

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.003

一种六自由度海浪模拟并联平台的 零点标定与性能评估*

郭云鹏, 陈 柏*, 吴洪涛
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对并联机器人中存在的运动精度欠缺的问题,对一种用于海浪模拟的六自由度并联平台进行了零点标定与性能评估。确立了并联平台的运动控制模型,通过齐次坐标方法建立了该并联平台的运动学反解,并且在运动学反解的基础上采用边界搜索法确定了平台定姿态时的工作空间。采用“PC机+运动控制卡”的控制模式对该平台进行了运动控制系统的设计,实现了并联平台的运动控制。首先运用矢量推导法建立了平台的零点误差模型,然后借助于激光跟踪仪对平台进行了零点标定,提高了平台的运动性能。最后针对特定的海浪谱,利用该平台对其进行了模拟实验,并根据实验结果对平台的跟踪性能进行了分析。研究表明,经过零点标定后的并联平台能够很好地对海浪进行跟踪模拟。

关键词: 并联平台; 海浪模拟; 运动控制; 零点标定; 性能评估

中图分类号: TH133; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)02-169-06

Zero calibration and performance assessment of a 6-DOF parallel platform used for wave simulation

GUO Yun-peng, CHEN Bai, WU Hong-tao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem that parallel robot exists the lack of movement precision, the zero calibration and performance assessment for a 6-DOF parallel platform used for wave simulation were completed. The inverse kinematics was acquired by using homogeneous coordinates method so as to establish the motion control model of the platform, and the workspace of certain posture was obtained by using boundary search method based on inverse kinematics. The motion control of the platform was realized, the design of control system was done by choosing PC and motion controller as the control mode. The motion performance was improved, vector derivation method was adopted to build the zero point error model, and zero calibration was implemented with the help of laser tracker. Finally, the platform was used to simulate a certain wave spectrum and the tracking performance was analyzed according to the experimental results. The results indicate that the calibrated platform has a good simulation performance.

Key words: parallel platform; wave simulation; motion control; zero calibration; performance assessment

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2013AA041004);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012798);江苏省产学研联合创新资金--前瞻性联合研究资助项目(BY2012011, BK2013003-10);南京市科委产学研计划资助项目(201204014)

作者简介: 郭云鹏(1990-),江西赣州人,男,主要从事机器人技术方面的研究. E-mail:gyp199009@aliyun.com

通信联系人: 陈 柏,男,教授,博士生导师. E-mail:chenbye@126.com

0 引 言

相较于串联机构,六自由度并联平台具有很多优越的性能。并联机器人具有刚度大、承载能力强、动态响应快等优点,因此,从20世纪80年代以来,并联机器人理论和应用得到国内外学者的广泛关注,并成为机器人领域的重要组成部分之一。目前,六自由度并联平台被广泛应用于加工中心、运动模拟器、空间宇航器对接、水下求援器对接、大型射电望远镜的轨迹精密控制等,前景巨大^[1-2]。

由于平台各运动部件在制造加工和装配过程中存在误差,使得并联机构的理论结构参数与实际结构参数之间存在偏差,从而使并联机构的运动学模型不确定,进而影响机构的工作精度^[3-4]。为了提高平台的空间定位精度,一方面可以通过增加装配精度实现,但是成本较高;而另一方面则是通过对机构进行运动学标定来达到目的,这也是目前被广为应用的方法。另据研究表明,在所有机构误差当中,零点误差是影响并联平台精度的主要误差源,因此通过对平台进行零点标定可以有效提高其运动精度^[5]。

在并联机构被正式应用于实践之前,有必要对其各项性能指标进行评估,而本研究的研究对象为用于海浪模拟的并联平台,尤其需要对其模拟跟踪性能进行评估。

因此,本研究将对这一特定的并联平台进行运动学分析,从而获取其运动工作空间以及对其运动控制系统进行设计,在完成对其零点标定后,将其运用于特定海浪谱的模拟之中,以实现其模拟跟踪性能的评估。

