

## 加工误差影响柔性铰链机构位移性能的有限元分析\*

沈剑英 杨世锡 周庆华 严拱标

**【摘要】** 提出一种柔性铰链机构的参数化有限元建模方法,利用有限元软件 ANSYS 提供的参数化程序设计语言 APDL 编制程序,在 ANSYS 中自动生成有限元分析模型。采用该方法分析了柔性铰链最小厚度,切割半径、宽度的加工误差,以及切割圆弧轴心线绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转角误差对柔性铰链机构位移性能的影响情况。分析结果表明,柔性铰链最小厚度的加工误差是对柔性铰链机构位移性能影响最大的因素。

**关键词:** 柔性铰链机构 加工误差 有限元分析

**中图分类号:** TH132;TP391.72

**文献标识码:** A

## Finite Element Analysis of Displacement Performances of Flexure Hinge Mechanism Affected by Machining Errors

Shen Jianying<sup>1</sup> Yang Shixi<sup>2</sup> Zhou Qinghua<sup>1</sup> Yan Gongbiao<sup>2</sup>

(1. Jiaxing University 2. Zhejiang University)

### Abstract

A parametric modeling method of flexure hinge mechanism was proposed. Using this method, the finite element analysis model could be automatically created by the document programmed with the parametric language APDL provided by the finite element software ANSYS. The influence of the displacement performances of flexure hinge mechanism was analyzed, which was affected by machining errors of the minimum hinge thickness, the cutting radius and the width, and the angular errors of the part axes with respect to  $x$ ,  $y$  and  $z$  axis. The results demonstrate that the machining error of the minimum hinge thickness is the main factor to all the machining errors.

**Key words** Flexure hinge mechanism, Machining error, Finite element analysis

### 引言

柔性铰链机构是一种新型的微位移机构,具有无机械摩擦、无间隙、无热源、加工简单及运动灵敏性高等优点,能够实现纳米分辨率定位。然而,加工误差的存在影响柔性铰链机构的输出位移性能, Jae<sup>[1]</sup>等人利用计算机自动产生柔性铰链机构加工误差的计算模型,分析了多种加工误差因素对其位移性能的影响情况。但仅考虑柔性铰链圆弧部分的弯曲变形,把其它部分都看作刚体;实际上,连杆部

分也会产生变形,输出位移和实际情况有差别。本文在提出柔性铰链机构参数化有限元建模方法的基础上,采用大型有限元软件 ANSYS 分析柔性铰链机构受加工误差影响的位移性能。

### 1 柔性铰链机构

由于设计和制造相对简单和准确,最常用的是直圆弧型柔性铰链<sup>[2]</sup>,它的基本结构见图 1,其中  $R$  为柔性铰链的切割半径, $t$  为柔性铰链的最小厚度, $b$  为柔性铰链的宽度, $h$  为柔性铰链的高度。柔性铰

收稿日期: 2006-03-17

\* 浙江省自然科学基金资助项目(项目编号:502021)

沈剑英 嘉兴学院机电工程学院 副教授, 314001 浙江省嘉兴市

杨世锡 浙江大学机械与能源工程学院 教授, 310027 杭州市

周庆华 嘉兴学院机电工程学院 副教授

严拱标 浙江大学机械与能源工程学院 教授

链的中部较为薄弱,在力矩作用下可以产生较明显的弹性角变形,能在机械结构中起到铰链的作用。柔性铰链的转动刚度  $k_a$  是最重要的性能参数,计算公式<sup>[3]</sup>为

$$k_a = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (1)$$

式中  $E$ ——材料的弹性模量

双平行四杆柔性铰链机构可简化为图2所示的形式,由于结构对称,在力  $F$  作用下,沿作用力方向产生位移  $s$  时,在其垂直方向不会产生一个交叉耦合位移误差<sup>[4]</sup>。

