

柔顺关节并联机器人设计与实验*

余跃庆 崔忠炜 赵鑫 马兰

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 通过实验研究,运用结构参数化方法设计了满足要求的柔顺关节,用以代替传统运动副进行传动,建立了含有柔顺关节的柔顺并联机器人机构,并与控制系统和 OPTOTRAK 测量系统一起组成实验系统,开展柔顺关节并联机器人动力学建模、分析、设计、规划与控制等方面的系统研究。以3自由度柔顺并联机器人为研究对象,分别对用转动副传动的刚性并联机器人和用柔顺关节传动的柔顺并联机器人进行了实验研究。通过对实验数据的对比分析,各项实验指标相对误差均控制在允许之内,表明在并联机器人中用柔顺关节取代转动副的有效性。

关键词: 柔顺关节 并联机器人 设计 实验

中图分类号: TH112; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0274-05

Design and Experiment of Parallel Robot with Compliant Joints

Yu Yueqing Cui Zhongwei Zhao Xin Ma Lan

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Compliant joint is mostly applied in the field of micro-operations. Instead of traditional kinematic pairs, compliant joints were designed by using method of structural parameters to satisfy the experimental requirement, and a parallel robot with compliant joints was proposed. Combined with the control unite and OPTOTRAK measurement, the experiment system of a 3-DOF compliant parallel robot was set up for the mechanism dynamics modeling, analysis, design, planning, and control system. The experimental study of the parallel robot with compliant joints was presented, compared to that with revolute joints. Through comparative analysis, relative errors of the experimental index were controlled within the allowable range. The experimental result showed the validity of compliant joints in replacing the kinematic pairs of parallel robots.

Key words: Compliant joint Parallel robot Design Experiment

引言

与串联机器人相比,并联机器人具有精度高、刚度大等优点,适合于一些需要高承载、高精度的应用场合^[1]。但是,由于其多是通过刚性运动副来传递运动和力,在高速、精密等现代机械中存在一些不可避免的问题,如:由运动副带来的间隙、摩擦及冲击,这些问题使得并联机器人的工作性能不能满足现代科技的发展要求。而柔顺机构的出现则从机构结构的角度的为解决这些问题提供了新的思路和途径。

柔顺机构是一种利用构件自身的柔性变形来完

成运动和力传递及转换的新型机构^[2]。近年来,柔顺机构的研究和应用取得了重要成果,主要集中在柔顺机构的结构及运动学分析等理论研究方面,实验研究相对较少。而在并联机器人机构方面,文献[3~6]将柔性铰链用于微操作并联机构中,解决了运动副带来的间隙、误差及加工问题,提高了定位精度。文献[7~11]针对微机械中柔性构件的静力学、运动学分析与设计进行了深入研究,为进一步提高柔性并联机器人的精度提供了有效方法。赵山杉^[12]基于伪刚体模型法进行了大变形环形柔性铰链的分析与设计;Bernardoni等^[13]基于柔性模块提

出了一种柔性机构的优化方法;Kim 等^[14]以柔性四杆为设计模块,通过确定各个模块的瞬心,实现了柔性机构的设计。然而,以上研究大多是围绕微机械结构展开的,而对于具有宏观大范围运动特征的一般柔顺并联机器人机构的设计及实验研究方面却很少涉及,而这方面的研究具有更加深远的理论意义和更加广阔的应用价值。

为此,本文首先设计柔顺关节,用以代替并联机器人中的运动副,从而搭建出含有柔顺关节的平面并联机器人实验系统;然后,对此柔顺并联机器人进行运动规划实验,通过对比来检验用柔顺关节取代转动副的可行性。

1 柔顺关节设计

1.1 材料选择

本文设计的柔顺关节主要在动载荷(冲击、振动)或交变应力作用下工作,利用材料本身具有的弹性变形来吸收和释放能量,从而传递运动和力。由于柔顺关节要经常承受振动和动应力的作用,它必须具有高的弹性极限、疲劳极限,为防止它在冲击和振动作用下突然断裂,应使其具有足够的韧性和塑性。

