

第 3 章 以太网家族及其安全应用

一般情况下,局域网(Local Area Network, LAN)指传输线(如 5 类双绞线)长度不超过 100 米的本地计算机网络,如家庭、楼宇等内部计算机网络,而私有网络(Private Network)则指利用各种长距离传输媒介(如光纤、卫星、租用数据信道等)将远距离的多个局域网互联后构成的专用网络,例如:校园网、企业网、电子政务网、税务金融银行网等(详见第 11 章关于 VPN 虚拟私有网络的介绍)。从 20 世纪 70 年代开始出现了很多不同的局域网技术,例如:以太网(Ethernet)、令牌环网(Token Ring)、令牌总线(Token Bus)、光纤分布式数据接口(FDDI)、异步传输模式 ATM 等。经过了数十年网络应用中的优胜劣汰,以太网成为当前构建局域网和广域私有网络的重要技术。其长盛不衰的主要原因除了以太网协议本身具有的先天优势外,还在于以太网技术的与时俱进、不断更新和发展。

在过去的三十多年里,以太网经历了 5 代的演变,但主要的基本概念保持不变,数据帧结构基本不变。它们是标准以太网(10Mbps)、快速以太网 FE(100Mbps)、千兆以太网 GE(1Gbps),十千兆以太网 10GE(10Gbps),以及基于无源光纤网络的以太网(Ethernet over Passive Optical Network, EPON)。以太网的不断发展是采用了新的数据链路层和物理层技术,来满足市场不断增长的需求(例如:有线电视网、通信网、互联网的三网融合等)。本章介绍这些以太网家族中的各种衍生技术,还讨论与以太网运行密切相关的地址解析协议(ARP)及其安全、动态主机配置协议(DHCP)的原理与安全。最后介绍 EPON 的工作原理及安全应用、IEEE 802.11 无线局域网等。列举了以太帧、ARP 和 DHCP 的实测数据分析,来说明 ARP 欺骗的原理和危害,以及以太网中几种常见的拒绝服务攻击 DoS 的监测和安全防护方法等。

3.1 以太网与 IEEE 802.3

3.1.1 IEEE 802 局域网标准

1985 年,电气与电子工程师协会(IEEE)启动了 802 标准项目,以建立一套技术标准让各不同网络设备制造商的产品之间能够互联通信。802 项目的目的并不是要取代互联网的 OSI 开放系统互联模型,而是要定义局域网协议的物理层和数据链路层的功能和标准。

后来,IEEE 802 标准被美国国家标准局 ANSI 采纳,在 1987 年,国际标准化组织 ISO 也将其采纳作为 ISO 8802 国际标准。图 3.1 是 802 标准与 OSI 模型的对照关系。IEEE 802 将数据链路层分为两个子层:逻辑链路控制子层(Logical Link Control, LLC)和媒体访问控制子层(Media Access Control, MAC)。IEEE 也为不同的局域网协议建立了几个物理层的标准。

在第 1 章中讨论过数据链路层,它的功能是在同一个网络中的两个相邻结点(设备)之间进行帧的传输、流量控制和差错控制。在 IEEE 802 中,流量控制、差错控制和构建帧的

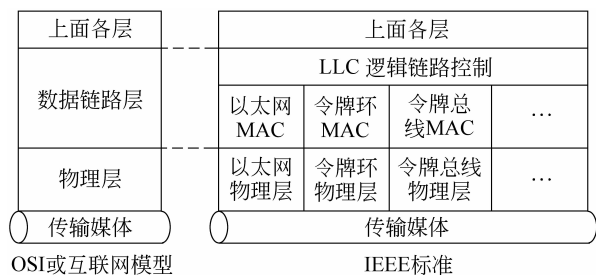


图 3.1 IEEE 局域网标准与 OSI 或互联网模型的对照

功能由逻辑链路控制 LLC 子层来完成。帧的构建由 LLC 和 MAC 共同完成。

LLC 为所有不同底层技术的局域网提供了统一的数据链路控制协议,因此 LLC 不同于 MAC 媒体访问控制子层。由于不同物理层的局域网使用同样的 LLC 协议,就使得它们之间可以互联通信,如图 3.1 所示。

