



# 光纤通信系统

GUANGXIAN TONGXIN XITONG

邓建芳 李筱林 主 编  
刘 芳 夏雪刚 副主编  
赵丽花 主 审



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 光纤通信系统

邓建芳 李筱林 主 编  
刘 芳 夏雪刚 副主编  
赵丽花 主 审



中国铁道出版社

2017年·北京

## 内 容 简 介

本书结合职业院校教学特点,采取项目式编写方式,适应职业院校项目式教学。书中主要包括光纤通信系统认知、SDH 传输系统组建、DWDM 传输系统组建、OTN 传输系统组建、ASON 技术、传输系统维护与管理等内容。每个项目细分为不同的模块和任务。

本书为高等职业院校通信专业教学用书,也可以作为铁路、城轨等领域通信相关专业的工程技术人员和管理人员培训和自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/邓建芳,李筱林主编. —北京:中国铁道出版社,2017. 8

ISBN 978-7-113-23288-7

I. ①光… II. ①邓… ②李… III. ①光纤通信-通信系统-高等职业教育-教材 IV. ①TN929. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 144753 号

书 名:光纤通信系统

作 者:邓建芳 李筱林 主编

策 划:徐 清

责任编辑:亢嘉豪

编辑部电话:(路)021-73146

电子信箱:dianwu@vip. sina. com

(市)010-51873146

封面设计:王镜夷

责任校对:苗 丹

责任印制:高春晓

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市宏盛印务有限公司

版 次:2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:25. 75 字数:645 千

书 号:ISBN 978-7-113-23288-7

定 价:60. 00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

# 前 言

光纤通信在铁路专用传输网中起着重要的作用。随着我国铁路事业的蓬勃发展,光纤通信新技术不断涌现,对光纤通信系统的建设和维护人员提出了更高的要求。

本书打破传统的按照知识体系组织内容的方式,以铁路专用传输网建设和维护岗位所需的职业能力为目标,对岗位任务和职业能力进行分析,进行职业化教学设计,按职业典型工作过程划分实践项目。

铁路专用传输网可分为骨干层、汇聚层和接入层三层结构,主要由光纤与光纤通信设备组成光纤通信系统。骨干层和汇聚层主要采用 OTN 或 DWDM+SDH/MSTP 制式,接入层主要采用 SDH/MSTP 制式。本书立足于我国普速铁路和高速铁路传输网的实际应用,纳入铁路通信工传输设备维护工作的职业需求,设计了光纤通信系统认知、SDH 传输系统组建、DWDM 传输系统组建、OTN 传输系统组建、ASON 技术、传输系统维护与管理六个项目。

每个项目包括若干个模块,每个模块由具体的任务组成。每个工作任务既有理论知识,又有操作任务,理论和实践有机结合,在学习了相关理论知识后到实践中应用,通过实践巩固理论知识,增强了学习者的学习兴趣。

任务安排由简到难,循序渐进,逐步深入。任务设计从认识光纤和单个光纤器件开始,有了一定基础后组建简单以太网光纤通信系统,逐步过渡到组建单波 SDH、波分 DWDM 和 OTN 传输系统,最后在综合已有知识的前提下,对传输系统进行维护和管理。

本书的特点主要如下:

(1) 紧跟铁路专用传输网最新技术,实用性强

选材力求实用性和新颖性,充分体现了近几年来高速铁路传输新技术的应用和发展,既包括了我国铁路普速铁路和高速铁路正在使用的 SDH 和 DWDM 传输技术,又包括了铁路骨干网正在改造的 OTN 传输技术。

OTN 和 ASON 目前在我国市场上仅有理论教材,未曾出现 OTN 设备和 ASON 技术的实践操作内容,本书包含了应用成熟的 SDH、DWDM 传输系统的组建,以及技术新颖的 OTN 系统组建、ASON 业务配置,充分体现了职业教育与实际应用紧密结合的特点,走在铁路专用传输网的技术前沿。

(2) 可通过软件完成任务,实验成本低

SDH 传输系统组建、DWDM 传输系统组建、OTN 传输系统组建、ASON 技术四

个项目可以通过中兴 E300 网管软件来实施任务。使用者只需要在一台计算机上安装 E300 服务器和客户端即可完成绝大部分任务操作,实验成本低,很好地解决了传输设备台套数不足的问题。

### (3) 便于教学和自主学习

每个项目相对独立,每个任务建议 2~4 课时,便于教师进行理实一体教学,任务的操作步骤详细,方便学生自主学习,特别适合铁路类高职通信专业教师和学生使用,也可以作为铁路、城轨等领域通信相关专业的工程技术人员和管理人员培训和自学用书。