综合以上几方面因素,考虑到弹簧钢(65Mn)具有优良的综合性能(力学性能、抗弹性能、疲劳性能、淬透性、物理化学性能等),并且常被用作制造弹性变形的材料,在规定的弹性变形范围内具备一定刚度,能承受冲击和振动作用下产生的载荷,因此,本文所设计柔顺关节材料选用弹簧钢(65Mn)。

1.2 结构参数设计

图 1 为 3 自由度平面并联机器人结构简图(A_1 、 A_2 、 A_3 为驱动端)。本文研究目的是在刚性 3-RRR 并联机器人的基础上,用柔顺关节取代其中部分转动副,构成柔顺并联机器人。

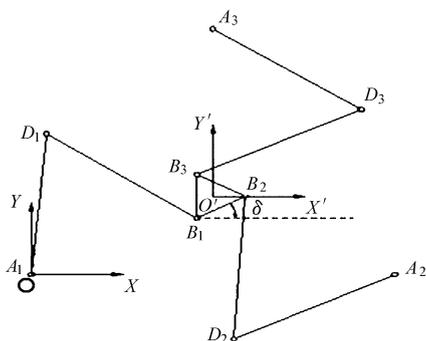


图 1 并联机器人结构简图

Fig.1 Structure diagram of parallel robot

并联机器人的定平台 $A_1A_2A_3$ 、动平台 $B_1B_2B_3$ 由 3 条结构相同的运动支链 $A_iD_iB_i$ ($i = 1, 2, 3$) 连接,

每条运动支链分别由驱动杆、连杆、运动副和柔顺关节组成。考虑到定平台上的驱动端 A_i 和动平台上的铰接处 B_i 的转动范围较大,不太适于安装柔顺关节,因此,本文将 D_i 处的 3 个转动副用柔顺关节替代。动平台可以实现沿 X 、 Y 轴方向的移动和绕 Z 轴方向的转动。动平台处于绝对坐标下的某一位姿为: (X', Y', δ) 。设定动平台的初始位姿: $X' = 450 \text{ mm}$, $Y' = 260 \text{ mm}$, $\delta = 0^\circ$ 。根据动平台的初始位姿,并在保证连杆、驱动杆轴心距不变的条件下确定柔顺关节的几何尺寸。

柔顺关节的主要尺寸由柔顺关节的圆弧半径 r 、圆弧角度 θ 、柔顺关节横截面的宽度 b 和厚度 h 构成,如图 2 所示,具体设计如下:

(1) 圆弧角度 θ : 当动平台处于初始位姿时,驱动杆与连杆的夹角为 78° ,用柔顺关节连接驱动杆和连杆后,需要保持两杆间的初始角度,因此,柔顺关节初始圆弧角度取值为 $\theta = 78^\circ$ 。

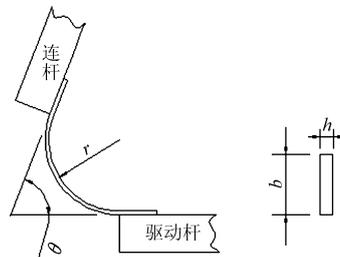


图 2 柔顺关节结构简图

Fig.2 Structure diagram of compliant joints

(2) 圆弧半径 r : 为了保证用柔顺关节替代转动副进行连接后,连杆和驱动杆轴心距不发生变化,圆弧半径 r 越小越好,但是考虑到实际加工因素,选取 $r = 20 \text{ mm}$ 。

(3) 柔顺关节横截面的宽度 b 及厚度 h : 驱动杆、连杆的横截面宽度为 26 mm ,故也设定柔顺关节横截面的宽度 $b = 26 \text{ mm}$;柔顺关节的刚度是设计中的关键参数,弯曲刚度公式为^[15]

$$K = \frac{1}{C} \frac{EI}{r^3} \quad (1)$$

由材料力学可得,柔性关节截面惯性矩为

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

由式(1)和(2)得

$$K = \frac{Ebh^3}{12Cr^3} \quad (3)$$

式中 C ——系数,取 1.2

E ——材料弹性模量

I ——柔顺关节截面惯性矩

由以上公式可以看出,柔顺关节刚度不仅与柔顺关节的材料属性、横截面的宽度 b 、厚度 h 呈正比

关系,还与圆弧半径 r 呈反比关系。

因此,为达到实验时理想的刚度,并考虑到实际加工因素,分别取横截面高度为 0.2 mm、0.5 mm、0.7 mm,将各参数代入式(3)中,经过计算, K 分别为 0.372 kN/mm、5.811 kN/mm、15.947 kN/mm。

