



八、光学纤维传感器及其在流速测量中的应用

304 所 刘宗彦

一、光导纤维及光纤传感器的发展

纤维光学是近代技术光学的一个重要分支。近年来由于成功地制造了光导纤维，使其应用得到了很大的发展。早在 1930 年德国拉姆制成了第一根可弯曲的石英纤维，并初步论述了其传递光束的原理。但纤维光学的蓬勃发展是在 20 世纪 60 年代。自 1957 年以来先后制成了玻璃（芯料）-塑料（涂层）纤维；玻璃（芯料）-玻璃（涂层）纤维；探测高能粒子轨迹的闪烁发光纤维；适用于光谱红外区域的光学纤维面板；适用于紫外高速摄影机的光学纤维面板；利用含铍的玻璃制成了激光纤维等。

开始，光纤主要用于通讯，随着光纤技术的发展，70 年代出现了光纤传感器。由于纤维光学元件具有可弯曲传递光束和图象、光能损失小、数值孔径大、分辨率高而且结构简单使用方便等特点，因此光纤传感器具有广泛的应用潜力而构成了巨大的吸引力，所以问世以来发展极为迅速。现已在光学、电学、热学、声学、磁学和核物理学等领域应用。

二、光纤及光纤传感器的原理和分类

直径为入射光波许多倍（10~20 倍）的光学纤维传递光能和图象的基本原理基于几何光学的全反射定律，而直径小到接近光波波长的光学纤维，衍射作用占优势，这时每根光学纤维就是一个波导管，其传递机理就要用波导理论加以解释。

光学纤维以性能分类有传光纤维和传象纤维两大类；按折射率分布分类有阶跃折射率型光纤和梯度折射率型光纤；按传输模式分类有

多模光纤和单模光纤。数值孔径、透光能力、分辨率、对比度等光学参量是表征各类光纤特性的主要参量。

虽然光纤传感器出现的历史不长，但它却具有非凡的生命力，前景是不可估量的。光纤传感器具有以下特点：灵敏度高、体积小、重量轻、可弯曲、绝缘良好、抗干扰、化学性能好、可传输光能和图象、低损耗、频带宽、材料来源丰富、价格低廉等优点，但有易碎的不足之处。

根据光纤在光纤传感器中的作用，光纤传感器可分为两种基本类型：

1. 非功能型光纤传感器

光纤在光纤传感器中只作为传输光能的一种媒介体，在光纤的一端需要连接敏感元件组成光纤传感器。这种类型的光纤传感器所用的光纤一般采用多模光纤。

2. 功能型光纤传感器

光纤在传感器中不仅是作为光能的传输媒介体，而且还利用光纤在外界影响下产生的某些特性的变化来实现某些物理、化学、生物及几何量的测量控制等作用的称为功能型光纤传感器。这种类型的传感器所用的光纤一般采用单模光纤。

各种类型的纤维光学传感器都具有通用的元件和机构。它们需要有光源、光学接口、光纤、光学调制机构、光电检测部分和信号处理设备（图 1 所示）。

光源可以是宽带的白炽灯、窄带的发光二极管、多模激光器或单频的单模激光器。光纤内部或外部的黑体辐射也可以用作光源。光学接口由镜头、折射率匹配器、偏振棱镜、连接

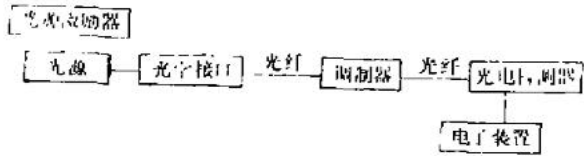


图1 纤维光学传感器通用机构

器、耦合器和定位装置组成。将光源发出的光束高效率地耦合到光纤上是很关键的，其困难程度与所用的光纤是多模还是单模有关，对多模光纤用折射率相匹配的环氧树脂或液体作对接耦合就可以了，但对单模光纤则需要用较复杂的镜头和定位装置。光学调制部分能调制的光学参量有相位（光纤长度、折射长度、光学频率）、幅度（反射、透射、吸收、散射、微弯曲）、颜色（磷光、荧光）、偏振状态等。目前已研制出几十种特殊的调制机构，可以在光纤的内部调制，也可以在光纤的外部调制。在光纤和光电检测器之间也要有耦合接口，但通常用对接耦合就够了。光电检测器之后还需要放大器、解调器、信号处理器、数字显示器等电子设备。