本书由邓建芳、李筱林主编,刘芳、夏雪刚副主编,由多所职业院校和中兴通讯有限公司合作完成。项目 1 的模块一由南京铁道职业技术学院段俊毅编写,项目 1 的模块二和模块三由新疆铁道职业技术学院刘芳编写,项目 2 的模块一由南京铁道职业技术学院朱晓蓉编写,项目 2 的模块二由湖南铁道职业技术学院谭传武编写,项目 3 由陕西铁路工程职业技术学院夏雪刚编写,项目 4 的模块一由南京铁道职业技术学院晏蓉编写,项目 4 的模块二和项目 5 的模块二由南京铁道职业技术学院邓建芳编写,项目 5 的模块一由南京铁道职业技术学院袁秀红编写,项目 6 的模块一由中兴通讯有限公司何良超编写,项目 6 的模块二由徐州工业职业技术学院凌启东编写,项目 2 的模块三和项目 6 的模块三由柳州铁道职业技术学院李筱林编写。全书由邓建芳统稿,赵丽花主审。

本书在编写过程中,参考了许多专家的著作和中兴通讯有限公司的相关设备资料,还得到了上海通信段、南京牧信科技有限公司、南京嘉环科技有限公司多位工程师的大力支持与帮助,在此表示最诚挚的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在一些错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 4 月

# 目 录

项目 1 光纤通信系统认知 .....	1
模块一 光纤通信认知 .....	1
任务 1: 光纤通信 .....	1
任务 2: 认识光纤 .....	3
模块二 光纤器件识别 .....	13
任务 1: 光纤跳线识别 .....	13
任务 2: 无源光纤器件识别 .....	18
任务 3: 有源光纤器件识别 .....	23
模块三 简单光纤通信系统组建 .....	32
任务 1: 光发送机测试 .....	32
任务 2: 光接收机测试 .....	38
任务 3: 认识光中继器 .....	43
任务 4: 光纤通信系统设计 .....	45
任务 5: 以太网光纤通信系统组建 .....	50
复习思考题 .....	54
项目 2 SDH 传输系统组建 .....	56
模块一 SDH 认知 .....	56
任务 1: 传输技术 .....	56
任务 2: SDH 帧结构 .....	61
任务 3: SDH 光接口识别 .....	72
模块二 SDH 传输系统配置 .....	74
任务 1: 认识 SDH 网络管理系统 .....	74
任务 2: SDH 系统硬件配置 .....	80
任务 3: 建立 SDH 传输系统拓扑 .....	90
任务 4: SDH 传输系统时钟源配置 .....	101
任务 5: 相邻站点间 2 M 电路业务开通 .....	110
任务 6: 相邻站点间 34 M 电路业务开通 .....	122
任务 7: 跨站点间 2 M 电路业务开通 .....	129
任务 8: 跨站点间 34 M 电路业务开通 .....	134
任务 9: 透传以太网业务开通 .....	140
任务 10: 虚拟局域网业务开通 .....	148
任务 11: SDH 传输系统公务配置 .....	155

模块三 SDH 网络保护 .....	160
任务 1:SDH 网络保护机制分析 .....	160
任务 2:通道保护配置 .....	163
任务 3:复用段保护配置 .....	172
任务 4:网元数据库下载 .....	179
复习思考题.....	181
<b>项目 3 DWDM 传输系统组建 .....</b>	<b>184</b>
模块一 WDM 认知 .....	184
任务 1: WDM 技术认知 .....	184
任务 2:WDM 光接口识别 .....	189
模块二 DWDM 传输系统配置 .....	192
任务 1:DWDM 系统结构 .....	192
任务 2:DWDM 设备硬件配置 .....	197
任务 3:建立 DWDM 系统拓扑 .....	208
任务 4:DWDM 网元内单板连接 .....	212
任务 5:DWDM 系统业务开通 .....	218
任务 6:DWDM 网络保护配置 .....	220
复习思考题.....	227
<b>项目 4 OTN 传输系统组建 .....</b>	<b>228</b>
模块一 OTN 认知 .....	228
任务 1:OTN 技术认知 .....	228
任务 2:OTN 开销认知 .....	235
任务 3:OTN 映射与复用认知 .....	249
模块二 OTN 传输系统配置 .....	258
任务 1:OTN 设备硬件配置 .....	258
任务 2:建立 OTN 系统拓扑 .....	283
任务 3:OTN 网元内单板连接 .....	287
任务 4:OTN 系统业务开通 .....	294
任务 5:波分系统光功率调测 .....	303
任务 6:OTN 网络保护配置 .....	308
复习思考题.....	326
<b>项目 5 ASON 技术 .....</b>	<b>327</b>
任务 1:ASON 技术认知.....	327
任务 2:ASON 业务配置.....	333
复习思考题.....	345

---

---

项目 6 传输系统维护与管理 .....	346
模块一 传输系统维护 .....	346
任务 1:DDF 数字配线接头的制作与维护 .....	346
任务 2:ODF 光纤配线接头的制作与维护 .....	350
任务 3:传输设备维护 .....	352
任务 4:传输网管维护 .....	356
模块二 传输系统测试 .....	364
任务 1:误码测试 .....	364
任务 2:以太网通道性能测试 .....	374
任务 3:抖动性能测试 .....	376
任务 4:波分系统性能测试 .....	381
任务 5:系统保护倒换测试 .....	385
模块三 传输系统故障处理 .....	390
任务 1:传输系统故障处理流程 .....	390
任务 2:传输系统上 R-LOS 告警故障处理 .....	393
任务 3:传输系统上单个业务不通故障处理 .....	395
任务 4:传输系统上网元脱管故障处理 .....	397
任务 5:波分系统误码率过高故障处理 .....	399
复习思考题 .....	400
参考文献 .....	401



