

光纤传感器译文集

中国科学院安徽光机所
中国科学院合肥智能所 情报室



譯 者 的 話

= 1055/30

光纤传感技术是世界上最近几年发展起来的一项新技术，它以高灵敏度、抗电磁干扰、耐腐蚀、可挠曲、体积小、价廉等独特的优点而受到世界各国科研单位、工业部门特别是国防部门的广泛重视，可广泛应用于转动、液面、温度、声、流量、加速度、电流、电场、磁场、压力、振动、弯曲、位移等物理参数的测量，具有十分广阔的应用前景。

为了引起国内科研及生产部门对这一新技术动向的重视，以便在我国迅速开发这一新技术，我们自近年来国外期刊中选译了有关各类光纤传感器的工作原理、装置及其特征、实验结果、发展动向等的综述、专论和专利总计49篇。全译文集共分八部分。包括综述，光纤位移、速度、加速度传感器，光纤转动传感器，光纤液面、流量传感器，光纤声传感器，光纤温度传感器，光纤电、磁传感器和其它传感器及相关技术。

译文集由中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国科学院合肥智能机械研究所两所情报室同志分译，两所专业科研人员校对。全集由邓春生、奚居雄组稿，杨训恺、寿涵奋、黄寿柏校订，车会生、庞宜生编辑。

译文有错误和不当之处，请读者批评指正。

1984年2月于合肥

综 述

目 录

综 述

- 0—1 光纤传感器技术..... (1)
- 0—2 光纤传感：一项新兴的技术..... (70)
- 0—3 光纤传感器引论..... (79)

一、光纤位移、速度、加速度传感器

- 1—1 多模光纤位移传感器..... (87)
- 1—2 光纤激光渡越速度计..... (90)
- 1—3 用于高分辨率测量脉动血流的激光多普勒测速计..... (93)
- 1—4 一种简单的光纤法布里—珀罗传感器..... (102)
- 1—5 光纤加速度计..... (107)
- 1—6 高灵敏度光纤加速度计..... (110)
- 1—7 光纤加速度计与惯性力测量法..... (114)

二、光纤转动传感器

- 2—1 激光陀螺——光纤激光陀螺的研究动向..... (123)
- 2—2 灵敏的光纤陀螺仪..... (141)
- 2—3 低噪声光纤转动传感技术..... (147)
- 2—4 无源光纤陀螺仪中的低噪声观测..... (152)
- 2—5 低漂移光纤转动传感技术..... (156)
- 2—6 采用超发光二极管的低漂移光纤陀螺..... (161)
- 2—7 全单模光纤陀螺仪..... (165)
- 2—8 双输入光纤陀螺仪..... (169)
- 2—9 光纤谐振腔陀螺仪：灵敏度和热非互反性..... (173)
- 2—10 装有光纤耦合 LiNbO_3 非互反移相器的光纤陀螺仪..... (181)
- 2—11 便于引进相位差偏置的光纤激光陀螺..... (187)
- 2—12 易引入相差偏置的光纤激光陀螺对转动的检测..... (196)
- 2—13 偏振状态对单模光纤传感器的效应..... (200)
- 2—14 光纤干涉仪转动传感器..... (206)

三、光纤液面、流量传感器

- 3—1 光纤流量计..... (213)

- 3—2 光纤涡泻流体流量计····· (217)
- 3—3 光纤液面和流量传感器系统····· (222)

四、光纤声传感器

- 4—1 光纤传感器····· (229)
- 4—2 光纤光声探测器····· (240)
- 4—3 多模耦合波导声传感器····· (244)
- 4—4 光纤微弯声传感器····· (249)
- 4—5 声振动传感器与传感系统····· (252)
- 4—6 光纤声传感器····· (262)

五、光纤温度传感器

- 5—1 光纤温度和压力传感器····· (267)
- 5—2 基于内部产生热辐射的光纤温度传感器····· (274)
- 5—3 光纤温度测量仪····· (286)
- 5—4 采用液体组元光纤的光纤温度传感器····· (292)

六、光纤电、磁传感器

- 6—1 金属被复多模光纤电流传感器····· (297)
- 6—2 光纤干涉仪电流传感器····· (299)
- 6—3 在单模光纤干涉仪中采用压电聚偏二氟乙烯 (PVF₂) 薄膜的电场传感器····· (302)
- 6—4 光纤磁传感器····· (312)

七、其 它

- 7—1 二极管激光传感器····· (315)
- 7—2 测量结构畸变的高灵敏度光纤应变传感器····· (318)
- 7—3 压力灵敏度降低了的光纤····· (322)
- 7—4 用于干涉测量声传感器的优化光纤被复材料····· (326)
- 7—5 单模光纤分波器与偏振控制器····· (337)
- 7—6 熔融单模光纤输入耦合器····· (341)
- 7—7 合成外差干涉测量的解调····· (344)
- 7—8 在光纤中由温度引起的光学相移····· (350)

光纤传感器技术

T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, G. H. Sigel, J. H. Cole

本文综述了光纤传感器目前的技术发展水平。详细阐明了它的运行原理和扼要介绍了各种不同类型的光纤传感器。讨论了光纤传感器所达到的性能和它的局限性。描述了制造光纤传感器的技术和声、磁、旋转、激光二极管以及其它各种传感器的特性。最后扼要介绍了光纤传感器技术的发展趋势和予期的应用领域。

