

单模光纤兼容性导则

长飞光纤光缆有限公司 李婧 杨晨

摘要：针对通信系统中各种类型单模光纤存在混用的情况，本文参考了 IEC 技术报告 IEC/TR62000，针对单模光纤本身的特性参数，分析了在混用光纤时所应考虑的兼容性问题。

关键词：单模光纤，兼容性

1. 通信单模光纤的分类

在国家标准 GB/T 9771 系列和 IEC 标准 60793-2-50 中，将通信单模光纤分为 B1.1、B1.2、B1.3、B2、B4、B5、B6 几个类别。而 ITU-T 也在 G.652、G.653、G.654、G.655、G.656 和 G.657 建议中分别规范了各种单模光纤的定义和特性指标。其详细的对应关系如表 1 所示。

表 1 单模光纤的分类和定义

GB/T 9771 和 IEC 60793-2-50 中的分类代号	ITU-T 中的分类代号	单模光纤名称	特征描述
B1.1	G.652. A, B	非色散位移单模光纤	零色散波长范围在 1300nm~1324nm 范围之内，在 1310nm 窗口性能最优化，但在 1550nm 窗口也可以使用。
B1.2	G.654	截止波长位移单模光纤	主要用于海底光缆，为优化衰减，在 1550nm 窗口性能最优化，并将截止波长移动到 1310nm 以上。
B1.3	G.652. C, D	波长段扩展的非色散位移单模光纤	在 1310nm 窗口性能最优化。与 B1.1 光纤相比较，在 1383nm 水峰处的衰减较低，适用于 O、E、S、C、L 波段（即 1260nm~1625nm 范围）。
B2	G.653	色散位移单模光纤	零色散波长位移到 1550nm 窗口，在 1550nm 窗口性能最优化。但由于四波混频效应的影响，一般 B2 光纤仅用于单通道传输。

GB/T 9771 和 IEC 60793-2-50 中的分类代号	ITU-T 中的分类代号	单模光纤名称	特征描述
B4	G. 655	非零色散位移光纤	零色散波长位移到 1550nm 窗口，在 1550nm 窗口性能最优化。采用‘非零色散’设计以避免非线性效应的影响。可用于多通道传输的密集波分复用系统。
B5	G. 656	宽波长段光传输用非零色散位移单模光纤	零色散波长位移到 1550nm 窗口，在 1550nm 窗口性能最优化。在 1460nm~1625nm 范围内设计小的正色散系数，可用于多通道传输的密集波分复用系统。
B6	G. 657	接入网用弯曲损耗不敏感单模光纤	抗弯曲性能优化。a1 和 a2 两个子类的光纤可用于 O、E、S、C、L 波段（即 1260nm~1625nm 范围），且满足 B1.3 光纤的所有性能要求。b2 和 b3 两个子类的光纤主要用于室内短距离传输，不要求满足 B1.3 光纤的性能要求。

2. 单模光纤混用时应考虑兼容性 问题

对于通信系统中不同的应用场合，例如不同的传输波段窗口、色散管理要求、密集布线情况下对弯曲性能的要求等等，不同种类的单模光纤可能存在混用和混接的情况。此时，应结合光纤本身的特性并综合考虑通信系统设计的要求进行分析。

光纤的大多数性能都与工作波长相关，因此在考虑光纤的兼容性时，应首先确定系统的工作波长，再结合考虑以下方面光纤性能的兼容性，以评估混用光纤对系统设计的各方面影响。

2.1 截止波长

光纤的截止波长是指在单模光纤中仅存在基模传输的最小波长。由于不同种类的单模光纤是为了优化不同工作窗口的性能而设计，因此其截止波长也不尽相同。在单模光

纤通信系统中，要求工作波长处应为单模传输，如果工作波长低于截止波长，则可能在系统中出现多模传输，造成噪声和误码。因此在混用不同类型的光纤时，应考虑截止波长与工作波长的匹配。

在 GB/T 15972.44 中规定了两种截止波长的定义，光纤截止波长和光缆截止波长。光纤在成缆和安装后，其截止波长会降低，一般向下偏移几十个纳米，根据不同的光纤种类，降低的程度不同，而其降低的程度主要由光纤的折射率剖面 and 成缆、布线方式所决定。

