

风洞 6_PUS 并联支撑机器人运动误差建模与补偿*

谭兴强¹ 张 键¹ 谢志江²

(1. 攀枝花学院机械工程学院, 攀枝花 617000; 2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对风洞 6 自由度并联支撑机器人, 利用单支链 D-H 参数方法和摄动法建立了其运动误差模型, 编写了误差模型仿真程序。根据风洞实验所需的 6 种典型运动模式, 分析了不同模式下并联支撑机器人输出运动位姿的误差, 得到了典型运动模式的误差变化规律。在风洞并联支撑机器人的构件设计和装配过程进行了针对性的误差控制, 使设计和制造的并联支撑机器人精度达到了风洞实验的要求, 并通过在风洞实验中嵌入与运动误差仿真类似的误差估算程序, 再对风洞实验中被试模型的位姿误差进行补偿, 实验证明这种方法提高了风洞实验数据的精度。

关键词: 机器人 并联机构 风洞 支撑机构 误差建模 误差分析

中图分类号: TH112; TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0334-07

引言

并联机器人的位姿精度对其实际输出有重要影响。并联机器人通常由多个串联杆件构成的回路并联组成, 各分支回路的并联组合使机器人累积误差小, 从而使其具有较高的输出精度^[1-2]。但是由于并联机器人在加工、装配中存在的制造误差, 以及在工作中因外力、热引起的变形, 使得并联机器人的存在难以避免的误差。并联机器人的误差可分为两类^[3], 一类是结构性误差, 因机构的实际结构参数与设计值不一致而引起的误差, 这类误差可以通过机构的运动学标定消除; 另一类是随机性误差, 如传感器的检测误差、导轨和杆件的热变形误差、动态误差、控制系统误差等, 这类误差不能通过运动学标定予以消除, 但可以通过提高精度设计等级进行限制^[4-5]。

D-H 参数分析法是并联机器人误差建模的基本方法, 不少学者以此为基础相继提出了影响系数法、位姿误差显著性分析法和距离误差模型分析法。Wang 等^[6]建立了 6-DOF 的 Stewart 平台的误差模型, 在考虑球铰和杆长误差的条件下, 分析了机器人的位姿精度; Moon 等^[7]采用螺旋理论建立了一种并联机器人的误差模型, 并可以对机器人杆件的设计误差进行预测; Han 等^[8]基于单支链方法建立了误差分析的正解和逆解模型, 分析了它们之间的关系, 利用误差正解和逆解模型的特征值分别得到了位姿误差和原始误差的公差; Seung 等^[9]按静态误差和动态误差分别考虑并联机构刚度和间隙的情况下,

根据并联机构的运动学正解推导了误差模型, 并通过实例对两种误差综合后的误差模型进行了分析; Cheng 等^[10]建立了一类可解耦的 3 自由度并联机构的运动学正解, 根据全微分系数理论得到了动平台的原始误差与实际定位误差之间的关系, 由此发现机构误差比驱动误差对定位误差的影响更大, 减小机构的制造和装配误差对提高并联机构的定位误差具有重要意义; 李新友等^[11]利用正交设计的思想对 3RPS 并联机构进行了精度分析与精度综合, 并根据正交设计的思想, 将该机构的 3 个位姿参数看成对位姿误差有影响的 3 个因素, 用位姿误差的极差作为敏感系数, 通过极差分析得到了位姿参数对位姿误差的影响程度; 郑辉等^[12]以一类含平行四边形支链的 Delta 并联机械手为研究对象, 利用空间矢量链分析方法, 构造出机构末端位置和姿态误差与几何误差之间的映射关系, 揭示了影响机构末端位姿不可补偿误差的几何误差来源; 陈培等^[13]把约束副间隙误差转化成为杆长误差, 推导了误差敏感度矩阵的参数化表示, 并利用 2RSS 并联机构的误差仿真模型, 求解了敏感度矩阵的参量, 验证了近似敏感度矩阵求解的有效性。谢平等^[14]、杜义浩等^[15]针对机构误差引起的期望轨迹与理想轨迹之间的偏差和非线性摩擦、负载变化等扰动因素引起的动态误差, 提出一种基于并联机器人位姿误差模型, 将位姿误差补偿转化为驱动杆参数组合优化问题, 进而利用粒子群算法寻优驱动杆参数, 修正并联机器人期望轨迹。于凌涛等^[16]通过建立 6 自由度并联机器人

收稿日期: 2013-04-11 修回日期: 2013-06-02

* 国家“995 工程”二期国防领域科技国家重大专项资助项目(20083001. HT12)

作者简介: 谭兴强, 副教授, 博士, 主要从事并联机构和虚拟制造研究, E-mail: tan65126919@163.com

误差方程,结合“三平面测量法”辨识机器人误差参数,实现了并联机器人误差检测、标定和补偿。这些误差分析和补偿方法的研究,有针对性地解决了并联机器人应用中遇到的问题,各有所长,但都没有全面考虑并联机器人的误差因素。本文采用摄动法全面建立6_PUS并联机支撑机器人各支链的误差模型,并结合风洞CTS实验对实验误差进行补偿,以期达到较好的误差控制效果。

