

基于球面并联机器人空间定位技术的动力学控制研究

张林^{1,2},郭旭侠¹,师朝阳¹,史革盟¹

(1. 宝鸡文理学院 机械工程学院,陕西 宝鸡 721013;

2. 包神铁路集团机务分公司,陕西 神木 719316)

摘要: 鉴于球面3自由度并联机器人上角锥具有3个纯转动自由度,其运动本质等效于3自由度转动陀螺。将该机器人构型用于刚体空间定位的执行机构,推导得到主动关节驱动力矩表达式,选取机器人3个欧拉角为广义坐标,采用拉格朗日法建立机器人运动微分方程。通过实例将球面3自由度并联机器人用作跟踪空间目标定位平台的执行机构,应用MATLAB软件对机器人进行仿真分析,得到影响机器人主动关节驱动力矩的主要因素,为机器人动力学性能分析和控制系统设计提供基础。

关键词: 球面并联机器人;驱动力矩;运动微分方程;空间定位

中图分类号:TH112;TP242 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2021)03-0153-04

Research on Dynamic Control Based on Space Positioning Technology of Spherical Parallel Robot

ZHANG Lin^{1,2}, GUO Xuxia¹, SHI Zhaoyang¹, SHI Gemeng¹

(1. Mechanical Engineering Institute, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China;

2. Baoshen Railway Group Locomotive Branch Company, Shenmu 719316, China)

Abstract: The pyramid on a spherical 3-DOF parallel robot has 3 pure rotational degrees of freedom, and its motion essence is equivalent to that of the 3-DOF rotating gyroscope. The robot configuration was used as the actuator of the rigid body spatial positioning, and the driving moment expression of the active joint was derived. Three Euler angles of the robot and the human were selected as the generalized coordinates, and the differential equation of the robot motion was established by Lagrange method. In the experiment, with the spherical 3-DOF parallel robot as the actuator of tracking space target positioning platform, the simulation analysis of the robot was carried out by MATLAB software. The main factors affecting the driving torque of the active joint of the robot were obtained. The results provide the basis for the dynamic performance analysis and control system design of the robot.

Keywords: spherical parallel robot; driving moment; dynamic differential equation; spatial location

0 引言

随着航天技术的发展,传统的陀螺仪定位导航装置越来越难以满足复杂环境下的定位跟踪要求,人们开始考虑将高灵活性的并联机器人技术应用其中,但其复杂的机构学特征使得机器人动力学层面的问题变得异常复杂,学者们对此提出了多种不同的方法来分析不同构型下机器人的动力学问题。鲁开讲等^[1]利用Kane法得到平面3自由度并联机构动力学方程。李永泉等^[2]结合拉格朗日方程和键合图法建立了2-DOF冗余驱动并联机器人动力学模型。柳贺等^[3]通过计算机器人力矩输出的前馈值,使得机器人转矩输出实现稳态调整。王中双等^[4]利用向量键合图法对空间并联机器人进行了动力学分析。刘凉等^[5]利用自然坐标法和绝对节点坐标法构建了3-RRRU并联机器人的正、逆动力学模型。MAZARE M^[6]利用拉格朗日法

推导了3自由度并联机器人的动力学模型。STAICU S^[7]基于虚功原理和拉格朗日乘子法建立了6-6 Stewart机构的逆动力学方程。ENFERADI J等^[8]基于虚功原理和螺旋理论,得到了3-RRCP的动力学方程。ZHANG B等^[9]利用虚功原理,建立了3-PRR并联机构的动力学模型。SHARIFZADEH M等^[10]采用输入输出黑盒辨识技术提出了一种多项式回归的逆动力学模型。本文将球面3自由度并联机器人用于3自由度陀螺平台定位的执行机构,采用拉格朗日法建立机器人运动微分方程,导出主动关节驱动力矩的表达式,得到影响机器人主动关节驱动力矩的主要因素,为机器人动力学性能分析和控制系统设计打下基础。

