

并联机器人开槽薄壁柔顺关节设计与实验*

余跃庆 马兰 崔忠炜 李渊

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,北京 100124)

摘要:针对传统柔顺关节运动范围小、易产生轴向漂移的不足,依据3RRR并联机器人运动范围,以关节的移动范围及所需刚度作为条件,对关节的几何尺寸进行了设计计算,并用ANSYS软件进行强度分析,设计了一种新型开槽式薄壁柔顺关节。利用扭转作为主要变形方式时,该柔顺关节具有扭转角度可达到 36° 及轴线相对固定不易漂移的优点。根据关节设计尺寸选择65Mn为材料进行了加工,在三自由度并联机器人实验平台上进行了片簧式与开槽式两种柔顺关节的实验对比,实验结果表明设计的开槽式薄壁柔顺关节能够完成轨迹跟踪任务,且最大相对误差为6.05%,对比片簧式柔顺关节具有一定优越性。

关键词:柔顺关节 运动副 并联机器人

中图分类号: TH112; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0284-07

引言

柔顺机构是一种利用机构中构件(杆件和铰链或关节)自身的柔性变形来完成运动、力和能量的传递和转换的新型机构,在结构上简化甚至没有运动副。与传统的刚性机构相比,它的优越性主要表现在两方面:降低成本(减少零件数目,减少装配时间,简化制造过程)和提高性能(提高精度,增加可靠性,减少磨损,减轻重量,减少维护)^[1]。在微型机器人中较为流行的柔性机构抛弃了传统意义上的刚性运动副,文献[2-5]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[6-10]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。可是大多数研究中关于微型操作结构关节最大弯曲角度很小,更不能实现宏观的大角度转动。因此人们开始逐渐研究并发展能应用于普通机器人的柔顺关节。

典型的关节设计可分为两种类型:即切口型关节及交叉式柔顺铰链。其中切口式可以用于替换传统回转副,而片簧式更多用于替换移动副。但平面切口及球面切口有应力集中问题,限制了关节的转动范围和使用寿命^[11]。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;另外,由片簧式的设计演变出了许多柔性回转副的构想,

如:Bona等^[13]提出了一种交叉式柔性铰链,通过两薄壁杆的弯曲变形来实现转动,可实现大角度变形的转动。但是这些柔顺关节转角非常有限,并且由于转动中心与回转副轴线不在一条直线上,因此转动时具有轴线漂移的问题。鉴于当前柔顺关节存在的转动范围小、轴心漂移大等问题,设计新型柔顺铰链并将其应用于普通机器人上是十分必要的。

本文设计并制作出一种开槽薄壁柔顺关节,用来替换三自由度并联机器人上的传统转动副。根据替换关节的运动范围及受力情况,对柔顺关节的几何尺寸进行设计计算,并选择65Mn弹簧钢作为材料,设计加工制作出实物。

1 开槽薄壁柔顺关节设计

1.1 应用条件与要求

本文设计的柔顺关节用来替换三自由度并联机器人中R副。该并联机构如图1所示:3条支链上D处回转副被柔顺关节替换,A、B处均为刚性回转副。三自由度并联机器人末端轨迹为 $R=100\text{ mm}$ 的圆,速度为 1000 mm/min ,由其工作空间及运动学计算可得出:需要替换的回转副关节夹角的初始角度为 73° ,最小夹角为 56° ,关节夹角运动范围为 35.94° 。其次计算具有刚性回转副的3RRR并联机器人在该速度和轨迹下,主动杆所受的驱动力矩。因为机器的结构对称,因此只计算其中一个主动杆的输出力矩即可;根据计算得到变化最剧烈时段的

力矩及角度变化分别为 $M_x = 4.3238 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$, $j_x = 5.0789 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。至此柔顺关节的设计要求基本确定。

