

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.036

6-PSS 柔性并联机器人动力学分析与仿真*

孙小勇¹ 谢志江¹ 蹇开林¹ 张 钧^{1,2}

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

【摘要】 为了提高风洞试验的安全性,对风洞试验用6-PSS并联机构进行柔性动力学分析。首先,对机构进行运动学分析,得到机构的运动学逆解,利用一阶影响系数法,推导出机构雅可比矩阵。其次,在拉格朗日方程基础上,采用一种合理简化模型动力学建模方法,给出机构动力学方程。提出一种简单实用的柔性动力学建模方法,运用ADAMS软件建立机构的柔性动力学模型,进行并联机构的柔性动力学仿真。对比刚体动力学和柔性动力学曲线,验证了柔性动力学仿真的正确性。最后,分析柔性动力学中驱动力和柔性变形等数据曲线,总结出并联机构柔性状态下动力学特征。

关键词: 并联机器人 柔性动力学 运动学

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0194-06

Dynamics Analysis and Simulation of 6-PSS Flexible Parallel Robot

Sun Xiaoyong¹ Xie Zhijiang¹ Jian Kailin¹ Zhang Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract

In order to improve the safety of the wind tunnel test, the flexible dynamics of a 6-PSS parallel mechanism for the wind tunnel was analyzed. At first, inverse kinematics of the parallel mechanism was received based on the analysis of its kinematics, and Jacobian matrix was calculated by using the first-order influence coefficient method. Then, the dynamics equation was solved by using the Lagrange equations and a simplified rational dynamics method. A simple and practical method of flexible dynamic simulation was put forward. The flexible dynamic simulation of the parallel was obtained with ADAMS software. The correctness of flexible dynamics simulation was verified by comparing the kinetics and dynamics data from rigid and flexible analysis. At last, the character of flexible kinetics was summed up by analyzing the driven force and flexible deformation data.

Key words Parallel robot, Flexible dynamics, Kinematics

引言

并联机构相比串联机构,具有工作空间大、快速性、刚度高、运动精度高等优点,受到众多研究者的关注^[1~4],并在工业领域获得广泛应用。并联机构的运动学及动力学分析是并联机构研究的基础,柔性动力学又是动力学研究的一个难点。

并联机构的动力学分析可以通过 Lagrange 法、矢量法、牛顿欧拉法、数值法等方法^[5~12],得到机构的动力学模型。但通过这些方法直接得到柔性并联机构的动力学方程比较困难^[13~14],而且不能真实反映机构的运动性能。

本文研究的6-PSS空间并联机构用于风洞试验时飞机模型的安装与支撑,特点是6个驱动采用

收稿日期:2011-08-20 修回日期:2012-03-09

* 国家国防基础研究项目(JW20*2009035)

作者简介: 孙小勇,博士生,主要从事并联机器人技术研究,E-mail: sunyong8435@sina.com

通讯作者: 谢志江,教授,博士生导师,主要从事机械创新设计、机电一体化及设备故障诊断研究,E-mail: xzj99@vip.sina.com

直线输入,动平台和输入驱动上的球铰位置可以灵活布置。此种6自由度机构可以获得较大工作空间,并且驱动是直线输入,高速使用情况下可采用直线电动机驱动,机构具有极高的快速性。

本文对此并联机构进行运动学分析,得到机构逆解公式。利用一阶运动影响系数法得到机构的雅可比矩阵。对机构进行有效简化,根据拉格朗日方程,得到机构的动力学方程,并根据仿真得到动力学仿真曲线。利用ADAMS和ANSYS联合仿真,对主要运动部件柔性体离散化,得到机构的柔性体模型。对机构柔性动力学进行分析,得到柔性机构驱动力和刚体驱动力的差别,根据大量的数据,得到机构柔性体动力学的特征。

1 并联机器人运动学分析

6-PSS 并联机器人机构模型结构图如图1所示,主要由动平台、固定基座及连接两平台的拉杆构成。机构共有6组运动支链,每个分支包含相同的运动部件和运动副,每个支链由移动副和拉杆两端球铰副S组成。

此机构关于XY平面对称,拉杆长度为拉杆两端球铰的距离,拉杆*i*长度定义为 $U_i D_i$ 距离($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$),拉杆1、3、4、6长度为 l_1 ,拉杆2和5长度为 l_2 。6个直线运动滑块为机构输入,动平台下端位姿为并联机构输出。

