

SUBMARINE FIBER OPTIC
CABLE ENGINEERING

海底光缆工程

叶银灿 姜新民 潘国富 江伟 等著

我国第一部海底光缆工程专著



海军出版社

海底光缆工程

HAIDI GUANGLAN GONGCHENG

叶银灿 姜新民 潘国富 江 伟 等 著

海洋出版社

2015年·北京

图书在版编目(CIP)数据

海底光缆工程 / 叶银灿等著. -- 北京: 海洋出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5027-9253-4

I. ①海… II. ①叶… III. ①海底—光纤通信—工程施工 IV. ①TN913.332

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第234049号

策划编辑: 项 翔
责任编辑: 李宝华
责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷

开本: 887mm×1092mm 1/16 印张: 18.75

字数: 341千字 定价: 98.00元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序 言

通信技术与人类社会的发展息息相关，从古至今人类从未停止过对它探索的脚步。20世纪60年代光纤通信技术在全球问世以来，引发了通信领域里程碑式的革命，光纤通信迅速成为现代通信网的主要传输手段。1988年，世界上第一条跨洋海底光缆建成，标志着国际通信进入了一个全新的历史时期。海底光缆通信以其容量大、通信质量高、成本低和安全可靠等优势，已经成为当今国际间通信和信息传递最为重要的手段和途径，并且成为推动世界经济繁荣、人文交流和社会发展的力量之一。

我国参加投资建设的首条国际海底光缆——中日海底光缆系统于1993年12月建成投入使用。历经20余年的发展，我国的国际海底光缆通信系统从无到有，逐步形成了连结世界各主要国家的海底光缆通信网，为满足国际通信的迅速发展提供了可靠的网络基础，并且成为国际海底光缆通信网络大家庭的重要成员。

沿海地区是我国经济发达与高速增长地区，而海岛又是海陆交通枢纽和海防前哨。自20世纪70年代以来，我国的陆—岛与岛—岛间海底通信电（光）缆的建设取得了长足的发展和进步，对于推动沿海地区国民经济信息化、促进沿海社会经济发展、巩固近海国防均发挥了重大作用。

《海底光缆工程》一书的作者们亲历和见证了我国海底光缆工程建设事业的发展历程，该书是国内首部海底光缆工程的专著，亦是他们多年实践的总结。该书内容丰富，介绍了海底光缆通信的基本概念和相关的海洋自然地理环境与海洋法知识，回顾了海底通信发明与发展历程，阐述了我国已建海底光缆系统的总体布局与特点，总结了国内外在海底光缆工程的场址选择、路由勘察、铺设施工、系统维护等方面的理论和实践经验，并就海底光缆工程的技术发展与市场前景做了展望。该书将对我国在该领域的长远发展和科技进步起到积极的推动作用。

中国科学院院士：



2015年2月

前言

自1851年第一条海底电报电缆问世以来,世界海底通信走过了160余年的发展历程。海底通信的发明与发展,凝聚着人类智慧和科学技术的结晶,尤其是光通信技术的应用引发了通信与信息领域革命性的变化。1988年,世界上第一条跨洋海底光缆系统(TAT-8)建成,标志着国际通信进入了一个崭新的历史时期。海底光缆以其容量大、通信质量高、成本低和安全可靠等优势,不仅完全取代了原有的海底同轴通信电缆,也逐步取代了卫星通信,迅速成为世界各国最主要的通信手段。据不完全的资料统计,迄今全球在运行的国际海底光缆有230余个系统,总长度超过 $105 \times 10^4 \text{ km}$ 。目前,海底光缆通信已占到了全球国际通信业务量的90%以上,成为当今世界各国“互联互通”进行通信和信息传递最为重要的手段和途径,给世界经济繁荣、人文交流和社会发展带来了无法估量的推动力量。

我国参加投资建设的第一条国际海底光缆——中日海底光缆系统,于1993年12月建成投入使用。历经20余年的发展,先后已建成连结我国大陆的有中日、中韩、环球、欧亚3号、中美、亚太2号、东亚—城市间、亚美、跨太平洋直达、东南亚—日本等10大海底光缆系统。除了积极参加国际海底光缆网络的建设外,我国还在世界其他海底光缆系统中购买了容量,以连接与我国之间没有直达光缆的国家和地区。我国的国际海底光缆通信系统从无到有,逐步形成了连结世界各主要国家的海底光缆通信网,为满足国际通信的迅速发展提供了可靠的网络基础,并且成为国际海底光缆通信网络中的重要一员和亚太地区国际通信一个重要的转接枢纽。

