



电子小文库

光纤传感器入门

[日] 根本俊雄 著
石永富 陈祥训 译

电子工业出版社

光纤传感器入门

〔日〕 根本俊雄 编

石永富 陈祥训 译

化学工业出版社

内 容 提 要

当代信息工程的主要任务是信息的获取,传输与处理。光纤传感器集纤维光学与电子学技术于一身,兼有信息的获取与传输的功能,是传感器中正在蓬勃兴起的一个新分支。本书深入浅出地介绍了纤维光学的基本理论,光纤传感器依据的各种效应,测量温度、压力、振动、位移、旋转、形变、速度、加速度、音响、电压、电磁场等物理量所用的各种光纤传感的具体实例或方案,此书是了解光纤传感器不可多得的入门书;也是从事光纤传感器研究的工程技术人员 的参考读物。

光 纤 传 感 器 入 门

(日)根本俊雄 编

石永富 陈祥训 译

责任编辑 平凡

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营
北京通县宏飞印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 4.625 字数: 103千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数: 1—04, 500册 定价: 1.00元

统一书号: 15290·420

前 言

光纤是二十世纪后半叶的重要发明之一，它与激光器、半导体光探测器一起构成了新的光学技术，即光电子学新领域。光纤的研制主要为了用于通信，有关光纤通信的技术已被开发，并在不断布设一些实用线路。看来光纤在有线通信中的优先地位已得到确认。

由于光纤具有许多新的特征，所以不仅在通信方面，而且在其他方面也提出了许多新的利用方法，进行着许多新的尝试，其中之一就是传感器方面的应用。

传感器（Sensor）就是能将被测对象的状态转换成可供处理的信号的元件或装置。在从对象抽取必要信息的测量过程中，传感器可以说是信息由测量对象进入测量系统的入口。所以，传感器对于测量的重要性自不待言。最近，人们对传感器的兴趣不仅在测量领域，而且在工业界也日益增长。其原因是，为了探索科学奥秘与制作高档产品，对测量提出高精度的要求，而微型计算机的发展使得智能自动控制能较经济地实现，而且，不仅科研与生产领域的机器希望智能化，家用电器也希望智能化。这些智能化的机器要获得控制信息就必须有适应各种目的的传感器。

传感器一词的含义，当初是指温度计、电流计这样一些测量工具，它们将温度、电量等人们不能直接比较的量，变成长度、角度等能够比较的空间信号形式。后来，随着电子

技术的发展，能将测量变成容易传输与放大的电信号的传感器也急速发展起来，开发了使用灵活方便的半导体传感器等新型传感器。现在人们所指的传感器，就包括电子传感器。

在电子传感器中，用光纤制成的传感器已引起人们的注目。这是因为：第一，这种新兴的传感器从原理上看，它以光学技术为基础，将测量对象的状态变成光信号的形式取出；从材料上看则以石英为主，适于在高电压、电磁干扰、海水下以及化学腐蚀气氛等环境条件下使用。第二，光纤是优越的低损耗传输线，使用时可不必考虑测量设备与被测对象的相对位置，因此，可用在以往电子传感器难以适应的场合。

光信号不仅能为人们所直接感知，而且能用半导体光电二极管（PD：Photo Diode）、雪崩光电二极管（APD：Avalanche Photo Diode）与发光二极管（LED：Light Emitting Diode）、激光二极管（LD：Laser Diode）之类小形而简便的器件，简单地进行OE（光-电）、EO（电-光）变换。因此，光纤传感器与高度发达的电子装置有很好的兼容性，这也是它的一大优点。

今后，为满足多种需要，将会不断地开发出具有智能控制功能的各种高性能设备，这就必然需要有适应不同使用环境与使用目的的传感器。光纤传感器是能适应这些智能设备要求的一种传感器。因此，对光纤传感器的研究开发可望更加深入广泛。