1 6_PUS 并联支撑机器人

图1所示6_PUS并联支撑机器人主要由2副相互平行的直线导轨、6个带直线电动机的滑块、6根拉杆、6个虎克铰、6个球铰、动平台、模型支杆和飞行器模型等组成。拉杆上端通过虎克铰与滑块固连;拉杆下端通过球铰与动平台相连。动平台通过直线电动机驱动的滑块沿直线导轨的移动实现运动,或实现飞行器模型的6自由度空间的姿态变换。导轨上安装有高精度的光栅尺,用来检测滑块在静坐标系中的位置,根据6个滑块的位置即可确定安装在动平台上实验模型的位姿^[17]。

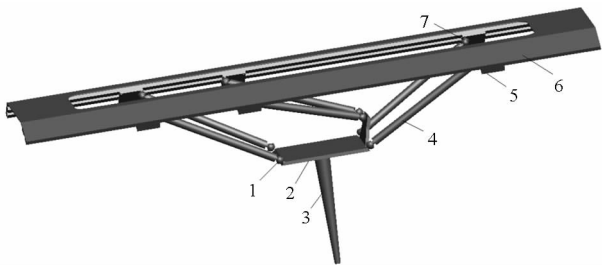


图1 6_PUS 并联机构结构造型

Fig. 1 Configuration of 6_PUS parallel mechanism

1. 球铰 2. 动平台 3. 支撑杆 4. 拉杆 5. 滑块 6. 导轨梁
7. 虎克铰/球铰

风洞实验时滑块、拉杆及动平台位于风洞的外面,只有支撑杆伸入风洞内部与实验模型相连。采用这种结构可以最大限度地减小实验模型与支撑装置对风洞流场的影响,提高实验数据的准确性。动平台与风洞实验模型之间由测量力和力矩的天平相连。天平安装在模型的质心上,以减小模型重力对实验数据的影响。动平台带动实验模型运动时,通过动平台位姿的变化可调节模型在风洞中的姿态,以测量飞行器模型在不同姿态下的风洞实验数据。习惯上用 α 、 β 、 γ 分别来表征动平台平面分别绕 Y_m 、 Z_m 、 X_m 转动后与 $O_m X_m Z_m$ 、 $O_m X_m Y_m$ 、 $O_m Y_m Z_m$ 面形成的夹角,这3个角分别称为俯仰角(攻角)、偏航角和滚转角^[18-19]。

2 支链运动学逆解

在D-H参数方法的基础上,结合误差摄动变

换原理,建立6_PUS风洞并联支撑机器人的运动学误差模型。6_PUS并联机器人的杆系D-H坐标如图2所示。任选并联机器人的一个支链进行D-H分析,将球面副假定为3个简单转动副构成的1R-2R-3R构件^[20]。在平行梁导轨水平面中间,动平台正上方建立静坐标系 $O_w XYZ$,分别在导轨、滑块、虎克铰十字轴、拉杆上端、球铰1R轴、球铰2R轴、动平台3R轴上建立支链杆件坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0 \sim O_6 X_6 Y_6 Z_6$,以及在动平台质心上建立动坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$,按照D-H坐标系之间的变换定义原则可得6_PUS并联机器人的逆解为

$$\begin{cases} \theta_2 = \arcsin[(n_y h - o_y w - a_y a + p_y)/L] \\ \theta_1 = \arccos[(n_z h - o_z w - a_z a + p_z - C - b)/(L \cos \theta_2)] \\ x_i = -L \sin \theta_1 \cos \theta_2 - n_x h + o_x w + a_x a - p_x \\ \theta_4 = \arccos(n_x \sin \theta_2 \sin \theta_1 + n_y \cos \theta_2 - n_z \sin \theta_2 \cos \theta_1) \\ \theta_3 = \arccos[(- n_x \cos \theta_2 \sin \theta_1 + n_y \sin \theta_2 + n_z \cos \theta_2 \cos \theta_1)/\sin \theta_4] \\ \theta_5 = \arccos[(- a_x \sin \theta_2 \sin \theta_1 - a_y \cos \theta_2 + a_z \sin \theta_2 \cos \theta_1)/\sin \theta_4] \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 a ——球铰中心在动坐标系 X 轴的分量
 w ——球铰中心在动坐标系 Y 轴的分量
 h ——球铰中心在动坐标系 Z 轴的分量
 C ——支链滑块所在平行梁导轨在全局坐标系中 Y 向的值,可正可负,其绝对值等于梁之半
 b ——虎克铰在全局坐标系 Z 向的值
 L ——拉杆长度

式(1)为求解6_PUS并联机器人某一支链运动逆解的通式,对于不同的支链,将不同的机构参数 w 、 h 、 C 、 b 、 L 代入式(1)即可求得不同支链的运动学逆解。

3 动平台位姿误差摄动法建模

在动平台的位姿误差分析中,不考虑导轨梁宽度误差和动平台球铰位置误差,则 T_0 和 T_d^6 中的宽度和位置参数可认为是不变量,动平台的位姿误差只与连杆坐标系参数 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 θ_i 、 d_i 有关。对杆件坐标变换矩阵 T_i^{i-1} 微分可得

$$\begin{aligned} dT_i^{i-1} &= \frac{\partial T_i^{i-1}}{\partial \alpha_{i-1}} \Delta \alpha_{i-1} + \frac{\partial T_i^{i-1}}{\partial a_{i-1}} \Delta a_{i-1} + \\ &\frac{\partial T_i^{i-1}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial T_i^{i-1}}{\partial d_i} \Delta d_i = T_i^{i-1} \Delta \mathbf{d}_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中

