

空间柔性闭链机器人动力学建模与振动仿真

张青云¹ 赵新华^{1,2} 刘凉² 戴腾达²

(1. 天津理工大学计算机科学与工程学院, 天津 300384;

2. 天津理工大学天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384)

摘要: 空间闭链机器人的柔性连杆在高速运行状态下产生的弹性变形对系统振动效应具有重要影响。为准确分析柔性连杆对空间柔性闭链机器人振动特性的影响,采用有限单元法对柔性构件进行离散,基于浮动坐标系法描述构件位移场,最后通过 Lagrange 方程建立空间刚柔耦合闭链机器人动力学模型及振动方程,并分析系统固有频率和振型函数。基于同等参数,利用 ADAMS/Vibration 模块建立了空间刚柔耦合闭链机器人的自激振动仿真模型,研究系统固有频率和对应模态的变化,以及不同激振力作用下的频率响应特征。结果表明:理论模型和仿真模型的动平台运动轨迹基本一致,并且理论模型与振动仿真模型的固有频率也具有的一致性,验证了振动仿真模型建立的正确性。随着激振力幅值的增大,系统响应增强。同一激振频率动平台质心处 Y 方向响应最大, X 方向次之, Z 方向最小。其中,系统第 11、12 阶模态对应的系统变形量最大,对应的激振频率为 40 ~ 60 Hz。

关键词: 空间柔性闭链机器人; 刚柔耦合; 振动分析; 频率响应; 动力学

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)01-0401-09

OSID:



Dynamic Modeling and Vibration Simulation of Spatial Flexible Closed-chain Robot

ZHANG Qingyun¹ ZHAO Xinhua^{1,2} LIU Liang² DAI Tengda²

(1. School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The elastic deformation of the flexible link in the spatial closed-chain robot under high-speed operation has an important impact on the vibration effect of the system. In order to accurately analyze the influence of the flexible link on the vibration characteristics of the spatial flexible closed-chain parallel robot, the finite element method was used to discretize the flexible link, and then the component displacement vector was described by the floating frame reference method. Finally, the spatial rigid-flexible coupling closed-chain robot was established based on the Lagrange equations dynamic model and vibration equation, and the system natural frequency and vibration mode function were analyzed. Based on the same parameter conditions, the ADAMS/Vibration module was used to establish the vibration simulation model of the spatial rigid-flexible coupling closed-chain robot, and the self-excited vibration analysis was carried out to study the change of the system natural frequency and the corresponding modal, as well as the different excitations frequency response characteristics under force. The results showed that themotion trajectories of the end-effector of the theoretical and the simulation model were basically the same, and they were also consistent with the natural frequencies of the vibration simulation model, which verified the correctness of the simulation model. As the amplitude of the excitation force increased, the system response was increased. Corresponding to the same excitation frequency, the Y -direction response

收稿日期: 2020-04-21 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1303502)、天津市重点研发计划科技支撑重点项目(20YFZCGX01050)、天津市教委科研计划项目(2017KJ259)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(17JCYBJC18300、18JCYBJC87900)和天津理工大学教学基金项目(ZD20)

作者简介: 张青云(1987—),女,博士生,主要从事机器人动力学与控制研究,E-mail: zqy_pretty@163.com

通信作者: 刘凉(1978—),男,讲师,博士,主要从事机器人及智能控制与检测技术研究,E-mail: liuliang_tjut@tjut.edu.cn

at the center of mass of the moving platform was the strongest, followed by the X -direction, and the Z -direction was the smallest. Among them, the system corresponding to the 11th to 12th modes had the largest deformation, and the corresponding excitation frequency was 40 ~ 60 Hz.

Key words: spatial flexible closed-chain robot; rigid-flexible coupling; vibration analysis; frequency response; dynamics

0 引言

并联机构因承载力强、结构刚度大、累计误差小等特点^[1-4]而广泛应用于机器人、航天、工业制造等领域。为了减少系统能耗、提高效率,闭链机器人一般由细长连杆构成,导致系统构件在运行过程中柔度增加、固有频率降低、弹性振动变大,从而影响了系统稳定性及轨迹运行精度。目前,对并联机构的振动分析主要集中在残余振动方面,很少涉及系统自激振动。文献[5]对物料装填机器人末端的残余振动进行了分析和抑制。文献[6]采用应变率反馈控制方法抑制了3-RRR平面柔性并联机器人残余振动。文献[7]建立了刚柔热耦合的旋转中心刚体-功能梯度材料梁的动力学模型。文献[8]通过S形曲线对机器人残余振动进行研究。文献[9]对Delta并联机器人残余振动进行控制分析。文献[10]对伸缩臂进行了抖动抑制研究。文献[11]采用主动控制方法对平面3-RRR柔性并联机器人的自激振动进行有效抑制。文献[12]采用非线性PD和模糊控制算法对3-RRR平面柔性并联机器人自激振动进行了分析。文献[13]对平面3自由度并联机器人的自激振动进行了控制研究。上述研究主要针对柔性臂和平面柔性机构的自激振动进行分析,鲜有涉及空间柔性闭链机构的自激振动。文献[14]建立了3-RRS柔性空间并联机器人的动力学模型,并对系统固有频率进行分析,但运动支链中不存在空间柔性构件。文献[15]对含柔性连杆的并联机器人动力学方程进行数值分析。文献[16]建立了含多个柔性连杆和柔性铰的空间全柔性机器人动力学模型,但并未对空间柔性系统的振动特性进行分析。

为了实现低成本、高效的振动特性分析,通过仿真技术对系统振动效应进行研究也逐渐趋于成熟。文献[17]对天平包装件的随机振动进行了振动仿真分析,并对该机构进行优化设计。文献[18]建立了一种5自由度喷涂机器人运动学模型,并对系统振动模型进行了受迫振动分析。文献[19]通过采用ADAMS/Vibration对钢管自动输送机构进行了振动仿真分析。文献[20]通过多体动力学软件对定轴齿轮箱刚柔耦合模型的振动频率特征进行分析。文献[21-23]通过仿真方法验证了并联机器人动力学模型的正确性。文献[24]建立了轮式车

