

直线电机驱动六自由度并联机构动力学特性研究

翟国栋^{1,2} 刘龙宇^{1,2} 蔡晨光³ 刘志华³ 梁 锋⁴

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 4. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

摘要: 直线电机驱动的六自由度并联机构可以实现高精度宽频带运动,在惯性单元校准、振动测试等领域具有广阔的应用前景。为了减小直线电机驱动对六自由度并联机构造成的幅值衰减问题,对机构进行动力学前馈控制分析。首先利用牛顿-欧拉法建立并联机构的动力学模型,简化动力学方程获得机构驱动力关系,在实验平台上进行实验,验证动力学模型准确性。利用传统运动学控制系统,结合动力学模型,设计一种动力学前馈控制方法,降低给定轨迹运动误差。实验结果表明,直线电机驱动的六自由度并联机构增加动力学前馈控制后,在沿X、Y、Z轴进行单自由度正弦运动时,运动误差分别下降55.5%、54.2%、59.8%。

关键词: 六自由度并联机构; 直线电机; 动力学模型; 前馈控制

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0450-09 OSID: 

Dynamic Characteristics of 6-DOF Parallel Mechanism Driven by Linear Motor

ZHAI Guodong^{1,2} LIU Longyu^{1,2} CAI Chenguang³ LIU Zhihua³ LIANG Feng⁴

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China
3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China
4. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

Abstract: Six-degrees of freedom parallel mechanisms driven by linear motors can realize high-precision and wide-band movements, and it had broad application prospects in inertial unit calibration, vibration testing and other fields. In order to reduce the amplitude attenuation of 6-DOF parallel mechanism caused by linear motor drive, dynamic feedforward control was analyzed for the mechanism. Firstly, the parameter model of the 6-DOF parallel mechanism was determined, and then the vector method was used to analyze the kinematic of the mechanism. Secondly, the dynamics model of the parallel mechanism used Newton – Euler principle. The driving force relationship of the mechanism was obtained by simplifying the dynamics equation. The driving force simulation curve was obtained by numerical analysis, and the experimental platform was built to obtain the experimental curve of the device driving force, which verified the accuracy of the dynamic model. Based on the classical motion closed loop control system and the dynamics model, a dynamic feedforward control method was designed to reduce the motion error of a given trajectory. Finally, experimental analysis of mechanism’s motion error in traditional kinematic control was done, and the motion error of the mechanism was compared. The experiment results showed that after added the dynamic feedforward control to the 6-DOF parallel mechanism driven by linear motor, the kinematic errors of the mechanism were reduced by 55.5%, 54.2% and 59.8%, when the mechanism carried out sinusoidal motion in X, Y and Z axes.

Key words: 6-DOF parallel mechanism; linear motor; dynamics modeling; feedforward control

收稿日期: 2022-07-26 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075512)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM21KFA12)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022YJSJD25)和宁东能源化工基地科技创新发展专项(2020NDYFLX0016)

作者简介: 翟国栋(1973—),男,教授,主要从事机械优化设计研究,E-mail: zgdl@cumtb.edu.cn

通信作者: 刘志华(1987—),男,副研究员,主要从事机器人与机构学研究,E-mail: liuzhihua@nim.ac.cn

0 引言

六自由度并联机构控制平台具有运动控制精度高、运动累积误差小、末端平台运动惯性小等特点,广泛应用于运动模拟、惯性单元校准、振动校准、医疗器械、航空航天等高精度领域^[1-4]。现有六自由度并联机构大多数采用伺服电动缸,虽然具有较高的运动控制精度和较长的使用寿命,但冲击载荷影响电动缸丝杠或轴承的传动^[5]。与伺服电动缸相比,直线电机位置精度高、机械传动过程中摩擦、噪声小,直接驱动负载可有效消除传动部件的柔性影响,可以实现宽频带运动控制,常用于高精度、高速运动控制领域^[6-8]。但直线电机在宽频带运动时,不可避免会引入扰动和噪声,造成稳定边界模糊,而且随着频率的增加,幅值和相位逐渐衰减。且现有六自由度并联机构的控制方法大多为运动学控制,没有考虑各运动支链间的驱动力耦合关系,而且较大的跟随误差导致机构运动轨迹误差增加^[9-11],无法满足直线电机驱动的六自由度并联机构的运动精度要求,因此研究直线电机的控制方法对于改善整个机构动态性能具有重要意义。

近年来,国内外学者针对六自由度并联机构的驱动方式、动力学特性分析以及控制方法等方面展开大量研究^[12-13]。在六自由度并联机构的动力学研究方面,一般是利用动力学模型实时控制机构理想运动轨迹的驱动力和力矩,以改善并联机构的非线性问题和耦合问题^[14-18]。传统基于运动学三闭环控制方法虽可满足在低频小幅值条件下较好的运动精度要求,但由于对较高频率或大幅值条件下没有考虑机构重力、离心力等非线性因素以及并联机构各运动支链间的动力学耦合因素,所以机构的控制精度较低,响应速度较慢^[19-21]。郑铁雄等^[22]针对 3-PRS-XY 混并联机构提出了一种计算力矩控制方法,即基于拉格朗日法建立机构的动力学模型,通过叠加机构不同位姿下的静力反解,得出力位并行所需的驱动力前馈模型。倪涛等^[23]基于 Stewart 平台在离线状态下估算出电动缸的摩擦力,基于机构的动力学模型补偿动平台的重力和摩擦力,提出了一种动力学前馈柔顺控制方法,可以使装置在不借助传感器的状态下,保证平台的柔顺运动,减少机构运行过程的刚性碰撞,延长了增加装置的使用寿命。YANG 等^[24]考虑并联机器人的动态耦合以及非线性问题,基于并联机构的模态矩阵以及质量矩阵的正交性,提出了解耦动力学方程的模态空间力学控制的方法,利用 PID 控制实验验证了该方法可以有效改善现有工作空间以及提高装置的控