# 项目1 光纤通信系统认知

## 模块一 光纤通信认知

### 任务1: 光纤通信

🔗: 认识光纤通信系统各组成部分, 根据生活中的实际应用逐步认识光纤通信的特点。

🔗: 能识别光纤通信系统的各组成部件, 比较说明光纤通信的优点和缺点, 完成光纤通信应用的调查报告。

#### 一、知识准备

光纤通信是以光波作为信息载体, 以光纤作为传输介质的一种通信方式, 是目前使用最主要的传输方式之一。光纤通信所用光波的波谱在  $1.67 \times 10^{14} \sim 3.75 \times 10^{14}$  Hz 之间, 波长范围为  $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$ , 属于电磁波谱中的红外波段。

#### (一) 光纤通信系统组成

光纤通信系统一般由光发送机、光中继器、光接收机、光纤线路组成。图 1-1 所示为光纤通信系统组成。光发送机和光接收机合在一起时统一称为光端机。

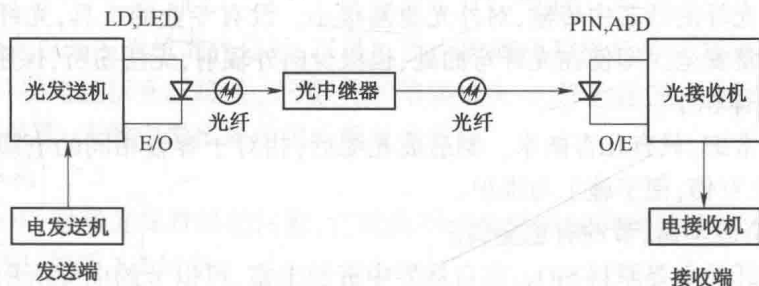


图 1-1 光纤通信系统组成

目前光纤上传送的信号以数字信号为主, 下面主要介绍数字光纤通信系统的各组成部分功能。

光发送机位于光纤通信系统的起始端, 其作用是将电发送机发送过来的电信号转换成光信号码流, 具体做法是先将电信号数字化, 然后对光源发出的光波进行调制, 成为已调光信号, 将其耦合到光纤中进行传输。

光发送机发出的光信号在光纤中传输时, 不仅幅度被损耗, 脉冲波形被展宽, 还夹杂着许多噪声。为了进行长距离的传输, 需要每隔一定距离设置一个光中继器。光中继器的作用是补偿光信号的幅度损耗, 对畸变失真的信号波形进行整形, 恢复光信号的形状。

光接收机位于光纤通信系统的末端, 其作用是将光纤传输过来的微弱光信号经光电检测器, 将其转换成电信号, 并对电信号进行足够的放大, 输出一个适合于定时判决的脉冲信号。

到判决电路,使之能够正确地恢复出原始电信号,送给电接收机。

为了使光纤通信系统正常运行,还需要自动倒换系统、告警处理系统、电源系统等备用或辅助系统。

## (二) 光纤通信特点

与电通信、无线通信相比,光纤通信具有以下优点和缺点:

### 1. 光纤通信优点

光纤通信之所以迅速发展和应用广泛,在于它具有以下突出的优点:

#### (1) 频带宽,通信容量大。

光纤通信使用的光波频率高,传输频带宽。理论上,光纤的传输频带为无穷大。通信容量与载波频率成正比,载波频率越高,所能携带的信息量就越大。光波的频率比电通信和无线通信频率高很多,通信容量也大很多。

#### (2) 损耗低,中继距离长。

通信系统的中继距离与传输线路的损耗成反比,线路的传输损耗越小,中继距离越长。电缆的损耗特性与结构尺寸及所传输信号的频率有关,频率越高,损耗越大。由于这个特性,电缆的中继距离不超过 500 m。而光纤的损耗特性仅与材料的纯度有关,在相当宽的频带内,损耗几乎不随频率的增加而变化。目前通信用单模光纤的最低损耗在 0.2 dB/km 以下。光纤的损耗低,意味着光纤的中继距离长,目前常用的单模光纤最大中继距离可达 200 km。

#### (3) 抗电磁干扰能力强。

光纤是电绝缘体材料,不受输电线、电气化铁路及高压设备等电磁干扰,可以与高压电线平行架设,通信也不会受到干扰。由于光纤抗电磁干扰能力强,光纤还可以与电缆一起制成复合光缆。