目前，在各个领域根据不同用途已研制出60~70种光纤传感器。近年来，人们将光导纤维用于激光多普勒流速仪传送激光和散射光。从而使激光多普勒流速仪的性能有了很大改进，开拓了它的应用范围。本文着重叙述光纤激光多普勒流速仪的原理、结构、性能和用途。

三、光纤激光多普勒流速仪

目前对流体流场的测试方法普遍采用毕托管探针法、热线及热线式风速仪或激光多普勒测速仪等。前两种均属接触式测量，对流场有一定的干扰；而后者属于非接触式测量，它具有非接触式测量、空间分辨率高、精度高、线性度好、测量范围大、良好的方向灵敏性与动态响应快等优点。激光多普勒流速仪在国内外已成为流体研究测量中极其重要的手段。但这种传统的仪器对测量物体内部流场（如发动机内部气流流场、汽化器试验、原子反应堆内部流场等），狭窄场所流场（如血管内血流速度）

及远离仪器的场地都很困难。另外传统的激光多普勒流速仪装置复杂、体积庞大、价格昂贵。最近研制成功的光纤激光多普勒流速仪扩充了应用范围，提高了灵活性，从而弥补了传统仪器的一些缺点。

1. 光纤激光多普勒流速仪的原理

光纤激光多普勒流速仪和传统激光多普勒流速仪的基本原理基于光学的多普勒效应。当一个固定的光源发出一束波长为 λ_i ，频率为 f_i ，光速为 C 的单色激光束时，其波前是一组平行平面，当激光束射到一个固体颗粒上，微粒 P 与光源发生相对位移时，颗粒所接收到的光频不再是 f_i ，而变为 f_r ，频差 $f_D(f_D=|f_i-f_r|)$ 的高低直接反映了颗粒运动速度 u ，这种现象在物理学上被称为光学的多普勒效应（图2所示）。

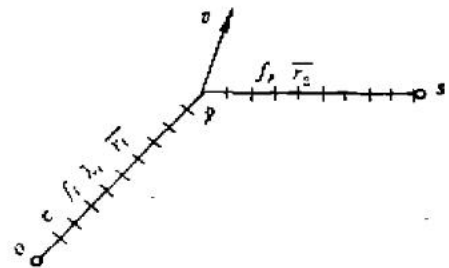


图2

假设 \vec{r}_i 是固定光源 O 指向运动颗粒 P 方向上选取的单位向量， u 是颗粒运动的速度，那么 f_r 和 f_i 的关系根据多普勒原理和爱因斯坦的相对论可得出

$$f_r = f_i \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{r}_i}{C} \right)$$

如果再有一个相对于光源是静止的观察者 S 所收到的颗粒散射光的频率是 f_s 而不是 f_r ，这就是第二次多普勒效应。所以由双散射型光路可知（图3所示）。

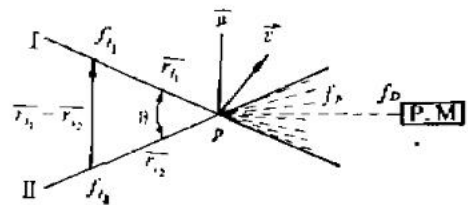


图3

$$f_{r1} = f_i \left[1 - \frac{\bar{u} \cdot (\bar{r}_{i1} - \bar{r}_i)}{C} \right]$$

$$f_{r2} = f_i \left[1 - \frac{\bar{u} \cdot (\bar{r}_{i2} - \bar{r}_i)}{C} \right]$$

f_{r1} 和 f_{r2} 在固定光检测 $P \cdot M$ 上进行混频所得频差为 f_D

$$f_D = f_i \left[\frac{\bar{u} \cdot (\bar{r}_{i1} - \bar{r}_{i2})}{C} \right]$$

