

**FIBEROPTIC  
SENSOR  
TECHNOLOGY HANDBOOK**

**光纤传感器**

**技术手册**



中国科学院安徽光学精密机械研究所译

# FIBEROPTIC SENSOR TECHNOLOGY HANDBOOK

by

Charles M. Davis  
Edward F. Carome  
Martin H. Weik  
Shaoul Ezekiel  
Robert E. Einzig

Dynamic Systems, Inc.  
8200 Greensboro Drive, Suite 500  
McLean, Virginia U.S.A. 22102  
(703) 734-7900

Distributor

Optical Technologies, Inc.  
8200 Greensboro Drive, Suite 550  
McLean, Virginia U.S.A. 22102  
(703) 821-3952

本书由中国科学院安徽光学精密机械研究所翻译出版

**翻 译**

第一章：李大中  
第二章：谢海明  
第三章：黄寿柏  
第四章：奚居雄  
第五章：孙文浩 刘厚祥  
第六章：郭之己  
附 录：李大中 郭之己

**校 订** 李大中 寿涵奋

**编 辑** 黄寿柏 孙文浩

## 前 言

光纤传感器技术手册反映了有关纤维光学领域和光纤传感器这一特殊领域的最新技术。本手册阐述的光纤传感器的技术原理和实践,将给读者打下一个坚实的基础,以便掌握这一相当新的技术。读者只需要极少量的一般性技术背景知识,就可以充分理解本书内容。作者的阐述是明确而严格的,而且注重实际,使之符合受时间和空间限制的实际情况。手册的全部内容选编得确保全书的连贯性和一致性。

Dynamics Systems, Inc (DSI)是一个富有创新精神的公司,它致力于系统概念的应用,以解决技术开发、技术工程和技术管理中存在的各种复杂问题。DSI的一个重要任务是设计和研制光纤传感器,为许多政府部门和私人企业在声光学、电光学、磁光学以及光纤传感器方面,提供广泛的科学技术和专门技术。DSI的科技人员参与了这一领域最早的一些研究工作,发展达到了现有的最新技术水平,编写和合作编写过有关这一领域的许多有影响的论文和专刊。DSI被公认为是光纤传感器和光通讯这一正在迅速兴起的领域的先驱者。DSI提供专业性服务的研究开发项目有:声纳、武器、火控、进攻性装置和安全装置,导航、遥测等。DSI还对数学模拟试验、工程设计、系统探测、课题管理、组织计划、后勤学、训练以及有关领域提供物质技术保证。

作者简介:

Dr. Charles M. Davis, 现为光学技术公司 (Optical Technology, Inc) 付主席。他有30年从事声光学和物理声学研究的经历。原为DSI的首席科学家,指导过光纤传感器系统的样机研制工作,编写过许多有关这一工作的论文。在此以前,他是一位物理学教授和美国海军研究实验室(NRL)物理声学分部的负责人。在NRL,他作为首席科学家,促成了光纤水下听音器的研制和开设了国防部光纤传感器系统(FOSS)的研究课题,并与同行合作发明了多种光纤传感器。

Dr. Edward F. Carome, 现为John Carroll大学的物理学教授,也是光学技术公司的一名顾问。他参与过NRL的光纤水下听音器的早期研制工作,发表过多篇论文,并且是三项专利权的所有人。目前他仍继续从事有关光纤传感器及其元件的研究工作。

Dr. Dartin H. Weik, 现为DSI的高级系统分析家。他在陆军弹道学研究实验室期间,设计和研制过数字电子计算机的元部件,并且是陆军计算机部和情报科学研究开发项目的负责人,以及科学技术情报规划的负责人。他编写过若干本有关计算机、信息处理系统、纤维光学、光波传播和一般通讯的综合性辞典。他目前的主要兴趣是光纤传感器在医疗仪器中的应用。

Dr. Shaoul Ezekiel, 现为MIT的教授。他从事的主要研究工作是把光学技术应用超精密测量。最近他从事无源谐振器和光纤干涉仪在转动测量中的应用研究。

Mr. Robert E. Einzig, 现为光学技术公司主席,原为DSI四位经理之一。他管理过该公司的若干个研究开发项目,负责并为国防部光纤传感器系统的研究项目提供物资技术保证。他除了具有从事水下声传感器的主要经历外,还具有光纤传感器和数据传输系统应用的多方面经验。

## 中 译 本 序

光纤传感器是近年异军突起的一项新技术。它可以对温度、压力、声场、线加速度与转动加速度、位置、化学成份、液面、应变以及核辐射等范围宽广的物理参量进行高精度检测，而且具有卓越的电气绝缘性能，不受电磁场干扰，体积小，可挠曲，在许多场合可以发挥现有的、其他传感器所不能起到的作用，应用前景极为广阔。国际学术界已于1983年和1984年相继召开光纤传感器学术讨论会，表现了对发展该项新技术的高度重视与热忱。据Kessler情报机构预测，美国光纤传感器的销售额将以每年30%的速度增长，从1983年约2千万美元，达到1993年的2.78亿美元。尽管光纤传感技术的研究发展大多起因于军事应用的推动，但在不久的将来，它在民用、医学、商业和工业应用中的市场重要性将超过军事应用。

我国对于光纤传感器的研制工作近年亦已起步。为了推动这一新技术的发展应用，我们选择了美国动力系统公司出版的这本光纤传感器技术手册介绍给读者。该书内容丰富，深入浅出，从纤维光学元件，特别是从光纤传感器的技术原理到应用，为读者提供了清晰的背景知识和实用资料。我们希望，这本手册的翻译出版将对我国的纤维光学、仪表计测、生产过程控制、环保监测以及传感器研制等事业发挥有益的作用。