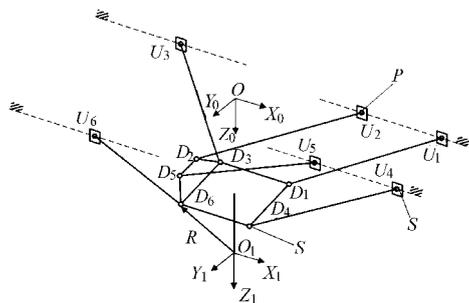


图1 6-PSS 并联机器人结构图

Fig. 1 Sketch of 6-PSS parallel mechanism

建立坐标系,固定坐标系 $OX_0 Y_0 Z_0$ 在上球铰组成的平面内,惯性坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 在动平台末端执行器位置。并联机构共有14个结构参数,分别为拉杆长 l_1, l_2 ,滑块导轨和水平面倾斜角度 θ ,左右导轨距离 $U_1 U_4$ 的一半 d_4 ,上球铰点 U_1 和 U_3 在平面YZ中的距离 d_5 ,上球铰到导轨平面距离 h_1, h_2 ,动平台下端末端执行器到 $U_1 U_2 U_4 U_5$ 平面距离 h ,动平台下球铰点 $D_1 (D_4)$ 到平面YZ距离 d_6 ,下球铰点 D_2, D_5 在平面XY中距离 d_7 ,下球铰点 D_2, D_5 距离的一半 d_8 ,下球铰点 D_1, D_4 距离的一半 d_9 ,下球铰点 D_2, D_3 在平面XY中投影与X轴夹角 ϕ ,动平台下端执行

器到平面 $D_1 D_3 D_4 D_6$ 距离 h_3 。

1.1 运动学逆解

已知动平台末端执行器的运动规律,根据并联机构的特点,下球铰在惯性坐标系中的坐标位置可由几何关系直接求出,上球铰(滑块位置)在固定坐标系中位置YZ方向也可求出,并求出滑块X方向位移,就是运动学逆解。

上球铰在固定坐标系中坐标为

$$U_1: (x_1, -d_4 + h_1 \sin\theta, h_1 \cos\theta)$$

$$U_2: (x_2, -d_4 + h_1 \sin\theta, h_1 \cos\theta)$$

$$U_3: (x_3, -d_4 + h_2 \sin\theta - d_5 \cos\theta, h_2 \cos\theta + d_5 \sin\theta)$$

$$U_4: (x_4, d_4 - h_1 \sin\theta, h_1 \cos\theta)$$

$$U_5: (x_5, d_4 - h_1 \sin\theta, h_1 \cos\theta)$$

$$U_6: (x_6, d_4 - h_2 \sin\theta + d_5 \cos\theta, h_2 \cos\theta + d_5 \sin\theta)$$

下球铰在惯性坐标系中坐标为

$$D_1: (d_6, -d_9, -h_3)$$

$$D_2: (-d_6 - d_7 \cos\phi, -d_8, -h_7 - d_7 \sin\phi)$$

$$D_3: (-d_6, -d_9, -h_3)$$

$$D_4: (d_6, d_9, -h_3)$$

$$D_5: (-d_6 - d_7 \cos\phi, d_8, -h_7 - d_7 \sin\phi)$$

$$D_6: (-d_6, d_9, -h_3)$$

下球铰坐标从惯性坐标系到固定坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{P} = (x, y, z)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & -s\beta c\gamma + c\beta s\alpha s\gamma & s\beta s\gamma + c\beta s\alpha c\gamma \\ s\beta c\alpha & c\beta c\gamma + s\beta s\alpha s\gamma & -c\beta s\gamma + s\beta s\alpha c\gamma \\ -s\alpha & c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma \end{bmatrix}$$

式中 \mathbf{P} ——惯性坐标系在固定坐标系中位置向量

\mathbf{R} ——惯性坐标系到固定坐标系方向余弦矩阵

其中 $c\beta = \cos\beta, s\beta = \sin\beta$,依次类推。上球铰和下球铰在固定坐标系中的位置坐标全部可以求得。根据拉杆长度计算公式

$$l_i = (x_{ui} - x_{di})^2 + (y_{ui} - y_{di})^2 + (z_{ui} - z_{di})^2 \quad (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

