

中等专业学校教材

光纤通信原理

南京铁路运输学校 晏蓉 主编
武汉铁路运输学校 赵沈 主审

中国铁道出版社

2000年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是根据铁路中专学校综合电信专业光纤通信课程教学大纲要求编写的,全书共五章,内容包括:概述、光纤与光缆、光器件、PDH 光纤系统及 SDH 光纤系统。为便于学习书末附有有关英文缩写语。

本书为中专综合电信专业教材,也可供从事通信技术的有关人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理/晏蓉主编.-北京:中国铁道出版社,
2000.9
中等专业学校教材
ISBN 7-113-03833-6

.光... .宴... .光缆通信-专业学校-教材
.TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38550 号

书 名: 光纤通信原理

作 者: 晏蓉

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑: 武亚雯

封面设计: 马利

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

开 本: 787× 1092 1/16 印张: 11 字数: 269 千

版 本: 2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1—3000 册

书 号: ISBN 7-113-03833-6/TN·127

定 价: 14.40 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

本书是根据 1997 年 7 月铁道部中等专业学校综合电信专业制定的“光纤通信系统原理”课程教学大纲要求编写的。

本书系统地介绍了光纤通信的基本概念和基本原理,考虑到光纤通信系统已广泛应用于计算机通信领域之中,该行业人员也有必要了解光纤通信的基本原理,书中兼顾了这方面的需求。全书共分五章,前三章讲述了光纤与光缆、光器件的基本原理,后两章介绍了 PDH 光纤系统及 SDH 光纤系统。通过本书的学习,将为学生为从事光纤通信领域的技术工作打下坚实的基础。

本书由南京铁路运输学校晏蓉主编,武汉铁路运输学校赵沈主审。编写分工为:

第一、二、三章由天津铁路工程学校卜爱琴编写,其余两章由南京铁路运输学校晏蓉编写,乌鲁木齐铁路运输学校杨天文负责编写习题。参加审稿会的有乌鲁木齐铁路运输学校杨天文、锦州铁路运输学校王静、洛阳信息工程学校郭青、闫建玫、西安铁路运输学校田国栋、内江铁路机械学校徐守菊、武汉铁路运输学校吴旭、南京铁路运输学校李嘉华,兰州铁路机械学校耿勇、柳州铁路运输学校何伟刚,他们为本书提出了许多中肯而具体的宝贵意见,在此一并表示感谢。

由于时间苍促,错误之处在所难免,敬请读者指正。

编 者

2000 年 6 月

目 录

第一章 概 述.....	1
第一节 光纤通信的发展过程.....	1
第二节 光纤通信系统的基本构成.....	2
第三节 光纤通信的特点.....	4
第四节 我国铁路光纤通信的现状.....	6
思考题.....	7
第二章 光纤与光缆.....	8
第一节 光纤与光缆的结构.....	8
第二节 光纤的导光原理	12
第三节 光纤的损耗	20
第四节 光纤的色散	22
第五节 光纤的连接	26
第六节 光纤的测量	30
第七节 光纤线路的维护	37
思考题	41
第三章 光 器 件	43
第一节 光 源	43
第二节 光检测器	54
第三节 无源光器件	60
思考题	67
第四章 PDH 光纤系统.....	68
第一节 光发送电路	69
第二节 光接收电路	73
第三节 线路码型	81
第四节 辅助功能	87
第五节 光中继器	91
第六节 传输距离估算	92
第七节 PDH 系统指标测试及维护	96
思考题.....	106

第五章 SDH 光纤系统	108
第一节 同步数字复接体制(SDH)	108
第二节 SDH 设备原理	130
第三节 网络结构与保护	150
第四节 网络管理	156
思考题	164
英文缩略语表	166
主要参考书目	168

第一章 概 述

光纤通信是以光波作载波、以光纤为传输媒介的通信方式。它是 70 年代初期出现的一种新型的通信技术。由于光纤通信本身具有一系列优越的特性,在短短的二三十年中得到了迅猛发展。如今,光纤通信已占据通信的主导地位,成为“信息高速公路”的基石。

第一节 光纤通信的发展过程

光纤通信是由光通信逐步发展演变而来的。我国古代用烽火台的火光传送敌情、近代战争中用信号弹指挥作战以及现代用信号灯指挥交通均可称为光通信。然而我们所说的光通信与这些简单的视觉光通信完全不同,它是指以光波作载波传送信息的通信方式。它的发展史应从贝尔的光电话说起。