刘颂豪

于中国科学院安徽光机所

1985.2

# 目 录

前言		
第一章	引论	( 1 )
§ 1.1	背景	( 1 )
§ 1.2	目的	( 1 )
§ 1.3	各章内容简介	( 1 )
第二章	光纤传感器元件	( 3 )
§ 2.1	光纤的性能	( 3 )
2.1.1	设计指标	( 3 )
2.1.2	光波传播	( 7 )
2.1.3	传播模式	( 7 )
§ 2.2	光纤的制造	( 16 )
2.2.1	折射率分布的控制	( 16 )
2.2.2	光纤制造过程	( 17 )
2.2.2.1	双坩锅法	( 17 )
2.2.2.2	内汽相氧化法	( 18 )
2.2.2.3	外汽相氧化法	( 19 )
2.2.2.4	汽相轴向沉积法	( 19 )
2.2.3	光纤强度	( 20 )
§ 2.3	固态光纤光源	( 21 )
2.3.1	半导体中的能级	( 21 )
2.3.2	发光二极管与二极管激光器	( 24 )
§ 2.4	光电探测器	( 27 )
第三章	光纤元件的相互连接	( 29 )
§ 3.1	光纤的活接头与死接头	( 29 )
3.1.1	参考文献	( 34 )
§ 3.2	光纤耦合器	( 34 )
3.2.1	参考文献	( 36 )
§ 3.3	光缆	( 37 )
3.3.1	概述	( 37 )
3.3.2	市售光缆	( 37 )
3.3.3	小结	( 38 )
第四章	光纤传感器中的光波	( 39 )
§ 4.1	干涉型光纤传感器	( 39 )

4.1.1	强度干涉测量法	( 39 )
4.1.1.1	基本原理	( 39 )
4.1.1.2	Michelson干涉仪	( 39 )
4.1.1.3	Mach-Zehnder干涉仪	( 39 )
4.1.1.4	Sagnac干涉仪	( 40 )
4.1.1.5	Fabry-Perot干涉仪	( 40 )
4.1.1.6	干涉仪灵敏度	( 41 )
4.1.2	光纤强度干涉仪	( 41 )
4.1.3	光纤传感器中的偏振	( 42 )
§ 4.2	相位与强度的检测	( 44 )
4.2.1	相位检测	( 44 )
4.2.2	零差检测应用	( 47 )
4.2.3	相位噪声	( 48 )
4.2.4	振幅噪声	( 48 )
4.2.5	伴生模与多模工作方式	( 49 )
4.2.6	锁相环工作方式	( 50 )
4.2.7	外差检测	( 50 )
4.2.8	参考文献	( 52 )
§ 4.3	集成光路 (IOCs)	( 52 )
第五章	光纤传感器及其元件	( 54 )
§ 5.1	相位调制型光纤传感器	( 54 )
5.1.1	概述	( 54 )
5.1.2	光纤声传感器	( 54 )
5.1.2.1	声压传感器	( 54 )
5.1.2.2	声压梯度传感器	( 57 )
5.1.3	光纤磁传感器	( 59 )
5.1.4	光纤电流传感器	( 60 )
5.1.5	光纤光声光谱仪	( 61 )
5.1.6	小结	( 61 )
5.1.7	参考文献	( 61 )
§ 5.2	强度调制型光纤传感器	( 62 )
5.2.1	概述	( 62 )
5.2.2	迅衰场光纤传感器	( 62 )
5.2.3	反射系数式光纤传感器	( 62 )
5.2.4	动栅式光纤传感器	( 63 )
5.2.5	微弯光纤传感器	( 64 )
5.2.6	参考文献	( 67 )
§ 5.3	光纤线加速度计	( 67 )

5.3.1	参考文献	( 69 )
§ 5.4	光纤旋转率传感器	( 69 )
5.4.1	引言	( 69 )
5.4.2	旋转率传感的方法	( 69 )
5.4.3	光学旋转率传感器的优点	( 70 )
5.4.4	真空中的Sagnac效应	( 70 )
5.4.5	介质中的Sagnac效应	( 71 )
5.4.6	Sagnac效应的量值	( 72 )
5.4.7	光学旋转率传感器的方法	( 72 )
5.4.8	光学旋转率传感器的基本极限	( 72 )
5.4.9	光纤旋转率传感器	( 73 )
5.4.10	光子散粒噪声极限	( 74 )
5.4.11	理想性能	( 74 )
5.4.12	非互易相移的测量	( 75 )
5.4.13	非互易相位调制的方法	( 75 )
5.4.14	开环与闭环的运行	( 77 )
5.4.15	光纤旋转率传感器存在的问题	( 77 )
5.4.16	集成光纤陀螺	( 78 )
5.4.17	光纤陀螺的性能	( 79 )
5.4.18	旋转率传感器小结	( 79 )
5.4.19	光纤传感器的一般性结论	( 79 )
5.4.20	参考文献	( 79 )
第六章	光纤传感器阵列与遥测系统	( 80 )
§ 6.1	光纤传感器阵列	( 80 )
6.1.1	光纤传感器阵列设计上的考虑	( 80 )
6.1.1.1	总体设计考虑	( 80 )
6.1.1.2	具体设计考虑	( 80 )
6.1.2	光纤传感器阵列的基本结构	( 80 )
6.1.3	光纤传感器阵列的技术指标分配	( 85 )
§ 6.2	光纤遥测系统	( 86 )
6.2.1	光纤遥测系统设计方案的选择	( 86 )
6.2.2	光纤遥测系统的基本结构形式	( 86 )
6.2.3	遥测系统的技术指标分配	( 87 )
6.2.3.1	脉冲上升时间的参数分配分析	( 87 )
6.2.3.2	光功率参数分配的分析	( 90 )
6.2.3.3	成本预算分析	( 91 )
6.2.4	光纤遥测系统的具体设计实例	( 91 )
§ 6.3	光纤传感器阵列的遥测传输线参数	( 92 )



