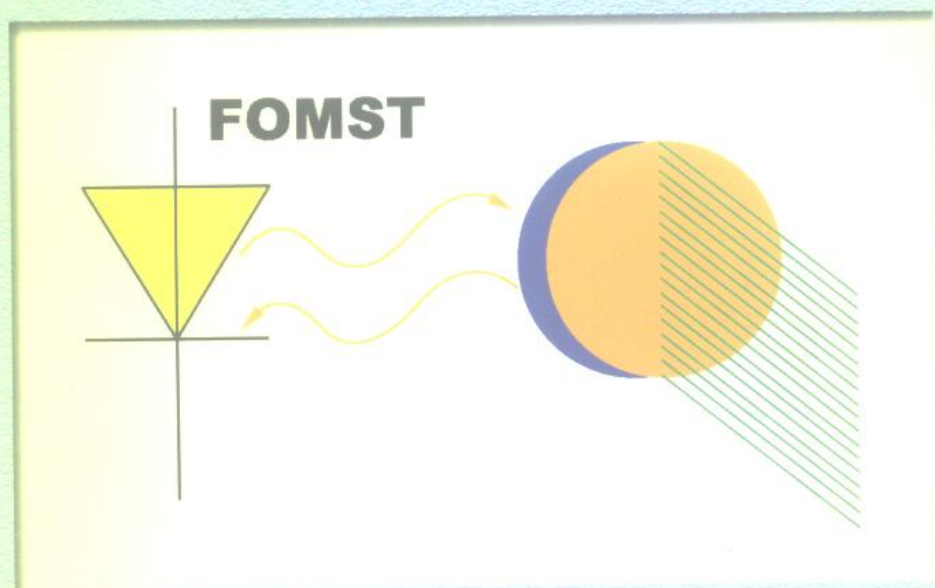


光纤测量 与 传感技术

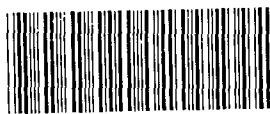
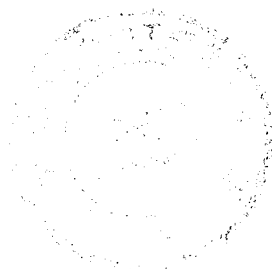
孙圣和 王廷云 徐影 编著



● 哈尔滨工业大学出版社

光纤测量与传感技术

孙圣和 王廷云 徐颖 编著



00462511

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 简 介

本书系统地讨论了光纤测量和光纤传感的基本原理、方法、实现及应用。本书选材合理,基本概念清楚,叙述深入浅出,理论密切结合实际,内容新颖。主要内容包括光纤的基本原理,光纤系统转换器和元件连接,光纤衰减和色散测量,光纤传感器基本原理,光纤传感器应用——机械量传感器、热工量传感器、电磁量传感器、医用传感器和监测大气污染传感器。本书以光纤测量与传感的原理、方法和应用为主线,力求有一定的先进性和实用性,从而开阅读者的眼界,并对光纤测量与传感有一个全面、深入的了解。

本书可作为高等院校测量技术及仪器、通信工程、电子科学与技术专业的本科生和研究生的教材,也可供有关科研人员、工程技术人员及教师参考。

光纤测量与传感技术

Guangxian Celiang Yu Chuangan Jishu

孙圣和 王廷云 徐颖 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

哈尔滨工业大学出版社电脑排版中心排版

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 字数 395 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

印数 1 ~ 3000

ISBN 7-5603-1444-9/TN·51 定价 20.00 元

前 言

光纤技术是正在迅猛发展中的一门新兴技术。光纤是光波导的一种,具有损耗低、频带宽、线径细、重量轻、可挠性好、抗电磁干扰、耐化学腐蚀、原料丰富、制造过程能耗少、节约大量有色金属等突出优点,从而引起了人们的高度重视。光纤的发展与应用是相辅相成的。随着光纤制造工艺的不断完善、发展,随着光纤质量、性能的不不断提高,光纤的应用由最初的传像、医疗诊断到通信网络,从长距离光纤通信到光纤传感,遍布了医疗、运输、通信、服务、军事、娱乐、能源、教育等各种领域,为今天信息世界的发展提供了一个有效的媒介。光纤的各种特性直接影响着光纤的各种应用,反过来,光纤的各种应用又对光纤特性的改进提出了许多新要求、新课题。因此,本书将介绍光纤的特性测量和光纤在测量中的应用两部分内容。希望它能为今后从事这方面课题研究与应用的人员起到一个抛砖引玉的作用。

本书共分十章。第一章简要地讨论了光纤波导的基本原理;第二章系统地分析了光纤系统的电光转换器件——光源,光电转换器件——光电探测器,光纤连接和光纤耦合的原理与实现;第三、四章详细地分析了光纤衰减和色散测量的原理和方法;第五章从光纤调制角度阐述了光纤传感器的基本原理;第六至第十章系统详细地分析了光纤传感器在机械量、热工量、电磁量、医用及监测大气污染方面的应用,给出了它们的结构、特性和技术指标。

