

蠕动转向关节动力学建模与分析

颜兵兵, 解明强, 孙红旗

佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江佳木斯 154007

摘要 为确立拱泥机器人蠕动转向关节的运动关系, 提出了可实现直行和转向运动的 3 自由度并联机构动力学模型。基于对 3-UPS 并联机构运动特性的分析, 首先建立了 3-UPS 运动学模型, 得出 3-UPS 并联机构动平台和各支链的速度以及加速度关系式。基于 Lagrange 方程建立 3-UPS 并联机构的动力学模型, 确立了系统的驱动力、驱动力矩以及各个支链主动杆的驱动力。利用 Matlab 软件对其动力学模型进行仿真分析, 得到的驱动力和驱动力矩变化曲线为拱泥机器人控制系统设计提供了技术支撑, 也为少自由度并联机构动力学分析提供参考。

关键词 并联机构; 3-UPS; Lagrange 方程; 运动学/动力学建模; 广义坐标; 系统动能

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.03.06

Dynamics Modeling and Analysis of Wriggle Turning Joint

YAN Bingbing, XIE Mingqiang, SUN Hongqi

College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang Province, China

Abstract The dynamics model of 3-UPS parallel mechanism with three degrees of freedom is created in order to determine the moving relations of the wriggle turning joints for a move-in-mud robot. After reviewed some relative researches on move-in-mud robot, a parallel mechanism with three degrees of freedom is given which can accomplish straight and turning movement. Based on the analysis on the moving characteristics of 3-UPS parallel mechanism, the kinematics model of this mechanism is created firstly, so as to obtain the relational expression of velocity and acceleration of moving platform and each branch chain. Then, based on the Lagrange equation, the dynamics model of 3-UPS parallel mechanism is established to solve the total driving force and torque of the whole system and the drive force of each active lever. By using software of Matlab, the simulation analysis on the dynamics model as mentioned above is carried out to get some changing curves about drive force and torque. These works provide the foundation for the design of control system of move-in-mud robot and give a reference to the dynamics analysis of parallel mechanism with few degrees of freedom.

Keywords parallel mechanism; 3-UPS; Lagrange equation; kinematics/dynamics modeling; generalized coordinate; system kinetic energy

0 引言

基于蠕动原理仿生拱泥机器人是一种新型仿生机器人。它若在泥土环境中前进至少需要具备直行与转向功能。2001 年魏洪兴等^[1]采用楔形套筒实现转向功能, 研制出第一台挖泥机器人实验样机, 并进行了筒内蠕动爬行实验、拱泥头的穿孔实验及整机土中爬行实验, 获得了具有学术价值的实验数据。中国科学院沈阳自动化研究所冯士伦等^[2]研制的水下自动攻泥机分为头部和尾部两部分, 两者通过液压系统连接, 并利用 4 个限位块与液压推进装置进行协调工作, 实现直行和转向运动。武汉理工大学张英等^[3]研制的仿生拱泥机器人

由拱泥头、蠕动躯体和组合缆线接口组成, 在拱泥头和躯体之间装有用于推动拱泥头前移并调节攻泥头方向的液压机构。西北工业大学也进行了仿蚯蚓在土质环境下拱洞机器人的研究工作, 基于蚯蚓的外轮廓及运动机制, 开展对仿蚯蚓拱洞机器人机构及运动方案的研究^[4]。上述研究在拱泥机器人功能与结构设计方面各有不同, 却有从串联机构转变为并联机构的趋势。

并联机器人具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、自重负荷比小、动力性能好、控制容易等优点, 因而扩大了机器人的应用领域, 引起了国内外学术界与工程界的广泛注意^[5-6]。

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2010-12-29

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11541355)

作者简介: 颜兵兵, 副教授, 研究方向为智能机器人技术, 电子信箱: yanbingbing@126.com

由于并联机构的复杂性, 其动力学模型通常是一个多自由度、多变量、高度非线性、多参数耦合的复杂系统, 一般采用 4 种动力学建模方法分析并联机构的特性, 即 Newton-Euler 方法、Lagrange 方法、Lagrange-D'Alembert 方法和微分几何方法^[7-8], 比较常用的是 Newton-Euler 方法和 Lagrange 方法^[9]。应用 Newton-Euler 方法建模时, 模型中冗余信息少, 计算速度快, 容易求解各构件的支反力^[10], 但很难处理好构件间的耦合关系。相对于 Newton-Euler 建模方法, Lagrange 方法概念清晰, 可以轻松解决各构件之间的耦合特性, 并且得到的动力学方程形式简单。

