

教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会规划教材

通信原理与应用——系统案例部分

光通信

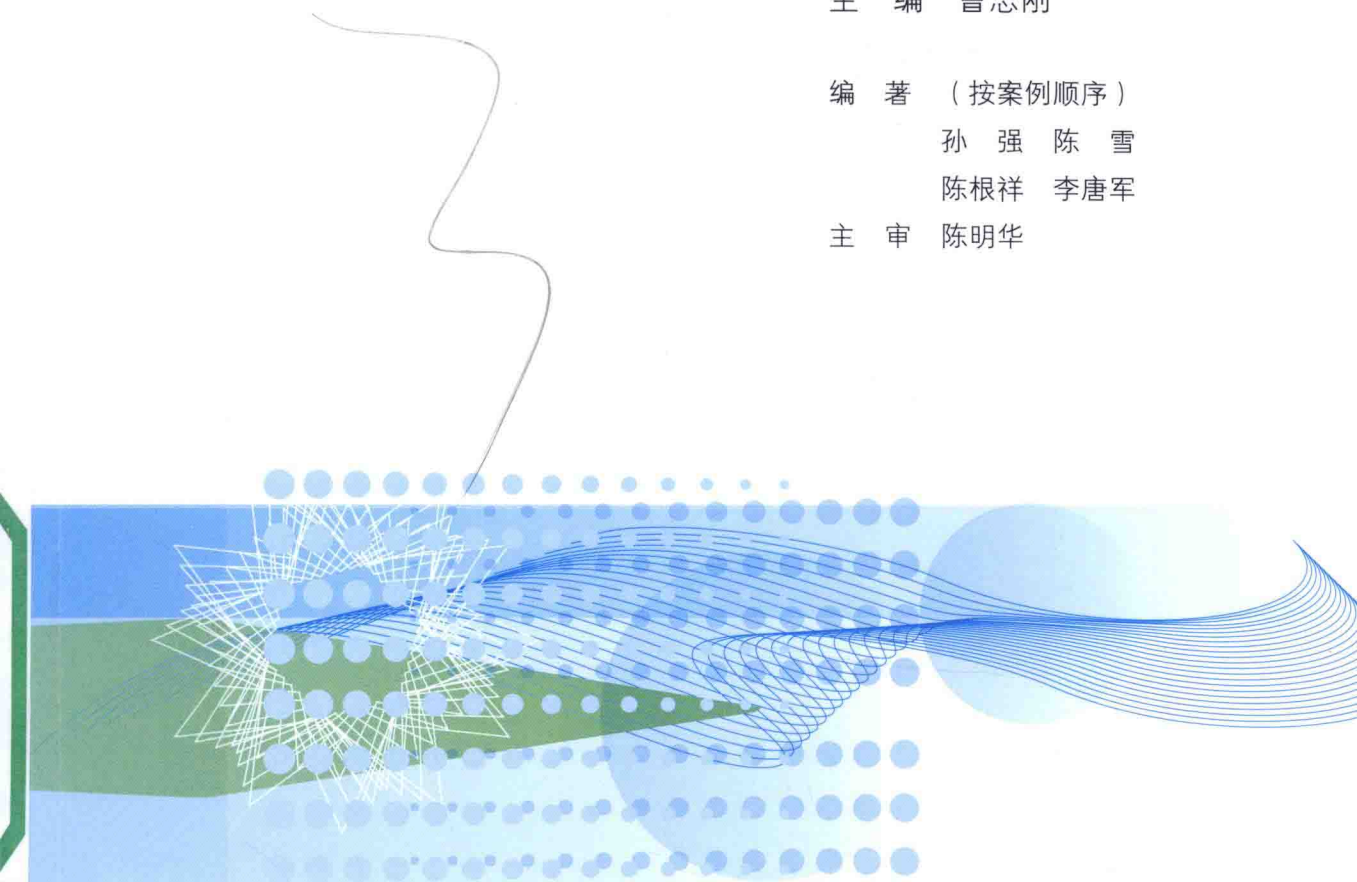
主 编 曹志刚

编 著 （按案例顺序）

孙 强 陈 雪

陈根祥 李唐军

主 审 陈明华



高等教育出版社

教育部高等学校电子信

指导分委员会规划教材

通信原理与应用——系统案例部分

光通信

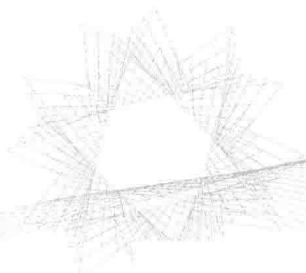
主 编 曹志刚

编 著 （按案例顺序）

孙 强 陈 雪

陈根祥 李唐军

主 审 陈明华



TONGXIN YUANLI YU YINGYONG
XITONG ANLI BUFEN
GUANG TONGXIN

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是《通信原理与应用——系统案例部分》的光通信分册。

《通信原理与应用》是在教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会领导下组织编写的系列教材,该教材分为基础理论部分和系统案例部分,将理论部分和系统案例部分作为一个整体编写,旨在理论联系实际,学以致用。

系统案例部分按应用类别分为七个分册:移动通信、光通信、卫星通信、宽带接入、短距离无线通信、广播与多媒体通信、其他无线通信。本书是其中的光通信分册,共收纳6个案例:光纤传输、数字复接体系、波分复用技术、多载波射频光通信系统、自由空间光通信、无源光纤接入网。

配套出版的基础理论部分内容包括:绪论、随机过程基础、模拟调制、数字信号基带传输、数字调制、模拟信号数字化、差错控制编码、复用与多址技术、无线通信传输新技术。

