一种纵扭复合换能器型超声 马达的原理及实验研究*

孙国武 程存弟 贺西平 卢义刚

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062) 1995 年 3 月 1 日收到

摘要 本文从纵扭振动换能器理论出发,设计了一种新的复合换能器型超声马达,并进行了实验研 究,测出了其主要性能参数. 关键词 纵扭复合换能器,超声马达.

The principle and experimental study of a ultrasonic motor with longitudinal-torsional complex vibration type transducer

Sun Guowu, Cheng Cundi, He Xiping, Lu Yigang (Applied Acoustics Institute of Shanxi Techers University, Xian 710062)

Abstract Based on the principle of longitudinal-torsional vibration, a new kind of ultrasonic motor with complex type transducer has been designed. Experimental study has been done and the main performance parameters measured.

Key words Longitudinal-torsional transducer, Ultrasonic motor.

1 前言

• 16 •

超声马达作为超声技术的一种新应用,近 年来日益受到国内外的重视,并在研究和应用 方面取得了显著的进展^[1].超声马达有多种类 型,复合换能器型是其中之一,而复合换能器 型又有几种不同的结构和形式.例如由纵振换 能器和多层换能器构成的线性马达,由扭转振 动换能器和多层换能器构成的旋转马达等 等^[2].尽管如此,该类型超声马达由于缺少实 际应用的考验,迄今还未定型,在结构和原理 方面均需继续进行研究和探索. 本文提出的一种纵扭复合换能器型超声马 达的设计具有结构简单,换能器的功率可以较 大,易于改变转子的旋转方向等特点.该超声 马达的核心部分是纵扭复合型换能器,文中对 此进行了较为详细的论述.

2 纵扭复合换能器型超声马达的设计

超声马达的基本原理是利用定子(换能器) 端面上质点的椭圆运动或类椭圆运动及定子与 转子接触面间的摩擦力来带动转子运动. 纵扭

* 陕西省自然科学基金资助项目

15 卷4 期

复合换能器型超声马达就是利用复合换能器在 的频率方程为 其辐射面上产生质点的纵把复合振动.

2.1 复合换能器的扭转振动

复合换能器的结构如图 1 所示,其中 L_1 式中 为后盖板,材料为45*纲,截面为正方形,中 心有供螺钉穿过的圆孔; L, 为产生纵振动的一 组压电晶片,材料为PZT-4,形状为有中心圆 孔的正方形; L_3 为产生扭转振动的压电晶片, 其结构如图 2 所示. 材料为 PZT-4, 但极化方 向与纵振换能器的不同,如图2中箭头所示; L₄ 为前盖板,截面为圆形,中心有丝孔,材料 为超硬铝; L₅ 为圆截面指数形变幅杆, 材料为 其中: 超硬铝; L₈ 为夹紧螺帽, 材料为黄铜.



图 1 复合换能器结构



图 2 扭振换能器压电晶片的结构 箭头表示压电晶片的极化方向

根据扭转换能器的设计理论^[3],图1所示 换能器在空载时产生扭转振动的等效电路如图 3 所示. 由等效电路显见, 电端的机械阻抗可 表示为:

$$Z_{12} = \{ \lfloor (Z_{5a} // Z_{5c} + Z_{6b} + Z_{1a}) \\ // Z_{1c} + Z_{1b} + Z_{2a} \rfloor // \\ Z_{2c} + Z_{2b} + Z_{3a} \} // \\ \lfloor (Z_{5b} // Z_{5c} + Z_{5a} + Z_{4b}) // \\ Z_{4c} + Z_{4a} + Z_{3b} \rfloor + Z_{3c} \}$$

式中"//"为并联符号.

应用声学

$$Z_{03}^{2} - Z_{03} \operatorname{ctg} \alpha_{3} (A_{z}/A_{m} + B_{z}/B_{m}) - A_{z}B_{z}/A_{m}B_{m} = 0$$
(2)

$$\begin{array}{l} A_{x} = Z_{01} Z_{02} Z_{06} \mathrm{ctg} a_{1} \mathrm{ctg} a_{2} \mathrm{tg} a_{6} + Z_{01}^{2} Z_{02} \mathrm{ctg} a_{2} \\ + Z_{01} Z_{02}^{2} \mathrm{ctg} a_{1} - Z_{02}^{2} Z_{06} \mathrm{tg} a_{6} \\ A_{m} = Z_{01}^{2} + Z_{01} Z_{06} \mathrm{ctg} a_{1} \mathrm{tg} a_{6} \\ + Z_{02} Z_{06} \mathrm{ctg} a_{2} \mathrm{tg} a_{6} \\ - Z_{01} Z_{02} \mathrm{ctg} a_{1} \mathrm{ctg} a_{2} \\ B_{z} = Z_{5x} Z_{04} \mathrm{ctg} a_{4} + Z_{04}^{2} \\ B_{m} = Z_{5x} - Z_{04} \mathrm{ctg} a_{4} \end{array}$$

