

文章编号 1004-924X(2003)01-0089-05

弹性铰链研究

辛洪兵, 郑伟智, 赵 果

(北京工商大学 机械自动化学院, 北京 100037)

摘要: 弹性铰链是一种在精密机械中广泛应用的新型铰链形式。本文概括了常用的弹性铰链类型, 总结了各种切口形状弹性铰链的特点, 对单轴双圆弧和单轴单圆弧的弹性铰链作了比较, 最后介绍了弹性铰链的加工及应用情况。

关键词: 弹性铰链; 切口形状; 拉伸刚度; 转角刚度

中图分类号: TH131 文献标识码: A

1 引言

近年来, 随着对超精密加工机械和测量器械的导向精度要求越来越高^[1-3], 特别是精密微位移工作台、半导体制造装置等领域应用的精密运动机构对构件间的连接形式提出更高的要求。

弹性铰链以其体积小、无机械摩擦、无间隙、运动灵敏性高等优点广泛地应用于陀螺仪、加速度计、精密天平、导弹控制喷嘴、形波导管天线等仪器仪表中, 并获得了前所未有的高精度和稳定性^[4]。弹性铰链在这些超微定位机构中广泛应用, 从而开创了进入超微定位机构和纳米级的新时代。

弹性铰链是一种带圆弧切口的一体化结构的新型铰链, 如图1所示, 可以用于绕轴作复杂运动的有限角位移, 并且其弹性变形是可逆的。

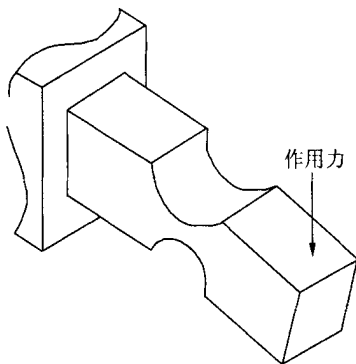
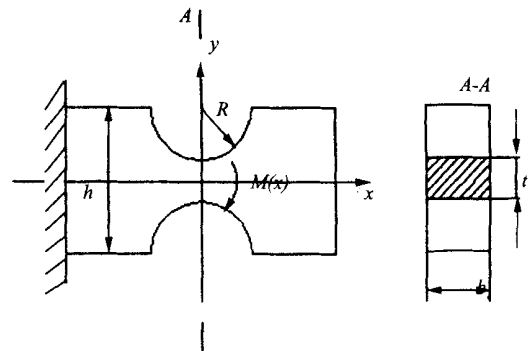


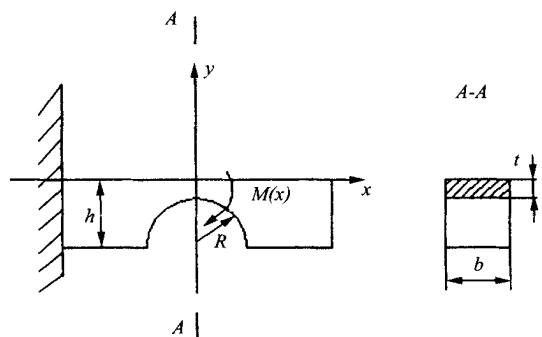
图1 弹性铰链结构简图

Fig. 1 Diagram of flexible hinge



(a) 单轴双圆弧弹性铰链

(a) Double arcs flexible hinge



(b) 单轴单圆弧弹性铰链

(b) Single arc flexible hinge

图2 单轴弹性铰链简图

Fig. 2 Single axis flexible hinge

收稿日期: 2002-08-07; 修订日期: 2002-10-30.

