

## 液体中激光声传输特性

李胜勇, 吴荣华, 王晓宇, 王江安, 宗思光

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 为了了解激光声在液体中的传输特性, 理论分析了激光声的传输特性, 并采用高速照相机、光纤 MEMS 水听器对激光声进行了实验研究, 利用小波变换对采集的不同位置上的激光声信号各级频谱特性进行了分析。结果表明: 激光声属于一种脉动球源, 激光声信号传输过程中幅度与距离成反比关系; 激光声的分析频带内存在明显的优势频率, 峰值频率稳定在 3.1 kHz, 带宽稳定在 3 kHz; 低频信号的能量占总能量的 70% 以上, 高频部分主要是噪声; 从功率谱波形分析看, 低频信号的强度幅值随时间、距离变化衰减较慢, 而高频噪声随时间、距离变换衰减较快。

**关键词:** 激光声; 传输特性; 液体; 小波

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0406006

## Properties of laser-induced acoustic signals transmission in liquid

Li Shengyong, Wu Ronghua, Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang

(Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to understand the transmission properties of laser-induced acoustic in liquid, the transmission properties of laser-induced acoustic were analyzed theoretically, and the experimental research on the laser-induced acoustic was carried out by using high speed camera and fiber MEMS hydrophone. Wavelet transform was used to analyze the spectrum characteristics of the laser-induced acoustic signals at different locations. The results show that the laser-induced acoustic is a pulsating source, amplitude and distance are inversely proportional in the process of laser acoustic signal transmission; laser acoustic analysis of band memory has obvious dominant frequency, with peak frequency stability of 3.1 kHz and bandwidth stability of 3 kHz; low frequency signal energy accounted for more than 70% of the total energy, high frequency part is mainly noise; from the power spectrum waveform analysis, low frequency signal amplitude with time and distance attenuation is slower, and high frequency noise with time and distance transform decays faster.

**Key words:** laser-induced acoustic; transmission properties; liquid; wavelet

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2016-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(41406047, 51409252, 51209210, 41306036)

作者简介: 李胜勇(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光空化及激光声特性方面的研究。Email: lsy929@163.com

## 0 引言

当高功率激光聚焦于液体中时,若作用激光能量密度超过液体的击穿阈值,则在聚焦区域内将发生光学击穿<sup>[1]</sup>、空化等一系列运动。伴随这些过程,产生等离子体声信号和空泡溃灭声信号,这些声信号统称为激光声信号<sup>[2]</sup>。

作为一种新的激发声波的方法,与传统声源相比,具有激发距离远、声源级高、声脉冲很窄,频谱宽;传输距离远;非接触式发声以及指向性好等显著优点。由于用激光可以远程激发声波,并且很容易控制光声源的位置。并且光声信号的宽频带使得它具有高的分辨能力及浅海传播时的抗干扰能力,所以,激光声在水下目标探测、通信、目标特性模拟等领域有广阔的应用前景<sup>[3-6]</sup>。

对激光声的形成机理与特性研究已经引起国内外学者越来越多的关注。F.Blackmon 构建了激光声实验系统,利用波长 1.06 μm 激光聚焦击穿水介质,研究单个激光声信号的时频特性。Brujan 等<sup>[7-9]</sup>研究了介质的弹塑性对激光声的影响,Kyuichi Yasui 等<sup>[9]</sup>数值模拟了水中空泡运动的剧烈程度对空泡声波的影响,彭水<sup>[10]</sup>提出了多个激光声源的声场叠加计算方法,李胜勇等<sup>[11]</sup>研究了环境压强对激光空泡声波特性影响。总的来说,对激光声特性与理论计算的研究很多,对激光声的传输特性以及频率组成、变化情况研究较少。

