

# 并联机器人中柔顺关节代替传统关节可行性分析

李渊<sup>1,2</sup> 余跃庆<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 大同大学煤炭工程学院, 大同 037003)

**摘要:** 在3-RRR平面并联机器人中,驱动杆和连杆之间的传统关节被柔顺关节代替,形成含有柔顺关节的并联机器人。基于含有柔顺关节的并联机器人动力学模型和传统关节并联机器人动力学模型,从理论上求解并对比了在并联机器人中加入柔顺关节前后动平台的轨迹、驱动力矩以及驱动杆的转角变化,同时通过实验对比了两者的动平台轨迹,验证了大范围宏观运动的3-RRR并联机器人中柔顺关节代替传统关节的可行性,为柔顺关节并联机器人的进一步研究打下了基础。

**关键词:** 并联机器人; 柔顺关节; 可行性; 轨迹

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0343-06

## Feasibility Analysis of Compliant Joints Instead of Traditional Joints in Parallel Robot

Li Yuan<sup>1,2</sup> Yu Yueqing<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
2. College of Coal Engineering, Datong University, Datong 037003, China)

**Abstract:** A parallel robot with compliant joints was formed by compliant joint substituted for the traditional joints between the driving rods and the connecting rods in a 3-RRR planar parallel robot. Based on the dynamics models of the parallel robot with compliant joints and the traditional-joint parallel robot, the trajectories of the moving platform and the angles change of driving rods were solved theoretically and compared with each other, and the results showed that both of theoretical calculation curves were very close, but there were high-frequency low-amplitude vibrations in the parallel robot with compliant joints and the maximum relative difference of trajectories of moving platform and of the angles change of driving rods were 1.02% and 1.6%, respectively. At the same time, the maximum driving torques of both robots were compared, and the result was that the maximum driving torques of the parallel robot with compliant joints were less than that of the conventional-joint parallel robot. Simultaneously, the trajectories tracking experiments of the parallel robot with compliant joints and the traditional-joint parallel robot were made respectively, which were compared with the ideal circular path, the result showed that the two experimental trajectories changed both basically consistent, but the magnitudes were different. The two experimental trajectories were compared with each other, and the relative difference was 3.91%. The theoretical and experimental studies proved that it was feasible and effective that the traditional joints were substituted by compliant joints in the parallel robot, which laid foundation for further study of parallel robot with compliant joints.

**Key words:** parallel robot; compliant joint; feasibility; trajectory

收稿日期: 2015-09-11 修回日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575006)

作者简介: 李渊(1984—),男,博士生,大同大学讲师,主要从事机器人和柔顺机构研究,E-mail: lytx2006@163.com

通信作者: 余跃庆(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事机构学和机器人学研究,E-mail: yqyu@bjut.edu.cn

## 引言

与串联机器人相比,并联机器人具有刚度大、精度高、速度快、动力学性能好等优点,但传统机械系统,是刚性构件靠运动副连接而成的,这在高速、精密、微型等高性能的要求下会出现问题。

而柔顺机构<sup>[1]</sup>利用机构中构件自身的柔性变形来完成运动、力和能量的传递和转换,在结构上它减少了甚至没有了运动副。与传统的刚性机构相比,它不仅减少零件数目、简化制造过程和减少装配时间,而且提高了精度、增加了可靠性、减少了磨损、减轻了质量等。

含有柔顺关节的并联机器人是综合柔顺机构和并联机器人而形成的一个新的研究方向。并联微操作机器人<sup>[2]</sup>是应用于微操作领域的柔顺关节并联机器人,它在结构设计及运动分析方面取得了许多研究成果<sup>[3-10]</sup>,在静力学方面也有一定的进展<sup>[11-12]</sup>,但在动力学方面<sup>[13-16]</sup>成果相对比较少。本文以传统关节并联机器人动力学模型<sup>[17]</sup>和含有柔顺关节的并联机器人动力学模型<sup>[18]</sup>为基础,通过理论仿真和实验来研究在大范围宏观运动的并联机器人中用柔顺关节代替传统关节的可行性。