我国海域辽阔,海岸线漫长,岛屿星罗棋布。沿海地区是我国经济发达与高速增长地区,而海岛又是海洋经济的前沿基地,是海陆交通枢纽和海防前哨。据1990年以来国家海洋局及其下属各分局等不完全的资料统计,我国近海累计建成的海底通信光(电)缆共200余条,总长度逾2 300 km。我国近海陆—岛与岛—岛间海底通信光缆的建设,对健全国内通信网络、推动沿海地区国民经济信息化和巩固国防具有重大的战略意义,在促进沿海社会经济发展、扩大对外开放与交流和维护国家权益等方面发挥着重要作用。

本书介绍了海底光缆通信的基本概念和相关的海洋自然地理环境与海洋法知识,回顾了海底通信发明与发展的历程,分析了我国已建海底光缆系统的总体布局与特点,较为系统地阐述与总结了国内外在海底光缆工程的场址选择、路由勘察、

铺设施工、系统维护、运行安全和信息化管理等方面的理论和实践经验，并就海底光缆工程的技术发展与市场前景做了展望。期望本书的出版对我国在这一领域的长远发展和科技进步能起到积极的推动作用。

全书共10章，其中第一章“绪论”由姜新民、江伟、陈亮、王建平撰写；第二章“海洋自然地理环境及海域疆界划分”由叶银灿、来向华撰写；第三章“我国已建海底光缆总体布局及特点”由叶银灿、潘国富撰写；第四章“海底光缆工程选址桌面研究”由潘国富、叶银灿撰写；第五章“海底光缆工程勘察”由来向华、叶银灿撰写；第六章“海底光缆施工”由赵波、徐容撰写；第七章“海底光缆维护”由徐容、薛蓓蓉、赵波撰写；第八章“海底光缆的安全性”由陈小玲撰写；第九章“海底光缆工程管理与维护监控信息系统”由陆晓鸣、江伟、陈江峰、张喆撰写；第十章“海底光缆工程技术的发展与市场前景展望”由姜新民、高军诗、叶银灿、赵波撰写。本书的附录1“海底通信电缆施工船简介”由姜新民、赵波编撰，附录2“专用名词术语中英文对照表”由叶银灿、姜新民编撰；本书的附图由郭芬芬编制；本书的插图、照片的计算机处理以及参考文献的整理、校核工作由田双凤、郭芬芬、何欣等完成。潘国富、江伟参加了本书的审校工作，全书由叶银灿、姜新民负责统稿。

我国著名海洋学家、中国科学院院士苏纪兰教授，在百忙中为本书作序。在本书撰写过程中，还得到中英海底系统有限公司蔡海民副总经理和国家海洋局第二海洋研究所、中国海底电缆建设有限公司、中国电信上海分公司等单位相关负责人的热情支持和协助，李全兴研究员对本书的撰写提出了宝贵意见和建议，在此一并致以谢忱！

本书在撰写过程中参考引用了大量的科技论文、著作、现行技术标准等资料，在此特向各位被引用文献的作者表示衷心的感谢！

本书的撰写出版，实属探索和尝试，存在的不妥、错漏之处在所难免，敬请读者批评指正！

叶银灿
2015年3月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 海底光缆通信基本概念	1
一、光纤结构与光传输特性	1
二、海底光缆的结构与类型	4
三、海底光缆通信技术特点	7
第二节 海底光缆系统构成及组网方式	7
一、海底光缆系统构成	7
二、海底光缆系统组网方式	13
第三节 海底通信工程的发展历程	15
一、海底电报电缆的发明与发展	15
二、海底同轴通信电缆的发明与发展	17
三、海底光缆通信的发明与发展	20
第二章 海洋自然地理环境及海域疆界划分	25
第一节 地球表面的海陆分布	25
第二节 中国近海自然地理概况	26
一、中国近海地理位置	26
二、海底地形地貌	28
三、海底沉积物	31
四、气候要素与水文环境	34
五、海洋灾害	39



