

中国矿业大学研究生教材

Xiandai Chuanganqi Jishu

现代传感器技术

童敏明 戴新联 编著

XIANDAI CHUANGANGQI JISHU
China University of Mining and Technology Press

3

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

TP212

143

2006

中国矿业大学研究生教材

现代传感器技术

童敏明 戴新联 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书较为详细地介绍了光纤、红外、激光、射线、超声波与微波、机器人、生物、半导体和固态图像等类型传感器的结构、工作原理、主要特性及应用,并简要介绍了这几种传感器的应用成果信息。

本书可作为相关专业研究生及高年级本科生的教材,亦可供相关科研、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感器技术/童敏明,戴新联编著. —徐州:
中国矿业大学出版社,2006.10
ISBN 7 - 81107 - 453 - 2
I. 现… II. ①童…②戴… III. 传感器 IV. TP212
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 042769 号

书 名 现代传感器技术

编 著 童敏明 戴新联

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 11.75 字数 220 千字

版次印次 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

传感器门类繁多,传感器技术涉及从敏感材料到基本物理与化学效应、制造技术、检测技术、数据处理等众多领域。根据电气与信息类工科研究生的培养目标,本书以固态传感器的基本原理、应用技术为主,在内容上有所取舍,突出重点。

在本书编写过程中,张徵、陆生华、李娇、王紫等研究生帮助整理了相关材料,在此表示感谢。

本书可作为电子科学类、电气信息类、自动化控制类、仪器仪表类等学科研究生的学习用书,也可供相关领域的工程技术人员参考。

作 者

2005 年 12 月

目 录

绪论.....	1
第一章 光纤传感器.....	3
第一节 光纤传光原理.....	3
第二节 光纤传光特性.....	6
第三节 光纤传感器的类型	11
应用成果信息	23
问题与思考	26
第二章 红外传感器	27
第一节 红外辐射的基本知识	27
第二节 红外辐射的基本定律	28
第三节 红外探测器	29
第四节 红外传感器的应用举例	35
应用成果信息	38
问题与思考	39
第三章 激光传感器	40
第一节 激光的特点和激光的频率	40
第二节 激光干涉传感器	42
第三节 激光衍射传感器	47
应用成果信息	53
问题与思考	56
第四章 射线传感器	57
第一节 核辐射的物理基础	57
第二节 射线传感器	59
第三节 核辐射检测的应用	62
第四节 放射性辐射的防护	63
应用成果信息	64

问题与思考	66
第五章 超声波与微波传感器	67
第一节 超声波传感器	67
第二节 微波传感器	73
应用成果信息	77
问题与思考	79
第六章 机器人传感器	80
第一节 概述	80
第二节 触觉传感器	81
第三节 接近觉传感器	94
第四节 视觉传感器	97
第五节 听觉、嗅觉、味觉及其他传感器	100
应用成果信息	101
问题与思考	103
第七章 生物传感器	104
第一节 生物传感器的原理、特点与分类	104
第二节 生物反应基本知识	107
第三节 生物活性材料固定化技术	112
第四节 酶传感器	114
第五节 微生物传感器	116
第六节 免疫传感器	119
第七节 生物组织传感器	121
第八节 半导体生物传感器	122
第九节 生物传感器的应用与未来	124
应用成果信息	125
问题与思考	127
第八章 半导体传感器	128
第一节 气敏传感器	128
第二节 湿敏传感器	134
第三节 磁敏传感器	139
第四节 色敏传感器	142
第五节 离子敏传感器	144
应用成果信息	147

问题与思考.....	148
第九章 固态图像传感器.....	149
第一节 固态图像传感器的敏感器件.....	151
第二节 固态图像传感器.....	157
第三节 固态图像传感器的主要特性.....	166
第四节 固态图像传感器的应用.....	172
应用成果信息.....	176
问题与思考.....	178
参考文献.....	179