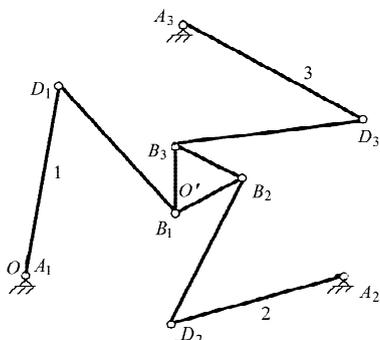


图 1 三自由度并联机器人简图

Fig. 1 Structure diagram of 3-DOF parallel robot

1.2 结构参数设计

为了保证设计出的开槽式柔顺关节具有足够的强度和运动范围,以满足上面提到的设计要求,首先计算柔顺关节在三自由度并联机构中所需要承受的刚度,然后根据刚度条件并结合最大扭转角度条件,确定零件的几何尺寸。

首先由于三自由度并联机器人 D 处的初始角度是 73° ,因此设计关节的开槽角度较传统裂筒式柔顺关节相比大了许多,用以保证柔顺关节在初始位置不会发生干涉,设定开槽角度为 120° 。图 2 所示为开槽薄壁柔顺关节结构简图。

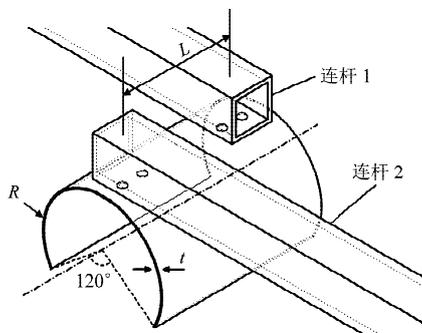


图 2 开槽薄壁柔顺关节结构简图

Fig. 2 Geometry of open thin-walled flexure joint

图中 R 表示柔顺关节圆筒半径, t 表示壁厚, L 表示两杆中心距;开槽薄壁柔顺关节的受力示意图如图 3 所示。

如图 2 所示:假设连杆 1 固定,开槽薄壁关节在 X, Y, Z 方向受到力和力矩作用,并分别产生各自转角。不同的是:在 Y, Z 两方向除力矩外还受到力的作用,而 X 方向单纯受力矩作用。由材料力学对刚度的定义,即 $k = \frac{M}{\varphi}$,可得到 X, Y, Z 三轴的扭转刚度 k_{tx}, k_{ty}, k_{tz} ,此外对于受力作用的 Y, Z 两轴,还可以计算弯曲刚度 k_{by}, k_{bz} 。注意到该柔顺关

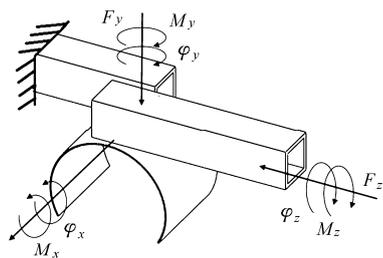


图 3 开槽薄壁柔顺关节受力示意图

Fig. 3 Loading of open thin-walled flexure joint

节的特点为薄壁环状,由材料力学,可计算其对型心惯性矩为

$$I_z = \int_A y^2 dA \approx R^3 t \left(\frac{2}{3} \pi - \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (1)$$

同理
$$I_y = \int_A z^2 dA \approx R^3 t \left(\frac{2}{3} \pi + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (2)$$

可得到轴向及非轴向的刚度

$$k_{tx} = \frac{M_x}{\varphi_x} = \frac{M_x}{M_x L} = \frac{4}{9L} G \pi R t^3 \quad (3)$$

$$k_{ty} = \frac{M_y}{\varphi_y} = \frac{M_y}{M_y L} = \frac{EI_z}{L} = \frac{ERt^3}{L} \left(\frac{2}{3} \pi - \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (4)$$

$$k_{tz} = \frac{M_z}{\varphi_z} = \frac{M_z}{M_z L} = \frac{EI_z}{L} = \frac{ERt^3}{L} \left(\frac{2}{3} \pi + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (5)$$

$$k_{by} = \frac{F_y}{y} = \frac{F_y}{F_y L^3} = \frac{3EI_z}{L^3} = \frac{3ER^3 t}{L^3} \left(\frac{2}{3} \pi - \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (6)$$

$$k_{bz} = \frac{F_z}{z} = \frac{F_z}{F_z L^3} = \frac{3EI_z}{L^3} = \frac{3ER^3 t}{L^3} \left(\frac{2}{3} \pi + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \quad (7)$$