1880 年,美国科学家贝尔发明了光电话。他用普通光源发出的自然光束作载波,在 200 m 的大气空间完成了语音信息的传送。光电话的发明,使用光波作载波传送信息成为可能,因此引起人们的极大关注。但由于当时技术条件的限制,这种光电话的传输距离很短,没有实用价值,只能算是光通信的雏形。在光电话问世后的很长一段时间里,光通信的发展非常缓慢,主要原因是没有找到合适的光源和传输媒介。

1960 年,美国科学家梅曼(Maiman)发明了世界上的第一台红宝石激光器。激光器发出的激光单色性好、方向性强、亮度高、相干性好,具有通常无线电波的性质,可作为理想的光载波加以调制后携带信息。因此激光器一出现,立即被看成光通信的关键元件,长期徘徊不前的光通信得以继续发展。60 年代初期研究的光通信大多是利用大气传输光波。经过实践人们很快发现大气传输光波受气候的影响十分严重,雾、雨、雪会使通信中断,风会引起信号的漂移和抖动使通信质量恶化。除此之外,大气传输光波还要求收、发两端直接可见。为了避免气候对光通信的影响,有人进行了透镜光波导实验。所谓透镜光波导就是在一条金属管道内,每隔一定距离放置一个聚焦透镜,使光波在管道中不断地边聚焦边向前传输。虽然实验是成功的,但由于透镜光波导结构复杂,安装精度要求太高而不能实用。尽管如此,这项实验对光纤通信的发展还是有贡献的,因为光纤的导光原理与透镜光波导基本相似,只是光纤导光原理的构思更巧妙、更合理一些。

1966 年,英国标准电信研究所的英籍华人高锟指出:用玻璃可以制出衰减为 20 dB/km 的光导纤维(简称光纤)。当时最好的玻璃衰减为 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。在这个理论的指导下,1970 年,美国康宁公司经过大量的研究和实验,首先制造出了衰减为 20 dB/km 的光纤,使光纤远距离传输光波成为可能。同年,最适合光纤通信的激光器——半导体激光器实现了室温连续振荡。半导体激光器能用电流直接调制,体积小、价格低,易于与光纤耦合。至此,实现光纤通信的两个最基本的问题——光源和光纤都获得了满意的解决,从而揭开了光纤通信发展的序幕,因此 1970 年可视为光纤通信的元年。

1976年,美国贝尔实验室在亚特兰大市成功地进行了第一个光纤通信系统的实验。该系统的传输速率为44 Mbit/s,传输距离为10 km左右。几乎与此同时,日本、英国等国家也先后进行了光纤通信系统实验,用于传送电话、电报、图像及数据信号。此后,世界上相继建成数千个光纤通信系统,并从实验阶段走向实用化阶段。二十多年来,光纤通信技术飞速发展,光源和光纤的质量不断提高。目前,在1.3 μm处的光纤损耗在0.5 dB/km以下,在1.55 μm处的光纤损耗达0.2 dB/km,已接近理论值。

第二节 光纤通信系统的基本构成

一、光在电磁波谱中的位置

光波与无线电波相似,也是一种电磁波,只是它的频率比无线电波的频率高得多。电磁波的波谱如图1—1所示。由图可见,红外线、可见光和紫外线均属于光波的范畴。可见光是人

眼能看见的光,它是由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色组成的连续光谱,其波长范围为0.39 μm至0.76 μm,其中红光的波长最长,而紫光的波长最短。红外线是人眼看不见的光,波长范围为0.76 μm至300 μm,一般又分为近红外区(= 0.76 ~ 15 μm)、中红外区(= 15 ~ 25 μm)、远红外区(= 25 ~ 300 μm)。目前光纤通信所用光波的波长范围为0.8 ~ 1.8 μm,属于电磁波谱中的近红外区。在光纤通信中,常将0.8 ~ 0.9 μm称为短波长,而将1.0 ~ 1.8 μm称为长波长。图1—1也示出了与波谱范围相对应的频率范围。光在真空中的传播速度约为 3×10^8 m/s,根据波长、频率和光速 c 之间的关系式

$$= c / \quad (1-1)$$

可计算出各电磁波的频率范围。对应光纤通信所用光波的波长范围,由式(1-1)可得相应的频率范围为 $1.67 \sim 3.75 \times 10^{14}$ Hz。可见光纤通信所用光波的频率是非常高的。正因为如此,光纤通信才具有其他通信无法比拟的巨大的通信容量。

