



海底光缆 通信系统

上册：设计及应用

Undersea Fiber Communication Systems , 2nd edition

(原书第2版)

[法]约瑟·切斯尼 (José Chesnoy) 著
王红霞 左名久 胡珊 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



海底光缆通信系统

(原书第2版)

上册：设计及应用

Undersea Fiber Communication Systems, 2nd edition

[法] 约瑟·切斯尼 (José Chesnoy) 著

王红霞 左名久 胡珊 译



机械工业出版社

Undersea Fiber Communication Systems, 2nd edition, by José Chesnoy.

ISBN: 978-0-12-804269-4 (ISBN of original edition)

Copyright © 2016, 2002 Elsevier Ltd. All Rights Reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.

All rights reserved.

Published in China by <China Machine Press> under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权登记 图字: 01-2016-2195 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

海底光缆通信系统: 原书第2版. 上册, 设计及应用/(法) 约瑟·切斯尼著; 王红霞, 左名久, 胡珊译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 7

书名原文: Undersea Fiber Communication Systems, 2nd edition

ISBN 978-7-111-53981-0

I. ①海… II. ①约…②王…③左…④胡… III. ①海底—光纤通信
IV. ①TN913.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126669 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 付承桂 任 鑫

责任校对: 肖 琳 封面设计: 路恩中

责任印制: 李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.5 印张 · 375 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53981-0

定价: 85.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书全面而详细地介绍了海底光缆通信系统，涵盖了其所有的技术方面，提供了海底光缆通信系统的设计、技术以及专业海底设备的理论和实践背景，是一本不可多得的海底光缆通信领域的专著，可作为海底网络相关科研工作者、高校教师和从事海缆工程技术人员的重要参考文献。

为更有针对性地服务于海底光缆通信系统的设计人员和工程技术人员，我们将译著分为《海底光缆通信系统（原书第2版）上册：设计及应用》和《海底光缆通信系统（原书第2版）下册：设备及运行维护》。

《海底光缆通信系统（原书第2版）上册：设计及应用》首先介绍了海底通信系统的概况以及从第一代海底通信系统到2015年安装系统的历史发展情况；然后全面阐述了光纤通信的基本原理、光放大技术、超长距离海底光缆通信系统的设计及其传输损伤的补偿技术、无中继传输系统的最新技术；最后介绍了近年来海底光缆在科研、石油和天然气领域的新应用。

《海底光缆通信系统（原书第2版）下册：设备及运行维护》介绍了海底网络的架构和管理、海底系统供电技术及其设计、海缆光纤的最新状况以及现代光纤的研究进展；全面阐述了海底设备、海底线路终端设备以及海底光缆设备的技术方面的问题；最后介绍了海底系统规划和部署、海缆通信系统升级、海缆线路维护技术。

译者的话

自 20 世纪以来，在洲际通信领域，海底光缆通信系统起到了全球骨干网络的作用，我国的海底光缆通信系统主要服务于我沿海岛礁通信，以无中继海底光缆通信系统为主，而跨洋有中继海底光缆通信系统的关键技术及设备，仍以国外公司为主。随着我国“一带一路”和海洋强国战略的提出，我国海洋网络建设将迎来发展的良机，也将有更多的国内机构和厂家投入到海洋网络的研发与建设中来。

本书全面而详细地介绍了海底光缆通信系统，涵盖了其所有的技术方面，提供了海底光缆通信系统的设计、技术以及专业海底设备的理论和实践背景，是一本不可多得的海底光缆通信领域的专著，可作为海底网络相关科研工作者、高校教师和从事海缆工程技术人员的重要参考文献，这也是为什么我们将其翻译成中文版本提供给我国广大读者的原因。

原书篇幅较大，为了更有针对性地服务于海底光缆通信系统的设计人员和工程技术人员，我们将译著分为《海底光缆通信系统（原书第 2 版）上册：设计及应用》和《海底光缆通信系统（原书第 2 版）下册：设备及运行维护》两册。

