

光纤光缆测试讲义

湖北凯乐新材料科技股份有限公司

二 00 二年六月

目 录

第一章 光纤连接.....	4
第一节 光耦合.....	4
一、光纤与光源耦合.....	4
二、光纤与光接收器的耦合.....	8
第二节 光纤连接.....	9
一、光纤连接方法.....	9
二、光纤连接损耗的初步分析.....	9
三、光纤的熔接.....	13
第二章 光纤尺寸参数测量.....	23
第一节 光纤尺寸参数定义.....	23
一、作用.....	23
二、定义.....	23
第二节 光纤几何尺寸参数测量方法.....	25
一、近场图像法.....	25
二、折射近场法.....	27
三、侧视法.....	30
四、机械法.....	32
五、传输或反射脉冲延迟法.....	33
六、光纤伸长量的测定.....	35
第三章 光纤带尺寸参数测量.....	38
第一节 光纤带结构.....	38
一、结构.....	38
二、类型.....	38
第二节 光纤带尺寸参数定义.....	39
一、定义.....	39
二、尺寸要求.....	39
第三节 光纤带尺寸参数测量.....	40
一、目视测量法.....	40
二、孔径规法.....	41
第四章 光纤传输特性和光学特性.....	42
第一节 光纤传输特性和光学特性测试目的.....	42
第二节 性能测量.....	42
一、衰减.....	42
二、色散.....	55
三、偏振模色散.....	65
四、截止波长.....	77
五、模场直径.....	83
六、有效面积.....	90
七、数值孔径.....	95

	八、光学连续性	97
	九、微弯敏感性	98
第五章	光纤机械性能	102
第一节	光纤机械性能测试的目的	102
第二节	测量方法	103
一、	光纤强度	104
二、	疲劳参数	111
三、	可剥性	115
四、	光纤的翘曲	117
第六章	光纤带机械性能	122
第一节	光纤带机械性能测试的目的	122
第二节	测量方法	122
一、	光纤带可分离性	122
二、	光纤带可剥离性	123
三、	光纤带抗扭转	124
四、	光纤带残余扭转	125
第七章	光纤的环境性能	126
第一节	光纤环境性能测试的目的	126
第二节	测量方法	126
一、	温度循环	126
二、	温度时延漂移	128
三、	浸水	130
四、	高温高湿	130
五、	高温	131
六、	核辐照	132
第八章	光纤机械性能测试	137
第一节	光缆机械性能测试的目的	137
第二节	性能测试	138
一、	拉伸	138
二、	光缆护套耐磨损	140
三、	压扁	140
四、	冲击	142
五、	反复弯曲	144
六、	扭转	145
七、	曲挠	148
八、	弯折	149
九、	弯曲	149
十、	耐切入	150
十一、	枪击损伤	150
十二、	刚性	151
十三、	拉力弯曲	154
第九章	光缆的环境性能	155
第一节	环境性能测试的目的	155

第二节	性能与测试.....	156
一、	温度循环.....	156
二、	渗水.....	158
三、	阻水油膏滴流.....	159
四、	油分离和蒸发.....	160
五、	气体阻力.....	161
六、	风积振动.....	162
七、	过滑轮.....	164
八、	舞动.....	165
九、	耐电痕.....	166
十、	阻燃.....	167
第十章	光缆线路工程测量.....	169
第一节	光缆线路工程测量的目的.....	169
第二节	单盘光缆现场复测.....	169
一、	规定.....	169
二、	光缆长度复测.....	170
三、	单盘光缆衰减测量.....	173
第三节	光纤后向散射衰减曲线.....	178
一、	曲线的作用.....	178
二、	观察和评价.....	179
第四节	工程竣工测量.....	180
一、	目的.....	180
二、	测量内容.....	180
三、	光缆线路衰减测量.....	180
四、	光缆线路衰减曲线测量.....	182
五、	光缆线路电特性测量.....	186
六、	光缆护层对地绝缘测量.....	188
七、	光缆线路对地绝缘监测.....	189
第五节	光缆链路偏振色散测量.....	190
一、	目的.....	190
二、	偏振模色散对系统的影响.....	190
三、	光缆链路偏振模色散.....	192
四、	光缆链路偏振模色散的测量.....	196
第六节	光缆线路自动监控.....	197
一、	目的.....	197
二、	监测原理与系统组成.....	197
三、	光缆线路监控.....	199

第一章 光纤连接

在介绍光纤光缆性能检测方法之前,先讲述光纤连接特别是光纤端面处理和熔接技术,作为必须掌握的基本技能训练。

实际的光通信系统由光发射器、光传输通道(光纤)、光接收器三个主要部分组成,光纤光缆的传输性能检测系统也同样如此。系统各部分之间的衔接就是光耦合或光纤连接问题。通信系统和检测系统都要求各部分之间光耦合有高耦合效率、稳定可靠、连接损耗小的连接。而且光耦合和光纤连接技术是光纤通信系统和检测系统中一门非常基本和实用的技术。

第一节 光耦合

一、光纤与光源的耦合

在光纤通信系统和光纤传输特性检测系统中使用多种光源,有半导体激光器、气体激光器、液体激光器、发光二极管、宽光谱光源等等。它们大致可以分为两大类,一类是相干光源,如各种激光器;另一类是非相干光源,如发光二极管、宽光谱光源(白炽灯)。光耦合先要解决如何高效率地把光源发射的光注入到传输通道中去的问题。为此,先了解一下光源的特性。

(一) 光源特性

1. 半导体激光器(LD)

半导体激光器的发光区是窄条形的发光区域,它的发光区域很薄,只有大约 $0.3\mu\text{m}$ 。半导体激光器的发光强度在其谐振腔内中的谐振腔外部的空间按一定的规律分布。半导体激光器工作电流在超过其阈值电流 I_{th} 不多时(约大于 I_{th} 的10%),它发光的模式是基横模(光强度在空间的不同分布称为不同的模式)。基横模在垂直于光轴的平面内光强度的分布是二维高斯形状。这种高斯形光束的腰部宽度即激光器谐振腔镜面上发光区域的宽度和厚度。即约 $30\mu\text{m}$ 和 $0.3\mu\text{m}$ 。半导体激光器在其宽度方向上(即平行于P-n结的方向)光束比较集中,其发散角比较小,约 $5\sim 6^\circ$ 。而在厚度方向(即垂直于P-n结的方向)上其光束的发散角较大,约有 $40\sim 60^\circ$ 。所以半导体激光器发射的光束的强度分布在空间上是不对称的,它所发射的光的远场图形是一种细长的椭圆形(远场概念在第二章中叙述)。

2. 面发光二极管(LED)

面发光二极管发出的光是由自发辐射产生的非相干辐射光。一般来说,LED是个均匀的面发光器件。非相干光源的基本参数之一是它的亮度,即单位面积上的某方向在单位立体角内所发射的光功率,以字母 L 来表示、所谓的均匀发光,

是指在整个发光面上各处的发光亮度都是一样的，并且在空间也是各向同性的。这种光源在空间单位立体角内所含的光功率分布遵循其法线夹角 θ 的余弦的 m 次方比例关系： $L_e(\theta) \propto \cos^m \theta$ ，特例当 $m=1$ 时，即 $L_e(\theta) \propto \cos \theta$ 的光源就是朗伯光源。面发光二极管属于此类光源。

当发光面很小时，在空间的一点处面积为 ΔS 的小区域内所得到的光功率 ΔP 是光源的亮度 L_e 和其发光面积 A_E 与面积元 (ΔS) 对光源所张立体角 $\Delta \Omega$ 和该面积元位置的余弦 $\cos \theta$ 之乘积：

$$\Delta P = L_e A_E \cdot \cos \theta \Delta \Omega \quad (1-1)$$

式中： θ —观察方向与光源发光面法线的夹角
面发光二极管的亮度一般只有 $100\text{W}/\text{sr}/\text{cm}^2$ 。

(二) 光纤与光源耦合

1. 直接耦合

直接将光纤靠近光源，由光纤接收光源发出的光。

(1) 光纤与半导体激光器直接耦合（如图 1-1 所示）

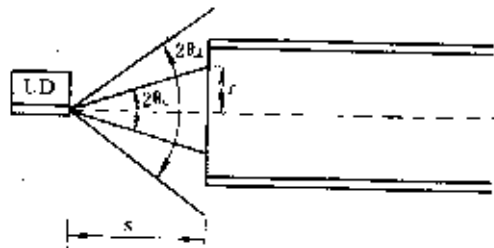


图 1-1 光纤与激光器直接耦合

半导体激光器的发光面积很小，当光纤端面与它的发光区靠得足够近的时候，激光器发出的光能全部照射到光纤端面上，甚至光纤的芯上。这时由光纤本

身的数值孔径决定了光耦合的效率 $\eta = \frac{\text{光纤接收的光功率}}{\text{激光器发射的总光功率}}$ 。

多模光纤，标称数值孔径 0.20；单模光纤一般只有 0.11 左右。说明通信用多模光纤的光接收孔径约 23° ，单模光纤只有 13° 弱。由于光纤端面还存光反射，所以还需考虑到光垂直入射情况下有约 4% 的反射损失。估计光纤与半导体激光器直接耦合时的最高耦合效率约 20%，换言之，光纤与半导体激光器直接耦合时，光耦合损耗约 7dB（耦合损耗 $L = 10|\lg \eta| \text{dB}$ ）。

(2) 光纤与面发光二极管直接耦合

当光纤纤芯的截面积大于发光二极管的发光面积，且光纤端面离发光面足够近时，可以用比较简单的方法求出这时的耦合效率

$$\eta = \text{Sin}^2 \theta_c = (\text{NA})^2 \quad (1-2)$$

式中, θ_c 是光纤的临界接收角, NA 是光纤的数值孔径。标称多模光纤 $NA=0.20$ ($\theta_c=11.5^\circ$), 所以它与面发光二极管直接耦合时效率只有 4% 左右, 也即光耦合损耗约 14dB。

2. 透镜耦合

光纤与光源直接耦合, 特别是与非相干光源耦合时, 光耦合效率是低的。为了提高光纤与光源之间的光耦合效率, 可以在光纤端面与光源发光面之间加入某些光学元件。通过改变光源的发光的方向性或者改变光纤的接收角, 来提高光耦合效率。

(1) 对于激光器一类相干光源, 可以使用多种方法。其中最简单的方法是将光纤端面熔融成一个半球形状, 它能起短焦距透镜的作用, 改变光纤的等效接收角。这就是所谓的光纤端面球透镜, 减小球透镜的半径, 光纤的等效接收角增大, 但最终有个极限值。这种方法可使耦合效率达到 60%。这种方法对于突变型光纤效果较好。

一种方法是用柱状透镜, 将半导体激光器的垂直于 P-n 结方向上的光束进行压缩, 改变它在空间的细长椭圆形分布, 使光斑接近圆形, 以利于与圆形截面的光纤进行耦合。图 1-2 示出柱透镜的排列情况。

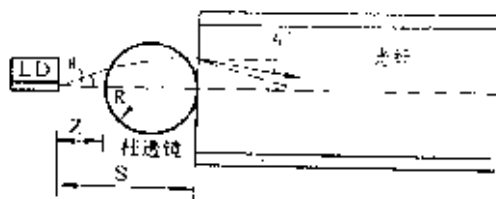


图 1-2 柱透镜耦合

从图 1-2 中可以看出, 自激光器发出的张角为 θ 的光, 经过柱透镜的两次折射以后, 比较小的角度 θ' 射入光纤, 实际上扩大了光纤的等效接收角。当柱透镜的半径 R 与光纤纤芯半径差不多或者更小一些, 而且激光器的发光面位置 $z=0.3R$ 时, 能达到约 80% 的耦合效率。

第三种方法是通过一段锥形光纤来耦合。采用腐蚀光纤或熔融拉锥的方法将光纤弄成一段锥形部分, 如图 1-3 所示。锥形光纤的前端 (细的那端) 半径为 a_1 , 光纤本身的半径为 a_n 。

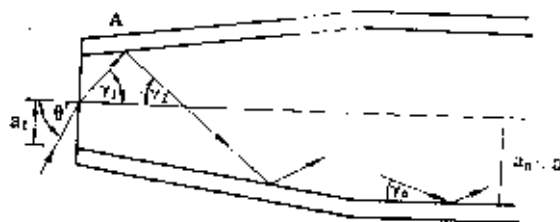


图 1-3 锥形光纤耦合

锥形光纤的前端的临界接收角 θ'_c 。与正常光纤段的临界接收角 θ_c 之间有近似关系:

$$\frac{\sin \theta'_c}{\sin \theta_c} = \frac{a_n}{a_1} \quad (1-3)$$

公式 (1-3) 说明, 锥形段光纤的前端接收数值孔径扩大到了 $\frac{a_n}{a_1}$ 倍。结果证实了这

种耦合方式效率可以达到 97%。

还有一种方法是通过凸透镜进行光耦合, 这是一种最常用的耦合方式。将激光器发光面放在凸透镜的焦点位置处, 这样, 通过透镜出射的光就会变成平行光; 然后再用第二个凸透镜, 将平行光重新聚焦到光纤的输入端面上。一般采用直径为 6mm 的凸透镜, 其焦距 f 为 4~15mm (用于光纤与激光器之间耦合, 可使用焦距长些的透镜)。一般, 使第二个透镜所成的像比发光面大 (如成像比率 4:1), 使入射光能充满光纤纤芯 (如图 1-4 所示)。

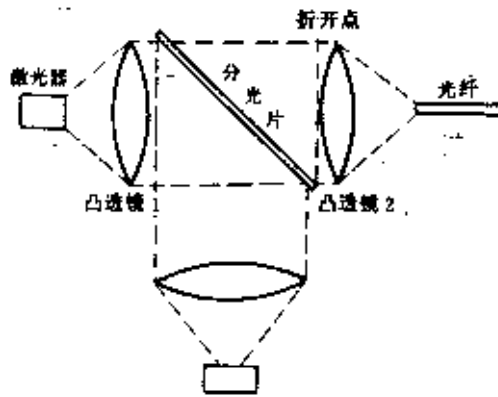


图 1-4 双凸透镜耦合

这种耦合方式用得较广泛, 在两个透镜之间还可以安放其它光学元件, 如加入可变光阑改变从第二个透镜出射的光束的孔径角 (这在以后光纤损耗测量的注入条件中将会看到); 如图 1-4 中已经示出的那样放置一块分光板, 就可用于双光束监控或监控光纤的对中情况; 当第二透镜换用不同焦距的透镜时, 又可改变从它出射的光斑的大小。

光纤与激光器之间的光耦合还可以通过自聚焦透镜 (自聚焦光纤) 进行, 调节自聚焦透镜的位置能使成像缩小或放大; 在自聚焦透镜前加一个柱透镜的复合透镜, 耦合效果更好, 光耦合效率可以达 80% 以上。

(2) 对于发光二极管一类非相干光源, 根据哈密顿几何光学刘维定理可知, 朗伯型光源, 无论在光纤与光源之间添加何种光学系统, 其光耦合效率都不会超过某个极值 η_{\max} :

$$\eta_{\max} = \frac{A_E}{A_F} (NA)^2 / n^2 \quad (1-4)$$

式中, n 为光源与光纤之间介质的折射率; A_F 是光纤的接收面积; A_E 为光源发光面积; NA 为光纤的数值孔径。公式(1-4)说明, 当光源的发光面积大于光纤的接收面积时, 添加任何光学元件都不能提高光耦合效率; 当光源的发光面积小于光纤的接收面积时, 通过附加光学元件的方法来提高光耦合效率的途径是有效的, 而且发光面积越小, 耦合效率的提高也就越多。

这一类光源的发光面直径较大, 一般利用附加光学系统的方法并不能改善光耦合效率; 这类光源的发光面积小时, 又会使它总的发光功率降低。一般地, 面发光二极管的发光面直径约为 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 时, 耦合情况最佳(对多模光纤而言)。用直径约 $100 \mu\text{m}$ 的球透镜可以改善面发光二极管的发射光束的方向性, 使其半功率点发散角降至 40° 左右。当今, 已经有一种新型的边辐射高亮度发光二极管, 它的发光区域很薄, 只有 $0.05 \mu\text{m}$ 左右, 在垂直于结面方向上发射角也大大地减小了: 从 120° 左右下降到 35° 左右。用这种发光器件, 可望在与光纤耦合时获得较高的耦合效率。

二、光纤与光接收器的耦合

在光纤通信系统和光纤传输特性检测系统中, 所用的光电接收(检测)器件基本上是 PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管。光电二极管的光敏面积, 一般地相对于光纤纤芯横截面积而言, 是较大的。如 APD 的光敏面直径一般有 $100 \sim 300 \mu\text{m}$, PIN 的接收面直径可大于 $500 \mu\text{m}$, 甚至大达 $\phi 10\text{mm}$ 。所以光纤与检测器之间的耦合是比较简单的事情, 只要光纤出射端面 and 光电检测器的光敏面之间的距离足够近, 光纤出射的光能全部照射到检测器光敏面上, 那么它们之间的低损耗耦合就很容易实现。一般, 光纤与光检测器之间, 不使用任何光学元件, 就可以达到 85% 以上的耦合效率。

虽然光纤与光电检测器之间的耦合比较容易, 一般采用直接耦合方式, 但也需要良好的对准调节和定位。有的场合, 特别是在检测仪器上和系统中使用裸光纤 FC 型活动连接器定位耦合, 有的通过耦合光纤(尾纤)用光纤活动连接器来耦合。有的场合下, 为了减小光检测器表面的光反射, 还需加合适的折射率匹配材料。

在必要的时候, 光纤与光电检测器之间也采用透镜来实现光耦合, 用该透镜将从光纤出射的光成像到检测器的光敏面上。用透镜耦合时, 即使光纤端面的位置稍有变动, 也不致于对光耦合效率产生影响。譬如, 在光纤的某些特性检测系统中, 为了提高光耦合的重复性, 或者在某些特殊场合中, 光纤出射端面不得不远离光检测器时, 常常使用透镜来进行光耦合。

第二节 光纤连接

一、光纤连接方法

光纤通信系统和光纤光缆传输性能检测系统中，都需要把光路连接起来，光纤之间的连接是必不可少的一环。光纤的连接本质上是光纤之间的对接耦合，光纤的连接是通信系统构成和光纤光缆性能检测中时刻要碰到的，我们必须熟练掌握光纤的连接技术。

在光纤之间实现互连主要有两种方式。一种是用连接器实现光纤的活动连接，它可以多次反复插拔装接。光纤通信系统的光端机和许多光纤光缆性能检测仪器都装有光纤连接器接口，对装有光纤接头的光纤，可以直接与这些端机或仪器相接，使用十分方便。只需注意，光纤连接器有许多种类，它们的结构有所不同，互相之间并不一定能互换使用，这时候就必须使用转接器（适配器）进行转接。另外一种光纤连接方式是固定连接或者永久性连接，这是一种得到广泛应用的光纤连接方式，在光纤链路构成中得到最广泛的应用。

光纤的固定连接也有多种形式，光纤连接过程中的光纤处理、端面制备等方法是光纤测量的基本技能，我们专门用一节来介绍这些技术。

二、光纤连接损耗的初步分析

在介绍光的固定连接方法之前，先初步了解一下光纤对接时的耦合损耗情况。

影响光纤对接时的耦合效率（或耦合损耗）的因素很多，这些因素基本上可分为两大类。一类是固有的，是被连接光纤本身的特性参数的差异，如纤芯直径、模场直径、数值孔径的差异、纤芯（或模场）的同心度偏差、纤芯随圆度等。由这些因素所引起的光纤对接损耗，一般是无法通过连接技术来改善的；另一类是光纤连接时光纤的端面质量、对中质量和连接质量等因素，具体来说就是光纤的端面切割质量，光纤轴间的横向错位、端面间距、纤轴的角度倾斜、纤芯形变等因素。这类因素所引起的连接损耗可通过连接技术的改进得到改善。

（一）光纤端面的反射损耗

两根光纤对接时，端面之间可能没有紧密接触而留有一些空隙。间隙中介质一般是空气，其折射率 n_0 与光纤纤芯的折射率 n 是不同的。这样，在两个光纤的端面上光传输时便会产生菲涅尔反射，引起光传输损耗。在一个光纤端面上，光传输时的耦合效率 η 为：

$$\eta = \left[\frac{4nn_0}{(n+n_0)^2} \right]^2 \quad (1-5)$$

公式(1-5)说明不考虑其它因素时，光纤对接因端面间隙处端面反射的存在而引起的耦合损耗。

一般空气的折射率 $n_0=1$ ，光纤纤芯折射率 $n=1.46$ ，所以在一个光纤端面上的光耦合效率 $\eta=0.93$ ，即在一个光纤端面上产生反射损耗 L_f ：

$$L_f = 10|\lg \eta| = 0.16dB \quad (1-6)$$

光通过光纤接点传输，经受在两个端面上反射，一次从发射光纤到空气；一次从空气到接收光纤，所以在—个光纤接点上，由反射引起的损耗总是 0.32dB。

这是个相当大的损耗，在实际的光纤对接时应设法避免或降低。减小这种反射损耗的途径，—是设法使对接的两个光纤端面紧密接触（如光纤连接器中的物理接触——PC），甚至干脆把两根光纤熔融连接起来，这样，两个端面之间完全没有了空气间隙，也就消除了因端面反射引起的光传输损耗。这一点，在监测光纤熔接过程中还可以用来判别光纤熔接质量的好坏。在无法完全消除面之间的间隙时，应在两个对接光纤端面之间加注折射率匹配材料，因其折射率接近光纤纤芯的折射率，从公式(1-5)可知，这样可以大大降低端面反射所引起的光传输损耗。

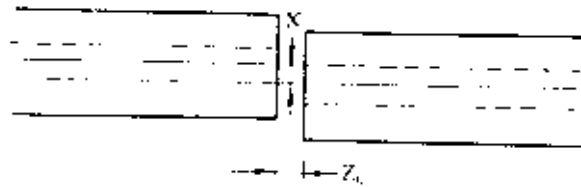


图 1-5 光纤对接时横向错位 X

(二) 光纤的横向错位

光纤在对接时，无论用微调架调节对准还是用 V 型槽之类工具定位，都不可能使两根光纤的纤轴完全平行并对准，在两根对接的光纤的轴线之间多少—些偏离，如图 1-5 所示。

当要求因纤轴的横向错位 X 所引起的光纤连接耗小于 0.1dB 时，对于常规多模渐变光纤 ($2a=50\ \mu\text{m}$, $\Delta=1\%$)，横向错位必须小于 $3.0\ \mu\text{m}$ ；对于 1300nm 通信用单模光纤 ($2a=10\ \mu\text{m}$, $\Delta=0.3\%$)，横向错位必须小于 $0.8\ \mu\text{m}$ 。显然，对单模光纤连接其对准确精度比多模光纤要高得多。

(三) 光纤纤轴的角度倾斜

光纤连接时，因种种原因，使两根要连接的光纤纤轴互相不平行，形成图 1-6 所示的那种情况，即两根光纤的轴之间—角度倾斜，这种纤轴之间的倾角 θ 也会引起光耦合损耗。



图 1-6 纤轴之间的倾角 θ

要使因纤轴倾角引起的光耦合损耗小于 1dB，必须要求倾角 θ 小于 5° ；若要使光纤连接损耗小于 0.1dB，要求多模光纤的轴倾角 θ 小于 0.7° ，而单模光纤

的轴倾角必须小于 0.3。

(四) 光纤端面间隙

两根对接光纤端面之间留有一定间隙 d 时，显然也会引起光传输损耗。

在同样的连接损耗要求下，对端面间隙 d 的要求不如对纤轴的横向偏移 X 那样严格。

以上各种情况都要假定用同一种光纤进行连接的情况，若连接的光纤不是同样光纤，那末由于光纤本身特性参数的差异，将引入连接损耗。

(五) 光纤参数的差别

1. 多模光纤

我们把连接的光纤一根称为发射光纤，记为 T；另一根称为接收光纤，记为 R。

(1) 纤芯直径不同，它们的半径分别标为 a_r 和 a_t 。当把它们连接起来时，在均匀模式功率分布条件下的光耦合效率为（假定 $a_t > a_r$ ）：

$$\begin{aligned} R \rightarrow T \quad \eta &= 1 \text{ (无耦合损耗)} \\ T \rightarrow R \quad \eta_{SI} = \eta_{GI} &= \left(\frac{a_R}{a_T} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-7)$$

(2) 数值孔径 (NA) 不同，同样记为 NA_R 和 NA_T ，并设 $NA_T > NA_R$ ，则在均匀模式功率分布条件下，光耦合效率为：

$$\begin{aligned} R \rightarrow T \quad \eta &= 1 \text{ (无耦合损耗)} \\ T \rightarrow R \quad \eta_{SI} = \eta_{GI} &= \left(\frac{NA_R}{NA_T} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

(3) 光纤的折射率分布指数 q 不同，记为 q_r 和 q_t ，并设 $q_r \geq q_t$ ，则在均匀模式功率分布条件下，连接时的耦合效率为：

$$\eta_{GI} = \frac{q_T(q_R + 2)}{q_R(q_T + 2)} \quad (1-9)$$

(4) 光纤纤芯椭圆。光纤纤芯不圆时，对接损耗就会增大。纤芯不规则无法考虑，这里只涉及纤芯椭圆的情况并设椭圆度 $e = \frac{b-a}{a}$ ，而且连接的两根光纤有同样的椭圆度，在最差的情况下对接，即一根光纤的长轴 (2b) 对另一根光纤的短轴 (2a)，这时，对接收的耦合效率 η_{MM} 为：

$$\eta_{MM} = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \frac{1-e}{\sqrt{(1-e)^2 + 1}} \quad (e \leq 5\% \text{ 时}) \quad (1-10)$$

2. 单模光纤

模场直径的差异。用模场半径计算连接时的耦合效率：

$$\eta = \frac{1}{4} \left(\frac{\omega_r}{\omega_r} + \frac{\omega_r}{\omega_r} \right)^2 \quad (1-11)$$