制精度。

在直线电机驱动的六自由度并联机构的动力学相关研究方面,当前国内外学者在直线电机驱动、六自由度并联机构结构设计、机构动力学特性分析以及前馈控制方法等方面进行了深入研究,但对于直线电机驱动的六自由度并联机构的研究仅仅对六自由度并联机构的结构、运动学、动力学分析等领域进行研究,较少学者考虑直线电机驱动时宽频带下幅值衰减问题,现有很多学者针对伺服电动缸驱动或液压驱动的并联机构动力学前馈的控制提出了很多先进算法,为基于直线电机驱动的并联机构动力学前馈方法提供了理论依据和思路。

为了解决直线电机驱动的六自由度并联机构的运动轨迹误差随频率增加而增大的问题,本文首先对机构的运动学进行分析,确定各部件速度、加速度矢量关系,选取牛顿-欧拉法建立机构动力学模型,搭建实验装置验证动力学模型的准确性;利用传统运动学闭环控制系统,分析装置的幅值衰减误差;考虑装置的驱动力、重力以及力矩等变量,增加动力学前馈控制指令,基于传统运动学控制方法,进一步提高装置运动控制精度和降低宽频带运动下的幅值衰减,最后验证本文动力学前馈控制方法的有效性。

1 动力学建模

1.1 运动学分析

直线电机驱动的六自由度并联机构主要由动平台、运动支链、滑块、直线电机组成,其结构如图 1 所示,其中,直线电机与滑块组成的驱动机构为并联机构的静平台,动平台连接运动支链,运动支链通过球铰与静平台上的滑块相连。在工作过程中,直线电机驱动滑块沿静平台导轨方向做直线往复运动,滑块通过球铰带动运动支链运动。进而带动动平台运动。通过直线电机驱动滑块运动,可以实现 6 个运动支链不同运动,进而完成动平台在指定轨迹下的运动。直线电机驱动的六自由度并联机构可有效消

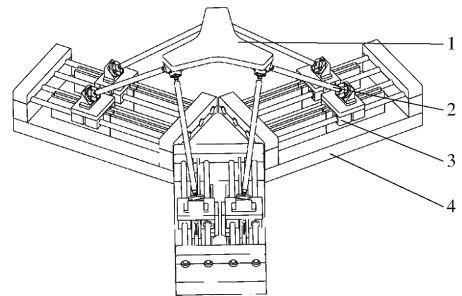


图 1 直线电机驱动的六自由度并联机构

Fig. 1 6-DOF parallel mechanism model

1. 动平台 2. 运动支链 3. 滑块 4. 直线电机

除间接传动部件的柔性影响以及滑块、运动支链和动平台之间的干涉,机构灵活性高,可以实现动平台复杂的空间位姿。

以静平台的圆心为坐标原点,建立静平台固定坐标系 $Oxyz$,静平台与运动支链间的铰点坐标为 $p_i(i=1,2,\cdots,6)$ 。以动平台运动支链铰点构成的六边形外接圆圆心为坐标原点 O' ,建立动平台坐标系 $O'x'y'z'$,动平台与运动支链间的铰点坐标为 $S_i(i=1,2,\cdots,6)$,动平台坐标系原点 O' 坐标可表达为 $T=(x,y,z),(\phi,\theta,\psi)$ 为动平台坐标系原点 O' 的空间姿态,基于欧拉角描述六自由度机构旋转矩阵为 $R=R(z,\phi)R(y,\theta)R(x,\psi)$ 。定义滑块运动方向与运动支链方向的单位向量分别为 e_i 和 n_i 。根据静平台固定坐标系和动平台坐标系以及动、静平台的铰点坐标,建立直线电机驱动的六自由度并联机构结构简图,如图 2 所示。

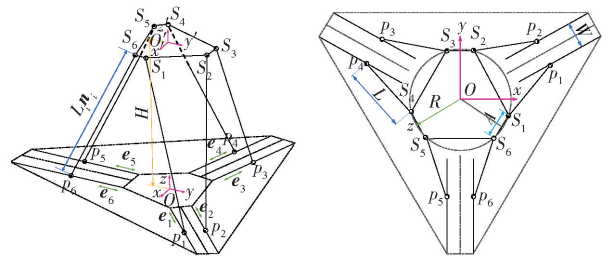


图 2 直线电机驱动的六自由度并联机构结构简图
Fig. 2 Linear motor-driven 6-DOF parallel mechanism structural diagram

各个构件质心矢量速度与加速度是六自由度并联机构进行动力学分析的基础,因此需根据该并联机构滑块、运动支链、动平台位置矢量关系计算各构件速度以及加速度矢量方程。

直线电机驱动六自由度并联机构运动支链位置矢量表达式为

$$b_i + p_i e_i + L_i n_i = T + RS_i \tag{1}$$

式中 L_i ——运动支链定杆长度

b_i ——直线电机导轨位置矢量

通过求解运动支链位置矢量方程,可得到机构滑块位移为

$$p_i = \eta^T e_i \pm \sqrt{(\eta^T e_i)^2 - \eta^T \eta + L_i^2} \tag{2}$$

其中

$$\eta = T + RS_i - b_i$$

对式(1)两边同时微分得运动支链速度矢量为

$$\dot{p}_i e_i + W_i \times L_i n_i = \dot{T} + \omega \times RS_i \tag{3}$$

其中

$$W_i = n_i \dot{n}_i$$

式中 ω ——动平台角速度矢量

$\dot{T}$ ——动平台线速度矢量

对式(3)两边同时左乘运动支链的方向向量 n_i^T ,得滑块速度矢量为

$$v_{si} = \frac{n_i^T}{n_i^T e_i} (\dot{T} + \omega \times RS_i) \tag{4}$$

运动支链质心位置矢量为

$${}^B r_{Li} = T + RS_i + T_i r_{Li} \tag{5}$$

式中 r_{Li} ——运动支链质心到滑块连接点的距离

T_i ——运动支链质心单位向量

对式(5)两边同时微分得支链质心速度矢量为

$$v_{Li} = \dot{T} + \omega \times RS_i + W \times T_i r_{Li} \tag{6}$$

动平台质心位置矢量表达式为

$${}^B r_p = T + Rr_p \tag{7}$$

式中 r_p ——动平台质心在静平台坐标系下位置矢量

对式(7)两边同时微分得到给定动平台质心速度矢量为

$$v_p = \dot{T} + \omega \times Rr_p \tag{8}$$

对式(4)计算求导得到滑块加速度矢量为

$$a_{si} = \frac{n_i^T}{n_i^T e_i} (\ddot{T} + \varepsilon \times RS_i + \omega(\omega \times RS_i)) + \frac{L_i \dot{n}_i^T \dot{n}_i}{n_i^T e_i} \tag{9}$$