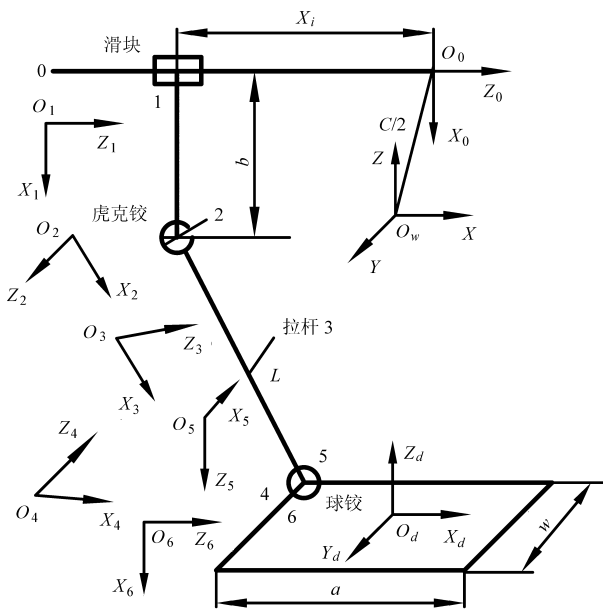


图2 6_PUS并联机器人D-H坐标

Fig.2 D-H coordination of 6_PUS parallel robot

$$\Delta_i^i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_{iz}^i & -\delta_{iy}^i & d_{ix}^i \\ \delta_{iz}^i & 0 & -\delta_{ix}^i & d_{iy}^i \\ -\delta_{iy}^i & \delta_{ix}^i & 0 & d_{iz}^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中矩阵 Δ_i^i 是由杆件坐标系 $\{O_i\}$ 中微小位移 $d_i^i = [d_{nx}^i \ d_{ny}^i \ d_{nz}^i]^T$ 和微小转动 $\delta_i^i = [\delta_{nx}^i \ \delta_{ny}^i \ \delta_{nz}^i]^T$ 的分量构成的误差矩阵。

假设由第 $\{O_i\}$ 坐标系 D-H 参数引起的连杆参数误差分别为 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 θ_i 、 d_i ，则由这些偏差引起第 $\{O_{i+1}\}$ 系中杆件产生的广义位移和转动可表示为

$$\begin{cases} \Delta q_{i+1} = \Delta a_{i-1} + \Delta d_i + \Delta \theta_i (a_{i-1} + \Delta a_{i-1}) \\ \Delta \phi_{i+1} = \Delta \theta_i + \Delta \alpha_{i-1} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \end{cases} \quad (3)$$

将以上误差中的高阶项忽略，同时将 $\{O_{i+1}\}$ 系中的误差表示成 $\{O_i\}$ 中的误差，得到位移和转动误差的分量表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta q_{ix} \\ \Delta q_{iy} \\ \Delta q_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta d_i \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_i \end{bmatrix} a_{i-1} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \phi_{ix} \\ \Delta \phi_{iy} \\ \Delta \phi_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 \mathbf{R}_i^{i-1} ——连杆变换矩阵 \mathbf{T}_i^{i-1} 的旋转矩阵

由 α_{i-1} 、 a_{i-1} 、 θ_i 、 d_i 引起的机器人执行器末端的小位姿误差可以由关节 $i+1$ 的广义微位移 Δq_i 和微转动 $\Delta \phi_i$ 表示

$$\begin{cases} \Delta q_i = \Delta q_{i+1} + \Delta \phi_{i+1} \times \mathbf{p}_{i+1} \\ \Delta \phi_i = \Delta \phi_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中 \mathbf{p}_{i+1} ——坐标系 $\{O_i\}$ 的原点到动平台动坐标系原点的矢量

将式(4)、(5)代入式(6)，则坐标系 $\{O_i\}$ 到动平台的位姿误差为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i^n \\ \Delta y_i^n \\ \Delta z_i^n \end{bmatrix} = \mathbf{R}_i^n \begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta d_i \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \right) \times \mathbf{p}_{i+1}^i \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \phi_{ix}^n \\ \Delta \phi_{iy}^n \\ \Delta \phi_{iz}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 \mathbf{R}_i^n ——坐标系 $\{O_i\}$ 与 $\{O_n\}$ 之间的连杆变换旋转矩阵

\mathbf{p}_{i+1}^i ——向量 \mathbf{p}_{i+1} 在坐标系 $\{O_i\}$ 中分量列矢量

将式(7)、(8)求得各杆系误差对末端执行器位姿的误差求矢量和可得动平台的位姿总误差，因此有

$$\begin{bmatrix} dx_n \\ dy_n \\ dz_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_i^n \begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta d_i \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \right) \times \mathbf{p}_{i+1}^i = \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_n^{iT} (d_i^i + \delta_i^i \times \mathbf{p}_{i+1}^i) \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \delta x_n \\ \delta y_n \\ \delta z_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \left(\begin{bmatrix} \Delta a_{i-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_i^{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \right) = \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_n^{iT} \delta_i^i \quad (10)$$

