



国际电信联盟

# ITU-T

国际电信联盟  
电信标准化部门

# G.654

(10/2000)

G系列：传输系统和媒质、数字系统和网络  
传输媒质的特性 — 光导纤维缆

---

## 截止波长位移单模光导纤维缆的特性

ITU-T 建议书G.654

（前称 “CCITT建议书”）

---

ITU-T G系列建议书

传输系统和媒质、数字系统和网络

国际电话连接和电路	G.100-G.199
所有模拟载波传输系统共有的一般特性	G.200-G.299
金属线路上国际载波电话系统的各项特性	G.300-G.399
在无线接力或卫星链路上传输并与金属线路互连的国际载波电话系统的一般特性	G.400-G.449
无线电话与线路电话的协调	G.450-G.499
测试设备	G.500-G.599
传输媒质的特性	G.600-G.699
概述	G.600-G.609
对称电缆线对	G.610-G.619
陆上同轴电缆线对	G.620-G.629
海底电缆	G.630-G.649
<b>光导纤维缆</b>	<b>G.650-G.659</b>
光部件和子系统的特性	G.660-G.699
数字终端设备	G.700-G.799
数字网	G.800-G.899
数字段和数字线路系统	G.900-G.999

如果需要进一步了解细目，请查阅ITU-T建议书清单。

截止波长位移单模光导纤维缆的特性

来 源

ITU-T 建议书G.654由ITU-T第15研究组(1997-2000年)修订，并由世界电信标准化全会(2000年9月27日-10月6日，蒙特利尔)批准。

## 前 言

ITU(国际电信联盟)是联合国在电信领域内的专门机构。ITU-T(国际电信联盟电信标准化部门)是国际电信联盟(ITU)的常设机构。ITU-T负责研究技术的、操作的和资费的问题，并且为实现全世界电信标准化，就上述问题发布建议书。

每四年召开一次的世界电信标准化全会(WTSA)确定ITU-T各研究组的研究课题，然后由各研究组制定有关这些课题的建议书。

ITU-T的成员按照WTSA第1号决议拟定的程序批准建议书。

在ITU-T研究范围内的某些信息技术领域中使用的必要标准是与ISO和IEC共同编写的。

## 注

在本建议书中，“主管部门”一词是电信主管部门和经认可的运营机构的简称。

## 知识产权

国际电联提请注意：本建议书的应用或实施可能需要使用已声明的知识产权。国际电联对有关已声明的知识产权的证据、有效性或适用性不表示意见，无论其是由国际电联成员还是由建议书制定过程之外的其他机构提出的。

到本建议书批准之日为止，国际电联尚未收到实施本建议书时可能需要的受专利保护的知识产权方面的通知。但是，本建议书实施者要注意，这可能不代表最新信息，因此最好查询TSB专利数据库。

© 国际电联 2005

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何形式或手段，电子的或机械的，包括影印和缩微胶卷等对本出版物的任一部分加以复制或使用的。

# 目 录

	页
1 范围 .....	1
2 参考文献 .....	1
2.1 规范参考文献 .....	1
2.2 资料性参考文献 .....	2
3 术语和定义 .....	2
4 缩写 .....	2
5 光纤特性 .....	2
5.1 模场直径 .....	2
5.2 包层直径 .....	3
5.3 模场同心度误差 .....	3
5.4 不圆度 .....	3
5.4.1 模场不圆度 .....	3
5.4.2 包层不圆度 .....	3
5.5 截止波长 .....	3
5.6 弯曲损耗 .....	4
5.7 光纤材料性能 .....	4
5.7.1 光纤材料 .....	4
5.7.2 保护材料 .....	4
5.7.3 筛选应力水准 .....	5
5.8 折射率分布 .....	5
5.9 色散的纵向均匀性 .....	5
5.10 色散系数 .....	5
5.11 光纤设计导则的例子 .....	5
6 光缆特性 .....	5
6.1 衰减系数 .....	6
6.2 偏振模色散系数 .....	6
7 建议值表 .....	6
附录 I — 链路特性和系统设计的信息 .....	7
I.1 衰减 .....	8
I.2 色散 .....	8
I.3 微分群时延 (DGD) .....	8
I.4 非线性系数 .....	9
I.5 通用典型值表 .....	9

	页
附录 II — 光纤设计导则的例子 .....	10
附录 III — 关于偏振模色散统计的信息 .....	12
III.1 引言 .....	12
III.2 数据收集 .....	13
III.3 $PMD_Q$ 的计算(蒙特卡洛统计试验法).....	14
III.4 $DGD_{max}$ 的计算(蒙特卡洛统计试验法).....	14
附录 IV — 参考资料 .....	15

## 截止波长位移单模光导纤维的特性

### 1 范围

本建议书叙述在1300 nm 波长附近具有零色散波长的单模光纤，它的截止波长位移并在1550 nm附近波长上损耗最小，是为1500-1600 nm波长区域中使用而优化的。

这种损耗非常低的截止波长位移光纤(CSF)可以应用于长距离数字传输用途，例如长距离地面线路系统和使用光放大器的海缆系统。这种CSF的几何、光学(衰减、截止波长、色散和偏振模色散等)、传输与机械特性叙述于后。