基金项目: 北京市自然科学基金资助 (No. 3032010)

2 弹性铰链的类型

弹性铰链有单轴和双轴两种类型,单轴弹性铰链较双轴弹性铰链应用更为广泛。单轴弹性铰链按截面形状又可分为圆形和矩形两种,由于矩形截面的单轴弹性铰链加工简单,因而最为常用。

矩形截面的单轴弹性铰链有单轴双圆弧和单轴单圆弧两种型式^[5],分别如图 2 中 a, b 所示。

弹性铰链按其切口形状还可以划分为圆弧形、椭圆形、矩形、双曲线形等多种形式。

3 弹性铰链的性能

弹性铰链虽然具有摩擦小、精度高等优点,但另一方面其刚度较低,如果为了弥补这方面缺陷,而将切口部分加厚,则又会因为弹性变形而造成很大的能量损失,使其性能不能充分的发挥;当利用其作微位移放大机构的时候还要考虑其拉伸刚度的影响,因为弹性铰链的拉伸会抵消部分初始发生器的位移,而使放大倍数明显降低。所以,通过研究弹性铰链的各个参数,对弹性铰链的性能进行分析非常重要。

3.1 单轴弹性铰链切口形状的研究

弹性铰链切口形状最初即为圆弧形,现在也依然用的最为广泛,早在 1965 年,美国学者 Paros 便对此形状的弹性铰链作了分析研究,并得出了其设计公式^[6]。后来,有人又开始研究其它切口形状如矩形、椭圆、角部修形的矩形、多次曲线等形状的弹性铰链性能^[7-8]。根据弹性铰链的切口形状的不同,在力学性能上也存在着差异,故要根据不同的场合来选择不同形状的弹性铰链。有人亦在研究一种使弹性铰链的力学性能最好的切口形状,即对弹性铰链形状进行最优化设计^[8-10]。

3.1.1 弹性铰链的拉伸刚度和转角刚度^[6]

1) 拉伸刚度

当在 X 轴向施加拉力 F_x 时,铰链伸长量为:

$$x = \int_x \frac{F_x}{EA(x)} dx = \frac{F_x}{2Eb} \int_x \frac{1}{f(x)} dx, \quad (1)$$

拉伸刚度: $2Eb / \int_x \frac{1}{f(x)} dx$.

2) 转角刚度

当在 Z 轴回转方向施加弯矩 M_x 时,铰链转角为

$$= \int_x \frac{M_x}{EI(x)} dx = \frac{3M_x}{2Eb} \int_x \frac{1}{f^3(x)} dx, \quad (2)$$

转角刚度: $k_a = \frac{2}{3} Eb / \int_x \frac{1}{f^3(x)} dx$.

式中: $f(x)$ 为弹性铰链形状的表达函数, E 为材料弹性模量。

由于弹性铰链中部较为薄弱,此部分产生的弹性变形对铰链功能的贡献最大,因此其最小厚度 t 对铰链性能影响很大。由式(1)、(2)可知,弹性铰链在此处的拉伸刚度和转角刚度分别为 Ebt 和 $Ebt^3/12$,即其拉伸刚度和 t 、 b 成正比,转角刚度和 t^3 、 b 成正比;由此可知,在拉伸刚度限定的情况下,为了提高其弯曲率,应尽量加大 b 值而减小 t 值。

3.1.2 切口形状与弹性铰链性能的关系

(1) 圆形弹性铰链和矩形弹性铰链的比较

矩形形状的弹性铰链如图 3 所示,应用也非常广泛。圆形铰链的弯曲轴的位置较为精确,但允许的侧向变形小,一般在精密器件上作铰支撑。矩形铰链的弯曲轴的位置不精确,但可允许较大的侧向变形。在二者具有相同的轴向刚度时,矩形弹性铰链比圆弧形弹性铰链弯曲率高 45% 以上^[9],但是矩形铰链的角部存在应力集中。通过日本大岩孝彰研究小组做的实验表明,给两种弹性铰链施加相同的弯矩时,圆形弹性铰链应力由两端向中间逐渐增大;矩形形状在中部很大的范围内应力分布较为平坦,但在角部出现显著的应力集中,应力的最大值是中部的 1.8 倍以上;矩形铰链应力最小值和圆弧铰链应力最大值大体相同。