6.3.1	传输线一般参数.....	( 92 )
6.3.2	传输线特殊参数.....	( 93 )
6.3.3	光纤的多路传输.....	( 94 )
6.3.4	连接器参数.....	( 95 )
§ 6.4	终端 (接收器) 的考虑.....	( 95 )
§ 6.5	小结.....	( 124 )
附录	光纤传感器术语汇编	

# 第一章 引 论

## § 1.1 背景

对增加通讯系统容量并降低单位信息费用的不断需求促使在世界范围内研制与敷设了数以百计的光波通讯系统。与有线电讯系统相比较,光纤传输系统运行时,其单位距离传输单位信息所需的能量较低,单位距离的信号衰减较小,具有更大的带宽以增加信道容量,电磁干扰较少,串音较低,防止秘密窃听的能力较好,电击危害较少;同时,重量轻,体积小,稀缺金属消耗较少等特点。这些优越性促进了光源,光纤,光缆和连接器以及光电探测器的改进。光纤数据中继传输系统是现成可购、随时可安装的设备。为了改进光学通讯系统的元部件,每年都要花费几亿美元。

在过去几年中,人们利用可得到的各种光学元件,在研制应用纤维光学的新型传感器方面已取得了显著进展。这些传感器能够检测声场、线加速度和转动加速度、电场、磁场和其它许多物理参量。这类传感器可调制光纤中光波的某些特征参量,如强度和相位。通常,相位调制需在检测前转换为强度调制。这种转换可以通过光学干涉仪来完成。通过光纤信号传输系统,可以在位于传感器(换能器、调制器)以外的地点遥测最终的信号(强度或相位信号)。光信号可以是模拟信号或分立信号形式,同时,该系统可以按光—电或电—光信号转换的方式工作,也可不以这种转换方式工作。本手册中阐述的光纤传感器可采用光纤传输系统,也可以采用电或电磁传输系统。即使在最简单的情况下,也即在相干光缆(coherent—fiber cable)中传递视场或图象时,光纤

束本身必然起着传感器的作用,因此,通过光纤实现光波接收的各方面问题也都必须考虑到。

## § 1.2 目的

这本光纤传感器手册旨在成为一份独立的文献以期为多种目的服务。它为理解构成纤维光学领域的概念,特别是为这些概念应用于光纤传感器提供了一个基本的背景情况。它描述了与光纤传感器有关的光纤性质、光纤制造、以及光源和光探测器的性质,重点则放在这些主要元件的设计考虑和有关的活接头和死接头、耦合器及光缆等方面。

为了探测某个物理参量,可以采用不同的方案来控制光波。这本手册中讨论了多种控制方案,包括干涉测量方法,偏振与调制方法等。通过零差和外差探测方法,讨论了强度和相位调制问题,介绍了集成光路并着重介绍了它们的制造和工作原理。描述了各种不同类型光纤传感器的设计及其运行,其中包括强度调制和相位调制传感器,旋转率传感器及加速度计。所讨论的器件有用于水下听音器、磁强计和地震检波器的光纤传感器(换能器或调制器)。

在大多数光纤传感器和传感阵列的应用中,需要在各种不同的距离上遥测被传的数据,因此手册中讨论了各种光纤传感器阵列和遥测方案,给出了涉及信号上升时间和功率分配概算的数据资料,并简要讨论了遥测系统的总体设计考虑。

## § 1.3 各章内容简介

在第一章的简短介绍之后,第二章主要阐述光纤传感器的基本元件,即光纤本身的性质。电磁波(光波)依据波动方程在光纤

中的传播；光波在进出光纤的耦合；吸收、泄漏和散射造成的功率损耗等问题；均在该章作了较详细的讨论。光纤的各种性质，其基本结构与局限性，包括全内反射，临界反射角和数值孔径的基本概念，也在该章中进行了讨论。此外，介绍了模式传播、折射率沿剖面分布及偏振的概念，概括了光纤制造的各种方法，包括几种控制光纤的方法。还讨论了如何使光纤获得所期望的折射率、尺寸、机械强度及纯度等问题。在第二章的最后，相当详细地讨论了各种光源的特性，以使读者了解这些光源在光纤传感器方面的用途。该章以讨论光电探测器的特性和局限性而结束，着重讨论了它们在光纤传感器输出信号上的用途及重要性。

第三章接着讨论了把光纤传感器的输入端和输出端分别连接到电源或光源、光电探测器或显示器件上的各种手段。传感器可通过各种类型的活接头和死接头、耦合器、混合器而与光纤或光缆相连接。光纤活接头和死接头主要用来连接光纤和光缆，耦合器则用于一个光源与多根光纤的连结（分支），混合器则用来使多根光纤耦合到一个光电探测器上（聚束）。

