

考虑双向振动耦合效应的声发射传感器的分析^{*}

焦 阳^{1,2}, 杨庆新¹, 刘时风³, 李光海⁴

(1 河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130

2 河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050018

3 清华大学 机械系, 北京 100084

4 中国特种设备检测研究中心, 北京 100013)

摘 要: 由于声发射传感器属于低频超声传感器, 其压电晶片工作频率决定了晶片的尺寸, 使其不能简化为一维或二维弹性体来分析, 考虑其径向和纵向振动不可忽视的耦合效应, 借用表观弹性常数的定义, 给出了短圆柱压电晶片包含直径和长度尺寸的频率方程。并根据频率方程制作了相应压电晶片, 实验测试结果和理论预期相符。

关键词: 声发射; 传感器; 耦合效应; 频率方程

中图分类号: TP216 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2007)02-0040-03

Analysis of acoustic emission sensor considering coupling effect within double direction^{*}

JIAO Yang^{1,2}, YANG Qingxin¹, LIU Shifeng³, LI Guanghai⁴

(1 Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province Hebei University of Technology Tianjin 300130 China

2 College of Electrical Engineering & Information Science Hebei University of Science and Technology Shijiazhuang 050018 China

3 Department of Mechanics Tsinghua University Beijing 100084 China

4 China Special Equipment Inspection and Research Center Beijing 100013 China)

Abstract Acoustic emission (AE) sensor belongs to low frequency supersonic sensor. The work frequency of piezoelectric element of AE sensor determines its dimension characteristic. So it can't be treated as one dimension or two dimension elastomer for analysis. Considering coupling effect within diametral vibration and vertical vibration making use of definition of apparent elastic coefficient, the frequency equation of short piezoelectric column that contains diameter and length is presented. According to the equation corresponding piezoelectric element has been made. Through experiment, the testing results conform to theory expect.

Key words acoustic emission (AE); sensor; coupling effect; frequency equation

0 引 言

声发射传感器一般由压电晶片、背衬、保护膜、电极引线 and 外壳等组成, 压电晶片为其核心部分。在一些关于传感器中压电晶片的尺寸与谐振频率关系研究中, 多是建立在压电晶片做单一纵向振动模式, 而压电晶片做单模振动, 是在晶片尺寸满足一定前提下的近似, 单一的工作模式理论成熟^[1-4], 和实验能够很好符合, 但需要满足一定的尺寸条件。当尺寸不满足要求时, 这种近似会有不可忽视的误差。声发射无损检测工程中, 常用的传感器是谐振频率在几百千赫兹的频率, 按照单模纵向振动的谐频公式所得到的

的压电晶片, 并不能像期待的那样工作在预期谐振频率。引起的偏差是因为压电晶片的尺寸不满足单模振动的条件, 存在不同模式间的振动耦合。因此, 在简化条件下得到的谐振频率公式必须修正才能用于非简化情况。MoriE和Itoh K等人在文献[5]中提出了在各向同性介质中考虑不同方向振动的耦合, 并用表观弹性常数来确定耦合情况下的谐振频率。任树初在文献[6]中将MoriE和Itoh K等人的方法在忽略压电效应的压电材料中推广。强盘富采用了伴随阵子法对压电薄圆板的耦合振动进行了分析^[7], 由于其径向上的边界条件不能逐点满足, 而且, 计算需修正和逼

收稿日期: 2006-12-09

* 基金项目: 河北省科技厅科技攻关计划资助项目 (06213532)

近, 存在计算上的困难。

本文从表观弹性常数的定义到应用来说明短圆柱体的频率常数与尺寸的关系。

1 短圆柱压电晶片分析

如图 1, 自由圆柱形的压电陶瓷 (半径为 a 半厚度为 t 厚径比 t/a 为有限值), z 轴为极化方向。忽略逆压电效应 (短路极化电极, 电场强度 $E=0$), 如果只考虑压电圆柱体的轴向和径向的伸缩应变, 即忽略剪切应变, 那么, 就可以只考虑轴向和径向的振动耦合。认为圆柱体在振动时处于准静态状态。应力简化条件为 $T_{\theta} = T_z = T_{z\theta} = 0$ $T_{rr} = T_{\theta\theta}$, 外表面对 θ 的偏导数都为 0 其中, T_{rr} 为径向应力, $T_{\theta\theta}$ 为周向应力, T_r , T_z 和 $T_{z\theta}$ 为剪切应力。