本书是结合作者多年的教学和科研经验,在查阅大量的国内外参考资料的基础上编著而成的。它的理论性和系统性强,以光纤为主线,从光纤波导的原理、特性及测量到光纤传感的原理及应用,由浅入深,阐述简洁明了,并以大量图表进行说明、讲解,使本书更显得概念清晰,内容丰富、语言简洁易懂。本书选材合理、内容新颖,抓住了光纤技术快速发展的脉搏,在光纤的特性分析、光纤系统转换器、光纤的连接和耦合、光纤的测量方法、光纤的传感原理和光纤传感器应用方面都反映了所独有的先进性。特别是在实用性方面,本书理论联系实际,在光纤测量原理的基础上给出了光纤测量方法;在光纤传感原理的基础上,给出了光纤传感器的应用领域和实例。本书中用光时域反射计测量光纤衰减,相位压缩原理在光纤传感技术中的应用,光纤电磁量传感器,医用光纤传感器,监测大气污染光纤传感器等方面的内容均是作者的研究成果及最新国内外资料,这也是本书的独到之处。

参加本书编写的人员还有:王超龙、庄荣新、张义刚、赵玉连、张忠亭、牛夏牧、孙雅杰。由于光纤测量与传感技术尚在不断发展中,有些理论还在进一步完善,有些应用还在探索或试验,加上作者的实验和水平有限,难免有不当之处,尚祈读者批评指正。

孙圣和
1999.12

目 录

第一章 光纤的基本原理	
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 光纤波导的原理	(2)
§ 1.3 光纤的分类	(3)
§ 1.4 光纤的特性	(5)
§ 1.5 光纤的衰减机理	(8)
1.5.1 衰减的概念	(8)
1.5.2 吸收损耗	(9)
1.5.3 散射损耗	(11)
1.5.4 微扰损耗	(12)
§ 1.6 光纤的色散机理	(13)
1.6.1 色散的概念	(13)
1.6.2 色散的机理	(14)
1.6.3 单模光纤与多模光纤的色散	(17)
1.6.4 光纤色散与带宽的关系	(18)
第二章 光纤系统转换器和元件连接	
§ 2.1 引言	(19)
§ 2.2 电光转换器——光源	(20)
2.2.1 光源的特性	(20)
2.2.2 典型光源	(20)
§ 2.3 光电转换器——光探测器	(30)
2.3.1 光探测器的特性参数	(30)
2.3.2 光探测器的原理	(33)
2.3.3 半导体光电探测器	(34)
2.3.4 光电倍增管	(37)
§ 2.4 光纤连接器和固定接头	(40)
2.4.1 光纤连接损耗	(40)
2.4.2 光纤活动连接器	(43)
2.4.3 光纤固定接头	(44)
§ 2.5 光纤定向耦合器	(45)
2.5.1 耦合器的分类	(45)
2.5.2 耦合器的基本工作原理	(46)
2.5.3 耦合器的性能参数及制备方法	(49)
第三章 光纤衰减测量	
§ 3.1 引言	(51)

§ 3.2	衰减测量的光激励	(52)
§ 3.3	剪断法	(56)
3.3.1	剪断法原理	(56)
3.3.2	衰减谱测量	(57)
3.3.3	误差分析	(58)
§ 3.4	插入损耗法	(60)
§ 3.5	背向散射法	(62)
3.5.1	背向散射法工作原理	(62)
3.5.2	注入条件	(64)
3.5.3	测量信号的接收	(66)
3.5.4	信号处理过程	(66)
3.5.5	信噪化、响应分辨率及动态范围	(67)
3.5.6	测量准确度的改进方法——两点法	(68)
3.5.7	结论	(69)
§ 3.6	光时域反射计(OTDR)	(69)
3.6.1	HP8145A 型 OTDR 的工作特性	(70)
3.6.2	HP8145A 型 OTDR 的工作原理	(71)
3.6.3	改进方案	(73)
§ 3.7	光频域反射计(OFDR)	(74)
第四章 光纤色散测量		
§ 4.1	引言	(77)
§ 4.2	时域法	(78)
4.2.1	模内色散测量	(79)
4.2.2	模间色散测量	(81)
4.2.3	误差分析	(85)
4.2.4	利用锁定放大器改善信噪比	(88)
4.2.5	利用拾波法减小总误差	(88)
§ 4.3	频域法	(89)
4.3.1	模内色散测量	(89)
4.3.2	模间色散测量	(92)
4.3.3	误差分析	(94)
§ 4.4	时域法和频域法的比较	(96)
第五章 光纤传感器基本原理		
§ 5.1	引言	(97)
§ 5.2	强度调制机理	(98)
5.2.1	反射式强度调制	(98)
5.2.2	透射式强度调制	(100)
5.2.3	光模式强度调制	(101)

