



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 7424.3—2003

---

## 光缆 第3部分:分规范 室外光缆

Optical fibre cables—Part 3:Section specification—outdoor cables

(IEC 60794-3:2001,MOD)

2003-07-02 发布

2003-10-01 实施

中华人民共和国  
国家质量监督检验检疫总局 发布

## 前 言

《光缆》分为如下几部分：

- 第 1-1 部分：总规范 总则；
- 第 1-2 部分：总规范 光缆基本试验程序；
- 第 2 部分：分规范 室内光缆；
- 第 3 部分：分规范 室外光缆；
- 第 4 部分：分规范 光纤复合架空地线。

本部分为光缆的第 3 部分。

本部分修改采用 IEC 60794-3:2001《光缆 第 3 部分：分规范 室外光缆》(英文版)。

本部分根据 IEC 60794-3:2001 重新起草。考虑到我国国情,本部分做了一些修改,与 IEC 60794-3:2001 主要技术差异如下：

- a) 对光纤的要求,IEC 60794-3:2001 引用的标准是 IEC 60793,本部分引用的标准 GB/T 9771 与 IEC 60793 是非等效的,但两者对光纤的技术要求基本一致；
- b) 删除了 IEC 60794-3:2001 中 5.6 条的注,该注的内容只是一种示例,本部分引用的相关标准对此有明确要求。同时,该条中增加了“所采用的光缆环的直径也可由用户与制造厂商定”；
- c) 将 IEC 60794-3:2001 中 7.8 条的内容合并到 7.1 条；
- d) 将 IEC 60794-3:2001 中第 9 章针对衰减测量时,其测量系统不确定度的要求从 0.05 dB 提高到 0.03 dB；
- e) 将 IEC 60794-3:2001 中表 1 关于光纤带的高度 480  $\mu\text{m}$  调整为 400  $\mu\text{m}$ ；
- f) 删除了 IEC 60794-3:2001 中 9.7 条的“可根据用户要求采用其他的接收判据”一句；
- g) 将 IEC 60794-3:2001 中 8.2.3 条对光纤带尺寸的规定调整到 6.5 条中。

本部分还做了一些编辑性修改,并将图 A.1 的图注中  $P_r$  改正为  $P_F$  等。

本部分的附录 A 为资料性附录。

本部分由中华人民共和国信息产业部提出。

本部分由中国电子技术标准化研究所(CESI)归口。

本部分起草单位:信息产业部电子第八研究所、信息产业部电信科学技术第五研究所。

本部分主要起草人:杨可贵、陈晓燕、李运发、李辉、王则民、王跃明。

本部分首次发布。

## 光缆 第3部分:分规范 室外光缆

### 1 范围

本部分规定了主要用于公共通信网的单模光缆和光缆元件的要求。相似类型光缆的其他应用也可参照使用。

本部分适用于陆上室外光缆(包括管道光缆、直埋光缆、架空光缆、过湖和过河的水下光缆)。对于架空应用,本部分不包括安装在架空输电线附近的光缆,在这一应用场合,将要增加相应要求和试验方法。同时,本部分不包括光纤复合架空地线和挂在架空输电线的相线或地线上的光缆。对于过湖和过河的水下光缆,本部分不规定光缆的修理方法即不具有修理能力,也未包括带有水下线路放大器的光缆。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 7424 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 2951.10—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第5部分:填充膏专用试验方法 第1节:滴点——油分离——低温脆性——总酸值——腐蚀性——23℃时的介电常数——23℃和100℃时的直流电阻率(idt IEC 60811-5-1:1990)

GB/T 6995.2 电线电缆识别标志 第2部分:标准颜色(GB/T 6995.2—1986, neq IEC 60304:1982)

GB/T 7424.1 光缆 第1部分:总规范(GB/T 7424.1—1998, eqv IEC 60794-1:1996)

GB/T 9771(所有部分) 通信用单模光纤系列(GB/T 9771—2000)

GB/T 11326.1—1989 聚烯烃绝缘铝-聚烯烃粘结护套高频农村通信电缆 一般规定(neq IEC 60708-1:1981)

GB/T 11327(所有部分) 聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低频通信电缆(GB/T 11327—1999, neq IEC 60189:1986)

GB/T 15972.2 光纤总规范 第2部分:尺寸参数试验方法(GB/T 15972.2—1998, eqv IEC 60793-1-2:1995)

GB/T 15972.3 光纤总规范 第3部分:机械性能试验方法(GB/T 15972.3—1998, eqv IEC 793-1-3:1995)

GB/T 15972.4 光纤总规范 第4部分:传输特性和光学特性试验方法(GB/T 15972.4—1998, eqv IEC 793-1-4:1995)

IEC/TR 61282-3 光纤系统中偏振模散计算指南

IEC/TS 61941 光纤——单模光纤偏振模散测量技术

ITU-T 建议 K.25 光缆的保护

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本部分。

3.1

**差分群时延(DGD) differential group delay(DGD)**

在特定时间和波长下,光缆末端两个基态偏振模(主偏振态)之间的相对时延,单位 ps。

3.2

**偏振模散值(PMD 值) polarisation mode dispersion value(PMD value)**

整个波长段的 DGD 的平均值,单位 ps。

3.3

**偏振模散系数(PMD 系数) polarisation mode dispersion coefficient(PMD coefficient)**

光缆的 PMD 值除以其长度的平方根,单位 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 。

3.4

**光缆段 cable section**

生产的单盘光缆。

3.5

**链路 link**

由几个单独光缆段组成的光缆线路长度。

注:链路 PMD 值通常根据本部分中的公式计算,但也可以测量。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本部分。

$\lambda_{cc}$ ——光缆中光纤截止波长;