在不同类型的光纤进行接续时，只要工作窗口的最小波长大于链路中最大光缆截止波长，即可完全避免由多模传输所引起的系统噪声。

2.2 光纤的熔接和接续

影响光纤熔接和接续损耗的本征因素主要有两个方面：光纤的模场直径差异和几何

尺寸偏差。

随着光纤生产技术的发展，同时各标准化组织对光纤的几何尺寸进行了严格规范，现在国内外厂家对光纤的几何尺寸控制都能够做到较好的水平，因此由几何尺寸偏差所引起的熔接损耗问题并不明显。但在实际施工过程中，仍然要注意几何尺寸偏差对熔接和接续所可能产生的不利影响。

另一个本征影响因素是模场直径的失配。表 1 中所列出的单模光纤种类，其模场直径的差异较大（模场直径与波长有关，考虑模场直径失配时应在同一工作波长进行比较），在不同种类的光纤进行混接时，模场直径失配是影响接续损耗的最重要的因素。

表 2 列出了各种单模光纤（包括子类）模场直径的指标要求：

表 2 不同光纤类型的模场直径

ITU-T 分类代号	模场直径 MFD (μm)	
	1310nm	1550nm
G. 652. A, B	(8.6—9.5) \pm 0.6	—
G. 652. C, D	(8.6—9.5) \pm 0.6	—
G. 653. A	—	(7.8—8.5) \pm 0.8
G. 653. B	—	(7.8—8.5) \pm 0.6
G. 654. A	—	(9.5—10.5) \pm 0.7
G. 654. B	—	(9.5—13.0) \pm 0.7
G. 654. C	—	(9.5—10.5) \pm 0.7
G. 655. C	—	(8—11) \pm 0.7
G. 655. D	—	(8—11) \pm 0.6
G. 655. E	—	(8—11) \pm 0.6
G. 656	—	(7—11) \pm 0.7
G. 657. A1	(8.6—9.5) \pm 0.4	—
G. 657. A2	(8.6—9.5) \pm 0.4	—
G. 657. B2	(6.3—9.5) \pm 0.4	—
G. 657. B3	(6.3—9.5) \pm 0.4	—

表 2 中，G. 652 和 G. 657 光纤在 1310nm 波长规范了模场直径指标，而 G. 653、G. 654、G. 655 和 G. 656 光纤主要在 1550nm 窗口使用，因此也仅在 1550nm 波长规范了模场直径。一般情况下，将不同工作窗口优化的光纤进行混用时，例如将 1310nm 窗口优化的 G. 652 光纤和 1550nm 窗口优化的 G. 655 光纤混接，由于模场直径失配较大，因此熔接损耗值也会偏大。

由于模场直径失配的因素而引起的熔接附加损耗可以用式 (1) 来近似计算：

$$L_{\text{loss}} \text{ (dB)} = -201 \log \left[\frac{2MFD_1 \cdot MFD_2}{MFD_1^2 + MFD_2^2} \right] \quad (1)$$

例如，将模场直径为 $8.6\mu\text{m}$ 的 G. 657. A2 光纤和 $6.3\mu\text{m}$ 的 G. 657. B2 光纤分别与 G. 652 光纤进行熔接，理论近似计算值与实测值如表 2 所示。在实际测试中，

由于要考虑除模场直径失配以外的其它影响因素，例如几何尺寸的影响、光纤折射率剖

面匹配的影响以及熔接机状态等，因此实测值会比理论计算值要略大。

表 3 G. 657 光纤与 G. 652 光纤熔接的理论计算和实测数据对比

熔接次数	样品 1		样品 2		理论近似计算的熔接损耗 (dB)	实测熔接损耗 (dB)
	光纤类型	MFD@ 1310nm	光纤类型	MFD@ 1310nm		
1	G. 657. A2	8.6 μ m	G. 652. D	9.1 μ m	0.014	0.04
2	G. 657. B2	6.3 μ m	G. 652. D	9.1 μ m	0.574	0.97

对于 G. 657. A1 或 A2 类光纤，其模场直径指标范围与 G. 652 光纤一致，因此在熔接和接续方面的兼容性较好。而 G. 657. B2 和 B3 类光纤的模场直径下限与 G. 652 光纤的典型模场直径中心值相差较大，导致接续损耗偏大。一般来说，在同一工作波长，若两根光纤的模场直径差异在 1 微米以内，采用正确且合适的熔接手段，每个熔接点的损耗值可小于 0.08dB。

