

光纤与传感

赵志敏 王田虎 华晋 编

南京航空航天大学

2008年9月



第一章 光纤及光纤传感器的一般介绍	1
1.1 概述	1
1.2 传感器与光纤传感器	2
1.2.1 传感器概念	2
1.2.2 光纤传感器	3
1.3 光纤系统设计	5
1.3.1 光纤的分类及特性	5
1.3.2 光纤传感器的光源特性	10
1.4 光纤束及特种光纤	11
1.5 光纤传感技术及进展	19
1.5.1 光纤技术简史	19
1.5.1.1 光纤研究重大事件	19
1.5.1.2 光纤传感技术的发展	19
1.5.2 光纤传感技术现状	21
1.5.3 传感用光纤	23
第二章 普通光纤的光线理论	25
2.1 子午光线的传播	25
2.2 斜光线的传播	28
2.3 光纤的弯曲	32
2.4 端面倾斜效应	35
2.5 光纤的数值孔径	39
第三章 普通光纤（均匀介质光纤）波导的波动理论	41
3.1 涂层无限厚的普通光纤	41
3.2 弱传导光纤	50
3.3 普通光纤中的辐射模	52
3.4 普通光纤中漏模	54
第四章 梯度折射率（非均匀介质）光纤的光线理论	59
4.1 在梯度折射率（非均匀介质）光纤中的光线	59
4.2 梯度折射率光纤的光线分析	60
4.3 折射率非均匀介质光纤中各类光线的聚焦特性	65
4.4 数值孔径	69
第五章 光纤的损耗及色散	70
5.1 光纤损耗	70
5.2 光纤中的色散现象	76
第六章 光纤传感器的基本原理	82
6.1 光纤传感器建模	82
6.1.1 一般传感器建模分析	82
6.1.2 光纤传感器建模分析	83
6.1.2.1 光纤传感器的调制分析	84
6.1.2.1 光纤传感器的解调分析	84
6.2 强度性光纤传感器	85
6.2.1 几种重要的强度调制方式	86

6.2.1.1 位移调制型光纤传感器	86
6.2.1.2 光闸调制型光纤传感器	86
6.2.1.3 反射调制型光纤传感器	87
6.2.1.4 损耗调制型光纤传感器	89
6.2.1.5 其他强度型光纤传感器	89
6.2.2 微弯损耗与光纤微弯传感器	90
6.2.3 光纤压力传感器及其应用	91
6.2.3.1 光纤压力传感器的类型	91
6.2.3.2 强度调制光纤压力传感器	92
6.3 相位调制型光纤传感器	96
6.3.1 干涉测量原理	96
6.3.2 光纤迈克尔逊干涉仪	99
6.3.3 光纤马赫-泽德干涉仪	100
6.3.4 法布里-珀罗光纤干涉仪	102
6.4 偏振调制型光纤传感器	103
6.4.1 影响光波偏振状态的物理效应	103
6.4.2 磁致旋光效应及磁光传感器	105
6.4.3 基于光弹效应的光纤压力传感器	107
6.5 频率调制型光纤传感器	107
6.5.1 光学多普勒概念	107
6.5.2 光纤多普勒流速计	108
6.6 波长调制型光纤传感器	110
6.7 分布式光纤传感原理	111

第一章 光纤及光纤传感器的一般介绍

传感器在当代科技领域及实际应用中占有十分重要的地位,各种类型的传感器件早已广泛地应用于各个学科领域。光纤传感技术是伴随着光纤通信技术的发展而迅速发展起来的一门新兴的传感技术。光纤传感器是以光纤作为信息传输媒质,光作为信息载体的一种传感器。

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的,以光波为载体,光纤为媒质,感知和传输外界被测量信号的新型传感技术,它是纤维光学在非通信领域中的应用。光纤传感的基本原理是利用物理、化学和生物效应来调制光纤中光波的传输特性,经过信号解调后可以测量各种物理量、化学量和生物量的变化。作为被测量信号载体的光波和作为光波传播媒质的光纤,具有一系列独特的、其他载体和媒质难以相比的优点。光波不产生电磁干扰,也不怕电磁干扰,易为各种光探测器接收,可方便地进行光电或电光转换,易与高度发展的现代电子装置和计算机相匹配。光纤工作频带宽,动态范围大,适合于遥测遥控,是一种优良的低损耗传输线;在一定条件下,光纤特别容易接收被测量或场的加载,是一种优良的敏感元件;光纤本身不带电,体小质轻,易弯曲,抗电磁干扰、抗辐射性能好,特别适合于易燃、易爆、空间受严格限制及强电磁干扰等恶劣环境下使用。因此,光纤传感技术一问世就受到极大重视,在军事、科技、工业过程控制、医疗测量等各个领域广泛应用,具有十分广阔的发展前景。

1.1 概述

传感器是感知、获取、检测和转换信息的,处于研究对象与传输处理系统的接口位置,被比喻为电子计算机实现电脑智能化的“五官”。因此,传感器是实现信息化时代的主要技术基础。

传感器用于很多科技领域,而光纤传感器是用途较多的传感器。

光纤与激光及半导体探测器一样,是种新兴的光学技术,是 20 世纪后半期重大发现之一,它形成光电子学新的领域。

在 70 年代中期,人们开始意识到光纤本身可以构成一种新的直接交换信息的基础,不需任何中间级就可把待测的量和光纤内的导光联系起来。1977 年美国海军研究所(NRL)开始执行光纤传感器系统(Foss)计划以来,光纤传感器在世界上许多实验室使用。

随着光纤传感器的研制,国际间的学术交流活动日益增多。1983 年起,国际光纤传感器会议(International Conference on Optical Fiber Sensors)定期召开,国内在该领域研究也十分活跃,几乎 1~2 年就有一次全国会议召开,许多研究新成果在会上得以交流。