不了解光波可能发生各种作用和光波间的相互作用，就不能很好地理解光纤传感器的运行。这类相互作用有很多是感知物理参量的基础。第四章讨论了光波的特性，包括干

涉特性、偏振特性、与零差检测及外差检测有关的强度调制特性和相位调制特性。第四章以用于集成光路的光波控制技术作为结束。

第五章将主要注意力从光纤传感器工作的一般原理及技术转向，阐述传感器本身及其元件。作为光纤传感器应用的实例，讨论了强度调制传感器，应用于诸如水下听音器和磁强计的相位调制传感器，转动传感器，加速度计，以及地震检波器。

第六章涉及到由光纤传感器组配成的传感器阵列，以及遥测到其它地点的传感器阵列的输出数据；深入讨论了设计的选择方案，基本结构形式，信号上升时间、功率及经费预算，光纤阵列及遥测系统的具体结构形式，以及与光纤传感器有关的光源、传输线和终端。

各章最后都列出了有关参考文献。附录则是关于纤维光学领域中的术语和定义的一个权威性汇编，着重于用于描述光纤传感器的设计、制造和运行的那些术语，并对本手册中使用的术语给予了特别注意。与光纤传感器及其工作原理和基础理论有关的论题和概念也编入在术语汇编中，这样，在讨论到主要论题时，读者不致因太多的细节而分散精力。例如，有关色散，麦克斯韦方程，调制，偏振，反射系数，透射系数以及各种光纤传感器和干涉仪的概念都已在术语汇编中加以说明。

（上接79页）

- J. Wittman, Appl. Opt. 18, 2096(1979).  
27. I.R.Kaminow, J.Quant. Elect. Q.E.-17, 15 (1981).  
28. D.M.Shupe, Appl. Opt. 19, 654(1980).  
29. E.C.Kintner, Opt. Lett. 6, 154(1981).  
30. K.Bohm, K.Petermann and E.Weidel, Opt. Lett. 7, 180(1982).  
31. S.Ezekiel, J.L.Davis and R.Hellwarth, Proc. of International Conf. on Fiberoptic

- Rotation Sensors, M.I.T. (Nov. 1981), Springer-Verlag(to be published).  
32. R.Goldstein and W.C.Ross, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 157, 122(1978).  
33. M.N.McLandrich and H.F.Rast, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 157, 122(1978).  
34. M.Papuchon and C.Puech, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 157, 218(1978).

## 第二章 光纤传感器元件

### § 2.1 光纤的性能

本章详细讨论光纤的基本性质，重点是在光纤传感器技术中起重要作用的一些概念问题。如图2.1所示，光纤的结构很简单。它通常是由玻璃或塑料包复的直径很细的若干层圆柱体构成，中心的一个圆柱体称做纤芯，由一种玻璃或塑料制成。围绕着纤芯的一个圆柱形外壳称做包层，它的材料通常是与纤芯材料稍有不同的玻璃或塑料。最后，在包层外面通常有一层外护套。光纤的导光能力取决于纤芯和包层的性质，光纤的机械强度则由塑料外护套来保持。

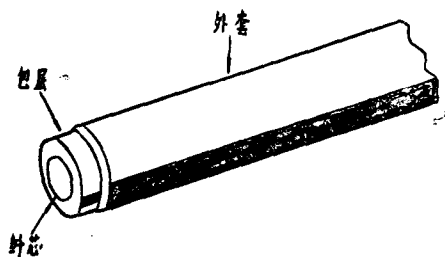


图2.1 光纤的基本结构

#### 2.1.1 设计指标(design objectives)

我们用图2.2所示的简单系统来阐述研制性能良好的光纤时所要考虑的一些设计指标。该系统有一个脉冲调制光源。左边的输入信号表示信息，它施加在光束上(调制)，光从光源出来后，由一个透镜聚焦至光纤的一端。光经过光纤从另一端出来，被第二个透镜聚焦到光探测器上。

以下讨论光纤的主要设计指标。第一个主要设计指标是要求最大数量的可用光被耦合进光纤芯，只有在光纤芯里沿着光纤传播的光才有较低的功率损耗。为了使尽可能多

的光传递进入纤芯，必须尽可能增大光纤的数值孔径(NA)。数值孔径是对图2.2所示简单系统的行为有着强烈影响的四个重要光纤参数之一。在其它三个参数引入之后，再对每个参数进行较为详细的讨论。

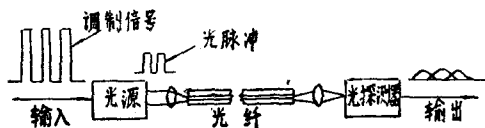


图2.2 基本光纤链

第二个光纤设计指标是光束从输入端通过纤芯到光纤输出端时，要求光束的光损耗减到最低。光损耗被称做衰减(功率损耗)率，通常用光纤每公里的dB(分贝)数来表示。

第三个光纤设计指标是尽可能增大光纤的信息承载容量。输入光纤的可以是强度连续变化的光束，或是图2.2中所示的一组轮廓清晰的光脉冲。当光脉冲通过光纤传播时，其振幅因衰减而降低。此外，由于将讨论的许多其它影响，单脉冲可也可展宽(扩展)。如果单脉冲变得太宽，它们将在时间和空间二方面都发生互相重叠或完全重合。如果这种情况发生，原来施加在光束上的信息就会丧失。在光纤中产生的脉冲展宽称做色散。该参数限制了光纤传输的信息承载容量(信号率)。

