

国际电信联盟

**ITU-T**

国际电信联盟  
电信标准化部门

**G系列**

增补41  
(05/2005)

G系列：传输系统和媒质、数字系统和网络

---

海底光缆系统设计导则

ITU-T G系列建议书 — 增补41

ITU-T



国际电信联盟

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
在无线电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
传输媒质的特性	G.600–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
服务质量和性能——一般和与用户相关的概况	G.1000–G.1999
传输媒质的特性	G.6000–G.6999
经传送网的数据——一般概况	G.7000–G.7999
经传送网的以太网概况	G.8000–G.8999
接入网	G.9000–G.9999

欲了解更详细信息，请查阅ITU-T建议书目录。

## 海底光缆系统设计导则

### 摘 要

本建议书增补描述了对海底光缆系统中支持 SDH 和 OTN 信号的带中继器、无中继器和光放大系统设计的考虑。本建议书增补特别着重于与海底光缆系统相关的特定问题。

本建议书增补还描述了对海底光缆系统设计要求的共同思路，以及对与一些建议书相关的材料进行整合和扩展的目标，这些建议书包括 G.971、G.972、G.973、G.974、G.975、G.975.1、G.976 和 G.977。

### 来 源

ITU-T 第 15 研究组（2005-2008）于 2005 年 5 月 27 日批准了 ITU-T G 系列建议书增补 41。

## 前 言

国际电信联盟（ITU）是从事电信领域工作的联合国专门机构。ITU-T（国际电信联盟电信标准化部门）是国际电信联盟的常设机构，负责研究技术、操作和资费问题，并且为在世界范围内实现电信标准化，发表有关上述研究项目的建议书。

每四年一届的世界电信标准化全会（WTSA）确定 ITU-T 各研究组的研究课题，再由各研究组制定有关这些课题的建议书。

WTSA 第 1 号决议规定了批准建议书须遵循的程序。

属 ITU-T 研究范围的某些信息技术领域的必要标准，是与国际标准化组织（ISO）和国际电工技术委员会（IEC）合作制定的。

## 注

本建议书为简要而使用的“主管部门”一词，既指电信主管部门，又指经认可的运营机构。

遵守本建议书的规定是以自愿为基础的，但建议书可能包含某些强制性条款（以确保例如互操作性或适用性等），只有满足所有强制性条款的规定，才能达到遵守建议书的目的。“应该”或“必须”等其他一些强制性用语及其否定形式被用于表达特定要求。使用此类用语不表示要求任何一方遵守本建议书。

## 知识产权

国际电联提请注意：本建议书的应用或实施可能涉及使用已申报的知识产权。国际电联对无论是其成员还是建议书制定程序之外的其他机构提出的有关已申报的知识产权的证据、有效性或适用性不表示意见。

至本建议书批准之日止，国际电联尚未收到实施本建议书可能需要的受专利保护的知识产权的通知。但需要提醒实施者注意的是，这可能不是最新信息，因此大力提倡他们查询电信标准化局（TSB）的专利数据库。

© 国际电联 2005

版权所有。未经国际电联事先书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

# 目 录

	页
1 范围 .....	1
2 参考文献 .....	1
2.1 一般参考文献 .....	1
2.2 第 6、7 和 9 节中的参考文献 .....	2
3 术语与定义 .....	3
4 缩写词和首字母缩略语 .....	3
5 系统单元参数 .....	5
5.1 发射机参数 .....	5
5.2 海缆参数 .....	6
5.3 海底中继器参数 .....	10
5.4 海缆接头参数 .....	12
5.5 接收机参数 .....	13
6 光网络拓扑 .....	14
6.1 点对点 .....	14
6.2 星形 .....	14
6.3 分支星形 .....	15
6.4 干线和分支 .....	15
6.5 花边形 .....	16
6.6 环形 .....	16
6.7 分支环形 .....	16
7 系统设计的考虑 .....	17
7.1 光功率预算 .....	17
7.2 色散的考虑 .....	32
8 前向纠错 .....	33
9 可靠性的考虑 .....	34
9.1 可靠性要求 .....	34
9.2 内部故障 .....	34
9.3 外部故障 .....	37
9.4 故障定位 .....	38
10 可升级性的考虑 .....	38



### 1 范围

本建议书增补描述了对海底光缆系统中支持 SDH 和 OTN 信号的带中继器、无中继器和光放大系统设计的考虑。本建议书增补特别着重于与海底光缆系统相关的特定问题。

本建议书增补还描述了对海底光缆系统设计要求的共同思路，以及对与一些建议书相关的材料进行整合和扩展的目标，这些建议书包括 G.971、G.972、G.973、G.974、G.975、G.975.1、G.976 和 G.977。

本建议书增补还将使读者能更好地理解当前正在分别进行的 ITU-T 第 15 研究组 5、7 和 8 号研究课题中对光纤、元件及系统接口建议书中的规范。本建议书增补应不妨碍光缆系统相关技术的技术发展。

### 2 参考文献

#### 2.1 一般参考文献

本建议书增补中引用了以下 ITU-T 建议书及其他参考文献。

- ITU-T Recommendation G.650.1 (2004), *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.650.2 (2005), *Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.652 (2005), *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.653 (2003), *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.654 (2004), *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.655 (2003), *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- ITU-T Recommendation G.656 (2004), *Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.*
- ITU-T Recommendation G.661 (1998), *Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems.*
- ITU-T Recommendation G.663 (2000), *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.*
- ITU-T Recommendation G.671 (2005), *Transmission characteristics of optical components and subsystems.*
- ITU-T Recommendation G.691 (2003), *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.*

- ITU-T Recommendation G.692 (1998), *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.*
- ITU-T Recommendation G.693 (2005), *Optical interfaces for intra-office systems.*
- ITU-T Recommendation G.694.1 (2002), *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.*
- ITU-T Recommendation G.694.2 (2003), *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.*
- ITU-T Recommendation G.826 (2002), *End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections.*
- ITU-T Recommendation G.828 (2000), *Error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate synchronous digital paths.*
- ITU-T Recommendation G.911 (1997), *Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems.*
- ITU-T Recommendation G.957 (1999), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.*
- ITU-T Recommendation G.959.1 (2003), *Optical transport network physical layer interfaces.*
- ITU-T Recommendation G.971 (2004), *General features of optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.972 (2004), *Definition of terms relevant to optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.973 (2003), *Characteristics of repeaterless optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.974 (2004), *Characteristics of regenerative optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.975 (2000), *Forward error correction for submarine systems.*
- ITU-T Recommendation G.975.1 (2004), *Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems.*
- ITU-T Recommendation G.976 (2004), *Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T Recommendation G.977 (2004), *Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems.*
- ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39 (2003), *Optical system design and engineering considerations.*
- IEC/TR 61282-3 (2002), *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.*
- IEC/TR 62380 (2004), *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.*

## 2.2 第6、7和9节中的参考文献

- [1] ZSAKANY (J.C.), MARSHALL (N.W.), ROBERTS (J.M.), ROSS (D.G.): The Application of Undersea Cable Systems in Globe Networking, *AT&T Technical Journal*, Vol. 74, No.1, pp.8-15, January/February 1995.



- [2] O'MAHONY (M.J.), SPIRIT (D.M.): High Capacity Optical Transmission Explained, *John Wiley & Sons*, 1995.
- [3] WINZER (P.J.), KALMÁR (A.): Sensitivity Enhancement of Optical Receivers by Impulse Coding, *JLT*, Vol. 17, No. 2, February 1999.
- [4] AGRAWAL (G.P.): Nonlinear Fiber Optics, *Academic Press*, Edition 1989.
- [5] TKACH (R.W.), CHAPLYVY (A.R.), FORGHIERI (F.), GNAUCK (A.H.), DEROSIER (R.M.): Four Photon Mixing and High-Speed WDM Systems, *JLT*, Vol. 13, No. 5, May 1995.
- [6] BERGANO (N.S.), ASPELL (J.), DAVIDSON (C.R.), TRISCHITTA (P.R.), NYMAN (B.M.), KERFOOT (F.W.): Bit Error Rate Measurements of 14000 km 5 Gbit/s Fibre-Amplifier Transmission System using Recirculating Loop, *Elec. Letters*, Vol. 27, No. 21, October 1991.
- [7] Military Handbook MIL-HDBK-217, *Reliability prediction of electronic component* (1995).
- [8] Telcordia Technologies Special Report SR-332, *Reliability procedure for electronic equipment*, Issue No. 1 (May 2001).

### 3 术语与定义

正式定义可在最初的建议书中找到。

### 4 缩写词和首字母缩略语

本建议书增补采用了以下缩写：

3R	功率、波形和定时再生
ASE	放大的自发辐射
BER	误码率
BOL	寿命开始
BU	分支单元
COTDR	相干光时域反射仪
CSF	截止波长位移单模光纤
CWDM	粗波分复用
DGD	差分群时延
DLS	数字线路段
DPSK	差分相移键控
DSF	色散位移单模光纤
DWDM	密集波分复用
DWDMS	密集波分复用系统
EDF	掺铒光纤
EOL	寿命终止
ER	消光比
FEC	前向纠错

FIT	失效时间
FWM	四波混频
IrDI	域间接口
LOC	线路光通道
MPI-R	接收机侧多径接口
MPI-S	源端多径接口
MTBF	平均故障间隔时间
MTTR	平均修复时间
NDSF	非色散位移单模光纤
NF	噪声系数
NRZ	不归零
NZDSF	非零色散位移单模光纤
OA	光放大器
OD	光分波器
OFA	光纤放大器
OM	光合波器
OOK	开关键控
OSNR	光信噪比
OSR	海底光中继器
OTDR	光时域反射仪
OTN	光传输网络
PDG	极化相关增益
PDL	极化相关衰耗
PFE	供电设备
PHB	极化烧孔
PMD	极化模式色散
R	接收机侧单通道光接口点
RX	(光)接收机
RZ	归零
S	源端单通道光接口
SDH	同步数字系列
SOP	极化状态
SPM	自相位调制
SRS	受激拉曼散射
SWS	单波长系统
TS	终端站
TTE	终端传输设备

TX	(光)发射机
WDM	波分复用
WDMS	波分复用系统
XPM	交叉相位调制

## 5 系统单元参数

### 5.1 发射机参数

如同 ITU-T G.957、G.691、G.692 和 G.959.1 建议书中所给出，这些参数定义在发射机输出参考点 S 或 MPI-S。

#### 5.1.1 系统工作波长范围

ITU-T G.691 和 G.957 建议书中给出了最高到 10 Gbit/s 的单通道 SDH 系统工作波长范围。ITU-T G.959.1 建议书中定义了最高 40 Gbit/s 单通道和多通道 IrDI 工作波长范围。其他应用可以采用本建议书增补中定义的频带内的不同频带和范围。

#### 5.1.2 频谱特性

ITU-T G.957 和 G.691 建议书中给出了最高 10 Gbit/s 单通道 SDH 接口的频谱特性。对更高比特率和更长距离，特别是在 WDM 环境中，需要附加的规范。

#### 5.1.3 SLM光源的最大谱宽

ITU-T G.691 建议书中为单通道 SDH 系统定义了这个参数。

#### 5.1.4 MLM光源的最大谱宽

ITU-T G.691 建议书中为单通道 SDH 系统定义了这个参数。

#### 5.1.5 啁啾

ITU-T G.691 建议书定义了这个参数。对更高比特率或更长距离系统，也可能工作于其他线路码，很可能需要对时间解析动态特性的附加规范。对这个参数及其测量留待进一步研究。

#### 5.1.6 边模抑制比

ITU-T G.957、G.691 和 G.959.1 建议书中定义了一个单纵模光源的边模抑制比。数值是对最高 40 Gbit/s 的 SDH 和 OTN IrDI 系统给定的。

#### 5.1.7 最大功率谱密度

ITU-T G.691 建议书中定义了最大功率谱密度。

#### 5.1.8 最大平均通道输出功率

ITU-T G.959.1 建议书中定义和确定了一个多通道光信号的最大平均通道输出功率。

#### 5.1.9 最小平均通道输出功率

ITU-T G.959.1 建议书中定义和确定了一个多通道光信号的这一特性。

### 5.1.10 中心频率

ITU-T G.694.1 建议书中给出了 WDM 信号的中心频率。这里，频率按最低 12.5 GHz 间隔给出。

### 5.1.11 通道间隔

ITU-T G.694.1 建议书中对 DWDM 定义了通道间隔，ITU-T G.694.2 建议书对 CWDM 定义了通道间隔。完整的 WDM 系统分类是在 ITU-T G.671 建议书中。

