

# 芯轴干涉型光纤水听器声压灵敏度的正交实验研究

申帅 周宏朴 张敏 廖延彪

(清华大学电子工程系光纤传感实验室, 北京 100084)

**摘要** 采用  $L_9(3^4)$  正交实验的方法, 研究了弹性筒与芯轴形成的空气腔的体积、绕制探头时对光纤施加的张力这两个因素对芯轴干涉型光纤水听器声压灵敏度造成的影响。实验结果表明, 空气腔体积及光纤张力对声压灵敏度没有实质影响, 在光纤与弹性筒充分耦合的前提下可以不予考虑。

**关键词** 光纤传感器; 光纤水听器; 声压灵敏度; 正交设计; 极差分析; 空气腔; 光纤张力

**中图分类号** TB565+.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP48.070603

## Acoustic Sensitivity of Interferometric Fiber-Optic Mandrel Hydrophone using Orthogonal Design

Shen Shuai Zhou Hongpu Zhang Min Liao Yanbiao

(Fiber-Optic Sensors Laboratory, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A  $L_9(3^4)$  orthogonal test is designed to investigate the effect of the room between the tube and the mandrel and the tension pulled on the fiber on acoustic sensitivity of interferometric fiber-optic mandrel hydrophone. Experimental results show that the room of air cavity and the tension pulled on fiber do not have much influence on sensitivity which can not be considered under the condition that the fiber and tube are fully coupled.

**Key words** fiber optic sensor; fiber-optic hydrophone; acoustic sensitivity; orthogonal design; range analysis; air cavity; fiber tension

**OCIS codes** 060.2370; 060.2300; 230.1040; 280.4788

### 1 引言

光纤水听器是一种基于光纤、光电子技术发展起来的水声信号传感器, 与传统压电水听器相比, 具有声压灵敏度高、频带宽、抗电磁干扰等优点<sup>[1~4]</sup>, 是现代声纳的一个重要发展方向。从传感机理上看, 光纤水听器可分为强度型、偏振态型、相位干涉型和波长型 4 类<sup>[5]</sup>, 其中又以相位干涉型最为普遍。以迈克耳孙干涉仪结构为例, 参考臂与声压屏蔽, 当声波作用于传感臂时, 会引起光纤长度及折射率的变化, 导致光程的变化, 进而引起干涉状态的变化。通过检测干涉状态的变化, 即可实现水声信号的提取。目前, 芯轴干涉型光纤水听器已从实验室走向工程化应用。

声压灵敏度是衡量水听器性能的一个重要指标。对于芯轴干涉型光纤水听器, 声压灵敏度与传感光纤长度、弹性筒的杨氏模量、壁厚、外半径等因素紧密相关<sup>[6~8]</sup>。从结构设计和制作工艺的角度, 弹性筒与芯轴形成的空气腔的体积, 以及绕制过程中对传感光纤施加的张力, 这两个因素是否会对声压灵敏度产生影响, 会产生多大程度的影响, 长期以来少有报道。由于较难用确切的公式表述或者建模分析这两种因素对声压灵敏度造成的影响, 因此有必要通过实验的方法来研究这个问题。

由于实验中涉及的因素较多, 每个因素又有若干个不同的水平, 若要进行全面实验, 不但工作量大而且耗时长、成本高。为了用较少实验, 就能达到上述目的, 决定采用正交实验的方法。

**收稿日期**: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-14; **网络出版日期**: 2011-06-03

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA0AA102-03)资助课题。

**作者简介**: 申帅(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器设计与测试等方面的研究。

E-mail: shenshuai2008@gmail.com

**导师简介**: 张敏(1971-), 男, 副教授, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: minzhang@mail.tsinghua.edu.cn

## 2 正交实验的原理及实验方案

正交实验设计是利用正交表科学地安排与分析多因素多水平实验的方法,是最常用的实验设计之一<sup>[9,10]</sup>。它是由实验因素的全部水平组合中,挑选出一部分具有代表性的水平组合进行实验,通过对实验结果的分析,找出各因素间的主次关系和最优搭配条件,为实验对象的性能优化提供有力的指导。

常用的正交表有  $L_4(2^3)$ ,  $L_8(2^7)$ ,  $L_9(3^4)$ ,  $L_{16}(4^5)$ ,  $L_{25}(5^6)$  等,使用时要根据实验目的和实验条件具体选择。由于应用环境的限制,用于本次实验的水听器声压灵敏度要不低于  $-146$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),同时弹性筒的外径及长度被设定为固定值。这样,对空气腔体积大小的讨论转化为对空气腔厚度的讨论。弹性筒的杨氏模量对声压灵敏度的影响很大<sup>[8]</sup>,如果选取不当,很可能造成声压灵敏度过高或过低。经过分析比较,统一选取聚碳酸酯作为弹性筒材料。