制订了一些条款以支持更高波长(直到16xx, xx少于或等于25 nm)的传输。这种光纤的几何、光学、传输与机械参数按以下三类特性叙述于后：

- 光纤特性，即那些通过布缆和安装保留的特性；
- 光缆特性，即传送光缆所建议的；
- 拼接光缆特有的链路特性，描述基于测量、建模或其他考虑的系统接口参数的估计方法。一些典型的链路特性值，见附录I。

提供建议值表以使得易于参考。该表指出了光纤的基本子类。依据将来技术的革命，新的子类可能按照系统的实施创建。

在本建议书中所用的各种术语的含义与验证各项特性的测试所要遵循的导则列于ITU-T建议书G.650[1]中。这种光纤的特征，包括相关系数的定义、它们的测试方法和相关值将在研究和时间过程中提供。

### 2 参考文献

下列ITU-T建议书和其他参考文献的条款，通过在本建议书中的引用而构成本建议书的条款。在出版时，所指出的版本是有效的。所有的建议书和其他参考文献都会被修订，使用本建议书的各方应探讨使用下列建议书或其他参考文献最新版本的可能性。当前有效的ITU-T建议书清单定期出版。

#### 2.1 规范参考文献

- [1] ITU-T G.650 (2000), *Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres.*

## 2.2 资料性参考文献

下列ITU-T建议书的条款，通过在本建议书中的引用而构成其他相关资料。

- [2] ITU-T G.663 (2000), *Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems*.
- [3] ITU-T G.691(2000), *Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers*.
- [4] ITU-T G.692(1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers*.

## 3 术语和定义

ITU-T建议书G.650[1]中给出的各项定义都适用于本建议书。

在评估适用性之前，其值应四舍五入为建议值表中给出的数字的数量级。

## 4 缩写

本建议书应用以下缩写：

Aeff	有效区域
CSF	截止波长位移光纤
DGD	微分群时延
GPa	吉帕
MFD	模场直径
$n^2/A_{eff}$	非线性系数
PMD	偏振模色散
RTM	参考测试方法
TBD	待定
WDM	波分复用

## 5 光纤特性

在本节只建议为光纤制造提供一个最低限度的主要设计框架的那些光纤特性。其值的范围和限值在第7节的表中给出。其中，光缆制造或安装可能会显著影响成缆光纤的截止波长和PMD。除此之外，对于单根光纤、装入光缆内并绕于盘上的光纤以及已安装好的光缆中的光纤，所建议的特性都同样适用。

### 5.1 模场直径

有关模场直径(MFD)标称值的一个标称值和其容差都应指定在1550 nm上。MFD的标称值应在第7节指定的范围内。MFD规定的容差应不超过第7节中的值。标称值的偏差不应超过规定的容差。



## 5.2 包层直径

对包层直径所建议的标称值为125  $\mu\text{m}$ 。

应规定容差，不应超过第7节中的值。标称值的包层偏差不应超过规定的容差。

## 5.3 模场同心度误差

模场同心度误差不应超过第7节中规定的值。

## 5.4 不圆度

### 5.4.1 模场不圆度

在实践中，对于标称模场为圆形的光纤，已发现其模场不圆度很低，不致影响传输与接续，所以并不认为有必要对模场不圆度建议一个具体的数值。一般不需要为了验收而测量模场不圆度。

### 5.4.2 包层不圆度

包层不圆度不应超过第7节中规定的值。

## 5.5 截止波长

能区分出三种有用的截止波长：

- a) 光缆截止波长， $\lambda_{\text{cc}}$ ；
- b) 光纤截止波长， $\lambda_{\text{c}}$ ；
- c) 跳线光缆截止波长， $\lambda_{\text{cj}}$ 。

注1 — 对于一些特殊的海底光缆应用，可能也需要其他的光缆截止波长。

$\lambda_{\text{c}}$ 、 $\lambda_{\text{cc}}$  以及  $\lambda_{\text{cj}}$  的实测值的相互关系取决于具体的光纤和光缆设计以及测试条件。虽然通常是  $\lambda_{\text{cc}} < \lambda_{\text{cj}} < \lambda_{\text{c}}$ ，但不容易建立一个通用的定量关系。

保证在接头之间的最小光缆长度中在系统的最低工作波长上的单模传输是头等重要的。有两种可选用的方法来达到：

- 1) 建议  $\lambda_{\text{c}}$  小于1600 nm：当宜有一个下限时， $\lambda_{\text{c}}$  应当大于 1350 nm；
- 2) 建议  $\lambda_{\text{cc}}$  最大值为 1530 nm。

注2 — 以上数值保证在1550 nm附近单模传输。对于 WDM应用需要工作在(1550 nm-x)的波长上，应当把以上数值减少 x nm。

这两个规定不需要都执行。因为规定 $\lambda_{\text{cc}}$  是保证单模光缆运用更直接的方法，所以规定 $\lambda_{\text{cc}}$  是更好的选择。当环境难于规定 $\lambda_{\text{cc}}$ 时(例如，在单模光导纤维缆中，诸如跳线光缆或者在与 $\lambda_{\text{cc}}$  RTM中的方法有重大不同的情况下所使用的光缆)，则规定  $\lambda_{\text{c}}$  是合适的。

在用户选择如 2)那样规定 $\lambda_{\text{cc}}$ 的情况下，应该理解 $\lambda_{\text{c}}$  可以超过 1600 nm。