本文针对拱泥机器人蠕动转向关节(具有 3 个自由度的 3-UPS 型并联机构)的进行运动学建模, 基于 Lagrange 方程推导 3-UPS 并联机构的动力学方程, 并利用 Matlab 软件对该动力学模型进行仿真分析。结果对少自由度并联机构的运动学和动力学研究有一定参考价值。

1 3-UPS 并联机构运动学建模

3-UPS 并联机构由 1 个动平台 $S_1S_2S_3$ 、3 条支链主动杆 $U_iP_iS_i(i=1,2,3)$ 、1 条支链从动杆 $U_4P_4O_2$ 和 1 个静平台(基座) $U_1U_2U_3$ 组成^[11], 如图 1 所示。

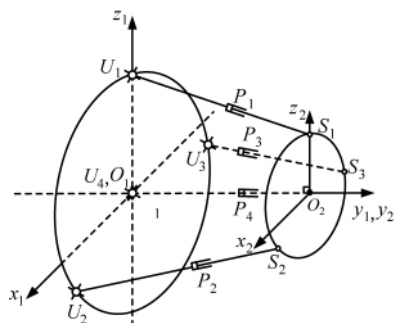


图 1 3-UPS 并联机构结构简图

Fig. 1 Structure diagram of 3-UPS parallel mechanism

在该结构中, 动平台 $S_1S_2S_3$ 与支链主动杆 $U_iP_iS_i(i=1,2,3)$ 通过球铰链相连接, 动平台 $S_1S_2S_3$ 与支链从动杆 $U_4P_4O_2$ 通过焊接相连, 静平台与各支链通过万向节连接。建立系统(固定)坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 和动平台的局部(动)坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 。坐标系的原点 $O_1(U_4)$ 和 O_2 分别位于静、动平台的几何中心, 轴 z_1 、 z_2 分别沿 O_1U_1 和 O_2S_1 方向, 轴 x_1, x_2 垂直于 O_1O_2 方向, 轴 $y_1(y_2)$ 沿 O_1O_2 方向, 并且顶点 $U_i, S_i(i=1,2,3)$ 分别以角度 120° 平均分布于静、动平台上。

由于 3-UPS 并联机构具有 3 个自由度(1 个移动、2 个转动), 因此采用广义坐标 $q_k(k=1,2,3)$ 描述机构的运动。设机构的静、动平台几何中心之间的距离为 l , 静、动平台的几何中心 O_1, O_2 到各个顶点 $U_i, S_i(i=1,2,3)$ 的距离分别为 R, r 。在系统坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下, 静平台上几何中心 $O_1(U_4)$ 和 $U_i(i=1,2,3)$ 的坐标为

$$O_1=(0 \ 0 \ 0)^T \quad U_i=(0 \ 0 \ R)^T$$

$$U_2=\left(\frac{\sqrt{3}}{2}R \ 0 \ -\frac{1}{2}R\right)^T$$

$$U_3=\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R \ 0 \ -\frac{1}{2}R\right)^T$$

在局部(动)坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 下, 动平台上几何中心 O_2 和 $S_i(i=1,2,3)$ 的坐标为

$$O_2=(0 \ 0 \ 0)^T \quad S_i=(0 \ 0 \ r)^T$$

$$S_2=\left(\frac{\sqrt{3}}{2}r \ 0 \ -\frac{1}{2}r\right)^T$$

$$S_3=\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}r \ 0 \ -\frac{1}{2}r\right)^T$$

在任意状态下, 动平台在驱动力的作用下先绕 O_1z_1 轴旋转 β 角, 再绕 O_1x_1 轴旋转 α 角, 最后沿新的 O_1y_1 轴移动距离 d , 整理后得到整个系统的变换矩阵 T_{xyz} ,

$$T_{xyz}=\begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & 0 \\ \cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha & d \\ \sin\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

经变换矩阵 T_{xyz} 转换后, 动平台上 O_2 和 $S_i(i=1,2,3)$ 的坐标变换为 O'_2 和 $S'_i(i=1,2,3)$, 有

$$\begin{bmatrix} O'_2 \\ 1 \end{bmatrix}=T_{xyz}\begin{bmatrix} O_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} S'_i \\ 1 \end{bmatrix}=T_{xyz}\begin{bmatrix} S_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