SZ——一种周期性换向绞合形式。

5 光纤

5.1 概述

应使用符合 GB/T 9771 规定的单模光纤。

5.2 衰减

5.2.1 衰减系数

光缆衰减系数的最大值和典型值由所使用的光纤类型决定,特殊值由用户与制造厂商定。

衰减系数应按 GB/T 15972.4 中方法 C1A、C1B 或 C1C 进行测量。

5.2.2 衰减均匀性-衰减不连续性

局部衰减不应有超过 0.10 dB 的不连续点。适用的试验方法在考虑中。

5.3 截止波长

光缆中光纤的截止波长  $\lambda_{cc}$  应小于工作波长。

5.4 光纤着色

如为便于区别对一次涂覆光纤进行着色,则着色涂层应在光缆的整个寿命期间易于识别,而且应按 GB/T 6995.2 合理配色。若有要求,着色应允许足够的光通过一次涂层传输,以便进行终端光注入和检测。

5.5 偏振模散(PMD)

已成缆光纤的 PMD 应以统计为基础而不是以单根光纤为基础进行规定/表征,如附录 A 所述。可以采用认可的任意 PMD 测量方法对单根已成缆光纤进行测量。在结构和工艺稳定且未成缆和已成缆光纤 PMD 系数之间的关系已知时,可以通过测量未成缆光纤,从而导出已成缆光纤的统计值。下列要求仅适合于由光缆信息计算的链路特性。要使该信息与链路的其他部分(如元件和光放大器)结合,应参考 IEC 61282-3。应采用下述两种方法中的一种规定/表征 PMD,所选方法应由用户与制造厂商定。

## a) 方法 1

制造厂应提供 PMD 设计值  $PMD_Q$ , 作为可能的光学链路中串接光缆 PMD 系数的统计上限。除详细规范另有规定外,  $PMD_Q$  值应小于  $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , 超过该值的概率为  $10^{-4}$ , 至少采用 20 根光缆串接。应采用用户与光缆制造厂共同商定的方法计算该值。PMD 设计值和数据传输系统性能之间的关系参见附录 A。

## b) 方法 2

提供已成缆光纤在给定波长下的瞬时端对端 PMD 超过规定值  $I_{tot}$  的概率  $P_F$ 。应对 40 个光缆段组成的 400 km 串接参考链路计算概率  $P_F$ 。 $P_F$  值和  $I_{tot}$  值以及具体统计方法应由用户与光缆制造厂商定。除非详细规范另有规定,  $I_{tot}=25 \text{ ps}$  时,  $P_F$  不应大于  $6.5 \times 10^{-8}$ 。

注:  $I_{tot}=25 \text{ ps}$  时,  $P_F$  不大于  $6.5 \times 10^{-8}$  相当于超过 25 ps 的时间不大于 0.002 分钟/年·公里·环路。

## 5.6 跳线光缆截止波长

如有规定, 跳线光缆的截止波长( $\lambda_c$ )应按 GB/T 15972.4 的规定进行测量, 所用的光缆环直径也可由用户与制造厂商定。该跳线光缆截止波长应小于工作波长。对于跨接长度小于 2m 的应用, 可以要求较小值。

## 6 光缆元件

通常, 由几个元件或单独成分构成, 这取决于考虑到光缆用途、工作环境和制造工艺时的光缆设计以及在处理和成缆过程中所需要的光纤保护。

光缆元件所用的材料应与其接触的其他元件相容。光单元(含有光纤的光缆元件)及其中的每根光纤应识别可分, 例如通过颜色、定位图、标志或按详细规范的规定。

除非另有规定, 应对半成品或成品光缆的元件进行试验。如果由同一制造厂按成缆操作程序制造光缆元件, 应仅对成品光缆进行试验。如果由第三方供应光缆元件, 应对光缆元件进行试验; 这里不排除对成品光缆进行试验。

## 6.1 紧包光纤

如需要紧被覆层, 则其应由一层或多层聚合材料组成, 接续时应易于去除。紧被覆层的标称直径应在  $800 \mu\text{m} \sim 900 \mu\text{m}$  之间, 具体数值应由用户与制造厂商定, 其公差应为  $\pm 50 \mu\text{m}$ 。除非另有规定, 光纤/紧被覆层的同心度误差应不超过  $75 \mu\text{m}$ 。

紧被覆层的颜色应在光缆的整个寿命期间易于识别。

## 6.2 加强光纤

在适当材料的护套内用非金属加强构件一次或多次环绕能对紧包光纤提供进一步的保护(例如, 在扇形引出光缆中)。

## 6.3 骨架芯

骨架芯应用合适的材料(例如, 聚乙烯或聚丙烯)按照规定的槽数以螺旋或 SZ 形式沿中心元件挤出而成。每个可填充的槽内放一根或多根预涂覆光纤或光单元(含有光纤的光缆元件)。

骨架芯通常含有一个金属或非金属中心元件。为了获得开槽骨架芯元件所要求的温度稳定性和抗拉性能, 中心元件和挤出的骨架之间应有足够的粘附力。槽的形状分布应均匀一致并确保光缆所需的光学和机械性能。

## 6.4 松套管光纤

在可以填充的松套管结构中封装一根或多根预涂覆或光纤带光纤。松套管可用复合管。

松套管中的填充复合物应符合 GB/T 7424.1 中方法 F6 的规定。

## 6.5 光纤带

光纤带是以粘合线性排列组合的光纤。一般每个光纤带可由 2、4、6、8、10、12 根或 24 根光纤组成。带中的光纤应保持平行、平直, 相邻光纤靠得很近且光纤中心线准直、平行和共面。除非另有规定, 各光

纤带应易于识别,或以打印符号或将带中的参考光纤单独着色和/或将光纤带的基体材料着色。

光纤带的结构一般为边粘型或包封型,随粘结剂提供给光纤的缓冲层的厚薄而定。图 1 所示为边粘型结构,粘结剂主要用于光纤之间。图 2 所示为包封型结构,粘结剂充分扩展到超过任何光纤的表面。图 3 为光纤带几何尺寸截面示意图。

