

# 空气背衬芯轴型光纤水听器加速度性能研究

白琳琅<sup>†</sup> 葛辉良

(杭州应用声学研究所声纳技术国防科技重点实验室 杭州 310012)

**摘要** 对用于水声探测的光纤水听器,加速度相移灵敏度是一个重要的参数。本文采用有限元法对空气背衬芯轴型光纤水听器的加速度相移灵敏度进行了理论分析,并通过实验验证,得到了空气背衬芯轴型光纤水听器加速度相移灵敏度的优化规律,提高芯轴壳体的硬度可有效降低光纤水听器的加速度相移灵敏度,而改变芯轴壳体的厚度对水听器加速度灵敏度影响不大。

**关键词** 光纤水听器,加速度,相移灵敏度

## Analysis of the acceleration responsivity of an air-backed mandrel fiber-optic hydrophone

BAI Lin-Lang GE Hui-Liang

(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310012)

**Abstract** The acceleration responsivity is a significant parameter for a fiber-optic hydrophone used in underwater acoustic detection. In this paper, the axial acceleration responsivity of an air-backed mandrel fiber-optic hydrophone is investigated by using the finite element method (FEM), and compared with some experiment result. Some analysis results are given: Increasing the rigidity of mandrel can decrease the acceleration responsivity of the fiber-optic hydrophone and changing the thickness of mandrel has little affect on the acceleration responsivity.

**Key words** Fiber-optic hydrophone, Acceleration responsivity, Phase sensitivity

### 1 引言

近些年来,光纤水听器受到了越来越多的关注,在过去的20多年中得到了很快的发展。光纤水听器拥有常规压电陶瓷水听器不具备的优

势,如免除了电磁干扰、在湿端无需供电、在未来还可能具有价格上的优势等等。目前,已有多种类型的光纤水听器被研究、应用,其中应用较为广泛的类型之一是芯轴型光纤水听器,因为其不仅结构简单且易于组成拖曳线列阵。

2006-12-08 收稿; 2007-06-01 定稿

作者简介:白琳琅(1980-),男,陕西兴平人,硕士,研究方向:水声换能器及声系统。

葛辉良(1972-),男,研究员,博士,博士生导师。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: sklbll@yahoo.com.cn

众所周知,用于运动状态如拖曳线列阵中的水听器应当呈现尽可能高的声灵敏度、尽可能宽的平坦响应区域,但也应具有低的加速度响应。本文中,将以空气背衬芯轴型光纤水听器为研究对象,应用有限元法来分析其加速度相移灵敏度,研究其抗加速度性能优化规律,并进行试验验证。图1为空气背衬芯轴型光纤水听器的结构示意图。

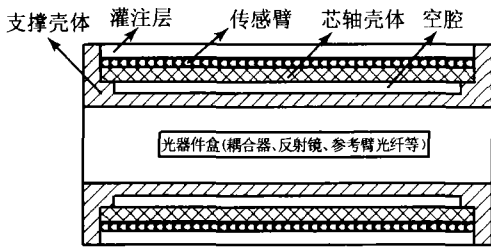


图1 空气背衬芯轴型光纤水听器结构示意图

## 2 芯轴型光纤水听器的光弹耦合原理

芯轴型光纤水听器的传感结构都可归结为光纤缠绕于圆柱形芯轴壳体之上。为此,首先来分析一下缠绕在芯轴壳体上的光纤长度

$$\Delta l_f = \frac{1}{k} \int_0^L \left[ r_f q^2 w + \frac{du}{dz} + \frac{1}{2} \left( \frac{q^2}{k^2} w^2 + \left( 1 - \frac{1}{k^2} \right) \left( \frac{du}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 - 2 \frac{q^2 r_f}{k^2} w \frac{du}{dz} \right) \right] dz \quad (1)$$

其中  $k = \sqrt{1 + q^2 r_f^2} \approx q r_f$ ,

$$q = \frac{2\pi N}{L} \approx \frac{2\pi}{d_f} \quad (d_f \ll L), N \text{ 为光纤缠绕的匝数。}$$

对于 Michelson 干涉仪,由单位轴对称载荷引起的光相位变化量  $\Delta\Phi$  为<sup>[1,3]</sup>:

$$\Delta\Phi = 2 \frac{2\pi n}{\lambda} \eta \Delta l_f \quad (2)$$

其中  $n$  — 光纤折射率;  $\lambda$  — 光波波长;  $\eta$  — 光弹修正因子。对于二氧化硅材料,此光弹修正因子近似为 0.71。