由于单模光纤的特殊性,所以无论是从模场直径大的光纤向模场直径小的光纤传输还是从模场直径小的光纤向模场直径大的光纤传输,它们的光耦合效率是一样的,即连接损耗一样。这一点,与不同芯径的多模光纤连接的结果完全不同。

(六) 光纤端面情况

光纤相连接时,光纤的端面都需经过切割处理,所得的光纤端面与理想状态总有一点差别。端面质量不理想,造成了光纤连接时光传输损耗增大,特别是在对接(不是熔接)时,影响更大。

1. 光纤端面与纤轴不垂直(斜的端面),对接时有一夹角 θ ,如图1-7所示。 θ 是两个光纤的端面角 θ_1 与 θ_2 之和。这种光纤端面相对接时,在均匀模式功率分布时,在突变型光纤时耦合效率是:

$$\eta_{sl} = 1 - \frac{|K-1|}{\pi K \sqrt{2\Delta}} \theta \quad (1-12)$$

式中, K 是光纤折射率与端面间介质折射率之比, Δ 是光纤纤芯、包层相对折射率差。

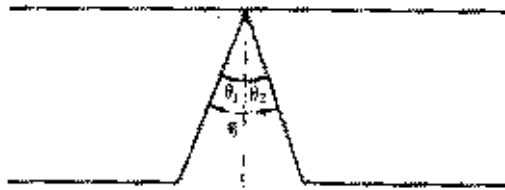


图 1-7 斜端面耦合情况

2. 凸形光纤端面。这种端面情况如图1-8所示。图中 d_1 、 d_2 表示两个端面的弯曲程度。突变型光纤,在均匀的模式功率分布情况下,其耦合效率为:

$$\eta_{sl} = 1 - \frac{1}{2\sqrt{2\Delta}} \frac{|K-1|}{K} \frac{(d_1 + d_2)}{a} \quad (1-13)$$

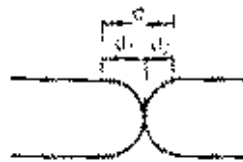


图 1-8 凸形端面对接

以上列举了影响光纤连接时耦合效率或耦合损耗(即连接损耗)的许多因素,以及单独考虑一种因素影响的结果。实际光纤连接的光传输损耗是各种因素综合

影响的结果，可以在以后的实际操作中参照上述结论，分析体会影响光纤连接损耗的主要因素。

三、光纤的熔接

在这一部分我们将简单介绍几种光纤固定连接的方法，并着重介绍光纤熔接的全过程。这些方法是在光纤检测和通信工程中要广泛使用的。

(一) 光纤固定连接的几种方法

1. 套管连接

光纤经过去除涂层、清洁处理后，插入图 1-9 所示的套管，直到两个端面接触。一般地需要在切割好的光纤端面上先蘸上折射率匹配材料再进行对接。套管的内径应与光纤外径相当，这样可得到满意的连接效果。

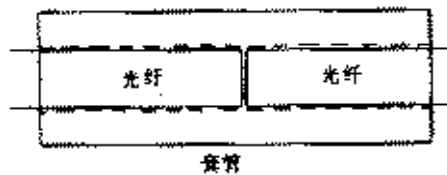


图 1-9 套管连接

2. V 形槽连接

将处理好的光纤放入 V 形槽内，放上盖板，然后轻轻推插光纤，使两个端面接触到。必要时端面之间应加注匹配材料。V 形槽的深浅和光纤外径的一致性将保证可以获得满意的连接效果（见图 1.10）。

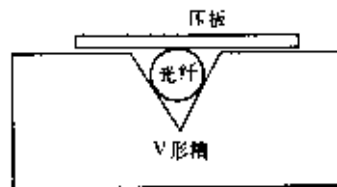


图 1-10 V 形槽和板

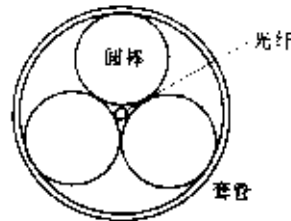


图 1-11 三棒连接

3. 三棒连接

图 1-11 示出了三棒的放置，棒的直径约为光纤外径的 6.5 倍，外面套有弹性材料，用以固定棒的位置。用类似于套管连接的方法使光纤在三棒的空隙中对接。

4. 熔融连接

用电弧、火焰或激光加热要连接的光纤的两个端面（已处理过的），使它们熔融直至“烧结”在一起。这种方法连接光纤都是在专门的光纤熔接机上完成的。

(二) 光纤的熔接

1. 光纤的熔融方法

可以用多种方法加热光纤并使其熔融。如用电热丝加热，这种方法不容易得到能使玻璃光纤熔融的高温（对石英玻璃光纤，其熔融连接温度要 2000℃ 以上）。也可以有用大功率激光器，如 CO₂ 激光器的激光束加热光纤，这可以获得非常清洁的加热状态，很适宜于做高强度光纤接头。但是使用激光束加热的激光器辅助装置较为庞大，花费也大，所以使用得并不广泛。也有使用各种火焰进行加热的，如丁烷氧焰，氢气火焰，氢氧焰，氢氟焰，氢氟氧焰等等。特别是氢氟焰，能做出强度最好的光纤熔接头。可惜的是使用各种火焰加热时自动控制比较困难，而且也不甚安全，所以还没有得到普遍推广应用，仅在个别对光纤接头强度有特高要求的场合使用。另外一种加热方法就是通过电弧放电，在光纤端头附近局部区域通过放电的方法产生高温使光纤熔融。这种方法可以通过控制电弧的放电电流而很方便地得到不同的温度，所以很容易实现自动控制。而且用这种方法所做的光纤接头质量好、损耗小、接头的强度也不错。这种电弧熔接光纤的方法已经在光纤熔接机中得到了广泛的应用。

2. 用光纤熔接机熔接光纤

光纤熔接机的发展史，已经经历了几代商品过程，最早的光纤电弧熔接机，光纤的对中和熔接过程都是手动操作的。从只适用于多模光纤发展到适用于多模光纤单模光纤的熔接，光纤熔接机的对中调整和定位精度大大提高了，可以达到 0.1 μm。最初的多模光纤熔接机以光纤外层作基准面进行对中调整，以后发展成光功率监测调整，现今的自动对中熔接机融入了显微摄像、微机技术和图像校正等新技术，形成了“纤芯直视”式自动熔接机，甚至可以一次熔接多根光纤。

光纤熔接机必须具备下述性能：

- 熔接机必须具有能固定光纤的精密光纤夹具，放置发射光纤和接收光纤的夹具的轴向应有极高的平行度。
- 要有精密的微调功能，一般要求能在 x、y、z 三个方向上能进行精密调整，调节精度达 0.1 μm。
- 电弧放电要稳定，光纤熔接条件可调节，以适应各类光纤的熔接。

(1) 光纤熔接前的准备工作

在光纤熔接的全过程中，需要精确地执行许多操作，主要是三个方面，即光纤端面制备、光纤精密对中和光纤的熔接和定位。在光纤熔接之前，光纤涂层的去除、清洁及端面制备工作必须仔细认真地对待。

- 光纤护层的去除。剥开光缆，其中的光纤的外面可能还有两层塑性保护层。一般，最外层是光纤的二次被覆层，二次被覆层可能是紧套的尼龙护层，也可能是松套的聚丙烯 (P.P)、聚酯 (PBT)、聚四氟氯乙烯 (FEP) 等塑料套管。这二次被覆层可以用专用的割刀割断然后用手拉去；在没有专用工具时，用单面或双面刀片割断被覆层，用手拉去套管。但除去紧套的尼龙护层必须用刀片来削除。

紧贴着石英玻璃光纤外表面上还有一层塑料涂层，即光纤的一次涂覆层，这一层涂覆材料一般用两种方法来去除。一种是机械方法，可用刀削去，也可用火焰把它烧掉，最好利用专用工具来剥除一次涂覆层，用机械方法剥除光纤的一次涂覆层，可能会损伤石英玻璃光纤的外表面，特别是用火焰方法去除涂层，将使光纤本身的机械强度大大降低；另一种方法是化学方法。用某种化学溶剂来去除光纤上的一次涂覆材料，根据不同的一次涂覆材料选用不同的化学溶剂；紫外固化(uv)的丙烯酸酯涂层，可以用二氯甲烷或二氯乙烷和三氯甲烷中任何一种作溶剂，将带有涂层的光纤在溶剂中浸泡数分钟，这类涂层便会溶胀，甚至脱落。用脱脂棉或纱布轻轻揩抹就能方便地去除这类涂覆层；当光纤的一次涂层材料是有机硅树脂时，需把它放在浓硫酸中浸泡，直到把有机硅树脂涂覆层全部溶解掉；如果光纤的一次涂覆层材料是环氧树脂，那么就要用热的（约 200℃）强酸（如浓硫酸）来浸泡、去除。硫酸有很强的腐蚀性，使用时必须千万小心，务必慎用。

光纤的一次涂覆层去除后，需仔细检查一下一次涂覆层是不是已经去除干净了。一次涂层去除干净以后，用蘸有酒精（无水乙醇）或丙酮的纱布或脱脂棉捏住光纤轻轻擦洗，务必使去除了一次覆层的裸光纤外表面上没有污染、水份及灰尘，否则会影响光纤熔接质量，甚至出现气泡。

● 光纤端面切割。无论是光纤对接还是熔接，要获得耦合损耗小的光纤高质量接头，被接光纤端面的质量是关键。光纤连接，要求光纤端面必须平整、端面与纤轴垂直。要得到满意的光纤端面，必须使用光纤切割刀等手段来获取高质量的光纤端面。当然可以采用切割、研磨、抛光的方法来获得平整的光纤端面，就像做光纤连接器那样，但这种手段太繁杂，不能在要求快捷时使用。在光纤对接和熔接过程中现在都使用专门的光纤切割刀来制备光纤端面，现在商品光纤熔接机都附有性能很好的光纤切割器。

高级的商用光纤切割刀，可以做出几乎接近理想的高质量光纤端面，而且成功率也很高。这些光纤切割刀工具所用的光纤切断方法基本上有两种。一种是在施加有一定张力的光纤上用金刚石一类刀刃在光纤的要切断部位处划（或刻）痕，一旦光纤表面出现裂纹，光纤就会在所加张力的作用下在划痕处崩断，从而得到所要的平整端面。另一种是先在裸光纤上用刀刃划痕，然后弯折光纤，或者在对光纤同时施加张力的情况下弯折光纤，光纤折断后便获得高质量的光纤断面。实际切割光纤时，对光纤施加的张力应在正确的范围内，如对外径为 $\phi 125 \mu\text{m}$ 的石英玻璃光纤，所加的张力约 100~300 克。另外，必须注意，在弯折光纤时要防止光纤受到扭转（光纤的扭转必须小于 1cm），否则断裂端面会出现唇边，或断面粗糙，如图 1-12 中所示的情况 (a) 和 (b)。

这种划痕-弯拉光纤的切割过程可用图 1-13 来概括：



(a) 唇边; (b) 中间雾状区右边粗糙不平; (c) 良好的端面

图 1-12 光纤端面的质量

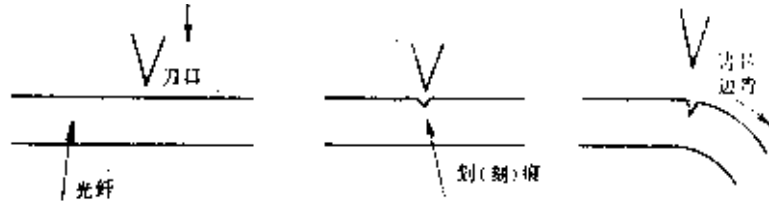


图 1-13 光纤端面切割过程

在图 1-12 中，已经看到了切割光纤所得到的质量，我们可以把光纤断面分成三个区域，见图 1-14 所示。

(a) 划痕点附近虚线内的区域，其半径为 r ，这是很平整的镜面区域；(b) 镜面区域边缘附近的雾状模糊区；(c) 凹凸不平的粗糙区域，位于划痕点的对面。

光纤断面上的镜面区域的大小与光纤上所受到的本地应力 F 有关。

$$r = \left(\frac{K}{F} \right)^2 \quad (1-14)$$

式中， K 是镜面常数，对于熔融石英 K 为 7.5kg/mm^2 ；碱玻璃的 K 为 6.1kg/mm^2 。从(1-26)式可知，在光纤上用金刚石划痕以后，光纤上必须有足够的应力，才能使光纤断裂；但是，所加的应力不能太大，否则镜面区域的半径将太小。同时在光纤划痕点的对面将出现上述 (b) 那样的粗糙不平的区域。由公式(1-14)得，要使镜面区域的半径 $r \geq a$ (a 是光纤半径)，要求在端面上所有点处的本地应力 F 小于 $K/\sqrt{2a}$ 。但是无疑地， F 必须大于 0。否则在划痕点的对面将形成唇边。此外，应力 F 必须与光纤的纤轴平行。应力 F 与纤轴不平行的后果是形成非零端面角（即端面与纤轴不垂直）。这样，光纤上所加应力 σ 的范围是 $0 < F < K/\sqrt{2a}$ 。

若在光纤上划痕太轻，那么需要加比较大的应力才能使光纤折断，这样得到的光纤端面质量就不会高。但是，划痕太重，会在端面上留下缺口，甚至直接弄断光纤。对于单用张力拉断光纤的切割方法，为保证获得镜面似的端面，需加较重的划痕，使在划痕点处所受的张应力最大，而后向周边逐渐减小，只要直到划痕点对面的应力仍然大于零的话，这样获得的光纤切割端面的质量是好的。对光纤施

加张力的同时再弯曲光纤，是通过光纤弯曲产生弯曲应力 $F_b \left(= E \frac{a}{R} \right)$ ，在光纤上实现上述应力状态（E 为光纤的杨氏模量，石英光纤的 $E=7000\text{kg/mm}^2$ ，R 是弯曲半径）。

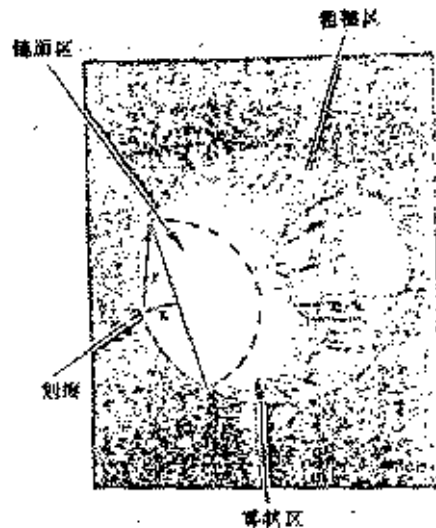


图 1-14 光纤断面情况

我们了解了光纤切割的断面形成过程，将有助于掌握手持光纤切割端面的方法。因为有些场合受条件限制没有很好的光纤切割刀，有些场合用手工切割光纤可以加速检测过程。所以必须掌握光纤手工切割制备的技能。手工切割光纤时，手持裸光纤，用金刚石刀、红宝石刀、或碳硅片的刀口以一定的力在裸光纤表面上划（刻）痕，然后拗断光纤，手工切割光纤过程很简单，但仍需多加练习才能熟练掌握。特别要注意对光纤划痕时，切割刀口必须与光纤轴要尽可能垂直。手工切割所得光纤端面的端面角在 $0 \sim 5^\circ$ 之间。优异的光纤切割器可以得到端面角小于 1° 的光纤端面。

光纤切割工具再好，也不可能达到 100% 的成功率，因此在切割光纤以后，应检查一下光纤的端面质量如何。一般在光学显微镜下观察光纤端面，从放大的端面像能清楚地看出端面质量情况，正如图 1-12 所示的那样。同时还可以看出光纤端面的清洁程度。一旦发现光纤端面质量不好或被沾污时，应重新清洗、切割，直到满意为止。现在商品光纤熔接机都有观察监视功能，光纤端面从正交的两个方向得到监视。

(2) 光纤的熔接

- 裸光纤在制备好端面以后，就可放入光纤熔接机的光纤夹持器上并固定。光纤夹持器多为 V 形槽结构，压板由弹性材料做成。注意用压板夹持光纤时，应压在光纤的未去除涂层的部分，不要夹在裸光纤上，以免光纤表面受到损伤或者甚至夹断裸光纤。

有些光纤熔接机的光纤装夹，光纤是以一定的弧度放置的，这样可以保证近光纤端面附近一段保证平直，如图 1-15 所示。

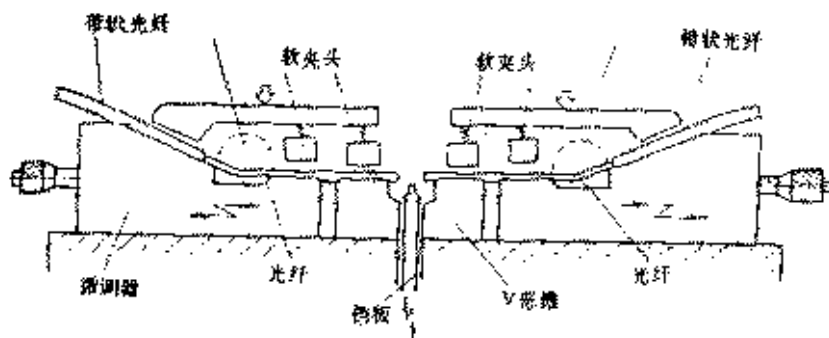


图 1-15 带状光纤熔接机的夹纤机构

- 光纤对中。利用光纤熔接的精密微调机构，将两根要连接的光纤面准确地对中。可以根据光纤的外表面作基准面使被连接光纤对中；也可以根据透过的光功率大小为依据进行对中；也可以以光纤纤芯中心为基线进行对中。这一过程，在自动光纤熔接机上是由机器自动完成的，光纤对准精度优于 $0.1\ \mu\text{m}$ ，调节范围数十微米。一般，对中过程需在 x、y、z 三个方向反复进行，直至达到一个最佳位置。有些光纤熔接机只有一维调节机构（z 方向）。

- 放电。在光纤熔接机的电极上加上直流电压、交流电压或高频电压都能引起两个电极间的火花放电。光纤自动熔接机中，由微机自动控制放电电流的大小和放电时间的长短，甚至有的还通过气压传感器自动调整放电强度。图 1-16 示出了电极之间放电电弧的强度分布。

- 光纤的熔接过程。把光纤熔接起来是使光纤对中状态固定下来的最好的一种定位方式，是获得高质量光纤接头的最后的关键过程。

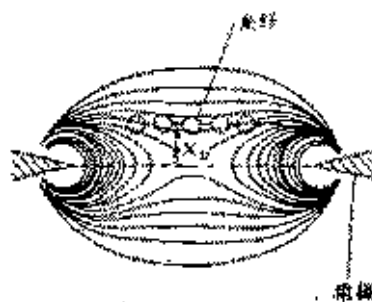


图 1-16 电火花的电流分布

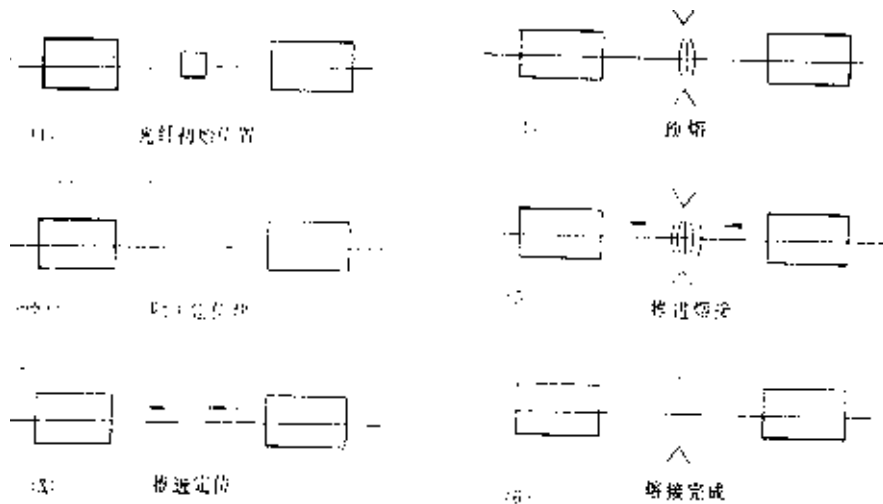
自动光纤熔接机中存储有 20 多种熔接参数，使用时必须根据光纤类型预先选用设定，有些可能要先经熔接试验后，才能选定。

光纤的放电熔接要在一定的条件下进行，表 1-1 列出一些主要的熔接参数作参考。

表 1-1 光纤熔接参数

光纤类型 熔接参数	偏心率 $\leq 1 \mu\text{m}$ 的 单模光纤多 模渐变光纤	偏心率 $> \mu\text{m}$ 的单模光纤
电极距离	$1.5 \mu\text{m}$	0.8mm
端面间距	$20 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$
光纤推进速度	$160 \mu\text{m/s}$	$50 \mu\text{m/s}$
光纤推进量	$20 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$
预热时间	0.12s	0.12s
熔融时间	3s	1s

光纤的熔接在放电过程中完成。先经历预熔阶段。预熔时，光纤的端面之间留有一定的空隙，在比正常熔接电流稍小的电流下放电。约在 1700°C 温度下光纤端面被预热，持续时间一般小于 0.3s。光纤预热同时还除去了制备光纤端面后还残留的污染物；然后，以正常的熔接电流放电，同时将一端的光纤向前推进，使两根光纤的端面紧紧连接在一起，待它们完全融合在一起时停止放电。光纤熔接的最佳温度在 $1980 \sim 2140^\circ\text{C}$ 之间；熔接时间，一般来说，多模光纤的熔融时间要长些，约 2~3 秒；对单模光纤熔接时间可以短些，约 1~2 秒。整个熔接过程可以图 1-17 概括。



- (1) 初始定位 (2) 除去定位件 (3) 设置预熔间隙
 (4) 光纤预熔 (5) 推进熔接 (6) 熔接结束

图 1-17 光纤熔接全过程

这里必须指出，如果被熔接的光纤纤芯的偏心率较大时，用正常熔接条件熔接时，在接点处会由于光纤表面张力的缘故使原来已经对准的纤芯产生偏移，见

图 1-18 所示。

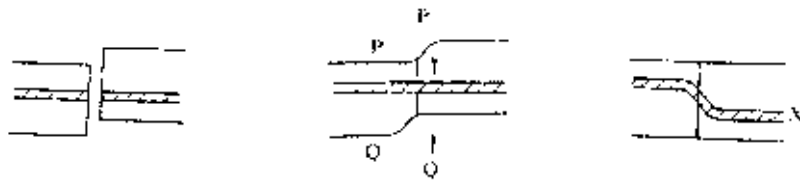


图 1-18 偏心量大的光纤熔接情况

所以，在熔接偏心量大的光纤时，应选用较短的熔接时间。但必须注意，光纤熔接时间太短，会因两根光纤没有充分融合在一起而影响光纤接点的牢度；熔融时间过长以及光纤推进量过多，又容易引起光纤发生形变，甚至使加热区边缘附近光纤变细。

● 熔接部位的增加。光纤的熔接部分现在是裸光纤，又经过加热处理，裸光纤本身的机械强度已经降低。所以光纤熔接部位的机械强度低于整根光纤的机械强度。因此，通常要在光纤连接部位采取增强保护措施。最简单的增强措施是在光纤端面处理之前先套上一根有适当长度的硬套管，如钢管、玻璃毛细管或硬塑料管，它们的内径大于光纤外径，光纤熔接好以后，将此管移至熔接部位完全套住接头附近的裸光纤，在其内注入快干胶封住。现在普遍采用图 1-19 所示的那种热收缩塑料套来增强。该管的内管是 EVA 热熔软塑料，可以填充裸光纤部位的空隙并起缓冲作用，外管是热收缩塑料管（辐照聚乙烯材料）内、外管之间有一根直的钢针。光纤穿在内管中，在熔接好光纤以后，将该管移至加固部位并对其加热，辐照 PE 管收缩就牢牢地固定了套管的位置，裸光纤部分的机械强度由钢针得到了加强。图中也示出了这种套管的参考尺寸。

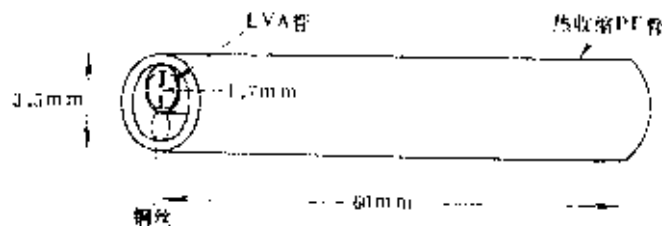


图 1-19 光纤接头用热收缩套管

● 光纤接头质量。光纤熔接起来以后，外表根本看不出与原光纤有什么不同，好的接头，即使在显微镜下也难以找出熔接点位置。但熔接过后的光纤内在质量还是有了变化，主要在于：a. 熔接后的光纤的抗拉强度变弱了；b. 熔接点出现了附加损耗。

熔接光纤的强度测量与光纤抗拉强度测量方法一样。现今先进的光纤熔接机附带有张力筛选功能。当光纤熔接好以后，先经过一定应力的张力筛选，筛选通过以后再进行套封增强。非熔接的石英玻璃光纤本身的拉断强度可达到 6 ~

8kg/mm²，经过电弧熔接过后光纤的强度在 2~3 kg/mm²；用氢氟火焰熔接的石英光纤接头的强度平均值可达到 5.9kg/mm²，最低也有 3.4 kg/mm²。

光纤接头的附加损耗（简称光纤的接头损耗）是评价光纤熔接点质量的主要指标。当前市售的光纤自动熔接机在熔接单模光纤时，熔接损耗平均可小于 0.05dB，用于连接多模光纤，熔接损耗平均 0.03dB 左右。