辆传动系的自激扭转振动仿真模型。

本文采用有限单元法对柔性构件进行离散,利用浮动坐标系法构建连杆位移场,最后通过Lagrange方程建立空间刚柔耦合闭链机器人的动力学模型及振动方程,并对系统固有频率和振型函数进行数值求解。在同等参数条件下,利用ADAMS/Vibration模块建立空间刚柔耦合闭链机器人的振动仿真模型,对其进行自激振动分析,研究系统固有频率和对应模态的变化,以及不同激振力作用下的频率响应特征。

1 动力学模型

1.1 物理模型

空间柔性闭链机器人结构简图如图1所示,它由静平台、动平台及3条三角对称的运动支链 $A_iB_iC_iP_i$ ($i=1,2,3$)构成。其中, A_i 、 B_i 、 C_i 为旋转关节连接点, P_i 为虎克铰关节连接点。由于连杆 C_iP_i ($i=1,2,3$)为细长构件,系统高速运行下将产生柔性变形,导致振动增强,从而影响系统稳定性。因此,对系统进行动力学及振动特性分析时,需将其设为柔性构件,而连杆 A_iB_i 、 B_iC_i ($i=1,2,3$)和动平台则设为刚性构件。

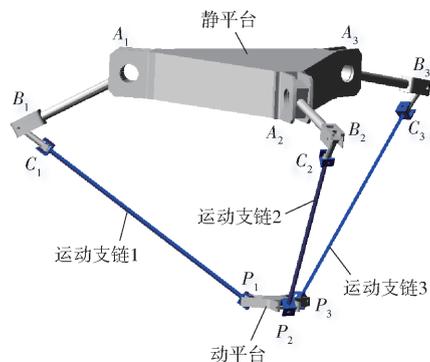


图1 空间柔性闭链机器人机构简图

Fig.1 Schematic of flexible spatial parallel robot

运动支链的坐标系简图如图2所示。其中,全局坐标系 $OXYZ$ 和局部坐标系 $Pxyz$ 设在静平台和动平台的几何中心,其余连杆坐标系则设置在各连杆的上关节处。 φ_i 为支链坐标系 $A_i x_{Ai} y_{Ai} z_{Ai}$ 中 x 轴与全局坐标系 X 轴之间的夹角, θ_{i1} 、 θ_{i2} 和 θ_{i3} 为连杆坐标系下各连杆与转轴之间的夹角,并且连杆 A_iB_i 、 B_iC_i 绕局部坐标轴 y 转动,而连杆 C_iP_i 则绕 z 轴转动,因此,柔性连杆 C_iP_i 为空间构件。

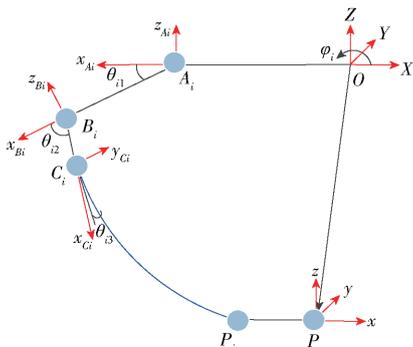


图 2 坐标系简图

Fig. 2 Coordinate schematic

1.2 空间柔性连杆运动学描述

空间柔性连杆坐标系固定在构件端点处,可简化绝对运动描述。基于浮动坐标系,空间柔性连杆上任意点 w 在全局坐标系下位移矢量可表示为

$$\mathbf{r}_w = \mathbf{r}_0 + \mathbf{R}\boldsymbol{\xi} \quad (1)$$

其中

$$\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\xi}_0 + \boldsymbol{\xi}_f$$

$$\boldsymbol{\xi}_f = \mathbf{N}\mathbf{q}_f$$

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_A \quad \mathbf{N}_B \quad \mathbf{N}_C]^T$$

式中 \mathbf{r}_0 ——柔性连杆坐标系原点在局部坐标系下的位移矢量

$\boldsymbol{\xi}_0$ ——未变形矢量 $\boldsymbol{\xi}_f$ ——变形矢量

\mathbf{q}_f ——单元节点位移向量

\mathbf{N} ——插值函数

\mathbf{R} ——柔性连杆坐标系变换到全局坐标系的变化矩阵

\mathbf{N}_A 、 \mathbf{N}_B 、 \mathbf{N}_C 分别采用线性函数和三次多项式函数进行插值计算。

根据上述描述可知

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{i1} \mathbf{R}_{i2} \mathbf{R}_{i3} \quad (2)$$

式中 \mathbf{R}_{i3} ——坐标系 $Pxyz$ 变换到坐标系 $C_i x_{Ci} y_{Ci} z_{Ci}$ 的变换矩阵

\mathbf{R}_{i2} ——坐标系 $C_i x_{Ci} y_{Ci} z_{Ci}$ 变换到坐标系 $B_i x_{Bi} y_{Bi} z_{Bi}$ 的变换矩阵

\mathbf{R}_{i1} ——坐标系 $B_i x_{Bi} y_{Bi} z_{Bi}$ 变换到坐标系 $A_i x_{Ai} y_{Ai} z_{Ai}$ 的变换矩阵

对式(1)求导,可得任意点在全局坐标系下的速度矢量为

$$\dot{\mathbf{r}}_w = \dot{\mathbf{r}}_0 + \dot{\mathbf{R}}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{R}\mathbf{N}\dot{\boldsymbol{\xi}}_f = \mathbf{h}\dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{h} = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \dot{\mathbf{R}}\boldsymbol{\xi} \quad \mathbf{R}\mathbf{N}]$ $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{r}}_0^T \quad \dot{\theta}_{in} \quad \dot{\boldsymbol{\xi}}_f^T]^T$

式中 \mathbf{I} ——单位矩阵

n ——运动支链 i 中刚性构件数

同理,全局坐标系下柔性连杆的绝对转角为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{i3} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i3} + \frac{\partial \mathbf{N}_C}{\partial x} \end{bmatrix} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{H} = [\mathbf{O}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I} \quad \dot{\mathbf{N}}_C(x)]$