其中 $\mathbf{R}_n^i = [n_i \ o_i \ a_i]$

式中 \mathbf{R}_n^i ——动坐标系 X, Y, Z 轴在 $\{O_i\}$ 坐标系中的方向余弦矩阵

为了将动平台的位姿误差表示成各运动副误差的函数，将式(9)、(10)进一步转换为

$$\begin{cases} dx_n = \sum_{i=1}^n [n_{A_i} \cdot d_i^i + (p_{A_i} \times n_{A_i}) \cdot \delta_i^i] \\ dy_n = \sum_{i=1}^n [o_{A_i} \cdot d_i^i + (p_{A_i} \times o_{A_i}) \cdot \delta_i^i] \\ dz_n = \sum_{i=1}^n [a_{A_i} \cdot d_i^i + (p_{A_i} \times a_{A_i}) \cdot \delta_i^i] \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \delta x_n = \sum_{i=1}^n n_{A_i} \cdot \delta_i^i \\ \delta y_n = \sum_{i=1}^n o_{A_i} \cdot \delta_i^i \\ \delta z_n = \sum_{i=1}^n a_{A_i} \cdot \delta_i^i \end{cases} \quad (12)$$

式(11)中 n_{A_i} 、 o_{A_i} 、 a_{A_i} 和 p_{A_i} 分别为连杆坐标系变换矩阵 $A_i = T_{i+1}^i T_{i+2}^{i+1} \cdots T_n^{n-1}$ 的第 1、2、3、4 列构成的前三维列向量。

4 动平台位姿误差仿真与分析

根据以上摄动法误差模型,在已知 6_PUS 并联支撑机器人各支链关节误差的条件下,可以计算出动平台的在 X 、 Y 、 Z 、 α 、 β 、 γ 方向上的运动误差。选取并联支撑机器人 6 种典型的实验运动类型,对不同运动模式下并联支撑机器人的位姿误差进行仿真研究,仿真参数有 a 、 w 、 h 、 C 、 b 、 L 。这些参数可根据并联支撑机器人表 1 中的结构参数^[17-18]确定。

(1) 动平台耦合运动 1 按俯仰角 $\beta = \cos t$, 升沉 $z = -0.4 - 0.025t$ 规律进行耦合运动,仿真结果如图 3 所示。

(2) 动平台俯仰运动: $\beta = \sin t$,仿真结果如图 4

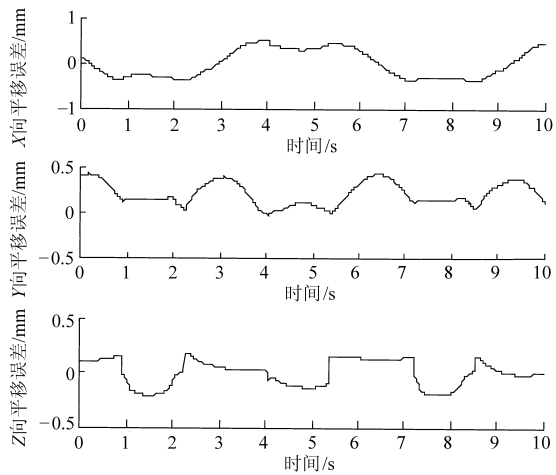


图 3 动平台耦合运动 1 位姿误差曲线

Fig. 3 Error graphic for translation and rotation of No. 1 coupling kinematic of motive platform

从 6_PUS 并联支撑系统 6 种典型实验形式误差仿真结果。可以看出:并联支撑机器人在不同运动方式下,其动平台输出的广义坐标误差也不同,偏航运动时 X 轴和 Y 轴的平移运动误差最大,滚转角和俯仰角误差也较大;滚转运动时 Z 轴误差最大,偏航角和 X 轴误差较小;升沉运动各种误差都较大,且误差波动明显。在转动误差方面,几种运动模式对俯仰角的误差影响都较大;非耦合运动对偏航角的误差影响较小,耦合运动对偏转角误差的影响较大;耦合运动和非耦合运动中的俯仰和偏航运动

表 1 运动误差仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters for motion error

参数	数值
动平台长度/m	0.6
动平台宽度/m	0.7
动平台侧高/m	0.18
动平台侧宽/m	0.4
平行梁宽度/m	1.0
虎克铰在静坐标系 Z 轴值/m	-0.15
拉杆长度/m	1.05
球铰中心到安装面高度/m	0.165
D-H 杆系中的位置误差/m	[0.05 0.05 0.05]
D-H 杆系中的角度误差/rad	[0.1 0.1 0.1]

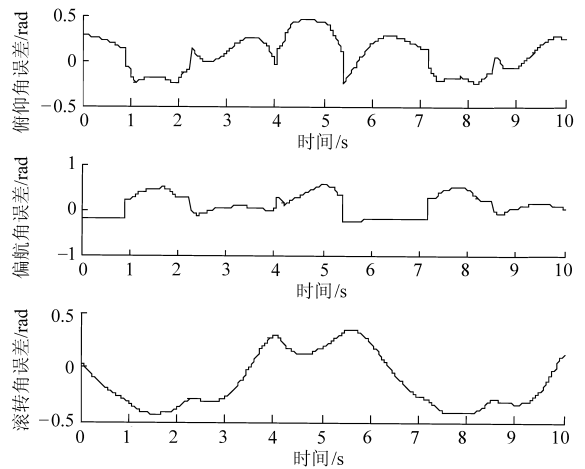
所示。

(3) 动平台偏航运动: $\alpha = \sin t$,仿真结果如图 5 所示。

(4) 动平台滚转运动: $\gamma = 0.2 \sin t$,仿真结果如图 6 所示。

(5) 动平台升沉运动: $z = 0.2 \sin t$,仿真结果如图 7 所示。

(6) 动平台耦合运动 2:按俯仰角 $\beta = \cos t$,偏航角 $\alpha = 2 \sin t$,滚转角 $\gamma = 0.2 \sin t$ 规则进行耦合运动,结果如图 8 所示。