● 光纤接头损耗的测量。现在，多数“纤芯直视”式自动熔接机都有直接显示熔接损耗的功能。必须指出，熔接机上所显示的光纤接头损耗值是熔接机根据光纤图象分析光纤对准情况后推算出来的，并不反映光纤接头的真实损耗值，但也反映了熔接质量的好坏。真正的接头损耗应以实际测量所得为准。

光纤接头损耗的测量方法有多种，最基本的有剪断法，最标准的是临时接点法，最常用的是后向散射法（光时域反射仪法）。

工程上比较实用的一种方法是测量整个光纤链路所有光纤接头的平均损耗。其方法是整条光纤链路连接好以后，从光纤的链路的输入光功率和输出光功率值算出光纤链路的总损耗，从中减去光纤链路中的每段光纤的损耗后，除以链路上的总接头数，就得出了平均接头损耗。这种方法相当实用，可惜的是无法知道每个光纤接头各自的损耗大小。

有一种方法是逐点监测法。用光源给光纤发送传输光，在进行光纤熔接之前，先用光纤功率计测量发送光纤的输出光功率；然后在光纤熔接完之后测量接收光纤的输出光功率。用这两个光功率值算出总的光损耗，减去该段接收光纤的损耗（假定接收光纤的损耗是已知的），就得到了熔接点的损耗。每个光纤接点都进行光功率监测，过程是相当繁琐的。这种测量方法原理上是适合于光纤接头损耗测量，但实施过程中还有点问题。首先，用这种方法测量多模光纤接头损耗时，实际测得的接头损耗与接收光纤的长短有关，往往是接收光纤较短时测到的接头损耗较小；其次，是光纤功率测量的精度问题。因为光纤接头的损耗一般都很小，大多在 0.1dB 以下，要精确测定这样小的损耗值，至少要求有优于 0.02dB 的测量精度。常用的光纤功率计很难满足这种要求。

测量光纤接头损耗用得最广泛的方法是用光时域反射仪实时监测光纤连接情况，从光纤链路的后向散射曲线上得到光纤接头损耗值。用光时域反射仪测量光纤接头时，经常在后向散射曲线上光纤接头位置出现“正”损耗值—“后向散射曲线的视在增益”。出现这种情况的主要原因是光纤接头两边的光纤的散射系数不同。遇到这种情况，要准确测定连接头的损耗，必须用光时域反射仪对这个光纤分别从发射光纤和接收光纤两端测量它的损耗，取这“双向”测量所得结果的平均值作为该接头的损耗。“双向”测量方法消除了接头两边光纤的后向散射性能差别所带来的接头损耗测量误差：设发射光纤的散射系数是 S_T ，则接头点前发射光纤的后向散射光功率电平 P'_{-T} 正比于 S_T ，即 $P'_{-T} \propto S_T$ ；而接点后的接收光

纤的散射光功率电平为 $P'_R \propto S_R T_{RT} T_{TR}$ 。 S_R 是接收光纤的散射系数， T_{TR} 是从发射光纤到接收光纤方向的通过光纤接头的透射系数， T_{RT} 是由接收光纤向发射光纤经过光纤接头的透射系数。所以用光时域反射仪从发射光纤测得的光纤接头损耗

$$L_{TR}^O = \frac{1}{2} 10 \lg \frac{P'_R}{P'_T} = \frac{1}{2} (L_{TR} + L_{RT}) + 5 \lg \frac{S_R}{S_T} (L_{TR} = 10 \lg T_{TR}, L_{RT} = 10 \lg T_{RT});$$

从接收光纤端进行测量可得 $L_{RT}^O = \frac{1}{2} (L_{RT} + L_{TR}) + 5 \lg \frac{S_T}{S_R}$ 。它们的平均值

$$\frac{1}{2} (L_{TR}^O + L_{RT}^O) = \frac{1}{2} (L_{RT} + L_{TR})$$

就消去了散射系数项的 $5 \lg \frac{S_R}{S_T}$ (或 $5 \lg \frac{S_T}{S_R}$) 的影响。

光纤接点损耗的临时接点测量方法，是在连接之前先测量发射光纤的输出光功率 P_1 ，然后连接起来，测出接收光纤的输出光功率 P_{s1} ，这样算出的总损耗是

$$10 \lg \frac{P_1}{P_{s1}}$$

它包括了光纤接头损耗 L_{s1} 与接收光纤上的损耗 L_{r1} ，然后在接收光纤

上离接头 1m 左右处剪断，测出其输出光功率 P'_1 ，则有 $L_{s1} = 10 \lg \frac{P_1}{P'_1}$ 。而后将两根光纤正式连接起来，再测出接收光纤的输出光功率 P_{s2} ，则有

$$10 \lg \frac{P_1}{P_{s2}} = L_{s2} + L_{r2}$$

可以认为 $L_{r1} = L_{r2}$ ，所以

$$L_{s2} = L_{s1} - 10 \lg \frac{P_{s2}}{P_{s1}} \quad (1-15)$$

$$\text{或 } L_{s2} = 10 \lg \frac{P_1 P_{s1}}{P_2 P_{s2}} \quad (1-16)$$

就得出正式接头的连接损耗值了。

临时接点法是光纤连接损耗测量的标准方法，但实际中很少应用。

第二章 光纤尺寸参数测量

第一节 光纤尺寸参数定义

一、作用

光纤的尺寸参数是光纤的最基本的标准化参数。尺寸参数除了对光纤的光传输、机械等性能有影响外，它们还对光纤的连接损耗的大小起着至关重要的作用。例如，单纤接续则要求被接光纤纤芯尺寸参数相同，但是光纤带接续则要用光纤外径作为纤芯对准的参考，故要求光纤的外径应均匀一致。

光纤的尺寸参数标准既是光纤制造的几何尺寸依据，又是光纤制造中严格控制的指标，还是判别光纤产品合格与否的质量标准。

二、定义

众所周知，光纤玻璃几何尺寸规定为圆对称结构。因此，2000年10月国际电信联盟电信标准化部（ITU-T）最新推荐的用来表征光纤几何尺寸的特征参数是：包层、包层中心、包层直径、包层直径偏差、包层容差范围、包层不圆度、芯中心、预涂覆层直径、缓冲层直径和光纤长度变化等，下面分别介绍这些参数的定义。

(1) 包层

包层是光纤横截面中玻璃的最外区域。

(2) 包层中心

包层中心是包层边界最佳拟合圆的中心。

(3) 包层直径

定义包层中心的圆的直径。

(4) 包层直径偏差

包层直径的实际值与标称值之差。

(5) 包层容差范围

对于一光纤横截面，包层容差范围是确定包层最外区域的圆与最大圆之间的范围。最大圆与包层最外区域的圆同心，它可拟合到包层最外区域。作为包层，两个圆具有相同的中心。

(6) 包层不圆度

由包层容差范围定义的两个圆直径之差除以包层直径所得得值，用百分数表示。

(7) 芯中心

芯中心是在大于和（或）小于光纤截止波长的波长下，在一恒定电平（选择在最大近场光强的5~50%之间），光纤中心区域发射的近场光强图形中，由最佳拟合圆构成的圆的中心。通常芯中心大致代表着模场中心。

(8) 预涂覆层直径

光纤预涂覆层直径是光纤预涂覆层外边界最佳拟合圆的直径。

(9) 缓冲层直径

缓冲层直径是缓冲层外边界最佳拟合圆的直径。

(10) 光纤伸长量

光纤伸长量是体现负荷变化时光纤应变的变化。

(11) 有效面积

有效面积是光纤非线性效应紧密相关的影响光纤传输系统，特别是远距离光放大系统传输质量的一个参数，有效面积 A_{eff} 的定义如下：

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left[\int_0^{\infty} I(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (2.1)$$

式中， $I(r)$ 是半径为 r 的光纤的基模的场强分布。对式 (2.1) 进行这个光纤横截面积分。例如，如果假定一个高斯近似：

$$I(r) = \exp\left(\frac{-2r^2}{w_0^2}\right) \quad (2.2)$$

式中： w_0 为光纤模场直径，那么对式 (4.1) 积分得到：

$$A_{eff} = \pi w_0^2 \quad (2.3)$$

光纤尺寸参数的测量方法有：近场图像法、折射近场法、俯视法、传输近场法等。借助这些几何尺寸参数测量方法，可对光纤玻璃的几何尺寸参数进行单个几何尺寸参数测量，也可进行多个几何参数测量。

第二节 光纤几何尺寸参数测量方法

一、近场图像法

1. 测量原理

近场图像法是单模光纤几何尺寸（除模场直径）测量的基准试验方法和多模光纤几何尺寸测量的替代试验方法。

近场图像法用一视频系统实现 X-Y 二维近场扫描。近场图像法的测量原理是，光纤输出端面上的近场传导模的光功率分布与光纤的折射率分布相似。

由 (2.1) 式得知，只要我们在光纤输出端近场直径扫描测量近场光强度分布，就能测定光纤沿直径方向的相对折射率分布曲线和折射率分布指数 g 。最后根据所测光纤的类型，按照光纤几何尺寸定义计算出所要的光纤几何尺寸参数。

2. 试验装置

近场图像法试验装置如图 2.1 所示，有关试验装置的主要组成部分的作用分别简述如下：

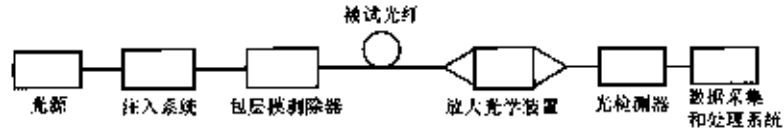


图 2.1 近场图像法试验装置

(1) 光源

应使用合适的光源照明纤芯和包层。在进行测量的整个过程中，光源强度应是可调和稳定的。

(2) 注入系统

光注入装置应能在空间上和角度上对光纤均匀满注入；在光纤输出端，应对包层均匀照明。

(3) 包层模剥除器

用包层模剥除器，从输入端附近移去试样的包层中传输的光功率。当光纤涂覆层折射率高于包层折射率时，则这个涂覆层就可作为模剥除器。

(4) 试样

试样为一短段要测量的光纤。试样光纤的两端应清洁、光滑，且与光纤轴垂直。

(5) 光学放大装置

光学放大装置由一光学系统组成（例如一个显微物镜），它使光纤试样输出的近场放大后再聚焦到扫描探测器平面上。光学系统的数值孔径和分辨能力应与所要求的测量监督相一致。光学系统的数值孔径 ≥ 0.3 ，放大倍数与所希望的空间分辨率相一致，并将其记录下来。

(6) 检测器

用电荷耦合器件摄像机、扫描光导摄像管或其他图形/光强识别设备来放大输出的近场图像并将其送到视频显示器。视频数字转化器将图像数字化处理，供计算机进一步分析。视频系统应具有足够的线性，以求达到校准后测量的不确定性小于所要求的指标。

(7) 视频图像显示器

视频图像显示器用来显示探测的图像、显示器屏幕上的图标，例如十字游标，有助于操作人员将试样图像定位在中心。当然，也可以选用计算机控制的对准和/或聚焦装置。

3. 试验程序

(1) 校准

对已知具有合适精度尺寸的试样进行扫描测定放大光学装置的放大率。

(2) 测量

在输入端对制备好的试样进行对准，已获得规定的注入条件。对输出端的近场图像进行聚焦和对中。对实际试验设备按建立的内部标准调整输入端纤芯图像照明亮度和输出端包层图像照明亮度。

记录输出端数字化视频图像。数字化视频图像给出了代表应确定的包层图像边缘和纤芯图像边缘并记入边缘图表。近场图像边界的判定层次如下：

纤芯图像边界：这一层次选在最大近场光强的 5% ~ 50% 处。

包层图像边界：确定包层边界可用不同的方法，这主要与照明方法有关。实际用的方法应该与校准所用的方法相同。

(3) 计算

纤芯边界和包层边界的原始数据拟合成数字上平滑紧凑曲线来最佳地估算实际的边界。这些数学上的平滑紧凑曲线再被拟合成一个圆用来确定几何特性，包括与每个相应边界的理想圆形的一阶偏差。这些数值和数字边界表达式用来确定的光纤玻璃尺寸参数如下：

拟合纤芯中心	$X_{co}, Y_{co} (\mu m);$
拟合包层半径	$R_{c1} (\mu m);$
拟合包层中心	$X_{c1}, Y_{c1} (\mu m);$
包层边界至包层中心的最小距离	$R_{minc1} (\mu m);$
包层边界至包层中心的最大距离	$R_{maxc1} (\mu m);$
包层直径	$2R_{c1} (\mu m);$
包层不圆度	$100 (R_{maxc1} - R_{minc1}) / R_{c1} (\%);$
芯同心度误差	$[(X_{c1} - X_{co})^2 + (Y_{c1} - Y_{co})^2]^{1/2} (\mu m);$

用来表示边界的数字上的平滑紧凑曲线允许曲率变化要大于或等于椭圆的曲线变化。对非椭圆形，拟合半径与角度位置前，数据变换为极坐标来大约估算中心。在拟合成数学模型时，允许用除去或剔除端面切割损伤造成的离散数据的方法来改善拟合效果。特性曲线、试验装置、切割方法、除去离散数据的方法的选择都会影响包层测量结果的精度。

(4) 试验结果

测量结果的试验报告中应包括下列内容：光纤识别号，尺寸参数（包层直径、包层不圆度、芯同心度误差）、试验装置、注入条件、光源光谱特性、放大率、探测器类型和尺寸精度及重复性等。

二、折射近场法

1. 测量原理

折射近场法是多模光纤尺寸参数测定的基准试验方法和单模光纤尺寸参数测定的第一替代试验方法。

折射近场测量是一种直接和精确的测量，它能直接测量光纤整个（纤芯和包

层)横截面折射率变化的两维分布图,具有高分辨率,经定标可给出折射率绝对值。用合适的方法由折射率两维分布图可确定单模光纤和多模光纤的几何参数及多模光纤的最大理论数值孔径。

折射近场法测量原理,如图 2.2 所示。

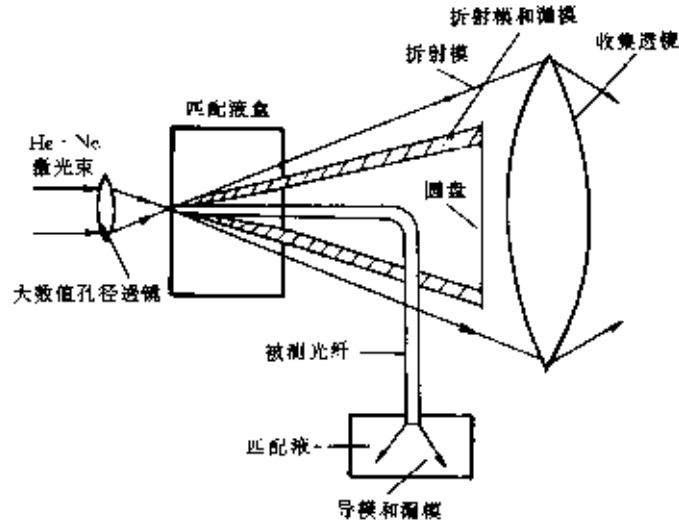


图 2.2 折射近场法测试原理示意图

被测光纤的注入端浸在匹配液中,浸油折射率比光纤包层折射率略高。用一数值孔径比光纤最大理论数值孔径大得多的透镜系统将扩展了的 He-Ne 激光束会聚为一小光斑(约为 $1\mu\text{m}$),注入到光纤端面上。可以推知:较小入射角的光线将在光纤中激励起折射模,逸向包层外面;入射角介于上述两者之间的光线则可形成漏泄模,一部分随传导模一起传到输出端,一部分与折射模一样辐射到包层外面。当光斑沿着光纤直径扫描时,由于 $n(r)$ 变化,各点的本地数值孔径 $NA(r)$ 不同,各处折射模功率亦不同,折射模功率分布与折射率分布相似。测得折射模功率分布,就可求出折射率分布。

折射近场法的优点是,可直接测出光纤的绝对折射率分布,既能测量单模光纤,又能测量多模光纤,测试精度高,空间分辨率小等。

2. 试验装置

折射近场法试验装置,如图 2.3 所示。有关试验装置的主要组成部分的功能分别简述如下:

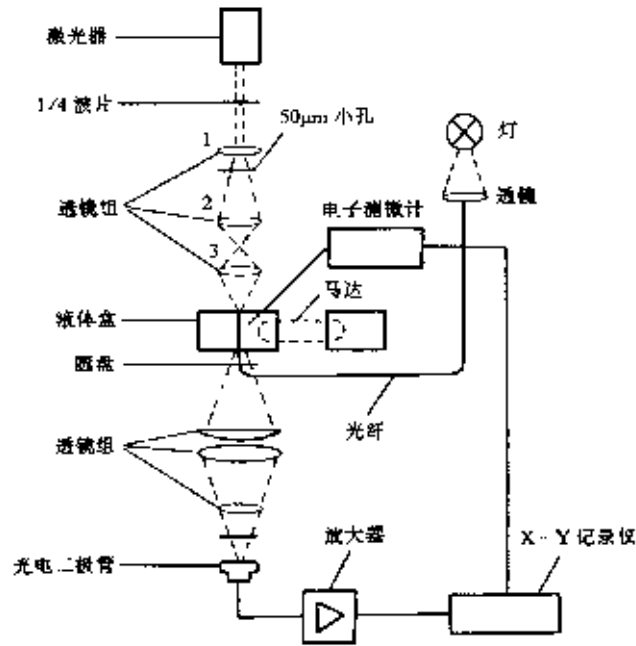


图 2.3 折射近场法试验装置示意图

(1) 光源

应使用一个输出功率为 1mW 的稳定激光器，输出模式为 TEM₀₀ 模。一般，选用波长为 633nm 的氦氖(He-Ne)激光器，但外推到其它波长时必须用修正系数对其结果加以修正。应注意，在 633nm 波长的测量可能给不出较长波长上的全部信息，特别是不均匀的光纤掺杂可能影响这种修正。

由于光在空气-玻璃界面的反射与角度和偏振状态密切相关，所以加入一个 1/4 波片将光束从线偏振变为圆偏振。一个置于透镜 1 焦点处的小孔作为空间滤波器。

(2) 注入光学系统

注入光学系统应对光纤的数值孔径满注入，并将光束聚焦到光纤平的输入端面上。光束光轴与光纤轴夹角应在 1° 以内，装置的分辨率取决于聚焦光斑尺寸，为了使分辨率最高，聚焦光斑尺寸应尽可能小。对多模光纤，光斑尺寸宜小于 1.5 μm；对单模光纤，光斑尺寸宜小于 1.0 μm。试验装置应确保聚焦光斑应能沿整个光纤横截面扫描。

(3) 液体盒

液体盒中折射率匹配液的折射率应稍高于光纤包层折射率。液体盒的位置由计算机控制的 X-Y 电动机驱动，并由 X-Y 电子测微计检测。

(4) 光探测器

只要能收集全部折射光，可采用任何方便的方法收集折射光，并传到探测器。通过计算确定圆盘尺寸及在中心轴上的位置。

(5) 获得数据

按照扫描法和规定要求，记录处理测得的光强分布，并以合适的形式给出。用一计算机驱动的 X-Y 电动机记录液体盒位置和相应的功率电平，处理测得的数据。

3. 试验程序

(1) 试样准备

试样长度应小于 2m，浸入液体盒中那段光纤的被覆层应去除，试样两个端面应清洁、光滑与光纤轴垂直。

(2) 装置校准

从液体盒中取出光纤对装置进行校准。测量期间，光锥角随入射点处光纤折射率的不同而变化（即通过圆盘功率的变化）。如已从液体盒中取出光纤，并且已知液体折射率及液体盒厚度，可通过沿光轴平移圆盘模拟角度的变化。通过把圆盘移动到若干个预定位置，可得到相对折射率剖面图。如果准确知道在测量波长和温度下包层或匹配液的折射率，就可准确确定绝对折射率 n_1 和 n_2 值。

也可借助一根已知其恒折射率值的细棒或一根已知有精确的多层阶跃折射率值的多模光纤对装置进行校准。

(3) 折射率剖面测量

将被试光纤注入端浸在液体盒中。同时激光束对中并聚焦到光纤端面上。

收集通过圆盘的全部折射光并聚焦到探测器光电二极管上。聚焦的激光光斑扫描整个光纤端面，直接获得光纤折射率的两维分布图。由这个折射率分布曲线，就可以计算出光纤的几何参数。

(4) 几何特性

一旦完成了折射率剖面测量，将芯-包折射率边界处各点分别与平均的芯折射率和包层折射率之间的平均值相重合就获得了芯轮廓。包层轮廓的确定方法与芯轮廓相同，所不同的是包层轮廓是在包层折射率匹配液边界获得的芯同心度误差。几何尺寸分析是利用芯和包轮廓数据来进行。

4. 试验结果

测量结果报告中应包括下列内容：试验装置、所用的扫描法说明、光纤识别号、测得的折射率分布图。

通过测得的折射率分布图形确定出包层直径、芯同心度误差、包层不圆度、芯直径等。

三、侧视法

1. 测量原理

侧视法是单模光纤尺寸参数测定的第二替代试验方法。侧视法的测量原理是通过测量光纤中折射光的光强分布来确定光纤的尺寸参数：芯同心度误差、包层直径和包层不圆度。

2. 试验装置

侧视法试验装置，如图 2.4 所示。有关试验装置的主要组成部分的作用简述如下：

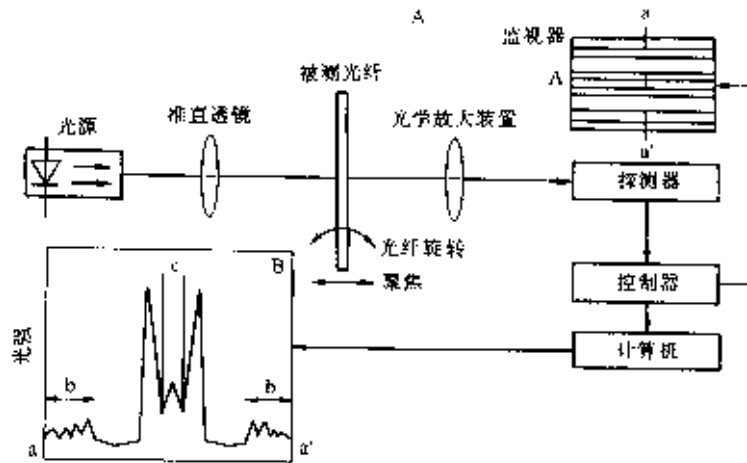


图 2.4 侧视法试验装置

(1) 光源

使发光光源与轴线平行，在测量的整个过程中，光源光强可调，光源位置、光强和波长应稳定。通常，选用稳定且高光强光源，例如发光二极管（LED）。

(2) 试样

被测试样应是一短段光纤。应剥除被观测那部分光纤的预涂覆层。测量中，光纤的表面应保持清洁。

(3) 光学放大装置

光学放大装置是由一个光学系统（如显微物镜）组成。光学系统放大光纤中折射光的光强分布至扫描探测器探测平面。观测平面应在光纤轴前保持固定距离处。选择的放大倍数应与所要求的空间分辨率相一致，且记录下来。

(4) 探测器

用一合适的探测器在沿与光纤轴线垂直的观测面来确定放大的光强分布。观察图像用的是图像显示器或电耦耦合器件摄像机。在所要求的测量范围内，探测器应具有线性特性。探测器的分辨率应与所要求的空间分辨率相匹配。

(5) 数据处理

用一台带有合适软件的计算机来对光强分布进行分析处理。

3. 试验程序

装置校准是通过扫描一段试样长度来测量光学放大装置的放大倍数。记录这个放大倍数。将光纤固定在试样夹中，并放入测量系统。调整光纤轴与测量系统光轴垂直，对不同观察方向（绕光纤轴旋转光纤，保持光纤轴与观察平面距离恒定），记录下与光纤轴垂直线（如图 2.4 中 A 图 a-a'）的观察面的光强分布。通

通过分析放大的图像（如图 2.4 中 B 图 b）中径向光强分布的对称性就能确定包层直径和光纤的中心位置。芯的中心位置是通过分析聚焦光（如图 2.4 中 B 图 c）的光强分布来确定的。光纤的中心位置与纤芯的中心位置之间的距离对应于纤芯同心度误差的标称观测值。

如图 2.5 所示，用试验获得的芯同心度误差数值拟合成随旋转角变化的正弦函数曲线。

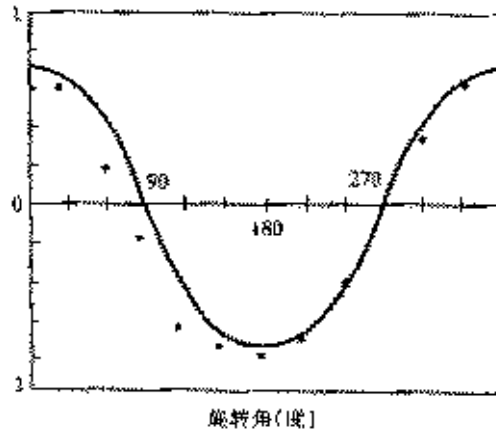


图 2.5 测得的模场同心度误差（MFCE）与旋转角的关系

从液体盒中取出光纤对装置进行校准。测量期间，光锥角随入射点处光纤折射率的不同而变化（即通过圆盘功率的变化）。如已从液体盒中取出光纤，并且已知液体折射率及液体盒厚度，可通过沿光轴平移圆盘模拟角度的变化。通过把圆盘移动到若干个预定位置，可得到相对折射率剖面图。如果准确知道在测量波长和温度下包层或匹配液的折射率，就可准确确定绝对折射率 n_1 和 n_2 值。

也可借助一根已知其恒折射率值的细棒或一根已知有精确的多层阶跃折射率值的多模光纤对装置进行校准。

折射率剖面测量将被试光纤注入端浸在液体盒中。同时激光束对中并聚焦到光纤端面上。

收集通过圆盘的全部折射光并聚焦到探测器光电二极管上。聚焦的激光光斑扫描整个光纤端面，直接获得光纤折射率的二维分布图。由这个折射率分布曲线，就可以计算出光纤的几何尺寸参数。