1 平台结构及运动学分析

1.1 平台结构组成

本研究的研究对象为六自由度海浪模拟并联平台,其实物图如图1所示。其主要结构包括固定的下平台,可运动的带T形槽上平台,六根滚珠丝杆副电动推杆以及分别用来连接上平台和推杆、推杆和下平台的上、下虎克铰链。

其中,上、下平台的结构尺寸为:上平台铰链中心分布在 $\Phi 720$ mm圆周上,3组呈均匀分布,即两两之间夹角为 120° ,每组的两个中心点所夹圆心角为 20° ;下平台铰链中心分布在 $\Phi 1\ 000$ mm圆周上,同样3组为均匀分布,每组的两个中心点所夹圆心角为 20° 。虎克铰链可旋转角度范围为 $[-45^\circ, 45^\circ]$,电动推杆为EXLAR公司生产的丝杠副缸体再自行配置同步带传



图1 并联平台实物图

动、伺服电机和限位开关,配置后的电动缸的最短安装尺寸为837 mm,最大行程为455 mm,最高转速为2 500 r/min,最高直线速度为212 mm/s,定位精度为0.025 mm。

1.2 运动学反解

为了达到对并联平台的实时控制,必须对平台进行运动学分析^[6]。运动学分析包括运动学正解分析,运动学反解分析和工作空间分析等,其中运动学正解求解较复杂。故而,并联平台的控制主要依据反向运动学模型。下面给出并联平台运动学反解的求解过程。

本研究根据并联机构相关理论建立的坐标系如图2所示。

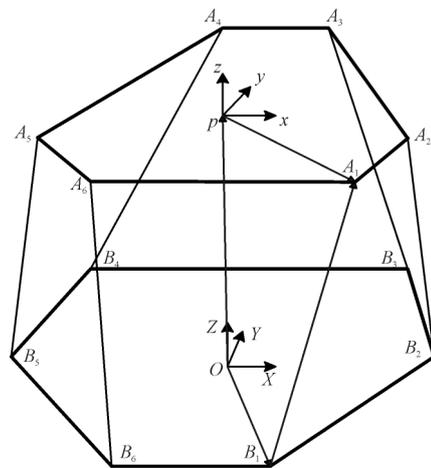


图2 并联平台结构简图及坐标系示意图

图2中, $A_i(i=1,2,\dots,6)$ 为上平台铰点中心, $B_i(i=1,2,\dots,6)$ 为下平台铰点中心。静坐标系 $O-XYZ$ 与下平台固联,原点 O 位于下平台中心, OX 轴和 OY 轴都在静平台平面内并且 $OY \perp B_3B_4$;动坐标系 $p-xyz$ 与上平台固联,原点 p 位于上平台中心, px 轴和 py 轴都在动平台平面内并且 $py \perp A_3A_4$ 。

运动学反解即已知动平台的位姿求解各电动推杆的长度。本研究采用RPY角的表示方法描述动平台的姿态角。

假设动平台的位姿广义坐标表示为:

$$\mathbf{q}=[x,y,z,\alpha,\beta,\gamma]^T \quad (1)$$

式中: x,y,z —动坐标系原点 p 在静坐标系中的坐标;
 α,β,γ —动坐标系相对于静坐标系的RPY角表示。

根据RPY角及旋转变换理论可得相应的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \text{Rot}(z,\gamma)\text{Rot}(y,\beta)\text{Rot}(x,\alpha) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $c = \cos, s = \sin$ 。