#### (4) 光泄漏小,保密性好。

光信号只在光纤的纤芯中传输,对外光泄漏很小。没有专业的工具,光纤无法分接,光纤中传输的信息非常安全。即使在光纤弯曲处,也极少向外辐射,无法窃听,保密性能好。

#### (5) 重量轻,体积小。

光纤直径非常细,只有几百微米。制造成光缆后,相对于容量相同的电缆,光缆的重量要小几十倍,甚至上百倍,便于施工与维护。

#### (6) 原材料资源丰富,节约有色金属。

制造石英光纤的主要原料  $\text{SiO}_2$ , 在自然界中资源丰富,可以节约电缆所用的铜、铝等有色金属。塑料光纤的主要原料为透光的聚合物,原材料来源丰富,价格低廉。

### 2. 光纤通信缺点

除了以上优点以外,光纤通信也存在一些缺点:

#### (1) 质地脆,不可弯曲太大,机械强度低。

光纤弯曲半径不易过小,否则会增加传输损耗,严重时会造成光纤断裂。

#### (2) 光纤接续需要一定的工具、设备和技术。

要使光纤连接损耗小,接续时要求两根光纤的纤芯严格对准,需要使用光纤熔接机或 U 型连接器来完成,比电缆接续复杂。

#### (3) 分路、耦合不灵活。

光纤分路和耦合需要使用专门的耦合器来完成。

随着科学技术的发展,光纤通信的缺点正在逐渐被克服。

## 二、任务实施

本任务的目的是对现实生活各领域中光纤通信的应用进行调查,完成调查报告。

### 1. 材料准备

无

### 2. 实施步骤

对现实生活各领域中光纤通信的应用进行调查,完成调查报告。

调查时间:
调查对象:
调查内容:

## 任务2:认识光纤

🔍:认识光纤的结构,分析光纤的导光原理和特性,对不同种类的光纤进行分类。

🔍:能根据测试图像识别光纤的不同结构,区分不同种类的光纤,根据光纤特性选择光纤适应不同的应用场合。

### 一、知识准备

光纤线路把来自光发送机的光信号,以尽可能小的畸变和损耗传输到光接收机。在工程实际应用中,光纤线路包括光纤跳线、光缆、光纤熔接接头、光纤连接器、光耦合器、光放大器或损耗器等。光纤跳线、光缆中最重要的组成都是光纤。

#### (一) 光纤结构

光纤(简称 OF)是导光导纤维的简称,它的典型结构是多层同轴圆柱体,从里到外依次为纤芯、包层、涂覆层,如图 1-2 所示。

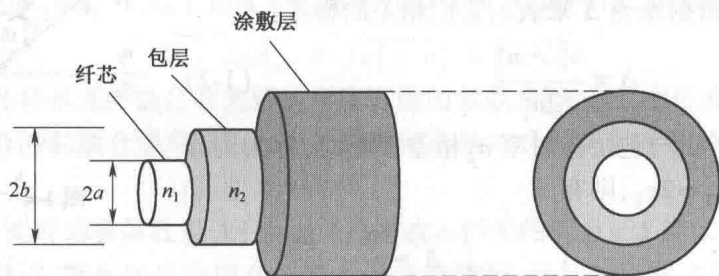


图 1-2 光纤的结构示意图

纤芯位于光纤的轴心位置,用于传输光信号,折射率为  $n_1$ ,直径为  $2a$ 。单模光纤纤芯直径  $2a$  为  $8\sim 10\ \mu\text{m}$ ,多模光纤纤芯直径  $2a$  为  $50\ \mu\text{m}$  或  $62.5\ \mu\text{m}$ 。

包层位于纤芯周围,折射率为  $n_2$ ,单模光纤和多模光纤的包层直径  $2b$  均为  $125\ \mu\text{m}$ 。包层

折射率  $n_2$  略小于纤芯折射率  $n_1$ , 这样可以使得光信号被束缚在纤芯中传输。为了实现纤芯与包层的折射率差, 需要使纤芯与包层的材料有所不同。石英光纤的纤芯是在  $\text{SiO}_2$  中掺杂了少量折射率高的  $\text{GeO}_2$  或  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 包层在  $\text{SiO}_2$  中掺杂了少量折射率低的  $\text{B}_2\text{O}_3$ 。

涂覆层保护光纤不受水汽的侵蚀和机械的擦伤, 同时又增加光纤的柔韧性, 并起着延长光纤寿命的作用。涂覆层常按照标准色谱着不同的颜色, 以区分光纤。涂覆层有一次涂覆、缓冲层和二次涂覆。一次涂覆层一般采用丙烯酸酯、有机硅或硅橡胶材料, 缓冲层为性能良好的填充油膏, 二次涂覆层多用聚丙烯或尼龙等高聚物。

## (二) 光纤导光原理分析

光纤是利用光的全反射特性来导光的。光从一种介质向另一种介质传播, 由于它们在不同介质中传输速率不一样, 因此, 当通过两个不同的介质(折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ) 交界面时, 就会发生反射和折射现象。

### 1. 反射定律

反射光线与入射光线和法线在同一平面上, 反射光线和入射光线分别位于法线两侧, 如图 1-3 所示。反射角  $\theta_2$  与入射角  $\theta_1$  的关系是:  $\theta_1 = \theta_2$ 。