第三节 海洋法与海域疆界划分	43
一、国际海洋法公约	43
二、中国的领海制度	47

第三章 我国已建海底光缆总体布局及特点 49

第一节 国际海底光缆系统	49
一、国际海底光缆系统的建设情况	49
二、国际海底光缆系统的布局及特点	58
第二节 国内海底光缆系统	63
一、国内海底光缆系统的建设情况	63
二、国内海底光缆的分布特点	66
第三节 海底光缆的弃置原因及方案	67
一、弃置原因	67
二、弃置方案	68
三、我国海底光缆的弃置情况分析	69

第四章 海底光缆工程选址桌面研究 71

第一节 海底光缆工程选址原则及工作程序	71
一、工程选址原则	71
二、工程选址程序	72
三、工程选址桌面研究报告	74
第二节 海底光缆工程选址实例	76
一、中日海底光缆系统	76
二、中美海底光缆系统	77
三、亚太2号海底光缆系统	81



四、城市间海底光缆系统.....	84
五、跨太平洋直达海底光缆系统.....	85
六、亚洲内环海底光缆系统.....	87
七、台湾海峡光缆1号.....	89
八、亚太海底光缆系统.....	91
九、舟山陆—岛和岛—岛间海底光缆.....	93

第五章 海底光缆工程勘察..... 97

第一节 勘察目的与内容.....	97
一、勘察目的	97
二、勘察内容.....	97
第二节 勘察程序与技术方法	108
一、勘察程序.....	108
二、勘察技术方法.....	109
第三节 海底光缆路由条件评价与成果报告编制.....	128
一、路由条件评价.....	128
二、成果报告及图件编制.....	131

第六章 海底光缆施工..... 133

第一节 海底光缆施工设备.....	133
一、海缆船.....	133
二、埋设设备.....	142
第二节 海底光缆的施工技术.....	151
一、装缆.....	151
二、铺设施工.....	152



第七章 海底光缆维护..... 165

第一节 国际海缆保护组织与相关法律.....	165
一、国际海缆保护委员会.....	165
二、保护国际海缆的相关法律.....	169
三、国际海缆维护的运作模式.....	173
第二节 海底光缆故障判断和测试.....	175
一、海底光缆故障种类.....	175
二、海底光缆故障定位方法.....	176
第三节 海底光缆故障修理.....	179
一、海底光缆故障修理程序.....	179
二、海底光缆的打捞技术.....	182
三、海底光缆故障修理的测试技术.....	190
四、海底光缆的接续技术.....	192

第八章 海底光缆的安全性..... 197

第一节 海底光缆安全的影响因素.....	197
一、海洋开发活动相关的人为因素.....	198
二、自然因素.....	205
三、其他人为因素.....	209
第二节 保障海底光缆安全的对策和措施.....	211
一、健全保护海缆的法律法规.....	211
二、优化工程选址.....	211
三、完善工程设计.....	212
四、规范施工程序.....	213
五、加强工程管理和安全应急措施.....	213

第九章 海底光缆工程管理与维护监控信息系统	215
第一节 地理信息系统的类型与构成	215
一、地理信息系统类型	215
二、地理信息系统构成	216
第二节 海底光缆工程管理信息系统	218
一、系统建设目标	219
二、空间参照系统及地图投影	219
三、系统建设技术路线	223
四、地理空间数据准备	224
五、系统主要功能设置	225
六、案例分析	228
第三节 海底光缆维护监控系统	232
一、系统建设目标	232
二、船舶动态监控模式	233
三、海底光缆维护监控系统集成的主要技术	234
四、海底光缆维护监控系统的原理与构成	237
五、海底光缆维护监控系统的主要功能	240
第十章 海底光缆工程技术的发展与市场前景展望	243
第一节 海底光缆技术发展趋势	243
一、调制解调技术及其发展趋势	243
二、前向纠错技术发展趋势	245
三、光纤技术发展趋势	245
第二节 海底光缆工程勘察与施工维护技术发展动态	246
一、海底光缆工程勘察技术发展趋势	246



