

全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书

通信专业 实务

——传输与接入

■ 全国通信专业技术人员职业水平考试办公室 组编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书

通信专业 实务

——传输与接入

■ 全国通信专业技术人员职业水平考试办公室 组编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

通信专业实务——传输与接入 / 全国通信专业技术人员
职业水平考试办公室组编. —北京: 人民邮电出版社, 2008.6
全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书
ISBN 978-7-115-18550-1

I. 通… II. 全… III. 通信技术—工程技术人员—水平
考试—自学参考资料 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 110453 号

内 容 提 要

本书依据《全国通信专业技术人员职业水平考试大纲》要求编写。全书分为有线传输与接入和无线传输与接入两部分。有线传输与接入部分的内容包括: 光纤通信基础知识、SDH 技术、DWDM 传输技术、MSTP 技术、接入网技术、下一代网络、光传输网络规划和光传输系统测试等。无线传输与接入部分的内容包括: 无线通信基础知识、无线通信系统基本知识、移动通信系统、微波与卫星通信系统、无线市话系统等。

本书既可作为全国通信专业技术人员职业水平考试的教材, 也可作为职业大中专在校学生的学习辅导教材, 还可供通信行业专业技术人员自学使用。

全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书

通信专业实务——传输与接入

-
- ◆ 组 编 全国通信专业技术人员职业水平考试办公室
责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 24 2008 年 6 月第 1 版
字数: 580 千字 2008 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18550-1/TN

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书

顾问委员会

秘建虎	史晓光	焦桂芳	宋宝英	苏少林	王金龙
许二宁	朱新煜	滕伟	朱峰		

编审委员会

黄克新	张邦宁	沈志祥	周建兵	唐景山	贾丹华
华仁方	朱祥华	殷益群	胡怡红	韩光伟	刘荣
李明清	施扬	张曙光	李茂长	潘焱	田华
汪仙山	姚力	聂晶	沈存峰	陈涓	刘军杰
陈昕	邵世雷	周卫东	徐智勇	邹仕祥	王衍波
罗国明	徐民	唐勇	夏南军	张雷霆	卢智军
周齐	赵长煦	张耀珍	刘静娴	王林林	雷晶
刘政	杨纯洁	曹兆成	谷俊江	樊玮	王向东
郭继兵	丁玮	堵雯曦	黎德琛	曹旭	张丛生
黄甫喜	张冬	戚兆军	孙青华	童蕾	王明明
刘键	张立科	李韵菊	顾芳	程志民	刘志文
张长新	张荣坤	张宏	张礼佳	赵宁	蒋亮
张彬	石景华	刘晓梅	储冰凌		

策划编辑 滑玉

近年来，我国通信行业在党中央、国务院的正确领导下，在发展中改革，在改革中发展，取得了举世瞩目的发展业绩。综合通信能力显著提升，业务结构不断优化，行业创新与转型步伐加快，充分发挥了对经济社会发展的倍增效应。“十一五”期间通信业务总量年均增长 28.5%，5 年增长 2.5 倍；电话用户年均新增 1 亿户，5 年增长了一倍多，互联网上网人数翻了两番；固定、移动电话普及率分别提高 10.3 和 25.2 个百分点。基础电信企业非话业务收入比例达到 30.6%，新增非话业务收入占全部新增收入的比例达到 63%，增值电信企业达到 2.2 万家，电信网络和用户规模居世界第一。我国通信行业发展一年一大步，实现了跨越式发展。

在通信行业跨越式发展的带动下，人才需求日益迫切。为适应我国社会主义市场经济体制和国家通信现代化建设需要，提升通信专业技术人员整体素质，推进通信专业技术人员认证管理工作与国际接轨，人事部和信息产业部决定，在通信运营领域建立通信专业技术人员职业水平评价制度。这项制度的建立，改革了原有的通信专业技术职称评定办法，实行了“以考代评”、“统一证书”，有利于企业改进人才培养模式，有利于加快通信专业技术人员的知识更新速度，有利于通信专业人才相互交流、合理流动，有利于增强通信企业的国际竞争力。

为了保证全国通信专业技术人员职业水平考试工作顺利开展，规范培训和考试工作，确保通信工程师以考代评的质量，公平、公正、科学地对通信专业技术人员进行鉴定考试，信息产业部全国通信专业技术人员职业水平考试办公室组织了一批具有较高理论水平和丰富实践经验的专家编写了全国通信专业技术人员初级、中级职业水平考试的 8 本教材，按照考试大纲的要求，全面介绍相关知识和技术，帮助考生学习和备考。