可以推导出滑块位移方程

$$\begin{aligned} x_{ui} = & \\ \begin{cases} x_{di} + \sqrt{l_i^2 - (y_{ui} - y_{di})^2 - (z_{ui} - z_{di})^2} & (i=1, 2, 4, 5) \\ x_{di} - \sqrt{l_i^2 - (y_{ui} - y_{di})^2 - (z_{ui} - z_{di})^2} & (i=3, 6) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)对时间求导,得到滑块的速度表达式,

速度公式对时间求导,得到加速度表达式。

1.2 雅可比矩阵求解

利用一阶运动影响系数法^[15]求解速度雅可比矩阵,可以利用机构几何参数快速求出,从而避免并联机构运动链多、运动副复杂的问题。

分析其中一个运动支链,动平台下端原点 O_1 (并联机构末端执行器)角速度 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, 原点 O_1 的速度 $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$, 则动平台下球铰速度可以表示为

$$\boldsymbol{v}_{di} = \boldsymbol{v} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{R}_i \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{R}_i \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$, 为动平台惯量坐标系 O_1 到下球铰的位置矢量。

根据拉杆两端上、下球铰速度关系

$$\boldsymbol{v}_{ui} \cdot \boldsymbol{L}_i = \boldsymbol{v}_{di} \cdot \boldsymbol{L}_i \quad (4)$$

式中 \boldsymbol{L}_i ——拉杆 i 的单位方向矢量

\boldsymbol{v}_{ui} ——上球铰速度

把式(4)代入式(3)得

$$\boldsymbol{v}_{ui} \cdot \boldsymbol{L}_i = (\boldsymbol{v} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{R}_i) \cdot \boldsymbol{L}_i = [\boldsymbol{L}_i \quad \boldsymbol{R}_i \times \boldsymbol{L}_i] \begin{bmatrix} \boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (5)$$

上球铰位置为 X 方向的移动副,上球铰速度 $\boldsymbol{v}_{ui} = (v_{uix}, 0, 0)$, $\boldsymbol{L}_i = (L_{ix}, L_{iy}, L_{iz})$, 令 $\boldsymbol{L}_{i0} = \boldsymbol{L}_i / L_{ix}$, 则式(5)可以化简为

$$v_{uix} = [\boldsymbol{L}_{i0} \quad \boldsymbol{R}_i \times \boldsymbol{L}_{i0}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则对于全部 6 个支链有

$$\begin{bmatrix} v_{u1x} \\ v_{u2x} \\ v_{u3x} \\ v_{u4x} \\ v_{u5x} \\ v_{u6x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{10} & \boldsymbol{R}_1 \times \boldsymbol{L}_{10} \\ \boldsymbol{L}_{20} & \boldsymbol{R}_2 \times \boldsymbol{L}_{20} \\ \boldsymbol{L}_{30} & \boldsymbol{R}_3 \times \boldsymbol{L}_{30} \\ \boldsymbol{L}_{40} & \boldsymbol{R}_4 \times \boldsymbol{L}_{40} \\ \boldsymbol{L}_{50} & \boldsymbol{R}_5 \times \boldsymbol{L}_{50} \\ \boldsymbol{L}_{60} & \boldsymbol{R}_6 \times \boldsymbol{L}_{60} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (7)$$

简记为 $[v_{uix}] = \boldsymbol{J}[\boldsymbol{v} \quad \boldsymbol{\omega}]^T$ (8)

式中 \boldsymbol{J} 即为速度雅可比矩阵, $\boldsymbol{J} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 。

2 动力学建模分析

拉格朗日函数 L 被定义为系统的动能 E 和势能 U 之差, 即 $L = E - U$, 其中 E 和 U 可以用任何方便的坐标系来表示。系统动力学方程式, 即拉格朗日方程为

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中 F_i ——作用在第 i 个坐标上的广义力或广义力矩

q_i ——广义坐标值

\dot{q}_i ——相应的广义速度

通过选取动平台位置和速度, 由动平台的位置信息来表示滑块与拉杆的位置, 并由其表示系统的动能和位能, 通过拉格朗日方法求取作用在运动平台上的广义力, 再由虚功原理最终求得作用在驱动端上的作用力, 即滑块所受的驱动力。

