

丛书主编：卢光跃 / 丛书副主编：张利 杨武军

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（中级） 传输与接入专业考试辅导

秦 婷 郭春霞 杨随虎 编著



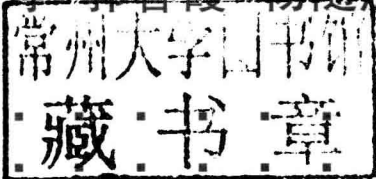
清华大学出版社

丛书主编：卢光跃 / 丛书副主编：张利 杨武军

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（中级） 传输与接入专业考试辅导

秦 婷 郭春霞 杨随虎 编著



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是针对通信专业技术人员职业水平考试（通信专业实务（中级）——传输与接入）的配套参考用书。本书主要内容涉及有线传输与接入和无线传输与接入的基本概念、基本技术、常见系统、网络规划、设计与工程建设、运行维护与管理以及测量等各方面。

本书可以作为通信专业技术人员职业水平考试（通信专业实务（中级）——传输与接入）的参考书。

本书扉页为防伪页，封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。  
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

### 图书在版编目（CIP）数据

通信专业实务（中级）——传输与接入专业考试辅导/秦婷等编著. —北京：清华大学出版社，2014  
全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书  
ISBN 978-7-302-36986-8

I. ①通… II. ①秦… III. ①通信技术-工程技术人员-水平考试-自学参考资料②通信传输系统-工程技术人员-水平考试-自学参考资料③接入网-工程技术人员-水平考试-自学参考资料 IV. ①TN91  
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 139504 号

责任编辑：柴文强 薛 阳  
封面设计：常雪影  
责任校对：胡伟民  
责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者：清华大学印刷厂

装 订 者：三河市少明印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×230mm 印 张：26.25 防 伪 页：1 字 数：660 千字

版 次：2014 年 8 月第 1 版

印 次：2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数：1~4000

定 价：49.00 元

# 序 言

当今世界，通信领域的发展日新月异，各种通信新技术、新产品、新服务大量涌现。在国家“十一五”发展规划纲要和“十二五”发展规划纲要中明确提出要大力发展通信产业；2010年10月发布的《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，提出加快建设宽带、泛在、融合、安全的信息网络基础设施；在2012年7月颁布的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》，首次明确提出实施“宽带中国”工程，在2013年8月国务院颁布的《“宽带中国”战略及实施方案》，将宽带网络提升为新时期我国经济社会发展的战略性公共基础设施；在2013年8月出台的《国务院关于促进信息消费扩大内需的若干意见》，力求在扩大居民消费需求方面，给信息产业带来新的增长点。面对激烈的国际竞争，建设一支适应国际化、水平一流的人才队伍成为了我国信息与通信行业（ICT）成败的关键。

为此，由国家人力资源和社会保障部、工业和信息化部领导组织了国家级通信专业技术人员职业水平考试（以下简称通信考试），其目的是科学、公正地对全国通信专业技术人员进行职业资格、专业技术资格认定和专业技术水平测试。根据原人事部、信息产业部文件（国人部发[2006]10号），通信专业技术人员职业水平评价，纳入全国专业技术人员职业资格证书制度统一规划，分初级、中级和高级三个级别层次。初级、中级职业水平采用考试的方式评价；高级职业水平实行考试与评审相结合的方式评价。

该项考试既是职业资格考试，又是职称资格考试，近几年每年参加该项考试的人员稳定在4~5万人左右。参加通信专业技术人员初级、中级职业水平考试，并取得相应级别职业水平证书的人员，表明其已具备相应专业技术岗位工作的水平和能力。用人单位可根据《工程技术人员职务试行条例》有关规定和相应专业岗位工作需要，从获得相应级别、类别职业水平证书的人员中择优聘任。取得初级水平证书，可聘任技术员或助理工程师职务；取得中级水平证书，可聘任工程师职务。通信专业技术人员初级、中级职业水平考试在全国实施后，各地区、各部门不再进行通信工程相应专业和级别任职资格的评审工作。

然而，目前，图书市场上有关通信考试的教材很少，真正从考试的角度，用简单、通俗易懂的语言讲述通信考试内容的书籍还是寥寥无几，很难满足市场的需要。为此清华大学出版社与西安邮电大学合作，邀请了一批教学与工程实践经验丰富的老师，参与本套丛书的编写，丛书合计8本，包含初级职业水平考试用书2本（《通信专业综合能力》和《通信专业实务》）和中级职业水平考试6本（《通信专业综合能力》和《通信专业实务》，其中《通信专业实务》分为交换技术、传输与接入、终端与业务、互联网技术、设备环境5个专业方向。该丛书旨在兼顾通信知识的系统性及通信技术最新发展的前提下，为读者提供一