在这里，感谢所有参与翻译的老师，感谢大家认真负责、严谨细致的工作态度，同时也感谢我们的研究生所做的大量琐碎工作以及辛勤的付出。

由于译者水平所限，书中难免存在错误和不当之处，望广大读者提出宝贵意见，以使我们更好地完善本书内容。

译者

原书序一

这个信息时代的发展几乎完全是由海底光缆来推动的。我们必须知道，99%的国际数据都是通过大量数百万美元造价的海底光缆传输的。2005年全球互联网连接用户首次达到了10亿；2010年互联网连接用户达到了20亿；2014年实现了第三个10亿用户的互联网连接。在虚拟的世界里，一个国家实现和保持强劲增长与发展势头的能力取决于其基础设施、通信的便捷性以及信息流的效率。信息的获取与社会经济发展之间的关联性已经成为普遍共识。

海底光缆产业竞争激烈，但是也存在着大量的合作，因为很多项目的范围和规模都要求业内的多个参与者共同实施。全球多个地区通信业的去管制化促进了私营海缆公司的发展。鉴于在世界范围内敷设海底光缆的经济、财政和地缘政治因素的挑战，海缆系统联盟组织就成了一种有效的投资和管理模式。业内人士也认识到有必要建立一个组织，以协调、鼓励和促进多个行业参与者的可持续发展与合作。1996年成立的SubOptic就发挥了这种关键作用。

供应商仍然是技术革新和进步的主要推动力。同时，通信业务的增长、多样化和互通性需求的提高，促进了现有海缆的不断升级和新海缆线路的建设，这不仅要在海缆发达地区还要在欠发达地区进行。当今世界的变化速度超过以往，而互联网及其应用业务（OTT）的出现加速了这个变化，同时它们深刻改变了网络的流量特性和格局。

部署在全球范围内海床上的海底光缆对于我们的日常生活以及国家级别的数据安全来说至关重要，但它也是脆弱的，因为海底光缆不易修复，而且基本上不被公众所认知。

本书详细地介绍了海底光缆领域的各方面知识，记录了海底光缆产业的详尽事实和信 息，可以说是对今天高度互联世界的“无名英雄”即海底光缆的致敬。

Yves Ruggeri

Orange 公司海底网络战略部副总裁

SubOptic 执行委员会主席

原 书 序 二

信息革命带来了互联网时代，而光通信网络在大容量数据传输中起着关键作用。在过去的一个世纪，世界范围的通信网络经历了迅猛增长，而不远的将来这个增长势头仍然强劲。由于用户数量的增长以及互联网的普及，非洲和亚洲一些尚未联网的地区将接入互联网。集成电路性能的提升加速了网络的发展，自 20 世纪中叶以来，晶体管的尺寸几乎每两年减小一半。新的基于互联网的全球经济需要一个大容量和高可靠性的全球网络，而这网络目前受到了海底通信光缆的限制。

信息传输领域内的创新层出不穷。自从 2002 年《海底光缆通信系统》的初版问世以来，光纤通信行业进入了“相干传输”时代。我们现在的传输容量比 5 年前超出了一个数量级。我们将信息编码成电磁波的相位、偏振和幅度。如果迈克尔·法拉第知道我们在跨大西洋的单根光纤上就实现了 $10000000000000\text{bit/s}$ 的数据传输，他将为我们而自豪。威廉·汤姆森爵士（即开尔文爵士）也会对我们的成就赞叹不已。开尔文爵士在 1858 年建造了第一根海缆，其传输速率为每分钟一个单词。汤姆森爵士和赛勒斯·菲尔德（美国商人，电信业先驱）会惊讶地发现，他们在第一根跨大西洋线路中所开发的很多工具沿用至今。初看起来现代通信海缆与 1858 年的海缆相似，后者基于铜导体，并带有古塔胶（反式胶）绝缘体。在现代海缆中，古塔胶已经被聚乙烯取代，我们仍然采用铜作为海底中继器的供电导体，并在 20 世纪的最后十年中增加了光纤。本书旨在帮助研究者和工程师们改变未来的全球海底通信。我们可以找到比 1858 年以来一直使用的铜导体更好且更廉价的导体吗？我们能够找到比一百年前发明的聚乙烯的绝缘性能更好的材料吗？

