

文章编号:1001-5132 (2009) 03-0425-05

一种新型光纤声音传感器的设计与研究

杨建红, 房怀英

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为解决单光纤输入、输出 Y 型分支结构光纤声音传感器易受激光源光强波动的影响, 由此设计了双同心圆新型结构的光纤声音传感器, 并在出射光纤光强为高斯分布的基础上推导了反射光强的物理模型, 理论分析表明这种新型光纤结构能克服光强波动的影响. 并在 1310 nm 波长的激光器和单模光纤研制光纤声音传感器上进行了相关实验, 实验结果表明: 这种光纤声音传感器的测量精度不受激光器输出光强波动的影响, 实验测得传感器灵敏度为 $850 \text{ mv} \cdot \text{Pa}^{-1}$, 频率响应范围为 10 Hz~9.5 kHz.

关键词: 光纤声音传感器; 双同心圆; 光强分布; 光强波动; 物理模型

中图分类号: TP212

文献标识码: A

光纤声音传感器由于具有抗电磁场干扰能力强、灵敏度高等特点, 在电力系统故障监测中, 常用于探测电力故障的异常声音. 文献[1]采用 Y 型光纤结构和多模光纤设计光纤声音传感器, 但是没有考虑光源本身波动对测量结果的影响, 而实际上, 光源输出光强可受工作环境和电源电压波动的影响. 文献[2]中为了克服输出光强波动带来的影响, 采用 1 根输入光纤和 6 根输出光纤设计结构, 通过合适的后处理方法能克服光强波动对测量的影响, 但是这种光纤结构过于复杂, 同时也影响光纤声音传感器的微型化和集成化.

为了克服光强波动对光纤声音传感器测量结果的影响, 笔者设计的光纤声音传感器采用反射强度调制方式, 并采用双同心圆新型光纤结构, 其结构如图 1 所示, 最里面层为入射光纤, 外面依次为 2 束接收光纤^[3]. 这种光纤结构相对于 Y 型光纤结

构而言, 以 2 个同心光纤输出电压之比为声音调制信号, 克服了光强波动带来的影响. 相对于 6 根输出光纤结构而言, 在光纤耦合和信号处理上会更简单. 当有声音产生时, 由于空气的振动带动传感器探头前端的振动膜片发生振动, 振动膜片对发射光进行强度调制, 通过光电探测器转换传感器直接输出 2 个电压信号. 激光器输出的光强很容易受到温度和电压的影响, 这 2 个电压信号包含了激光源的波动情况, 但是以 2 路输出电压的比值为传

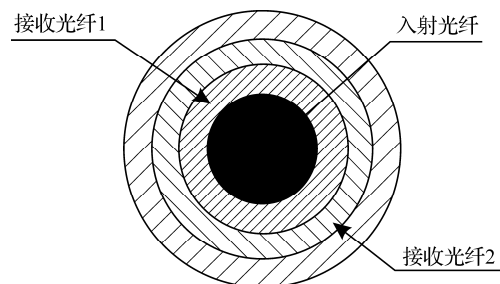


图 1 双同心圆光纤结构

传感器输出信号则避免了光强波动带来的影响. 相对于单输入多输出的光纤结构形式, 这种光纤声音传感器很容易实现传感器的微型化和集成化. 此外, 笔者也从理论和实验对所研制的光纤声音传感器特性进行了研究.

1 光纤声音传感器反射光数学模型的分析

振动薄膜受到声音压力作用时产生位移, 从而对接收光纤的光强进行调制, 接收光强同薄膜与光纤距离的关系称为光强调制函数. 在声压的作用下, 由于振动膜的位移为纳米级, 远远小于振动膜厚度和半径, 因此振动膜的弯曲变形不是球冠形的. 而且光纤高斯半径远远小于振动膜半径, 所以可以将接收光纤近似等效为平面镜成像. 如图 2 所示, 以 ρ 和 d 为坐标建立平面镜成像系统, 图 2 中 A 和 B 之间等效间距为 $2d$.

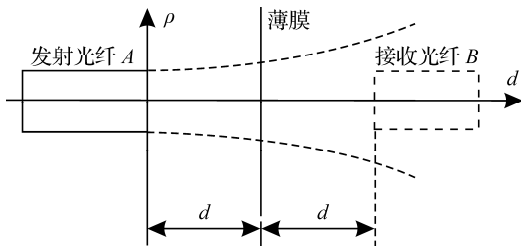


图 2 等价光纤坐标系

根据能量守恒定理, 由文献[4-6]可知接收光纤沿径向方向的光强分布为:

$$I(2d) = \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left(-2\frac{\rho^2}{\omega^2(2d)}\right), \quad (1)$$