在混接两种不同类型的光纤时，还应当选用合格的熔接机，并有针对性的优化熔接机的参数设置。修改参数设置并不能绝对保证熔接损耗达到所要求的水平，但合适的参数设置能够最大程度的减小熔接损耗。对于常用的一些混接情况（例如，G. 652 和 G. 657. A2 光纤的熔接），部分熔接机厂商已经将优化后的参数设置设为了默认选项。

另外，测试熔接损耗必须采用正确的方法。尤其是使用 OTDR 来测试熔接损耗时，要严格使用双向平均法进行测试。如果被熔接的两根光纤之间存在模场直径失配，会出现 OTDR 一个方向测试结果较大，而另一个方向测试结果出现负值（负损耗或增益，伪值）的情况。只有将两个方向的测试值进行平均，才能正确评估熔接点的损耗值。参看 IEC TR 62316 中对双向平均法有更详细的介绍。

上述所应考虑的事项，大部分同样适用于机械连接的接续方式，例如暂时性的活动

连接或永久性的机械冷接。

需要说明的是，在实际应用中，不同类型光纤的混接并不是无序、随意性的，一般在一条链路中，出现混接的情况有限（一般为 2 个接续点），在系统设计时，应基于整个链路的功率预算进行考虑，一般情况下，由于模场失配造成的稍大一点的接续损耗并不会影响整个链路的正常开通，结合实际情况进行分析是非常必要的。

2.3 色度色散

在光纤中传输的光信号的不同频率成份或不同的模式分量以不同的速度传播，到达一定距离后必然产生信号失真，这种现象称为光纤的色度色散（也简称为色散）。色散是影响光纤通信系统传输距离的因素之一，但可以通过一定的手段对色散进行补偿或管理。

不同种类的单模光纤进行有计划的混接能够一定程度上优化链路中的色散性能。事实上，如果将色散系数符号相反的光纤进行混接，可以实现在整个链路中一定波长范围内的色散趋近于零。在这种情况下，一般可使用色散补偿光纤帮助进行色散管理。

色散会限制数字信号的传输距离，色散的受限距离（在这里指无需进行色散补偿或色散管理的传输距离）针对不同类型的单模光纤有所不同。一般情况下，超过色散受限距离时，则需要进行色散补偿。色散补偿虽然是解决链路传输距离受限的有效方式之

一，但必然会增加系统的建设和维护成本，建议在一条链路中需要混用光纤时，尽量选用具有同样色散特性的光纤类型。

系统的总色散与每一段光纤的色散系数和长度有关。当不同类型的光纤进行混接时，建议分别计算每一段光纤的色散值，最后分析系统总色散。在混接的情况下，整个链路的色散斜率可以被补偿，这是由于被混接的不同光纤，其色散系数与波长的依赖关系不一样，最终链路的总色散斜率与各种被混接光纤的原始色散斜率曲线以及在链路中的长度有关。

设计和实施链路的色散管理是一个复杂的过程，关于色散补偿、色散斜率补偿和色散管理等相关内容在 IEC TR61282-7 中有详细解释。

2.4 偏振模色散

随着光纤通信向高速率、多通道、长距离和全光网络方向发展，尤其在 40Gb/s、100Gb/s 甚至更高速率的通信系统中应用，PMD 已经成为限制系统传输速率的主要因素。与色度色散的线性关系有所区别，链路的偏振模色散 (PMD) 是一个随机统计值，现阶段尚无成熟的光学补偿方案。

PMD 的最大受限传输距离 L_{MAX} 与系统传输速率 B 和光缆的链路 PMD 系数 F_{PMD} 有关，近似计算公式如下：

$$L_{MAX} = 10000 / (F_{PMD} \times B)^2 \quad (2)$$

当链路 PMD 系数分别为 $0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 和 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 时，基于 NRZ 码的系统传输速率和受限传输距离的关系如表 4 所示。

表 4 链路 PMD 系数、系统传输速率与 PMD 受限距离的关系

传输速率 PMD 系数	10Gb/s	40Gb/s	100Gb/s
$0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$	10000km	625km	100km
$0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$	400km	25km	4km