我们还有很多问题需要解决：海底光缆的成本对于很多发展中国家来说仍然是难以承受的，海缆的修复可能耗费数周时间。我们今天敷设海缆的速度和 1858 年英国皇家海军舰艇“阿伽门农号”的敷设速度差不多。Suboptic 组织是独一无二的，因为它关注环境的影响、海缆安全和数据的安全，并维持足够数量的布缆船以应对海洋作业的挑战。本书详细介绍了海底光缆项目各个方面的问题。

在严苛环境条件下，海底光缆的设计、安装和维护基于了几代工程师们的经验积累，本书正是该领域全球顶尖专家共同的智慧结晶。

海底光缆通信系统项目的巨大投资以及系统的复杂性要求海缆系统要具有较长的寿命周期，而现代的海缆系统设计寿命通常为 25 年。成功的安装、运行和修复取决于海缆系统的架构和部件的可靠性。工程技术上的惊人成就凝聚了信息科学、非线性光学、电子工程、材料科学、工程实践、项目管理、海洋专业和高可靠性标准等方面的知识。海底光缆通信系统将继续服务于社会，而本书的读者也将为我们提供有益的反馈。

Valey Kamalov

Google 公司信息传输工程师

2015 年 7 月

原 书 序 三

地球各大洲之间通过海底光缆网络连接成一体。我们每次浏览互联网、拨打越洋电话或者向其他洲的朋友发送短信时都会用到海底光缆通信系统。但是，世界上多数人每天使用这个系统时却不知道它的存在，当你使用智能手机拍照，然后发送给朋友时，你是否会想到（或关心）接收者在地球的哪个方位？虽然这个人可能在地球的另一端，但是你的照片能瞬间送达，这就像魔术！

大家使用海底光缆的最简单例子就是在网上搜索信息，搜索结果来自于供应商本地数据中心的数据。但是，这些分布在全球各地的数据中心每天都会通过海底光缆在洲际之间传输。

我们常说全球 99% 的通信容量由海底光缆支撑。人们可能会说 99% 这个百分比，是因为他们不知道确切的数字。但据我估计，海底光缆所支撑的典型互联网流量百分比更可能是 99.999%！显然，海底光缆才是真正实现网络“全球化”的关键。

自海底电话电缆首次在 1950 年推出以来，海缆通信产业经历了巨大的技术变革，这些变革促进了海底通信容量的迅猛增长。首先是 20 世纪 80 年代模拟同轴电缆向数字单模光纤系统的转变。尽管这样的变革是巨大的技术挑战，最初容量的增加也比较有限，但在当时人们普遍认为光纤通信系统有着巨大的容量潜力。然而，电光再生器的使用成为实现光纤系统所有潜力的一个“瓶颈”。20 世纪 90 年代推出了基于光放大器的中继器，它是革命性的技术。在过去 20 年中，光纤系统的容量实现了 3 个数量级的增长，这种系统单信道的传输速率为再生系统的 10 倍。然后是波分复用技术在宽带光纤放大中继器中的应用，以及今天的相干收发技术。TAT-12/13 是第一个基于光放大器的跨大西洋系统，它于 1996 年投入使用，每光纤对的单信道传输速率为 5Gbit/s。而当今最先进的光纤系统可以支持每光纤对大于 10000Gbit/s 的传输速率（大于 100 个信道，每信道速率 100Gbit/s）。

这些大容量海底光缆系统位于地球的最遥远地方——全球各大洋的海底。这样遥远的环境要求光缆系统具备一定程度的特有的可靠性，这种高可靠性的实现是通过采用各种技术手段来提升其质量和生产工艺，过去数年的技术变革促进了光缆系统容量的持续增长。