光纤传感器是以光学技术为基础,将被敏感的状态以光信号形式取出。光信号不仅能直接感知,而且利用半导体二极管、激光二极管之类的小型而简单的元件很容易进行光电、电光转换。所以易与高度发展的电子装置匹配,它是光纤传感器的突出优点。

光纤本身可作为敏感元件,而且也是一种优良的低损耗传输线,更适于电子传感器不太适用的地方。

目前,光纤传感器可用于测量温度、位移、振动等物理量,其研究方向正朝向多功能,如智能、控制功能等方向发展。

光纤技术主要应用领域:

- (1) 光的传递。用光纤传递光波的能量(用传光束)。
- (2) 视觉信息的传递。用相关传光束传递图像(用传象束)。

(3) 光纤通讯。用光纤作通讯介质来传输载波调制的光强信号。

(4) 光纤传感。光纤不仅作为光波的传播媒质，而且可以用来测量表征光波特征的参量（振幅、位相、偏振态、波长、模式等）在传播中随着外界因素的变化而变化。

(5) 光纤的非线性特性。在强输入光功率作用下，光纤会产生非线性效应，发生光增益（激光纤维），频率转换及其他作用（自相位调制、非线性吸收等）。

1.2 传感器与光纤传感器

1.2.1 传感器概念

传感技术是测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术、微电子学、光学、声学、精密机械、仿生学、材料科学等众多学科相互交叉的综合性高新技术和密集型前沿技术。现阶段，从宇宙探索、海洋开发，到国防建设、工农业生产；从环境保护、灾情预报，到包括生命科学在内的每一项现代科学研究；从生产过程的检测与控制，到人民群众的日常生活等等，几乎都离不开传感器和传感技术。事实证明，传感器和传感技术已经渗入了新技术革命的所有领域，涉及了国民经济的每个部门，进入了大众生活的各个方面。

传感器的概念我们并不陌生，人的眼睛就是一种传感器。人步行时，要用眼睛观察道路状况，由大脑做出判断并控制着步行的方向和行动，这样才能保证安全行走。在人类有目的指向的行为中，关于目标的识别和判断都是必不可少的。在工程技术中控制和测量的关系也是如此：要实现准确的自动控制，必须从工程对象那里得到信息，在其基础上做出准确的判断。无论是测量还是控制，其最重要的部分都是作为来自待测目标的信息入口的传感器。

所谓传感器，就是能将待测对象的状态变换成为可处理信号的器件或装置。一般来说，传感器要求具备以下条件：

(1) 有优良的转换功能。

工作范围宽，具有好的线性特性，检测信号的信噪比高，重复性好等特性优良。

(2) 检测信号的质量好。容易作信号处理，易传输信号。

(3) 与被测物匹配好。对被测物环境适应能力强，不破坏被测物体的状态，检测信号不受被测物环境的干扰。

一般而言，传感器测量信号通常可分为以下六类：

(1) 辐射信号：包括强度、波长、偏振态、电磁场相位或声辐射；

(2) 机械信号：包括应力、应变、压力、力矩、位移、速度、加速度、流量、质量；

(3) 热学信号：包括温度、空间或时间上的温差和热流量；

(4) 电场信号：包括电压、电流、电荷、电阻、电感、电容、脉冲持续时间、频率和介电常数；

(5) 磁场信号：包括磁通密度、磁场方向和磁导率；

(6) 化学信号：包括化学成分、毒性、氧化-还原能力、pH 值、 peo_2 值等；

(7) 生物信号：听觉、嗅觉、视觉、肌肉收缩、电脉冲等。

传感器的设计与研制，主要取决于感测信号的性质。在工程实际应用中，可根据不同的需求，结合上述几类不同信号的属性来设计和研制相应的传感器。

1.2.2 光纤传感器

光纤传感器是利用光纤将待测量对光纤内部传输的光学参量进行调制，并对被调制过的光波信号进行检测，从而获得待测量值的一种装置。光纤传感器与传统的各类传感器相比，具有独特的优点。光纤本身用作基本传感器，具有高灵敏度，抗电磁干扰，耐腐蚀、防爆及不干扰被测场等特点；光纤作为传感信号的传送系统，与传统的金属线路相比，具有抗电磁场和地球环流的干扰、可靠性高、安全及可长距离传送等优点；并且便于与计算机连接、与光纤传输组成遥感网络；加之光纤传感器结构简单、体积小、重量轻，因此，有着广泛的应用潜力。

一、光纤传感器概念

光纤传感是一种新兴的现代化传感技术。光纤传感器从本质上看是一种器件，在外界参量(如物理量、化学量、生物量、生物医学量等)的作用下，光纤中光波导的特性会发生某种变化，而将这些变化制作成相应的器件、装置或系统就称之为光纤传感器。

二、光纤传感器组成

光纤传感器由光源、入射光纤、出射光纤、光调制器、光探测器及解调器组成，其基本结构如下图。光源相当于一个信号源，负责信号的发射；光纤是传输介质，负责信号的传输；传感头感知外界信息，相当于调制器，而光的调制过程是光纤本身或通过透镜与光纤耦合的外部装置进行的；光探测器负责信号的转换，将光纤送来的光信号转换成电信号；信号处理电路的功能是还原外界信号，相当于解调器。

三、光纤传感器工作原理

基本原理是将光源的光经入射光纤送入调制区，光在调制区内与外界被测参数相互作用，使光的性质(如强度、波长、频率、相位、偏振态等)发生化学变化而成为被调制的信号光，再经出射光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数。其基本原理结构图如图1.1所示。