二、光纤通信系统的基本组成

光纤通信系统是以光波作载波、光纤作传输媒介的通信系统。它的基本组成如图1—2所示,由光发送机、光接收机、光中继器以及光纤构成的光缆组成。光纤通信系统若加上适当的接口设备,就可以作为一个单独的“光单元”插入到现有的数字或模拟通信系统。所以光纤通信系统分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统,按送入系统的信号类型而定。

1. 光发送机

光发送机主要由光源和驱动器组成。光源产生光波,驱动器实现对光源的调制。光发送机的作用是将电信号转变为光信号,并将光信号送入到光纤中传输。

光源是光发送机的核心,其性能好坏将对光纤通信系统产生很大的影响。目前光纤通信系统使用的光源都是由半导体材料制成的,半导体光源分为两种:一种是半导体激光器;另一种是半导体发光二极管,它们都是在正向偏压下工作。半导体激光器发出的是激光,发光功率大,谱线宽度窄,但电路结构复杂,温度特性差。为使它稳定地工作,必须加控制电路;半导体发光二极管发出的是荧光,发光功率不大,谱线宽度宽,但电路结构简单,寿命长,价格便宜。

2. 光纤或光缆

光纤作为传输媒介,作用是将光信号由发端送到收端。光纤通信使用的光纤通常是由石英玻璃制成的,由纤芯和包层组成。为使光信号局限在纤芯中传输,要求纤芯的折射率略大于包层的折射率。光纤属于光波导,一般双向通信时需要两根光纤,来去方向各需要一根光纤传送光信号。

按分类方式不同,光纤有很多种类。按传输模式分类,有多模光纤和单模光纤;按折射率分布分类,有突变光纤和渐变光纤;等等。不同种类的光纤,其传输特性也不相同。

光纤的主要传输特性是衰减(dB/km)和色散(ps/km)。光纤衰减限制着传输距离,而色散则影响光纤通信系统的通信容量和传输距离。

为了保护光纤,在光纤拉丝成型的同时就在裸光纤上加了一层涂覆层,根据需要有时还要另加套塑。为使光纤能适应各种敷设条件和各种环境,还须把光纤和其他元件组合起来制成光缆才能在实际的工程中使用。

3. 光接收机

光接收机主要由光电检测器和放大器组成。其作用是将光纤传送过来的光信号转变为电信号,然后进行进一步的处理。

光纤通信使用的光电检测器也是半导体材料制成的。光电检测器分为 PIN 光电二极管和 APD 光电二极管两种,它们都在反向偏压下工作。这两种光电二极管的主要区别是: APD 光电二极管有雪崩增益,内部有光电流放大作用,有时也称之为雪崩光电二极管,而 PIN 光电二极管没有增益。但 APD 光电二极管工作时需要较高的反向偏压,并且温度特性差,为保证输出稳定,需要对反向偏压进行控制,因此电路比较复杂。

4. 光中继器

光信号在光纤中传输一定距离后,由于受到光纤衰减和色散的影响,光信号的能量会被衰减,波形也会产生失真,从而导致通信质量恶化。为此在光信号传输一定距离后就要设置光中继器,对衰减了的光信号进行放大,恢复失真了的波形。

光中继器有两类。一类是光-电-光间接放大光中继器。它先将被衰减的光信号转变为电信号,对电信号进行放大处理之后再转变为光信号送入光纤。另一类是全光中继器。它可以对光信号直接进行放大,补偿光信号的衰减,延长传输距离,但目前还不能起恢复失真波形的作用。

第三节 光纤通信的特点

光纤通信与电通信的主要区别有两点:一是用频率很高的光波作载波,二是用光纤作传输媒介。基于以上两点,光纤通信具有以下优点。

1. 传输频带宽,通信容量大

在电磁波谱中,无线电频段和微波频段已为人们所熟悉,通信技术的进步使电磁波谱的发掘利用扩展到光频段。光的基频为 3×10^{14} Hz,目前光纤通信的频率范围为 $1.67 \sim 3.75 \times 10^{14}$ Hz。而从长波开始、包括微波在内直至毫米波的整个电通信可利用的电磁波谱仅为 3×10^{11} Hz,所以用光作载频其理论频带极其宽广。

以 1.550 nm 光波长为例,对于光有公式

$$\begin{aligned} \text{光波长}(\lambda) \times \text{光频}(\nu) &= \text{光速}(c) \\ &= 1.550 \text{ nm时,} \\ &= c/\lambda = (3 \times 10^{14} \mu\text{m/s}) / (1.55 \mu\text{m}) = 2 \times 10^{14} / \text{s} \end{aligned}$$