我们相信，经过全社会的共同努力，全国通信专业技术人员职业水平考试将会更加规范、科学，进而对培养通信专业人才，加快专业队伍建设，推动国民经济和国家通信现代化作出更大贡献。

全国通信专业技术人员职业水平考试办公室

本书主要是为“全国通信专业技术人员职业水平考试”（简称职业水平考试）应试者编写，以信息产业部颁发的《全国通信专业技术人员职业水平考试大纲》（简称《考试大纲》）为依据，经过多次集体讨论和修改，并最终定稿。

当前，各类电信网络正在飞速发展，电信网络的各种通信技术不断演进，各种电信业务层出不穷，令人目不暇接。为此，作者根据多年在电信网络与通信技术领域从事教学、科研、工程实践和管理的经验和体会，以及对电信网络相关技术和管理领域的理论与实践问题的深刻理解，紧扣《考试大纲》的要求，对本书的内容精心设计，力图从现代电信网络的视角对繁杂的各种通信技术认真加以审视。本书主要介绍成熟、实用和有一定发展前景的电信网络、通信技术和电信业务等内容。本书在每一章后面均附有练习题，最后还附有各章练习题的参考答案，以期满足传输与接入科目考试培训需要。

本书层次清晰、内容丰富、通俗易懂，注重现实通信企业对通信专业技术人员职业水平的要求，力求反映现代通信技术、业务的最新发展。全书分为15章，分别介绍光纤通信基础知识、SDH技术、DWDM技术、MSTP技术、接入网技术、下一代网络、光传输网络规划设计、光传输系统测试、无线通信基础知识、无线通信系统基础知识、移动通信系统、微波与卫星通信系统、无线市话系统等内容。

本书既可作为全国通信专业技术人员中级职业水平考试的教材，也可作为职业大中专在校学生的学习辅导教材，还可供通信行业专业技术人员自学使用。

参加职业水平考试使用本书时，应结合《考试大纲》的要求进行阅读，以便更有针对性。高等学校相关专业作为教学使用本书时，可结合学时安排，对各章节的内容进行取舍。

本书由黄克新、张邦宁主编，唐景山副主编。第1、2、3、4、5、7章由汪仙山编写，第6章由郭继斌编写，第8章由唐勇编写，第9、10、11、13、14章由潘焱编写；第12章由田华编写，第15章由田华、蔡伟明、谷俊江编写。

本书在编写过程中得到了信息产业部、江苏省通信管理局、中国人民解放军理工大学通信工程学院、中国电信股份有限公司江苏分公司、中国移动通信集团江苏有限公司、中国联通有限公司江苏分公司的大力支持和帮助，在此深表感谢。

由于编写时间仓促，作者水平有限，加之本书技术性和专业性较强，书中难免有疏漏与不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

第1部分 有线传输与接入

第1章 光纤通信概述2	2.4.2 SDH的功能分层.....37
1.1 引言.....2	2.4.3 SDH的网元形式.....38
1.1.1 光纤通信的发展简况.....2	2.5 SDH保护技术.....40
1.1.2 光纤通信的发展趋势.....2	2.5.1 自愈环网保护.....40
1.2 光纤.....4	2.5.2 子网连接保护.....43
1.2.1 光纤的结构与分类.....4	2.5.3 网络保护结构的互通.....43
1.2.2 光纤的色散与损耗.....5	2.6 SDH同步.....44
1.2.3 光纤的非线性效应.....7	2.6.1 定时基准的传输与分配.....44
1.2.4 常用的单模光纤.....9	2.6.2 SDH设备定时工作方式.....46
1.2.5 光源与光纤的耦合.....10	2.6.3 SDH定时的保护.....47
1.3 光缆.....11	2.7 SDH网络管理.....48
1.3.1 光缆的技术要求.....11	2.7.1 SDH管理网的功能.....48
1.3.2 常用光缆的典型结构.....12	2.7.2 SDH管理网的组织.....49
1.4 光通信器件.....14	练习题.....50
1.4.1 光源.....14	第3章 DWDM技术53
1.4.2 光检测器.....17	3.1 DWDM的工作原理.....53
1.4.3 光无源器件.....19	3.1.1 工作原理.....53
1.4.4 光开关.....21	3.1.2 工作方式.....54
1.4.5 光滤波器.....22	3.2 DWDM的系统组成.....55
1.5 数字光纤通信系统.....22	3.2.1 DWDM系统组成.....55
1.5.1 系统构成.....22	3.2.2 光波长转换器.....55
1.5.2 光信号的调制.....24	3.2.3 光复用器和光解复用器.....56
1.5.3 PDH传输体制.....26	3.2.4 DWDM系统的监控技术.....56
练习题.....27	3.3 DWDM系统工作波长.....58
第2章 SDH技术30	3.4 DWDM系统的节点功能.....59
2.1 SDH的速率体系和帧结构.....30	3.5 光放大器.....60
2.1.1 SDH的速率体系.....30	3.6 CWDM技术.....65
2.1.2 SDH的帧结构.....31	3.7 IP over WDM.....66
2.2 SDH的复用映射结构.....33	3.8 DWDM光网络.....67
2.3 SDH的光接口.....35	3.8.1 DWDM广播选择网.....67
2.4 SDH传送网结构.....36	3.8.2 DWDM波长选路网.....68
2.4.1 SDH的拓扑结构.....36	3.8.3 WRN的选路算法.....70