选取弹性筒壁厚、空气腔厚度、光纤绕制张力、传感光纤长度 4 个因素,忽略各因素之间的交互作用,采用  $L_9(3^4)$  正交表,进行正交实验。各因素选取的水平如表 1 所示。其中,在传感光纤张力的选取上,既要保证光纤与弹性筒的紧密耦合,又要防止制作过程中光纤张力过大容易损坏,结合当前工作基础,选取表 1 所示 3 个水平。

表 1  $L_9(3^4)$  正交实验中选取的各因素及其水平  
Table 1 Factors and levels used in orthogonal design

	Thickness of elastic tube /mm	Thickness of air cavity /mm	Fiber tension /N	Length of sensing fiber /m
Level 1	2.0	0.4	1.2	8.5
Level 2	2.3	0.7	1.5	7.5
Level 3	2.6	1.0	1.8	6.5

根据表 1,所进行的实验如表 2 中 2~10 行所示。由表 2 可看出,此时正交实验只需要 9 次,相对于  $3^4=81$  次的全面实验,实验次数大大减少。

表 2  $L_9(3^4)$  正交实验设计及结果分析  
Table 2 Orthogonal design and experimental result analysis

	Thickness of elastic tube /mm	Thickness of air cavity /mm	Fiber tension /N	Length of sensing fiber /m	Acoustic sensitivity /dB (re rad/ $\mu$ Pa)
1	2.0	0.4	1.8	7.5	-140.8
2	2.3	0.4	1.2	8.5	-141.8
3	2.6	0.4	1.5	6.5	-144.0
4	2.0	0.7	1.5	8.5	-139.3
5	2.3	0.7	1.8	6.5	-143.1
6	2.6	0.7	1.2	7.5	-143.0
7	2.0	1.0	1.2	6.5	-140.5
8	2.3	1.0	1.5	7.5	-142.2
9	2.6	1.0	1.8	8.5	-142.6
$K_1$	-420.7	-426.7	-425.3	-423.7	
$K_2$	-427.1	-425.4	-425.5	-426.0	
$K_3$	-429.5	-425.3	-426.5	-427.6	
$\overline{K_1}$	-140.2	-142.2	-141.8	-141.2	
$\overline{K_2}$	-142.4	-141.8	-141.8	-142.0	
$\overline{K_3}$	-143.2	-141.8	-142.2	-142.5	
R	2.9	0.4	0.4	1.3	

## 3 正交实验结果分析

在国防科技工业水声一级计量站,采用比对法对上述 9 个探头进行了声压灵敏度测试<sup>[11]</sup>,测试结果如图 1 所示。由于每个探头的声压灵敏度波动都小于 1 dB,故可取各频点声压灵敏度的平均值作为探头的声

压灵敏度,填入表2最后一列。根据实验结果计算均值及极差填入表2,并做出极差图,如图2。其中 $K_1, K_2, K_3$ 分别为各水平求和, $\overline{K_1}, \overline{K_2}, \overline{K_3}$ 为各水平的均值, $R$ 为极差。以弹性筒厚度这一因素为例(这里取弹性筒厚度为20 mm),

$$K_1 = -140.8 + (-139.3) + (-140.5) = -420.7,$$

$$\overline{K_1} = K_1/3 = -140.2,$$

$$R = \max(\overline{K_1}, \overline{K_2}, \overline{K_3}) - \min(\overline{K_1}, \overline{K_2}, \overline{K_3}) = -140.2 - (-143.2) = 2.9.$$

由于计算中数据保留位数的原因,此处应为2.9,而不是3.0。其他类同。

由图2可以看出,在当前所选水平下,空气腔厚度或光纤绕制张力变化时,水听器声压灵敏度基本保持不变,对应表2,极差值均小于0.5 dB。传感光纤长度变化时,水听器声压灵敏度变化较大,极差是1.3 dB。弹性筒厚度变化时,水听器声压灵敏度变化最大,极差是2.9 dB。比较各因素对应的极差,可以看出,空气腔厚度或光纤绕制张力对声压灵敏度没有实质影响。在只考虑声压灵敏度的情况下,为了增大探头声压灵敏度,可以减小弹性筒厚度,增加传感光纤长度,同时保证光纤与弹性筒紧密耦合又不易损坏,空气腔可以不做专门考虑。