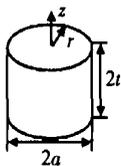


图 1 短圆柱的耦合振动

Fig 1 Coupling vibration of short column

根据简化条件, 压电陶瓷的物理方程可以简化为

$$S_r = \frac{\partial \xi_r}{\partial r} = s_{11}^E T_{rr} + s_{12}^E T_{\theta\theta} + s_{13}^E T_z, \quad (1)$$

$$S_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \xi_\theta}{\partial \theta} + \frac{\xi_r}{r} = s_{12}^E T_{rr} + s_{11}^E T_{\theta\theta} + s_{13}^E T_z, \quad (2)$$

$$S_z = \frac{\partial \xi_z}{\partial z} = s_{13}^E T_{rr} + s_{13}^E T_{\theta\theta} + s_{33}^E T_z. \quad (3)$$

显然, $S_r = S_\theta$, 令 $n = -T_z / T_{rr} = -T_z / T_{\theta\theta}$

各式中, T_{zz} 为轴向应力, S_r , S_θ 和 S_z 分别为径向、周向和轴向应变, ξ_r , ξ_θ 和 ξ_z 分别为径向、周向和轴向位移, s_{11}^E , s_{12}^E , s_{13}^E , s_{33}^E 为材料的柔顺系数。

将 n 代入式 (3), 则有 $\frac{T_z}{S_3} = \left[s_{33}^E \left(1 + \frac{2\sigma_{31}^E}{n} \right) \right]^{-1}$, 令

$\sigma_{13}^E = -\frac{s_{13}^E}{s_{33}^E}$ 。那么, 圆柱形压电陶瓷的轴向表观弹性常数

$$C_{ae} = \left[s_{33}^E \left(1 + \frac{2\sigma_{31}^E}{n} \right) \right]^{-1}, \text{ 有轴向表观波速 } v_l^2 = \frac{C_{ae}}{\rho}, \text{ 其中,}$$

ρ 为材料密度。

将 n 代入式 (1) 和式 (2), 则有 $\frac{T_r}{S_1} = [s_{11}^E (1 + n\sigma_{13}^E - \sigma_{12}^E)]^{-1}$, 令 $\sigma_{12}^E = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}$, $\sigma_{13}^E = -\frac{s_{13}^E}{s_{11}^E}$, 那么, 圆柱的径向表观弹性常数为

$$C_{re} = \frac{T_{rr}}{S_1 + \sigma_{12}^E} = \frac{T_r}{S_1 + \sigma_{12}^E S_1} = \frac{T_r}{S_1 (1 + \sigma_{12}^E)} = [s_{11}^E (1 + \sigma_{12}^E) (1 + n\sigma_{13}^E - \sigma_{12}^E)]^{-1}.$$

有径向表观波速为 $v_r^2 = \frac{C_{re}}{\rho}$ 。

分别将轴向表观波速和径向表观波速代入细长棒的共

振基频满足的方程 $k_1 t = \pi/2$ 和薄圆片的径向共振频率满足的方程 $k_r a J_0(k_r a) - (1 - \sigma) J_1(k_r a) = 0$ 其中, k_r , k_z 为波数, J_0 , J_1 分别为零阶和一阶 Bessel 函数, $\sigma = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}$ 为材料的泊松比。