5.2.4	折射率强度调制	(103)
5.2.5	光吸收系数强度调制	(105)
§ 5.3	相位调制机理	(106)
5.3.1	相位调制	(106)
5.3.2	光纤干涉仪	(110)
5.3.4	相位压缩原理及微分干涉仪	(114)
§ 5.4	频率调制机理	(117)
5.4.1	光纤多普勒技术	(118)
5.4.2	光纤多普勒系统的局限性	(120)
§ 5.5	波长调制机理	(121)
5.5.1	光纤 pH 探测技术	(121)
5.5.2	光纤荧光探测技术	(122)
5.5.3	光纤黑体探测技术	(123)
5.5.4	光纤法布里 - 珀罗滤光技术	(124)
§ 5.6	偏振调制机理	(125)
5.6.1	普克耳效应	(125)
5.6.2	克尔效应	(127)
5.6.3	法拉第效应	(128)
5.6.4	光弹效应	(129)
§ 5.7	对光纤与光电器件的要求	(131)
第六章 光纤机械量传感器		
§ 6.1	引言	(132)
§ 6.2	光纤位移传感器	(134)
6.2.1	外调制式位移传感器	(134)
6.2.2	内调制式位移传感器	(136)
6.2.3	相位干涉式位移传感器	(138)
§ 6.3	光纤压力和水声传感器	(139)
6.3.1	全内反射光纤压力传感器	(139)
6.3.2	微弯曲光纤水声传感器	(141)
6.3.3	动态压力传感器	(141)
6.3.4	偏振调制光纤压力和水声传感器	(142)
§ 6.4	光纤应变传感器	(143)
§ 6.5	光纤表面粗糙度传感器	(146)
§ 6.6	光纤加速度传感器	(149)
6.6.1	振动加速度传感器原理	(149)
6.6.2	相位调制光纤加速度传感器	(150)
§ 6.7	光纤振动传感器	(152)
6.7.1	相位调制光纤振动传感器	(152)

6.7.2	双波长光纤振动传感器	(156)
6.7.3	多普勒效应光纤振动传感器	(157)
第七章 光纤热工量传感器		
§ 7.1	引言	(158)
§ 7.2	辐射型光纤温度传感器	(161)
7.2.1	有关光纤的特性	(161)
7.2.2	测温探头	(163)
7.2.3	光纤辐射温度计的组成	(163)
7.2.4	光纤高温传感器	(164)
7.2.5	光纤扫描温度计	(165)
7.2.6	荧光辐射型光纤温度计	(167)
§ 7.3	传光型光纤温度传感器	(168)
7.3.1	半导体光纤温度传感器	(168)
7.3.2	荧光衰变式光纤温度传感器	(169)
7.3.3	热色效应光纤温度传感器	(170)
§ 7.4	传感型光纤温度传感器	(172)
7.4.1	折射率调制光纤温度传感器	(172)
7.4.2	相位调制光纤温度传感器	(175)
§ 7.5	传光型光纤流量传感器	(177)
7.5.1	相关型光纤流量传感器	(177)
7.5.2	光纤涡轮流量计	(179)
7.5.3	光纤膜片式流速计	(180)
§ 7.6	传感型光纤流量传感器	(181)
第八章 光纤电磁量传感器		
§ 8.1	引言	(184)
§ 8.2	光纤磁场传感器	(185)
8.2.1	光纤法拉第磁强计	(185)
8.2.2	磁致伸缩效应光纤磁场传感器	(188)
§ 8.3	光纤电场传感器	(191)
8.3.1	电致光吸收光纤电场传感原理	(192)
8.3.2	压电弹光光纤电场传感器	(193)
8.3.3	BSO 晶体光纤电场传感器	(195)
§ 8.4	光纤电流传感器	(196)
8.4.1	金属被覆光纤电流传感器	(196)
8.4.2	磁致伸缩效应光纤电流传感器	(198)
8.4.3	法拉第效应光纤电流传感器	(198)
8.4.4	压电弹光效应光纤电流传感器	(200)
第九章 医用光纤传感器		