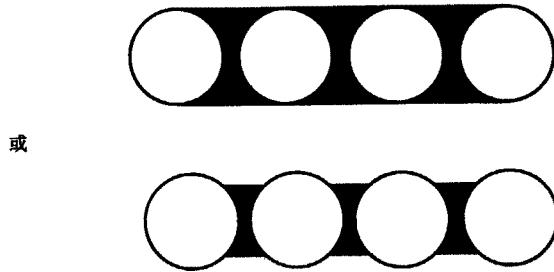


图 1 边粘型光纤带截面示意图

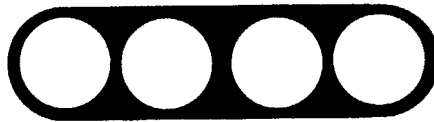
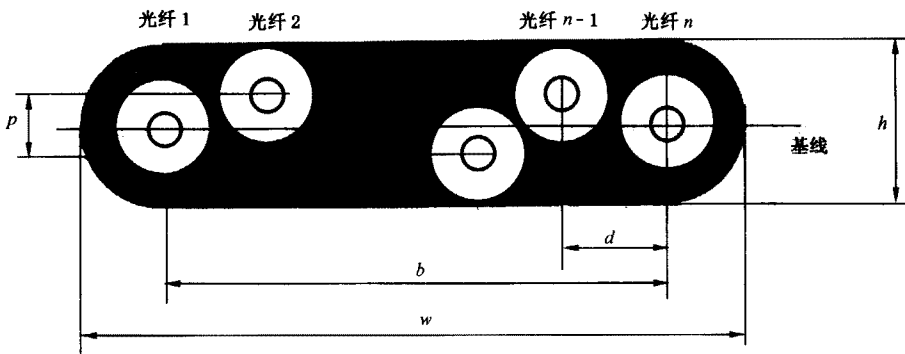


图 2 包封型光纤带截面示意图



- $b$ ——两端光纤中心距;
- $d$ ——相邻光纤中心距;
- $h$ ——光纤带的高度;
- $p$ ——光纤带结构的平整度;
- $w$ ——光纤带的宽度。

图 3 光纤带截面示意图

除非另有规定,光纤带的最大尺寸和几何结构如表 1 所示。更精确的要求可由用户与制造厂根据所采用的接续或连接器技术商定。

表 1 光纤带的最大尺寸

光纤数	宽度 $w$	高度 $h$	光纤排列		
			水平间距		平面度 $p$
			相邻光纤 $d$	两端光纤 $b$	
$\mu\text{m}$					
2	700	400	280	280	—
4	1 220	400	280	835	50
6	1 770	400	280	1385	50
8	2 300	400	300	1920	50 <sup>a</sup>
10	2 850	400	300	2450	50 <sup>a</sup>
12	3 400	400	300	2980	75 <sup>a</sup>
24	6 800	400	300	每单元 <sup>b</sup>	75 <sup>b</sup>

a 暂定值；  
b 每单元值用分离成预定的子单元测量。

## 7 光缆结构

### 7.1 概述

应按至少 20 年的预期工作寿命设计和制造光缆。由于这个原因,已安装的光缆在工作波长上的衰减不应超过用户与制造厂商定的值,同时应考虑氢气对光缆传输性能的影响(氢气效应见 GB/T 7424.1)。光缆中的材料在指定用途中应不危害健康。光缆中的光纤通常为同一类型,但有些光缆为混合型,包括多个规定的光纤类型或来源可能不同的同一类型光纤。

除非另有规定,在交货长度上应无光纤接头。在整个光缆长度上,每根光纤都应能识别。

对于架空应用光缆的特殊情况,为防止由环境条件(如风力负载或冰负载)引起的附加光纤应变,应选择使该应变限制在用户与制造厂商定值之内的光缆结构,尤其是加强件。

### 7.2 光缆元件的排放

第 6 章中所述的光单元可按如下排放:

- 光单元不绞合(只有在有要求时才对单管的抗弯折性进行测定);
- 采用螺旋或 SZ 形式的多个相同光单元(可通过叠加两个或多个元件排放带状单元);
- 骨架芯中多个混合结构,如紧被覆、光纤带或松套管;
- 松套管中多个混合结构,如紧被覆或光纤带。

如有要求,单根绝缘铜导体、线对或四芯线结构可与上述光单元一起绞合。

当光缆使用在最小弯曲半径下时,由光纤弯曲引起的最大光纤应变应由用户与制造厂商定。

### 7.3 缆芯填充

若有规定,元件以及缆芯应采用阻水材料连续填充,也可以每隔一定的间隔进行填充。阻水材料应易于去除且对人体没有危害。

所用的阻水材料应与其他相关的光缆元件相容。如采用填充复合物,应采用下列试验方法验证其适用性。

a) 填充复合物的油分离量应满足 GB/T 2951.10—1997 中第 5 章的要求,填充复合物应按 GB/T 7424.1 进行试验。

b) 对于含金属元件的光缆,应按 GB/T 2951.10—1997 中第 8 章的规定进行填充复合物的腐蚀性试验。

c) 若仅进行油分离试验,填充复合物在低于规定温度值时不应是液体。滴点确定应按 GB/T 2951.10—1997 中第 4 章的规定进行试验。

#### 7.4 加强构件

为满足安装和工作条件,光缆应设计有足够的加强构件,从而使光纤免受超过用户与制造厂商定的极限应变。

加强构件可以是金属,也可以是非金属,可置于缆芯中、护套下和/或护套中。

如有要求,架空光缆应配置分立的悬挂吊线。悬挂吊线的位置和型式取决于安装惯例和环境条件,且应由用户与制造厂商定。

例如,悬挂吊线和光缆芯可以形成“8”字形结构,或者用捆扎或其他适当的方式将光缆固定到分立的悬挂吊线上。

#### 7.5 防潮层

如有规定,防潮层应是连续的金属护套或者在缆芯外纵包搭接并与护套粘结的金属带。在采用连续金属护套的情况下,所用的材料及其厚度应由用户与制造厂商定。

可采用的材料包括但并不限于以下几种:塑料复合或未复合的铝、铁、铜或铜合金。这些金属可以平坦或者轧纹。金属带的接续应确保成品缆的电连续性。

在采用铝防潮带的情况下,搭接量及铝带的厚度应按照 GB/T 11326.1—1989 的规定。经用户与制造厂商定,可减小金属带的标称厚度。铝带对护套的粘结性应符合 GB/T 11326.1—1989 中 4.6 的规定。应对取自成品缆各端的护套样品进行检验,以确保防潮带搭接紧密并满足该条款的要求。可采用用户与制造厂商定的替代试验方法检验防潮效果。