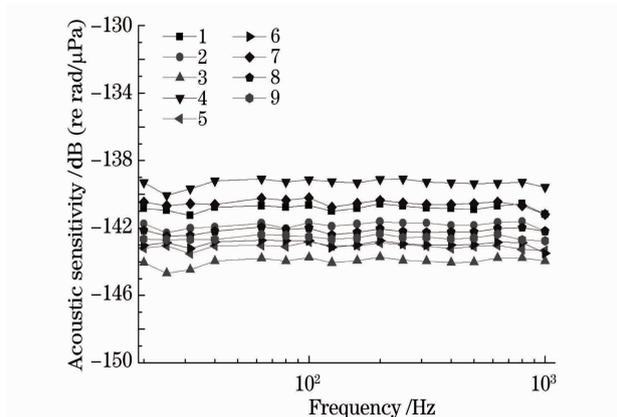


图1 水听器声压灵敏度频响曲线

Fig.1 Acoustic sensitivity-frequency response curve of fiber-optic hydrophone

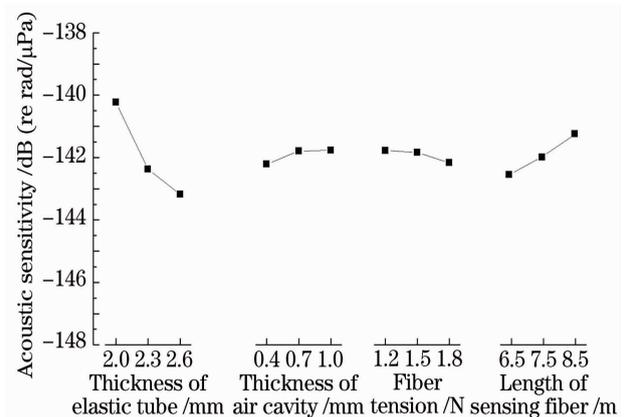


图2 各因素、水平对声压灵敏度的影响

Fig.2 Influence of factors and levels on acoustic sensitivity

## 4 结 论

在当前声压灵敏度及机械尺寸限制下,探头声压灵敏度正交实验表明,空气腔的体积及绕制过程中对光纤施加的张力对该种芯轴干涉型光纤水听器的声压灵敏度没有实质影响。

考虑到裸纤暴露在外面容易损坏,声压灵敏度是在探头灌胶封装后进行测试的,该过程可能对声压灵敏度造成一定程度的影响。根据大量测试结果得出的结论,封装会造成声压灵敏度波动 $\pm 0.5$  dB,变化较小,因此对于定性分析,封装的影响可以忽略。

另外,由于探头本身尺寸的限制,各水平取值受到限制,可能对极差造成了一定程度的影响。对于探头的设计,需要考虑多方面的因素,包括声压灵敏度、带宽、耐压性、谐振峰、加速度灵敏度等。

## 参 考 文 献

- 1 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology[J]. *IEEE Proc. Radar, Sonar Navigation*, 1996, **143**(3): 204~209
- 2 K. K. Clay, D. Anthony. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Appl. Phys.*, 2004, **37**(8):197~216
- 3 Cao Jianian, Bao Jianxin, Li Xuyou *et al.*. Optic fiber hydrophone[J]. *Optical Communication Technology*, 1997, **21**(2): 90~94
- 4 曹家年,包建新,李绪友等. 光纤水听器[J]. *光通信技术*, 1997, **21**(2): 90~94
- 5 Zhang Renhe, Ni Ming. Theory and application of the optic fiber hydrophone [J]. *Physics*, 2004, **33**(7): 503~507

- 张仁和,倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. 物理, 2004, **33**(7): 503~507
- 5 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. 328
- 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. 328
- 6 Yin Kai, Zhou Hongpu, Zhang Min *et al.*. Optimization design of the pressure phase sensitivity of the fiber-optic air-backed mandrel hydrophone[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1940~1945
- 殷镨,周宏朴,张敏等. 芯轴型光纤水听器声压灵敏度的优化设计[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1940~1945
- 7 Li Qiushi, Luo Hong, Meng Zhou *et al.*. Research on the pressure sensitivity of the interferometric fiber-optic hydrophone with a concentric mandrel[J]. *Test and Measurement Technology*, 2005, **19**(4): 402~407
- 李秋实,罗洪,孟洲等. 同轴干涉型光纤水听器声压灵敏度特性分析[J]. 测试技术学报, 2005, **19**(4): 402~407
- 8 Zhou Wei, Zhou Hongpu, Zhang Min *et al.*. An investigation of the acoustic sensitivity of the interferometric fiber-optic mandrel hydrophone[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 070601
- 周炜,周宏朴,张敏等. 芯轴干涉型光纤水听器的声压灵敏度研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(10): 070601
- 9 Writing group of orthogonal design. Orthogonal Design Method and its Application[M]. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 1979. 1~30
- 正交设计法编写组. 正交设计法及其应用[M]. 南昌: 江西人民出版社, 1979. 1~30
- 10 Department of Mathematics and Mechanics, Peking University. Orthogonal Design—An Arrangement of Multi-Factor test Mathematical Methods[M]. Beijing: People's Education Press, 1977. 16~24
- 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计——一种安排多因素实验的数学方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1977. 16~24
- 11 Jiang Tongchuan. Orthogonal Experimental Design [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1985. 28~36
- 姜同川. 正交实验设计[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985. 28~36