## 1 理论仿真

如图1所示为传统关节的3-RRR刚性平面并联机器人,其结构参数如表1所示。

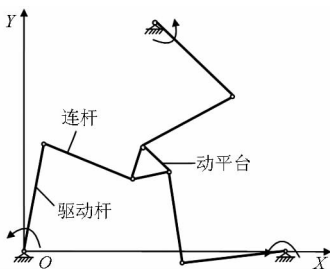


图1 3-RRR刚性平面并联机器人示意图

Fig.1 Sketch map of 3-RRR rigid planar parallel robot

表1 3-RRR平面刚性并联机器人的结构参数

Tab.1 Structural parameters of rigid planar 3-RRR parallel robot

结构	杆长/mm	截面尺寸/mm × mm	材料
驱动杆	400	23 × 10	硬铝
连杆	400	23 × 10	硬铝
结构	边长/mm	厚度/mm	材料
动平台	80	25	硬铝
静平台	900	35	铸铁

文献[17]建立的动力学模型虽然是含有柔顺关节的并联机器人的,但只是把柔顺关节转换为含有扭簧的传统关节。在计算时,只要把扭簧的刚度

变为零,则其模型就转换为传统关节并联机器人的动力学模型。

将图1中所示的3-RRR刚性平面并联机器人中的驱动杆和连杆之间的传统转动副用柔顺关节来代替,构成含有柔顺关节的平面并联机器人,如图2所示。为了保证良好的驱动性能,定平台与各驱动杆之间仍然采用传统关节来连接;为了动平台的运动不直接受柔顺关节变形的影响而保持期望运动规律,动平台和各连杆之间也仍然采用传统关节来连接。

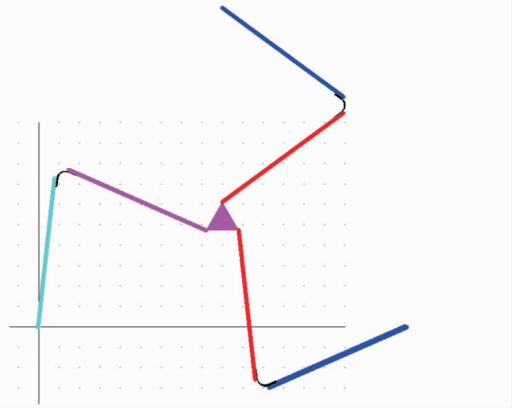


图2 含有柔顺关节的平面并联机器人

Fig.2 Planar parallel robot with compliant joints

在并联机器人加入柔顺关节后,原有机器人的很多结构参数均未改变。只是加入柔顺关节后,实际的驱动杆和连杆的杆长有所改变,这个变化与柔顺关节的初始曲率半径参数有关系,这样才能保证加入柔顺关节前后两者的初始位形都相同,图3为初始位形中柔顺关节结构图。表2为含有柔顺关节的并联机器人的结构参数。

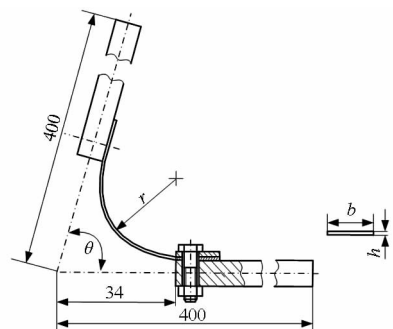


图3 柔顺关节结构图

Fig.3 Structure diagram of compliant joint

文献[18]基于初始弯曲柔性梁的1R伪刚体模型建立了柔顺关节双1R伪刚体模型,并将其融入到并联机器人中,其结构示意图如图4所示。

基于拉格朗日方程和虚拟切割法建立的含有柔顺关节并联机器人动力学方程为

$$M_e \ddot{X} + C_e \dot{X} + K_e X = S^T \tau_a + \tau_c \quad (1)$$

表 2 含有柔顺关节的并联机器人的结构参数

Tab.2 Structural parameters of parallel robot with compliant joints

结构	杆长/mm	截面尺寸/mm × mm	材料
刚性驱动杆	366	23 × 10	硬铝
刚性连杆	366	23 × 10	硬铝
结构	边长/mm	厚度/mm	材料
动平台	80	25	硬铝
静平台	900	35	铸铁
结构	半径 × 弧度/ mm × rad	截面尺寸/ mm × mm	材料
柔顺关节	20 × 1.88	26 × 0.3	弹簧钢