目前，实用化的光纤传感器为数尚少，然而，研究中的传感器却为数甚多，象传感温度、压力、振动、音响、射

线、电、磁、电磁波、光等许多物理量的光纤传感器都在开发研究。本书拟对这些光纤传感器的现状及原理作一介绍，以供今后开发利用光纤传感器时参考。

本书是电子学丛书之一，是根据Iレワトロニクス杂志1981年11月号至1983年5月号连载的《光ファイバニザ：活用の手引》修订而成的。

愿本书能为读者所喜爱。

根本俊雄

1983年6月

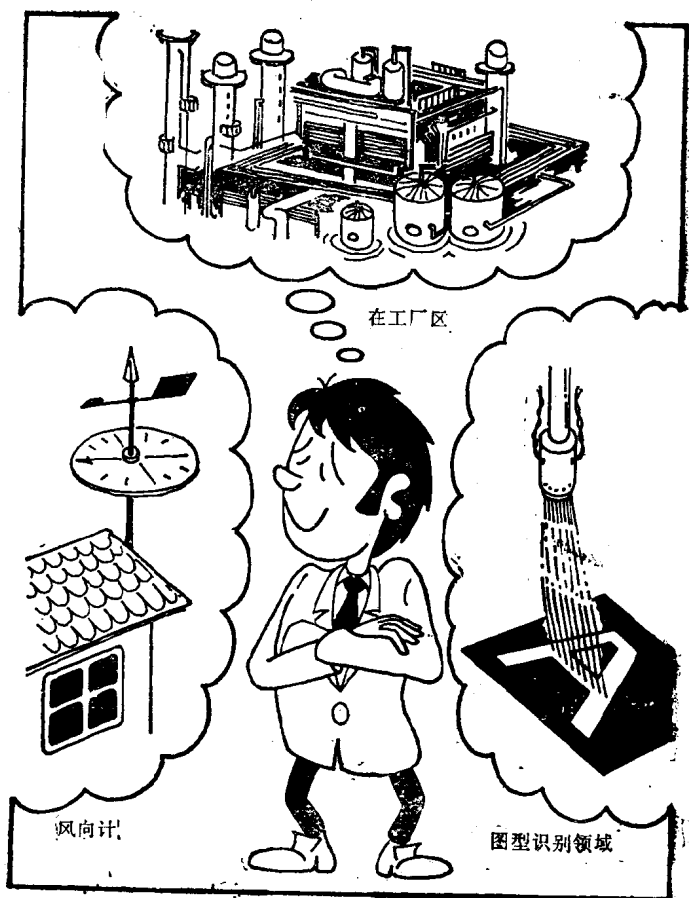
目 录

第一章 光纤传感器基础	(1)
第一节 传感器与光纤	(2)
第二节 光纤基础	(5)
一、 光纤的导波原理	(6)
二、 数值孔径 NA 与归一化频率 V	(10)
三、 各种光纤	(11)
四、 光纤的特性	(13)
第三节 光纤传感器的结构	(17)
一、 传感光纤型	(17)
二、 传输光纤型	(20)
三、 鉴别电路	(22)
第二章 光纤传感器原理入门	(24)
第一节 光纤温度传感器	(25)
一、 传感光纤型光纤温度传感器	(25)
二、 传输光纤型光纤温度传感器	(27)
第二节 光纤压力、振动传感器	(34)
一、 传感光纤型光纤压力、振动传感器	(35)
二、 传输光纤型光纤压力、振动传感器	(37)
第三节 光纤位移传感器	(42)
一、 天线型光纤位移传感器	(43)
二、 传感光纤型光纤位移传感器	(48)