如果使用十五分之一的波段,即 $0.1 \mu\text{m}$ 的波长宽度,对应的频带宽度

$$\Delta \nu = c / \lambda^2 \Delta \lambda = (3 \times 10^{14} \mu\text{m/s}) / (1.55 \mu\text{m})^2 = 12 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

若按 4 kHz 一个模拟音频话路所需要的带宽计算,可以传输 3×10^9 个模拟话路。若按 32 kHz 一个数字音频话路所需要的带宽计算,可以传输 3.75×10^8 个数字话路。

数字通信有通信质量好,抗干扰能力强等优点。用电缆进行数字传输的一大缺点是频带利用率不高。载波电话(模拟通信)一路带宽 4 kHz ,而一路 64 kbit/s 的 PCM 数字电话,至少需要带宽 32 kHz ,占用了 8 个模拟话路,故线路利用率较低。光纤的出现正好适应了数字通信的发展需要,目前多模光纤的带宽可以做到 $1 \text{ GHz} \cdot \text{km}$,单模光纤的带宽可以做到近 $100 \text{ GHz} \cdot \text{km}$,大大超过了电缆的最高传输带宽。所以不论是从可利用的光波频段来讲,还是就光纤自身的带宽而言,光纤通信可以利用的频带比任何其他通信方式都宽得多,通信容量非常大,特别适合高速率的数字通信。当社会的发展要求通信网传输由高码率的数字音频信号、高速成批数据信号、宽带数字电视信号等等组成的信息流时,只有光纤能够担当“信息高速公路”重任。虽然到目前为止还没有一种技术能像控制电磁波那样(调频,调相,调幅)方便的控制光波,但是已经证实,采用强度调制、直接检测的方式,可以用光载波传输 400 Mbit/s 至 10 Gbit/s 的高速数字信号,人们正在研究开发利用光频段的更有效的手段。

2. 传输距离长

在通信系统中,传输介质损耗的大小直接关系到传输距离的长短。光纤的传输损耗比长途电缆、同轴电缆、毫米波导管等任何一种线路都低,见图 1—3。光纤在 $1.0 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的范围内达到 1 dB/km 是很容易的事。 1 dB/km 是什么概念呢?窗玻璃的损耗为数千 dB/km ,光学仪器为 500 dB/km ,雨过天晴的大气透明度为 1 dB/km 。目前 $1.3 \mu\text{m}$ 附近的光纤衰耗已降低到 $0.3 \sim 0.4 \text{ dB/km}$, $1.55 \mu\text{m}$ 可以降低到 $0.18 \sim 0.25 \text{ dB/km}$ 。光纤不仅衰耗小,而且损耗的频率特性好。光纤传输的机理跟电缆有本质的区别。要想降低传输损耗,只要尽量降低玻璃中的杂质含量,尽量准确安排光纤横截面的折射率分布就可以了,损耗与光纤横截面的尺寸几乎没有关系,不像电缆那样横截面越小,损耗越大。降低电缆传输损耗的主要方法是减少电阻,减少线间电容,这就意味着增加导体的结构尺寸,增加成本,即使这样也还不能解决“损耗与传输信号频率的平方根成比例增大”的问题。这是因为电缆损耗特性除了与横截面有关外,还是频率的增

函数,对于信号来说,高频成分和低频成分损耗不同使信号失真,要加线路均衡;对于载波来说,工作频率越高,损耗越大,使传输距离(也称中继距离)越短。10 800 路载波电话通信或400 Mbit/s数字通信的中同轴电缆每隔1.6 km就得设立中继站。在电缆通信中通信容量与中继距离是不可调和的矛盾。利用光纤的低衰耗可以拉长中继距离,利用光纤的大带宽又可以实现大容量传输,所以光纤通信可以同时增大通信容量,扩大无中继距离。它所能达到的大容量和长中继距离水平是在电缆通信中不可能做到的。