本书可用作电子信息类专业及其他相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事研究开发的工程技术人员参考和借鉴。教学中可以将系统案例与理论部分配合使用。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理与应用.系统案例部分.光通信 / 曹志刚

主编;孙强等编著. -- 北京:高等教育出版社,

2015.8

ISBN 978-7-04-042164-4

I. ①通… II. ①曹…②孙… III. ①通信理论-高等学校-教材②光通信-高等学校-教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 040028 号

策划编辑 吴陈滨
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 王楠
责任校对 陈旭颖

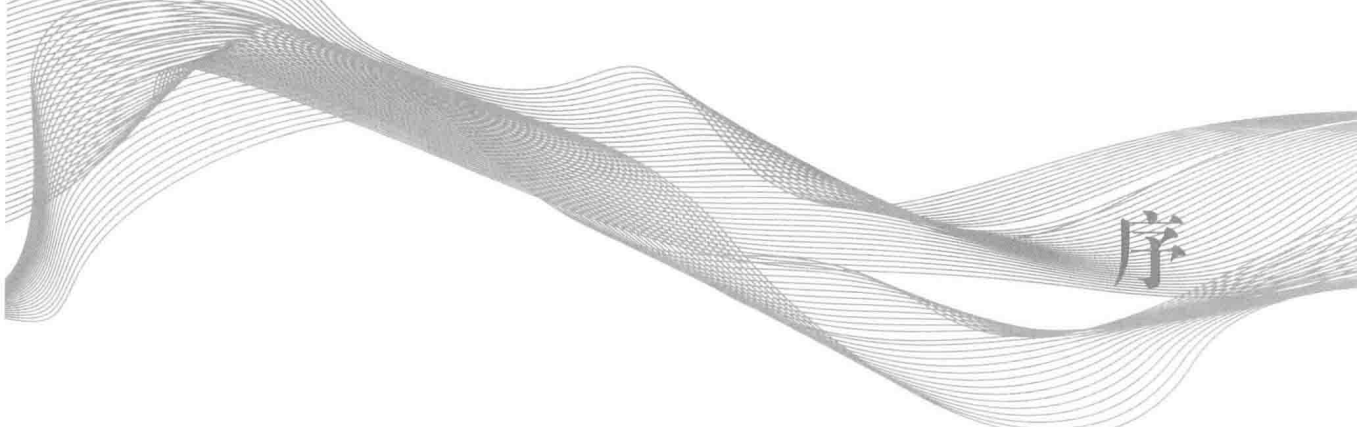
封面设计 王 睢
责任印制 毛斯璐

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 11
字 数 200 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2015 年 8 月第 1 版
印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷
定 价 19.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 42164-00