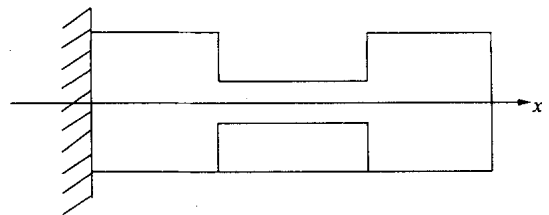


图 3 矩形切口弹性铰链

Fig. 3 Flexible hinge with rectangle notch

(2) 切口形状的改进

为了使弹性铰链易弯,同时又不存在应力集中现象,大岩孝彰等人对矩形角部进行了修形处理,使其变得平滑,并对形状进行了优化。由此得

到的弹性铰链,弯曲率和矩形形状弹性铰链大致相等,而它的应力最大值和矩形形状弹性铰链应力最小值大体相同。在所受最大应力相同的条件下,修形后的铰链转角比圆形大 20%,而矩形则比圆形小 30%。因此,在弹性限度内,对矩形铰链修形后的弹性铰链最易弯。

Wei Xu 与 Tim King 研究了将矩形角部用圆弧进行代替,并对椭圆形状进行了性能分析^[7]。设 $t = 2 \text{ mm}$, 限定最大应力值为 200 MPa 的条件下,矩形形状角部用圆弧进行修整后(角圆半径为 0 时矩形形状,为 1 mm 时圆弧形状),矩形角圆的最佳半径约 0.4 mm 。椭圆切口形状,短轴半径从 0 到 1 mm 范围变化(等于 0 时为矩形,等于 1 mm 时为圆),椭圆最佳短轴半径 0.04 mm 。

(3) 弹性铰链的最优切口形状

大岩孝彰等人通过对优化设计及对 2~9 次高次函数的切口形状弹性铰链的分析,最后得到了最佳形状的近似表达式^[9]:

$$\begin{aligned}
 &0 < x < 0.1 \text{ 时}, y = 0.1 \\
 &0.1 < x < 0.3 \text{ 时}, \\
 &y = 1\,357.8x^6 - 1\,496.3x^5 + 6\,732.9x^4 \\
 &- 1\,575.2x^3 + 201.59x^2 + 13.345x + 0.4564. \quad (3)
 \end{aligned}$$

3.2 单轴双圆弧与单轴单圆弧弹性铰链的性能比较

单轴双圆弧与单轴单圆弧弹性铰链是应用非常广泛的两种类型。其结构分别如图 2 中(a)、(b)所示。

3.2.1 单轴双圆弧弹性铰链的拉伸刚度和转角刚度^[5]

设 $h = 2R + t, \quad \rho = \frac{t}{2R}$

(1) 在轴向力 F_x 作用下沿 X 轴的线位移 x 和拉伸刚度 k_x

由式(1)可求得线位移和轴向刚度

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{F_x}{Eb} D_x, \quad k_x = \frac{Eb}{D_x} \\
 D_x &= \frac{2(1+\rho)}{\sqrt{2+\rho^2}} \arctan \sqrt{\frac{2+\rho}{2-\rho}} - \frac{\rho}{2}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

当 $t \ll R$ 时,轴向刚度可简化为:

$$D_x = \left(\frac{R}{t}\right)^{\frac{1}{2}} - 2.57.$$

(2) 在弯矩 M_x 作用下绕 Z 轴的偏转角 θ 和转角刚度 k

由计算公式(2)可求得转角及转角刚度

$$\begin{aligned}
 &= \frac{M_x}{EbC_z}, \quad k = EbC_z \\
 C_z &= \frac{2R^2}{3} \int \frac{3+4\rho+2\rho^2}{(1+\rho)(2+\rho^2)^2} + \\
 &\frac{6(1+\rho)}{(2+\rho^2)^{5/2}} \arctan \sqrt{\frac{2+\rho}{2-\rho}} J^{-1}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

