

光纤传感技术

董孝义*

【提要】 传感技术是现代信息社会的神经中枢,光纤传感则是一种新兴的现代传感技术,由于它具有灵敏度高、响应速度快以及抗干扰、抗各种恶劣条件等一系列优点而成为传感领域的佼佼者,因而在光学与光电子学科中占有重要地位。光纤传感划分为非功能型和功能型两大类:前者简单易行、无需特殊技术,因此已被广泛研究,并有相当数量进入实用化;功能型传感则要求条件苛刻,多数仍处于研制阶段,但因其具有极高灵敏度,属于高性能传感类,故仍为光纤传感的主要发展方向。文中以表格形式概要列示了这两类光纤传感的基本状况,表明光纤传感有广泛应用前景。

光纤传感器今后发展趋势是:加速光纤传感器的实用化进程;大力开展光纤传感技术的集成化研究;积极开展多功能光纤传感及其网络化研究,以及不断推出新型光纤传感器并开拓新的应用领域等。

—

测量的目的是为了获得研究对象(或过程)的有关信息,并进行相应处理,然后再去控制对象(或过程),完成这一功能性操作的即为传感技术。传感技术是现代信息社会的神经中枢,它对未来经济和科学技术的发展起着十分重要的促进作用。因此,普遍认为,传感技术的发展程度、水平高低是衡量一个国家科学技术先进水平的重要标志之一。

光纤传感是一种新兴的现代化传感技术。根据工作原理可将其分为两大类,一类是利用光纤介质对测量量的敏感效应来完成全部传感操作。这时,光纤既是敏感体又是敏感信号的传输介质,因而把它称之为功能型光纤传感,或称传感型光纤传感;第二类是非功能型光纤传感,又称传感型光纤传感。这时光纤只作为敏感信号的传输线路,而提供敏感信号的敏感体则由其他有关介质承担。对于第一类,由于光纤兼容,因此需要使用特殊拉制的具有相关光效应的特种光纤,即增敏光纤;对于第二类,则可使用常规通信光纤传输敏感信号,而敏感体则需要借助具有相关光效应的敏感材料来承担,因此,光纤线路是非连续的,光纤与敏感体需要耦合衔接。这里所说的光效应,包括电光、光电、声光、光声、磁光、压光、弹光、热光以及吸收与发光、干涉与衍射等各种物理效应。由此可知,光纤传感与纤维光学、光电子学、非线性光学、导波光学、光波技术以至光谱学、薄膜光学等多种学科密切相关,是遍及现代光学各学科领域的一门综合性极强的高技术,它在光学与光电子学中占有重要地位。它的问世及其深入研究不仅仅展示出广泛的应用前景,而且大大地丰富了光学与光电子学的研究领域,并促进其向深度和广度发展。

* 南开大学现代光学研究所

二

光纤传感自问世以来,至今不过十几年,但其发展之迅速令人刮目相看。由于它具有灵敏度高、响应速度快、抗腐蚀、抗高温、抗各种恶劣条件、抗电磁干扰、耐高压、安全可靠、信息容量大、易于实现远距离多通道操作、易于与计算机或通信系统联网等一系列优点,已成为传统传感器的有力竞争者,并被确认为传感技术领域中最有应用前景的新型传感技术。十几年来,世界几个工业大国均投入大量人力物力竞先开展光纤传感的研究。到目前为止,已有电流、电

表 1

测定对象	利用的主要效应	检测方式	灵敏度或精度	实用化情况
电场	泡克尔斯效应	偏振	1mV	已有商品
	电色效应	光强	0.1V	已有商品
磁场	法拉第效应	偏振	0.1G	已有商品
电流			0.1A	
温度	(半导体材料)吸收	光强	1K	已有商品
	荧光	光强	1K	已有商品
	标准具	光强	1K	已有商品
	双折射	偏振	10^{-2} K	已有商品
压力	黑体辐射	光强	1K	已有商品
	光弹效应	偏振	1kPa	已有实用化报道
	光束扩展	光强	1kPa	
声波	振动膜	干涉	可听声平	
	干涉仪	干涉	1nm	
位移	光束扩展	光强	0.1 μ m	已有商品
	变轴效应	光强	0.1 μ m	已有商品
振动	多卜勒效应	频移	(振幅)0.1 μ m	
加速度	光弹效应	偏振	1mG	
	变轴效应	光强	50 μ G	已有实用化报道
	臂伸效应	光强	1 μ G	
油滴、尘埃、缺陷、泡等	光散射	光强	(浓度) 10^3 至大于 10^3 ppm $\pm 5\%$	已有测定石油污染的商品
液位	棱镜全反射	光强		
	液面反射	调制波相位差	5mm	已有实用化报道
	薄膜作用	光强		
速度	多卜勒效应	频移	10cm/s	已有测量血流速度的研究报告
	固有振动频率	干涉	1m/s	
	强度相关	时间差	0.04—1m/s	
	光编码	光脉冲计数	10^{-6} — 10^5 m/s	已有测定流速的商品
	薄膜作用	光强		
膜厚	光程长度变化	干涉	0.1 μ m	
	椭圆度	偏振	0.1 μ m	
成分	光吸收	光强	10^3 ppm	
	荧光	光强	10^3 ppm	
	椭圆度	偏振		
图象	光传输	光强	6 μ m(象元直径)	