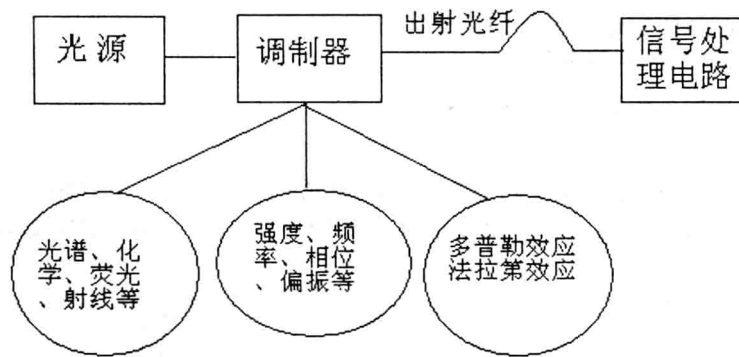


图1.1 光纤结构原理图

光纤传感器按传感原理可分为两类，一类是传光型(或称非功能型)传感器，另一类是传感型(或称功能型)传感器。在传光型光纤传感器中，光纤仅作为光的传输媒质，对被测信号的感觉是靠其它敏感元件来完成的，这种传感器中出射光纤和入射光纤是不连续的，两者之间的调制器是光谱变化的敏感元件或其它性质的敏感元件。在传感型光纤传感器中光纤兼有对被测信号的传输作用，将信号的“感”和“传”合而为一，因此这类传感器中光纤是连续的。结构原理如图1.2所示。

(1) 功能型:利用光纤本身的特性把光纤直接作为敏感元件，感知信息的同时又传输信息(称为全光纤传感器)；

(2) 非功能型:利用其它敏感元件感知待测量的变化，光纤仅仅作为光的传输介质，传

输光信号来自较远处或者难以接近的场所(称为传光型传感器或者混合型传感器)。

不论是功能型和非功能型,最终都是需要通过对光波参数的调制来实现待测信息的提取,具体的调制方法可以根据强度、相位、频率、偏振、颜色等实现。

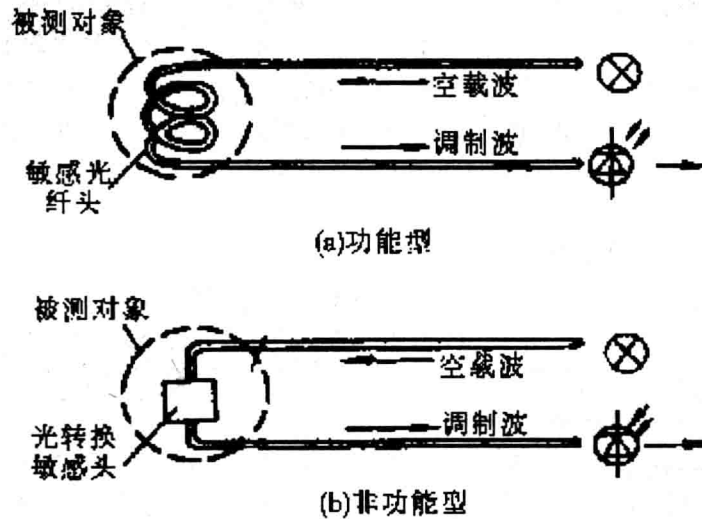


图 1.2 功能型和非功能型光纤传感器结构示意图

四、光纤传感器特点

光纤传感技术与纤维光学、光电子学、非线性光学、导波光学、光波技术、光谱学、薄膜光学以至电子学、机械工程学、化学、封装工艺学、测量学、计算机科学等多种学科密切相关,是遍及现代光学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。光纤传感技术具有以下显著特点:

(1) 高灵敏度:由于光是一种波长极短的电磁波,通过光的相位可得到光学长度。以光纤干涉为例,由于所使用的光纤直径很小,在受到微小的外界作用或温度变化时,其光学长度就要发生变化,从而引起较大的相位变化。

(2) 快速测量:光的传播速度最快且能传送二维信息,因此可用于高速测量与监控。军事上对雷达等信号的分析要求具有极高的检测速率,应用电子学的方法难以实现,而利用光的衍射现象的高速频谱分析便可解决。

(3) 大信息容量:被测信号以光波为载体,而光的频率极高,所容纳的频带很宽,测量动态范围大:同一根光纤可以传输多路信号,如波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、频分复用(FDM)等技术。

(4) 强适应性:光纤是一种电介质,耐高温、耐腐蚀、抗电磁干扰,可应用于其它传感器所不适用的极端与恶劣环境中,如核辐射、化学污染、强腐蚀性、高温高压、强电磁场、易燃易爆、深水区域的参数测量等。

(5) 质轻可挠曲:光纤质量轻,价格低廉,测量精度高,在传感器市场具有较强的竞争力。又因其良好的柔韧性,几何形状具有多方面适应性,可做成机敏灵巧型传感器及其阵列,用于多参数、多点及准分布式测量,适宜于传感器件的集成化。

(6) 与计算机技术和遥测技术相配合,可实现远距离、实时在线测量和自动控制以及快速预警等。

五、光纤传感关键技术

光纤传感器系统的关键技术包括两个方面:一是外界被测参数如何调制光纤中的光波参数,这需要对传感机构进行精巧设计以实现高灵敏度感测;二是怎样把被测参量从已调制的光波信号中提取出来,即解调(或检测)技术。尽管光纤传感器存在五种调制类型和各种调制

方式，但光探测器只能响应光的强度，不能反映光的频率、波长、相位、偏振态这四种物理量。因此，这四种调制信号都要通过某种转换技术，使之转换成强度信号才能被探测器响应，这种转换技术被称为解调技术。

频率调制信号的检测一般是采用混频而得到差频信号，该差频信号应能反映被测信号的大小；波长调制信号的检测首先是用光谱仪或棱镜将各个波长的能量分开，该波长能量随被测参数而变化，对于双波长的检测，通常采用比色法获得被测参数；相位调制信号是通过干涉技术转换成强度信号来加以检测的；而偏振态的调制信号则是用检偏器转换成强度信号实现偏振检测。