序

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》明确指出:“高等教育承担着培养高级专门人才、发展科学技术文化、促进社会主义现代化建设的重大任务。提高质量是高等教育发展的核心任务,是建设高等教育强国的基本要求。”我国高等教育已经进入大众化教育阶段,成为工程教育大国,但还不是工程教育强国,还远不能满足当前经济建设和社会发展的需求。高等教育培养高素质工程技术人员是我国高等学校人才培养模式之一,并应置于重要的位置。高等教育培养出数量足够并且能够面向一线的优秀工程技术人员,这是中国高等学校,特别是高等工科院校不可推卸的历史责任,也是努力办好人民满意的教育、推动高等教育内涵式发展、深化教育领域综合改革和着力提高教育质量的具体实践。

国民经济与社会信息化和现代服务业的迅猛发展,对电子信息领域的人才培养提出了更高的要求,而电子信息类专业又是许多高等学校的传统专业、优势专业和主干专业,也是近年来发展最快、在校人数最多的专业类之一。

为了适应高等工程教育改革,满足社会对电子信息类专业工程技术人才的需要,教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会根据教育部卓越工程师教育培养计划要求,针对中国高等工程教育存在的工程性、创新性和多样性缺失等问题,在认真开展了学科专业发展战略的研究和《高等学校电子信息科学与工程类本科指导性专业规范(试行)》的制定基础上,2010年从以信息与通信工程学科为特色的十余所重点高等院校和知名企业遴选了有丰富的工程实践背景和教材编写经验的40余位教授和专家,组织开展编写一套体现理论基础教学与工程应用案例协同教学理念的电子信息类专业核心课程教材,并使其具有权威性、工程性、创新性和示范性。

第一批高等学校电子信息类专业核心课程涉及“通信原理与应用”“通信网络基础”和“数字信号处理”三门课程。从课程体系、教学大纲到三级目录,编写组在

广泛征求意见的基础上进行了深入的调查、分析和研究,并召开了十几次会议进行研讨。教材完稿后,又邀请相关课程领域的权威专家进行审稿。至此,第一批“高等学校电子信息类专业核心课程教材”将于2015年陆续问世。

第一批高等学校电子信息类专业核心课程教材的编写汇聚了全国相关课程优秀教育工作者和行业专家的丰硕教学和科研成果。教材内容注重体现理论基础性和工程应用性的协同。教材的理论基础严谨,概念清晰;教材的应用案例典型,特色鲜明。本系列教材有利于培养学生应用数理基础、科学与工程知识的能力,有利于培养学生根据需求设计部件、系统或过程的能力,有利于培养学生解决问题的能力,有利于激发学生提出问题的兴趣,有利于培养学生创新意识,增强学习主动性和积极性。

衷心感谢参与编写第一批高等学校电子信息类专业核心课程教材的学者和专家,正是他们高度的责任感和无私的奉献精神,使这套系列教材得以顺利出版。同时,也衷心希望这套教材能够在我国高等学校电子信息类专业课程教学中发挥积极的作用。

教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会(2001—2012年)

副主任委员

教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会(2001—2012年)

主任委员

北京交通大学 谈振辉

2014年12月

为贯彻落实走中国特色新型工业化道路、建设创新型国家、建设人力资源强国的战略部署,实施《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》,教育部提出了卓越工程师教育培养计划。其主要目标是:面向工业界、面向世界、面向未来,培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才,为建设创新型国家、实现工业化和现代化奠定坚实的人力资源优势,增强我国的核心竞争力和综合国力。

以实施卓越工程师教育培养计划为突破口,促进工程教育改革和创新,全面提高我国工程教育人才培养质量,努力建设具有世界先进水平、中国特色的社会主义现代高等工程教育体系,促进我国从工程教育大国走向工程教育强国。卓越工程师教育的核心是强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力,为此需要大力改革课程体系和教学内容。

本书正是基于以上目标,在教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会领导下组织编写的。由清华大学曹志刚教授担任主编、选题并统编定稿。