式中 \mathbf{O} ——零矩阵

1.3 空间柔性构件动能

空间柔性构件动能包括平动动能和转动动能,则空间柔性构件的平动动能 T_{f-T} 可表示为

$$T_{f-T} = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{r}}_w^T \dot{\mathbf{r}}_w dV = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}_{f-T} \dot{\mathbf{q}} \quad (5)$$

而空间柔性连杆的转动动能 T_{f-R} 为

$$T_{f-R} = \frac{1}{2} \int_0^{L_3} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i3}^2 dJ_c = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}_{f-R} \dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

式中 L_3 ——柔性连杆长度

ρ ——柔性构件密度

J_c ——构件绕质心的转动惯量

\mathbf{M}_{f-T} 、 \mathbf{M}_{f-R} ——对应平动动能和转动动能的质量矩阵

空间柔性连杆总动能为

$$T_f = T_{f-T} + T_{f-R} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}_f \dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

式中 \mathbf{M}_f ——空间柔性构件对应的质量矩阵

1.4 空间柔性构件势能

空间柔性构件势能由弹性势能和重力势能构成。其中,空间柔性连杆的弹性势能对应的刚度矩阵可通过虚功原理推导得

$$\delta W = - \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (8)$$

其中

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\boldsymbol{\xi}_f$$

式中 \mathbf{E} ——弹性模量矩阵

$\boldsymbol{\varepsilon}$ ——应变位移关系

\mathbf{D} ——应变-位移的偏微分算子

则空间柔性构件刚度矩阵为

$$\mathbf{k}_f = \int_V (\mathbf{D}\mathbf{N})^T \mathbf{E} \mathbf{D}\mathbf{N} dV \quad (9)$$

空间柔性连杆对应的弹性广义力为

$$\mathbf{F}_f = \mathbf{K}_f \mathbf{q} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{K}_f = \text{diag}(\mathbf{O}_{3 \times 3} \quad \cdots \quad \mathbf{O}_n \quad \mathbf{k}_f)$

式中 \mathbf{O}_n —— n 个刚体广义坐标对应的刚度矩阵项

\mathbf{q} ——系统广义坐标

空间柔性构件重力广义力为

$$\mathbf{G}_f = \frac{\partial (m_3 g r_{w-z})}{\partial \mathbf{q}} \quad (11)$$

式中 m_3 ——柔性连杆质量

r_{w-z} ——柔性连杆质心在全局坐标系下 Z 轴方向坐标值

1.5 空间柔性构件动力学方程

将式(7)~(11)代入 Lagrange 方程,则空间柔性连杆的动力学方程可表示为

$$M_f \ddot{q} + K_f q = Q_f - G_f \quad (12)$$

其中

$$Q_f = Q_{fF} - Q_{fv}$$

$$Q_{fv} = -\dot{M}_f \dot{q} + \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T M_f \dot{q} \right)$$

式中 Q_{fv} ——速度二次项

Q_{fF} ——单元所受广义外力

由于变形矢量 ξ_f 是在局部坐标系下进行描述, 将其变换到全局坐标系下表示为

$$\xi_f = B u_f \quad (13)$$

式中 u_f ——全局坐标系下的柔性广义坐标

B ——全局坐标系 $A_i x_{Ai} y_{Ai} z_{Ai}$ 变换到局部坐标系 $C_i x_{Ci} y_{Ci} z_{Ci}$ 的变换矩阵

将式(13)代入式(12), 则空间柔性连杆在全局坐标系下表示的动力学方程为

$$\bar{M}_f \ddot{\bar{q}} + \bar{K}_f \bar{q} = \bar{Q}_f - \bar{G}_f \quad (14)$$

其中 $\bar{q} = [\dot{r}_0^T \quad \theta_{in} \quad u_f^T]^T$

式中 \bar{M}_f ——柔性构件在全局坐标系下质量矩阵

\bar{K}_f ——柔性构件在全局坐标系下刚度矩阵

\bar{Q}_f ——柔性构件在全局坐标系下广义外力

\bar{G}_f ——柔性构件在全局坐标系下广义重力

1.6 运动支链动力学方程

运动支链由空间柔性构件及刚性连杆 $A_i B_i$ 、 $B_i C_i$ 组成, 其中, 刚性连杆 $A_i B_i$ 、 $B_i C_i$ 动能和势能分别为

$$\begin{cases} T_{A_i B_i} = \frac{1}{2} m_1 v_{i1}^2 \\ T_{B_i C_i} = \frac{1}{2} m_2 v_{i2}^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_{i2}^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} V_{A_i B_i} = -\frac{1}{2} m_1 g L_1 \sin \theta_{i1} \\ V_{B_i C_i} = -m_2 g L_1 \sin \theta_{i1} - \frac{1}{2} m_2 g L_2 \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \end{cases} \quad (16)$$

式中 m_1 、 m_2 ——连杆 $A_i B_i$ 和 $B_i C_i$ 质量

L_1 、 L_2 ——连杆 $A_i B_i$ 和 $B_i C_i$ 长度

v_{i1} 、 v_{i2} ——连杆 $A_i B_i$ 和 $B_i C_i$ 绝对速度

J_2 ——连杆 $B_i C_i$ 转动惯量

ω_{i2} ——连杆 $B_i C_i$ 转动惯量绝对角速度

1.7 约束关系

空间柔性构件产生的弹性变形将导致刚性动平台产生微小位移, 则动平台几何中心 $P = [P_x \quad P_y \quad P_z \quad P_{x\theta} \quad P_{y\theta} \quad P_{z\theta}]$ 的理想轨迹与实际位移 $P' = [P'_x \quad P'_y \quad P'_z \quad P'_{x\theta} \quad P'_{y\theta} \quad P'_{z\theta}]$ 之间的关系可通过协调矩阵 J_p [25] 表示, 即

$$P' = P + J_p \Delta P \quad (17)$$

其中 $\Delta P = [\Delta P_x \quad \Delta P_y \quad \Delta P_z \quad \Delta P_{x\theta} \quad \Delta P_{y\theta} \quad \Delta P_{z\theta}]$

$$J_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & P_z & -P_y \\ 0 & 1 & 0 & -P_z & 0 & P_x \\ 0 & 0 & 1 & P_y & -P_x & 0 \end{bmatrix}$$