从动坐标系到静坐标系的齐次变换矩阵为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设上平台各铰点在动坐标系中的表示为: $A_i^p(x_i^p, y_i^p, z_i^p)$, 下平台各铰点在静坐标系中的表示为: $B_i^o(X_i^o, Y_i^o, Z_i^o)$, $i=1,2,\dots,6$, 则有第 i 根驱动杆向量的齐次坐标表示为:

$$\mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} l_{ix} \\ l_{iy} \\ l_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{B}_i^o \mathbf{A}_i^o = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_i^p \\ y_i^p \\ z_i^p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i^o \\ Y_i^o \\ Z_i^o \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可得第 i 根驱动杆的长度为:

$$l_i = \|\mathbf{l}_i\| = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2} \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (5)$$

1.3 工作空间分析

工作空间是机器人末端所能达到的目标点的集合,它是用来衡量并联机构的设计的重要依据,同时并联机构的整体性能取决于工作空间^[7]。

影响工作空间的大小和形状的因素很多,主要包括驱动杆的杆长限制,虎克铰的最大转角限制以及相邻驱动杆之间的尺寸干涉。

一般来说,并联机构工作空间边界是由一组高度非线性方程确定的曲面,精确计算工作空间体积很难。但是研究者可以通过边界搜索法,即将三维空间细分成大小一样的小六面体,运用运动学反解判断机器人在每个六面体中心点处是否属于其定姿态工作空间,而一个点是否属于其工作空间,则取决于反解所得的平台位姿是否满足前面提到的3个约束条件,即杆长限制、转角限制以及尺寸干涉^[8]。

由于零姿态时的定姿态工作空间最大^[9],本研究在这里只考虑当姿态角 $\alpha=\beta=\gamma=0^\circ$ 时的位置工作空

间,采用边界搜索法利用Matlab计算得到一定姿态角下的位置工作空间,如图3所示。

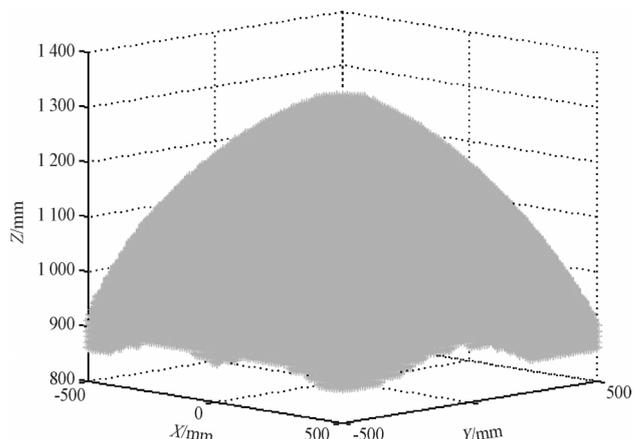


图3 姿态角为(0,0,0)时的工作空间

从图3中可以看出,工作空间总体呈一钟形,边界由3部分组成:第一部分是由于受驱动杆最大杆长限制而形成的工作空间的上部边界,第二部分是由于受驱动杆最短杆长限制而形成的工作空间的下部边界,第三部分是由于受铰链转角限制形成的两侧边界。

2 控制系统设计

2.1 控制模式选择

并联机器人采用基于PC机+运动控制卡的开放式控制模式。控制系统思路为:给平台控制系统输入一定的位移曲线或数据,运动控制卡根据读入的数据来驱动伺服电动缸推杆进行相应规律的伸缩运动,从而使平台机构实现所预期的运动规律^[10],系统控制框图如图4所示。

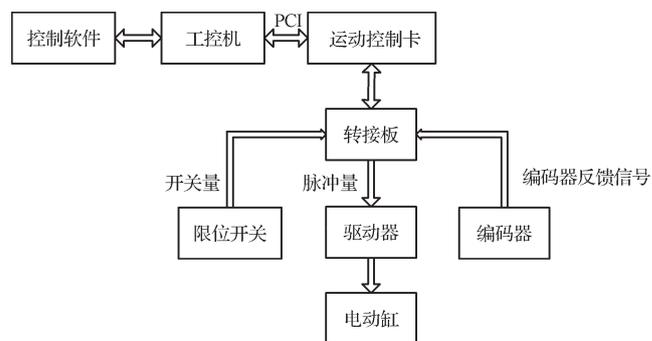


图4 系统控制框图

2.2 硬件设计

控制系统硬件主要包括工控机、运动控制卡、伺服驱动系统以及限位开关等。其中,运动控制卡采用众为兴ADT-856六轴运动控制卡,该卡是基于PCI总线的高性能六轴伺服/步进控制卡。