§ 9.1	引言	(201)
§ 9.2	医用光纤温度传感器	(202)
9.2.1	强度调制型光纤温度传感器	(202)
9.2.2	波长调制型光纤温度传感器	(205)
9.2.3	时域型光纤温度传感器	(209)
§ 9.3	癌症超热治疗中的光纤温度计	(209)
9.3.1	光纤温度计设计简介	(209)
9.3.2	光纤温度计的系统设计	(211)
9.3.3	系统的主要技术性能	(216)
§ 9.4	光纤体压计	(217)
9.4.1	薄膜型光纤体压计	(218)
9.4.2	光弹效应光纤体压计	(222)
§ 9.5	光纤血流计	(226)
9.5.1	动脉光纤血流计	(227)
9.5.2	皮肤光纤血流计	(230)
9.5.3	双波长光光纤血流计	(237)
§ 9.6	光纤血气分析传感器	(240)
9.6.1	光纤 pH 值传感器	(240)
9.6.2	光纤 pO ₂ 传感器	(243)
9.6.3	光纤血气监测传感器	(247)
第十章 监测大气污染光纤传感器		
§ 10.1	引言	(253)
§ 10.2	光纤二氧化氮(NO ₂)传感器	(254)
10.2.1	弹光型光纤 NO ₂ 传感器	(254)
10.2.2	差分吸收式光纤 NO ₂ 传感器	(256)
§ 10.3	光纤氨气(NH ₃)传感器	(257)
10.3.1	荧光光纤 NH ₃ 传感器	(258)
10.3.2	比色分析光纤 NH ₃ 传感器	(258)
10.3.3	pH 试剂光纤 NH ₃ 传感器	(260)
§ 10.4	光纤二氧化碳(CO ₂)传感器	(265)
§ 10.5	光纤瓦斯传感器	(268)
参考文献		(272)

第一章 光纤的基本原理

§ 1.1 引言

要测量光纤的特性,开发光纤的应用,必须对光纤波导的原理及其重要的光学特性有基本的了解。本章首先介绍光纤波导的基本原理及其分类,然后讨论光纤的各种特性,重点讨论传输特性(即光学特性),包括衰减和色散,最后介绍光纤元件(接头、连接器等)的特点及在系统中应用时的要求。

§ 1.2 光纤波导的原理

光纤是传光的纤维波导或光导纤维的简称。通常,它是由高纯度的石英玻璃为主掺少量杂质锗(Ge)、硼(B)、磷(P)等的材料制成的细长的圆柱形,细如发丝(通常直径为几微米到几百微米)。实用的结构有两个同轴区,内区称为纤芯,外区称为包层。通常,在包层外面还有一层起支撑保护作用的套层。

因为光是电磁波,所以光在光纤中的传输可用麦克斯韦波动方程来分析。当光纤的断面尺寸比光波长大得多时,可用射线的概念来处理。

射线光学的基本关系式是有关其反射和折射的非涅耳(Fresnel)定律。

首先,我们来看光在分层介质中的传播,如图 1-1 所示。图中介质 1 的折射率为 n_1 , 介质 2 的折射率为 n_2 。当光束以较小的 θ_1 角入射到介质界面上时,部分光进入介质 2 并产生折射,部分光被反射。它们之间的相对强度取决于两种介质的折射率。介质的折射率定义为光在空气中的速度与光在介质中的速度之比。

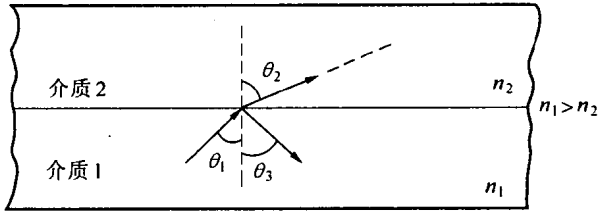


图 1-1 当光线从较高折射率介质向较低折射率介质传播时,在界面处的折射和反射

由非涅耳定律可知

$$\theta_3 = \theta_1 \quad (1-1)$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-2)$$

在 $n_1 > n_2$ 时,逐渐增大 θ_1 , 进入介质 2 的折射光束进一步趋向界面,直到 θ_2 趋于

90°。此时,进入介质2的光强显著减小并趋于零,而反射光强接近入射光强。当 $\theta_2 = 90^\circ$ 极限值时,相应的 θ_1 角定义为临界角 θ_c 。由于 $\sin 90^\circ = 1$,所以临界角

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1-3)$$

当 $\theta_1 \geq \theta_c$ 时,入射光线将产生全反射。应当注意,只有当光从折射率大的介质进入折射率小的介质,即 $n_1 > n_2$ 时,在界面上才能产生全反射。

全反射现象是光纤传输的基础。现在,我们来看一根具体的光纤,如图1-2所示。纤芯折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 , n_0 为空气折射率。为分析方便,我们讨论光线为子午

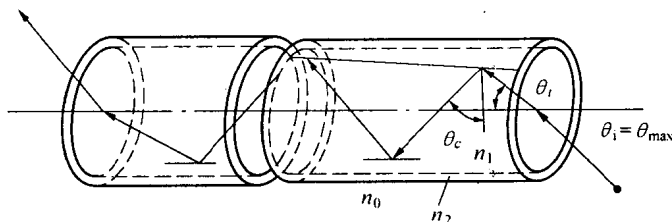


图1-2 具有包层的纤维

光线的情况。子午光线是指在子午平面上传播的光线。子午平面是与纤轴相交且与纤壁垂直的所有平面。在光纤内传播的子午光线,简称内光线,遇到纤芯与包层的分界面的入射角大于 θ_c 时,才能保证光线在纤芯内产生多次全反射,使光线沿光纤传输。然而,内光线的入射角大小又取决于从空气中入射的光束进入纤芯所产生的折射角 θ_i ,因此,空气和纤芯界面上入射光的入射角 θ_i 就限定了光能否在光纤中以全反射形式传输。