二、海底光缆施工技术方法发展趋势..... 248

第三节 海底光缆通信市场前景展望..... 252

一、海底通信的发展与经济的繁荣紧密相关..... 252

二、全球经济一体化为海底光缆发展开拓了广阔的前景..... 253

三、通信与信息新媒体的出现为海底光缆发展增添强劲动力..... 254

参考文献..... 259

附录1 海底通信电缆施工船简介..... 263

附录2 专用名词术语中英文对照表..... 275

附图1 全球海底光缆系统分布图..... 285

附图2 西北太平洋地区海底光缆系统分布图..... 287

第一章 绪论

第一节 海底光缆通信基本概念

一、光纤结构与光传输特性

1. 光的传播特性

光在同种均匀介质内沿直线传播，当一束光线射到两种不同介质的分界面时会发生反射和折射现象。一部分光线被反射回原介质，称为反射光，另一部分射入新介质的光线则称为折射光，入射光与界面法线的夹角称为入射角。但当入射角大于某一临界值后，就不再发生折射现象，光线被介质分界面全部反射，这种现象称为全反射。全反射现象只在光线从折射率大的介质射向折射率小的介质时才会发生。利用光的全反射作用，就可以实现光信号在光纤中的传输。

2. 光纤的结构

光纤的典型结构是多层同轴圆柱体，自内向外由纤芯、包层和涂敷层3部分组成，如图1-1所示。

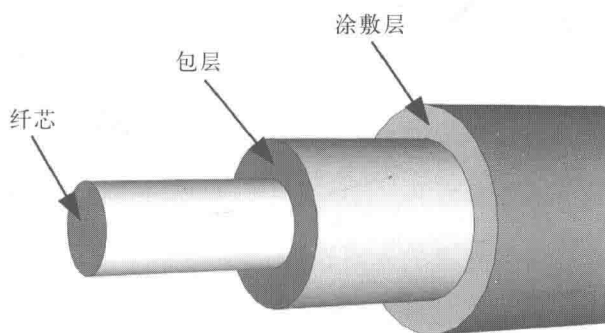


图1-1 光纤结构示意图

目前用于通信的光纤主要是石英系光纤，其主要成分是高纯度石英玻璃，即二氧化硅(SiO_2)。为满足全反射的条件，要求纤芯的折射率比包层稍高，因此通常在石英中掺入折射率高于石英的掺杂剂，制作光纤的纤芯。同时将折射率较低的材料掺杂进



石英,作为包层材料。

光信号主要在纤芯内传输,包层为光的传输提供反射面和光隔离,并起一定的机械保护作用。光纤的光学特性及传输特性主要由纤芯和包层组成的裸光纤决定。涂覆层则用于保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤。

3. 光纤的传输特性

衰减和色散是影响光纤传输性能的两个重要参数。

(1) 衰减

衰减是指光在光纤中传播时,光信号功率随着传输距离增长的同时,按照指数规律减少的现象。光纤的衰减参数很大程度上决定了光纤通信系统内中继距离的长短。

造成光信号功率衰减的原因主要有3类,即吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。

①吸收损耗。是指由于光纤本身材料对光能量的吸收造成的损耗,可分为本征吸收和杂质吸收。前者是由纯石英引起的损耗,后者是由掺杂的杂质引起的损耗。

②散射损耗。是指光纤在加热制造时,熔融态石英玻璃分子的热扰动造成材料内部密度的不均匀,从而引起折射率的起伏,并进一步造成光在传输过程中发生散射现象而造成的损耗。

③辐射损耗。光纤因外力作用而产生弯曲后造成光能量泄露到包层,由此产生的损耗通常称为辐射损耗。在光纤制造过程中,有时会在其表面模压一层压缩护套,当光纤受到外力而弯曲时,护套产生变形,但光纤依旧保持准直状态。

(2) 色散

色散是指光信号在光纤中传播时发生的脉冲展宽现象。在光纤通信系统中,当色散累积到一定程度后将导致前后脉冲相互重叠,形成码间干扰,造成光信号失真。光纤色散限制了光纤通信传输的带宽和距离。

光纤的材料、波导结构、模式结构以及光信号结构等都是造成光纤色散的起因。按照不同的起因,色散一般分为材料色散、波导色散、模式色散和偏振模色散。通常情况下,多模光纤以模式色散为主,而单模光纤以材料色散和偏振模色散为主。