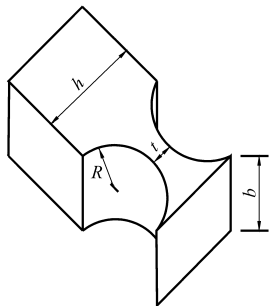


图1 柔性铰链结构示意图

Fig.1 Diagram of flexure hinge

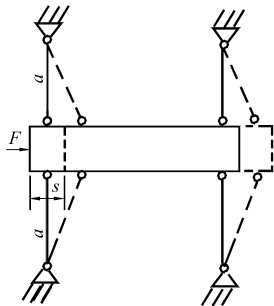


图2 双平行四杆柔性铰链机构示意图

Fig.2 Double parallel four-bar flexure hinge mechanism

## 2 参数化有限元建模

有限元法是变形分析计算中主要方法,用 ANSYS 分析柔性铰链机构的位移,首先要建立它的几何实体模型和有限元模型,然后进行求解。利用 APDL 语言编制命令流文件,实现参数化有限元建模,可以方便地分析柔性铰链机构的位移,以及克服人机交互方式下操作费时、枯燥和容易出错的缺点。

下面以双平行四杆柔性铰链机构为例,说明用 APDL 语言编制命令流文件实现参数化有限元建模的步骤:

### (1) 确定几何实体建模方法

在人机交互方式下或用 APDL 语言编制命令流文件,ANSYS 都提供了 2 种几何实体建模方法,即自下向上的建模方法和自上而下的建模方法。自上而下的建模方法用于直接创建最高级的图元,如长方体、圆柱体等,在创建复杂的几何实体模型时,可以用布尔运算(加、减、分割等)来生成。根据双平行四杆柔性铰链机构的结构特征,采用自上而下的建模方法。

### (2) 求关键点的坐标,生成几何实体模型

参数化建模是指先用一组参数来定义几何图形尺寸数值并约束尺寸关系,在几何造型时得到一簇

在形状上具有相似性而结构尺寸有所差异的实体。图3是平行四杆柔性铰链机构的尺寸约束示意图,该机构结构对称,尺寸大小由参数  $L$ 、 $W$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $h$ 、 $R$  和  $t$  决定。创建长方体、圆柱体等单元要知道关键点的坐标,根据图3中的尺寸约束关系能方便地计算出关键点的坐标,点1、2、3和4的坐标分别为

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{W}{2} \\ y_1 = \frac{n}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = -\frac{W}{2} + \frac{h}{2} - \frac{t}{2} - R \\ y_2 = -\frac{n}{2} - R \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_3 = -\frac{W}{2} + \frac{h}{2} - \frac{t}{2} - R \\ y_3 = -\frac{n}{2} - R - a \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_4 = -\frac{W}{2} \\ y_4 = -\frac{L}{2} \end{cases} \quad (5)$$

其它关键点的坐标不再详细列出。改变式(2)~(5)中的参数值,就可以得到形状相似而尺寸不同的双平行四杆柔性铰链机构。

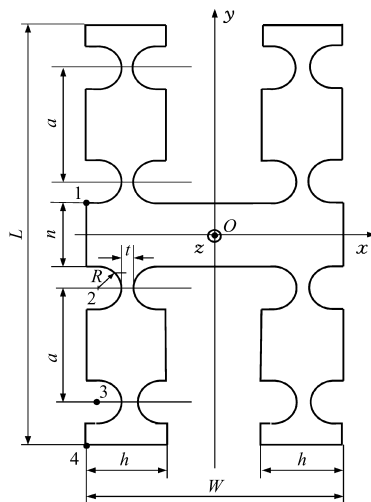


图3 双平行四杆柔性铰链机构尺寸约束图

Fig.3 Dimension constraint diagram of double parallel four-bar flexure hinge mechanism