由于芯轴壳体表面的周向应变  $\epsilon_\theta =$

变化量与所受载荷之间的关系。直径为  $d_f$  的光纤缠绕在长  $L$ 、半径为  $r_f$  的芯轴壳体上的示意图如图2所示。轴对称载荷作用于光纤水听器上,将会使光纤圈上任一点产生轴向位移  $u(z,t)$  和径向位移  $w(z,t)$ ,由于载荷的轴对称性,其切向位移为零,轴向分量  $z$  和径向分量  $r$  均独立于切向坐标  $\theta$ 。理论上,由于扭转作用, $z, r$  对  $\theta$  均有依赖作用,但这里认为此影响可以忽略。

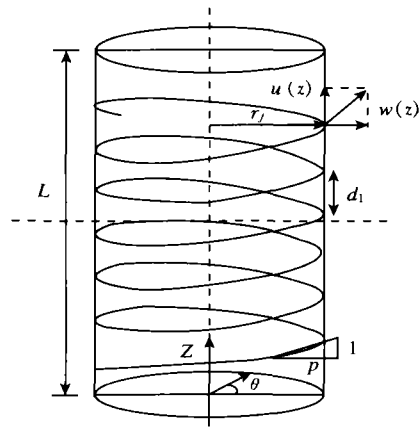


图2 光纤圈示意图

经推导<sup>[3]</sup>,缠绕光纤总长度  $l_f$  在轴对称载荷作用下的变化量  $\Delta l_f$  可用下式来表达:

( $w/r_f$ ),经推导<sup>[3]</sup>,在单位轴对称载荷(如声压、加速度、温度等)作用下,芯轴型光纤水听器的相移灵敏度  $R_b$  与芯轴壳体表面的平均切向应变  $\epsilon_\theta$  成比例:

$$\begin{aligned} R_b = \Delta\Phi &\approx (4\pi n k L / \lambda) \eta \frac{1}{L} \int_0^L \frac{w}{r_f} dz \\ &= (4\pi n k L / \lambda) \eta \epsilon_\theta \end{aligned} \quad (3)$$

上式中近似认为芯轴壳体与缠绕光纤完全耦合,称为光弹转换式。

从(3)式可以看出,只要求出传感光纤在加速度作用下的位移分布或应变分布就可以得到芯轴型光纤水听器的相移灵敏度。在本

文中,将利用有限元分析软件 ANSYS 来求解传感光纤的平均切向应变,从而得到光纤水听器的加速度相移灵敏度。

### 3 ANSYS 分析光纤水听器中两个问题的处理

问题一:如果要用有限元分析软件 ANSYS 将光纤进行详细描述,不但建模相当麻烦,并且模型中会产生大量的单元,这样要得到计算结果,将非常费时。在芯轴型光纤水听器结构中,由于传感光纤都是缠绕在圆柱形芯轴壳体上,那么缠绕光纤可以看作是由光纤材料组成的一个很薄的圆柱壳体(暂称为光纤等效层),这种处理方法既使建模较为方便,又不会在有限元模型中产生过多的单元<sup>[2]</sup>。由于芯轴型光纤水听器的轴对称性,所以我们采用 ANSYS 提供的平面轴对称单元 PLANE42 来建立其有限元模型。

问题二:计算光纤水听器加速度相移灵敏度时,ANSYS 软件不能对有限元模型施加加速度载荷,于是需要对加速度载荷进行相应地转换。我们注意到,在测量光纤水听器时,一般给水听器施加的加速度为谐和信号,设为  $g$ ,它与位移量  $u$  存在关系:  $g = -\omega^2 u$ ,可以将加速度载荷转换为位移载荷。

### 4 有限元分析结果

为了研究空气背衬芯轴型光纤水听器加速度灵敏度的优化规律,我们采取改变光纤水听器某一参数(结构或材料参数)而保持其他参数不变的方法。应用有限元软件分别改变芯轴壳体的硬度和厚度而得到的部分结论如图 3、图 4 所示。理论分析结果表明,提高芯轴壳体的硬度可有效降低光纤水听器的加速度相移灵敏度,而改变芯轴壳体的厚度对水听器加速度灵敏度影响不大。