1 机器人速度分析

空间球面3自由度并联机器人上、下角锥均为正三棱锥。如图1所示,它们之间通过3条相同的3转动副运动链连接,机器人全部转动副的轴线汇交于一点O,上角锥

基金项目: 国家自然科学基金项目(11302003);陕西省科学技术厅项目(2020JM-623);宝鸡市科技计划项目(2018JH-28);宝鸡文理学院项目(ZK16042);研究生创新科研项目(YJSCX19YB52)

第一作者简介: 张林(1993—),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为并联机器人机构学理论。

可实现绕 O 的定点转动。取参考坐标系 $O-i_1 i_2 i_3$, 基矢量 i_3 垂直于下角锥底面 $B_1 B_2 B_3$, 基矢量 i_1 的方向由 $b_1 \times i_3$ 确定。在上角锥固连坐标系 $O-e_1 e_2 e_3$, 基矢量 e_3 垂直于上角锥底面 $V_1 V_2 V_3$, 基矢量 e_1 的方向由 $v_1 \times e_3$ 确定。

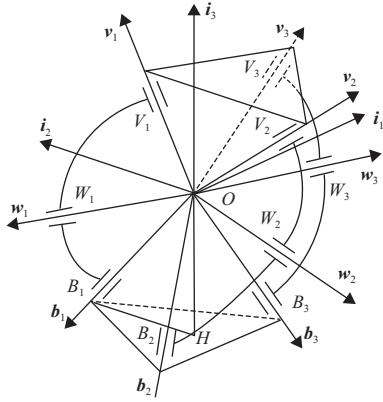


图1 球面3自由度并联机器人

机器人上、下角锥之间的旋转变换采用3个欧拉角描述,并取为系统广义坐标,上角锥在参考坐标系的角速度为

$$\omega_H = \dot{\psi} i_3 + \dot{\varphi} p + \dot{\delta} e_3 = G_T \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\psi & \sin\psi \sin\varphi \\ 0 & \sin\psi & -\cos\psi \sin\varphi \\ 1 & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_3, p, e_3 为欧拉变换瞬时旋转轴方向的单位矢量; ψ, φ, δ 为欧拉角, 即系统广义坐标。

利用影响系数法^[11]建立各分支关节运动角速度对上角锥转动角速度的影响关系:

$$\omega_H = [b, w, v]^{(r)} [\dot{\phi}_1^{(r)} \quad \dot{\phi}_2^{(r)} \quad \dot{\phi}_3^{(r)}]^T = G_\phi^{H(r)} \dot{\phi}^{(r)} \quad (2)$$

式中: r 为机器人分支序号, $r=1, 2, 3$; b, w, v 为依次为下角锥到上角锥转动副轴线的单位矢量; $\dot{\phi}^{(r)}$ 为关节相对角速度向量; $\dot{\phi}_j^{(r)}$ 为关节相对角速度; $G_\phi^{H(r)}$ 为分支 r 的一阶影响系数矩阵。

当 $G_\phi^{H(r)}$ 非奇异时, 求出分支上各关节运动的速度

$$\dot{\phi}^{(r)} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1^{(r)} \\ \dot{\phi}_2^{(r)} \\ \dot{\phi}_3^{(r)} \end{bmatrix} = G_\phi^{H-1(r)} G_T \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = G_H^{\phi(r)} G_T \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