LLC 定义了一个协议数据单元(Protocol Data Unit,PDU),它的头部包含了一个用于流量控制和差错控制的控制字段,两个其他的头部字段用于标识源和目的主机的 LLC 的上层协议。这两个字段称为目的服务访问点(Destination Service Access Point,DSAP)和源服务访问点(Source Service Access Point,SSAP)。在一个典型的数据链路控制协议(如高级数据链路控制(HDLC)等)中定义的其他字段被移到 MAC 子层。换言之,在 HDLC 里定义的一个帧,被分开放入 LLC 子层的 PDU 和 MAC 子层的帧内。对传输媒体的访问控制包括:随机访问、受控访问,以及信道多路复用。IEEE 802 标准的 MAC 子层定义了对每种局域网的物理层访问方式。例如,以太局域网的媒体访问方法是 CSMA/CD(载波侦听多路访问/冲突检测),令牌环网和令牌总线的媒体访问方式是令牌传递。物理层的传输媒体包括:同轴电缆、双绞线、光纤、无线电信道等,IEEE 为每种局域网定义了详细的物理层参数。

3.1.2 IEEE 802.3 与标准以太网

以太网是 20 世纪 70 年代早期由 Xerox 公司开发的用于将计算机工作站互联的局域网技术。在 20 世纪 80 年代早期,由 DEC、Intel 和 Xerox 合作制定了 DIX 以太网标准,用于同轴电缆传输的帧速率为 10Mbps 的局域网。在此基础上于 1985 年发布了基于粗同轴电缆的 IEEE 802.3 LAN 的标准。以太网和 IEEE 802.3 标准的主要差别是头部中“长度/类型”字段的定义,如图 3.2 所示。IEEE 802.3 标准在短短的几年内就得到修订和补充,传输线缆包括细同轴电缆、双绞线、单模和多模光纤。1995 年制定了 100Mbps 的 FE 快速以太网标准,1998 年制定了 1Gbps 的 GE 千兆以太网标准,后来又制定了 10Gbps 以太网标准。



图 3.2 IEEE 802.3 和以太网的数据帧结构

参见图 1.17 的以太网结构。早先的 802.3 标准定义了基于总线式同轴电缆的传输网络,每个终端的传输信号在共享式的媒体上广播,采用载波侦听多路访问/冲突检测(Carrier Sensing Multiple Access With Collision Detection,CSMA/CD)技术作为媒体访问控制 MAC 协议。当一个工作站要发送数据帧时,要等待传输信道空闲时才能发送。它在发送数据帧时必须同时持续侦听线缆上是否有其他工作站也发送数据帧而产生冲突。如果发生了冲突,就中止传输,然后等待一个随机时间段后再重新发送该数据帧。如果在两倍传输延迟的时间内没有发生冲突(数字信号经过网络中最长电缆传输的延迟时间的两倍),那么此工作站知道它的传输已经独占了此信道,数据帧广播给了所有的工作站,其他工作站就要等待到线路空闲时才能发送数据帧。由此定义了最小时间槽的长度就是两倍于信号在网络中最长电缆中传输的延迟时间。

在 CSMA/CD 系统里的一个重要参数就是此时间槽,它定义了一个工作站占用信道的最短时间,如果一个以太帧太短,传输此帧的信道占用时间小于此时间槽,则发送端检测不到是否发生了碰撞。早先 IEEE 802.3 设计的以太网速率是 10Mbps,同轴电缆的最大传输距离为 2500m。传输中继器最多可用 4 个,终端到终端的最大传输延迟为 51.2ms。在 10Mbps 的速率时,此传输延迟等于 64B(512b)的发送时间,因此这就是以太网数据帧的最小长度。如果以太帧短于 64B,就要加入 0 作为数据填充。

IEEE 802.3 标准规定主机在发生了一次冲突而中止传输后,再进行第 n 次尝试重传的时间间隔为 $0 \sim 2^k - 1$ 倍时间槽之间,其中 $k = \min(n, 10)$ 。即冲突后的第一次重传的等待时间间隔是 1 或 2 倍时间槽,第二次重传的等待时间是 0、1、2 或 3 倍时间槽,每次重传的等待时间按照 2 倍的延迟递增,直到最大值 2^{10} 倍时间槽。冲突的次数越多,重传等待的时间间隔越长,就减小了再次发生冲突的概率。