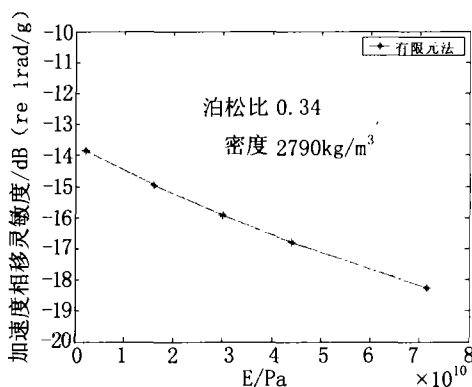


图 3 空气背衬芯轴型光纤水听器加速度相移灵敏度与芯轴壳体杨氏模量(E)关系曲线

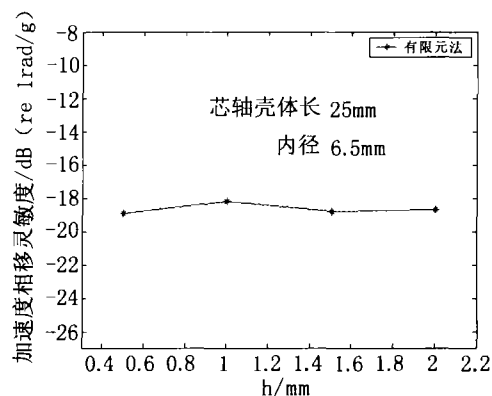


图 4 空气背衬芯轴型光纤水听器加速度相移灵敏度与芯轴壳体厚度(h)关系曲线

### 5 试验结果

为了验证有限元分析方法及优化规律的正确性,我们制作了一组空气背衬芯轴型光纤水听器,并对其性能进行了实验室测量,图 5 为采用

标准加速度计的比较法的加速度测量系统框图,测试结果见表 1(测量频段为 200Hz ~ 1.5kHz)。在这组光纤水听器中,支撑壳体都采用硬铝材料,芯轴壳体分别采用硬铝(Al)和尼龙(NI),芯轴壳体厚度分别取 0.5mm、1.0mm、1.5mm。

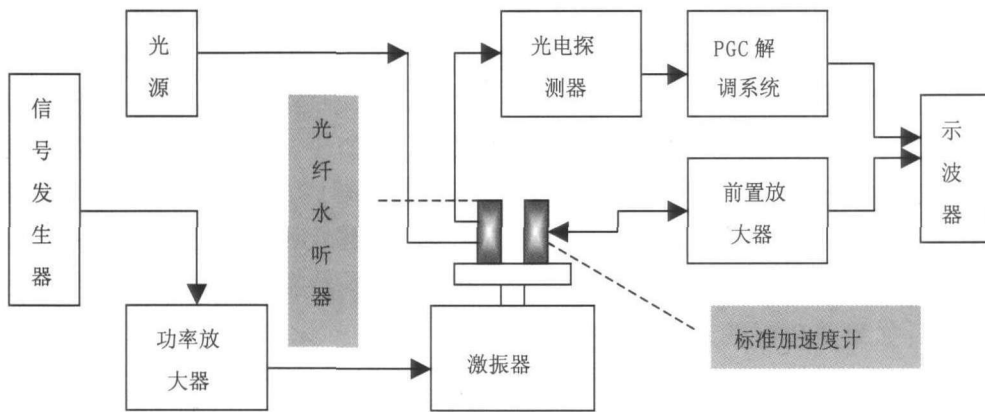


图5 光纤水听器加速度相移灵敏度测量系统框图

表1 加速度相移灵敏度理论实测结果

芯轴壳体	AI-0.5		AI-1.0		AI-1.5		NI-1.0	
加速度相移灵敏度(dB)	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值
	$-17.2 \pm 3.0$	-18.8	$-20.1 \pm 2.9$	-19.0	$-18.9 \pm 1.5$	-19.0	$-14.6 \pm 2.0$	-12.3

从表1可以看出,采用有限元法预报的空气背衬芯轴型光纤水听器的加速度相移灵敏度与实验测试结果变化不大。

(3)此外,通过以上的理论、实验结果比对,认为有限元法对空气背衬芯轴型光纤水听器加速度相移灵敏度及其优化规律可进行较为准确的预报。

## 6 结论

通过以上理论计算和试验的结果可得到以下结论:

(1)改变空气背衬芯轴型光纤水听器芯轴壳体的厚度,对其加速度相移灵敏度影响不大;

(2)芯轴壳体越“软”(即杨氏模量越低)空气背衬芯轴型光纤水听器的加速度相移灵敏度越高。

## 参 考 文 献

- [1] Ole Henrik Maagaard, Geir Bjarte Havsgard "An investigation of the pressure-to-acceleration responsivity ratio of fiber-optic mandrel hydrophone" IEEE Journal of lightwave technology. July 2001, 19(7):358-363.
- [2] Jong-in Im and Y. Roh, "A finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone" J. Acoust. Soc. Am. 1998, 103:2425-2431.
- [3] 白琳琅. 光纤水听器探头结构优化设计研究. 中国舰船研究院硕士学位论文. 2006.