3.9 光传送网	72	6.1.2 ASON 的概念	109
练习题	73	6.2 ASON 的体系结构	109
第 4 章 MSTP 技术	76	6.2.1 ASON 的体系结构	109
4.1 MSTP 的功能模型	76	6.2.2 ASON 的接口类型	110
4.1.1 MSTP 的功能模型	76	6.2.3 ASON 的连接类型	112
4.1.2 MSTP 的特点	77	6.3 ASON 的传送面	113
4.2 级联与虚级联	78	6.4 ASON 的控制平面	114
4.3 SDH 上传送以太网 MAC 帧的 协议	81	6.4.1 控制平面的基本功能	114
4.3.1 PPP/HDLC 技术	81	6.4.2 控制平面的基本结构	116
4.3.2 GFP 技术	83	6.4.3 控制平面协议	117
4.4 内嵌 ATM 处理模块的 MSTP	86	6.5 ASON 的管理平面	117
4.5 内嵌二层交换技术的 MSTP	86	练习题	118
4.5.1 以太网业务透传	87	第 7 章 本地传输网规划	120
4.5.2 以太网的二层交换	87	7.1 本地传输网的分层结构	120
4.5.3 以太环网	88	7.1.1 本地网与干线的关系	120
4.6 内嵌 RPR 技术的 MSTP	88	7.1.2 本地网层次结构	121
4.6.1 弹性分组环	88	7.1.3 本地网分层规划	122
4.6.2 内嵌 RPR 的 MSTP	90	7.2 本地传输网的与其他业务网的 接口	124
4.7 内嵌 MPLS 技术的 MSTP	90	7.3 本地传输网面临的多厂家 环境	125
练习题	92	7.4 中继网络组织中应考虑的 要素	126
第 5 章 接入网技术	94	7.5 光传输网络的扩容和优化	129
5.1 接入网概述	94	7.6 SDH 网管系统配置	132
5.2 DSL 技术	95	7.7 SDH 网同步规划	133
5.3 混合光纤同轴网	97	7.8 新建与扩容工程	135
5.3.1 HFC 网络结构	97	练习题	137
5.3.2 HFC 的频率分割	97	第 8 章 光传输常用仪表及测试	138
5.3.3 HFC 性能特点	98	8.1 光传输系统测试仪表简介	138
5.4 无源光网络	98	8.1.1 光功率计和稳定光源	138
5.4.1 光接入网的参考配置	98	8.1.2 光时域反射仪	139
5.4.2 PON 的拓扑结构	101	8.1.3 误码测试仪	140
5.4.3 PON 的信道共享技术	102	8.1.4 光谱分析仪和多波长计	141
5.4.4 APON	103	8.1.5 各类综合分析仪	142
5.4.5 EPON	104	8.2 PDH 测试简介	142
5.4.6 GPON	105	8.3 SDH 测试简介	143
练习题	106	8.4 DWDM 测试	145
第 6 章 自动交换光网络	108	8.4.1 波长转换器测试	145
6.1 ASON 的概念	108		
6.1.1 光交换技术	108		

8.4.2 合波器测试·····	149	8.4.5 光监控信道测试·····	153
8.4.3 分波器测试·····	150	8.4.6 WDM 系统主光通道测试·····	154
8.4.4 光放大器测试·····	151	练习题·····	156