套通俗易懂、涵盖通信考试基本知识点和考试内容的考试用书。

本书力图用通俗易懂的语言，给读者提供一种全新的阅读体验，将艰深复杂的通信知识进行通俗的解读，并围绕考试大纲和历届考题的形式，设计了针对性的仿真考题，并进行讲解，读者一方面能够对当代通信的基本原理和关键技术有一个全面的了解，另一方面对通信考试内容进行有针对性的复习备考。本书读者对象主要是通信行业从业人员。

历经一年多的撰写，在丛书即将出版之际，非常感谢清华大学出版社的柴文强老师、丛书编写团队教师一起筹划丛书、精炼内容所付出的辛苦；感谢编写团队的各位老师，在繁重教学科研任务下，保质保量完成本丛书所付出的辛勤与智慧；感谢柴文强老师及各位编辑们的对书稿撰写的指导及编辑工作。但由于时间仓促及作者学识有限，书中内容难免会有欠妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

# 前 言

为了帮助广大考生在短期内准确理解和熟练掌握全国通信专业技术人员职业水平考试通信专业实务（中级）——传输与接入专业考试大纲要求和知识点的内容，全面提高解题能力和应试水平，本书编写团队在认真分析考试大纲的基础上，精心编写了本书，通过对知识点的综述和习题的解题分析，帮助考生提高综合分析和综合解题的能力。同时，本书也适合作为各类通信专业技术人员职业水平考试培训班培训教材使用。

本书依据《全国通信专业技术人员职业水平考试大纲》要求设置章节，全书分为两大部分，共设 15 章，内容涉及有线传输与接入和无线传输与接入的各个方面。其中本书第 1 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章由秦婷编写，第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 7 章由郭春霞编写，第 11 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章、第 15 章由杨随虎编写。

本书每章节的编排分为基础知识、考试要求、考试要点、习题精粹及答案、练习题以及练习题参考答案 6 个模块。其中基础知识模块对考试大纲所要求的知识点进行详细讲解，并对常考知识点进行了深度剖析。考试要求和考试要点帮助考生在考前快速回忆考试内容及要求，明确本章节的学习目标和重点。习题精粹及答案主要针对《全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书》中各章节练习题进行总结分析，以帮助开阔考生的解题思路。练习题模块则以各种习题的形式对知识点的内容进行深入训练，注重对所学知识的应用提升，帮助考生将所学知识融会贯通，切实提高考生解题能力。

建议考生在使用本书时，不要就题论题，应通过对题目的练习、比较、思考，掌握该题型设置和解答的规律和技巧，从而迅速提高知识水平和应试能力。希望本书能为考生的复习备考带来大的帮助。

在此，编写团队要对在本书编写过程中提供很大帮助的人民邮电出版社出版的《全国通信专业技术人员职业水平考试参考用书》及其编者表示深深的感谢，在此帮助下，我们才能顺利地完成本书的编写。

我们根据多年教学经验的积累，力图通过本书帮助考生进行全国通信专业技术人员职业水平的考试。但是，由于传输与接入包含有线与无线的各个方面，涉及面广，内容更新迅速，加之编者水平有限，书中难免有缺陷和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 4 月于西安

# 目 录

<b>第 1 章 光纤通信概述</b> ..... 1	<b>【习题集】</b> .....41
<b>【基础知识】</b> ..... 1	<b>【习题参考答案】</b> .....45
1.1 引言..... 1	<b>第 2 章 SDH 技术</b> ..... 50
1.1.1 光纤通信的发展简介 ..... 1	<b>【基础知识】</b> ..... 50
1.1.2 光纤通信的特点 ..... 1	2.1 SDH 的产生 ..... 50
1.1.3 光纤通信的发展趋势 ..... 2	2.1.1 PDH 的帧结构和主要缺陷 ..... 50
1.2 光纤..... 3	2.1.2 SDH 基本概念和特点 ..... 51
1.2.1 光纤的结构与分类 ..... 3	2.2 SDH 的速率体系和帧结构 ..... 51
1.2.2 光纤的传输特性 ..... 6	2.2.1 SDH 的速率体系 ..... 51
1.2.3 光纤的非线性效应 ..... 9	2.2.2 SDH 的帧结构 ..... 52
1.2.4 光纤的光学特性 ..... 11	2.3 同步复用与映射方法 ..... 55
1.3 光缆..... 12	2.3.1 复用结构 ..... 55
1.3.1 光缆的结构 ..... 12	2.3.2 映射 ..... 57
1.3.2 典型的光缆结构 ..... 13	2.3.3 定位 ..... 58
1.3.3 光缆的种类 ..... 14	2.3.4 复用 ..... 58
1.4 光通信器件 ..... 14	2.3.5 复用映射单元的参数 ..... 60
1.4.1 光源 ..... 14	2.4 光接口类型与参数 ..... 61
1.4.2 光电检测器 ..... 19	2.4.1 光接口、电接口的界定 ..... 61
1.4.3 光放大器 ..... 22	2.4.2 光接口的分类 ..... 61
1.4.4 无源光器件 ..... 24	2.4.3 光接口参数 ..... 61
1.5 数字光纤通信系统 ..... 28	2.5 SDH 传送网络结构 ..... 63
1.5.1 数字光纤通信系统组成 ..... 28	2.5.1 SDH 的拓扑结构 ..... 63
1.5.2 光纤通信系统的分类 ..... 29	2.5.2 SDH 的功能分层 ..... 63
1.5.3 光信号的调制 ..... 30	2.5.3 SDH 的网元形式 ..... 65
1.5.4 准同步数字系列 (PDH) 传输体制 ..... 32	2.6 网络的保护与恢复 ..... 65
<b>【考试要求】</b> ..... 35	2.6.1 自愈网的概念 ..... 66
<b>【考试要点】</b> ..... 35	2.6.2 自愈环网保护 ..... 66
<b>【习题集精粹及答案】</b> ..... 36	2.7 SDH 网络同步与定时 ..... 69
	2.8 SDH 网络传输性能 ..... 72