其中,

$$\omega(2d) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2\lambda d}{\pi\omega_0^2}\right)^2},$$

$I(2d)$ 和 $\omega(2d)$ 分别为距离端面 d 处的中心光强和高斯半宽; $I(0)$ 为纤端中心处光强; $\omega_0 = \sigma R_0$ 为单模光纤的高斯半宽; ω_0 同光纤结构参数 σ 和纤芯半径相关; ρ 为光纤端面径向半径. 建立如图 3 所示的坐标系, 忽略反射光同接收光纤的耦合损

失, 假设反射膜的光反射率为 g , 且假设光纤同振动膜之间完全垂直, 由图 3 可知 2 束接收光纤所接收的光通量分别为:

$$P_{1f} = g \times \int_{R_0}^{R_1} 2\pi I(2d) \rho d\rho = \int_{R_0}^{R_1} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left(-2\frac{\rho^2}{\omega^2(2d)}\right), \quad (2)$$

$$P_{2f} = g \times \int_{R_1}^{R_2} 2\pi I(2d) \rho d\rho = \int_{R_1}^{R_2} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left(-2\frac{\rho^2}{\omega^2(2d)}\right). \quad (3)$$

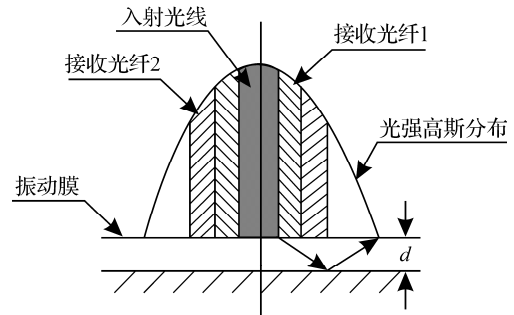


图 3 双同心圆光纤纤端光强分布

由(2)式和(3)式可知, 每束接收光纤接收的光通量与纤端发射光强 $I(0)$ 、光强分布高斯半宽及接收光纤半径有关. 如果将被调制的接收光强作为被检测的信号, 则接收光纤接收的光通量很容易受到光源光强波动的影响. 激光光源发出的光强很容易受到温度、工作电压的波动影响, 这也是反射光强调制式光纤传感器一般不使用激光器作为光源的主要原因. 现将(2)式和(3)式作比值运算, 因此为:

$$P_f = \frac{P_{1f}}{P_{2f}} = \frac{\int_{R_0}^{R_1} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left(-2\frac{\rho^2}{\omega^2(2d)}\right)}{\int_{R_1}^{R_2} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left(-2\frac{\rho^2}{\omega^2(2d)}\right)} = P(R_0, R_1, R_2, d, \omega(0)). \quad (4)$$

由此可见, 2 个输出电压的比值与光强 $I(0)$ 无关, 与光纤和振动膜的间距 d 、高斯半径、光纤半径等有关, 因此当光纤声音传感器采用双同心圆光纤结构, 可以探测出光纤探头和振动膜之间的间距, 从而检测出声音信号, 同时可以避免激光器

光强波动对测量信号的影响.

2 光纤声音传感器的研制

传感器探头用于振动膜片和光纤的安装, 为简化其设计结构, 设计中采用光纤头同探头直接装配, 并采取密封措施将联接处密封. 振动膜片加预置张力后通过螺栓直接夹紧. 由于光纤同振动膜片之间的垂直度直接影响接收光纤光通量函数中的垂直度系数, 因此在设计中用4个微调螺钉调整光纤头与薄膜的垂直度. 基于以上分析, 笔者自行研制了同心圆型光纤声音传感器的探头, 设计出的探头结构如图4所示. 并为保证探头结构装配的准确性, 整个结构采用快速原型制造.

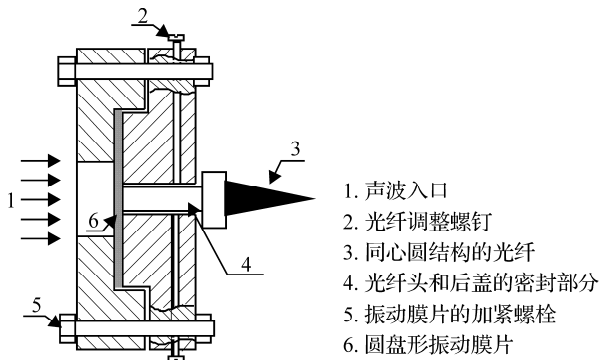


图4 传感器探头结构

采用的单模光纤是 Corning 公司的 SMF-28, 它是一种低损耗的阶跃折射率光纤, 纤芯直径 $8.2 \mu\text{m}$, 数值孔径 NA 为 0.09 (13.5%光强处), 波长为 1310 nm 时的高斯半宽 $\omega_0 = 4.6 \mu\text{m}$. 相比 Y 型结构反射光纤声音传感器而言, 图4中光纤采用了双同心圆结构, 可以避免光强波动对声音测量的影响, 同时结构简单容易实现.