第 2 部分 无线传输与接入

第 9 章 无线通信概述 ·····	160	11.4 接收系统结构·····	196
9.1 无线通信发展历史·····	160	练习题·····	197
9.2 无线频谱划分·····	161	第 12 章 移动通信系统 ·····	199
9.3 无线信道与电波传播特性·····	162	12.1 移动通信概述·····	199
9.3.1 自由空间传播·····	162	12.1.1 移动通信的特点·····	199
9.3.2 地面传播·····	163	12.1.2 移动通信的发展·····	201
9.3.3 卫星传播·····	164	12.1.3 移动通信新技术·····	205
9.4 无线通信发展趋势·····	165	12.2 GSM 数字蜂窝移动通信网·····	210
练习题·····	168	12.2.1 系统组成·····	211
第 10 章 无线通信技术 ·····	170	12.2.2 无线空中接口·····	214
10.1 模拟调制技术·····	170	12.2.3 GPRS·····	216
10.1.1 幅度调制·····	171	12.3 CDMA 数字蜂窝移动通信网·····	220
10.1.2 频率调制和相位调制·····	172	12.3.1 CDMA 蜂窝移动通信技术的	
10.2 数字调制技术·····	174	演进与标准·····	220
10.2.1 二进制振幅调制·····	175	12.3.2 系统结构与特点·····	221
10.2.2 二进制频率调制·····	175	12.3.3 无线接口特性·····	225
10.2.3 二进制数字相位调制·····	176	12.3.4 cdma2000 1x·····	227
10.2.4 现代数字调制技术·····	177	练习题·····	229
10.3 多址技术·····	178	第 13 章 微波与卫星通信系统 ·····	233
10.3.1 频分多址方式·····	179	13.1 微波中继通信·····	233
10.3.2 时分多址方式·····	179	13.1.1 微波中继通信的概念·····	233
10.3.3 码分多址方式·····	180	13.1.2 微波传播特性·····	235
10.3.4 空分多址方式·····	181	13.1.3 分集接收·····	237
10.4 扩频技术·····	182	13.1.4 微波线路设计·····	239
10.4.1 扩频技术概述·····	182	13.2 卫星通信系统·····	240
10.4.2 直扩扩频系统·····	183	13.2.1 卫星通信系统的组成·····	243
10.4.3 跳频扩频系统·····	184	13.2.2 甚小天线地球站·····	249
练习题·····	185	练习题·····	252
第 11 章 无线通信系统基本知识 ·····	188	第 14 章 无线市话系统 ·····	254
11.1 无线通信系统基本原理·····	188	14.1 PAS 的关键技术·····	256
11.2 天线基础知识·····	189	14.1.1 PAS 的频率使用与多址	
11.2.1 概述·····	189	技术·····	256
11.2.2 天线阵列·····	193	14.1.2 微蜂窝与信道动态分配	
11.3 发射系统结构·····	195	技术·····	258

IV | 通信专业实务——传输与接入

14.1.3 V5 技术	259	15.1 蜂窝移动通信网规划与优化	281
14.2 PAS 系统组成	263	15.1.1 无线网络规划基础	282
14.3 空中接口及通信流程	265	15.1.2 GSM 无线网络规划	294
14.3.1 PHS 空中接口的物理结构	265	15.1.3 CDMA 无线网络规划	301
14.3.2 PHS 的逻辑信道	266	15.1.4 无线网络优化	310
14.3.3 超帧结构	267	15.2 移动通信网运行维护	316
14.3.4 链路层与网络层结构	268	15.2.1 移动通信系统的主要性能指标	316
14.3.5 PAS 切换与漫游技术	268	15.2.2 移动通信网的运行维护方法与流程	320
14.4 信令传输	271	15.2.3 移动通信网的应急通信保障	326
14.4.1 概述	271	15.3 无线网络性能测试及常用仪表工具	327
14.4.2 中继	272	15.3.1 基站综合测试	327
14.4.3 链路	273	15.3.2 信令分析	331
14.4.4 协议	273	15.3.3 路测及数据分析	336
14.5 测试仪表	274	练习题	345
14.5.1 PHS35 功能说明	274	练习题参考答案(部分)	349
14.5.2 PHS35 信令跟踪	276	参考文献	370
14.5.3 LF970 应用说明	277		
14.5.4 3M965DSP 使用说明	278		
练习题	279		
第 15 章 无线网络规划与维护	281		

第 1 部分

章 目 录

有线传输与接入

第 1 章 光纤通信概述

第 2 章 SDH 技术

第 3 章 DWDM 技术

第 4 章 MSTP 技术

第 5 章 接入网技术

第 6 章 自动交换光网络

第 7 章 本地传输网规划

第 8 章 光传输常用仪表及测试

光纤传输系统一般由光发送机、光接收机、光中继器（或放大器）、光缆等组成。本章主要介绍常用光纤的主要特性、常用光缆的结构、光源和光开关等光通信器件以及数字光纤通信系统的组成。