在用户选择如 1)那样规定 $\lambda_{\text{c}}$ 的情况下，就不需要规定 $\lambda_{\text{cc}}$ 。

在用户选择规定 $\lambda_{cc}$ 的情况下，可以允许 $\lambda_c$ 高于系统的最低工作波长，这时，依靠光缆制造与安装的效果，使得对于两个接头之间的最短光缆长度得出低于系统的最低工作波长的 $\lambda_{cc}$ 之值。

在用户选择规定 $\lambda_{cc}$ 的情况下，一个质量认定试验可能足以保证 $\lambda_{cc}$ 已满足要求。

光缆截止波长 $\lambda_{cc}$ 不应超过第7节中规定的最大值。

## 5.6 弯曲损耗

弯曲损耗随波长、弯曲半径和具有特定半径的轴的圈数的变化而变化。弯曲损耗不应超过第7节中给出的波长、弯曲半径和圈数的最大值。

如果光纤将用于超过1550 nm的波长，最长预测波长上的最大损耗可利用该特定的光纤设计的损耗光谱模型或统计数据库从1550 nm上的损耗测量中估算出来。另外，可在较长的波长上进行一个质量认定试验。

注1 — 质量认定试验可能足以保证这项要求是得到满足的。

注2 — 圈数建议值符合典型中继器间隔的全部接头套管中所采用的大致圈数。建议半径值是等效于在实际系统安装中为了避免由于光纤长期使用而引起的静态疲劳故障所广泛接受的最小弯曲半径。

注3 — 如果为了实用理由，选择低于圈数建议值来进行试验，则建议不要小于40圈，并使用一个按比例减少的附加损耗。

注4 — 如果计划在接头套管中或系统中的别的地方采用小于建议的弯曲半径(例如  $R = 30 \text{ mm}$ )，则建议同样的最大损耗值应适用于使用这种较小半径的具有同样圈数值的光纤。

注5 — 弯曲损耗建议值与实际单模光纤的配置有关。在成缆光纤的损耗规范中包括了成缆单模光纤与扭合有关的弯曲半径对损耗性能的影响。

注6 — 假如需要例行试验，为了1550 nm弯曲敏感性的精确度和测量容易，可采用一圈或几圈小直径环圈代替建议的圈数试验。在这种情况下，应该选择环圈的直径、圈数以及多圈试验时的最大允许弯曲损耗，以便与建议试验和允许实验相关联。

## 5.7 光纤材料性能

### 5.7.1 光纤材料

应当说明制作光纤所用的材料。

注 — 熔接不同材料的熔接光纤时需要小心。初步的结果表明，当接续不同的高二氧化硅光纤时，能取得适当的接头损耗与强度。

### 5.7.2 保护材料

应当说明用来制作光纤一次涂层材料的物理与化学性能以及除去这个涂层(如果需要的话)的最好方法。在单根加套光纤的情况下，也应作类似的说明。

### 5.7.3 筛选应力水准

规定的筛选应力  $\sigma_p$  应当不少于第7节规定的最小值。

注 — 各机械参数的定义包含在G.650的第1.2节与第2.6节。

### 5.8 折射率分布

光纤的折射率分布通常不需要知道。

### 5.9 色散的纵向均匀性

在研究中。

注 — 在特定波长上的色散系数本地绝对值与在长波上的测得的值不同。如果其值减小到接近于WDM系统中工作波长的波长上的较小值，四波混频线圈可以感应到其他波长(包括但不限于其他工作波长)的功率传播。色散系数的绝对值、色散斜率、工作波长、光功率和四波混频发生涉及的距离的一个函数是巨大的四波混频功率。

对DWDM在1550 nm区域的运作，ITU-T G.652光纤的色散足够大，可以避免四波混频。因此，色散均匀性不是一个函数问题。

### 5.10 色散系数

测出的光纤每单位长度上的群时延对波长的关系应当用二次式来拟合(见ITU-T G.650[1]):

$$\tau(\lambda) = \tau_{1550} + (S_{1550}/2)(\lambda - 1550)^2 + D_{1550}(\lambda - 1550)$$

式中:  $\tau_{1550}$  是在 $\lambda=1550$  nm 时的相对群时延。色散系数 $D(\lambda)=d\tau/d\lambda$  可从微分的二次式来确定:

$$D(\lambda) = S_{1550}(\lambda - 1550) + D_{1550}$$

式中,  $S_{1550}$  是在1550 nm 波长上的(均一)色散斜率, 也就是  $S_{1550}(\lambda)=dD/d\lambda$  在  $\lambda=1550$  nm上的值。而且,  $D_{1550}$  还表示在  $\lambda=1550$  nm上的色散值。

注1 —  $\tau(\lambda)$  与  $D(\lambda)$  的这些式子在 1500-1600 nm 波长范围内是足够精确的。但不意味着它们要用于1310 区域。

注2 — 另外一种方法可直接测出色散系数, 例如用微分相移法。在这种情况下, 应当把一根直线 $\tau(\lambda)$ 直接拟合到色散系数上来确定 $S_{1550}$  与  $D_{1550}$ 。

