

# 光纤传感技术对工业发展的促进作用\*

廖延彪<sup>†</sup>

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要** 光纤通信和光纤传感是光纤技术两大应用领域. 光纤传感由于具有良好的抗电磁干扰、高电磁绝缘性、本质安全和可成网等诸多优点, 因而对仪表工业的发展有很大促进作用, 其中包括改造传统产品, 更新换代老产品, 以及形成新的技术分支. 文章对此进行了分析和介绍, 并论述了光纤传感研究的新领域.

**关键词** 光纤技术, 光纤传感, 传感技术

## Optical fiber sensors promote industrial development

LIAO Yan-Biao<sup>†</sup>

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Optical fiber (OF) communications and OF sensors are two major applications of fibers. Because of their resistance to electromagnetic interference, high electromagnetic insulation, safety and adaptability for network development, OF sensors can greatly promote the development of instruments through upgrading of traditional products to form a new technical branch. The research and development of OF sensors is reviewed and the conditions for spreading their application in China are analyzed.

**Key words** optical fiber technology, optical fiber sensors, sensing technology

光纤传输和传感是光纤技术中的两个重要领域. 目前光纤传输(光通信)技术发展迅猛, 应用广泛; 光纤传感技术也日益显示出其巨大应用潜力, 它对仪器仪表等许多行业的发展, 将产生巨大的促进作用.

光纤传感器由于具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、电绝缘性好、安全可靠、耐腐蚀、可构成光纤传感网等诸多优点, 在工业、农业、生物医疗等各领域均有广阔的应用前景, 它将对传统的仪器仪表行业注入新的血液.

### 1 光纤传感器的原理和特点

仪器仪表行业中光纤最早用于传光及传像. 20世纪70年代初生产出低损耗光纤后, 光纤在通信技术中用于长距离传递信息. 光纤不仅可作为光波的传输媒质, 而且可用作传感元件来探测各种物理量.

因为光波在光纤中传播时, 其特征参量(振幅、相位、偏振态、波长等)会随外界因素(如温度、压力、磁场、电场、核辐射等)而变, 这就是光纤传感器(optic fiber sensors, OFS)的基本原理.

OFS可分为传感型(功能型)和传光型(非功能型)两大类. 利用外界物理因素改变光纤中光波的特征参量, 从而对外界因素进行探测, 称为传感型OFS, 它具有“传”和“感”合一的特点. 而传光型OFS是指利用其他敏感元件测得的物理量, 由光纤进行信息传输, 其特点是可充分利用现有的传感器, 便于推广应用. 这两类OFS都可再分成强度调制、相位调制、偏振调制以及波长(或频率)调制等几种类型.

和传统的传感器相比, OFS的主要特点是(1)

\* 2002-12-23 收到初稿, 2003-05-06 修回

<sup>†</sup> E-mail: lyb-dee@mail. tsinghua. edu. cn

抗电磁干扰,电绝缘性好,耐腐蚀、本质安全。由于 OFS 是利用光波获取和传递信息,而光纤又是电绝缘、耐腐蚀、本质安全的传输媒质,不怕电磁干扰,也不影响外界的电磁场,这使它在电力、石油、化工、冶金等强电磁干扰、易燃、易爆、强腐蚀环境中能有效地传感。(2)灵敏度高。利用光波干涉技术和长光纤使不少 OFS 灵敏度优于一般的传感器。(3)重量轻、体积小、外形可变。利用光纤这些特点可构成外形各异、尺寸不同的各种 OFS。(4)对象广泛,目前已有性能不同的测量温度、压力、位移、速度、加速度、液面、流量、振动、水声、电流、电压、磁场、电场、核辐射等各种物理量、化学量、生物量等的 OFS。(5)对被测介质影响小。(6)便于复用、便于成网、有利于用现有光通信技术组成遥测传感网络。(7)成本低。有些 OFS 其成本将大大低于现有同类传感器,而有些 OFS 由于其特殊性能,它和现有仪器结合,将使其大大增值。