图 1—3 各种传输介质损耗特性的比较

3. 抗电磁干扰

电缆是电的良导体,所以电磁感应既有外部的,也有内部的。在电缆内部,相邻芯线之间电磁场的互相耦合使之可能产生严重的串话,不管采取多么复杂的绞扭措施也不能完全消除,这种芯线周围的电磁场还使电缆通信很容易窃听。电缆的外部感应就更为严重,自然界的雷电,高压输电线,甚至无线电广播的电磁场都可能对电缆中的信号产生明显的影响。为了消除外部的电磁干扰,金属电缆常配有笨重而昂贵的金属屏蔽层。而光纤是玻璃制成的,材料的特性使光纤又有了一系列优点。光纤不导电不导磁,没有电磁感应。光纤的绝缘特性使它对外部电场的干扰“无动于衷”,这对于电气铁道和电力线等强电场附近的通信极为有利;又由于光纤包层以外还有涂覆层,纤芯内传播的光局限于光纤之中,基本不会向外逸出,光缆的周围基本上没有信息能量。在这种情况下,一方面同一根光缆中相邻的各根光纤几乎没有串话现象;另一方面,要想像电通信那样在光纤周围窃听光纤通信的内容几乎是不可能的,即使用光耦合的方法窃听,光端机马上可以感觉出光能量的减少,并能用仪器测出耦合地点。所以光纤通信保密性好。光纤中的信号传输没有大地回路,因而不受大地电流或电位差的影响,不会因为短路而损坏两端的设备。光纤不会产生电火花,在易燃易爆的场所使用又显得比较安全。特别是和金属相比,光纤的耐腐蚀耐潮湿的能力要更强一些,甚至还能经受核辐射的考验。

4. 节约有色金属

光纤由于材料特点带来的最大好处是可以大量节约有色金属。制造光纤的主要成分是二氧化硅,而硅原料在地球上的储藏量极为丰富。制造100 km长的中同轴电缆需要12 t铜,50 t铝,有人算过一笔帐,如果全世界每家都用上电缆传输的电视电话,即使把地球上所有的铜矿都开采出来,也不足以制造所需要的同轴电缆。而拉制100 km长的光纤,只需要高纯度的石英玻璃1 kg。并且制造光纤所必需的能源消耗,与一般的金属电缆相比,估计要低两个数量级左右。从节约能源、节约资源的角度看,光纤的这个优点是带根本性的优点。另外,由光缆大大延

长中继距离而节约的中继设备的费用,也是十分可观的。

5. 线径细、重量轻

由于光纤中传播的光波波长为微米量级,所以光纤很细,可绕性很好。多模光纤的芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 左右,和人的头发丝差不多。单模光纤芯径仅在 $10\ \mu\text{m}$ 左右。光纤加上包层后直径一般为 $120\ \mu\text{m}$,只有对称电缆的 $1/3\sim 1/4$,同轴电缆的 $1/100$ 。成缆后,8芯光缆的横截面直径约为 $10\ \text{mm}$,而标准同轴电缆的横截面直径为 $47\ \text{mm}$ 。反过来,如果允许光缆和电缆一样粗细,则光缆中可容纳的芯线数目要多得多。线径细对于充分利用城市现有的电信地下管道设施,是十分有利的。光纤不仅直径细,而且因玻璃比重小(只有铜的 $1/4$ 左右),光缆重量也比同轴电缆轻得多。例如,18管同轴电缆 $1\ \text{m}$ 的重量为 $11\ \text{kg}$,而同等容量的光缆 $1\ \text{m}$ 只重 $90\ \text{g}$ 。重量轻使得运输和敷设都比较方便。

由于光纤通信有着如此之多的优越性,在短短的20多年中得到了飞速发展,电信网的光纤化已经成为不可逆转的大趋势,光纤具有的巨大的潜在容量吸引着人们朝着建立“高速信息通信网”的方向大步迈进。

第四节 我国铁路光纤通信的现状

铁路通信网是除电信公用网以外的最大专用通信网之一,是直接为铁路运输服务的独立的通信网。由于光纤通信具有通信容量大、中继距离长、抗电磁干扰能力强、无串话等优点,很适应于铁路通信的需要,尤其适用于电气化铁路,因此近年来我国铁路部门一直非常重视光纤通信的研究和应用,把它视为改善铁路通信方式、加速其现代化进程的重要手段。