式中 ΔP ——动平台微小位移

动平台的动力学方程可写为

$$\begin{cases} T_p = \frac{1}{2} \dot{P}'^T m_p \dot{P}' + \frac{1}{2} J \omega_p^T \\ V_p = m_p g z_p \end{cases} \quad (18)$$

式中 m_p ——动平台质量

J ——动平台转动惯量

ω_p^T ——动平台绝对角速度

z_p ——动平台在全局坐标系 Z 方向位移

1.8 系统动力学方程

由式(14)~(18)可得到空间柔性闭链机器人动力学方程为

$$\bar{M} \ddot{\bar{q}} + \bar{K} \bar{q} = \bar{Q} - \bar{G} \quad (19)$$

式中 \bar{M} ——系统总质量矩阵

\bar{K} ——系统总刚度矩阵

\bar{Q} ——系统总广义外力

\bar{G} ——系统总广义重力

\bar{q} ——系统在全局坐标系下的广义坐标

2 固有频率和振型分析

由式(19)可得空间柔性闭链机器人自由振动方程为

$$M \ddot{\bar{q}} + K \bar{q} = 0 \quad (20)$$

根据模态分析理论 [26] 可得系统固有频率和模态振型表达式为

$$| -\lambda M + K | = 0 \quad (21)$$

当质量矩阵 M 为非奇异矩阵时, 令 $C = M^{-1} K$, 则式(21)可改写为

$$\begin{cases} | -\lambda I + C | = 0 \\ \lambda = \omega_m^2 \\ \omega_m = 2\pi f_m \end{cases} \quad (22)$$

式中 ω_m ——系统固有角频率

f_m ——系统固有频率

空间柔性闭链机器人系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

构件	连杆 $A_i B_i$	连杆 $B_i C_i$	连杆 $C_i P_i$	动平台
质量/kg	2	0.2	1	1
长度/m	0.4	0.1	0.8	0.1
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 801	7 801	2 740	7 801
泊松比	0.29	0.29	0.33	0.29
弹性模量/Pa	2.07×10^{11}	2.07×10^{11}	7.17×10^{10}	2.07×10^{11}

系统动平台几何中心的运动轨迹为

$$\begin{cases} P_x = 0.1 \cos(\omega t) \\ P_y = 0.1 \sin(\omega t) \\ P_z = -0.7 \end{cases} \quad (23)$$

其中, $t = 5 \text{ s}$, 静平台半径 $r = 0.4 \text{ m}$, 角速度 $\omega = 2 \text{ rad/s}$ 。

通过 Matlab 软件编写程序进行仿真可得空间柔性闭链机器人固有频率随时间变化的关系如图 3 所示, 以及动平台在全局坐标系下随时间变化的运动轨迹如图 4 所示。

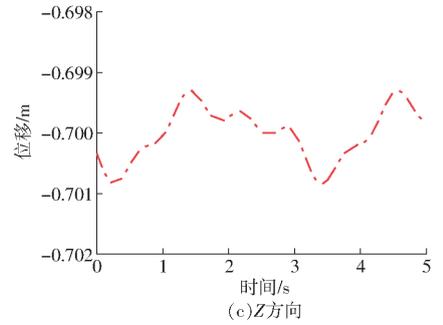
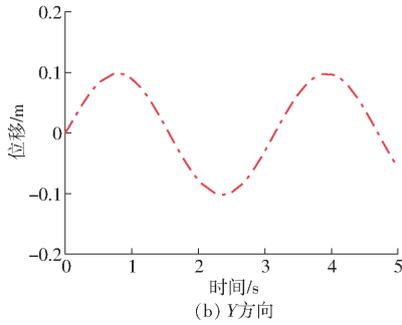
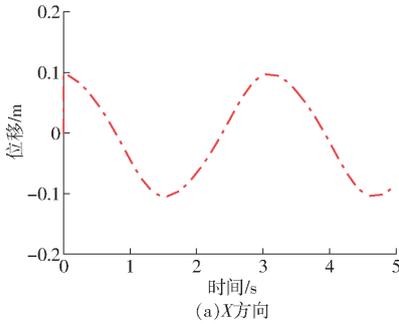


图 4 动平台位移(理论模型)

Fig. 4 Displacement of end-effector (theoretical model)

由图 4 可知, 在空间柔性构件的作用下, 理论模型的动平台在 X 方向和 Y 方向最大浮动值分别为 0.0089 m 和 0.0047 m , 而 Z 方向位移在 $-0.7012 \sim -0.6998 \text{ m}$ 之间波动。

3 振动仿真

基于图 1, 利用 ADAMS 软件建立空间柔性闭链机器人的仿真模型。再通过 ADAMS/Vibration 模块对系统进行约束模态分析。由于系统中的空间柔性杆为均质、圆形截面构件, 结构简单, 故直接通过 Flexible Bodies 模块进行柔化处理, 产生 1 014 个节点, 2 136 个单元。

3.1 自由模态分析

通过振动仿真分析, 空间柔性闭链机器人在自由状态时的前 12 阶固有频率如表 2 所示。

由表 2 可知, ADAMS 模型中的前 6 阶固有频率都为 0, 即系统对应的刚体模态, 它由 3 个移动模态和 3 个转动模态构成。因此, 系统最小固有频率出现在第 7 阶, 对应固有频率为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ Hz}$ 。而理论模型通过式(22)计算后, 对应系统最小固有频率为 $4.02 \times 10^{-5} \text{ Hz}$ 。由于振动仿真系统由多个刚柔构件组成, 并且空间柔性构件的单元数多, 柔度大, 所以仿真模型的最小固有频率小于理论模型, 但两者数值基本一致, 验证了振动仿真模型建立的正确性。因此, 可通过该振动仿真模型对其系统振动特性进行精确仿真分析。