### 2. 折射定律

折射光线跟入射光线和法线在同一平面上, 折射光线和入射光线分别位于法线两侧, 如图 1-3 所示。折射角  $\theta_3$  与入射角  $\theta_1$  的关系是:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_3$ 。

若光从折射率大的介质入射到折射率小的介质, 当入射角达到一定值时, 折射角将等于  $90^\circ$ , 光不再进入折射率小的介质, 即发生了全反射现象。这时的入射角称为临界角  $\theta_c$ , 它满足

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$$

当入射角  $\theta_1 > \theta_c$  时, 满足全反射条件, 所有的光将被反射回入射介质, 如图 1-4 所示。光纤就是利用这个原理在纤芯中传输光的, 这就要求纤芯折射率  $n_1$  大于包层折射率  $n_2$ , 即  $n_1 > n_2$ , 以使光波在纤芯中传输。

### 3. 相对折射率差

纤芯折射率  $n_1$  与包层折射率  $n_2$  的大小直接影响着光纤的性能, 常用相对折射率差  $\Delta$  来表示它们相差的程度:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1-2)$$

当纤芯折射率  $n_1$  与包层折射率  $n_2$  相差很小时, 称为弱导波光纤, 此时  $n_1 + n_2 \approx 2n_1$ , 则有

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1-3)$$

目前实用的光纤大多都是弱导波光纤。

### 4. 数值孔径

当光以入射角  $\theta_k$  从空气入射(折射率为  $n_0$ ) 到空气和纤芯(折射率为  $n_1$ ) 的交界面时, 将发生反射和折射现象, 一部分光折射到纤芯中, 折射角为  $\theta_3$ 。

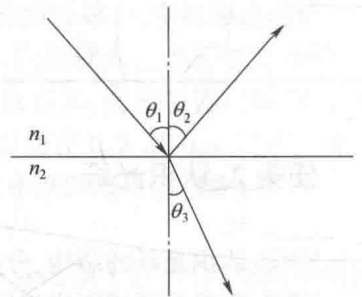


图 1-3 光的反射与折射

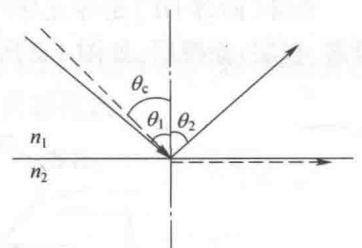


图 1-4 光的全反射

$$n_0 \sin \theta_k = n_1 \sin \theta_3 \quad (1-4)$$

这部分光向前传输,到达纤芯和包层的交界面时,若入射角  $\theta_1$  满足如下全反射条件时,将发生全反射现象,光全部反射回纤芯中。

$$\theta_1 \leq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1-5)$$

反射回纤芯的光,在向另一侧的纤芯与包层交界面入射时,入射角将保持不变,依然发生全反射现象。如此下去,光可以在纤芯中不断反射,从光纤的一端传播到了另一端。光信号在阶跃型光纤中的传播路径如图 1-5 所示。

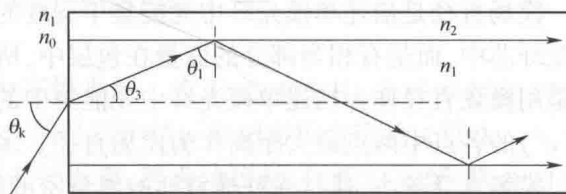


图 1-5 阶跃型光纤的传播路径

$\theta_3$  与  $\theta_1$  的关系为

$$\theta_1 + \theta_3 = 90^\circ$$

则有

$$n_0 \sin \theta_k = n_1 \cos \theta_1$$

由于空气的折射率  $n_0 \approx 1$ , 有

$$\begin{aligned} \sin \theta_k &= n_1 \cos \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} \\ &\leq n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (1-6)$$

(1) 当光入射到纤芯的入射角正好满足式(1-6)的临界条件,即  $\sin \theta_k = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  时,光在纤芯与包层的交界面折射角刚好为  $90^\circ$ , 此时有微弱的光沿纤芯与包层的交界面传播。

(2) 当光入射到纤芯的入射角小于临界角时,即  $\sin \theta_k < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  时,光在纤芯与包层的交界面发生全反射,光线以之字形向前传播,光被束缚在纤芯中。

(3) 当光入射到纤芯的入射角大于临界角时,即  $\sin \theta_k > \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  时,光在纤芯与包层的交界面的折射角小于  $90^\circ$ , 一部分光进入包层,被损耗掉。

可见,入射到光纤端面的光并不能全部被光纤所传输,只是在某个角度范围内的入射光才可以满足全反射条件被束缚在纤芯中传输。若用  $\theta_{\max}$  表示从空气中入射到光纤端面,并能为光纤所能捕获的最大入射角,这个角度  $\theta_{\max}$  的正弦值就称为光纤的数值孔径,表示为  $NA$ 。

$$NA = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-7)$$

光纤的数值孔径是光纤能接收光辐射角度范围的参数,同时也是表征光纤和光源、光检测器及其他光纤耦合时的耦合效率参数。光纤的数值孔径与纤芯折射率和纤芯、包层折射率差有关。