### 5.1.12 最大中心频率偏差

ITU-T G.692 和 G.959.1 建议书中定义了采用 NRZ 编码光通道的最大中心频率偏差。采用非对称滤波的其他可能性可能需要一个不同的定义，将留待进一步研究。

### 5.1.13 最小消光比

作为 NRZ 编码 WDM 系统的每通道数值，ITU-T G.959.1 建议书中定义了最小消光比。对 RZ 编码信号，可采用相同的方法。对其他线路码，此定义留待进一步研究。

### 5.1.14 眼图模板

ITU-T G.957、G.691、G.693 建议书和其他建议书中给出了 SDH 单通道系统的眼图模板。ITU-T G.959.1 建议书中定义了 NRZ 编码 IrID 多通道和单通道接口的眼图模板。

### 5.1.15 极化

本参数给出了光源信号的极化分布。本参数可能影响 PMD 容限，而且在极化复用情况中很重要。

### 5.1.16 光源光信噪比

本数值给出了在耦合进传输通路给定带宽内的一个光发射机信号光功率与噪声光功率之比。

## 5.2 海缆参数

海缆是设计用来在海缆设计寿命期内，确保为光纤抵抗海水压力、纵向海水波动、化学侵蚀和氢污染提供保护的。

海缆的设计还要保证在对海缆进行布放、掩埋、回收和施工等标准海底操作时，不会造成光纤性能劣化。

ITU-T G.973、G.974 和 G.977 建议书中分别定义了涉及海缆方面的相关规范及实施。

### 5.2.1 海缆分类

#### 5.2.1.1 根据应用分类

水底光缆可以是：

- 带中继器的海底光缆；
- 无中继器的海底光缆；
- 海缆化的陆地光缆。

带中继器的海缆可以用于所有水下应用，主要用于深水。

无中继器海缆既适合于浅水，也适用于深水。海缆化的陆地光缆（MTC）通常用于过湖和江河。所有海缆通常都经过广泛测试，以证实可以在各种条件下，甚至是在最恶劣的气候条件下对它们进行安装和修理，而不会有任何光、电或机械性能或可靠性的损伤。

### 5.2.1.2 根据海缆保护方式分类

海底光缆应能在其使用深度提供抵抗环境伤害的保护：抵抗海洋生物、鱼咬和磨损的保护，以及抵抗侵蚀和船只活动的铠装。ITU-T G.972 建议书中定义了不同保护类型的海缆，尤其是：

- 单层铠装海缆；
- 双层铠装海缆；
- 岩石铠装海缆。

### 5.2.1.3 根据海缆对光纤保护结构方式分类

海缆和光纤结构的强度决定了海缆总的机械特性。在设计海缆时，应考虑布放、回收和修理中承受外力的累积效应，以及布放后海缆上的永久外力或残留拉伸力，以保证系统的设计寿命。

一般采用两种普通海缆类型来保护光纤：

- 紧密海缆结构，其中光纤被紧紧地固定在海缆中，所以光纤的拉伸基本上等于海缆的拉伸；
- 松海缆结构，其中光纤在海缆中可以自由移动，这样光纤的拉伸低于海缆拉伸，一直保持为零，直到海缆拉伸达到给定数值。

## 5.2.2 海缆中光纤的传输参数

通常，光纤成缆前（安放到海缆中）的传输参数将接近或等于 ITU-T G.652、G.653、G.654、G.655 和 G.656 建议书中所规定的参数。光纤类型的选择要兼顾系统总体造价和性能的优化。

在一个基本海缆段中的光纤传输特性应在成缆前光纤特性的一个指定变化范围之内；特别是光缆、光缆接头和光纤的设计应使弯曲和微弯造成的衰耗增加可以忽略不计。在确定光纤在光缆和设备（光缆接头、终端、中继器等）中的最小弯曲半径时将对此加以考虑。

光纤衰耗、色度色散和 PMD 在系统设计寿命之内应保持稳定在指定极限之内；特别是光缆的设计应使来自外部的氢穿透和光缆内部氢的产生都最大限度减少到可接受的水平，甚至当光缆在使用深度断裂后；还应考虑光纤对伽马辐射的敏感性。

决定光纤特性的主要参数为：

- 在所有工作波长的衰减系数，以 dB/km 表示；
- 在所有工作波长的色度色散系数，以 ps/nm.km 表示；
- 零色散波长  $\lambda_0$ ，以 nm 表示；
- 工作波长附近的色散斜率，以 ps/nm<sup>2</sup>.km 表示；
- 非线性折射指数  $n_2$ ，以 m<sup>2</sup>/W 表示；

- 有效面积  $A_{\text{eff}}$ ，以  $\mu\text{m}^2$  表示；
- 非线性系数  $n_2/A_{\text{eff}}$ ，以  $\text{W}^{-1}$  表示；
- 总平均极化模式色散（PMD），以  $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$  表示。

关于这些参数，海缆系统设计者应区分几种类型的光纤。其中包括：

- ITU-T G.652 建议书中定义的非色散位移单模光纤（NDSF）。
- ITU-T G.653 建议书中定义的色散位移单模光纤（DSF）。
- ITU-T G.654 建议书中定义的截止波长位移单模光纤（CSF）。
- ITU-T G.655 和 G.656 建议书中定义的非零色散位移单模光纤（NZDSF）。
- 色散补偿单模光纤（DCF）。
- 负色散斜率光纤。
- 非常大的有效面积光纤。

根据系统规范（数据比特率和编码、波长数量、光放大器跨距、光放大器输出功率、链路长度等），可采用这些光纤的各种组合来保证系统性能。在这种情况下，系统被称为受管理的色散。

### 5.2.2.1 光纤衰减

光纤的衰减特性可以用衰减系数来表示，单位为  $\text{dB}/\text{km}$ （对数值）或  $\text{km}^{-1}$ （线性值）。

### 5.2.2.2 光纤非线性

在采用高输出功率 OFA 设计长途光链路时，应考虑非线性效应。这些效应沿着光链路累积，并且会使传输显著地劣化。在 SWS 中，占主导地位的非线性效应通常是信号的自相位调制，它正比于非线性系数（比率  $n_2/A_{\text{eff}}$ ）乘以其归一化幅度的平方。当存在色度色散时，这个非线性效应会引起时域中的脉冲展宽，最终导致系统性能损伤。在 WDMS 或 DWDMS 中，占主导地位效应通常是由于相邻波长存在而引起的交叉相位调制。这个非线性效应会造成性能下降。

### 5.2.2.3 极化模式色散（PMD）

因为不同的基模正交极化分量对应不同的模式指数，对光纤内芯理想圆柱形对称结构的微小偏差会导致双折射。PMD 会引起脉冲展宽，应对其限制一个最大值。这个值可以是对整个链路表示的，且通常固定为比特时隙的一定比值。PMD 以  $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$  表示。

### 5.2.2.4 色度色散

色度色散即群速度对波长的从属性，因此一个光信号的所有频谱成分将以不同的速度传播。这将导致脉冲展宽，而且可能是一个主要的损伤。根据系统设计，特别是波长的数量（WDM 系统），通过以不同方式控制它来限制脉冲展宽和其他传输效应将非常有意思。通常，这种控制会产生一个表示色散沿整个链路是如何被控制的色散分布图。

### 5.2.3 光纤机械参数

光纤机械特性很大程度上取决于在整个光纤长度上实施的张力测试。光纤张力测试的特性取决于施加于光纤的应力或光纤的拉伸以及实施的时间。张力测试的水平作为光缆结构的一个函数来确定。应对光纤熔接点进行类似的张力测试。建议张力测试的持续时间应尽可能短。

在确定光纤在光缆和设备（中继器、分支单元、光缆接头盒或光缆终端）中最小弯曲半径时，应考虑光纤和熔接点的机械强度。

### 5.2.4 光缆机械参数

在布放和修理操作中，应由海缆船只对带有接头盒、光缆耦合器和光缆转换的光缆进行安全操作；海缆应能承受多次通过海缆船头。

海缆应是可以修理的，而且在修理过程中，在船上良好工作条件下完成一个海缆接续的时间长短应该合理。

当被一个小锚、锚或捕鱼工具钩住时，海缆通常因接近直线情况断裂应力一部分的应力而断裂（取决于海缆的类型和锚的性质）；在断裂点的附近甚至存在光纤和海缆寿命及可靠性降低的危险，特别是由于施加于光纤的压力或海水的渗透；应对海缆损坏的部分进行更换；其长度应保持在指定范围之内。

在 ITU-T G.972 建议书中定义了一些参数来确定海缆的机械特性和海缆安装、回收和修理的能力，并用作对海缆操作的导则：

- 海缆断裂负荷，在达标测试中测量；
- 光纤断裂的海缆负荷，在达标测试中测量；
- 标称瞬间张力强度，只是偶然发生，特别是在回收操作中；
- 标称操作张力强度，可在修理中发生；
- 标称永久张力强度，体现了海缆布放后的状态；
- 海缆最小弯曲半径，用于指导对海缆的操作。

### 5.2.5 海缆电气参数

应能通过海缆对中继器或分支单元进行远程供电，包括具有低线性电阻的供电导体及具有高压绝缘能力的绝缘体。

### 5.2.6 海缆的出厂长度

海缆的出厂长度应尽可能长。出厂长度通常应大于 25 km。

### 5.2.7 海缆的物理参数

海缆的物理参数包括外径、空气中的重量和水中的重量。

## 5.2.8 修理海缆

在海缆断裂或损坏时使用修理海缆。修理海缆应在光特性、电气特性及机械特性上与要修理的海缆一致。

## 5.3 海底中继器参数

海底中继器参数参见 ITU-T G.974 和 G.977 建议书。

### 5.3.1 中继器类型

有 3 种中继器类型：

- 带 3R 电再生的光中继器；
- 带 EDF 放大器的光中继器；
- 带拉曼放大的光中继器。

注一 在本增补的其他各节中，OFA 包括 EDF 放大器和拉曼放大器。

### 5.3.2 带3R电再生的光中继器参数

#### 5.3.2.1 光参数

在光接口的信号应符合光段落的功率预算。特别在系统组装时，应遵守一定的限定值：

- 中继器最小平均输入功率（dBm）：光线路信号中的平均光功率，当构成链路时，在中继器光输入接口处必须要保证此值，只有这样，海缆段的光功率预算才能提供保证的余量。
- 中继器最小平均输出功率（dBm）：光线路信号中的平均光功率，当构成链路时，在中继器光输出接口处必须要保证此值，只有这样，海缆段的光功率预算才能提供保证的余量。

对集成系统，类似的参数应作为集成线路光接口处集成规范的一部分来指定。

#### 5.3.2.2 抖动参数

要求在光接口处的中继器抖动性能（抖动容限、最大输出抖动、抖动转移特性）与系统规范一致。

对集成系统，应将同样的参数、输出中继器抖动谱密度和对位抖动作为集成线路光接口处集成规范的一部分来设定。

### 5.3.3 带EDF放大的光中继器参数

#### 5.3.3.1 光参数

ITU-T G.661 建议书涉及 EDF 放大器相关一般参数的定义和测试方法。对中继器中的 EDF 放大器，必须考虑以下参数：

- 小信号增益（SSG）；
- 标称增益（NG）；
- 噪声系数（NF）；
- 标称信号输出功率（NSOP）；
- 标称信号输入功率（NSIP）；
- 压缩因子（CF）；



- 中继器最小平均输入功率 (dBm) ;
- 中继器最小平均输出功率 (dBm) ;
- 抖动性能;
- 相移性能。

此外,特别是对 WDMS,还要考虑:

- 增益平坦度 (GF) 。

### 5.3.3.2 极化效应

一个 EDF 放大器的不同元件要根据系统要求进行选择,以保证其性能对极化效应有合理的不敏感性,例如 PDL、PMD。其他一些极化效应如 PDG、PHB 是固有效应,只能通过外部措施来防止或限制(例如,在 TTE 发射机中进行信号极化扰模)。

### 5.3.4 带拉曼放大的光中继器参数

留待进一步研究。

### 5.3.5 中继器的机械参数

#### 5.3.5.1 中继器外壳

中继器外壳的设计必须要能保证对深海光中继器进行操作、布放、回收和重新布放而不会引起机械、电气和光性能的降低。

以下是中继器外壳的技术设计考虑:

- 在决定基本结构设计和元件安放时,必须要考虑性能、可靠性和制造的难易性。
- 中继器外壳需要有效散热和吸收震动的结构。
- 需要有高可靠性、抗压、气密和低损耗的穿通使光纤和电力线能够进入中继器外壳。
- 需要具有抗压及适当张力强度的高可靠性和低损耗海缆连接。
- 海缆到中继器的连接结构。

#### 5.3.5.2 内部单元

在中继器外壳内,内部单元可以包括几个电源供电模块和在双方向放大来自一对或几对光纤光信号的 OFA 对。

#### 5.3.5.3 腐蚀防护

OSR 的外壳外部应设计成可抵抗海水的侵蚀。

#### 5.3.5.4 抵抗水压

OSR 必须要设计可支撑深海中巨大的压力强度。

#### 5.3.5.5 高压绝缘

中继器外壳和内部单元之间要求有高压绝缘,以保证中继器的工作。

### 5.3.5.6 温度控制

由 OSR 内部电子元件产生的热量可以通过与中继器外壳进行的热传导充分散发掉。

### 5.3.5.7 中继器外壳密封

中继器必须能对海水和气体入侵提供防护，二者都是直接来自周围的海水和由于靠近中继器的海缆断裂造成的纵向泄漏。

### 5.3.5.8 环境条件控制

元件的可靠性和正常工作要求受控制的内部环境，涉及相对湿度或任何可预见的产生于中继器内部的气体。

## 5.3.6 中继器的电气参数

### 5.3.6.1 电源模块

OSR 由终端站通过海缆内电导体以恒流的方式进行供电。电源模块向 OFA 对供电来确保光放大。OSR 可以接受任何电极性。

### 5.3.6.2 浪涌保护

必须对 OSR 进行电源浪涌保护，它可能是由海缆内高压供电的突然中断而引起（海缆断裂或 PFE 短路）。

## 5.4 海缆接头参数

海缆接头使两个海缆段落连接在一起，提供相邻海缆段之间的光学、电气和机械连续性。海缆接头提供的能力包括：

- 将海缆的子段熔接到一起来形成段落；
- 在系统组装时将海缆与中继器连接起来；
- 终结海缆端头，以便将来在系统安装时转变为海缆对海缆的连接；
- 在岸滩连接处将海缆和陆缆连接到一起。

海缆接头是为在装船、布放、回收、修理和重新布放过程中苛刻条件下提供海缆或中继器与海缆之间的可靠连接而设计的，深度可达 7 500 米。适当的海缆接头设计可以满足铠装海缆的各种要求。

### 5.4.1 光学参数

#### 5.4.1.1 熔接损耗

熔接损耗即由于光纤熔接及海缆连接后多余的光纤引起的损耗增加。应尽可能使熔接损耗最小。对合适的情况，它的测试方法应遵从 ITU-T G.650.1 建议书。

### 5.4.2 机械参数

#### 5.4.2.1 强度

海缆加强芯的终结采用了一个插头式的设计，其断裂强度超过所要求的海缆最小断裂强度的 90%。

#### 5.4.2.2 张力强度

在 ITU-T G.972 建议书中定义了张力强度。其他可能性留待进一步研究。

### 5.4.2.3 腐蚀防护

必须保护接头使其免于海水的侵蚀。

### 5.4.2.4 抵抗水压

接头必须设计得能承受巨大的压强。

### 5.4.2.5 接头密封

必须为接头提供防止周围海洋海水和气体进入的保护。

### 5.4.2.6 弯曲性能

弯曲限制导架要保证接头中弯曲度的逐渐过渡，它的设计应可以通过海缆船上的海缆操作机械。

## 5.4.3 电气参数

这个连接终结海缆中的电导体并提供通过接头的电气连续性。

### 5.4.3.1 高压绝缘

为保证接头的工作，在海缆供电导体和海水间应有高压绝缘。

## 5.4.4 物理参数

海缆接头的物理参数包括长度、外径、空气中重量和水中重量。

## 5.5 接收机参数

如 ITU-T G.957、G.691、G.692 和 G.959.1 建议书中所给出的，这些参数是针对接收机参考点 R 或 MPI-R 而定义。

### 5.5.1 灵敏度

ITU-T G.957 和 G.691 建议书中定义了高达 10 Gbit/s 的 SDH 单通道系统的接收机灵敏度。SDH 和 OTN IrDI 接收机的灵敏度在 ITU-T G.959.1 建议书中定义。

接收机灵敏度定义为寿命终止时，最差情况下的数值，考虑了老化和温度余量以及如特定接口的发射机规范给定的发射机不理想所引起的最差情况眼图模板和消光比代价。

但是，与通道效应相关的代价是与基本灵敏度值分开确定的。

### 5.5.2 过载

ITU-T G.957 和 G.691 建议书中规定了高达 10 Gbit/s 的 SDH 单通道系统接收机过载定义和数值。高达 40 Gbit/s 的 SDH 和 OTN IrDI 接收机的过载定义和数值在 ITU-T G.959.1 建议书中指定。

### 5.5.3 最小平均通道输入功率

ITU-T G.959.1 建议书定义了多通道接收机高达 10 Gbit/s 光复用 IrDI 的最小平均通道输入功率。

### 5.5.4 最大平均通道输入功率

ITU-T G.959.1 建议书定义了多通道接收机高达 10 Gbit/s 光复用 IrDI 的最大平均通道输入功率。

### 5.5.5 光通道代价

ITU-T G.957 和 G.691 建议书中规定了高达 10 Gbit/s 的 SDH 单通道系统的光通道代价定义和数值。ITU-T G.959.1 建议书中规定了高达 10 Gbit/s 的单通道和多通道 OTN IrDI 接收机的通路代价定义和数值。ITU-T G.959.1 建议书中还规定了高达 40 Gbit/s 单通道 SDH 和 OTN IrDI 接收机的通路代价定义和数值。

### 5.5.6 最大通道输入功率差

本参数显示了一个光复用信号通道间的最大差异，在 ITU-T G.959.1 建议书中给出了定义。

### 5.5.7 接收机输入处最小OSNR

该数值定义为在 OSNR 受限（线路放大）系统中，在接收机参考点和给定功率水平条件下，达到目标 BER 所需要的最小光信号对噪声的比值。应该注意，这是一个设计参数。

## 6 光网络拓扑

海底光缆系统的光网络拓扑类型为点到点、星形、分支星形、干线和分支、花边形、环形和分支环形。本节基于[1]中给出的信息。

### 6.1 点对点

该结构（图 6-1）由位于两个不同终端站（TS）的两个终端传输设备（TTE）之间的直接海缆链路组成。



图 6-1 点对点拓扑

### 6.2 星形

该结构（图 6-2）由一个通过分别的海缆连接其他几个终端站（TS）的主 TS 组成。在基本星形结构中，业务从主 TS 的 TTE 独立地直接传送到其他 TS。因此，星形网络对每个 TS 需要一个分别的海缆，导致了结构成本相对较高，特别是当 TS 在地理上相距较远时。

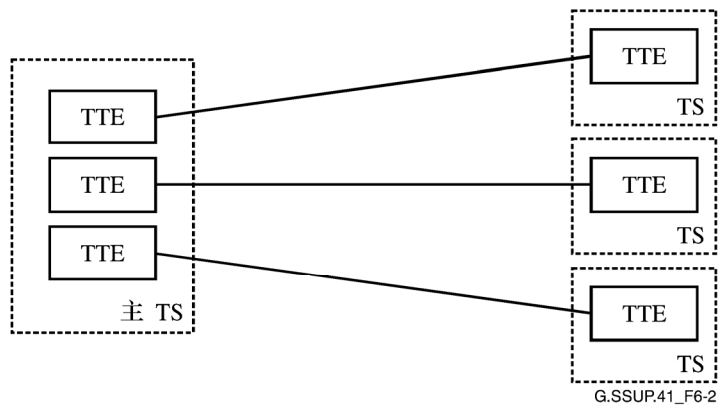


图 6-2—星形拓扑

### 6.3 分支星形

除了业务的分离是在水下完成外，该结构（图 6-3）提供了与基本星形相同的能力，使相距较远 TS 间分别的海缆成本最小。业务的分离是通过一个分支单元（BU）来实现，它将一个干线海缆中的光纤和两个或更多分支内不相连的光纤连接起来。

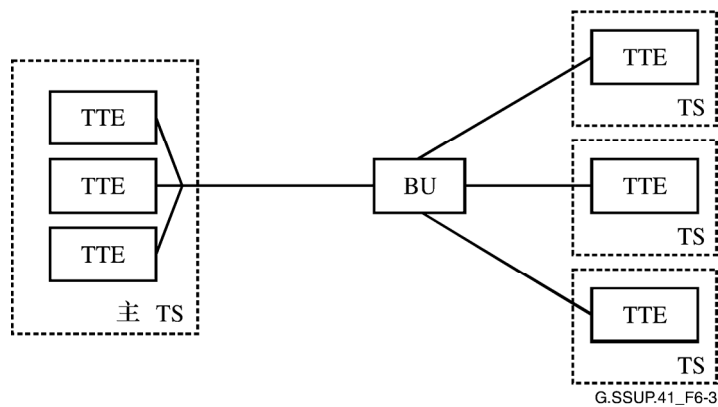


图 6-3—分支星形的拓扑

### 6.4 干线和分支

该结构（图 6-4）通过分支单元将多个包括 TTE 的 TS 连接到一个干线海缆，使分支 TS 方向的业务部分可以被取出。

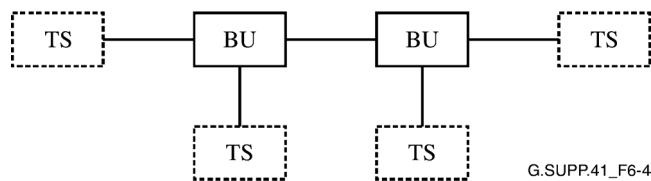


图 6-4—干线和分支拓扑

## 6.5 花边形

花边形（图 6-5）基本上主要是海岸登陆点间的一串环路，虽然不总是这样，但它经常被用做一个无中继系统。考虑到对将来容量增长要求的预期，这些无中继器的典型应用都配有高于初始业务所需要光纤数量的海缆。因此，在需要附加容量的情况下，所需要的附加投资仅仅是终端设备。一个花边形的结构往往是一个典型的、岸上安装的反映。这样的结构可以经常被用做一个现有陆基系统的补充、备用路由。这种结构是日益流行的对一个陆基系统替代，特别是当陆地地形使安装和维护很困难时。

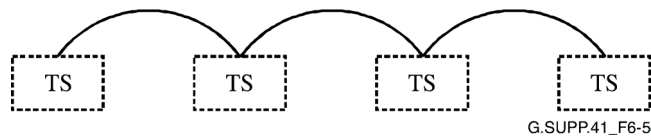


图 6-5—花边形拓扑

## 6.6 环形

环形结构（图 6-6）本质上是一组连接的点到点海缆，它具有两倍所需的传输容量。当环内发生任何单个故障时，例如海缆被切断，业务沿着环 — 离开无法工作的段落 — 继续向着其原目的地迂回。岸基传输设备对整个环路提供自动故障检测和倒换控制，不会丢失任何呼叫。

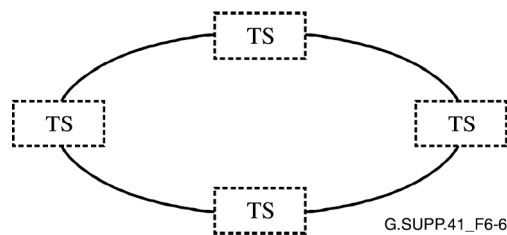


图 6-6—环形拓扑

## 6.7 分支环形

这个结构（图 6-7）将环形的能力以附加一个分支单元的成本有效方式加以扩展。分支环形结构保持了环形的自愈性质。然而，分支环形可以被视为是干线分支和环形的合并，保持了每种结构的大部分优点。这种结构可以通过很多途径来实现，包括通过其他网络接合。通过适当的规划，一个网络可以先配置成一个干线分支结构，以后升级成一个分支环形。

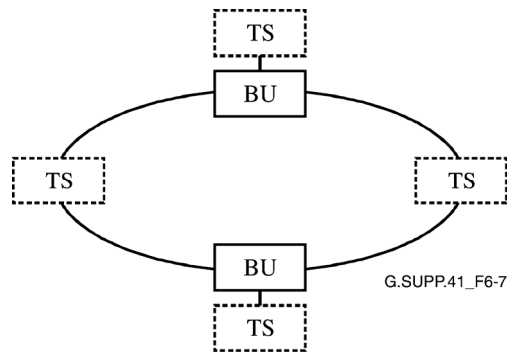


图 6-7—分支环形拓扑

## 7 系统设计的考虑

### 7.1 光功率预算

如 ITU-T G.976 建议书中所定义，光功率预算是一个契约性性能预算，保证系统性能优于 ITU-T G.826 和/或 G.828 建议书中所定义的最低所需 BER 性能。