### (3) 建立有限元模型的前处理

确定材料特性,如弹性模量、泊松比;确定网格的单元类型、划分精度,设置边界条件及载荷大小等。

### (4) 用 APDL 语言编程

APDL 语言编程比较容易,调试也比较简单。打开文本编辑器,如写字板、记事本等,就可以直接进行参数化命令流的编写,最后以 double.txt 文件名

存盘。

### (5) 运行 double.txt

启动 ANSYS 软件, 进入图形用户界面, 点击实用菜单 (Utility Menu), 在弹出的下拉菜单中, 再点击 Read Input from 菜单项, 根据提示, 找到文件 double.txt。接着, ANSYS 软件就自动运行。图 4 为生成的几何实体模型, 图 5 为生成的有限元模型。

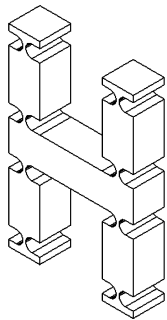


图 4 几何实体模型  
Fig. 4 Geometric solid model

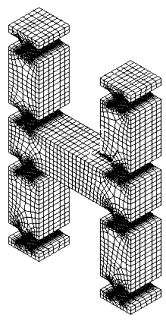


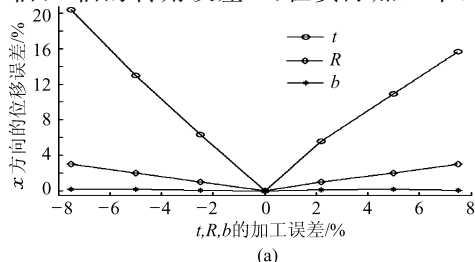
图 5 有限元模型  
Fig. 5 Finite element model

如果要生成一个新的分析模型, 只要改变程序中相关的参数值, 生成一个新的文件, ANSYS 运行后, 就能很快得到所需的新模型, 因此, 采用 APDL 语言编制命令流文件进行参数化有限元建模, 建模速度快、方便, 不易出错。

## 3 有限元分析

### 3.1 加工误差因素

柔性铰链利用结构薄弱部分的弹性变形完成运动的传递, 因此, 它是柔性铰链机构实现微位移的关键部位, 它的加工精度直接影响到柔性铰链机构的位移性能。所以, 分析加工误差因素对指导柔性铰链机构的设计和制造有重要作用。柔性铰链机构的加工误差因素主要有: ① 铰链最小厚度  $t$ 、切割半径  $R$ 、宽度  $b$  的加工误差; 由图 1 知, 柔性铰链的基本结构参数为铰链最小厚度  $t$ 、切割半径  $R$ 、宽度  $b$ , 在实际加工中, 这 3 个参数存在加工误差。② 切割圆弧轴心线绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转角误差<sup>[1]</sup>: 在实际加工中,



切割圆弧轴心线在  $yOz$  平面里有绕  $x$  轴的转角误差  $\theta_x$ , 轴心线在  $xOz$  平面里有绕  $y$  轴的转角误差  $\theta_y$ , 轴心线在  $xOy$  平面里有绕  $z$  轴的转角误差  $\theta_z$ 。

### 3.2 加工误差的影响分析

力  $F$  加在  $x$  方向上, 柔性铰链机构沿  $x$  方向平动, 应该仅在  $x$  方向上有位移, 在  $y$ 、 $z$  方向上无位移, 也不产生转动; 但实际上, 由于存在加工误差,  $x$  方向的位移值偏离理想值,  $y$ 、 $z$  方向上也有位移 (即耦合误差), 同时, 柔性铰链机构绕  $x$  轴有一个角度误差  $\phi_x$ , 绕  $y$  轴有一个角度误差  $\phi_y$ , 绕  $z$  轴有一个角度误差  $\phi_z$ 。

用 ANSYS 分析时, 建立标准模型,  $t=1$  mm,  $R=2$  mm,  $b=10$  mm,  $h=10$  mm,  $a=20$  mm, 材料为铝合金 (弹性模量为 68 GPa, 泊松比为 0.35)。分网时采用高精度三维实体单元 SOLID45。