为了全面了解激光声在液体中的传输特性,文中基于脉动球源的假设,理论分析了激光声的传输特性,并构建了激光声传输特性研究实验系统,在水槽中,采用激光器水下激发产生激光声,同时采用高速照相机、光纤 MEMS 水听器分别对激光击穿过程和激光声进行了实验测量。针对激光声频率成份丰富的特点,应用小波变换<sup>[12]</sup>对采集的声信号进行了分析,以了解激光声在水中传输时各种频率段的变化趋势。

## 1 基本理论方程及其求解

光击穿条件下的激光声源(等离子体、空泡)属于脉动球源,辐射的激光声信号的波阵面是球面,能量在波阵面上均匀分布,属于均匀球面波信号。设定

在  $t_0$  时刻,激光声源的半径是  $r_0$ ,在  $t_0+dt$  时刻,半径变为  $r_0+dr$ ,体积发生变化,引起周围液体径向流动,产生激光声信号,脉动球源辐射声信号示意图如图 1 所示。

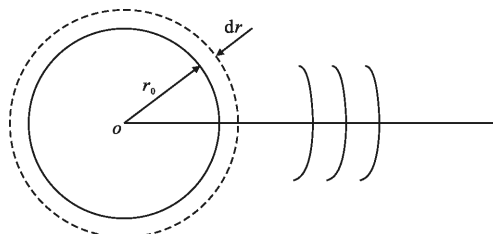


图 1 脉动球源辐射声信号示意图

Fig.1 Diagram for pulsating sphere source radiating acoustic signal

脉动球源的波动方程表达式为公式(1)<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\partial \ln S}{\partial r} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

距离声源中心  $r$  处波阵面面积  $S=4\pi r^2$ , 带入公式(1),可以得到公式(2):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2)$$

令  $Y=pr$ , 带入公式(2),可得:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (3)$$

对公式(3)求解得到公式(4):

$$Y=Ae^{j(\omega t-kr)}+Be^{j(\omega t+kr)} \quad (4)$$

式中: $A$ 、 $B$  都为常数。

脉动球源辐射声信号的声压方程表达式为公式(5):

$$p=\frac{A}{r} e^{j(\omega t-kr)}+\frac{B}{r} e^{j(\omega t+kr)} \quad (5)$$

上式中第一项是向外径向辐射的声信号,第二项是向声源会聚声信号。

因为激光声信号是向外辐射的,所以  $B=0$ 。这样,激光声信号的声压方程可以写为:

$$p=\frac{A}{r} e^{j(\omega t-kr)} \quad (6)$$

式中: $A$  为激光声信号初始幅度; $r$  为信号接收点到声源中心的距离; $k=\omega/c$  为波数。

从公式(6)可以看出,随着传输距离的增加,激光声信号幅度逐渐减小,传输距离与激光声幅度存在反比例关系。

## 2 实验装置与结果分析

### 2.1 实验装置

采用图 2 所示的实验平台研究激光声传输特性<sup>[14]</sup>。将调 Q Nd:YAG 激光器(能量 100 mJ(±3%), 波长 0.53 μm, 脉宽 8 ns)和光学系统都固定在密封装置中, 再将密封装置放于水池(长 36 m, 宽 5 m, 高 2 m, 实验时水深 1 m, 水池壁布有消声橡胶, 做了消声处理)中进行实验。由控制器实现对激光器的实时控制, 激光经过光学系统实现扩束聚焦, 击穿水介质辐射声信号。利用光纤 MEMS 水听器接收声信号<sup>[15]</sup>, 其线性频带宽度 1~10 kHz, 灵敏度级 -210 dB(参考值为 1 V/μPa), 同压电陶瓷水听器相比, 光纤 MEMS 水听器具有良好的低频响应灵敏度, 接收到的声信号具有主频低, 带宽窄的优良特性。将水听器分别置于水池的不同位置采集激光声信号, 由示波器显示激光声信号并送计算机存储。整个击穿过程采用 FASTCAM SA1.1 型高速相机, 以 250 000 fps 速率拍摄照片。高速相机距离激光击穿点的距离是 85 cm。