1.3 光纤系统设计

这部分内容着重介绍光纤用于传感器的一部分基本概念、光纤的基本工作原理、光纤特性、光纤传感器的检测方式及作用等。

光纤作为光纤传感器的核心部分，在进行系统设计时，要考虑下面几个方面的最优条件：

(1) 光源与光纤的耦合效率高

要求光耦合到光纤的效率高，因为光在光纤芯中传播时其损耗最小，为了使尽可能多的光进入纤芯，就必须增大数值孔径 NA。

其中 $NA = (n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$ ， n_f 指光纤纤维折射率， n_c 指包层折射率。

(2) 光损耗小

光束从输入端到纤芯的输出端时，要求光束的光损耗减到最低，即要选用光损耗小的光纤。其光纤损耗通常用分贝（dB）表示。

(3) 增大光纤的信息承载容量

输入光纤的可能是连续变化的光束，也可使一组轮廓清晰的光脉冲。当光脉冲通过光纤时，其振幅因衰减而降低。由于光色散的原因也可能是光脉冲展宽。单脉冲的展宽，将产生时间和空间上的相互重合，从而降低或消失信号。这使参数限制了光纤传输信息承载容量。

1.3.1 光纤的分类及特性

从目前对构成光纤的材料研究来看，虽然许多光纤方案被使用，但不论在通信领域或光纤传感领域，从性能、可靠性来说，石英系统光纤都是重点。下面主要介绍石英光纤特性。

一、光纤的分类

石英光纤系统结构主要有以石英为主要材料的纤芯和包层构成。根据芯的折射率分布，光导纤维的形式分三种，如图 1.3 所示。

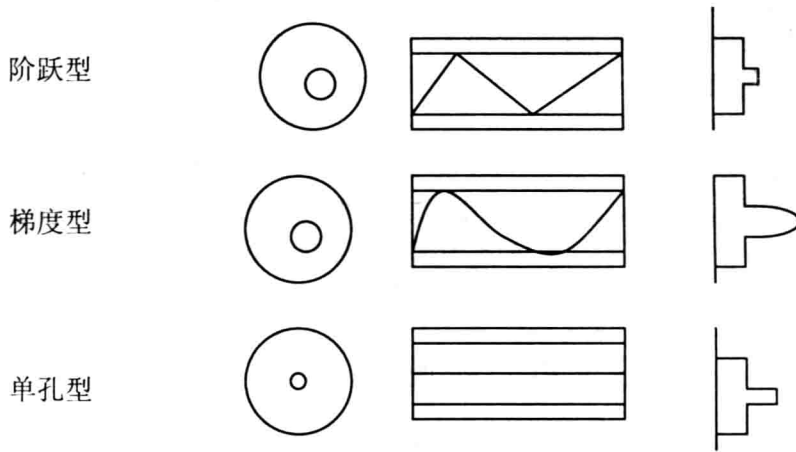


图 1.3 石英光纤系统结构

阶跃型----纤芯的折射率是不变的 (多模光纤)

梯度型----纤芯的折射率近似平方分布 (多模光纤)

单孔型----纤芯光学尺寸很小 (单模光纤)

表 1 列出了基本光纤的比较:

表 1

种类/特性	阶跃型	梯度型	单孔型
几何尺寸	纤芯口径 50~150 μm 外径 125~350 μm	50 μm 125 μm	5-8 μm 125 μm
特点	低损失, 与光源结合特性较好, 但振型频差较大。	低损失, 宽频带, 与光源的结合型稍差, 但振型频差较小。	低损失, 超宽带, 与光源的结合性稍差, 但由于有振型频差, 故信号畸形小。
用途	适合于 1km 以下的多距离传输, 可广泛用于光学计算。	适用于中长距离的传输。	适用于远距离传输。

在石英光纤系统中, 为了使折射率变化, 在石英材料中混入少量添加剂, 掺杂一些元素后, 可使光纤比石英折射率高或低。

但无论怎么分类, 光纤总是把光封闭在线状的光路中, 从一点传输到另一点, 它属于波道管型光路系统, 因而传输特性特别稳定。

光导纤维的特点及作用可由下表 2 给出:

表 2

特点	作用
低损失性, 宽带域, 可长距离传输。	适宜大容量信号传输, 可减少中继站, 利于通信。
高绝缘性, 耐高电位差。	对接地电位差, 地点位上升等无影响。
无感应性, 对电磁、噪音不敏感。	耐浪涌, 耐雷击, 耐电磁感应、噪音。