第四节	光纤角度速传感器	(51)
一、	什么是陀螺仪	(51)
二、	激光陀螺	(53)
三、	光纤陀螺	(56)
第五节	光纤应变、弯曲传感器	(60)
一、	光纤的应变、变形与传输特性的变化	(61)
二、	光纤应变传感器实例	(64)
三、	其他形式	(66)
第六节	光纤速度、流速传感器	(68)
一、	光纤速度传感器种类	(69)
二、	多普勒效应与速度传感器	(70)
三、	多普勒型光纤速度传感器	(72)
第七节	光纤加速度传感器	(76)
一、	加速度传感器原理	(77)
二、	利用相位变化的加速度传感器	(78)
三、	利用振幅变化的加速度传感器	(83)
第八节	光纤音响传感器	(85)
一、	利用相位变化的光纤音响传感器	(86)
二、	利用传输损耗变化的音响传感器	(90)
第九节	光纤磁场传感器	(93)
一、	利用法拉第效应的传感器	(94)
二、	利用磁致伸缩效应的传感器	(99)
第十节	光纤电压、电流传感器	(103)
一、	电压传感器	(105)
二、	电流传感器	(108)

第十一节 光纤电磁场传感器	(111)
一、微波传感器	(114)
二、光波电磁场传感器	(119)
第十二节 光纤光谱传感器	(123)
一、微量气体的检测	(124)
二、生物体内测量的应用	(127)
第十三节 光纤放射线传感器	(131)
一、光纤放射线传感器原理	(132)
二、吸光型传感器实例	(135)

第一章 光纤传感器基础



第一节 传感器与光纤

人走路时用眼睛观察路面状态，用大脑进行判断，从而控制步伐。这样做，就可安全地行走。也就是说，在人们的有效行动中，对于对象的认识与判断是缺一不可的。这跟控制与测量的关系一样，要进行有效的自动控制，必须从对象中抽取信息，并以此信息为基础，得出正确的判断。微型计算机的发展，不仅促使测量技术得到高度的发展，而且可靠性高的自动控制设备也正在加速发展与普及。对于这种测量与控制系统来说，最重要的部分是从对象获取信息并输入系统的入口——传感器。今后，对于测量与控制系统的要求越来越高。为此，研制所需的传感器就成了重要的课题。

传感器是把被测对象的状态转换成可供处理的信号的元件或装置。通常对传感器有如下要求：

（一）优越的转换功能

1. 工作范围宽；
2. 具有单纯的转换关系（线性关系）；
3. 检测信号的信噪比好；
4. 重复性好；
5. 长时间变化小。

（二）检测信号的质量好

1. 信号处理容易；
2. 信号传输容易。

（三）与被测对象的匹配性好

1. 不易扰乱对象的状态；

- 2.能经受对象所处环境的考验；
- 3.检测信号不易受对象所处环境的干扰。

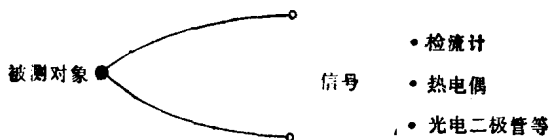
(四) 其他

- 1.体积小、重量轻；
- 2.价廉；
- 3.故障少；
- 4.特性偏差小。

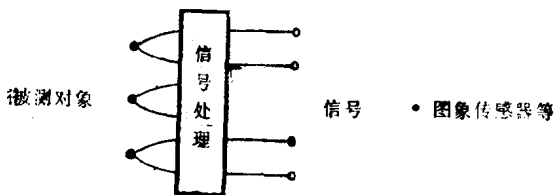
完全满足上述条件的传感器非常少，但一般说，将对象的状态作为电信号来检测的电子传感器能较好地满足条件（一）和（二），因此，目前如果谈及传感器，多半是指电子传感器。而且，一提到传感器，马上就会想到如图1（a）所示，将对象的状态转换成直接信号的热电偶那样的元件。的确，这是传感器的基本形式，在传感器中占很大的比重，但是必须注意，传感器还有许多适合不同检测对象与目的的其他形式。如采用CCD（电荷耦合器件）的图象传感器；如图1（b）那样的把几个基本传感器与CPU（中央处理机）组合在一起，用CPU处理各基本传感器送来的信号，以检测被测对象状态的复合传感器等。其中电波望远镜用的传感器应称为传感器系统，它象图1（c）那样，具有由许多天线阵列与滤波器组成的信号预处理部分，用来检测自预处理部分来的电磁波信号的基本传感器部分和信号处理部分。传感器形式如此之多，说明了人们有发挥这样一种设计思想的本领，那就是当基本传感器不能达到目的时，就采用与其他许多技术相结合的办法来构成合乎要求的传感器。