2.1 系统动能

滑块和上球铰运动规律相同, 滑块及附属构件质量质心可简化到上球铰球心位置。动平台、动平台下端执行器和下球铰等作为整体, 可以通过计算得到质心位置和转动惯量。

拉杆质量相对于滑块和动平台质量较小, 转动惯量也较小, 可把拉杆质量转换到滑块上和动平台上。

动平台惯量矩阵

$$\boldsymbol{J}_0 = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix}$$

因为动平台实际惯量矩阵中, 除主对角线上的 J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{zz} 外, 其它量级较小, 故在简化算法中忽略不计。

则动平台动能为

$$E_1 = \frac{1}{2} m_1 (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + \frac{1}{2} J_{xx} \omega_x^2 + \frac{1}{2} J_{yy} \omega_y^2 + \frac{1}{2} J_{zz} \omega_z^2 \quad (10)$$

滑块动能 $E_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 m_{2i} v_i^2$ (11)

式中 m_1 ——动平台、下球铰、末端执行器及 3 根拉杆的质量和

v_x, v_y, v_z ——动平台沿坐标 3 个方向的移动速度

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ——动平台沿坐标 3 个方向的转动速度

m_{2i} ——第 i 个滑块、球铰与拉杆质量一半之和

系统动能为

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{2} m_1 (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + \frac{1}{2} J_{xx} \omega_x^2 + \frac{1}{2} J_{yy} \omega_y^2 + \frac{1}{2} J_{zz} \omega_z^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 m_{2i} v_i^2 \quad (12)$$

2.2 系统势能

在固定坐标系下, 以原点 O 为势能原点, 则动平台势能为 $-m_1 g (h + z)$, 6 个滑块的势能为 $-(m_{23} + m_{26}) g (h_2 \cos \theta + d_5 \sin \theta)$ 。

系统总势能

$$U = -m_1 g (h + z) - (m_{23} + m_{26}) g (h_2 \cos \theta + d_5 \sin \theta) \quad (13)$$

2.3 基于虚功原理的拉格朗日方程

根据虚功原理得到动力学方程

$$L = E - U = \frac{1}{2}m_1(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + \frac{1}{2}J_{xx}\omega_x^2 + \frac{1}{2}J_{yy}\omega_y^2 + \frac{1}{2}J_{zz}\omega_z^2 + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^6 m_{2i}v_i^2 + m_1g(h+z) + (m_{23} + m_{26})g(h_2\cos\theta + d_5\sin\theta)$$

根据拉格朗日方程

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

得

$$\begin{cases} F_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = m_1 \dot{v}_x + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i1} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i1}}{dt} \right) \\ F_y = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_y} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = m_1 \dot{v}_y + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i2} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i2}}{dt} \right) \\ F_z = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_z} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = m_1 \dot{v}_z + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i3} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i3}}{dt} \right) + m_1 g \\ T_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = J_x \dot{\omega}_x + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i4} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i4}}{dt} \right) \\ T_y = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega_y} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} = J_y \dot{\omega}_y + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i5} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i5}}{dt} \right) \\ T_z = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \omega_z} \right) - \frac{\partial L}{\partial \gamma} = J_z \dot{\omega}_z + m_2 \sum_{i=1}^6 \left(J_{i6} \frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{dJ_{i6}}{dt} \right) \end{cases} \quad (14)$$

广义驱动力 F 实际上是通过作用在滑块上产生的驱动力, 根据虚功原理, J 为机构的雅可比矩阵, 则系统的驱动力为

$$[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6] = (J^T)^{-1} \cdot F \quad (15)$$

给定动平台末端执行器运动规律, 由式(14)求得数据代入到式(15)中, 则可以求得系统6个滑块驱动的驱动力。

3 实例分析及柔性仿真

3.1 实例分析

综合分析风洞试验条件及并联机构的实际要求, 对并联机构14个尺寸参数进行初步设计, 主要约束条件为: 风洞高度、支撑装置尺寸要求, 动平台末端执行器不短于2 m; 3个方向的位移最大300 mm, 3个方向的旋转角度最大30°; 同组滑块不能干涉, 拉杆空间不干涉; 球铰的旋转角度最大40°。

综合实际约束条件, 以滑块的速度、加速度、电动机功率为目标函数, 进行尺度综合分析, 得出机构的优化尺寸。给定系统结构参数: $l_1 = 2.0$ m, $l_2 = 1.8$ m, $\theta = 30^\circ$, $d_4 = 0.55$ m, $d_5 = 0.4$ m, $d_6 = 0.3$ m, $d_7 = 0.32$ m, $d_8 = 0.1$ m, $d_9 = 0.25$ m, $\phi = 54^\circ$, $h_1 =$