本书全面综述了基于海底光缆的国际通信网络技术，首先介绍了光纤通信的基础知识，然后介绍了关于海底光缆的所有重要课题。在光纤产业中，海底光缆通信

系统的一些特征，例如终端站之间的长距离传输，以及在严苛海底环境中水下设备的布放等，都是非常重要的，而且是独一无二的。海底光缆通信系统的这些特征必须要求特殊的设计，包括高性能终端站设备，特殊供电性能，当然也包括用于部署和维护海底设备的各种海洋装备。

Neal S. Bergano

**泰科电子海底通信部
研发副总和首席技术官**

原 书 前 言

海底光缆：一个战略领域

25 年来，光缆系统以惊人的速度遍布陆地和海底。现在，铺设在海床上的海底光缆大约有 100 万 km。这些光缆支撑着我们整个通信骨干网的 99%。很多卫星通信站已被拆除，成为了历史。

没有哪一种技术能像海底光缆这样，虽然不为人所知，却对我们的社会产生如此广泛的影响。发达国家早在一个世纪以前就确定了海底光缆的战略地位。

本书是《海底光缆通信系统》的第 2 版，它全面而详细地介绍了海底光缆通信系统，涵盖了所有的技术方面，提供了海底光缆系统设计规则、所需技术以及专业海底设备的理论和实践背景。此外，本书还描述了相关产业的发展情况，包括设备设计、安装以及海上作业等。考虑到本书的完整性，我们亦收录了历史和运行方面的信息。

本书自 2002 年首次出版以来，在学术界一直被当作重要的参考文献。自第一代光子学参考合集^[1]和一些优秀的历史收藏本^[2]发布以来，鲜有可与之媲美之作。

为什么要再版？

本书的第 1 版写于 2001 年，当时正值互联网泡沫时期。包括海底光缆在内的电信业发展基本陷于停滞，直到 2007 年方有所好转。在此期间，本书的第 1 版在相关技术领域仍代表着最高水平。2007 年电信业开始复苏，截至 2015 年，电信技术再次获得了快速发展，在这种背景下，本书的第 1 版就显得陈旧了。

正如摩尔定律有所放缓一样，光传输也面临着达到信息谱密度香农极限的问题，海底光缆也毫无例外地遭遇了容量极限的挑战，而这正为修订版的发布提供了合适的时机。

这个新版本保留了对适用性广的光学技术、设备、操作和海上敷设工程的说明，旨在为此领域工作者提供重要参考。本书不仅全面覆盖并更新了相关领域的知识，亦填补了一些空白。

新增内容具有以下特色：

- 1) 针对通信的超长距离海底传输技术。
 - 2) 海底光缆的其他应用，如科研、石油和天然气。
- 解决了针对复合型网络和宽带服务的高速网络发展问题，即

- 1) 100Gbit/s 信道或以上的相干光技术。
- 2) 湿端设备光纤网络和可重配性。

完整概述了该领域的知识演变，阐述了大型海底项目的战略重要性，包括

- 1) 海底网络的技术运营周期和组织运营周期。
- 2) 通过相干技术放大的海底光缆的升级。

本书目标和大纲

自2002年本书第1版出版以来,技术领域的演变发展十分迅速。第2版的目标是更新内容,实现技术和操作上的完整性,并继续作为海底光缆领域的主要参考文献。本书内容安排如下:

第I部分简要介绍海底网络。

第1章:José Chesnoy编写的“海底光缆通信介绍”一章,介绍了海底通信系统的概况。

第2章:Gérard Fouchard编写的“海底通信系统的历史回顾”一章,完整地概述从第一代到2015年安装系统的历史发展。

第II部分介绍了现代海底光缆网络和系统的设计背景,针对所有长距到无中继应用再到非通信应用。

第3章:Philippe Gallion编写的“非相干和相干数字光纤通信的基本原理”一章,介绍了光纤通信的理论背景,从其调制到接收,完整描述了从电噪声源到光噪声源的信号质量,并详细介绍了带光放大器的系统。本修订版增加了对相干传输基础知识的介绍。

第4章:Dominique Bayart编写的“光放大”一章,运用基础知识和基本原理,全面介绍了主要光纤放大器——掺铒光纤和拉曼光纤放大器技术的最新知识,以帮助读者正确理解通过级联放大器产生的信号和噪声。

