

光纤通信技术丛书

光纤测试



白崇恩 刘有信 编著

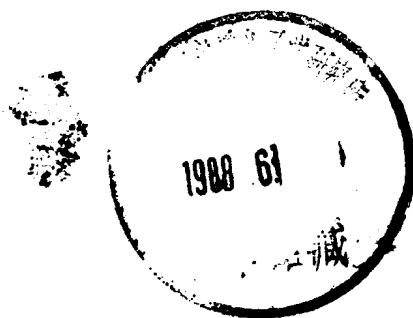
人



73.4612
光纤通信技术丛书

光 纤 测 试

白崇恩 刘有信 编著



人民邮电出版社

8810469

0022/05

内 容 提 要

在当前光纤通信进入推广应用的阶段,迫切要求光纤测试实用化、标准化。本书从实用出发,以 CCITT 建议的标准方法为基本内容,详细地介绍了光纤衰减测量、色散测量、截止波长的测量、模场直径的测量、单模光纤偏振特性的测量、折射率分布的测量、最大理论数值孔径的测量以及几何尺寸参数的测量。本书在介绍每种方法的同时,适当地阐述了方法的原理及其理论根据,这些对学习光纤测试技术均有实用参考价值。

本书可供从事光纤通信科研、设计、制造、施工和教学人员参考。

光纤通信技术丛书

光 纤 测 试

白崇恩 刘有信 编著

责任编辑 李树岭

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1988 年 2 月第一版

印张: 7²⁴/₃₂ 页数: 124 1988 年 2 月北京第 1 次印刷

字数: 174 千字 印数: 3 000 册

ISBN 7115-03487-7/TN

定价: 1.80 元

出版者的话

为了普及光纤通信技术，为我国通信现代化服务，我们组织编写了一套“光纤通信技术丛书”，陆续出版。

这套丛书准备结合国内光纤通信发展现状，介绍光纤光缆及其测试技术、有源无源光电器件、光端机、光纤通信系统及其测试等。丛书的读者对象主要是从事光纤通信维护、施工、研制生产人员和有关专业的院校师生。

我们殷切希望广大读者对这套丛书提出意见和建议，帮助我们做好丛书的编撰工作。

序 言

光纤和激光技术是当代新技术之一。光纤通信发展迅速，一些国家已在全面推广应用，国内近几年来技术上也有很大的突破，工程应用渐趋成熟，开始进入实用阶段，可以预见不久的将来，光纤和激光技术在通信领域的应用将使有线通信状况发生划时代的变化。此外，光纤传感在传感器领域中也得到独特的应用，广泛地受到重视，人们正以极大的兴趣在从事开发研究。

光纤测试是对光纤特性的实验验证，对光纤特性要求的检验和评价。这无论是在光纤传输理论的研究，或为纤维设计和工艺提供反馈信息，以及生产过程的质量控制、产品检验、敷设安装、线路维护等都是十分重要必须掌握的基本技术。

但是，光纤测试作为一门新技术，测试原理、测试方法，甚至测试内容、参数定义，并不都是成熟的，而且因为光纤特性的敏感性，使光纤呈现的特性除了与纤维本身的结构有关以外，外部因素的影响非常敏感。测试中，光源稳定、发射技术、耦合方式、测试条件，样品处理和检测信息的处理等等对光纤呈现的特性都有密切的关系。因此如何精确而可重复地测定光纤诸参数也是一个重要问题。随着实用化的发展还迫切要求测试方法、测试设备的仪表化、标准化。近十年来国内外专家对光纤测试技术的研究，发表了大量的文章和报道，提出众多的方法，国际电报电话咨询委员会(CCITT)也设立了专门的课题进行专题研究，为了适应实用发展形势的迫切要求，根据各国的建议，经过反复充分的讨论，推荐了一些实用而可靠的方

8810469

· 1 ·

法作为统一标准的测试方法，形成了 CCITT-G.651 和 G.652 建议书。其中多模光纤的参数测量方法基本上是成熟了的，但是，单模光纤方面还没有达到完全成熟，有的定义和方法迄今尚在研究中。尤其是当前光纤工艺技术突破性发展，质量不断提高，随着光纤应用领域的扩大，新结构新类型不断地出现，光纤测试技术还有许多有待研究的问题。