1. 以太网的帧结构

如图 3.2 所示,各种不同速率的以太帧的结构都是相同的。以太帧结构包含的字段是:前导符(preamble),帧开始定界符,目的物理地址,源物理地址,帧长度或内部封装的协议数据单元 PDU 类型,载荷数据和填充,循环冗余校验码。源主机将以太帧广播发送到传输线上后,接收端收到帧后并不向源主机返回确认信息,确认功能必须由上层执行。前导符和帧开始定界符字段属于物理层的头部,可用于自动识别该帧的标称速率。

(1) 前导符:长 7B(56b),由 56 个 1 和 0 的交替构成,用于告知接收端有帧到达,以及识别该帧的速率是 10Mbps、100Mbps 还是 1Gbps。接收机的网卡读取收到帧的前导符,由此判断该帧的速率,然后网卡的时钟自动与输入帧的速率同步,从而正确读取整个数据帧。因此各种不同速率的以太帧可以在同一个以太网中传输,相互兼容。接收端丢失此字段的部分不会影响帧的完整接收。

(2) 帧开始定界符(start frame delimiter,SFD):长 1B(10101011),标识帧的开始。告诉接收端这是最后的时钟同步机会。最后 2 个比特为 11,表示下一字段是目的 MAC 地址。

(3) 目的物理地址 Dst(destination address):长 6B,标识该帧的接收端的 MAC 物理地址。

(4) 源物理地址 Src(Source address):长 6B,标识发送方的 MAC 物理地址。

(5) 帧长度或类型字段:以太网用此字段标识帧内部封装数据的上层协议类型,IEEE 802.3 标准使用此字段表示此帧的字节“长度”。从图 3.2 可知,帧的最大长度为 6+

$6+2+1500+4=1518\text{B}$,等于十六进制数 $0\text{x}0600$ 。因此如果收到的帧中此字段的值小于 $0\text{x}0600$,则表明此帧属于 IEEE 802.3 帧。如果收到的帧中此字段的值大于 $0\text{x}0600$,则说明此帧属于以太网帧。目前以太网用得较多,可从捕获帧中直接观察。

IEEE 802.3 用该字段表示“长度”,单位为字节,数据帧的最大长度为 1518B ,其中包含 18B 的固定头部(不包含前导符和帧开始定界符字段),其数值小于 $0\text{x}0600$ 。

以太网用该字段表示“类型”,其数值大于 $0\text{x}0600$ 。类型字段的值所代表的上层协议如表 3.1 所示。例如,当收到一个以太网帧后,如果读出类型字段值为 $0\text{x}0800$,这说明此帧的载荷数据中封装的是 IP 包,于是接收端就按照 IP 包的结构去分析和取出该帧携带的 IP 包。若收到帧中的类型字段为 $0\text{x}0806$,则该帧封装传输的上层数据属于 ARP 地址解析协议,然后按照 ARP 的结构进行解读和提取信息。

表 3.1 以太网帧头部中类型字段标识了内部封装的上层协议类型

封装的协议	类型字段	封装的协议	类型字段	封装的协议	类型字段
IPv4	$0\text{x}0800$	ARP	$0\text{x}0806$	PPPoE	$0\text{x}8864$
802.1x 认证	$0\text{x}888e$	IPv6	$0\text{x}86dd$	Slow 协议	$0\text{x}8809$

(6) 载荷数据和填充:此字段属于有效载荷,用于封装传输上层协议的数据,长度范围 $46\sim1500\text{B}$ 。若载荷短于 46B ,则填充 0,用于保证每个帧的总长度不小于 64B (即 $46+18=64\text{B}$)。

(7) 循环冗余校验码(CRC):以太网帧的检错使用 CCITT-32 的循环冗余校验码(CRC),工作原理见附录 D。CRC 的检错范围包括源和目的地址字段、长度字段、载荷字段和填充字段。当网卡 NIC 收到一个帧后,它先检测帧的长度是否在允许范围内,然后用收到的 CRC 对该帧进行检错。如果发现错误,将该帧丢弃,不传给机内上面的网络层实体,也不向源主机报告出错信息。帧丢失的问题由上层处理。