第5章:Gabriel Charlet和Pascal Pecci编写的“超长距离海底传输”一章,从理论和实践上介绍了WDM(密集波分复用)光放大链路的设计。这是基础章节,涵盖了超长距放大系统的WDM系统设计的所有理论和实践知识。本章较第1版做出了明显修改,涵盖了所有关于海底传输的现代知识。

第6章:Eduardo F. Mateo编写的“超长距离海底网络中传输损伤的补偿技术”,这一章是新增内容,旨在介绍各种光技术和处理技术,以及针对线性和非线性效应带来的系统劣化影响,改善传输质量的技术。

第7章:Herve Fevrier、Bertrand Clesca、Philippe Perrier、Do-Il Chang和Wayne Pelouch编写的“无中继传输”一章,介绍了无中继传输系统这一领域中全面而最新的知识。

第8章:Stephen Lentz编写的“海底光缆的新应用”一章是新增章节,全面介绍了近年来发展的科研、石油和天然气领域的应用。

第III部分介绍了海底设备及海底网络所涉及的所有技术的实现情况。

第9章^①:Olivier Courtois和Caroline Bardelay-Guyot编写的“海底网络的架构和管理”一章,描述了包括网络管理在内的海底网络。相较于第1版而言,本章有相当大的更新,纳入了直接IP连接、ROADM介绍及其对网络管理的影响。

① 原书由于在翻译过程中分为了上、下两册,第9章~第17章见《海底光缆通信系统(原书第2版)下册:设备及运行维护》。——译者注

第10章: Koji Takehira 编写的“海底系统供电”一章, 这是新增章节, 更全面地介绍了该海底系统供电, 对于海底网络而言具有特别的战略性和针对性。

第11章: Scott R. Bickham, Hazell Matthews 和 Snigdharaj Mishra 编写的“海缆光纤”一章, 介绍了海缆光纤的最新状况, 包括它们朝着新的低损耗、有效面积大的现代光纤方向的研究进展。

第12章: Neal Bergano, Bruce Nyman, Maurice Kordahi, Barbara Dean, Haifeng Li 和 Lara Garrett 编写的“海底设备”一章, 全面地介绍了海底硬件的关键部分—湿式设备。此外还针对海底网络的可靠性方面进行了全新的综合性分析。

第13章: Jean Francois Libert 和 Gary Waterworth 编写的“海缆技术”一章, 涵盖了海底光缆设备技术方面的问题。

第14章: Arnaud Leroy 和 Omar Ait Sab 编写的“海底线路终端”一章。本章专门介绍传输设备。第2版适当涉及现代的相干技术和信号处理, 全部进行了重新修订。

第IV部分完整地描述了操作方面的技术, 以确保本书涉及范围的完整性。

第15章: Loic Lefur 编写的“系统规划和部署”一章, 是新增章节, 从理念提出到系统验收, 详细介绍了海底项目的整个周期。

第16章: Robert Hadaway 编写的“海缆升级”一章, 也是新增章节, 为适应新技术时代的需要, 开启的新篇章。

第17章: John Horne 和 Raynald Leconte 编写的“海缆及其维护”一章, 对海洋敷设和维护技术进行了升级。

本书编辑特别感谢所有参与者, 感谢他们为编写出一本高质量书籍所投入的时间, 以及他们的原创性贡献。这一高级别专家小组为本合集所贡献的独特内容, 弥补了之前任何出版物中均没有涉及的空白。没有他们的参与, 便没有我们现在的成就。

三段序言均由行业内关键人员撰写: Yves Ruggeri 代表重要电信运营商和 Suboptic 组织; Valey Kamalov 代表 Webco 运营商; Neal Bergano 是历史海缆供应商的主要代表。在此, 对他们表示衷心的感谢。

最后, 编者还希望特别缅怀于 2005 年离开我们的 Jean Jerphagnon。他献出毕生精力, 促进海底光缆技术的发展, 他是一位十分有影响力的专家, 同时也是本书第1版的发起人。我们相信, 看到该领域在过去十年间取得如此巨大的进步, 他会非常欣慰。

主 编
José Chesnoy

参考文献

- [1] Runge PK, Trischitta PR, editors. Undersea lightwave communications. IEEE Press; 1986.
- [2] Salvador R, Fouchard G, Rolland Y, Leclerc AP. Du Morse à l'Internet, Edition Association des Amis des Câbles Sous Marins; 2006.