再计算动平台、各支链质心坐标 $O'_i(i=0,1,2,3,4)$, 质心坐标中含有参数 α, β, d , 均为时间 t 的函数, 因此动平台、各支链的质心位置和速度为

$$O'_i=(x_{c_i} \ y_{c_i} \ z_{c_i})^T \quad V_{c_i}=(\dot{x}_{c_i} \ \dot{y}_{c_i} \ \dot{z}_{c_i})^T \quad (i=0,1,2,3,4)$$

其中, O_{c_0}, V_{c_0} 为动平台质心的位置和速度; $O_{c_1}, O_{c_2}, O_{c_3}, V_{c_1}, V_{c_2}, V_{c_3}$ 分别为 3 个支链主动杆质心的位置和速度; O_{c_4}, V_{c_4} 为支链从动杆质心的速度。

2 3-UPS 并联机构的动力学建模

整个系统的动能 T 由动平台、各个支链动能构成, 即

$$T=\frac{1}{2}m_0V_{c_0}^2+\sum_{i=1}^3\frac{1}{2}m_1V_{c_i}^2+\frac{1}{2}m_4V_{c_4}^2 \quad (1)$$

其中, m_0 为动平台的质量, m_1 为支链主动杆的质量, m_4 为支链从动杆的质量。

式(1)对 q_k 求导, 简化成矩阵形式为

$$\frac{\partial T}{\partial q_1}=X^T k_1 X \quad \frac{\partial T}{\partial q_2}=X^T k_2 X \quad \frac{\partial T}{\partial q_3}=0 \quad (2)$$

其中, 广义坐标 q_1, q_2, q_3 分别为 α, β, d , 向量 $X=(\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{d})^T$ 为广义坐标向量对时间 t 求导。 $k_i(i=1,2,3)$ 为 3×3 矩阵。

式(1)再对 q_k 求导, 简化成矩阵形式为

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}=J_k X \quad (k=1,2,3) \quad (3)$$

其中, $J_1=(J_{11} \ J_{12} \ J_{13}), J_2=(J_{21} \ J_{22} \ J_{23}), J_3=(J_{31} \ J_{32} \ J_{33})$ 。
式(3)对 t 求导, 简化成矩阵形式为

$$d\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) / dt = J'_k X + J_k X' \quad (4)$$

设虚功 $\delta W = Q \delta q_k$ ($k=1, 2, 3$), Q 为广义力, $W=(w_1 \ w_2 \ w_3)^T$ 。
当并联机构转动 α 角时, 受到驱动力矩为 M_1 ; 转动 β 角时, 受到驱动力矩为 M_2 ; 平移 d 时, 受到驱动力为 F_3 。根据虚功原理, 有

$$\delta w_1 = Q_1 \delta \alpha = -G_0 \delta z_0 - \sum_{i=1}^3 G_i \delta z_i - G_4 \delta z_4 + M_1 \delta \alpha \quad (5)$$

$$\delta w_2 = Q_2 \delta \beta = -G_0 \delta z_0 - \sum_{i=1}^3 G_i \delta z_i - G_4 \delta z_4 + M_2 \delta \beta \quad (6)$$

$$\delta w_3 = Q_3 \delta s = -G_0 \delta z_0 - \sum_{i=1}^3 G_i \delta z_i - G_4 \delta z_4 + F_3 \delta s \quad (7)$$

其中, δz_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$) 分别为动平台、各个支链连杆沿 z 轴的虚位移, G_i 为动平台、各支链的重力。通过该机构的结构特性, 可以得到

$$\delta z_0 = 2\delta z_1 = 2\delta z_2 = 2\delta z_3 = \delta z_4 \quad (8)$$

动平台、各个支链连杆在 z 轴上的坐标对广义坐标 q_k 求偏导, 得到动平台、各个支链连杆在 z 轴上的虚位移, 将虚位移与式(8)代入式(5)~式(7), 得到的广义力可简化为

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, 参数 N_1, N_2, N_3 具体形式为

$$N_1 = \cos \alpha \cos \beta \left(-m_0 g l - \frac{3}{2} m_1 g l - \frac{1}{2} m_4 g l \right)$$

$$N_2 = \sin \alpha \sin \beta \left(m_0 g l + \frac{3}{2} m_1 g l + \frac{1}{2} m_4 g l \right)$$

$$N_3 = 0$$

将式(2)、式(4)、式(9)代入 Lagrange 方程

$$\frac{d(\partial T / \partial \dot{q}_k)}{dt} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k \quad (k=1, 2, 3)$$