式中 $\ddot{T}$ ——动平台线加速度矢量

ε ——动平台角加速度矢量

对式(6)求导得到支链质心加速度矢量为

$$a_{Li} = \ddot{T} + \varepsilon \times RS_i + E_i \times T_i r_{Li} + \omega \times (\omega \times RS_i) + W \times (W \times T_i r_{Li}) \tag{10}$$

其中

$$E_i = n_i \times \ddot{n}_i$$

对式(8)求导得到给定动平台质心加速度矢量为

$$a_p = \ddot{T} + \varepsilon \times Rr_p + \omega \times (\omega \times Rr_p) \tag{11}$$

1.2 动力学分析

根据机构主要部分的运动速度和加速度方程,可以建立机构主要部分的力学方程,进而基于牛顿-欧拉法构建六自由度并联机构的动力学方程,消除各个构件间的内力,进一步分析驱动力、自身重力、动平台负载以及惯性力等对机构的影响规律以及消除各个构件间的内力。机构单个运动支链、动平台以及滑块的受力分析如图 3 所示。为简化运算,在计算过程中忽略各关节摩擦力的影响。

动平台和滑块受力主要分为 2 项,第 1 项为零件自身重力,第 2 项为零件的惯性力和作用力矢量之和。

动平台合力矩计算公式为

$$\hat{F}_p = \begin{bmatrix} m_p g \\ O_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_p a_p \\ I_p \varepsilon + \omega \times I_p \omega \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中 m_p ——动平台质量

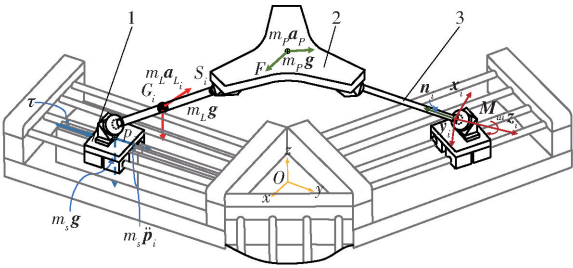


图 3 机构受力分析

Fig. 3 Mechanical analysis of mechanism

1. 滑块 2. 动平台 3. 运动支链

g ——重力加速度 O_3 ——零矩阵

I_p ——与自身质心的惯量矩阵

滑块合力矩计算公式为

$$\hat{F}_{Si} = \begin{bmatrix} m_s g \\ O_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_s a_{Si} \\ I_{Si} \varepsilon_{Si} + \omega_{Si} \times I_{Si} \omega_{Si} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 m_s ——滑块质量

I_{Si} ——滑块惯量矩阵

ω_{Si} ——滑块角速度矢量

运动支链的主要受力为自身重力、动平台与运动支链之间的作用力以及运动支链惯性力和作用力矢量之和,运动支链的合力矩计算公式为

$$\hat{F}_{Li} = \begin{bmatrix} m_L g \\ O_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_L I_3 & O_3 \\ O_3 & I_{Li} \end{bmatrix} J_{Li} J^{-1} \ddot{q} - \begin{bmatrix} \dot{q}^T N_{F_{Li}}^{(1)} \dot{q} \\ \vdots \\ \dot{q}^T N_{F_{Li}}^{(6)} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $N_{F_{Li}}^{(m)} = m_p N_{Li}^{(m)} \quad (1 \leq m \leq 3)$

$$N_{F_{Li}}^{(m+3)} = \sum_{j=1}^3 I_{Li}^{(m,j)} N_{Li}^{(j+3)} - J^{-T} J_{R_{Li}}^T [\delta_m \times] I_{Li} J_{R_{Li}} J^{-1}$$

式中 m_L ——运动支链质量

J_{Li} ——动平台与运动支链速度映射矩阵

I_{Li} ——运动支链惯量矩阵

$\dot{q}$ ——驱动关节滑块速度矢量

建立该并联机构的动平台、运动支链及滑块的合力矩计算式后,根据牛顿-欧拉方程,建立该机构动力学方程为

$$\tau + J^{-T} J_p^T \hat{F}_p + \sum_{i=1}^N J^{-T} J_{Li}^T \hat{F}_{Li} + \sum_{i=1}^N J^{-T} J_{Si}^T \hat{F}_{Si} = 0 \quad (15)$$

式中 T ——滑块驱动力

J_p ——动平台质心与动平台速度映射矩阵

J_{Si} ——滑块与动平台速度映射矩阵

对式(15)进行规范方程简化得到滑块驱动力为

$$\tau = M_q(q) \ddot{q} + V_q(q, \dot{q}) + G_q(q) \quad (16)$$

其中

$$M_q(q) = \sum_{k=1}^N J^{-T} J_k^T \begin{bmatrix} m_k I_3 & O_3 \\ O_3 & I_k \end{bmatrix} J_k J^{-1}$$

$$V_q(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{q}^T N_V^{(1)} \dot{q} \\ \vdots \\ \dot{q}^T N_V^{(6)} \dot{q} \end{bmatrix}$$

$$N_V^{(m)} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^6 (J^{-T} J_k^T)^{(m,j)} N_{F_k}^{(j)} \quad (1 \leq m \leq 6)$$

$$G_q(q) = - \sum_{k=1}^N J^{-T} J_k^T \begin{bmatrix} m_k g \\ O_3 \end{bmatrix}$$