从物理上看,光纤的数值孔径  $NA$  表示光纤接收入射光的能力。 $\Delta$  越大,  $NA$  越大,则光纤接收光的能力也越强,即光能量束缚在纤芯中的能量越强,光纤与光源之间的耦合效率就越高。只有满足入射光  $\theta_k$  小于  $\theta_{\max}$  的光信号才会在纤芯中形成导波,在光纤中进行传输。从进入光纤的光功率的观点来看,  $NA$  越大越好。

但是  $NA$  太大时,经光纤传输后产生的信号畸变加大,会影响光纤的传输速率。因此,在光纤通信系统中,对光纤的数值孔径有一定的要求。通常为了最有效地把光入射到光纤中去,

应采用数值孔径与光纤数值孔径相同的透镜进行集光。

CCITT 建议多模光纤的数值孔径取值范围为 0.18~0.23,其对应的光纤端面接收角  $\theta_{\max}$  为  $10^\circ \sim 13^\circ$ 。不同厂家生产的光纤的数值孔径不同。在进行光纤连接的时候,尽可能选用数值孔径相同的光纤,否则会导致部分光进入包层之中,造成光的损失。

### 5. 模场直径

模场直径是描述单模光纤中光能集中程度的参量。因为单模光纤中基模场并不是完全集中在纤芯中,而是有相当部分的能量在包层中,所以对单模光纤不宜用芯径作为其特征参数,而是用模场直径作为描述单模光纤中光能集中的范围,一般以光强降低到轴心线处最大光强  $1/(e^2)$  的各点中两点最大距离作为模场直径。多模光纤直接使用纤芯直径作为模场直径。

模场直径越小,通过光纤横截面的能量密度就越大。当通过光纤的能量密度过大时,会引起光纤的非线性效应,造成光纤通信系统的光信噪比降低,影响系统性能。对于光纤通信用光纤,模场直径越大越好。

### (三) 光纤分类

#### 1. 按传输波长分类

按传输波长的不同,光纤可分为短波长光纤和长波长光纤。

##### (1) 短波长光纤

短波长光纤的中心波长为 850 nm,波长范围为 800~900 nm,主要应用于短距离通信。

##### (2) 长波长光纤

长波长光纤的中心波长有 1 310 nm 和 1 550 nm 两种,波长范围分别为 1 260~1 360 nm 和 1 510~1 610 nm,主要应用于长距离通信或干线传输。

#### 2. 按照光纤的模式分类

光纤传输模式是指光在光纤中传播时的电磁场稳态分布(既满足边界条件的电磁场波动方程的解),每一种电磁场稳态分布对应一种模式。

光纤中传播模式的数量与光的工作波长、光纤的结构特性、纤芯的折射率和包层的折射率分布有关。各模式都有其自身的归一化截止频率,它描述了各模式的截止条件,用  $V_c$  表示。 $LP_{01}$  模(基模)的  $V_c = 0$ 。与  $LP_{01}$  模最邻近的模为  $LP_{11}$ ,  $LP_{11}$  模的  $V_c \approx 2.405$ 。其后依次为  $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$ ……模次越高,相应的  $V_c$  就越高。

为了表示光纤中存在模式的数量,引入了归一化频率参数,定义为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-8)$$

式(1-8)中, $\lambda$  为光纤中光的工作波长, $a$  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。 $V$  随纤芯半径  $a$ 、纤芯和包层的相对折射率  $\Delta$  的增大而增大。

当光纤的归一化频率  $V$  大于某种模式的  $V_c$  时,这种模式就能在光纤中传输。根据光纤中传输模式的数量来分,光纤可分为单模光纤和多模光纤。

##### (1) 单模光纤 SMF(Single-Mode Fiber)

只能传播一种模式(即基模)的光纤称为单模光纤。判断一根光纤是不是单模传输,主要依据是归一化频率的大小。为了保证光纤中只存在一种模式,其余高次模都被截止,应满足截止条件

$$0 < V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405 \quad (1-9)$$

式(1-9)中,波长的最小值称为单模光纤的截止波长,表示为 $\lambda_{\text{截止}}$ 。

$$\lambda_{\text{截止}} = \frac{2\pi}{2.405} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{2.405} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-10)$$

若要实现单模传输,则须使光纤的工作波长 $\lambda > \lambda_{\text{截止}}$ 。单模光纤的纤芯半径 $a$ 和相对折射率差 $\Delta$ 较小,对制作工艺提出了很高的要求。由于单模光纤只传输基模,完全避免了模式色散。单模光纤色散小、损耗低、传输容量大,适用于长距离传输。

### (2) 多模光纤 MMF (Multi-Mode Fiber)

能传播两种或者两种以上模式的光纤称为多模光纤。当 $V > 2.405$ 时,光纤中存在 $LP_{01}$ 模、 $LP_{11}$ 模等多种模式,形成多模传输。多模光纤的纤芯半径 $a$ 和相对折射率差 $\Delta$ 较大。

