

OTDR 测试原理及曲线分析

李龙孙 杨晨

1. 引言

光时域反射仪（OTDR：Optical Time-Domain Reflectometer），是光纤测试，特别是在网络建设的实际施工布线中经常使用的仪器。OTDR 可以测试（成缆前后）光纤的衰减系数、光纤长度、衰减均匀性、点不连续性、物理缺陷和接头损耗等参数，特别适合于对通信网络中的光纤光缆链路进行检测，它既可以定位光纤链路中的连接点（含热熔接、机械冷连接、活动连接等）的位置并测试其损耗，又可以在链路发生故障时，迅速查找原因并定位故障位置。

2. 测试原理

OTDR 通过采集和测量因瑞利散射而被光纤自身背向散射回来的光功率来进行相关的测试。OTDR 将光脉冲注入到待测光纤中后，因为瑞利散射，注入的光脉冲在光纤长度方向上的每一点上都被散射（所有方向），其中一部分光会背向返回到 OTDR 的探测单元，OTDR 会采集和测量此背向散射光。

在光纤链路上的某一点，其背向散射的光功率 $P(z)$ 可以通过公式(1)^[1]计算：

$$P(z) = C \frac{\lambda^2}{(MFD(z))^2} P_i \tau_w 10^{-\frac{2}{10}\alpha z} \quad (1)$$

其中， λ 为注入光的波长， C 为比例系数（与多种因素有关，比如光纤的玻璃材料）， z 为此点距离原点的距离， $MFD(z)$ 为光纤在此点处的模场直径， P_i 为 OTDR 的脉冲功率， τ_w 为脉冲的宽度， α 为光纤的衰减系数。

从公式(1)可以看出， $P(z)$ 的大小是受到光纤模场直径的影响的。

一般情况下， $P(z)$ 采用对数坐标表示，所以 OTDR 的测试曲线一般为直线，其斜率反映了光纤的衰减系数。

2.1 衰减系数的测试^[2]

使用 OTDR 测试光纤或光缆的衰减系数的步骤如下：

2.1.1 光纤连接

将被试光纤连接到 OTDR 上，或连接到盲区光纤的一端（盲区光纤也可称为尾纤，在测试过程中用于避免 OTDR 盲区的影响），盲区光纤的另一端连接到 OTDR 上。

2.1.2 参数设置

在 OTDR 中设置光源波长、脉宽、测距范围（包括长度分辨率）、有效群折射率以及信号平均时间等参数。

在选择脉宽、脉冲重复频率和光源光功率时应注意，对于短距离测量，应选用短脉宽以提供足够高的分辨率，但这又将限制测量时的动态范围和可测量的最大长度。对于长距离测量，可以将入射的峰值功率增加到可能产生足够大非线性影响的功率水平之下，也可通过选用长脉宽以增加动态范围，但这又将减小测量时的分辨率。

2.1.3 曲线显示

启动 OTDR 进行取样，调整仪器显示的背向散射信号，使曲线尽可能全屏显示，如需增加分辨率，应调整图形的显示刻度，并尽量放大感兴趣的图形区域

(在此过程中, 应注意正确的区分真实的信号和噪声信号)。图 1 是测量衰减时的完整 OTDR 曲线图。

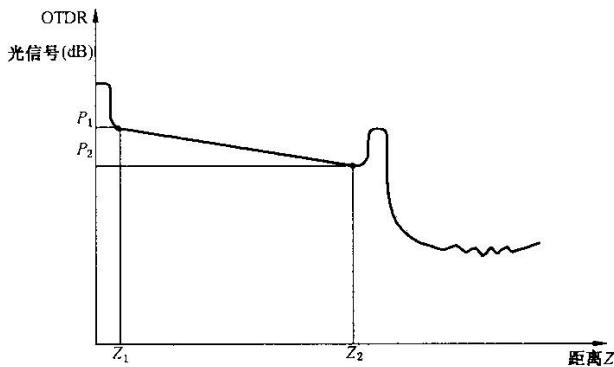


图 1. “均匀”样品的 OTDR 测试曲线 1

2.1.4 衰减系数的测试

将光标置于试样曲线线性区段始端(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 。对于 Z_2 的定位, 如可能, 切割试样远端, 在曲线尾端产生明显的反射。