式中 G ——剪切弹性模量 E ——弹性模量
 h ——截面积长度

由力矩和转角并利用公式(3),可得到 3RRR 机器人关节所需要的轴向扭转刚度

$$k_{tx} = \frac{4}{9L} G \pi R t^3 =$$

$$\frac{M_x}{\varphi_x} = \frac{4.3238 \times 10^{-4}}{5.0789 \times 10^{-4}} = 0.528 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$$

为了进一步分析开槽薄壁关节的特性,需要计算该结构的弹性变形范围及最大应力。假设该结构只受扭转载荷,并先计算其所承受的最大应力。根据材料力学得开槽薄壁截面的最大应力和转角

$$\tau_{\max} = \frac{3Mt}{\sum h_i t_i^3} = \frac{9M}{4\pi R t^2} \quad (8)$$

$$\theta = \frac{3ML}{G \sum h_i t_i^3} = \frac{9ML}{4G\pi R t^3} \quad (9)$$

将公式(9)代入最大应力公式(8)中,可得关于最大应力与扭转角度的公式

$$\tau_{\max} = \frac{Gt\theta}{L} \quad (10)$$

该圆弧状零件所受应力为二向应力,公式的假设前提为:物体受到纯扭转,也就是纯剪切应力状态。根据材料力学形状改变比能理论,可以得到纯剪切的强度条件是

$$\tau = \frac{[\sigma]}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

式中 $[\sigma]$ ——许用应力 τ ——剪应力

将公式(11)代入到开槽薄壁关节的最大转角公式中得

$$\theta_{\max} = \frac{L[\sigma]}{\sqrt{3}Gt} \quad (12)$$

根据仿真计算出机器人运动轨迹($R = 100 \text{ mm}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$)时,关节的转动范围是 35.94° ,因此所设计的关节最大扭转角需满足: $\theta_{\max} \geq 35.94^\circ$ 。

根据公式(12)可得到

$$\frac{L}{t} = \frac{\sqrt{3}G\theta_{\max}}{[\sigma]} \quad (13)$$

接下来进行零件几何尺寸的设计,按前面分析过的刚度公式可知,壁厚 t 越小越好,因为可以获得更大的扭转角度。但受到实际制作的影响, t 的厚度是有限的。可加工的最薄壁厚为 0.2 mm ,使用材料为弹簧钢 65Mn ,许用应力 $[\sigma] = 850 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,剪切模量 $G = 78.92 \text{ GPa}$,代入公式(13),得到

$$\frac{L}{t} \geq \frac{\sqrt{3}G\theta_{\max}}{[\sigma]} = 100.88$$

即长度与厚度的比值,也要作为设计依据之一。可加工的弹簧钢片最小厚度为 0.2 mm ,因此 L 应大于 20.174 mm 。 L 越长,根据公式(12)可知,其转动范围越大;但抗弯刚度与 L 成反比, L 越大抗弯刚度越小,有可能发生 Y 方向的弯折。考虑到杆件的安装空间及加工成本,初步确定 $L = 50 \text{ mm}$ 。

根据公式(14),得到: $R = \frac{9Lk}{4G\pi t^3} = 0.0299 \text{ m}$ 。

因此设计半径 $R = 30 \text{ mm}$ 时,其抗弯刚度^[14]为

$$k_b = \frac{\pi E}{L} R^3 t =$$

$$\frac{\pi \times 200 \times (30)^3 \times 0.2}{50} = 6.78 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$$

可见相比于轴向的扭转刚度,抗弯刚度要大得

多。

将 R 代入公式(4)~(7)得到非轴向的刚度: $k_{ry} = 1.416 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; $k_{rz} = 2.156 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$; $k_{ly} = 16.99 \text{ N/m}$; $k_{lz} = 25.85 \text{ N/m}$ 。