机器人的分支中, 第一个转动副是主动关节, 从上式中将3个主动关节的方程分别取出并合写成矩阵形式

$$T_{ar} = \frac{1}{2} I_{ar} \omega_2^{(r)} = \frac{1}{4} \rho \left(\alpha_2 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_2 \right) \left(\dot{\phi}_1^{(r)} \cos \alpha_1 + \dot{\phi}_2^{(r)} \right)^2 + \frac{1}{4} \rho \left(\alpha_2 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_2 \right) \frac{\det^2(w_r, v_r, b_r)}{\sin^2 \alpha_2} \dot{\phi}_1^{(r)2} + \frac{(\dot{\phi}_1^{(r)} v_r \cdot b_r + \dot{\phi}_2^{(r)} \cos \alpha_2 - \dot{\phi}_1^{(r)} \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 - \dot{\phi}_2^{(r)} \cos \alpha_2)^2 \rho \alpha_2}{2 \sin^2 \alpha_2} \\ \rho (1 - \cos 2\alpha_2) \dot{\phi}_1^{(r)} \det(w_r, v_r, b_r) (\dot{\phi}_1^{(r)} v_r \cdot b_r + \dot{\phi}_2^{(r)} \cos \alpha_2 - \dot{\phi}_1^{(r)} \cos \alpha_2 \cos \alpha_1 - \dot{\phi}_2^{(r)} \cos \alpha_2) \\ 4 \sin^2 \alpha_2 \quad (8)$$

$$\dot{q} = [\dot{\phi}_1^{(1)} \quad \dot{\phi}_1^{(2)} \quad \dot{\phi}_1^{(3)}]^T = \begin{Bmatrix} G_{H1,:}^{\phi(1)} \\ G_{H1,:}^{\phi(2)} \\ G_{H1,:}^{\phi(3)} \end{Bmatrix} \omega_H = G_H^q \omega_H \quad (4)$$

式中: $G_{H1,:}^{\phi(1)}$ 的下标“1,:”表示矩阵第1行构成的行向量; \dot{q} 为主动关节速度; G_H^q 为机器人输入输出速度传递矩阵, 即雅克比矩阵。

2 系统动能的计算

2.1 主动连杆动能计算

机器人主动杆一端与下角锥以转动关节相连, 所以主动杆的运动是绕 b_r 定轴转动, 绝对角速度矢量

$$\omega_1^{(r)} = \dot{\phi}_1^{(r)} b_r \quad (5)$$

主动杆动能

$$T_{br} = \frac{1}{2} I_{br} \omega_1^{(r)2} = \frac{1}{4} \rho \left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right) \dot{\phi}_1^{(r)2} b_r^2 \quad (6)$$

式中 I_{br} 为主动连杆绕瞬时角速度矢量轴的转动惯量; α_1 为 $\arccos(b_r, W_r)$ 对应的圆心角; ρ 为主动杆线密度, 单位为 kg/m 。

2.2 从动杆动能计算

在连杆上建立局部坐标系 $O-x'y'z'$, 如图2所示。

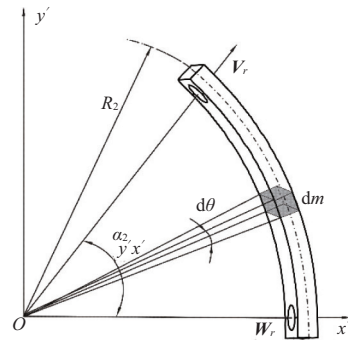


图2 机器人从动杆

x' 轴的方向与关节轴线 w_r 的方向一致, y' 轴取在从动连杆所在平面, z' 轴的方向垂直于连杆所在的平面。从动连杆随主动杆转动, 同时又绕 w_r 轴转动, 其绝对角速度矢量

$$\omega_2^{(r)} = \dot{\phi}_1^{(r)} b_r + \dot{\phi}_2^{(r)} w_r \quad (7)$$

从动杆的运动可看作是绕瞬时角速度矢量轴的瞬时转动, 其动能

式中: I_w 为从动连杆绕瞬时角速度矢量轴的转动惯量; α_2 为 $\text{arc}(W_r, V_r)$ 对应的圆心角; ρ 为从动杆线密度。

2.3 上角锥动能计算

在机器人上角锥建立直角坐标系,坐标轴方向与动坐

$$T_s = \frac{1}{2} I_s \omega_H^2 = \frac{3\sqrt{3}\rho_2 \tan^2 \gamma (\tan^2 \gamma + 8) \cos^5 \gamma}{320} [(\cos \delta \dot{\varphi} + \sin \varphi \sin \delta \dot{\psi})^2 + (-\sin \delta \dot{\varphi} + \sin \varphi \cos \delta \dot{\psi})^2] + \frac{3\sqrt{3}\rho_2 \cos \gamma \sin^4 \gamma (\dot{\delta} + \cos \varphi \dot{\psi})^2}{160} \quad (9)$$