将上式中的矢量形式变为标量形式为

$$f_D = \frac{u}{\lambda_i} 2 \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\therefore u = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} f_D$$

这便是激光测速的基本公式。

式中 u —— 所测的流体速度；

λ —— 激光光束波长；

θ —— 光束 I 与光束 II 的夹角。

由此可知，多普勒频差 f_D 与流体实际速度 u 有一严格的线性关系。测出这个频差值即可得出流体运动的真实速度。

2. 光纤激光多普勒流速仪的结构

我们以图 4 所示的最简单的一维光纤流速仪说明光纤速度传感器的基本结构。

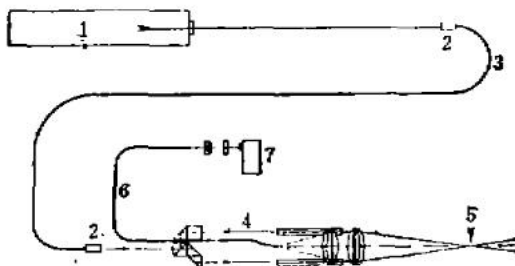


图 4

从激光器 (1) 出射的激光束首先通过自聚焦透镜 (2) 被耦合到单模光导纤维 (3) 上，激光束经单模光纤被传送到光学调制部分 (4)，一束激光通过光束分离器被分成相互平行、光强相等、偏振方向一致的两束，再由发射透镜聚焦到被测点 (5)。被运动颗粒散射携带多普勒速度信号的散射光由接收透镜收集，并且被耦合到多模光导纤维 (6) 上，由多模光纤将光信号传送给光电检测器。根据光

的多普勒效应与光外差原理，在光电检测器中完成光学混频和检波后，将光信息转换成电信号。随后再由信号处理和数字处理系统进行处理。

根据光纤在多普勒流速仪中传递激光部位的不同可分为三类：光纤连线型、光纤探头型和全光纤型传感器。

近年来光纤流速仪发展很快，相继研制成二维、三维光纤流速仪、带频移能辨别速度方向的光纤流速仪等……

在光纤激光多普勒流速仪中将激光束高效率地同光纤耦合是比较困难的。光束与光纤耦合方式很多。在此采用的自聚焦透镜耦合方式，其耦合效率可达 50~60%。圆柱形的自聚焦透镜实际上是一段自聚焦光导纤维，其折射率分布是自纤维轴沿横截面内半径方向呈抛物线状连续变小，可表示为 $n(r) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot a^2 r^2 \right)$ 。当近轴光线在其中传播时，光线的路径为正弦（或余弦）曲线。在传播中没有全反射损耗，它对于轴内点和轴外点的子午光线均有自聚焦作用。

对于一般的非功能型光纤传感器多采用多模光纤，但是光纤激光多普勒流速仪中的发射光纤必须使用保偏型单模光纤。因为这台仪器要求激光束通过光纤传送后仍保持它的高斯分布和偏振方向。光纤内传输模式的总数根据参数 V 来决定， $V = \frac{2\pi a n_1 \sqrt{\Delta}}{\lambda}$ ， V 为具有频率的量纲，被称为特征频率。 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 为相对折射率差，是表征光纤特征的重要参数之一， a 是芯子半径， n_1 是芯线折射率， n_2 是外层折射率， λ 为入射光波波长。如果 $V < 2.405$ (0 级贝塞尔函数的第一个根)，则只有最低的空间模（基模）能分布。从 V 与光纤参数、波长的关系式中可以看出，只要使光纤的芯做得足够细，折射率的差值尽量小，就可以限制可传布模的数目而成为单模，于是就获得了“单模”工作方式。当 V 值选定在第二个模快要出现的位置附近时，基模就接近高斯分布。

