

圆环驻波超声波马达振子的有限元分析及振型测试*

刘景全 杨志刚 吴博达 程光明
(吉林工业大学机械工程系 长春 130025)

摘要 采用有限元方法比较系统地分析了圆环驻波超声波马达振子弹性体的结构尺寸对其固有频率的影响, 为设计和加工振子提供了理论依据; 通过有限元比较精确地计算了马达振子 B_{14} 振型的固有频率。经对振子试机的振型测试, 验证了有限元分析的准确性。

关键词 超声波马达 振子 有限元

1 引言

超声波马达是将压电元件的机械振动加以变换, 并借助摩擦而连续输出位移或旋转的驱动机构。具有直接驱动、控制准确灵敏、可变化多种结构、不产生也不接受磁干扰等优点。因而在高精密设备、仪器仪表等领域有较为广泛的应用价值^[1-3]。

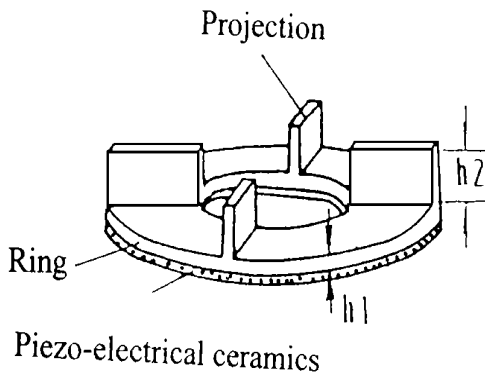


Fig 1 Structure of the vibrator

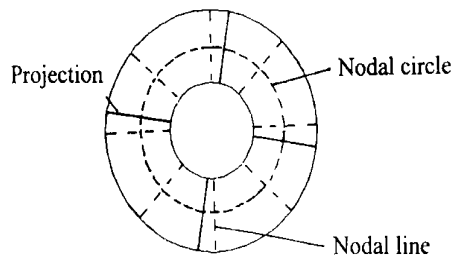


Fig 2 B_{14} vibration mode of the vibrator

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1998-01-13

圆环超声波马达以其薄而中空、轻小简单等优点引起了广泛关注。笔者提出了仅用一组压电陶瓷激励带凸起的圆环,使凸起顶部形成椭圆运动,从而实现驱动的马达^[4]。图 1 为文献[4]所采用的振子。其驱动原理要求振子形成如图 2 所示的 B_{14} 振型(下角标 1 代表节圆数,4 代表节径数)。该文献在设计振子结构尺寸和求解振子固有频率时,采用了解析法。由于振子结构复杂,该文忽略了压电陶瓷和凸起的影响,因而只能粗略计算振子的振动状态。本文在此基础上采用有限元方法来分析振子。首先分析圆环尺寸;之后分析振子弹性体,即由圆环和凸起构成;最后分析压电振子。振子弹性体的材料为 45# 钢,压电陶瓷为 PZT-42 型,边界条件均为自由。

2 圆环尺寸对圆环固有频率的影响

圆环的形状是由外半径 a , 内半径 b 及厚度 h_1 决定。首先分析 b/a 对圆环固有频率的影响。 a 取 25mm, h_1 取 2mm, b/a 分别取 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9。对应建立有限元模型。图 3 为有限元分析圆环的一个模型。计算结果如图 4 所示。由图可知,当 b/a 在 0 到 0.5 之间时,曲线呈下降趋势; b/a 在 0.5 到 0.9 之间时,曲线呈上升趋势。对圆环超声波马达而言, b/a 选在 0.3 到 0.7 之间为宜。本文 b/a 取 0.4。