压、温度、位移、声波、速度、浓度、压力、液位等近百种光纤传感装置的研究报道,而且已有一定数量的光纤传感器开始从实验室走向实用化和商品化,并初步形成具有一定竞争力的国际市场。据报道,1990年光纤传感器的世界总产值可达2.68亿美元,并以平均每年高达34%的速度增长,到本世纪末,总产值将达到48.8亿美元。

表1和表2分别列举了现阶段一些典型的非功能和功能型光纤传感器的研究状况

1. 非功能型光纤传感的研究情况

这类光纤传感器结构简单,无需特殊技术,对光纤和光源均无苛刻要求,而且成本低,易于实现。因此已被广泛研究,是最早进入实用化和商品化的光纤传感器(参阅表1)。

表 2

测定对象	利用的主要效应	检测方式	灵敏度或精度
电 压	电致光程长度变化	干 涉	$5\mu\text{V}/\text{m}, \mu\text{V}$
磁 场	磁致光程长度变化	干 涉	$10^{-9}\text{G(AC)}, 10^{-4}\text{G(DC)}$
电 流	法拉第效应及安培定则	偏 振	MA~mA
温 度	光程长度变化	干 涉	$10^{-4}\text{K}/\text{m}$
	双折射变化	偏 振	$10^{-2}\text{K}/\text{m}$
	黑体辐射	发 光 强 度	1—10K
	喇曼散射、瑞利散射	光 强	5K
应 变	光程长度变化	干 涉	$10^{-7}/\text{m}$
	双折射变化	偏 振	$10^{-5}/\text{m}$
位 移	光程长度变化	干 涉	$10^{-8}\mu\text{m}$
	微弯效应	光 强	$1\mu\text{m}$
声 波 压 力	光程长度变化	干 涉	$0.02\text{Pa}/\text{m}$
	微弯效应	光 强	1kPa
振动加速度	光程长度变化	干 涉	10nG
浓 度	临界角变化	光 强	0.1%
	消逝波吸收	光 强	1%
角 速 度	Sagnac效应	干 涉	$0.1\text{deg}/\text{h}$
成 分	折射率变化	光 强	1%
液 位	菲涅耳反射	光 强	1mm
	包层模损耗	光 强	1mm
放 射 线	光 吸 收	光 强	
光 频	空间相干传输	多重反射干涉	0.1MHz
光 强	荧 光	光 强	

2. 功能型光纤传感器

这种光纤传感又可分为干涉型和非干涉型。其中干涉型具有相当高的灵敏度(参阅表2),是一种高性能的传感器。典型的有Mach-Zehnder型,Michelson型,Fabry-Perot型和Sagnac型。

(1) Sagnac型 利用Sagnac效应研制出高性能的光纤陀螺仪是光纤传感技术的一项突出成就,目前短期制导用(漂移为10—100度/小时)和低性能战术用(漂移为1—10度/小时)光纤陀螺已投入市场,但惯性导航用高精密光纤陀螺还处在开发之中。目前,光纤陀螺的实验室最高水平,其漂移在 5×10^{-3} 度/小时以内。

(2) Mach-Zehnder型 这种光纤传感器具有极高的灵敏度,最小可检测相位差达

10^{-7} rad。由于需要特种光纤和探测技术,故造价较高,目前主要适于军用。这一类型中发展最快的是声传感器和磁场计,前者进一步发展为光纤声纳系统(水听器)、地震探测系统、大气声音探测系统、窃听系统等,因此受到普遍重视。

至于 Michelson 和 Fabry-Perot 型光纤传感虽也有研究,但相对而言效率较低技术较难,因此远不如 Mach-Zehnder 型研究得广泛。

三

从总体上看,目前只有一部分非功能型和少量功能型光纤传感器已进入实用化阶段,而大部分光纤传感器仍处于研究和开发阶段。其发展趋势和研究方向是:

1. 加速光纤传感器的实用化进程,提高其竞争力。其中以加快研究高性能光纤传感器(如光纤陀螺、光纤声纳系统等)、促成实用化尤为重要。

2. 大力开展光纤传感器的集成化研究。采用光电集成,将全部光电元件及信号处理系统集成在一块芯片上,或将光纤激光器、光纤调制器、光纤偏振器及特种光纤等光纤型器件一体化。这不仅降低系统成本,而且提高了稳定性、可靠性和互换性。因此这方面的研究工作有非常大的吸引力和应用前景。

3. 积极开展多功能光纤传感和光纤传感网络化研究。由一个具有多功能的敏感体或多个具有不同功能的敏感体,通过光纤网络联系起来,把反映多点或多种测量数据的信号汇总到计算、处理和控制中心,从而构成了一个网络化的多功能光纤传感系统。这类研究包括:(1)多点测量系统,如近期提出的分布式光纤传感系统(包括光时域和频域反射计形式)、阵列式光纤传感系统(如全光学曳引阵列、光纤声纳系统等);(2)多参量测量系统,如多重化光纤传感系统(包括 TDM, FDM 和 WDM 等)和多通道光纤传感系统。

4. 不断推出新型光纤传感机制,开拓新的应用领域。例如,由各种光纤传感器与微电子信号处理器相结合研制出新一代测量仪表——光纤式测量仪表;利用光纤的低衰耗特性研制出适于恶劣环境(如核爆炸装置、核电站、瓦斯区或化学污染区等)的光纤远距离传感监控系统;开辟光纤传感在生物医学、机械人、神经网络以及光计算方面的应用等等。

四

我国从 70 年代末开始,部分单位进行了光纤传感方面的研究工作,80 年代中期达到高潮,到目前为止已有 70 多个单位对几十种光纤传感器进行了论证、研究和研制,并取得了一些成绩。但总体上说,我国的基本情况是:研究单位很多、鉴定项目也不少,而真正实用化的则甚微,因此可以说我国只处于性能性实验论证的初级阶段。形成这种局面的主要原因是国家投资少、经费不足,相关技术差,不协调不配套,不注重基础,领导不力、一轰而起,只图虚名、不讲实效。

五

据上所述,我国发展光纤传感技术的中、近期战略方向和目标应该是:

1. 重点促成一些已有相当基础的光纤传感器(如非功能型电磁传感器、温度传感器等)的实用化,并使之形成产品。

2. 大力加快与光纤传感配套的特种器件(如光纤有源、无源器件)、特种技术(如特种光纤技术)及其相关理论的研究和研制,实现光纤传感研究和研制的谐调化、一体化。

3. 积极发展和开发占有优势、具有特种用途和应用前景的高性能光纤传感器(如光纤陀螺、光纤声纳系统、遥测遥控光纤传感系统等),使之达到实用化水平。

4. 进一步开拓具有新构思、新原理并具有应用前景的高技术型光纤传感的研究新领域,建立光纤传感集成化、网络化研究的初步基础。

我国在光纤传感方面起步并不晚,但发展速度缓慢,与国际先进水平之间的距离日益加大,面对这一严峻形势,我们必须直追,加快研究工作的步伐。在近3—5年内国家应对上述四个方面的研究和研制工作予以大力支持,特别是对于与特种器件、特种技术相关的基础研究,对于光纤陀螺、光纤声纳系统等几种高性能光纤传感的研究以及对光纤传感集成化、网络化和多功能化的开拓性研究应给予优先支持,以便促成我国光纤传感事业的迅速发展。

清华大学廖延彪教授、机电部26所高希才高级工程师提供不少有意义的专题材料,方便本稿得以完成,为此深表谢意。

OPTIC-FIBER SENSOR TECHNIQUE -

Dong Xiaoyi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University*)

Abstract

Sensor technique is a pivot of modern information society. As a new and developing technique, the optic-fiber sensor become superior in stransducer field because of its high sensitivity, fast responsibility, anti-interference and its resistance to the bad condition. Consequently, it occupied an important place in optics and opto-electronics. Optic-fiber sensor can be divided into non-functional one and functional one. The former is simple and has no need of special technique, thus it is developed widely and many of them have become practicable. While the functional sensor requires strike condition. Most of them are still in research phase. But it has exceeding high sensitivity, so it is a key develop orientation. In this paper, the basic situation of these two kind of optic-fiber sensor is listed in tables. It shows that the optic-fiber sensor has wide apply prospect.

Those are main developing directions of optic-fiber sensor in the future, i.e. speed up the practical process, devote major effort to the integration of optic-fiber sensor, carry out the research of multifunctional optic-fiber sensor and its network, exploit novel optic-fiber sensor and open new application field.