联立求解可得

$$\begin{aligned} & [16(\rho s_{33}^E)^2 (1 + \sigma_{12}^E) (\sigma_{12}^E + 2\sigma_{13}^E \sigma_{31}^E - 1)] \cdot N^4 + \\ & \left\{ 4\rho s_{33}^E \left[1 - (\sigma_{12}^E)^2 + \left(\frac{t}{a} \cdot \frac{2x_0}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{s_{33}^E}{s_{11}^E} \right] \right\} \cdot N^2 - \\ & \left[\frac{t}{a} \cdot \frac{2x_0}{\pi} \right]^2 \cdot \frac{s_{33}^E}{s_{11}^E} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $x_0 = k_r a$ $N = f_0 \cdot 2t$ N 为基频频率常数; f_0 为基频频率。式 (4) 即为圆柱形压电陶瓷在忽略压电效应下考虑径向和纵向振动耦合的频率方程。显然, 共振基频除了和材料的物理参数有关外, 还和材料的厚径比 t/a 有关。求解方程 (4) 时, x_0 作为已知量代入, x_0 是方程 $k_r a J_0(k_r a) - (1 - \sigma) J_1(k_r a) = 0$ 的第一个非 0 根, 与材料的柔顺系数 $\sigma_{12}^E = \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}$ 有关。

表 1 是当 σ_{12}^E 取不同值求解得到的 x_0 。

表 1 含 Bessel 函数方程的数值解

Tab 1 Value explanation of equation with Bessel function

柔性系数 σ_{12}^E	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33
x_0	2.036	2.043	2.049	2.055	2.061	2.067

将压电陶瓷材料的物理参数和尺寸代入方程 (4) 中, 会求解到 N 的 2 个解, 经验证大的解对应的 n 小于 0 小的解对应的 n 大于 0 因为谐振时 n 为正数, 所以, 求解得到的 N 解只取小值。

国内某公司的 TY-5L 产品参数如表 2 所示 (没有提供 s_{12}^E 和 s_{13}^E 数据, 认为 $\sigma_{12}^E = \sigma_{13}^E = 0.3$)。

表 2 TY-5L 压电陶瓷材料常数

Tab 2 TY-5L piezoelectric ceramics coefficient

材料柔性系数 ($10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$)				材料密度
s_{11}^E	s_{33}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	($10^3 \text{kg}/\text{m}^3$)
17.6	19.2	-5.28 [#]	-5.28 [#]	7.6

注: 带 # 的 s_{12}^E 和 s_{13}^E 数据是根据提供的其他数据计算得到

以上数据代入方程 (4), 可得频率常数与厚径比的关系曲线, 如图 2

图 2 说明同材料的压电陶瓷, 厚径比很小 ($t < 0.3a$) 时, 频率常数与厚径比近似呈正比线性关系; 当厚径比较大 ($t > 10a$) 时, 频率常数近似为常数; 当厚度和直径尺寸可比拟时, 频率常数与厚径比呈非线性关系。声发射传感器的压电元件因为厚度和直径尺寸相近, 因此, 谐振频率的计算不能简单视为一维弹性体来计算。

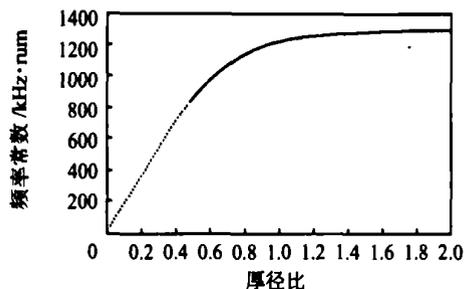


图 2 短圆柱频率常数和厚径比关系

Fig 2 Relation between short column frequency coefficient and thickness diameter ratio

2 实验分析

为了验证短圆柱压电陶瓷间存在振动耦合,以国内某公司 TY-5L 压电陶瓷材料制作了 4 种同高度、不同直径的短圆柱。4 种尺寸的压电陶瓷圆柱尺寸分别为 $\phi 4\text{mm} \times 6\text{mm}$, $\phi 8\text{mm} \times 6\text{mm}$, $\phi 12\text{mm} \times 6\text{mm}$, $\phi 16\text{mm} \times 6\text{mm}$, 极化方向为圆柱轴向。测试目的是验证压电晶片的谐振频率同时受高度和直径的影响,测试方法是将在 XC16B 脉冲发生器的脉冲信号(周期 1ms, 脉宽 75 μs , 幅度 10V 的正脉冲)作用在压电晶片的两极,用示波器记录压电晶片的响应。尺寸为 $\phi 4\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电陶瓷圆柱的实测信号如图 3。