本书是为从事光纤通信研究、制造、施工和维护的工程技术人员以及院校相关专业师生介绍光纤测试技术而编写的，也可供从事光纤传感、光纤应用开发研究的技术人员参考。

本书从实用出发，因此内容上以目前国际上认可或基本上认可的方法为主，也就是说根据目前 CCITT 建议的测试方法为基本内容，此外也有少数章节介绍一般常用的或有实用价值的方法，目的在于提供参考，了解动向。

章节的编写基本上是按参数的测量来分立的，每个参数都有几种测试方法，读者应主要掌握 CCITT 建议的基准测试方法(RTM)和替代测试方法(ATM)，如表 1 所列。所谓基准测试法就是严格按照光纤某一给定特性的定义进行的测量方法；替代测试法是在某种意义上与给定特性的定义相一致的测量方法。

光纤测量是对光纤某一特性的定量测定。但是测量技术，任何一种参数的测量方法，实际上都是一个包括发射(E/O)和接收(O/E)的光纤传输系统，所以虽然是介绍某一特性的测量，而测量方法都涉及光纤的传输理论，还需具有光电器件、激光技术和电子技术的基础。这些基础内容已有较多较好著作可以参考，本书一般都不详述。有些理论公式为了避免烦琐的数学推导，或作附录介绍或者注明出处，需要深入研究的读者可参看书末的附录和所列的参考资料。

表 1 CCITT 建议的测试方法

参 数	RTM	ATM
衰 减 系 数	切 断 法	插入损耗法 背向散射法
基 带 响 应	时 域 法	
总色散系数	频 域 法	
	相 移 法	
	脉冲时延法	
截 止 波 长	传导功率法	模场直径与波长关系法
折射率分布	折射近场法	近 场 法
最大理论数值孔径	折射近场法	远 场 法
几 何 尺 寸	折射近场法	近 场 法
模 场 直 径*	传输场法和横向偏移法	

* 尚未挑选出 RTM

本书第一、二、三、四章及第九、十、十一章是由白崇恩同志执笔撰写，第五、六、七、八章是由刘有信同志执笔撰写，最后由白崇恩同志复校全文。

由于作者水平有限，错误之处难免，欢迎读者批评指正。

作者

于武汉邮电科学研究院

1985 年 11 月

目 录

第一章 基本概念

- 1.1 光纤的结构及光的传播 (1)
- 1.2 衰减 (4)
- 1.3 带宽 (5)
- 1.4 光纤的特性要求 (8)

第二章 衰减测量

- 2.1 衰减和衰减系数的定义 (11)
- 2.2 衰减测量注入条件 (12)
- 2.3 切断法 (17)
- 2.4 插入损耗法 (19)
- 2.5 背向散射法 (23)
- 2.6 光纤衰减的现场测试 (28)

第三章 光时域反射计

- 3.1 背向瑞利散射信号的特点 (40)
- 3.2 方向耦合器 (44)
- 3.3 信号处理 (48)
- 3.4 偏振光时域反射计 (54)
- 3.5 相干式光时域反射计 (56)

第四章 基带测量

- 4.1 注入条件 (61)
- 4.2 时域法 (63)
- 4.3 频域法 (69)
- 4.4 长距离光纤系统的带宽 (72)

4.5 光纤带宽的现场测试.....	(73)
4.5.1 单盘光缆的带宽测试.....	(74)
4.5.2 中继段光缆线路总带宽的测试.....	(80)

第五章 色散的测量

5.1 色散的概念	(82)
5.1.1 材料色散.....	(84)
5.1.2 波导色散.....	(85)
5.1.3 单模光纤的色散.....	(85)
5.2 色散的测量	(86)
5.2.1 相移法.....	(87)
5.2.2 脉冲时延法.....	(98)

第六章 截止波长的测量

6.1 截止波长的物理概念	(118)
6.2 截止波长的测量	(119)
6.2.1 传导功率法.....	(119)
6.2.2 模场直径法.....	(124)
6.2.3 偏振分析法.....	(127)
6.2.4 折射功率法.....	(130)
6.2.5 远场法	(134)