4. 光纤的分类及海底光缆的光纤选型

光纤的分类方法有多种。按照光纤的材料可分为石英系光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层石英芯光纤、全塑料光纤;按光纤的折射率分布情况可分为阶跃型光纤和渐变型光纤;按照光纤的传输模式可分为多模光纤和单模光纤。

根据国际电信联盟远程通信标准化组织(ITU-T)的建议,考虑到登陆站的设备、光信号传输长度和成本等因素,海底光缆一般会采用以下几种类型的光纤。



(1) G.652 光纤

G.652 光纤又称标准单模光纤。G.652 光纤的特点是当其工作波长在 1 310 nm 时, 光纤的色散值为零, 但每千米的衰减值却较大, 约为 0.3~0.4 dB/km; 当其工作波长在 1 550 nm 时, 衰减值达到最小, 但该波段的色散值较高。目前, G.652 光纤已得到广泛应用。

(2) G.654 光纤

G.654 光纤又被称为截止波长位移单模光纤, 可以视为 G.652 光纤的改进型。当其工作波长在 1 310 nm 处时色散值为零, 在 1 550 nm 处, 它的色散值和 G.652 光纤一致。但是在 1 550 nm 处的每千米衰减值相比 G.652 光纤还要更低, 达到 0.2 dB/km 以下。G.654 光纤也被称为 1 550 nm 损耗最小的单模光纤。

(3) G.655 光纤

G.655 光纤称为非零色散位移单模光纤, 是一种改进的色散位移光纤。G.655 光纤的零色散点不在 1 550 nm 上, 而是有小幅度的位移, 在 1 525 nm 或 1 585 nm 处。因此该光纤在 1 550 nm 处存在一定大小的色散, 有利于抑制密集波分复用系统中的四波混频效应。G.655 光纤适合在大容量、长距离的海底传输系统使用。

(4) 混合光纤

混合光纤是指在同一个光放段内发送端采用大有效截面光纤, 接收端采用小有效截面光纤, 两种光纤以一定比例组合, 形成混合光纤光放段。光纤参数参考值一般为大有效截面光纤的色散系数 $-2 \sim -3.4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、有效截面大于等于 $75 \mu\text{m}^2$, 小有效截面光纤的色散系数 $-2 \sim -3.4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、有效截面大于等于 $50 \mu\text{m}^2$ 。如图 1-2 所示。

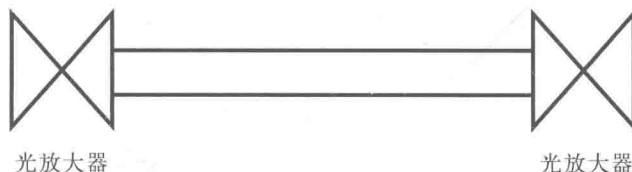


图 1-2 混合光纤光放段示意图

(5) 色散管理光纤

色散管理光纤 (DMF) 是相干接收技术出现之前大跨距 (例如 TPE 海底光缆系统) 海底光缆系统采用的光纤。这也是一种混合光纤技术, 每个光放段由 “+D” 和 “-D” 两种光纤组成, 其中 “+D” 光纤, 色散系数 $+20 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 有效截面大于 $100 \mu\text{m}^2$, 而 “-D” 光纤色散系数 $-40 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 有效截面介于 $20 \sim 30 \mu\text{m}^2$, 在一个光放段内两种光纤配置比例大致为 2:1, 整个光放段的平均色散 $-3 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。此种光纤配置方式提高了发送端光纤有效截面而降低非线性, 接收端的小有效面积光纤减小色散斜率的影响。



二、海底光缆的结构与类型

1. 海底光缆结构

海底光缆由外护套、钢丝、填充物、远供导体和光纤组成，通常使用的国际海底光缆纤芯为8~16芯，其外观结构见图1-3。

以海底轻型光缆（LW）为例，其结构如图1-4所示。

(1) 光纤单元

光纤单元中间是一根覆铜钢丝，以增加韧性，光纤围绕在钢丝周围，这两者又被UV硬化树脂被覆包裹着形成了一个圆柱形的光纤单元，该树脂主要是用来防止海水的侵入。光纤单元的外径标称值一般为2.55 mm，如图1-5所示。

