



光纤声传感器

章立明 徐其昌

(中国科学院声学研究所)

1986年3月3日收到

光纤传感器作为一种新兴的传感技术,在许多领域中都已显示出强大的生命力。近些年来,国外许多公司、军事部门和大学都积极投身于这方面的研究,使这种新型的传感器得到了迅速发展^[1-2]。

光纤传感器具有低功耗,抗电气干扰及能直接和光纤数据系统相连接等特点。与其它传感器相比,它具有很高的灵敏度,在几何形状上又具有多方面的适应性和组合性,可以根据实际需要做成不同形状,以满足各种不同的要求。光纤传感器的应用范围极为广泛,但其技术基础都是相近的。在此基础上可以制成传感不同物理量的传感器。这些物理量包括声场^[3]、磁场^[4]、压力^[5]、温度^[6]、加速度^[7]、转动(陀螺)^[8]、位移^[9]、液面^[10]、流量和电流^[11]、辐射^[12]等。由于光纤本身具有介电结构,光纤传感器便可用于高压、强电气干扰、高温、腐蚀等恶劣环境。

在过去几年里,国外已研制成60种以上不同类型的光纤传感器(包括光纤本身作为敏感元件和作为其它光学敏感元件的光波导)。从传感机理上,这些传感器主要可分为振幅型和相位型两种。在振幅型的传感器中,待测的外界扰动与光纤连接的某些装置相互作用,直接调制光强。这一类型的优点是结构简单,具有与多模光纤技术的相容性,信号检测也较为容易。但其灵敏度比较低。考虑到大多数应用并不需要极高的灵敏度,因此,这类传感器目前仍拥有较大的市场。相位(即干涉)型传感器,在理论上其灵敏度要比现有的传感器高出几个数量级,并可通过改变在光纤上的涂层来改变其

传感的物理量。这样,使用共同的光源及检测技术就能制成传感不同物理量的传感器。但相位型也有其内在的缺点,如结构较振幅型复杂,并需要比较复杂的检测手段。

下面简单介绍相位型及振幅型声传感器的发展过程。

一、相位型

根据光弹理论,压强的变化可以引起折射率的变化,因此,声波在流体中传播,可以调制一束光的相位。1977年以前,许多人曾用激光干涉的方法测量这一相移。但这种方法本身存在一些问题,主要有1. 相位移是声压和声光相互作用距离的乘积,而光在水中的衰减很大,要产生一个长的作用距离是困难的。2. 由于声光相互作用相当弱,要产生一个可测量的相移,需要很强的声压。3. 在水下产生激光也比较困难。为解决上述问题,1977年 T. H. Bucaro 和 J. H. Cole^[13-14]等人,已想到把长距离低损耗的光纤通入流体中,利用光纤能很好地把光限制在光纤中的特性,大大增加了声光相互作用距离,使探测灵敏度显著提高,以致利用这一效应足以形成一个对声非常灵敏的传感器。这也就是最早的单模相位型光纤声传感器。其实实验装置如图一所示。这种结构实质上就是光学里常用的 Mach-Zehden (M-Z) 干涉仪。由激光器产生的相干光通过50%的分光镜分成两路,一路耦合到一个通入水中的传感光线圈,另一路耦合到一根参考光纤中去。然后再把两

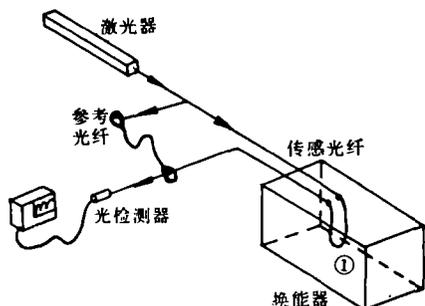


图1 M-Z干涉声传感器示意图

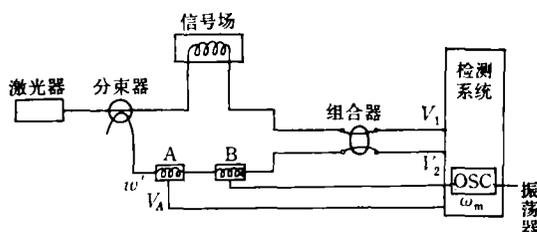


图2 检测系统的一般形式

根光纤的出射光汇合起来形成干涉。干涉后的光送入一个可变孔径的光电检测器，产生电信号输出。由一个压电换能器在传感光纤附近产生一个声压为 p 、角频率为 ω_s 的声信号，这时在光电管上光的幅度为

$$E = E_0 \exp(i\omega t) + E_0 \exp[i\omega t + i\nu \sin(\omega_s t) + i\phi_0]$$