### 5.11 光纤设计导则的例子

附录II给出了一个日本公司(KDD)对最小损耗和截止波长位移光纤(CSF)所采用的光纤设计导则的例子。

## 6 光缆特性

因为第5节所给出的光纤的几何和光学特性几乎不受成缆过程的影响, 本节将给出与光缆制造长度的传输特性主要有关的各项建议。

环境与试验条件是至关重要的，将在试验方法的导则中叙述。

## 6.1 衰减系数

在1500-1600 nm波长区域内的一个或多个波长上都规定了衰减系数的最小值。光导纤维缆衰减系数值不应超过第7节中规定的值。

注 — 最低值取决于制造过程、光纤成分与设计以及光缆的设计。如附录II所示的，在1550 nm区域中已达到0.15 - 0.19 dB/km 的值。

## 6.2 偏振模色散系数

具有较低的比特率距离乘积的系统可允许较大的PMD系数值而不受损伤。

不是所有的表都包括关于PMD的要求。需要时，成缆光纤偏振模色散应依据统计基础而非单个光纤规定。要求仅与从光缆信息中计算出来的链接方向有关。统计规范的度量可在以下找到。计算的方法可在IEC 61282-3[IV.1]中找到，并在附录III中归纳。

制造商应采用PMD链接设计值 $PMD_Q$ ，它是作为M光缆段的规定的可能链接内拼接光导纤维缆的PMD系数的统计上限值。该上限值根据小的可能性级别Q定义，Q指的是拼接PMD系数值超过 $PMD_Q$ 的可能性。对于在第7节中给出的M和Q值， $PMD_Q$ 值不应超过第7节规定的最大PMD系数。

在设计 and 处理稳定、未成缆和成缆光纤的PMD系数之间的关系已知的情况下，未成缆光纤的测量结果用于生成成缆光纤的统计值。如果已经表明了这样一种关系，那么布缆者可以有选择地规定未成缆光纤的最大PMD值。

对PMD系数值的限制可以解释为等效于对随着时间和波长随机变化的微分群时延(DGD)的统计变量的限制。如果光导纤维缆已规定了PMD系数分布，那么也可以确定DGD变量的等效限制。DGD分布限制的度量和值可在附录I中找到。

## 7 建议值表

表1概括了满足本建议目标的大量光纤类别的建议值。

G.654.A是色散位移单模光导纤维缆的基本子类。该子类适用于ITU-T G.691[3]和ITU-T G.692[4]中在1550 nm波长区域内的系统。

表1/G.654—G.654.A光缆基本类别

光纤特性		
特 性	详 情	值
模场直径	波长	1550 nm
	标称值范围	9.5-10.5 $\mu\text{m}$
	容差	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
包层直径	标称值	125 $\mu\text{m}$
	容差	$\pm 1 \mu\text{m}$
模场同心度误差	最大值	0.8 $\mu\text{m}$
包层不圆度	最大值	2.0%
光缆截止波长	最大值	1530 nm
弯曲损耗	半径	37.5 mm
	圈数	100
	在 1550 nm 区域的最大值	0.50 dB
筛选应力	最小值	0.69 GPa
色散系数	D <sub>1550max</sub>	20 ps/(nm·km)
	S <sub>1550max</sub>	0.070 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
未成缆光纤 PMD 系数	最大值	Ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (注)
光缆特性		
衰减系数	波长	
	在 1500 nm 区域的最大值	0.22 dB/km
PMD 系数	M	20 根光缆
	Q	0.01%
	PMD <sub>Q</sub> 的最大值	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
注 — 如果对于特定的光缆结构已经指定了光缆PMD <sub>Q</sub> ,那么可以由布缆者指定一个未成缆光纤的选择的最大PMD系数,以支持光缆PMD <sub>Q</sub> 的主要要求。		

## 附 录 I

### 链路特性和系统设计的信息

一个拼接链路通常包括一定数量的光导纤维缆的接头制造长度。制造长度的各项要求在本建议书第5节和第6节给出。拼接链路的传输参数必须不仅考虑单根光纤长度的性能,而且还要考虑拼接统计量。

制造长度内光导纤维缆的传输特性会有一些的概率分布,如果要取得最经济的设计,时常需要考虑这种概率分布。阅读本节中下面几个小节的内容时都要想到各项参数的统计性质。

链路特性值受一些因素的影响，而不像光导纤维缆受例如接头、连接器和安装等的影响。这些因素未在本建议书中规定。为了估计链路特性值，在下表中提供了光导纤维缆的典型值。系统设计所需要的光纤参数的估计方法基于测量、建模或其他考虑提供。

## I.1 衰减

链路的衰减A由下式给出：

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y$$

式中：

$\alpha$	在链路中光导纤维缆的典型衰减系数；
$\alpha_s$	平均接头损耗；
x	在链路中接头的数目；
$\alpha_c$	线路连接器的平均损耗；
y	在链路中线路连接器(如果装有的话)的数目；
L	链路长度；

应当分配适当的光缆裕度给将来光缆配置的变化(附加接头、额外的光缆长度、老化效应、温度变化等)。上式不包括设备连接器的损耗。I.5中可以找到光导纤维缆衰减系数的典型值。在设计实际系统时所采用的衰减预算中，应该考虑这些参数的统计变化。

## I.2 色散

以ps/nm表示的色散能从制造长度的色散系数计算出来，计算时假定它与长度呈线性关系，并适当考虑这些系数的符号(见第5.10节)。

当这些光纤用于在1550 nm波长区域传输时，通常采用某些形式的色散补偿。在这种情况下，设计时要用到平均链路色散。在1550 nm视窗内测得的色散可以在1550 nm视窗内用与波长的线性关系来描绘。这个关系用典型的色散系数和1550 nm波长上的色散斜率系数描述。