2.9 SDH 网络管理 .....	77	4.2.2 MSTP 的功能模型 .....	123
【考试要求】 .....	79	4.2.3 MSTP 的特点 .....	124
【考试要点】 .....	79	4.3 MSTP 关键技术 .....	125
【习题集精粹及答案】 .....	79	4.3.1 级联与虚级联 .....	125
【练习题】 .....	85	4.3.2 封装协议 .....	127
【练习题参考答案】 .....	89	4.3.3 链路容量调整机制(LCAS) .....	129
<b>第3章 DWDM 技术</b> .....	94	4.4 内嵌 ATM 处理模块的 MSTP .....	130
【基础知识】 .....	94	4.5 内嵌二层交换技术的 MSTP .....	131
3.1 WDM 技术概述 .....	94	4.5.1 以太网业务透传 .....	131
3.1.1 工作原理 .....	94	4.5.2 以太网的二层交换 .....	131
3.1.2 WDM、DWDM 与 CWDM .....	95	4.5.3 以太环网 .....	132
3.1.3 基本类型 .....	96	4.6 内嵌 RPR 技术的 MSTP .....	132
3.2 DWDM 系统组成 .....	98	4.7 内嵌 MPLS 技术的 MSTP .....	133
3.2.1 光波长转换器 .....	99	【考试要求】 .....	134
3.2.2 光复用器和光解复用器 .....	99	【考试要点】 .....	134
3.2.3 光放大器 .....	100	【习题集精粹及答案】 .....	134
3.2.4 DWDM 传输系统的 监控与管理 .....	103	【练习题】 .....	137
3.3 波长分配与通道间隔 .....	104	【练习题参考答案】 .....	138
3.4 DWDM 系统的节点功能 .....	105	<b>第5章 接入网技术</b> .....	141
3.5 IP Over DWDM .....	106	【基础知识】 .....	141
3.6 DWDM 光网络的组成结构 .....	107	5.1 接入网概述 .....	141
3.7 光传送网 .....	109	5.2 DSL 技术 .....	145
【考试要求】 .....	110	5.3 混合光纤同轴网 .....	147
【考试要点】 .....	110	5.3.1 HFC 的发展 .....	147
【习题集精粹及答案】 .....	111	5.3.2 HFC 的系统网络结构 .....	147
【练习题】 .....	117	5.3.3 HFC 的频谱划分 .....	149
【练习题参考答案】 .....	119	5.3.4 HFC 的特点 .....	149
<b>第4章 MSTP 技术</b> .....	122	5.4 无源光网络 .....	150
【基础知识】 .....	122	5.4.1 光接入网的基本配置 .....	150
4.1 MSTP 概述 .....	122	5.4.2 光接入网的分类 .....	152
4.1.1 MSTP 产生的背景 .....	122	5.4.3 PON 的基本原理 .....	152
4.1.2 MSTP 的发展 .....	122	5.4.4 PON 的拓扑结构 .....	154
4.2 MSTP 的功能模型及特点 .....	123	5.4.5 APON 技术 .....	155
4.2.1 MSTP 的工作原理 .....	123	5.4.6 EPON 技术 .....	157
		5.4.7 GPON 技术 .....	158