与内光线入射角的临界角 θ_c 相对应,光纤入射光的入射角 θ_i 有一个最大值 θ_{max} 。当 $\theta_i \leq \theta_{max}$ 时,入射光在光纤内将以大于或等于 θ_c 的入射角在纤芯和包层界面上产生多次的全反射。当光线以 $\theta_i > \theta_{max}$ 入射到端面上时,内光线将以小于 θ_c 的入射角投射到纤芯和包层界面上。这样的光线,由于每次射到界面上只是部分反射,故很快就会漏出光纤。因此, θ_{max} 确定了光纤的接收锥半角。下面讨论 θ_{max} 的确定。

由菲涅耳定律,对于内光线,有

$$\sin \theta_c = n_2/n_1 = \sin(90^\circ - \theta_i) \quad (1-4)$$

即

$$n_2/n_1 = \cos \theta_i$$

或

$$n_2/n_1 = (1 - \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}$$

对空气和纤芯界面,有

$$\frac{\sin \theta_{max}}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_0} \quad (1-5)$$

整理得到

$$\sin \theta_{max} = \frac{1}{n_0} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

$n_0 \sin \theta_{max}$ 定义为光纤的数值孔径。它的平方是光纤端面集光能力的量度。在空气中

$n_0 = 1$, 因此, 对于一根光纤, 我们有数值孔径

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

NA 是表示光纤波导特性的重要参数, 它反映光纤与光源或探测器等元件耦合时的耦合效率。应注意, 光纤的数值孔径仅决定于光纤的折射率, 而与光纤的几何尺寸无关。

在光纤中传输的光线除上面讨论的子午光线外, 还有斜光线。斜光线是指从光纤端面任意方向入射且不在同一平面内传播的光线。斜光线也有其全反射条件, 满足条件的斜光线才能在光纤中传输, 两者的重要区别是, 子午光线是平面曲线(呈锯齿形), 斜光线是空间曲线(有时呈螺旋形)。

§ 1.3 光纤的分类

光纤是一种光波导, 因而光波在其中传播也存在模式问题。模式是指传输线横截面和纵截面的电磁场结构图形, 即电磁波的分布情况。一般说来, 不同的模式有不同的场结构, 且每一种传输线都有一个与其对应的基模或主模。基模是截止波长最长的模式。除基模外, 截止波长较短的其它模式称为高次模。根据光纤能传输的模式数目, 可将其分为单模光纤和多模光纤。

单模光纤只能传输一种模式, 但这种模式可以按两种相互正交的偏振状态出现。多模光纤能传输多种模式, 甚至几百到几千个模式。

归一化频率 V 是一个与光波频率和光纤结构参数有关的参量, 通常用它表示光纤所传导的模式数。其定义式如下

$$V = ka \cdot NA = ka \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = n_1 ka (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (1-8)$$

式中, k 是平面波在自由空间中的传播常数或波数, 定义为 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是传导光在自由空间的波长; a 是光纤的半径; NA 是光纤的数值孔径; n_1 是纤芯折射率的最大值; n_2 是包层折射率; Δ 为最大相对折射率差, 即

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1-9)$$

光纤能传导的模式数 N 可用下式计算

$$N = \left[\frac{\alpha}{2(\alpha + 2)} \right] V^2 = (n_1 ka)^2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \quad (1-10)$$

式中, α 是光纤断面折射率分布指数, 它决定光纤折射率沿径向分布的规律。

单模光纤和多模光纤, 由于它们能传输的模式数不同, 故它们的传输特性有很大区别。主要区别是在衰减和色散(或带宽)上多模光纤更复杂一些。

根据纤芯径向的折射率分布不同, 光纤又可分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤。通常, 单模光纤多半是阶跃折射率分布, 多模光纤既有阶跃的也有渐变折射率分布。图 1-3(a) 是典型的阶跃折射率多模光纤, 其特点是纤芯的折射率固定不变。由图可见, 由于不同模式在纤芯中传播的群速度不同, 因而各个模式到达光纤输出端面的群延时不同, 结果使传输的光脉冲展宽, 这种现象称为模式色散。