一、概述与引言

光纤传感器的发展已经日趋成熟，这一新技术的影响目前已十分明显。光纤传感器具有许多优点：比现有技术的灵敏度要高；几何形状具有多方面的适应性，可以制成任意形状的光纤传感器；具有共同的技术基础，在此基础上可以制造传感各种不同物理微扰（声、磁、温度、旋转等）的器件；具有介电结构，以致光纤传感器可用于高压、电气噪音、高温、腐蚀或其它的恶劣环境；而且具有与光纤遥测技术的内在相容性。过去几年里在验证这些优点方面取得了实质性的进展，已研制了60多种不同的光纤传感器。数量如此众多的光纤传感器通常可以分为振幅和相位（干涉）传感器。振幅传感器就是物理微扰与光纤或与光纤相连接的某些装置相互作用，直接对光纤中光的强度进行调制。本文主体部分详细描述的这种强度传感器的优点是，它的结构简单，具有与多模光纤技术的相容性。在某些情况下，为了实现这些优点，往往要牺牲对它的灵敏度要求。考虑到大多数应用并不需要极限灵敏度，而且振幅传感器与现有的传感器不相上下，因此这一类传感器看来拥有一个较大的应用市场。

相位（或干涉）传感器，不论是用于磁场传感，还是声、旋转等传感，在理论上它的灵敏度都要比现有传感技术高几个数量级。采用光纤干涉仪结构的声传感器，其理论预测值已经验证达到了现有测声技术水平的极限。此外，由于光纤声传感器可以制成带有延伸元件的结构，从而有可能产生使光纤叶边减少，噪音消除和（或）在光纤信号处理中的振幅遮蔽（shading），因而出现了其它的一些优点。又如光纤磁场传感器在室温下运行，它的检测灵敏度与通常在4~10k°下运行的低温的超导量子干涉器件（SQUID）不相上下，甚至要超过后者。因此相位传感器可以满足对几何形状适应性和高灵敏度这二个基本要求的市场的需要。

光纤传感器的迅猛发展开始于1977年，但是有些单独的演示早在这以前就已开始了。在过去的四年里，光纤传感器由于许多实验室加入了这一行列而得到了急剧发展。一个实

例是1977~1979年期间所演示的光纤声传感器，它的灵敏度提高了约100分贝，以致现在接近于或超过了以前的电声传感器的性能。正在研制中的光纤传感器有磁、声、压力、温度、加速度、陀螺、位移、液面、转矩、光声、电流和应变等类型的光纤传感器。由于光纤传感器用介质材料制成，而且与光纤遥测技术的相容性较好，所以此技术具有非常高的适应性。

尽管光纤传感器取得了迅速进展，也演示过许多种光纤传感器，但是这种技术还没有得到充分的研究和开发。在噪音源，检测方法，封装和光纤被复层最佳化方面仍然存在一些实际问题。例如，光纤陀螺的不可逆噪音使它未能达到极限灵敏度。磁传感器的磁敏被复光纤只能制成一米左右的长度，比较短，而实际希望能制成一千米的长度。传感器的封装尚不能适应运行中所遇到的严酷条件。这些问题是目前研究的一些领域，许多工作还只是刚刚开始，所以予期完全解决这些问题为时尚早。

本文旨在描述这一技术，详细说明这一技术的先进所在，为那些试图制造这些传感器的人们指点至关紧要的应考虑之处，并对读者提供关于这一正在兴起的新技术的感性知识。第二节讨论了迄今已高度发展的声传感器，描述光纤对声场的增敏或退敏技术。概述了噪音源对频率的依赖效应和组态响应。描述了设计和实测的性能水平，并简述了传感器的封装。

第三节讨论了光纤磁传感器。描述了被复层和芯轴对灵敏度的影响，传感器响应对频率的依赖关系，以及噪音源。描述了予期的性能和先进技术水平。第四节描述了光纤转动传感器（陀螺），尽管它的转动传感特性有明显提高，但是它的噪音问题使得这一特性不能实现。本节描述了这些噪音源，各种不同的陀螺技术和结构以及它们的技术现状。

第五节讨论了振幅传感器。概述了它的运行原理、优点、局限性和已验证的性能。第六节讨论了激光二极管传感器。大多数情况下这种传感器采用三个反射镜的激光腔结构，其中一个反射镜的位置要受到被传感的场的影响。这种传感器可以有光纤作为光腔的一部分，也可以没有这种光纤。本节还概述了它的噪音源、优点、局限性和已验证的性能。

第七节简要讨论了加速度、电流、温度、光声、转矩、液面等光纤传感器。有些传感器利用的是相位效应，另一些则利用了振幅效应。之所以讨论这些传感器，主要因为它们正处于研制的早期阶段，虽然讨论是粗略的，但我们希望所附参考文献提供的信息将是有益的。最后一节描述了发展光纤传感器所采用的一些基础技术，特别是检测和激光技术。激光源对光纤传感器的性能具有制约能力，本节提出了这些制约性，并详细讨论了各种不同的检测方法和它们之间的折衷方案，使读者可以了解每一种有效的解决方法和它的局限性。本文最后以对光纤传感技术的未来展望和予期应用而告结束。

二、光纤声传感器

光纤干涉仪

光纤干涉仪声传感器一般采用图1所示的 Mach-Zehnder 结构^[1,2]。把激光束分光，用参考光纤传输其中的一束光，用暴露于声场的传感光纤传输另一束光。在参考臂中，用布拉格调制器传光频产生频移或用光纤延伸器^[3]和集成光学相移器来调制相位。两