对于 40Gb/s 以上的传输系统，PMD 本资料条款的最终解释权属于长飞公司

所导致的系统应用限制较为严重，因此推荐在整个链路中都采用 PMD 系数优化的光纤光缆，有助于满足未来系统速率升级的应用要求。

关于 PMD 的一般原理可参见 IEC TR 61282-9，而混合链路的 PMD 计算（包括链路中包括例如放大器等器件所产生的影响）可参见 IEC 61282-3。

2.5 非线性效应

光纤的非线性效应指强光作用下由于介质的非线性极化而产生的效应。主要包括散射效应（受激布里渊散射 SBS 和受激拉曼散射 SRS 等），和与克尔效应相关的影响（自相位调制 SPM、交叉相位调制 XPM、四波混频效应 FWM 等），其中四波混频、交叉相位调制对系统的影响较为严重。

通信系统中的非线性效应一般与光纤纤芯中传输的功率密度有关，功率密度越大，非线性效应越明显。当输入光功率一定时，功率密度与光纤的有效面积成反比，因此大有效面积的光纤有利于降低光纤中非线性效应的影响。例如，G.655 类光纤针对 10Gb/s、40Gb/s 以上高速传输系统的应用，相对 G.652 光纤设计了更大的有效面积，目的在于降低光纤中的传输功率密度，降低非线性效应的影响。一般来讲，光纤的有效面积等于或大于 G.655 光纤即可满足当前和未来系统的应用需求。

将不同有效面积的光纤有计划的混接使用，是降低系统非线性效应的一种可行方法。例如，将有效面积较大的光纤用在链路中传输功率相对较大的起始端，可以最大程度的减少非线性效应的影响。在远离光源的链路远端，选用有效面积较小的光纤，可以降低色散系数，并且增加拉曼放大器的放大效率。选择不同有效面积的光纤规格和放置位置是系统设计中的关键问题。

由于光纤的有效面积与模场直径存在正

比例关系，因此在混用不同有效面积的光纤时，应注意模场直径失配所造成的接续问题。

2.6 衰减系数

每一种单模光纤，其衰减系数都针对工作波长窗口进行了优化设计。因此当某种光纤被使用于工作窗口之外的其它波长时，衰减系数也会随之变化，因此在混用光纤时，应当注意衰减系数与工作波长的关系。例如，G. 652. B 光纤主要应用于 1310nm 波段，其在水峰位置 1383nm 波长的衰减特性就与 G. 652. D 光纤有所区别。系统如果已经开通或者未来计划开通 1383nm 波段范围的应用，那么在链路中的每一段混接的光纤，都应具有一致的 1383nm 衰减特性。

4. 单模光纤的兼容性等级

表 5 中总结了在混用不同类型光纤时对

上述事项所应当重视的程度，用等级 L、M、H 来表示。表 5 并不旨在给出光纤兼容使用的规范，而是提醒使用者在混用任意两种类型的单模光纤时，应针对其不同的特性差异予以不同程度的分析和考虑。例如，某一些光纤混用的情况，从光纤设计的角度并不推荐，但可能在系统设计和链路结构中所需要，在这种情况下，系统设计者应结合光纤的特性分析混用光纤所存在的风险。

混用等级 L、M、H 的具体意义如下：

L=低 在规定的工作波长可兼容使用。

M=中 在部分波长处可兼容使用，建议综合分析系统应用需求进行混用风险评估。

H=高 存在混用风险，应谨慎评估混用光纤对通信系统可能产生的影响。

表 5 单模光纤的兼容性等级

光纤类型	光纤类型	衰减系数	色散	截止波长	熔接或接续损耗
G. 652. B	G. 652. B	L	L	L	L
	G. 652. D	M	L	L	L
	G. 653	L	H	L	M
	G. 654	L	M	H	H
	G. 655	L	H	H	M
	G. 656	L	H	H	M
	G. 657. A1/ A2	L	L	L	L
	G. 657. B2/ B3	M	M	L	M
G. 652. D	G. 652. D	L	L	L	L
	G. 653	L	H	L	M
	G. 654	L	M	H	H
	G. 655	L	H	H	M
	G. 656	L	H	H	M
	G. 657. A1/ A2	L	L	L	L
	G. 657. B2/ B3	M	M	L	M