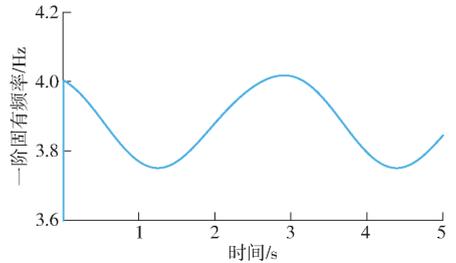


图 3 空间柔性闭链机器人固有频率特性

Fig. 3 Characteristics of natural frequencies of flexible spatial parallel robot

表 2 振动仿真模型前 12 阶固有频率

Tab.2 The first 12 natural frequencies of vibration simulation model

阶数	ADAMS 模型固有频率/Hz	振型方向
1	0	刚体运动模式
2	0	刚体运动模式
3	0	刚体运动模式
4	0	刚体运动模式
5	0	刚体运动模式
6	0	刚体运动模式
7	2.2×10^{-5}	平移振动模式
8	0.002	平移振动模式
9	1.496	扭转振动模式
10	2.484	扭转振动模式
11	12.276	平移振动模式
12	17.799	平移振动模式

3.2 约束模态分析

为了分析空间柔性闭链机器人实际工作状态下的振动特性, 将空间柔性闭链机器人的载荷以质量的形式进行描述(表 1)。由于空间柔性构件的变形受到与之相连的刚性构件的影响, 因此, 将该空间柔性构件边界条件设为两端铰支, 而系统其他构件的约束关系则通过 Connector 模块进行设置, 如表 3 所示。

通过对空间柔性闭链机器人进行约束模态分析可知, 系统 3 ~ 12 阶固有频率如表 4 所示。

由表 4 可知, 空间柔性闭链机器人约束模态下

表3 机构约束关系

Tab.3 Constraint relationship

运动副	构件名称
固定副	静平台、地面
转动副(R副)	连杆1、静平台
转动副(R副)	连杆2、连杆1
转动副(R副)	连杆3、连杆2
虎克铰(U副)	末端执行器、连杆3

表4 约束模态系统频率

Tab.4 System natural frequency in constrained mode

阶数	3	4	5	6	7
频率/Hz	0	0.067	0.002	0.031	0.051
阶数	8	9	10	11	12
频率/Hz	2.861	6.767	7.643	13.633	23.657

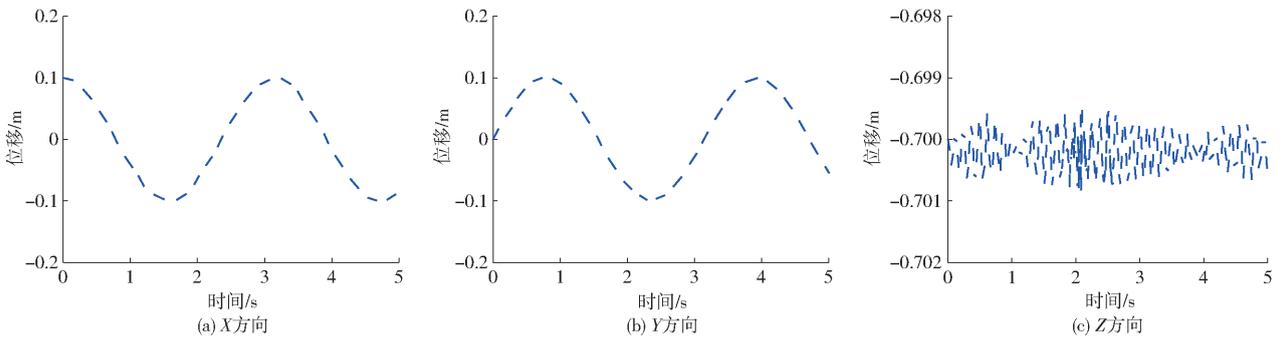


图5 动平台位移

Fig.5 Displacement of end-effector (simulation model)

3.3 自激振动仿真

空间柔性闭链机器人系统高度非线性,系统运行过程中不仅存在空间柔性构件弹性变形引起的振动。同时,空间柔性构件的弹性变形也将引起动平台的微小位移,产生轨迹偏差。此时,为了补偿轨迹偏差,通过系统内部振源进行自身调节而激励的振动则为自激振动。

通过对约束状态下的空间柔性闭链机器人进行自激振动仿真分析可知,系统共有31阶模态,由图6可知模态最大值为25 Hz。

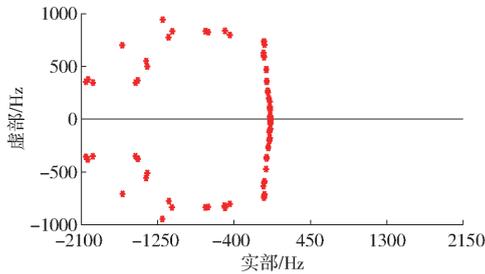


图6 模态分布图

Fig.6 System modes distribution diagram

空间柔性闭链机器人主要频率及振型如图7所示。

系统特征值与固有频率如表5所示。

的固有频率远大于自由模态下的固有频率,说明系统在约束状态下的系统动力学特性更好也更符合实际工况。因此,通过对系统进行约束模态分析具有实用价值。

而在系统约束状态下,对空间柔性闭链机器人进行动力学仿真可得动平台随时间变化的运动规律如图5所示。

由图5可知,系统动平台在X和Y方向的位移为-0.1036~0.1009 m和-0.1025~0.1006 m,Z方向的位移运动范围为-0.7008~-0.6993 m。通过与理论模型动平台运动轨迹对比可知,两类模型在同等参数条件下的运动轨迹基本一致,验证了理论模型和分析模型建立的正确性。