#### 7.6 光缆护套和铠装

##### 7.6.1 内护套

光缆可以按用户与制造厂的协商使用内护套。当要求特定结构或为制造目的时,内护套可覆盖缆芯或缆芯内的单元,或两者兼而有之。除非另有规定,内护套应为聚乙烯。

##### 7.6.2 铠装

铠装可以是金属,也可以是非金属。

##### 7.6.3 外护套

除非另有规定,光缆应具有符合 GB/T 11326.1—1989 第 4 章要求、对紫外线稳定的耐气候聚乙烯制成的护套。

护套厚度和光缆的总直径及其变化应考虑到安装条件,并应由用户与制造厂商定。

##### 7.6.4 外部保护

对过湖和过河的水下光缆,外部保护可以是一层聚丙烯绳或聚乙烯护套或其他适宜的材料。特殊外护套应由用户与制造厂协商。

如有要求,最外层应着色,以便于在安装和维修操作时可以看到光缆移动。

#### 7.7 护套标志

如有要求,应以用户与制造厂商定的方式对光缆加以标志。一般的标志方法是色带热压、压印、喷印或其他合适的方法。

标志的其他要求正在考虑中。

标志可以是单线也可以是双线。单线标志应沿光缆的长度纵向标出。双线标志应沿光缆长度由径向相对的两条线纵向标出。

双线标志的耐磨性试验仅需在其中一根标志线上进行。



## 8 安装和使用要求

### 8.1 概述

安装和使用要求应由用户与制造厂商定。

### 8.2 光缆元件的接续特性

下列试验旨在表征不同类型的光缆元件接续时的特性。

#### 8.2.1 通用试验

##### 8.2.1.1 尺寸

适用时,采用下列试验方法:

- 二次涂层和紧包缓冲层直径:GB/T 15972.2 中方法 A4;
- 松套管、骨架芯和加强型元件:GB/T 15972.2 中方法 A4 或 GB/T 11327;
- 光纤带:GB/T 7424.1 中方法 G2、G3 或 G4。

##### 8.2.1.2 弯曲试验

如有要求,采用 GB/T 7424.1 中方法 G1。

##### 8.2.1.3 可剥离性

对一次、二次光纤涂层和紧包缓冲层的可剥离性,采用 GB/T 15972.3 中方法 B6 试验。

##### 8.2.1.4 其他试验

正在考虑中。

#### 8.2.2 松套管的试验

##### 8.2.2.1 松套管弯折

采用 GB/T 7424.1 中方法 G7。

##### 8.2.2.2 其他试验

正在考虑中。

#### 8.2.3 光纤带的试验

##### 8.2.3.1 结构尺寸

尺寸和几何结构采用 GB/T 7424.1 中方法 G2 检验,以确定并确保对光纤带制造工艺进行适当的控制。一旦该工艺确定,为了确保功能特性,进行最终检验时,采用孔规(GB/T 7424.1 中方法 G3)、千分表(GB/T 7424.1 中方法 G4)或者通过外观测量方法控制和检验光纤带的宽度和高度。

##### 8.2.3.2 机械性能

###### 8.2.3.2.1 光纤从光纤带上的分离性

如要求光纤具有可分离性,应以光纤可从光纤带中分离成子光纤带或单根光纤的方式构制光纤带,同时满足下列准则:

- 应采用 GB/T 7424.1 中方法 G5 所示的撕裂(可分离性)试验或者制造厂与用户之间商定的方法,对光纤带可分离成单根光纤的能力进行试验;
- 应在不采用特殊工具或装置的情况下完成分离;
- 光纤分离过程不应使光纤的光学和机械性能有永久性的损害;
- 光纤的色码应完整到足以识别单根光纤。

###### 8.2.3.2.2 光纤带可剥离性

单根光纤的涂层以及残余的光纤带粘结材料应易于去除。去除的方法应由用户与制造厂商定或者在详细规范中规定。

###### 8.2.3.2.3 扭转

光纤带的机械和功能完整性按 GB/T 7424.1 中方法 G6 检验。

##### 8.2.3.3 环境要求

#### 8.2.3.3.1 浸水

正在考虑中。

#### 8.2.3.3.2 其他要求

如有其他附加要求,应由用户与制造厂商定。

### 9 光缆试验

由于缺少适用的标准,本部分规定的参数可能受到由测量误差或校准误差造成的测量不确定性的影响。接收判据应对这一情况给予说明。本部分的衰减测量不确定性应不大于 0.03 dB。无明显衰减变化意味着在测量不确定性之内的测量值的任何变化,或正或负,均应忽略。