绪 论

传感器是能感受规定的被测量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。

传感器的定义包含了以下几方面的含义：

- (1) 传感器是一种器件或测量装置,能够完成检测任务;
- (2) 传感器的被测量可能是物理量、化学量或生物量等;
- (3) 传感器的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理和显示等,这种量可以是气、光、磁、电量,也可以是电阻、电容或电感的变化量等;
- (4) 传感器的输出量与被测量有一定的对应关系。

当今世界是以信息技术为特征的新技术革命时代,传感器技术是现代信息技术的重要支柱。一个国家、一项工程设计中传感器应用的数量和水平直接标志着其技术先进的程度。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态,并使产品达到最好的质量。因此可以说,没有众多优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

在基础学科研究中,传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展,进入了许多新领域:在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙,微观上要观察小到微米的粒子世界;纵向上要观察长达数十万年的天体演化,短到微秒的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然,要获取大量人类感官无法直接获取的信息,没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度传感器的出现,往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空到浩瀚的海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的。世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平。

第一章 光纤传感器

光纤传感器是一种利用光纤技术和光学原理,将被测量转换成可用输出信号的器件或装置。图 1-1 所示为光纤传感器的原理结构图。以光纤为载体,将光源发射的光送到测量单元,被测量调制测量单元中的光信号,再由光纤送到光检测器,转换成相应的电信号,通过信号处理单元处理,输出可用信号。

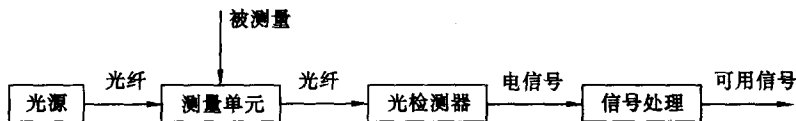


图 1-1 光纤传感器基本结构框图

光纤传感器是一门新兴的应用发展技术,受到世界各国科研、军事、工业等部门的高度重视,得到迅速发展。光纤传感器应用广泛,可用于测量液位、位移、温度、电流、电场、磁场、转速、加速度、振动、压力等各种物理参数。光纤传感器因为它的低成本、高灵敏度、小体积、耐腐蚀、抗电磁干扰等众多优点,发展前景非常广阔。

第一节 光纤传光原理

光从一种媒质射到两种媒质分界面上时,会同时发生反射和折射。折射光的强弱和反射光的强弱之间有一定的联系。当入射角逐渐增大时,反射光的能量越来越强,折射光的能量越来越弱。当光线从光疏媒质进入光密媒质时,入射角 θ_1 大于折射角 θ_2 ,如图 1-2(a)所示;当光从光密媒质进入光疏媒质时,入射角 θ_1 小于折射角 θ_2 ,如图 1-2(b)所示;当入射角增大到一定程度时,折射角达到 90° ,如图 1-2(c)所示,此时折射光线的能量减小到零,入射光线的能量全部反射,此现象称之为全反射。全反射的入射角称为 θ_c 。不同物质之间的临界角都是不同的,根据斯乃尔法则,临界角 θ_c 与媒质折射率的关系有

$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{则} \quad \theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$$

由上式可知,发生全反射的条件为:

- (1) 光由光密媒质射向光疏媒质;
- (2) 入射角要等于或大于临界角。

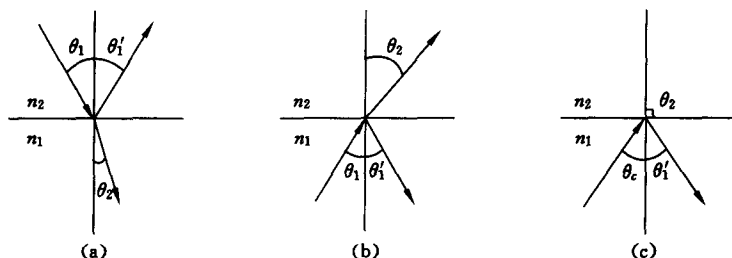


图 1-2 各种折射、反射的情况

n_1 ——光密媒质的折射率; n_2 ——光疏媒质的折射率;
 θ_1' ——反射角; θ_1 ——入射角; θ_2 ——折射角; θ_c ——临界角

光导纤维传输光信号是基于光的全反射。光导纤维是一种极细的玻璃纤维,图 1-3 所示为光纤的基本结构,光纤是由内外两层折射率不同的玻璃拉成的。折射率大的玻璃圆柱体构成了内芯,叫纤芯;折射率比纤芯小的玻璃圆筒构成了外面的一层,叫包层;最外面一层是护套,起到保护作用。当光以一定入射角射入纤芯时,它会在两层玻璃界面上发生全反射,使射入纤芯的光线能从光纤的一端传到另一端。按照折射率分类光纤有两种类型,一种为阶跃折射率光纤,另一种是渐变折射率光纤。光纤的基本结构如图 1-4 所示。两种光纤的区别在于:阶跃折射率光纤的纤芯折射率不会随着纤芯半径的变化而变化,是一常数 n_1 ;渐变折射率光纤的纤芯折射率随半径增大而减小,在纤芯和包层的界面处 $n_1 = n_2$ 。

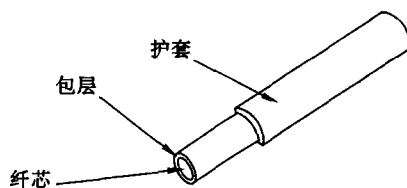


图 1-3 光纤的基本结构

图 1-5 所示为一根圆柱形光纤,其端面是一平面。光线以与圆柱纤维的轴线成 θ 角的方向从空气中射入光纤端面,根据斯乃尔法则,它在纤芯内发生折射现象,其折射角为 θ_2 ,然后射至纤芯与包层界面,入射角为 θ_1 。当 θ_1 大于临界角

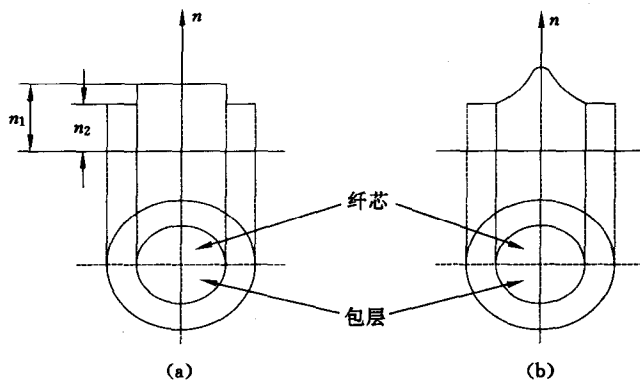


图 1-4 折射率分布

(a) 阶跃折射率光纤; (b) 渐变折射率光纤

θ_c 时,入射的光线会在界面上发生全反射现象,并在光纤中以同样角度反复反射,不断向前传播到圆柱的另一端面并发射出去,这就是光纤的传光原理。图中虚线表示入射角 θ' 过大的光线入射的情况,它不能够满足全反射条件,所以,光

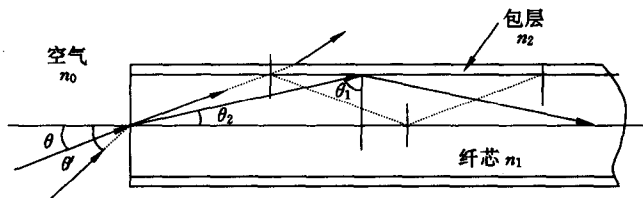


图 1-5 光在光纤中的传播

大多会从通过纤芯和包层的界面逸出,少部分光在光纤中经过多次反射后,也基本上会耗尽,没有光的射出。同理,入射角过小的光线也不能通过光纤进行传输。只有在一定角度范围内的光线,才可以从圆柱的一端传输到另一端。通过计算,可以算出最大允许的入射角度。设空气、纤芯、包层的折射率分别为 n_0 、 n_1 和 n_2 ,根据斯乃尔法则,有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_2 \quad (1-2)$$