为满足实验运动行程要求,将柔顺关节结构参数代入运动行程公式^[16]

$$f = C_1 \frac{Fr^3}{EI} \quad (4)$$

式中 C_1 ——系数,取 1.2

F ——作用于柔顺关节的载荷,为 0.32 kN

由此可得当 $h = 0.2$ mm 时, $f = 860.34$ mm;当 $h = 0.5$ mm 时, $f = 55.062$ mm;当 $h = 0.7$ mm 时, $f = 20.066$ mm。

由于实验条件的限制,并不是说刚度越小越好,运行行程越大越好,因此可以从上述计算数据看出,当 $h = 0.5$ mm 时,柔顺关节适于本实验系统,刚度居中,满足机构实验允许范围。

经过计算取柔顺关节的圆弧半径 $r = 20$ mm;圆弧角度 $\theta = 78^\circ$;横截面的宽度 $b = 26$ mm;横截面的厚度 $h = 0.5$ mm。

1.3 柔顺关节应力校核

柔顺关节的最大应力因载荷作用点和方向的变化而发生在不同的截面。柔顺关节的危险截面主要承受弯曲正应力,其计算公式为^[15]

$$\sigma = \frac{M}{Z_m} = \frac{6M}{bh^2} \quad (5)$$

式中 M ——危险截面的作用弯矩

Z_m ——危险截面的抗弯截面系数

求得最大弯曲应力为: $\sigma_{\max} = 64.62$ MPa。由文献^[15]知,柔顺关节弯曲许用应力为: $\sigma = 1130$ MPa, $\sigma_{\max} < \sigma$,所以柔顺关节的设计满足实验要求。

柔顺关节加工完成后,与驱动杆、连杆相连接,组成并联机器人的一个运动支链。

2 实验

2.1 实验系统

搭建的实验系统分为 3 部分:含有柔顺关节的平面并联机器人机构部分;机器人控制部分;测量系统部分。实验系统框图及照片如图 3、4 所示。

机器人机构部分包括动平台、定平台、3 个柔顺关节、3 根驱动杆、3 根连杆、6 个转动副。其中,驱动杆与连杆由柔顺关节连接,动平台与连杆通过转动副连接,与定平台连接的转动副为驱动副。动平台可以实现沿 X 、 Y 轴的移动和绕 Z 轴的转动。

并联机器人控制部分主要包括工控机、控制柜

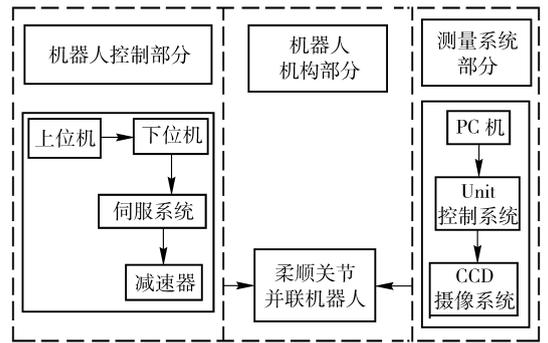


图3 实验系统框图

Fig.3 Black diagram of experiment system

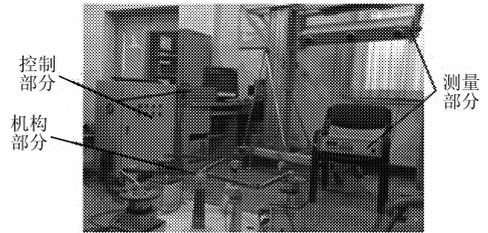


图4 实验系统实物图

Fig.4 Experimental system diagram

以及伺服系统,其工作原理为:通过 RT Linux 平台向工控机 IPC 发送指令,IPC 实时地向控制器 PMAC 发送指令(PMAC 是一款功能强大的可编程多轴运动控制器,可以与各种主机、驱动器、电动机配合完成相应的操作功能),PMAC 通过转换卡 ACC8P 与伺服驱动器连接,PMAC 发出指令后,机器人根据相关指令执行机构运动。图 5 为控制系统硬件结构框图。