式中 $\ddot{q}$ ——驱动关节滑块加速度矢量

2 动力学前馈控制

目前大部分六自由并联机构选用运动学控制系统,在忽略并联机构动态特性的情况下,上位机输入位姿指令,控制器接受上位机指令进行逆运动学解算,计算得各滑块位置命令,位置环 PD 控制器根据位置命令与光栅反馈之间的误差,生成电流环控制命令;伺服驱动器实施电流环 PI 控制,驱动滑块完成特定的轨迹运动,在滑块作用下,动平台完成规划位姿运动。

运动学控制系统以传统 PID 控制算法或者基于 PID 控制算法衍生出的近似控制算法调节,这种控制方式针对运动精度要求不高或小负载的并联机构是有效的,但对于运动精度要求高的并联机构局限性较大。传统 PID 控制进行运动支链单独控制。当装置进行宽频带运动时,并联机构各运动支链驱动力变化范围大速度快,PID 控制反馈增益常量导致无法快速精准地响应驱动力的变化,控制系统执行运动轨迹时存在滞后性、不可避免的振荡以及幅值衰减等问题,严重影响控制稳定性以及机构运动精度。

针对传统 PID 控制算法存在的问题,可以通过并联机构动力学前馈控制^[25-27]来减少机构的幅值衰减,提升机构运动精度。动力学前馈控制是改善并联机构控制精度的常用方法之一,动力学前馈框图如图 4 所示。在传统伺服驱动器的三闭环控制基础上增加动力学前馈控制,即根据运动指令完成驱动器三闭环控制,在驱动并联机构各滑块运动的同时,利用直线电机驱动的六自由度并联机构动力学模型,解算出各滑块所需的驱动力,进一步求解出滑块所需的加速度,通过比例关系将指令加速度转换为前馈电流,叠加到控制系统电流环的输入端,进而完成对并联机构的动力学前馈。由于直线电机的驱动力可以克服由传统三闭环运动控制带来的宽频带幅值衰减问题,同时动力学模型也考虑到机构自身重力、惯性力以及动平台负载等因素对机构的影响,因此动力学前馈可有效提升装置动平台动态运动精

度,提高滑块响应速度,从而改善机构的动态性能。

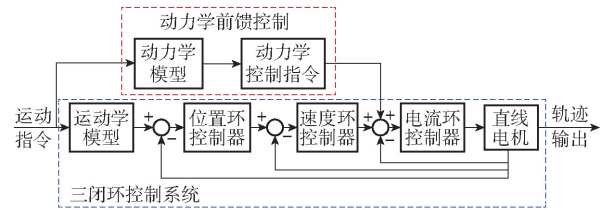


图 4 动力学前馈控制框图

Fig. 4 Dynamic feedforward control diagram

3 动力学及控制实验

3.1 实验方案设计

根据直线电机驱动的六自由度并联机构动力学模型和动力学前馈控制方法准确性,搭建直线电机驱动的六自由度并联机构实验平台如图 5 所示。

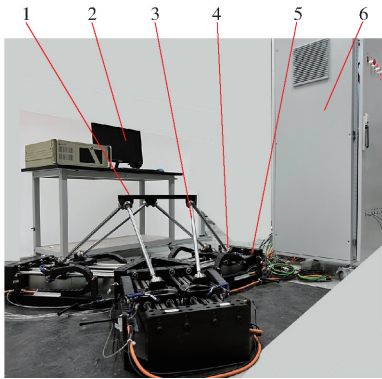


图 5 六自由度并联机构实验系统

Fig. 5 6-DOF parallel mechanism experimental system

1. 运动支链 2. 上位机 3. 动平台 4. 滑块 5. 直线电机
6. 电控柜

基于伺服三闭环控制系统,对直线电机驱动的六自由度并联机构的 6 个滑块进行单独运动控制,测量系统将直线光栅传感器的实时位移信息反馈到驱动器完成电机的换向,控制器通过驱动器获取光栅传感器的位置反馈。将 24 位高精度分布式数据采集仪(INV3062C)与驱动器 X8 模拟输出端口相连接,从而对驱动器的模拟输出电流进行实时采集。

滑块驱动力计算式为

$$F_i = K_{ti} I_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (17)$$

式中 F_i ——第 i 个滑块驱动力

K_{ti} ——电机力矩常数

I_i ——第 i 个滑块模拟输出电流

实验 1:首先基于 Matlab 对前文建立的动力学模型进行数值仿真分析。其次在并联机构实验平台上,上位机将规划的正弦运动轨迹传递给控制卡,基于运动控制系统进行实验数据采集,由式(17)将模拟输出信号转换为滑块驱动力。再者将并联机构实验系统得到的滑块驱动力实验数据与 Matlab 数值

仿真所得驱动力进行对比分析,进一步完善动力学模型和实验系统。最后结合装置实际运动情况,对实验装置结构参数进行优化设计,实验装置性能参数如表 1 所示。

表 1 实验装置性能参数

Tab. 1 Performance parameters of experimental setup

参数	数值
动平台质量 m_p/kg	2.85
运动支链质量 m_L/kg	0.93
滑块质量 m_s/kg	2.53
动平台惯量 $I_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	diag[0.040 512 0.040 512 0.075 404]
支链惯量 $I_L/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	diag[0.000 054 0.077 413 0.077 413]

实验 2:在传统运动学控制基础上增加动力学前馈控制,首先分析应用传统运动学控制时,实验装置的运动误差。然后分析增加动力学控制后装置的运动误差,最后对传统运动学控制和增加动力学前馈控制后的运动误差进行对比分析,验证动力学前馈控制对于提高装置运动精度的有效性。