2. 以太网帧的长度选择

以太网的帧长度(包含头部、数据、填充和尾部)最短为 64B ,最长为 1518B 。 64B 最短帧长限制是为了保证 CSMA/CD 的正确运行(此限制在交换式的 FE、GE 以太网和 EPON 中被弱化了)。

以太网帧的最大长度为 1518B ,去除固定长度为 18B 的头部后,载荷数据的最大长度为 1500B 。此最大长度限制的原因之一是防止在共享传输信道的网络中,某台主机长时间独占信道,而阻碍其他主机发送数据。特别是当载荷数据是音频和视频等实时性数据时,不允许有长时间的延迟和等待。

3. 以太网的 MAC 物理地址

以太网的每个工作站(PC、网络打印机等)都安装有自己的网络接口卡(network interface card, NIC),它的 MAC 物理地址长 6B ,用 12 个十六进制数分段表示(每个十六进制数代表 4 比特)。

有 3 类 MAC 物理地址:单播地址、组播地址、广播地址。以太网中的源地址必是单播地址,因为数据帧只能来自一个工作站。目的地址可以是单播、多播或广播地址。 6 字节的 MAC 地址可以提供 2^{48} 个全球唯一的地址,前 3 个字节标识网卡的制造商,后 3 个字节为网

卡的产品序列号,因此每个制造商可以有 $2^{24}-1=16\,777\,215$ 个产品序号(减去 1 个由 24 个 1 构成的广播地址)。例如,Cisco 公司生产的网卡 MAC 地址前 3 个字节的代码为 00:00:0c,3Com 公司生产的网卡 MAC 地址前 3 个字节的代码为 02:60:8c。MAC 地址的 6 个字节用 12 个十六进制数标识,每两个数之间用“:”号分开。在 Wireshark 分析软件中,可以直接将捕获到的以太帧的 MAC 地址的制造商代码用公司名称显示出来,见后面的实测分析例子。

(1) 单播地址:由制造商永久性地固化在 NIC 中,网卡根据此地址来识别网络上传输的包是否是给自己主机的。单播地址中的第二个十六进制数为偶数。

(2) 组播地址:用于标识能同时接收到同一个帧的一组主机。多播地址中的第二个十六进制数是奇数。NIC 的多播地址由主机进行设定。举例如下:

目的 MAC 地址 4A:30:10:21:10:1A 是单播地址,因为第 2 个数 0xA(即 1010)是偶数。

目的 MAC 地址 47:20:1B:2E:08:EE 是多播地址,因为第 2 个数 0x7(即 0111)是奇数。

(3) 广播地址:即 48 比特全为 1 的 MAC 地址,用十六进制数表示为 ff:ff:ff:ff:ff:ff。物理地址在网络上的传输顺序不同于十六进制的书写顺序。传输是按地址字节从左向右,逐个字节发送,但是对于每个字节的比特发送顺序则是从最右向左的顺序发送。其好处是:这种发送顺序可使得定义该地址类型是单播还是多播的比特最先到达接收端。

例如,MAC 地址 47:20:1B:2E:08:EE 的发送顺序是:字节的顺序为从左到右,而每个字节内的比特顺序则为从右向左。

发送方向 ← 11100010 00000100 11011000 01110100 00010000 01110111

4. 从以太网中捕获的以太帧实例分析

图 3.3 是利用 Wireshark 从以太网捕获的一个以太帧的真实案例(操作方法参见第 7 章)。图中分为 3 个窗口,下窗口中的每一行原始数据可按照图 3.2 的以太帧结构和表 3.1 解读分析如下:

(1) 上窗口是捕获包的列表:第 6 号帧,捕获时刻 12s,源地址 vianettwo_47:6e:a3,目的地址 Broadcast,上层协议 arp,包中信息:谁的 IP 地址是 192.168.0.1? 请告诉 192.168.0.163。

(2) 中窗口是选中包的数据解释:第 6 号帧,网络线路上有 42 字节,实际捕获了 42 字节。Ethernet II (100Mb/s 以太帧),源 MAC 地址 00:12:7b:47:6e:a3,目的 MAC 地址