光功率预算从一个简单的线性质量因子（Q 因子）开始，它只考虑由于放大器 ASE 噪声引起的劣化（平均  $Q$ ）。之后，光功率预算对所有类型的劣化分配代价/损伤（由于传输、终端设备等）。劣化的估计采用理论分析、计算机模拟和在试验测试台上的直接测量相结合。

对每一个海缆数字线路段，建议确定两个不同的功率预算，一个是寿命初始（BOL）值，另一个是寿命终止（EOL）值：

- BOL 功率预算提供最恶劣情况下的数字线路段性能，它在试运行测量。
- EOL 功率预算提供估计的在系统寿命终止时最差情况下的数字线路段性能，且包括老化余量、内部故障和指定的修理余量。

EOL 余量是估计的系统寿命终止时的最差 Q 因子与满足要求传输性能所需的最小 Q 因子之差。此外，光功率预算应该清楚地表明得到指定系统误码性能所需要的最小 Q 因子，并包括通过采用 FEC 所提供的余量改善（如果可适用时）。（见图 7-1。）

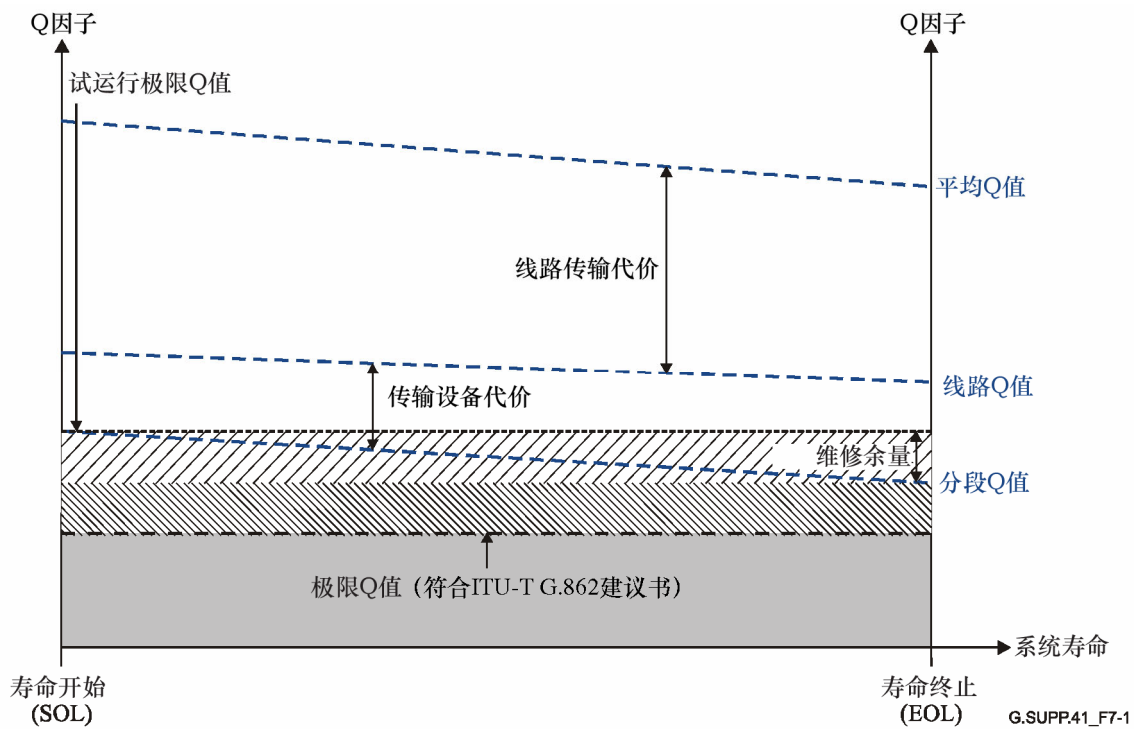


图 7-1—功率预算结构举例

### 7.1.1 质量因子 (Q因子)

在海缆数字线路段的光功率预算表中采用了附件 A/G.977 中所描述的 Q 因子，并采用分贝表示。以下文字源于 ITU-T G 系列建议书的增补 39，在此引用的目的是为了更方便读者。

Q 因子是在判决电路除以电压或电流为单位的信噪比，定义为：

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)} \quad (7-1)$$

其中， $\mu_{1,0}$  是传号/空号电压或电流的平均值， $\sigma_{1,0}$  是标准偏差。例如，BER 为  $10^{-12}$  对应于  $Q \approx 7.03$ 。

因为实际的 Q 因子估算技术为了推断在最佳判决门限时的信号质量而测量接收到的“眼图”上面和下面区域，Q 可以被视为实际 BER 的定性指示。

当门限值设定为最佳值时，与 BER（在无 FEC 的情况下）的分析计算关系为：

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (7-2)$$

其中：

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta \quad (7-3)$$



对于  $Q > 3$ （高斯假设），对这个函数通常采用的近似为：

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (7-4)$$

在  $Q$  值整个范围[2]给出精确值的另一个表达式为：

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left( \left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (7-5)$$

图 7-2 中的曲线显示了  $Q$  值低于或等于 5 时的这两种近似。

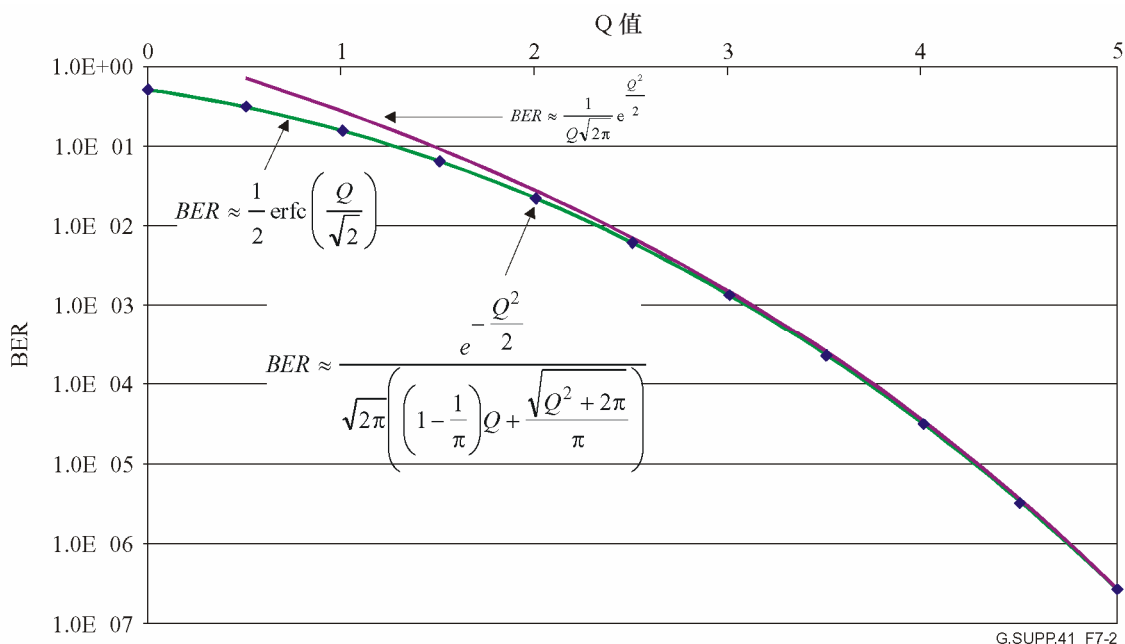


图 7-2—BER和Q关系的近似计算

$Q$  因子通常采用分贝的形式，而不是线性形式：

$$Q(\text{分贝}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{线性}) \quad (7-6)$$

一个海底数字线路段的性能应该用其  $Q$  因子或一个直接测量 BER 来表述，此 BER 应满足以光功率预算表示的  $Q$  因子约定试运行极限。

请注意，式 7-2 到 7-5 只有在高斯噪声分布的情况下才成立。这个近似在基于海缆系统中广泛采用的 OOK 技术的调制格式中得到认可。基于相位调制的调制格式将留待进一步研究，例如因为海底应用而在过去数年被重新研究的 DPSK。

## 7.1.2 光功率预算的相关参数

按照 ITU-T G.977 建议书，建议光功率预算至少应考虑由于以下和效应所引起的损伤：

- 光噪声累积（见 7.1.3）→平均 Q 因子的计算。
- 传输损伤（见 7.1.4）→线路 Q 因子计算。
  - 由色度色散和非线性效应（自相位调制、交叉相位调制、线路光通道之间的四波混频效应、受激拉曼散射等）的结合效应引起的传输损伤（见 7.1.4.1）；
  - 由光极化效应引起的传输损伤，例如极化模式色散（PMD）、极化相关损耗（PDL）、极化相关增益（PDG）。由于这些损伤随时间波动，应对随时间变化的性能采取特别的预防措施（见 7.1.4.2）；
  - 由整个段落累积增益曲线的不平坦引起的损伤（见 7.1.4.3）；
  - 非最佳预加重损伤（见 7.1.4.4）；
  - 由海底数字线路段波长不准引起的损伤（见 7.1.4.5）；
  - 由监控引起的损伤（见 7.1.4.6）；
  - 制造和环境损伤（见 7.1.4.7）。
- 考虑终端传输设备非理想特性的损伤（与终端传输设备背靠背 Q 因子性能有关）（见 7.1.5）→段落 Q 因子计算。
- 特别是对于寿命终止功率预算应该增加一些附加的余量（见 7.1.6）→段落余量。
  - 对于特定修理操作的余量（修理熔接、由修理后的额外光缆长度带来的附加损耗和色散分布图改变等等）（见 7.1.6.1）；
  - 对于光缆和元件老化的余量（见 7.1.6.2）；
  - 对于一些元件可遇见的失效的余量，例如泵浦激光器失效（见 7.1.6.3）。

光信号间的交叉相位调制和四波混频、受激拉曼散射、累积增益曲线的不平坦和光通道非最佳相对功率是专门对于 WDM 和 DWDM 系统的损伤，因为它们涉及多个光信号在同一根光纤上同时传输。

## 7.1.3 光噪声累积

### 7.1.3.1 光信噪比计算

在一个包括级联光放大器链的系统中，ASE 噪声在每个光放大器得到累加。光信噪比（OSNR）在通过每个光放大器之后降低。因此，OSNR 对监控和表述光放大器性能的特性是一个有用的参数。图 7-3 描述了一个我们用做基准的多通道系统（N 个跨段，N-1 个线路放大器）。

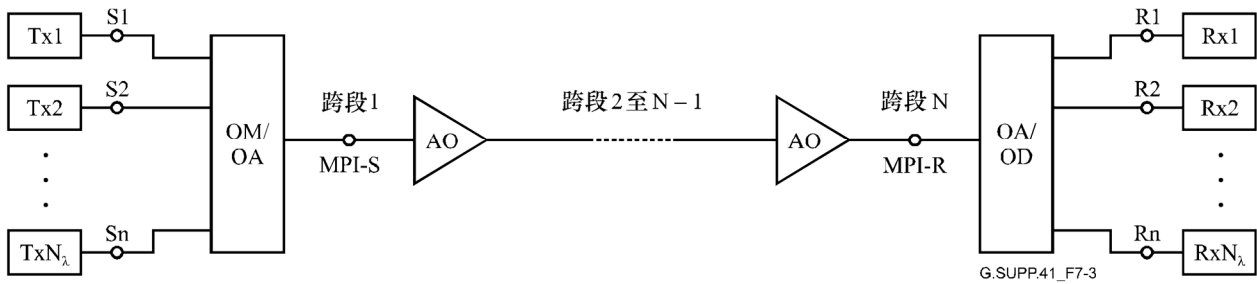


图 7-3—光线路系统接口的表述  
(一个多通道N跨段系统)

对 OSNR 计算有两种方法:

- i) 简单噪声积累和恒定信号功率; 或
- ii) 噪声积累和总输出功率恒定。

即使最现实的假设是第 ii) 项, 得自假设 i) 的公式也是 ii) 的一个很好的近似, 并被广泛使用。

在本节中, 我们将对第 i) 项演进: 信号功率保持不变。

对图 7-3 中所示系统, 进行以下主要假设:

- 包括在链中的所有光放大器具有相同的噪声系数 (NF)。
- 所有跨段的衰耗相等。
- 所有在线放大器的总输出功率相同。

在此情况下, 在接收机输入端的 OSNR (图 7-3 中的点  $R_i, i = 1, \dots, n$ ) 可以近似为:

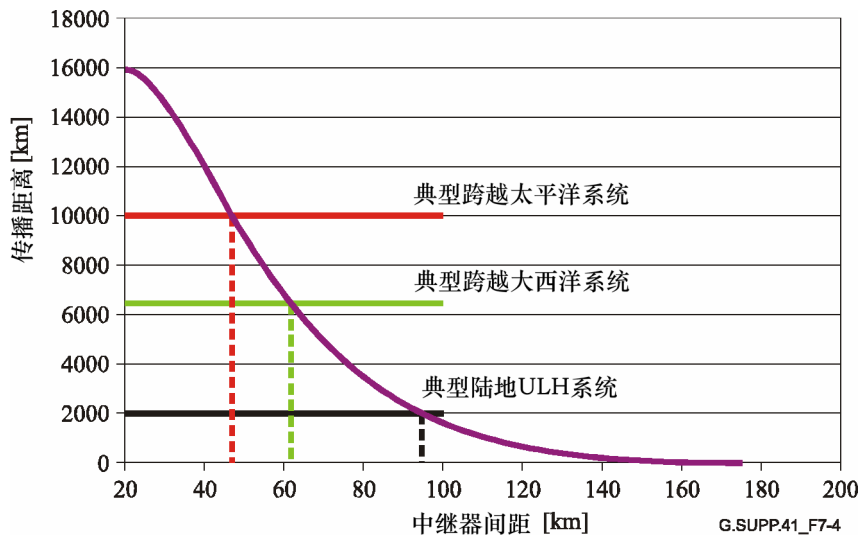
$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot N_{amp} \cdot NF - \frac{1}{G} \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-7)$$

其中,  $P_{out}$  是以 W 为单位的放大器总输出功率,  $G$  是放大器的增益 (假设它等于总的跨段衰耗),  $NF$  是光放大器的噪声系数,  $h$  是以  $J \cdot s$  为单位的普朗克常数,  $\nu$  是以 Hz 为单位的光频率,  $B_r$  是 Hz 为单位的参考光带宽,  $N_\lambda$  是波长的总数量,  $N_{amp}$  是光放大器的总数量。式 7-7 表示 ASE 噪声是在所有  $N_{amp}$  个放大器累积的。

如果线路放大器增益非常高, 即  $G \gg 1$ , 式 7-7 可以简化为:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot N_{amp} \cdot NF \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-8)$$

其中, 增益  $G$  等于  $e^{\alpha L}$ ,  $L$  是跨段长度。因而, 对一个给定的 OSNR, 可达到的总长度是跨段长度的函数。图 7-4 显示了一个海底和陆地系统典型跨段长度的例子。



注一 采用的参数为：参考带宽 $B_r = 0.1$  nm内的OSNR = 16 dB,  $NF = 4.7$  dB,  $N_\lambda = 64$ 条通道,  $P_{out} = 14$  dBm, 光纤衰耗 $\alpha = 0.21$  dB/km。

图 7-4—达到典型海底和陆地传输距离所需中继器间隔的举例

对系统无中继且仅包括一个预放大器的情况，公式 7-8 可以修改为：

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot NF \cdot G_{pre-amplifier} \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-9)$$

其中， $L$  是以千米为单位的光缆长度， $\alpha$ 为它的每千米总衰耗。

对带有远程放大和发射机侧单个功率放大器的无中继系统的情况，公式 7-7 可修改为：

$$OSNR = \frac{P_{Trans} \cdot e^{-\alpha L}}{N_\lambda \cdot h\nu \cdot B_r \cdot \left( NF_1 + \frac{NF_2}{G_1} \right)} \quad (7-10)$$

其中， $L$  是以千米为单位的光缆总长度， $\alpha$ 为它的每千米总衰耗， $P_{Trans}$  为发射机的输出功率（图 7-3 中点 MPI-S）， $NF_1$  和  $NF_2$  为远程放大器和功率放大器的噪声指数， $G_1$  是远程放大器的增益。

采用拉曼放大的无中继海底系统留待进一步研究。

### 7.1.3.2 Q因子计算

当忽略了接收机的热噪声和发射噪声并采用 7.1.1 中给出的近似方法时，理论线性 Q 因子可由以下关系近似：

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2M \cdot OSNR \cdot (1 - ER)}{1 + ER} \sqrt{B_r}}{\sqrt{1 + \frac{4M \cdot ER \cdot OSNR}{1 + ER}} + \sqrt{1 + \frac{4M \cdot OSNR}{1 + ER}}} \sqrt{B_e} \quad (7-11)$$

其中， $OSNR$  是以光带宽  $B_r$  表示的光信噪比， $ER$  是以线性单元表示的发射机消光比， $B_e$  是以 Hz 为单位的接收机电带宽， $B_r$  是以 Hz 为单位的接收机光带宽， $M$  是一个与调制格式相关的系数（NRZ 时  $M = 1$ ，RZ 时  $M \sim 1.4$ [3]）。注意，系数  $M$  也取决于消光比参数。

## 7.1.4 传播损伤

与仅考虑简单 ASE 噪声累积计算出的平均  $Q$  值相比，传播损伤将引起一些附加代价，需要从平均  $Q$  因子中将它们扣除来得出线路  $Q$  值（见图 7-1）。

### 7.1.4.1 由非线性效应引起的传播损伤

当光信号功率较高时，信号与传输媒质之间开始产生非线性相互作用。应该注意，高功率光信号对在不缩短跨段长度情况下获得可接受的 OSNR 值是必要的。因此，光纤非线性在大容量系统和无电再生的长路由情况，特别是采用光放大的长距离海底链路中受到重视。非线性通常被分为两种类型：一些与被称作克尔效应的光纤密度相关折射指数有关（自相位调制、交叉相位调制和四波混频），另一些与散射效应有关（主要是受激拉曼效应）。有一些参数将影响这些非线性效应的严重性，包括光纤色散性能、有效面积和光纤的非线性折射指数、WDM 系统中的通道数量和间隔以及信号密度和数据速率。这些非线性效应在附件 II/G.663 中描述。在 7.1.4.1.1、7.1.4.1.2、7.1.4.1.3 和 7.1.4.1.4 中对主要的非线性效应进行了复述。

#### 7.1.4.1.1 自相位调制 (SPM)

以下文字源于 II.3.1/G.663，为了方便读者引用于此。由于光纤折射指数取决于光信号强度，光信号瞬间密度变化将引入一个对其自己相位的调制。此效应被称做自相位调制 (SPM)。

在光传输系统中，由于光密度改变引起相位的改变，自相位调制将逐步展宽信号频谱（见图 7-5）。当存在由 SPM 引起频谱展宽时，在光纤一般色散区域内（即在零色散波长以下），由于色度色散效应，信号在沿光纤传播时将经历一个更大的时间展宽。相反，在相反的色散区域内，色度色散与 SPM 可以相互补偿，产生较小的时间展宽。著名的光孤子传播就是基于此现象。

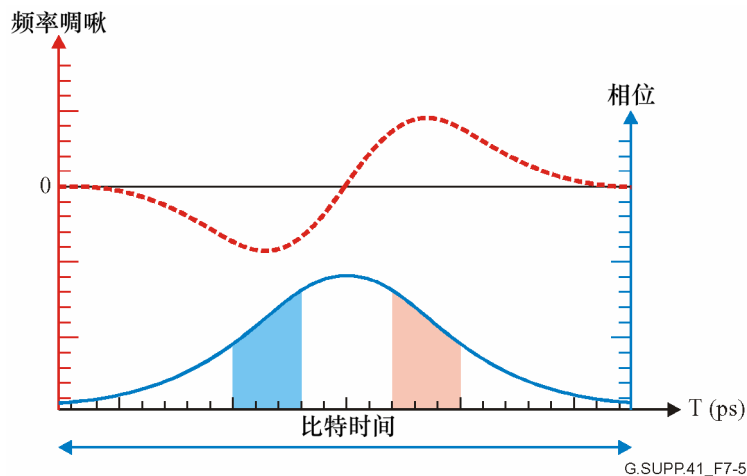


图 7-5—因SPM引入的时间相移变化和频率啁啾[4]

通常，只有在色散累积较高的系统中，或采用光放大的超长距离海缆系统中，SPM 效应才比较显著。工作在色散受限的一般色散体制下时，系统不可能承受由 SPM 引起的附加效应。在具有非常小通道间隔的 WDM 系统中，由 SPM 引入的频谱展宽也会引起相邻通道间的干扰。当与窄带光滤波器相结合时，SPM 效应还将引起劣化。由于 SPM 基本上是一个单通道效应，它不会因通道数量更多而受影响。SPM 引起的失真代价将会因为通道功率更大而增加。它还将因为通道比特率更高而增加，因为比特率更高时上升/下降比特斜率也更大。

当工作在 ITU-T G.655 建议书光纤零色散波长以上时，SPM 效应会减轻。具有加大光纤有效面积或减少非线性折射指数特性的光纤也可以使 SPM 代价降低。尽管系统设计倾向于要求更大的功率来满足更大的跨段距离，对所有设计类型的光纤，都可以通过减少通道发射功率来降低 SPM 效应。

#### 7.1.4.1.2 交叉相位调制 (XPM)

以下文字源于 II.3.3/G.663，为了方便读者引用于此。在多通道系统中，当瞬间光密度变化因为相邻通道间的相互作用而引起相位改变时，交叉相位调制 (XPM) 将逐步展宽信号频谱。XPM 引入的频谱展宽量与通道间隔和光纤色度色散有关，因为色散引起的差分群速度将使相互作用的脉冲随着沿光纤下传而分离。一旦 XPM 引入了频谱展宽，信号因色度色散效应在沿光纤传播过程中经历一个更大的时间展宽。

较小的通道间隔会使系统 XPM 代价增加。如对 SPM 提到的，相位信号的改变与光纤折射指数的改变有关，而它又与通道功率相关。较大的平均发射功率导致较大的相移，当与色散效应相结合时，导致更大的系统代价。

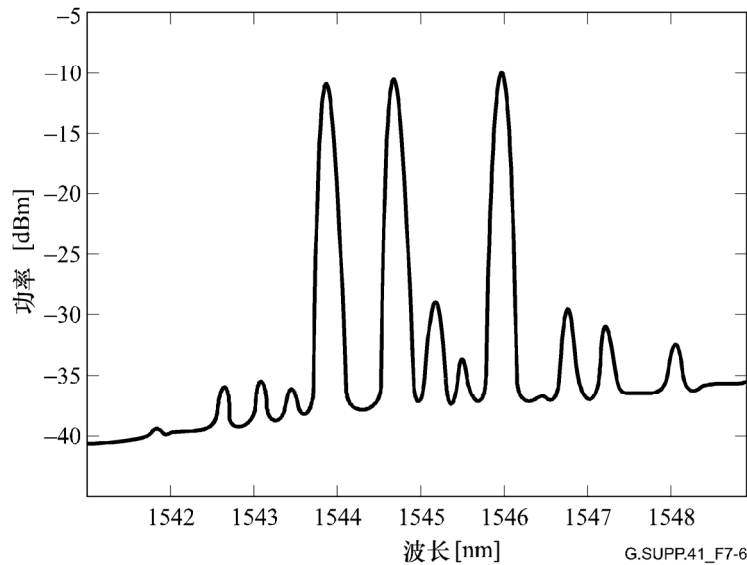
在 ITU-T G.652 建议书光纤系统中，XPM 带来的损伤比在 ITU-T G.653 和 G.655 建议书光纤系统中相对更显著。由于 XPM 的展宽可引起 WDM 系统中相邻通道间的干扰。

尽管系统设计倾向为了更长的跨段距离要求更大的功率，对所有光纤设计类型，可以通过降低通道发送功率来减少 XPM 效应。

### 7.1.4.1.3 四波混频 (FWM)

以下文字源于 II.3.5/G.663，为了方便读者引用于此。四波混频 (FWM) 也被称为四光子混频，发生于两个或三个不同波长的光波相互作用产生出另外波长的新光波，称为混频产物或边带。这个相互作用主要发生在 WDM 系统的信号之间。