## 2 光纤传感器的若干应用

利用先进的 OFS 技术和光电子技术对传统的仪器仪表进行改造,扩展功能,可使其具有实时、在线、遥测、连网等先进性能。例如,传统的盒式压力计、双金属温度计、腰轮流量计、浮子式液位计等和光纤传感技术相结合,把测量结果变成光信号,再用光纤传至控制室,就可利用这些传统的仪表实现对现场诸参量进行在线、实时检测。改造后的仪表有本质安全、精度高、可与计算机联网等诸多优点,在石油、化工等易燃、易爆行业,具有广阔的应用前景。现以温度传感器为例,说明其结构。此温度传感是以双金属片为温度敏感元件。其工作原理是利用双金属片的热膨胀性,在外界温度发生变化时,通过双金属片带动光码盘转动,再用光纤输入两束光,通过光码盘,码盘转动时,出射光被调制成光脉冲输出,如图 1 所示。由两光脉冲的相位差则可判断温度变化的方向(升温 and 降温)。再通过对两路输出光信号的处理,可以得到计数器计数值和温度的关系。

传统的光度计、光谱仪等分析仪器和光纤探头相结合,并用光纤传输测量结果,就可使这类仪器成为一套具有实时、在线、遥测功能的先进检测系统:光度计、光谱仪等分析仪器以及计算机等数据处理系统在控制室,而探测用光纤探头在数十或数百米外的工作现场,这类系统在环境监测、化工生产领域有广阔的应用前景,有的已有产品。这类仪器和过去

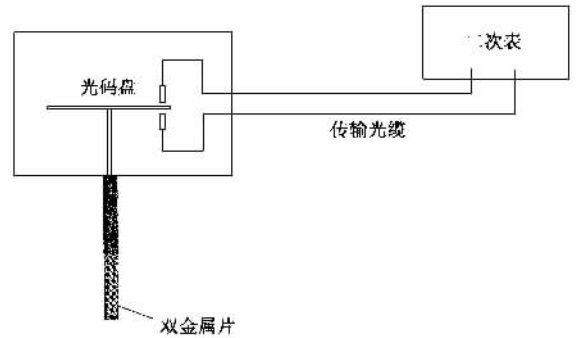


图 1 光纤温度传感器示意图

分析用光谱仪器的主要差别是:光纤式光谱仪器是把原光谱仪中的样品盒(吸收池)从仪器内部移到测量现场,使实验室仪器改造成遥测仪器,光源则改用半导体器件(半导体激光器或半导体发光管),用光纤把样品盒(在测量现场)和光源、光谱分析装置(在实验室或分析中心)连结。光纤的传输距离可长达数百米,这就构成光纤式分光光度计;另外用光纤把从发光物质(在测量现场)发出的待测光传到光谱仪器(在实验室)进行光谱分析,这就构成光纤式光谱分析仪。

光纤式大电流、高电压传感器是典型应用例之一。传统的电流互感器是利用电磁感应原理,把高压(几千到几十万伏电压)端的大电流(例如 1000A)转换成小电流(例如 5A),在低压端进行测量。这种互感器的成本主要用于解决绝缘问题,而且这种成本随互感器使用电压的等级上升而呈指数增加。另外,绝缘的可靠性,也是这类互感器的隐患。目前解决的方案之一,就是用光电和光纤技术对它进行改造,其基本思路是:电磁式电流互感器置于高压端(例如出 220kV 高压输电线上),此电流互感器产生的感应信号调制也置于高压端的半导体发光管,载有此调制信号的光强由光纤传送到地面控制室,由光/电转换器换成电信号,再经信号处理单元输出被测电流的测量值,高压端发光管的供电可利用电磁感应方式在高压端解决,也可用光电池解决。其方法是在控制室用一定功率的光源通过光纤传送到处于高压端的光电池,光电池把光能转换成电能,给发光管供电。已有用这种电光、光电转换技术构成光纤电流计的报道。这种光纤传输线的方式是解决强电磁干扰环境及其他恶劣环境下测量的好办法,目前已有相应的产品出售。