1.1 引言

1.1.1 光纤通信的发展简况

光纤通信作为现代传输的主要手段，在现代电信网中起着举足轻重的作用。1970年美国康宁公司研制生产出了衰减为 20dB/km 的光纤，同年美国贝尔实验室实现了GaAlAs半导体激光器室温下的连续工作。由于这两项重要科研成果的问世，揭开了光纤通信的序幕，一种崭新的通信方式由此诞生。此后，光纤通信的研究在世界范围以极其惊人的速度发展，目前光纤通信已在各国的各个领域得到了越来越广泛的应用。

回顾光纤通信的发展历史，已经历了四代的变更。1973~1976年的短波长（850nm）多模光纤通信系统被认为是第一代光纤通信系统，其传输速率为 $50\sim 100\text{Mbit/s}$ ，中继距离为10km。1976~1982年的长波长（1310nm）多模和单模光纤通信系统构成了第二代光纤通信系统，其传输速率为 140Mbit/s ，中继距离为 $20\sim 50\text{km}$ 。1982~1988年的长波长（1310nm）单模光纤实用化通信系统的大规模应用是第三代光纤通信系统的主要特征，其传输信号为准同步数字体系（PDH）的各次群信号，传输距离为50km左右。1988年后到现在为第四代光纤通信系统的发展时期，主要特征是开始建设和应用同步数字体系（SDH）光纤传输网络，传输速率达 2.5Gbit/s ，中继距离为80km左右，传输波长从1310nm转向1550nm，并开始采用光纤放大器（EDFA）、光波分复用（WDM）等技术。目前，光纤传输网络核心汇聚层逐渐向自动交换光网络（ASON）方向发展，中继层面快速过渡到以多业务传送平台（MSTP）为代表的经济传送语音和数据的方式，接入层面逐步向无源光网络（PON）过渡。

1.1.2 光纤通信的发展趋势

光纤通信之所以能够迅速发展，是由于它具有以下突出优点。

- (1) 通信容量大。
- (2) 传输距离长。

- (3) 抗电磁干扰。
- (4) 环境适应性好, 重量轻且易敷设。
- (5) 保密性好。
- (6) 在大容量传输中体现出极高的投资性价比。

在未来的信息社会中, 大量信息的传输网络将主要由光纤网络来完成, 光纤网络将成为“信息高速公路”的传输平台。未来的光纤通信将向以下几个方面发展。

1. 大容量与高速化

大容量与高速化是现代通信网的要求, 实现大容量与高速化的主要手段是采用复用技术, 主要有时分复用和波分复用。

时分复用是指各路信号在同一信道占有不同时间间隙进行通信的传输方式, SDH 技术就是一个很好的代表。目前 2.5Gbit/s 的 SDH 系统已经大量商用, 10Gbit/s 的 SDH 系统在干线网和城域网核心汇聚层得到较多的应用。10Gbit/s 以上的系统由于电子器件性能的限制, 价格昂贵, 因此超大容量的传输系统(如干线传输)中一般采用光波分复用技术。光波分复用(WDM)配合光放大器(如掺铒光纤放大器, 即 EDFA)可以实现较远距离的大容量传输, 在干线网中得到广泛使用。

2. 全光化

在长途骨干传输、城域网核心汇聚层的传输将普遍采用光纤传输技术已经没有疑义。由于光放大技术的发展, 超长距离的光域传输已经没有障碍, 以自动交换光网络(ASON)为代表的光交换技术使得业务的上下和交换可以在光域进行, 而无源光网络(PON)技术使得城域网的接入层最终可以实现光纤化。

3. 业务多样化

人们已不满足于传统、单一的语音服务, 对各种多媒体业务的渴求越来越强烈, 因此信息共享、有线电视、点播电视、电视会议、异地办公、计算机互联网等应运而生。目前的综合业务传输平台(MSTP)技术就是为了适应 TDM、ATM 和 IP 业务的传输发展起来的。随着业务需求的多样化和 IP 化, 光纤网络将向全光化、智能化的下一代传输网络迈进。

4. 智能化

对于日益庞大的传输容量和日益繁忙的调度需求, 随着光纤网络建设规模的不断扩大, 网络的安全性、高效性、复杂性都对网络的管理维护提出了很高的要求, 基于密集波分复用(DWDM)的光传送网(OTN)技术、适应下一代网络(NGN)的自动交换光网络(ASON)技术, 正是为了适应未来的智能光网络(ION)的需要而得到飞速的发展。