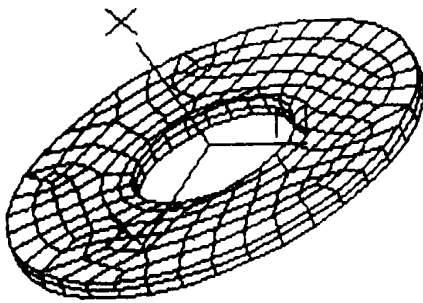


Fig 3 FEM mode of the ring

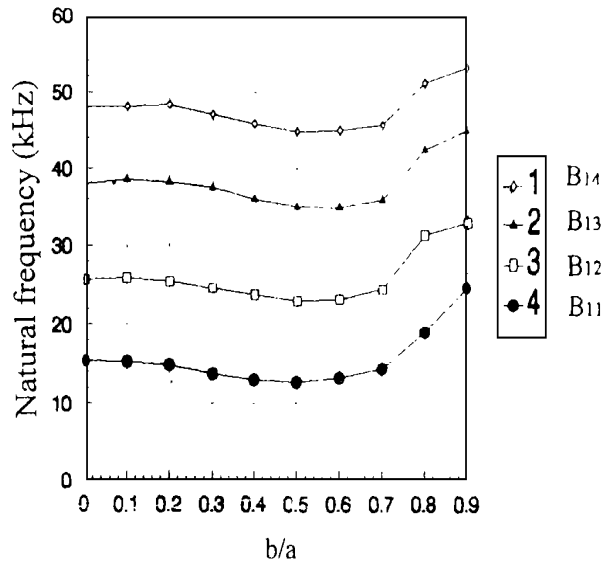


Fig 4 b/a of inner and external diameter of the ring versus the natural frequency of the ring

当 b/a 取 0.4, h_1 取 2mm, 圆环外直径 $2a$ 分别取 $\varnothing 15\text{mm}$, $\varnothing 20\text{mm}$, $\varnothing 30\text{mm}$, $\varnothing 35\text{mm}$, $\varnothing 40\text{mm}$, $\varnothing 50\text{mm}$, $\varnothing 55\text{mm}$, $\varnothing 60\text{mm}$, 对应建立有限元模型并进行计算。图 5 为圆环外直径与圆环固有频率的关系曲线。由图可见,随着圆环外直径增加,圆环固有频率呈下降趋势。当尺寸在

15mm 和 40mm 之间时, 曲线迅速下降, 这表明, 在此区域内圆环外直径稍有变化, 其固有频率就变化较大。因而要求该段尺寸加工精度较高。当尺寸大于 40mm 时, 曲线变化较平缓, 该段尺寸加工精度要求不高。本文选取圆环外直径为 $\varnothing 50\text{mm}$ 。

当 b/a 取 0.4, 圆环外直径 $2a$ 取 $\varnothing 50\text{mm}$, 厚度 h_1 分别取 1mm, 1.5mm, 1.8mm, 2mm, 2.2mm, 2.5mm, 3mm, 4mm, 对应建立有限元模型。图 6 为有限元计算后的结果。由图可分析出: 对于同一振型, 圆环的固有频率随着环厚的增加基本呈线性上升趋势; 不同振型所对应直线的斜率随着振型阶次的提高而增大。由此可知, 可通过改变圆环的厚度来有效地改变圆环的固有频率。本文选取圆环厚度 h_1 为 2mm。

3 振子弹性体尺寸对其固有频率的影响

振子弹性体中凸起的尺寸是由凸起的长度、宽度和高度确定。圆环外直径 $2a$ 取 $\varnothing 50\text{mm}$, 内外半径比 b/a 取 0.4, 厚 h_1 取 2mm。