对滚转角误差的影响大,其他运动对滚转角误差的影响较小。

5 算法应用实例

运用以上动平台输出位姿误差模型,对风洞飞行器实验的位姿误差进行补偿,以提高风洞实验结果的精度。基本思想是:根据该机构的位置逆解解析式(1),利用误差数学模型式(11)、(12)计算出机构理想位姿的误差,然后将误差与理想位姿相加得到实际位姿。再求出相应的杆长误差后与逆解得到

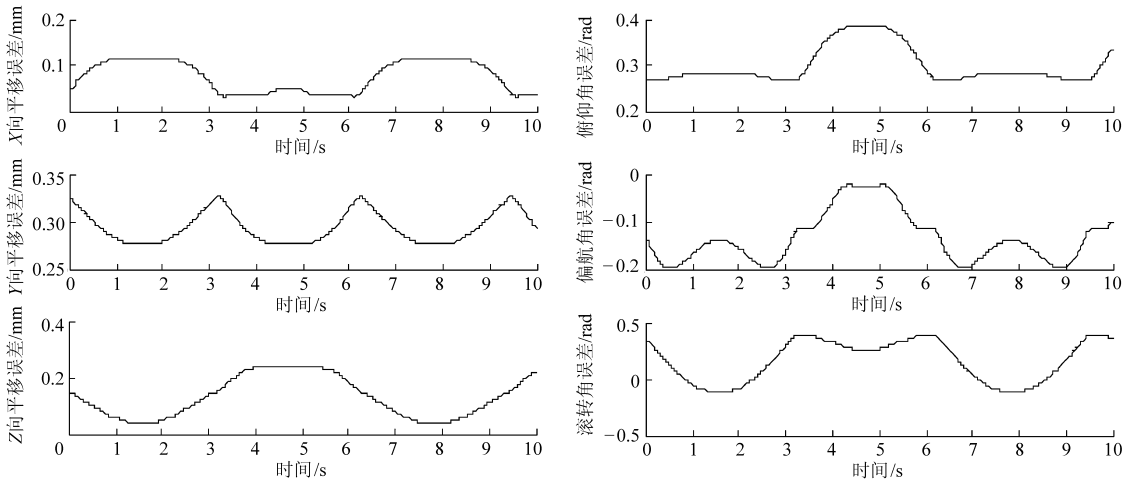


图4 动平台俯仰运动位姿误差曲线

Fig. 4 Error graphic for translation and rotation of pitching kinematic of motive platform

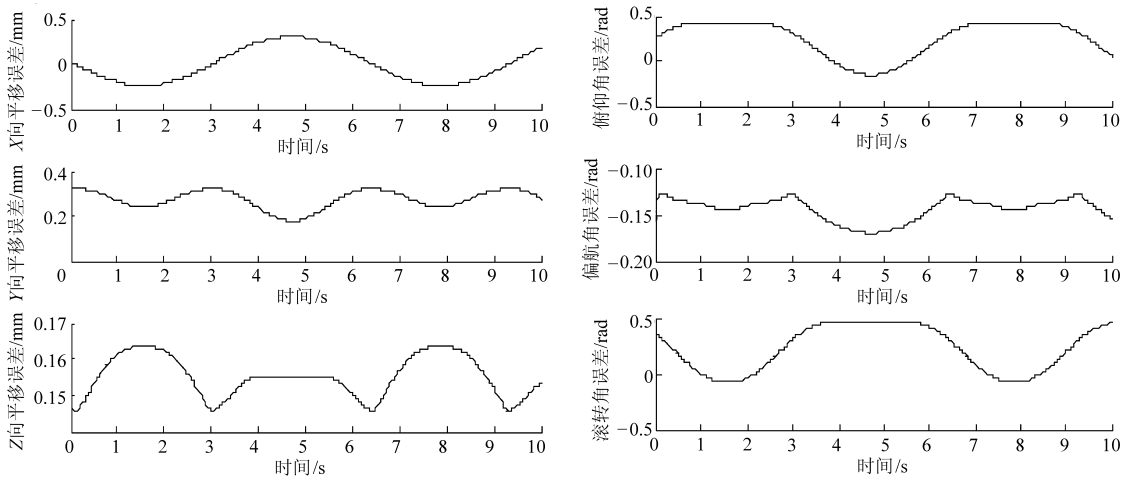


图5 动平台偏航运动位姿误差曲线

Fig. 5 Error graphic for translation and rotation of yaw kinematic of motive platform