无漏话性，不可能非破坏性连接。
 防暴性，光信号是低能量，无放电性。
 耐腐蚀性，是无机材料。
 耐火性，无机材料耐火。
 细径性，可控性好，轻量化。

通讯保密性好。
 适于可燃性气体下，无需防爆。
 耐腐蚀性气体、液体，耐气候变化。
 火灾时仍能保持功能。
 可装于狭缝或歪曲地方

二、光导纤维特性

(1) 传输特性

光在光纤中传输时，其光通量将会衰减，这种损失有波动的固有损失和非固有损失组成，下面介绍其各自的传输特性。

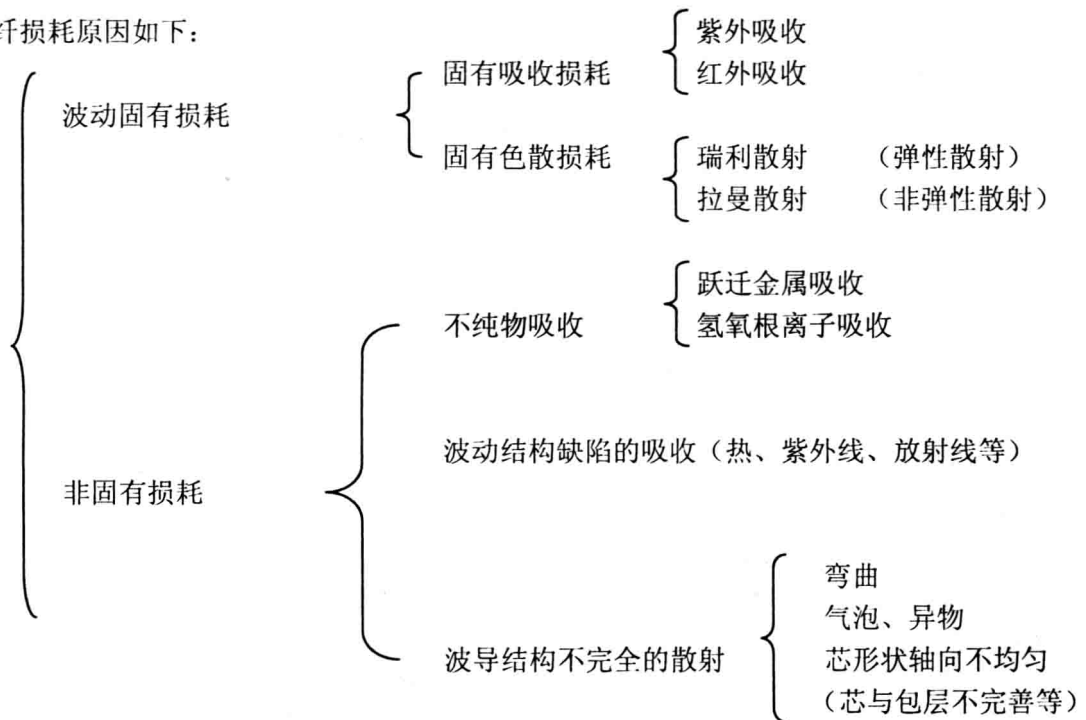
A. 石英系统光纤的损耗特性

入射光纤中的光由于各种原因被吸收、色散，其中一部分光被损失。光纤损失(用 dB/km 表示)可用下式表示：

$$\text{损失} = 10/L \times \log_{10} p_i/p_o \quad (1.3.1)$$

式中 p_i ----光纤入射端的光能； p_o ----光纤出射端的光能； L ----光纤长度。

光纤损耗原因如下：



B. 与光路垂直方向光能散射小

传输特性的另一特点就是与光路垂直方向光能散射小。利用透镜组成的光学系统仅仅是利用折射率不同的边界面的折射，所以很难把光路封闭在很小的断面内。由于激光具有很好的传输特性，是其他光源无法可比的，但与光导纤维相比，这不如光导纤维的传输特性好。

例如，激光按 TEM₀₀ 模式传输时，在与传播方向垂直面上的强度分布可用下式表示。设与激光中心距离为 r：

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2 / \omega^2) \quad (1.3.2)$$

式中 ω -----光斑断面尺寸，随激光传播而增大。

在束腰（光线最细处）相距 z 的距离处，光斑半径 ω ：

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (1.3.3)$$

式中： λ -----激光波长(He—Ne,632.8nm)， ω_0 -----束腰半径，也称固有光斑尺寸。

如果 ω_0 的直径为 2mm,传播到 10 米处，光斑尺寸几乎不变，但是当 $\omega_0=100 \mu\text{m}$ 时，传播 100mm,光斑尺寸就要扩大两倍以上。而用透镜系统如下图所示，



图 1.4 透镜系统传输激光

传输把光斑尺寸控制在 $100 \mu\text{m}$ 以内，就要以几十毫米的间隔排列一个透镜。由分析可知，光斑尺寸增大时，利用透镜系统是比较有利的。

但当 ω_0 在几百微米以内，则利用光导纤维比较有利，如下图所示。



图 1.5 光纤传输激光

从图中看出，要把传输光点控制在 $100 \mu\text{m}$ 内，利用光纤的特点，不但不需透镜，而且垂直方向的损失也较小。

C. 石英光纤的传输频带特点

光纤通信是以光强度的变化来传输信号的，但传输频带受多模色散、材料色散、结构色散所限制。

(i) 多模色散是多模光纤中存在的色散。如下图所示

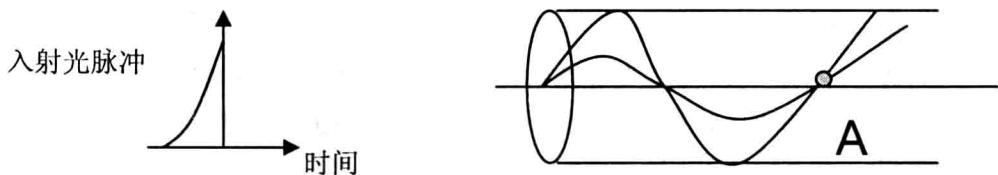


图 1.6 多模色散

图 1.6 中 A 所示每个模式传播速度不同。

(ii) 材料色散, 如下图 1.7 中 B 点所示即使模式相同, 波长不同时, 波动折射率不同, 传播速度也不相同。

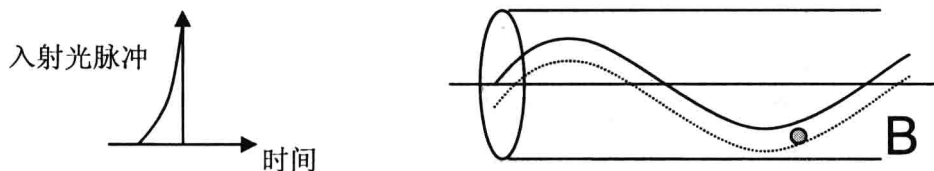


图1.7 材料色散

(iii) 结构色散, 如下图 1.8 中 C 点所示, 即使模式相同, 因波长不同, 传播方向(轨迹)也会稍有不同。材料色散与结构色散是因为光源有不同单一波长而产生的色散, 故两者合起来一起称为波长色散。