用 ANSYS 软件分析时, 取铰链最小厚度  $t$ 、切割半径  $R$ 、宽度  $b$  的加工误差为标准模型给定值的  $\pm 2.5\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 7.5\%$ , 切割圆弧轴心线绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转角误差  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  分别为  $\pm 2.5$  mrad、 $\pm 5$  mrad、 $\pm 7.5$  mrad。分析结果见图 6~11。

从图 6a 得到, 铰链最小厚度  $t$  的加工误差对柔性铰链机构  $x$  方向的输出位移影响很大。当  $t$  的加工误差为  $2.5\%$  时,  $x$  方向的位移误差为  $5.6\%$ , 而当  $t$  的加工误差为  $-7.5\%$  时,  $x$  方向的位移误差为  $20.7\%$ 。

$\theta_x$ 、 $\theta_y$  对柔性铰链机构  $z$  方向的位移影响也较大。当  $\theta_x$  的加工误差为  $7.5$  mrad 时,  $z$  方向的位移误差为  $10\%$ , 当  $\theta_y$  的加工误差为  $7.5$  mrad 时,  $z$  方向的位移误差为  $7.9\%$ , 见图 8b。

$\theta_x$ 、 $\theta_y$  对柔性铰链机构的转动误差  $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$  影响也较大。当  $\theta_x$  的加工误差为  $7.5$  mrad 时,  $\phi_x$  的转动误差为  $6.7\%$  (见图 10b); 当  $\theta_y$  的加工误差为  $7.5$  mrad 时,  $\phi_x$  的转动误差为  $5.8\%$  (见图 9b),  $\phi_y$  的转动误差为  $6.3\%$  (见图 10b),  $\phi_z$  的转动误差为  $7.3\%$  (见图 11b)。

