

文章编号 1004-924X(2009)08-1832-07

分布反馈式光纤激光器的动态特性

谭波^{1,2}, 黄俊斌¹, 何琳², 顾宏灿¹, 李日忠¹

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033)

摘要:为了探明分布反馈式(DFB)光纤激光器用于水声探测时,所测得的声压灵敏度高于静压条件下计算所得的声压灵敏度,且动态响应曲线不平坦的原因及其机理,对DFB光纤激光器的动态特性进行了研究。对两端固定并分别置于空气和水介质中的DFB光纤激光器的振动模态进行了数值仿真分析;设计加工了实验夹具,分别对其进行实验研究。实验测得数据显示,两端固定的裸纤在发生振动时的第一阶固有频率与其夹持长度有关,且随着该长度的增大,固有频率降低;当夹持长度分别为50、55和60 mm时,在空气和水介质中DFB光纤激光器振动的第一阶固有频率分别约为250、200、125 Hz以及200、160、120 Hz,实测数据与仿真分析吻合。结果表明,当DFB光纤激光器受外界激励发生振动时,会引起激光器输出信号幅值的波动,导致其声压灵敏度出现起伏,第一阶固有频率对其具有很大的影响。

关键词:分布反馈光纤激光器;水听器;水声探测;动态特性;声压灵敏度

中图分类号: TN248.8 **文献标识码:** A

Dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser

TAN Bo^{1,2}, HUANG Jun-bin¹, HE Lin², GU Hong-can¹, LI Ri-zhong¹

(1. *Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

2. *Research Institute of Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

Abstract: When a Distributed Feedback(DFB) fiber laser is used in underwater acoustic detection, it is found that the acoustic pressure sensitivity of the DFB fiber laser is higher than that calculated under hydrostatic boundary conditions, and its frequency response curve is not smooth. To explore the reason and the mechanism of the above, the dynamical characteristics of the DFB fiber laser are investigated. Firstly, the vibration models of the DFB fiber laser whose both ends are fixed and placed in air and water respectively is analyzed numerically. And then, with specially designed testing assemblies, experimental study on it is also conducted. The results indicate that the first order natural frequency of the DFB fiber laser is related to the length of the optical fiber between the two fixed ends, and the frequency decreases with the length increases. When the length is set as 50, 55 and 60 mm respectively, the first order natural frequencies have been found to be about 250, 200 and 125 Hz in air, and 200, 160 and 120 Hz in water. These data show that when vibration takes place in the DFB fiber laser, its output will be changed to cause the fluctuation of acoustic pressure sensitivity, which shows

收稿日期:2008-09-02;修订日期:2008-10-23.

基金项目:国家973安全重大基础研究发展规划资助项目

the first natural frequency is an important factor for the underwater acoustic detection.

Key words: Distribution Feedback(DFB) fiber laser; hydrophone; underwater acoustic detection; dynamical characteristic; acoustic pressure sensitivity

1 引 言

分布反馈式(DFB)光纤激光器近年来在水声探测领域得到了迅速发展。但在将 DFB 光纤激光器应用于水声探测的研究过程中,可以发现实验中所测得的 DFB 光纤激光器声压灵敏度往往要高于在静水压力条件下理论计算所得的声压灵敏度,而且其频响曲线出现较大起伏。1998 年 S. W. Lovseth 等人指出^[1],利用 DFB 光纤激光器探测空气中的声波时,声场中的压力梯度将对光纤产生横向力,使光纤发生弯曲并产生轴向的应变,从而影响激光器的输出;1999 年 D. J. Hill 等人发现^[2],将 DFB 光纤激光器作为水声传感器时,其频率响应曲线在测量频带内的变化幅度超过 ± 10 dB,而有关的原因尚有待于进一步的研究;2003 年 A. Tikhomirov 等人第一次提出^[3],声波引起的光纤弯曲是 DFB 光纤激光器引入干扰的主要响应机制,并利用空气中的实验对其理论进行了验证。