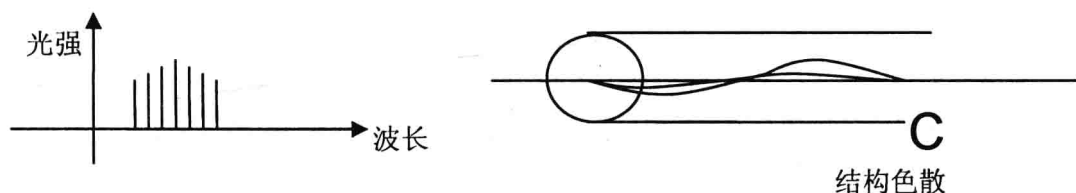


图1.8 结构色散

D. 单模光纤传输特性

单模光纤其芯与包层间的折射率通常给得很小。1979 年以后所使用的单模光纤, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长接近达到了 0.2Db/km 。

因传播模式仅为一种, 故不存在多模色散, 所以传输频带很宽。微弯曲增加的损耗与波长有关, 随波长增加损耗急剧增加。

(2) 电气特性

光纤的绝缘性能较好, 在 1cm 长度内可耐压数千伏, 几乎不受电场和磁场的影响, 因此可以实现无感应的传输通路, 也可利用光纤在高强度下传递信号。

(3) 物质特性

石英光纤的密度较小, 抗拉强度大 (400N/mm^2), 在理论上起抗拉强度比得上包括钢在内的钢材料, 但由于拉丝设备损伤以及大气中暴露处理的结果, 都严重降低了纤维强度。尤其是在微裂纹形成时, 抗拉强度将大大下降, 光学特性也受到不利的影响。光纤弯曲半径可达外径的 10 倍, 相对强度 95% 的条件下, 性能几乎不变。

一般光导纤维的直径为 $10\text{—}350 \mu\text{m}$, 柔软, 可自由弯曲, 利用一根软的传象纤维光束, 就可以使图像横移、旋转、折迭等。而用光学系统就要用到几个系统。

(4) 结合特性

光导纤维接受光能量的指标要用“数值孔径 (NA)”表示, 光导纤维的数值孔径 NA 与最大入射角 θ_{max} (相对光轴) 的关系为

$$\text{NA} = \sin \theta_{\text{max}} \quad (1.3.4)$$

NA 大的光纤接受的光信号多，一般的石英波动梯度型光导纤维的 NA 为 0.2 左右。

(5) 传像特性

若入射面与出射面的排列完全相似的话，投入到入射面的图形就可以准确地传输到出射面，一般把这样的束状光导纤维称为传象束。

(6) 可灵敏检测纤维材料和物理现象的相互作用

比如，作为光导材料的波动板被 X 射线照射后就着色。故光导纤维光路可做得很长。所以能非常灵敏地检测出着色情况，也可检测 x 射线剂量。

(7) 可用单模光纤或梯度型光纤检测相位

这两种光纤不会破坏相干光，而且可传输相干光。因此，可以用干涉测量法或相位测量法检测出光的相位差。

1.3.2 光纤传感器的光源特性

一、几何特性

光纤传感器光源的第一个特性是有一定的光输出功率，具体表现在送去传感器的光通量可以达到最大，而这个量的大小则取决于光源的波长和射入光纤的光通量的综合应用。

光源的发光波长决定了光纤的衰减。为此，光源的发光波长应选择在光纤呈低损耗附近。

光源射入光纤的光通量直接与纤芯面积和光纤的数值孔径有关，即与光源和光纤的几何特性有关。确定出给定光源射出并能进入给定光纤的光功率，取决于该光纤的面积乘立体角和光源的亮度（光源每单位面积单位辐射立体角内所辐射的功率），对任何光纤系统来说，高亮度光源都是极其重要的。在实践中要特别注意光源面积与光纤数值孔径的精确匹配，以实现最佳的功率耦合，使光纤输出功率达到最大值。

二、光辐射的频谱特性

光纤传感器光源的频谱特性主要体现为中心波长 λ 和光频宽 $\Delta\lambda$ ，如下图所示

I

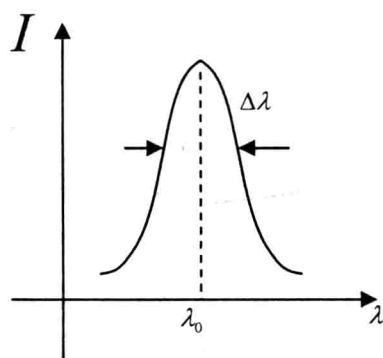


图 1.9 频谱

原则上，中心波长应选择在光纤的低损耗传输窗口，使光在光纤中传输损耗最小。光谱宽度则由传输带宽决定。一般光纤的传输带宽较宽，则光源的光谱带宽 $\Delta\lambda$ 区域变窄，这是由于单模光纤作宽频带传输时，光纤折射率随波长稍有不同，这是是单模传输频宽受到限制的主要原因。

光纤中传输时间也随光源的波长不同而变化。当光源的波长为 $0.85\mu\text{m}$ 时光纤每千米产生 $10^5 \text{ ps}/\mu\text{m}$ 的延迟。如果光源的光谱宽度为 $0.01\mu\text{m}$ 时，则延迟时间为上述时间的 100 倍，即 1ns 。

在许多光源中，供给光源能量的电源通常都有噪声，通过光源的光电转换，这种噪声也

将转化为光噪声。光源内，尤其是激光光源内，常有谐振效应，在一些特定的频率上产生附加噪声。震荡媒质的结构不规则将会引起不规则光的产生，从而造成光源不稳定，这样光源中实际的噪声超过散粒噪声。

三、光电转换特性

光源所用的电源对光输出有直接影响，且影响是多维的。一般地，输出功率的大小随电激励而增加，但是器件的温度也随电激励的增强而升高。对于许多电光变换器来说，就使得输出功率比恒温是要低，且光频率也变化。对发光二极管来说，这可能是由于带隙随温度而产生小的变化所致，而对激光器来说，这种效应则是腔长和激光媒质折射热扰动共同作用下的结果。因此，一般输出强度和频率都将是电源的函数。

