybrid robotic machine tool[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(1): 423-433.
- [6] POTT A, MÜTHERICH H, KRAUS W, et al. IPAnema: A family of cable-driven parallel robots for industrial applications [M]. Heidelberg: Springer, 2013: 119-134.
- [7] JIANG Q, KUMAR V. The inverse kinematics of cooperative transport with multiple aerial robots[J]. IEEE Trans. Robot., 2013, 23(1): 136-145.
- [8] 高峰,李艳,黄玉美,等. 3-RPS 并联机构运动学标定方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 568-574.
- [9] 张傲杰,张尚盈,陈皓晖. 绳驱并联机器人实时正解数值算法[J]. 机床与液压, 2021, 49(18): 42-45.
- [10] CHEN C T, LIEN W Y, CHEN C T, et al. Dynamic modeling and motion control of a cable-driven robotic exoskeleton with pneumatic artificial muscle actuators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 149796-149807.
- [11] 邓槟槟,尚伟伟,张彬,等. 6 自由度绳索牵引并联机器人的快速终端滑模同步控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(13): 50-58.
- [12] 王启明,苏建,张兰,等. 基于 L-M 算法的正交 Stewart 平台姿态正解的初值补偿[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 97-104.
- [13] 张明岳,李丽敏,温宗周,等. 基于改进 Elman 神经网络和模糊控制的智能灌溉算法设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 155-160.
- [14] 刘洋,行鸿彦,侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.
- [15] MENDEL J M. Uncertain rule-based fuzzy systems: Introduction and new directions [M]. Heidelberg: Springer, 2017: 229-234.

## 作者简介

张琨,副教授,主要研究方向为自动检测技术。

霍建霖,高级工程师,主要研究方向为自动检测技术和特种设备检测技术。

赵志启,硕士研究生,主要研究方向为机器人技术。

张镭(通信作者),教授,主要研究方向为机电系统控制。

E-mail: zhanglei@vip.henu.edu.cn