从目前光纤传输网络的技术主流趋势上看, 干线网络已经基本构建为 DWDM 技术+EDFA 放大+G.655 光纤, 城域核心汇聚层网络正在形成粗波分复用(CWDM)技术与 MSTP 技术并进, 本地接入层网络正在建设 MSTP 技术和 PON 技术的平台。运营商在光纤传输网络的规划建设观念上有从业务网的配套传送网络向可经营网络转变的趋势, 以适应新业务的快速开展并占有基础平台资源作后盾的优势; 在网络演进方式上有朝 ASON 方向逐步进化的

趋势，以智能化的网络适应动态发展的业务需求。

1.2 光纤

1.2.1 光纤的结构与分类

光纤是光纤传输系统的物理层介质，是构建光纤传输网络的重要基础。

1. 光纤的结构

(1) 光纤的基本结构。光纤的基本结构一般是双层或多层的同心圆柱体，如图 1-1 所示。中心部分是纤芯，由纯石英玻璃拉制而成；纤芯外面是包层，纤芯的折射率高于包层的折射率，从而形成一种光波导效应，使大部分的光被束缚在纤芯中传输，实现光信号的传输。

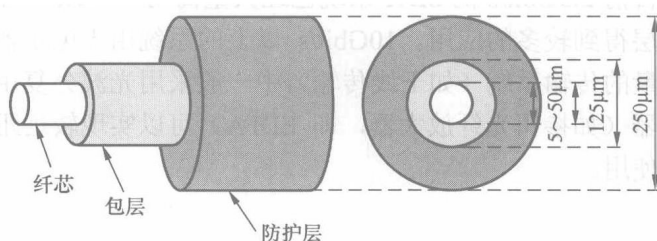


图 1-1 光纤的基本结构

由纤芯和包层组成的光纤称为裸光纤，裸光纤不能直接使用，实用的光纤是在裸光纤的外面增加了防护层保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤，增加光的柔韧性，并用来缓冲外层的压力、增加光纤的抗拉、抗压强度，以及改善光纤的温度特性和防潮性能等。防护层通常也包括好几层，包括包层外面的缓冲涂层、加强材料涂覆层以及最外一层的套塑层。

光纤的几何尺寸很小，纤芯直径一般在 5~50μm 之间，包层的外径为 125μm，若将防护涂层也算上整个光纤的外径，也只有 250μm 左右。

光纤的套塑方法有两种：紧套和松套。紧套是指光纤在套管内不能自由松动，而松套光纤则有一定的活动范围。紧套的优点是性能稳定，外径较小但机械性能不如松套，因为紧套无松套的缓冲空间，易受外力影响。松套光纤温度性能优于紧套光纤，制作比较容易，但外径较大，为避免水分，需要填充半流质的油膏来提高组成光缆后的光缆的纵向封闭性能。经过涂覆、套塑形成的光纤常称为被覆光纤。

(2) 光纤的材料。目前通信用光纤主要是石英系光纤，其主要成分是高纯度的 SiO_2 玻璃。如果在石英中掺入折射率高于石英的掺杂剂，就可以制作光纤的纤芯；同样，如果在石英中掺入折射率低于石英的掺杂剂，则就可以作为包层材料。纤芯中广泛应用的掺杂剂为二氧化锗 (GeO_2)、五氧化二磷 (P_2O_5) 等，包层中主要的掺杂剂为三氧化二硼 (B_2O_3)、氟 (F) 等。

(3) 光纤的折射率分布。光纤的光学特性决定于它的折射率分布，因此光纤纤芯和包层折射率在制造阶段（指预制棒制造）是沿径向加以控制的。用控制预制棒中掺杂剂的种类和数量的方法来使之产生一定形状的折射率分布。折射率分布的形状有：阶跃（突变）、高斯、三角形或更复杂的形式。

2. 光纤的分类

光纤的分类方法很多，既可以按照光的折射分布来分，如阶跃光纤和渐变光纤，也可以按照传输模式数目来分，如单模光纤和多模光纤。

光纤模是满足边界条件的电磁场波动方程的解即电磁场的稳态分布，每一种这样的分布对应一种模式。根据光纤中传输模式数目分为多模光纤和单模光纤。

(1) 多模光纤。光纤中传输模式的数目与光的波长、光纤的结构（如纤芯直径）、光纤的纤芯和包层的折射率分布有关。为了表示光纤中存在模式的数目，我们引入归一化频率参数 (V)，其定义为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