当 $t \ll R$ 时,上式可简化为 $C_z = \frac{2t^{5/2}}{9R^{1/2}}$ 。

上述式中, R 为弹性铰链圆弧半径, M_x 为作用于弹性铰链上的弯矩, t 为弹性铰链薄壁厚度, h 为弹性铰链厚壁厚度, b 为弹性铰链高度, E 为材料的弹性模量。

3.2.2 单轴单圆弧弹性铰链的拉伸刚度和转角刚度^[5]

设 $h = R + t, \quad \rho = \frac{t}{R}$

(1) 在轴向力 F_x 作用下沿 X 轴的线位移 x 和拉伸刚度 k_x

由式(1)可求得线位移和轴向刚度

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{F_x}{Eb} D_x, \quad k_x = \frac{Eb}{D_x} \\
 D_x &= \frac{4(1+\rho)}{\sqrt{2+\rho^2}} \arctan \sqrt{\frac{2+\rho}{2-\rho}} - \rho, \quad (6)
 \end{aligned}$$

(2) 在弯矩 M_x 作用下绕 Z 轴的偏转角 θ 和转角刚度 k

由式(2)可求得转角及转角刚度

$$\begin{aligned}
 &= \frac{M_x}{EbC_z}, \quad k = EbC_z \\
 C_z &= \frac{R^2}{12} \int \frac{3+4\rho+2\rho^2}{(1+\rho)(2+\rho^2)^2} + \\
 &\frac{6(1+\rho)}{(2+\rho^2)^{5/2}} \arctan \sqrt{\frac{2+\rho}{2-\rho}} J^{-1}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

R 越大、 t 值越小,则弹性铰链越“软”,即转角刚度降低,柔性铰链的弯曲抗力也就减小。单轴双圆弧与单轴单圆弧弹性铰链的转角刚度比较如表 1 所示。

表 1 单轴双圆弧与单轴单圆弧弹性铰链转角刚度比值
Table 1 Bend rigidity comparison between single axis double arcs and single arc flexible hinges

t/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
R/mm								
0.5	1.263	1.188	1.146	1.119	1.100	1.087	1.077	1.068
1.0	1.326	1.263	1.219	1.188	1.164	1.146	1.131	1.119
1.5	1.353	1.302	1.263	1.232	1.208	1.188	1.171	1.158
2.0	1.368	1.326	1.292	1.263	1.239	1.219	1.203	1.188
2.5	1.377	1.342	1.312	1.285	1.263	1.244	1.227	1.212
3.0	1.383	1.353	1.326	1.302	1.281	1.263	1.247	1.232
3.5	1.388	1.361	1.337	1.316	1.296	1.279	1.263	1.249
4.0	1.388	1.368	1.346	1.326	1.308	1.292	1.277	1.263

从表中可以看出单轴双圆弧比单轴单圆弧弹性铰链的转角刚度要大,并且随着 R/t 值的增加,而变得越发明显。

4 弹性铰链的材料选择及加工

为了使弹性铰链具有良好的变形可恢复性及较高的疲劳强度,应当选择弹性模量较大的材料。现今应用较多的材料有弹簧钢 65 Mn,有时也采用钛、铍铜等金属材料。

弹性铰链组成的机构通常为一体化结构。为

参考文献:

- [1] 干东英,王立鼎. 微型机械的现状与发展[J]. 机械工程学报,1994,30(2):1-8.
GAN D Y, WANG L D. Development and prospects of microelectro mechanical system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1994,30(2):1-8. (in Chinese)
- [2] 宣明. 微型机械及相关理论和技术[J]. 光学 精密工程,1994,2(3):1-5.
XUAN M. Micromechanism and their related theory and technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994,2(3):1-5. (in Chinese)
- [3] 周兆英,叶雄英. 微米纳米技术及微型机电系统[J]. 光学 精密工程,1998,6(1):1-7.
ZHOU Zh Y, YE X Y. Micro-nano technology and microelectro mechanical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998,6(1):1-7. (in Chinese)
- [4] 薛实福,李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
XUE Sh F, LI Q X. *Precision instrument design* [M]. Beijing: Tsinghua Publishing, 1991.
- [5] 王建林. 三维一体化超微定位技术及系统的研究[D]. 天津:天津大学,1997.
WANGJ L. *Study on the three-dimensional integration ultra microlocation technology and system* [D]. Tianjin University, 1997. (in Chinese)
- [6] PAROS J M, WEISBORD L. *How to design flexure hinges* [M]. Machine Design, 1994.
- [7] XU W, KING T. Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations [J]. *Precision Engineering*, 1996,19:4-10.
- [8] 大岩孝彰,松永高宏. 弹性 ヒンジの形状最適化设计[A]. 1997 年度精密工学会春季大会论文集[C]. 1997. 1151-

了保证弹性铰链的制造精度,一般采用电火花线切割进行加工。

5 弹性铰链的应用状况

弹性铰链在精密机械中,常常被用来制做微位移放大装置。压电陶瓷微位移驱动器件以其体积小、驱动力大、分辨率高、不发热、易于控制等特点,受到人们的关注,但其位移输出较小,所以往往不能直接应用到实践中,这时,就可采用弹性铰链做成微位移放大机构将其输出位移进行放大,从而使其应用领域大大拓宽。具体应用实例有微动工作台、微型机械手、扫描显微镜探针、压电打字机等。

6 结 论

目前,弹性铰链机构在精密机械中的应用日趋广泛,从 50 年代人们初步开发出弹性铰链机构到现在几十年的时间内,国内外已经对弹性铰链的各个方面都进行了较为细致的研究,但其刚度分析和参数设计较为复杂,从而使其应用受到局限。所以,以后还需对其刚度分析进行简化,对形状及参数设计进一步优化。

1152.

OIWA T, MATSUNAGA T. Shape optimization design for flexure hinges[A]. *Proceedings of Spring Conference of Precision Engineering Society* [C]. 1997,1151-1152.

[9] 大岩孝彰,杉本敏彦. 弹性 ヒンジの形状最適化 に関する研究[J]. 精密工学会志,1997,63(10):1445-1458.

OIWA T, SUGIMOTO T. Shape optimization for flexure hinges[J]. *Journal of Precision Engineering*, 1997,63(10):1445-1458.

[10] 大岩孝彰,松永高宏. ねじり型弹性 ヒンジに関する研究[J]. 精密工学会志,2000,66:955-959.

OIWA T, MATSUNAGA T. A study on torsional elastic hinge[J]. *Journal of Precision Engineering*, 2000,66:955-959.

Research on flexible hinges

XIN Hong-bing ,ZHENG Wei-zhi ,ZHAO Fu

(*School of Mechanical Engineering and Automation ,
University, Beijing 100037, China*)

Abstract : Flexible hinge is a new type of hinge widely used in precision machines. The types and the characteristics of flexible hinges with different notches are summarised ,and single axis-double circular hinges are compared with single axis-single circular notch hinges. The fabrication and application of flexible hinges are discussed as well.

Key words : flexible hinges ; notch type ; tensile strength ; bend rigidity

作者简介:辛洪兵(1968 -) ,男 ,辽宁省大连人 ,任教于北京工商大学机械自动化学院 ,副教授 ,博士 ,中国机械工程学会高级会员。研究领域为机械学、机械制造 ,译著 1 本 ,参编教材 2 本 ,发表论文 38 篇。E-mail :hsinhb @263. net
郑伟智(1978 -) ,男 ,河北省保定市 ,北京工商大学机械自动化学院硕士研究生 ;
赵 果(1972 -) ,男 ,吉林省长春市 ,北京工商大学机械自动化学院讲师 ,工学硕士。