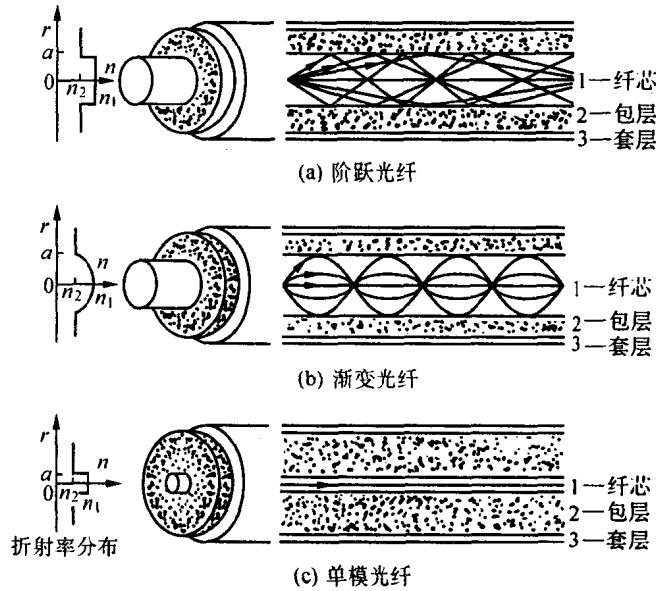


图 1-3 光纤的结构

图 1-3(b)是渐变折射率多模光纤,其特点是纤芯折射率沿径向逐渐减小。由图可见,由于不同模式的群速度相同,故这种光纤可以显著地减小模式色散。折射率沿径向的分布一般可表示为

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{\frac{1}{2}}, & 0 \leq r \leq a \\ n_1(1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2, & r > a \end{cases} \quad (1-11)$$

式中, r 是径向坐标; α 是折射率分布指数, $\alpha = 2$ 和 $\alpha = \infty$ 分别为抛物线分布和阶跃分布。

如果 $\alpha = 2$, 这种光纤就能使点光源发射的光线周期性地聚焦。对于传输来说, 这种光纤的主要优点是模式色散小。如果仅考虑轴向模(子午光线), 几乎所有模的群速度都相同。但是, 如果同时考虑斜向模(斜光线)的话, 只有在 α 非常接近于 2 时, 才能使模式色散减小到令人满意的程度。若渐变折射率光纤的 Δ 等于阶跃折射率光纤的 Δ , 则抛物线分布的渐变折射率光纤能传播的模数仅为阶跃折射率光纤的一半。显然, 在多模光纤中传输的模式越少, 最终其输出端的脉冲展宽也越小, 即模式色散越小。

由式(1-8)可知, 减小芯径或减小纤芯和包层间的相对折射率之差都可减小光纤的归一化频率。随着归一化频率的减小, 传播的模数也逐渐变少。当 $V_c = 2.405(1 + \frac{2}{\alpha})^{\frac{1}{2}}$ 时, 最后一个高次模截止, 光纤只能传播主模 HE_{11} 。这种光纤称为单模光纤。一般, 单模光纤均是纤芯光学尺寸极小(直径仅几微米)的阶跃光纤。因此, 有时也称这种光纤为单孔型光纤, 如图 1-3(c)所示。

实际设计与使用的光纤, 其性能也各不相同。单模光纤频带极宽, 而渐变折射率光纤的信息容量较大, 且处理简便。当需要从光源处收集尽可能多的光能时, 则使用粗芯阶跃折射率多模光纤比较合适。因此, 通常在短距离、低数据率通信系统中使用多模阶跃光纤; 在长距离、高数据率通信系统中使用单模光纤或渐变折射率多模光纤。在光纤传感应

用中,光强度调制型或传光型光纤传感器绝大多数采用多模(阶跃或渐变折射率)光纤。相位调制型和偏振态调制型光纤传感器采用单模光纤,例如,满足特殊要求的保偏光纤、低双折射光纤、高双折射光纤等。

§ 1.4 光纤的特性

光纤的特性主要包括传输特性(或称光学特性)、物理特性、化学特性和几何特性等。

一、传输特性

光纤的衰减(或损耗)和色散(或带宽)是描述光纤传输特性的两个重要参量。衰减是描述光纤使光能在传输过程中沿着波导逐渐减小或消失的特性。在给定信号和工作条件,即给定发射机输出功率和检测器灵敏度时,光纤的衰减决定信号无失真传输通路的最大距离。色散限制了光纤传输频响的上限。色散引起的脉冲展宽限制了脉冲调制或数据传输系统中给定长度光纤的最高脉冲或数据传输速度。

二、物理特性

光纤的物理特性包括机械性能、热性能和电绝缘性能等。

(一) 机械性能

1. 弯曲性

光纤遵循虎克定律。在弹性范围内,光纤受到外力发生弯曲时,芯轴内部分受到压缩作用,芯轴外部分受到拉伸作用。外力消失后,由于弹性作用,光纤能自动恢复原状。但是,当弯曲半径小于所容许的曲率半径时,光纤将会被折断。