$$Z_{5x} = Z_{05} \{ k_5/k_5 tg(\alpha_5/2) + \beta/k_5 + (k_5/k_5 sin\alpha_5) \cdot [k_5/k_5 tg(\alpha_5/2) - \beta/k_5] \}$$
$$/[k_5/k_5 tg\alpha_5 + \beta/k_5] \}$$
$$k_5^2 = k_5^2 - \beta^2$$

上面诸式各参数的含义分别为:

$$Z_{\alpha} = \psi \rho_{i} C_{i} I_{\rho_{i}} \quad (i = 1, 2, 4, 5, 6)$$

$$Z_{ia} = Z_{ib} = j Z_{\alpha} tga_{i} \quad (i = 1, 2, 4, 5, 6)$$

$$Z_{ic} = Z_{\alpha} / j sina_{i} \quad (i = 1, 2, 4, 5, 6)$$

$$Z_{03} = nc_{44}^{D} \mathbf{I}_{x} / c_{3}, \quad c_{44}^{D} = C_{44}^{E} + e_{15}^{2} / \epsilon_{11}^{i}$$

$$Z_{3a} = Z_{3b} = j \psi Z_{03} \sqrt{1 - k_{15}^{2}} tg(a_{3}/2)$$

$$Z_{3x} = \psi Z_{03} \sqrt{1 - k_{15}^{2}} / j sina_{3}$$

$$k_{15}^{2} = G^{2} e_{15}^{2} a^{2} b^{2} Jq / [\epsilon_{11}^{e} C_{44}^{D} \mathbf{I}_{x} (ab - \Pi R^{2}/4)]$$

$$G = a/2, \quad \psi = J/q, \quad J = P - \Pi R^{3} / 3a^{2} b$$

$$\mathbf{I}_{x} = \frac{1}{24} [b(2b^{2} + 5a^{2}) \sqrt{a^{2} + b^{2}} + 3a^{4} ln$$

$$\left(\frac{b + \sqrt{a^{2} + b^{2}}}{a}\right) - 2b^{4}] - \frac{1}{4}R^{4}$$

$$P = \frac{2}{3} \sqrt{1 + b^{2}/a^{2}} + \frac{b^{2}}{3a^{2}} sh^{-1} \left(\frac{a}{b}\right)$$

$$+ \frac{a}{3b} sh^{-1} \left(\frac{b}{a}\right)$$

式中 ρ_i 表示第*i*段材料密度, C_i 表示把振波 (1) 速, I,表示第 i 段截面惯性矩, a;(i=1,2,3,4, 5,6)表示第 i 段的对应相角, C44 为压电材料的 令总阻抗为零,可求得系统作扭转振动时 刚度系数,e₁₅为压电常数,e₅,为介电常数, R • 17 •



图 3 复合换能器扭转振动时的等效电路

别表示 L_3 中陶瓷块的长度和宽度,这里取 $a = - 参数及频率特性参数如表 1 所示. 表中 <math>f^{T}$ 、 f^{L} b=20 mm, n 表示组成每层扭转振动压电晶片 分别表示扭振动和纵振动时的谐频值, 表中同 的陶瓷块数量,图2所示为n=4,k,表示铝材 时给出了 f_T 和 f^L 的实测值. 中扭振波数, k_5 为指数形铝棒中扭振波数, β 为其婉延指数.

2.2 复合换能器的纵振动

不考虑振动系统中纵振动和剪切振动相互 影响,当振子作纯纵振动时,根据纵振动换能 器理论^[4],图1所示振子的纵振频率方程为:

$$Z_{02} - Z_{02} \operatorname{ctg} \alpha_2 \left(\frac{C_z}{C_m} + \frac{D_z}{D_m} \right) - C_z D_z / c_m D_m = 0$$