一旦完成了折射率剖面测量，将芯-包折射率边界处各点分别与平均的芯折射率和包层折射率之间的平均值相重合就获得了芯轮廓。包层轮廓的确定方法与芯轮廓相同，所不同的是包层轮廓是在包层折射率匹配液边界获得的芯同心度误差。几何尺寸分析则利用芯和包轮廓数据来进行。

4. 试验结果

测量结果报告中应包括下列内容：试验装置、所用的扫描法说明、光纤识别号和测得的折射率分布图。

通过测得的折射率分布图形确定出包层直径、芯同心度误差、包层不圆度和芯直径等。

四、机械法

1. 测量原理

机械法的测量原理是通过两个平砧与受试光纤直径方向上的两个相对侧面的机械接触来测量光纤试样的直径。

机械法适用于多模光纤和单模光纤包层直径的精度测量，用来向工厂提供作为校准光纤的样品。这种方法也用来测量光纤涂覆层直径和缓冲层直径。

2. 试验装置

采用两个表面很平的平砧，平砧与光纤侧面相接触。两平砧的表面互相平行，平砧与光纤的接触力应足够小，以保证平砧对光纤不产生物理变形。如果平砧表面不平坦，或者平砧对光纤产生变形，则应对测量结果作出修正。试验装置如图 2.6 所示。

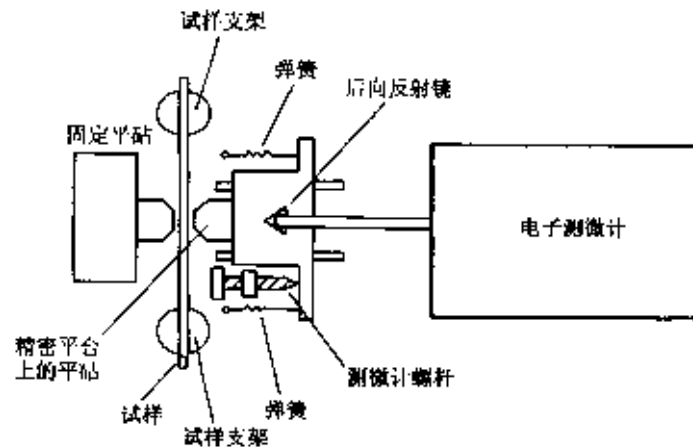


图 2.6 机械法测径试验装置（顶视图）

(1) 平砧

采用两个平砧，一个固定，一个可以移动的精密平台上的平砧安装在精密控制器上或者可以自由移动。通过弹簧（或由悬挂重物产生拉力，或采用其他类似手段）将可移动的精密平砧靠紧固定平砧（或光纤）。

(2) 电子测微计系统

用像双通路迈克尔逊干涉仪这样的电子测微计系统，它与后向反射镜或平面镜一起用于精确测量平台的移动，即可移动平砧的移动。

(3) 试样支架

支架将试样支撑在两平砧之间。短试样可从套圈（或 V 型夹具及其它类型固定器）中伸出。

3. 试验程序

清洁平砧表面，转动测微计螺杆使平砧表面相接触。将测微计螺杆转过头一点，使两个平砧仅靠弹簧张力贴在一起，记录电子测微计读数 L_1 。

然后调节测微计，使平砧表面之间的间隙大于试样直径。将试样置于两平砧之间的支架上。缓缓转动螺杆使平砧表面接触光纤，将测微计螺杆转过头一点，使平砧仅靠弹簧张力夹住光纤，记录电子测微计读数 L_2 。

试样直径就是 $L_2 - L_1$ 。如果变形不能忽略，该值还应加上修正值。为保证测量的重复性，应重复测量几次。

为确定试样的不圆度，应转动试样进行一系列测量。

测量时，应将平砧表面和试样表面的接触力调到足够小，使得试样或平砧产生的变形可以忽略。所要求的平砧与试样的材料，接触力大小应在用户和厂家之间达成协议。

4. 试验结果

试验结果报告中应包括：试验名称、试样识别号、试验数据及由多次测量的试样平均直径和标准偏差。

五、传输或反射脉冲延迟法

1. 测量原理

光纤群折射率已知时，通过测量光脉冲或脉冲串的传输时间进行光纤长度测定。这个方法也可以对已知长度的光纤进行群折射率测定。

光脉冲通过长度为 L ，平均群折射率为 N 的光纤的传输/延时时间 Δt 为：

$$\Delta t = \frac{NL}{c} \quad (2.4)$$

式中： c —真空中光速。

如果 N 已知，测量 Δt 可得出 L ；反过来，当 L 已知，则测量 Δt 可得出 N 。

2. 试验装置

有两种测量光脉冲传输时间的方法：传输脉冲延迟和反射脉冲延迟法。

测量传输脉冲的延迟时间（测量 Δt ），对应的试验装置如图 2.7 所示

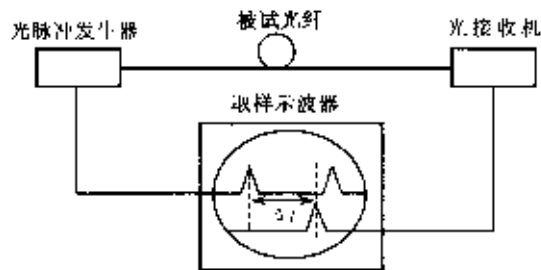


图 2.7 测量传输脉冲延迟时间的试验装置

测量反射脉冲的延迟时间（测量 $2\Delta t$ ），对应的试验装置如图 2.8 所示。

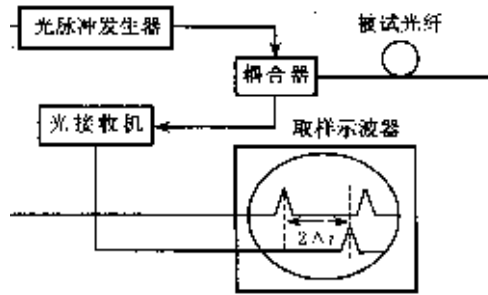


图 2.8 测量反射脉冲延迟时间的试验装置

有关测量传输脉冲延迟时间和测量反射脉冲延迟时间的试验装置的主要组成部分的功能，如下所述：

(1) 光源

① 采用取样示波器进行测量

光脉冲发生器最好是大功率激光器，它由频率和宽度可调的电脉冲系列发生器激励。应记录波长和谱宽。

② 采用计数器或后向散射装置进行测量

光脉冲发生器最好是大功率激光器，它由宽度可调的电脉冲系列发生器激励。两脉冲之间的时间，或大于传输脉冲的传输时间（采用计数器时为 Δt ），或大于反射脉冲的传输时间（采用后向散射装置时为 $2\Delta t$ ）。应记录激光器波长和谱宽。

(2) 光探测器

光接收机中光探测器最好选用高速雪崩光电二极管。光探测器在测量波长上应有足够的灵敏度，并且带宽应足够宽，使得光脉冲形状不受影响。

3. 试验程序

(1) 校准

测量光源至注入点的延迟时间（即装置本身的延迟时间）。

(2) 平均群折射率值

对一根长度已知的光纤进行测量，测量出 Δt ，计算出光纤平均群折射率值 N 。

(3) 长度测量

长度测量值可以是示波器屏上的时域读数，采用双通道示波器可改善测量的准确度使它与光纤的实际长度无关；也可以是电子计数器显示器上平均传输时间的读数，电子计数器应校准修正。

(4) 计算

光纤长度可通过下述两公式计算求得：

① 传输脉冲法

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{N} \quad (2.5)$$

② 反射脉冲法

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{2N} \quad (2.6)$$

式中: L — 光纤长度 (m)

Δt — 传输或反射时间 (ns);

N — 真空中平均群折射率;

C — 真空中的光速。

4. 试验结果

试验结果报告应包括下列内容: 试验名称、试样识别号、试验数据等。测量波长、群折射率、试验装置的延迟时间、传输和/或反射时间。

六、光纤伸长量的测定

1. 测量原理

本方法规定了测量光纤伸长量的试验程序, 其目的不在于测量光纤绝对应变, 而是测量负荷条件变化时应变的变化。

本试验完全适用于非色散位移和截止波长单模光纤。对于梯度折射率多模光纤, 由于光纤中产生的非纵向应力, 可能产生干涉模效应, 因此将测量结果认为是最终结果时应谨慎。

光纤伸长量测定可采用相移法或差分脉冲时延法。

光纤伸长应变 ε (即 $\Delta L/L$) 由下式给出:

$$\varepsilon = v \frac{\Delta t}{L} \quad (2.7)$$

式中: Δt — 差分脉冲时延;

L — 光纤长度;

v — 与光弹系数 k、真空中光速 c 和有效群折射率 N_{eff} 有关的常数。

采用 A 法时, 差分时延 Δt 由下式得到:

$$v = v \frac{kc}{N_{eff}} \quad (2.8)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta \theta}{360f} \quad (2.9)$$

式中: $\Delta \theta$ — 相移 ($^\circ$);

f — 调制频率 (Hz);

2. 试验装置

一标距长度已知的试验附加装置应能给光纤或光缆施加和改变纵向应力。为防止加载时光纤 (包括光缆中光纤) 滑动, 应适当固定试样端头。应提供一合适

的测量长度伸长量的工作台,用于相移法或脉冲延时法与机械法测得的光纤伸长量值的校准。

(1) 光学试验装置

试验装置在测量期间和测量时温度变化范围内应是稳定的。

① 相移法

典型试验装置,如图 2.9 所示。

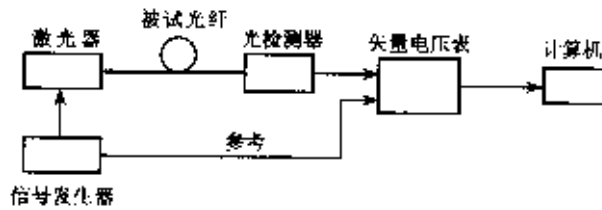


图 2.9 相移法试验装置

一个光源(激光器或 LED)、调制器、注入光学装置、信号检测器和参考信号等可用于本方法。相移法与光纤波长色散的试验方法类似,区别只在于相移法只采用一个激光器(或只需要一个波长的光源),因为本方法中测量的相移只是光纤应变化的函数。

② 差分脉冲时延法

典型试验装置如图 2.10 所示

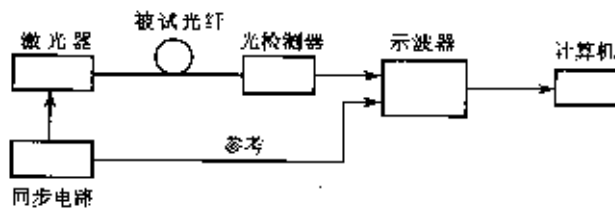


图 2.10 差分脉冲时延法

采用适当的试验装置,该装置应能测量光纤中信号的传输时间,例如一台脉冲/菲涅尔光时域反射计(OTDR)。

(2) 仪器分辨率

整个测量系统的应变测量分辨率应不大于 0.01%。该分辨率包括光学试验装置(调制频率、脉冲宽度等)和试验附加装置(试样标距长度、光纤/光缆端头固定器、负荷测量装置等)的分辨率。因为确定整个测量系统的精度和分辨率时,涉及了上述所有的因素,所以应对试验装置的每一部分单独估算。

试验应在室内条件下(典型为试验室)进行。只要测量期间温度变化范围稳定在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 之内,试验也可在其它条件下进行。对于极端温度和气压变化(大于 40 个大气压)的情况,有必要进行修正,特别是 ν 因子。

3. 试验程序

(1) 校准

将参考光纤连接到光学试验装置中，在已知足够线性的光纤伸长量范围内，逐渐增加光纤伸长量以确定 ν 值。

连续测量并记录作为光纤伸长量（用机械法测量）函数的相移值或脉冲时延值，由此确定的关系考虑了由应变导致的群折射率变化。通常，建议在同类型光纤中随机挑选试样进行校准；但是只要同类型光纤，就不必要在每次测量光纤伸长量之前重复校准。

(2) 测量

在参考条件（典型为室内条件）下读取以“度”表示的相移值或脉冲时延值，并记录这些数值作为参考。

使试样在规定负荷下产生沿长度方向的应变。施加负荷稳定后，再进行测量，并记录由应变产生的相移值或脉冲时延值以及机械法测量的光纤伸长量和/或光缆伸长量。对每一个施加的负荷应重复该测量步骤。

在负荷释放后，进行最终测量，以观察光纤应变是否返回到初始参考条件下的值。

4. 试验结果

测量结果应包括的内容：试验名称、试样识别号、试验数据 [在读取每一相移读数（脉冲时延数、长度读数）时施加的负荷值及计算出的应变值]。试验报告中应包含：光源类型和波长、调制器频率和类型、注入条件、试验方法和校准数据等。

第三章 光纤带尺寸参数测量

第一节 光纤带结构

一、结构

光纤带由具有预涂覆层的光纤和 UV 固化粘结材料组成，通过粘结材料将光纤集成为一个组合的线性阵列。粘结材料应紧密地与各光纤预涂覆层粘结成一体，其性能应满足光纤带的要求。

二、类型

根据粘结材料用量的多少，光纤带的典型结构可分为边粘型和包覆型，如图 3.1 和图 3.2 所示。

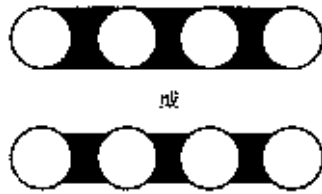


图 3.1 典型的边粘型光纤带结构



图 3.2 典型的包覆型光纤带结构

根据用户的要求，光纤带中的光纤有 2 芯、4 芯、6 芯、8 芯、10 芯、12 芯、24 芯、36 芯或更多芯数。光纤带中的光纤应平行排列不得交叉。

光纤带中相邻光纤应紧挨，中心线应保持平直。彼此互相平行和共面。

光纤带既可作为缆芯元件，又可作为一个单独的光纤带产品。

第二节 光纤带尺寸参数定义

一、定义

图 3.3 准确地标出了光纤带各种几何尺寸参数，以满足我们定义光纤带尺寸参数和测量需要。

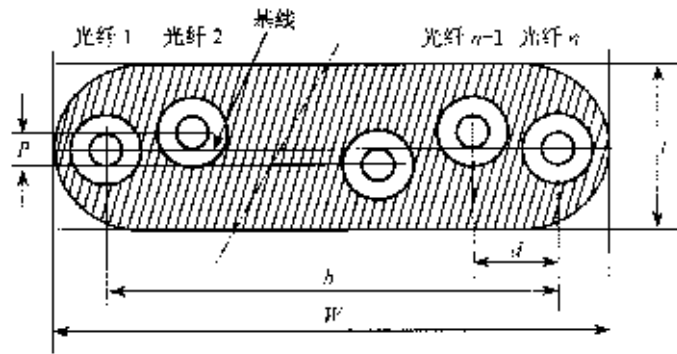


图 3.3 光纤带几何尺寸参数

(1) 宽度和厚度

宽度 w 和厚度 t 是包围光纤带横截面的最小矩形的长边和短边的尺寸。

(2) 基线

基线是在光纤带横截面中通过第一根光纤(光纤 1)中心和最后一根光纤(光纤 n)中心的直线。

(3) 光纤水平间距

光纤水平间距是光纤带横截面上两光纤中心在基线上垂直投影之间的距离。

光纤水平间距参数区别如下:

—相邻光纤中心间距离, 用 d 表示;

—两侧光纤中心间距离, 用 b 表示。

(4) 光纤垂直位置偏差

光纤垂直位置偏差是光纤横截面上光纤中心到基线以上的垂直距离规定为正偏差, 在基线以下的垂直距离规定为负偏差。

(5) 平整度

光纤带的平整度是正最大光纤垂直位置偏差与负最大光纤垂直位置偏差绝对值之和, 用 p 表示。

二、尺寸要求

除非产品规范中另有规定, 光纤带的最大几何尺寸参数应如表 3.1 所示。

表 3.1 光纤带的最大尺寸参数

带中光纤数 n	宽度 $w(\mu\text{m})$	厚度 $t(\mu\text{m})$	相邻光纤水平间距 $d(\mu\text{m})$	两侧光纤水平间距 $b(\mu\text{m})$	平整度 $p(\mu\text{m})$
2	700	400	280	280	—
4	1230	400	280	835	35

6	1770	400	280	1385	35
8	2300	400	300	1920	50
10	2850	400	300	2450	50
12	3400	400	300	2980	50

第三节 光纤带尺寸参数测量

一、目视测量法

1. 试验目的

本试验的目的是用于型式试验时确定光纤带的几何尺寸，即宽度、厚度和光纤的排列。一般不用于对最终产品的检验。

2. 试验装置

目视测量法采用的试验装置是具有合适放大倍数的读数显微镜或投影仪。

3. 试验程序

从被试样本光纤带上截取 5 段试样，试样在统计上具有独立性，并能代表被测光纤带的总体特征。

对于目视测量法有模具法和夹具法两种试验程序可供选用。

(1) 模具法

垂直于光纤带轴切割试样，切割的试样竖直放在用环氧树脂填满的模具中。如需要，待固化后再研磨和抛光端面，将试样放在测量装置中，使端面与光程垂直，用显微镜或投影仪进行测量。

注：试样制备应小心，不要改变光纤带结构，并能得到一个代表光纤包层和光纤带横截面的真实图像。

(2) 夹具法

将光纤带试样置于带纤夹具中，用光纤带热护套剥离工具去除光纤涂覆层和粘结材料 20~25mm，用酒精棉球擦洗清洁光纤的剥离部分。调整试样在夹具中的位置，在离光纤带剥离边缘 250~500mm 处切割光纤。截断和抛光光纤带试样的另一端，并用一准直光源照明该端。在显微镜下对准端面，测量光纤带试样的切割端。

注：试样制备应小心，不要改变光纤带结构，并能得到一个代表光纤包层和光纤带横截面的真实图像。

4. 试验结果

目视测量法的试验结果报告中应包括的内容有：试验方法、光纤带结构类型

和芯数、试样数目、光纤带宽度、厚度、和光纤排列尺寸参数（d、b、p）的最大值和平均值。

二、孔径规法

1. 试验目的

本试验的目的是检验光纤带的功能性能。为了保证光纤带功能性能，边粘型光纤带尺寸可以用孔径规法进行控制和最终检验，其意图是要证实光纤带端部是否能插入并对准商用剥离工具的导槽中。

2. 试验装置

孔径规法采用的试验装置是孔径规，其尺寸如图 3.4 所示。

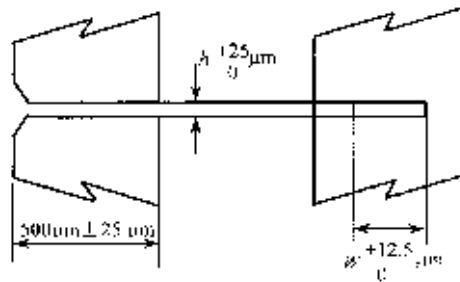


图 3.4 孔径规法尺寸示意图

3. 试验程序

从被测试样本光带上截取 5 段有代表性的光纤带试样，每段长度不小于 50mm。

将光纤带试样在中间部位夹持住，然后将端部 10mm 长光纤带插入孔径规。

4. 试验结果

孔径规法的试验结果报告中应包括的内容有：试验方法、孔径规尺寸、光纤带结构类型和芯数、试样数目和光纤带是否无机械损坏且自由地插入孔径规。

第四章 光纤传输特性和光学特性

第一节 光纤传输特性和光学特性测试目的

光纤的传输特性和光学特性对光纤通信系统的工作波长、传输速率、传输容量、传输距离和信息质量等都有着至关重要的影响。

光纤的传输特性和光学特性具体涉及到适用的特性有：衰减、色散、截止波长、模场直径、基带响应、数值孔径、有效面积、光学连续性和微弯敏感性等等。

本章着重介绍光纤的传输特性和光学特性的各个具体特性参数的定义，给出测量原理描述，介绍试验装置和试验程序。读者应当重点掌握描述光纤传输特性和光学特性各参数的基本概念、物理意义、在此基础上再深入理解光纤传输特性和光学特性各参数和测量原理及试验方法的实质。

第二节 性能测量

一、衰减

1. 定义

衰减是光纤中光功率减少量的一种度量，它取决于光纤的工作（波长）类型和长度，并受测量条件的影响。

在波长 λ 处，一段光纤上相距距离为 L 的两个横截面 1 和 2 之间的衰减 $A(\lambda)$ 定义为：

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} (\text{dB}) \quad (4.1)$$

式中： $P_1(\lambda)$ — 在波长为 λ 时，通过横截面 1 的光功率；

$P_2(\lambda)$ — 在波长为 λ 时，通过横截面 2 的光功率。

通常，对于均匀光纤来说，可用单位长度的衰减，即衰减系数反映光纤的衰减性能的好坏。衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 定义为：

$$\alpha(\lambda) = A(\lambda) / L \quad (4.2)$$

$$= \frac{10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)}}{L} \quad (\text{dB/km})$$

式中： L — 光纤长度 (km)。

$\alpha(\lambda)$ 值与选择的光纤长度无关。

在鉴别光纤性能和系统设计等实际应用中，人们最感兴趣的是光纤在工作波

长下的衰减系数，如在工作波长 $\lambda = 850\text{nm}$ 、 1310nm 和 1550nm 等处的衰减系数。

衰减系数随波长变化的曲线被称为衰减谱，其能直观且形象地反映出在一定波长范围内整个光纤长度上的衰减信息。

2. 测试方法

光纤衰减测量要特别注意，只有当光纤结构或材料均匀的并在稳态条件下，才能精确测量出光纤衰减系数，由各段光纤的衰减线性相加可得出串接的光缆链路的光纤总衰减。

常用的光纤衰减试验方法有：截断法、后向散射法和插入损耗法。它们的测量原理、试验装置和试验程序等内容介绍如下。

(1) 截断法

① 测量原理

截断法是测量光纤衰减特性的基准试验方法。在不改变注入条件下，分别测出通过光纤两个点的光功率 $P_1(\lambda)$ 和 $P_2(\lambda)$ ，再按定义计算出光纤的衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 。 $P_2(\lambda)$ 是长光纤末端测得的输出光功率； $P_1(\lambda)$ 为截断 2m 光纤后，短光纤末端测得的输出光功率，即长光纤的输入光功率。

由上得知，截断法不可能获得整个光纤长度上的衰减变化情况，在变化条件下也很难测出光纤衰减变化，截断法的优点是测量精度高，其缺点是在某些情况下是破坏性的。

② 试验装置

衰减测定可在一个或多个波长上进行，或者在某一波长范围内测量衰减谱特性。适宜用来测量衰减或衰减谱的试验装置，分别如图 4.1 和图 4.2 所示。截断法测量衰减或衰减谱的试验装置主要有：光源、调制、注入系统、滤模器、包层模剥除器和光探测器等。

A. 光源

应采用稳定辐射的光源，如卤钨灯、激光器或发光二极管。依据测量类型选择合适的光源。在完成测量过程的长时间内，光源位置、光强和波长应保持稳定。用规定窄的光源谱线半幅全宽(FWHM)来保证对光纤衰减谱特性有足够的分辨率。

B. 调制

为了改善接收机信噪比，通常对光源进行调制。这时，应将光探测器连接到与光源调制频率同步的信号处理装置上。检测系统灵敏度应有良好的线性。

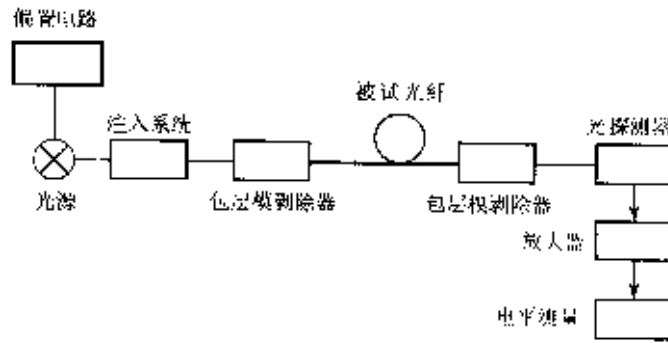


图 4.1 截断法测量衰减的试验装置

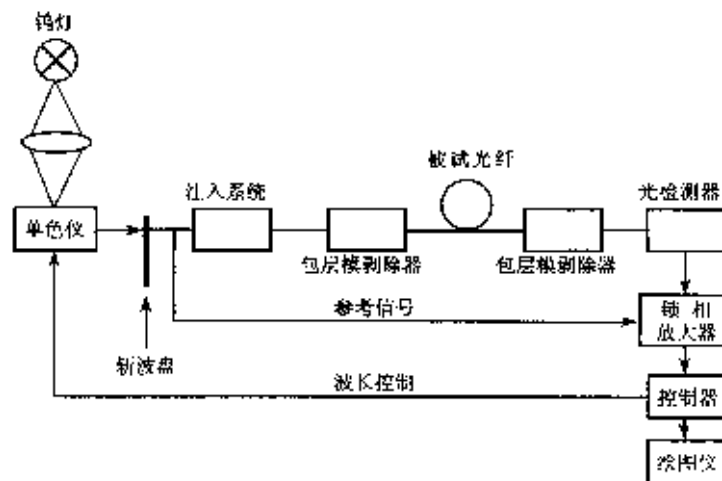


图 4.2 截断法测量衰减谱的试验装置

C. 滤模器

必须小心不要让高阶模传过截断长度，在许多情况下是采用对光纤一个圈的方法来滤除高阶模。

D. 注入系统

采用的注入条件必须保证足以激励基模，例如，稳定的注入方法为：单模光纤注入和多模光纤注入技术。

a. 单模光纤注入条件

单模光纤注入条件应足以激励起基模，滤去高阶模，剥除包层模，注入光纤的光功率在测量期间应保持稳定。通常采用下列两种注入技术：

- 尾纤：采用尾纤时，应在光源尾纤和被试光纤之间使用折射率匹配材料消除干涉效应。

- 光学透镜系统：采用光学透镜系统时应能使光纤注入端与注入光束重复对中并稳定固定的定位装置。为了减少光纤定位对注入功率的敏感性，可采用满注入方法。

为在感兴趣的波长范围内滤除高阶模，应采用诸如半径足够小的单个光纤圈（例如 30mm）作为滤模器将截止波长移至所关注的最短波长以下，但光纤圈的

半径不能小到引起与波长相关的振荡。

为保证沿光纤短距离（截留长度）传输后不存在包层模，需采用包层模剥除器。包层模剥除器通常由折射率等于或稍大于光纤包层折射率的材料组成，可以是一种直接加在除去预涂覆层光纤上靠近端点处的折射率匹配液。在某些情况下，光纤预涂覆层可起包层模剥除器作用。

b. 多模光纤注入条件

多模光纤注入条件应避免注入高阶瞬态模式，使沿光纤的功率分布基本不变化（即稳态模分布），从而使光纤衰减与长度近似成线性关系。通常采用下列两种注入技术：

· 滤模器

采用滤模器的衰减测量注入装置如图 4.3 所示。

可以选择一根与被测光纤类型相同的足够长（典型长度不短于 1km）光纤作为滤模器，也可选择将被试光纤以低张力在芯轴上绕几圈（典型为 3~5 圈）的芯轴形式滤模器，芯轴直径选择应保证在被测光纤中激励的瞬态模受到足够的衰减，从而达到稳态模分布；另外也可以采用搅模器和滤模器的组合形式，即将一些金属球随机分布在不短于 0.5m 的与被试光纤类型相同的光纤上，在金属球上另压力来达到稳态模分布。