5.4.8 V5 接口 .....	160	7.4 中继网络组织中应考虑的因素 .....	194
5.4.9 PON 的测距技术 .....	162	7.5 本地传输系统的优化 .....	195
【考试要求】 .....	163	7.6 SDH 网管系统配置 .....	196
【考试要点】 .....	164	7.7 SDH 网同步规划 .....	196
【习题集精粹及答案】 .....	164	7.8 新建与扩容工程建设程序 .....	197
【练习题】 .....	168	【考试要求】 .....	198
【练习题参考答案】 .....	171	【考试要点】 .....	198
<b>第 6 章 自动交换光网络</b> .....	174	【习题集精粹及答案】 .....	198
【基础知识】 .....	174	【练习题】 .....	198
6.1 ASON 的概念及技术特点 .....	174	【练习题参考答案】 .....	199
6.1.1 ASON 的概念 .....	174	<b>第 8 章 光通信用仪表及测试</b> .....	200
6.1.2 ASON 技术的发展 .....	174	【基础知识】 .....	200
6.1.3 ASON 技术的特点 .....	174	8.1 光通信用仪表 .....	200
6.2 ASON 的网络体系结构 .....	175	8.1.1 光功率计 .....	200
6.3 ASON 的 3 种接口 .....	177	8.1.2 光源 .....	202
6.4 ASON 的 3 类连接 .....	178	8.1.3 光衰减器 .....	203
6.5 ASON 的 3 个平面 .....	178	8.1.4 光时域反射仪 .....	203
6.5.1 ASON 的控制平面 .....	178	8.1.5 光谱分析仪 .....	207
6.5.2 ASON 的传送平面 .....	183	8.1.6 光波长计 .....	207
6.5.3 ASON 的管理平面 .....	183	8.1.7 多波长计 .....	208
6.5.4 数据通信网 .....	185	8.1.8 误码测试仪 .....	208
6.6 ASON 与 SDH、OTN 的关系 .....	185	8.1.9 数字传输分析仪 .....	209
【考试要求】 .....	185	8.2 PON 网络测试 .....	211
【考试要点】 .....	186	8.2.1 光功率测试 .....	211
【习题集精粹及答案】 .....	186	8.2.2 光损耗测试 .....	214
【练习题】 .....	187	8.2.3 接收灵敏度测试 .....	215
【练习题参考答案】 .....	189	8.2.4 接收饱和度测试 .....	215
<b>第 7 章 本地传输网规划</b> .....	191	8.2.5 FTTH 网络测试 .....	216
【基础知识】 .....	191	8.3 PDH 测试项目 .....	223
7.1 本地传输网的分层结构 .....	191	8.4 SDH 测试项目 .....	223
7.1.1 传输网结构 .....	191	8.5 DWDM 测试 .....	224
7.1.2 本地网层次结构 .....	191	8.5.1 单盘测试 .....	225
7.1.3 本地网分层规划 .....	192	8.5.2 系统测试 .....	235
7.2 本地传输网与其他业务网的接口 .....	193	【考试要求】 .....	239
7.3 本地传输网面临的多厂家环境 .....	193	【考试要点】 .....	239

【习题集精粹及答案】	241	【考试要求】	287
【练习题】	245	【考试要点】	287
【练习题参考答案】	247	【习题集精粹及答案】	288
<b>第9章 无线通信概述</b>	249	【习题集】	291
【基础知识】	249	【练习题参考答案】	293
9.1 无线通信的发展史简介	249	<b>第11章 无线通信系统基本知识</b>	296
9.2 无线通信使用的频率和波段	250	【基础知识】	296
9.3 无线信道与电波传播的基本特征	251	11.1 天线基础知识	296
9.3.1 无线信道基本特征	252	11.2 天线阵列	298
9.3.2 电波的自由空间传播	252	11.3 无线通信系统基本原理	300
9.3.3 电波的地面传播	253	11.4 发射系统结构	300
9.3.4 电波的视距传播	253	11.5 接收系统结构	301
9.3.5 卫星传播	255	【考试要求】	302
9.4 无线通信发展趋势简介	256	【考试要点】	302
【考试要求】	259	【习题集精粹及答案】	302
【考试要点】	259	【练习题】	303
【习题集精粹及答案】	259	【练习题参考答案】	304
【练习题】	261	<b>第12章 移动通信系统</b>	305
【练习题参考答案】	262	【基础知识】	305
<b>第10章 无线通信技术</b>	264	12.1 移动通信概述	305
【基础知识】	264	12.1.1 移动通信的特点	305
10.1 模拟调制技术	264	12.1.2 移动通信的发展	306
10.1.1 幅度调制	265	12.1.3 移动通信新技术	308
10.1.2 角度调制	267	12.2 GSM 数字蜂窝移动通信网	311
10.2 数字调制技术	269	12.2.1 系统组成	311
10.2.1 数字振幅调制	270	12.2.2 GSM 无线空中接口	314
10.2.2 数字频率调制	273	12.2.3 GPRS	315
10.2.3 数字相位调制	274	12.3 CDMA 数字蜂窝移动通信网	317
10.2.4 改进型数字调制技术	276	12.3.1 CDMA 数字蜂窝移动通信 技术的演进与标准	317
10.3 多址技术	278	12.3.2 系统结构与特点	318
10.3.1 频分多址(FDMA)	279	12.3.3 CDMA 无线接口特性	319
10.3.2 时分多址(TDMA)	280	12.3.4 cdma2000 1x	320
10.3.3 码分多址(CDMA)	281	【考试要求】	321
10.3.4 空分多址(SDMA)	282	【考试要点】	321
10.4 扩频技术	283		