束光重新组合，与一光学探测器表面相互作用，然后采用合适的解调器检测初始的相位调制信号。可以采用的解调技术有调频鉴别^[4]，稳定零差^[3]，合成外差^[5]，以及其它几种技术^[6]。可以根据传感器的具体应用情况来选用不同的解调技术。这将在第八节中详细讨论。

对于由散粒或量子极限确定信噪比的情况，光纤干涉仪传感器可能达到的极限灵敏度示如图2。为了比较，图中示出了普通压电传感器（H56水听器）与人耳的可检测阈值。由图可见，长度短至1米的光纤可超过此可检测阈值。

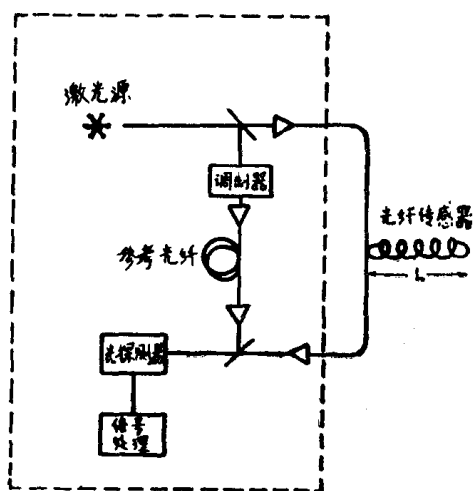


图1 基本光纤干涉仪

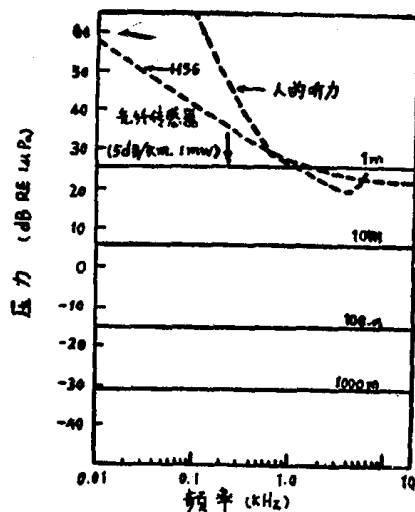


图2 包塑光纤不同长度下，散粒噪声极限光纤传感器的最小可检测压力^[4]

光纤声传感器具有的主要优点之一，是它的几何形状的多方面适应性。图3示出了几个实例。左上图所示为制成的轻而柔软的平面传感元件，它也可制成左下图所示的线性阵列，单个的光纤元件可制得比声波长要长得多，因此可成为一种方向性高的接收器。换句话说，把具有所要求性能的单个人纤传感器排成一列，可构成一个小的重量轻的线性阵列。如图右所示，把参考光纤（在此是一个环）放在传感光纤邻近，可制成简单的梯度传

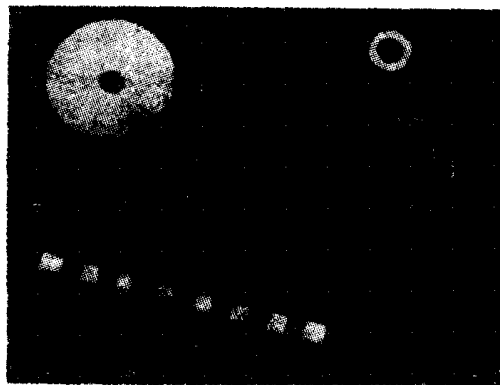


图3 各种光纤传感器的湿端

感器。如果这两个环的压力灵敏度是匹配的，则这一对环对压力不产生响应，而对压力的空间梯度有响应。这种梯度传感器可用来检测入射声波的方向。如图所示，梯度传感器可容易地制得小而坚固。大多数这种传感器的优点是可以通过空间变化，对信号/噪音进行检测前的予处理。这可以通过改变光纤绕组的密度来完成。最后，如右上图所示，可以简单地通过使传感元件的尺寸小于声波的长度，来制成灵敏的无定向元件。

低频下的声灵敏度

对光纤中传播的光的相位进行声调制，通常要考虑在相应于光纤和声信号间不同的相互作用范围内的三个截然不同的频率范围。为了确定这些范围，有效的方法是研究一种特殊的传感装置，比如用直径为d的光纤构成一个直径为D的环。在低频情况，声波长 Λ 比D大得多，声波对光纤施加可改变的静压力。在中等频率情况， Λ 与D差不多，但仍比d大得多，沿声传播方向的压力梯度变得重要起来。而在超声频率下， Λ 与d差不多或小于d，在整个光纤横截面上的弹性应变分布变成各向异性，因此必须把光学模的分布考虑进去。

光纤的光学相对压力的灵敏度定义为 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 。式中， $\Delta\phi$ 为压力变化 ΔP 产生的相位 ϕ 的相移。若给定压力变化 ΔP 产生光纤芯的轴向应变 ϵ_z 和径向应变 ϵ_r ，则它们的关系式可变成

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \epsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12}) \epsilon_r + P_{12} \epsilon_z] \quad (1)$$

式中， P_{11} 和 P_{12} 为光纤芯的弹性光学系数或泡克耳系数， n 为光纤芯的折射率。(1)式中的第一项为光纤长度变化产生的 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 部分，第二项、第三项表示对光纤芯进行与光弹性效应^[8]有关的折射率调制而产生的部分。

典型的光纤由性质类似的玻璃制成的芯、包层和基质这三部分组成。传感器光纤通常包上一层柔软的橡胶，然后再包上一层硬塑料。为了计算(1)式给出的灵敏度，芯的应变 ϵ_z 和 ϵ_r 必定与光纤的各种不同被复层的性质有关。已经报道过单层^[7,9]或双层光纤^[3]对压力的灵敏度。下面我们考虑的是一种典型的四层光纤的精确几何结构。