不言而喻，光纤是光波传输损耗较低的一种传输线。采用光纤的传感器之所以引人注目，不仅因为光纤本身能成为

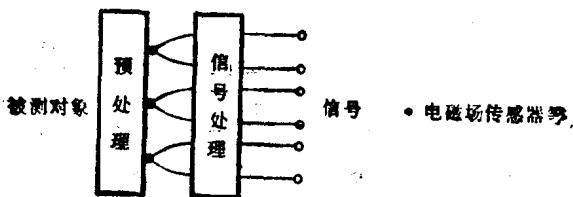
基本传感器,而且还有以下优点:传输检测信号是传感器的一个重要功能,与通常的金属传输线相比,由于光纤传输检测信号不易受外界的影响,所以可靠性高;光纤是介质材料做成的细丝,因而对被测对象的扰乱小,将许多光纤组合在一起也很方便;它不是以电子技术而是以光学技术为基础的,因此,不但能构成纯电子技术不能实现的传感器,还能结合光、电技术各自的特长,构成新的传感器,扩大传感器的应用范围。



(a) 基本传感器



(b) 复合传感器, 智能传感器



(c) 传感器系统

图1 传感器的形式

第二节 光纤基础

要开发光纤传感器，首先必须对光纤本身的基本知识有所了解。光纤是用石英、玻璃、塑料等光透射率高的电介质制作的极细纤维，在近红外线至可见光领域里传输损耗非常小，是极为理想的传输线路。从本质上说，光纤是微波技术等领域也在采用的电介质表面波线路的一种。

1960年，由于激光器的发明，正式对光波导进行了研究，但是，象光纤这样的把大部分光能集中在电介质中的线路，尚未予以考虑。理由之一是，当时玻璃的 $\tan \delta$ 为 10^{-8} 左右，由此产生的介质损耗就有500分贝/公里，而且当时认为减小这种损耗是很困难的。理由之二是，即使能做到低损耗，由于当时的光纤是利用空气与玻璃界面反复产生的全反射来进行传输的，因而色散过大，信号很快失真，因而这种光纤被认为是不能用来传输信息的。

后来，光纤的研究取得一系列进展，才把光纤的目标确定为作光传输线使用。这一系列进展是：发明了旨在减少色散的阶跃折射率型与梯度折射率型等结构形式的光波导，前者在传光用的中心部分（纤芯）之外复盖一层折射率比它稍低的介质（包层），后者的折射率分布从中心开始按平方规律减小；高·霍克曼（Kao·Hockman）等人详细研究了玻璃损耗机理，发现了除去杂质即可降低损耗的奥秘，康宁公司实际制作了损耗为20分贝/公里的光纤。

1970年以来，光纤的发展非常迅速。已能够研制出损耗为0.2分贝/公里的光纤。即使传输15公里，光能也只损耗一半，这已接近理论极限。

而且，从光纤使用技术的观点看，可以说能与光纤很好配合使用的器件大量存在，如光接收器件有光电二极管（PD）、雪崩光电二极管（APD），发光器件有发光二极管（LED）、激光二极管（LD）等。也就是说，可把单纯形式的光纤与高度发展的电子技术结合在一起，从而获得更高的功能而在各方面应用。

一、光纤的导波原理

图2为目前使用的两种光纤的波导结构。因为光也是电磁波，所以光在这些光纤中的传输可用麦克斯韦的波动方程来分析；而在光纤的断面尺寸比光的波长大得多时，则可用射线的概念来处理。

图2(a)是阶跃型光纤的光波传输情况。光在这种光纤中的传输过程可理解为光在光纤界面的反复全反射过程。射线光学的基本关系式就是有关光的反射和折射的斯涅耳（Shnell）定理，参见图3。即：

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

或

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

其中， n_1 、 n_2 分别为媒质I与II的折射率。设介电常数分别为 ϵ_1 与 ϵ_2 ，则 $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ ， $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$ 。