受试光纤数应能反映出光缆设计的特征,并且应由用户与制造厂商定。

适用于“8”字形结构光缆的一些试验,应与悬挂吊线一起进行试验。如果有一定的安装条件要求,还应在无悬挂吊线的情况下试验“8”字形光缆。

#### 9.1 拉伸

应按 GB/T 7424.1 中方法 E1 进行试验。

#### 9.2 敷设能力

选择下列试验来验证特殊敷设条件的适用性。

##### 9.2.1 张力弯曲

应按 GB/T 7424.1 中方法 E18 进行试验。

##### 9.2.2 反复弯曲

应按 GB/T 7424.1 中方法 E6 进行试验。

##### 9.2.3 冲击

应按 GB/T 7424.1 中方法 E4 进行试验。

##### 9.2.4 弯折

应按 GB/T 7424.1 中方法 E10 进行试验。

##### 9.2.5 扭转

应按 GB/T 7424.1 中方法 E7 进行试验。

##### 9.2.6 静态水压

过湖和过河的水下光缆应按 GB/T 7424.1 中方法 F10 进行试验(试验方法在考虑中)。

##### 9.2.7 卷绕

过湖和过河的水下光缆应按 GB/T 7424.1 中方法 E20 进行试验(试验方法在考虑中)。

##### 9.2.8 护套耐磨性

应按 GB/T 7424.1 中方法 E2A 来测定护套耐磨性。

#### 9.3 光缆弯曲

应按 GB/T 7424.1 中方法 E11 的程序 1 进行试验。

#### 9.4 压扁

应按 GB/T 7424.1 中方法 E3 进行试验。

#### 9.5 温度循环

应按 GB/T 7424.1 中方法 F1 进行试验。

#### 9.6 老化

##### 9.6.1 光纤涂层相容性

当光纤同填充复合物接触时,应在加速老化后通过试验已成缆光纤或填充复合物中的光纤来验证填充复合物与光纤涂层的相容性:

—— 涂层剥离力稳定性按 GB/T 7424.1 中方法 E5 试验;

如有要求,还有:

—— 尺寸稳定性;

—— 涂层透射率。

(试验方法正在考虑中)。

#### 9.6.2 成品光缆

正在考虑中。

#### 9.7 渗水(仅对填充光缆)

应按 GB/T 7424.1 中方法 F5B 进行试验。对过江和过湖光缆,试验方法正在考虑中。

#### 9.8 耐气压(仅对非填充光缆)

如果非填充光缆用充气方式保护,应采用 GB/T 7424.1 中方法 F8 来测定光缆的耐气压性。

#### 9.9 雷电(对含金属元件的光缆)

如有要求,光缆的雷电保护应满足 ITU-T 建议 K.25 的规定或由用户与制造厂商定。

#### 9.10 特殊架空安装条件

特殊架空安装条件下光缆的适应性可采用下列试验验证。

##### 9.10.1 风积振动

应按 GB/T 7424.1 中方法 E19 试验光缆的耐风积振动性。

##### 9.10.2 耐枪击性

应按 GB/T 7424.1 中方法 E13 进行试验。

### 10 质量保证

应通过进行光缆相关部分所规定的试验,验证规范要求的一致性。并不是指对所有光缆长度进行所有试验,试验频次应由用户与制造厂商定。

制造厂有责任通过质量控制程序确立质量保证,确保产品满足本部分的要求。当用户希望规定验收试验或其他质量程序,必须在定货时由用户与制造厂商定。

## 附录 A

(资料性附录)

## 光缆偏振模散统计规范指南

## A.1 绪言

偏振模散(PMD)是其大小随时间和波长随机变化的一种随机特性。光缆 PMD 瞬态值的变化用包含 PMD 系数的麦克斯韦概率密度函数来描述。PMD 系数为在一个波段内测得的瞬态 PMD 的平均值除以长度的平方根(对于强模式耦合光纤)。

相等长度光缆串接链路的 PMD 系数是组成链路的各光缆段的 PMD 系数的均方根。由于各光缆段的 PMD 系数是随机分布的,故串接链路的系数也是随机分布的。然而,串接链路分布的变化性比各单根光缆的变化要小,这是因为光缆串接时出现抵消。

方法 1 是通过确定链路的 PMD 设计值来减小串接光缆的变化量。该值可用于计算至少 20 段光缆组成的串接光缆链路的 PMD 统计上限。该上限比采用最坏情况 PMD 值获得的值更为真实地显示出串接链路中可能遇到的最大 PMD 值。

由于方法 1 提供了串接链路 PMD 的统计上限,认可的 PMD 测量方法可以用于已安装的光缆链路,以确定其 PMD 是否符合制造厂规定的统计上限。而且该上限可用于估算链路 PMD 对任何类型传输系统性能的影响。

方法 2 将串接链路的 PMD 密度函数与瞬态 PMD 的麦克斯韦概率密度函数相结合,以计算在给定波长下瞬态 PMD 超过规定值的概率。对由 40 段光缆组成的 400km 长参考链路进行计算。

A.5.1 说明了这两种方法的共同点。A.5.2 对方法 1 进行了详细说明,A.5.3 对方法 2 进行了详细说明,A.5.4 指出对于数字系统设计如何采用方法 1 的结果。

本附录给出用于计算光缆偏振模散统计规范的定义。

## A.2 装置

采用符合 IEC 61941 的装置对各光缆段进行 PMD 测量。

## A.3 试样

按照 IEC 61941 准备待测的光缆段。

## A.4 试验程序

按照 IEC 61941 的程序进行 PMD 测量。

## A.5 计算

按照 IEC 61941 的规定计算出各光缆段的 PMD 系数值。在已测量足够数量的具有代表性光缆段时,采用以下章条的统计方法来评价与该标准的技术要求的一致性。采用 IEC 61282-3 将光缆的技术要求与系统中可能有的其他元件的技术要求相结合,用于计算总体性能。

## A.5.1 光缆各段串接法

两种方法的共同特点是取决于一条光学链路的 PMD 系数是组成链路的相等长度光缆的 PMD 系数的均方根。

假设  $x_i$  和  $l_i$  分别为各光缆段中光纤的 PMD 系数和长度,则  $M$  段光缆的串接链路的 PMD 系数如下:

$$X_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M x_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^M l_i}} \dots\dots\dots (A.1)$$

对于  $M$  段相等光缆长度组成的链路,  $l_i = l_c$ , 则式(A.1)为:

$$X_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M x_i^2}{M}} \dots\dots\dots (A.2)$$

串接链路 PMD 系数  $X_M$  的变化小于各光缆段  $x_i$  的变化, 因为串接光纤时出现抵消。

**A.5.2 方法 1: PMD 设计值**

**A.5.2.1 确定链路 PMD 系数的概率分布**

式(A.2)表明可以从组成链路的各光缆段的 PMD 系数  $x_i$  推导出具体串接链路的 PMD 系数  $X_M$ 。链路 PMD 系数的概率分布取决于组成链路的光缆的 PMD 系数以及光缆段的数量。