在低频下(即 $\Lambda \gg$ 传感器的最大尺寸)，声波对光纤传感器施加静压力。对尺寸为英寸量级的传感器，频率达几千赫时，情况就是这样。此时，光纤的极坐标应力(Polar Stress) σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 与光纤应变 ϵ_r 、 ϵ_θ 、 ϵ_z 的相关式^[9]为

$$\begin{pmatrix} \sigma_r^i \\ \sigma_\theta^i \\ \sigma_z^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\lambda_i + 2\mu_i) & & \lambda_i \\ \lambda_i & (\lambda_i + 2\mu_i) & \lambda_i \\ \lambda_i & \lambda_i & (\lambda_i + 2\mu_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_r^i \\ \epsilon_\theta^i \\ \epsilon_z^i \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中， i 为光纤的层指数(芯为0，包层为1等)， λ_i 和 μ_i 为Lame参数^[10]，它们与杨氏弹性模数 E_i 和泊松比 ν_i 的关系式为

$$\lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)}, \quad \mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \quad (3)$$

对圆柱体光纤，可由Lame的解^[11]获得光纤应变

$$\varepsilon_r^i = U_0^i + \frac{U_1^i}{\gamma^2} \quad \varepsilon_\theta^i = U_0^i - \frac{U_1^i}{\gamma^2} \quad \varepsilon_z^i = W_0^i \quad (4)$$

式中， U_0^i 、 U_1^i 、 W_0^i 为待定常数。由于应变在芯的中心一定是有限的，所以 $U_0^i = 0$ 。

对m层的光纤，(4)式中的常数 U_0^i 、 U_1^i 、 W_0^i 由下列边界条件确定：

$$\sigma_r^i \Big|_{r=r_i} = \sigma_r^{i+1} \Big|_{r=r_i} \quad (i=0, 1, \dots, m-1), \quad (5)$$

$$u_r^i \Big|_{r=r_i} = u_r^{i+1} \Big|_{r=r_i} \quad (i=0, 1, \dots, m-1), \quad (6)$$

$$\sigma_r^m \Big|_{r=r_m} = -P, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^m \sigma_z^i A_i = -PA_m, \quad (8)$$

$$\varepsilon_z^0 = \varepsilon_z^1 = \dots = \varepsilon_z^m \quad (9)$$

式中， $u_r^i (= \int \varepsilon_r^i dr)$ 为第i层的径向位移， r_i 和 A_i 分别为第i层的半径和横截面积。方程(5)和(6)描述各层边界上的径向应力和连续位移。方程(7)和(8)中假定所施的压力为静压力。方程(9)为平面应变近似，终端效应忽略不计。对长而细的光纤圆柱体，它的误差小于1%^[7]。

利用(5)~(9)式所描述的边界条件，来确定常数 U_0^i 、 U_1^i 、 W_0^i ，并由(4)式计算 ε_r^0 和 ε_z^0 ，然后由(1)式可求出灵敏度 $\Delta\phi / \Delta\phi P$ 。

图4所示为市售国际电报电话公司制造的典型单模光纤的压力灵敏度与塑料被复层(Hytrel)厚度的函数关系。这一厚度随光纤的不同而不同。普通光纤由含有微量 GeO_2 的石英玻璃芯，5% B_2O_3 和95% SiO_2 的包层和w形折射率剖面的石英玻璃衬层所组成。光纤护套由硅橡胶层和一层Hytrel型的塑料构成。已经相当详细地实验研究和理论分析了这一种光纤的声学响应^[4,8]。表1列出了用以计算这一光纤的灵敏度 $\Delta\phi / \phi \Delta P$ 的全部参数。自图4可知，最大的贡献 ε_z^1 为光纤长度变化(式1的第1项)产生的 $\Delta\phi / \phi \Delta P$ 部分。 ε_r^p 和 ε_z^p 两项(式1的后两项)是光弹性效应产生的，它们给出的贡献正好相反，比较小。压力灵敏度主要由于 ε_z^1 的变化，随Hytrel塑料厚度的增加而迅速增加。

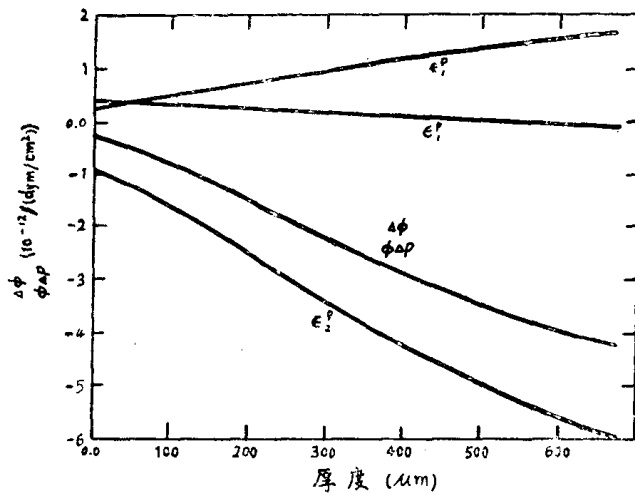


图4 ITT 光纤的压力灵敏度 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 与 Hytrel 厚度的函数关系。 ϵ_z^I 表示长度变化引起的相位变化； ϵ_z^P 和 ϵ_z^I 表示折射率调制项 [13]