交流伺服驱动模块选用安川系列伺服驱动。另

外,限位开关采用欧姆龙电感式接近开关,具有体积小、反应灵敏、安装方便等优点。

2.3 软件设计

控制系统软件分为上位机软件和下位机软件,上位机软件基于工控机,主要负责系统管理,状态显示以及数据处理等实时性比较弱的任务;下位机软件基于ADT856运动控制卡,利用控制卡强大的运算能力完成运动控制、限位信号检测和安全监控等实时性比较强的任务。

上位机软件采用基于 Windows 操作系统的面向对象的可视化软件开发工具 Visual C++6.0 进行开发,通过调用 ADT-856 控制卡提供的动态链接库与下位机相联系,从而共同完成对并联平台的控制。控制流程图如图 5 所示。

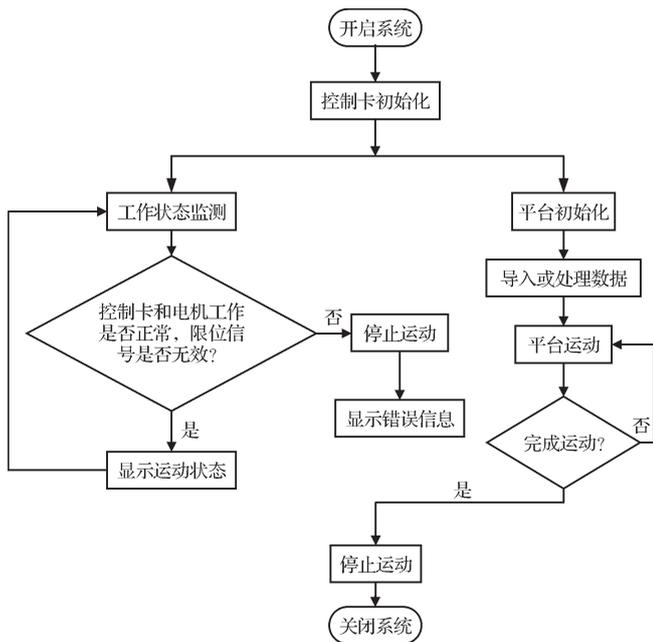


图 5 控制流程图

上位机软件主界面如图 6 所示。软件主要包含控制卡初始化、参数设定、状态监测、指定轨迹运动、手动调试、回零等功能。



图 6 控制软件主界面

3 零点标定

零点标定是指当机器人末端处于零点位置时对机器人各支链位置误差进行辨识补偿,属于机器人运动学标定的一种。本研究即采用外部标定法。外部标定方法是利用高精度的外部传感器检测末端位姿信息,并构造末端位姿误差与模型计算值间的误差范函,进而通过相应的逆解或正解辨识模型来识别几何参数^[11-12]。

3.1 零点误差建模

在图 2 中,根据矢量封闭原则,可得:

$$r = b_i + l_i w_i - a_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (6)$$

其中, $r = \overline{Op}$, $b_i = \overline{OB_i}$, $a_i = \overline{pA_i}$, $w_i = \overline{B_i A_i} / l_i$ 。

对式(6)进行一阶摄动^[13],可得:

$$\Delta r = \Delta l_i w_i + l_i \Delta \theta_i \times w_i - \Delta \theta \times a_i \quad (7)$$

式中: Δr , $\Delta \theta$ —动平台参考点位置误差矢量和动平台姿态误差矢量; Δl_i , $\Delta \theta_i$ —驱动杆 i 的零点误差和姿态误差矢量。