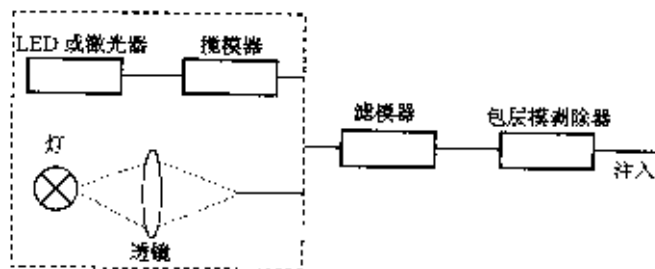


图 4.3 采用滤模器的衰减测量注入装置

采用远场测量方法比较均匀满注入的被试光纤（不短于 1km）远场功率分布与采用芯轴滤模器（或采用搅模器和滤模器组合形式）的短段光纤远场功率分布。芯轴直径（或施加于金属球的压力）的选择应保证两者的远场功率分布相接近。短光纤辐射图数值孔径应为长光纤数值孔径的 94~100%。芯轴直径（或施加于金属的压力）可能随光纤不同而异，这取决于光纤和预涂覆层类型。通常芯轴直径为 15~40mm，在 20mm 长光纤内绕五个圈。

滤模器前注入的光功率分布应是基本均匀的，对于不能产生这种分布的光源，如 LED 或激光器，应采用搅模器。搅模器可由一种合适的光纤排列组成（例如，阶跃-梯度-阶跃型折射率分布光纤排列）。

· 几何光学注入：采用空间状态限制的衰减测量的几何光学注入装置，如图 4.4 所示。

注入光束光斑尺寸应为被测光纤纤芯直径的 70%，数值孔径应为被试光纤数值孔径的 70%，这是不会产生泄漏模（即非束缚模）的最大几何注入功率分布。例如，50/125 μm 、数值孔径为 0.20 的梯度型折射率分布的多模光纤，空间状态限制注入条件为均匀的 35 μm 光斑和 0.14 数值孔径。

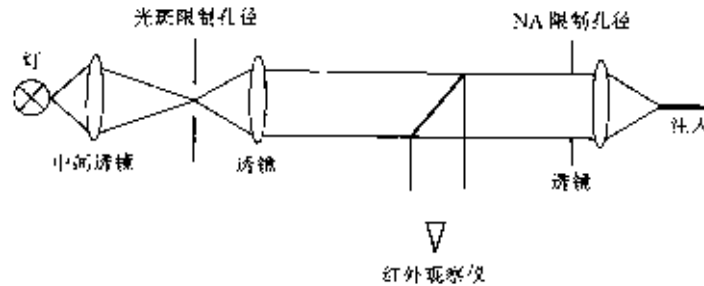


图 4.4 空间状态限制衰减测量的几何注入装置

E. 包层模剥除器

包层模剥除器促使包层模转换成辐射模。因此，包层模从光纤中剥除。

F. 光探测器

应使用一合适的光探测器，以便将从被测光纤输出的所有辐射光都耦合到光探测器。光探测器的光谱响应应与光源的光谱特性相适应。光探测器应稳定，且具有线性灵敏特性。

③ 试验程序

被测光纤的两个端面应清洁、光滑，且与光纤轴垂直。测量未成缆光纤应在松绕的光纤盘上进行，即光纤盘表面不应引起微弯。

将被测光纤放入试验装置中，记录输出光功率 P_2 保持注入条件不变，将光纤截断至截留长度（例如距离光注入点 2m）记录从光纤截留长度输出的光功率 P_1 。

按式 (4.1) 衰减定义，由测得的 P_1 和 P_2 计算出 P_1 与 P_2 两功率点间光纤段的衰减和衰减的系数。

(2) 后向散射法

① 测量原理

后向散射法测量光纤衰减的第一替代法。它基于光纤中双向后向散射光信号来提取光纤衰减或衰减系数、光纤长度、衰减均匀性、点不连续性、光学连续性、物理缺陷和接头损耗等信息。

单向后向散射测量适用于一些特殊情况，例如检验成缆光纤的散射斜率的变化。

因为后向散射法是一种非破坏性测试方法，所以这种方法被广泛应用在光纤光缆研究、生产、质量控制、工程施工、验收试验和安装维护时对光缆链路点不

连续性作大致判断。

后向散射法的测量原理是将大功率的窄脉冲注入被测光纤，然后在同一端检测光纤后向返回的散射光功率。由于主要的散射作用是瑞利散射，瑞利散射光的特征是它的波长与入射光波的波长相同，它的光功率与该点的入射光功率成正比，所以测量沿光纤返回的后向瑞利散射光功率就可以获得光沿光纤传输的衰减及其他信息。图 4.5 所示为后向散射法测得的衰减曲线。因为信号是通过数对数放大器处理的，衰减曲线相对后向散射功率是对数标度，即读得的是电平值。而且是经过往返两次衰减的值，所以曲线斜率为常数的 AB 段光纤的衰减为：

$$A(\lambda)_{AB} = \frac{1}{2}(P_A - P_B) \quad (\text{dB}) \quad (4.3)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{L_{AB}} \quad (\text{dB/km}) \quad (4.4)$$

至于衰减曲线坐标的长度标准是通过时标换算得到的，即：根据光在光纤中传播速度和传输时间换算为长度（距离）。

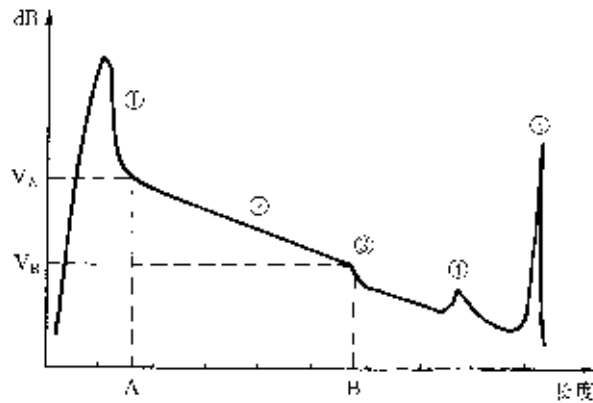


图 4.5 后向散射法测得的衰减曲线

光在真空中的传播速度 $c_0=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，光纤的折射率为 $n(\lambda)$ ，所以光在光纤中的传输速度 $c=c_0/n(\lambda)$ 。

设衰减曲线横坐标 AB 间的时间间隔为 Δt ，注意这是经过往返传输的时间，故 AB 间的长度（距离）为：

$$L = \frac{c_0}{n(\lambda)} \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (\text{m}) \quad (4.5)$$

例如，光纤在 $0.85 \mu\text{m}$ 波长的 $n(\lambda)=1.482$ ，当 $\Delta t=12 \mu\text{s}$ 时，代入式 (4.5) 计算的长度或距离 $L=1214.6 \text{m}$ 。

由图 (4.5) 得知，单向后向散射衰减曲线仅反映的是衰减与长度的关系。利用后向散射法测得的单向后向散射衰减曲线，我们可以监测到许多现象，分别见图 4.5 中曲线的 ① ~ ⑤ 段。

- ① 表示在光纤输入端由光分路器和耦合器产生的反射。
- ② 是散射斜率恒定区。
- ③ 由于局部缺陷、连接或耦合造成的不连续性。
- ④ 表示散射斜率随波长而变化。
- ⑤ 在光纤输出端的波动，例如衰减随温度的变化。

② 试验装置

通常，后向散射的光信号的信号电平小，且与噪声电平相当。为改善信噪比和动态测量范围，常常使用一大功率光源与检测到的信号进行信号处理的装置相连接。另外，通过调节脉冲宽度来妥善处理分辨率与动态范围之间的关系。

后向散射法试验所用的装置就是光时域反射计 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)。OTDR 的组成，如图 4.6 所示。OTDR 各主要组成部分的作用，如下所述。

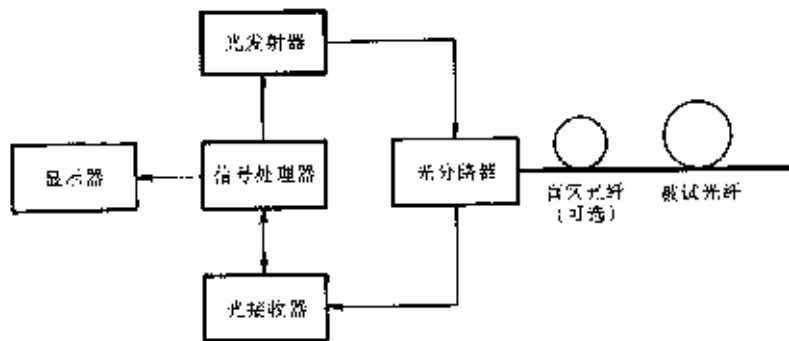


图 4.6 OTDR 试验装置框图

A. 光发射器

通常包括一个脉冲激光二极管，能提供一个或多个脉冲宽度和脉冲重复频率。多波长仪器通常具有多个光源，标称中心波长可分为 850nm、1300nm、1310nm 或 1550nm，或按光纤产品规范规定。中心波长应在规定值的 15nm 以内。对于精确测量，中心波长应在规定值的 10nm 以内。如果光源中心波长和规定波长差值大于 10nm，应在测量结果报告中指出。光源均方根谱宽 (RMSW) 应不大于 10nm，或者光源半幅全宽 (FWHM) 应不大于 25nm。

如果衰减谱模型中采用 OTDR 数据，实际中心波长应在规定值的 2nm 之内，水峰波长区域 (1360 ~ 1430nm) 的光源谱宽不应大于 10nm (FWHM) 或 4nm (RMSW)。

采用诸如光谱分折仪这样合适的测量仪器对光源中心波长和谱宽进行周期检测。

B. 输出口

以某种方法将被测光纤或盲区光纤连接到仪器面板或光源尾纤上。

C. 光分路器

耦合器/光分路器将光源输出光耦合到光纤和将后向散射光耦合到探测器，同时避免光源与探测器的直接耦合。耦合器/光分路器不应有偏振效应。

D. 光接收器

通常包括光电二极管探测器，探测器的带宽、灵敏度、线性度及动态范围应与采用的脉宽和接收信号电平相适应。

E. 信号处理

用一个对数响应的信号处理器处理信号，并采用信号平均技术提高信噪比。

F. 显示器

显示器可以是阴极射线管、液晶显示器或是这两者，也可以是计算机的部件。显示器上垂直分度标尺为分贝数，对应于往返光信号损耗之半的分贝数变化；水平分度标尺为 m 或 km，对应于往返光信号群时延之半的长度。

仪器面板控制器可对显示器上的曲线进行定位，并能对长度或分贝的较小区域显示的部分曲线进行扩展。可控制一个或多个能对曲线上某些点定位的可移动光标，显示器上给出移动光标的坐标和一些适合于本仪器的辅助信息。

G. 数据接口（可选）

仪器可提供显示曲线的硬拷贝，并能与计算机连接。

H. 反射控制器（可选）

为将高菲涅尔反射引起的接收器瞬时饱和降到最低限度，以减少每一反射点后光纤盲区范围，选用电子屏蔽或在耦合器/光分路器中采用适合的方法。

为了减少 OTDR 连接处初始反射对结果的影响，通常在 OTDR 连接器和被测光纤之间采用一段盲区光纤。

I. 接头和连接器

为了将 OTDR 曲线的附加影响减至最小，OTDR 所要求的任何接头或连接器应具有低插入损耗和低反射（高回波损耗）。

③ 试验程序

被测试样为成盘光纤或光缆中的光纤。可在工厂或现场对一段或连接起来的多段光纤进行测量。

将被测光纤与光耦合系统对准。从受试光纤每一端测量一个单向后向散射衰减曲线。图 4.5 所示的是一个单向后向散射衰减曲线的实例。用信号处理器来分析每个散射衰减曲线，且记录在对数坐标上。由于光纤两端的耦合和光分路器引起反射，所以要去掉衰减曲线两端的部分（参见图 4.5 中的①和③两部分）。

由散射衰减曲线两端之间的时延 t 和光纤的群折射率 N 来计算光纤的长度 L_f 即：

$$L_f = \frac{ct}{N} \quad (4.6)$$

式中： c —真空中的光速。

我们用下列给出的方法由两个测得和记录的单向后向散射衰减曲线来求得双向后向散射衰减曲线。

$a(x)$ 和 $b(z)$ 是描述两个单向后向散射衰减曲线的函数，单位为 dB， x 和 z 分别是光纤两端至光注入点的最近距离。双向后向散射衰减曲线由下式给定：

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (4.7)$$

由端点位置 x_0 和 x_1 ($x_0 < x_1$) 定义的光纤段的衰减系数， $A(x_0, x_1)$ 可按下式求得：

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (4.8)$$

式 (4.8) 可用最小二乘法对 x_0 和 x_1 之间的数据进行线性拟合求得。两端点之间的光纤衰减系数也可按式 (4.8) 求出。所用的数据应尽可能靠近各端点。但是，这些点应选在盲区和端点反射区之外。

A. 长度测定

如图 4.7 所示，将光标置于试样末端反射脉冲上升边缘的一点，确定 Z_2 ；将同一光标或另一光标置于试样始端反射脉冲上升边缘的一点确定 Z_0 （如试样前无光纤或光缆段则 Z_0 为零，如试样前有已知长度为 Z_0 的光纤或光缆段，则 Z_0 为 Z_0 ）。如果由于不连续性极小而不易确定 Z_2 和 Z_0 的位置，就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位，对于 Z_2 的定位如有可能，切割试样远端，使那里产生反射。试样长度为 $Z_2 - Z_0$ 。

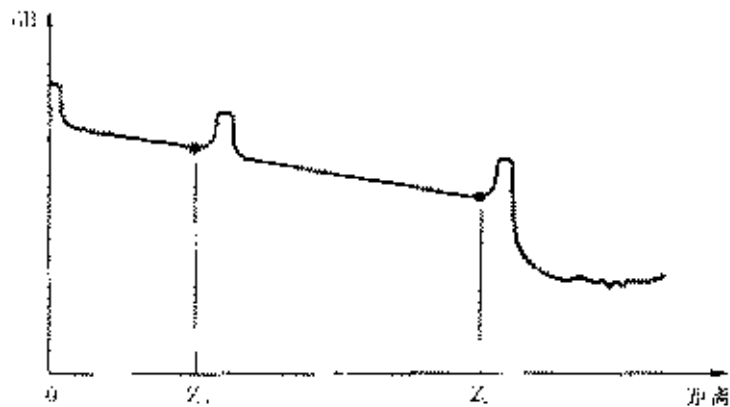


图 4.7 长度测定的 OTDR 衰减曲线

B. 衰减和衰减系数的测定

如图 4.8 所示，将光标置于试样始端反射脉冲上升边缘的一点，确定 Z_0 （如试样前无光纤或光缆段，则 Z_0 为零）。

将光标置于试样曲线线性始端（紧挨近端）。确定 Z_1, P_1 ；将同一光标或另一光标置于试样末端反射脉冲上升边缘的一点，确定 Z_2, P_2 。

如果因不连续性极小而不易确定 Z_0 和 Z_2 的位置，就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位；对于 Z_2 的定位，如可能，切割试样远端，使那里产生反射。

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减：

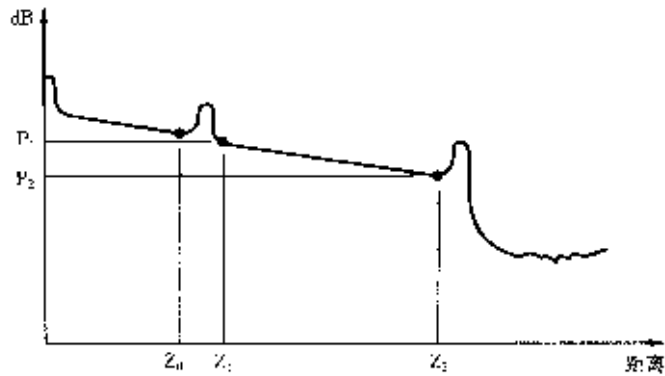


图 4.8 OTDR 衰减曲线

$$A = (P_1 - P_2) \quad (\text{dB}) \quad (4.9)$$

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减系数：

$$\alpha = (P_1 - P_2) / (Z_2 - Z_1) \quad (\text{dB/km}) \quad (4.10)$$

光纤或光缆段总单向后向散射衰减：

$$A_{\text{总}} = \alpha (Z_2 - Z_0) \quad (\text{dB}) \quad (4.11)$$

通常，OTDR 能直接给出 A 值和 α 值。该数据可以用两点法给出，也可以用最小二乘（LSA）法拟合曲线给出。LSA 法得出的结果可能与两点法得出的结果不同，但 LSA 法的重复性更好。

应进行双向测量，将双向测量获得的数值取平均得到精确衰减和衰减系数；如光纤两端均匀性好，亦可进行单向测量。

需要时可进行多波长测量，对非色散位移单模光纤和色散位移单模光纤可按照衰减谱模型给出的关系式计算衰减谱。

C. 点不连续的测定

点不连续是连续的 OTDR 信号在朝上或朝下方向的暂时或永久性的局部偏移，偏移特征能够随试验条件（例如 OTDR 信号脉宽、波长和方向）变化。

点不连续的持续时间约为脉冲宽度。为了确定不连续（而不是衰减不均匀性）的存在，应采用两种不同的脉宽观察有疑问的区域。如果损耗或增益的形状随脉宽而变，则该异常情况是点不连续；否则要按照测量光纤或光缆衰减的程序进行衰减不均匀性测量。

如图 4.9 所示，将光标置于不连续点处功率开始上升或下降的始端来确定点不连续的位置。一般仪器要求一对光标置于不连续点处的两侧，将两根最佳拟合

直线（每一根分别由两点法或最小二乘法得到）外推到不连续点处的位置。两直线在不连续点处的垂直距离为点不连续的视在损耗或增益。

应进行双向测量，将双向测量取得的数值进行平均（这样可消除视在增益）得出点不连续损耗。

(3) 插入损耗法

① 测量原理

插入损耗法是测量光纤衰减特性的第二替代法。其测量原理类似于截断法。只不过插入损耗法用带活接头的连接软线代替短光纤进行参考测量，计算在预先相互连接的注入系统和接收系统之间（参考条件）因插入被测光纤引起的功率损耗。因此，功率 P_1 、 P_2 的测量没有截断法那么直接，而且由于连接的损耗会给测量带来误差，所以插入损耗法不适用于工厂来测量光纤和光缆的制造长度的衰减。

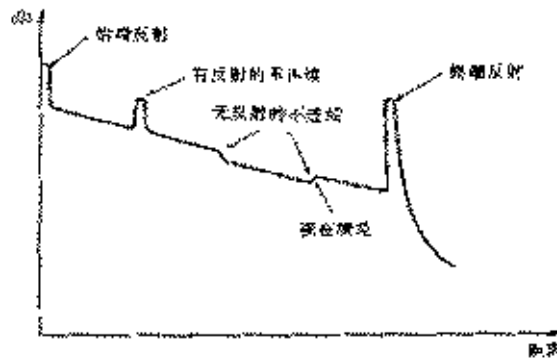


图 4.9 OTDR 点不连续曲线

插入损耗法的缺点是测量精度低于截断法。但是它具有非破坏性，即不需剪断被测光纤，被测光纤两端各带半个连接器和操作简单等优点。因此，用插入损耗法做成的便携式仪表，非常适用于现场用来测量带有连接器光缆中继段长度的总衰减。

插入损耗法有两个可供选择的参考条件下的测量原理方案，如图 4.10 所示。它们的区别本质在于注入系统和接收系统。图 4.10(a) 方案中固定到被测光纤的半个连接器的质量会影响测量结果。图 4.10(b) 方案则不存在这种影响。原因是它们采用光学系统精密耦合，代替了连接器耦合，它的测量精度更高，更适合于只需要知道光纤的真实衰减的场合，反之，当被测光纤段带有半个连接器，而且必须与其它元件串接时，要考虑半个连接器与标称衰减偏差时，图 4.10(a) 方案测得的结果才更具有意义。

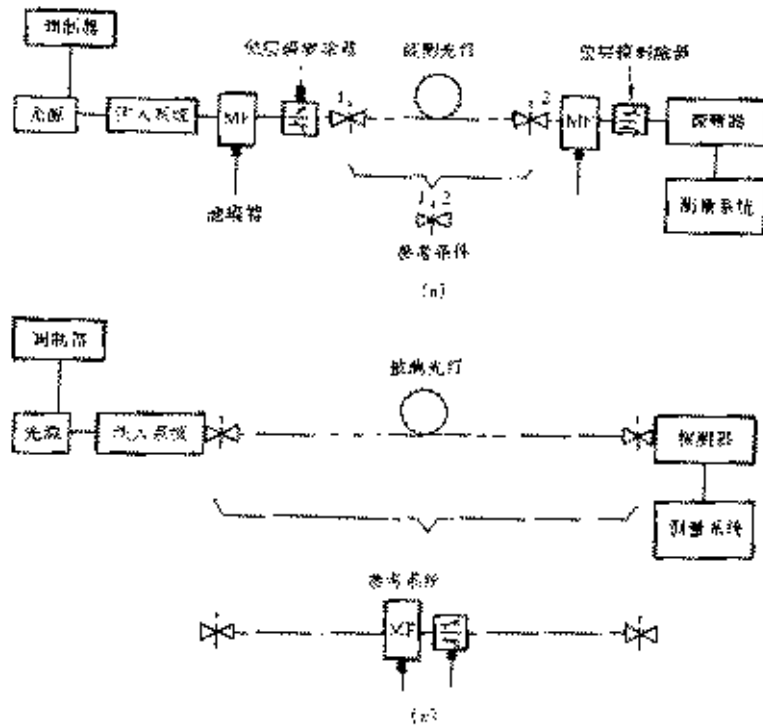


图 4.10 典型的插入损耗法测试装置

② 试验装置

插入损耗法测试装置如图 4.10 所示。衰减测量可在一个或多个波长上进行，而衰减谱的测量则是在一个波长范围内进行的。

A. 光源

大功率稳定辐射光源适合于作为光源，例如卤钨灯、激光器或发光二极管。如果用宽光谱光源，其后应接上一个波长选择器（这个波长选择器被插在探测器之前）。在考虑选用波长选择器时，应该知道每种情况下光源的标称波长。光谱宽（FWHM）要窄，应与光纤衰减谱的任何分辨特征相适应。

B. 调制器

为了改善接收机信噪比，通常对光源进行调制。这时，将光探测器连接到与光源调制频率同步的信号处理装置上。检测系统灵敏度应有良好的线性。

C. 注入系统

a. 方案 1

光源与被测光纤相同标准特性的一短段单模光纤相耦合，而且配置一个滤模器和一个包层模剥除器。

上述的一短段单模光纤借助一个非常精密的耦合装置与被测光纤耦合，以减小耦合损耗和确保测量结果有意义。如果测试光纤是用半个连接器来耦合，应用一个比较高质量的半个连接器来与注入光纤连接。

b. 方案 2

通过一个合适的光学系统将光源耦合到被测光纤中。在光纤输入端面的注入光斑具有一近场光强，在模场直径内有一个均匀的远场光强，那么被测光纤则有一个远场光强。

光学系统使用几个透镜和一个光纤定位器。光先注入到一根阶跃折射率分布多模光纤，再将多模光纤与被测光纤连接。试验完成是通过任何耦合器或半个连接器与那些被测光纤进行连接的。

D. 参考系统

参考系统仅适用于方案 2。这个系统是由一短段与被测光纤相同标准特性的光纤组成的。该光纤带有一个滤模器和一个包层模剥除器，它们都不应对基模引起任何损耗。

E. 滤模器

滤模器只允许基模在光纤中传输。例如，这可以通过对光纤进行适当的弯曲来实现。

F. 包层模剥除器

包层模剥除器用来促使包层模转换成辐射模。如果光纤本身不传输包层模，那么就不需要选用包层模剥除器。

G. 光探测器

光探测器的光谱响应要与光源的光谱特性相一致。光探测器要具有线性敏感特性。

a. 方案 1

光探测器应与被测光纤具有相同特性的单模光纤相连接。该光纤应带有一个滤模器和一个包层模剥除器。

b. 方案 2

被测光纤的端面应定位在光探测器的前面，应选用一个适合的光探测器来截断来自光纤的所有辐射。光探测器应是空间均匀的。光探测器与一阶跃折射率分布多模光纤相连接。该光纤再通过任何耦合装置或一个与被测光纤进行连接的半个连接器来与被测光纤进行耦合。