由此可以看出,开槽薄壁关节在轴向的刚度越小,意味着转动越灵活,而非轴向的扭转刚度和线性刚度比较大,意味着关节不容易在其他方向上发生弯折。因此从理论上可以认为这种关节更贴近于传统的回转副,但运动中又不涉及到刚性回转副运动过程中具有的冲击和摩擦。

应用 ANSYS 软件对开槽薄壁关节受力状况进行了有限元分析,如图 4 所示。模仿一端臂固定,另一端受力的情况进行有限元分析。在关节运动范围内,柔顺关节所承受的最大应力为 775 MPa ,小于材料的许用应力 $[\sigma]$ 。因此,满足理论设计要求。

至此设计工作完成,开槽薄壁圆轴几何尺寸为:半径 $R = 30 \text{ mm}$,长度 $L = 50 \text{ mm}$,厚度 $t = 0.2 \text{ mm}$ 。

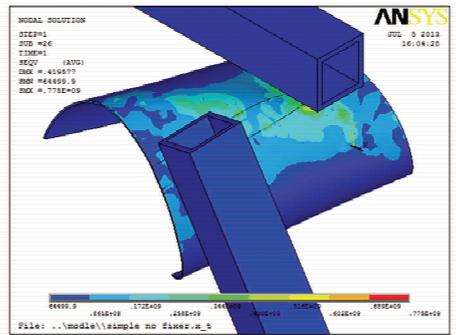


图 4 开槽柔顺关节 ANSYS 受力分析图

Fig. 4 Analysis of loading of open thin-walled flexure joint by ANSYS

1.3 加工制作

柔顺关节所用材料为 65Mn 弹簧钢,加工制作中既要考虑到零件几何构形又要不影响力学性能。因此从几何构形和力学性能角度出发,初步加工后对柔顺关节进行热处理。热处理过程分为 3 部分,应力退火处理、淬火处理及最后的回火处理。回火时将柔顺关节装卡在卡具上,将前面热处理产生的变形在回火过程中得到回复和矫正。

加工后的柔顺关节安装在并联机器人上,如图 5a 所示,柔顺关节与连杆之间通过螺钉固定。图 5b 为 3 个柔顺关节分别安装在并联机构的 3 个分支上,替换第 1 个刚性回转副。

2 实验与结果分析

2.1 实验系统

检验柔顺关节工作情况的实验载体是 3RRR 并联机器人,如图 6 所示。

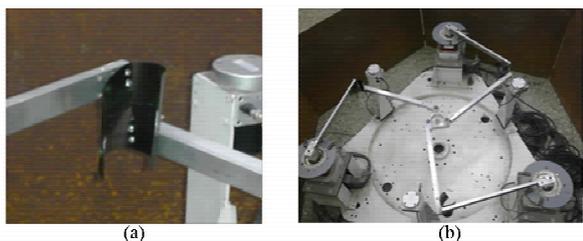


图 5 开槽柔顺关节安装实物图

Fig. 5 Practical parallel robot with open thin-walled flexure joint

(a) 开槽薄壁关节装配图 (b) 并联机器人整体安装实物图



图 6 实验系统

Fig. 6 Experiment system

- 1. 含柔顺关节的 3RRR 并联机器人
- 2. 工控机
- 3. 电气控制柜
- 4. 电机、减速器、接近开关
- 5. CCD 摄像系统、Optotrak Unit 控制系统

该并联机器人的控制为开环控制,沿预设轨迹运动。除了限位开关之外没有其他的反馈传感器。因此实验数据的采集主要由 Optotrak 系统完成,即在需要采集位移的位置标记 MARK 点,由 CCD 摄像系统采集 MARK 点的移动,并以 XYZ 三坐标的形式记录轨迹,之后在 PC 中以数表形式生成数据。

对照实验采用片簧式柔顺关节^[15],其结构简图及安装实物如图 7 所示,其中柔顺片厚度为 0.2 mm,材料为弹簧钢 65Mn,半径 $R = 30$ mm,长度 $L = 50$ mm。实验平台 3RRR 并联机器人主要由静平台、动平台及杆件组成。静平台是边长为 900 mm 的等边三角形,厚度 35 mm,材料铸铁;动平台是边