【习题集精粹及答案】 .....	322	【考试要点】 .....	354
【练习题】 .....	324	【习题集精粹及答案】 .....	355
【练习题参考答案】 .....	327	【练习题】 .....	355
<b>第 13 章 微波与卫星通信</b> .....	<b>330</b>	【练习题参考答案】 .....	<b>356</b>
【基础知识】 .....	330	<b>第 15 章 无线网络规划与维护</b> .....	<b>359</b>
13.1 微波中继通信 .....	330	【基础知识】 .....	359
13.1.1 微波中继通信的特点 .....	330	15.1 蜂窝移动通信网规划与优化 .....	359
13.1.2 微波传播特性 .....	331	15.1.1 无线网络规划基础 .....	359
13.1.3 分集接收 .....	333	15.1.2 GSM 无线网络规划 .....	366
13.1.4 微波线路设计 .....	334	15.1.3 CDMA 无线网络规划 .....	369
13.2 卫星通信系统 .....	335	15.1.4 无线网络优化 .....	373
13.2.1 卫星通信频段的划分 .....	336	15.2 移动通信网运行维护 .....	377
13.2.2 卫星通信的特点 .....	336	15.2.1 移动通信系统的主要	
13.2.3 卫星通信系统的组成 .....	337	性能指标 .....	377
13.2.4 甚小天线地球站 .....	340	15.2.2 移动通信网的运行	
【考试要求】 .....	341	维护方法与流程 .....	381
【考试要点】 .....	341	15.2.3 移动通信网的应急	
【习题集精粹及答案】 .....	342	通信保障 .....	387
【练习题】 .....	342	15.3 无线网络性能测试及	
【练习题参考答案】 .....	343	常用仪表工具 .....	387
<b>第 14 章 无线市话系统</b> .....	<b>345</b>	15.3.1 基站综合测试 .....	388
【基础知识】 .....	345	15.3.2 信令分析 .....	390
14.1 PAS 概述 .....	345	15.3.3 路测及数据分析 .....	391
14.2 PAS 的关键技术 .....	346	【考试要求】 .....	394
14.3 PAS 系统组成 .....	348	【考试要点】 .....	394
14.4 PAS 的空中接口及通信 .....	349	【习题集精粹及答案】 .....	394
14.5 信令传输 .....	352	【练习题】 .....	397
14.6 测试仪表 .....	353	【练习题参考答案】 .....	400
【考试要求】 .....	354	<b>参考文献</b> .....	<b>407</b>

# 第 1 章 光纤通信概述

## 【基础知识】

光纤通信，就是指以光波为载波，以光导纤维为传输媒介的一种通信方式。随着通信业务的迅猛增长，光纤通信以其独特的优越性和巨大的传输带宽成为当今世界最主要的信息传输方式。

### 1.1 引言

#### 1.1.1 光纤通信的发展简介

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。1966年7月英籍华裔学者高锟和霍克哈姆从理论上证明了用光纤作为传输介质可以实现光通信的可能性。1970年，美国康宁玻璃公司制造了世界上第一根传输损耗低于20dB/km的光纤，同年，美国贝尔实验室实现了GaAlAs半导体激光器在室温下的连续工作。光纤和半导体激光器的技术进步，使得1970年成为光纤通信发展的一个重要里程碑。此后，光纤通信的研究在世界范围内以其惊人的速度迅猛发展，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。

光纤通信的发展可以简要地分为四个阶段。第一阶段是从基础研究到商业应用的开发时期。第二阶段是以提高传输速率和增加传输距离为研究目标和大力推广应用的实用化时期。第三阶段是以超大容量、超长距离为目标，全面深入开展新技术研究的时期。第四阶段是采用光放大器、波分复用光纤通信系统和超长距离的光孤子通信系统时期。

#### 1.1.2 光纤通信的特点

光纤通信之所以受到人们的极大重视，是因为和其他通信方式相比，其具有无与伦比的优越性：

- (1) 通信容量大。目前用一根光纤同时传输50万个话路(40Gb/s)的实验已取得成功。
- (2) 中继距离长。配以适当的光发射、光接收设备以及光放大器，中继距离将达数百千米以上甚至数千千米。
- (3) 保密性能好。光波只在光纤的纤芯中传输，基本上没有光“泄露”。