全书分两部分:基础理论部分和系统案例部分。将理论部分和系统案例部分作为一个整体编写,在国内外同类教材中是一次尝试,旨在理论联系实际,学以致用,拓宽学生的工程知识。

基础理论部分共9章,第1章绪论,第2章随机过程基础,第3章模拟调制,第4章数字信号基带传输,第5章数字调制,第6章模拟信号数字化,第7章差错控制编码,第8章复用与多址技术,第9章无线通信传输新技术。以章次为序,分别由清华大学曹志刚(第1、7章)、东南大学宋铁成(第2、9章)、北京邮电大学杨鸿文(第3、5章)、清华大学陈巍(第4章)、西安电子科技大学张辉(第6、8章)编写。北京交通大学张立军参与了第7章部分内容的修改。清华大学白铂编写了第1章的1.2节。

北京交通大学谈振辉教授对基础理论部分全文进行了审阅。

系统案例部分按移动通信、光通信、卫星通信、宽带接入、短距离无线通信、广播与多媒体通信、其他无线通信等不同应用类别分为7篇,共收纳48个通信系统典型案例。案例作者由从事该领域研究和教学的高校和国内知名设备厂商中遴选,以案例编号为序,作者分别是:北京邮电大学杨鸿文,清华大学李云洲,北京邮电大学张欣、彭木根,北京交通大学孙强,北京邮电大学陈雪,中央民族大学陈根祥,北京交通大学李唐军,解放军理工大学甘仲民、李志强、李广侠、张更新,清华大学郑友泉、詹亚锋,南京邮电大学王文鼎,东南大学胡静,北京信威公司许瑞锋、唐春莺、余西西,南京邮电大学余兆明,北京邮电大学郭文彬,清华大学宋健,南京邮电大学朱晓荣,东南大学夏玮玮、徐平平、张在琛,西安电子科技大学李长乐,中国传媒大学韦博荣,清华大学薛永林,北京交通大学张立军、赵永祥,清华大学王昭诚、窦维蓓、唐昆、李晔,解放军理工大学程云鹏、王呈贵,中兴通讯股份有限公司王田甜,清华大学栗欣,西安电子科技大学卢小峰,西北工业大学陈连平。其中个别作者编写了多个案例。通信系统案例部分内容丰富,但篇幅较大。为读者使用方便,将系统案例部分按两种方式出版,一种是系统案例部分合订本;另一种是将系统案例部分分成7个分册出版,每篇自成一册。7个分册依序分别由清华大学王京、陈明华,北京大学项海格,北京邮电大学吴伟陵,东南大学沈连丰,清华大学林行刚,北京交通大学谈振辉担任评审。

限于本人水平,且作者众多,书中错误疏漏、文风不一在所难免,敬请指正。主编邮箱为 czg-dee@tsinghua.edu.cn。

本教材可用作电子信息类专业及其他相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事研究开发的工程技术人员参考和借鉴。