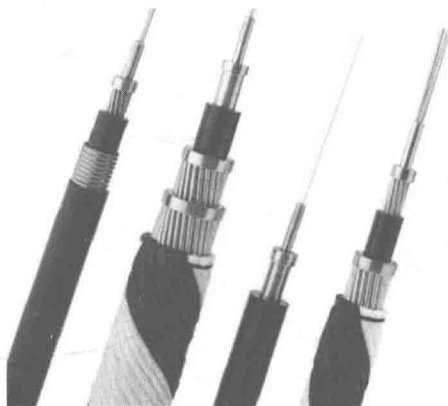


图1-3 海底光缆外观结构

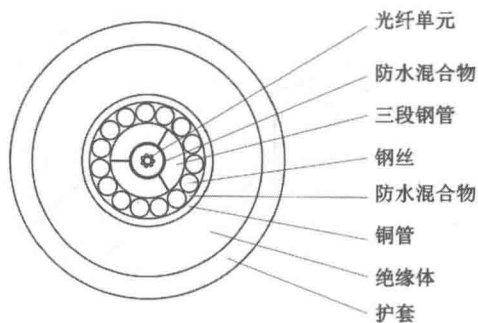


图1-4 海底轻型光缆（LW）结构

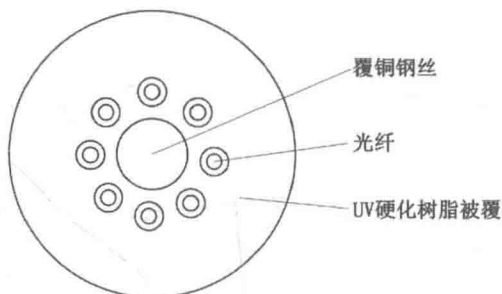


图1-5 8芯光纤单元

(2) 钢管

钢管分为3段，按经线方向装配组合在光纤单元外，主要作用是抵抗压力。钢管的内壁和光纤单元之间填充了一种混合物以再次防止海水侵入。钢管的外径标称值一般为6.1 mm。

(3) 钢丝和铜管

14根外径为1.725 mm的钢丝以左手方向绕在钢管外围，以形成抗张力部分。数根铜条按经线方向绕在钢丝周围，接口的地方焊接，形成了一个铜管，通常铜管装配完成后，标称直径达10.54 mm。铜管内壁和钢丝之间依然填充防水混合物树脂。



(4) 绝缘体

使用低密度聚乙烯使供电导体绝缘。加上聚乙烯，此时外径一般为19.0 mm。

(5) 护套

护套由高密度聚乙烯制作，围覆在绝缘体外，外径达到22.5 mm。

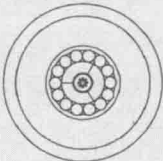
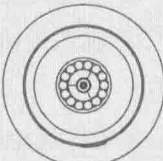
其他种类海底光缆的光纤单元均与LW型相同，仅从敷设在海底的安全考虑，外覆不同尺寸的钢带、护套或铠装等，形成不同结构的光缆。

2. 海底光缆类型

按照海底光缆传输系统是否有中继器可分为有中继型海底光缆系统和无中继型海底光缆系统。二者主要的区别是：有中继型海底光缆结构内有远供系统使用的铜导体，而无中继型海底光缆系统则无须此铜导体。一般我国近海岛屿间及岛屿—大陆间的海底光缆多为无中继型海底光缆系统，而跨洋国际海底光缆则多为有中继型海底光缆系统。

按照海底光缆适用的水深范围主要可分为海底轻型光缆（Light Weight Cable）、海底轻型屏蔽光缆（Light Weight Screened Cable）、海底轻型单层铠装光缆（Single Armored (Light) Cable）、海底单层铠装光缆（Single Armored Cable）和海底双层铠装光缆（Double Armored Cable），其各自特点详见表1-1。

表1-1 海底光缆类型及特点

光缆类型	适用水深范围	主要性能特点	断面结构
海底轻型光缆 (LW)	>1 000 m	无铠装保护，在海底表面敷设时采用，海底条件相对安全	
海底轻型屏蔽光缆 (LWS)	500~1 000 m	在LW基础上增加钢带屏蔽层以防止大型鱼类啮咬	
海底轻型单层铠装光缆 (SAL)	200~500 m	在LW基础上以单层较细直径钢丝作为铠装加强对海缆的保护	