多模光纤芯半径和相对折射率差大比单模光纤得多,制造较容易,使用较方便,耦合和连接比单模光纤容易。但多模光纤会产生模式色散,导致带宽变窄,降低光纤的传输容量,只适用于短距离传输。

单模光纤和多模光纤的比较见表 1-1。

表 1-1 单模光纤和多模光纤的比较

性能	名称	单模光纤	多模光纤
纤芯直径		较细(8~10 $\mu\text{m}$ )	较粗(50~100 $\mu\text{m}$ )
与光源的耦合		较难	简单
光纤间连接		较难	较容易
传输带宽		极宽(几百 GHz)	较窄(几 GHz)
微弯曲影响		小	较大
损耗		小	较大
色散		小	较大
适用场合		长距离、大容量	短距离、小容量

### 3. 按折射率分类

根据光纤中纤芯和包层的折射率分布不同,光纤可分为阶跃型光纤和渐变型光纤,如图 1-6 所示。

#### (1) 阶跃型光纤(SIF)

阶跃型光纤在纤芯与包层区域内,其折射率分布分别是均匀不变的,其值分别为 $n_1$ 与 $n_2$ ,但在纤芯与包层的分界处,其折射率的变化是阶跃的。

阶跃型光纤主要有阶跃型多模光纤和阶跃型单模光纤两种。在阶跃型单模光纤中,光线的传输轨迹是直线形状,如图 1-7(a)所示。在阶跃型多模光纤中,光线的传输轨迹是“之”字折线形状,如图 1-7(b)所示。

阶跃型光纤衍生出一种 W 型光纤。W 型光纤为双包层光纤,纤芯和内包层、外包层的折射率都是均匀分布的,折射率分别为 $n_1$ 、 $n_2$ 和 $n_3$ ( $n_1 > n_3 > n_2$ )。折射率在纤芯与内包层、内包层与外包层的界面上发生突变。W 型光纤可用

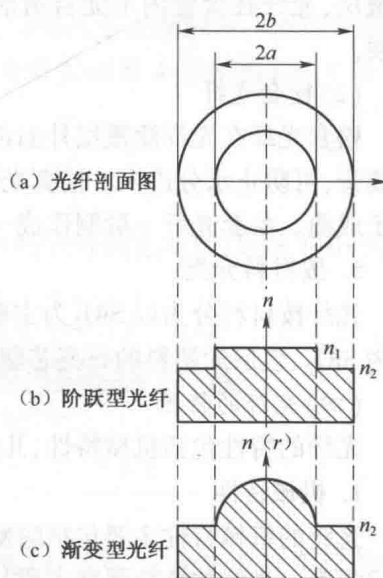
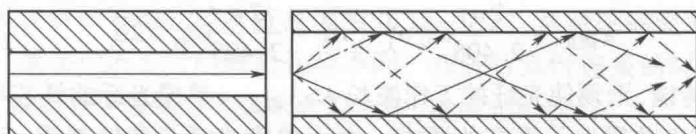


图 1-6 光纤的折射率分布

作带通滤波器。



(a) 阶跃型单模光纤

(b) 阶跃型多模光纤

图 1-7 阶跃光纤的传输轨迹

## (2) 渐变型光纤(GIF)

渐变型光纤轴心处的折射率最大( $n_1$ ),而沿剖面径向的增加而逐渐变小,到了纤芯与包层的分界面,正好降到与包层区域的折射率 $n_2$ 相等的数值;在包层区域中其折射率的分布是均匀不变的为 $n_2$ 。在渐变型光纤中,光线的传输轨迹是正弦形状,如图1-8所示。渐变型结构只有多模光纤才采用。

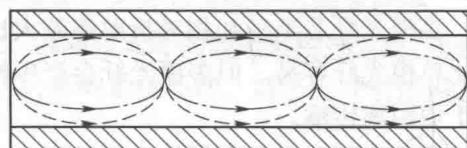


图 1-8 渐变型光纤的传输轨迹

渐变型光纤靠近轴心的光波传播路程短,折射率大,传播速度慢。远离轴心的光波传播路程长,折射率小,传播速度快。如果调整合适的光纤长度,可使从光纤端面上同一点出发的近轴光线经过适当的距离后,又重新汇集到一点,也就是说它们具有相同的传输时延,这种现象称为自聚焦特性。在渐变型光纤中,不同模式的光,在折射率分布不均匀的纤芯内,只要满足一定条件,这些光将同时到达终端,从而消除了模式色散。由于阶跃型多模光纤的模式数目较多,模间延时较大,传输带宽窄,目前已被渐变型多模光纤取代。

## 4. 按套塑结构分类

光纤按套塑结构分为紧套光纤和松套光纤。

### (1) 紧套光纤

紧套光纤为二次涂覆光纤,在一次涂覆的光纤上再紧紧地套上一层尼龙或聚乙烯等塑料涂覆层,光纤在套管内不能自由活动。紧套光纤结构相对简单,无论是测量还是使用都比较方便。