光纤或光缆段的单向后向散射衰减系数 α 为:

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

(2)

该数据可以用两点法给出, 也可以用最小二乘近似(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, 该方法由于减小了噪声的影响而具有更好的重复性, 但当光纤衰减不均匀时会给出错误的结果。

进行双向测试, 将双向测试的数值进行平均以消除后向散射特性随光纤长度变化的影响, 取双向测量的平均值作为该波长上衰减系数的最后结果。

如需要, 可切换到另一波长重复上述过程。

2.2 光纤长度的测试^[3]

如图 2 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_1 (如试样前无光纤或光缆段则 Z_1 为零, 如试样前有已知长度 Z_0 的光

纤或光缆段, 则 Z_1 为 Z_0)。如果由于不连续性极小而不宜确定 Z_2 和 Z_1 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, 在曲线尾端产生明显的反射。

光纤的长度为:

$$L = Z_2 - Z_1 \quad (3)$$

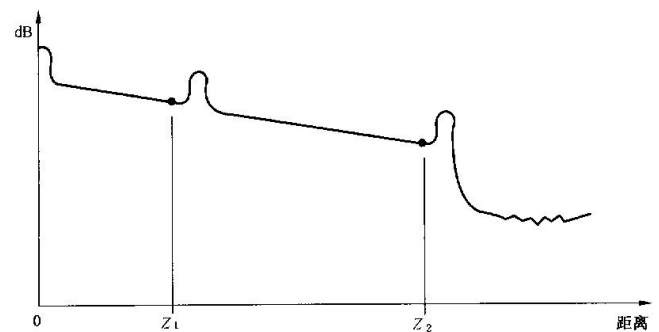


图 2 “均匀”样品的 OTDR 测试曲线 2 (试样前连接了盲区光纤)

2.3 点不连续的测试

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 3 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。

单向 OTDR 测试一般只用于检查链路中是否存在点不连续, 以及确定点不连续的位置, 不应用作实际损耗的测定评估。由于 MFD 公差和其他光纤固有参数的差异会导致错误。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。

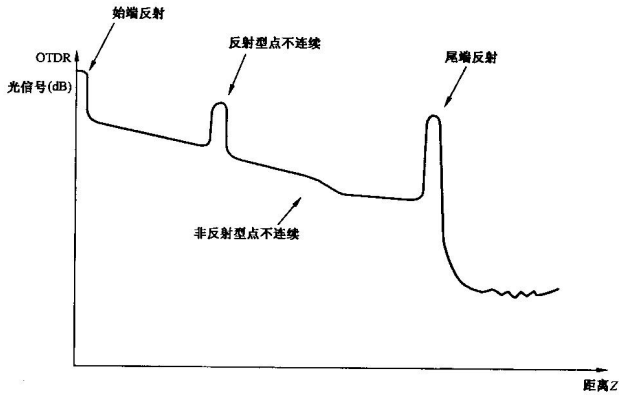


图 3. OTDR 测试曲线上的不连续点

3. 熔接损耗

光纤的熔接损耗属于 OTDR 点不连续的一种。由于光纤光缆的工程施工中广泛应用到光纤的熔接技术，在此专门对熔接损耗的测试进行解释。

一般的，熔接损耗的大小与下面几个因素有关：

- 1) 两端光纤的纤芯对准
- 2) 两端光纤的端面是否平行（即纤轴是否同轴）
- 3) 模场直径的匹配

随着熔接机厂商的制造工艺不断发展，光纤的熔接损耗受前面两项的影响已降至很低的程度，然而由于两端光纤的模场直径失配，会造成熔接损耗在一定程度上增大。

3.1 模场直径失配的影响

由于模场直径的失配造成的熔接损耗 $Loss_{MFD-mismatch}$ ，可以通过公式(4)^[1]来进行理论计算：

$$Loss_{MFD-mismatch} = -20 \log \left[\frac{2MFD_1 MFD_2}{(MFD_1^2 + MFD_2^2)} \right] dB \quad (4)$$