在 $n_1 > n_2$ 时，改变光纤的入射角，就会出现 $\theta_2 = 0$ 的情况。这时的角 θ_1 称作临界角用 θ_c 来表示，临界角 θ_c 可根据(1)式求得：

$$\theta_c = \cos^{-1}[n_2/n_1]$$

入射角小于这一角度的光线都在界面上产生全反射，并沿光纤轴向传播。

最初用于窥视镜的光纤是单根裸露的玻璃纤维，媒质 I 为空气，媒质 II 为玻璃。如果取 $n_1 = 1$ ， $n_2 = 1.5$ ，则由(3)式算得这种光纤的临界角为 48 度。

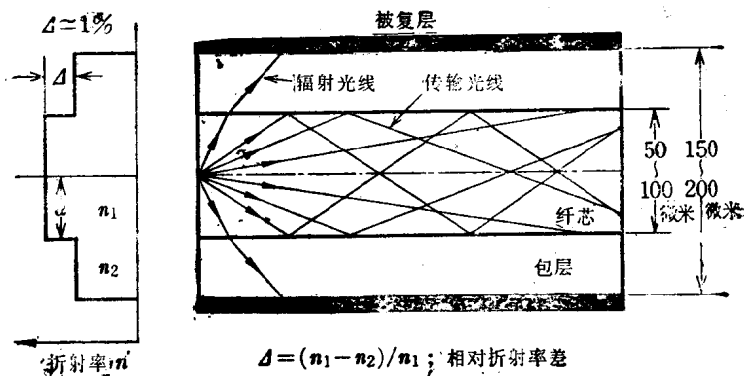
可是，从图 2(a) 可看出，若光线的入射角越大，则反射的次数越多，所以沿光纤轴向的视在光速就慢。临界角大，以各种角度入射的许多光线都能传输，即使入射光的波形是入口处要求的波形，出射光的波形也会大大失真，这是因为出射光是传输路径不同的各种光线的合成光的缘故。也就是说 θ_c 大的光纤，色散也大。因此，开发了具有图 2(a)、(b) 所示结构的低色散光纤。

为减小临界角 θ_c ，将光纤传光用的纤芯部分用折射率比它低 1% 左右的包层包住，参见图 2(a)。设相对折射率差 ($\Delta = n_1^2 - n_2^2 / 2n_1 \approx n_1 - n_2 / n_1$) 为 0.01，则临界角 θ_c 降为 8 度左右。

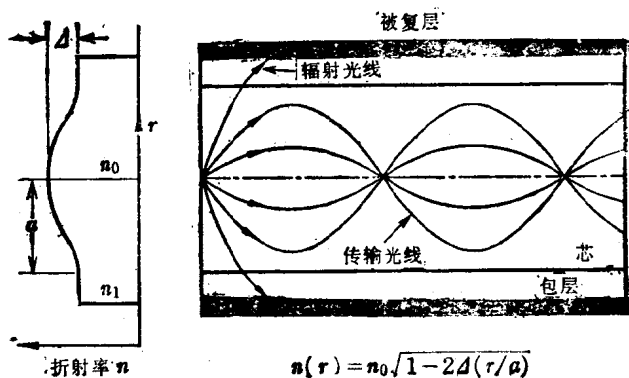
至于图 2(b) 中所示的光纤，其结构则是折射率从中心开始按平方规律减小。以某一角度入射的光线，在外侧每行进一步就向内侧折射一点，形成沿中心轴弯曲行进的传输方式。由于折射率越小的地方，光的速度越快，所以以各种角度入射的光线都能获得与轴向速度相等的传播速度，也就是说，这种光纤的色散较小。

传输许多光线的光纤，一般称作多模光纤，这是由于每条光线在光纤内的电磁场分布（形态）不同的缘故。用波动

理论分析时，这些光线为了满足光纤界面处的边界条件，就不能取连续值。因此，不同光线可根据模式形状来加以区



(a) 阶跃型光纤



(b) 梯度折射率 光纤

图 2 光纤结构