$h_2 = 0.13$ m, $h = 3.4$ m, $h_3 = 2$ m。滑块质量60 kg, 动平台质量100 kg。给定2种运动情况: 动平台末端执行器绕 Y_1 轴以振幅为30°、频率1 Hz 正弦规律转动; 动平台末端执行器绕 X_1 轴以振幅10°、频率1 Hz 正弦规律转动。在 Matlab 软件中编程, 得到仿真结果如图2~5, 图中横坐标每个时间步长为0.02 s。

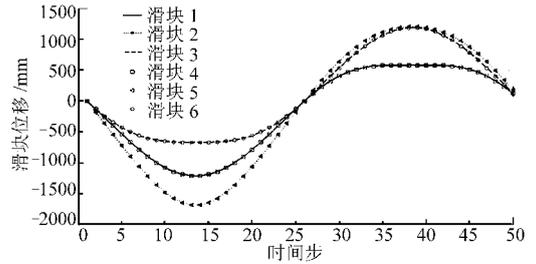


图2 绕 Y_1 轴运动滑块位移曲线

Fig. 2 Slipways displacement of Y_1 axis motion

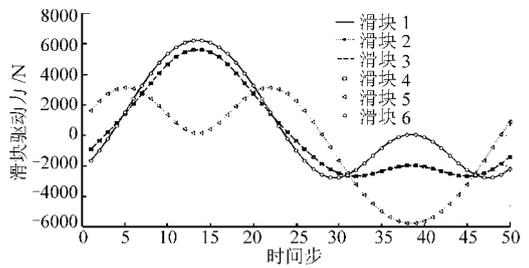


图3 绕 Y_1 轴运动滑块驱动力曲线

Fig. 3 Driving force of Y_1 axis motion

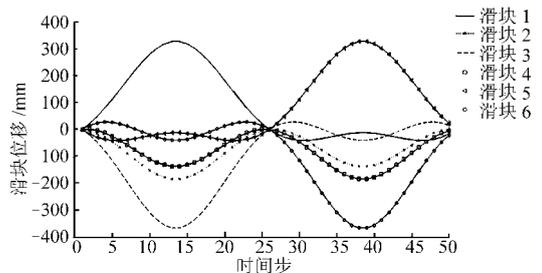


图4 绕 X_1 轴运动滑块位移曲线

Fig. 4 Slipways displacement of X_1 axis motion

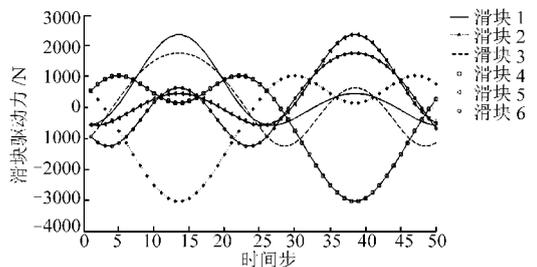


图5 绕 X_1 轴运动滑块驱动力曲线

Fig. 5 Driving force of X_1 axis motion

从仿真结果可以看出, 机构的最大位移和最大驱动力都出现在第一种运动状态, 并且最大位移出现在滑块2和5, 最大驱动力出现在滑块3和6。

系统具有6个自由度, 可以进行6个单自由度运动, 也可实现几种自由度耦合运动。实例分析中只

列出2种典型运动,限于篇幅其它运动未全部列出。计算可得到滑块位移、速度、加速度及滑块的驱动力等数据曲线,分析可知,此并联机构运动有以下特点:

(1)滑块位移、速度、加速度曲线近似正弦变化,与动平台末端执行器运动规律相符。

(2)系统所有运动中,绕 Y_1 轴旋转的频率和振

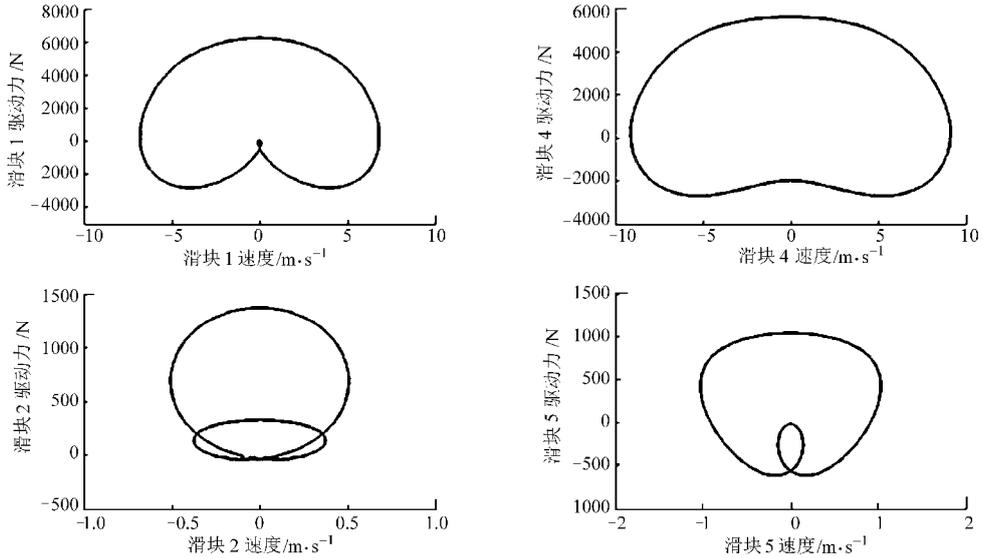


图6 滑块驱动力随速度变化曲线

Fig. 6 Relationship between driving force and velocity

3.2 系统柔性动力学仿真

利用 ADAMS 和 ANSYS 软件对系统进行柔性动力学联合仿真。整个系统中,拉杆的变形对系统精度影响最大,拉杆采用复合材料,故柔性仿真时,对拉杆进行柔性网格划分,得出系统柔性仿真结果。

通过以下步骤完成联合仿真:

(1)使用 Solidworks 建立系统三维模型。

(2)三维模型导入 ADAMS 软件中,建立系统全刚体模型,可对系统进行运动学、动力学仿真。

(3)使用 ANSYS 软件,对系统中 6 根拉杆进行网格划分,生成 .mnf 柔性体文件。

(4)将柔性体文件导入到 ADAMS 中,并替换原刚体。

(5)根据逆解求得滑块位移曲线,重新添加滑块移动副驱动,模拟系统正常运动情况,对系统进行柔性动力学仿真。

幅对滑块位移、速度、加速度、驱动力影响最大,最大位移等出现在这种运动的最大振幅和最大频率处。

(3)对于系统不同规律运动,滑块最大驱动力出现在滑块速度为零时,而滑块速度最大时驱动力为零或者较小。如图 6 中,在绕 Y_1 轴运动时,驱动力最大值出现在滑块速度为零时,最小值出现在速度最大时。

(6)进行 ADAMS 仿真,得到所需数据。

按照上述步骤,得到系统的三维模型及柔性体模型如图 7 所示。

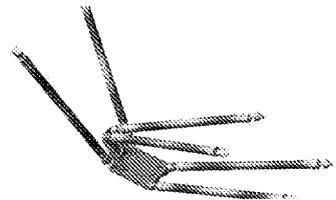


图7 机构柔性仿真模型

Fig. 7 Mode of flexible dynamics simulation

在 ADAMS 仿真软件中,模拟系统运动,计算分析滑块驱动力和拉杆受力情况。以典型运动(动平台末端执行器绕 Y_1 轴以振幅 30° 、频率 1 Hz 正弦规律转动)为例,分析多体柔性方式对系统的影响。

