

# 光纤 传感技术

张国顺 何家祥 肖桂香

水利电力出版社

# 光纤传感技术

张国顺 何家祥 肖桂香

水利电力出版社

---

## 光纤传感技术

张国顺 何家祥 肖桂香

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 12.5印张 274千字

1988年10月第一版 1988年10月北京第一次印刷

印数0001—3000册 定价4.80元

ISBN 7-120-00380-1/TH·3

## 内 容 提 要

本书介绍了新兴的光纤传感技术，其内容广泛，反映国内外最新水平。书中简述了光纤基础理论；论述了强度、相位、频率、偏振、波长等光调制技术；重点介绍了机械量、电磁量、热工量、化学量和生物医学量，如位移、压力、振动、速度、加速度、温度、流量、液位、电流、电压、磁场、应力、应变、体温、体压、浓度、pH值和血氧含量等的光纤传感技术和光纤传感器。

本书适合于科研单位、厂矿企业、高等院校等部门中从事自动检测、传感技术研究、仪器、仪表设计等方面的工程技术人员与师生参考。

## 前 言

本书是在光电子技术专业选修课程“光纤传感技术”教材的基础上扩充编写而成的。书中引用了国内外发表的最新技术资料，力图反映光纤传感技术的最新成果及水平。

全书共十章，还有绪论、附录和参考文献。

绪论概述了光纤传感技术的产生和发展情况，介绍了光纤传感器的分类、用途及特点，是全书的纲要。

第一、二、三章简述了光纤波导、模式耦合理论和光纤的基本特性，是设计光纤传感器的理论基础。

第四、五章详细介绍了光纤传感器用的光源和光探测器，是设计光纤传感器必不可少的知识。

第五章论述了各种光调制技术，是组成各种光纤传感器的技术基础、也是全书的技术核心。

第六章至第十章是本书的重点内容。按照用途分类讲述了用光纤探测各种物理量的方法，并以国内外发表的光纤传感器实例加以说明，着重于介绍探测方法，尽量给读者留下清楚、具体的概念，体现了本书的实用性，这是本书的特点。

读者欲详细了解文中介绍的有关内容，可参阅书末的参考文献。

附录中介绍了部分国产光纤的规格、数据，供读者参考。

本书由天津大学精密仪器工程系光电子技术专业张国顺副教授主编，并编写了绪论、第四、五章和第九章的第一、

( 40566

二节；何家祥付教授编写了第一、二、三、七、八章和第六章的第四、五节，第十章的第三节；肖桂香编写了第六章的第一、二、三节，第九章的第三、四节和第十章的第一、二节。

全书由天津大学姚建铨教授审定。刘宪文和赵祥明同志参加了部分外文资料的翻译工作，刘佳等同志协助整理了部分书稿。在编写过程中还得到许多同志及兄弟单位的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于水平所限，加之时间仓促，书中难免有不妥之处，望读者批评指正。

编 者

1987年4月于天津大学

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 光纤波导理论	4
第一节 光线理论	4
一、阶跃光纤	
二、梯度光纤	
第二节 模式理论	11
一、阶跃光纤	
二、梯度光纤	
第二章 光纤模式耦合理论	30
第一节 幅度耦合方程	30
一、模式耦合幅度方程	
二、幅度耦合方程的微扰解	
三、阶跃光纤耦合系数	
第二节 光纤的周期畸变	39
第三节 功率耦合方程	43
一、基本方程	
二、稳态解	
三、脉冲响应	
第三章 光纤的基本特性	53
第一节 光纤的偏振与双折射	53
一、单模光纤的偏振	
二、单模光纤的双折射	
三、偏振型单模光纤	
第二节 光纤的色散特性	74
一、光纤色散的种类	
二、阶跃光纤的色散	
三、梯度光纤的色散	
第三节 光纤的损耗	81
一、本征损耗	
二、杂质吸收	
三、结构缺陷损耗	
第四节 光纤的非线性特性	84
一、受激喇曼散射(SRS)	
二、受激布里渊散射(SBS)	
三、光感应双折射	
四、自相位调制(SPM)	