对于直径在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ，折射率差在 $0.1 \sim 1\%$ 之间的可见光芯线，通过计算可知，此光纤可以获得单模工作方式，此时基模接近高斯分布。但单模光纤的波长范围有限，对于某个给定的单模光纤，波长范围不能很宽。如波长较长，模就增宽，光波将扩散到外径，模的强度分布失去它的高斯分布。反之，波长较短，使 $V \geq 2.405$ ，那么光纤的弯曲和不规则性会导致能量出现在第二个模上，也会使光强呈非高斯分布，这都是光纤激光流速仪不允许的。此外，光纤激光流速仪还要求通过发射光纤的光束仍保持其原来的偏振方向不变。对于普通的单模光纤，由于光纤中残留的双折射，线偏振光波光学延迟而变更偏振方向。这种光纤会影响速度测量，在光纤激光流速仪中使用不理想。除了选用“偏振保持型”光纤外，在将光耦合到光纤上时，也要细心调节。因为在光纤的安装、弯曲和连接时，胶粘处理和箍扎损伤会使光纤变形，引起双折射效应，造成在传送过程中偏振方向的改变。

在光纤激光流速仪的接收光路中多数使用多模光纤。在后向接收系统中，为了避免衍射，收集光孔要求大于光束直径，所以必须用多模光纤作接收传输。

3. 光纤激光多普勒流速仪的特点

激光多普勒流速仪使用了光纤以后，其性能有了很大的改变。首先，光纤探头体积小，光纤长度可选择，因此可以较自由地移动测量点位置。可以测出传统激光流速仪难以测到的角落。其次，光纤探头体积小、重量轻，因而配套使用的三维位移机构可以选用小型精密坐标架。在速度方向未知的流场中，用传统的激光多普勒流速仪只能测出两束光所在平面内，与两束光夹角平分线垂直方向的速度分量。而光纤激光流速仪利用光纤的柔软性，可以旋转分束棱镜直到使多普勒频率达到最大值。测定从基准方向棱镜旋转的角度，就可以确定流场中流速的主方向（不能分辨正、负）。

另外，在大型被测空间中，可把小巧的光纤探头直接放入流体中测量，克服了传统仪器

由于作用距离有限带来的困难。除此之外，光纤不受电干扰影响，可以在较恶劣环境中进行测量，使用方便。

光纤探头也有其不足之处。首先作用距离小，为保证测量点的空间分辨率，透镜焦距不能太大，通常光纤探头的作用距离只有 $50 \sim 60 \text{mm}$ ；光纤耦合时能量损失较大，导致散射信号光较弱，只能加大光探测器的收集孔径，这样，同时收集了较强的杂散光，从而降低了信噪比。