曹志刚

2014年9月于清华大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

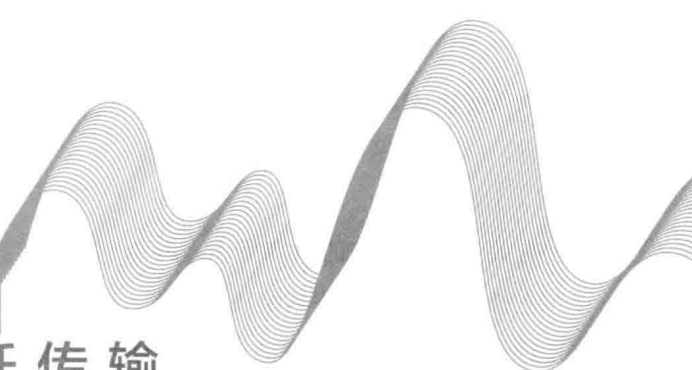
邮政编码 100120

案例八 光纤传输	1
8.1 光纤传输概述	1
8.2 光纤光缆	2
8.2.1 光纤光缆的优点	2
8.2.2 光纤结构和种类	3
8.2.3 光纤传输基本知识	6
8.2.4 光纤的基本特性	8
8.2.5 光缆结构和种类	17
8.3 光源	20
8.3.1 激光原理的基础知识	20
8.3.2 半导体激光器	22
8.3.3 半导体发光二极管	27
8.4 光检测器	30
8.4.1 光电检测器工作原理	30
8.4.2 PIN 光电二极管	32
8.4.3 雪崩光电二极管	33
8.5 数字光纤传输系统	35
8.5.1 光发送端机	37
8.5.2 光接收端机	38
8.6 光纤传输典型应用实例	40
8.6.1 光纤到家 (FTTH)	40
8.6.2 光纤混合光纤/同轴电缆 (HFC) 网络	42
参考文献	43

案例九 数字复接体系	44
9.1 数字光纤传输系统	44
9.1.1 数字光纤传输系统概述	44
9.1.2 数字复接与 PDH 速率等级	49
9.1.3 码速调整	51
9.2 同步数字体系(SDH)	52
9.2.1 SDH/SONET 技术的产生	52
9.2.2 SDH 速率等级和技术特点	53
9.3 数字通信系统的性能指标	57
9.3.1 误码	57
9.3.2 抖动与漂移	60
9.3.3 可用性	61
参考文献	61
案例十 波分复用技术	63
10.1 波分复用技术概述	63
10.1.1 空分复用(SDM)	63
10.1.2 时分复用(TDM)	64
10.2 波分复用(WDM)系统原理	64
10.3 工作方式	66
10.3.1 双纤双向传输	66
10.3.2 单纤双向传输	67
10.3.3 光信号分出和插入	68
10.4 WDM 的主要特点	68
10.5 技术规范	69
10.5.1 集成式系统	69
10.5.2 开放式系统	69
10.5.3 光接口分类	71
10.5.4 光接口参数	72
10.5.5 光监控通路(OSC)要求	72
10.6 光纤放大器	72
10.6.1 掺铒光纤放大器(EDFA)	73

10.6.2 光纤拉曼放大器	77
10.7 波分复用器件	79
10.7.1 光栅型波分复用器	80
10.7.2 介质膜滤波器型波分复用器	81
10.7.3 阵列波导光栅(AWG)型波分复用器	82
10.8 光分插复用器	82
10.8.1 非重构型 OADM 的结构	83
10.8.2 可重构型 OADM 的结构	84
10.9 WDM 保护技术	85
10.10 WDM 典型应用实例	88
参考文献	90
案例十一 多载波射频光通信系统	92
11.1 多载波射频光通信系统概述	92
11.2 系统组成与调制形式	94
11.3 系统载噪比(CNR)	96
11.4 多载波射频光通信系统	97
11.4.1 系统组成	97
11.4.2 谐波失真和交调失真	98
11.5 光正交频分复用(O-OFDM)系统	100
11.5.1 光正交频分复用(O-OFDM)系统概述	100
11.5.2 OFDM 原理	102
11.5.3 OFDM 的离散傅里叶变换实现	103
11.5.4 光域的线性与非线性映射	106
11.5.5 直接检测光 OFDM 系统	107
11.5.6 相干检测光 OFDM 系统	108
11.5.7 峰值平均功率比	109
11.5.8 频偏与相位噪声	110
11.6 典型案例	111
11.6.1 CATV 系统	111
11.6.2 超大容量 OFDM 光纤传输系统	112
参考文献	113

案例十二 自由空间光通信	115
12.1 自由空间光通信概述	115
12.2 光发送设备	116
12.3 光接收设备	118
12.4 空间光学信道	120
12.4.1 自由空间光学信道	120
12.4.2 大气光学信道	121
12.5 背景辐射	123
12.6 对准、捕获和跟踪	125
12.6.1 光学对准	126
12.6.2 光束捕获	127
12.6.3 光束跟踪	129
12.7 典型案例	130
参考文献	133
案例十三 无源光纤接入网	135
13.1 在光接入网中为什么采用 PON	135
13.2 PON 的概念和分类	138
13.3 无源光接入网络中的关键技术	139
13.3.1 光分配网络 (ODN)	140
13.3.2 光网络单元 (ONU) 和光线路终端 (OLT) 中的光收发器	145
13.3.3 光纤	152
13.3.4 前向纠错 (FEC)	153
13.3.5 EPON 交互通信	154
13.4 EPON 应用实例	157
参考文献	158
系统案例部分总目录	160