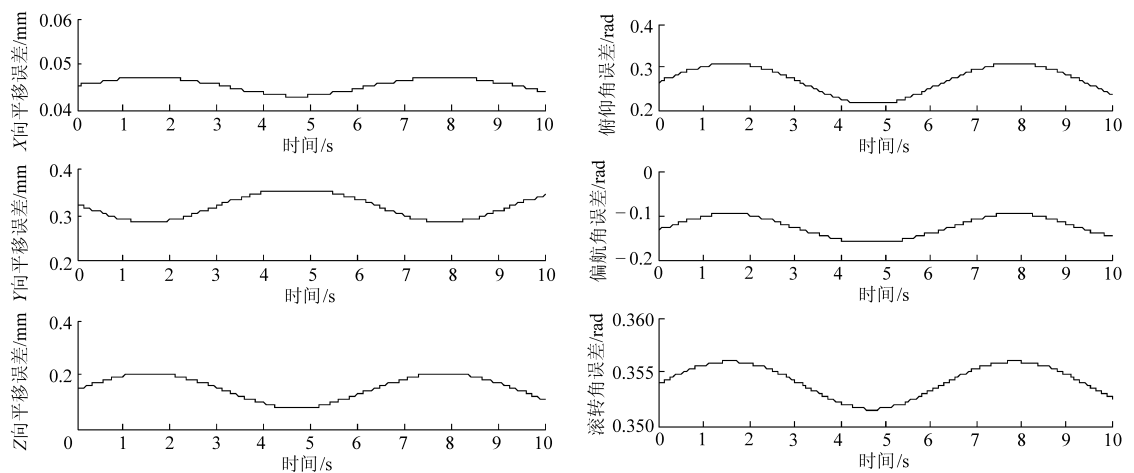


图6 动平台滚转运动位姿误差曲线

Fig. 6 Error graphic for translation and rotation of rolling kinematic of motive platform

的理想杆长叠加得到实际的杆长,最后根据实际杆长对该并联支撑机器人动平台位姿进行控制。实验前先根据被试模型运动轨迹曲线估算误差,采用光学位姿检测仪对修正前后的动平台输出位姿进行测试,并将测得的结果与系统给定的理想值进行比较,

三者的曲线分别如图9~10所示。

从图9~10的曲线中可以看出,在风洞实验中采用误差模型校正算法之后,动平台的位移和转动精度有明显提高,说明该误差模型是正确的,可以有效地提高风洞测试数据的精度。

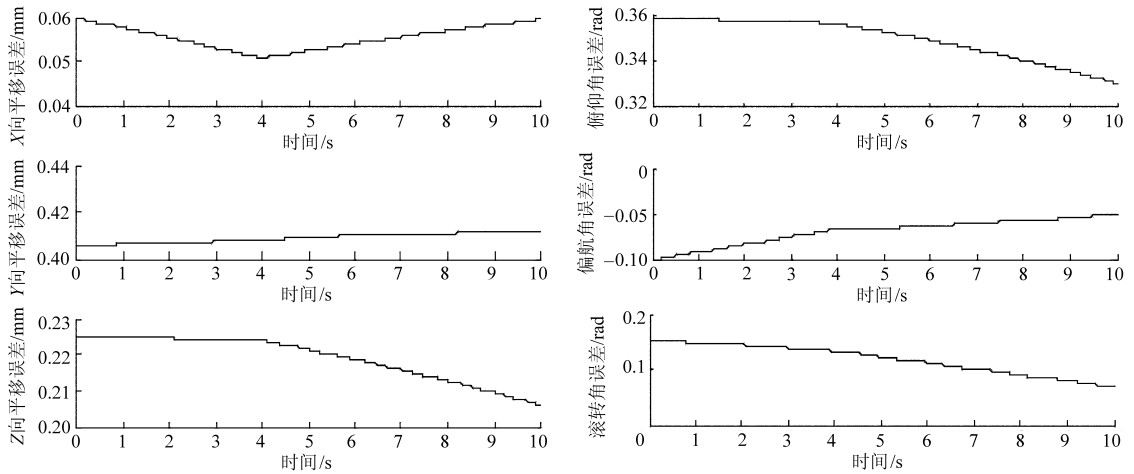


图 7 动平台升沉运动位姿误差曲线

Fig. 7 Error graphic for translation and rotation of heaving kinematic of motive platform

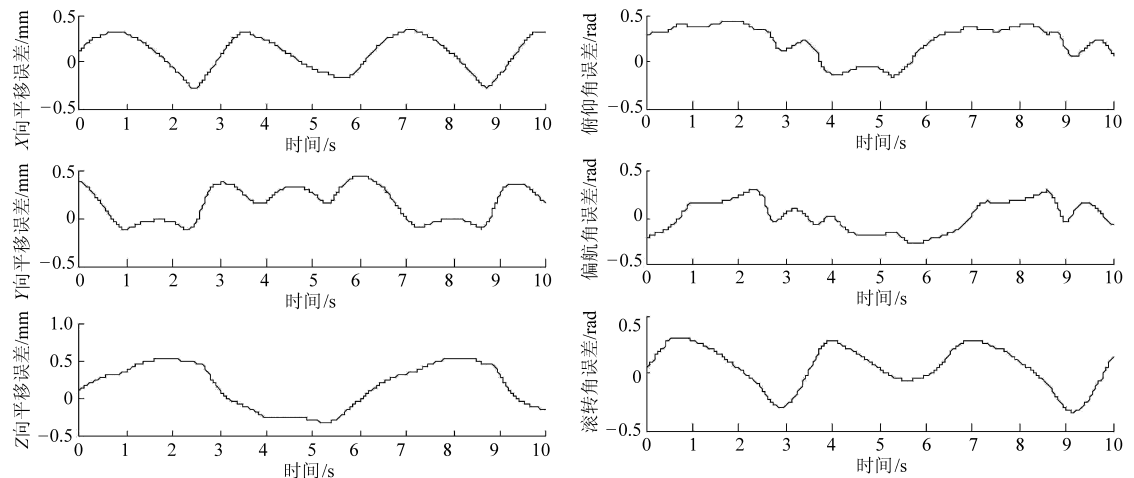


图 8 动平台耦合运动 2 位姿误差曲线

Fig. 8 Error graphic for translation and rotation of No. 2 coupling kinematic of motive platform