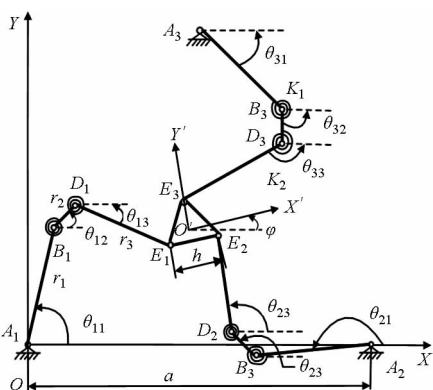


图 4 含有柔顺关节的平面并联机器人结构图

Fig.4 Structures diagram of parallel robot with compliant joints

其中  $M_e = J^T M J$   $C_e = J^T (M \dot{J} + C J)$

$K_e = J^T K D J$   $\tau_c = J^T K q_0$

式中  $M_e$ ——惯性矩阵  $C_e$ ——阻尼矩阵

$K_e$ ——刚度矩阵

$\tau_c$ ——机器人的初始载荷向量的修正量

以动平台中心点为目标点,机器人名义运动规律为

律为

$$\begin{cases} x = 0.45 + 0.1 \cos \frac{5t}{6} \\ y = 0.15 \times \sqrt{3} + 0.1 \sin \frac{5t}{6} \quad (t \in (0, 7.54 \text{ s})) \\ \varphi = -0.05 \sin \frac{5t}{6} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $x, y$ ——动平台目标点在  $x$  轴、 $y$  轴方向上的位置, mm

$\varphi$ ——动平台转角, rad

根据机器人的名义运动轨迹,分别基于含有柔顺关节的并联机器人和传统关节的并联机器人的动力学模型,计算其期望驱动力矩,如图 5 和图 6 所示。

对比图 5 和图 6,可以看出在式(2)所示的匀速圆周运动过程中,传统关节的并联机器人的期望驱

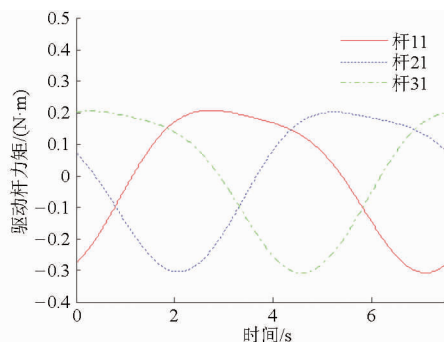


图 5 含有柔顺关节的并联机器人期望驱动力矩  
Fig.5 Desired driving torques of parallel robot with compliant joints

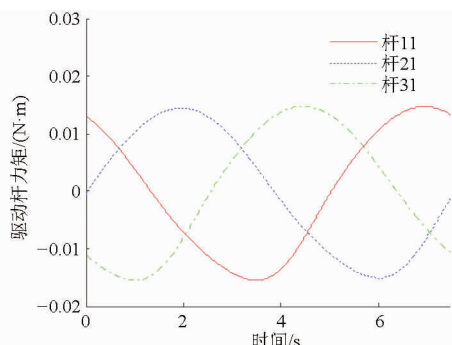


图 6 传统关节的并联机器人期望驱动力矩  
Fig.6 Desired driving torques of parallel robot with traditional joints

动力矩最大值大约是  $0.016 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,而含有柔顺关节的期望驱动力矩绝对值最大值是  $0.307 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。但是在机器人整个运动过程中,如考虑加速运动,那么两者差距就比较小,如加速度为  $8000 \text{ mm/s}^2$  时,传统关节为  $3.91 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,而柔顺关节是  $3.615 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,当然这也与机器人的运动规划有关。

为了研究并联机器人中,柔顺关节代替传统关节是否可行有效,对含有柔顺关节并联机器人和传统关节并联机器人的动平台响应进行理论对比,如图 7、图 8 所示,两者轨迹径向差值曲线如图 9 所示。

由图 7~9 含有柔顺关节并联机器人和传统关节并联机器人的理论计算结果对比及差值可以看出,含有柔顺关节并联机器人的计算结果与传统关节并联机器人计算结果很接近,只是前者存在低幅高频振动,后者变化很平缓;两者圆周运动径向最大差值为  $0.34 \text{ mm}$ ,最小差值为  $-1.02 \text{ mm}$ ,平均差值为  $-0.36 \text{ mm}$ ,最大相对差值为  $1.02\%$ 。这从理论轨迹的角度上说明,在并联机器人中,用柔顺关节代替传统关节可行有效,而且精度还很高。而含有柔顺关节并联机器人在运动过程中出现的低幅高频振动,是刚柔耦合系统中柔顺部件特有的性质。振幅和频率取决于机器人结构参数和运行速度等。这种