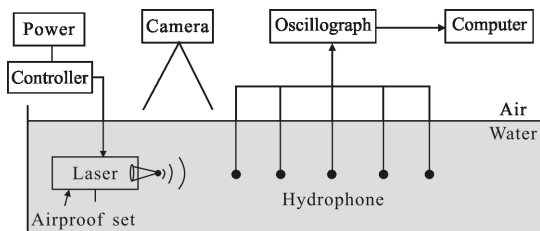


图 2 激光声信号传输特性实验结构图

Fig.2 Experimental system for laser-induced acoustic signal transmission characteristic

### 2.2 结果分析

#### (1) 球面特征

图 3 是用高速相机记录的激光击穿液体, 并向外辐射冲击波的过程。图中圆环状阴影即为冲击波波阵面。验证了激光击穿水介质形成的激光声源(等离子体、空泡)属于脉动球源, 能量在波阵面上均匀分布, 属于均匀球面波信号的假设。



图 3 光击穿冲击波序列图

Fig.3 Shock waves process of optical breakdown

#### (2) 衰减特性

激光声信号由光纤 MEMS 水听器接收后, 又经过光电转换电路处理。光电转换电路通频带 1~100 kHz, 增益为 40 dB, 噪声 100 mV。为了减少测量误差, 每一个数据点, 都是在同一距离上测量 20 次取平均值得到的。测量得到的激光声信号时域波形和频谱如图 4 所示, 从实验数据可以看出, 光纤 MEMS 水听器接收到的激光声信号有多个峰值, 逐渐衰减直至消失。

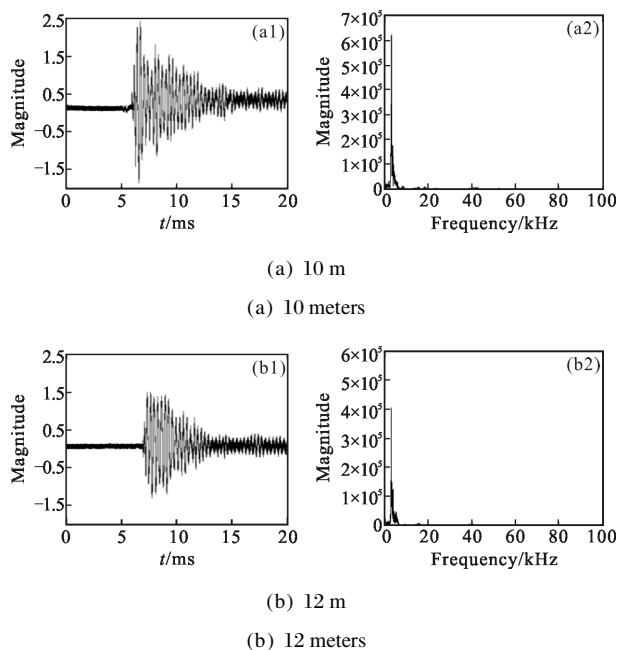


图 4 激光声信号波形与频谱图

Fig.4 Waveforms and spectrums of laser-induced acoustic signals

通过对光纤 MEMS 水听器在不同位置接收的激光声信号进行总结, 可得到激光声信号幅度如图 5

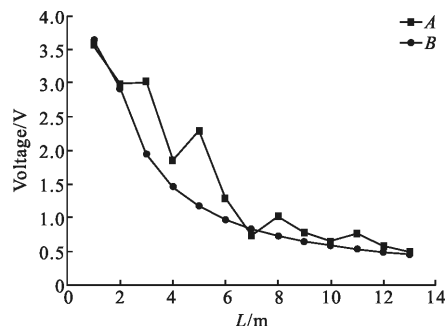


图 5 不同位置上的激光声信号幅度

Fig.5 Amplitudes of laser-induced acoustic signals in different distances

所示。其中, A 表示实验测量所得数据, B 表示 1/r 衰

减曲线。从实验结果可以看出,远场条件下,随着传输距离的增加,激光声信号幅度变化与  $1/r$  规律基本相符,虽然池壁做了消声处理,还存在一定的壁面反射,使得实验结果和理论分析出现了轻微偏差。