3.2 动力学仿真实验与装置实验对比

规划直线电机驱动六自由度并联机构在动平台坐标系 O' 下的运动轨迹。设该机构进行 Z 轴单自由度正弦运动,运动方程为

$$z = 12\sin(8\pi t) \quad (18)$$

根据规划运动轨迹,基于 Matlab 仿真分析得到滑块驱动力曲线,即滑块驱动力理论值曲线,基于直线电机驱动的六自由度并联机构实验平台数据采集处理后得到滑块驱动力,绘制成滑块驱动力实验值曲线,将理论值与实验值进行对比,如图 6 所示。

在进行 Z 轴正弦运动时,6 个滑块的驱动力大小及运动方向均相同,这与装置的运动规律相吻合。由图 6 可知,由数值仿真分析所得的驱动力曲线与实验平台运动所采集的实验数据处理后所得曲线基本吻合。

在实验过程中发现,实验平台进行单自由度正弦运动时所采集的驱动力与由 Matlab 仿真所得数据存在一定的偏差,因此对其进行对比分析。图 7 为装置频率基于三分之一倍频程设计为 1~5 Hz,幅值设计为 5~15 mm 的 X 、 Y 、 Z 轴单自由度正弦运动下,6 个滑块数值仿真所得驱动力与实验平台运动采集的驱动力最大偏差的对比。

由图 7a 可知,装置动平台进行 X 轴运动时,在幅值相同情况下,随着频率增加,驱动力偏差越来越大;在频率相同情况下,随着幅值增加,驱动力偏差越来越大,驱动力偏差最大为 3.42 N;由图 7b 所示,装置动平台进行 Y 轴运动时,在幅值相同情况下,随着频率增加,驱动力偏差先逐渐增大,3.15 Hz 驱

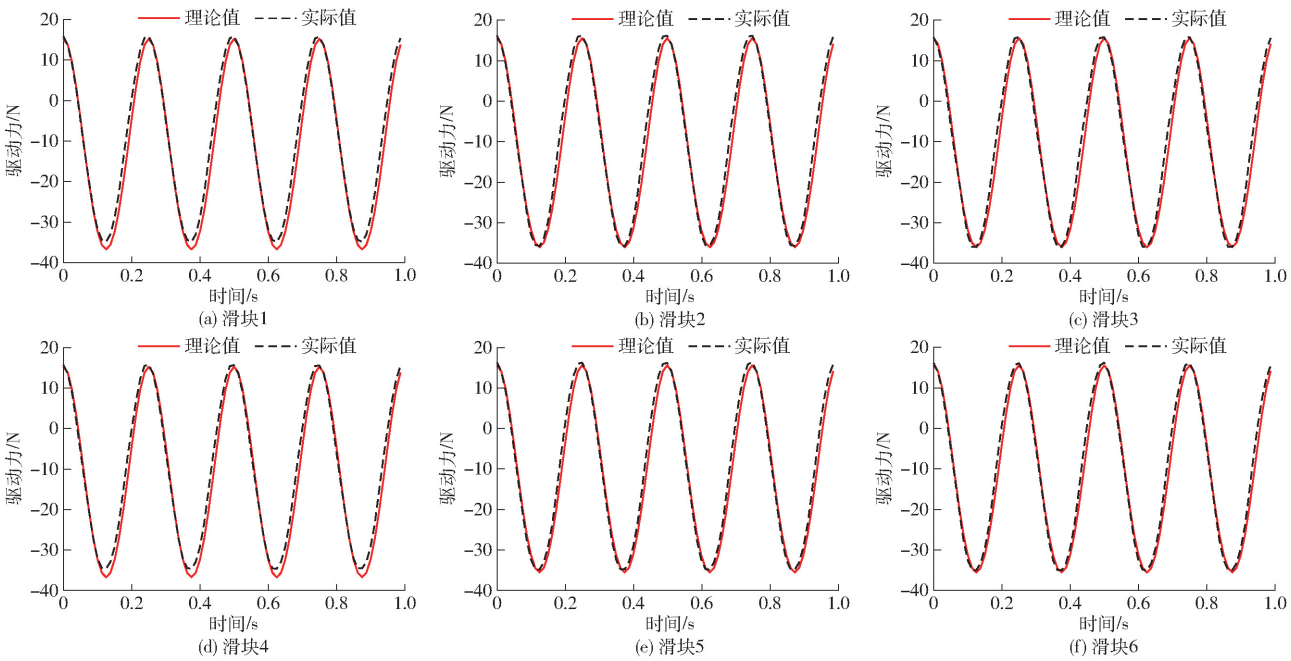


图 6 并联机构滑块的驱动力曲线
Fig. 6 Driving force curves of slider

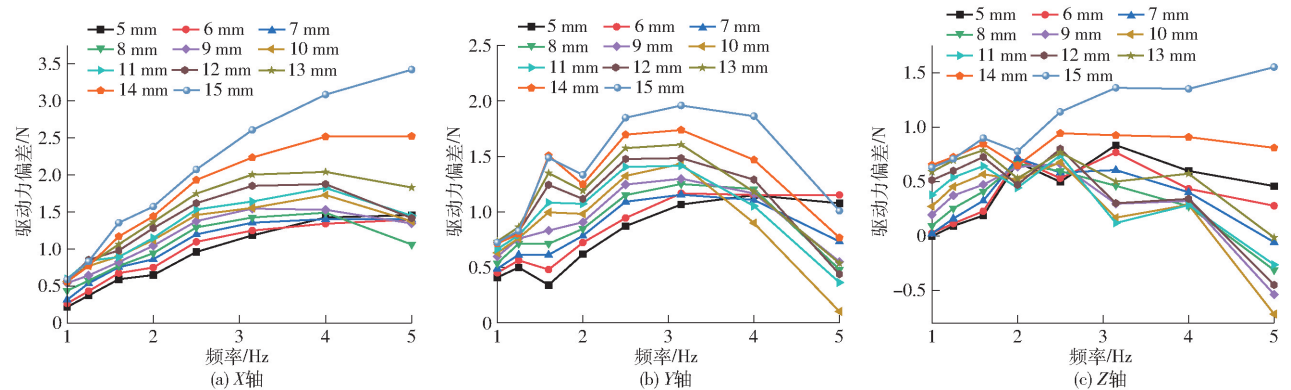


图 7 单自由度驱动力偏差

Fig. 7 Single degree of freedom driving force deviation

动力偏差达到最大,然后随着频率的继续增加,驱动力偏差逐渐减小;在相同频率下,幅值逐渐增大,驱动力偏差逐渐增大,驱动力偏差最大为 1.96 N;由图 7c 所示,装置动平台进行 Z 轴运动时,在幅值相同情况下,随着频率的增加,驱动力偏差呈下降趋势;在频率相同情况下,驱动力偏差逐渐增大,偏差最大为 1.55 N。