式中， λ 为光纤中电磁波的工作波长； a 为光纤的纤芯半径； n_1 为纤芯的折射率； n_2 为包层的折射率。

多模光纤是一种传播多个模式的光纤，即它允许多个传导模通过。多模光纤有两种结构：多模阶跃光纤和多模渐变光纤。多模阶跃光纤是早期的产品，结构简单、工艺易于实现，但由于其模式数目较多，因而模间延时较大，传输带宽窄，目前已被多模渐变光纤取代。

多模渐变光纤现已成为国际标准（即 G.651）光纤，ITU-T 对其主要参数，如芯径、包层直径、同心度误差等作了严格的规定。

(2) 单模光纤。只能传播一种模式的光纤称为单模光纤。为保证光纤中只存一个模式，应满足截止条件

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$

式中，波长的最小值称为单模光纤的截止波长，表示为 $\lambda_{\text{截止}}$ 。 V 随纤芯半径 a 、纤芯和包层的相对折射率 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 增大而增大，因而单模光纤的纤芯和折射率差都较小。典型多模光纤和单模光纤的结构如图 1-2 所示。

ITU-T 已规范了 4 种类型的单模光纤，即 G.652 光纤、G.653 光纤、G.654 光纤和 G.655 光纤。

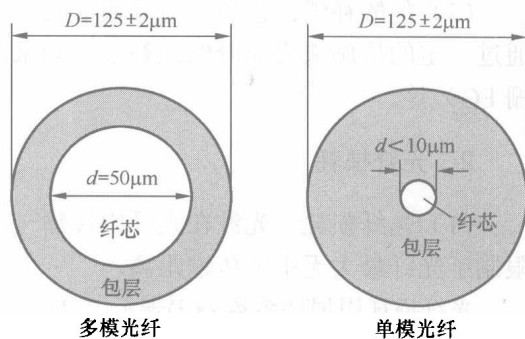


图 1-2 多模光纤与单模光纤的横截面尺寸

1.2.2 光纤的色散与损耗

光纤的色散和损耗是限制光无中继传输距离的两个重要因素。

1. 光纤色散

光信号在光纤中传输时幅度会因损耗而减小，波形亦会发生愈来愈大的失真，脉宽展宽，从而限制了光纤的最高信息传输速率，这是由光纤的色散引起的。色散是指不同频率的电磁波以不同的相速度和群速度在介质中传播的物理现象。色散导致光脉冲在传播过程中展宽，致使前后脉冲相互重叠，引起数字信号的码间串扰。在光纤传输理论中将色散分为模式色散

和波长色散。

(1) 模式色散。在多模光纤中,光信号耦合进光纤以后,会激励起多个导波模式。这些模式有不同的相位常数和不同的传播速度,从而导致光脉冲的展宽。这种脉冲展宽与波长色散不同,它与光源的谱宽无关。这种与光源谱宽无关,仅由传播模式间相位常数的差异导致的色散效应,称为模式色散或模间色散。

如果将不同的导波模式理解为不同的传播路径,则可以认为不同的导波模式从始端到终端走过不同的路程,从而导致光脉冲展宽,所以又可以将模式色散称为多径色散。在多模光纤中,模式色散是起决定性作用的,它最终限制了光纤的传输带宽和中继距离,人们常用比特距离积来衡量多模光纤的传输容量。

(2) 波长色散。单模光纤中不存在模式色散,但存在波长色散。所谓波长色散是由于光源发出的光脉冲不可能是单色光(而且光波上调制的信号存在一定的带宽),这些不同波长或频率成分的光信号在光纤中传播时由于速度不同引起的光脉冲的展宽现象称为波长色散。

根据波长色散的产生机理,又可以将波长色散分为材料色散和波导色散等。

材料色散是由于构成光纤的纤芯和包层材料的折射率随波长的变化(是波长的函数)而引起的。由于实际的光源的光谱是有一定的宽度的,不同的波长由于速度不同相互之间有延迟,从而导致输入光纤的窄脉冲输出时变宽了。对于普通的单模光纤,材料色散在波长 $\lambda=1.27\mu\text{m}$ 左右为零, $\lambda>1.27\mu\text{m}$ 时有正的色散, $\lambda<1.27\mu\text{m}$ 时有负的色散。

波导色散是由于光纤中模式的传播常数是频率的函数而引起的。它不仅与光源的谱宽有关还与光纤的结构参数(如 V 等)有关。对于普通的单模光纤,波导色散相对于材料色散较小,它与光纤波导参数有关,随 V 、光纤的纤芯、光波长的减小而变大。波导色散为负色散。