DFB 光纤激光器作为一种细长型结构的敏感元件,本身结构和响应机理都具有非常独特的特性,这些特性对于 DFB 光纤激光水听器传感特性具有非常重要的影响。本文利用有限元软件 ANSYS,建立了光纤分别置于空气和水介质中的三维模型,对处于两端固定条件下的 3 种不同长度的光纤分别进行了模态分析,计算了其前 4 阶固有频率及振型;设计了可调整间距的夹具对 DFB 光纤激光器进行夹持,并利用加速度振动实验和振动液柱法对各种夹持长度条件下的 DFB 光纤激光器进行了振动和水声实验研究;最后对仿真结果与实验数据进行了比较。

作为 DFB 光纤激光水听器的敏感元件,DFB 光纤激光器对其传感特性具有非常重要的影响,因此本文对激光器的动态特性进行了研究,探讨其动态特性对 DFB 光纤激光器输出的影响,这对 DFB 光纤激光水听器的实用化研究,解决其抗干

扰问题,以及指导 DFB 光纤激光水听器探头的设计都具有非常重要的意义。

2 DFB 光纤激光器基本传感特性

DFB 光纤激光水听器利用 DFB 光纤激光器作为敏感元件。将 DFB 光纤激光水听器置于声场时,声压将引起激光腔的应变,从而使激光器输出波长 λ_{FL} 发生变化。检测这个变化,即可测定激光腔的受激励程度,从而解调出声压信号。该输出波长是由谐振腔内相移光栅的布喇格波长决定的,即 $\lambda_{FL} = \lambda_B$ ^[4]。该反射波长满足如下光学方程^[5]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

其中, λ_B 为布喇格波长, Λ 是光栅周期, n_{eff} 是纤芯的有效折射率,一般取值 1.456。

因此外界激励引起的光栅布喇格波长漂移可以由下式描述:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (2)$$

由公式(2)可看出,外界激励一方面通过弹性效应使光纤的几何结构发生变化,另一方面可通过光弹效应使光纤折射率发生变化,从而对波长漂移产生影响。

如图 1 所示,将基于 DFB 光纤激光器的水听器置于水声场时,外界激励使 DFB 光纤激光器产生应变,从而使出射波长产生相应的漂移。由于 DFB 光纤激光器出射激光具有很窄的激射线宽,因此水听器的信号可采用干涉解调法进行解调,通过与干涉型解调仪结合后,水听器具有相当高的声压灵敏度。比较常用的解调方法是 1992 年由 A. D. Kersey 等人提出的非平衡 Mach-Zehnder 干涉解调法^[6]。其原理是,DFB 光纤激光器发出的携带水声信号的窄带光经一个 3 dB 耦合器分束后分别进入光程差为 nd 的非平衡 Mach-Zehnder 光纤干涉仪两臂,从而将波长漂移信息转换为相位信息;随后两路光束再经另一个