可以采用下述三种方法测定链路 PMD 系数的分布。方法 a) 为数值方法, 方法 b) 和方法 c) 为分析方法。在两种分析方法中, 方法 b) 为光缆 PMD 系数分布假设了一个特定的分析函数, 而方法 c) 未采取这种假设, 但引入了中央界限原理的外延法。

a) 蒙特卡罗数值法[1]<sup>1)</sup>

蒙特卡罗法可用于确定串接链路 PMD 系数的概率密度, 而未对其功能形式进行任何假设。这种方法通过对被测光缆总体反复抽样来拟合构建链路的过程。对足够多的已成缆光纤的 PMD 系数进行测量, 以表征基础分布。然后采用该数据计算串接链路中单条光纤路径的 PMD 系数。

从实测的链路 PMD 系数中随机选取  $M$  个值, 并按照式(A.2)把它们作为均方根的底数来计算链路 PMD 系数。将算得的链路的 PMD 系数插入由其他随机取样而得到的直方图或表格中。重复该步骤直至已计算出的链路 PMD 值足以得到一张串接链路 PMD 系数分布的高密度(0.001 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ )方框图。

根据中央界限原理, 链路 PMD 系数的方框图将趋向集中于可以用两个参数就能描述分布。因此, 方框图可以用一个参数方程来拟合, 此方程能外延到概率水平小于试样大小所包含的水平。这两个参数方程总是代表分布的两个方面: 中央值和中央值周围的变化率。可以根据方框图形状来选择一种  $\Gamma$  概率分布。典型的分布可能包括对数正态(链路 PMD 系数的对数呈高斯分布)或由  $\Gamma$  分布推导出的分布。

b)  $\Gamma$  分布分析法[2]

$\Gamma$  系列分布常可以用来表示测得的光缆 PMD 系数和链路 PMD 系数两者的分布。如果假设实测的光缆 PMD 系数  $x_i$  的平方分布为  $\Gamma$  随机可变, 则已成缆光纤 PMD 系数的概率密度为:

$$f_{\text{光缆}}(x; \alpha, \beta) = \frac{2\beta^\alpha x^{2\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\beta x^2) \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$x$ ——光缆 PMD 系数的可能值;

$\Gamma(\alpha)$ —— $\Gamma$  函数;

$\alpha$  和  $\beta$ ——控制密度的形状。

标准拟合法, 如最大似然法, 能把式(A.3)拟合到实测的光缆 PMD 数据以求出  $\alpha$  和  $\beta$  值。

$M$  段串接光缆链路 PMD 系数  $X_M$  的概率密度与式(A.3)的形式相同, 但用  $M\alpha$  和  $M\beta$  代替  $\alpha$  和  $\beta$ 。

$$f_{\text{链路}}(X_M; M, \alpha, \beta) = \frac{2(M\beta)^\alpha X_M^{2M\alpha-1}}{\Gamma(M\alpha)} \exp(-M\beta X_M^2) \dots\dots\dots (A.4)$$

1) 见参考文献。

因此,通过配合式(A.3)测量光缆 PMD 系数求出  $\alpha$  和  $\beta$  参数,可以用式(A.4)说明链路 PMD 系数的概率密度。

c) 无模型分析法[2]

可以采用比方法 b)中描述的方法更普通的替代方法。它不对已成缆光纤实测的 PMD 系数的密度的形式作任何假设。

测量  $N$  根缆化光纤的 PMD 系数后,计算其平方的平均值、方差和三阶矩。

$$\mu_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \dots\dots\dots (A.5a)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \mu_1)^2 \dots\dots\dots (A.5b)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \mu_1)^3 \dots\dots\dots (A.5c)$$

设  $X_M$  为一个代表  $M$  根等长度光缆串接组成的光纤路径的链路 PMD 系数和随机变量,设  $u$  为  $X_M$  的可能值。引用中央界限外延原理[3],可以得出链路 PMD 系数的分布近似为:

$$f_{\text{链路}}(u;M) = \phi(z(u)) + tM^{-1/2}(1-z(u)^2)\phi(z(u)) \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right);$$

$$\phi(z) = \int_{-\infty}^z \phi(y) dy;$$

$$z(u) = (u^2 - \mu_1) \sqrt{\frac{M}{\mu_2}};$$

$$t = \frac{\mu_3}{6\mu_2^{3/2}}.$$

把式(A.6)对  $u$  求导,得到链路 PMD 系数概率密度函数的近似值。

A.5.2.2 确定 PMD 设计值

采用 A.5.2.1 中叙述的三种方法求出链路 PMD 系数的密度函数,现在可以用来计算 PMD 设计值。对于  $M$  根光缆组成的串接链路,PMD 设计值  $\text{PMD}_Q$  定义为链路的 PMD 系数  $X_M$  超过该值的概率为  $Q$ 。

$$P\{X_M > \text{PMD}_Q\} = Q \dots\dots\dots (A.7a)$$

由此得出, $N > M$ ,则  $X_N$  超过  $\text{PMD}_Q$  的概率小于  $Q$ 。

$$P\{X_N > \text{PMD}_Q\} < Q \dots\dots\dots (A.7b)$$

为了讨论,假设  $N > 20$ (链路至少包括 20 段光缆)时, $Q = 10^{-4}$ (链路 PMD 超过 PMD 设计值的概率小于 0.000 1), $M$  和  $Q$  的实际值应由用户与制造厂商定。以下讨论如何采用方法 c)获得的光缆 PMD 密度函数求出  $\text{PMD}_Q$ 。