表1 标准ITT单模光纤（无外护套）

	光 纤 芯	包 层	衬层	第一护层 (软)
成份	$\text{SiO}_2 + \text{微量GeO}_2(0.1\%)$	$\text{SiO}_2(95\%)$ $\text{B}_2\text{O}_3(5\%)$	SiO_2	硅
直径 (μm)	4	26	84	250
杨氏模数 (10^{10}dyn/cm)	72	65	72	0.0035
泊松比	0.17	0.149	0.17	0.49947
P_{11}	0.126			
P_{12}	0.27			
n	1.458			

用于光纤的普通被复材料有橡胶,热固性塑料和UV硫化的弹性体 [12]。直接被复在波导上的被复层典型地是像橡胶那样的柔软材料,它可把微弯损耗降至最小程度。硬的外被复层用以保持玻璃的强度,保护光纤不受恶劣环境的影响,而且便于光纤操作。软的内被复层在确定声灵敏度中起作用不大,因此,优化光纤的声响应在于选择恰当的外护套材料。

图5所示为对于不同模数的外护层,这种光纤压力灵敏度计算值与被复层厚度的函数关系。在此,被复层的杨氏模数是不同的,而体积弹性模数是一固定值 (4×10^{10} 达因/厘米²)。由图中可知,当被复层变得很厚时,光纤灵敏度接近于与杨氏模数无关的一个极限值。在厚的被复层情况下,静压力产生光纤波导中的各向同性应变,其值只决定于被复层的可压缩性(体积弹性模数的倒数)。这样,对厚的被复层情况(约5毫米),压力灵敏度完全决定于被复层的体积弹性模数,而不依赖于其它的弹性模数。

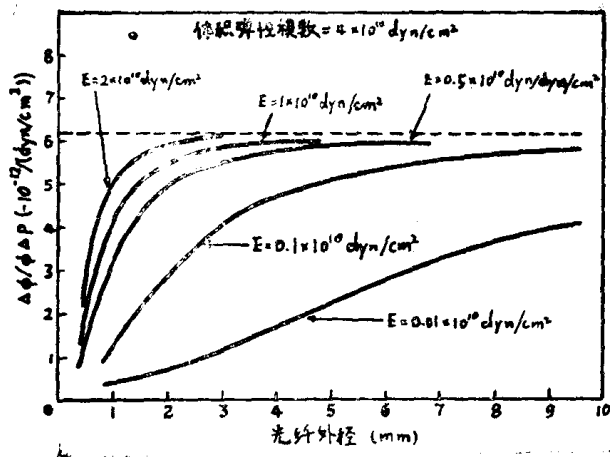


图5 对不同杨氏模数E和恒定体积弹性模数 ($4 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$) 的外护层, 压力灵敏度计算值与光纤外径的函数关系。光纤参量给予表1中。

对具有典型被复层厚度的光纤, 灵敏度与弹性模数是一种较复杂的函数关系^[12]。在此情况下, 波导受到各向异性的应变, 因此为了预测对声的灵敏度, 需要两个独立的弹性模数数据。图6所示为不同杨氏模数外护层的光纤压力灵敏度(0.7毫米外径)与体积弹性模数的函数关系, 光纤的各种参数示如表1。自图中可知, 对于杨氏模数大的光纤来说, 光纤灵敏度是体积弹性模数的强函数。这种依赖关系随着杨氏模数的下降而变弱。这可以这样来理解, 即对光纤的复合几何结构来说, 个别的光纤层上的轴向应力决定于这一层光纤的横截面积与它的杨氏模数的乘积。因此, 对于高杨氏模数的材料, 要达到灵敏度主要决定于该光纤层的体积弹性模数的厚被复层情况, 只需要很小的被复层厚度。但是对

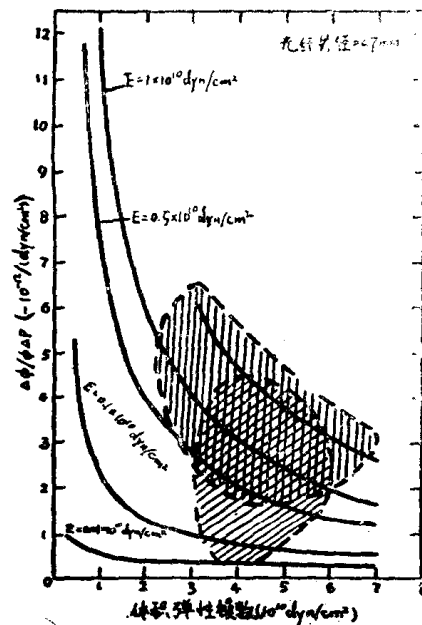


图6 对不同杨氏模数, 0.7mm外径外护层(如表1), 压力灵敏度计算值与体积弹性模数的函数关系。阴影面积: 塑料(上), UV硫化护层(中), 橡胶(下)。

低杨氏模数的材料，被复层对轴向应变有贡献的程度减少并开始向玻璃波导对灵敏度起主要作用的极限发展。因此对典型的被复层厚度来说，高的声灵敏度需要杨氏模数大和体积弹性模数小的材料。

图7所示为包上各种不同弹性体的光纤的声灵敏度的频率响应，频率范围 $10^2 \sim 10^4$ 赫。由图中可知，硬被复层光纤的灵敏度对频率的依赖程度较小，尼龙对频率的依赖性最小。在UV硫化的软弹性体对频率依赖性最大。用聚四氟乙烯获得的灵敏度最高，UV软被复层获得的灵敏度最低。UV软被复层获得的灵敏度在频率降至2千赫以下时迅速降低。这种被复层和类似的被复层与宽带的声特性不相容，然而它仍可用作仅能检测高频声信号的低频的声滤波器。