式中 ω 为光的角频率； ϕ_0 表示两光路的固有位差； ν 为声的振幅。对于均匀声场

$$\nu = K \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \cdot p \cdot L$$

n 为光纤的折射率； K 为光的波数； L 为声光相互作用距离。

对于 ν 较小的情况，光电倍增管的输出电流为

$$i_p = 2AO_p [1 + \cos \phi_0] - \frac{1}{2} \nu \sin \phi_0 \sin \omega_s t$$

式中 O_p 表示光从干涉臂输出的光功率； A 为光电倍增管的光电灵敏度。

假设最终限制这种干涉仪灵敏度的因素主要是激光的散粒噪声，可以得出理论上的最小可测声压值为

$$p_{\min} = 3.13\alpha A (cm^{-1}) / \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s$$

电压灵敏度为

$$S(dB \text{ re } |V| \mu Pa) = 20 \log \left[O_p \cdot L \cdot 10^{-\alpha L} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \cdot R \cdot 10^{-5} \right]$$

式中 α 为光纤的衰减系数； R 为光电管的负载电阻。

如果考虑长为 4m， α 为 15dB/km 的光纤，功率为 10 mW，波长为 6328 Å 的激光源，并用量子系数为 0.3，50Ω 负载，具有 100 倍增益的雪崩二极管检测，则在带宽为 1Hz 的情况下， $p_{\min} = 7.6 \times 10^{-7} \mu Pa$ 及 $S = -140 \text{ dB}$ 。如果用单位增益的光电检测器，将得到 $S = -180 \text{ dB}$ 。这一数值比最好的 PZT-5 压电换能器灵敏度还要高 5 倍。

这以后，这种传感器又得到了进一步的改善。1979 年，J. Bucaro 和 T. Hickman^[15] 在光纤上涂上一层 1mm 厚的高分子护套，使压强引起的光纤长度变化比起光纤折射率的变化大得多，把原来的

$$\nu = K \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \cdot p \cdot L \text{ 改进为}$$

$$\nu = K \left(\frac{\partial p}{\partial n} + \frac{n}{L} \frac{\partial L}{\partial p} \right) \cdot p \cdot L$$

结果使灵敏度比原来的又增加 26 dB。

与此同时，利用光纤构成的单模耦合器也在不断发展。1979 年美国海军实验室的 T. G. Giallorenzi 等人^[16] 成功地研制成了 3dB 单模光纤耦合器。再加上通讯中已经得到普遍应用的半导体激光器及 Pi_N 光电二极管，使光纤声传感器向集成化迈进了一大步。1983 年，R. Kashyap 和 B. K. Nagar^[17] 成功地做出了全光纤的声传感器。整个光路都被限制在光纤中，没有分立部件，使整个传感系统稳定性明显改善。

光纤干涉型声传感器具有极高的灵敏度，因此，它对于外界的扰动也非常敏感，这就需要有效的方法把在噪声中的有用信号检测出来。一般而言，干涉型声传感器的检测方法要比强度型的复杂得多。对 M-Z 干涉仪，检测

表 1 检测系统工作方式

检测系统	频率	A	B
被动零差检测	$\omega = \omega'$	否	否
直流相位跟踪零差检测	$\omega = \omega'$	是	否
交流相位跟踪零差检测	$\omega = \omega'$	是	是
外差检测	$\omega \neq \omega'$	否	否
合成外差检测	$\omega = \omega'$	否	否