第四个设计指标是当开始拉制光纤时要尽可能增大其强度，并使其在成缆或用于传感器及其它应用时，仍能保持此强度。

在较详细地研究这些和其它光纤设计指标以前，将讨论光在光纤中传播的基本理论，首先从光线在分层介质中的传播开始。光线概念是一种方便的近似方法，可用于导

出其它重要概念，诸如全内反射和光线的收集。然而，要进一步扩展光传播的理论，就必须考虑光是一种电磁波现象，以及光纤是一个圆柱形的介电波导。有了这些，就有可能发展一个柱波导所容许的电磁传播模式的概念和引入经常遇到的光纤波导V参数（V值）。对于某种特定应用，此参数是选择一种合适的光纤时必须考虑到的。

根据光传播的光线理论，如图2.3所示，光束从下面以 $\theta_1$ 角入射到两个透明介质间的界面上。当 $\theta_1$ 大时，部份入射光束进入上部介质，部份被反射。它们的相对强度取决于两种介质的折射率。介质折射率定义为光在真空中的速度与光在介质中的速度之比。介质的折射率越高，光在介质中的传输越慢。图2.3中 $n_1$ 表示介质1的折射率， $n_2$ 表示介质2的折射率。

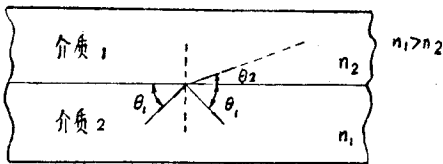


图2.3 光波从高折射率介质向低折射率介质传输时在界面上的反射和折射

这些折射率也决定了透射进入介质2的光束方向，也即，这两个介质的折射率决定了图2.3中的 $\theta_2$ 角。光在一个界面上折射的Snell定律预示了角 $\theta_1$ 的余弦与角 $\theta_2$ 的余弦之比等于 $n_2/n_1$ ，因此也等于速度之比 $v_1/v_2$ 。如图2.3所见，如果光在介质1中的传播速度比在介质2中的速度慢，则角 $\theta_1$ 大于角 $\theta_2$ ，当光进入介质2时将折向界面。光的反射角等于入射角。这是熟知的折射反射定律（Snell定律）对光线处理波现象的应用之一。

角 $\theta_1$ 逐步减小，得到图2.4的结果。光线从左边以较大的角 $\theta_2$ 入射到两种介质的界面上， $n_1 > n_2$ 。在这里既存在一束折射光，

也存在一束反射光，从能量守恒观点来看，二者的能量之和等于入射光束的能量。

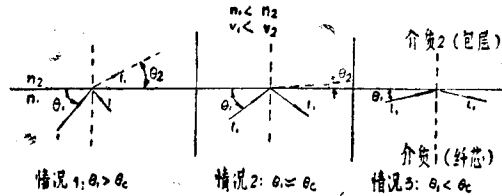


图2.4 光线入射角大于、等于或小于临界角时界面上发生的内反射

当角 $\theta_1$ 减小时，进入介质2的折射光束进一步弯向界面，直到图2.4中间所示的角 $\theta_2$ 为零。同时进入介质2的光的强度逐步减弱，当角 $\theta_2$ 为零时光强也为零；这样反射光强度就接近于入射光强。对应于 $\theta_2 = 0$ 的极限值的 $\theta_1$ 定义为临界角 $\theta_c$ 。在这条件时 $\cos\theta_2$ 等于1，则临界角 $\theta_c$ 由下式确定：

$$\theta_c = \cos^{-1} n_2/n_1 \quad (2.1)$$

如图2.4左边所示，对等于或小于临界角 $\theta_c$ 的所有角 $\theta_1$ 的值，入射光线将全反射，且能量将不透射进入介质2。应该强调，只是当入射到介质1中的光速小于介质2中的光速时，也即当折射率 $n_1$ 大于折射率 $n_2$ 时，在界面上才发生全内反射现象。例如，假设光从水中入射到水和空气的界面上，光在水中的速度约为 $2.25 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ ，在空气中的光速为 $3.00 \times 10^8 \text{m/s}$ 。因而，水的折射率是1.33，从水到空气界面上的临界角约为 $41^\circ$ 。所有以等于或小于 $41^\circ$ 角入射到水—空气界面上的光线将发生全内反射。

全内反射现象是光纤的工作基础。光纤芯材料的折射率必须略大于周围包层的折射率。图2.5表示了以一个等于临界角的角度在纤芯中传播的情况。这样的光线每当入射到纤芯—包层界面上时，就被全内反射，以致收集在纤芯里，这个光线以及任何其它 $\theta_1 < \theta_c$ 的光线将保留在纤芯里直到到达光纤

端。理想情况是光线无衰减地通过光纤芯传播。

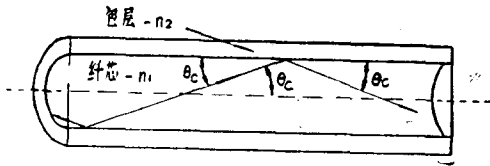


图2.5 临界角 $\theta_c$ 的全内反射阶跃折射率光纤

控制包层折射率，使其略小于纤芯折射率，因而引入一个 $\Delta$ 量是合适的，该量是这两个折射率的相对折射率差，由下式确定：

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (2.2)$$

从等式 (2.1) 和 (2.2)，对于一个子午光线（在包含纤芯中心轴的平面内传播的光线临界角的余弦由下式确定：

$$\cos^2 \theta_c = n_2 / n_1 = 1 - \Delta \quad (2.3)$$

$$\cos \theta_c = 1 - 2\Delta + \Delta^2 \quad (2.4)$$

利用勾股 (Pythagorean) 定理：

$$\sin^2 \theta_c = 1 - \cos^2 \theta_c = 2\Delta - \Delta^2 \quad (2.5)$$

$$\sin \theta_c = (2\Delta - \Delta^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