Fig 5 Diameter of the ring (2a) versus the natural frequency of the ring

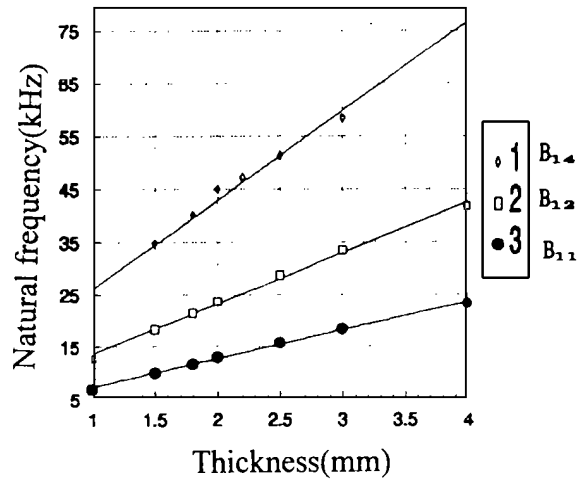
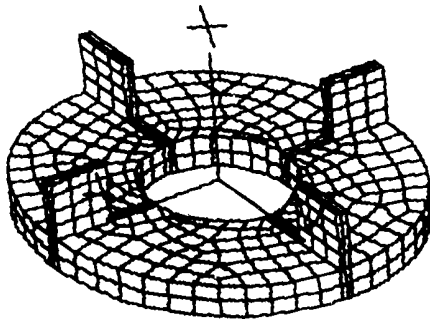
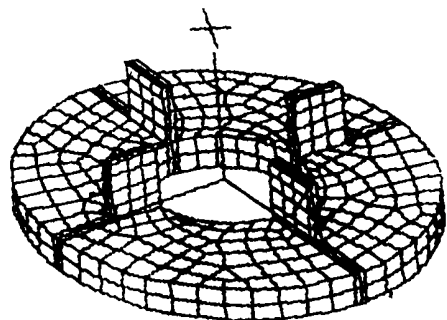


Fig 6 Thickness of the ring versus the natural frequency of the ring



(a) Changing length from outer to inner



(b) Changing length from inner to outer

Fig 7 FEM mode of the length of projection

先分析凸起长度对振子弹性体固有频率的影响。凸起宽度取 1.5mm, 高度取 7.5mm。凸起在长度方向由外向里分别取 1.5mm, 3mm, 5mm, 7mm, 15mm, 对应建立有限元模型。图 7 (a) 为其中的一个有限元模型; 凸起在长度方向由里向外分别取 5mm, 7mm, 9mm, 11mm, 13mm, 15mm, 对应建立有限元模型, 图 7(b) 为其中一有限元模型。有限元计算结果见图 8。由图可分析出, 无论凸起长度是由外向里变化, 还是由里外变化, 对应的 B14 振型的固有频率变化较小, 而且凸起长度由外向里增加时, 振子弹性体固有频率变化更平缓。在此意义上, 可较灵活地设计凸起的长度, 本文选凸起的长度为 15mm。