在1550 nm波长区域内的色散系数 $D_{1550}$ 和色散斜率系数 $S_{1550}$ 的典型值可以在第I.1节中找到。这些值和链路长度 $L_{Link}$ 可用于在光纤链路设计中计算典型色散。

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (ps / nm)$$

## I.3 微分群时延(DGD)

微分群时延是两种极化模式的到达时间对一个特定波长和时间的微分。对于具有PMD系数的链路，链路的DGD随着时间和波长的变化随机变化，例如麦克斯韦分布就包含一个单独的参数，该参数是链路的PMD系数的结果，也是链路长度的平方根。PMD在特定时间和波长产生的系统损伤取决于在该时间和波长的DGD。因此，由于DGD分布与光导纤维缆PMD系数分布有关，建立关于DGD分布有用的限制和其限值的方法已在IEC 61282-3中详细阐述和记载，并在附录IV中归纳。DGD分布限值的度量表示如下：

注一 元素而非光导纤维的分布的确定超出了本建议书的范围，在IEC 61282-3[IV.1]中讨论。

参考链路长度 $L_{Ref}$ ：最大DGD和概率将适用的最大链路长度。对于更长的链路场长度，用最大DGD乘以实际长度与参考长度的比率的平方根。

典型最大光缆长度 $L_{Cab}$ ：当拼接的典型单根光缆或在确定PMD系数分布时测量的光缆长度小于这个值时，最大值可以确保。

DGD最大值 $DGD_{max}$ ：在考虑光纤系统设计时可能使用的DGD值。

最大概率PF：实际DGD值超过 $DGD_{max}$ 的概率。

第I.5节包含适用于遵循表2和表3中建议书的统计PMD限制的光导纤维的这些度量值。

## I.4 非线性系数

关于由非线性光纤效应(见ITU-T G.663[2])引起的系统损伤，色散效应和非线性系数 $n_2/A_{eff}$ 是交互的。典型值与实际得到的值不同。非线性系数的测试方法有待进一步研究。

## I.5 通用典型值表

根据第I.1、I.2、I.3节，下表中的值代表拼接光导纤维。

衰减系数	波长	典型链路值
	1550 nm	0.25 dB/km
	16XXnm(注 1)	TBD
色散系数	$D_{1550}$	TBD
	$S_{1550}$	TBD
微分群时延(DGD) (注 2)	参考链路长度	400 km
	典型最大光缆段长度	10 km
	DGD 最大值	25 ps
	最大概率	$6.5 \times 10^{-8}$
注1 — 该波段的上限波长还没有完全确定。然而，XX小于或等于25 nm。		
注2 — 只有当规定了表1中的成缆PMD <sub>Q</sub> 值，这些值才适用。		

## 附录 II

### 光纤设计导则的例子

在光纤设计中，模场直径(MFD) $2W$ 和有效截止波长 $\lambda_{ce}$ 是非常重要的参数。匹配包层光纤在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处的等弯曲损耗 $\alpha_b$ 、色散 $D$ 和折射率 $\Delta$ 曲线作为 $2W$ 和 $\lambda_{ce}$ 的函数，如图II.1<sup>1</sup>中所示。在此，平行线区域对应于ITU-T(CCITT)G.652光纤视窗( $2W_{1.55\mu\text{m}} = 10 \pm 1.0\ \mu\text{m}$ ,  $1.10\ \mu\text{m} < \lambda_{ce} < 1.28\ \mu\text{m}$ )建议的 $1.31\ \mu\text{m}$ 优化单模光纤。从图II.1中可以发现， $1.55\ \mu\text{m}$ 波长区域内的弯曲损耗极大地影响使用凹陷包层设计的 $1.31\ \mu\text{m}$ 优化单模光纤(SMF; ITU-T G.652)。由于弯曲产生的光缆损耗可以被认为等同于等弯曲半径 $R_c$ 处的弯曲损耗。

单模光纤( $V \leq 1.7$ )在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处由于布缆过程产生的额外损耗增量大约为 $0.015\ \text{dB/km}$ ，其值对应于弯曲半径 $R_c = 45\ \text{m}$ 。在此，理论上的弯曲损耗由等效弯曲半径 $R_c = 45\ \text{mm}$ 计算。