通常对光纤来说， $\Delta^2 \ll 2\Delta$ ，所以：

$$\sin \theta_c = (2\Delta)^{1/2} \quad (2.7)$$

典型地，包层折射率 $n_2$ 为1.44，而纤芯折射率 $n_1$ 可以为1.46。在此情况下 $\Delta = 0.14$ ， $2\Delta = 0.28$ 和 $\Delta^2 = 0.0002$ ，或 $2\Delta$ 的1.4%，对这个数值来说近似是有效的。临界角通常是几度，因此用等式 (2.7) 给出的正弦值去计算临界角是足够精确的。

如上所述，在纤芯里以等于或小于 $\theta_c$ 角传播的光线将被收集在纤芯里。以大于 $\theta_c$ 的角 $\theta_1$ 传播的光线每次遇到纤芯一包层界面时，部份光线透射进入包层。当 $\theta_1 > \theta_c$ 的光线通过纤芯传播时，它的强度急速下降，因而不能在光纤里长距离传播。

有两类不同的折射率分布的光纤得到广

泛应用。一是阶跃折射率光纤。图2.6左部所示为阶跃折射率光纤折射率与纤芯中心到包层外边的距离的函数关系。在纤芯内，折射率不随半径而变化，即有一个常数值 $n_1$ 。在纤芯一包层界面上折射率从 $n_1$ 阶梯式地降低到 $n_2$ ，并在整个包层内保持此 $n_2$ 不变。另一类光纤是渐变折射率光纤，它的折射率分布示于图2.6右部。在这类光纤中，折射率 $n_1$ 随偏离纤芯中心径向距离的增大而减小。从纤芯一包层界面到包层外表面之间的折射率 $n_2$ 不变。

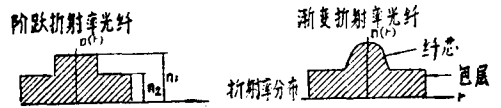


图2.6 柱波导 (光纤) 的折射率分布

图2.7左下方所示为在阶跃折射率光纤内以最小光功率损耗传播的典型光纤。在纤芯内，有一个中心光线平行于光纤轴传播。还有一些子午光线在包含光纤中心轴的平面内传播。它们在纤芯中行进，每当遇到纤芯一包层界面，就发生前向反射和后向反射。

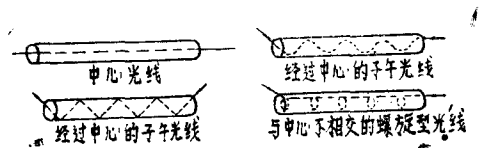


图2.7 光纤芯里不同方向的光线

图2.7右上方所示为渐变折射率光纤中的子午光线。由于折射率从纤芯中心到纤芯一包层界面的连续变化，这些连续地向后和向前弯曲的光线不是沿直线前进，而是沿曲线传播，不过，它们总是在包含光纤中心轴的平面内传播。

图2.7右下方所示为沿着与光纤中心轴不相交的螺旋线传播的另外一些光线。阶跃型光纤中还存在另外一些所谓斜光线的类

似光线。螺旋光线和斜光线比子午光线要多得多,光线在光纤中传播时,它们是极其重要的。它们对能量和信息从光纤输入端至输出端的传输起了决定性作用。但是,正如图2.7左下图所见,对螺旋光线和斜光线传播的几何描述远比子午光线困难。然而,为了简化光纤中的光线传播理论,这个描述仅限于考虑子午光线。该方法对定义和理解光进入光纤,在光纤内传播和从光纤出来的基本参数提供了一个充分的背景材料。

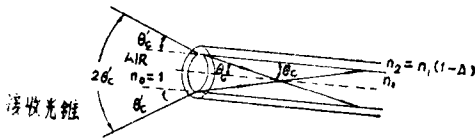


图2.8 阶跃折射率光纤的接收光锥体  
 $(N.A.) = \sin\theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$

光纤的数值孔径(NA)定义为光锥半角的正弦。光是从该角从空气入射到光纤输入端面,如图2.8 所见,这样,在光锥内所有光线一进入光纤就被封闭在纤芯里。在光纤端面的纤芯-空气横向界面处(空气折射率 $n_0$ 等于1),有另一个临界角 $\theta_c'$ ,凡包含在半光锥角 $\theta_c'$ 内的光线都被收集在光纤里。应用Snell定理的正弦形式,因为 $\theta_c'$ 是锥棱和入射面(光纤端面)法线间的夹角,所以纤芯中 $\sin\theta_c$ 与空气中 $\sin\theta_c'$ 之比等于纤芯折射率 $n_1$ 除以空气折射率 $n_0$ 。由于 $n_0 = 1$ ,因此:

$$(\sin\theta_c)/n_0 = \sin\theta_c' = (\sin\theta_c')/n_1 \quad (2.8)$$

在光纤内纤芯-包层界面处,看到方程(2.3) $\cos\theta_c = n_2/n_1$ 。联立方程(2.3)和(2.8)并使用勾股定理:

$$\sin^2\theta_c + \cos^2\theta_c = 1 = (\sin^2\theta_c')/n_1^2 + n_2^2/n_1^2 \quad (2.9)$$

