

纵-扭复合振动夹心式压电超声换能器的研究

阎向宏 张福成*

(石油大学数理系 山东东营·257062)

本文从纵振动和扭转振动的波动方程出发,结合复合振动换能器各组成部分在一维条件下,纵振动和扭转振动的等效网络,以一维声传输线理论为基础,推导出了复合振动换能器所满足的纵振动和扭转振动共振频率方程,通过合理地选择变截面杆的弯延指数 β ,从而设计出了同一长度下,纵振动的基波和扭转振动的二次谐波可以共振的纵-扭复合振动换能器,并对影响弯延指数 β 的因素进行了初步的探讨。实验结果表明,理论计算与实验结果基本符合。

关键词: 纵振动,扭转振动,复合振动换能器,复合振动

The primary study of the pre-stressed piezoelectric longitudinal-torsional composite transducer

YAN Xianghong ZHANG Fucheng*

(University of Petroleum, Shan Dong · 257062)

In this paper, according to the wave equation of the longitudinal and torsional vibration, on the base of the one-dimentional transmission line theory, and through analysising the composite transducers every part's equivalent net, we gave out the longitudinal's and torsional's resonant frequency equation. If we choose the suitable parameter β of the exponnent bar, we can design a composite transducer that the longitudinal vibration fundamental frequency can coincide with the second harmonics of the torsional vibration in the same length. We also studied the parameter which affecting parameter β . The experiment results show that the theoretical computation is in agreement with the experimental results.

Key words: longitudinal vibration, fundamental frequency, torsional vibration, composite transducer, composite vibration

*Applied Acoustics Institute, Shanxi Teachers University, Xian · 710062

1 引言

在功率超声技术中,夹心式压电振动换能器的应用十分广泛。超声波切削、超声波打孔、超声波焊接等技术中,通常采用的都是单一振动模式振动子。特别是在金属材料的深小孔加工中,由于随着加工深度的增加,加工

过程中所产生的大量切屑不能及时排出而导致“积食”现象,降低了加工效率。为了克服这一缺点,文献[1]中提出了一种新的超声波加工方法——超声波旋转加工方法。这种超声波加工方法,由于待加工的另件要作高速的旋转运动,因此要保证足够的加工精度,对整个机械系统的稳定性要求更加严格。文献

* 陕西师范大学声学所·710062

收稿日期:94-11-14;修回日期:94-12-28

[2]中介绍了一种较早的纵扭模式转换振动系统。这种振动系统,是在单一振动模式纵振换能器的工具头上,加刻一定形状、一定深度的螺纹,将纵振动转换为工具头端面上既有纵振动又有扭转振动的复合振动模式。当把这种振动系统用于金属材料的钻孔加工时,经测试,可以降低扭转力矩 40~50%。加工的效率可以得到较大提高,当把该振动系统用于金属材料焊接时,在工具头上加几公斤的力,在不到 1s 时间内可以把两个 0.1mm 厚铝片焊在一起。大量的实验证明,工具头上所刻螺纹的形状、深度对扭转振动有较大影响。由于没有精确理论来分析、计算,工具头上所刻螺纹形状、深度,所以这种振动系统难以在实际中普及应用。本文所研究的纵一扭复合振动换能器,它的两种振动模式——纵振动和扭转振动,分别由沿厚度方向的极化压电陶瓷(L)和沿圆周方向极化的压电陶瓷(T)来激励产生。整个振动系统的效率高于纵扭模式转换振动系统的效率,应用更为广泛。除了应用于超声波焊接,超声波打孔,超声波切割等方面,这种复合振动换能器,在这几年特别热门的超声马达中也有其极为重要的应用。[3]~[4]

2. 纵扭复合振动换能器的结构

本文所研究的纵-扭复合振动换能器如图 1 所示。

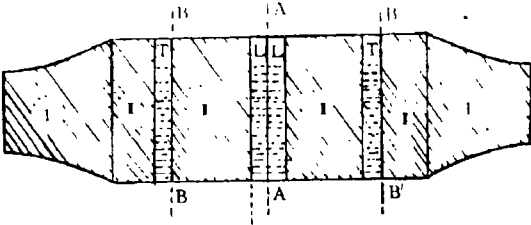


图 1 纵扭复合振动换能器的结构

其中: I:变截面指数杆; I:均匀截面杆; T:产生扭转振动的压电陶瓷(沿圆周方向极化); L:产生纵振动的压电陶瓷(沿厚度方向极化); B-B、B'-B' 面为扭转振动全

波长的两个节面; A-A 面为纵振动半波长的节面。

为了研究问题的方便,以 A-A 面为对称面,将复合振动换能器分为对称的两部分,在下面的讨论中,只讨论其左半部分即可。

3 共振频率方程的推导

由一维声传输线理论可知,组成复合振动换能器的各部分之间可以看作是串联结的。在推导共振频率方程过程中,还必须满足以下 3 个近似限制条件:① 满足一维条件,即横向尺寸小于 1/4 波长;② 忽略换能器中预应力螺栓的影响;③ 纵-扭振动只看作是单纯的纵、扭振动的叠加,不考虑其参数间的相互耦合影响;由一维声传输线理论和等效网络可得:[7~11]