我国第一个具有实用化水平的铁路光纤通信系统是1982年12月开通的北京铁路局到北京站的数字光纤通信系统。该系统全长 $12.16\ \text{km}$,传输速率为 $8.448\ \text{Mbit/s}$,工作波长为 $0.85\ \mu\text{m}$,采用国产4芯光缆,光纤为渐变型多模光纤,损耗小于 $4\ \text{dB/km}$,中继距离为 $6\ \text{km}$,光源为LED,光电检测器为Si-APD。该系统代表了我国第一代铁路光纤通信系统的水平。从1986年起,我国铁路部门转入第二代长波长单模光纤通信系统的研究和实用化工作,并开始建立长距离大容量的光纤通信系统。1988年,大秦(大同-秦皇岛)铁路光纤通信系统开通,它是我国铁路第一条长途干线数字光纤通信系统,全长 $630\ \text{km}$,中继距离 $40\ \text{km}$ 左右,干线通信系统的传输速率为 $34\ \text{Mbit/s}$,区段通信系统的传输速率为 $8\ \text{Mbit/s}$,工作波长为 $1.3\ \mu\text{m}$,采用8芯光缆、突变型单模光纤,LD光源,PIN-FET光检测器组件。它的开通标志着我国长波长、单模光纤通信系统进入实用化阶段。在这之后短短的几年里,我国又相继开通了北京—郑州、郑州—武汉、济南—青岛、沈阳—大石桥、宝鸡—中卫等铁路光纤通信系统。这些系统的干线传输速率多为 $140\ \text{Mbit/s}$,区段通信传输速率多为 $34\ \text{Mbit/s}$,仍使用工作波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的单模光纤。随着光纤通信技术的不断发展,从1993年开始,我国铁路光纤通信由传统的准同步数字传输(PDH)转入光同步数字传输(SDH),这就构成了铁路光纤通信的第三代。其中最具代表性的是1996年9月开通的 $2\ 381\ \text{km}$ 的京九(北京-香港九龙)铁路光纤通信系统。该系统的干线传输速率为 $622\ \text{Mbit/s}$,区段通信传输速率为 $155\ \text{Mbit/s}$,使用20芯光缆、 $1.3\ \mu\text{m}$ 单模光纤。

我国铁路光纤通信正随着技术进步的滚滚洪流,朝着更新更高的方向前进。

思 考 题

1. 什么叫光纤通信？
2. 目前光纤通信的波长范围是多少？位于电磁波的哪个波段上？
3. 光波长范围是多少？找出相应电磁波段范围。
4. 光纤通信中，短波长、长波长波段范围是多少？典型的波长是哪些？
5. 简述光纤通信发展史，说明大力发展光纤通信的重要意义。
6. 简述光纤通信系统的基本组成及各部分作用。
7. 简述光纤通信的优越性。

第二章 光纤与光缆

光纤是光导纤维的简称。目前通信用的光纤主要是石英光纤, 光纤在光纤通信系统中的作用是将携带信息的光信号从发端传送到收端。

第一节 光纤与光缆的结构

一、光纤的结构

光纤是用玻璃预制棒拉制成的玻璃丝, 由纤芯和包层组成, 其形状为圆柱体, 如图 2—1 所示, 图中中心部分为纤芯, 其直径为 $5 \sim 75 \mu\text{m}$, 纤芯外面的部分为包层, 包层的直径为 $100 \sim 150 \mu\text{m}$, 纤芯和包层的主要材料都是石英玻璃, 即二氧化硅(SiO_2)。纤芯的作用是传输光波, 包层的作用是将光波封闭在纤芯中。为了使光波在纤芯中传输, 需要使纤芯材料的折射率 n_1 大于包层材料的折射率 n_2 。为此在纤芯中掺入了少量的比石英折射率稍高的材料, 如二氧化锗(GeO_2)、五氧化二磷(P_2O_5), 而在包层中掺入了少量的比石英折射率稍低材料, 如三氧化二硼(B_2O_3)、氟(F)。

图 2—1 光纤的结构

图 2—2 光纤芯线的横断面

由纤芯和包层组成的光纤称为裸光纤。由于裸光纤较脆、易断, 为了保护光纤表面, 提高光纤的抗拉强度以及便于使用, 一般需在裸光纤外面进行二次涂覆而形成光纤芯线, 光纤芯线的横断面如图 2—2 所示。图中包层外面很薄一层的涂覆层, 称为一次涂覆, 其厚度一般为 $30 \sim 150 \mu\text{m}$, 所用材料为硅酮树脂或聚氨基甲酸乙酯, 一次涂覆的外面为套塑, 套塑又称为“二次涂覆”或“被覆”, 套塑的材料多为聚乙烯塑料或聚丙烯塑料、尼龙等。