在有两个信号的情况下，它们差频的调幅调制了光纤的折射率，并产生了一个差频频率的相位调制。此相位调制产生两个由此差频给定频率的边带。当有三个信号时，将产生更多且更强的混频产物（见图 7-6），当通道间隔频率相等时，它将直接落入相邻信号通道。如果在边带和初始信号之间达到相位匹配条件，两个沿一根光纤传输的光波以高效产生 FWM。



注一 当采用3-mW通道时，在中心通道 $D=-0.2$  ps/nm.km。

图 7-6— 在25 km色散位移光纤输出端测得的光功率谱

FWM 边带的产生会引起信号功率的明显损耗。此外，当混频产物直接落入信号通道，会造成参量干扰，根据信号与边带相位的相互作用，在信号脉冲中以幅度增益或损失形式表现出来。

参量干扰造成接收机输出端眼图的闭合，因此使误码率 (BER) 性能劣化。多通道系统的趋势是向更多通道数量方向发展，这使可能落入信号通道内的混频产物数量增加。

可以通过增加频率间隔和色度色散来削弱相互作用波长之间的相位匹配，降低因 FWM 造成的系统代价。但是，系统倾向是减少频率间隔，以允许在相同的光带宽内有更多的通道。此外，随着通道发送功率的增加，FWM 效率（进而系统代价）也增加。

#### 7.1.4.1.4 受激拉曼散射 (SRS)

以下文字源于 II.3.7/G.663，为了方便读者引用于此。受激拉曼散射是一个宽带效应，涉及光和硅分子震动模式间的相互作用。SRS 使一个信号波长表现为一个更长波长的拉曼泵浦源，或者对一个信号通道，或者是对自发散射拉曼位移光波。任何情况下，此过程使波长较短的信号衰减，而波长较长的信号得到放大。

受激拉曼散射 (SRS) 主要影响有较大带宽的 WDM 系统。由于一部分功率因 SRS 而转移到波长较长的通道，WDM 系统中波长较短的信号遭受信噪比下降。这造成系统总体容量受到限制，它取决于总通道数量、通道间隔、平均输入功率和系统总长度。

尚未有关于消除 WDM 系统中 SRS 效应的实用技术的报道。可以采用一个增益滤波器来修正引入的 OSNR 倾斜。SRS 效应还可以通过减少输入光功率来减轻。

#### 7.1.4.1.5 非线性效应的影响

一个具有完全色散补偿的多跨段高速传输系统以一种一般的方式受到非线性光现象的影响，例如单通道系统中的 SPM 或 WDM 系统中的 XPM 和 FWM。它们的影响随光输入功率而增加。当光纤输入光功率变得非常高时，结果是系统性能被这些非线性效应严重地劣化。

通常，是采用基于分步傅立叶方法的数字模拟工具来评估非线性效应对 WDM 系统的影响[4]。大部分时间是通过试验工具来验证结果，如循环算法[6]或试验平台。

在低输入光功率时，由于在传输线路终点接收到的光信噪比低，系统性能明显劣化（见 7.1.3）。

因此，需要在低输入功率（OSNR 限制）和高输入功率（非线性效应限制）之间找到一个平衡点。为保证最优系统性能而寻找最佳工作点时，考虑了以下方面：

- 用于传输的光纤类型；
- 色散补偿机制；
- 跨段长度；
- 线路输出光功率；
- 通道间隔。

#### 7.1.4.1.6 结论

为达到给定 Q 因子而挑选出单一最小输入光功率数值（例如，大于 7）是不可能的。在这个最小值和达到非线性代价剧增之前可达到的最大功率值之间，可以将所希望的系统参数（光纤类型、色散补偿、放大器间距、通道间隔等）应用于基本模拟的方法，以确定一个系统的最佳性能区间。



### 7.1.4.2 由光极化效应引起的传播损伤

以下文字源于 II.4.1/G.663，为了方便读者引用于此。众所周知，光器件和子系统或多或少对光信号的极化状态敏感。这些极化效应可以分为 3 个部分：

- PMD：极化模式色散；
- PDL：极化相关损耗；
- PDG：极化相关增益。

在 ITU-T G.663、G.671、G.650.2 建议书和 IEC 61282-3 中对它们进行了详细的描述。

所有这些效应将对光信号引入一些代价，因而必须在海底光传输系统的线路设计中予以考虑。特别是，它们与外界条件相关，例如温度将引起性能随时间的波动。建议采用统计方法来计算引入的代价。

#### 7.1.4.2.1 极化模式色散 (PMD)

光纤双折射是由于制造过程造成的几何特征不均匀所引起，它将引起取决于极化状态 (SOP) 的传播时间改变。极化模式色散值是两个正交极化模式间的平均差分群延迟 (DGD) 时间，它将在光传输系统中引起脉冲展宽。以下文字源于 ITU-T G 系列建议书增补 39，为了方便读者引用于此。

DGD 值随时间随机变化，表现出由 PMD 赋予的麦克斯韦分布特性。一个光缆的 PMD 还与统计特性相关联，该统计特性可以与构成链路的其他部件的 PMD 结合起来，以确定作为概率极限的一个最大 DGD。一方面，见附件 I/G.650.2 和附件 II/G.663 中对光缆 PMD 统计特性的描述。另一方面，ITU-T G.671 建议书中包含了如何将链路其他单元的 PMD 特性与光缆的相结合，以确定链路的最大结合 DGD。

$$DGD_{\max_{link}} = \left[ DGD_{\max_F}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2} \quad (7-12)$$

其中：

- $DGD_{\max_{link}}$  是链路的最大 DGD (ps)；
- $DGD_{\max_F}$  是光缆连接后得到的最大 DGD (ps)；
- $S$  是麦克斯韦调整因子 (见 7-1)；
- $PMD_{Ci}$  是第  $i$  个元件的 PMD 值 (ps)。

式 7-12 假设瞬时 DGD 的统计值可以用麦克斯韦分布来近似，它是瞬时 DGD 超过受表 7-1 中麦克斯韦调整因子值控制的  $DGD_{\max_{link}}$  的概率。

表 7-1—引用 ITU-T G.959.1 建议书中 DGD 平均值与概率

最大值与平均值之比	超过最大值的概率
3.0	$4.2 \times 10^{-5}$
3.5	$7.7 \times 10^{-7}$
4.0	$7.4 \times 10^{-9}$

因此，如果我们知道系统可以容忍的最大 DGD，我们就可以通过用最大值与相当于可接收概率的平均值之比来除  $DGD_{max}$ ，推导出等效平均 DGD。

详情请见 ITU-T G 系列建议书增补 39 和 ITU-T G.959.1 建议书，包括对一个概率为  $1 \times 10^{-5}$  的 10 Gbit/s NRZ 应用中最大 DGD 为 30 ps 的计算。

## **PMD 功率代价**

如 ITU-T G 系列建议书增补 39 中所解释的，因接收点（见图 7-3）R 处的 DGD 所引起的功率代价是两个正交极化模式相对功率的函数。因为光缆主极化状态与光源极化的相对位置在变化，这个差距也随时间变化。设定最大的链路 DGD，使在最差功率分配比（两个模式分配相同功率）的情况下最多只能有一个给定的一阶光缆代价。最差情况一阶光缆代价还受传输格式是 NRZ 还是 RZ 的影响。

对 10 Gbit/s NRZ 应用（见附件 I/G.691 和 ITU-T G.959.1 建议书），1 dB 一阶代价容限对应于在 R 点 DGD 的 30 ps 极限。

RZ 情况留待进一步研究。

### **7.1.4.2.2 极化相关损耗（PDL）**

在 ITU-T G.671 建议书中，极化相关损耗被定义为对所有极化状态（SOP）的 SOP 变化引起的最大插入损耗变化值。在有放大的系统中，放大器控制的一个模式是工作于一个恒定的信号功率。信号和噪声都受极化相关损耗的影响。但是，因为噪声是非极化的，所以信号和噪声受到不同的影响。噪声可以被分解为一个与信号平行的分量和一个与信号正交的分量。可以看到，PDL 和光放大的结合效应总是增加正交于信号的噪声分量。此外，随着信号极化由于极化模式色散而改变，正交噪声分量的幅度也随时间改变。这将导致接收机处 OSNR 和 Q 值的降低。此外，波动时间也导致接收机处 OSNR 和 Q 值的衰落，二者都将导致系统性能的损伤。

通过降低每个器件的 PDL 可以减少由每个光器件累积 PDL 造成的系统代价。应该注意，PDL 对系统的影响随着放大器数量的增加而增加。在长距离海缆系统中，因为放大器的数量可达数百个，所以要求极为严谨。通过减少波动和改善平均 Q 值，极化调制或扰模已经显示出可以改善系统性能。

### **7.1.4.2.3 极化相关增益（PDG）**

在 ITU-T G.661 建议书中，极化相关增益被定义为由于在正常工作条件下输入信号极化状态的改变引起的最大增益变化。由于极化相关增益引起的系统代价留待进一步研究。

### **7.1.4.3 由累积增益曲线不平坦所引起的损伤**

由累积增益曲线不平坦引起的损伤与非最佳预加重损伤相关联（见 7.1.4.4）。

#### 7.1.4.4 非最佳预加重损伤

预均衡或预加重可用于 MPI-S 接口处，以减少传播中系统内在线放大器增益偏差和增益倾斜的影响。

预加重采用以下机制来部分补偿放大器增益偏差和增益倾斜：

对将要经历最低在线放大器增益的通道给定 MPI-S 处最大的光功率，而对将要经历最大在线放大器增益的通道给定 MPI-S 处最低的光功率。对每一个波长，最大和最低光功率值之间的差别被称做预加重值。

这样，通道功率预加重实现了对所有通道的系统传输特性进行均衡。但是，每个通道的功率水平不同，在一根光纤中的传播将引入附加代价（见图 7-7）。

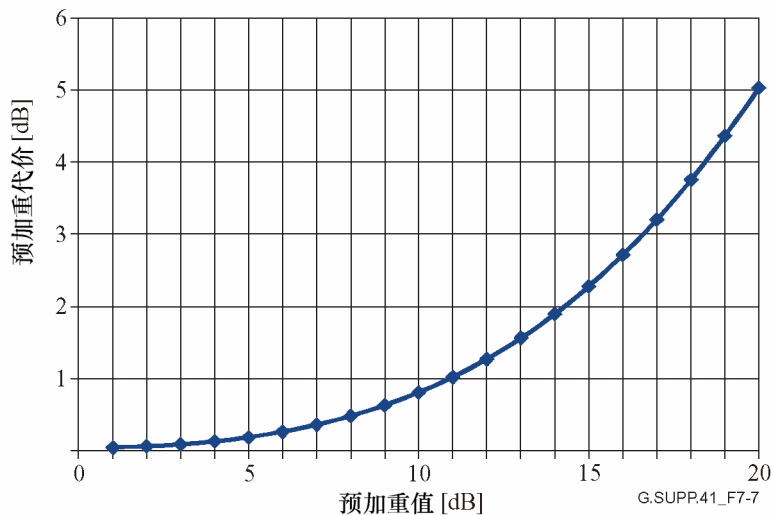


图 7-7—由于预加重调整引起代价的举例

#### 7.1.4.5 由波长误调整引起的损伤

信号波长或所有执行滤波功能的光器件（光滤波器、合波器和分波器）的误调整可能引起一些附加损伤。例如，激光器和相应合波器带宽中心的波长偏移可能会引入造成 Q 因子劣化的附加损耗。

#### 7.1.4.6 由监控引起的损伤

这些损伤与在线路上发送用来监控特定从属设备的光指令有关。例如，在海缆系统中采用的大部分中继器可以用一个低频调制的光信号来询问和应答。这个调制幅度与数据调制幅度相比很低，对信号性能干扰尽可能小。在线路 Q 值估算中，应评价并考虑由于这个附加调制引起的损伤。

#### 7.1.4.7 制造与环境损伤

在制造过程中，我们无法保证所有制造的设备表现得完全一样，或换句话说，展现相同的性能。因此，应该预先分配一些损伤给因这些差别引起的传输性能变化。这一项还应考虑到系统中可能发生的环境条件变化（例如温度和压力）。

### 7.1.5 终端传输设备非理想性引起的损伤

终端传输设备引起的损伤通常用发射机和接收机背靠背配置测试得出的 Q 因子表示。要计算整个段的真实 Q 因子，必须要考虑发射机和接收机的真实特性。可采用以下公式：

$$\frac{1}{Q_{\text{段落}}^2} = \frac{1}{Q_{\text{线路}}^2} + \frac{1}{Q_{TTE \text{ 背靠背}}^2} \quad (7-13)$$