3 dB 耦合器重新相干混合,在输出端输出干涉结果;输出的光信号由光电探测器接收转换为光电

流,再经过差分放大、带通滤波后,进入计算机进行数字信号处理。

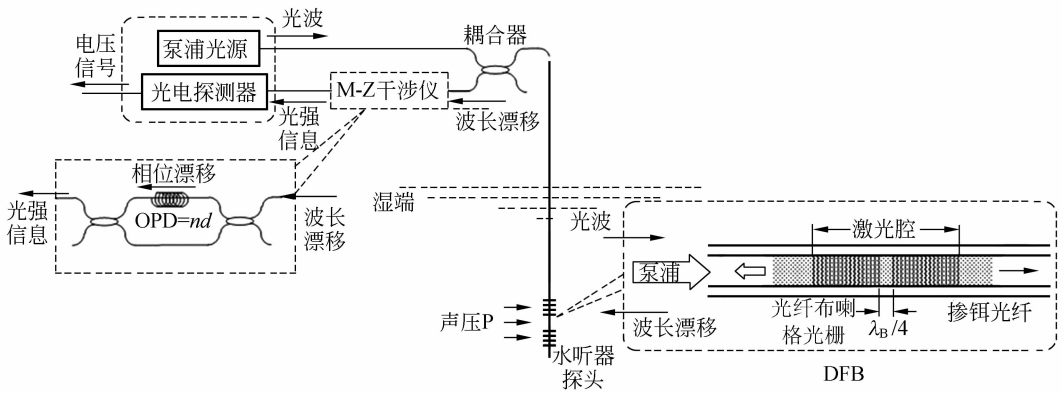


图 1 DFB 光纤水听器系统的基本原理图

Fig. 1 Principle of DFB fiber laser hydrophone system

由公式(2)可见,当 DFB 光纤激光器受到外界激励时,其光纤有效折射率和光栅周期将发生改变,从而引起出射激光波长的变化,而在以往的研究中,通常仅考虑了激光器均匀受压的情况^[2],基于这一假设计算所得的频率响应曲线非常平坦。但实际上,由于激光器独特的细长型结构特点,在受到加速度激励或者声波作用时,光纤都将由于惯性力或者声波散射作用所产生的净力^[7]而产生横向振动,造成光纤轴向上的拉伸,此时 DFB 光纤激光器内部除均匀受压而产生受声信号调制的应变外,还将产生由于弯曲而引起的应变,从而使 DFB 光纤激光器出射激光波长发生变化。因此,光纤本身固有的弯曲振动特性将对 DFB 光纤激光器的输出特性产生重要的影响。由于应用中通常需对 DFB 光纤激光器两端进行固定,因此本文分析中仅考虑两端固支光纤的动态特性。

3 DFB 光纤激光器振动特性分析

3.1 光纤的基本物理特性

光纤的结构非常简单,通常包括纤芯、包层、涂敷层三层。其中纤芯位于光纤的中心部位,其成份是高纯度的二氧化硅,为提高其光折射率通常还掺有极少量的掺杂剂,如二氧化锗、五氧化二磷等;包层位于纤芯的周围,其成份也是含有极少

量掺杂剂的高纯度二氧化硅,折射率略低于纤芯的折射率;光纤的最外层是由丙烯酸酯、硅橡胶和尼龙组成的涂敷层,其作用是增加光纤的机械强度与可弯曲性。

由于 DFB 光纤激光器在制作过程中通常要先将光纤的涂敷层剥离,然后才能进行处理并写入光栅构成谐振腔,而写入光栅后要重新涂敷激光器又比较困难,因此这里仅对未涂敷保护层的裸纤进行研究。由于纤芯与包层材料属性相同,在力学分析中可将其作为一个整体考虑。目前所使用的标准通信光纤包层的直径通常为 $125\ \mu\text{m}$,DFB 光纤激光器谐振腔的长度通常为 $50\ \text{mm}$ 。

3.2 空气中两端固定光纤的模式分析

利用有限元软件 ANSYS 对光纤在空气中的振动特性进行了分析。考虑到光纤的对称性,为节省计算资源,在 ANSYS 中建立了光纤的 $1/2$ 三维模型。为了分析不同光纤长度对结果的影响,建立了长度 L 分别为 $50\ \text{mm}$ 、 $55\ \text{mm}$ 、 $60\ \text{mm}$ 的 3 种模型,光纤直径 $D=125\ \mu\text{m}$ 。光纤材料参数为:密度 $\rho=2\ 700\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E=7.5\times 10^{10}\ \text{Pa}$,泊松比 $\nu=0.17$ 。选用 SOLID45 单元对光纤划分网格,共划分单元 11 730 个,节点 16 863 个,光纤网格模型如图 2 所示。模型建立后对光纤施加两端固定的边界条件,光纤中间剖面施加对称约束。利用 Block Lanczos 方法对其进行模式计算,得到前 4 阶固有频率及振型分别如表 1 和图 3 所示。

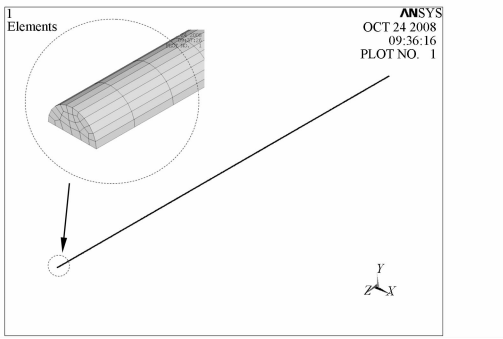


图 2 空气中光纤网格模型

Fig. 2 Meshed model of fiber in air

表 1 空气中各模型前 4 阶固有频率

Tab. 1 Natural frequencies of the first four orders for models in air

r	1	2	3	4
f_r (Hz)-50 mm	243.6	671.5	1 316.3	2 175.9
f_r (Hz)-55 mm	200.6	552.9	1 083.8	1 791.6
f_r (Hz)-60 mm	168.0	463.1	907.9	1 500.8