因为空气的折射率 $n_0 = 1$,所以

$$\sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_2 \quad (1-3)$$

若要满足全反射的要求,必须满足

$$\theta_1 \geq \theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1-4)$$

能够满足上式要求的 θ_1 的最小值为 θ_c , 所以

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-5)$$

因为 $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_2$, 所以 $\cos \theta_2 = \frac{n_2}{n_1}$ 。

根据 $\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 = 1$, 得 $\sin^2 \theta_2 = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$

$$\sin \theta_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

由上式及式(1-3)可得 $\sin \theta_0 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ (1-6)

当 $\theta_1 = \theta_0$ 时, $\sin \theta_0$ 称为数值孔径, 用符号 NA 来表示, 有

$$NA = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-7)$$

NA 作为光纤传光的一个重要参数, 反映了光纤对入射光的接收能力。如表 1-1 所示, 对纯二氧化硅包层材料的阶跃型光纤, 它对 $0.83 \mu\text{m}$ 的折射率为 1.458, 当纤芯折射率为 1.461, 数值孔径为 0.10, 临界接收锥顶角 $2\theta_0$ 为 11.5° ; 当纤芯折射率增加到 1.472 且包层折射率保持不变时, 数值孔径增加到 0.20, 而临界接收锥顶角增加到 23° 。因此, 只有将纤芯折射率控制在千分之一左右才能获得所希望的 NA 值。

表 1-1 数值孔径与纤芯折射率的关系[二氧化硅包层 $n_2 = 1.458(0.85 \mu\text{m})$]

n_1	NA	$2\theta_0 / (^\circ)$
1.461	0.10	11.5
1.464	0.14	16.1
1.469	0.18	21.0
1.472	0.20	23.0

第二节 光纤传光特性

一、光纤的传输损耗

(一) 传输损耗的表示方法

光信号在光纤中传输时, 由于客观条件的限制, 不可能实现理想传输, 均存在一定的传输损耗。损耗值越大, 光能量在传输的过程中的消耗就越大, 传输信

号衰减也越大。所以,评价光纤传光优劣的重要指标之一就是传输损耗,用衰减率 ϵ 来表示,有

$$\epsilon = -\log \frac{I_2}{I_1} \quad (1-8)$$

式中 I_1 ——射入光的强度;

I_2 ——出射光的强度。

(二) 产生传输损耗的原因

只有在衰减率很小的情况下,光纤通讯才能实现。目前光纤的最小损耗在 $0.2 \sim 1.0$ dB/km 范围,传光长度超过 50 km,如果需要更长的信号传输,可以增加中继装置。光传输损耗的主要原因有三种。

1. 材料吸收

光纤材料中包含铜、铁、镁等金属杂质离子,它们会吸收光能量,并以热能形式辐射出去,因此需要改造光纤的制造技术,生产出高纯度的光纤。目前这个问题已经被解决,基本可以克服材料的吸收损耗了。其原理是在制造光纤的过程中掺入 OH^- 离子,于是会在 $1.38 \mu\text{m}$ 波长上产生一个吸收损耗的峰值,如图 1-6 所示。可以通过控制 OH^- 离子的含量来减小光纤材料的吸收损耗。

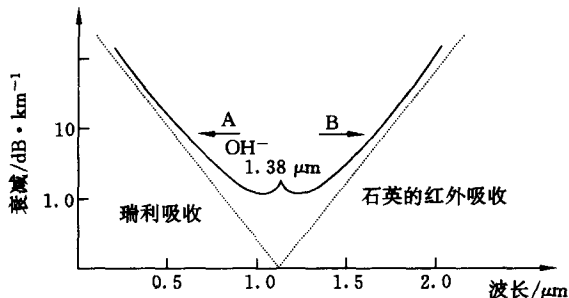


图 1-6 高质量光纤的衰减与波长的典型关系曲线

2. 散射损耗

散射损耗是由于光的传输媒质中某种不均匀物质引起光的散射现象造成的。在 1987 年,瑞利首次对光的散射现象作了理论研究,得出了著名的瑞利定律

$$I \propto f^4 = \frac{C^4}{\lambda^4} \quad (1-9)$$

即散射光的强度 I 和光波频率 f 的四次方成正比。

瑞利证明光在媒质中的散射是因为微观密度的波动导致折射率的不均匀性

而引起的。对于玻璃,当它从液态变成固态时,随着玻璃固化密度的不均匀被固定在玻璃中,由此而造成的不均匀折射率导致了光的传输散射,这种情况属于静态密度波动,称为瑞利散射。除此之外还有动态波动,它是由热声波产生的,由于玻璃的温度高于绝对零度,所以会产生和传播这种密度波动,此散射叫做布里渊散射。实际散射损耗主要是瑞利散射。