③ 试验程序

如果光纤与连接器耦合，就需要弄清楚试验程序。一旦选定测量波长，首先按下述方法测量功率 P_1 。

a. 方案 1

首先将注入系统的光纤与接收系统的光纤相连接，其次记下测得的接收功率 P_1 ；然后将被测光纤连接到注入系统与接收系统之间，测出功率 P_2 ，那么被测光纤段的总衰减可按式计算：

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \quad (4.12)$$

式中： C_r 、 C_1 和 C_2 分别是在参考条件下，被测光纤输入端和输出端连接器的标称平均损耗 (dB)。

b. 方案 2

首先将参考系统连接在注入系统和接收系统之间，其次记录测出的功率 P_1 ，然后按注入系统方案 1 测出功率 P_2 ，则被测光纤段的总衰减的计算式如下：

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (\text{dB}) \quad (4.13)$$

二、色散

1. 定义

光纤中色散主要是指集中的光能，例如光脉冲经过光纤传输后在光纤输出端发生能量分散，导致传输信号畸变。在光纤数字通信系统中，由于信号的各频率成分或各模式成分的传输速度不同，信号在光纤中传输一段距离后，将互相散开，脉冲展宽。严重时，前后脉冲将互相重叠，形成码间干扰，增加误码率，影响了光纤的带宽，限制了光纤的传输容量和传输距离。

与光纤色散有关的系统性能损伤主要有：码间干扰、模分配噪声和啁啾噪声。

多模光纤的色散主要包括：模间色散、材料色散、波导色散等。单模光纤色散主要包括：材料色散、波导色散、折射率剖面色散和偏振模色散等。

色散是单模光纤的重要参数之一。研究光纤的色散特性，对合理地设计光纤折射率剖面结构，改善光纤的传输特性是极为重要的。值得指出的是，G. 653、G. 655 单模光纤都是由优化光纤工作波长处的材料色散和波导色散的方法，即通过改变光纤波导结构研制出来的新型光纤。

单模光纤的色散决定着光纤所能传输的速率、距离、容量，对于超长距离、超大容量、超高速率的通信系统有着极为重要的意义。色散和衰减是系统设计的光中继段受限距离的两个重要参数。

传输系统设计中，色散限制系统光中继距离的估算公式：

$$L = 10^6 \cdot \varepsilon / (B \cdot D \cdot \delta \lambda) \quad (4.14)$$

式中： L — 色散受限系统光中继距离 (km)；

ε — 当光源为多纵横激光器时取 0.115，发光二极管或单纵横激光器时取 0.306；

B — 传输比特率 (Gbit/s)；

D — 光纤色散系数 ps/(nm·km)；

$\delta \lambda$ — 光源的均方根谱宽 (nm)。

由式 (4.14) 得知，系统传输距离与光纤的色散系数成反比。特别是当今在掺

铒光纤放大器广为采用的前提下, 光纤的色散、色散系数、零色散波长、零色散斜率已成为光纤、有源器件及系统设备研究人员共同努力解决的热点研究课题之一。

(1) 色散

色散是由组成光源谱的不同波长, 以不同群速度传输所引起的光纤中单位光源谱宽的光脉冲展宽, 用 ps/nm 表示。它取决于光纤的特性和长度。单模光纤色散通常是由材料色散、波导色散和剖面色散三部分共同组成。

(2) 色散系数 $D(\lambda)$

色散系数 $D(\lambda)$ 是单位长度光纤的波长色散, 单位为: ps/(nm·km)。若在波长 λ 下, 单位长度的群时延为 $\tau(\lambda)$, 则波长色散系数 $D(\lambda)$ 如下式:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \cdot \frac{1}{L} \quad \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right] \quad (4.15)$$

(3) 零色散波长 λ_0

零色散波长 λ_0 是波长色散为零的波长, 单位为 nm。

(4) 零色散斜率 S_0

在零色散波长处, 波长色散系数随波长变化曲线的斜率为 S_0 , 单位为 ps/(nm²·km)。

2. 测量方法

与多模光纤相比单模光纤没有模间色散, 故其总色散很小, 即对信号的畸变或展宽很小, 带宽很宽。因此单模光纤色散的测量需要用精密灵巧的皮秒级时延差的测量方法: 相移法、干涉法和脉冲时延法。ITU-T G.650(2000) 规定相移法为光纤色散测量的基准试验方法, 干涉法和脉冲时延法为替代试验方法。下面主要介绍这些试验方法的测量原理、试验装置和试验程序。

(1) 相移法

① 测量原理

相移法是测量光纤色散的基准试验方法。相移法的测量原理是通过测量不同波长的光纤的光信号, 通过光纤后产生相移法, 计算得出不同波长间的相对群时延再根据时延 $\tau(\lambda_i)$ 得到最佳拟合时延曲线 $\tau(\lambda)$, 通过数学运算进一步得到光纤色散特性曲线 $D(\lambda)$ 。

假设有波长 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 的几个光源, 分别用频率为 f 的正弦电信号调制, 光纤输入端信号的初始相位是 $\theta_1 \sim \theta_n$, 用 $\tau_1 \sim \tau_n$ 表示传输群时延, 则通过被测光纤后的相位分别为:

$$\begin{aligned} & \theta_1 + 2\pi f \tau_1 \\ & \vdots \\ & \theta_n + 2\pi f \tau_n \end{aligned} \quad (4.16)$$

假定通过一段光纤每一波长的参考信号的时延都一样, 且用 τ_0 表示, 则测

量信号与参考信号相比后，每一波长的相位差分别为：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 2\pi f(\tau_1 - \tau_0) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \phi_n &= 2\pi f(\tau_n - \tau_0) \end{aligned} \quad (4.17)$$

相应的时延表示分别为：

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\phi_1}{2\pi f} + \tau_0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \tau_n &= \frac{\phi_n}{2\pi f} + \tau_0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

测量时，为了消除相位旋转数目的影响，使用的调制频率 f 必须满足： $(2N-1)\pi < \phi$ ， $-\phi_n < (2N+1)\pi$ (N 为相位旋转数目)。于是，相差 $\phi_1 \sim \phi_n$ 可重新表示为：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_1 + 2\pi N \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \phi_n &= \phi_n + 2\pi N \end{aligned} \quad (4.19)$$

相应的延迟时间重新表示为：

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\phi_1 + 2\pi N}{2\pi f} + \tau_0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \tau_n &= \frac{\phi_n + 2\pi N}{2\pi f} + \tau_0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

由式 (4.20) 可以清楚地看出，从测得的相移量 $\phi'_1 \sim \phi'_n$ 就能计算出不同波长的相对群时延。根据群时延 $\tau(\lambda)$ 得到最佳拟合群时延 $\tau(\lambda)$ ，再经过数学计算进一步得到光纤的色散特性曲线 $D(\lambda)$ 。

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} \quad (4.21)$$

当 $D(\lambda) = 0$ 时，就称之为零色散波长 λ_0 。

相移法适用于实验室、工厂和现场测量长度大于 1km 的单模光纤和多模光纤的波长色散，在测量精度或重复性满足要求的情况下，也可以用来测量更短的光纤；但测量波长范围可按要求改变。

② 试验装置

相移法测量单模光纤色散特性的试验装置，如图 4.11 所示。试验装置主要包括：光源波长选择器、光探测器、参考信道、时延检测器和信号处理器等。

A. 光源

在测量期间内，光源的位置、光强和波长都应稳定。根据测量的波长范围，可以选用的光源是激光二极管 (LD 阵列)、可调波长激光二极管 (如外腔激光器)、发光二极管 LED 或宽带光源 (如拉曼光纤 Nd: YAG 激光器)。

在任何情况下，调制信号都应确保群时延测量有足够的时间响应。

B. 波长选择器

波长选择器和监测器用来选择和监视测量的群时延波长。根据光源的类型和测量装置来选用波长选择器、光开关、单色仪、色散仪、滤光器、光耦合器、连接器、通过改变电驱动信号来选择不同波长的光源。波长监测是由一个光纤耦合器和一个波长仪来完成的。波长选择器和监测仪既可放置在被测光纤的输入端，又可放置在被测光纤的输出端。

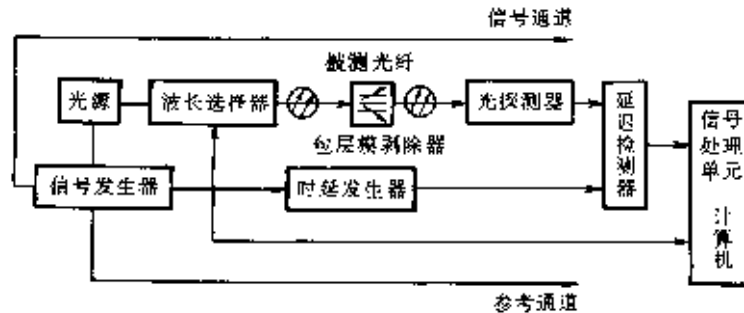


图 4.11 相移法测量单模光纤色散的试验装置

如果用数学拟合 [式 (4.22)、式 (4.24)] 来处理数据，至少有一个数据必须在 λ_0 的 100nm 以内。

C. 光探测器

由被测光纤出射的光、参考光纤或分光器等与光探测器耦合，光探测器的信噪比和时间响应都应与测量相适应。如果需要，光探测器后应接一个低噪声放大器。

D. 参考信道

参考信道可由电信号线组成，也可由光信号线组成。参考信道中可插入一合适的时延发生器。在某些情况下，被测光纤本身就可以作为参考信道线。

E. 时延探测器

时延探测器用来测量参考信号和信道信号之间的相位移。一般选用一个矢量电压表。

F. 信号处理器

为了减小噪声和/或测量波形的抖动，往往加入一个信号处理器。需要时，

用一台数字计算机来实现仪器控制、数据获取、数据的数值计算。

③ 试验程序

被测光纤通过波长选择器或分光器等与光源和光探测器耦合。需要时,先对光源的色散时延进行校正。必须在波长分辨率与信号电平之间获得一种合适的均衡。除非被测光纤也被用作参考信道线,在测量中光纤的温度必须足够的稳定。在测量波长下,参考信号和信道信号间的相位移是用延时检测器进行测量的。为了获得测量波长处的色散系数,数据处理应与所用的调制类型相适应。需要时,应做出群时延谱扫描与波长的曲线关系。由测量值来获得拟合曲线。

由测得的相位移 ϕ ,再通过关系式 $\tau = \phi / 2\pi f$ 就能求得群时延, f 是调制频率。根据 ITU-T G. 650(2000)规定,各种光纤的群时延与波长的拟合公式和光纤的色散系数的计算公式分别介绍如下。

对 G. 652 光纤:

G. 652 光纤零色散波长在 1310nm 附近,其工作波长在 1270~1340nm 之间。测得的单位长度光纤的群时延与波长的关系由三项 Sellmeier 表达式拟合如下:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (4.22)$$

式中: τ_0 是在零色散波长 λ_0 处的相对最小群时延。

G. 652 光纤的色散系数 $D(\lambda)$, 可将式(4.22)对波长求微分得到:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right) \quad (4.23)$$

式中: S_0 零色散斜率,即色散斜率 $S(\lambda) = dD/d\lambda$ 在零色散波长 λ_0 处的值,单位为 ps/(nm²·km)。

对 G. 653 光纤:

G. 653 光纤零色散波长在 1550nm 附近,其工作波长在 1550~1600nm 之间。测得的单位长度光纤的群时延与波长关系的拟合表达式为:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (4.24)$$

式中: τ_0 为零色散波长处最小的相对时延。通过将式(4.24)对波长求微分可获得 G. 653 光纤的色散系数表达式为:

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0) S_0 \quad (4.25)$$

式中: S_0 为零色散斜率,即 $S(\lambda) = dD/d\lambda$ 在零色散波长 λ_0 处的值。

对于 G. 652 光纤和 G. 653 光纤的色散系数曲线,如图 4.12 所示。

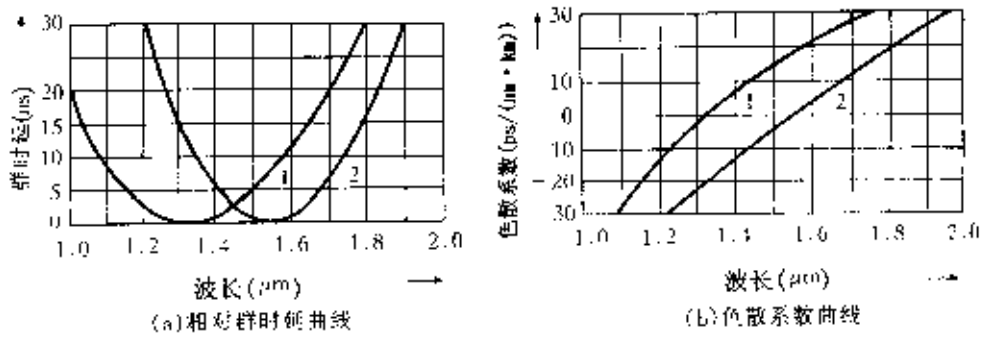


图 4.12 G.652 光纤(1)和 G.653 光纤(2)的色散曲线

对 G.655 光纤:

G.655 光纤的零色散波长在 1550nm 附近, 在使用波长区域: 1530~1625nm 具有一个非零的小色散值, 以抑制密集波分复用中四波混频等非线性效应。

G.655 光纤在使用的波长范围内有一个允许的色散系数绝对值, 在规定的波长范围内色散系数不能为零。同时也规定色散的正负符号。

$$D_{\min} \leq |D(\lambda)| \leq D_{\max} \quad \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (4.26)$$

· 波长色散特性

非零色散区 (nm): $1530 \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1625$

非零色散区色散系数绝对值 ps/(nm·km) $1.0 \leq D_{\min} \leq D_{\max} \leq 10$

色散符号: 正或负

最大色散系数与最小色散系数差 ps/(nm·km) $D_{\max} - D_{\min} \leq 5.0$

· L 波长色散特性

非零色散区 (nm): $1565 \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1625$

非零色散区色散系数绝对值 ps/(nm·km) 待定

色散符号: 正

(2) 干涉法

① 测量原理

干涉法是单模光纤色散测量的第一替代试验方法。干涉法的特点是仅用一根几米长的短光纤就可以测量出光纤的色散。干涉法还可给出光纤色散纵向均匀性。而且它还可检测出整体或局部的因素, 例如: 温度变化、微弯损耗等对色散的影响。

干涉法测量原理是按照干涉法测量原理, 即用 Mach-Zehnder 干涉法测量被测光纤试样和参考通道之间与波长有关的时延。参考通道既可是空气通道, 又可

以是已知群时延谱的单模光纤

这里应指出的是,用干涉法测出的几米长短光纤色散值外推到纵向均匀的长光纤,并非适用每一种情况。

用一根单模光纤作为参考的测试装置的测量原理。如图 4.13 所示。这个试验装置的测量原理用分振幅的方法产生双光束,实现干涉。从光源出来经波长选择器的光束被光束分离器 1 分为两束光,它们分别经过被测光纤和参考光纤传输后,又由光束分离器 2 将两束光合二为一进入光探测器。只要精确调整参考光纤出射端面与第二个光束分离器间的距离 X ,就可使进入光探测器中的二束光满足相关条件,在锁相放大器中显示最大值。

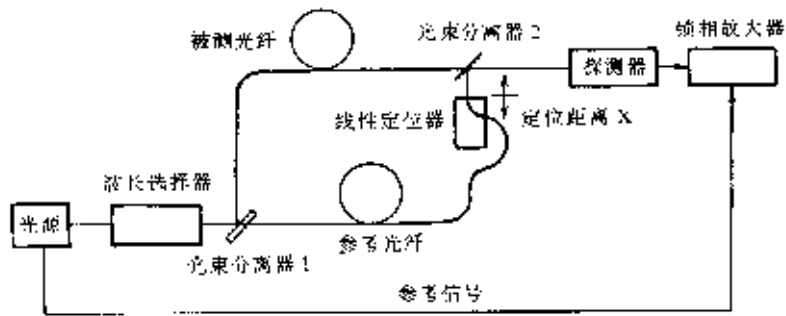


图 4.13 干涉法测量色散的试验装置

测量时,保持注入条件不变,测量不同波长点的群时延。每一个波长 λ_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 分别测出对应于干涉图上最大中心光强的位置 X_i , 于是这个波长上参考通道与试验通道的群时延差为:

$$\Delta \tau_g(\lambda_i) = \tau_{Tf}(\lambda_i) - \tau_{Rf}(\lambda_i) = (x_0 - x_i) / c \quad (4.27)$$

式中: $\tau_{Tf}(\lambda_i)$ 和 $\tau_{Rf}(\lambda_i)$ 分别为被测光纤和参考光纤的群时延, c 为真空中的光速。由式 (4.27) 可得到被测光纤的群时延的公式:

$$\tau_{Tf}(\lambda_i) = \tau_{Rf}(\lambda_i) + (x_0 - x_i) / c \quad (4.28)$$

被测光纤单位长度上的群时延为:

$$\tau(\lambda_i) = \frac{\tau_{Rf}(\lambda_i) + (x_0 - x_i) / c}{L} \quad (4.29)$$

式中: L 为被测光纤的长度。

在求出一组 $\tau(\lambda_i) - \lambda_i$ 的值后,根据被测光纤的类型,分别进行相对时延曲线拟合,求出 λ_0 和 S_0 后,再计算出各类光纤的色散系数曲线。

② 试验装置

干涉法测量光纤色散有两个试验方案:参考光纤方案和空气通道参考方案。参考光纤方案的试验装置,如图 4.13 所示。这个试验装置主要组成部分有:光源、波长选择器、光束分离器、被测光纤、参考光纤、光探测器等。

A. 光源

在测量期间光源的位置、光强和波长应保持稳定。光源应是稳定的光源,如带拉曼光纤的 YAG 激光器或卤钨灯和发光二极管等。对采用锁定放大技术时,应选用低频调制(50~500Hz)光源就能满足要求。

B. 波长选择器

波长选择器的波长应选在测量群时延的波长。根据光源类型和测量系统来选用单色仪、光干涉滤光器或其他波长选择器。波长选择器可放在被测光纤的输入端,也可放在被测光纤的输出端。光源的光谱宽度主要由色散测量精度决定。光源的光谱宽度大约为 2~10nm。如果要对测得的数据进行数学拟合,那么至少有一个数据应在零色散波长 λ_0 的 100nm 内。

C. 光探测器

光探测器在测量色散的波长范围内应具有足够的灵敏度。需要时,接收信号应用一个互阻抗电路进行增强。

D. 试样

试验用的试样可以是未成缆单模光纤,也可以是成缆的单模光纤。试样的长度为 1~10m。光纤试样长度的精度应为 $\pm 1\text{mm}$ 。应十分小心地制备试样光纤的端面。

E. 数据处理

用一台带有合适软件的计算机来对干涉图型进行分析和数据处理。

③ 试验程序

将被测光纤安放在图 4.13 所示的试验装置中。所用的优化光探测器接受光功率的方法是借助一台三维微定位器来对试样光纤端面进行定位。消除了包层模产生的误差。

群时延测量是通过用一维定位器来对不同波长的参考通道与二个干涉仪通道的光长进行平衡来实现的。波长 λ_i 干涉图型的最大强度位置 x_i 与波长 λ_0 的位置 x_0 之间的位置差就确定出参考通道和被测通道之间的群时延差 $\Delta \tau_g(x_i)$:

$$\Delta \tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (4.30)$$

式中: c 为真空中的光速。由 $\Delta \tau_g(\lambda_i)$ 与参考通道的群时延谱可求出被测光纤的群时延。将被测光纤的群时延除受试光纤长度就给出了被测光纤单位长度的群时延 $\tau(\lambda)$, 如图 4.14 所示。

对不同类型的单模光纤采用相应的时延拟合公式和色散系数算式就可求各种单模光纤的群时延和色散系数。

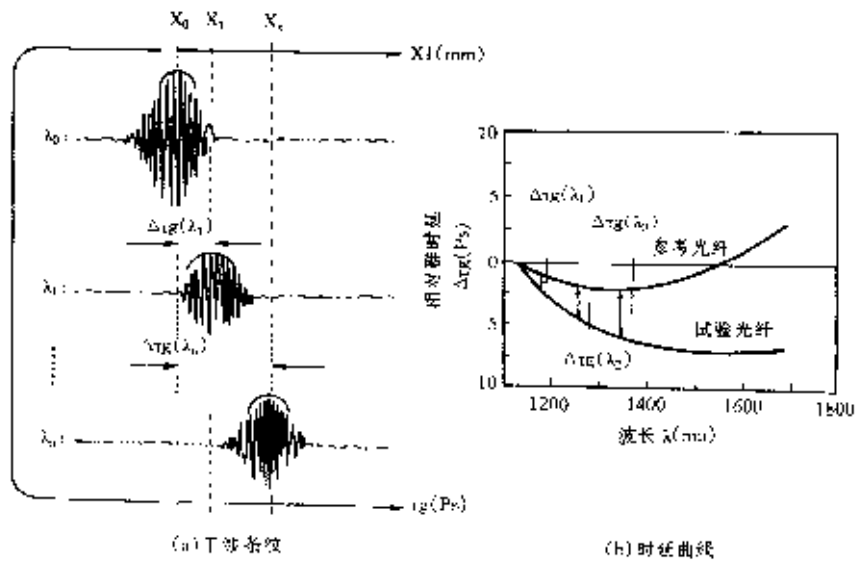


图 4.14 群时延谱的确定

(3) 脉冲时延法

① 测量原理

脉冲时延法是单模光纤色散测量的第二替代试验法。这种试验方法的测量原理是，使不同波长的窄光脉冲分别通过已知长度的受试光纤时，测量不同波长下产生的相对群时延，再由群时延差计算出被测光纤的色散系数。群时延的测量采用时域法，即通过探测、记录、处理不同波长下脉冲的时延。具体的脉冲时延法的测量原理，如图 4.11 所示。

脉冲时延法的关键问题在于极窄光脉冲的产生、光探测和测量。因此，脉冲时延法对测量系统各组成部分（如电脉冲发生器产生极窄光脉冲、光探测器高速响应和示波器高速取样）的技术指标要求都非常高。例如，光纤长度为 10km，色散系数大约是 $2\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，如果我们选用中心波长相差 10nm 的两个波长进行测量，这样我们可估算出示波器上的时延差为： $\Delta \tau = 10\text{km} \times 10\text{nm} \times 2\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) = 200\text{ps}$ 。在如此短的时间间隔，要得到精确的测量，光脉冲宽度应小于 100ps，而光探测器的响应小于 50ps，相应的取样示波器的带宽应在 10GHz 以上。

由上可知，当光纤的色散系数很小或光纤长度不长时，估算时延 $\Delta \tau$ 很小。如需要进一步提高时间的分辨率，就要对光纤探测器和取样示波器提出更苛刻的要求。因此，脉冲时延法测试系统一般用于长距离（如光纤链路和光缆中继段）总色散的测量。

② 试验装置

脉冲时延法试验装置主要组成部分有：光源、波长选择器、光探测器、参考信道、时延探测器、信号处理器等。有关试验装置具体组合方案，如图 4.11 所

示。

A. 光源

在整个测量期间，光源的位置，光强和波长都应稳定。根据测量的工作波长范围，可供选用的光源有：激光二极管、激光二极管阵列（LD-阵列）、可调波长激光器（外腔激光器）和宽带光源（拉曼光纤 Nd:YAG 激光器）。在任何情况下，群时延测量中调制信号都应保持足够的时间响应。

B. 波长选择

波长选择器和监视器用来选择和监视群时延测量的波长。根据光源类型和测量装置来选用波长选择器、光开关、单色仪、微调定位器、滤光器、光耦合器、光连接器。波长监视是由一个光纤耦合器和波长仪来完成的。波长选择器和监视仪可以安放在被测光纤的输入端，也可以安放在被测光纤的输出端。需要对测量数据进行数学拟合时，至少有一个数据点应在零色散波长 λ_0 的 100nm 内。

C. 光探测器

由被测光纤出射的光、参考光纤或光隔离器应与适合于测量的信噪比和时间响应的光探测器耦合。需要时，光探测器后应接入一个低噪声放大器。

D. 参考信道

参考信道可由电信号线或光信号线组成。在参考信道中可插入一适宜的时延发生器。在某些情况下，被测光纤本身可作为参考信道线。

E. 时延探测器

时延探测器测量的是参考信号和信道信号之间的时延。可用作时延检测的仪表为高速示波器或取样示波器。

F. 信号处理器

为减小噪声和/或测得的波形抖动应加入一个信号处理器。需要时，用一台计算机来进行仪器控制、数据获取和数据的数值计算。

③ 试验程序

A. 参考光纤的测量

将参考光纤放入试验装置，并将光源波长调至第一个测量波长。调节时延发生器，以便在已知的经校准的示波器时间刻度上显示出输入光脉冲。脉冲位置由其波峰或中心点确定。将该波长作为基准波长，记录该基准波长脉冲相对于校准的标准（例如显示标线）的时间位置。

将光源调至下一个测量波长，不改变时延发生器，记录该波长脉冲和基准波长脉冲之间的时间差 $\tau_{in}(\lambda_i)$ 。在所要求的各波长 λ_i 上重复本程序。

B. 被测光纤的测量

将被测光纤放入试验装置，并将光源调至第一个测量波长，调节时延发生器，以便在已知的经校准的示波器时间刻度上显示出输入脉冲。

按参考光纤测量中由脉冲波峰或中心步骤确定基准波长,记录基准波长脉冲的时间位置。将光源调至下一个测量波长,不改变时延发生器,记录该波长脉冲和基准波长脉冲(由参考光纤测量中确定)之间的时间差 $\tau_{out}(\lambda_i)$ 。在所要求的各波长 λ 上重复本程序。