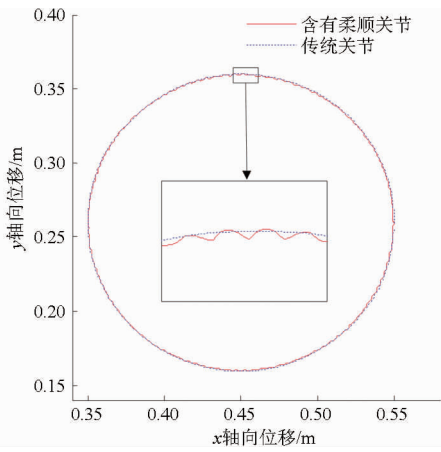


图7 理论轨迹对比

Fig. 7 Comparison of theoretical trajectories

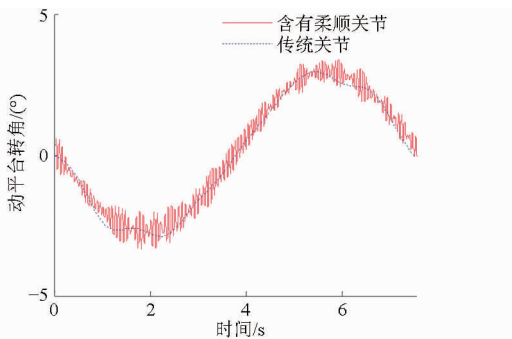


图8 理论转角对比

Fig. 8 Comparison of theoretical angles

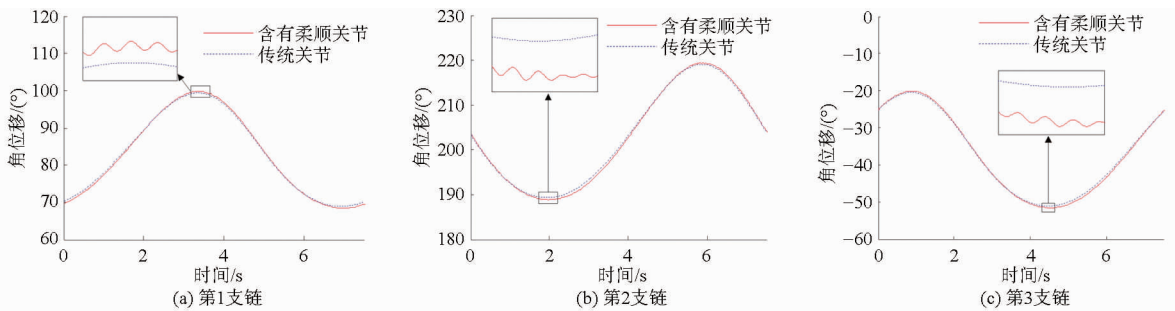


图10 驱动杆角位移变化曲线

Fig. 10 Angle change of driving rod

表3 角位移差值

Tab. 3 Difference of angular displacement

统计量	最大差值/ (°)	最小差值/ (°)	平均差值/ (°)	最大相对 差值/%
第1支链	0.568	-0.671	-0.059	0.58
第2支链	0.543	-0.767	-0.098	0.25
第3支链	0.496	-0.732	-0.117	1.56

0.8°,最大相对差值不超过1.6%。从两者角位移的理论变化情况说明了并联机器人用柔顺关节代替传统关节可行有效。

## 2 实验

如图11所示为含有柔顺关节的并联机器人实

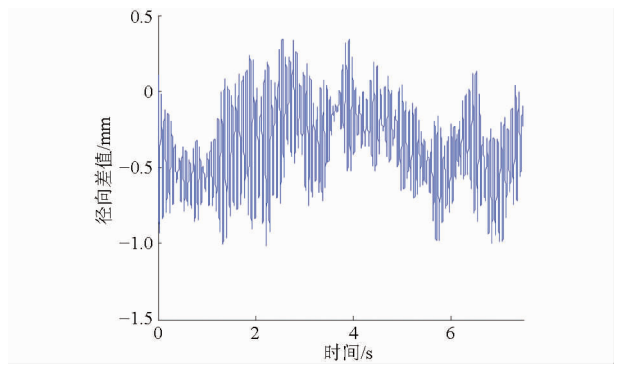


图9 差值曲线

Fig. 9 Difference curve

低幅高频振动可以吸收和释放能量,让机器人在奇异位形等位置可以平稳运行,特别是在精密和微型等领域,柔顺关节并联机器人比传统关节并联机器人更有优势。

根据含有柔顺关节的并联机器人动力学模型,还可以计算出各支链驱动杆的角位移,并与传统关节并联机器人理论计算结果进行对比,如图10所示,两者的差值统计如表3所示。

由图10及表3可以看出,含有柔顺关节并联机器人和传统关节并联机器人,两者各支链驱动杆的理论角位移变化基本一致,在波峰和波谷的地方两者差值相对比较明显一些,但是最大差值不超过