图 8 表示机构在柔性动力学仿真下的 6 个滑块驱动力曲线;图 9 表示动平台末端执行器在柔性动力学仿真下的误差曲线;图 10 则表示拉杆的受力连

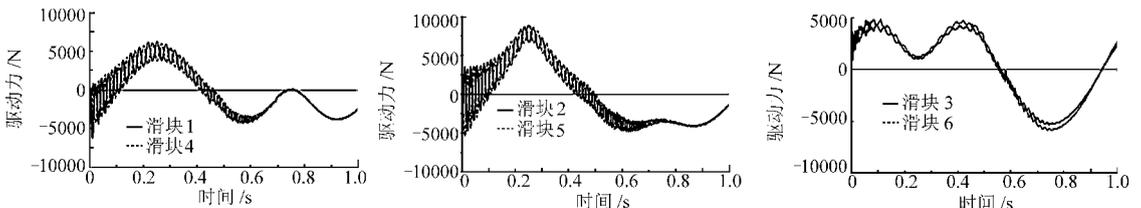


图8 滑块驱动力柔性仿真曲线

Fig. 8 Driving force of flexible dynamics simulation

接点在柔性动力学仿真下的变形曲线。

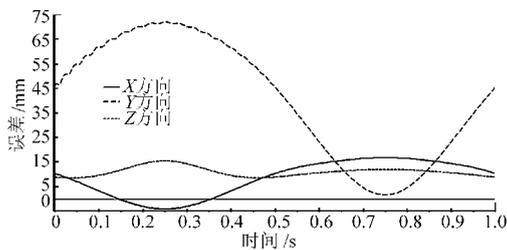


图9 末端执行器柔性仿真误差曲线

Fig.9 Error curves of end actuator in flexible simulation

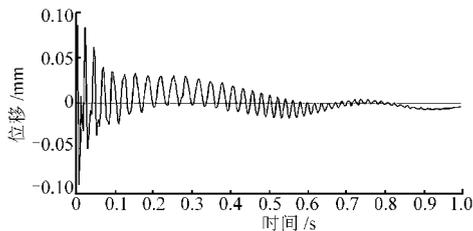


图10 拉杆连接点柔性仿真变形曲线

Fig.10 Deformation curves of rod connection point in flexible simulation

根据系统柔性体仿真结果,对比系统刚性动力学分析结果,可以得出:

(1) 滑块驱动力柔性体产生较大波动,并且按照末端执行器运动规律的高频规律波动。驱动器进行调试时应注意增加滤波功能,减小高频对运动控制的影响。

(2) 曲线规律和刚体相同,最大值基本相同,验证了柔性多体动力学分析的正确性。

(3) 对称方位的滑块驱动力呈现波动交替变

化,波动变化是由拉杆弹性变形引起。要求滑块驱动器有较强的适应能力,如果驱动器能力不足,则有可能造成滑块产生蠕动现象。驱动控制系统的驱动能力需在理论值基础上增大。

(4) 柔性体仿真中在拉杆受力和滑块驱动力曲线中都出现高频波动曲线,这种高频波动对系统误差产生很大影响,应在控制系统设计时尽量减小或避免。

(5) 柔性体仿真末端执行器位移误差大,说明拉杆的刚度对末端执行器的精度有较大影响,优化时可充分增加拉杆的刚度。

4 结论

(1) 建立了并联机构的运动学逆解模型,根据坐标变换和结构特点得到运动学逆解,根据一阶运动影响系数法,比较简便得到机构的雅可比矩阵,为动力学分析提供了基础。

(2) 利用虚功原理拉格朗日方程数值建模法,构建机构动力学模型,借助 Matlab 软件进行动力学仿真分析,得到系统的动力学曲线。

(3) 通过 ADAMS 和 ANSYS 联合仿真,进行系统多体柔性动力学分析,得到系统更符合真实情况的动力学曲线。

(4) 提出的运动学和动力学模型建立方法,可作为解决此类机构的一般方法。通过分析比较刚体动力学和柔性动力学的仿真结果,得到机构特有的几个重要结论,对系统控制和误差分析有重要意义。

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 张立勋,孙洪颖,钱振美. 卧式下肢康复机器人运动学分析及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 2 001 ~ 2 005. Zhang Lixun, Sun Hongying, Qian Zhenmei. Kinematics analysis and simulation of horizontal lower limbs rehabilitative robot [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 2 001 ~ 2 005. (in Chinese)
- 3 马晓丽,马履中,周兆忠. 新型4自由度并联机构的运动学建模与分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 100 ~ 104. Ma Xiaoli, Ma Lüzhong, Zhou Zhaozhong. Kinematics modeling and analysis of a 4 - DOF parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 100 ~ 104. (in Chinese)
- 4 刘善增,余跃庆,佘国宁,等. 3自由度并联机器人的运动学与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 12 ~ 17. Liu Shanzeng, Yu Yueqing, Si Guoning, et al. Kinematic and dynamic analysis of a three-degree-of-freedom parallel manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 12 ~ 17. (in Chinese)
- 5 车仁炜,陆念力,胡长胜. 6-HTRT 并联机器人动力学分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(10): 1 146 ~ 1 151. Che Renwei, Lu Nianli, Hu Changsheng. Dynamics analysis of 6 - HTRT parallel robots [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10): 1 146 ~ 1 151. (in Chinese)
- 6 Benamar F, Bidaud P, Menn F. Generic differential kinematic modeling of articulated mobile robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(7): 997 ~ 1 012.
- 7 Wolf A, Shoham M. Screw theory tools for the synthesis of the geometry of a parallel robot for a given instantaneous task [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(6): 656 ~ 670.
- 8 Dai J S, Huang Z, Lipkin H. Mobility of over constrained parallel mechanisms [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 220 ~ 229.