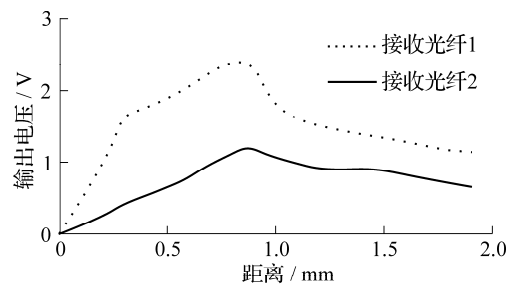
3 实验及实验结果分析

3.1 反射光强调制特性

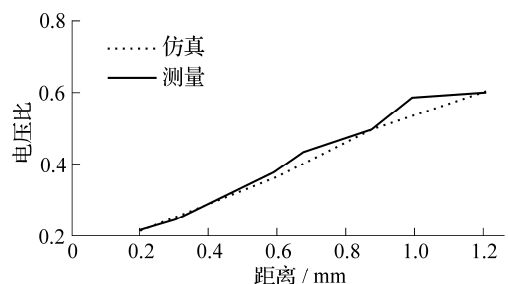
光纤传感器光强调制特性指 2 束接收光纤接收光强之比与光纤端面和反射薄膜距离的关系,

为测试光强调制特性, 使用哈尔滨工程大学生产的二维微位移调节架代替图4中的光纤探头. 光纤固定架上的 4 个螺钉用于调整光纤与反射薄膜的垂直度, 2 个千分头分别用于 x, y 两个方向的微调进给, 它们的最小刻度都是 0.01 mm . 实验中, 通过调整 x 方向的千分头来调整光纤端面 and 反射薄膜之间的距离, 通过 PIN 光电检测电路测量反射光路 PIN 的输出光强. 为减小误差, 实验中光电检测输出电压的采样频率设为 100 Hz , 采样 10 s 取平均值. 实验结果如图5(a)所示, 图5(a)中纵坐标为两同心圆接收光纤输出电压, 横坐标为纤端和振动膜之间的间距. 图5(b)为两同心圆接收光纤输出电压的比值. 分别对实验测量结果和(4)式的仿真结果进行对比, 说明前面的纤端光强分布和等价成像的假设是正确的. 而理论仿真和实际测量仍然存在一定的误差, 这主要是由调节架的调节误差, 纤端和振动膜是否垂直等因素引起的.

由图5可知, 当采用 U_1 和 U_2 的比值作为传感器的输出, 传感器具有较大的线性范围和较高的线性度. 因此采用双同心圆型光纤声音传感器可以使光纤端面和振动膜之间有较大的调节范围,



(a) 反射光纤输出电压



(b) 电压比值输出特性

图5 反射光强调制特性

这使得这种光纤声音传感器制造变得容易. 实验测得传感器灵敏度为 $850 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$, 频率响应范围为 $10 \text{ Hz} \sim 9.5 \text{ kHz}$.

3.2 对光源输出光强变化的补偿实验研究

激光器的工作温度对输出光强具有一定的影响, 因此, 分别针对同心圆型光纤声音传感器的 2 根输出光纤的电压比值和单根输出光纤的输出电压进行了对比实验研究, 研究的结果如图 6 所示. 然而, 长时间的连续工作会使激光器工作温度发生一定的漂移, 因此在实验中对传感器连续工作 40 h 的时间中, 间隔 3 h 进行测试. 虚线为输出光纤 1 的输出结果, 实线为输出光纤 1 和输出光纤 2 的电压比值, 光纤头和反射膜之间间距为 0.85 mm . 实验结果表明: 单根光纤输出电压有比较大的波动, 这是工作温度变化影响的结果; 而变化的趋势为慢慢减小, 因为激光器长时间工作使其工作温度慢慢升高, 导致其阈值电流增大, 从而使输出光强减小, 如果不消除这种变化会影响传感器长时间的测量精度. 如果采用同心圆型结构光纤传感器, 则 2 根输出光纤电压的比值能抵消温度变化的影响. 从图 6 中也可发现, 2 根输出光纤的输出电压比值变化很小, 输出的稳定性较好, 这也就进一步验证了(4)式的推导是正确的.