(3) 频率特性

通过小波变换把采集的激光声信号分解到不同的频率通道,以获取在不同的频带上激光声的频率成份特征。文中采用 db5 小波基对实验数据进行 5 级小波分解,得到激光声信号多分辨率分解结果如图 6 所示,图中标注的  $a$  表示低频重构信号, $d$  表示高频细节信号, $a$  和  $d$  后面的数字表示小波分解的层数,也可以说是不同的频带。从图中可以看出,高频细节信号主要是由噪声引起的,取出噪声后重构激光声信号波形如图 4 所示,明显可以看出去除了颤动,减小了噪声的影响。

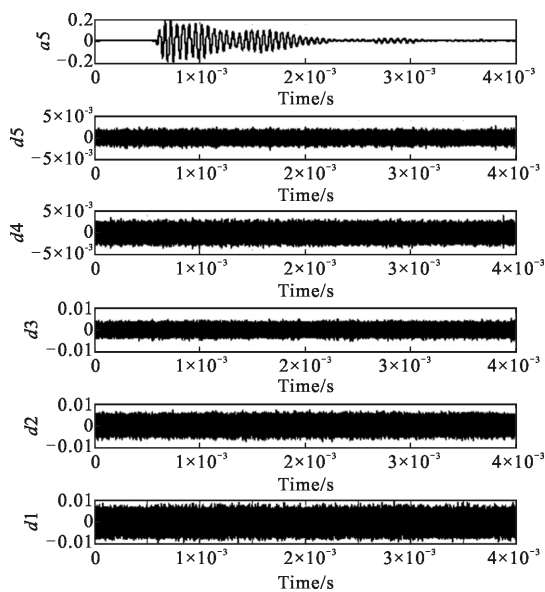


图 6 激光声信号多分辨率分解结果

Fig.6 Multi resolution decomposition results of laser-induced acoustic signals

为了提取激光声信号的频谱特征,进一步对各层信号进行频谱分析,激光声频谱典型特征图(13 m)如图 7 所示,可以发现,激光声的分析频带内存在明显的优势频率,不同接收距离上光纤 MEMS 水听器测量到的激光声信号峰值频率变化情况如图 8 所示。

由图 4 的频谱图可以看出,随着传输距离的增加,激光声信号的峰值频率和带宽基本保持稳定,其中,峰值频率稳定在 3.1 kHz,带宽稳定在 3 kHz。在

传输过程中,尽管其声幅值存在差异,但其频率特征很明显,构成激光声传递的主频带。从图 7 的小波分析功率谱波形分析看,低频信号的强度幅值随时间、距离变化衰减较慢,而高频噪声随时间、距离变换衰减较快。

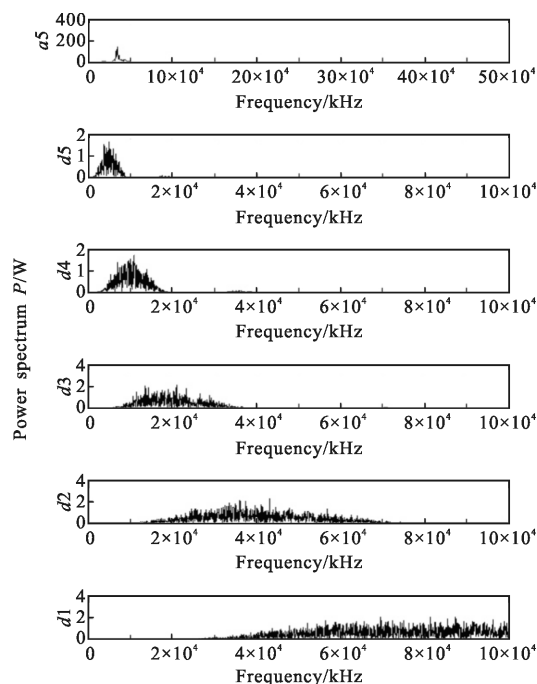


图 7 激光声信号频谱图(13 m)