利用 OFS 还可构成很多性能优良的新一代测试仪器,以取代传统的测试仪表。例如,用于导航、石

油、交通(高速列车、自动驾驶)等行业的光纤陀螺,具有无惯性、体积小、重量轻、灵敏度高等优点. 光纤陀螺是一种新型角速度传感器,与传统的陀螺相比,光纤陀螺无闭锁,易于微型化,可用于不同精度应用场合,而保持较低的性能价格比. 近20年来,人们对光纤陀螺中存在的物理现象已理解清楚,一些关键技术已解决. 干涉型光纤陀螺已有产品. 干涉型光纤陀螺的基本构成是一个环形双光束干涉仪(SAGNAC干涉仪)输入光经分束器分为两束,分别沿顺时针和逆时针方向在光纤环中传播,最后又在分束器处会合发生干涉,如图2所示. 围绕垂直于环面的轴的转动将引起两束光之间的相位差(光程差)的变化,因此改变输出干涉图样,相位差 $\Phi_s$ (称为SAGNAC相移)和角速度之间的关系为

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \Omega, \quad (1)$$

式中 $L$ 为光纤的长度, $D$ 为光纤环的直径, $\lambda$ 为波长, $c$ 为真空中光的速度, $\Omega$ 为角速度. 用低损耗单模光纤导光, $L$ 可长至几百米甚至上千米,这样可以大大提高环形干涉仪的灵敏度,即使微小的转动也可以产生能够测量的相移.

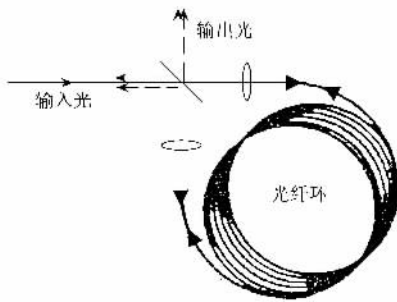


图2 光纤陀螺原理图

光纤电流、电压传感器的基本原理是利用光纤或其他光学材料的磁光效应和电光效应测量电流、电压,利用光纤传输信息的一种测量装置. 具有绝缘性好、抗电磁干扰、灵敏度高、测量动态范围大、造价低等优点,因此是一种很有实用价值的测量装置.

多相流的测量是石油、化工、电力等行业的重要技术之一,由于光纤传感的许多优点,OFS已成为多相流测量中的一支新秀. 这种传感器的基本原理是:利用光纤端面的全反射作用,来检测光纤端面处是液体还是气体,如图3所示. 当端面是液体时,由于液体的折射率(1.3—1.5)和光纤的折射率(1.5)很相近,因而光纤传输的绝大部分光强都进入液体. 反之,当光纤端面为气体时,则在端面为一定形状时,

将因全反射原理而使大部分光在光纤中沿原路返回,因而测量由光纤端面返回光的强弱及信号持续时间就可获得光纤端面处气泡的尺寸、含量等参数.

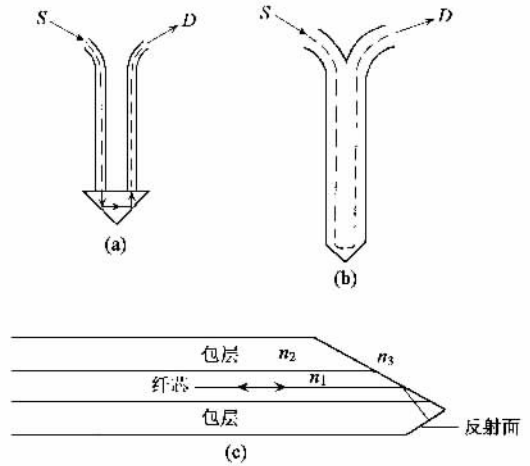


图3 光纤二相流传感器原理图

### 3 光纤光栅传感器

光纤光栅是近几年发展最为迅速的光纤无源器件之一. 由于它具有许多独特的优点,因而在光纤通信、光纤传感等领域有广阔的应用前景. 光纤光栅的出现,使许多复杂的全光通信和光纤传感网络成为可能,极大地拓宽了光纤技术的应用范围.