从每个波长的输入脉冲时间差中减去在该波长上测得的输入脉冲时间差。单位长度的群时延为:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_{out}(\lambda_i) - \tau_{in}(\lambda_i)}{L} \quad (\text{ps/km}) \quad (4.31)$$

式中: $\tau_{out}(\lambda_i)$ —输出脉冲时间差 (ps);

$\tau_{in}(\lambda_i)$ —输入脉冲时间差 (ps);

L—减去参考光纤长度后的被测光纤长度 (km)。

对于各类光纤,群时延曲线 $\tau(\lambda)$ 的拟合和色散系数 $D(\lambda)$ 的计算按相移法中规定的方法进行。

三、偏振模色散

1. 定义

(1) 偏振模色散

偏振模色散(PMD, Polarization Mode Dispersion)是指单模光纤中的两个正交偏振模之间的差分群时延,它在数字系统中使脉冲展宽产生误码。

(2) 主偏振态

对于一在给定时间和光频上应用的单模光纤,总存在着两个称之为主偏振态的正交偏振态,如果当一准单色光仅激励一个主偏振态时,不发生由于偏振模色散引起的脉冲展宽;当一准单色光均匀激励这两个主偏振态时,将发生由于偏振模色散引起的最大脉冲展宽。光纤输出的主偏振态的两个正交偏振态,当光频稍微变化时,输出偏振并不改变,相应的输入正交偏振态是输入主振模态。

(3) 差分群时延

差分群时延是两个主偏振态之间群时延的时间差,一般用 ps 为单位。

(4) 偏振模色散差分群时延

在所有实际情况下,下面介绍偏振模色散差分群时延三种定义在所能达到的测量重复性之内是等效的。

① 二阶矩偏振模色散差分群时延 P_s

二阶矩偏振模色散差分群时延定义为,当一准单色光窄脉冲注入到光纤经传输后,忽略波长色散的影响,在光纤输出端输出脉冲中光强分布 $I(t)$ 的均方差 σ 的 2 倍,即:

$$P_s = 2(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2)^{1/2} = 2 \left\{ \frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} \left[\frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4.32)$$

式中: t —光到达光纤输出端所需的时间(ps)。

② 平均偏振模色散差分群时延 P_m

平均偏振模色散差分群时延是在光频范围 ($\nu_1 \sim \nu_2$) 内偏振态差分群时延 $\delta \tau(\nu)$ 的平均值, 即:

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta \tau(\nu) d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (4.33)$$

式中: ν —光频率;

ν_1, ν_2 —分别为频率范围上下限。

③ 均方根偏振模色散差分群时延 P_r

均方根偏振模色散差分群时延是在光频范围 ($\nu_1 \sim \nu_2$) 内主偏振态差分群时延 $\delta \tau(\nu)$ 的均方根值, 即:

$$P_r = \left[\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta \tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right]^{1/2} \quad (4.34)$$

式中: ν —光频率;

ν_1, ν_2 —分别为频率范围上下限。

(5) 偏振模色散系数

偏振模色散系数用 $PMDc$ 表示。应区别两种情况:

弱偏振模耦合 (短光纤):

$$PMDc = \frac{P_s}{L}, \frac{P_m}{L}, (ps/km) \quad (4.35)$$

强偏振模耦合 (长光纤):

$$PMDc = \frac{P_s}{\sqrt{L}}, \frac{P_m}{\sqrt{L}}, \frac{P_r}{\sqrt{L}} (ps/\sqrt{km}) \quad (4.36)$$

式中: L —光纤长度

2. 测量方法

为了适应超高速率光纤数字通信系统发展的需要, 人们对光纤偏振模色散的研究工作越来越深入。究其原因是光纤的偏振模色散对超高速率光纤数字通信系统的传输性能有着不可忽视的影响, 所以人们对光纤偏振模色散的研究涉及到偏振模色散的产生机理、理论分析计算、测量方法标准、光缆链路偏振模色散设计等。

作为国内广大光纤光缆研制、生产、工程施工的人员和用户, 更加关心和迫切需要了解与掌握的是偏振模色散的定义, 试验方法, 测量原理、试验装置和试验程序等详细内容。

本节主要以国际电信联盟电信标准化部门建议 ITU-T G. 650(2000) 和国际电工委员会标准草案 IEC61941(1999) 中介绍的单模光纤偏振模色散的定义和测量

方法为依据，对偏振模色散的基准试验方法，即斯托克斯参数测定法和替代试验方法，即偏振态法与干涉法的测量原理、试验装置和试验程序等，给予简述。

(1) 斯托克斯参数测定法

① 测量原理

斯托克斯参数测定法是测量单模光纤 PMD 的基准试验方法。它的测试原理是，在一波长范围内，以一定的波长间隔测量出输出偏振态随波长的变化，该变化可采用琼斯矩阵本征分析或邦加球 (Poincare Sphere) 上输出偏振态矢量的旋转来表征，通过分析和计算从而得到 PMD 的结果。

斯托克斯参数测定法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。在某些情况下，为获得满意的测量精度，要进行重复测量。这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

② 试验装置

斯托克斯参数测定法测量 PMD 的试验装置如图 4.15 所示。试验装置主要包括：光源、偏振调节器、线偏振器组和输入光学器件等。

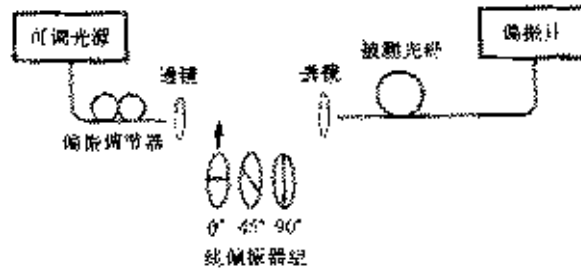


图 4.15 斯托克斯参数测定法试验装置

A. 光源

光源是一只单纵模激光器或窄带光源，在测量波长范围内波长是可调的。光谱分布足够窄，使得从被测光纤出来的光在所有测量条件下都保持偏振状态。偏振度 (DOP, Degree Of Polarization) 不小于 90%，虽然偏振度低到 25% 时仍然可进行测量，但降低了测量精度。对于一给定的差分群时延值 $\Delta \tau$ ，要求的最低偏振度 DOP (%) 由下式给出：

$$DOP = 100 \exp \left[-\frac{1}{4 \ln 2} \left(\pi c \Delta \tau \Delta \lambda_{FWHM} / \lambda_0^2 \right)^2 \right] \quad (4.37)$$

式中： λ_0 — 高斯谱中心波长（假定光谱为高斯分布）；

c — 真空中光速；

$\Delta \tau$ — 给定的差分群时延值；

$\Delta \lambda_{FWHM}$ — 光谱半幅全宽度 (FWHM)。

B. 偏振调节器

一个偏振调节器置于可调光源之后，其作用是给线偏振器组提供近似圆偏振

光，使得线偏振器的极化方向不会与输入光的偏振方向相交。

C. 线偏振器组

采用三个线偏振器，将它们以相对角度约为 45° 安排依次置于测量光路中，应知道实际的相对角度。

D. 输入光学器件

可以采用单模尾纤或一个光学透镜系统来激励被测光纤。

a. 尾纤

如果采用尾纤，应避免反射引起的干涉影响，要求使用折射率匹配液或成角度的切割面。尾纤应是单模光纤的尾纤。

b. 光学透镜系统

如果采用光学透镜系统，应使用一些适当的方法，例如一真空吸盘来稳固地支撑光纤输入端。

c. 包层模剥除器

用包层模剥除器，剥除任何包层模中传输的光功率。当光纤预涂覆层材料的折射率等于或大于光纤包层折射率时，光纤预涂覆层就可起到包层模剥除器的作用。

E. 输出光学器件

输出光学器件将被测光纤出射的全部功率耦合至偏振计中。例如可用一个光学透镜系统、一个与单模尾纤对接的接头或使用折射率匹配液将一个直接连到探测器的光纤与被测光纤耦合。

F. 偏振计

采用一个偏振计测量三个线偏振器分别插入光路时所对应的三个输出偏振态。偏振计的波长范围应覆盖光源的波长范围。

③ 试验程序

试样应为已知长度的一段成缆或未成缆的单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤的位置及所处环境温度均应保持稳定。可以通过在邦加球上观测被测光纤输出偏振态监视试验器械环境的温度稳定性，在相应于一对相邻琼斯矩阵测量的时间内，输出偏振的变化相对于波长增加产生的变化应是很小的。

当需要减小附加模耦合时，未成缆光纤应当用适当的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（曲型值小于 0.15N）。

测量程序为调整光源输出光的偏振方向。将可调激光器波长定于待测波长范围的中心波长，将三个线偏振器依次插入光路中，测量出它们相应的输出光功率，通过偏振调节器调整光源的偏振方向，使得三个功率相互差别在大约 3dB 范围之内。首先将光源通过偏振调节器耦合至线偏振器组。其次将线偏振器组的输出耦合至被测光纤的输入端。再将被测光纤的输出耦合至偏振计。选择进行测量的波长步长 $\Delta\lambda$ ， $\Delta\lambda$ 最大允许值应满足下式：

$$\Delta \tau_{\max} \Delta \lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (4.38)$$

式中: $\Delta \tau_{\max}$ —测量波长范围内预计的最大差分群时延数值;

λ_0 —中心波长;

c —真空中光速。

例如, 在 1550nm 波长处最大差分群时延 $\Delta \tau_{\max}$ 与波长 $\Delta \lambda$ 的乘积大小应保持不大于 4 (ps · nm); 在 1300nm 波长处应保持不大于 2.8 (ps · nm)。这个要求保证了从一个测量波长到下一个测量波长时, 输出偏振态围绕邦加球偏振态轴旋转角度小于 180°。

在不能预计 $\Delta \tau_{\max}$ 的情况下, 可以在测量波长范围内实现一系列的试样测量, 每次测量采用与光源谱宽和最小调谐步长相称的一对靠近的波长, 将测得的最大差分群时延值乘以余量因子 3 作为 $\Delta \tau_{\max}$ 代入上式, 计算出用于实际测量的 $\Delta \lambda$ 值。如果此波长间隔太大, 可再用较小波长间隔重复测量, 直至差分群时延值与波长关系曲线形状和平均差分群时延值基本保持不变时, 波长间隔就满意了。在测量波长范围内, 选定的波长步长间隔, 在选定的波长上, 依次插入每一个线偏振器, 用偏振计记录相应的斯托克斯参数, 完成测量数据的收集。

④ 结果计算

A. 琼斯矩阵本征分析法

a. 单次测量差分群时延的计算

由斯托克斯参数计算各波长响应的琼斯矩阵, 对每一波长间隔, 计算出较高光频上琼斯矩阵 $T(\omega + \Delta \omega)$ 与较低光频上逆琼斯矩阵 $T(\omega)$ 的乘积。对一特定波长间隔, 可从下式找到差分群时延值, 即 $\Delta \tau$ 为:

$$\Delta \tau = \left| \text{Arg} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) / \Delta \omega \right| \quad (4.39)$$

式中: ω —光波角频率 (rad/s);

$\Delta \omega$ —光波角频间隔 (rad/s);

P_1, P_2 — $T(\omega + \Delta \omega)T(\omega)$ 的复数本征值。

Arg 为幅角函数, 即 $\text{Arg}(Ae^{j\theta}) = \theta$

将计算得到的每一个差分群时延值作为相应波长间隔中心波长上的差分群时延值, 然后对这些值在整个波长范围内取平均得到单次测量的差分群时延。图 (4.16a) 示出了单次测量得到的差分群时延与波长关系曲线, 差分群时延值的直方图及麦克斯韦分布曲线。

b. 多次测量平均差分群时延的计算

单次测量得到的 PMD 值 $\langle \Delta t \rangle \lambda$ 仅仅是测量波长范围内各波长间隔差分群时延测量值的平均。如果为了增加样本数量, 在不同条件下进行多次测量, 就应

使用系统平均值。图(4.16b)示出了多次测量得到的差分群时延与波长关系曲线,差分群时延值的直方图及麦克斯韦分布曲线。

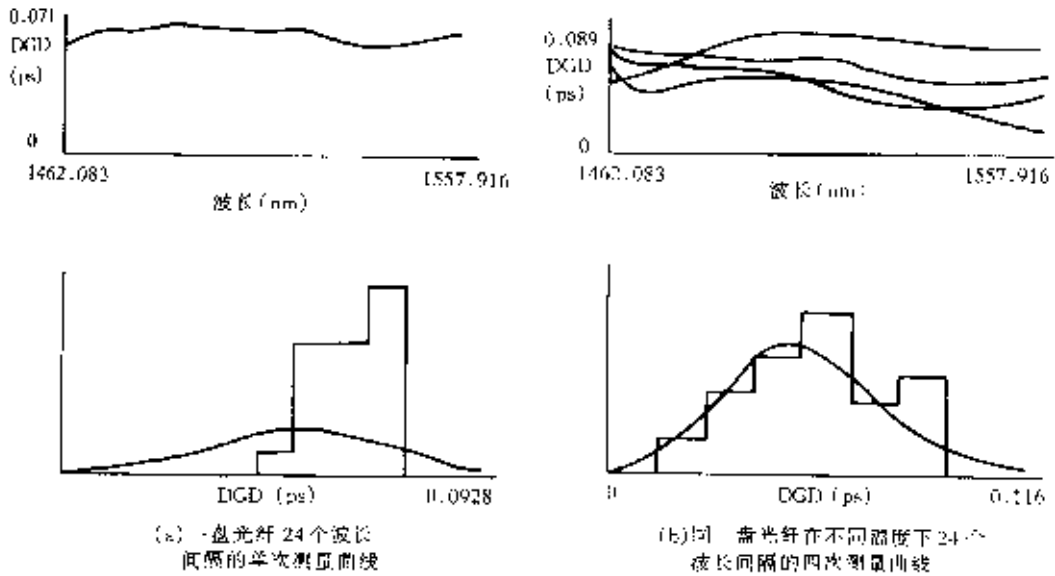


图 4.16 琼斯矩阵法计算的差分群时延结果

c. 偏振模色散系数计算

根据被测光纤呈现出的模耦合类型, 偏振模色散系数, 可以用式(4.35)或(4.36)计算。弱偏振模耦合时, 用式(4.35)计算; 强偏振模耦合时, 用式(4.36)计算。如果在整个测量波长范围内, $\Delta\tau$ 的标准偏差小于平均值的十分之一, 受试光纤被认为呈现可忽略的偏振模, PMD 可用短光纤的 PMD 系数 $\Delta\tau/L$ 表示。

B. 邦加球法

从测得的斯托克斯参数 (S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3) 重建在邦加球上描述偏振态随波长演变的轨迹 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 分别与总的光功率、 $\theta=0^\circ$ 的线性偏振态、 $\theta=45^\circ$ 的线性偏振态和右旋圆偏振态有关。图 4.17 给出两个实测的例子, 图上当 (O) 和 (X) 代表由于 PMD 是波长 λ 函数而测得的偏振态弧段, P_{a-a} 是主偏振态。

考虑到波长间隔 (它们可以包括两个波长步长以上), 邦加球上描述偏振态随波长演变的轨迹应分段地分析, 以保证确定的主偏振态存在的假定成立。再用简单的几何考虑确定邦加球上本地主偏振态轴和由波长变化引起的旋转角度 $\Delta\phi$ 。一个可用的方法是能够通过考虑三个、三个的测量点分析邦加球上的轨迹,

找出由两对点确定的线段轴的交点，从这点开始，用三角关系可以计算出 $\Delta \phi$ 。

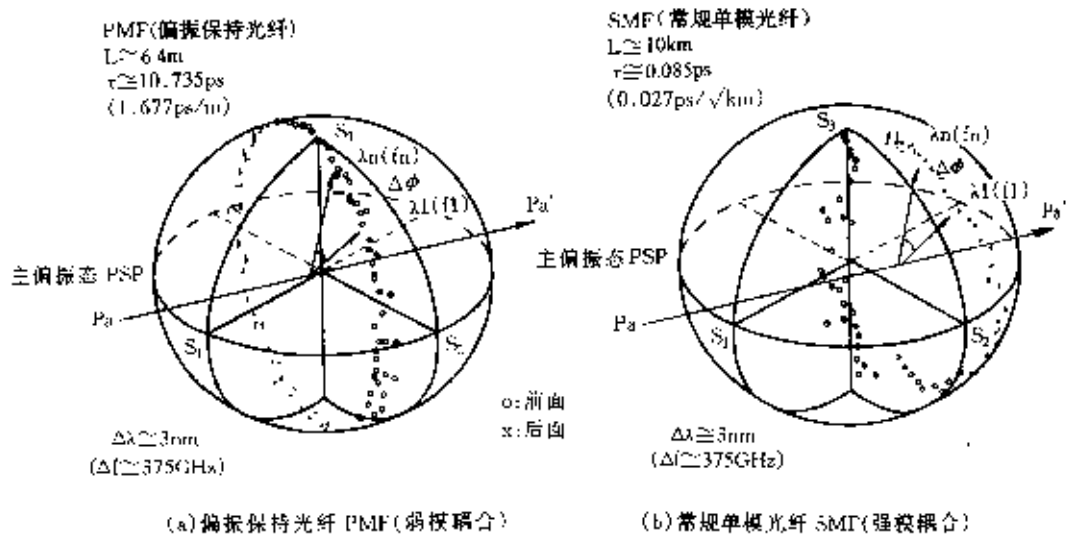


图 4.17 邦加球法测量分析的两种光纤的 PMD 实例

差分群时延或 PMD 时延 $\delta \tau$ 由下式给出：

$$\delta \tau = \frac{\Delta \phi}{2\pi \Delta f} = \frac{\Delta \phi \lambda_1 \lambda_n}{2\pi c \Delta \lambda} \quad (4.40)$$

式中： $\Delta \phi$ —相位差（邦加球上斯托克斯矢量弧的角宽度，即旋转角度）；

Δf —频率差；

$\Delta \lambda$ —波长间隔；

c —真空中光速

λ_1, λ_n — $\Delta \lambda$ 的起始和终止波长。

计算差分群时延（单位 ps）与波长的关系，也可以根据测得的差分群时延值作出直方图来表示数据。计算测量波长范围内差分群时延的平均值 $\langle \delta \tau \rangle$ 。为了增加样本空间，可进行多次测量。由 $\langle \delta \tau \rangle$ 根据模耦合的类型，分别由式 (4.35) 和 (4.36) 计算 PMDc。

(2) 偏振态法

① 测量原理

偏振态法是测量单模光纤 PMD 的第一替代试验方法。它的测量原理是，对于一固定的输入偏振态，当注入光波长（频率）变化时，在斯托克斯参数空间里邦加球上被测光纤输出偏振态也会发生演变，它们环绕与主偏振态方向重合的轴旋转，旋转速度取决于 PMD 时延：时延越大，旋转越快。通过测量相应角频率变化 $\Delta \omega$ 时，邦加球上代表偏振态点的旋转角度 $\Delta \theta$ ，就可以按下式计算出 PMD 时延 $\delta \tau$ ：

$$\delta\tau = |\Delta\theta / \Delta\omega| \quad (4.41)$$

这种方法直接给出了被测试样主偏振态间差分群时延与波长或时间的函数关系，然后通过或在时间或波长范围内取平均值得到 PMD。这个方法能够给出有关差分群时延统计的整个信息。

偏振态法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。但这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

② 试验装置

偏振态法测量 PMD 的试验装置，如图 4.18 所示。偏振态法试验装置主要组成有：光源、偏振控制器、偏振计等。

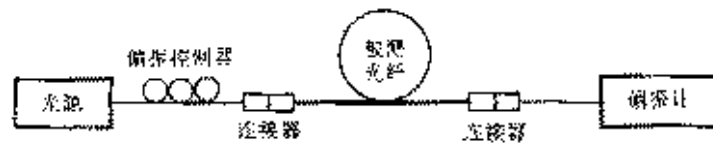


图 4.18 偏振态法的试验装置

A. 光源

需要一只稳定的单纵模激光器，在测量范围内波长可调。单纵模激光器的谱线宽度必须足够窄，以保证在所有测量条件下不会因被测光纤偏振模色散导致信号消偏振。

B. 偏振控制器

偏振控制器应置于光源和被测光纤之间。

C. 偏振计

在被测光纤的输出端，应使用偏振计测量斯托克斯参数。斯托克斯参数是输出波长的函数。

③ 试验程序

试样应为一段已知长度的成缆或未成缆的单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤的位置及所处环境温度均应保持稳定。应采用标准大气条件，对已安装的光纤和光缆，可采用实际应用的条件。

当减小附加模耦合最为重要时，未成缆光纤应当用合适的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值小于 0.15N）。测量程序为通过偏振控制器将光源耦合至被测光纤输入端。如有必要，可调节偏振控制器来得到确定邦加球上输出偏振态旋转角度的最佳条件。将被测光纤输出端耦合至偏振计。选择进行测量的波长范围。选择测量斯托克斯参数的波长步长 $\Delta\lambda$ (nm)。为避免从一个波长变换到下一个波长时，输出偏振态在球上环绕主偏振态轴旋转角度大于 180° ，对 1550nm 波长区域，应当满足 $\Delta\tau_{\max} \cdot \Delta\lambda < 4$ (ps · nm) 的要求，对 1300nm 波长区域，应当满足 $\Delta\tau_{\max} \Delta\lambda \leq 2.8$ (ps · nm) 的要求。 $\Delta\tau_{\max}$ (ps) 是预计的被测光纤最大差分群时延值。在选定的各个波长上

测量出斯托克斯参数值，并以适于下面分析的方式进行记录。

④ 结果计算

用斯托克斯分析器（或旋转分析器）测出偏振波动后，可将它转换为偏振态与波长关系的曲线。根据测得的斯托克斯参数，用下式确定每一偏振态的偏振椭圆度 η ：

$$\eta = \tan \left[0.5 \tan^{-1} \left(\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \right) \right] \quad (4.42)$$

式中： S_1 、 S_2 和 S_3 都是斯托克斯参数。

计算偏振态，偏振态用下式表示：

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (4.32)$$

式中： η —偏振椭圆度。

绘出偏振态与波长关系曲线，确定偏振态曲线上峰值（或极值）间隔的数目，相邻峰值间相位差为 π ，差分群时延或 PMD 时延 $\delta\tau$ 由下式给出：

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta \lambda} \quad (4.44)$$

式中： N —偏振态曲线上峰的数目；

Δf —频范围；

$\Delta \lambda$ —波长范围；

c —真空光速；

$\lambda_1 \lambda_n$ — $\Delta \lambda$ 的上、下限波长。

由测得的差分群时延平均值即 $\langle \delta\tau \rangle$ ，根据模耦合类型，分别由公式 (4.35) 和 (4.36) 来计算 PMD 系数。图 4.19 绘出了两个实测的例子。

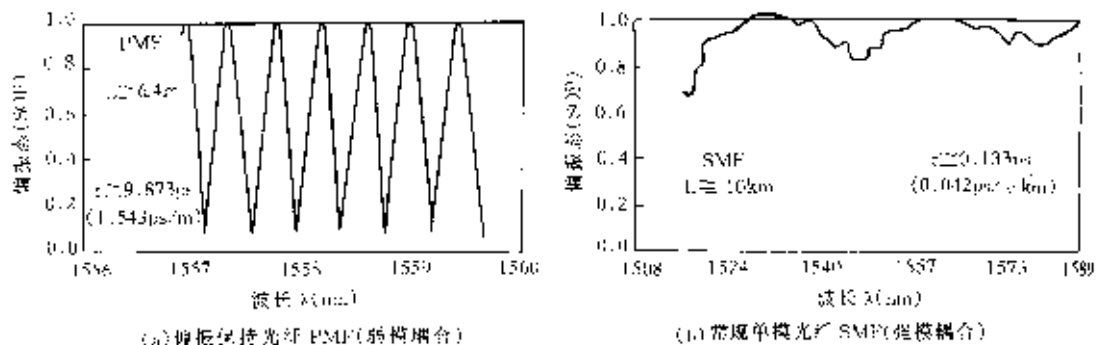


图 4.19 偏振态测量 PMD 的两个实例

(3) 干涉法

① 测量原理

干涉法是测量单模光纤 PMD 的第二替代试验方法。当测量处于动态中的光缆时（例如 OPGW 光缆和 ADSS 光缆），干涉法可以作为基准试验方法。干涉法介绍的是一种测量单模光纤和光缆的平均偏振模色散的方法。干涉法的测量原理是，当光纤一端用宽带光源照明时，在输出端测量电磁场的自相关函数或互相关函数，从而确定 PMD。在自相关型干涉仪表中，干涉图具有一个相应于光源自相关的中心相干峰。测量值代表了在测量波长范围内的平均值。在 1310nm 或 1550nm 窗口，波长范围典型值是 60nm 至 80nm。

干涉法的主要优点是测量速度非常快，测量设备体积小，特别适合于现场使用。干涉法与偏振模耦合程度无关，适用于短的光纤和长的光纤。但这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

② 试验装置

测量时可以使用 Michelson 干涉仪或 Mach-Zehnder 干涉仪，干涉仪的参考通道可以是空气通道，也可以是一段单模光纤；试验中它们可放在光源端，也或放在探测器端。典型位置的例子。如图 4.20、图 4.21 和图 4.22 所示。