光纤的弯曲性与光纤的机械强度有关。机械强度取决于材料的纯度、分子结构状态及缺陷等。因而,严格的制作工艺是提高机械强度的主要保证。

如果光纤的包层采用低膨胀系数的材料,那么,由于挤压的效果也能增加光纤的机械强度。但是,这样将增加内应力,使光纤双折射加大。

光纤弯曲时所受的应力可用下式表示

$$\sigma = aE/R \quad (1-12)$$

式中, σ 为应力; E 为杨氏模量; R 为弯曲的曲率半径; a 为纤芯半径。

2. 抗拉强度

光纤的抗拉强度 F 由如下经验公式计算

$$F = \frac{1\,572 \times (111.8 + 2a)}{1\,525 + 2a} \quad (1-13)$$

式中, a 为纤芯半径,单位为 μm ; F 的单位为 kg/cm^2 。

3. 硬度

石英玻璃的硬度通常用克氏硬度来表示。克氏硬度的测试方法是用金刚石四方锤在研磨过的试件表面上压出印痕,根据加压力与四方印痕的对角线长度可得到试件材料的克氏硬度值 H_k ,即

$$H_k = 14.23p/L^2 \quad (1-14)$$

式中, p 为加压值; L 为印痕的对角线长度。

金刚石的克氏硬度在 5 500 ~ 6 950 之间, 玻璃的克氏硬度一般在 350 ~ 650 之间。

(二) 热性能

1. 耐热性

随着光纤波导介质材料的不同, 其熔化温度也不同。一般光纤在 500℃ 以下的温度环境中使用没有问题, 而纯石英光纤的耐热温度可高达 1 000℃。

在低温环境下使用, 通常取决于包层材料在低温下的可挠性。在一般条件下, 光纤使用的温度可低至 -40℃, 具体还要看包层材料的低温性能。

光纤耐热性能的好坏直接影响光纤温度传感的品质。同时, 对于光纤的其它传感应用也影响很大。

2. 热膨胀系数

光纤的热膨胀系数是一个重要的物理参数, 尤其在光纤传感应用中, 它关系到光纤对被测物理量的敏感性能的好坏。根据被测参数的不同, 对光纤热膨胀系数的要求不同。例如, 测量温度时, 要求光纤有较高的热膨胀系数, 以取得良好的灵敏度。而在测量压力及其它物理量时, 则要求光纤具有尽可能好的热稳定性, 即有最小的热膨胀系数。这是传感用光纤与其它应用光纤的最大不同之处。

对于玻璃材料, 测量热膨胀系数常用压杆式示差热膨胀测量法测量。

(三) 电绝缘性能

作为传感应用的光纤, 在许多场合要求有良好的电绝缘性能。例如, 在测量高压输电线路电流强度的法拉第传感器中, 光纤必须有良好的电绝缘性。SiO₂ 石英玻璃等介质都是优良的电绝缘材料。石英玻璃的电阻率为 $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 一般玻璃材料的电阻率在 $1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。因此, 石英光纤能承受几十千伏至几十万伏的高压, 特别适合于在高强电磁场区应用。

三、化学特性

一般玻璃的化学性质比较稳定。石英玻璃光纤的化学性能与玻璃基本相同。

1. 耐水性

光纤有时需要浸泡在水中工作, 因而要求有良好的耐水性。对于玻璃材料光纤, 由于其表面积较大, 容易吸潮, 纤维受到侵蚀, 造成透光性和机械强度下降。光纤表面的老化情况与包层材料有关。因此, 如果需要提高耐水性, 则可用硅防水剂加以处理。

2. 耐酸性

玻璃的抗酸能力和抗碱能力都较差, 几乎所有的玻璃在氟酸中都会溶解。

四、几何特性

光纤的几何特性是指其结构的几何形状和尺寸。它直接影响着光纤的光学传输特性。光纤几何形状的标准化对得到最小的耦合损耗是非常重要的。标准规定光纤为圆对称结构, 因此表征光纤几何特性的参数是纤芯直径、包层直径、纤芯不圆度、包层不圆度和纤芯与包层的同心度误差。此外, 光纤横断面的折射率分布和最大理论数值孔径也是决定光纤光学特性的两个重要参数。

以上简述了光纤的基本特性。如何利用光纤这些特有的性能,不同领域从不同角度出发有不同的要求。即是同一领域,具体使用的条件不同,要求也是不同的。在光纤的诸多应用中,开发较早且应用已很广泛的领域还是在通信方面。光纤通信在世界各国普遍受到重视,许多国家已经进入广泛实用阶段。为了统一标准,国际电报电话咨询委员会(CCITT)设立了专业工作组进行研究并确定对光纤的一般技术要求,提出了关于多模光纤的 G.651 和关于单模光纤的 G.652 建议。同时,国际电工委员会(IEC)也进行了专门的研究,制定并公布了与 CCITT 建议相同的 IEC 标准。现将 1984 年 CCITT 和 IEC 规定的光纤一般技术要求列于表 1-1 和表 1-2 中。这些要求是对通信使用的石英系列光纤提出的,当前已成为光纤通信的国际标准。对于光纤应用的其它领域可供参考。