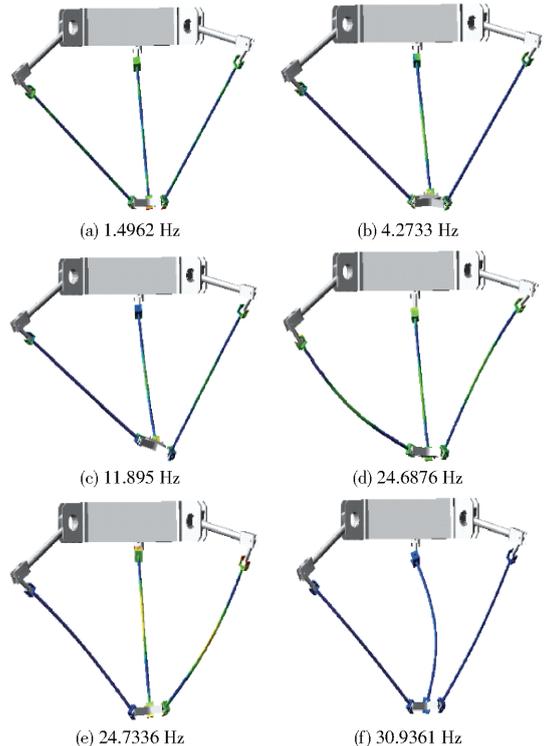


图7 系统主要频率及振型图

Fig.7 System main frequency and mode diagram

为了分析不同激振力对系统振动频率的影响,需要定义系统输入通道和输出通道。其中,输入通

道用于设置激励值及其作用位置,输出通道则是对

表 5 系统特征值与固有频率

Tab.5 System natural frequency and characteristic value

阶数	固有频率/Hz	阻尼比	实部/Hz	虚部/Hz
1	1.496 22	1	1.496 22	0
2	1.496 24	1	-1.496 24	0
3	4.273 32	1	-4.273 32	0
4	4.295 91	1	4.295 91	0
5	11.895	1	-11.895	0
6	11.903 4	1	11.903 4	0
7	2.2×10^{-5}	1.42×10^{-6}	3.14×10^{-11}	$\pm 2.2 \times 10^{-5}$
8	0.001 46	4.99×10^{-7}	7.29×10^{-10}	$\pm 0.001 462$
9	1.496 23	8.51×10^{-6}	1.27×10^{-5}	$\pm 1.496 23$
10	2.484 01	0.001 39	-0.003 4	$\pm 2.484 01$
11	12.276 2	0.001 83	-0.022 54	$\pm 12.276 1$
12	17.799 5	0.005 18	-0.092 2	$\pm 17.799 5$

系统的响应频率进行检测。为了对比不同激励对系统振动特性的影响,设置 3 个不同位置的输入通道,3 个输出通道,位置如表 6 所示。

表 6 输入和输出通道参数

Tab.6 Input and output channel parameters

通道	通道位置	通道方向
输入通道	空间柔性梁质心	x_{Ci}
		y_{Ci}
		z_{Ci}
输出通道	动平台质心	X
		Y
		Z

系统输入通道采用简谐激励 $F(t) = f_0 \sin(\omega t)$, 则对应不同 f_0 的系统幅频响应曲线如图 8 所示。

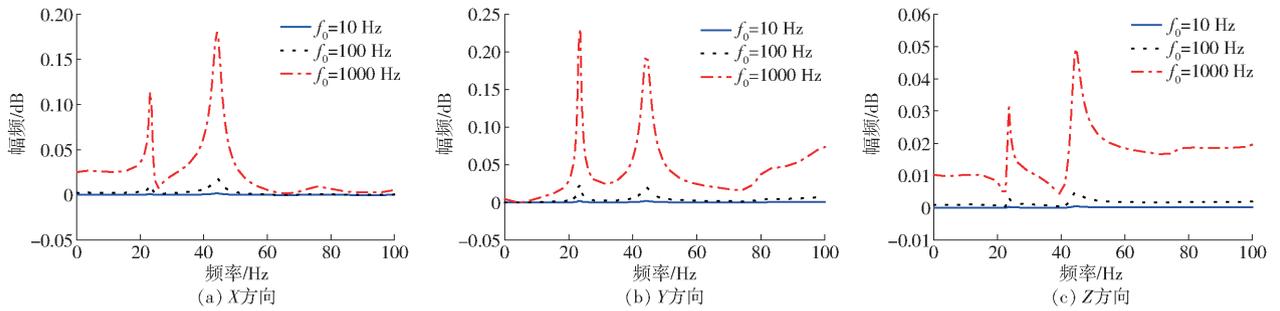


图 8 不同激励作用于 x_{Ci} 方向的幅频响应

Fig.8 Amplitude-frequency response of x_{Ci} direction with different excitations

由图 8 可得,3 个激励中, $f_0 = 1\ 000\ \text{Hz}$ 对应的幅频响应最大, $f_0 = 100\ \text{Hz}$ 次之,而 $f_0 = 10\ \text{Hz}$ 的幅频响应最小。当激励作用于空间柔性构件质心 x_{Ci} 方向时,动平台 Y 方向响应最强,Z 方向次之,而 X 方向最小。当激振力频率在 20 ~ 60 Hz 时,系统幅频响应曲线出现明显跃升和下降,振动效应明显。

当 3 个不同激励作用于空间柔性构件质心 y_{Ci} 方向时,如图 9 所示,随着激振力幅值的增加,动平台质心处 X、Y、Z 方向幅频影响特性也随之增强。其中,最大幅频响应为 $f_0 = 1\ 000\ \text{Hz}$ 时动平台质心处 Y 方向响应,最小幅频响应值为 $f_0 = 10\ \text{Hz}$ 时动平台质心 X 方向响应。

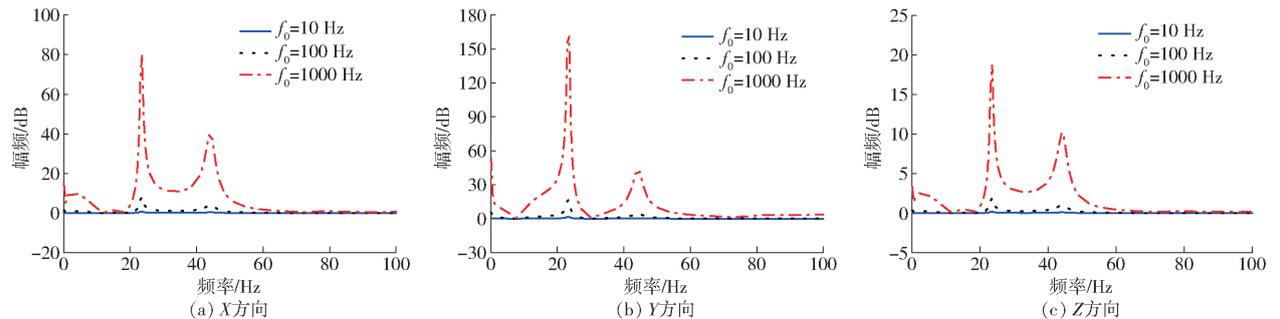


图 9 不同激励作用于 y_{Ci} 方向的幅频响应

Fig.9 Amplitude-frequency response of y_{Ci} direction with different excitations