案例八

光纤传输

光纤通信技术是 20 世纪 70 年代初期兴起的一门高新技术。光纤通信以其技术上的先进性和巨大的经济效益,对传统的通信手段提出了强劲的挑战,显示了极强的生命力。现在,光纤通信的应用范围,除公用通信网外,在铁路通信、电力通信、军用通信、有线电视、数据通信系统等方面都得到了极其广泛的应用。许多新的应用领域还在不断开拓之中。本章对光纤传输的一些关键技术以及系统组成等基本问题进行了较为全面的论述,并给出了目前光纤传输技术的典型应用。

8.1 光纤传输概述

光纤通信是以光波作为载波、以光纤作为传输媒介的通信方式。

1966 年,华裔科学家高锟提出用石英玻璃可以制成损耗为 20 dB/km 的光导纤维(简称光纤)。当时即便是用最好的玻璃来传输光波,其损耗也高达 1 000 dB/km,高锟分析了玻璃产生衰减的原因,从理论上预言,如果能消除玻璃中的各种杂质,就有可能制成低损耗的光纤,这一重大研究成果奠定了现代光通信——光纤通信的基础。

1970 年是光纤通信史上闪光的一年。这一年美国康宁公司制造出了损耗为 20 dB/km 的光纤,使光纤远距离传输光波成为可能。同一年,贝尔实验室又研究成功了在室温下可连续工作的激光器。此后,光纤的损耗不断下降,使光纤通信逐渐向实用化迈进。

光纤与其他通信相比,具有许多独特的优越性:损耗低、容量大、质量轻、抗电磁干扰和化学腐蚀等。光纤具有三个低损耗波长窗口:850 nm、1 310 nm 和 1 550 nm。在波分复用 WDM 系统中所采用的波长可分为 C 频段和 L 频段。C 频段的范围是 1 530 ~ 1 565 nm,L 频段的范围是

1 565 ~ 1 625 nm。

有关 WDM 系统的内容见本系列教材之《通信原理与应用——系统案例部分》案例十。

光纤传输系统的基本组成如图 8-1-1 所示,它是由光传输设备(发端)、光纤、再生中继器和光传输设备(收端)组成的。

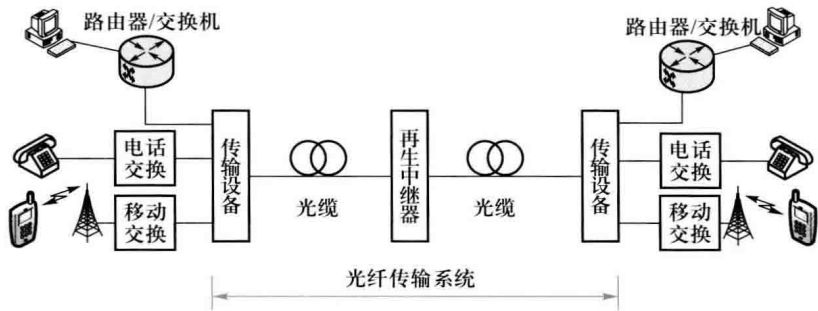


图 8-1-1 光纤传输系统的基本组成

8.2 光纤光缆

8.2.1 光纤光缆的优点

通信用光纤与其他通信线相比,具有许多独特的优越性。因为光纤能解决电缆在传输过程中许多难以解决的问题,因而具有普通电缆所不具备的独特优点。

1. 传输频带宽、容量大

光纤传输是以光波作为载波,而光波的频率范围极宽,其载频可以达到约 200 THz($1\text{ THz} = 10^{12}\text{ Hz}$)。因此,单波长所携带的调制信号速率极高。如果同时使用波分复用技术,其传输容量将更会大得惊人。