利用实验平台采集的驱动力与仿真值存在误差原因:①实验平台样机存在机械零部件制造误差、整机装配误差、传动机构误差等几何误差,后续将通过运动学参数辨识提升机构的精度。②实验平台样机的惯量参数,例如动平台和运动支链的质心位置、质量和惯量矩阵等存在误差,后续将通过动力学参数辨识修正实验平台惯性参数。

3.3 控制实验

验证动力学模型的准确性后,对装置的前馈控

制进行实验分析,规划并联机构在动平台坐标系 O' 下的运动轨迹,设该机构进行 Z 轴单自由度正弦运动, $z = 12\sin(8\pi t)$ 。首先通过实验分析运动学控制,控制卡利用给定运动轨迹进行运动学逆解计算,计算出各滑块运动轨迹,驱动器根据计算出的轨迹依次进行位置环、速度环和电流环的控制,最终控制直线电机实现滑块运动。利用实验装置采集到的各滑块位移反馈值,计算直线电机驱动下各滑块给定命令值与反馈值的位移误差。然后,基于已经建立的动力学模型,在经典运动学控制中增加动力学前馈控制,设计动平台进行 X、Y、Z 轴单自由度正弦运动实验,对比实验平台基于三分之一倍频程 1 ~ 5 Hz 的频率点以及幅值 5 ~ 15 mm 位移点下的运动衰减误差。

3.3.1 运动学控制实验

根据给定实验平台的正弦运动轨迹,控制器利

用运动逆解计算出的各滑块运动轨迹的命令值,同时控制器利用实验装置测量系统实时采集滑块位移

反馈值,图 8 为规划运动轨迹下,各滑块运动时命令值与反馈值对比。

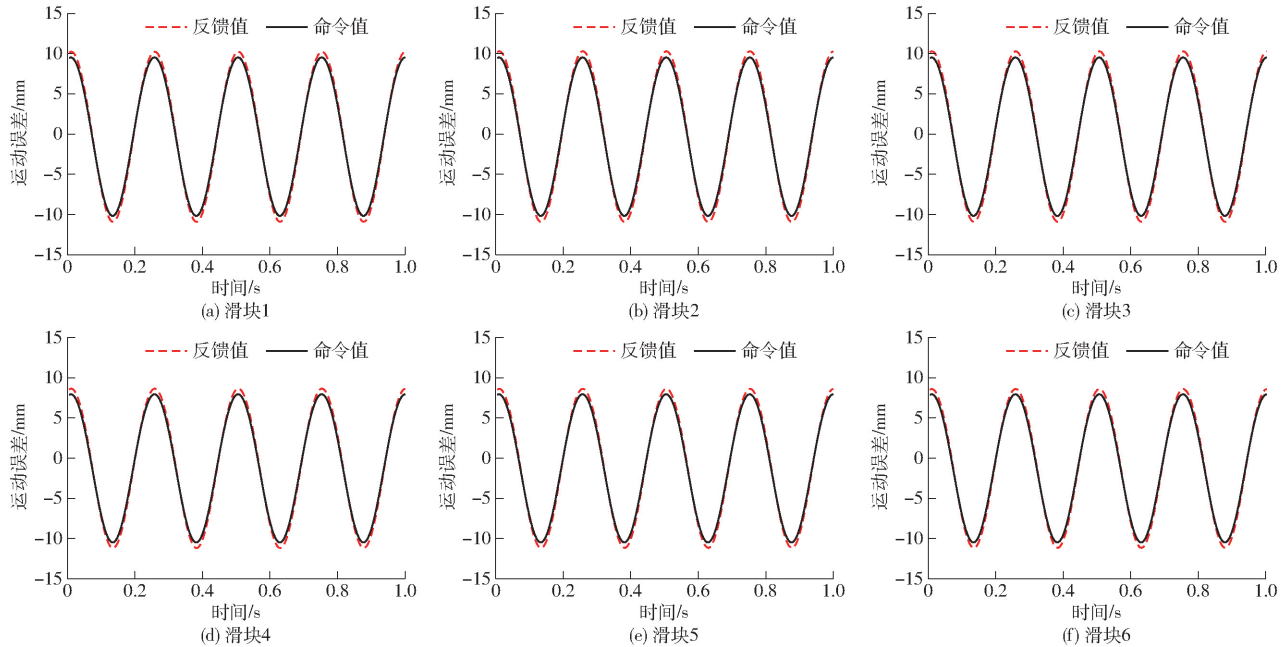


图 8 滑块命令值与反馈值对比

Fig. 8 Command value and feedback value comparison curves

由图 8 可以看出,滑块能够较好地完成运动控制下的轨迹。但直线电机驱动随频率升高存在幅值衰减问题,且装置的运动控制系统只基于运动学逆解求得各滑块的运动轨迹,利用驱动器完成对装置的控制,没有考虑装置的动力学问题,使得装置存在一定的运动轨迹误差。

为进一步寻找装置的误差规律,将装置运动轨迹设计为 X 、 Y 、 Z 轴单自由度幅值为 5 ~ 15 mm,基于三分之一倍频程选择频率点 1 ~ 5 Hz 的正弦运动,通过分析各滑块命令值与反馈值差值,基于运动学正解,可以得到传统运动学控制的机构动平台的幅值衰减规律,如图 9 所示。