为:密度 $\rho = 2\ 700\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E = 7.5 \times 10^{10}\ \text{Pa}$,泊松比 $\nu = 0.17$;水介质参数为:密度 $\rho = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$,声速 $c = 1\ 500\ \text{m/s}$ 。分别选用 SOLID45 单元和 FLUID30 单元对光纤和水介质划分网格,共划分 SOLID45 单元 14 000 个,FLUID30 单元 52 560 个,其中流固耦合单元 5 076 个,节点 76 950 个,光纤及水介质网格模型如图 4 所示。

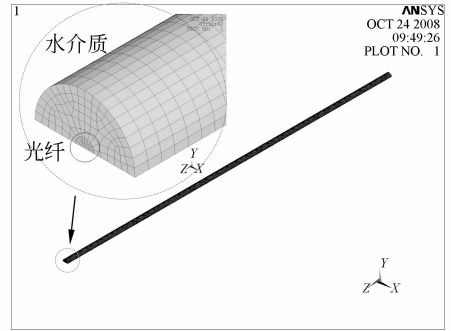


图 4 水介质中光纤网格模型

Fig. 4 Meshed model of fiber in water

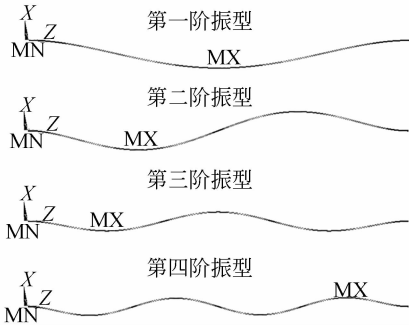


图 3 两端固定光纤的前四阶固有振型

Fig. 3 Mode shapes of the first four orders for fiber both ends fixed

模型建立后对光纤施加两端固定的边界条件,光纤及水介质中间剖面施加对称约束。利用 Unsymmetric 方法对其进行模态计算,得到前 4 阶固有频率如表 2 所示,其振型与图 3 相同。

表 2 水介质中各模型前 4 阶固有频率 (Hz)

Tab. 2 Natural frequencies of the first four orders for models in water

r	1	2	3	4
f_r (Hz)-50 mm	199.4	549.6	1 077.5	1 781.2
f_r (Hz)-55 mm	164.8	454.2	890.5	1 472.0
f_r (Hz)-60 mm	138.5	381.7	748.2	1 236.9

3.3 水介质中两端固定光纤的模态分析

为对光纤在水介质中的振动特性进行分析,利用 ANSYS 的流体-结构耦合处理功能对该问题进行了计算。在 ANSYS 中建立了光纤与水的 1/2 三维模型,同样共建立光纤长度 L 分别为 50 mm、55 mm、60 mm 的 3 种模型,光纤直径 $D = 125\ \mu\text{m}$ 。为了使水介质边界对计算结果的影响尽量小,改变水介质模型尺寸进行了多次计算,最终确定将尺寸设为光纤直径的 6 倍,即水介质模型直径 $X = 0.75\ \text{mm}$,此时该参数对计算所得固有频率与振型的影响已非常小。光纤材料参数

通过以上分析可见,两端固定的裸纤振动的固有频率与光纤长度有关,随着固定间距的增大,各阶固有频率降低;而受到水介质耦合作用的影响,置于水介质中的光纤各阶固有频率要低于置于空气中的光纤,振型与介质类型无关。

4 实验设计

对两端固定的 DFB 光纤激光器在受到加速度激励以及水声作用时的响应特性分别进行了实验研究。实验中所采用的 DFB 光纤激光器为在

掺铒光纤上蚀刻 $\lambda/4$ 相移光栅制作而成,出射激光中心波长为 1 550.660 nm,在 100 mW 980 泵浦光泵浦下的输出功率为 120 μ W,线宽 < 50 kHz;实验系统采用了基于 3×3 耦合器的无源零差解调方案,非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪由一只 3 dB 的 2×2 耦合器和一只 3×3 的耦合器组成,非平衡路径长度为 60 m;经非平衡干涉仪输出的相位信息再通过光电探测器和数据采集卡采集后联入计算机进行信号处理。