对于高质量的光纤,其损耗特性表现在:在较长的波长上,表现为十分接近纤芯材料本身在远红外区存在的固有吸收极限;在短波长上,很接近由瑞利散射所造成的极限。高质量光纤的衰减与波长的典型关系曲线如图 1-6 所示。大多数光纤在 $1.38\ \mu\text{m}$ 上表现出净的 OH^- 吸收峰值。

3. 弯曲损耗

恒定半径弯曲损耗机理的光线图如图 1-7 所示。如果有一根光线在光纤直的部分向右传播,在光纤直的界面上的人射角 θ 大于临界入射角 θ_c ,符合全反射条件。在光纤的弯曲部分,光线的人射角 θ 有可能小于 θ_c ,一部分的人射光线由于折射入包层而损耗。在光纤弯曲部分的外侧面,每次的光线反射都会有部分能量被损失掉,所以产生光纤弯曲损耗。光纤弯曲半径和数值孔径(NA)决定了损耗的大小。在微压、微位移等物理量的测量中采用的光纤传感器常利用光纤弯曲损耗特性。

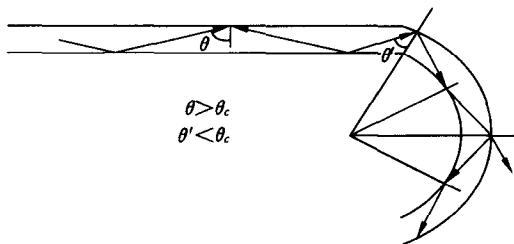


图 1-7 恒定半径弯曲光纤功率损耗

二、光纤的传输频带特性

在利用光纤进行信号传输时,人们总是希望光束上的信息能够不失真地传输出去,但事实上光纤传输信号的能力受到脉冲展宽的影响。当以光脉冲形式输入到光纤中的光信号经过光纤的传送后,如果脉冲变得很宽,那么脉冲之间将会发生重叠现象,以至于无法分辨信号,导致“误码”产生。色散是造成脉冲展宽的主要原因。光纤中色散可分为以下三类:

(一) 模式色散

如图 1-8 所示,进入阶跃折射率多模光纤的光脉冲,在不同的模式中分配其

能量,每个模式都有它特定的传输速度或是传输速度范围,所以它们到达光纤输出端的时间可能不同,它们的速度和所走路径长度决定了这个到达时间。由此产生的脉冲被展宽的现象就称之为模式色散。实际上,阶跃多模光纤中脉冲展宽的主要根源就是模式色散。

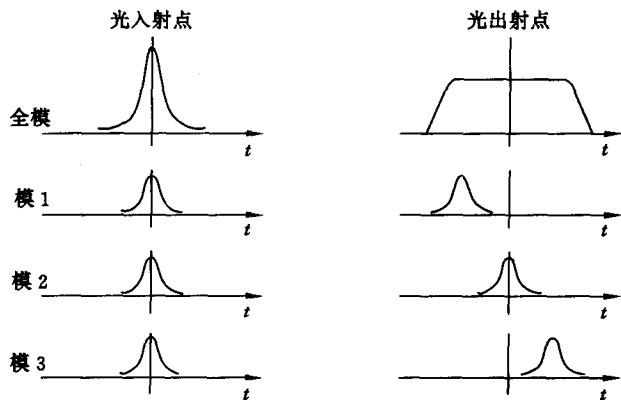


图 1-8 模式色散导致脉冲展宽

对于阶跃型多模光纤,模式色散随相对折射率差成比例增加,相对折射率差 $\Delta = n_1 - n_2$ 。单模光纤由于只有基模通过光纤,所以不产生模式色散。存在于多模光纤中的模式可能有很多种,但是模式色散可以通过改良纤芯折射率在断面的分布而被减小。在渐变折射率多模光纤中的模式色散相对就很小,虽然各个模式的传播速度和所行路程不同,但它们的传播时间可以基本相同,几乎可以同时到达光纤输出端,这样就可以避免或者减少模式色散。