- (4) 适应能力强。
- (5) 体积小、重量轻、便于施工和维护。
- (6) 原材料来源丰富，潜在的价格低廉。

光纤通信也存在如下缺点：

- (1) 需要光/电和电/光变换部分。
- (2) 光直接放大难。
- (3) 电力传输困难。
- (4) 弯曲半径不宜太小。
- (5) 需要高级的切断接续技术。
- (6) 分路耦合不方便。

虽然光纤通信存在这些问题，但随着科技的发展，这些问题都可以得到解决。由于光纤通信在技术上具有较大的优越性，它将在通信领域中发挥越来越重要的作用。

### 1.1.3 光纤通信的发展趋势

在未来信息社会中，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. 向超大容量和高速化演进

超大容量与高速化是现代通信网发展的必然要求，实现大容量与高速化的主要手段是采用复用技术，主要采用的复用技术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，采用点的时分复用系统的扩容已接近极限，但是光源信号可以利用多个波长适当地错开，并且在同一根光纤中进行传输，这样就形成了超大容量的传输系统，这种系统采用的主要技术就是光波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）。密集波分复用（Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM）系统为光传输链路提供了“无尽”的容量，同时使得信息的传输速率也得到了飞速的提高。

#### 2. 向全光网发展

未来的高速通信网将是光传送网，全光网络是它的终极发展目标。全光网络具有良好的透明性、开放性、兼容性、可靠性、可扩展性，并能提供巨大的带宽、超大容量、极高的处理速度、较低的误码率，网络结构简单，网络非常灵活，可以随时增加新节点。

#### 3. 向通信业务多样化发展

目前，通信网的业务已不仅仅是传统、单一的语音服务，各种多样化多媒体业务的形式也越来越多，如信息共享、有线电视、点播电视、电视会议、异地办公、计算机互联网等。因此，综合业务传输平台（Multi-Service Transfer Platform, MSTP）技术就是为了适应 TDM、ATM 和 IP 业务的传输发展起来的。以 IP 业务为主的数据业务是当前世界信息业发展的主要推动力。

#### 4. 向智能化发展

在现代通信飞速发展的情况下，庞大的传输容量和繁忙的系统调度需要光纤网络建设规模不断地扩大，同时网络的安全性、高效性、复杂性都对网络的管理维护提出了很高的要求，在这种情况下光传送网（Optical Transport Network, OTN）技术、自动交换光网络（Automatically Switched Optical Network, ASON）技术，较好地适应了未来的智能光网络（Intelligent Optical Network, ION）的需要，从而得到了飞速的发展。

## 1.2 光纤

### 1.2.1 光纤的结构与分类

光纤是光纤通信系统中的重要组成部件，是光信号传输的介质。

#### 1. 光纤的结构

光纤由光折射率较高的纤芯和折射率较低的包层所组成，为了保护光纤不受外力和环境的影响，在包层的外面都加上了防护层，如图 1.1 所示。通信系统中使用的光纤一般为圆柱形。

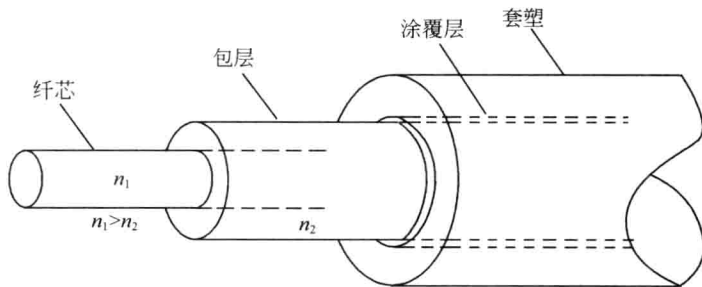


图 1.1 光纤结构示意图

在图 1.1 中，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。

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，并用来缓冲外界的压力、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。防护层通常有好几层，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。

纤芯的粗细、纤芯的材料和包层材料的折射率，对光纤的特性起着决定性的影响。

#### 2. 光纤的分类

光纤的种类很多，可以用不同的方法进行分类。

### 1) 按传输波长分类

按工作波长划分, 光纤可分为短波长光纤、长波长光纤和超长波长光纤。短波长光纤的波长为  $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ , 主要为  $0.85\mu\text{m}$ , 长波长光纤的波长为  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ , 主要有  $1.31\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  两种。长波长光纤具有衰耗低、带宽大等优点, 适用于远距离、大容量的光纤通信。目前主要使用的是  $1.55\mu\text{m}$  的长波长光纤。