二、光纤的分类

光纤的种类很多, 可以用不同的方法进行分类, 如按照制成光纤材料的不同来分有石英光纤、多组分玻璃光纤、液芯光纤和塑料光纤。目前通信上采用的光纤主要是石英系光纤。

1. 突变型光纤、渐变型光纤和 W 型光纤

按照光纤纤芯的折射率分布来划分,光纤分为突变型光纤、渐变型光纤和 W 型光纤。

突变型光纤的纤芯折射率是均匀不变的为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,在纤芯和包层的界面上折射率发生突变,如图 2—3(a)所示,图中 $2a$ 、 $2b$ 分别为纤芯和包层的直径。突变型光纤又可形象地称为“阶跃型光纤”。

渐变型光纤的纤芯折射率在轴心处最大,而在光纤的横截面内沿半径方向折射率逐渐减小,到了纤芯和包层的界面降至包层的折射率 n_2 ,其折射率分布如图 2—3(b)所示。渐变型光纤由于其制造上的特点,又可称为“梯度型光纤”。

W 型光纤的折射率分布如图 2—3(c)所示,它是在纤芯与包层之间设一缓冲层,纤芯的折射率最高为 n_1 ,缓冲层的折射率最低为 n_3 ,而包层的折射率 n_2 介于二者之间。

目前广泛使用的是突变型光纤和渐变型光纤。

图 2—3 光纤的折射率剖面分布

(a) 突变型光纤;(b) 渐变型光纤;(c) W 型光纤。

2. 单模光纤和多模光纤

按照光纤中传输的模式数划分,光纤分为单模光纤和多模光纤。所谓模式,简单来说就是电磁场在光纤中的分布方式,模式不同,其分布不同。

当光纤中只有一种模式传输时,这种光纤叫做单模光纤。单模光纤的纤芯直径较小,一般在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。

当光纤中有多个模式传输时,这种光纤叫做多模光纤。多模光纤的纤芯直径较大,约为 $50\sim 75\ \mu\text{m}$ 。

三、光纤的结构参数

我们知道,光纤是由纤芯和包层组成的,理想的光纤其纤芯和包层为同轴心的均匀圆柱体,其横断面如图 2—4(a)所示,在这种情况下,光纤的纤芯直径(芯径)和包层直径(外径)可用其横

图 2—4 光纤的横断面

(a) 理想光纤;(b) 实际光纤。

断面圆的直径表示。由于实际的光纤并不是那么理想,总存在一定的偏差,如纤芯与包层不同心、不是均匀的圆柱体等,因此对于实际的光纤,除芯径、外径之外,有必要再确定几个参数,如非圆率、偏心率等,这些参数对估算和评价光纤接续损耗都有着重要的作用。

如图 2—4(b) 所示,光纤的芯径一般用纤芯的最小直径 d_{\min} 和最大直径 d_{\max} 的平均值表示,即:

$$\text{芯径} \quad d = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} \quad (2-1)$$

光纤的外径是用包层的最小直径 D_{\min} 和最大直径 D_{\max} 的平均值表示,即:

$$\text{外径} \quad D = \frac{D_{\min} + D_{\max}}{2} \quad (2-2)$$

由于实际光纤的纤芯与包层并不是理想的圆柱体,故将纤芯非圆率定义为纤芯的最大直径和最小直径之差与芯径的比值,即:

纤芯非圆率

$$e = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d} \times 100\% \quad (2-3)$$

而包层的非圆率定义为包层的最大直径和最小直径之差与外径的比值,即:

包层非圆率

$$E = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% \quad (2-4)$$

显然,纤芯(或包层)非圆率的数值越小越好。

偏心率是表示纤芯与包层两圆心偏差大小的一个参数,其定义为纤芯的圆心和包层的圆心之间的距离与芯径 d 的比值,即:

$$\text{偏心率} \quad c = \frac{x}{d} \times 100\% \quad (2-5)$$

四、光缆的结构

目前,光纤通信用的光纤都经过了一次涂覆和二次涂覆的处理,经过涂覆后的光纤虽然已具有了一定的抗张强度,但还是经不起施工中的弯折、扭曲和侧压等外力作用,为了使光纤能在各种敷设条件和各种环境中使用,必须把光纤与其他元件组合起来构成光缆,使其具有优良的传输性能以及抗拉、抗冲击、抗弯、抗扭曲等机械性能。

1. 光缆的基本组成

目前光纤通信中使用着各种不同类型的光缆,其结构形式多种多样,但不论何种结构形式的光缆,基本上都是由缆芯、加强元件和护层三部分组成。

(1) 缆芯

缆芯是由单根或多根光纤芯线组成,其作用是传输光波。光纤芯线是在裸光纤外面进行二次涂覆而形成的,它有紧套和松套两种结构。

紧套光纤又有二层和三层两种结构,二层结构的紧套光纤是在光纤一次涂覆层外面再紧紧地套上一层被覆层,见图 2—2,而三层结构在一次涂覆层和二次涂覆层之间有一缓冲层,其目的是为了减小外面应力对光纤的作用,如图 2—5(a) 所示。