验系统图。



图11 含有柔顺关节的平面并联机器人实验系统  
Fig. 11 Experimental system of planar parallel robot with compliant joints

1. 含有柔顺关节的并联机器人
2. 工控机(内插PMAC)
3. 电气控制柜
4. 伺服电机、接近开关、减速器
5. Optotrak 测量系统

它由3部分组成:含有柔顺关节的并联机器人机构(图12)、机器人控制系统和机器人测量系统。其中测量系统则是由NDI Optotrak 三维测量系统实现。机器人控制系统和测量系统详见文献[19]。



图12 含有柔顺关节的平面并联机器人机构

Fig.12 Planar parallel robot with compliant joints

1. 运动支链 2. 动平台 3. 定平台 4. 柔顺关节

从图7和图8可以看出,当柔顺关节截面厚度为0.3 mm时,计算结果振动比较明显。为了提高机器人精度,在实际实验中,柔顺关节截面厚度变为0.5 mm。

按照式(2)所示的运动规律分别进行含有柔顺关节并联机器人和传统关节并联机器人的轨迹跟踪实验,其结果对比如图13所示,并计算两者的圆周运动径向距离与理想圆周运动结果的差值如图14所示,其差值统计如表4所示。两者圆周运动径向距离差值如图15所示。

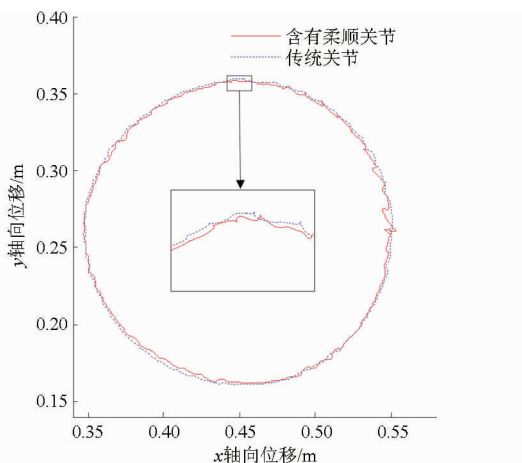


图13 实验轨迹对比

Fig.13 Comparison of experimental trajectories

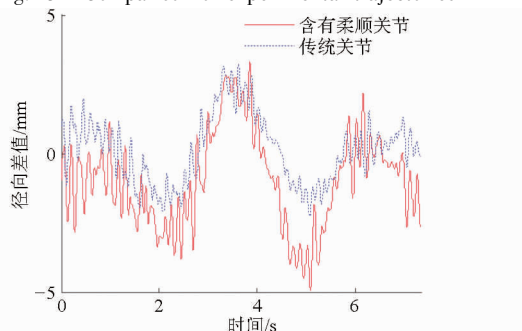


图14 实验结果与理想结果之间的差值

Fig.14 Difference between experimental and desired results

表4 实验结果与理想结果差值

Tab.4 Differences between experimental and ideal results

机器人类型	最大差值/mm	最小差值/mm	平均差值/mm	最大相对差值/%
含有柔顺关节的并联机器人	3.31	-4.93	-0.96	4.93
刚性并联机器人	3.23	-2.26	0.15	3.23

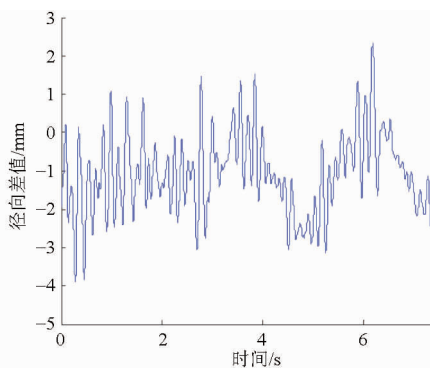


图15 差值曲线

Fig.15 Difference curve

从图13和图14可以看出,含有柔顺关节的并联机器人和传统关节的并联机器人的轨迹跟踪结果在与理想圆周轨迹进行比较时,这两者的运动轨迹变化基本一致,只是幅度有所不同,而且从表4,两者与理想圆的平均差值可知,含有柔顺关节的并联机器人的轨迹比理想圆稍微小一圈,两者平均差值不到1 mm,最大相对差值不超过5%;而刚性的比理想圆稍微大些,最大差值不超过3.5%。