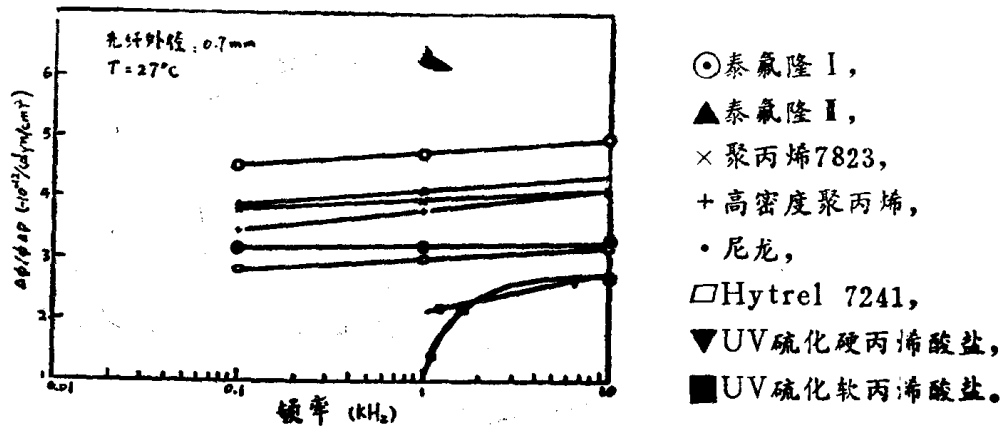


图7 对包复不同弹性体的0.7mm 外径光纤，27℃下压力灵敏度与频率的关系曲线。

声的退敏

对许多光纤传感器来说，包括声传感器参考臂中的光纤在内，把光纤对压力的灵敏度降至最小程度也同样是重要的。通常要求把声灵敏度集中在传感光纤上，并要求参考光纤和引导光纤对声场不敏感。

光纤长度变化（式1中的第1项）和与光弹性效应有关的芯的折射率调制（式1中的第2和第3项）对光纤的压力灵敏度 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 有影响。通常这些效应正好是相反的^[7]。包以塑料的典型光纤的声灵敏度比裸光纤的声灵敏度要大得多，这是因为光纤长度变化具有较大的贡献。而光纤包以体积弹性模数大的材料，则灵敏度明显下降。这些材料是玻璃^[13]或金属^[14]。

图8所示为包上玻璃和金属的光纤的压力灵敏度与被复层厚度的函数关系。对13微米厚的镍护套，95微米厚的铅护套和70微米厚的铝酸钙玻璃护套的光纤，其压力灵敏度为零。镍护套要求的厚度最小。但是灵敏度与厚度的关系曲线比较陡，因此对厚度控制的公差要求十分严格。

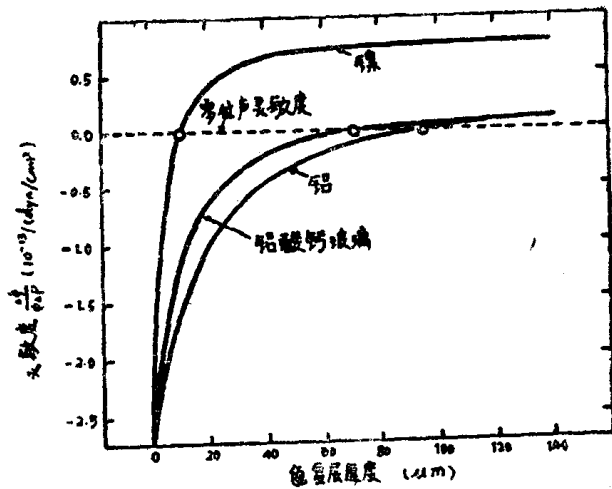


图8 包复不同高模数材料的 SiO₂ 光纤的压力灵敏度 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 与被复层厚度的关系曲线

中等频率下的声响应

现在再研究一下直径为 d 的光纤构成的特征直径 D 的传感元件。在声波波长 Λ 相当于 D 的中等频率下，传感器上的压力梯度变得重要起来。在此情况下，声的响应特性决定于传感器元件的几何结构。实用的结构有：在顺变芯轴上螺旋卷绕的光纤，光纤环匝，嵌入顺变棒中的直光纤，螺旋卷绕的扁平元件等。

作为一个实例，我们研究一下光纤线圈的响应^[15]。为了确定线圈的动态响应，必须推导出入射声在线圈元件上产生声力的表达式。通过在线圈元件表面上求入射平面波压力的积分，可得到声力表达式。只有线圈平面中的振动才对光子的净相移有贡献。入射声的压力场用下式表示：

$$\begin{aligned} p &= p_0 \exp(ik \cdot r), \\ &= p_0 \exp [(ik \cdot (R + r))], \\ &= p_0 \exp(ik \cdot r) \end{aligned} \quad (10)$$

式中， R 为线圈元件中心的位置矢量， p_0 为在 R 处的入射压力， $k = 2\pi / \Lambda$ 。作用在线圈元件上的声力在平面上的分量为 $F = [(\Delta S p ds) \cdot n]$

式中， ΔS 为元件面积， n 为平行于 R 的单位矢量。计算了上面的积分，并把元件的曲率考虑进去之后，得出声力的最终表达式为：

$$\Delta F = (-\pi r^2 p_0 \Delta \alpha) n + i(-\pi r^2 p_0 k R \sin \theta \sin \Delta \phi) n \quad (11)$$