A.5.2.2.1 采用方法 a)蒙特卡罗密度确定 PMD 设计值

为了获得  $Q = 10^{-4}$  的概率,采用纯数值法要求蒙特卡罗模拟超过  $10^4$  试样。如果这样则计算工作变得繁重,可以将链路 PMD 系数直方图用一个参数式拟合,以便外推至比其他允许的方式测量更低的概率水平。可以根据直方图的形状选择一种概率分布。典型的分布可能包括对数(链路 PMD 系数的对数为高斯分布)或由  $\Gamma$  分布推导出。函数被拟合后,可以计算出  $Q$  次分位点的  $\text{PMD}_Q$  值。

A.5.2.2.2 采用方法 b)的  $\Gamma$  密度确定 PMD 设计值

对于  $M$  段光缆在  $10^{-4}$  分位点的链路 PMD 系数  $X_Q$  的近似值由下式给出:

$$X_Q = \frac{2.004 + 0.975 \sqrt{M\alpha}}{\sqrt{M\beta}} \dots\dots\dots (A.8)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  参数可由方法 b) 求出。对于  $N > M = 20$  段光缆, PMD 设计值为:

$$PMD_Q = \frac{0.448 + 0.975\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \dots\dots\dots (A.9)$$

对于参考文献 [4] 报导的 288 根随机选取的已成缆光纤,  $\alpha = 0.979$ ,  $\beta = 48.6$ ,  $PMD_Q = 0.20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

**A.5.2.2.3 采用方法 c) 确定 PMD 设计值**

可以采用方法 c) 计算出的因数来计算链路 PMD 系数  $X_Q$ 。对于  $M$  段光缆组成的链路,  $Q$  次分位点时的  $X_Q$  可以近似为:

$$X_Q \approx \left[ \mu_1 + z_Q \left[ \frac{\mu_2}{M} \right]^{1/2} + \frac{\mu_3}{6\mu_2 M} (z_Q^2 - 1) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (A.10)$$

其中,  $z_Q$  为标准正态分布的  $Q$  次分位点。对于  $N > M = 20$  段光缆,  $Q = 10^{-4}$  时,  $z_Q = 3.72$  时, PMD 设计值则为:

$$PMD_Q \approx \left[ \mu_1 + 0.832 \sqrt{\mu_2} + 0.107 \frac{\mu_3}{\mu_2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (A.11)$$

对于参考文献 [4] 报导的 288 根随机选取的已成缆光纤, 其中:

$$\mu_1 = 2.02 \times 10^{-2}, \mu_2 = 7.43 \times 10^{-4}, \mu_3 = 8.26 \times 10^{-5}。$$

由式 (A.11) 可以得出  $PMD_Q = 0.23 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

**A.5.3 方法 2: 最大 DGD**

**A.5.3.1 路径与麦克斯韦变量相结合**

DGD 值 ( $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ )  $I$  随时间和波长的变化而随机变化, 符合如下麦克斯韦概率密度函数:

$$f_M(I; X_M) = 2 \left[ \frac{4}{\pi X_M^2} \right]^{3/2} \frac{I^2}{\Gamma(3/2)} \exp \left[ -\frac{4}{\pi} \left( \frac{I}{X_M} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

$X_M$ ——式 (A.1) 或 (A.2) 给定的  $M$  段光缆组成的串接链路的 PMD 系数。

为了将串接链路 PMD 系数变化与麦克斯韦变化结合为用于系数设计中一个值, 需要规定参考链路。而参考链路的性能可以推广到其他链路。用两个参数来定义参考链路, 即链路总长  $L_R$  和假设所有光缆段等长度的光缆段长度  $l_c$ 。

由于抵消, 串接 PMD 系数变化比单个光缆段的变化小。从总数取样的单个光缆段测量值的统计变化可用于推导出串接链路 PMD 系数变化。如果被测各光缆段的长度小于用来说明参考链路的值, 而且段数  $n_R$  保持恒定, 则实际串接链路 PMD 系数值的变化将小于由式 (A.2) 分析得出的值。即超过给定值的概率将小于被测光缆的长度小于  $l_c$  时的计算值。

设  $f_{\text{链路}}(X_i)$  为通过分析测量 PMD 系数值的分布和式 (A.2) 确定的串接链路 PMD 系数值的离散概率密度函数 (直方图)。令  $I$  为用作系统设计值的某些瞬时 PMD 值 ( $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ), 则超过  $I$  的概率  $P_F$  为:

$$P_F = \sum_i f_{\text{链路}}(X_i) \left[ 1 - \int_0^I f_M(y; X_i) dy \right] \dots\dots\dots (A.13)$$

来自 PMD 的链路设计的瞬时端对端色散  $I_{\text{tot}}$  (ps) 为参考链路长度的平方根与  $I$  的乘积:

$$I_{\text{tot}} = I \sqrt{L_R} \dots\dots\dots (A.14)$$

危险时间  $T_r$  (分钟/年/千米/环路) 的计算, 假设一旦构成环路的两根光纤或波长的任何一个的瞬时 PMD 超过  $I_{\text{tot}}$  则存在危险。采用式 (A.13) 得出的概率值, 则危险时间为:

$$T_r = 2 \times P_F \times 60 \times 24 \times 365 \times 25/L_R \dots\dots\dots (A.15)$$

当链路长度小于参考长度, 允许  $I_{\text{tot}}$  保持在 21 ps。当链路长度大于参考长度, 则设计值应增加, 如

式(A.16)所示:

$$I_{\text{链路}} = I_{\text{tot}} \sqrt{\frac{L_{\text{链路}}}{L_R}} \dots\dots\dots (A.16)$$

式中:

$L_{\text{链路}}$ ——大于  $L_R$  的链路长度;