4.1 加速度振动实验

设计加工了如图 5 所示的 DFB 光纤激光器固定装置进行夹持间距的调整以及对激光器的固定。考虑到 DFB 光纤激光器对声信号也非常敏感,为了隔离这种干扰,采用隔声材料设计加工了隔声盒。DFB 光纤激光器固定装置由基座、两个 L 形固定支架及压片组成。两个 L 形固定支架固定于基座上,其间距可在一定范围内调整,实验中可选择调整为 50 mm、55 mm 和 60 mm;将 DFB 光纤激光器两端分别用压片固定在两个 L 形固定支架上的凹槽内,令 DFB 光纤激光器保持正直并轻微张紧,将两个压片压紧,以螺钉固定;然后将基座固定于隔声盒内部,光纤从隔声盒两侧的小孔引出,隔声盒底部可用螺钉固定于振动台上。

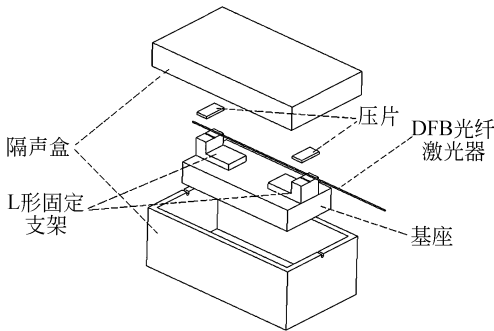


图 5 光纤固定及隔声装置

Fig. 5 Devices for fiber fixing and sound isolating

为了测量 DFB 光纤激光器受加速度横向激励时的响应,搭建了如图 6 所示的 DFB 光纤激光器振动实验系统。

将隔声盒牢固固定于一台 2202 型振动台台面中心,振动台与 7101 功率放大器连接,使用一台 GFG-8050 型信号发生器提供正弦波信号;将一个 6100 型加速度计与隔声盒并排固定于振动台台面,加速度计与一台 3114 型电荷放大器相连,输出信号幅度通过一台 TDS2024 型示波器读

取;DFB 光纤激光器经干涉仪输出的相位信息通过光电探测输出后接入数据采集卡,联入计算机,通过解调后得到 DFB 光纤激光器的相位漂移信息。读取加速度大小后,即可计算出 DFB 光纤激光器的加速度响应大小,单位为 rad/g。

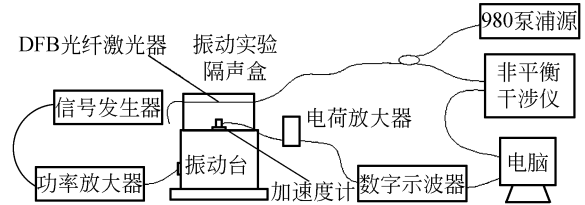


图 6 振动实验系统

Fig. 6 Vibration testing system

4.2 振动液柱法实验

设计加工了如图 7 所示的 DFB 光纤激光器水声实验夹具,该夹具的两个伸出杆可在一定的间距间自由调整,实验中可选择调整为 50 mm、55 mm 和 60 mm。固定间距后,使 DFB 光纤激光器放入支架两个伸出杆上的凹槽内,令 DFB 光纤激光器保持正直并轻微张紧,然后将两个压片压紧,以螺钉固定。

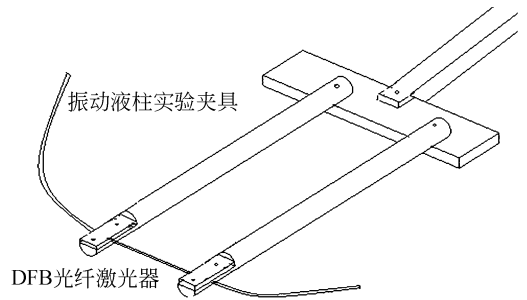


图 7 水声实验夹具

Fig. 7 Testing clamp of in water

搭建了如图 8 所示的 DFB 光纤激光器振动液柱法实验系统对 DFB 光纤激光器受声压激励时的响应进行测量。

加工制作了液柱容器,注入水深 180 mm;容器牢固固定于振动台台面中心,振动台与功率放大器连接,使用信号发生器提供正弦波信号;加速度计固定于液柱容器底部,与电荷放大器相连,输出信号幅度通过示波器读取;利用水声实验夹具将 DFB 光纤激光器水平夹持,入水深度为 90 mm,保持激光器轴线与水平面平行,定位后将夹持激光器的夹具固定于与振动系统隔开的连杆