2. 传输损耗低

目前实际应用中的光纤一般是用石英玻璃制成的,其传输损耗可低于 0.25 dB/km,它比其他任何传输媒质的损耗都要低。

3. 直径小、质量轻、富于挠性

光纤很细,质量很轻,便于搬运和施工。成缆后,6~12 芯缆外径约 12 mm,重量约为 150 kg/km。

4. 抗干扰和化学腐蚀

光纤不导电,不会受高压电线、无线广播和雷电等的电磁干扰;另外,石英光纤可抗化学腐蚀,在有腐蚀的地方可以敷设光缆。

5. 资源丰富

石英光纤的主要原料是 SiO_2 ,它是地壳中含量最丰富的物质,在地球上所蕴藏的 Si 与 O_2 可以说是取之不尽、用之不竭的。

8.2.2 光纤结构和种类

1. 光纤结构

光纤,全称为光导纤维。它由两种不同折射率的玻璃材料拉制而成,是利用光在玻璃材料制成的纤维中的全反射原理而达成的光传导工具。

(1) 光纤基本结构

光纤的基本结构如图 8-2-1 所示。内层为纤芯,作用是传输光信号;外层为包层,作用是使光信号封闭在纤芯中传播。纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 稍大,这是光纤结构的关键。通信用光纤外径为 $125\text{ }\mu\text{m}$;多模光纤的纤芯为 $50\text{ }\mu\text{m}$,单模光纤的纤芯为 $8\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 8-2-1 所示的光纤,实际上是平时所说的裸纤,它的强度较差,尤其是柔软性很差,为了达到实际使用的要求,在光纤制造过程中,即裸纤从高温炉拉出后 2 秒钟内要进行涂覆。经过涂覆后的光纤才能用来制造光缆,才能满足通信传输线路的要求。我们通常所说的光纤,就是指这种涂覆光纤。涂覆光纤一般分为三层,中心为高折射率玻璃芯,中间为低折射率硅玻璃包层,最外是加强用的树脂涂层。

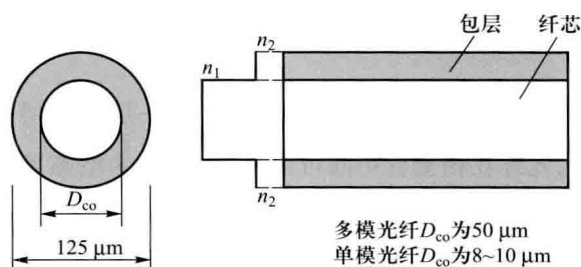


图 8-2-1 光纤的基本结构

目前,使用最广泛的两种光纤是紧套光纤和松套光纤,其光纤结构如图 8-2-2 所示。

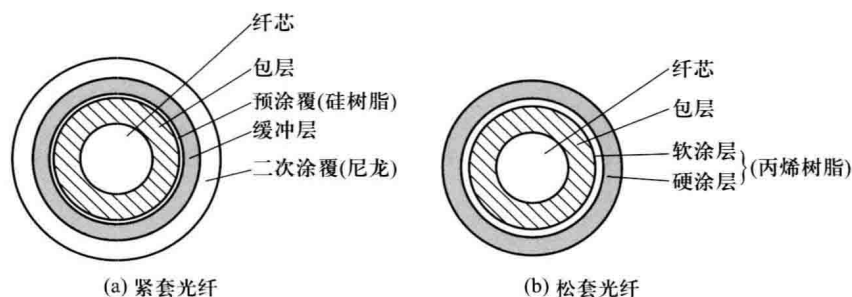


图 8-2-2 套塑光纤结构

(2) 紧套光纤结构

紧套光纤是在裸光纤的一次被覆光纤(涂覆光纤)表面上紧密套上一层被覆层[即二次套塑料(PVC/PVDF/LSZH/Hytrel)]构成的,其中被覆层可由一种或多种材料构成,与光纤同心,如图 8-2-2(a)所示。