目 录

译者的话

原书序一

原书序二

原书序三

原书前言

第 1 章 海底光缆通信介绍	1
1.1 引言	1
1.2 海底通信系统的结构	4
1.3 太比特海底光通信技术	7
1.4 近期和未来的发展	9
1.4.1 海底光缆的近期发展	9
1.4.2 海底系统的未来发展	11
参考文献	14
第 2 章 海底通信系统的历史回顾	16
2.1 引言	16
2.2 海底电缆电报时代	17
2.2.1 早期电报时代 (1800—1850 年)	17
2.2.2 英国海底电缆时代 (1850—1872 年)	18
2.2.3 全球网络 (1872—1920 年)	21
2.2.4 电缆和无线电的竞争 (1920—1960 年)	23
2.2.5 技术和经济因素	25
2.3 海底同轴电缆电话时代	28
2.3.1 早期海底电话电缆尝试	28
2.3.2 第一代海底同轴电缆 (1950—1961 年)	29
2.3.3 第二代海底同轴电缆 (1960—1970 年)	30
2.3.4 宽带海底电缆 (1970—1988 年)	31
2.3.5 技术和经济因素	32
2.4 海底光缆时代	35
2.4.1 从模拟到数字化 (1976—1988 年)	35

XII 海底光缆通信系统 (原书第2版) 上册: 设计及应用

2.4.2 再生海底光缆系统和联盟组织 (1986—1995 年)	36
2.4.3 光放大和波分复用技术 (1995—2000 年)	38
2.4.4 相干光通信技术的时代及其发展 (2010 至今)	42
2.4.5 新市场和经济影响	43
2.4.6 布缆船和敷设作业	43
2.5 小结	44
参考文献	45

第3章 非相干和相干数字光纤通信的基本原理 46

3.1 引言	46
3.2 光纤信道	47
3.2.1 光纤带宽	47
3.2.2 光纤信道容量	47
3.2.3 二进制光信道和符号概率	49
3.3 调制格式	51
3.3.1 待调制参数	51
3.3.2 调制信号的光功率谱	51
3.3.3 调制信号基带功率谱的一般表达式	52
3.3.4 开关键控调制方式	54
3.3.5 纯相位调制	57
3.3.6 正交振幅调制	58
3.4 噪声及信号与噪声的相互作用	60
3.4.1 光信噪比和噪声指数	60
3.4.2 光电检测器灵敏度和光电信号转换	60
3.4.3 基础量子噪声	61
3.4.4 光放大噪声	64
3.4.5 增益和衰减分布的影响	67
3.4.6 光噪累积	69
3.4.7 信号和噪声相互作用	70
3.4.8 附加电噪声	71
3.5 直接检测 (非相干) 光通信	72
3.5.1 定义	72
3.5.2 理想散粒噪声限制接收机	75
3.5.3 较小热噪限制检测的放大器	77
3.5.4 前置放大光信号的检测	78
3.6 相干光通信	81
3.6.1 相干接收机原理	81