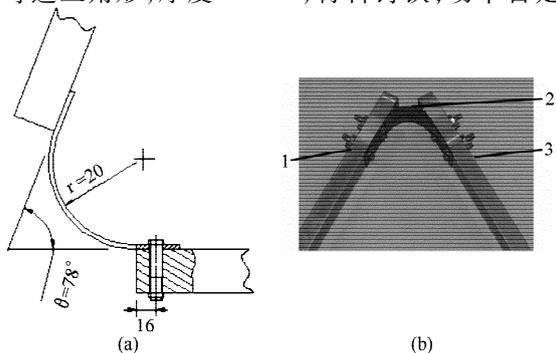


图 7 片簧式柔顺关节结构图

Fig. 7 Construction diagram of leaf spring joint

(a) 片簧式关节安装示意图 (b) 片簧式关节装配图

- 1. 驱动杆
- 2. 片簧式关节
- 3. 连杆

长为 80 mm 的等边三角形,厚度 25 mm,材料硬铝;各个驱动杆尺寸为 $374 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,材料为硬铝;连杆尺寸为 $380 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,材料为硬铝。

驱动杆和连杆的截面和材料与原 3RRR 柔性并联机器人实验系统不同,原设计采用以驱动杆为柔性,即采用截面为 $23 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的弹簧钢片作为各杆,关节为刚性的设计进行实验。而此处借助平台,以关节为柔性为主进行研究,因此为了排除杆件对实验结果的影响,采用的硬铝和铝方管作为实验用杆,尽量减少因为杆件原因造成的变形等,影响对柔性关节的数据分析。

2.2 实验方案

为了避免由控制程序造成的轨迹误差,首先将刚性回转副安装在 3RRR 并联机器人实验系统上,将 MARK 点标记在动平台中心即输出端,记录输出的位移轨迹,以下简称刚性实验。再以开槽薄壁柔顺关节和片簧式柔顺关节替代刚性回转副,以相同速度运行同样的轨迹,并记录输出的位移轨迹。平台的轨迹规划如表 1 所示。

表 1 轨迹规划

Tab. 1 Objective planning track

运动阶段	轨迹描述	起点/ mm	终点/ mm	规划速度 v / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
初始阶段	从零点沿 X 轴运动到整圆轨迹起点	(0,0)	(100,0)	1 000
轨迹阶段	画以零点为圆心,半径 100 mm 的圆	(100,0)	(100,0)	1 000
回归阶段	由轨迹圆终点返回至零点	(100,0)	(0,0)	1 000

2.3 实验数据及分析

为便于说明,以下将传统靠弯曲变形实现扭转功能的片簧式柔顺关节称为原柔顺关节,而本文设计的开槽式薄壁柔顺关节简称为新柔顺关节。

实验动平台输出的轨迹曲线如图 8 所示,图 9 所示为两种关节与理论的误差曲线。经计算得到实验误差的统计值如表 2 所示。下面结合图 8、图 9 及表 2,对实验结果进行分析。

由图 8 看出,首先将开槽式柔顺关节、片簧式柔顺关节分别与理论轨迹相比较。两种柔顺关节都可以完成规定轨迹曲线,即半径为 100 mm 的圆,但两者的平均误差不同,观察图 9 发现,两者的误差趋势类似,但开槽式的误差曲线基本处于片簧式误差曲线的下方,说明开槽式关节的误差小。开槽式柔顺关节、片簧式柔顺关节实验与理论对比,平均误差分别为 0.92 mm、3.09 mm。片簧式关节的平均误差明