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性(外界入射光子和纤芯内锗离子相互作用引起的折射率的永久性变化)在纤芯内形成空间相位光栅,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤光器或反射镜,利用这一特性可构成许多性能独特的光纤无源器件和光纤传感器,例如可构成光纤激光器,光纤滤波器,光纤波分复用器以及用于应力、应变、温度等诸多参量检测的光纤传感器和各种简单和复杂的光纤传感网,如图4所示.

基于光纤光栅的光纤传感器,其传感过程是通过外界参量对Bragg中心波长的调制来实现的,属于波长调制型光纤传感器. 它具有以下明显的优点:一是抗干扰能力强,因为普通传输光纤不会影响光波的频率特性(忽略光纤的非线性效应),从本质上排除了各种光强起伏引起的干扰,因而具有很高的可靠性和稳定性;二是传感探头结构简单,尺寸小(其外径和光纤本身等同),适用于各种应用场合,尤其是智能材料和结构;三是测量结果具有良好的重复性;四是便于构成各种形式的光纤传感网络;五

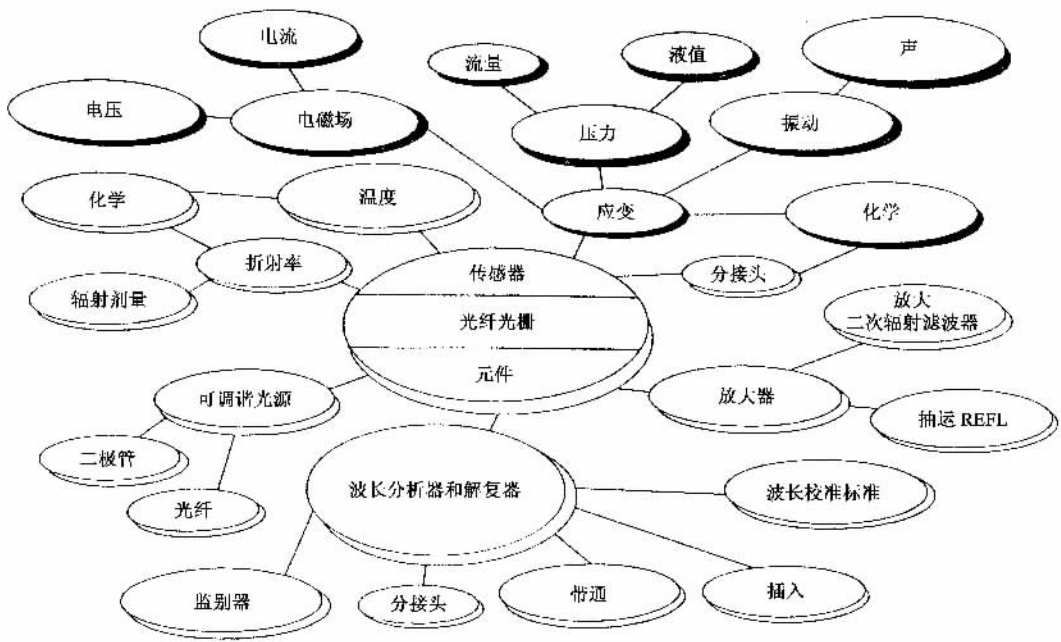


图4 光纤光栅的应用

是可用于对外界参量的绝对测量(在对光纤光栅进行定标后);六是光栅的写入工艺已较成熟,便于形成规模生产(商品化)。此外,还具有测量对象广泛、易于实现多参量测量等优点。但是它也存在不足之处,例如,对波长移位检测需要用较复杂的技术和较昂贵的仪器或光纤器件,需要大功率的宽带光源或可调谐光源,其检测的分辨率和动态范围也受一定限制等。