### 7.1.6 系统余量

一个海缆系统设计寿命为 25 年。要达到这个设计寿命要求满足一定的余量。

#### 7.1.6.1 修理操作引起的损伤

海缆线路布放之后，每次海缆修理需要增加一些附加海缆。这些附加海缆导致跨段损耗增加并因此导致 Q 因子劣化。

通过估计系统寿命期间所需要的修理次数来估算修理操作余量。通常采用以下设定：

- 陆地光缆修理：每 4 km 修理 1 次，至少修理 2 次；
- 浅水修理：每 15 km 修理 1 次，最少修理 5 次；
- 深水修理：每 1000 km 修理 1 次。

每次修理将增加一段与被修理处海水深度成正比的海缆。通常，增加的长度在海水深度 1.5 倍到 2.5 倍之间。

要计算修理操作所需要的余量，总的附加光缆长度是按所有预计的修理都加上后的最差情况来估算的。另一个 Q 因子是对初始线路总长度与因修理增加的最大额外光缆长度之和来计算的。这个 Q 因子与平均 Q 因子之差对应于分配给修理的余量。

#### 7.1.6.2 设备老化引起的损伤

设备老化引起的损伤主要是因为光纤。事实上，它的衰耗将因为与环境有关的物理影响而慢慢增加。通常考虑其中两个：

- 光纤中氢气的影响：该劣化通常按 25 年后大约 0.003 dB/km 的附加衰耗来近似。
- 辐射的影响：光纤衰耗对高能量辐射（γ 射线）敏感，其来源可能与沉积物、海水或人造物质源（垃圾填埋场）有关。25 年后的损耗增加估计小于 0.002 dB/km。

采用与修理操作相同的方法（见 7.1.6.1），计算一个带有这些附加衰耗的 Q 因子，并与平均 Q 值比较，得到设备老化所需的余量值。

#### 7.1.6.3 一些元件可预见故障引起的损伤

由于对附加设备进行海上操作更换和修理的高成本和高复杂性，最敏感的元件都是冗余的，以尽可能避免去对其进行操作。要考虑的主要故障是中继器的泵浦源失效。泵浦源冗余避免了一个泵浦源失效时失去输出功率，但这样一个事件总会造成输出功率和噪声指数的劣化，导致 Q 因子降低。

考虑这种情况的附加余量将取决于泵浦源的可靠性和冗余设置。

#### 7.1.6.4 未分配余量

预备余量是考虑了寿命终止条件下所有修理余量后剩下的余量。为了加强对系统的信心或为了可能发生的不可预见系统升级保留余量，大多数情况下购买者会要求这些余量。

#### 7.1.7 结论

光功率预算表描述了如何满足系统性能。附录 A/G.977 中有一个推荐的光功率预算表模板。

在采用光放大器的海底系统（ITU-T G.973 和 G.977 建议书）中，仅在海缆系统电光接口处的终端传输设备中进行再生。在发射和接收之间，通道将承受诸如光噪声积累、传播（光纤非线性、色度色散等）引起的损伤。因此，建议在海缆数字线路段级别建立光功率预算。由于一些系统可能包括数个有不同损伤的海缆数字线路段，进一步建议对每个海缆数字线路段建立一个光功率预算。

进一步考虑到，在一些情况下（例如有 WDM-BU 时），两个路由（干线和分支）可能会承受不同的损伤：在此情况下，应该为每个路由建立一个分别的功率预算，而且应考虑最差情况。

此外，在一个多登陆点系统设计已经按照光信噪比劣化和中继器间隔对最长海缆数字线路段进行优化的情况下，额外余量对较短的情况也可以有效。这些额外余量通常被称为未分配的供应商/分段余量，应该在功率预算表中明确地报告出来。

供应商应该提供支持功率预算表有效性的足够信息，特别是，但不仅限于：

- 总传输距离和跨段长度值；
- 传送波长的数量；
- 发射机的消光比；
- 中继器标称输出功率值；
- 标称噪声指数值；
- 接收机的光带宽；
- 终端背靠背 Q 因子规格；
- 前向纠错码特性（包括 FEC 前 BER 和 FEC 后 BER 曲线）。

供应商还应该明确是否采用任何设备来改善传输性能，例如在发射机/接收机端的极化扰模器和/或填充通道，或在海底设施中的增益均衡滤波器、倾斜均衡器和/或斜率均衡器。

## 7.2 色散的考虑

色度色散是群速度对波长的从属性，导致了光信号的所有频谱成分将以不同的速度传播。这会引入脉冲展宽并且可能成为主要损伤。根据系统设计，特别是波长数量（WDM 系统），采用不同方式对色散进行管理，以限制脉冲展宽和其他传播效应，是重要的。一般来说，这种管理会产生一个色散分布图，它显示出沿整个链路是如何管理色散的。

### 7.2.1 色度色散引起的脉冲展宽

单模光纤中的色度色散是材料色散和波导色散的组合，它助长了数字信号中的脉冲展宽和失真。主要原因是在光源光谱中存在不同波长。每个波长沿光纤有不同的相位时延和群时延，所以造成输出脉冲在时间上的失真。

### 7.2.2 色度色散分布

如 ITU-T G973 建议书中对单通道系统和 ITU-T G977 建议书中对 WDM 所解释的，色散分布图是描述一个系统色度色散特性的实用工具。积累色散被定义为终端发射机输出与光通路其他任何一点间所测量到的色散。色散分布图是对给定工作波长的本地色度色散作为光发射机到光接收机距离函数进行的描绘。色散分布图将主要取决于系统类型（SWS 或 WDMS）。

对一个 SWS，典型的具有接近零但不为零的低负色度色散的光纤被用在链路的主要段落，而具有较高正色度色散的光纤被用在链路对应为色散补偿的一些段落。这种管理的目的是要保持整个链路的累积色散接近于零，而同时保持本地色度色散不为零。

对一个 10 Gbit/s 的 WDMS，典型的具有低负色度色散但远离零（大约  $-2 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ）的光纤被用于大多数段落（有时可以采用两种类型的光纤：段落起始端采用大有效面积光纤，末端采用低斜率光纤），而具有较高正色度色散的光纤有规则地用于补偿段落。这种管理的目的是为了保持链路总的累积色散接近于零，而同时又要保持本地色度色散较高且不为零，以限制四波混频和交叉相位调制。

对一个具有大量 LOC 的 10 Gbit/s WDMS（图 7-8），典型的具有大色度色散的光纤被用于链路沿线所有的段落。段落的一部分通常是具有正斜率的正色散（通常具有非常大的有效面积），而剩余部分是具有负斜率的负色散（通常具有非常小的有效面积）。

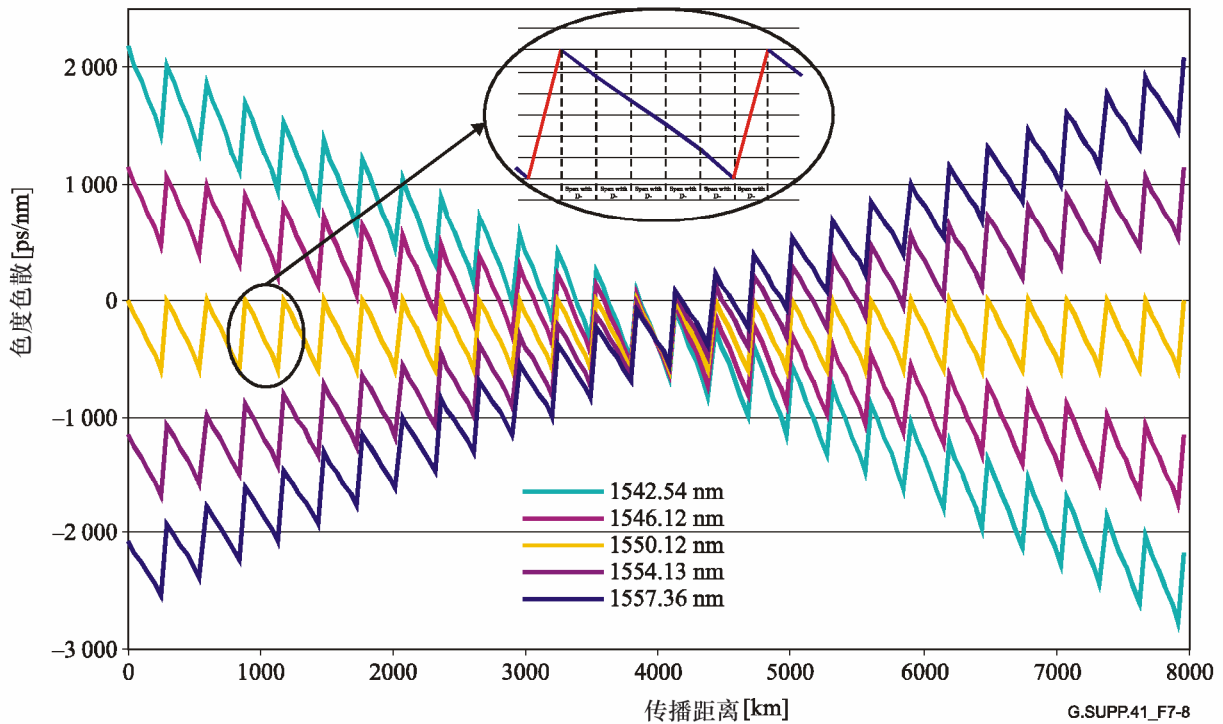


图 7-8—采用以1550.12-nm为中心的40波长WDM系统设计的  
163跨段海缆WDM系统的典型色度色散分布图

### 7.2.3 色散管理的实施

每个光段落色散分布图的设计必须符合传输要求（非线性效应限制、脉冲展宽等）。

每个波长的剩余色散可以通过在海缆终端传输设备的发送（预补偿）和/或接收（后补偿）侧采用一定长度均衡光纤或其他无源色散补偿装置来补偿。通常，对单通道系统只在接收端进行补偿，对 WDM 系统在发送和接收端都进行补偿。

系统设计应该考虑所有引起偏离规划色散分布的随机和系统的原因，包括但不限于：

- 零色散波长、色散以及规定的 DSF、NDSF、DCF、NZDSF、CSF、负斜率光纤、EDF 等的色散斜率在测量中的不确定性；
- 基本光缆段组装中光纤组部分重新安排及“随意”选择所引起的不确定性；
- 光缆和压力容器中光纤的温度、压力和张力系数的不确定性；
- 色散测量时光纤的确实温度和张力的不确定性；
- 已安装光纤温度的不确定性；
- 老化；
- 修理操作。

## 8 前向纠错

本节留待进一步研究。

## 9 可靠性的考虑

海缆网络要求可靠和牢固的光纤系统，以避免昂贵的水中场地修理。此外，考虑到系统寿命期间技术可能会变化，维护机制要在系统寿命初始时建立起来，以保证合同规定的系统寿命期间可能的修理。

系统寿命期间发生的失效可能是由于内部故障（分路故障、光纤衰耗增加、中继器失效、卡板失效等）或外部侵扰（例如水中的锚钩和渔业活动及陆地上的操作不当）。

### 9.1 可靠性要求

可靠性被定义为一个元件或一个子系统在给定时间内的特定条件下完成所要求功能的概率。它可以通过不同的数值来表示：

- 失效次数（FIT）： $10^9$  装置每小时的失效次数。此数值与温度相关，应在工作温度下记录。从统计观点看，此定义等效于：每个装置  $10^9$  小时失效的次数。
- 平均失效间隔时间（MTBF）：2 次相邻失效间的预期时间。

应该注意，这些统计数值对个别装置没有意义，仅提供性能概率，而不是绝对期望。

首先，总体可靠性约束用来估计每个子系统允许的可靠性，然后用于每个元件。要求一个元件对给定系统寿命的可靠性将被转换成失效率（FIT）或 MTBF。

对一个系统或子系统，规定了以下数值：

- 平均修复时间（MTTR）：修复一个失效期望所需的时间。
- 宕机 =  $MTTR/MTBF$ ：通常以每年网络无法完成其功能的分钟来表示的时间量。
- 网络可用性（%）=  $(\text{总时间} - \text{宕机}) / \text{总时间} * 100\%$ 。