表 2 各种检测方法的比较

	HOM	PTOC	PTAC	HET	SHET
干涉仪需要反馈	否	是	是	否	否
需要特殊的干涉结构	是	否	否	是	否
信号畸变特性	中等	良好	良好	中等	中等
无重调起伏	是	否	否	是	是
无振荡器相位噪音	是	是	是	否	否
激光振幅噪声抑制	是	是	否	否	否
电子学复杂性	中等	低	中等	中等	高

系统的一般形式如图 2 所示。这里假设声信号只作用于信号臂。而检测系统只作用于参考臂。在此情况下，位于组合器以前的信号臂中电场为

$$E_s = E_s[\exp(i\omega t + is(t) + i\phi_s)]$$

参考臂中电场为

$$E_r = E_r[\exp(i\omega't + iA(t) + iB(t) + i\phi_r)]$$

这里 $s(t)$ 正比于声信号的幅度。理想情况下 ϕ_s 及 ϕ_r 均为常数，然而在干涉仪中 ϕ_s 与 ϕ_r 以准随机形式漂移。参考臂中的两个相位项(A 和 B)是通过在压电环上施加电信号来调整的。根据实际检测系统的类型，出现或 A 或 B 存在或两者均不存在这几种情况。A 表示通过反馈电路所产生使干涉仪保持恒定 90° 相移的补偿相位。B 总是取 $\phi_m \sin(\omega_m t)$ 的形式，是通过振荡器驱动压电元件产生的。

现在采用的检测系统大致分为五类：**1.** 被动零差(HOM)；**2.** 直流相位跟踪零差(PTDC)；**3.** 交流相位跟踪零差(PTAC)；**4.** 外差法(HET)；**5.** 合成外差法(SHET)。这些方法各有利弊。表 1 和表 2 给出这些方法的性能及工作方式。

M-Z 干涉仪具有一些本质上的缺点。比如它需要一个参考臂，而参考臂本身对外界扰动

的敏感及窜入参考臂的信号会使整个系统的信噪比降低。此外，M-Z 干涉仪还需要两个耦合器，增加了系统的复杂性。1981 年 Toshihiko, Yoshino^[18] 等人用单根光纤制成 Fabry-Perot 即 (F-P) 干涉仪。这种干涉仪省去了耦合器及参考臂，仅用一根单模光纤，只需要在光纤两个端面镀上一层半反射的介质膜。这样，光纤自身就构成了一个 (F-P) 共振腔。外界扰动可以改变腔的光学长度，从而产生对干涉条纹的调制。用这种干涉仪做成的传感器不仅结构简单，而且比 M-Z 干涉仪灵敏度高。但需要在单模光纤微细的端面上镀膜，工艺要求比较高。此外还要求光源有很好的相干性。

美国海军实验室的 S.C. Rashelish^[19] 等人对光在光纤中的偏振现象进行了研究，结果表明，在各向异性的光纤中，两个偏振膜式的相速度是不同的。外界声压可以不等地改变这两个偏振膜的相速度。当用适当的方法使这两个模干涉时，就可以在检测器中得到变化的信号。用这种偏振干涉的方法做成的传感器也具有结构简单的特点，仅需一根光纤及两块偏振片。信号检测系统也可以做得和振幅型同样简单。此外，这种结构固有的相位差极小，可以有效地抑制光源的相位噪声。但其灵敏度要低于 M-Z 干涉仪。

二、振幅型

振幅型光纤声传感器在整个光纤声传感器中占有很大的比例。实际上，这种类型的传感器早在干涉型之前就有人演示过，但直到 1977 年光纤干涉型声传感器出现以后，才受到人们的普遍重视。相继出现了许多利用各种不同原理进行感声的传感器。表 3 给出了常见的一些振幅型声传感器的工作原理及主要优缺点。

尽管各种类型的光纤声传感器都取得了飞速的发展，但这一技术尚未得到充分的开发和利用。并且，在噪声源，检测方法和封装等方面还有待于进一步完善，还有不少实际问题有待于解决。相信在不远的将来，这种新兴的传感