目前已有用光纤光栅测量应力、应变、温度等参量以及构成光纤生物、化学传感器的许多报道,其主要研究内容是提高灵敏度,扩大动态范围。提高灵敏度途径是改变包层材料、光纤结构和光纤成分等。

此外,用光纤光栅构成多参量传感器和光纤传感网也是目前的研究热点之一。

## 4 分布式光纤传感器

分布式光纤传感器是指以光纤为传感介质,利用光波在光纤中传输的特性,以给出沿光纤长度方向每一点的被测量值。这是光纤特有的一种新型传感器,它可给出大空间范围的温度或应力等参量的分布值。构成分布式光纤传感器需解决的主要问题,一是传感元件,例如光纤,它能给出被测量参量沿空间位置的连续变化值;二是准确给出被测量参量所对应的空间位置。对于前者,可利用光纤中传输损耗、模耦合、传播的相位差,以及非线性效应(例如,

光波的频移)等给出连续分布的测量结果;对于后者,则可利用光时域反射技术(OTDR)、扫描干涉技术等给出被测量所对应的空间位置。下面举几例说明。

### 4.1 分布式光纤温度传感器

利用光纤中拉曼散射或布里渊散射光强随温度的变化关系,以及 OTDR 技术可构成分布式光纤温度传感器。这种传感系统研究得比较多,并已有产品问世。而利用其他参量随温度的变化关系则可构成其他参量的分布式光纤传感器,例如,已有利用光纤分布式温度传感器检测大坝的渗水、输气或输油管道的泄漏。

### 4.2 分布式光纤应力传感器

高双折射光纤受力时,两正交偏振模会发生耦合,引起输出光偏振态发生变化,再利用扫描 Michelson 干涉仪,可测受力点位置。

### 4.3 分布式微弯光纤传感器

利用光纤中的微弯损耗效应和 OTDR 技术可构成分布式光纤应变传感器,光纤的微弯结构可有不同形式。

### 4.4 分布式 Sagnac 光纤应力传感器

此传感器为一 Sagnac 光纤干涉仪,由高双折射光纤组成。光纤受外力时,光纤中两偏振模发生耦合,使输出光变化,再利用连续波调频技术确定外力点的位置,即可构成分布式应力传感器,其空间分辨率目前为 1m。

## 5 用于智能材料和结构的光纤传感技术

在材料和结构的制造过程中,将传感元件和驱动元件埋入其中.传感元件可对结构的状态参数,如应变、温度、损伤程度等进行实时测量;驱动元件根据需要对结构的状态作必要的调节或控制,由此可保证结构的安全运行并始终工作在最佳状态.这种结构具有一定的“智能”,称为智能结构.

OFS 由于具有体积小,损耗低,灵敏度高,抗强电磁干扰,电绝缘性好,带宽大,可同时作为传感元件和传输媒质,并实现多点或分布式测量,因而是最有希望用于智能结构的传感技术.这是国内外目前研究的热点之一.

综上所述,OFS 是一种新型的传感器,它具有一系列优点,它也是我国仪器仪表行业和制造行业现代化的一个重要方面.