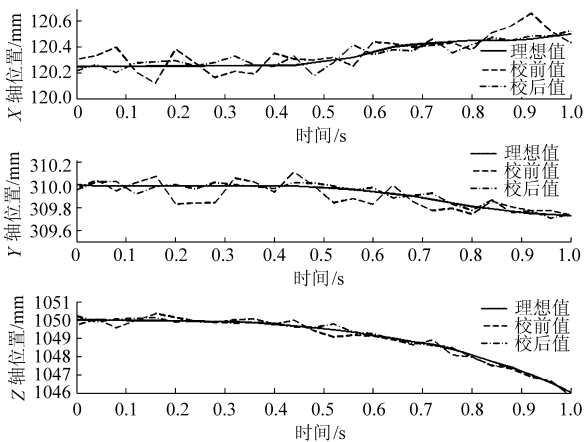


图 9 动平台位置曲线比较

Fig. 9 Comparison of displacement graphics of motive platform

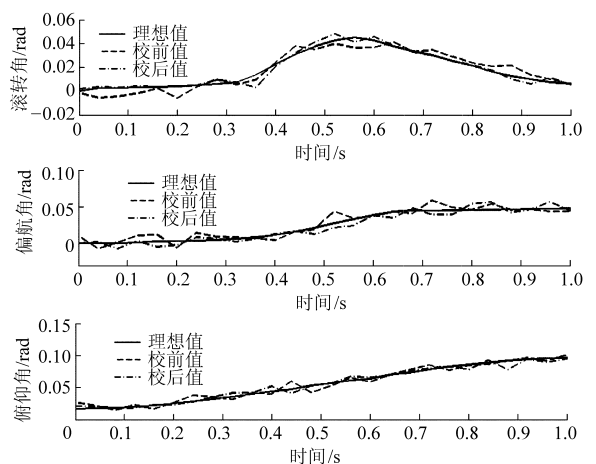


图 10 动平台姿态曲线比较

Fig. 10 Comparison of posture graphics of motive platform

6 结束语

通过对动平台输出位姿误差的仿真分析,并借助误差敏感度分析,可对并联支撑机器人构件设计和装配过程中的误差进行针对性控制,提高并联机器

人设计制造的精度。此外,通过在风洞实验中嵌入与运动误差仿真相似的运动误差估算程序,对风洞实验中被试模型的位姿误差进行估算,提高了风洞实验数据的准确性。通过实际应用,也证明了该方法的正确性。

参 考 文 献

- 1 李研彪,金振林,计时鸣,等.一种并联结构拟人肩关节的误差分析[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(3):446-451.
Li Yanbiao, Jin Zhenlin, Ji Shiming, et al. Error analysis of a parallel anthropopathic shoulder[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(3): 446-451. (in Chinese)
- 2 李思维,黄田,Derek Chetwynd,等.一种含平行四边形支链的3自由度并联机构姿态精度综合与装配工艺设计[J].机械工程学报,2003,39(7):38-42.
Li Siwei, Huang Tian, Derek Chetwynd, et al. Orientation accuracy synthesis and assembly process design of a 3-DOF parallel kinematic machine with parallelogram struts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 38-42. (in Chinese)
- 3 沈惠平,张会芳,辛秀梅,等.并联运动机械误差建模及校正技术的最新进展[J].中国机械工程,2008,19(1):120-125.
Shen Huiping, Zhang Huifang, Xin Xiumei, et al. New progresses of error analysis modeling and calibration of parallel kinematic machine[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(1): 120-125. (in Chinese)
- 4 唐国宝,黄田.Delta 并联机构精度标定方法研究[J].机械工程学报,2003,39(8):55-61.
Tang Guobao, Huang Tian. Kinematic calibration of Delta robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 55-61. (in Chinese)
- 5 Rauf A, Pervez A, Uchiyama M. Experimental results on kinematic calibration of parallel manipulators using pose measurement device[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(2): 379-384.
- 6 Wang S M, Ehman K F. Errors model and accuracy analysis of a six-DOF Stewart platform[J]. Manufacturing Science and Engineering, 1995, 2(1): 519-530.
- 7 Moon S K, Moon Y M, Kota S. Screw-theory based error prediction of a novel compliant PKM[C]//Proceedings of 3rd Parallel Kinematics Seminar, 2002: 507-508.
- 8 Han S K, Yong J C. The kinematic error bound analysis of the Stewart platform[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(1): 63-73.
- 9 Seung R L, Kyungwoo Kang. Error analysis of a parallel mechanism considering link stiffness and joint clearances[J]. KSME International Journal, 2002, 16(6): 799-809.
- 10 Cheng Gang, Ge Shirong, Wang Yong. Error analysis of three degree-of-freedom changeable parallel measuring mechanism[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 17(1): 101-104.
- 11 李新友,陈五一,韩先国.基于正交设计的3-RPS 并联机构精度分析与综合[J].北京航空航天大学学报,2011,37(8): 979-984.
Li Xinyou, Chen Wuyi, Han Xianguo. Accuracy analysis and synthesis of 3-RPS parallel machine based on orthogonal design [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(8): 979-984. (in Chinese)
- 12 郑辉,唐国宝.Delta 并联机械手几何误差建模及灵敏度分析[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):252-255.
Zheng Hui, Tang Guobao. Error modeling and sensitivity analysis of Delta robot[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 252-255. (in Chinese)
- 13 陈培,王兴.空间2-RSSS 机构的误差分析[J].北京航空航天大学学报,2011,37(3):263-267.
Chen Pei, Wang Xing. Error model analysis of 2-RSSS spatial mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 263-267. (in Chinese)
- 14 谢平,杜义浩,田培涛,等.一种并联机器人误差综合补偿方法[J].机械工程学报,2012,48(9):43-49.
Xie Ping, Du Yihao, Tian Peitao, et al. A parallel robot error comprehensive compensation method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 43-49. (in Chinese)
- 15 杜义浩.并联机器人轨迹规划中的运动误差补偿方法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012:81-90.
Du Yihao. Motion error compensation method research in parallel robot trajectory planning [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2012: 81-90. (in Chinese)
- 16 于凌涛,孙立宁,杜志江,等.并联机器人误差检测与补偿的三平面法[J].哈尔滨工业大学学报,2006,27(5):671-674.
Yu Lingtao, Sun Lining, Du Zhijiang, et al. Three planes method on measuring and compensation of parallel robot[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(5): 671-674. (in Chinese)
- 17 谭兴强,谢志江,谢永春.6-PUS 并联机构奇异判据推导与奇异性分析[J].农业机械学报,2012,43(12):234-239.
Tan Xingqiang, Xie Zhijiang, Xie Yongchun. Deriving on singularity judge for 6-PUS parallel mechanism and singularity analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 234-239. (in Chinese)
- 18 谭兴强.风洞六自由度并联支撑机器人优化及控制系统研究[D].重庆:重庆大学,2012:19-20.
Tan Xingqiang. Study on optimization design and control system for 6-DOF parallel mechanism support system of wind tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 19-20. (in Chinese)
- 19 熊有伦.机器人技术基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2008:23-29.
- 20 李永泉,张立杰,郭志民,等.基于D-H 矩阵的球面5R 并联机构误差建模及灵敏度分析[J].中国机械工程,2012,23(12):1470-1474.
Li Yongquan, Zhang Lijie, Guo Zhimin, et al. Error modeling and sensitivity analysis of spherical 5R parallel manipulator based on D-H matrix[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1470-1474. (in Chinese)