除上述特性外，还有环境特性等一系列因素。

1.4 光纤束及特种光纤

一、光纤束

用光纤制成的纤维光学元件，可分为柔软光线束和硬式的光纤板两类。光纤又有传光束和传像束两种。

(1) 软式光纤束的制作

光纤束是纤维光学的基本元件。柔软可弯曲的特性是它最突出的优点。组成这种元件的基本单元是单根光纤，光纤束的制作一般分为三步：一是拉丝，把光学玻璃材料在高温下拉制成单根光纤，二是成束阶段，采用一定的方法，将单根光纤组合成传光束和传像束，三是对光纤束端部进行研磨抛光和装置保护外套。

(2) 透过率和分辨率

数值孔径，透过率和分辨率是纤维光学元件的主要质量指标。单根光纤的数值孔径已进行讨论过由光纤组合的元件的数值孔径基本上和单根光纤相同，在此不在赘述。

下面将研究光纤束的透过率和分辨率这两个重要的参数。

A. 透过率

透过率是纤维光学元件透光性能好坏的标志。透过率 T 定义：光纤的输出光通量和输入光通量之比，即为：

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1.4.1)$$

式中， I 是光纤的输出光通量； I_0 是光纤的输入光通量。为了排除光纤孔径角对输入光通量的影响，通过限制光远的入射光锥应小于光纤的子午孔径角。

对单根光纤，影响透过率的主要因素有：光纤芯材料的吸收；涂层和芯层界面内壁上的全反射损失；光纤端面的菲涅尔反射损失。而对于有光纤制成的元件，透过率除了上述的影响外，还和纤维光学元件的填充系数有关。

通过单根光纤说传递的光通量可由下式表示：

$$F = \iint I(\theta, r) dA d\Omega \quad (1.4.2)$$

式中 $I(\theta, r)$ 是光线在纤维内的角分布； t 是通过光线的透过系数； dA 是垂直于光纤中心轴端面的面积元； $d\Omega$ 是入射光涂层的立体角元。该式说明，光纤的端部式由一个光锥所照明，光纤所传递的光通量式光远的角分布和端部面积的重积分，所以包含了所有的子午光线和斜光线。下面先对投射函数 t 作具体讨论。

(i) 光纤端面上的反射损失

当入射光由一种媒质射到另一种媒质时,在其两媒质之间的分界面上必定会有一部分光波界面反射。入射角不同,反射光得大小也就不同。对光纤也是这样。当光纤入射到端面时,总有一部分光波被反射,这就是光纤端面的反射损失。入射角小时,反射损失也小,由菲涅尔公式,反射系数可写成

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\operatorname{tg}^2(\phi - \theta)}{\operatorname{tg}^2(\phi + \theta)} + \frac{\sin^2(\phi - \theta)}{\sin^2(\phi + \theta)} \right] \quad (1.4.3)$$

式中 ϕ 为入射角; θ 为折射角。因

$$R = \frac{1}{2} (t_p^2 + t_s^2) \quad (1.4.4)$$

式中

$$t_p^2 = \frac{n_1 \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} - n_0 \cos \theta}{n_1 \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + n_0 \cos \theta}$$

$$t_s^2 = \frac{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} - n_1 \cos \theta}{\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + n_1 \cos \theta}$$

前几式都是 θ (折射角) 表示的,主要是因下面讨论的都是用光的光纤内的折射角。脚标 p 和 s 分别表示光波的振幅与入射面平行和垂直两种情况。

正入射时,即 $\theta = 0$ 的情况下:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (1.4.5)$$

图 1.10 表示 $n_0 = 1$ 时正入射的菲涅尔反射损失和折射率之间关系。折射率约大反射系数也就月大。这是将来光纤至于空气中时的正入射条件下光纤的端面反射损失。图 1.11 表示入射角和菲涅尔反射系数的关系,从途中清楚的可看到,当入射脚为零的正入射情况下,反射损失最小,而随着入射角增大,反射损失也逐渐增加。

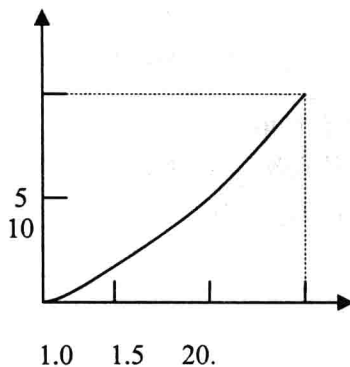


图 1.10 $n_0 = 1$ 时正入射的端面

反射和折射率关系

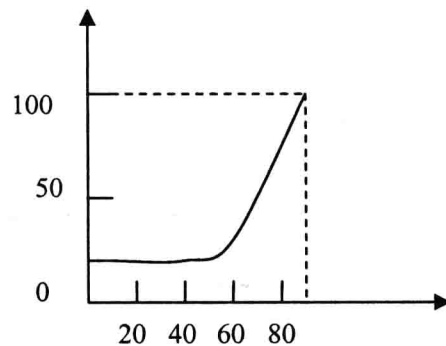


图 1.11 $n_0 = 1.52$ 时菲涅尔的

端面反射和折射率关系

当光束入射到光纤端面时,设其反射系数为 R ,这反射的光通量为 RI_0 , I_0 是入射的光

通量，而进入光纤中的光通量为 $(1-R)I_0$ ，在考虑光在出射端面的反射损失后，光纤的透过系数 t 为

$$t_1 = (1-R)^2 \quad (1.4.6)$$

可得：

$$t_1 = \frac{1}{4} [t_p'^2 + t_s'^2] \quad (1.4.7)$$

式中

$$t_p'^2 = \frac{4n_0^2 n_1 \cos \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta}}{(n_1 \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + n_0^2 \cos \theta)^2}$$

$$t_s'^2 = \frac{4n_0^2 n_1 \cos \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta}}{(\sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + n_1 \cos \theta)^2}$$