表 3 振幅型声传感器的工作原理及特点

传感器类型	主要优点	缺 点	简单工作原理
微弯曲	多模光纤,光约束在光纤中	严格机械准直	外界扰动调制光纤中的微弯曲损耗
瞬表场	多模光纤	同 上	通过变化二根光纤的瞬衰耦合,来调制一根光纤中的光强
移动光纤		严格准直,光不约束在光纤中	微扰使一根光纤相对于另一根固定光纤移动而调制光强
光 栅	多模光纤	同 上	两平行放置的光栅产生相对移动而调制光强
近全反射	光约束在光纤中	单模光纤灵敏度低	工作于近全反射角附近,扰动引起临界角变化,调制反射光强
偏 振	多模光纤,无移动部件	光不约束在光纤中	外界扰动调制光弹材料的双折射

技术必将在我国的国民经济发展中发挥更重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Giallorenzi, T. G., *IEEE Trns. MTT-30-4* (1982), 626.
- [2] Giallorenzi, T. G., *Ultrasonics Symposium 1980*, 702.
- [3] Price, H. B., *J. Acous. Soc. Am.*, 66-4 (1979), 976.
- [4] Yariv, A., *Opt. Lett.*, 5(1980), 89.
- [5] Field, J. N., *J. Acous. Soc. Am.*, 67-3 (1980), 816.
- [6] Shuichi Tai, Kazue Kyuma, *Appl. Opt.*, 22(1983), 1771.
- [7] Kyuma, K., *IEEE Trns. QE-18*(1982), 676.
- [8] Bergh, R. A. and H. J. Shaw, *Opt. Lett.*, 6(1981), 198.
- [9] Mohr, R. and N. Lagakos, *Appl. Opt.*, 20(1981), 167.
- [10] Lyle, J. H. and C. W. Pitt, *Elec. Lett.*, 7(1981), 167.
- [11] Tangonan, G. L., *Elec. Lett.*, 16(1980), 958.
- [12] Evans, B. D., *Fiber and Integrated Optics*, 77 (1970), 88.
- [13] Cole, J. H. and R. Johnson, *J. Acous. Soc. Am.*, 62 (1977), 1136.
- [14] Bucaro, J. A. and H. P. Dardy, *J. Acous. Soc. Am.*, 62(1977), 1102.
- [15] Cole, J. and J. A. Bucaro, *J. Acous. Soc. Am.* 65 (1980), 87.
- [16] Giallorenzi, T. G., *Opt. Lett.*, 4(1979), 29.
- [17] Kashyap, R., and Nayar, B. K., *First Conference on Optical Fiber Sensors*, 1982, 38.
- [18] Toshihiko Yoshino and Kiyoshi Korosawa, *IEEE Trns. QE-18* (1982), 1624.
- [19] Rashleigh, S. C., *Opt. Lett.*, 5(1980), 392.

第三届西太平洋地区声学会议 (WESTPAC III) 第一号通知

第三届西太平洋地区声学会议,定于1988年11月2—4日在中国上海召开。此会议由西太平洋地区国家的声学学会发起,中国声学学会、中国科学院声学研究所和上海声学学会联合举办。

会议的主题为:“西太平洋地区的声学进展”,并对以下声学诸领域的论文均感兴趣。

语言通信;生理声学和心理学;噪声;冲击和振动;建筑声学;生物声学;超声学、量子声学和声波的物理效应;水声学;物理声学;空气声学和大气声学;换能原理与技术;声学测量、标准化和仪器;声信号处理;声频工程和电声学;音乐声学;其它。

会议的工作语言为英语,并出版论文集。会议其间还将组织技术展览和学术参观。

会议征稿自通知发出起开始。每篇应征论文先交

中文稿(全文)供审查,中文稿字数应在4000字以内(包括图表),并附300字左右的摘要(中文)。来稿请寄至WESTPAC III秘书处。作者需写清姓名和地址,来稿不论被接受与否一概不退,请作者自留底稿。征稿截止日期为1988年2月28日。秘书处将于1988年3月31日前,通知作者论文是否被会议接收。作者在接到通知后,应按规定要求提供论文的英文译稿及摘要(详细规定见第二号通知),于1988年6月30日前寄至秘书处。

WESTPAC III秘书处的地址为

北京市海淀区中关村路17号(邮政信箱2712)中国声学学会转。

WESTPAC III 秘书处

1987年9月30日