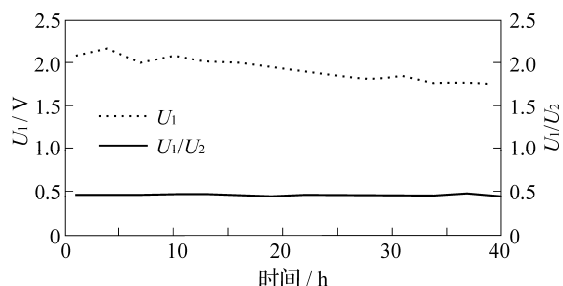


图 6 传感器长时间稳定性对比

在没有声音输出的情况下, 双同心圆型光纤对激光源输出光强波动的抑制作用, 当光纤头和反射膜之间的间距为 1 mm , 使光纤声音传感器的激光器驱动电流具有一定的波动, 电流波动范围为 $26 \sim 30 \text{ mA}$, 然后使用后处理电路分别探测接收光纤 1 和接收光纤 2 的电压信号, 求出电压 U_1 和

U_2 的比值, 实验结果见表 1. 由实验结果可知, 如果激光器的驱动电流不稳定, 则能影响单个输出光纤的输出电压, 从而影响声音测量的准确度; 但是如果采用双同心圆型结构, 以 2 根输出光纤输出电压的比值作为测量信号, 则测量结果受驱动光强波动较小. 同时这种光纤结构也能用于其他反射光强调制式光纤传感器.

表 1 光纤输出受驱动电流影响情况

输入电流/mA	U_1/V	U_2/V	U_1/U_2
26	1.64	1.58	1.04
27	1.85	1.76	1.05
28	2.02	1.96	1.03
29	2.27	2.11	1.07
30	2.45	2.39	1.03

4 结论

基于纤端光强高斯分布模型, 推导了双同心圆光纤结构的接收光强分布模型. 研究中发现, 若以 2 根接收光纤的输出电压之比作为光强调制信号的输出, 则能消除光源波动对测量的影响. 并在此理论的基础上, 设计了新型双同心结构的光纤声音传感器, 并对所设计的光纤声音传感器进行了理论仿真和实验研究. 研究中也得出, 双同心圆结构的光纤声音传感器具有较大的线性范围和非常好的线性度. 在分别对光纤声音传感器的单根光纤输出和双同心圆型光纤声音传感器的输出电压之比做了对比实验研究后, 也同时表明, 双同心圆结构的光纤声音传感器能较好抑制激光电源波动和温度对测量精度的影响, 同时, 所设计的光纤声音传感器的灵敏度和频率响应范围能满足一些特定场合的测量需求.

参考文献:

- [1] 徐海英, 蒋永梁, 王丽, 等. 光纤麦克风传感探头的设计研究[J]. 传感技术学报, 2004(4):716-719.
- [2] Bucaro J A, Lagakos N. Lightweight fiber optic microphones and accelerometers[J]. Review of Scientific

- Instruments, 2001, 72(6):2 816-2 821.
- [3] 三好隆志, 斋藤胜政. 同心圆型光ファイバ束の解析 [J]. 精密机械, 1981, 47(3):74-79.
- [4] Kadirvel K, Taylor R, Horowitz S, et al. Design and characterization of MEMS optical microphone for aeroacoustic measurement[C]. Reno: AIAA, 2004.
- [5] Garthe D. Fiber-optic microphone for airborne sound [C]//13th Int Congress Acoustics, Yugoslavia: Belgrade. 1989: 483-486.
- [6] 苑立波, 赵世刚, 吕厚均. 光纤端出射光场的场强分布 [J]. 黑龙江大学学报: 自然科学版, 1993, 10(1):78-84.

Design of a New-type Fiber Optic Acoustic Sensor

YANG Jian-hong, FANG Huai-ying

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to remove disturbance caused by the single output and input fiber Y-structure, this paper introduces a design of a new-type fiber optic acoustic sensor by adopting the double concentric circles fiber structure. The physical model of reflection intensity of light is constructed based on Gaussian distribution of light intensity of fiber endpoint. A laser diode with wavelength of 1 310 nm is used as its light source, and it is found that the changes of light intensity for LD source adversely affect detecting precision of fiber optic acoustic. A simple construction head of fiber optic acoustic sensor is designed based on 1 310 nm LD source and single module fiber. Characteristics of fiber optic acoustic sensor are studied in respect of the light intensity modulation, frequency response, and detecting sound signal by experiment. The experimental results suggest that the proposed fiber optic acoustic sensor has good light intensity modulation, high frequency response, and can better resist the disturbance caused light intensity change. The sensor's sensitivity is found to be $850\text{mv}\cdot\text{Pa}^{-1}$, and the measurement range lies within 10 Hz~9.5 kHz.

Key words: fiber optic acoustic sensor; double concentric circles; light intensity distributing; light intensity change; physical model

CLC number: TP212

Document code: A

(责任编辑 章践立)