因为 $w_i^T (\Delta \theta_i \times w_i) = 0$, 等式(7)两边同时点乘 w_i , 得到驱动杆 i 的零点误差:

$$\Delta l_i = w_i^T \Delta r + (a_i \times w_i)^T \Delta \theta \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (8)$$

本研究通过实验测得并联平台实际位姿并与理想位姿进行比较,得到参考点位姿误差 Δr 和 $\Delta \theta$, 代入到式(8),可求得每根驱动杆的零点误差。

3.2 标定实验

本研究采用激光跟踪仪对动平台位姿进行测量,位置可以通过仪器直接获取,而姿态则可以间接通过测量动平台上同一平面上的确定的 3 个点的坐标计算获取。实验中给定一组目标点位姿如表 1 所示,分别测量动平台从零点到给定目标点时的实际位姿如表 2 所示。

对比实际位姿与理论位姿得到测量点的位姿误差如表 3 所示。

本研究将 6 个测量点的位姿误差代入式(8),得到 6 根驱动杆的 6 组零点误差,分别对这 6 组数值求取平均值,得到零点误差大小如表 4 所示。分别根据 6 根

表 1 测量点理论位姿

x/mm	y/mm	z/mm	α/rad	β/rad	γ/rad
100	100	962	$\pi/36$	$-\pi/36$	$\pi/36$
-100	100	962	$-\pi/36$	$\pi/36$	$\pi/36$
100	100	962	$\pi/36$	$-\pi/36$	$-\pi/36$
100	100	962	$-\pi/36$	$-\pi/36$	$\pi/36$
-100	100	962	$-\pi/36$	$-\pi/36$	$\pi/36$
-100	100	962	$\pi/36$	$\pi/36$	$-\pi/36$

表2 测量点实际位姿

x/mm	y/mm	z/mm	α/rad	β/rad	γ/rad
100.52	100.83	961.30	0.085	-0.088	0.091
-99.32	101.78	962.08	-0.082	0.087	0.086
101.61	102.74	961.43	0.090	-0.088	-0.089
101.30	102.96	961.44	-0.084	-0.088	0.085
-99.21	102.13	961.98	-0.083	-0.088	0.084
-98.94	101.38	962.04	0.092	0.087	-0.091

表3 测量点位姿误差

$\Delta x/mm$	$\Delta y/mm$	$\Delta z/mm$	$\Delta \alpha/rad$	$\Delta \beta/rad$	$\Delta \gamma/rad$
0.52	0.83	-0.70	-0.002	-0.001	0.004
0.68	1.78	0.08	0.005	0	-0.001
1.61	2.74	-0.57	0.003	-0.001	-0.002
1.30	2.96	-0.56	0.003	-0.001	-0.002
0.79	2.13	-0.02	0.004	-0.001	-0.003
1.06	1.38	0.04	0.005	0	-0.004

表4 驱动杆零点误差

$\Delta l_1/mm$	$\Delta l_2/mm$	$\Delta l_3/mm$	$\Delta l_4/mm$	$\Delta l_5/mm$	$\Delta l_6/mm$
1.40	-1.24	0.65	1.36	-1.99	0.81

驱动杆的零点误差大小调整系统回零时的杆长即可实现系统的零点标定。

4 基于六自由度并联平台的海浪模拟实验

船舶等在海洋中会受到海浪的扰动而产生振动,因此,海浪模拟器最重要的功能是模拟海浪产生的振动信息^[14]。

4.1 海浪谱数据获取

由于海浪的生成原理较为复杂,目前较多采用皮尔逊-莫斯柯维奇谱,简称P-M谱代替^[15],P-M谱表达式为:

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp\{-\beta(\frac{g}{u\omega})^4\} \quad (9)$$

式中: ω —圆频率; g —重力加速度; α 、 β —相应系数,取经验值 $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$; u —海面以上19.5 m高处的平均风速。