第七章 模场直径的测量

7.1 单模光纤模场直径的物理概念	(139)
7.2 模场直径的测量	(139)
7.2.1 横向偏移法.....	(141)
7.2.2 传输场法.....	(148)
7.2.3 改变接收或注入数值孔径法.....	(157)

第八章 单模光纤偏振特性的测量

8.1 引言	(161)
8.2 单模光纤的偏振特性.....	(163)

8.2.1	单模光纤的双折射	(163)
8.2.2	偏振模色散	(167)
8.2.3	消光比	(168)
8.3	光纤拍长的测量	(169)
8.3.1	直接观察法	(169)
8.3.2	扭转法	(172)
8.3.3	逐段剪断法	(176)
8.3.4	偏振光时域反射计	(178)
8.4	单模光纤偏振模色散的测量	(184)
8.4.1	传输功率法	(184)
8.4.2	相移法	(186)
8.4.3	干涉法	(187)
第九章 折射率分布的测量		
9.1	折射近场法	(192)
9.2	近场扫描法	(198)
9.3	反射法	(201)
第十章 最大理论数值孔径的测量		
10.1	最大理论数值孔径的定义	(203)
10.2	折射近场法	(207)
10.3	远场法	(208)
10.4	远场光斑法	(210)
第十一章 几何尺寸参数的测量		
11.1	折射近场法测几何尺寸参数	(212)
11.2	近场法测几何尺寸参数	(218)
11.3	四圆容差域法	(219)
附 录		
附录 1	任意折射率分布光纤的色散公式	(222)
附录 2	式(6.8)的推导	(224)

附录 3	式(7.4)的推导	(227)
附录 4	式(7.10)和式(7.11)的等效性证明	(229)
附录 5	式(8.12)的证明	(230)
附录 6	式(8.15)的证明	(231)
参考文献		(233)

第一章 基本概念

在介绍光纤测试之前，首先概述一下光纤的物理特性和传输特性，作为以后各章讨论的基础。由于这些内容属于光纤传输理论的范围，已有不少的专著可以参考，因此本章只直接引叙，不作详细推导。对于初学者，作为预备知识，得到一些基本概念，对以后各章的阅读是有帮助的。

1.1 光纤的结构及光的传播

光纤是一种介质波导。通常按其传播的模数分为多模光纤和单模光纤。多模光纤传播许多模式的光，它们在光纤中传播的途径如图 1.1 所示。图中 1，2，3 分别为纤芯、包层和涂敷层。包层的折射率比纤芯的折射率略低。图 1.1 (a) 所示的光纤叫做阶跃型光纤，因为折射率随半径的变化从包层到纤芯是突变的。因此进入光纤的入射角大于临界角的所有光线在纤芯——包层界面产生全反射，形成束缚在纤芯内的锯齿形传播途径，而进入光纤的入射角小于临界角的光线在界面将发生部分反射和部分折射进入包层。经过多次的反射结果使这些光线的能量受到损耗。涂敷层是一种塑性材料，它起保护作用。