式中: I_s 为上角锥绕瞬时角速度矢量轴的转动惯量; ρ_2 为下角锥的体积密度。

由上述计算可知系统动能具有如下形式,它是广义坐标、广义速度及时间的函数。

$$T = \sum_{r=1}^3 (T_{ar} + T_{br}) + T_s \triangleq T(\psi, \varphi, \delta, \dot{\psi}, \dot{\varphi}, \dot{\delta}, t) \triangleq T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \quad (10)$$

3 系统运动微分方程

将式(10)代入拉格朗日第二类动力学方程,可得机器人运动微分方程

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i} \right] - \frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i} = Q_i \quad i=1, 2, 3 \quad (11)$$

式中: x_i, \dot{x}_i 分别为第 i 个广义坐标和广义速度; $\mathbf{x} = [\psi, \varphi, \delta]$; Q_i 为对应于第 i 个广义坐标的广义力。

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i} \right] = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi} & \dot{\varphi} & \dot{\delta} \end{bmatrix} \mathbf{H}^{(i)} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i} \right],$$

$$\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_j} \right] \frac{dx_j}{dt} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i} \right] = \begin{bmatrix} \dot{\psi} & \dot{\varphi} & \dot{\delta} \end{bmatrix} \mathbf{H}'^{(i)} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}.$$

式中: \mathbf{M} 为系统惯性矩阵, $\mathbf{M} \in R^{3 \times 3}$; $\mathbf{H} \in R^{3 \times 3 \times 3}$; $\mathbf{H}' \in R^{3 \times 3 \times 3}$, 其维数分别对应于 $k, j, i, i, j, k = 1, 2, 3$; $M_{ij} = \frac{\partial^2 T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i \partial \dot{x}_j}$; $\mathbf{H}_{ij}^{(i)}$

$$(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i \partial \dot{x}_j \partial \dot{x}_k}; \mathbf{H}'_{ij}^{(i)}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 T(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)}{\partial \dot{x}_i \partial \dot{x}_j \partial \dot{x}_k}.$$

由于机器人的运动只能实现上角锥绕下角锥的定点转动,所以在转动过程中系统只传递转矩。根据虚位移原理,主动关节驱动力矩做的元功。

$$\delta W = \boldsymbol{\tau}^T \delta \boldsymbol{\phi}_1^{(r)} - \mathbf{F}(\mathbf{x})^T \delta \mathbf{x} = \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{G}_H^q \delta \mathbf{x} - \mathbf{F}(\mathbf{x})^T \delta \mathbf{x} \triangleq \mathbf{Q}^T \delta \mathbf{x} \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为主动关节驱动力矩, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$; $\delta \boldsymbol{\phi}_1^{(r)}$ 为

标系 $O-e_1 e_2 e_3$ 一致。上角锥速度以欧拉角的形式给出,将其投影在动坐标系中:

$$\boldsymbol{\omega}_H^{(e)} = [\cos \delta \dot{\varphi} + \sin \varphi \sin \delta \dot{\psi}, -\sin \delta \dot{\varphi} + \sin \varphi \cos \delta \dot{\psi}, \dot{\delta} + \cos \varphi \dot{\psi}]^T.$$

上角锥的运动可看作是绕瞬时角速度轴的瞬时转动,其动能

主动关节的虚位移; \mathbf{F} 为系统重力项。

由上式可求得广义力 \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{G}_H^q{}^T \boldsymbol{\tau} - \mathbf{F}(\mathbf{x})^T \quad (13)$$

将以上结果代入式(11),得机器人系统运动微分方程

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^T [\mathbf{H}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) - \mathbf{H}'(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x})] \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{G}_H^q{}^T \boldsymbol{\tau} \quad (14)$$