(ii) 光纤芯和涂层界面内壁上的全反射损失

光线在光纤总的传播是通过光线在光纤芯和涂层界面内壁上的多次全反射进行的，因此全反射起着光纤中非常重要。设为光纤芯和涂层界面内壁上的全反射系数。在理想情况下，渠岸反射系数 α 为 1，这种全反射是完全的，不存在全反射损失但在通常情况下这是不可能的，因光纤芯和涂层不可能是理想的光学接触，因此总有 $\alpha < 1$ ，即是每进行一次全反射就要损失一部分能量。很据全反射次数多少就能算出损失的光能量。所以，由于光的全反射损失，使原来是 I_0 的光能量就变为 $I_0 \alpha^n$ ，这里 n 为全反射的次数。根据全反射次数的计算公式，可得透过系数 t_2 为

$$t_2 = \alpha^{\left(\frac{lg \theta}{\alpha \cos \gamma}\right)} \quad (1.4.8)$$

式中 l 为光纤长度， d 为光纤直径，分别为光纤内入射光线和纤维中心轴的夹角及斜光线的倾角。光纤的直径约小，全反射次数就越多，这样全反射的损失就约大，透过系数就约小。

(iii) 光纤芯材料的吸收损失

当光线通过光纤时，由于芯材料的吸收，因而使光能逐步衰减。其大小可用光吸收系数表示，设为光纤芯材料的光吸收系数。根据光线通过长度 l 的光纤，其光路长为 $S = \frac{l}{\cos \theta}$ ，所以由于芯材料的吸收，原来 I_0 的光能量就成为 $I_0 \exp\left(-\frac{\beta l}{\cos \theta}\right)$ ，故透过系数可为

$$t_3 = \exp\left(-\frac{\beta l}{\cos \theta}\right) \quad (1.4.9)$$

从式中可以看出，光能量的损失与光纤的长度 l 和芯材料的关系系数由指数衰减关系。因此，为了保证光纤具有的透过的性质就要求芯材料的吸收系数越小越好。

考虑上述影响光透过的三个因素后，就可以得到光线通过光纤后的透过系数为

$$t = t_1 t_2 t_3$$

$$= \frac{1}{4} (t_p'^2 + t_s'^2)^2 \alpha^{\frac{lg \theta}{d \cos \gamma}} \exp\left(-\frac{\beta l}{\cos \theta}\right) \quad (1.4.10)$$

于是，当光线通过光纤后所传递得光通量得表示式 (1.4.2) 式就可写为

$$F = 2\pi d^2 \int_{\theta=0}^{\theta_c} \int_{\gamma=0}^{\frac{\pi}{2}} I(\theta, \gamma) \frac{1}{4} (t_p'^2 + t_s'^2)^2 \alpha^{\frac{t\gamma\theta}{d \cos \gamma}} \exp\left(-\frac{\beta l}{\cos \theta}\right) \sin \theta \cos^2 \gamma d\gamma d\theta$$

$$+ 2\pi d^2 \int_{\theta=\theta_c}^{\theta_\alpha} \int_{\gamma=\bar{\gamma}}^{\frac{\pi}{2}} I(\theta, \gamma) \frac{1}{4} (t_p'^2 + t_s'^2)^2 \alpha^{\frac{t\gamma\theta}{d \cos \gamma}} \exp\left(-\frac{\beta l}{\cos \theta}\right) \sin \theta \cos^2 \gamma d\gamma d\theta$$

(1.4.11)

该公式包括了所有得子午光线和斜光线。积分分两部分，这是由于 γ 得取值范围依赖于 θ 得原因。在子午光线孔径内，对每个 θ 角， γ 得取值范围 $0 - \frac{\pi}{2}$ ，而在子午孔径外即 $\theta_c < \theta < \theta_\alpha$ 时， γ 得最小数值为 $\bar{\gamma}$ ，而且

$$\cos \bar{\gamma} = \frac{\sin \theta_c}{\sin \theta}, \sin \theta_\alpha = \frac{n_0}{n_1}$$

对透过光通量得表示式 (1.4.11) 进行计算是较复杂的，但若根据实际情况，课桌一些近似处理，对长的光纤束，其端面反射损失比芯材料的吸收损失及全反射的损失小。而对块状的光纤面板，芯材料的吸收损失和全反射损失的端面的反射损失小。有这样的近似考虑后，就能估计个类损失的大小而达到简化计算的目的。

上面讨论的单根光纤，对纤维光学元件来讲，决定透过率大小的因素，除上述外，还有元件的传光面积，用填充系数来表示。因元件是有许多单根光纤组合而成，而光纤之间必然会有空隙，并且每根光纤还有涂层，这次面积对透光是无效的。因此当光线入射到纤维光学元件时，并非端面上每点对透光都有贡献，只有光纤芯才对透光起作用。把纤维光学元件中各个光学纤维芯的积分和 S 和元件端面总面积 S_0 之比定义为填充系数 k

$$k = \frac{S}{S_0} \quad (1.4.12)$$

当纤维光学元件端面上光纤排列是正方形结构时

$$k = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1.4.13)$$

当纤维光学元件端面上光纤排列时六角形结构时

$$k = \frac{\pi}{3.464} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1.4.14)$$

上两式中， d —光纤芯直径； D —光纤直径。对于光纤光学元件，不但要求其单根光纤透光性能好，还要求元件的填充系数高。这样才能使纤维光学元件具有高的透光性能。

利用 (1.4.1) 式，并借助于已知光纤长度和入射角条件下平行光的光通量数值后，就可推算出光纤的吸收系数 β 和界面内壁的全反射系数 α 。

当考虑用平行于光纤中心轴的平行光入射时，即 $\phi = 0$ ，由于 $\theta = 0, \gamma = 0$ ，则 (1.4.11) 式可简化为：

$$F = 2\pi d^2 I(0) (t_p'^2 + t_s'^2)^2 e^{-\beta l} \quad (1.4.15)$$