实验中,假定海面高19.5 m处的平均风速为3 m/s, g 取9.81 m/s²,得到的海浪谱曲线如图7所示。

4.2 实验及结果分析

本研究将海浪振幅值对应于平台的Z轴方向的变化量,利用运动学反解求得平台的6根驱动杆相对于平台在高度Z=1 000 mm时的长度变化。杆长数据通过控制系统的上位机读取并转换发送至驱动器,驱动器进而控制6个驱动电机作相应的动作,从而使

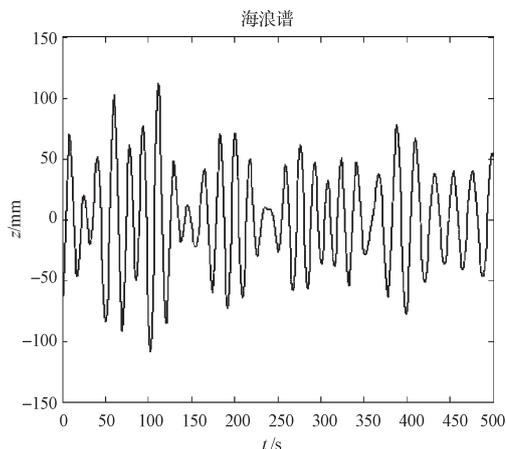


图7 海浪谱

得动平台实现振动模拟。

为了检测动平台的跟踪性能,实验中采用将6个编码器实时采集的电机转动信息转换成对应的驱动杆长变化量与理论的杆长变化量进行对比而获得。由于平台是沿Z轴方向的平动,6根杆的长度变化完全一致,取第一根驱动杆作为参考,其通过反解计算得到的理想驱动杆长度与实际驱动杆长度对比图如图8所示。从图8中可以发现:实际驱动杆长的变化规律与理想杆长变化基本一致,可见平台有较好的跟踪性能。

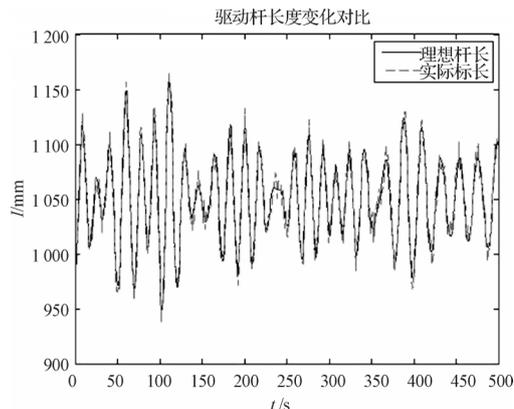


图8 实际杆长与理论杆长对比

5 结束语

本研究对一种六自由度并联平台进行了数学建模分析,获取了其运动学反解,分析了其工作空间,设计了该并联平台的运动控制系统,实现了动平台的运动控制。

为了提高动平台的运动控制精度,本研究从运动学标定入手实现了动平台的零点标定。为了验证动平台的模拟跟踪性能,本研究进行了基于并联平台的海浪振动模拟实验。研究表明,动平台能很好地对振动信息进行跟踪模拟。

参考文献(References):