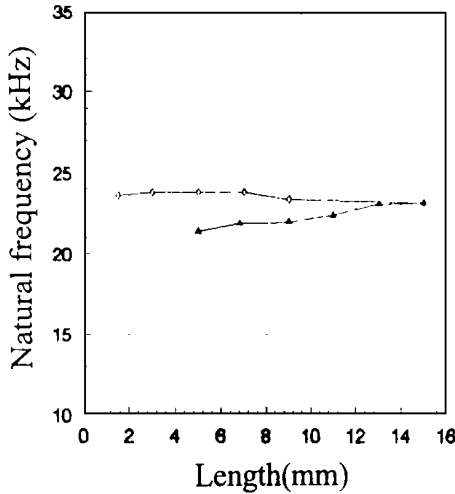


Fig 8 Length of projection versus natural frequency of the elastic body

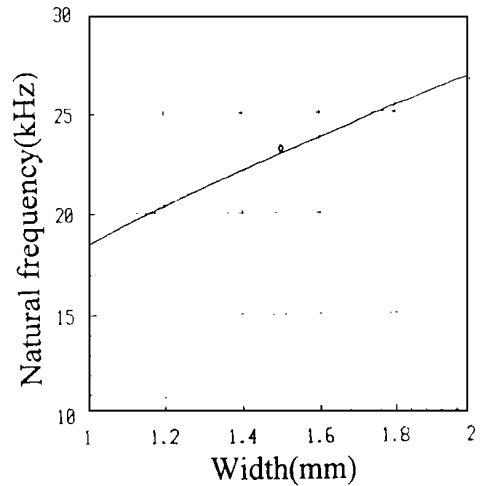


Fig 9 Width of the projection versus natural frequency of the elastic body

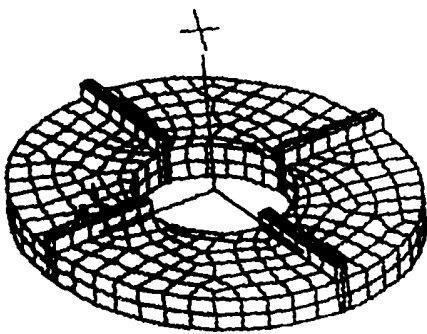


Fig 10 FEM mode of the height of projection versus natural frequency of the elastic body

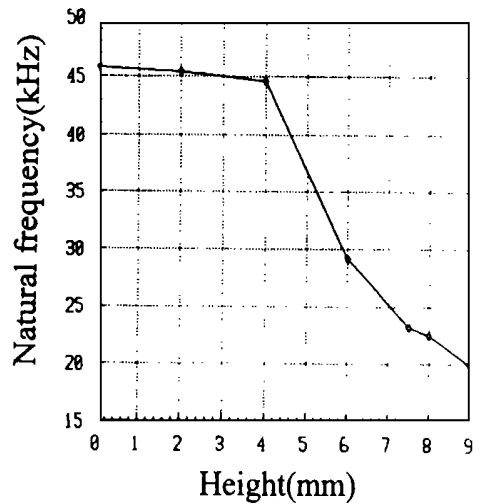


Fig 11 Height of projection versus natural frequency of the elastic body

凸起宽对振子弹性体固有频率的影响。凸起长取 15mm, 高取 7.5mm, 凸起宽分别取 1mm, 1.5mm, 2.0mm, 相应建立有限元模型, 其计算结果见图 9。当凸起宽度增加时, 振子弹性

体 B_{14} 振型的固有频率基本呈线性增加。由此可知凸起宽度方向尺寸加工精度要求较高,要避免产生加工变形同时要注意保证四凸起的位置精度。本文选取凸起宽为 1.5mm 。

凸起高度 h_2 对振子弹性体固有频率的影响,凸起的长度为 15mm ,宽度为 1.5mm ,高分别取 2mm , 4mm , 6mm , 7.5mm , 8mm , 9mm , 10mm ,对应建立有限元模型。图10为其中的一个有限元模型。通过有限元计算其 B_{14} 振型的固有频率,结果见图11。从中可分析出,随着凸起增高,振子弹性体的固有频率呈下降趋势,当凸起高度小于 4mm 时,曲线趋于平缓,这表明凸起高度对振子弹性体固有频率影响较小,可以用解析法来求解振子弹性体的固有频率;当凸起高度大于 4mm 时,曲线变化较陡,凸起高度对振子弹性体固有频率影响较大,解析法不适用。凸起高度在该段尺寸内加工精度要高。在有限元计算中还发现,当凸起高于 4mm 时,凸起产生了一阶弯曲振动,利用这一点可用来提高马达转速。本文选取凸起高为 7.5mm 。

4 压电振子的有限元分析

本文采用的压电振子是由振子弹性体和压电陶瓷通过高分子粘结剂粘结而成。由于振子弹性体和压电陶瓷材质是不同的,在有限元分析中采用分层建模的方法,即建立振子弹性体层和压电陶瓷层。为简化计算,将粘结层忽略不计。

根据上文分析,圆环尺寸 $2a$ 取 950mm , b/a 取 0.4 , h_1 取 15mm ,宽取 1.5mm ,高取 7.5mm ;压电陶瓷外半径为 25mm ,内半径为 10mm ,厚度为 2mm 。振子的有限元模型见图12。为求所需 B_{14} 振型精确解。本文对振子结构进行几次细分单元,求解振子 B_{14} 振型的固有频率为 30.2kHz 。