当 \mathbf{G}_H^q 非奇异时,得到关节驱动力矩

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{G}_H^q{}^T{}^{(-1)} \{ \mathbf{M}(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^T [\mathbf{H}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) - \mathbf{H}'(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x})] \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}(\mathbf{x}) \} \quad (15)$$

4 应用实例

在刚体定位控制问题中,一般采用对应于欧拉角顺序的3自由度陀螺平台进行定位,结合球面3-RRR 并联机器人上平台3维转动的结构特点,将陀螺平台附加在球面机器人上,如图3所示。该执行机构可以在空间目标移动的过程中,控制陀螺平台搜索目标信号,对陀螺的姿态进行稳定补偿,使陀螺平台实时跟踪空间目标。在陀螺平台转动轴上安装传感器 AH500,此传感器是基于三轴磁力计、三轴陀螺仪以及三轴加速度计进行设计的稳定跟踪传感器。三轴磁力计可测量出空间目标的方位角;加速度计可测量单轴的线加速度,经过双目测距原理,得出目标在陀螺仪坐标系的向径,进而可将运动目标的线加速度转化为陀螺仪的角加速度;陀螺仪可测量出空间目标的角速度。通过数据融合,系统可以实时地输出空间目标的进动角、章动角、自转角及其角速度、加速度等数据,输出的进动角 ψ 、章动角 φ 、自转角 δ 可作为球面机器人的3个广义坐标。

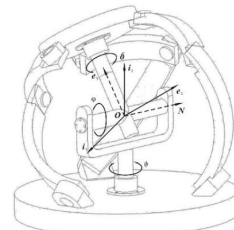


图3 基于球面3自由度并联机器人的空间定位执行机构

选取并联机器人结构参数如下,上、下角锥的锥半角分别为 $\gamma = 30^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$; 连杆 B, W_i 和 W_r, V_r 的圆心角分别为 $\alpha_1 = 90^\circ$ 、 $\alpha_2 = 90^\circ$ 。给定机构上角锥的运动规律 $\psi = 0.56 \sin(1.2t - 59.9)$, $\varphi = -0.4 \cos(0.4t - 20)$, $\delta = -0.36 \sin(0.6t - 30)$, $t = [0, 6.5]$ s。

对于给定的上角锥运动,由式(4)求得主动关节角速度的变化历程,如图4所示,角速度曲线光滑连续表明机器人具有较好的运动传递性。由式(15)可知,主动关节的驱动力由加速度项、速度项和重力项3部分组成。1个运动周期内,主动关节加速度项和速度项引起驱动力矩的变化曲线分别如图5、图6所示。为了清楚加速度项与速度项对驱动力的影响程度,图7给出了上角锥在1个运动周期内主动关节驱动力矩的总体变化曲线。对比图5-图7可看出影响驱动力大小的主要因素是加速度项和速度项,而重力项影响很小。本文按照预订的定位轨迹,计算出主动关节的力矩作为控制量,是一种动力学层面上的开环控制,如果系统存在不确定因素和随机扰动,就必须建立带有反馈环路的闭环控制,以抑制不确定性因素和扰动引起的定位误差。