从图15含有柔顺关节的并联机器人和传统关节并联机器人的轨迹径向差值曲线以及相关统计数据可知,两者最大相对值为3.91%,平均差值为-1.11 mm,这说明在并联机器人中,柔顺关节代替传统关节基本可行有效。

### 3 结束语

在3-RRR平面并联机器人中,驱动杆和连杆之间的传统关节用柔顺关节代替,形成含有柔顺关节的并联机器人。基于含有柔顺关节的并联机器人动力学新模型和传统关节的并联机器人动力学模型,从理论对比了双方的动平台轨迹和驱动杆转角,误差比较小,最大相对误差分别为1.02%和1.6%;同时进行了轨迹跟踪实验,其最大径向距离相对误差为3.91%。通过理论仿真研究和实验研究的结果说明:在大范围宏观的3-RRR并联机器人中,该柔顺关节代替传统关节可行有效,为含有片簧状柔顺关节的并联机器人的进一步研究打下了基础。

## 参 考 文 献

- 1 HOWELL L L. Compliant mechanism [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- 2 贲远,徐青松,李杨民. 并联微操作机器人技术及应用进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 12-23.  
YUN Y, XU Q S, LI Y M. Survey on parallel manipulators with micro/nano manipulation technology and applications [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 12-23. (in Chinese)
- 3 RYU J W, LEE S Q, GWEON D G, et al. Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism [J]. Mechatronics, 1999, 9(6): 657-674.
- 4 YU J J, HU Y D, BI S S, et al. Kinematics feature analysis of a 3-DOF compliant mechanism for micro manipulation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(1): 127-131.
- 5 YUN Y, LI Y M. Design and Analysis of a novel 6-DOF redundant actuated parallel robot with compliant hinges for high precision positioning [J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(4): 829-845.
- 6 HAO G B, KONG X W. A 3-DOF Translational compliant parallel manipulator based on flexure motion [C]// ASME Proceedings of IDETC/CIE2009, Volume 7: 33rd Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, 2009: 1-10.
- 7 HESSELBACH J, PLITEA N, THOBEN R. Advanced technologies for micro assembly [J]. The International Society for Optical Engineering 1998, 3202: 178-190.
- 8 余跃庆,崔忠炜,赵鑫,等. 柔顺关节并联机器人设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 274-278.  
YU Y Q, CUI Z W, ZHAO X, et al. Design and experiment of parallel robot with compliant joints [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 274-278. (in Chinese)
- 9 余跃庆,马兰,崔忠炜,等. 并联机器人开槽薄壁柔顺关节设计与实验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 284-290.  
YU Y Q, MA L, CUI Z W, et al. Design and experiment of open thin-walled flexure joints of parallel robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 284-290. (in Chinese)
- 10 田浩,余跃庆,吕强. 片簧型柔顺并联机器人运动规划与轨迹跟踪技术 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 372-378.  
TIAN H, YU Y Q, LÜ Q. Motion planning and trajectory tracking of parallel robot with leaf compliant joint [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 372-378. (in Chinese)
- 11 YONG Y K, LU T F. Kinetostatic modeling of 3-RRR compliant micro-motion stages with flexure hinges [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(6): 1156-1175.
- 12 YUE Y, GAO F, ZHAO X C, et al. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-DOF perpendicular parallel micro-manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(5): 756-771.
- 13 刘平安. 柔性关节及 3-DOF 微动平面并联机器人设计与分析 [D]. 北京:北京交通大学, 2008.  
LIU Ping'an. Design and synthesis of flexure hinges and 3-DOF micro-motion planar parallel manipulators [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- 14 TIAN Y L, Shirinzadeha B, Zhang D. Design and dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation [J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(2): 230-241.
- 15 XU Q S. Design, testing and precision control of a novel long-stroke flexure micro positioning system [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70: 209-224.
- 16 田浩,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学建模与控制研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 279-283.  
TIAN H, YU Y Q. Dynamics and control of parallel robot with compliant joints [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 279-283. (in Chinese)
- 17 LI Y, YU Y Q. Dynamic modeling for a high-speed 3-DOF parallel robot with compliant joints [C]// International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014), 2014: 224-229.
- 18 李渊,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 345-353.  
LI Y, YU Y Q. Dynamic model of a parallel robot with compliant joints [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 345-353. (in Chinese)
- 19 赵鑫. 含有柔顺关节的三自由度并联机器人结构设计与实验研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2012.  
ZHAO X. Structural design and experimental study of a 3-DOF parallel robot with compliant joints [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)