在阶跃型光纤中传播的这些光线(模)，其传播途径是不同的，因此对传输的数字脉冲信号，不同的模将以不同的时间到

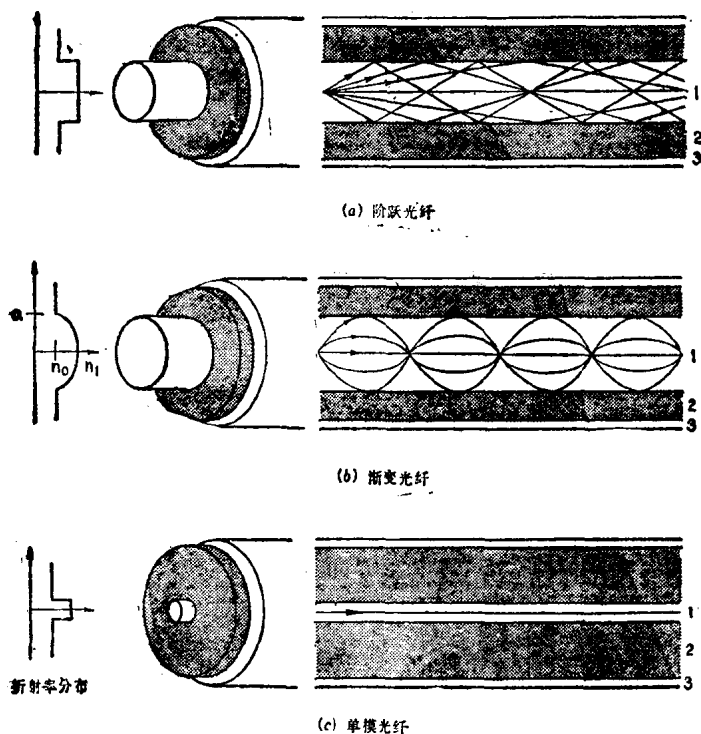


图 1.1 光纤的结构

达光纤的远端而引起脉冲的展宽，这就限制了数字信号所能传输的比特率。

如果采用如图 1.1 (b)所示的“渐变”型光纤，则不同的模可以得到接近相等的传播速度。因为这种光纤其折射率从中心沿径向的变化是渐变的，中心折射率最大，向外逐渐减小，在边缘处折射率最小。由于折射率沿径向各处不同，光纤在传播过程中的方向就要改变，好像自聚焦作用，因此不同的光线通过它们不同的传播途径，在一周期内沿轴向传播相等的距离，

也就是各模在一周期内的平均轴向速度相等。传播速度相等就能使脉冲展宽减小到百分之一或者更小。

折射率沿径向的分布一般表示为：

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

式中， a 是纤芯半径； r 为径向位置； α 是决定折射率分布形状的参数，通常叫做折射率分布指数或剖面指数， $\alpha = 2$ 和 $\alpha = \infty$ 分别为抛物线分布（图 1.1 (b)）和阶跃分布（图 1.1 (a)）。 Δ 为最大相对折射率差，即

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

式中， $n_1 = n(0)$ 和 $n_2 = n(a)$ 分别是纤芯中心折射率和包层折射率。

光纤的最大理论数值孔径为：

$$\text{N.A.} = [n_1^2 - n_2^2]^{\frac{1}{2}} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.3)$$

光纤的传导模的总数 N 大约等于^[1]：

$$N = \left[\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right] (n_1 k a)^2 \Delta = \left[\frac{\alpha}{2(\alpha + 2)} \right] V^2 \quad (1.4)$$

式中， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间的波数或相位常数， λ 为工作波长。

$$V = k a [n_1^2 - n_2^2]^{1/2} \quad (1.5)$$

是一个与光波频率成正比的结构参数，称为归一化频率。

减小纤芯半径 a 和(或) Δ ，归一化频率 V 可减小到下面的值^[1]：

$$V_c = 2.405 \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

这时，光纤将只有基模(HE_{11})传输，因此这种光纤就称为“单

模光纤”，见图 1.1 (c)。

1.2 衰 减

光波信号在沿光纤传输的过程中，将有能量的损失，或者说功率的损耗。产生损耗的原因是复杂的，包括本征的和非本征的。图 1.2 所示是典型的光纤衰减谱曲线。瑞利散射损耗及紫外和红外吸收损耗是本征损耗，它们是绝不可能消除的。据 1978 — 1982 年间的报道，光纤生产的水平对于 GeO_2 、 P_2O_5 、 SiO_2 纤芯的光纤最低损耗，已达到表 1.1 所列各值，所有这些损耗值都已在理论的最低范围内，接近本征值。