式中， $\Delta \alpha$ 为在线圈中心元件所对的角， r 为光纤半径。

在每一线圈元件上，除了声力以外，还有瞬间轴向应变 e_z 和声压力 p 。所确定的轴向弹性应力。线圈横截面上总的轴向力为光纤中轴向应力与光纤间流体静压力产生的力的贡献总和。当入射声波长大于线圈横截面时，可以假定作用在线圈横截面上的流体中的瞬间静压力约为常数，等于声压 p_0 ，那么流体压力对轴向张力的贡献 $T_w = -(1-f)\pi r^2 p_0$ ，

式中 $(1-f)$ 为流体在线圈横截面中占有的部分。光纤的总张力为： $T_t = f \pi r^2 \hat{S}_{xx}$ ，式中 \hat{S}_{xx} 为光纤的平均轴向应力。 \hat{S}_{xx} 可用轴向应变 e_x 和光纤上瞬间压力 p 来表示，在此取 p 等于声压 p_0 。线圈横截面上瞬间拉力 T 的最终表达式为

$$T = f \pi r^2 (\hat{E} e_x - 2 \hat{\sigma} p_0) - (1-f) \pi \gamma_0^2 p_0 \quad (12)$$

式中， \hat{E} 和 $\hat{\sigma}$ 分别为光纤的有效杨氏模数和泊松比。

入射声波激励产生各种不同的线圈振动模。当声波波长 $\Lambda \gg r_0$ 时，线圈振动类似于一个细的圆环的振动模。弯曲振动不产生可量度的光学相移，主要贡献来源于小振幅模式 (breathing mode)。通过在线圈附近对力 ΔF 和直接由声压 p_0 确定的 $-T \Delta \alpha$ 部分求积分来获得此模的驱动力 F_0 。

$$F_0 = -\pi r_0^2 \int_0^{2\pi} p_0 d\alpha - i(\pi r_0^2 k R \sin \theta) \int_0^{2\pi} p_0 \sin \alpha d\alpha \\ + \pi r_0^2 (2 \hat{\sigma} f + 1 - f) \int_0^{2\pi} p_0 d\alpha$$

用此表达式去代替 p_0 ，计算积分得出

$$F_0 = -2\pi A p_0 [f(1-2\hat{\sigma})J_0(\eta) - \eta J_1(\eta)] \quad (13)$$

式中， A 为线圈的横截面积， p_0 为入射声的压力振幅， $J_0(\eta)$ 和 $J_1(\eta)$ 为贝塞尔函数， $\eta = kR \sin \theta$ 。 $J_1(\eta)$ 项由压力梯度得出， $J_0(\eta)$ 项由表面压力项和 $T \Delta \alpha$ 力得出。

运动方程可表示为驱动力 F_0 与弹性力，惯性项以及振动线圈产生的声辐射反作用力之间的平衡关系。对小振幅模来说，径向位移 u 和轴向应变 e_x 分别为

$$u = u_0 e^{-i\omega t}, \quad e_x = u_0 e^{-i\omega t} / R \quad (14)$$

这一元件上的弹性力为 $-f A E e_x \Delta \alpha$ ，可通过计算有效复合弹性模复数 $\hat{E} = \hat{E}' + i\hat{E}''$ ，而形式上计入阻尼力。 \hat{E}'' 计入了光纤中的内耗效应和光纤间水中的粘性阻尼。线圈元件的惯性项 $\Delta \alpha$ 为 $p_0 A R \Delta \phi u$ 。式中， u 为加速度， p_0 为有效密度，也即光纤密度与光纤间流体密度之间的平均值。

振动线圈将辐射声，声辐射将在线圈元件上施加一反作用力，该反作用力近似为

$$F_r = A \rho_\omega^2 u_0 e^{-i\omega t} R \Delta \alpha \quad (15)$$

式中， ρ_ω 为水密度。 $\Delta \alpha$ 线圈元件的运动方程现在可表示为

$$-\omega^2 u_0 \rho_0 A R \Delta \alpha = F_0 \Delta \alpha / 2\pi - f A \hat{E} u_0 \Delta \alpha / R + \omega^2 u_0 \rho_\omega A R \Delta \alpha$$

式中，省却了因子 $e^{-i\omega t}$ 。重新整理各项得出下面的振动振幅的解

$$u_0 = \frac{[f(-2\hat{\sigma})J_0(\eta) - \eta J_1(\eta)] P_0}{[\omega^2(\rho_0 + \rho_\omega) R - f\hat{E}'/R] - i f \hat{E}''/R} \quad (16)$$

上面的 u_0 表达式可代入 (14) 得出轴向应变。径向应变可用轴向应变和所施的压力 p 来表示：

$$e_r = qe_a + \beta_p \quad (17)$$

式中，系数 q 和 β 可用(2)~(9)式确定。最后由(1)式确定归一化光学相移

$$\Delta\phi/k_0Lp_0 = \text{Re} + \text{Im} \quad (18)$$

式中，

$$\text{Re} = \{ D(|u_0|/R)\cos u_p - n_0^2(p_{11} - p_{44})\beta \text{Jo}(\eta) \} n$$