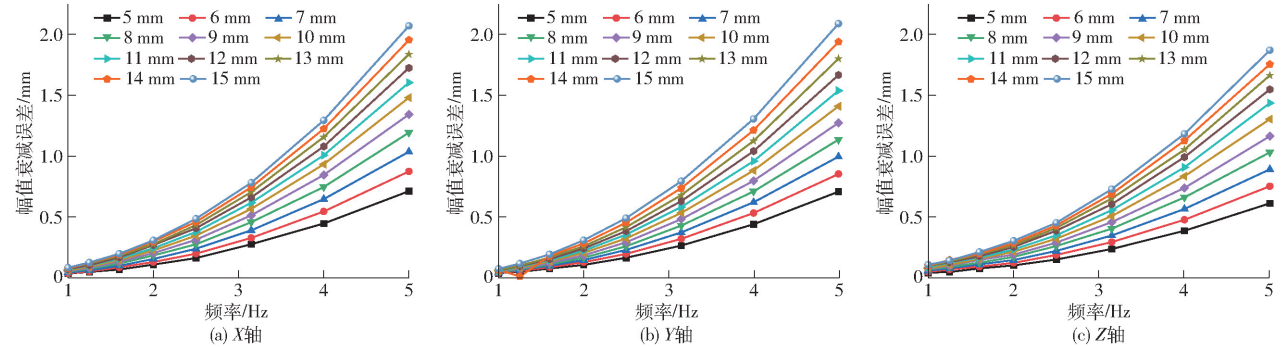


图 9 运动学控制的机构运动幅值衰减规律

Fig. 9 Attenuation law of amplitude of mechanism motion in kinematics control

由图 9 可以看出, X 、 Y 、 Z 轴运动在相同频率下,动平台运动时的运动轨迹误差随着运动幅值的增加而增大;在相同幅值下,运动轨迹误差随着频率的增加而增大。由图 9a 可知, X 轴在幅值为 15 mm 频率为 5 Hz 时误差最大,最大运动轨迹误差为 2.069 mm,运动误差占运动轨迹比例高达 13.8%;由图 9b 可知, Y 轴最大运动轨迹误差为 2.089 mm,运动误差比例高达 13.9%;由图 9c 可知, Z 轴最大运动轨迹误差为 1.869 mm,运动误差比例高达 12.5%。

3.3.2 动力学前馈控制实验

根据测量每个直线电机光栅位移,运用运动学正解计算出实验平台运动轨迹,与运动命令值进行比较得到运动轨迹误差。通过动力学前馈补偿后运动轨迹误差变化如图 10 所示,实验平台的幅值衰减变化趋势与未进行前馈补偿前相同,但运动轨迹误差减小。

补偿增益 X 轴前馈补偿后误差变化如图 10a 所示, X 轴最大轨迹误差为 0.92 mm,误差占运动指令

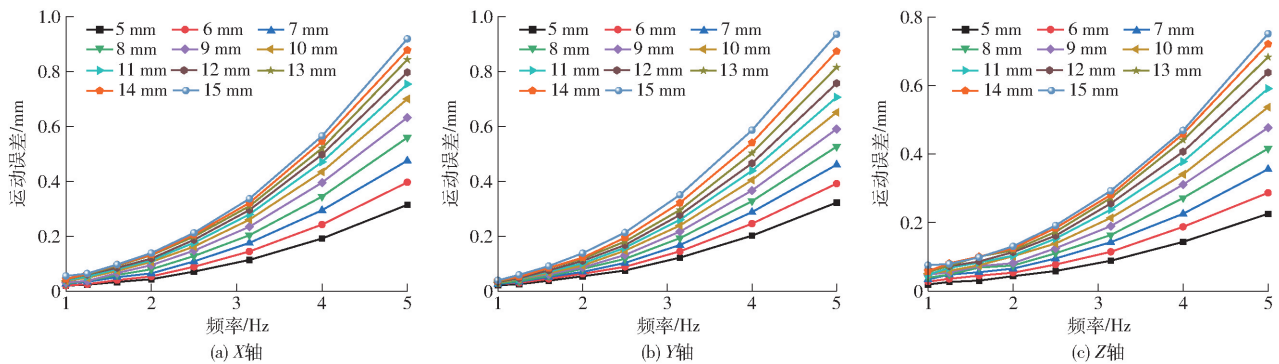


图 10 动力学前馈控制补偿后运动误差变化曲线

Fig. 10 Motion error changes after dynamic feedforward compensation

的 6.1%, 对比传统运动学控制方法, 误差减少 55.5%; 补偿增益 Y 轴前馈补偿后误差变化如图 10b 所示, Y 轴最大轨迹误差为 0.94 mm, 误差占运动指令的 6.3%, 对比传统运动学控制方法, 误差减少 54.2%; 补偿增益 Z 轴前馈补偿后误差变化如图 10c 所示, Z 轴最大轨迹误差为 0.75 mm, 误差占运动指令的 5%, 对比传统运动学控制方法, 误差减小 59.8%。

4 结论

(1) 根据直线电机驱动的六自由度并联机构特

点, 利用牛顿-欧拉法建立机构的动力学模型, 通过数值分析得到驱动力仿真曲线, 搭建实验平台, 获得装置驱动力实验曲线。实验平台采集的驱动力与仿真值存在偏差, 后续将通过运动学和动力学参数辨识修正。

(2) 基于传统运动学控制系统, 结合动力学模型, 设计了一种动力学前馈控制方法。实验结果表明, 与传统运动学控制相比, 机构进行 X 、 Y 、 Z 轴单自由度正弦运动时, 运动误差分别下降 55.5%、54.2%、59.8%, 验证了动力学前馈控制方法可有效提高机构的运动精度。