上;DFB 光纤激光器经干涉仪输出的相位信息通过光电探测输出后接入数据采集卡,联入计算机,通过解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息。读取加速度大小后,根据振动液柱法声压计算公式,即可计算出 DFB 光纤激光器所处深度在各频点的声压大小,从而得到其声压响应输出大小,单位为 $\text{rad}/\mu\text{Pa}$ 。

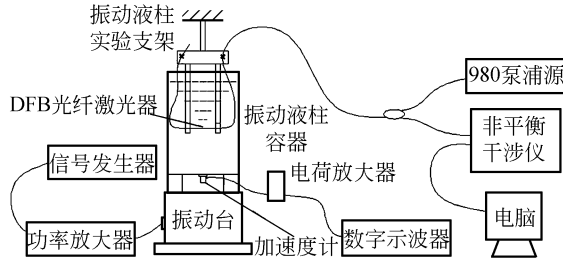


图 8 振动液柱法实验系统

Fig. 8 Vibration column testing system

5 实验结果

5.1 加速度振动实验结果

使用光纤固定及隔声装置对激光器进行了 3 种夹持间距的实验,实验中选择 $20\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频率范围内的 $1/3$ 倍频程中心频率施加激励,读取实验数据并进行计算后得到 DFB 光纤激光器在各个频点的加速度响应,取参考值为 $1\text{ rad}/g$,可得到 3 条加速度响应曲线如图 9 所示。

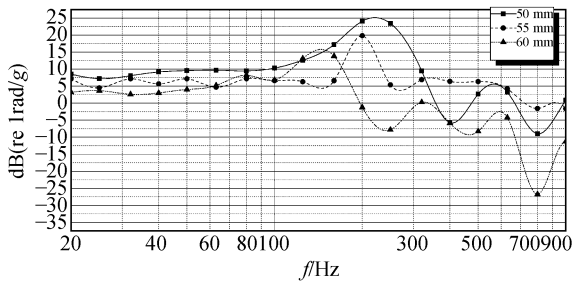


图 9 DFB 光纤激光器加速度响应曲线

Fig. 9 Acceleration response curves of DFB fiber laser

由图 9 可见,图中的 3 条曲线分别在 250 Hz 、 200 Hz 、 125 Hz 附件出现了较大的起伏,这与表 1 所示的计算所得的各曲线第一阶固有频率非常吻合;在响应曲线低频段,单位加速度激励下均引起了激光器较大幅度的输出,3 条曲线的加

速度响应都超过了 0 dB ;在第一阶固有频率各加速度响应显著增加,其中夹持长度为 50 mm 的激光器响应达到了 $25\text{ dB (re } 1\text{ rad}/g)$,可见第一阶固有频率对两端夹持的 DFB 光纤激光器振动特性产生了很大的影响,在该频点 DFB 光纤激光器的加速度响应出现了较大幅度的增加,但在第一阶固有频率后,各夹持长度条件下的激光器输出均出现了与固有频率无明显关系的较大起伏。

5.2 振动液柱法实验结果

使用水声实验夹具对激光器进行了 3 种夹持间距的实验,实验中选择 $20\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频率范围内的 $1/3$ 倍频程中心频率施加激励,读取实验数据并进行计算后,取参考值为 $1\text{ rad}/\mu\text{Pa}$,可得到 DFB 光纤激光器 3 条声压响应曲线如图 10 所示。