变换:

$$(\sin^2\theta_c')/n_1^2 = 1 - n_2^2/n_1^2 = (n_1^2 -$$

$$n_2^2)/n_1^2 \quad (2.10)$$

根据定义,数值孔径等于 $\sin\theta_c$ :

$$N.A. = \sin\theta_c' = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.11)$$

如上在方程(2.2)中所定义:

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (2.12)$$

对 $n_2$ 求解:

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \quad (2.13)$$

在方程(2.11)里用方程(2.13)替代并化简:

$$N.A. = n_1(2\Delta - \Delta^2)^{1/2} \quad (2.14)$$

光纤通常是 $\Delta_2 \ll 2\Delta$ , 所以:

$$N.A. = n_1(2\Delta)^{1/2} \approx [2n_1(n_1 - n_2)]^{1/2} \quad (2.15)$$

方程(2.15)表示,收集在纤芯里的光的传播量正比于纤芯折射率和纤芯-包层折射率差的乘积的平方根。

光线在光纤中传播的这些不同概念的实例示于图2.9和下表:

$\Delta$	$\theta_c(\text{rad})$	$\theta_c(\text{deg})$	$\theta_c(\text{rad})$	$\theta_c(\text{deg})$
0.010	0.142	8.13	0.214	12.24
0.001	0.045	2.56	0.067	3.85

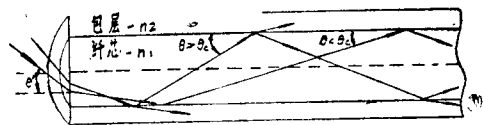


图2.9 在阶跃折射率光纤芯中的光线

图2.9 中有两条光线,一条光线以入射角 $\theta_c'$ 从空气进入光纤-包层界面相交时,与界面的相交角小于临界角 $\theta_c$ 。此时该光线将被全内反射并封闭在纤芯里,因此它通过光纤传播的损耗最小。第二条光线是以较大的角从空气入射,该光线与纤芯-包层界面以

大于 $\theta_c$ 的角相交。在每次反射时，部份光反射回纤芯，部份光则透射进入包层。这样的光线受到强烈衰减，所以当它沿光纤芯传播时强度迅速降低。

公式(2.8)，(2.11)和(2.15)表示当 $\Delta^2 \ll 2\Delta$ 时，封闭在纤芯里的光在纤芯—包层界面上发生内反射的临界角(弧度)约等于 $(2\Delta)^{1/2}$ ，而相当于从空气进入光纤的临界角 $\theta_c'$ 等于 $n_1(2\Delta)^{1/2}$ 。正如上述表中所指出 $\Delta=0.01$ ，则在纤芯—包层界面上 $\theta_c=0.14$ 弧度或约 $8^\circ$ 。假设纤芯折射率 $n_1$ 等于1.5，光从空气进入光纤并与光轴成最大的夹角 $\theta_c'$ ，为 $\theta_c=0.21$ 弧度或约 $12^\circ$ 。全顶角为 $24^\circ$ 的光锥可以使光线从空气进入光纤并全部被封闭在纤芯里。对 $\Delta=0.01$ ， $\theta_c=0.045$ 弧度或约为 $2.6^\circ$ 。为了使光线封闭在光纤里，从空气进入光纤的光线必须是在全顶角为 $2\theta_c'$ ，或约 $8^\circ$ 的光锥内。

### 2.1.2 光波传播

光线理论是光在约束介质中传播的近似表述。它只适用于和波导截面相比较小的波长。对圆柱光纤，所谓“小”只是与纤芯半径相比较而言。He—Ne光的波长是 $0.63\mu\text{m}$ ，光线理论可以很好地适用于纤芯半径大于 $25\mu\text{m}$ 的光纤。对纤芯半径为 $2\mu\text{m}$ 的波导，光线理论是一个很差的近似理论，因为在这种情况下波长只有纤芯半径的 $1/3$ 。因为，采用电磁波理论可以很好地描述光的传播。

麦克斯韦方程正确地描述了电场和磁场在线性、均匀、各向同性的无源介质中的时空相互依赖关系。可以从这些方程推导出电磁波方程的一般形式。波方程描述了在空间坐标和时间坐标上的电磁波的传播。如果无源介质是一种非导体(介电材料)，可以把波方程简化，用以描述光纤中的传播。

光纤是柱状介电波导。为了描述光在它里面的传播，使用图2.10所示惯用的柱坐标系是适宜的。

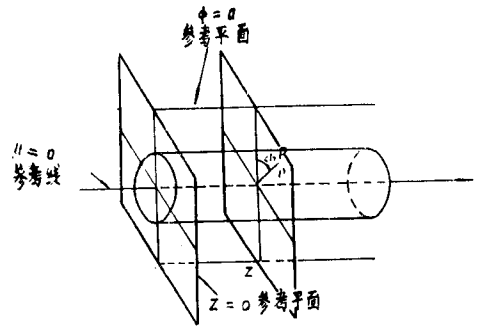


图2.10 用于表示光波在光纤中传播的柱坐标系：由 $\rho$  $\phi$ 来确定点P

把对称波导的中心轴取做坐标系统的z轴。z坐标是离开参考面 $z_0(z=0)$ 的距离。由径向坐标P(离开z轴径向距离)，方位角 $\phi$ (从任意参考面( $\phi=0$ )测量)和z值确定光纤中的一个空间点的位置。该坐标系统是通常熟知的柱坐标系。