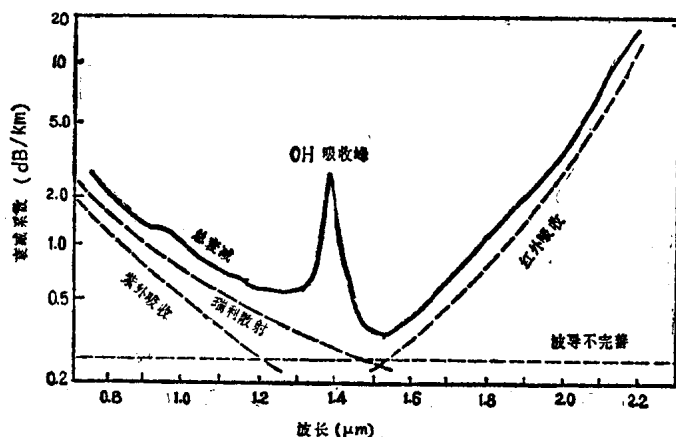


图 1.2 典型的光纤衰减谱曲线

除了本征损耗以外，由于波导结构不均匀如纤芯 - 包层界面的随机畸变；由于光纤套塑、成缆和温度变化引起光纤轴的微小起伏而产生微弯损耗。这些原因将使光纤的衰减比表 1.1

表 1.1

波 长 (nm)	多 模 光 纤 ($\Delta \approx 1\%$) (dB/km)	单模光纤 (dB/km)
850	2.12	1.8
1300	0.42	0.27
1550	0.23	0.16

所列最佳值要大 20 % 到 100 %。

另一重要的非本征损耗机理是杂质吸收。由玻璃中的水份引起的 OH 根吸收, 造成了光纤在波长 950 nm, 1240 nm 和 1390 nm 的损耗峰。如果纤芯的含水量保持低于十亿 ($=10^9$) 分之一, 则 OH 根吸收损耗也能做到很小。

过渡金属离子是另一种共同的和潜在的令人讨厌的杂质。

1.3 带 宽

在光纤通信系统中, 主要调制方式是脉冲调制。使得脉冲展宽的主要原因是模畸变和色散。色散包括材料色散和波导色散。各种色散在不同的情况下有不同的重要性。对于多模传输, 影响最大的是模畸变, 其次是材料色散, 而波导色散一般可以忽略; 对于单模传输, 一般是材料色散占主导地位, 波导色散比材料色散小两个数量级。

(1) 模畸变

多模传输时在同一波长下, 各传导模之间的群速度不同, 光脉冲到达终端受到时延畸变使脉冲展宽, 这就称为模畸变 (Modal distortion) 或模分散 (Modal dispersion)。

在式(1.1)中决定折射率分布形状的参数 α 有一个最佳值能使传导模的群速度接近相等。这个最佳值取决于玻璃组分和波长。选择最佳 α 值,给出最小的每单位长度脉冲响应均方根宽度 σ_m 为^[2]:

$$\sigma_m \approx 0.14 \Delta^2 \mu s / km \quad (1.7)$$

若 $\Delta = 1\%$, 则 $\sigma_m \approx 14 \text{ ps} / km$

通常理想的折射率剖面总是呈现出微扰的, 因此实际的 σ_m 要比式(1.7)预计的值要大。式(1.7)表明在最佳 α 下模畸变与相对折射率差的平方成正比, Δ 越大, 畸变越严重。但 Δ 不能太小, 因为从激发或数值孔径来看, Δ 应该大一些, 而且 Δ 小, 光纤转弯时辐射损耗大, 所以必须综合各方面的要求来选定 Δ 。

带宽 B 是根据光纤的基带响应下降到二分之一(-3 dB 光功率)点的频率来定义的, 一个近似的经验式是^[3]:

$$B(\text{GHz} \cdot \text{km}) \approx 169 / [\sigma(\text{ps} / \text{km})] \quad (1.8)$$

使 α 最佳减小模畸变, 但却解除了单模光纤所必要的完整的剖面, 甚至两个正交的偏振有稍微不同的群速度而发生双折射, 造成偏振模色散限制了单模光纤的带宽。

(2) 材料色散

材料色散是光纤材料(玻璃)的折射率随波长而变, 于是不同波长的群速度不同, 引起了色散(Chromatic dispersion)。

实际的光源并不是单色的, 具有一定的谱宽。因材料色散引起的脉冲展宽与光源谱宽成正比。多模渐变型光纤, 例如采用激光器(LD)作光源, 谱宽一般仅 $1 \sim 2 \text{ nm}$, 脉冲展宽主要是模畸变造成, 材料色散可以忽略, 但当光源为发光二极管(LED)时, 一般谱宽大约 $30 \sim 50 \text{ nm}$, 这就增加了材料色散的严重性, 这时材料色散与模畸变相比就不容忽视