由图 10 可知,幅频响应最大值出现在图 10b 中,而图 10a 次之,图 10c 最小。并且激振力幅值越大,幅频响应也越强。

因子曲线图如图 11 所示。

由于低频模态对系统的影响较大,故通过 1 ~ 100 Hz 频段的模态坐标图来分析系统自激振动特性。其中,对应同一激励作用的系统各阶模态参与

通过自激振动仿真可知,系统第 11、12 阶模态对应系统最大变形,对应激振频率在 40 ~ 60 Hz 之间,并且随着激振频率的逐步增加,系统幅频响应值开始下降,系统趋于稳定。因此,为了能有效抑制系统柔性变形导致的振动问题,应尽量避免外部激励

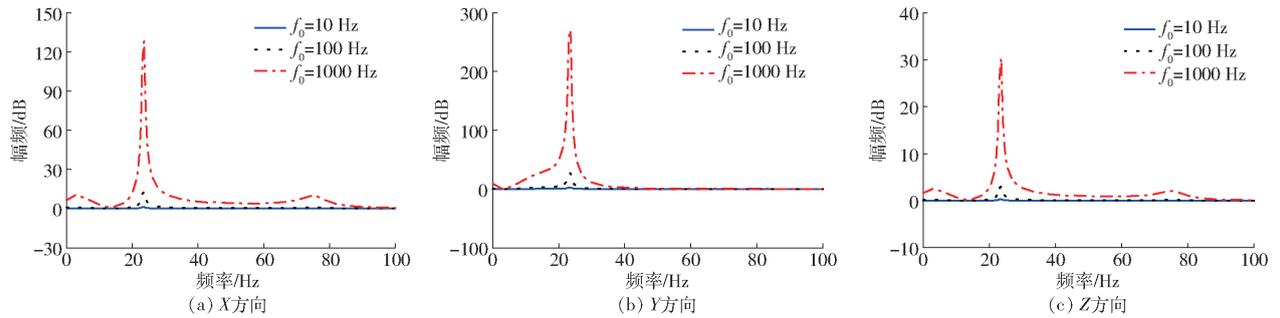
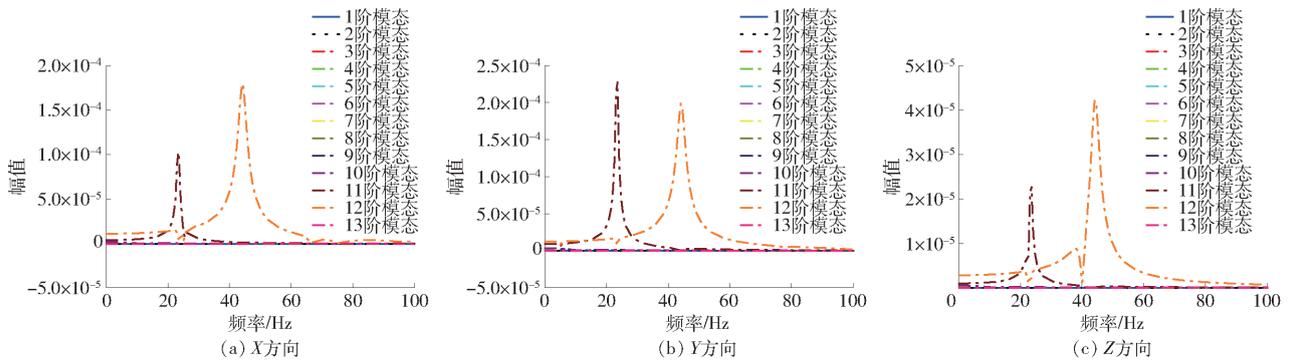
图10 不同激励作用于 z_{ci} 方向的幅频响应Fig. 10 Amplitude-frequency response of z_{ci} direction with different excitations

图11 动平台质心模态参与因子曲线

Fig. 11 Curve diagram of modal participation factor of centroid of moving platform

频率为40~60 Hz。

4 结论

(1)建立了考虑空间柔性构件变形的刚柔耦合闭链机器人动力学模型,分析可知,系统空间柔性构件的弹性变形对系统动平台的轨迹精度和振动效应具有重要影响,符合实际工况,可为空间柔性闭链机器人的控制设计提供理论支持。

(2)振动仿真模型和理论模型的固有频率基本一致,验证了振动仿真模型的正确性。因此,可以利用

仿真模型对空间柔性闭链机器人进行振动特性分析。

(3)通过自激振动分析得到动平台质心在3个坐标轴方向的幅频响应曲线,结果表明:激振力幅值越大,系统幅频响应越强。其中,Y方向响应最大,X方向次之,Z方向最小。

(4)由各阶模态参与因子曲线图可知,系统第11、12阶模态对应的系统变形最大,对应的激振频率为40~60 Hz。因此,为了有效抑制系统柔性变形而导致的振动问题,应使系统外部激励频率远离该频率范围。