### (2) 松套光纤

松套光纤在光纤涂覆层外面再套上一层塑料套管,光纤可以在套管中自由活动,套管中充有油膏,可防止水分进入。松套光纤机械特性好,防水性能好,有利于提高光纤的稳定可靠性,便于成缆。松套光纤一般制作成一管多芯结构。

## 5. 按材料分类

光纤按材料分为以 $\text{SiO}_2$ 为主要成分的石英光纤,以多种成分组成的多组分玻璃光纤、纤芯为 $\text{SiO}_2$ 、包层为塑料的石英芯塑料包层光纤,以塑料为材料的塑料光纤。

### (四) 光纤的特性

光纤的特性包括机械特性、几何特性、温度特性和传输特性。

#### 1. 机械特性

光纤的机械特性主要包括耐侧压力、抗拉强度、弯曲以及扭绞性能等,工程上最关心的是抗拉强度。光纤的抗拉强度主要与光纤的制造材料、工艺有关。光纤在成缆以及安装使用中存在过大的残余应力,也会影响光纤的抗拉强度。



光纤的寿命,习惯称使用寿命,当光纤损耗加大以致系统开通困难时,称其已达到了使用寿命。从机械性能讲,寿命指断裂寿命。在光纤、光缆制造以及程建设中,一般是按20年的使用寿命设计的,实际可能使用30~40年。

## 2. 几何特性

光纤的几何特性包括纤芯直径、包层直径、纤芯不圆度、包层不圆度、纤芯与包层同心度等。光纤的几何尺寸、光学参数除对光纤的传输性能和机械性能有影响外,对光纤的接续损耗也产生较大的影响。ITU-T规定多模光纤的芯直径为 $50/62.5\ \mu\text{m}\pm 3\ \mu\text{m}$ ,多模及单模光纤的包层直径均要求为 $125\ \mu\text{m}\pm 3\ \mu\text{m}$ ,纤芯/包层同心度误差小于或等于6%,芯径不圆度小于或等于6%,芯径不圆度小于或等于2%。

## 3. 温度特性

光纤的温度特性是温度对光纤损耗的影响。由于光纤涂覆层、套塑层和石英的膨胀系数不同,有机树脂和塑料的热膨胀系数比石英大得多。在正常使用温度下( $-10\ ^\circ\text{C}\sim +40\ ^\circ\text{C}$ ),光纤的特性基本上不受影响。当温度降低时,由于涂覆层的收缩量比石英纤芯大,所以会使光纤受到很大的轴向压力而产生微弯,使光纤的损耗增大,如图1-9所示。随着温度的不断降低,光纤损耗就不断增大,当温度降至 $-55\ ^\circ\text{C}$ 左右时,损耗急剧增加,使系统无法正常运行。

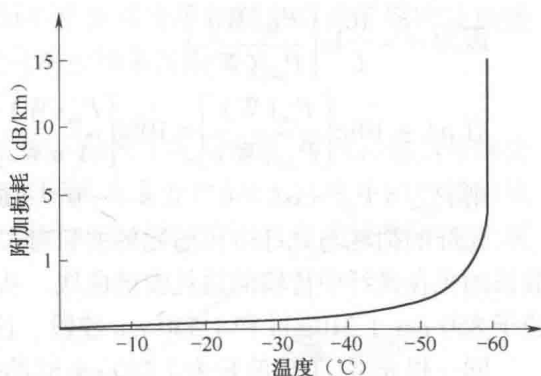


图1-9 光纤的温度特性

## 4. 传输特性

光纤的传输特性是指光信号在光纤中传输所表现出来的特性,主要包括损耗特性和色散特性。

### (1) 光纤的损耗特性

光纤传播的光能有一部分在光纤内部被吸收,有一部分可能辐射到光纤外部,使得光能减少。光波在光纤中传输时,随着传输距离的增加,光波的光功率强度逐渐减弱,光纤对光功率产生损耗作用,称为光纤的损耗(也称衰减)。长度为 $L$ 的光纤在波长 $\lambda$ 处的损耗(工程上单位为dB)定义为

$$A = 10\lg\left[\frac{P_0}{P_1}\right] \quad (\text{dB}) \quad (1-11)$$

式(1-11)中, $P_1$ 为传输到轴向距离 $L$ 处的光功率, $P_0$ 为 $L=0$ 处光纤的光功率,如图1-10所示。

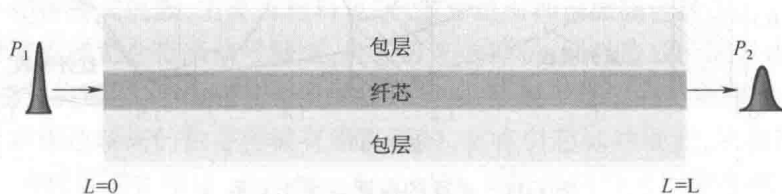


图1-10 光纤损耗示意图

光纤每千米的平均损耗一般用损耗系数(也称衰减系数) $A_f$ 表示,它是指光在单位长度光纤中传输时的损耗量,单位一般用 $\text{dB}/\text{km}$ 表示。损耗系数是光纤的重要特征参数之一,它在