整理后, 得到 3-UPS 并联机构的动力学方程

$$J'_k X + J_k X' - X^T W_k X = Q_k \quad (k=1, 2, 3) \quad (10)$$

3-UPS 并联机构的驱动力来自于 3 个支链主动杆, 各支链主动杆质心的速度 $V_{c_i}=(\dot{x}_{c_i} \ \dot{y}_{c_i} \ \dot{z}_{c_i})^T$ ($i=1, 2, 3$) 对 t 求导, 得到支链主动杆质心的加速度为

$$\dot{V}_{c_i}=(\ddot{x}_{c_i} \ \ddot{y}_{c_i} \ \ddot{z}_{c_i})^T \quad (i=1, 2, 3)$$

因此, 3-UPS 并联机构 3 个支链主动杆的驱动力为

$$f_i = m_i \dot{V}_{c_i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

3 3-UPS 并联机构的算例仿真

3-UPS 并联机构的物理参数为: $m_0=200g, m_1=140g, m_4=130g; R=100mm, r=80mm, l=100mm$ 。广义坐标 α, β, d 为

$$\alpha = \frac{\pi}{60} \sin 2t \quad \beta = \frac{\pi}{60} \sin 2t \quad d = 10 \sin 2t$$

利用 Matlab 软件对动平台质心坐标进行计算机仿真, 得到 3-UPS 并联机构的动平台质心的运动轨迹曲线(图 2)和总驱动力矩和总驱动力变化曲线(图 3)。

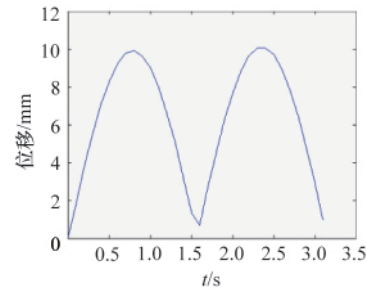


图 2 动平台质心的运动轨迹曲线
Fig. 2 Motion trajectory of moving platform centroid

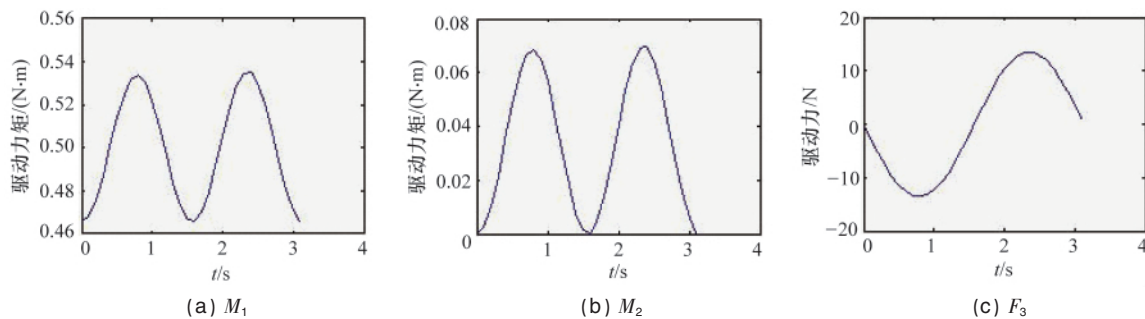


图 3 驱动力矩和驱动力变化曲线
Fig. 3 Curve of driving torque and force

根据系统设计需要, 利用 Matlab 软件对式(11)进行数值模拟, 得到 3 个支链主动杆的驱动力变化曲线, 如图 4 所示。可以看出, 在给定的动平台运动轨迹的情况下, 该机构空载