- [1] 邱法维,袁建光,沙锋强,等. 六自由度减摇模拟器系统研发[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2012(12): 22-24.
- [2] 颜旗权. 六自由度飞行模拟器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2008.
- [3] PENG B B, GAO F. Modeling for calibration of parallel robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8): 132-135.
- [4] SHEN H P, ZHANG H F, XING X M. New progresses of error analysis modeling and calibration of parallel kinematic machine [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 9(1): 120-125.
- [5] 孙月海,王 兰,梅江平,等. 基于单目视觉的Delta机器人零点标定方法[J]. *天津大学学报*, 2013, 46(3): 239-243.
- [6] 王 军,杨 勇,罗诗风,等. 基于PMAC运动控制卡的六自由度运动平台控制系统开发[J]. *机床与液压*, 2012, 40(9): 77-80.
- [7] 潘大亨. 六自由度动感平台的控制与仿真[D]. 上海:华东理工大学机械与动力工程学院, 2012.
- [8] 王顺利. 6-3平台并联运动机床研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2010.
- [9] 齐 佐. 6-THRT并联机构受力分析与仿真[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院, 2008.
- [10] 张 松. 六自由度运动平台的控制系统[D]. 上海:华东理工大学机械与动力工程学院, 2011.
- [11] 蒋梦捷,张志宇,郑立功,等. 六自由度Stewart平台空间解析及误差分析[J]. *机械传动*, 2013, 37(2): 87-89.
- [12] 顾云鹭. 六自由度并联地震模拟振动台全误差分析及标定研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力学院, 2012.
- [13] 潘伯钊,宋铁民,王攀峰,等. 基于激光跟踪仪的混联机器人快速零点标定方法[J]. *机械工程学报*, 2012, 10(45): 31-37.
- [14] 皮阳军,王宣银,罗晓晔,等. 六自由度舰船运动模拟器随机海浪谱模拟[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(4): 375-378.
- [15] 徐德伦,于定勇. 随机海浪理论[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

- 郭云鹏,陈 柏,吴洪涛. 一种六自由度海浪模拟并联平台的零点标定与性能评估[J]. *机电工程*, 2015, 32(2): 169-174.
- GUO Yun-peng, CHEN Bai, WU Hong-tao. Zero calibration and performance assessment of a 6-DOF parallel platform used for wave simulation [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(2): 169-174.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第162页)

参考文献(References):

- [1] 日高照晃,山本信行,石田武. 行星齿轮装置均载机构中的各种误差和载荷分配的关系[J]. *日本机械学会论文集*, 1986, 52(480): 2200-2206.
- [2] KAHRAMAN A. Load sharing characteristics of planetary transmissions [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1994, 29(8): 1151-1165.
- [3] KAHRAMAN A. Static load sharing characteristics of transmission planetary gear sets: model and experiment [J]. *SAE transactions*, 1999, 108(6): 1954-1963.
- [4] 袁 茹,王三民. 行星齿轮传动的功率分流动态均衡优化设计[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(4): 410-412.
- [5] BODAS A, KAHRAMAN A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets [J]. *JSME, International Journal Series C*, 2004, 47(3): 908-915.
- [6] SINGH A. Application of a system level model to study the planetary load sharing behavior [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(3): 469-476.
- [7] LIGATA H, KAHRAMAN A, SINGH A. A closed-form planet load sharing formulation for planetary gear sets using a translational analogy [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(2): 567-572.
- [8] SINGH A, KAHRAMAN A, LIGATA H. Internal gear strains and load sharing in planetary transmissions: model and experiments [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(7): 1-10.
- [9] LIGATA H, KAHRAMAN A, SINGH A. An experimental study of the influence of manufacturing errors on the planetary gear stresses and planet load sharing [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(4): 1-9.
- [10] 周建星,董海军. 基于非线性动力学的行星传动均载性能研究[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(6): 808-811.
- [11] 陆俊华,朱如鹏,靳广虎. 行星传动动态均载特性分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 85-90.
- [12] 巫世晶,王晓笋,胡建正,等. 车辆行星传动系统虚拟样机技术研究与实践[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(6): 550-553.
- [13] 庞晓琛. 基于ANSYS的齿轮接触问题研究[J]. *起重运输机械*, 2008(6): 23-27.
- [14] 朱雪松,郝伟娜,高竹发. Halbach阵列型摆线永磁齿轮转动转矩的有限元分析[J]. *轻工机械*, 2013, 31(2): 24-28.
- [15] 文 周,陈婵娟,彭 彪. 基于Pro/E和ANSYS的输送辊有限元分析[J]. *包装与食品机械*, 2013(3): 38-40.

[编辑:罗向阳]