4. 光纤激光多普勒流速仪的应用

传统激光多普勒流速仪难以测量的物体内侧、狭窄部位、远离仪器的场所等，正是光纤激光多普勒流速仪发挥作用的地方。如：

(1) 飞机、船舶的研究（机翼面、船舶侧面流体的流动情况）；

(2) 内燃机研究（汽化器试验，发动机内部流场分布）；

(3) 化学工业（搅拌槽、化学反应槽内部流体动向测量，汽液、固汽二相流等测量）；

(4) 建筑、土木工程（高层建筑周围，住宅内部通气测量，河流水面流速等）；

(5) 医用（血流测定）。

光纤激光多普勒流速仪的应用很多，本文仅对测量血流速度作一简单介绍。

血流速度计的基本结构如图 5 所示。

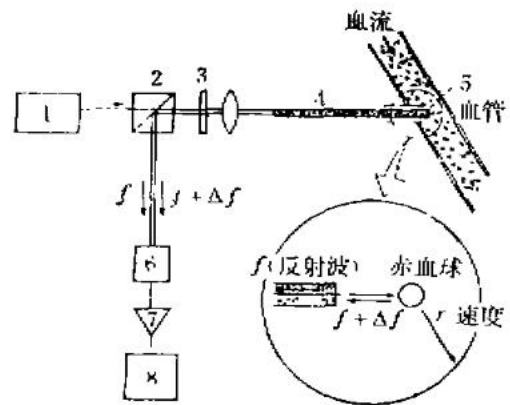


图 5

这种传感器的光纤探头是用直径大约为 $150 \mu\text{m}$ 的光导纤维插入注射器针头，测量时光

纤可以与针头一起插入血管。由激光器(1)发出的频率为 f 的激光,首先经过偏振分光棱镜,其垂直偏振光全部通过并被耦合进入光纤(4)。经光纤传送后,从光纤端面反射回来的光波频率仍为 f ,而通过光纤照射到血液中运动的红血球(5)上被散射的光波频率则为 $f + \Delta f$ 。反射光与散射光再经同一根光纤返回,因为往返两次经过 $\frac{1}{4}$ 波片(3),所以光的偏振方向旋转 90° ,光束不会返回激光器而被折射。 f 与 $f + \Delta f$ 的光一并进入光电检测器、前置放大器及信号处理器进行光外差检波、信号处理求出 Δf ,进而可以算出红血球的运动速度。1975年Tanaka氏报告,美国已用光学纤维血液流速计准确测出 $0.01 \sim 10 \text{ cm/s}$ 的血液流速。用该装置实测家兔腿部直径 2 mm 静脉中的血液平均流速为 2.1 cm/s ,空间分辨率 $100 \mu\text{m}$ 。用血流速度计也可以测量眼底血流速度、心脏血液循环等……

四、展望光纤传感器

从光纤传感器的性能、成本等综合指标来看,它的发展前景非常可观,可以说相当多的

技术尚处于开发阶段。目前的开发课题有:电压、电场、电流、磁场、温度、压力、流量、液面、速度、振动、陀螺、编码等等。

从美国和日本光纤传感器生产规模的发展,可以预测国际光纤传感器市场动向。在美国1983年光纤传感器市场交易额约为2000万美元,预计1993年可达2.8亿美元。在日本1984年光纤传感器市场交易额为28亿日元,预计1990年可达130亿日元。

从发展的角度来讲,光纤传感器还需要小型化、集成化、多路化和智能化。为了确立和扩大光纤传感器的市场要从硬、软件两个方面去突破,在电子学、机械工程学、石油化学、医疗等领域里继续寻找市场的同时,进一步研究新产品,扩大应用范围。

参考文献

- [1] S. L. Kaufman & L. M. Fingerson. "Fiber Optics in LDV Applications", 1985, MANCHESTER UK.
- [2] [日]长尾和美著, 光导纤维。
- [3] T. Tanaka, et al, Appl. Opt. 14, 1, P. 1927 (1975)
- [4] 两池, 电子通信学会研究会资料, OQE-79-37 (1979)。

(上接18页)

楚。待到求垂直度值时,很容易出错,荒谬结果的出现,很可能就是这个原因。为此,建议测量人员在一个几何元素探测结束之后,立即着手将图纸要求的各种数值(包括垂直度在内)算出来,要是发现错误,可以及时纠正或补测。补测一个元素有时比更改指令要方便些。

三坐标测量机主要用于制件质量检测 and 工艺分析。它具有测量快的特点,很适用于加工中心等数控机床的首件工艺分析。这样搭配,才能充分发挥这些高效机床的优势,给生产带来实际的经济效益。为此,我们经常求算元素间的角度值是否互成 90° 来了解垂直度情况。例如一个孔对平面基准的垂直情况分析。在莱茨 MESCAL 软件中,可将被分析的孔看成圆

柱体或圆锥体(当孔有喇叭口时)。它们都具有一根轴心线。可用仰角(ELEVATION)和方位角(AZIMUTH)来描述这根轴心线的空间位置。其角度值的判别与前述相同。

三、一点建议

三坐标测量机不仅要求机械精度高、计算机运算迅速,而且要求完善的软件支持,来给测量人员提供方便。本文所述的类似问题已经遇到不少。建议我国的软件编制人员与测量人员密切合作,根据我国的形位公差标准,编制出更加实用方便的软件来,无须附加计算就可得出各种误差数值。直线位置的仰角和方位角可以在终端上直接图示就更好了。