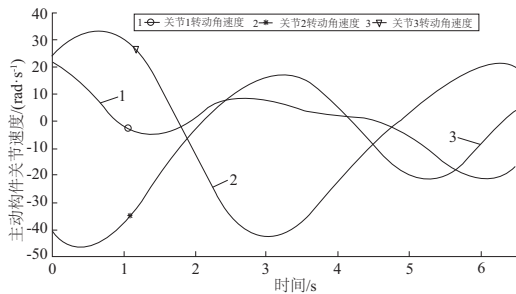


图4 机器人主动关节转动角速度

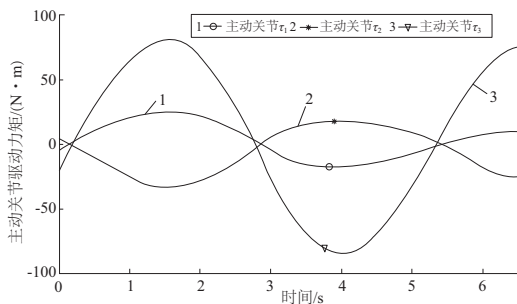


图5 加速度项对驱动力矩的影响

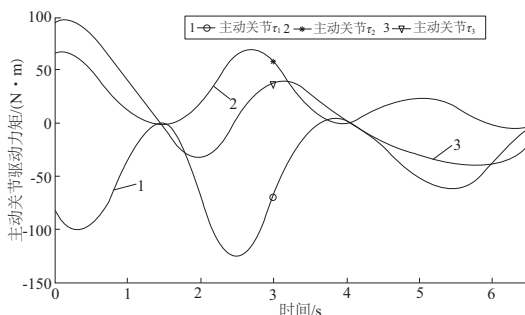


图6 速度项对驱动力矩的影响

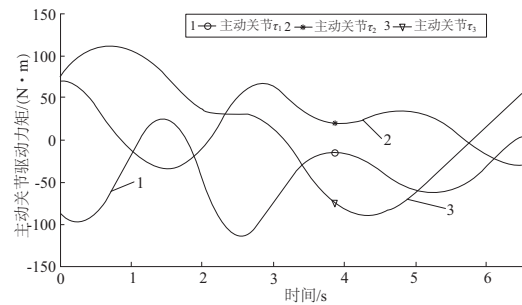


图7 机器人主动关节驱动力矩

式,建立了机器人运动微分方程,避免在约束方程出现较为复杂的众多约束力和约束力偶,并且所得方程易于转化为形式简单的状态方程,便于机器人动力学性能分析和控制系统设计。

2)以球面3自由度并联机器人在目标跟踪问题的应用为例,设计出执行机构姿态角检测方案,以目标对象的姿态角为输入量,得到施加于机器人主动关节的驱动力矩。仿真结果表明,影响驱动力大小的主要因素是加速度项和速度项,而重力项影响很小。

参考文献:

- [1] 鲁开讲,师俊平,张锋涛. 平面三自由度并联机构动力学优化设计[J]. 中国机械工程,2010,21(16):1926-1931.
- [2] 李永泉,王立捷,刘天旭,等. 一种并联机器人机电耦合多领域系统动力学参数辨识、控制及试验[J]. 机械工程学报,2018,54(11):141-150.
- [3] 柳贺,平国祥,曾辉. 基于力矩前馈的重载机器人控制研究与实现[J]. 机械设计与制造,2016,45(2):170-172,191.
- [4] 王中双,邹鹤,陶洋洋,等. 3-RR型并联机器人动力学分析向量键合图法[J]. 机械设计与制造,2016(2):106-109.
- [5] 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]. 农业机械学报,2018,49(2):376-384.
- [6] MAZARE M, TAGHIZADEH M, NAJAFI M R. Inverse dynamics of a 3-P [2 (US)] translational parallel robot [J]. Robotica, 2019,37(4):708-728.
- [7] STAIUCU S. Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011,27(1):212-220.
- [8] ENFERADI J, SAFFAR V. A virtual power algorithm for dynamics analysis of a 3-RRcP spherical parallel robot using the screw theory [J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2020,18(3):351-363.
- [9] ZHANG B, WANG L, WU J. Dynamic isotropic performance evaluation of a 3-DOF parallel manipulator [J]. Qinghua Daxue Xuebao/journal of Tsinghua University, 2017, 57(8):803-809.
- [10] SHARIFZADEH M, DOROUDCHI A, MASOULEH M T, et al. Experimental identification of friction and dynamics of an overconstrained 3-DOF decoupled parallel mechanism [C]// 2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM). Tehran, Iran: IEEE, 2016:185-191.
- [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.

5 结语

1)选取机器人3个欧拉角为广义坐标,采用拉格朗日法从机械能的观点出发导出了机器人转动构件动能计算

收稿日期:2020-04-02