$$\text{Im} = \{ D(|u_0|/R)\sin u_p \} n$$

$$D = n^2(p_{11} - p_{44})q + 1/2n^2(p_{11} - 2p_{44}) - 1$$

$|u_0|$ ， u_p 分别为振动振幅 u_0 的大小和相位。

图9、图10所示为包以HytreI塑料的光纤环的声响应测量值，与由(18)式计算所得的理论值相比较。光纤环共振效应在图9中十分明显。

图10所示的定向响应明显表明附加的压力梯度所产生的效应。

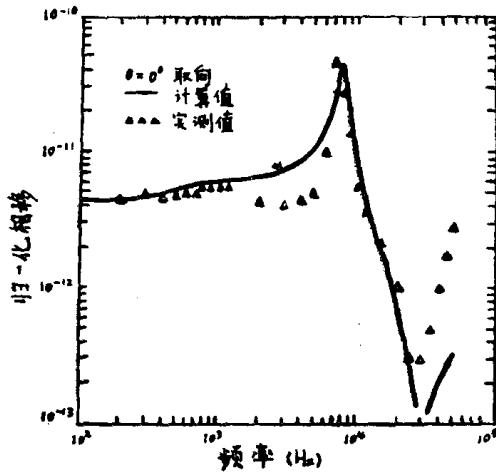


图9 $\theta = 0$ 取向的2.5 cm 直径光纤线圈的频率响应。频率范围100Hz~50kHz下,实测与计算光学相移的关系曲线(单位长度1cm,单位入射声压1 dyn/cm²) [15]

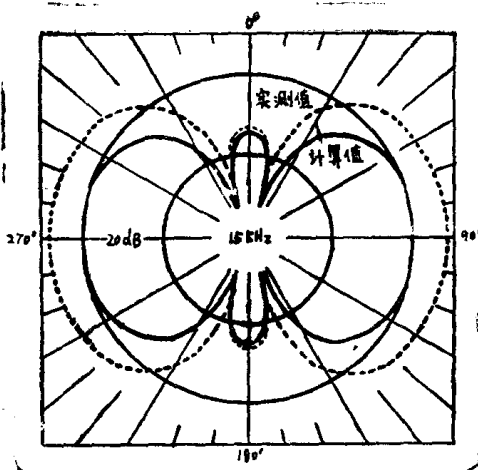


图10 15kHz下光纤线圈水声器的光束图型 [15]

高频超声响应

现在研究一下半径为 a ，沿 z 轴准直的无限长的各向同性光纤。声波沿 x 方向入射，声波产生的应变改变经过光纤而传输的光的相位。在很低声频下，这些应变在光纤的横截面上是均匀的。但是在高频下，应变不再是均匀的，因此必须考虑光束的偏振态。在这种情况下，声波使光纤起线性延迟器作用。光纤出口处的电场分量可用琼斯矩阵^[16]描述为

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha(\gamma, \theta) - \sin \alpha(\gamma, \theta) \\ \sin \alpha(\gamma, \theta) \cos \alpha(\gamma, \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i \Delta \beta_1(\gamma, \theta)} & 0 \\ 0 & e^{-i \Delta \beta_2(\gamma, \theta)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中， $\Delta \beta_n(\gamma, \theta)$ 为沿声诱导的每一主应变轴上所产生的相移， α 为 x 轴与主应变轴之间的夹角， γ 和 θ 为确定光纤中待研究的点的极坐标， E_{x_0} 和 E_{y_0} 为输入电场。

每一单位长度的相移 $\Delta \beta_n$ 和产生的双折射 $\Delta \beta$ 与主应变 e_1 和 e_2 的关系式如下^[10]：

$$\Delta \beta_1 = k_0 n^3 (P_{11} e_1 + P_{12} e_2) / 2 \quad (20a)$$

$$\Delta \beta_2 = k_0 n^3 (P_{12} e_1 + P_{11} e_2) / 2 \quad (20b)$$

$$\Delta \beta = (\Delta \beta_1 - \Delta \beta_2) = -k_0 n^3 P_{44} (e_1 - e_2) \quad (20c)$$

式中， P_{11} 为泡克耳系数， k_0 为真空中的光学波数， n 为折射率。主应变和主轴角一般是随光纤横截面的位置而变化。通常声感应的应变充分小，以致对光纤波导的作用只作为一种微扰。这一条件可用下式来表示：

$$\Delta \beta_1, \Delta \beta_2 \ll k \Delta n \quad (21)$$

式中， Δn 为光纤芯与被复层之间的折射率差。可以通过解位移波方程^[17, 18]来计算超声感应的主应变以及其后超声感应的相移和双折射

$$\bar{u} = -\nabla \phi + \nabla \times \bar{\psi} \quad (22)$$

式中， \bar{u} 为位移矢量， ϕ 为标量， $\bar{\psi}$ 为矢量势。对正交入射的超声波，感应的主应变为

$$e_1 = \frac{\epsilon_{\gamma\gamma} + \epsilon_{\theta\theta}}{2} + \frac{1}{2} [(\epsilon_{\gamma\gamma} - \epsilon_{\theta\theta})^2 + 4\epsilon_{\gamma\theta}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$e_2 = \frac{\epsilon_{\gamma\gamma} + \epsilon_{\theta\theta}}{2} - \frac{1}{2} [(\epsilon_{\gamma\gamma} - \epsilon_{\theta\theta})^2 + 4\epsilon_{\gamma\theta}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

式中， $\epsilon_{\gamma\gamma}$ ， $\epsilon_{\theta\theta}$ ， $\epsilon_{\gamma\theta}$ 为柱坐标中的应变。把 Φ 和 ψ 通过用柱面基函数展开，而且应用光纤表面的四个边界条件，由(22)–(24)式可以计算出感应的主应变。位移和正交应力必须是连续的，边界上的正切应力必须为零。

图11所示为单模光纤的这一计算结果与 ka (声压力 $10^4 p_s$) 的函数关系。在低频下