### 2) 按光纤纤芯折射率的分布分类

按光纤纤芯折射率的分布划分, 光纤可分为阶跃型光纤、渐变型光纤和 W 型光纤。目前广泛使用的是阶跃型光纤和渐变型光纤。

### 3) 按光纤传输模数分类

按传输模的数量划分, 光纤分为多模光纤和单模光纤。

传输模式是指光在光纤中传播时的电磁场分布形式, 一种电磁场分布对应一种模式。

当光纤中传输多种模式时, 这种光纤为多模光纤。多模传输时光纤的归一化频率  $V > 2.045$ , 且  $V$  值越大, 光纤中传输的模式数就越多。多模光纤的纤芯直径较粗, 既可以采用阶跃折射率分布, 也可以采用渐变折射率分布, 目前多采用后者。多模光纤仅适用于低速率、短距离的光纤通信。

当光纤中只传输一种模式时, 这种光纤为单模光纤。单模传输时光纤的归一化频率  $V$  应满足:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \leq 2.045$$

$V=2.045$  对应的波长, 称为截止波长。单模光纤的纤芯直径极细, 折射率分布一般采用阶跃折射率分布。单模光纤只能传输基模, 不存在模式色散, 具有比多模光纤大得多的带宽, 因此, 单模光纤特别适用于大容量长距离传输。

### 4) 按 ITU-T 建议分类

根据 ITU-T 规范, 共有 G.652, G.653, G.654 和 G.655 四种单模光纤。单模光纤的介绍如表 1.1 所示。

表 1.1 常见单模光纤介绍

类型	定义	适用范围	主要指标
G.652	标准单模光纤 (Single-Mode Fiber, SMF), 是指色散零点 (即色散为零的波长) 在 $1310\text{nm}$ 附近的光纤	PON 系统、SDH 系统、DWDM 系统均可	<p><b>衰减:</b> <math>1310\text{nm}</math> 窗口的衰减值目前一般在 <math>0.3\sim 0.4\text{dB/km}</math>, 典型值为 <math>0.35\text{dB/km}</math>; <math>1550\text{nm}</math> 窗口的衰减值目前一般在 <math>0.17\sim 0.25\text{dB/km}</math>, 典型值为 <math>0.20\text{dB/km}</math></p> <p><b>色散:</b> 零色散波长的允许范围是 <math>1300\sim 1324\text{nm}</math>。在 <math>1550\text{nm}</math> 窗口的色散系数是正的。在波长 <math>1550\text{nm}</math> 处, 色散系数 <math>D</math> 的典型值是 <math>17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})</math>, 最大值一般不超过 <math>20\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})</math></p>

续表

类型	定义	适用范围	主要指标
G.653	色散位移光纤 (Dispersion Shifted Fiber, DSF), 是指色散零点在 1550nm 附近的光纤, 相对于标准单模光纤 (G.652), 它的色散零点发生了移动。用于 DWDM 系统时, FWM (Four Wavelength Mixing, 四频混波) 效应非常明显	主要应用于单信道几千千米的海底系统和长距离陆地通信干线, SDH 系统可以, DWDM 一般不采用	<b>衰减:</b> 1310nm 波段的衰减值小于 0.55dB/km, 目前没有掌握典型值数据。1550nm 波段的衰减值小于 0.35dB/km, 目前一般在 0.19~0.25dB/km <b>色散:</b> G.653 的零色散波长在 1550nm 附近, 在 1525~1575nm 范围内, 最大色散系数是 3.5ps/(nm·km), 在 1550nm 窗口, 特别是在 C 波段, 色散位移光纤的色散系数很小或可能为零
G.654	截止波长移位单模光纤。在 1550nm 处具有极小的传输损耗。截止波长大于 1310nm, 因此, 不能用于 1310nm 窗口	主要应用于需要很长再生段距离的海底光缆通信	<b>衰减:</b> 重点是降低 1550nm 波段的衰减, 一般为 0.15~0.19dB/km, 典型值为 0.185 dB/k <b>色散:</b> 零色散点在 1310nm 附近, 1550nm 窗口的色散较高, 可达 18ps/(nm·km)
G.655	非零色散位移光纤 (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF), 将色散零点的位置从 1550nm 附近移开一定波长数, 使色散零点不在 1550nm 附近, 而是在 1525nm 或 1585nm 处。能够避免 FWM 的影响。工作带宽为 1530~1625nm (C+L 波段), 截止波长大于 1310nm, 因此, 不能用于 1310nm 窗口	SDH/DWDM 系统均可, 但更适合 DWDM 系统的传送	<b>衰减:</b> 1310nm 波段的衰减值在 ITU-T 中无规定。1550nm 波段的衰减值小于 0.35dB/km, 目前一般在 0.19~0.25dB/km <b>色散:</b> 当 1530nm < $\lambda$ < 1565nm 时, 色散系数 D 在 1.0~6.0ps/(nm·km) 范围内; G.655 光纤色散系数没有典型值, 因厂家而异, 常见的有 4.5ps/(nm·km) 和 6ps/(nm·km)。需要实地确认