在折射率只依赖于径向坐标的简单情况下，从麦克斯韦方程推导出波动方程的电场解表示为如下两个函数的乘积：

$$E(\rho, \phi, z, t) = E(\rho, \phi) e^{-i(\omega t - z\beta)} \quad (2.16)$$

$$= E(\rho, \phi) \sin(\omega t - \beta z) \quad (2.17)$$

t是以参考时间 $t_0$ 为原点的变量，第一项是振幅因子 $E(\rho, \phi)$ ，它取决于径向向量 $\rho$ 和方位角坐标 $\phi$ 。第二项可表示为复指数函数或正弦函数，它表明电场在时间域和空间域上都是正弦波。角频率 $\omega = 2\pi f$ ，式中f是光频率。 $\beta$ 是传播常数，定义为折射率n和波矢量k的z分量的乘积，在这里 $k\pi = 2\lambda/\lambda_0$ ， $\lambda_0$ 是频率为f的光在真空中的波长。在介电材料中光能量的传输形式是沿波导轴向传播。k的绝对值也称为波数。

### 2.1.3 传播模式

当在纤芯—包层界面上引入边界条件时，只允许存在波动方程的特定(分立)解。



只有这些值才能存在，它们中的每一个都由  $i$ , 振幅因子  $E_i(\rho, \phi)$  值以及与传播常数  $(\beta_i)$  相应的分立值所确定。沿波导轴的每个许可波（即模式）的传播速度由下标所表明的一个特定波的传播常数  $\beta_i$  与角频率之比来确定。因此，各种允许解代表了有分立振幅的分立波，这些波中每一个波都沿着波导轴以分立速度传播。

为了描述光在阶跃折射率光纤中的传播特征，使用这个通常称为波导  $V$  参数 ( $V$  值) 的参数是适宜的，它由下式确定：

$$V = 2\pi a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda_0 \quad (2.18)$$

从方程(2.11)得：

$$V = 2\pi a(N.A.) / \lambda_0 \quad (2.19)$$

式中  $a$  是纤芯半径； $N.A.$  是光纤数值孔径，它是纤芯和包层的折射率的函数； $\lambda_0$  是真空中入射光的波长。（真空中的光波长几乎与空气中的光波长相等）。这些是描述光在阶跃折射率光纤中传播所需要的主要参数。可以把  $V$  参数指定为光纤的光传播特征参数。 $V$  值越大，光纤所能支持的也即能容许传播的不同模式的分立波也越多。

从光纤中光传播的波理论所能得到的预测或结论，可以概括成图解形式。如同所述只存在波动方程的特定分立解，这些解相应于以特定速度沿波导轴传播的分立波。在图2.11中图示了这些特定模式的一些特征值。曲线表示传播常数  $\beta$  的允许值与  $V$  参数 ( $V$  值) 的函数关系。每条曲线对应于波动方程的一个特定允许解。该图表明：对不同解的  $\beta$  允许值是介于  $k_{n1}$  和  $k_{n2}$  之间， $k_{n1}$  和  $k_{n2}$  分别对应于在纤芯中的波数和在包层中的波数。因为  $z$  方向上的波 (相) 速由  $\omega/\beta$  确定，所以图2.11中曲线也表明相速与波导  $V$  参数 ( $V$  值) 的函数关系。当波导  $V$  参数增加时，可以看到由不同曲线所代表的

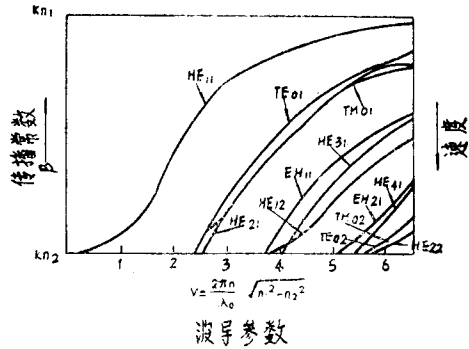


图2.11 传播常数  $\beta$  和不同模式的速度与  $V$  参数的函数关系。

允许波(模)的速度变化范围是从包层中的较高速度(下面的纵坐标, 较高值), 到纤芯里的较低速度(上面的纵坐标, 较低值)。因此图2.11里每条曲线都对应用于应用在介电波导上的波动方程的一个允许解。波导的  $V$  参数随纤芯半径和数值孔径的增加而增加, 随波长的增加而减小。  $V$  参数增加, 所允许的模式数增加。  $V$  小于2.40时, 只允许一个波或模存在, 在图2.12中是  $HE_{11}$  模。  $V$  在2.4~3.8范围内, 允许有四个模式存在, 它们是  $HE_{11}$ ,  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$ , 和  $HE_{21}$ 。这些特定的字母数字符号对电磁波导来说是标准的。选择它们是因为对电场和磁场而言空间变化的特定形式与波动方程的特定解是相联系的。当  $V$  增加时, 允许更多的模式存在。

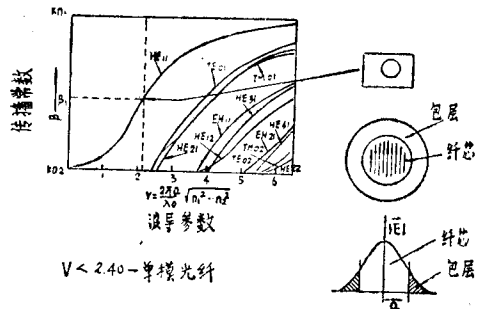


图2.12 光纤只提供第一个模  $HE_{11}$  时光波的电场