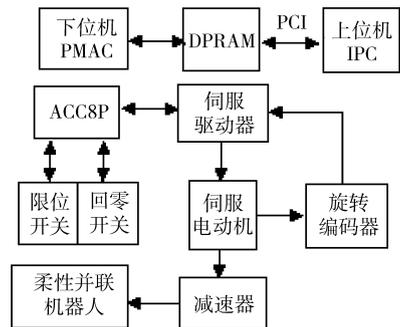


图5 控制系统硬件结构框图

Fig.5 Hardware structure diagram of control system

选取 OPTOTRAK 系列动态测量系统作为运动学数据采集系统,利用先进的红外测量技术,可以精确实时捕捉高速运动目标的三维坐标和 6 个自由度,并通过配套软件进行完整的运动学分析。测量系统由 Optotrak PC、CCD 摄像系统、Optotrak Unit 控制系统、Strober 转换器及红外线传感器组成。Optotrak 测量过程如下:首先将 marker 贴在动平台执行端点处,并且使 marker 在 3 个 CCD 传感器共同的可视范围内。在控制计算机上激活 marker。

marker 所发出的红外光被 CCD 摄像系统接收,由 Optotrak Unit 控制系统把待测点的坐标数据传到计算机 Optotrak PC。最后计算机通过调用 Optotrak 库函数来显示和处理数据。

2.2 实验结果与分析

为了检验用柔顺关节取代转动副构建柔顺并联机器人的可行性,分别针对转动副传动的刚性并联机器人(第 1 组)和柔顺关节传动的柔顺并联机器

人(第 2 组)进行高速、高加速的运动规划实验。两组实验都是以动平台中心点为目标点,实现一个以 (0,0) 点为圆心、半径为 100 mm 的整圆轨迹。

由于控制系统不提供相对零点,只是提供绝对零点,因此,在机器人执行运动之前必须进行机构回零操作,从而让各运动实轴和动平台虚轴空间的零点一致。本实验的轨迹规划共分为 3 个阶段,各个阶段轨迹规划如表 1。

表 1 目标轨迹规划

Tab.1 Objective trajectory planning

运动阶段	轨迹描述	起点/mm	终点/mm	规划加速度 $a/mm \cdot s^{-2}$	规划速度 $v/mm \cdot s^{-1}$
起始阶段	从零点沿 X 轴运动到整圆轨迹起点	(0,0)	(100,0)	20 000	5 000
目标阶段	沿圆心(0,0),半径 100 mm 的整圆轨迹	(100,0)	(100,0)	20 000	5 000
结束阶段	从整圆轨迹终点沿 X 轴运动到零点	(100,0)	(0,0)	20 000	5 000

由 Optotrak 采集系统分别对两组实验进行数据采集,将采集的数据通过 NDI Data View 和 Matlab 软件进行处理,得到两组目标点的实际运动轨迹如图 6、7 所示。

一定波动。

进一步分析,以半径 100 mm 的圆为标准,分别计算每一时刻两组实验的实际运动轨迹与理论轨迹之间的误差,如图 8、9 所示。对实验结果进行统计分析,分别得出第 1 组实验与第 2 组实验误差的统计值,如表 2。