参 考 文 献

- [1] CHEN Genliang, YU Weidong, LI Qinchuan, et al. Dynamic modeling and performance analysis of the 3-PRR1 1T2R parallel manipulator without parasitic motion[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 90(1): 339–353.
- [2] 张青云, 赵新华, 刘凉, 等. 空间刚柔耦合并联机器人动力学建模及仿真[J]. *机械设计*, 2020, 37(4): 61–66. ZHANG Qingyun, ZHAO Xinhua, LIU Liang, et al. Dynamic modeling and simulation of the space rigid-flexible coupling parallel robot[J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(4): 61–66. (in Chinese)
- [3] 张泉, 周丽平, 金家楣, 等. 高速柔性并联平台的动力学分析[J]. *振动工程学报*, 2015, 28(1): 27–37. ZHANG Quan, ZHOU Liping, JIN Jiamei, et al. Dynamic analysis of a high-speed flexible parallel manipulator[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2015, 28(1): 27–37. (in Chinese)
- [4] BAYRAM A. Trajectory tracking of a planer parallel manipulator by using computed force control method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(2): 449–458.
- [5] 郑昱, 广晨汉, 杨洋. 一种圆柱物料装填机器人残余振动抑制方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(4): 746–753. ZHENG Yu, GUANG Chenhan, YANG Yang. Research on residual vibration suppression method of a cylindrical object loading robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(4): 746–753. (in Chinese)
- [6] ZHANG Qinhu, LU Qinghua, ZHANG Xianming, et al. Study on residual vibration suppress of a 3-DOF flexible parallel robot mechanism[J]. *Sensors*, 2018, 8(12): 4145.
- [7] 范纪华, 陈立威, 王明强, 等. 旋转中心刚体-FGM梁刚柔热耦合动力学特性研究[J]. *力学学报*, 2019, 51(6): 1905–1917. FAN Jihua, CHEN Liwei, WANG Mingqiang, et al. Research on dynamics of a rigid-flexible-thermal coupling rotating HUB-FGM beam[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1905–1917. (in Chinese)

- [8] REW K H, KIM K S. Using asymmetric S-curve profile for fast and vibration less motion[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: 2011: 1-4.
- [9] 解则晓, 商大伟, 任凭. 基于Lame曲线的Delta并联机器人拾放操作轨迹的优化与试验验证[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 52-59.
XIE Zexiao, SHANG Dawei, REN Ping. Optimization and experimental verification of pick-and-place trajectory for a Delta parallel robot based on Lamé curves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 52-59. (in Chinese)
- [10] 姜海勇, 邢雅周, 李娜, 等. 基于微分平坦与自抗扰控制的伸缩臂抖动抑制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 394-401.
JIANG Haiyong, XING Yazhou, LI Na, et al. Research of vibration suppression of telescopic arm based on differential flatness and active disturbance rejection control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 394-401. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200346&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.046. (in Chinese)
- [11] 余龙焕, 邱志成, 张宪民. 基于加速度反馈的平面3-RRR柔性并联机器人自激振动控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 40-50.
YU Longhuan, QIU Zhicheng, ZHANG Xianmin. Self-excited vibration control of the planar 3-RRR flexible parallel manipulator based on acceleration feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 40-50. (in Chinese)
- [12] QIU Z C, YANG J, ZHANG X M. Self-excited vibration control of the flexible planar 3-RRR robot[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(2): 351-361.
- [13] 杨杰, 邱志成, 张宪民. 3-RRR柔性平面并联机器人自激振动控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 138-143.
YANG Jie, QIU Zhicheng, ZHANG Xianmin. Self-excited vibration control of a planar 3-RRR flexible parallel robot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21): 138-143. (in Chinese)
- [14] 刘善增, 余跃庆, 苏丽颖, 等. 3-RRR柔性并联机器人的动力学建模与频率特性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1219-1223.
LIU Shanzeng, YU Yueqing, SU Liying, et al. Dynamic modeling and frequency analysis of a 3-RRR flexible parallel manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(10): 1219-1223. (in Chinese)
- [15] 刘凉, 赵新华, 周海波, 等. 空间刚柔耦合并联机器人动力学求解策略[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 376-384.
LIU Liang, ZHAO Xinhua, ZHOU Haibo, et al. Dynamic solution for spatial rigid-flexible parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 376-384. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180249&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.049. (in Chinese)
- [16] ZHANG Dingguo, ZHOU Shengfeng. Dynamics of flexible-link and flexible-joint robots[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 26(5): 695-704.
- [17] 米男男, 李光. 分析天平包装件随机振动仿真分析及优化设计[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 206-212.
MI Nannan, LI Guang. Random vibration simulation analysis and an optimization design of analytical balance packages[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(4): 206-212. (in Chinese)
- [18] 余祥, 皱光明, 徐历洪, 等. 一种五自由度喷涂机器人运动学与振动分析[J]. 机械设计与制造, 2019, 9(9): 253-257.
YU Xiang, ZOU Guangming, XU Lihong, et al. Analysis of kinematic and vibration of a five-axis painting robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 9(9): 253-257. (in Chinese)
- [19] 郑帅, 柴晓艳, 刘锡军, 等. 基于ADAMS/Vibration的钢管自动输送机构的振动分析[J]. 重型机械, 2016(1): 65-69.
ZHENG Shuai, CHAI Xiaoyan, LIU Xijun, et al. Vibration analysis of steel pipe automatic conveying mechanism based on ADAMS/Vibration[J]. Heavy Machinery, 2016(1): 65-69. (in Chinese)
- [20] 姚文, 丁康. 定轴齿轮箱故障振动特性仿真及实验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(7): 114-121.
YAO Wen, DING Kang. Simulation and experimental study on fault vibration characteristics of fix-axis gear box[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(7): 114-121. (in Chinese)
- [21] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 412-420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171251&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.051. (in Chinese)
- [22] 朱伟, 郭倩, 马致远, 等. SCARA并联机构刚度和动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 375-385.
ZHU Wei, GUO Qian, MA Zhiyuan, et al. Stiffness and dynamics analysis of SCARA parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 375-385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191044&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.044. (in Chinese)
- [23] 李永泉, 刘天旭, 王立捷, 等. Stewart平台多能域系统动力学全解建模与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 404-411.
LI Yongquan, LIU Tianxu, WANG Lijie, et al. Multi-energy domain dynamic full solution model and experiment of Stewart platform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 404-411. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180448&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.048. (in Chinese)
- [24] 葛剑敏, 王佐民, 郑联珠. 轮式车辆传动系自激扭转振动仿真计算研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 1-4.
GE Jianmin, WANG Zuomin, ZHENG Lianzhu. Simulation of self-excited vibration on vehicle power train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3): 1-4. (in Chinese)
- [25] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [26] 鲍文博, 白泉, 陆海燕. 振动动力学基础与MATLAB应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 157-170.