松套结构如图 2—5(b) 所示,它是把一次涂覆后的光纤放入一根塑料套管中,管中填充半流质油膏,光纤在套管中可自由活动并处于弯曲状态,几乎不承受压力或侧压力,使光纤受到保护。

图 2—5 紧套和松套光纤结构示意图
(a) 紧套光纤结构示意图; (b) 松套光纤结构示意图。

(2) 加强元件

加强元件是光缆的一个重要组成部分,其作用是增强光缆敷设时可承受的拉伸负荷,因此在光缆的中心或四周要加一根或多根加强元件。加强元件一般有金属丝和非金属纤维(如增强塑料)。使用非金属加强元件的无金属光缆能有效地防止雷击。

(3) 护层

光缆的护层主要是对已形成缆的光纤芯线起保护作用,避免受外界的伤害,因此要求护层具有耐压力、抗潮、湿度特性好、重量轻、耐化学侵蚀、阻燃等特点。

光缆的护层可分为内护层和外护层两部分。内护层一般采用聚乙烯(pe)或聚氯乙烯(pvc)塑料等,外护层根据敷设条件而定,可由铝带/聚乙烯综合纵包粘接护层(lap)、钢带(或钢丝)铠装和聚乙烯外护层等组成。

2. 光缆的种类

光缆按结构形成主要分成以下几类。

(1) 层绞式光缆

层绞式光缆的结构如图 2—6(a)所示,它是将若干根光纤芯线以加强元件为中心绞合在一起的一种结构。层绞式光缆的结构和电缆十分相似,不同之处在于它的中心有一根钢质加强芯,用于增强光缆的抗拉强度。这种结构适用于芯线数较小(如 10 以内)的光缆。

(2) 骨架式光缆

骨架式光缆的结构如图 2—6(b)所示,它是将单根或多根光纤放入骨架的 V 型或 U 型槽中,骨架的中心是加强元件,槽在纵向呈螺旋形弯曲。这种结构光缆的抗侧压性能好,但制造工艺复杂。

(3) 束管式光缆

束管式光缆的结构如图 2—6(c)所示,它是将数根一次涂覆的光纤放入同一根塑料管中,管中填充油膏,光纤浮在油膏中,加强元件置于聚乙烯外护层中,这既增加了束管的抗拉性,又增加了护层的机械强度。束管式光缆的结构合理、重量轻、体积小、价格较低。

(4) 带状光缆

带状光缆的结构如图 2—6(d)所示,它是将多根光纤排列成行制成带状光缆单元,然后再将多个带状单元按一定方式绞合成缆。这种结构的光缆属于高密度光缆,收容 100 根以上的

光纤芯线是很容易的,另外这种光缆可以做到多根光纤一次接续。

图 2—6 光缆的结构
(a)层绞式;(b)骨架式;(c)束管式;(d)带状。

第二节 光纤的导光原理

分析光在光纤中传播的方法有两种,一种是几何光学的方法,又称为射线理论。它是把光看作射线,引用几何光学中的反射和折射定律来解释光在光纤中的传播现象,这种方法比较直观,易于理解。另一种是模式理论,模式理论是把光当作电磁波,把光纤当作光波导,用电磁场分布的模式来解释光纤中的传播现象。这种方法理论性较强,比较完整严密,但缺乏简明性,不易理解。本节我们主要利用几何光学中的反射和折射来分析光纤的导光原理,而对模式理论只作简单介绍。

一、光的反射与折射

由物理光学可知,光在均匀介质中是沿直线传播的。但是,当光射到两种不同介质的界面时,将产生反射和折射,如图 2—7 所示,一部分光线沿 OB 方向反射回介质 1 中,一部分光线沿 OC 方向折射进入介质 2。反射光线和折射光线分别服从反射定律和折射定律。

1. 反射定律和折射定律

反射定律是指反射光线位于入射光线和法线所决定的平面内,反射光线和入射光线分居法线两侧,反射角 i_r 等于入射角 i_i , 即:

$$i_r = i_i$$

图 2—7 光的反射和折射

折射定律是指折射光线和入射光线分居法线两侧,不论入射角怎样改变,入射角的正弦值