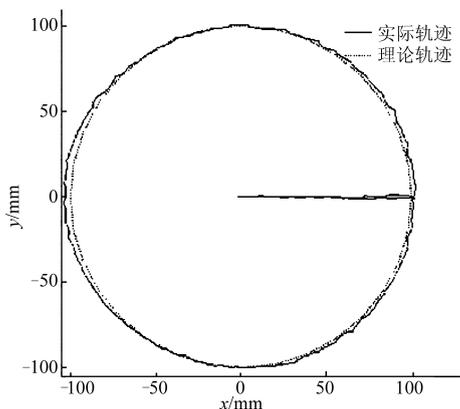


图 6 第 1 组实验目标点运动轨迹

Fig. 6 Trajectory of target of Exp. 1

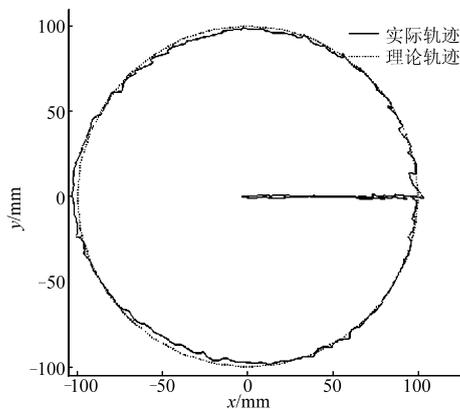


图 7 第 2 组实验目标点运动轨迹

Fig. 7 Trajectory of target of Exp. 2

从图 6、7 可以直观地看出:在相同的实验条件下,第 1 组实验和第 2 组实验的实际运动轨迹曲线的变化趋势比较相近,目标点都在理论轨迹附近,有

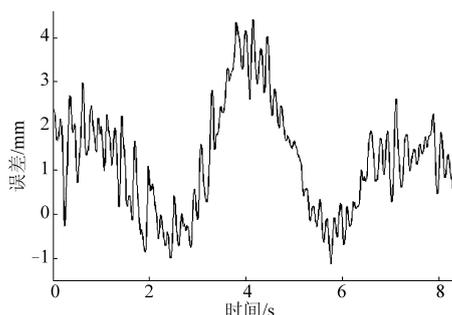


图 8 第 1 组实验运动轨迹与理论轨迹的误差曲线

Fig. 8 Error between actual and ideal trajectory of target of Exp. 1

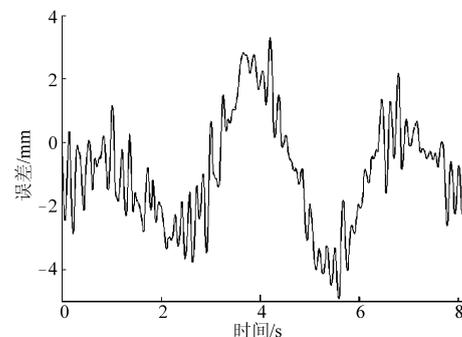


图 9 第 2 组实验运动轨迹与理论轨迹的误差曲线

Fig. 9 Error between actual and ideal trajectory of target of Exp. 2

由图 8、图 9 及表 2 可以看出:第 1 组与第 2 组实验轨迹与理论轨迹误差曲线的变化频率和幅值基本吻合,与理论轨迹的误差平均值、标准差和最大峰

谷差相差无几,两组实验目标点实际运动轨迹的相对误差分别为 0.26%、0.27%、0.20%。这表明,采用柔顺关节传动的柔顺并联机器人与采用转动副传动的刚性并联机器人在完成规划运动时的实验轨迹十分接近,也就是说,用柔顺关节取代转动副同样能够使并联机器人较好地完成操作任务。

表 2 误差统计

Tab.2 Statistics of errors

		误差	统计值	最大
		平均值	标准差	峰谷差
第 1 组 实验	与理论绝对误差	1.23	1.22	2.82
	与理论相对误差/%	1.23	1.22	2.82
	与理论绝对误差	-0.96	1.50	3.02
第 2 组 实验	与理论相对误差/%	-0.96	1.50	3.02
	与第 1 组绝对误差	0.26	0.28	0.20
	与第 1 组相对误差/%	0.26	0.27	0.20

另一方面,两组实验轨迹都与规划的理论轨迹有一定差距,这主要是由于实际实验系统中杆件的加工和安装误差、运动副间隙、摩擦等共同因素造成的,在今后的实验研究中需要尽力克服和改善。