模场直径的失配程度可以由 F_{MFD} 来描述， F_{MFD} 的大小由公式(5)^[5]决定：

$$F_{MFD} = \frac{MFD_1 - MFD_2}{\frac{1}{2}(MFD_1 + MFD_2)} \quad (5)$$

当 F_{MFD} 的绝对值小于 0.8 时， $Loss_{MFD-mismatch}$ 可以按公式(6)^[5]计算

$$Loss_{MFD-mismatch} = 4.343 F_{MFD}^2 dB \quad (6)$$

根据上述公式，计算了不同模场直径差异情况下由模场直径失配造成的熔接损耗的大小。计算时，假设熔接点两端的光纤在 1310nm 处的模场直径的分布范围为 8.4 μ m 至 9.6 μ m。计算结果如图 4 所示：

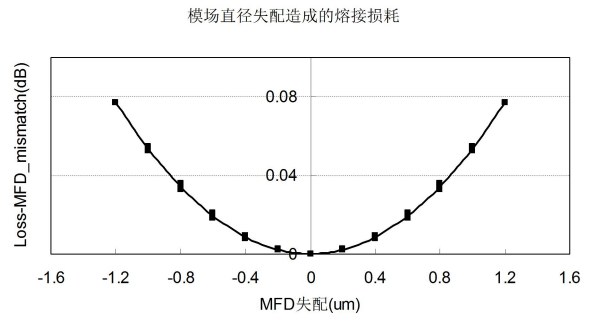


图 4. 模场直径失配造成的熔接损耗

图 4 为根据公式(6)计算得到的由于模场直径失配造成的熔接损耗。如果熔接点两端光纤的模场直径的差值在 1.2 μ m 以下，由模场直径失配造成的熔接损耗小于 0.08dB。ITU-T G. 652 建议^[6]中，对于光纤模场直径的公差要求是 $\pm 0.6\mu$ m，ITU-T G. 657 建议^[7]中，此要求更为严格，为 $\pm 0.4\mu$ m，所以对于同类型的光纤而言，其模场直径的差异不会超过 1.2 μ m。

3.2 单向测试时的 OTDR 曲线

因为 OTDR 特殊的测试原理，使得其测试结果对模场直径十分敏感，从公式(1)可以看出，OTDR 探测到某点的背向散射功率 $P(z)$ 是反比于此点的模场直径的，也就是说模场直径越大，反射的光功率越小，而模场直径越小，反射的光功率越大。假设两段模场直径具有一定差异的光纤通过熔接机热熔接，则在熔

接点前后, $P(z)$ 的区别是明显的。如果光从小模场直径的光纤进入大模场直径的光纤, 则 OTDR 曲线会出现一个明显的负台阶 (衰减), 而光从大模场直径的光纤进入小模场直径的光纤时, OTDR 曲线上会出现一个明显的正台阶 (视在增益)。单向测试时出现的明显的正负台阶都无法正确的反映此熔接点的实际熔接损耗, 甚至会给施工人员提供错误的信息而造成不必要的返工。

图 5 为用 OTDR 单向测试模场直径失配的两段光纤的熔接损耗时的典型曲线的示意图。

从图 5 中可以看出, 当光从大模场直径的光纤进入小模场直径的光纤时, OTDR 曲线上出现了一个明显的正台阶, 而当光从小模场直径的光纤进入大模场直径的光纤时, OTDR 曲线上出现了一个明显的负台阶。

熔接点两端的光纤的模场直径差异越大, 则台阶越明显。即为我们常说的“大正大负”问题。

因 OTDR 的测试原理所造成的误差损耗 α_{OTDR} 可以通过公式 (7) [1] 进行计算:

$$\alpha_{OTDR} = 10 \log(MFD2 / MFD1) \quad (7)$$

当 F_{MFD} 的绝对值小于 0.35 时, α_{OTDR} 可以按公式 (8) [5] 计算

$$\alpha_{OTDR} = -4.343 F_{MFD} dB \quad (8)$$

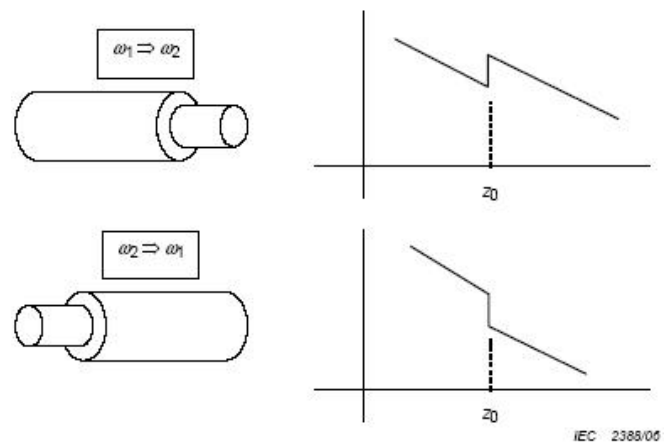


图 5. 模场直径差异造成的 OTDR 曲线的正负台阶 [1] (ω_1, ω_2 代表光纤的模场直径, $\omega_1 > \omega_2, z_0$ 为熔接点的位置)

根据上述公式, 计算了不同模场直径差异情况下由模场直径失配造成的 OTDR 误差损耗的大小。计算时, 假设熔接点两端的光纤在 1310nm 处的模场直径的分布范围为 8.4 μ m 至 9.6 μ m。计算结果如图 6 所示:

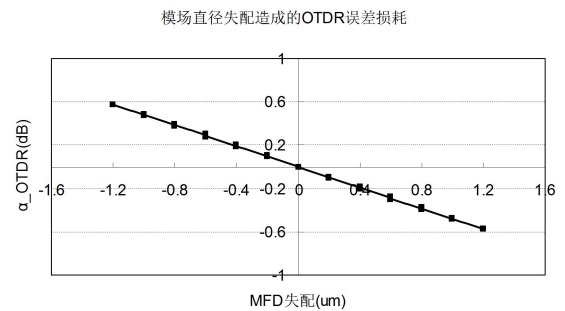


图 6. 模场直径失配造成的 OTDR 误差损耗

图 6 为根据公式 (8) 计算得到的由于模场直径失配造成的 OTDR 误差损耗。

将图 4 和图 6 进行比较, 可以发现在相同的模场直径差值下, α_{OTDR} 明显大于 $Loss_{MFD-mismatch}$, 例如模场直径差值为 0.6 μ m 时, α_{OTDR} 的值约为 0.3dB, 而 $Loss_{MFD-mismatch}$ 的值仅为 0.03dB。

上述分析说明, 使用 OTDR 进行单向测试时, OTDR 显示的台阶的“高度”不能真实反映熔接点的损耗值。假设台阶的“高度”为 G (单位 dB), 真实的熔接损

耗值为 L_{ture} ，则：

$$G=L_{\text{ture}}+\alpha_{\text{OTDR}} \quad (9)$$

而，

$$L_{\text{ture}}=\text{Loss}_{\text{MFD-mismatch}}+\text{Loss}_{\text{others}} \quad (10)$$

其中， $\text{Loss}_{\text{others}}$ 指因偏芯、偏轴等其它机理造成的熔接损耗。

根据公式(9)和公式(10)，可以推出真实的熔接损耗值 L_{ture} 的计算公式为：

$$L_{\text{ture}}=(G_1+G_2)/2 \quad (11)$$

其中 1 和 2 代表了光传输的方向性。

因此，要准确的测试熔接点的熔接损耗，必须使用 OTDR 进行双向测试，取双向测试结果的平均值来评价熔接损耗的大小。

参考文献

- [1] IEC TR 62316(2007):Guidance for the interpretation of OTDR backscattering traces
- [2] GB/T 15972-40(2008): 光纤试验方法规范 第 40 部分: 传输特性和光学特性的测量方法和试验程序 - 衰减
- [3] GB/T 15972-22(2008): 光纤试验方法规范 第 22 部分: 尺寸参数的测量方法和试验程序 - 长度
- [4] ITU-T L.12 (200803):Optical fibre splices
- [5] Draka Application Note : SM OTDRs, Apparent Gain, Loss and other surprises
- [6] ITU-T G.652 (2009): Characteristics of a single-mode optical fibre cable
- [7] ITU-T G.657 (2009): Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access Network

长飞光纤光缆股份有限公司

Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company

地址: 武汉市光谷大道9号(430073)

ADD: No.9 Optics Valley Avenue, Wuhan, Hubei, China(P.C.: 430073)

电话(Tel): +86 400-991-6698

邮箱(Email): marketing@yofc.com

www.yofc.com