参 考 文 献

- 1 Briot S, Bonev I A. Pantoperon-4: a new 3T1R decoupled parallel manipulator for pick-and-place applications [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(5): 707 ~ 721.
- 2 Altuzarra O, Loizaga M, Pinto C, et al. Synthesis of partially decoupled multi-level manipulators with lower mobility [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(1): 106 ~ 118.
- 3 韩方元, 赵丁选, 李天宇. 3-RPS 并联机构正解快速数值算法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 229 ~ 233.
Han Fangyuan, Zhao Dingxuan, Li Tianyu. A fast forward algorithm for 3-RPS parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 229 ~ 233. (in Chinese)
- 4 Gregorio R D. Translational parallel manipulators: new proposals [J]. *Journal of Robotic Systems*, 2002, 19(12): 595 ~ 603.
- 5 朱伟, 马履中, 吴伟光, 等. 基于三平移并联机构的三维减振平台建模与仿真[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(1): 142 ~ 146.
Zhu Wei, Ma Lüzhong, Wu Weiguang, et al. Modeling and simulation analysis on multi-dimensional damping platform base on three-translation parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(1): 142 ~ 146. (in Chinese)
- 6 Jin Q, Yang T L. Theory for topology synthesis of parallel manipulators and its application to three-dimension-translation parallel manipulators [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(4): 625 ~ 639.
- 7 Clavel R. Delta, a fast robot with parallel geometry [C] // Burckhardt C W. 18th International Symposium on Industrial Robots. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 91 ~ 100.
- 8 Kong X, Gosselin C M. Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3-DOF translational parallel manipulator [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2002, 21(9): 791 ~ 798.
- 9 Li W, Gao F, Zhang J. R-CUBE, a decoupled parallel manipulator only with revolute joints [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(4): 467 ~ 473.
- 10 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- 11 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.

(上接第 199 页)

- 9 孙恒辉, 刘正士, 陈恩伟. 6-SPR 并联机构运动学的一种分析方法[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 194 ~ 197.
Sun Henghui, Liu Zhengshi, Chen Enwei. Method for kinematics analysis of the 6-SPR parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(1): 194 ~ 197. (in Chinese)
- 10 潘春萍, 管欣, 卢颖, 等. 六足并联机构的动力学建模与仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(21): 6 889 ~ 6 896.
Pan Chunping, Guan Xin, Lu Ying, et al. Dynamics modeling and simulation analysis of hexapod parallel mechanism [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(21): 6 889 ~ 6 896. (in Chinese)
- 11 闫述, 王旭永, 陶建峰, 等. 三自由度摇摆台姿态逆解及 ADAMS 仿真[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(2): 325 ~ 327.
Yan Shu, Wang Xuyong, Tao Jianfeng, et al. Inverse direction solution and ADAMS simulation of 3-rotational-DOF parallel driven platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(2): 325 ~ 327. (in Chinese)
- 12 冯志友, 张燕, 杨廷力, 等. 基于牛顿欧拉法的 2UPS-2RPS 并联机构逆动力学分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4): 193 ~ 197.
Feng Zhiyou, Zhang Yan, Yang Tingli, et al. Inverse dynamics of a 2UPS-2RPS parallel mechanism by Newton-Euler formulation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 193 ~ 197. (in Chinese)
- 13 贾晓辉, 田延岭, 张大卫. 3-PRR 柔性并联机构动力学分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(10): 199 ~ 203.
Jia Xiaohui, Tian Yanling, Zhang Dawei. Dynamics analysis of 3-PRR compliant parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(10): 199 ~ 203. (in Chinese)
- 14 胡俊峰, 张宪民, 朱大昌, 等. 柔性并联机器人动力学建模[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 208 ~ 213.
Hu Junfeng, Zhang Xianmin, Zhu Dachang, et al. Dynamic modeling of flexible parallel robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 208 ~ 213. (in Chinese)
- 15 于靖军, 刘辛军, 丁希仑. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.