### 参 考 文 献

[ 1 ] 靳伟,廖延彪等.导波光学传感器:原理与技术.北京:科学出版社,1998 第 9,10 章. Jin W, Liao Y B *et al.* Waveguide Optical Sensors: Principles and Applications. Beijing: Science Press, 1998. Ch. 9, 10 (in Chinese)

[ 2 ] 廖延彪.光纤光学.北京:清华大学出版,2000,第 4、5、6 章 [ Liao Y B. Fiber Optics. Beijing: Tsinghua University Press, 2000, Ch. 4—6 (in Chinese) ]

[ 3 ] Culshaw B *et al.* Optical Fibre Sensors. Artech House, 1989, Vols. 1—2

[ 4 ] Culshaw B *et al.* Optical Fibre Sensors. Artech House, 1989, Vols. 3—4

[ 5 ] Udd E. Fiber Optical Smart Structures. London: John Wiley & Sons, 1995

[ 6 ] Othonos A *et al.* Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunication and Sensing. Artech House, 1999

[ 7 ] 涂亚庆,刘兴长.光纤智能结构.重庆:重庆出版社,2000 [ Tu Y Q, Liu X C. Optical Fiber Smart Structures. Chongqing: Chongqing Press, 2000 (in Chinese) ]

[ 8 ] 廖延彪.物理,1991,20:231 [ Liao Y B. Wuli (Physics), 1991, 20: 231 (in Chinese) ]

[ 9 ] 廖延彪.激光与红外,1999,29(1):14 [ Liao Y B. LASER & INFRARED, 1999, 29(1): 14 (in Chinese) ]

[ 10 ] Proceedings on OFS-13 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Korea, 1999

[ 11 ] Proceedings on OFS-12, USA, 1997

[ 12 ] Proceedings on OFS-14, Italy, 2000

[ 13 ] Proceedings on OFS-15, USA, 2002

· 物理新闻与动态 ·

## 贝尔实验室物理学家的论文诸多被撤消

2001 年,位于新泽西州穆勒山的贝尔实验室物理奇才詹·亨德里克·舒恩以平均每 8 天出 1 篇的惊人速度写出论文.现今,依据贝尔实验室 9 月 25 日的报告,舒恩论文存在许多被指控的不轨行为( Science 杂志 2002 年 10 月 4 日,第 30 页).论文被撤消的速度同样惊人.2002 年 11 月, Science 刊登了关于舒恩与同事所著的 8 篇论文的撤消声明(见《物理》2003 年第 2 期第 138 页). Science 杂志电子版对舒恩论文发布相关警告,并说将尽快发表书面撤消声明.在最新一轮撤消声明大战中,美国物理学会(APS)与美国物理联合会(AIP)在 2002 年 12 月宣布,他们就舒恩与其合著者在他们的杂志上发表的 12 篇论文将发布撤消声明.

据 AIP 杂志负责人托马斯·冯·福尔斯特称,论文的所有作者都同意撤消 AIP 杂志上的 6 篇论文,即 Appl. Phys. Lett 上的 5 篇和 J. Appl. Phys. 上的 1 篇. APS 杂志的总编马丁·布拉姆说,所有作者都同意撤消 Phys. Rev. B 上的两篇文章,因可能含有“替代数据”它们已被贝尔实验室委员会重新标示.但对于委员会未加审查的刊登在 Phys. Rev. B 和 Phys. Rev. Lett. 上的 4 篇论文,舒恩对其合著者准备将其撤消的决定并不同意.布拉姆说,撤消声明中将反映这种分歧. APS 杂志还计划公布告示:读者小心未被撤消的两篇论文,因为论文作者还坚持维持原状.其中 1 篇是舒恩独著.

布拉姆谈到, APS 编辑部认为,重新审查舒恩自 1998 年以来合著的所有论文(不仅仅限于贝尔实验室所标示的那些)是很重要的.这些期刊都将把撤消的论文保持在其网站上,但在网上论文附有撤消声明,并在印刷刊物上附有勘误表.布拉姆还谈到:“我们不想篡改已发表论文的档案,但将带有红色‘撤消’字样,就像是个红 A 字”(红 A 字原意指在殖民地时期用以标志通奸犯,此引申为“耻辱”的代名词——译者注).

(姜广智 秦炎福 译自 Science, 2003, 299: 3)