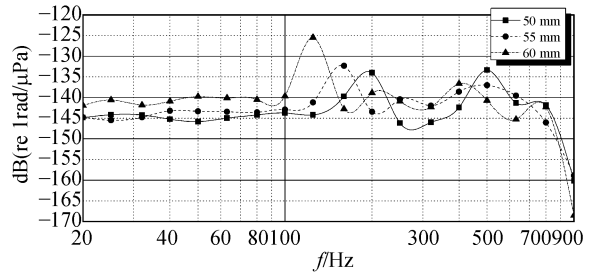


图 10 DFB 光纤激光器声压响应曲线

Fig. 10 Acoustic pressure response curves of DFB fiber laser

由图 10 可见,实验所测得的结果同样与仿真计算所得的各个第一阶共振频率能够很好吻合,对应的激光器声压响应曲线分别在 200 Hz 、 160 Hz 、 120 Hz 附近出现了较大的起伏,而在第一阶谐振出现之前的频响曲线均相对比较平坦。但在第一阶固有频率后,各夹持长度条件下的激光器输出的平坦性均比较差,与加速度振动实验的结果相似,各夹持长度条件下的激光器输出均出现了与固有频率无明显关系的较大起伏。

6 结论

利用有限元软件 ANSYS 对分别置于空气和水介质中的裸纤进行了模态分析;对处于该边界条件、不同夹持间距状态下的 DFB 光纤激光器进行了实验研究。仿真分析及实验结果表明:两

端固定的裸纤振动的第一阶固有频率与其夹持长度有关,激光器在各固有频率的信号输出幅度有明显的增大,且随着夹持长度的增大,各阶固有频率降低;而受到水介质耦合作用影响,置于水介质中的光纤各阶固有频率要低于置于空气中的光纤。当夹持长度分别为 50、55 和 60 mm 时,在空气和水介质中 DFB 光纤激光器振动的第一阶固

有频率分别为 250、200、125 Hz 以及 200、160、120 Hz。但是对于第一阶固有频率以后激光器输出与固有频率无明显关系的原因,固定激光器时两端所受张紧力与其输出之间的关系,以及 DFB 光纤激光器在非均匀应变状况下加速度及声压作用下响应与激励之间的关系尚有待于进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] SIGURD W L, KJELL B, JON T K. Contributions to wavelength shifts of DFB fiber lasers used as acoustic sensors in air[J]. *SPIE*, 1998, 3483: 69-73.
- [2] HILL D J, NASH P J. A fiber laser hydrophone array[J]. *SPIE*, 1999, 3860:55-66.
- [3] TIKBOMIROV A, FOSTER S, MILNES M, *et al.*. Acoustic and vibrational response of a DFB fibre laser sensor [C]. *Proceedings of COIN/ACOFT 2003 Conference, Melbourne, Australia; COIN/ACOFT*, 2003.
- [4] LEUNG I, BRODZELI Z, WHITBREAD T, *et al.*. A distributed-feedback fibre laser based optical fibre hydrophone system with very high-sensitivity

[J]. *SPIE*, 2005,5634:434-443.

- [5] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- WANG H W. *The Technology and Application of Fiber Sensing*[M]. Beijing: Press of National Defence Industry, 2001. (in Chinese)
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron Lett.* 1992,28(3):236-238.
- [7] P. M. 莫尔斯, K. U. 英格特. 理论声学[M]. 北京:科学出版社,1986.
- MORSSE P M, INGARD K U. *Theoretical Acoustic*[M]. Beijing: Press of Science, 1986. (in Chinese)

作者简介:



谭波(1979—),男,湖南双峰人,博士,讲师,分别于2000年、2003年、2008年于海军工程大学获得学士、硕士、博士学位,现为海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室教员,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: whtbwjsw@163.com



顾宏灿(1980—),男,江苏晋江人,博士,讲师,分别于2001年、2003年、2008年于海军工程大学获得学士、硕士、博士学位,现为海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室教员,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: guhongcan@163.com



黄俊斌(1965—),男,湖南湘潭人,副教授,分别于1988年、1991年于海军工程大学获得学士、硕士学位,现为海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室主任,主要从事光纤传感技术和兵器测试与故障诊断技术方面的研究。E-mail: junbinh@public.wh.hb.cn



李日忠(1978—),男,湖南郴州人,硕士,讲师,2001年于武汉大学获得学士学位,2004年于国防科技大学获得硕士学位,现为海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室教员,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: tatam@163.com



何琳(1957—),男,四川西充人,教授,博士生导师,分别于1981年、1984年于海军工程大学获得学士、硕士学位,现为海军工程大学振动与噪声研究所所长,主要从事潜艇隐身方面的研究。E-mail: shock_isolator@yahoo.com.cn