具有紧套二次被覆结构的单模或多模光纤称为紧套光纤,紧套光纤的外径标称通常为 0.6 mm 和 0.9 mm 两种。

具有紧套二次被覆结构的光纤,是制造各种室内光缆的基本元件,也是制造各种软光缆的基础材料。可直接做尾纤,用于各类光有源或无源器件的连接,仪表和终端设备的连接等。

紧套光纤的特点:具有柔软、易剥离性能;高性能紧套保护一次涂覆光纤;弯曲半径小,机械及环境性能优良;制造的室内光缆可适合于不同的机械和环境要求,如拉力(或压力)偏大、高温(或低温)、弯曲次数多、低烟、无腐蚀、环保、野外、配线箱(架)及普通使用等。

紧套被覆层颜色符合相关标准(如 GB 6995.2)的规定,依次为:蓝、桔、绿、棕、灰、白、红、黑、黄、紫、粉红、青绿等,也可是其他商定颜色。

(3) 松套光纤结构

松套光纤是在一根或几根涂覆光纤外有间隙地松套上一层被覆层构成的,其中被覆层可由一种或多种材料构成管状,光纤在松套管中间可以松动,管内的空隙可以填充合适的阻水材料,如图 8-2-2(b)所示。

光纤采用松套管作为第二次保护,松套光纤的套塑层内可放入单芯、双芯或多芯一次涂覆的光纤。当光纤数较多时,可先用这种结构制成光纤单元。

松套光纤外径较大,但温度性能、抗压性能较好,故应用较广,是制造各种室外光缆的基本元

件,也是制造各种光缆的基础材料。

松套光纤的特点:具有很好的机械性能和温度特性;松套管材料本身具有良好的耐水解性能和较高的强度,松套管对光纤能起到抗压、抗拉的保护作用。通常,在松套管内充以特种油膏,以增强防水性能和缓冲作用,对光纤进行了关键性保护,使光纤具有良好的抗压性和柔软性。

松套被覆层颜色符合相关标准(如 GB 6995.2)的规定,依次为:蓝、桔、绿、棕、灰、白、红、黑、黄、紫、粉红、青绿等,也可是其他商定颜色。

2. 光纤的种类

光纤的分类方法较多,可以按材料性质、折射率分布及套塑方式等进行分类。在工程建设中常用的分类是按传输模数量及折射率分布状况进行的分类,按传输模数量可分为多模光纤或单模光纤;按折射率分布状况分类,多模光纤可分为阶跃型(突变型)光纤和梯度型(渐变型、聚焦型)光纤,单模光纤为阶跃型光纤。

依据国际电工委员会标准 IEC60793-1-1(1995)《光纤第一部分总规范》光纤的分类方法,按光纤所用材料性质、折射率分布状况等因素,光纤被分为 A 类和 B 类:A 类为多模光纤,B 类为单模光纤。多模光纤可简单地认为有多个传输模数量的光在光纤中传播;单模光纤可认为只有单个传输模数量的光在光纤中传播,其结构及传输情况如图 8-2-3 所示。

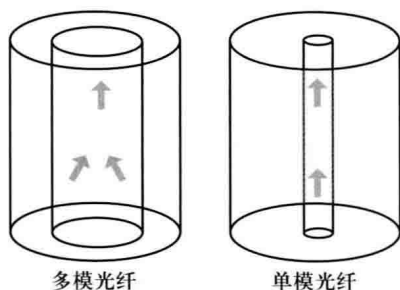


图 8-2-3 多模光纤和单模光纤光传播图

(1) 多模光纤(A类光纤)

多模光纤(A类光纤)按折射率分布状况分类,分为梯度型折射率光纤(A1)、准阶跃型折射率光纤(A2.1)、阶跃型折射率光纤(A2.2、A3)。

由于阶跃型折射率多模光纤的模间色散高,只适用于短途低速通信,现在已逐渐被淘汰了。

梯度型光纤是为了克服阶跃型多模光纤模色散的缺点而设计的一种多模光纤。并且,梯度型多模光纤具有衰减低、抗弯曲等特点,其性能比阶跃型多模光纤要好很多,目前,多模光纤一般为梯度型折射率光纤(A1)。

梯度型多模光纤包括 A1a、A1b、A1c 和 A1d 几种类型,主要应用于数据链路、局域网、传感器的光纤连接。

ITU-T 在 2000 年对多模光纤给出了最新建议:G.651 多模光纤是长波长多模光纤,其物理