续表

光纤类型	光纤类型	衰减系数	色散	截止波长	熔接或接续损耗
G. 653	G. 653	L	L	L	L
	G. 654	L	H	H	H
	G. 655	L	M	H	M
	G. 656	L	H	H	M
	G. 657. A1/ A2	L	H	L	M
	G. 657. B2/ B3	L	H	L	M
G. 654	G. 654	L	L	L	L
	G. 655	L	H	H	H
	G. 656	L	H	H	H
	G. 657. A1/ A2	L	M	H	H
	G. 657. B2/ B3	L	H	H	H
G. 655	G. 655	L	M	L	M
	G. 656	L	M	H	M
	G. 657. A1/ A2	L	H	H	M
	G. 657. B2/ B3	L	H	H	M
G. 656	G. 656	L	L	L	L
	G. 657. A1/ A2	L	H	H	M
	G. 657. B2/ B3	L	H	H	M
G. 657. A1/ A2	G. 657. A1/ A2	L	L	L	L
	G. 657. B2/ B3	M	M	L	M
G. 657. B2/ B3	G. 657. B2/ B3	L	L	L	M

5. 小结

在通信系统中，混用不同类型的单模光纤时，应分别从光纤的截止波长、熔接和接续、色度色散、偏振模色散、非线性效应以及衰减系数等参数的兼容性方面进行考虑。其中，G. 657. A1/ A2 光纤在性能指标上，除了弯曲性能优于 G. 652 光纤，其他性能指标均完全满足 G. 652. D 光纤的要求，因此这两类光纤的兼容性最佳。其它任意两种光纤类型，在光纤的性能指标上均有一定差异，因此在实际应用中，应综合通信系统设

本资料条款的最终解释权属于长飞公司

计的要求，结合光纤的不同特性有针对性的进行设计和分析。

参考文献

- [1] IEC TR 62000 单模光纤兼容性导则 (Single-mode fibre compatibility guidelines)
- [2] GB/T 9771 (所有部分) 通信用单模光纤
- [3] IEC 60793-2-50 (2008) B 类单模光纤规范 (Sectional specification for class B single-mode fibres)
- [4] IEC/TR 61262-3 (2006) 纤维光学通信系统设计指南. 第 3 部分: 偏振模色散计算 (Fibre optic communication system design)

- guides - Part 3; Calculation of polarisation mode dispersion)
- [5] IEC TR 61282-4 (2003) 纤维光学通信系统设计指南. 第 4 部分: 非线性效应的调节和利用 (Fibre optic communication system design guides - Part 4: Accomodation and utilization of non-linear effects)
- [6] IEC TR 61282-7 (2003) 纤维光学通信系统的设计指南. 第 7 部分: 色度色散的统计计算 Fibre optic communication system design guides - Part 7: Statistical calculation of chromatic dispersion
- [7] IEC TR 61282-9 (2006) 纤维光学通信系统设计指南. 第 9 部分: 偏振模色散计量和理论 (Fibre optic communication system design guides - Part 9: Guidance on polarisation mode dispersion measurements and theory)
- [8] ITU-T G. 652 (2009) 单模光纤光缆的特性 (Characteristics of a single-mode optical fibre and cable)
- [9] ITU-T G. 653 (2010) 色散位移单模光纤光缆的特性 (Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable)
- [10] ITU-T G. 654 (2010) 截止波长位移单模光纤光缆特性 (Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable)
- [11] ITU-T G. 655 (2009) 非零色散位移单模光纤光缆特性 (Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre and cable)
- [12] ITU-T G. 656 (2010) 宽波长段光传输用非零色散单模光纤光缆特性 (Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport)
- [13] ITU-T G. 657 (2009) 接入网用弯曲损耗不敏感单模光纤光缆的特性 (Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network)

长飞光纤光缆有限公司

YANGTZE OPTICAL FIBRE AND CABLE COMPANY LTD.

地址: 中国武汉关山二路四号

ADD: 4# Guanshan Er Road, Wuhan, China

邮编: Zipcode: 430073

电话: TEL: +86 27 67887266

+86 27 87802541

传真: FAX: +86 27 87801760

Http://www.yofc.com.cn