第五节 光纤的物理与化学性能 .....	93
一、物理性能    二、化学性能	
第四章 光纤传感器用光源 .....	98
第一节 光源的性质及分类 .....	98
第二节 发光二极管 .....	100
一、表面发光二极管    二、侧边发光二极管    三、超辐射 发光二极管	
第三节 半导体激光器 .....	108
一、注入式半导体激光器    二、半导体激光器的主要特性 三、半导体异质结激光器    四、分布反馈半导体激光器	
第四节 氦氖激光器 .....	122
一、氦氖激光器的结构原理    二、氦氖激光器输出光束的特性	
第五节 其它光源 .....	127
一、白炽光源    二、固体激光器	
第五章 光纤传感器用光探测器 .....	132
第一节 概述 .....	132
一、光探测器的分类    二、光电探测器原理    三、光探测器 的特性参数    四、光探测器的噪声	
第二节 半导体光探测器 .....	142
一、硅光电二极管    二、PIN光电二极管    三、雪崩式光电 二极管(APD)    四、其它光探测器	
第三节 光电倍增管 .....	154
一、基本工作原理    二、二次电子发射和倍增效应    三、基 本工作电路    四、光电倍增管的使用	
第六章 光调制技术 .....	160
第一节 光强度调制 .....	160
一、微弯效应光强度调制技术    二、光强度的外调制技术 三、折射率光强度调制技术	
第二节 偏振调制 .....	178
一、普克耳效应    二、平方电光效应    三、磁致旋光效应 四、光弹效应	



第三节	相位调制	191
一、	光的相位调制和干涉测量	
二、	光纤中的相位调制	
三、	几种物理效应	
第四节	频率调制	209
一、	光学多普勒概念	
二、	光纤多普勒技术	
第五节	颜色调制	214
一、	光纤颜色探测	
二、	光纤法布里-珀罗滤光技术	
三、	光纤pH探测技术	
第七章	热工参数测量光纤传感器	219
第一节	光纤温度传感器	219
一、	相位调制型光纤温度传感器	
二、	热辐射光纤温度传感器	
三、	传光型光纤温度传感器	
第二节	光纤流量流速传感器	244
一、	光纤旋涡流量计	
二、	光纤激光多普勒测速计	
第三节	光纤压力传感器	253
一、	用于压力传感的马赫-泽德光纤干涉仪	
二、	偏振型光纤压力传感器	
三、	差分外差法光纤压力传感器	
四、	利用纵向应力作用的光纤压力传感器	
五、	反射型光纤压力传感器	
六、	利用受激喇曼效应的光纤压力传感器	
第八章	电磁参数测量光纤传感器	275
第一节	光纤电流传感器	275
一、	利用法拉第效应的光纤电流传感器	
二、	金属被覆多模光纤电流传感器	
三、	光纤干涉型电流传感器	
第二节	光纤电压电场传感器	281
一、	利用PVF <sub>2</sub> 材料的光纤电场传感器	
二、	用于高压电气系统中的电压电场传感器	
第三节	光纤磁场传感器	287
一、	利用磁致伸缩效应的光纤磁场传感器	
二、	用于高压电气系统中的光纤磁场传感器	
第九章	机械量测量光纤传感器	297
第一节	光纤位移传感器	297

一、光纤开关与定位装置	二、天线型光纤位移传感器	
三、受抑全内反射光纤位移传感器	四、压电与磁致伸缩材料 伸缩位移光纤传感器	
五、光纤微弯位移传感器	六、光纤 干涉型位移传感器	
第二节 速度、加速度光纤传感器 .....		329
一、光纤激光渡越速度计	二、利用马赫-泽德干涉仪的光纤 加速度计	
三、倾斜镜式光纤加速度计		
第三节 光纤振动传感器 .....		339
一、低频相位调制光纤振动传感器	二、利用光弹效应的 光纤振动传感器	
第十章 其它光纤传感器 .....		351
第一节 光纤陀螺仪 .....		351
一、塞格纳克效应	二、光纤陀螺仪中的相移检测	
第二节 用于监测空气污染的光纤传感器系统 .....		357
一、工作原理	二、光纤监测系统	
第三节 医用光纤传感器 .....		362
一、光纤测氧计	二、光纤血流计	三、其它医用光纤传感器
附录 光纤传感器用光纤制品 .....		374
参考文献 .....		385

## 绪 论

光纤传感技术是伴随着光导纤维及光通讯技术的发展而逐步形成的。这是本世纪70年代末发展起来的一门崭新的技术。

自被誉为光通讯元年的1970年以后，由于实用化光导纤维和半导体激光管的研制成功，光纤系统发展到实用化阶段，从此，光纤技术得到了迅速发展。

在光通讯系统中，光纤用作远距离传输光波信号的媒质。但是，在实际光传输过程中，光纤易受外界环境因素的影响，如温度、压力、电场、磁场等环境条件的变化将引起光波量，如光强度、相位、频率、偏振态等变化。因此，人们发现如果能测出光波量的变化，就可以知道导致这些光波量变化的温度、压力、磁场等物理量的大小，于是出现了光纤传感技术。