(二) 材料色散

在介质材料中传输的光波,其传播速度与波长有关。材料色散指的是光源发出的光脉冲为不同波长构成的光,不是单纯的单色光(单一波长的光),不同波长的光将以不同速度传播,从而导致脉冲展宽,如图 1-9 所示。

经过试验我们发现,在长波长的光入射石英玻璃材料时,色散较小。当波长大约为 $1.3 \mu\text{m}$ 时,入射石英玻璃材料的色散为零。所以,利用长波长的光进行传输对减小色散是有效的。

(三) 波导色散

波导色散与光纤的几何结构有关。因为波导的横截面尺寸决定光的传输模式,所以波导的横截面尺寸要求较严格,对于一定的波导尺寸,色散会因为实际尺寸与要求尺寸的偏差以及长度方向上尺寸的不均匀而增加,并且光谱的变宽

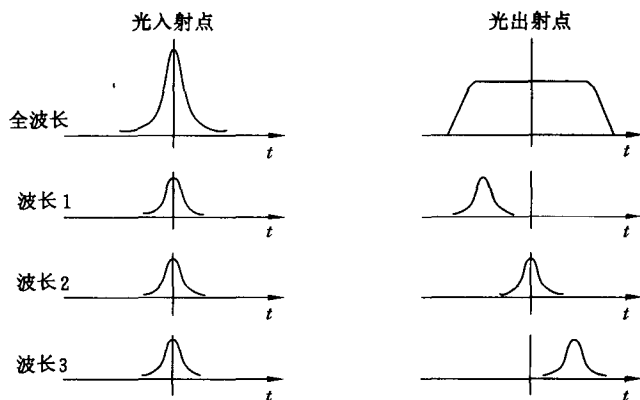


图 1-9 材料色散导致脉冲展宽

会导致色散增大。

在单模光纤中,波导色散会产生一定的影响。在波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 时,材料色散为零时,波导色散更为明显。当工作在波长 $0.85\ \mu\text{m}$ 时,与材料色散相比,波导色散就可以忽略不计了。

模式色散是多模光纤中影响光信号正常传输的主要因素。对于单模光纤,不存在模式色散。单模光纤具有很多优点,如失真小、光脉冲频率高、能量集中、通信容量大、传输的模式单纯等。因此单模光纤常被应用于高速度、远距离、大容量的光纤通信中。但是它也有不足之处,因为它的芯径小,制造工艺要求高,所以目前多模光纤应用较多。

三、光纤强度

影响光纤传感器的储存寿命和工作寿命的主要原因是所用玻璃光纤的机械强度。在一定的条件下,玻璃纤维甚至可以比钢线更结实。图 1-10 所示为二氧化硅(SiO_2)光纤和钢线的应力-应变关系曲线。试验所用的钢线,在约 $1.5 \times 10^8\ \text{N/m}$ 的应力和 0.5% 量级的应变时,它将趋于断裂。而未擦伤的光纤在承受大约 $5 \times 10^9\ \text{N/m}$ 的应力时仍能够保持弹性。不过钢线具有延展性,而且它可能修补和软化表面上的小裂纹,但是玻璃的特性是硬而脆的,所以一个细小的裂纹都可以成为应力集中的中心,并且可以把力作用到整个光纤横截面上,从而导致光纤的断裂。因此实际的光纤强度远低于上述理论值。

随着光纤制造工艺的不断改进,光纤的强度也将不断提高,从而延长光纤的使用寿命。