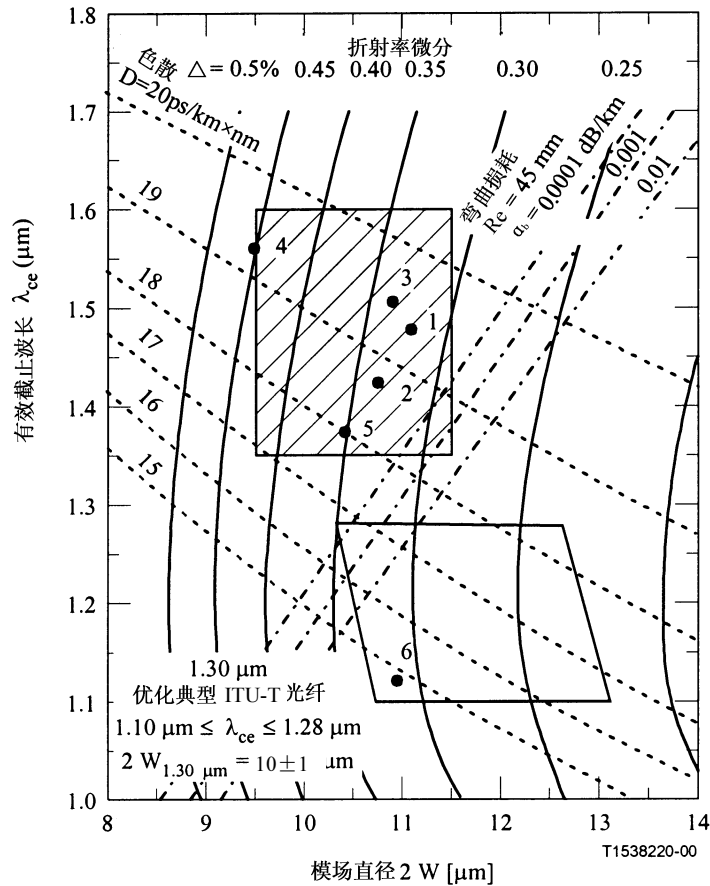
为了保持光纤的低损耗特性，应尽可能地减少布缆过程产生的额外损耗。从图II.1中可以发现，为实现少于 $0.005\ \text{dB/km}$ 的布缆损耗，模场直径(MFD) $2W$ 的上限和有效截止波长 $\lambda_{ce}$ 的下限大约分别为 $11.5\ \mu\text{m}$ 和 $1.35\ \mu\text{m}$ ，所期望的最佳光纤参数由图II.1中的阴影区域表示。增加有效截止波长 $\lambda_{ce}$ 可以提高 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的弯曲阻抗，而不增加光纤固有损耗，然而，有效截止波长 $\lambda_{ce}$ 的上限(直至 $1.60\ \mu\text{m}$ )应视在更长光缆情况下的单模运作而定。例如在此，已知紫外涂敷光纤( $2\ \text{m}$ )和长波成缆光纤(长于 $20\ \text{km}$ )的有效截止波长相差大约 $70\ \text{nm}$ 。

图II.1中的点( $\bullet$ )代表在 $1.55\ \mu\text{m}$ 最小损耗和截止位移单模光纤(CSF)采样上的测量值，它们的参数在图II.1中示出。其中，光纤1和光纤2分别代表纯石英纤心/F—凹陷包层光纤，光纤3和光纤4分别代表微Ge和F—掺杂纤心/F—凹陷包层光纤，光纤5通常为 $G_e$ 掺杂纤心光纤。而光纤6则通常为 $1.31\ \mu\text{m}$ 标准单模光纤(SMF)。从图II.1中可以发现，测试光纤损耗和色散分别为 $0.176\text{-}0.197\ \text{dB/km}$ 和 $17.7\text{-}19.3\ \text{ps/nm-km}$ 。这些光纤的瑞利散射系数 $A_0$ 和非波长依赖型损耗 $B_0$ 大约分别为 $0.83\text{-}0.97\ \text{dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$ 和 $0.011\text{-}0.015\ \text{dB/km}$ 。

$1.55\ \mu\text{m}$ 最小损耗和截止位移光纤(CSF; 光纤1-5)和 $1.31\ \mu\text{m}$ 优化光纤(SMF; 光纤6)的实践结果在图II.2中示出。从图II.2中可以发现， $1.55\ \mu\text{m}$ 最小损耗和截止位移光纤(CSF)在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的弯曲损耗小于通常的单模光纤(ITU-T G.652)在 $1.31\ \mu\text{m}$ 系统运行波长处的弯曲损耗。

<sup>1</sup> NAMIHIRA (Y.), HORIUCHI (Y.) and WAKABAYASHI (H.): Optimum fibre parameters of low-loss single-mode optical fibres for use in  $1.55\ \mu\text{m}$  wavelength regions, *Electronics Letters*, Vol. 23, No. 18, pp. 963-964, 1987.



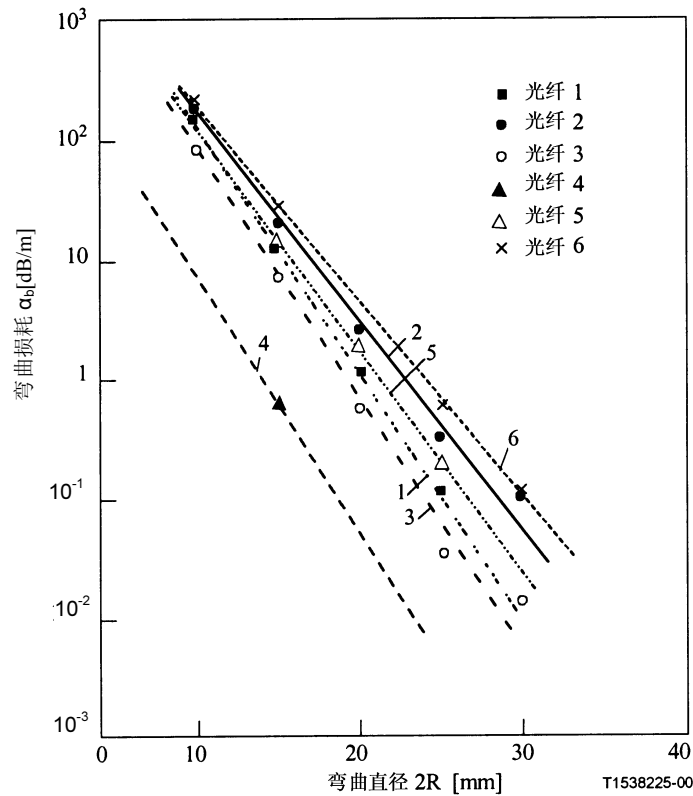


图II.1/G.654—在1.55μm波长处的等弯曲损耗 $\alpha_b$ 、色散D和折射率 $\Delta$ 对模场直径2W和有效截止波长 $\lambda_{ce}$ 的曲线