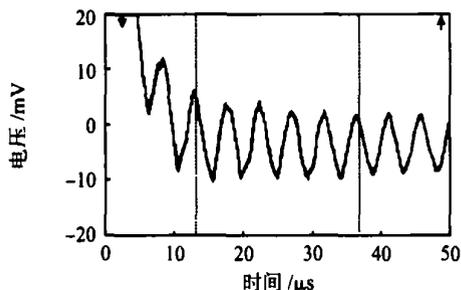


图 3 $\phi 4\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电圆柱的脉冲响应波形

Fig 3 $\phi 4\text{mm} \times 6\text{mm}$ pulse response waveform of piezo column

通过示波器记录到的波形,可以估计压电圆柱的谐振频率。 $\phi 4\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 200 kHz, $\phi 8\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 180 kHz, $\phi 12\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 140 kHz, $\phi 16\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 110 kHz。可见,直径对谐振频率的影响不可忽视,直径越大,谐振频率越低,这是因为圆柱的径向谐振频率随半径增加而降低的原因。圆柱谐振就是其单模纵向谐振波和其单模径向谐振波干涉叠加的结果。

为了验证频率和厚径比的关系,用 TY-5L 材料制作了 $\phi 12\text{mm} \times 2.5\text{mm}$, $\phi 12\text{mm} \times 6\text{mm}$, $\phi 9.5\text{mm} \times 7.5\text{mm}$, $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 4 种不同尺寸的压电晶片,极化方向为圆柱轴向。给晶片施加重复周期为 1ms, 脉宽为 75 μs , 幅值为

10V 的脉冲信号,实验测得它们的相应波形,尺寸为 $\phi 12\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 压电晶片的波形如图 4。

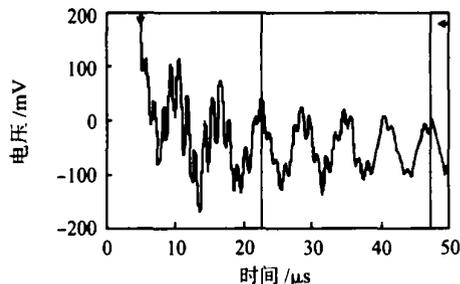


图 4 $\phi 12\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 压电晶片脉冲响应波形

Fig 4 $\phi 12\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ pulse response waveform of piezoid

通过示波器记录到的波形,可以估计压电圆柱的谐振频率。 $\phi 12\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 160 kHz, $\phi 12\text{mm} \times 6\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 140 kHz, $\phi 9.5\text{mm} \times 7.5\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 150 kHz, $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 压电晶片的谐振频率为 150 kHz。可见不同尺寸的压电晶片可以获得同样的谐振频率。

3 结论

由于声发射传感器的工作频段属于低频超声频段,简单的压电元件频率方程所确定的压电元件尺寸和实际需要不符。考虑到压电元件横向和纵向振动的耦合效应,建立了圆柱型压电元件的频率方程,该方程可以准确预测压电元件的基波谐振频率。并对所得结论进行了实验分析,结果和理论预期相符。

参考文献:

- [1] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 178-208.
- [2] 王衿奉, 姜祖桐, 石瑞大. 压电振动[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 56-120.
- [3] 何芳钧. 压电陶瓷滤波器[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 124-129.
- [4] 李远. 压电与铁电材料的测量[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 28-36.
- [5] Mori E, Itoh K, Inamura A. Analysis of a short column vibration by apparent elasticity method and its application[C] // Ultrasonics International 1977 Conference Proceedings, Japan: IPC Science & Technology Press, 1977: 262-269.
- [6] 任树初. 压电振子的多维耦合振动(1): 纯压电振子[J]. 声学学报, 1983, 8(3): 147-157.
- [7] 强盘富. 有限尺寸压电陶瓷圆板的耦合振动[J]. 声学学报, 1984, 9(1): 47-54.

作者简介:

焦阳(1963-), 女, 山东日照人, 副教授, 硕士(在读博士), 一直从事电工电子技术教学及智能检测与控制研究工作, 研究方向为智能检测与控制。