3.6.2 单正交测量和平衡零差检测	82
3.6.3 采用双平衡外差检测进行双正交测量	86
参考文献	90
第4章 光放大	93
4.1 引言	93
4.2 EDFA 放大原理	94
4.2.1 基本原理	94
4.2.2 玻璃基质的影响	94
4.2.3 EDFA 的基本特性	95
4.2.4 基态模型	96
4.2.5 典型受限掺铒模型	96
4.2.6 光纤参数	99
4.2.7 动态性能	100
4.2.8 噪声特性	101
4.3 海缆系统的特性	103
4.3.1 高噪声性能设计	104
4.3.2 偏振相关的损耗	105
4.3.3 掺铒光纤中的光偏振效应	105
4.3.4 泵浦偏振对 PDG 的影响	105
4.3.5 光谱烧孔	106
4.3.6 光谱烧孔的建模	107
4.4 长距离应用 EDFA 的优化	108
4.4.1 暗纤运行	108
4.4.2 WDM 输入信号谱运行	109
4.4.3 增益带宽	109
4.4.4 玻璃成分	110
4.4.5 增益漂移对输出 OSNR 的影响	111
4.4.6 增益均衡	112
4.5 工程特性	114
4.5.1 功率消耗	114
4.5.2 泵浦技术	114
4.5.3 海底工程的特殊性	116
4.6 L 波段 EDFA 的应用	117
4.6.1 系统性能	117
4.6.2 现场实际应用问题	118
4.6.3 C + L 波段系统	119

4.6.4 高效 C+L 结构	119
4.7 拉曼放大的实现	119
4.7.1 拉曼放大的原理	120
4.7.2 EDFA 预放大的实际应用	122
4.7.3 全拉曼放大的海缆链路	122
4.7.4 无中继系统中的拉曼应用	124
4.8 未来放大技术展望	125
参考文献	126
第5章 超长距离海底传输	131
5.1 引言	131
5.2 色散效应和非线性效应	131
5.2.1 传输限制、衰减、色散和偏振模色散	131
5.2.2 光纤基础设施	134
5.3 调制格式和相干接收机	140
5.3.1 调制格式	140
5.3.2 相干接收机说明	145
5.4 长距离传输系统的主要特性	148
5.4.1 技术挑战: 高容量单位光纤	148
5.4.2 光信噪比	149
5.4.3 传输损伤	153
5.4.4 中继器监控	157
5.4.5 功率预算表和典型中继距离	157
5.5 增益均衡	161
5.5.1 功率预加重	162
5.5.2 固定增益均衡器	165
5.5.3 可调增益均衡器	168
5.5.4 非最佳增益均衡的影响	170
5.6 传输系统	172
5.6.1 试验装置	172
5.6.2 NZDSF 传输试验	172
5.6.3 +D/-D 传输试验	175
5.6.4 相干技术在 40Gbit/s 色散管理链路的首次部署 (NZDSF 及 +D/-D)	178
5.6.5 +D 光纤传输试验	180
5.7 下一代海底系统	181
5.7.1 光谱整形	182
5.7.2 正交幅度调制 (QAM) 格式	183

5.7.3 4D 和 N-D 格式	184
5.7.4 香农极限	185
5.7.5 基于 DSP 的非线性抑制	186
5.7.6 实验室记录的试验和技术	187
5.7.7 空分复用技术, 未来的方向?	187
参考文献	189
第 6 章 超长距离海底网络中传输损伤的补偿技术	192
6.1 引言	192
6.2 超长距离海底系统线性效应的补偿	193
6.2.1 光域内色散效应的补偿	193
6.2.2 数字相干系统中色散效应的补偿	195
6.3 超长距离海底系统非线性效应的补偿	198
6.3.1 补偿光纤非线性效应的光学技术	198
6.3.2 补偿光纤非线性效应的数字技术: 数字反向传输	203
6.3.3 补偿光纤非线性效应的其他数字信号处理技术	208
参考文献	209
第 7 章 无中继传输	213
7.1 引言	213
7.2 历史和近期发展	214
7.2.1 信道速率的增加	214
7.2.2 信道数量的增加	214
7.2.3 大有效面积的线路光纤	215
7.2.4 扩展无中继距离	215
7.3 应用	218
7.4 无中继系统技术	219
7.4.1 无中继传输的基础	219
7.4.2 拉曼放大	220
7.4.3 系统结构	224
7.5 光损伤及其限制	229
7.5.1 线性效应造成的限制	230
7.5.2 非线性效应造成的限制	230
7.6 系统实现时要考虑的问题	233
7.6.1 光连接器和光纤损耗	233
7.6.2 远程泵浦光放大器的位置和设计	234
7.7 标准	236