(3) 色散补偿。色散对光纤通信尤其是高比特率光纤通信系统的传输有不利的影响,可通过一定的措施来设法降低或补偿。如采用色散补偿光纤(DCF)或色散补偿器(如光纤光栅FG)等。

2. 光纤损耗

(1) 光纤损耗。光波在光纤中传输一段距离后能量会衰减,这就是光纤损耗。光纤损耗限制了光纤最大无中继传输距离。

光纤损耗用损耗系数 $\alpha(\lambda)$ 表示,单位为dB/km,即单位长度(km)的光功率损耗(dB)值。

如果注入光纤的功率为 $p(z=0)$,光纤的长度为 L ,经长度 L 的光纤传输后光功率为 $p(z=L)$,由于光功率随长度是按指数规律衰减的,定义 $\alpha(\lambda)$ 为

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \log \frac{p(z=0)}{p(z=L)} \quad (\text{dB/km})$$

引起光纤损耗的主要机理是光能量的吸收损耗、散射损耗及辐射损耗。吸收损耗与光纤材料有关,散射损耗与光纤材料及光波导中的结构缺陷、非线性效应有关,这两项损耗是光纤材料固有的;辐射损耗则与光纤几何形状的扰动有关。

光纤材料的吸收损耗包括紫外吸收、红外吸收和杂质吸收等。红外吸收形成了石英光纤工作波长的上限;紫外吸收随波长减小而逐渐变大;而杂质吸收典型的是OH⁻吸收峰。

散射损耗中,典型的如瑞利散射,其大小与光波长的4次方成反比,因而对短波长窗口的影响较大。

辐射损耗如光纤的弯曲损耗、微弯损耗等。

光纤的损耗与波长的关系，如图 1-3 所示，可见有 3 个低损耗窗口，分别位于 0.85 μm 、1.30 μm 及 1.55 μm 波段。

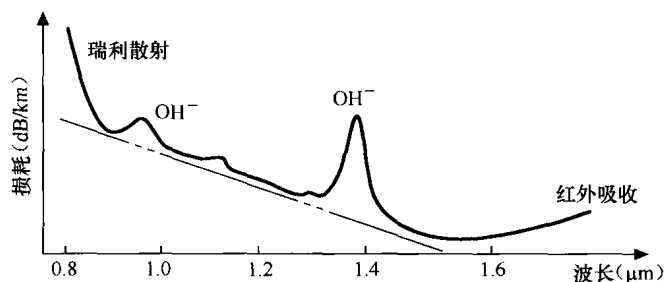


图 1-3 光纤损耗与波长的关系

(2) 光纤的可用频谱。根据光纤的光功率损耗，同时考虑到光源、光检测器和包括光纤在内的光器件的使用，目前光纤应用的光谱范围如表 1-1 所示。光纤的第 1 低损耗窗口位于 0.85 μm 附近，第 2 低损耗窗口位于 1.30 μm 附近 (S 波段)，第 3 低损耗窗口位于 1.55 μm 附近 (C 波段)；将 1 561~1 620nm 段定义为 L 波段或第 4 窗口，将 1 350~1 450nm 段定义为第 5 窗口。习惯上将 1 528~1 545nm 段称为蓝波段，将 1 350~1 450nm 段称为红波段。

表 1-1 目前光纤采用的低损耗光谱

窗 口	标 记	波长范围 (nm)	光 纤 类 型	应 用
第一		820~900	多模光纤	LAN
第二	S	1 280~1 350	单模光纤	单波长
第三	C	1 528~1 565	单模光纤	WAN
第四	L	1 561~1 620	单模光纤	WAN
第五		1 350~1 450	单模光纤	MAN、WAN
		1 450~1 528	单模光纤	WAN

1.2.3 光纤的非线性效应

光源性能的提高、DWDM 系统和光放大器的采用，使得光纤的入纤功率可能很高。在光场较弱的情况下，光纤的各种特征参数随光场强弱变化很小，这时光纤对光场来讲是一种线性介质。但是，当光纤中的光功率提高后（如 DWDM 系统），光纤的各种特征参数随光场强度而显著变化，从而引起光纤的非线性效应。

单模光纤的非线性效应分为受激散射效应和非线性折射率效应。受激散射效应包括受激拉曼散射 (SRS) 和受激布里渊散射 (SBS)，非线性折射率效应包括自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM) 和四波混频 (FWM)。

1. 受激散射

(1) 受激拉曼散射 (SRS)。当一个强光信号输入光纤后，在光纤中会引发分子共振，产