(1) 当纵振动发生共振时,系统等效网络如图 2 所示。

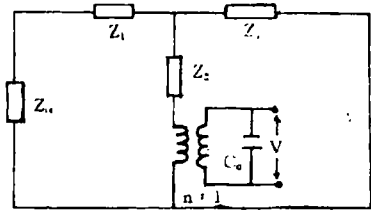


图 2 纵振动共振时等效网络

其中: $Z_1 = j\rho_e V_d \text{Stg}(K_d L_e/2)$

$$Z_2 = \rho_e V_d S / j \sin(K_d L_e)$$

Z_{L1} 为压电陶瓷(L)左侧部分的总阻抗,令 $Z_{L1} = R_m + jX_m$,共振时,动态回路的总电抗为零。即 $j\rho_e V_d \text{Stg}(K_d L_e/2) - j\rho_e V_d S / \sin(K_d L_e) + jX_m = 0$,由此可以得出其频率方程为

$$\text{tg}(K_d L_e) = \rho_e V_d S / X_m \quad (1)$$

(2) 当扭转振动共振时,节面 B-B 左侧系统等效网络如图 3 所示。

其中: $Z_1 = j\rho_e V_d I p \text{tg}(K_d L_e/2)$

$$Z_2 = \rho_e V_d I p / j \sin(K_d L_e)$$

Z_{T1} 为压电陶瓷(T)左侧部分的总阻抗,令 $Z_{T1} = R_m + jY_m$,共振时,动态回路的总电抗为

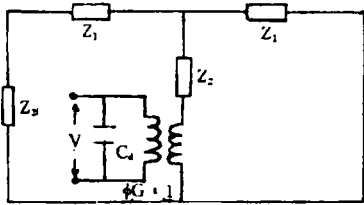


图3 扭转振动共振时等效网络

零。即 $j\rho_e V_a I p \operatorname{tg}(K_n L_e/2) - j\rho_e V_a I p / \sin(K_n L_e) + jY_m = 0$ 由此可以得出其频率方程为：

$$\operatorname{tg}(K_n L_e) = \rho_e V_a I p / Y_m \quad (2)$$

令扭转振动节面右侧部分(即 B-B 和 A-A 两平面间的部分)满足 $1/4$ 扭波波长,且为等截面。考虑到陶瓷元件的存在,其长度 L_3 由下式决定。

$$\operatorname{tg}(K_n L_3) = \frac{Z_{10} \operatorname{tg}(K_n L) - \rho_e V_a I p \operatorname{tg}(K_n L_e)}{Z_{10} + \rho_e V_a I p \operatorname{tg}(K_n L_e) \operatorname{tg}(K_n L)}$$

其中: $L = \lambda/4$, Z_{10} 为陶瓷元件(L)和 B-B 节面之间金属部分的阻抗

5 实验及结论

为了验证本文所得出的纵-扭复合振动换能器的共振频率方程,按该理论我们设计加工了一个纵扭复合振动换能器。其参数为:共振频率 $f = 20\text{kHz}$;前后盖板材料选用硬铝,其参数为: $E = 7.15 \times 10^{10} \text{N/m}^2$; $G = 2.73 \times 10^{10} \text{N/m}^2$; $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。压电材料选用 PZT-4,其参数为: $E = 20.6 \times 10^{10} \text{N/m}^2$; $G = 8.03 \times 10^{10} \text{N/m}^2$; $\rho = 7.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。沿圆周方向极化压电陶瓷(T)厚 $L_e = 2.5\text{mm}$ 沿厚度方向极化压电陶瓷(L)厚 $L_e = 4.0\text{mm}$,换能器截面半径 $R = 19\text{mm}$,由该理论计算出的换能器参数为:

$$L_1 = 10\text{mm} \quad L_2 = 35.92\text{mm}$$

$$L_3 = 26.61\text{mm} \quad \beta = 1.35 \times 10^{-2}/\text{mm}$$

实验测量结果如表所示:

参 数	理论值	测量值	$\delta(\%)$
$f_L(\text{kHz})$	20	18.34	8.3
$f_t(\text{kHz})$	20	18.28	8.6

由表中数据可知,纵扭复合振动换能器

的设计理论与实验基本相符合,扭转振动二次谐波和纵振动一次谐波在相同长度下有相同的共振频率。综合上述分析,可得如下结论:

(1) 合理地选择复合振动换能器指数杆的弯延指数 β ,可以达到纵振动的基波和扭转振动二次谐波在相同长度下,有相同的共振频率。

(2) 如果改变压电陶瓷元件厚度,弯延指数 β 值也将随之改变。

(3) 本研究所得出的理论公式为工程设计制作这种复合换能器提供了理论依据。

参考文献

- 1 1991 全国功率超声会议论文摘要 1991, 桂林
- 2 L. D. Rozenberg. Sources of high-intensity ultrasound. Vol. 2
- 3 高桥贞行, 大西修等. 纵扭复合振动を利用して超声波モータ. 音响学讲演, 1988, 2(4): 10
- 4 富川以朗, 足立成和等. 纵扭り振动モータ利用の超音波モータ—对称构造の利点注目した构成. 音响学讲演, 1988, 1(P): 20
- 5 中村建太郎, 上羽贞行. 変位素予なボルトしためした复合振动予型超音波モータ. 音响学讲演 1988, 2(Q): 5
- 6 O. Ohnishi, O. Myohga, T. Uchikawa 等. Piezoelectric ultrasonic motor using longitudinal-Torsional composite of a cylindrical resonator. Ultrasonics Symposium, 1989
- 7 栾桂冬, 张金铎等. 压电换能器和换能器阵. 北京大学出版社, 1990
- 8 林仲茂. 超声变幅杆的原理与设计. 科学出版社, 1987
- 9 阮世勋. 超声变幅杆设计用表的计算机编制(Ⅱ). 应用声学, 1986, 5(2): 22~28
- 10 阮世勋. 扭转超声变幅杆截面函数的理论推导. 广西大学学报(自然科学版), 1991, 16(4): 12
- 11 井上武志, 富川以朗. 扭り振动压电ヤラミエタ圆板の回路表示. 音响学讲演, 1988, 2: (Q) 10