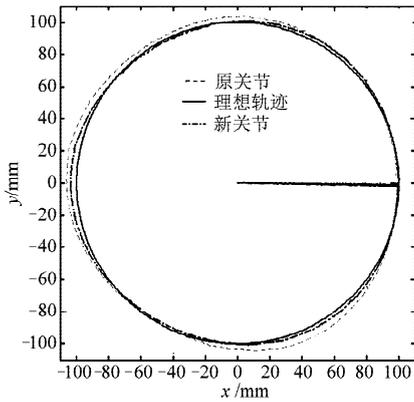


图8 两种柔顺关节实验轨迹与理想轨迹

Fig. 8 Two kinds of flexure joint experiment tracks and ideal track

显高于开槽式柔顺关节,而开槽薄壁关节的误差控制在1%以内。

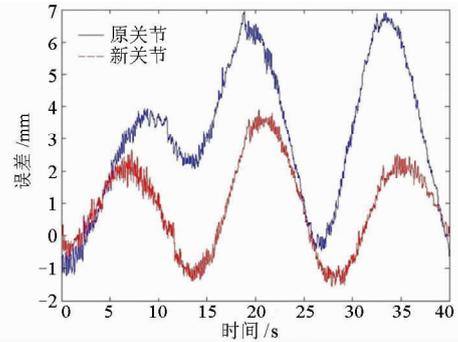


图9 两种含柔顺关节实验轨迹误差曲线

Fig. 9 Two kinds of flexure joint experiment errors

表2 误差统计值

Tab. 2 Error statistics

统计值	误差平均值	标准偏差	最大误差	最大峰谷差
开槽式柔顺关节实验与理论误差/mm	0.92	1.38	3.89	1.44
开槽式柔顺关节实验与理论相对误差/%	0.92	1.36	3.89	1.44
片簧式柔顺关节实验与理论误差/mm	3.09	2.19	5.71	1.85
片簧式柔顺关节实验与理论相对误差/%	3.09	2.14	5.71	1.85
刚性关节实验与理论误差/mm	1.35	0.71	3.19	1.38
刚性关节实验与理论相对误差/%	1.35	0.70	3.19	1.38
开槽式柔性关节实验与刚性实验误差/mm	0.62	0.91	2.85	2.66
开槽式柔性关节实验与刚性实验相对误差/%	0.61	0.90	2.81	2.59
片簧式柔性关节实验与刚性实验误差/mm	2.68	1.59	6.41	2.43
片簧式柔性关节实验与刚性实验相对误差/%	2.64	1.57	6.05	2.37

仔细观察图8,两者发生较大误差的位置相同。如在 $(-100,0)$ 位置附近,两者距离理论轨迹略远,并且在此处同时出现最大误差,开槽式柔顺关节、片簧式柔顺关节实验与理论误差分别为:3.89 mm和5.71 mm;相对误差为3.89%和5.71%。这种情况的出现不仅与柔顺关节有关,也和并联机构在工作空间中的位姿有关,该位姿容易发生奇异,因此该位置轨迹误差较大。

虽然存在误差,但两者整体运行相对平稳,在轨迹曲线表现出一定波动,都不是平滑曲线。开槽式柔顺关节、片簧式柔顺关节与理论对比的最大峰谷差分别为:1.44 mm和1.85 mm,刚性关节与理论对比的最大峰谷差1.38 mm,为该列最小值。开槽式柔顺关节波动幅度小于片簧式柔顺关节波动幅度。

开槽式柔顺关节、片簧式柔顺关节与理论对比的标准差分别为1.38 mm和2.19 mm。这说明在运动过程中,开槽式柔顺关节的波动比片簧式柔顺关节小,相对误差为1.36%,运行相对更平稳,说明开槽式柔顺关节性能更好。

为了减少因控制方面造成的结果误差,开槽式

柔顺关节、片簧式柔顺关节实验结果还分别与刚性关节实验结果进行了比较。在误差平均值一项,开槽式柔顺关节与刚性实验对比的平均误差小于片簧式与理论对比误差;而标准偏差一项中,开槽式与刚性实验对比的标准偏差小于片簧式与刚性实验对比的标准偏差;此外,片簧式与刚性实验对比的最大误差为6.41 mm,明显大于开槽式与刚性实验对比误差2.85 mm。说明在同一控制程序下,开槽式柔顺关节的表现更接近于刚性关节,且开槽式柔顺关节表现明显优于片簧式柔顺关节。