除表 1.1 中的单模光纤外还有 G.656、大有效面积光纤、色散补偿光纤和全波光纤等。

G.656 光纤是一种色散斜率基本为零、工作波长范围覆盖 S+C+L 波段的宽带光传输的非零色散位移光纤。

大有效面积光纤 (Large Effective-Area Fiber, LEAF) 是为了适应更大容量、更长距离的 WDM 系统的应用而出现的, 这种光纤的模场直径由普通光纤 8.4 $\mu\text{m}$  增加到 9.6 $\mu\text{m}$ , 从而使有效面积从 55 $\mu\text{m}^2$  增加到 72 $\mu\text{m}^2$  以上。适用于使用高输出功率掺铒光纤放大器, 即 EDFA 和 WDM 技术的网络。

色散补偿光纤 (Dispersion Compensating Fiber, DCF) 是具有大的负色散的光纤。它是针对现已铺设的 1.3 $\mu\text{m}$  标准单模光纤而设计的一种新型单模光纤。为了使现已敷设的 1.3 $\mu\text{m}$  光纤系统采用 WDM/EDFA 技术, 就必须将光纤的工作波长从 1.3 $\mu\text{m}$  转为 1.55 $\mu\text{m}$ , 而标准光纤在 1.55 $\mu\text{m}$  波长的色散不是零, 而是正的 17~20ps/(nm·km), 并且具有正的色散斜率, 所以必须在这些光纤中加接具有负色散的色散补偿光纤, 进行色散补偿, 以保证整条光纤线路的总色散近似为零, 从而实现高速度、大容量、长距离的通信。



全波光纤（All Wave Fiber, AWF）就是采用新的生产流程，使 1385nm 附近残留的  $\text{OH}^-$  离子几乎全部消除掉的一种新型光纤。全波光纤把原来认为是不能使用的波段的光损耗降低下来，把两个窗口之间的间隔打通，形成了一个宽的窗口，使从 1335nm 一直到 1625nm 的整个波段都可以使用，因此把这个打通后的新窗口称为“全波窗口”。ITU-T 将“全波光纤”定义为 G.652c 类光纤。主要适用于 ITU-T G.957 规定的 SDH 传输系统和 G.691 规定的带光放大的单通道 SDH 传输系统和高至 STM-64（10Gb/s）的 ITU-T G.692 带光放大的波分复用传输系统。

## 1.2.2 光纤的传输特性

光纤的传输特性主要包括色散特性和损耗特性，它们分别决定光纤通信系统的传输距离和通信容量。

### 1. 光纤色散

光脉冲中的不同频率或模式在光纤中的群速度不同，因而这些频率成分和模式到达光纤终端有先有后，使得光脉冲发生展宽，致使前后脉冲相互重叠，引起数字信号的码间串扰，这就是光纤的色散，如图 1.2 所示。光纤中的色散可分为模式色散、色度色散和偏振模色散。

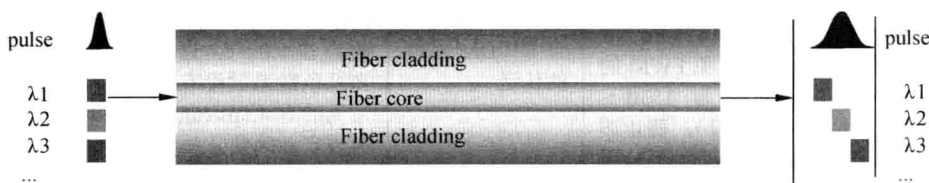


图 1.2 色散引起的脉冲展宽示意图

(1) 模式色散。对于多模中不同模式的光束有不同的群速度，在传输过程中，由于不同模式的光束的时间延迟不同而产生色散，称为模式色散。只有多模光纤才存在模式色散。在单模光纤中由于只有一种模式传输，没有模式色散，所以单模光纤的色散比多模光纤小得多，即其通信容量比多模光纤大得多，这也是单模光纤获得广泛应用的原因之一。

(2) 色度色散。由于光源的不同频率（或波长）成分具有不同的群速度，在传输过程中，不同频率的光束的时间延迟不同而产生的色散称为色度色散。色度色散包括材料色散和波导色散。

**材料色散：**由于材料折射率随光信号频率（波长）的变化而变化，使光信号不同频率（波长）成分所对应的群速度不同，从而引起脉冲展宽，由此引起的色散称为材料色散。

**波导色散：**从理论上讲，光纤中的光波只在纤芯中传输，但由于光纤的几何结构、形状等方面的不完善，使得光波的一部分在纤芯中传输，而另一部分在包层中传输，由于纤芯和包层的折射率不同，而造成脉冲展宽的现象，称为波导色散。