光纤传感器与传统的各类传感器相比有一系列独特的优点。主要优点有：灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好、防爆、光路有可挠曲性，以及便于与计算机联接，便于与光纤传输系统组成遥测网络等；还有结构简单、体积小、重量轻、耗电少等优点。因此，它一出现，就受到世界各国有关学术界和研究机构的高度重视。在一些工业发达的国家，如美国、英国、日本、联邦德国等国，均投入相当多的人力、物力、先后制定发展规划。许多高等学校、科研机构及企业单位均在这方面开展了深入研究工作。1983年4月在英国伦敦召开了第一届国际光纤传感器会议，以后又分别

在联邦德国、美国和日本召开了国际光纤传感器学术交流会。

光纤传感器是通过被测量对光纤内传输的光进行调制，使传输光的强度（振幅）、相位、频率或偏振态等特性发生变化，再通过对被调制过的光信号进行检测，从而得出被测量的一种新型传感器。

光纤传感器一般可分为两大类：一类是功能型传感器（Function Fibre Optic Sensor），另一类是非功能型传感器（Non-Function Fibre Optic Sensor）。前者是利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件，所以又叫传感型光纤传感器，或叫做全光纤传感器；后者是利用其它敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为光的传输介质，传输来自远处或难以接近场所的光信号，因此，也称做传光型传感器或混合型传感器。

根据对光进行调制的手段不同，光纤传感器又有强度（振幅）调制、相位调制、频率调制、偏振调制、波长调制等不同工作原理的光纤传感器。

光纤分为单模光纤和多模光纤。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光纤或多模梯度光纤；相位调制型和偏振态调制型光纤传感器，采用单模光纤，如能满足特殊要求的保偏光纤、低双折射光纤、高双折射光纤等。

为了获得适宜的灵敏度，也可将普通光纤“增敏”或者“去敏”。总之，只采用通讯用光纤，会使光纤传感器性能受到限制。采用新材料，设计特殊结构的专用光纤，是促进光纤传感技术发展的努力方向。

光纤传感器可以探测的物理量很多，包括目前在实验室

阶段的研究成果，已实现光纤传感的物理量已近70种。按照被测对象的不同，光纤传感器可以分为位移、压力、温度、流量、速度、加速度、振动、转动、弯曲、应变、磁场、电压、电流、以及化学量、生物医学量等各种光纤传感器，其中有的已经形成商品，可供实际应用。

我国对光纤传感技术的研究也很重视，从70年代末就开始了这方面的研究工作。目前在许多高等院校、科研机构及企业部门开展了光纤传感技术的研究工作，曾召开过全国性的光纤传感技术学术会议，光纤传感技术已列入国家重点研究项目。随着新技术革命浪潮的到来，光纤传感技术在我国必将得到迅速发展。

## 第一章 光纤波导理论

理想的光学纤维作为介质波导，它的传输规律可用光线理论和波动理论来描述。

### 第一节 光线理论

当光在远大于光波长的介质空间传播时，可以当作“光线”来考虑，这就是光线理论的出发点。根据麦克斯韦方程，在这种几何光学近似的条件下，认为光波长  $\lambda \rightarrow 0$ ，可引出光线方程。在直角坐标系  $oxyz$  中，有：

$$\frac{d}{ds} \left[ n(x, y, z) \frac{d\vec{\rho}}{ds} \right] = \nabla n \quad (1-1)$$

式中  $n(x, y, z)$ ——介质空间的折射率分布；

$s$ ——光线轨迹的曲线坐标，相应地  $\vec{s}$  是沿光线方向的单位矢量；

$\vec{\rho}(s)$ ——光线轨迹上  $s$  处的位置矢量；

$\nabla n$ ——折射率  $n$  的梯度。

这是光线传输微分方程的矢量形式。由此也可得出光在均匀介质（折射率  $n$  为常量）中直线传播的规律。从式（1-1）得：

$$n \frac{d\vec{\rho}}{ds} = \text{常量} \quad (1-2)$$

式（1-2）表明光线的轨迹是一条直线。

## 一、阶跃光纤

首先介绍一种简单的阶跃光纤波导，即具有均匀芯子的光纤。这种阶跃光纤的芯子折射率 $n_1$ 和包层折射率 $n_2$ 均为常量，且 $n_1 > n_2$ 。下面利用光线的概念来分析子午光线和斜光线的情形。

### 1. 子午光线

子午光线即在通过光纤中心轴线的平面内传播的光线。如图1-1所示，设 $\theta_m$ 为光线从光纤端面入射的最大张角， $\theta_c$ 为在光纤内纤芯与包层界面上相应的临界全反射角， $\theta_c'$ 为临界全反射余角，则子午光线的数值孔径为：

$$NA = n_1 \sin \theta_c' = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-3)$$