Fig.7 Spectrums of laser-induced acoustic signals(13 m)

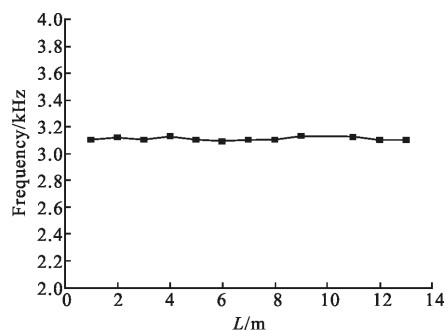


图 8 不同位置上的激光声信号峰值频率

Fig.8 Central frequency of laser-induced acoustic signals in different distance

(4) 能量特征

对激光声信号采用小波分析提取能量特征、构造能量特征向量、归一化处理,这样可以得到信号能量的变化规律。各级能量所占比例如表 1 所示,从结果中可以看出,低频段  $a5$  级,占激光声总能量的 70% 以上,是整个声波信号的主要频率成分集中的

部分;高频段  $d1\sim d5$  级能量占比依次减少。

表 1 激光声传输过程中不同频带能量比例

Tab.1 Energy ratio of different frequency bands in the process of laser acoustic transmission

Range /m	Normalized energy features					
	$d1$	$d2$	$d3$	$d4$	$d5$	$a5$
1	0.033 8	0.024 0	0.017 2	0.012 4	0.008 9	0.903 7
2	0.039 0	0.027 7	0.019 8	0.014 4	0.010 3	0.888 9
3	0.044 5	0.031 6	0.022 7	0.016 4	0.011 8	0.873 0
4	0.064 4	0.045 8	0.032 8	0.023 6	0.017 0	0.816 4
5	0.066 5	0.047 2	0.033 8	0.024 4	0.017 6	0.810 4
6	0.051 5	0.036 7	0.026 3	0.019 1	0.013 8	0.852 6
7	0.044 0	0.031 6	0.023 0	0.016 9	0.012 3	0.872 2
8	0.039 7	0.028 5	0.020 7	0.015 2	0.011 1	0.884 9
9	0.053 7	0.038 6	0.028 1	0.020 9	0.015 0	0.843 7
10	0.051 0	0.036 6	0.026 6	0.019 6	0.014 3	0.852 1
11	0.042 4	0.030 4	0.022 1	0.016 2	0.011 8	0.877 1
12	0.060 5	0.043 4	0.031 6	0.023 4	0.016 9	0.824 2
13	0.073 9	0.052 9	0.038 5	0.028 5	0.020 7	0.785 5

### 3 结 论

理论分析了激光声的传输特性,采用激光器水下激发产生激光声,同时采用高速照相机、光纤 MEMS 水听器分别对激光击穿过程和激光声进行了实验测量,利用小波变换对采集的不同位置上的激光声信号各级频谱特性进行了分析。结果表明:激光声属于一种脉动球源,能量在波阵面上均匀分布,激光声信号传输过程中幅度与距离成反比关系;激光声的分析频带内存在明显的优势频率,峰值频率稳定在 3.1 kHz,带宽稳定在 3 kHz;低频信号的能量占总能量的 70%以上,高频部分主要是噪声;从功率谱波形分析看,低频信号的强度幅值随时间、距离变化衰减较慢,而高频噪声随时间、距离变换衰减较快。研究表明,激光声在液体中具有较为稳定的频谱特征与传输特性,研究结果可为将来激光声水下远距离、高保密通信提供有益的参考。

### 参考文献:

[1] Li Rongfu, Cui Guihua, Tian Zuoxi, et al. Laser-Acoustic Remote Sensing Technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 12-15. (in Chinese)  
李荣福,崔桂华,田作喜,等.激光声遥感技术[M].北京:国防工业出版社,2003:12-15.