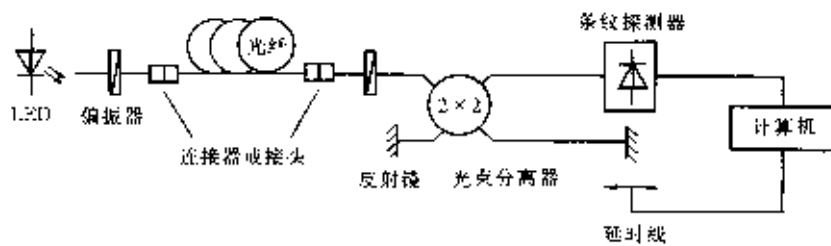


图 4.20 光纤参考通道的 Michelson 干涉仪法的试验装置

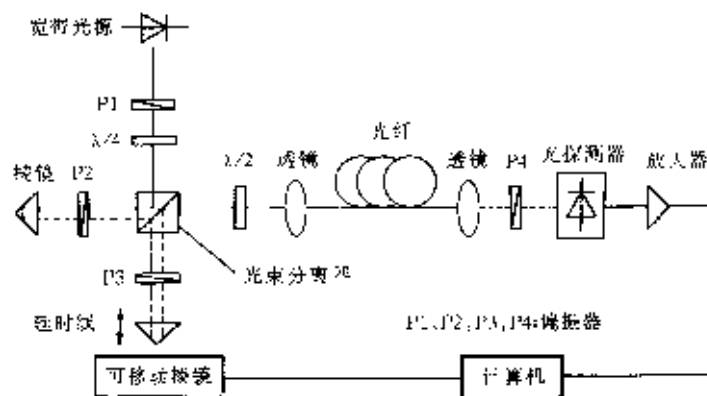


图 4.21 空气参考通道的 Michelson 干涉仪法的试验装置

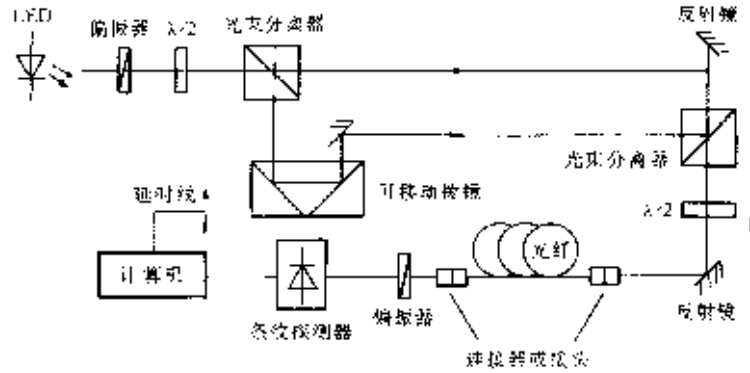


图 4.22 空气参考通道的 Mach-Zehnder 型干涉仪试验装置

A. 光源

应使用一偏振的宽谱光源，例如带一只后置偏振器的 LED。光源中心波长应位于 1310nm 或 1550nm 窗口内。光源光谱典型 FWHM 宽大约为 60nm，光谱形状应近似高斯分布，不存在可能影响自相关函数的波动。

B. 偏振器

偏振器应对光源整个波长范围内的光偏振。

C. 光束分离器

光束分离器用来将一束偏振光分成两束光，使两束光分别在干涉仪的两个臂中传播。它可以是一只光耦合器或一只直角光束分离器。

D. 探测器

从被测光纤射出的光耦合至一只光探测器中，它应具有合适的信噪比。探测系统可包括具有斩波器/锁相放大器或相当可比技术的同步探测技术。

E. 数据处理设备

应使用一台具有合适软件的计算机来分析干涉图样。

③ 试验程序

试样应为一已知长度的成缆或未成缆的单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤的位置及所处环境温度均应保持稳定。对已安装的光纤光缆，可采用实际应用的条件。

当减小附加模耦合是重要时，未成缆光纤应当用适当的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值小于 0.15N）。测量程序为：将光源通过偏振器耦合至光纤输入端，光纤输出端耦合至干涉仪输入端（如图 4.20）；或将光源通过透镜和偏振器耦合至光纤输入端，光纤输出端通过透镜和偏振器耦合至光探测器（如图 4.21、图 4.22）。可通过标准光纤连接器和接头，或通过一个光纤对准系统来实现。若采用后一种方法，则应用折射率匹配液，以避免反射。

将光源输出功率调节到与探测器特性相适应的一个合适参考值。为得到足够

的干涉条纹对比度，应使干涉仪两臂中的功率基本相同。通过移动干涉仪两臂中反射镜，记录光强来得到第一个测量结果，对于一选定的偏振态，从得到的干涉条纹图，按下述的方法计算 PMD 时延。弱偏振模耦合和强偏振模耦合的干涉条纹图例子，如图 4.23 所示。在偏振模耦合不够或 PMD 较低的情况下，为了得到在所有情况下的平均结果，宜对不同的偏振态进行测量或在测量时对偏振状态进行调制。

设备校准可用已知 PMD 时延的高双折射光纤或已知 PMD 时延的标准光纤进行。

弱偏振模耦合情况下，干涉条纹是分离的峰，两个伴峰相对于中心主峰的延迟都是对应于被测器件的差分群时延。对于这种情况，差分群时延等效于 PMD 群时延。

$$\Delta \tau = 2 \Delta L / c \quad (4.45)$$

式中： ΔL —光延迟线移动的距离；

c —真空中光速。

强偏振模耦合情况下，根据干涉图中干涉图型的宽度来确定 PMD 群时延。这时干涉条纹很接近。PMD 时延 $\Delta \tau$ 从干涉图高斯拟合曲线参数 δ 得到：

$$\Delta \tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \delta \quad (4.46)$$

式中： δ —高斯曲线标准偏差。

图 4.23 对弱偏振模耦合（上方）和强偏振模耦合（下方）光纤，分别用自相关型仪器 (a. b) 和互相关型仪器 (c. d) 测得的干涉条纹图。

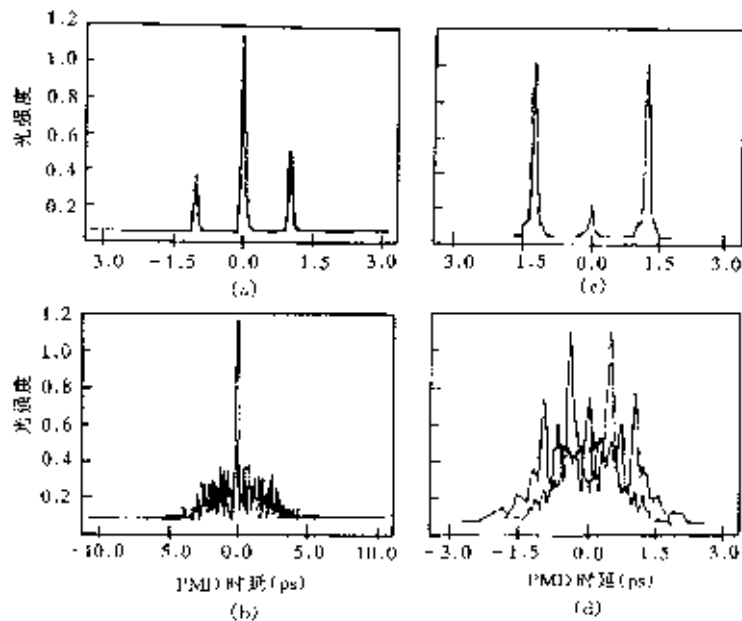


图 4.23 自相关型仪器 (a. b) 和互相关型仪器 (c. d) 测得的干涉条纹图

四、截止波长

1. 定义

当光纤的结构参数（折射率与芯径）确定后，光纤是否工作于单模状态完全决定于其中传播光的波长。由于最临近基模 LP_{01} 的高阶模是 LP_{11} 。因此，我们定义使 LP_{11} 模截止（完全不能传输）的波长为单模光纤的截止波 λ_c 长。 λ_c 定义为总功率，包括注入的高阶模与基模光功率之比减小到小于 0.1dB 时所对应的更长波长。按照这个定义，当各次模基本上受到均匀激励时，二阶模 LP_{11} 比基模 LP_{01} 衰减大的波长就是截止波长。

只有当工作波长大于单模光纤的截止波长 λ_c 时，才能保证光纤工作单模状态。归一化截止频率 V 值与光纤折射率分布指数 g 有关。

综上所述，单模光纤的单模工作截止状态仅取决于光纤的结构参数，称之为理论截止波长 λ_{cc} 。由于其未考虑光纤所处的实际状态，故理论截止波长只具有理论分析研究价值。

通常，人们所指的截止波长是实际测得的截止波长。实际测量研究表明，光纤的截止波长与光纤的长度和光纤所处的状态，如弯曲和受到应力作用等有关。为了使实际测得的截止波长更具工程实用价值，国际电信联盟标准化部门在 ITU-T G. 650(2000) 中将实际测量的截止波长分为三类：光缆截止波长、光纤截止波长和跳线光缆截止波长。

(1) 光缆截止波长 λ_{cc}

光缆截止波长是在预先将 22m 光缆平直安放，剥去被测光缆两端护套等保护层，两端各裸露出 1m 长的预涂覆光纤，并在两根裸露光纤上各松绕一个半径为 40mm 的圆圈的条件，测得的成缆光纤截止波长。光缆截止波长的替代试验方法是通过测量 22m 具有预涂覆层的未成缆光纤中间松绕 n 个半径大于 140mm 的圆圈，光纤的两端各弯一个半径为 40mm 的圆圈的光纤的截止波长来获得光缆的截止波长。实践证明，光波经过 22m 成缆光纤后， LP_{11} 模不能继续传播。因此，光缆截止波长是确保光缆中光纤单模工作最为直接有效的参数。

为了避免模式噪音和色散的影响，最短缆长的截止波长必须小于系统预先设定的最短工作波长。这样就确保了光缆线路中每段光缆中的光纤都是处在单模工作状态。

(2) 光纤截止波长 λ_c

光纤截止波长是对包含一个半径 140mm 松绕圆圈的其他部分保持平直 2m 长光纤测得的截止波长。

(3) 跳线光缆截止波长 λ_{cj}

跳线光缆截止波长是对包含一个半径为 76mm 圆圈，其他部分保持平直的 2m

长跳线光缆测得的截止波长。

λ_c 、 λ_{cc} 和 λ_{cj} 测量值之间的关系取决于光纤种类、光缆结构和试验条件。但是不管怎样，根据 λ_{cc} 、 λ_c 和 λ_{cj} 定义得知， λ_{cc} 、 λ_c 和 λ_{cj} 分别对应于LP₁₁模完全不能传输的波长或经过22m成缆光纤、2m光纤和2m跳线缆光纤后LP₁₁模完全截止的波长。

虽然 λ_{cc} 、 λ_c 和 λ_{cj} 三者之间的定量关系不易确定，但是由光纤种类、光缆结构和试验条件来确保在最短工作波长，在两连接之间的最短光缆中传输单模是极为重要的。

为避免模噪声和色散补偿，最短光缆长度的截止波长 λ_{cc} （包括提出的修复长度）应该小于最小预先考虑的系统波长 λ_s ，即： $\lambda_{cc} < \lambda_s$ 。

这样便确保了每一段光缆都能满足单模工作。任何不完善的接续点都会产生一些高阶模(LP₁₁)功率。对短距离(n米，具体大小取决于敷设条件)，单模光纤支持这种高阶模。为了给出足够的光纤距离来使LP₁₁模到下一个接续点前衰减掉，我们必须规定出两个接续点之间的最短距离。如果最短光缆段满足 $\lambda_{cc} < \lambda_c$ ，所有的更长光缆都会自动地满足单模系统操作，不必考虑光缆的基本段长。

光纤截止波长和模场直径可用来估算光纤的弯曲敏感性。大的光纤截止波长和小的模场直径会得到更好的抗弯曲光纤。这就揭示了即使截止波长的上限已超过工作波长，往往还希望将截止波长 λ_c 规定得更高的理由。所有实际安装技术和光缆结构将确保光缆截止波长小于操作波长。

由于光缆截止波长 λ_{cc} 比光纤截止波长 λ_c 更直接确保光缆的单模工作，所以人们常常喜欢选用 λ_{cc} 而不用 λ_c 。然而，当环境条件不宜用 λ_{cc} 的规定时（如，单芯光缆：尾纤、跳线缆或以与 λ_{cc} 基准试验方法完全不同的方法敷设的光缆），再规定出 λ_c 或 λ_c 的上限是合适的。有关各种单模光纤的截止波长的详细规定，请读者查阅ITU-T G. 652、G. 653、G. 654和G. 655光纤2000年10月版本中规定值。

通常，对同一类型光纤， λ_{cc} 、 λ_c 、 λ_{cj} 的关系如下：

$$\lambda_c > \lambda_{cj} > \lambda_{cc} \quad (4.47)$$

G. 652 光纤和 G. 655 光纤的截止波长在国家标准 GB/T9771-2000《非色散位移型单模光纤》和《非零色散位移型单模光纤》中的规定值，分别为：

G. 652 光纤 $\lambda_{cc} \leq 1260\text{nm}$ ， $\lambda_c \leq 1250\text{nm}$ ， $\lambda_{cj} \leq 1250\text{nm}$ ；

G. 655 光纤 $\lambda_{cc} \leq 1480\text{nm}$ ， $\lambda_c \leq 1470\text{nm}$ ， $\lambda_{cj} \leq 1480\text{nm}$ 。

2. 测量方法

从单模光纤的传输理论可知，截止波长是单模光纤所特有的重要参数之一，它是保证光纤实现单模传输的必要条件。

单模光纤截止波长的测量目的是确保单模光纤在系统规定的波长以上进行

有效的单模工作。

测量预涂覆单模光纤截止波长、跳线光缆单模光纤和成缆单模光纤截止波长的基准试验方法是传输功率法。传输功率法和替代法的测量原理、试验装置和试验程序如下所述。

(1) 传输功率法

① 测量原理

单模光纤中除了光纤固有的吸收和散射损耗外，还存在着其他附加损耗，如：光纤芯包界面缺陷、纵向不均匀性、光纤微（宏）观弯曲等。这些附加损耗在单模光纤截止波长处对基模的衰减影响极大。当单模光纤工作波长稍低于理论截止波长时，单模光纤中激励的基模急剧衰减。传输功率法的测量原理是在规定的试验条件下，通过测试被测的一短段光纤传输的功率随波长变化与参考的传输功率之比来确定截止波长。

按照 ITU-T G. 650 (2000) 规定取 2m 长度被测光纤作试样，将其传输功率谱与参考传输功率谱相比较，确定出光纤截止波长。引进参考传输功率是为了排队测量系统随波长的起伏所造成的影响。获得参考传输功率的方法有两种：将待测光纤试样打一小圈或用一根 1~2m 长的多模光纤。

② 试验装置

传输功率法测量光纤截止波长的试验装置，如图 4.24 所示。这个试验装置主要组成部分有：光源、包层模剥除器、光探测器等。

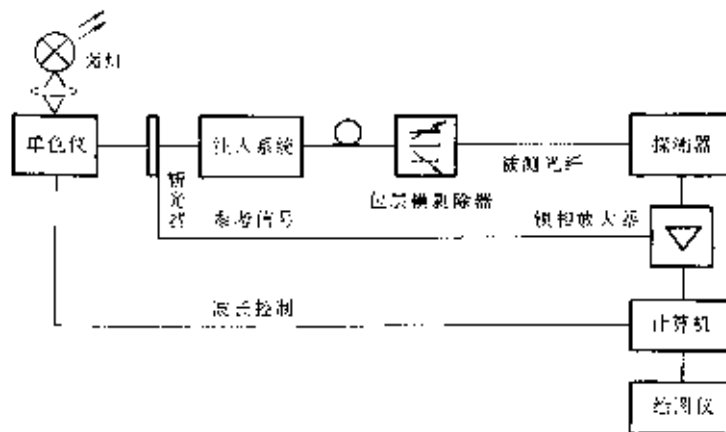


图 4.24 传输功率法试验装置

A. 光源

选用的光源 FWHM 谱宽不超过 10nm。在完成整个测量过程中，光源的位置、光强和波长应稳定不变，并能够在足够宽的波长范围内工作。

B. 调制

为改善接收器处的信噪比，通常采用调制光源方法。如果采取这个办法，光探测器应与光源调制频率同步信号处理系统连接探测。系统应是基本线性的。

C. 注入条件与系统

应用的注入条件是均匀地激励 LP_{01} 和 LP_{11} 模，例如，稳定的注入方法是与多模光纤相连接或用稳定的大光斑、大数值孔径的注入光学系统。

D. 包层模剥除器

包层模剥除器是一个确保包层模转换成辐射模的器件。因此，它从光纤中剥除包层模，应小心不要影响 LP_{01} 模的传输。

E. 光探测器

选用一个合适的光探测器，以求截断来自光纤的所有辐射。光探测器的光谱响应与光源的光谱特性相一致。光探测器应具有良好的表面均匀性和线性灵敏度。

③ 试验程序

A. 预涂覆光纤截止波长

a. 标准试样

测量是在 2m 长的光纤试样上进行的。试样光纤插入试验装置中并被变成一个松弛圈。松弛圈形成一个半径为 140mm 完整圈。光纤试样其它部分应基本未受到外部应力作用。尽管光纤试样上允许半径大于 140mm 偶然弯曲，但是这些偶然弯曲不会对测量结果产生明显的影响。在预计测量的截止波长附近的足够宽范围内，记录输出功率 $P_1(\lambda)$ 与 λ 的关系曲线。

b. 通过参考试样的传输

测量截止波长时，可从下述的两个试验方法中任选一个。

● 待测光纤试样

采用待测光纤试样，保持注入条件不变，在被测光纤试样上至少打一个小半径圆圈滤掉 LP_{11} 模，再在截止波长附近的足够宽的范围内测量输出功率 $P_2(\lambda)$ 。这个圆圈的半径典型值 30mm。

● 多模光纤试样

1~2m 的短多模光纤，在上述相同的波长范围内测量输出功率 $P_3(\lambda)$ 。多模光纤作参考试样时，泄漏模的存在会使测得的传输谱出现不希望的波纹影响测量结果。为了减小波纹，对多模光纤的注入条件限制，只对多模光纤芯直径和数值孔径进行 70% 的注入或用合适的滤模器。

c. 计算

光纤试样的衰减谱与参考功率的关系：

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (4.48)$$

式中：i=2 或 3，分别代表上述两种方法。

假设直线代表更长波长区，高阶模与基模的偏差为：

$$\Delta \alpha (\lambda) = \alpha (\lambda) - (A_0 + B_0 \lambda) \quad (4.49)$$

求出 A_0 和 B_0 ，这样 $(A_0 + B_0 \lambda)$ 表示波长在高级模衰减急剧增大区（转变区）以上的衰减谱曲线部分。对上述的采用待测光纤试样的方法， A_0 和 B_0 都为零，参见图 4.25。

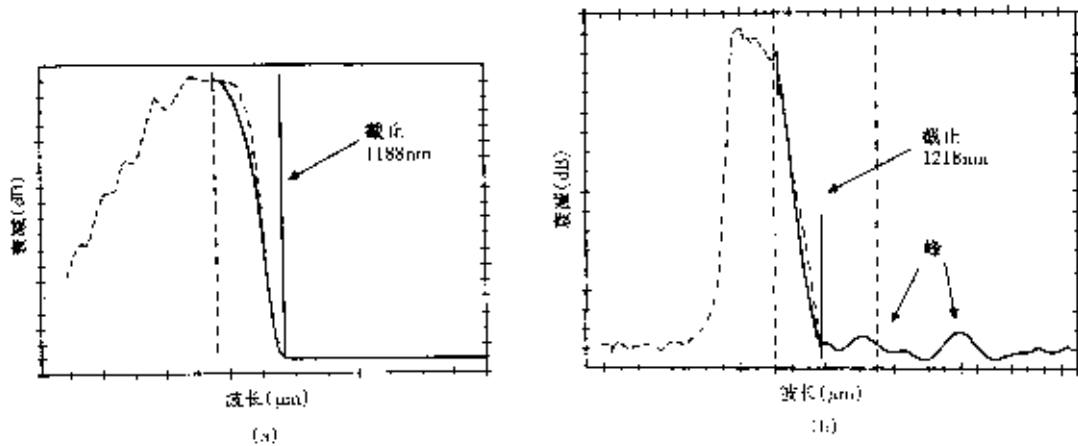


图 4.25 单模光纤截止波长

在转变区，高阶模功率随波长增大而降低。光纤的截止波长 λ_c 定义为高阶模功率相对于基模功率 $\Delta \alpha (\lambda)$ 降低到 0.1dB 的波长。

B. 成缆光纤截止波长

a. 试样准备

在模拟室外光缆线路最短缆长的应用条件下，对成缆单模光纤的截止波长 λ_{cc} 进行测量，旨在确保所使用的最短光缆在规定的工作波长以上能有效地呈单模状态工作。

成缆光纤截止波长的测量是在一根单模光纤光缆的光纤上进行的。准备一根 22m 光缆，将其两端各剥开 1m 露出预涂覆光纤，所剩 20m 长的光缆段平整放置，避免产生任何可能影响测量结果的小弯，参见图 4.26 所示。

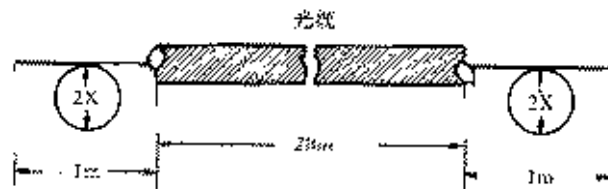


图 4.26 成缆光纤截止波长测量中使用的条件

b. 测量步骤

λ_{cc} 测量步骤与 λ_c 相同。为模拟接头盒的效果，在试样光缆两端裸露的 1m

光纤上各打一个半径为 40mm 的圈，如图 4.26 所示。光纤或光缆中允许有些大半径的偶然弯曲，但它们对测量结果引起明显的变化。在预计的截止波长附近足够宽的波长范围内，测量输出光功率谱 $P_1(\lambda)$ 。

然后将两端露出的光纤各打一个半径为 30mm 的圆圈，测出 $P_2(\lambda)$ ，同样计算出：

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (4.50)$$

成缆光纤截止波长就是 $\alpha(\lambda)$ 等于 0.1dB 所对应的最大波长。

(2) 替代法

为了测量成缆光纤截止波长的方便和容易实现，ITU-G.650(2000) 还介绍了一个替代法。这个替代法测量的不是在成缆光纤上进行，而是在未成缆光纤上进行。为了确保 λ_{cc} 的测量结果与对成缆光纤的测量结果相一致，必须采用合适的测量条件。有关用未成缆光纤替代成缆光纤进行截止波长的使用条件和具体方法，如图 4.27 所示。

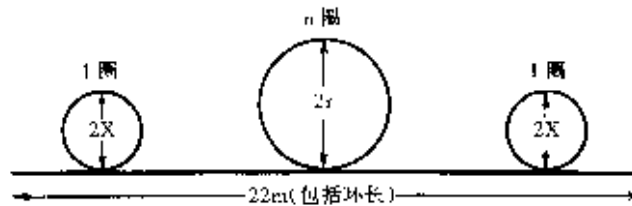


图 4.27 用未成缆光纤测量 λ_{cc} 的试样条件

未成缆光纤是预涂覆光纤或完整的二次套塑光纤。将 22m 长的光纤插入试验装置中。除了在 22m 光纤两端各打一个半径 $X=40\text{mm}$ 的圆圈外，其余 20mm 光纤松绕成半径 $r \geq 140\text{mm}$ 的 n 个松圆圈，为的是模拟成缆条件。未成缆光纤截止波长 λ_{cc} 的试验程序和确定方法与成缆光纤完全相同。

五、模场直径

1. 定义

模场直径是单模光纤所特有的一个重要参数。它的标称值和容差大小与光纤的连接损耗和抗弯性有着密切的关系，而且可以从模场直径随波长的变化谱估算单模光纤的色散值、单模光纤连接损耗、弯曲损耗和单模光纤有效面积等。因此，在单模光纤生产光缆、施工接续和实际使用中，人们非常重视模场直径这一参数。与模场特性相关的几个定义如下：

(1) 模场

模场是光纤中的基模 LP_{01} 的单模电场在空间的强度分布。

(2) 模场直径

单模光纤中的场并不完全集中在纤芯中，而有相当部分的能量在包层中传

输，所以不用纤芯的几何尺寸作为单模光纤的特性参数，而是用模场直径作为描述单模光纤中光能集中程度的度量。模场直径 $2w$ 表示光纤横截面基模的电磁场强度横向分布的度量，模场直径可由远场强度分布为 $F(\theta)$ 来定义， θ 为远场角，则模场直径定义为：

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^{\pi} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.51)$$

(3) 模场中心

模场中心是光纤内基模场空间强度分布的中心位置。模场中心位于 r_c ，它是位置矢量 r 的标称强度加权积分：

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA} \quad (4.52)$$

(4) 芯同心度误差

芯同心度误差是模场中心和包层中心之间的距离。

2. 测量方法

模场直径是单模光纤基模模场强度空间的一种度量。用模场直径概念的理由是因为单模光纤中的场并不是完全集中在纤芯中，而有相当部分的能量在包层中传输，所以不宜用纤芯的几何尺寸作为单模光纤的特性参数，而是用模场直径作为描述单模光纤中光能集中的范围。

模场直径的测量目的是确定出单模光纤内光功率的分布范围及其同轴性。经过长时间研究后，ITU-T G. 650 (2000) 对模场直径和测量作了明确规定。值得指出的是模场直径与测量方法紧密相关。

模场直径测量方法有：远场扫描法、可变孔径法和近场扫描法等。模场直径的定义及不同测量方法之间的数学等效关系，如图 4.28 所示。

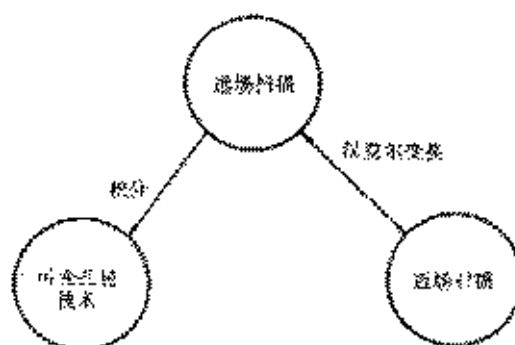


图 4.28 模场直径测量方法之间的数学关系

模场直径的等效转换式：

- 可变孔径法