式中  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ ——相对折射率差。

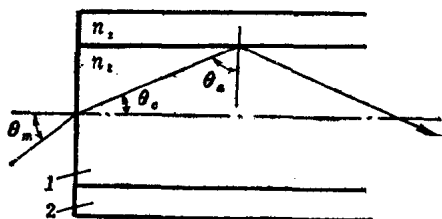


图 1-1 阶跃光纤的子午光线

1—芯子；2—包层

数值孔径是反映光纤波导特性的重要参数。

对于任意两条不同入射角的子午光线在阶跃光纤内传播时，它们的全反射余角 $\theta$ 不同，故在光纤内所走过的路程不同，从而到达光纤出射端面的时间早晚也不同。也就是不同的波导模式，经过光纤的时间长短不同，即传播快慢不同，这种现象称为模色散。光纤的色散问题将在以后有关章节详

细讨论。这里仅讨论子午光线的色散。

传播最快和最慢的两条光线的传播时间差，通常称为最大时延差。当光线的全反射余角  $\theta$  最大，即  $\theta = \theta_c$  时，则光线在光纤中走得最慢，传播时间最长为  $t_m$ 。而全反射余角  $\theta = 0$  时，光线与光纤轴线  $z$  平行，在光纤中走得最快，传播时间最短为  $t_0$ 。于是，由几何关系可得出  $t_0$  和  $t_m$  的关系：

$$t_0 = t_m \cos \theta_c = t_m n_1 / n_2$$

得最大时延差  $\tau$ ：

$$\tau = t_m - t_0 \approx t_m \sqrt{\Delta} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可看出，相对折射率差  $\Delta$  越小，子午光线的最大时延差  $\tau$  也就越小。但同时，可以传输的波导模式也越少。因此要想获得模数多、色散小的光纤，必须采用非均匀芯子。

在光纤作为传感元件时，色散将对元件的灵敏度和传输特性产生不良影响。例如，由于色散的存在，脉冲信号在传输过程中因展宽而发生畸变。因此，色散小有利于提高光纤传感器的质量。

## 2. 斜光线

斜光线是指从光纤端面任意方向入射的光线。如图 1-2 所示，设从光纤端面入射的斜光线的单位矢量  $\vec{s}_0 = L_0 \vec{i}_x + M_0 \vec{i}_y + N_0 \vec{i}_z$ ，其中  $L_0$ 、 $M_0$ 、 $N_0$  是该入射光线  $\vec{s}_0$  的方向余弦。而  $\vec{s}_0$  在光纤端面的入射位置  $P_0$  点的坐标  $\vec{P}_0 = x_0 \vec{i}_x + y_0 \vec{i}_y$ 。如果光线方向矢量  $\vec{s}_m$  和反射点的径向矢量  $\vec{a}_m$  是描述在光纤芯体-包层界面上第  $m$  次反射前的光线，则根据光线在反射前后共面的条件：

$$(\vec{s}_m - \vec{s}_{m+1}) \times \vec{a}_m = 0 \quad (1-5)$$

以及由反射角与入射角相等的条件有：



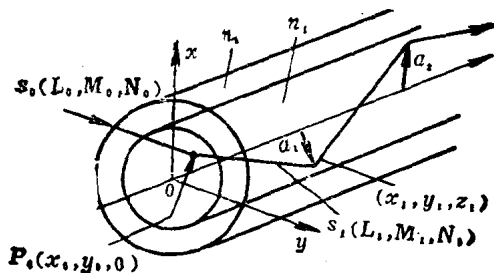


图 1-2 阶跃光纤的斜光线

$$(\vec{s}_m + \vec{s}_{m+1}) \cdot \vec{a}_m = 0 \quad (1-6)$$

同时根据全反射条件:

$$\frac{\vec{s}_m \cdot \vec{a}_m}{|\vec{a}_m|} \leq \left[ \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right]^{1/2} \quad (1-7)$$

利用式(1-5)和式(1-6)进行运算, 可通过入射光线的参数来表示上式的全反射条件:

$$\left[ L_0^2 + M_0^2 - \left( \frac{x_0 M_0 - y_0 L_0}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \leq NA \quad (1-8)$$

式中  $a$  —— 纤芯半径。

式(1-8)表明了斜光线的全反射条件。入射的斜光线只有满足了上述条件才可能成为导波。

如果考虑光线在  $|x_0| = a, y_0 = 0$  的位置入射, 则式(1-8)变为  $L_0 \leq NA$ 。这表明上述条件与  $M_0$  无关, 也即是与入射光线和  $y$  轴所成的交角大小无关。当光线在近乎和  $y$  轴平行的方向入射时, 光线将被锁闭在芯体内, 在芯体与包