表II.1/G.654—1.55 μm最小损耗和截止位移单模光纤(CSF; ITU-T G.654)的光纤参数

光纤	MFD [μm] @1.55 μm	$\lambda_{ce}$ [μm]	$\Delta$ [%]	损耗 [dB/km] @1.55 μm (@1.30 μm)	色散 [ps/nm·km] @1.55 μm (@1.30 μm)
1	11.1	1.48	0.33	0.176 (0.320)	19.27
2	10.8	1.43	0.34	0.184 (0.323)	18.69
3	10.9	1.51	0.35	0.181 (0.348)	18.92
4	9.50	1.56	0.45	0.189 (0.334)	18.99
5	10.1	1.38	0.35	0.197 (0.351)	17.67
最小~最大	9.50 ~ 11.1	1.38 ~ 1.56	0.33 ~ 0.45	0.176 ~ 0.197 (0.320 ~ 0.351)	17.67 ~ 19.27

光纤 1 和 2: 纯石英纤心; 光纤 3 和 4: 微 Ge 掺杂纤心/F—凹陷包层;  
光纤 5: 通常的 Ge 掺杂纤心。



注 — 交叉(虚线曲线)代表光纤6, 即典型的ITU-T(CCITT)G.652光纤, 其中 $\lambda=1.30\mu\text{m}$  ( $\lambda_{ce}\cong 1.12\mu\text{m}$ ,  $2W_{130\mu\text{m}}\cong 9.20\mu\text{m}$ ,  $\Delta\cong 0.33\%$ )。

图II.2/G.654—弯曲损耗作为在1.55 $\mu\text{m}$ 处的测试单模光纤采样的曲率直径的函数

### 附录 III

#### 关于偏振模色散统计的信息

提供本附录用于为PMD概括一些统计性计算。IEC 61282-3 [IV.1] 更完整地记载了这些计算和理论。这将在下列节中给出:

##### III.1 引言

##### III.2 数据收集

##### III.3 PMD<sub>Q</sub>的计算(蒙特卡洛统计试验法)

##### III.4 DGD<sub>max</sub>的计算(蒙特卡洛统计试验法)

注 — IEC 61282-3[IV.1]也允许并定义了其他的计算方法。这里给出蒙特卡洛统计试验法是因为它最容易描述。

#### III.1 引言

偏振模色散(PMD)是一个统计特性, 对于给定的光纤, 它定义为穿过一定范围波长的测得的微分群时延(DGD)的平均值。由于DGD值是随时间和波长随机变化的, 对报道的PMD值可获得的能再现的理论上的更低限制大约在 $\pm 15\%$ 。这个性质暗指它不适合于选择单根光纤或光缆来制订比过程性能更严格的规范。这样的选择通常适合于决定论的属性例如衰减而不适合于PMD。这意味着关于整个过程的分布是最合理的。

关于PMD的功能，考虑的第二点是在给定时间和波长内的系统损伤是由DGD值控制的，该DGD值则随着PMD值的变化统计地变化。如果给定了特定成缆光纤的PMD值，那么就可以计算DGD超出给定值的概率。然而很清楚的是，这些公式对于规定的最大值的应用将产生实际系统性能的模糊观念。但是，PMD的统计规范会生成对于整个人口的DGD值的统计范围。这个范围用概率定义，生成一个在系统设计中使用的值，该值比无统计性规范中得到的值小，这里所指的系统设计在DGD值上大约低20%和在概率上低两个数量级。

首要的考虑是希望为在光导纤维缆中测得的PMD值的分布定义一个简单的统计度量。因此度量必须包括进程方法和进程可变性两个方面。一些概率等级的置信上限也是度量。

已经知道可以通过计算单根光缆的PMD系数的正交平均来估计一套拼接光缆的PMD系数。从应用的观点来看，为了给置信上限度量更多的含义，应计算20根光缆的拼接链路的上限。这个光缆数目小于多数链路中使用的数目，但从表示拼接链路的DGD分布来看，它已足够大，有重要的意义了。0.01%的概率值也是标准化的——一部分是基于与DGD超过一个限值（这个值必须非常低）的概率相等。置信上限被称为PMD<sub>Q</sub>或链路设计值，该规范类型称为方法1。

根据不同系统的考虑，包括可能在链路中的其他PMD生成元素的存在，DGD的概率限制在 $6.5 \cdot 10^{-8}$ 。IEC 61282-3描述了一种确定最大值（用概率定义）的方法，以使得如果分布超过了方法1的要求，那么跨越仅由光导纤维缆组成的链路的DGD将超过DGD最大值的概率小于 $6.5 \cdot 10^{-8}$ 。要为一系列范围的分布形状确定一个DGD<sub>max</sub>值。已知规定光导纤维缆的PMD分布的这种DGD<sub>max</sub>方法为方法2。在IEC 61282-3中给出综合方法2参数和其他光纤元素的参数的方法。