时所需驱动力和驱动力矩较为平稳, 所得曲线及其生成方法为 3-UPS 并联机构的结构优化设计及其控制系统研究提供数据参考与技术支持。

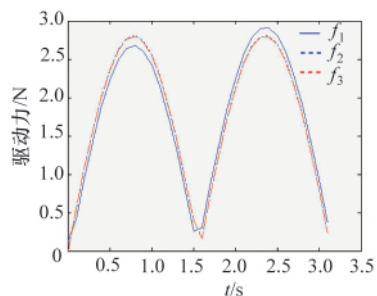


图 4 3 个主动杆的驱动力变化曲线

Fig. 4 Curve of driving force of three active levers

4 结论

基于 3-UPS 并联机构的运动学研究,利用 Lagrange 方程建立其系统动力学模型,解决了系统内部各支链之间的耦合关系,得到了关节变量与驱动器所需力和力矩的显式表达式,其形式较为简练,为研究该类机构的动力学模型奠定了基础。当该系统沿着给定的运动轨迹运动时,利用 Matlab 对并联机构的动力学模型以及各个支链主动杆的驱动力进行仿真计算,得到系统的总驱动力矩、驱动力以及 3 个支链主动杆的驱动力变化情况,为 3-UPS 并联机构的控制系统的设计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 魏洪兴, 孟庆鑫, 王田苗. 拱泥机器人原理样机的研制 [J]. 中国造船, 2003, 44(1): 89-93.
Wei Hongxing, Meng Qingxin, Wang Tianmiao. *Shipbuilding of China*, 2003, 44(1): 89-93.
- [2] 冯士伦, 王建华, 林杨, 等. 蠕动爬行攻泥机构转向工作特性的有限元分析[J]. 船舶工程, 2003, 25(5): 32-34.
Feng Shilun, Wang Jianhua, Lin Yang, et al. *Ship Engineering*, 2003, 25(5): 32-34.
- [3] 张英, 孙虎, 胡勇, 等. 水下仿生拱泥机器人方案研究 [J]. 武汉理工大

学学报: 信息与管理工程版, 2005, 27(4): 43-46.

- Zhang Ying, Sun Hu, Hu Yong, et al. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2005, 27 (4): 43-46.
- [4] 李燕. 仿蚯蚓在土质环境下拱洞机器人的研究 [D]. 陕西: 西北工业大学, 2004.
Li Yan. Study on an earthworm-like robot coving hole under the earth [D]. Shaanxi: Northwestern Polytechnical University, 2004.
 - [5] 黄真. 并联机器人及其机构学理论[J]. 燕山大学学报, 1998, 22(1): 13-17.
Huang Zhen. *Journal of Yanshan University*, 1998, 22(1): 13-17.
 - [6] 余晓流, 岑豫皖, 潘紫微, 等. 并联机器人的理论及应用研究 [J]. 安徽工业大学学报, 2003, 20(4): 290-294.
Yu Xiaoliu, Cen Yuwan, Pan Ziwei, et al. *Journal of Anhui University of Technology*, 2003, 20(4): 290-294.
 - [7] 白志富, 韩先国, 陈五一. 基于 Lagrange 方程三自由度并联机构动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(1): 51-54.
Bai Zhifu, Han Xianguo, Chen Wuyi. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(1): 51-54.
 - [8] 罗磊, 莫锦秋, 王石刚, 等. 并联机构动力学建模和控制方法分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 75-78.
Luo Lei, Mo Jinqiu, Wang Shigang, et al. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(1): 75-78.
 - [9] 陈文凯, 刘平安. 3-RSR 并联机器人动力学研究 [J]. 机械设计, 2006, 23(7): 45-47.
Chen Wenkai, Liu Pingan. *Journal of Machine Design*, 2006, 23 (7): 45-47.
 - [10] 郭祖华, 陈五一, 陈鼎昌. 6-UPS 型并联机构的刚体动力学模型[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 53-57.
Guo Zuhua, Chen Wuyi, Chen Dingchang. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(11): 53-57.
 - [11] 任福君, 颜兵兵. 蠕动转向机构的设计与分析 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 50-55.
Ren Fujun, Yan Bingbing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(1): 50-55.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

“第九届全国微型化学实验研讨会暨 第七届中学微型实验研讨会”征文



中国化学会将于 2011 年 7 月 19 日在武汉市召开“第九届全国微型化学实验研讨会暨第七届中学微型实验研讨会”。会议主题: 绿色、低碳、创新、和谐。

征文内容: 具有推广价值的微型实验方案、新仪器(含无机、有机、高分子、分析、物化和中小学自然科学)的新 ML 的软硬件; 微型实验在科学研究与工农业生产中的应用; 推广应用 ML 经验总结与问题讨论(如: ML 在生态文明建设中的作用、ML 与创新教育、ML 在研究性学习中的应用、ML 与绿色化学、环境保护与环境污染处理、低碳经济、资源节约型与环境友好型社会建设等); 境外微型实验的新进展。

联系方式: 武汉市洪山区雄楚大街 693 号(430074), 鄢国平; 电话: 027-87196030; 网站: news.wit.edu.cn。