[2] Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. A new method for improving characteristic of laser-induced acoustic signals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1449-1453. (in Chinese)  
王晓宇,王江安,宗思光,等.一种新的改善激光声信号特性的方法[J].*红外与激光工程*,2014,43(5):1449-1453.

[3] Ye Xi, Yao Xiongliang, Zhang A'man, et al. The motion and acoustic radiation characteristics for cavitation in the compressible vortex fluid [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(11): 114702. (in Chinese)  
叶曦,姚熊亮,张阿漫,等.可压缩涡流场中空泡运动规律及声辐射特性研究[J].*物理学报*,2013,62(11):114702.

[4] Wu Xiaoye, Zhang Lichao, Shi Guang. Optical-thermal and optical-acoustics detecting techniques applied for the characterizations of high performance optical thin films [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 0701-0711. (in Chinese)  
武潇野,张立超,时光.应用于高性能光学薄膜表征的光热光声检测技术[J].*中国光学*,2014,7(5):0701-0711.

[5] Miao Shaofeng, Yang Hong, Huang Yuanhui, et al. Research progresses of photoacoustic imaging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 699-713. (in Chinese)  
苗少峰,杨虹,黄远辉,等.光声成像研究进展[J].*中国光学*,2015,8(5):699-713.

[6] Yang Chenlong, Chen Yuechao, Ye Qian, et al. Ultrasonic echo signal modeling and identification for minor defects in metallic materials [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2635-2644. (in Chinese)  
杨辰龙,陈越超,叶钱,等.金属材料小缺陷超声反射信号建模及识别[J].*光学精密工程*,2015,23(9):2635-2644.

[7] Antonelli L, Blackmon F. Experiment demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 103-112.

[8] Brujan E A, Vogel A. Stress wave emission and cavitation bubble dynamics by nanosecond optical breakdown in a tissue phantom [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 55(8): 281-308.

[9] Kyuichi Yasui, Toru Tuziuti, Judy Lee, et al. Numerical

- simulations of acoustic cavitation noise with the temporal fluctuation in the number of bubbles [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(2): 460–472.
- [10] Peng Shui, Zhang Mingmin, Wang Jiang'an. Improved method for computing underwater acoustic wave induced by laser breakdown [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 1332–1337. (in Chinese)  
彭水, 张明敏, 王江安. 一种改进的水下光击穿声辐射计算方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 1332–1337.
- [11] Li Shengyong, Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, et al. Experimental investigation of influence of ambient pressure on properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 879–883. (in Chinese)  
李胜勇, 王晓宇, 王江安, 等. 环境压强对激光空泡声波特性影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 879–883.
- [12] Li Shengyong, Wu Jun, Jiang Tao, et al. Properties investigated of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves based on wavelet analysis [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1053–1058. (in Chinese)  
李胜勇, 吴俊, 姜涛, 等. 基于小波分析的空泡声波特性研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1053–1058.
- [13] Du Gonghuan, Zhu Zhemin. *Fundamentals of Acoustics* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 102–105. (in Chinese)  
杜功焕, 朱哲民. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 102–105.
- [14] Lu Zhigang, Zhan Renjun, Wang Xiaoyu. Characteristics of laser-induced plasma acoustic signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2844–2849. (in Chinese)  
卢志刚, 战仁军, 王晓宇. 激光等离子体声信号特性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2844–2849.
- [15] Liu Mengran, Jian Zeming, Zhang Guojun, et al. Fluid-structure interaction of MEMS vector hydrophone in packing processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1387–1393. (in Chinese)  
刘梦然, 简泽明, 张国军, 等. MEMS 矢量水听器封装的流体-结构相互作用 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1387–1393.