### 9.2 内部故障

为了在海缆系统中达到可靠性目标（使内部故障最少），并建立一个在整个系统寿命期内可实行的维护制度，应确定在元件、子系统和系统级别的故障根本原因。因此，在系统中采用的所有元件的可靠性必须对应合同规定的系统寿命（通常为 25 年）进行论证。预期的可靠性经常是基于 ITU-T G.911 建议书、IEC 62380、MIL-HDBK-217 [7]、Telcordia SR 332 [8] 以及元件供应商的数据。

#### 9.2.1 失效率分析

##### 9.2.1.1 早期致命

在寿命初期工作条件下，海缆系统中采用的单元和元件表现出高的失效率，然后随时间降低。这个短暂的时期被称做早期致命期（早期致命：通常为 1 到 2 年）。它主要是因为非理想的制造过程（欠缺的原材料、不当的操作、污染的环境、电源浪涌、低效的监控或不恰当的运输和处理）。应该注意，早期致命与整个一批装置有关，不能反映一个单个装置的特性。在特别情况下，单个装置或者不合格，或者通过测试，而很多单元的失效率将符合一个递减的曲线。



### 9.2.1.2 随机失效

早期致命之后的时期表现出较低的失效率。这个时期因失效率几乎不变而被称为有用寿命，直到最后阶段开始（耗尽期）。不变的失效符合随机过程，甚至通常采用高度控制过程都无法检测到。

### 9.2.1.3 老化

当系统和相关元件开始在使用中耗尽时，最后一个时期来到了。失效可能是由于老化、材料疲劳、过度使用、环境腐蚀、不适宜的环境或累积损伤所引起。

习惯上将系统寿命期间的失效率特性描述为如图 9-1 中的一个浴盆曲线。

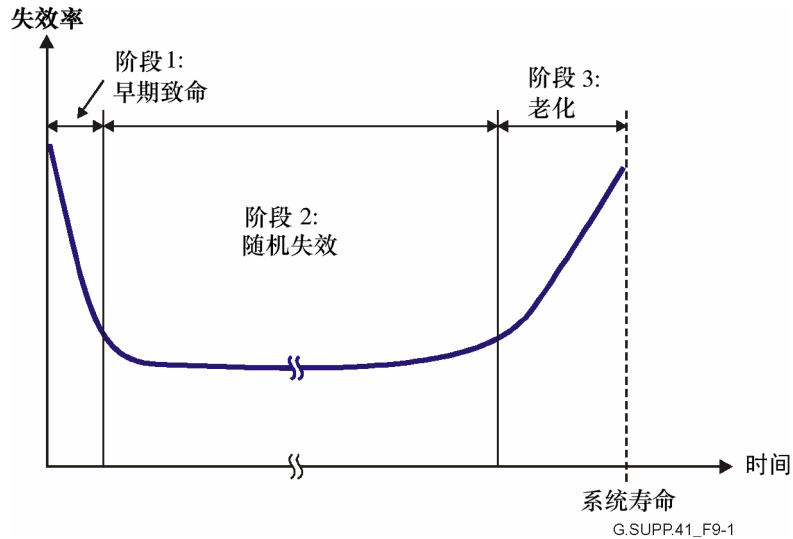


图 9-1—系统寿命期间典型失效率特性

## 9.2.2 水中装置可靠性

在可靠性方面，水中装置比陆地装置更严格，因为 MTTR 更大。典型的对水中装置修复的 MTTR 值大约是 2 周，而陆地是 2 小时。从可靠性的观点看，这就是为什么中继器中使用的激光泵浦源的 FIT 对系统是一个敏感的问题。例如，陆地系统网络中放大器的典型 FIT 在 1000 到 10 000 之间，与海缆放大器相比，它是 10 到 100 之间（大约低 2 个数量级）。

设计超级可靠海缆系统意味着在系统寿命期间一个耗尽失效概率必须几乎不存在，而且随机失效必须尽可能减小。

中继器是最关键的设备，因为它们包括电、光和光电元件。除此之外，必须牢记任何内部损坏将直接影响传输质量，不管它的原因是什么。因此，必须小心谨慎以防止和减少失效的风险。特别是，一根光纤上的光失效一定不能影响其他光纤上的系统性能。ITU-T G.976 建议书中详细描述了光缆安装之前和期间所要求的测试。

i) 一般要求

通过大量筛选元件、严格控制原材料、牢靠和简单的设计、小心的制造过程和全面的质量控制，可以得到低的 FIT。

显而易见，为了以可预见和可理解的方式加速达到失效，需要一个测试条件。还应该认识到，一个系统包括很多不同的制造过程和组装步骤，每一个都应该进行测试。每个失效都应归结于一个单独的失效机制，并且不应与测试装置和测试步骤自己之间潜在的相互作用有关联。出于经济目的和技术可行性，可靠性要求必须采用加速测试。

ii) 冗余

通常采用冗余配置来达到所要求的可靠性并相应降低子系统的 FIT。例如，冗余泵浦激光器通常被用来保证放大器的可靠性目标。

9.2.3 可靠性计算举例

对一个具有 4 重冗余泵浦源机制设计的中继器，假设 25 年寿命期内每个泵浦源的失效概率如下（假设失效率恒定）：

$$p = 1 - e^{21.9 \times 10^{-5} FIT} \tag{9-1}$$

在式 9-1 中假定所有 4 个泵浦源的 FIT 值（对  $10^9$  装置定义）相等。式 9-1 中的数值  $21.9 \times 10^{-5}$  来自：

$$\frac{25 \text{年} \times 365 \text{天} \times 24 \text{小时}}{10^9 \text{装置}} = 21.9 \times 10^{-5} \text{小时/装置} \tag{9-2}$$

图 9-2 显示了一个典型的只有 1 对光纤的横跨大西洋光缆系统（150 个中继器）25 年系统寿命期内泵浦源的失效次数。一个海缆激光器泵浦源典型的 FIT 假设为 25。泵浦源失效次数的估计值为  $p$  和泵浦源总数的乘积。

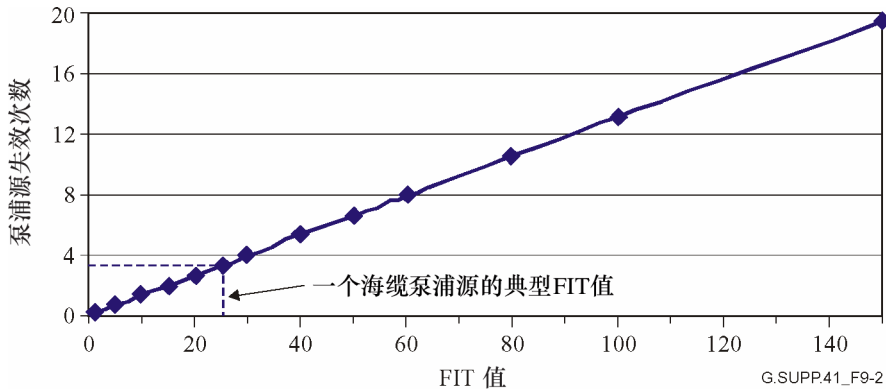


图 9-2—对一个典型横跨大西洋链路泵浦源失效次数的估计，该链路包含1对光纤和 150个中继器，每个中继器有4个泵浦源

这些失效随机分布在传输线路上，这意味着在受影响的中继器上或传输代价上都不会有迹象。

假设一个激光器泵浦源失效的概率为  $p$ ，泵浦源的总数为  $N$ （中继器数量的 4 倍），我们可以表示在整个系统中确实出现一次失效的概率。

用一个随机变量  $X_i (X_1 \leq X_i \leq X_N)$  来表示每个泵浦源。这样，我们有  $N$  个遵从以下定律的随机变量：

- i) 泵浦源  $X_i$  不正常 ( $X_i = 0$ ) 的概率  $p(X_i = 0) = p$ ;
- ii) 泵浦源  $X_i$  工作 ( $X_i = 1$ ) 的概率  $p(X_i = 1) = 1 - p(X_i = 0) = 1 - p$ 。

估计泵浦源失效的次数为  $N \cdot p$  (图 9-2) 且偏差为  $Np(1-p)$ 。这个概率定律遵从二项式定律，且在系统寿命期内确实有  $n$  个泵浦源失效的概率为：

$$P(n, N) = \frac{N!}{(N-n)!n!} p^n (1-p)^{N-n} \quad (9-3)$$

假设我们在一个中继器中已经有一个泵浦源失效了，在同一个中继器中有第二个泵浦源失效的概率为：

$$P_2(N) = P(1,3) = 3p(1-p)^2 \quad (9-4)$$

采用与图 9-2 中相同的典型系统并采用式 9-4，这个概率导致了在图 9-3 中表现出来的在同一个中继器中第一和第二次失效之间的 MTBF 值。对一个等于 25 的典型 FIT 可得到 MTBR 大于 1500 年！

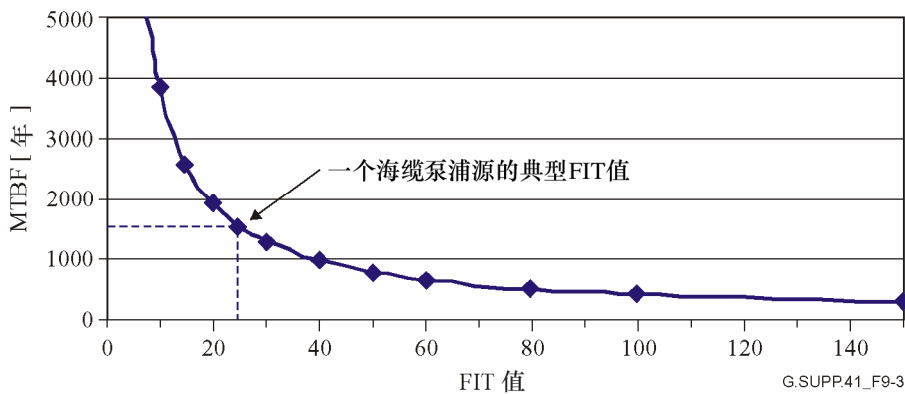


图 9-3—在一个典型横跨大西洋链路中同一个中继器的第二个泵浦源失效的 MTBF，该链路包含 1 对光纤和 150 个中继器，每个中继器有 4 个泵浦源

### 9.3 外部故障

外部故障通常发生在海缆段。事实上，失效的主要原因是侵扰，诸如海底捕鱼、拖网捕鱼、海流、地质事件（地震和火山）以及由过载引起的热失效。几乎 90% 的失效是渔业活动和船锚损坏造成的。要保护海缆免受这些各种因素的伤害，除了海床条件不允许掩埋的岩石区域外，在浅水中可以掩埋水中装置。此外，海缆路由的选择尽可能避开地质危害。

当水中装置失效时，必须要进行海上操作，要动用海缆船来进行修理。海缆损坏的段落被切除、回收并用船上备用品来替换。平均修理时间 (MTTR) 估计为 1 到 3 周，取决于故障位置、海水深度、是否有修理船、损坏的根本原因以及会极大减缓海上操作的天气。

为了将这些故障对业务的影响降到最低，当可能时，应通过备用路由来增加网络的总体可用性（海缆网络拓扑详见第 6 节）。当水中装置发生故障导致传输受损时，业务通常绕行到保护路由上。

## 9.4 故障定位

大多数情况下，一个仔细的设计并不能防止非预期失效。应该用快速的诊断和排除故障来降低业务中断。因此，应监控关键的参数（采用一个监控机制），并用来检测突发或渐进失效及它们的位置。

如 ITU-T G.976 建议书中详述的，根据采用的设施（中继器监控或外部措施，如 OTDR、相干 OTDR、导体的电阻或电容测试等），可以从终端站进行一些在线和中断业务的测试。这些测试被用来精确查找并确定故障类型。通常，OTDR 被用来检查位于 TTE 和第一个水下中继器之间海缆的质量，COTDR 则用于长距离中继系统故障定位。

修理期间，可以从船上采用一个电极技术（如果可用）来进行海缆路由的定位。它能及时地恢复海缆故障段或水下设备。

## 10 可升级性的考虑

本节留待进一步研究。

## ITU-T 系列建议书

A系列	ITU-T工作的组织
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
<b>G系列</b>	<b>传输系统和媒质、数字系统和网络</b>
H系列	视听和多媒质系统
I系列	综合业务数字网
J系列	有线网和电视、声音节目和其他多媒质信号的传输
K系列	干扰的防护
L系列	线缆的构成、安装和保护及外部设备的其他组件
M系列	电信管理，包括TMN和网络维护
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、电话装置、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及安全
Y系列	全球信息基础设施、互联网的协议问题和下一代网络
Z系列	用于电信系统的语言和一般软件问题