$I_{\text{链路}}$ ——大于  $I_{\text{tot}}$  的端对端瞬时 PMD 值。

**A.5.3.2 采用  $\Gamma$  函数的实例**

式(A.3)和式(A.4)分别描述可以用来说明光缆和串接链路的 PMD 系数的  $\Gamma$  概率密度函数。

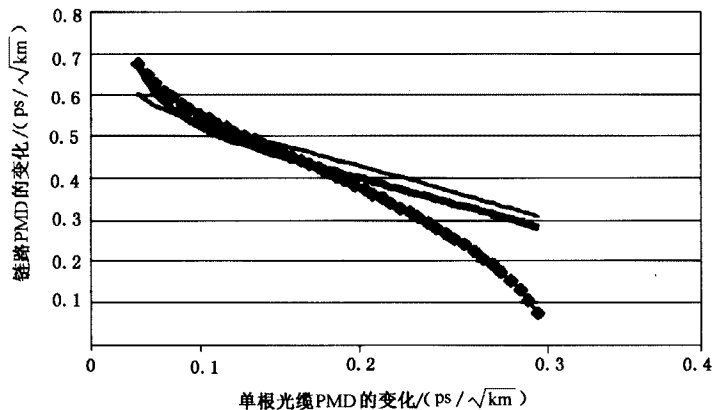
式(A.2)给出  $M$  根等长度光缆的 PMD 系数的均方根。当具有  $\Gamma$  密度函数模型时,由参考文献[4]给出链路 PMD 系数的平均值为:

$$E\{X_M\} \cong \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \left(1 - \frac{1}{8M\alpha}\right) \dots\dots\dots (A.17)$$

当  $M\alpha \rightarrow \infty$  时,式(A.17)趋于渐近值  $\sqrt{\alpha/\beta}$ ,而  $X_M$  的标准偏差趋于 0。当  $M\alpha > 5$ ,99.99% 的  $X_Q$  可由参考文献[4]近似得出:

$$X_Q = 0.975 \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} + \frac{2.004}{\sqrt{M\beta}} \dots\dots\dots (A.18)$$

求积平均值  $E\{X_M\}$  和  $2\sqrt{\beta}$  相结合,可以用于定义当通过由 40 根 10 km 光缆段组成的 400 km 上为 21 ps 时,  $P_F$  小于  $7.6 \times 10^{-7}$  的包络线。图 A.1 给出  $X_Q = 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  和该  $P_F$  的综合包络线。使这些参数落在综合包络线之下的光缆分布将满足以上要求。该图给出方法 1 和方法 2 的缺陷判据间的近似等效。



- ◆ M2: 21 ps,  $P_F: 7.6 \times 10^{-7}$ , 400 km 光缆, 每根 10 km;
- M1:  $\text{PMD}_Q: 0.5$ ,  $P_F: 1 \times 10^{-4}$ , 20 根光缆;
- - M1:  $\text{PMD}_Q: 0.5$ ,  $P_F: 1 \times 10^{-6}$ , 40 根光缆。

图 A.1 采用  $\Gamma$  函数的近似包络线

**A.5.4 方法 1 链路 PMD 和数字系统性能之间的关系**

PMD 设计值表示 PMD 的传统定义,可以采用 IEC 61941 中的任一个方法测量。因此,通过测量串接链路 PMD 并将该值与采用光缆制造厂提供的 PMD 设计获得的值相比较,可以轻易确定与方法 1 的要求的一致性。虽然一致性判据明确,但在试图采用 PMD 的普遍定义确定系统性能时则产生困难。



PMD 是一随机变量,其瞬时值由麦克斯韦概率密度函数描述,它的平均值为采用验收试验程序时获得的值。使 PMD 与数字系统性能的相关联的意图通常集中在将最大瞬时 PMD 值超过一个“比特”周期中某一分数的概率减至最小。例如,对于麦克斯韦分布,瞬时 PMD 超过其平均值三倍的概率为  $4 \times 10^{-5}$ 。然而,除这一危险因数以外,给定路径的 PMD 将超过 PMD 设计值的概率可以用分位点  $Q$  表示, $Q$  值将由用户与光缆制造厂协商。当  $Q=10^{-4}$ ,则链路 PMD 超过 PMD 设计值的概率小于  $10^{-4}$ 。因此,长  $L_{\text{链路}}$  的给定链路的瞬时 PMD 超过三倍链路 PMD 设计值的概率  $I$ ,即  $\{I > 3 \times \text{PMD}_Q \sqrt{L_{\text{链路}}}\}$  可以通过求链路分布函数  $F_{\text{链路}}$  与该链路 DGD 麦克斯韦密度的卷积积分获得。

$$P_F = \int_0^{\infty} (1 - F_{\text{链路}}) f_{\text{maxwell}} dX_M \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

由式(A.19)给出  $10^{-4}$ 分位点的实际概率的上限为:

$$P_F \{I > 3 \times \text{PMD}_Q \sqrt{L}\} \leq 1.4 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

采用式(A.19)准确获得的概率或式(A.20)获得的保守近似都可以用于计算每年光学回路的瞬时 PMD 超过三倍 PMD 设计值的时间量。

**A.6 结果**

**A.6.1 每次试验应提交的资料**

**A.6.1.1 对方法 1**

- $M$  光缆数;
- $Q$  概率水平;
- $\text{PMD}_Q$  链路设计值。

**A.6.1.2 对方法 2**

- $\text{DGD}_{\text{最大}}$  最大 DGD;
- $L_{\text{参考}}$  参考长度;
- $L_{\text{缆}}$  采用的光缆长度;
- $P_F$  超过  $\text{DGD}_{\text{最大}}$  的概率。

**A.6.2 需要提供的资料**

所采用的计算方法和与此有关的细节。

参 考 文 献

- [1] GALLAGHER, D. et al. , Simulation of System Length Limitation Induced by PMD, International Wire and Cable Symposium Proceedings, 1996, p. 27-36.
  - [2] JACOBS, S. A. et al. , Statistical Estimation of the PMD Coefficients of Fiber Paths, National Fiber Optic Engineers Conference, September 1997.
  - [3] PATEL, J. and READ, C. , Handbook of the Normal Distribution, Marcel Dekker, Inc. , New York, 1982.
  - [4] JACOBS, S. A. et al. , Statistical Estimation of PMD Coefficients for System Design, Electronics Letters, 1997, 33, p. 619-621.
-