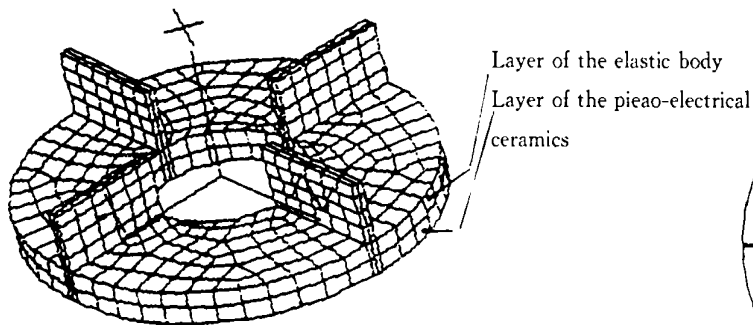


Fig 12 FEM mode of the vibrator

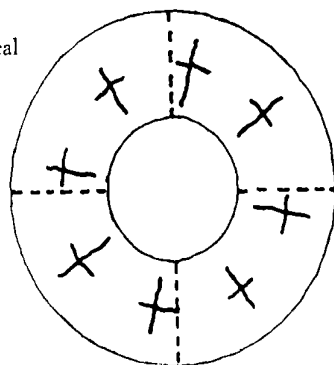


Fig 13 Measurement of the B_{14} vibration mode

5 振型测试

根据上述分析,加工并制造出振子。用信号发生器输出的正弦信号激励振子。当输入频率为 31.2kHz 时,测得如图13所示振型。图中实线部分为振子的振型图,其在圆周方向形成四

条近似完整的节径, 在振子圆环内近似形成了一个节圆, 基本上可认为是 B_{14} 振型。图中虚线处为四凸起的位置。该测试振型与理论设计振型(见图 2)基本吻合。马达振子有限元分析的 B_{14} 振型的固有频率 30.2 kHz, 实测的共振频率为 31.2 kHz, 相对误差为 3.3%, 可以满足工程中设计要求。

6 结 论

a 通过有限元较系统地分析了振子弹性体结构尺寸对其固有频率的影响, 为设计和加工振子提供了有力的依据。

b 采用有限元方法分析振子的固有频率, 理论值与实测值具有较好的吻合性, 相对误差为 3.3%。

参 考 文 献

- 1 见诚尚志 超音波モ-タ入门 东京: 综合电子出版社, 1991
- 2 刘一声 压电超声电机及其应用 压电与声光, 1988; 4(6): 60~ 71
- 3 内野研二 超音波モ-タ. 精密工学会志, 1989; 55(3): 485~ 490
- 4 杨志刚, 程光明, 刘景全 双弯曲驻波旋转型超声马达 压电与声光, 1995; 17(6). 50~ 54

Finite-Element Analyses of the Vibration of a Ring Type Ultrasonic Motor and Measurement of Vibration Mode

L U Jing-Quan, YANG Zhi-Gang, WU Bo-Da, CHEN G Guang-Ming
(Dept of Mechanical Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025)

Abstract

In this paper, FEM is used to analyze systematically the effect about the dimensions of the elastic body of vibrator versus its natural frequency. Such gives the theoretic base for the motor's design and fabrication. The natural frequency of the vibrator is calculated by FEM. The vibration mode of the vibrator's prototype is measured, and the calculated result of FEM is verified.

Key words: Ultrasonic motor, Vibrator, FEM

刘景全 男, 1971 年出生, 1993 年毕业于吉林工业大学机械工程系, 1996 年毕业于吉林工业大学机械工程系并获工学硕士学位, 1996 年考入吉林工业大学机械科学与工程学院, 攻读博士学位, 主要从事压电驱动技术研究。