方法1是一种基于测量什么的衡量标准，因此作为规范要求贸易和商业中极其明确地使用。方法2是推断系统设计含义的一种手段，因此作为系统设计的信息包括在内。

## III.2 数据收集

用代表给定光缆结构和制造时期的PMD值来计算。一般至少需要100个值。采样通常要把不同结构的光缆和不同的光纤位置考虑在内。

只要对于给定的结构，未成缆光纤和光缆值之间的关系稳定，那么未成缆光纤的测量值就可能使光缆分布扩大。这种扩大的方法之一是从每个未成缆光纤值中生成几个可能的光缆值。应当随机地选择这些值来代表通常的关系和可变性(例如随着测量可再现性变化的可变性)。因为变量的范围包括可再现性错误，因此这种估计光缆PMD值的方法可能导致低估PMD<sub>Q</sub>。

测得的采样长度看起来和方法2的推论有关。这一点已经着手研究，得出下列结论。方法2含义对任何小于400 km的链路都有效，只要：

- 安装的光缆小于10 km，或
- 测得的长度小于10 km。

### III.3 PMD<sub>Q</sub>的计算(蒙特卡洛统计试验法)

IEC 61282-3中给出其他的计算方法。这里描述蒙特卡洛统计试验法是因为其最容易描述，而且使用的假设最少。

测得的PMD系数值由 $x_i$ 表示， $i$ 从1到 $N$ ， $N$ 为测量数。这些值用于生成100 000个拼接链路PMD系数值，其中每个值用随机从大量采样中选择的20个单根光缆值的正交平均计算。

注一 当 $N=100$ 时，有 $5.3 \cdot 10^{20}$ 个可能的链路值。

为计算每个链路值，选择从1到 $N$ 的20个随机数。选择这些值，用索引号 $k$ 标注。链路PMD系数 $y$ 用下式计算：

$$y = \left( \frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} x_k^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-1})$$

在计算这些值时，收集100 000个值放入一个高密度的矩阵图。当计算结束时，从矩阵图中计算累积概率函数，并确定相关于99.99%的PMD值。报告这个值，作为PMD<sub>Q</sub>。如果算得的PMD<sub>Q</sub>小于规定值(0.5 ps/sqrt(km))，那么分布超出方法1。

### III.4 DGD<sub>max</sub>的计算(蒙特卡洛统计试验法)

该种计算建立于PMD<sub>Q</sub>的计算上。在计算中，预定了DGD<sub>max</sub>的值(为25 ps)，并计算超过该值的概率PF。如果计算出的概率小于规定值( $6.5 \cdot 10^{-8}$ )，那么分布超过方法2。

在开始进行蒙特卡洛统计试验法之前，用下式计算PMD系数限值 $P_{\max}$ ：

$$P_{\max} = \frac{DGD_{\max}}{\sqrt{L_{\text{ref}}}} = \frac{25}{20} = 1.25$$

对于20光缆链路拼接值 $y_{2j-1}$ 和 $y_{2j}$ ，40光缆拼接值 $z_j$ 由下式生成：

$$z_j = \left( \frac{y_{2j-1}^2 + y_{2j}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (\text{III-2})$$

注一 这样生成了50 000个 $z_j$ 值，数目足够多。

用下式计算超过在40链路上的第j个拼接点上的DGDmax的概率pj:

$$p_j = 1 - \int_0^{P_{\max}/z_j} 2 \left( \frac{4}{\pi} \right)^{3/2} \frac{t^2}{\Gamma(3/2)} \exp\left[-\frac{4}{\pi} t^2\right] dt \quad (\text{III-3})$$

ExcelTM定义了可以用于计算pj的函数，GAMMADIST(X, ALPHA, BETA, Cumulative)。

对该函数的要求应该是:

$$PJ = 1 - \text{GAMMADIST}(4 * P_{\max} * P_{\max} / (PI() * ZI * ZI), 1.5, 1, \text{TRUE}) \quad (\text{III-4})$$

超过DGDmax的概率PF由下式给出:

$$P_F = \frac{1}{50000} \sum_j P_j \quad (\text{III-5})$$

如果概率PF小于规定值，分布超过方法2。

## 附录 IV

### 参考资料

- [IV.1] IEC 61282-3:(work in progress), Guidelines for the Calculation of PMD in Fibre Optic Systems.
- [IV.2] IEC 60793-2 (86A/563/CDV), *Optical fibres – Part 2: Product specifications*





## ITU-T 建议书系列

A系列	ITU-T工作的组织
B系列	表述方式：定义、符号和分类
C系列	综合电信统计
D系列	一般资费原则
E系列	综合网络运行、电话业务、业务运行和人为因素
F系列	非话电信业务
G系列	<b>传输系统和媒质、数字系统和网络</b>
H系列	视听及多媒体系统
I系列	综合业务数字网
J系列	电视、声音节目和其他多媒体信号的传输
K系列	干扰的防护
L系列	电缆和外部设备其他组件的结构、安装和保护
M系列	TMN和网络维护：国际传输系统、电话电路、电报、传真和租用电路
N系列	维护：国际声音节目和电视传输电路
O系列	测量设备技术规程
P系列	电话传输质量、电话安装及本地线路网络
Q系列	交换和信令
R系列	电报传输
S系列	电报业务终端设备
T系列	远程信息处理业务的终端设备
U系列	电报交换
V系列	电话网上的数据通信
X系列	数据网和开放系统通信
Y系列	全球信息基础设施和互联网的协议问题
Z系列	用于电信系统的语言和一般软件问题