参 考 文 献

- [1] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] SUMNU A, GUZELBEY I H, CAKIR M V, et al. Simulation and PID control of a Stewart platform with linear motor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(1): 345–356.
- [3] 孔令富, 张世辉, 肖文辉, 等. 基于牛顿-欧拉方法的 6-PUS 并联机构刚体动力学模型[J]. 机器人, 2004, 26(5): 395–399. KONG Lingfu, ZHANG Shihui, XIAO Wenhui, et al. Rigid body dynamics model of the 6-PUS parallel mechanism based on Newton-Euler method[J]. Robot, 2004, 26(5): 395–399. (in Chinese)
- [4] 梁凤超, 谭爽, 黄刚, 等. 空间光学遥感器高精度 6-DOF 并联平台设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1332–1342. LIANG Fengchao, TAN Shuang, HUANG Gang, et al. Design and implementation of a high precision 6-DOF parallel platform for a space optical remote sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(7): 1332–1342. (in Chinese)
- [5] XU Zefeng, YANG Liqi, HUANG Wenkai, et al. Dynamics analysis of a novel 3-PSS parallel robot based on linear motor[J]. IEEE Access, 2020, 8: 119048–119061.
- [6] ZEMIRLINE A, EI H, ABD R, et al. Design and optimization of a linear piezoelectric motor using response surface method[J]. Mechanics of Solids, 2021, 56(5): 873–884.
- [7] SUN Guanghui, WU Ligang, KUANG Zhian, et al. Practical tracking control of linear motor via fractional-order sliding mode[J]. Automatica, 2018, 94: 221–235.
- [8] ZHENG Jinchuan, WANG Hai, MAN Zhihong, et al. Robust motion control of a linear motor positioner using fast nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(4): 1743–1752.
- [9] LIU Zhihua, CAI Chenguang, LÜ Qi, et al. Improved control of linear motors for broadband transducer calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1–9.
- [10] ZHANG Wenjing, NAN Nan, YANG Yifan, et al. Force ripple compensation in a PMLSM position servo system using periodic adaptive learning control[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 266–277.
- [11] HUI Yu, CHI Ronghu, HUANG Biao, et al. Extended state observer-based data-driven iterative learning control for permanent magnet linear motor with initial shifts and disturbances[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 51(3): 1881–1891.
- [12] 王宗平, 赵登峰, 曾国英. 一种六自由度并联机构的动力学模型[J]. 机械设计与制造, 2018(增刊): 71–74, 77.

- WANG Zongping, ZHAO Dengfeng, ZENG Guoying. The dynamic model of a 6-DOF parallel mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(Supp.):71-74,77. (in Chinese)
- [13] NABAVI S, AKBARZADEH A, ENFERADI J. Closed-form dynamic formulation of a general 6-PUS robot[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 96:317-330.
- [14] 吴超宇, 钱小吾, 余伟, 等. 直线驱动型并联机器人反向动力学分析与验证[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12):412-420. WU Chaoyu, QIAN Xiaowu, YU Wei, et al. Analysis and verification of linear driven parallel robot reverse dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):412-420. (in Chinese)
- [15] 陈国强, 周红鹏, 黄俊杰, 等. 考虑关节摩擦的3-PRS并联机构动力学建模研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):416-426. CHEN Guoqiang, ZHOU Hongpeng, HUANG Junjie, et al. Dynamic modeling with joint friction of 3-PRS parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):416-426. (in Chinese)
- [16] 刘晓飞, 唐艳华, 刘鑫, 等. 含约束支链的冗余驱动并联机构动力学性能优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5):378-385, 403. LIU Xiaofei, TANG Yanhua, LIU Xin, et al. Dynamics performance optimization for redundantly actuated parallel manipulator with constraint branch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):378-385, 403. (in Chinese)
- [17] 窦玉超, 姚建涛, 高思慧, 等. 冗余驱动并联机器人动力学建模与驱动力协调分配[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1):293-300. DOU Yuchao, YAO Jiantao, GAO Sihui, et al. Dynamic modeling and driving force coordinate distribution of the parallel robot with redundant actuation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):293-300. (in Chinese)
- [18] KALANI H, REZAEI A, AKBARZADEH A. Improved general solution for the dynamic modeling of Gough - Stewart platform based on principle of virtual work[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(4):2393-2418.
- [19] 聂松林, 李芹, 尹方龙, 等. 直驱泵系统的单神经元PID+前馈控制策略[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(9):821-830. NIE Songlin, LI Qin, YIN Fanglong, et al. Single neuron PID + feedforward controller of a direct drive pump system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(9):821-830. (in Chinese)
- [20] SWEVERS J, VERDONCK W, SCHUTTER J D. Dynamic model identification for industrial robots-integrated experiment design and parameter estimation[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(5):58-71.
- [21] ZHU Yaguang, JIN Bo, LI Wei. Leg compliance control of a hexapod robot based on improved adaptive control in different environments[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(3):904-913.
- [22] 郑轶雄, 王宇晗, 石璟. 面向驱动力前馈控制的重载并联机构运动学及力学分析[J]. 机械设计与制造, 2012(1):176-178. ZHENG Yixiong, WANG Yuhan, SHI Jing. Kinematics and dynamics analysis of overloaded parallel mechanism for forward feedback control of driving force[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1):176-178. (in Chinese)
- [23] 倪涛, 徐海远, 李东, 等. 六自由度平台动力学前馈柔顺控制研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(6):683-689. NI Tao, XU Haiyuan, LI Dong, et al. Research on dynamics feedforward compliance control of 6-DOF platforms[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(6):683-689. (in Chinese)
- [24] YANG Chifu, ZHAO Jinsong, LI Liyi, et al. Design and implementation of a novel modal space active force control concept for spatial multi-DOF parallel robotic manipulators actuated by electrical actuators[J]. ISA Transactions, 2018, 72:273-286.
- [25] 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- [26] WANG Jinsong, WU Jun, WANG Liping, et al. Dynamic feed-forward control of a parallel kinematic machine[J]. Mechatronics, 2009, 19(3):313-324.
- [27] TU Xiao, ZHOU Rougang, ZHOU Yunfei, et al. Dynamical decoupling and feed-forward control for magnetically levitated planar actuators[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2017(54):57-76.