而最大峰谷差一列中,两种柔性关节与刚性对比的峰谷差分别为2.66 mm、2.43 mm,均大于刚性关节与理论对比的最大峰谷差,说明两者都需要在抑制振动方面有待改善。

综上所述,实验结果表明本文设计的开槽式薄壁柔顺关节能够很好地传递力矩、力,完成给定任务,设计的机械性能满足实际需求。对比片簧式柔顺关节,轨迹误差更小、运行更加平稳,运动性能有所提高,说明这种开槽薄壁柔顺关节具有一定的优越性。

3 结束语

以所需刚度及最大扭转角作为设计条件,设计并制作一种开槽薄壁柔顺关节。该关节较传统依靠弯曲达到变形的关节相比,具有足够的刚度并提供更大的扭转范围,扭转角度可以达到 35° ,并且转动

轴线不漂移。实验中将开槽薄壁柔顺关节装载在三自由度并联机构上替代传统R副,运行规定轨迹并与片簧式柔顺关节及刚性副实验结果对比,实验结果说明该关节能够替代刚性R副,在运动精度和稳定性上比片簧式柔顺关节相比有所提高,具有一定的优越性。

参 考 文 献

- 张连杰,刘善增,朱真才. 柔顺机构的研究进展[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(7):108-112.
Zhang Lianjie, Liu Shanzeng, Zhu Zhencai. Recent development of compliant mechanism[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(7): 108-112. (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]. Chinese Journal of 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 parallel manipulators [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 micromanipulator [C] // Proceedings of the 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology, 2007:432-437.
- 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.
- 陈恳,李嘉,董怡,等. 并联微操作手的运动学分析[J]. 中国机械工程,1998,9(7):57-59.
Chen Ken, Li Jia, Dong Yi, et al. Kinematic analysis of the parallel micromanipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,1998, 9(7): 57-59. (in Chinese)
- 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, Staticforces 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 Ping'an. Kinetostatic modeling of 3 DOF planar parallel micro-motion manipulator [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(6): 37-40. (in Chinese)
- Noll T, Holldack K, Reichardt G, 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.
- 杨启志,马履中,尹小琴. 全柔性机构中柔性运动副的结构型式与应用[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003,24(4):9-12.
Yang Qizhi, Ma Lüzhong, Yin Xiaoqin. Type and application of compliant kinematic-pairs in fully compliant mechanism [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003, 24(4): 9-12. (in Chinese)
- 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)
- De Bona F, Zelenika S. Precision positioning devices based on elastic elements: mathematical modelling and interferometric characterization [C] // Seminar on Handling and Assembly of Microparts, 1994.
- Goldfarb M, Speich J E. A well-behaved revolute flexure joint for compliant mechanism design [J]. Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3): 424-429.
- 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 Xin. Structural design and experimental study of a 3-DOF parallel robot with compliant joints [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 余跃庆,崔忠伟,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 Yueqing, Cui Zhongwei, Zhao Xin, 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)

Design and Experiment of Open Thin-walled Flexure Joints of Parallel Robot

Yu Yueqing¹ Ma Lan¹ Cui Zhongwei¹ Li Yuan¹

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

Abstract: Limited motion range and easily happened rotation axis drift are the main disadvantages of traditional flexible joint of parallel robot. In order to promote the performance of flexure joint, a new design of open thin-walled flexure joint was proposed. According to the range of motion of 3RRR parallel robot, the geometry of joint was calculated by using the motion range of joint and the required joint stiffness as design parameters. And the structure strength of joint was analyzed via ANSYS. Torsion is the deformation mode of the open thin-walled flexure joint. The advantages of 36 degrees motion range and fixed rotation axis are presented in this joint. The practical joint is made of 65Mn spring steel according to the designed joint geometry. The contrast experiments between leaf spring and open thin-walled flexure joints were carried out on a three DOF parallel robot experiment platform. The results show the designed open thin-walled flexure joint can accomplish trajectory tracking missions and the maximum relative error is 6.05%. Its superiority over the leaf spring joint is presented by the results.

Key words: Open thin-walled flexure joint Kinematic-pairs Parallel robot