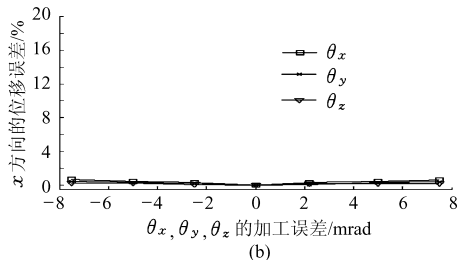


图 6 柔性铰链机构沿  $x$  方向的位移误差

Fig. 6 Displacement errors of flexure hinge mechanism in the  $x$  direction

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

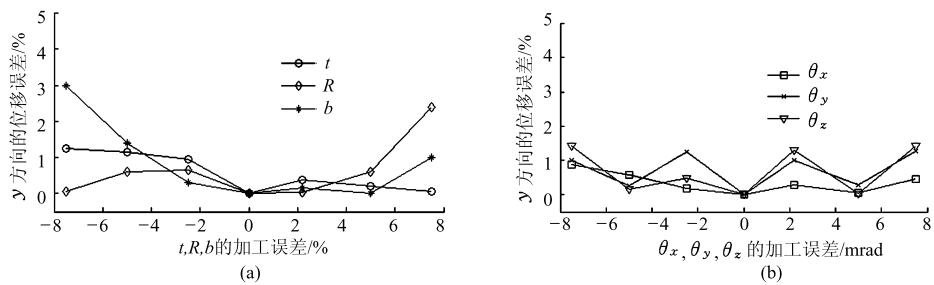


图7 柔性铰链机构沿 y 方向的位移误差

Fig. 7 Displacement errors of flexure hinge mechanism in the y direction

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

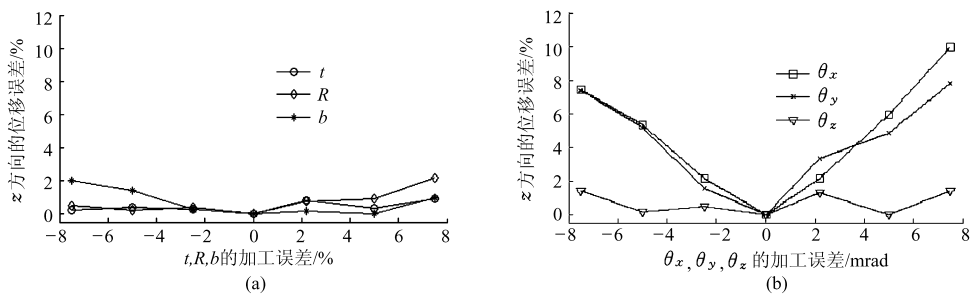


图8 柔性铰链机构沿 z 方向的位移误差

Fig. 8 Displacement errors of flexure hinge mechanism in the z direction

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

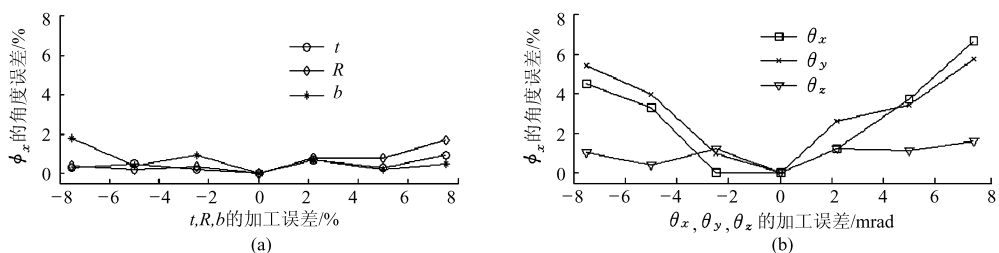


图9 柔性铰链机构绕 x 轴的角度误差

Fig. 9 Rotating errors of flexure hinge mechanism about the x axis

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

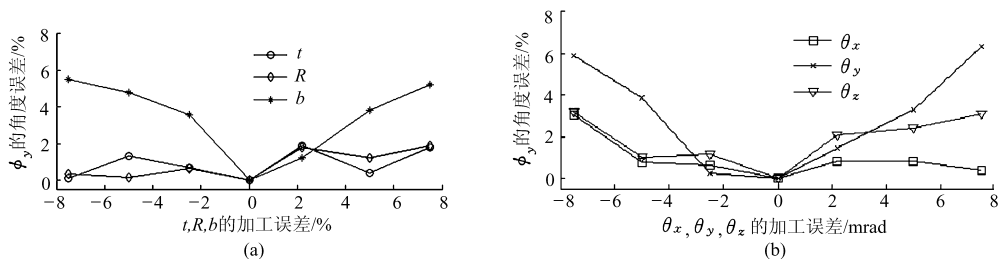


图10 柔性铰链机构绕 y 轴的角度误差

Fig. 10 Rotating errors of flexure hinge mechanism about the y axis

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

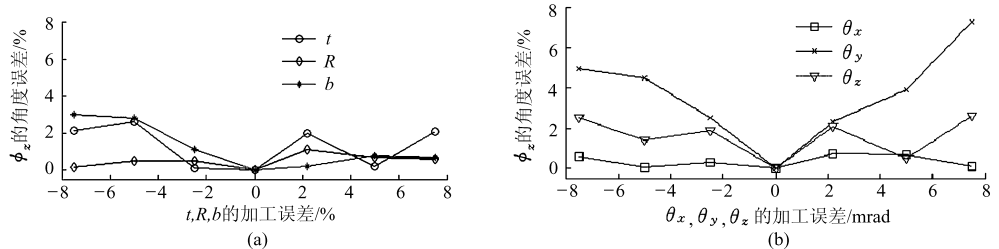


图11 柔性铰链机构绕 z 轴的角度误差

Fig. 11 Rotating errors of flexure hinge mechanism about the z axis

(a) 结构参数加工误差的影响 (b) 转角误差的影响

法。

可采用标准3轴铣刀路进行编程,首先对所得3D曲线进行旋转,如图11所示,将展开方向(设计坐标的Z轴方向)旋转至加工坐标的Y轴方向。

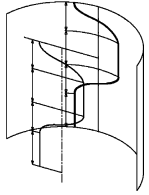


图10 位移曲线的坐标变换示意图

Fig.10 Coordinate transformation of motion curve

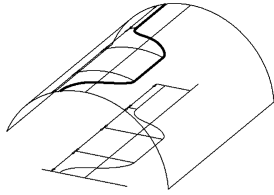


图11 应用CAM软件编程示意图

Fig.11 Practical CAM programming

应用CAM软件沿3D曲线进行数控编程,即可按范成法加工出符合上述要求的圆柱凸轮槽。但编程时不能选用与实际加工相符的立铣刀,必须使用直径很小的球刀,甚至可用直径为零的铣刀进行编程,不然会发生刀路的偏移。如图12所示,如选用

与实际加工相符的 $\phi 20$ 立铣刀编程,刀路产生图中的偏移,但实际生成的刀路必须与3D曲线重合。

应用CAM软件生成刀路,并后置处理,用第4轴(转动轴)A替换程序中的Y,用Y替换程序中的Z,并人工进行编辑加入进、退刀,即可得到用于圆柱凸轮凹槽加工的4轴数控程序。

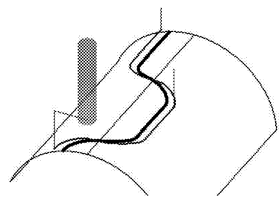


图12 刀路偏移示意图

Fig.12 Deviation in toolpath