表 1-1(a) 多模光纤类型

类别	材料	型式	α 值范围
A ₁	玻璃纤芯/玻璃包层	渐变型	$1 \leq \alpha < 3$
A _{2.1}	玻璃纤芯/玻璃包层	准阶跃型	$3 \leq \alpha < 10$
A _{2.2}	玻璃纤芯/玻璃包层	阶跃型	$10 \leq \alpha < \infty$
A ₃	玻璃纤芯/塑料包层	阶跃型	$10 \leq \alpha < \infty$
A ₄	塑料光纤		

表 1-1(b) 单模光纤类型

类别	材料	型式	折射率分布
B _{1.1}	1 300nm 附近零色散 $\lambda_c < 1 300\text{nm}$	1 300nm 最佳	近似阶跃
B _{1.2}	1 300nm 附近零色散 $1 300\text{nm} \leq \lambda_c < 1 550\text{nm}$	1 550nm 最佳	近似阶跃
B _{2.1}	波长色散控制	零色散在 1 550nm 附近	各种折射率分布
B _{2.2}		宽波长范围低色散	各种折射率分布
B ₃	偏振保持光纤		

表 1-2 光纤的特性要求

参数	A ₁	B _{1.1}
纤芯直径(μm)	$50 \pm 6\%$	
模场直径(μm)		$(9 \sim 10)^* \pm 10\%$
包层直径(μm)	$125 \pm 2.4\%$	$125 \pm 2.4\%$
纤芯不圆度	$< 6\%$	
模场不圆度		$< 6\%$
包层不圆度	$< 2\%$	
纤芯/包层同心度误差	$< 6\%$	
模场/包层同心度误差		**
最大理论数值孔径	$(0.18 \sim 0.22) \pm 0.02$	
LP ₁₁ 模截止波长(nm)		1 100 ~ 1 280***

衰减系数(dB/km)	850 nm	3.0 ~ 4.0	< 1.0
	1 300 nm	0.8 ~ 3.0	
	1 550 nm		
带宽(MHz·km)	850nm	3.0 ~ 4.0	
	1 300nm	200 ~ 1 000	
	1 300nm	200 ~ 1 200	
总色散系数(ps/km·nm)	850nm****	≤ 120	3.5
	1 300 nm*****	≤ 6	
	1 550 nm		

* 9 μm 用于凹陷包层设计; 10 μm 用于匹配包层设计。

** 取决于接续技术,应在 0.5 ~ 3.0 μm 以内。当采用包层表面对准的方法接续时必须要有严格的要求(例如 0.5 μm),采用耦合功率校准方法接续时可以放宽要求(例如 3 μm)。

*** 是用短光纤(2m)用基准测试法测量规定的范围。

**** 850 nm 系指 820 ~ 910 nm 范围。

***** 1 300 nm 系指 1 285 ~ 1 330 nm 范围。

光纤的最重要特性是光学传输特性,其它特性的影响,最终也都反映在光学传输特性上。因而,下面将重点探讨光纤的光学传输特性——衰减和色散的物理机理。

§ 1.5 光纤的衰减机理

1.5.1 衰减的概念

衰减描述光能在传输过程中逐渐减小或消失的现象。

光纤的发展和应用过程一直是围绕着降低损耗来进行的。从最初的 100 dB/km(1966 年)降到 1970 年的 20 dB/km,再到 0.47 dB/km(1976 年)以至于 0.2 dB/km(1980 年)。即使降得再低,由于光纤的衰减受光纤材料固有因素和制造工艺的影响,损耗是绝对不会消除的。

按引起光纤损耗的因素不同,其损耗主要有三种:①吸收损耗;②散射损耗;③微扰损耗。

由各种损耗引起的功率衰减通常定义为

$$A(\lambda) = 10\lg(P_i/P_0) \quad (\text{dB}) \quad (1-15)$$

式中, P_i 为输入功率; P_0 为输出功率。衰减的单位为分贝,用 dB 表示。

对于一根均匀的光纤可定义单位长度的衰减为衰减系数 $\alpha(\lambda)$,即

$$\alpha(\lambda) = A(\lambda)/L = \frac{1}{L} 10\lg(P_i/P_0) \quad (\text{dB/km}) \quad (1-16)$$

式中, L 为光纤长度。

衰减和衰减系数都是与波长有关的量,而衰减与长度有关,衰减系数与长度无关。

大多数传输线所传输的功率与其传输距离(z)之间的关系为

$$P(z) = P(0)e^{-2\beta z} \quad (1-17)$$

式中, $P(0)$ 为入射端 $z=0$ 处的输入功率; β 是电场幅度衰减系数。由于功率是电场幅度