- high torque[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2):44-47. (in Chinese)
- 18 闻德生,张勇,王志力,等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析[J]. 西安交通大学学报,2011,45(3):81-85.
Wen Desheng, Zhang Yong, Wang Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple acting multi pump and multi motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(3):81-85. (in Chinese)
- 19 柯明纯,丁凡,李宾. 背压对液压马达效率影响的探讨[J]. 农业机械学报,2006,37(10):128-131.
Ke Mingchun, Ding Fan, Li Bin. Exploration of the influence of backing pressure on the efficiency of hydraulic motor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):128-131. (in Chinese)
- 20 杨尔庄. 液压技术的发展动向及展望[J]. 液压启气动与密封,2003(4):1-7.

Uniformity of Double Stator Alien Slider Hydraulic Motor

Wen Desheng Zhang Kaiming Zhang Sanxi Zheng Zhenquan Yang Jie
(Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To meet the needs of different working conditions, a double-stator multi-motors was designed. Double-stator single-acting multi-motors was one of double-stator multi-motors. In order to realize the performance of motor, the influence of torque pulsation by different number of slider was studied based on the analysis of the theoretical displacement and theoretical torque of double-stator single-acting multi-motors. Through the analysis, mathematical expressions of the motor torque and the number of sliders were obtained. Meanwhile, the results show that the lag angle can influence torque pulsation when outer motor and inner motor work at the same time and differential connection. It turns out that the uniformity of angular velocity is smaller when the number of alien slider is odd, while the amplitude of angular velocity is a little larger than the motor whose number of sliders is even. This research work lays a theoretical foundation for the design of double-stator single-acting multi-motors.

Key words: Double-stator Angular speed Uniformity Slider

(上接第 340 页)

Motion Error Modeling and Compensating for 6_PUS Parallel Robot of Wind Tunnel Support System

Tan Xingqiang¹ Zhang Jian¹ Xie Zhijiang²
(1. College of Mechanic Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China
2. College of Mechanic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at a kind of new 6-DOF wind tunnel support parallel robot, using the method of D-H single-chain, and together with the method of parameters-perturbation, the motion error model of this support parallel robot used in wind tunnel was established, and simulation program based on this motion error model was made. According to six kinds of typical motion mode of wind tunnel test, six kinds of posture errors of different motion mode of this parallel support system was analyzed and error curves of typical motion mode were also get by simulation. Using the motion error models obtained from the simulation, the corresponding error controlling methods was carried during this parallel support robot components designing and assembling, and ensuring the design and manufacture accuracy of the parallel support robot reached the requirement of wind tunnel tests, and error estimation program which was similar to that of the motion error simulation was embedded in the wind tunnel test to compensate the motion errors of posture and location of tested aircraft model, and it was proved in practice that the precision of wind tunnel test data was improved.

Key words: Robot Parallel mechanism Wind tunnel Support system Error model Error analysis