3 结论

(1) 根据并联机器人的结构特点,设计出相应的柔顺关节,从而构建了由柔顺关节传动的柔顺并联机器人机构、控制部分和测试系统组成的实验系统:以材料为 65Mn 的弹簧钢柔顺关节取代传统的运动副,运用结构参数化方法设计出满足本实验要求的关节结构,构建了柔顺并联机器人的机构部分;采用交流伺服系统对机构进行驱动;以“IPC + PMAC”为硬件核心和“RTLinux”为软件开发平台,设计了平面 3 - RRR 柔性并联机器人实时控制部分;利用控制系统的开放性,设计了以线尺传感器为采集单元,“RTLinux”为软件开发平台的并联机器人运动学数据实时采集系统。

(2) 在实验系统搭建完成后,运用测试系统对实验进行数据采集,通过与用转动副传动的刚性并联机器人实验对比,相对误差均控制在允许范围之内,表明用柔顺关节取代转动副构成柔顺并联机器人是可行的,为该领域进一步研究提供了实验支持。

参 考 文 献

- Merlet J P. Parallel robots[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- 王雯静,余跃庆,王华伟. 柔顺机构国内外研究现状分析[J]. 机械设计,2007,24(6):1~4.
Wang Wenjing, Yu Yueqing, Wang Huawei. Analysis on the research status of compliant mechanism at home and abroad[J]. Journal of Mechanical Design, 2007,24(6):1~4. (in Chinese)
- 于靖军,宗光华,毕树生. 纳米级精度柔性机器人的设计方法及实现研究[J]. 中国机械工程,2002,13(18):1577~1580.
Yu Jingjun, Zong Guanghua, Bi Shusheng. Design of a compliant manipulator with nano-meter range resolution[J]. China Mechanical Engineering,2002,13(18):1577~1580. (in Chinese)
- 杜志江,董为,孙立宁. 柔性铰链及其在精密并联机器人中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(9):1469~1473.
Du Zhijiang, Dong Wei, Sun Lining. Flexure hinge and its application in precision parallelmanipulators[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2006,38(9):1469~1473. (in Chinese)
- Li Yangmin, Xu Qingsong. Dynamics analysis of a modified 3 - PRC compliant parallel micro-manipulator[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Nanotechnology, 2007: 432~437.
- Yong Yuen Kuan, Lu Tien-Fu. Kinetostatic modeling of 3 - RRR compliant micro-motion stages with flexure hinges[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(6): 1156~1175.
- Yue Yi, Gao Feng, Zhao Xianchao, 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.
- 杨启志. 三平移全柔性并联微动机器人机构静力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(11):110~113.
Yang Qizhi. Static forces analysis of the fully compliant three DOF translational parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(11):110~113. (in Chinese)
- 刘平安. 3-DOF 平面微动并联机器人的动-静态建模[J]. 华东交通大学学报,2008,25(6):37~40.
Liu Pingan. Kinetostatic modeling of 3-DOF planar parallel micro-motion manipulator [J]. Journal of East China Jiaotong University,2008,25(6):37~40. (in Chinese)
- Tino Noll, Karsten Holldack, Gerd Reichardt, et al. Parallel kinematics for nanoscale Cartesian motions[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 291~304.
- Ni Zongyue, Zhang Dawei, Wu Yingjun, et al. Analysis of parasitic motion in parallelogram compliant mechanism[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 133~138.
- 赵山杉. 大变形环形柔性铰链性能分析与设计方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2010.
Zhao Shanshan. Research on performance analysis and design method of large-deflection annulus-shaped flexure hinges [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)
- Bernardon P, Bidaud P, Bidard C, et al. A new compliant mechanism design methodology based on flexible building blocks[C]//Proceedings of SPIE 5383, 2004:244~254.
- Kim C J, Kota S, Moon Y M. An instant center approach toward the conceptual design of compliant mechanisms[J]. ASME Journal of Mechanical Design,2006,128(3): 542~550.
- 罗迎社. 材料力学[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2001.
- 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册[M]. 北京:机械工业出版社,1997.