式中:

$$C_{z} = Z_{5x}Z_{03}Z_{04} \operatorname{ctg} \alpha_{3} \operatorname{ctg} \alpha_{4} + Z_{03}^{2}Z_{04} \operatorname{ctg} \alpha_{4} + Z_{04}^{2}Z_{03} \operatorname{ctg} \alpha_{4} - Z_{03}^{2}Z_{5x}$$

$$C_{m} = Z_{5x}Z_{04} \operatorname{ctg} \alpha_{4} + Z_{04}^{2} + Z_{5x}Z_{03} \operatorname{ctg} \alpha_{3} - Z_{03}Z_{04} \operatorname{ctg} \alpha_{3} \operatorname{ctg} \alpha_{4}$$

$$D_{z} = Z_{01}^{2} + Z_{01}Z_{06} \operatorname{ctg} \alpha_{1} \operatorname{tg} \alpha_{6}$$

$$D_{m} = Z_{06} \operatorname{tg} \alpha_{6} - Z_{01} \operatorname{ctg} \alpha_{1}$$

$$Z_{5x} = Z_{05} \{k_{5}/k_{x} \operatorname{tg} (\alpha_{5}/2) + \beta/k_{x} + (k_{5}/k_{x} \operatorname{sin} \alpha_{5}) \cdot [k_{5}/k_{x} \operatorname{tg} (\alpha_{5}/2) - \beta/k_{x}]/[(k_{5}/k_{s}) + k_{5}/k_{5}] + k_{5}/k_{5}}$$

诸式中各量的含义: $Z_{\alpha}(i=1,2,3,4,5,6)$ 为纵 振时第*i*段的声阻抗, α_i (*i*=1,2,3,4,5,6)为对 应段的相角,k,为圆柱形长铝棒的纵波波数,k, 为指数杆 L_s 的纵波波数, β 为婉延指数.

2.3 复合换能器设计

根据上述的扭转振动频率方程(2)和纵振 动频率方程(3)可对复合换能器进行设计计算, • 18 •

表示螺母的内半径,本振子中取 7 mm, a, b 分 对图 1 所示的复合换能器结构,计算出的几何

表1 复合换能器的几何参数及频率特性参数

L ₁ mm	L ₂ mm	L ₃ mm	L ₄ mm	L ₅ mm	∫{ h kHz	f 📊 kHz	fh kHz	f h kHz
63.5	6.0	6.0	20. 0	59.0	22.5	22. 0	32. 0	31. 0

通常复合换能器工作于扭转振动的谐振频 率,而纵振动处于非谐振状态.

(3) 3 复合换能器型超声马达的结构 及性能

本文探讨的复合换能器型超声马达的结构 如图4所示,它由复合换能器(定子)1、转子2、 施压弹簧3和支座4等部分组成、激励电信号 由专用的超声频电功率源供给. 经测试该超声 马达的主要性能参数如下:



图 4 超声马达结构示意图 (下转第22页)

15卷4期



图 3 雪崩 MARX 电路



图 4 MARX 电路的等效电路

前沿4 ns,脉冲底宽为12 ns 的单极窄脉冲. 用此信号源激励中心频率为100 MHz 的聚焦 超声探头,得到的由镜头端面的反射回波信号 (此换能器用36° Y 切割的 LiNO₃ 制成),其 峰峰值可达9 V^[1],可见此激励源的高频激励 效率是很高的.

参考文献

- [1] 苏公雨,乐光启. 无损检测,1995,17(3):61-64.
- [2] Benzel D M, Pocha M D. Rev. Sci. Instrum, 1985, 56
 (7).
- [3] Baker R J. Rev. Sci. Instrum, 1991, 62(4).

(上接第18页)

工作频率 22 kHz 最大转速 30 rpm 最大扭矩 1.91 kg・cm 最大负载 6.5 kg

4 结论及讨论

(1) 纵扭复合换能器采用普通压电晶片, 具有结构简单,功率调节范围宽等特点。

(2)转子的旋转方向可通过调节马达的工作频率来改变,该超声马达能在22.0 kHz和24.6 kHz分别实现正、反方向的转动.但后者转动时扭矩较小.

(3)实验研究中发现定子与转子接触面的•22•

大小对转动情况影响比较明显,接触面存在最 佳值.接触面过大时会停止转动,过小时则转 动扭矩减小,这可能是定子表面质点的非同相 振动的影响,对此尚待进一步探讨.

参考文献

- [1] 周铁英等. 压电超声马达研究新进展,1994年全国声学 学术会议论文集,上海,51-56.
- [2] 程存第. 超声技术—— 功率超声及其应用, 陕西师范大 学出版社, 1993, 232—246.
- [3] 孙国武等.大功率矩形换能器的设计,中国声学学会 1995年青年学术会议论文集,西北工业大学出版社, 1995,511-514.
- [4] 栾桂冬等. 压电换能器和换能器阵(上),北京大学出版 社,1990,197---210.

15 卷 4 期