## 4 结束语

按圆柱曲面展开进行摆动从动件圆柱凸轮凹槽轮廓线的3D展开,并运用坐标变换及数控编程对圆柱凸轮凹槽轮廓线进行设计和加工,是解决摆动从动件圆柱凸轮在工作过程中运动轨迹存在误差、摆动从动件发生“卡死”的有效方法。

## 参 考 文 献

- 1 Psang D L, Ming F L. NC data generation for 4-axis machine tools equipped with rotary angle head attachments to produce variable pitch screws[J]. Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(3): 341~353.
- 2 Zietarski S L. System integrated product design, CNC programming and postprocessing for three-axis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(3): 294~299.
- 3 Arunava B S. A comparison of approximate methods for the analytical determination of profiles for disk cams with roller followers[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(6): 645~656.
- 4 Omirou S L. A locus tracing algorithm for cutter offsetting in CNC machining[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(1): 49~55.
- 5 陈俊华,张美琴,盛刚. 基于通用CAM软件的圆柱凸轮数控编程[J]. 机械制造, 2005, 43(3): 17~19.
- 6 陆金贵. 凸轮制造技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.

(上接第136页)

## 4 结束语

基于有限元软件ANSYS提供的APDL语言,提出了一种快速又方便的柔性铰链机构参数化有限元建模方法,并采用该方法分析了加工误差对柔性铰链机构输出位移的影响。分析结果表明,柔性铰链

最小厚度 $t$ 的加工误差对 $x$ 方向的位移性能影响很大,切割圆弧轴心线绕 $x$ 轴、 $y$ 轴的转角误差 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 对 $z$ 方向的位移误差影响也较大,另外,切割圆弧轴心线绕 $x$ 轴、 $y$ 轴的转角误差 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 对柔性铰链机构的转角 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ 影响也较大;在所有因素中,柔性铰链最小厚度 $t$ 的加工误差影响最大。

## 参 考 文 献

- 1 Jae W Ryu, Dae-Gab Gweon. Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection[J]. Precision Engineering, 1997, 21(2/3): 83~89.
- 2 吴鹰飞,周兆英. 柔性铰链的应用[J]. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1615~1618.
- 3 Paros J M, Weisboro L. How to design flexure hinge[J]. Machine Design, 1965, 37(27): 151~157.
- 4 纪华伟,杨世锡,吴昭同. 一体化微操作器误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 136~140.