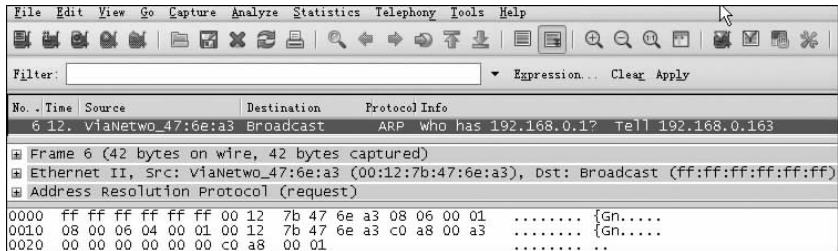


图 3.3 利用 Wireshark 捕获的一个以太帧的数据分析

ff;ff;ff;ff;ff;ff,上层协议为地址解析协议(请求)。

(3) 下窗口是选中以太帧数据: 第 0x0000~0x0006 字节是 ff ff ff ff ff ff,第 0x0007~0x0012 字节是 00 12 7b 47 6e a3,第 0x000c~0x000d 字节是 08 06,第 0x000e~0x0029 字节是载荷数据(ARP 包)。

3.1.3 以太网的物理层

表 3.2 为 IEEE 802.3 的物理层的定义。每种传输媒体有 3 个参数: 比特速率、信号编码技术和最大网段长度。例如,初期共享媒体以太网的定义是: 10Base-5 以太网使用直径 10mm 的粗同轴电缆,数据速率 10Mbps,最大网段长度 500m,信号传输使用曼彻斯特编码,粗同轴电缆使用不方便;10Base-2 以太网使用直径 5mm 的同轴电缆,传输速率 10Mbps,最大网段长度 185m,使用 T 型 BNC 接头。目前已很少使用同轴电缆。10Base-T 以太网使用两对非屏蔽铜芯双绞线(Unshielded Twisted Pair,UTP),传输速率 10Mbps,每台工作站通过一根 UDP 双绞线连接到一个集线器 Hub 构成星形拓扑结构,集线器就是信号容易产生冲突的地方。双绞线的优点是价格低廉,最大传输距离 100m。10Base-F 以太网使用多模光纤,最大传输距离为 2000m。共享媒体的传输方式后来被存储转发式的交换机取代了,现在又被 EPON 网络技术采用。

表 3.2 IEEE 802.3 标准以太网的物理层

特性参数	10Base-5	10Base-2	10Base-T	10Base-F
传输媒介	粗同轴电缆	细同轴电缆	双绞线	多模光纤
最大网段长度	500m	200m	100m	2000m
拓扑结构	总线	总线	星形	点对点连接
线路编码	曼彻斯特码	曼彻斯特码	曼彻斯特码	曼彻斯特码

标准以太网的物理层使用基带(Base Band)传输数字信号,发送端将数据转换为曼彻斯特码送入传输媒体,接收端将收到的曼彻斯特码解码还原为数据。曼彻斯特码具有自同步功能,在每两个比特的交界处信号产生跳变,接收端由此获得时钟同步信息。

1. 利用双绞线传输

双绞线(Twisted Pair Wire)是局域网中常用的一种传输介质,特别是在星形拓扑网络中。双绞线由两根具有绝缘保护层的铜导线组成,把两根导线按一定密度互相缠绕在一起。当传输信号时,相邻绞环对外电磁场辐射大小相等而相位相反,因此互相抵消。双绞线一方面可降低线内传输的信号对外的辐射干扰,另一方面也可以降低受外界电磁场干扰的程度。常用的五类双绞电缆由四对双绞线组成,同一电缆中不同线对具有不同的缠绕度,以降低相邻线对间的串扰,如图 3.4 所示。第 2 章已讨论过电话系统使用的三类双绞线,在以太局域网中更重视双绞线的高频传输性能。

双绞线的性能指标包括: 信号衰减、近端串扰、特性阻抗、分布电容、直流电阻等。

双绞线的特性阻抗可以用射频双平行传输线的理论进行分析,特性阻抗取决于铜芯导线的直径以及双平行导线之间的间距和绝缘介质(参看有关天线馈电与射频传输线资料),常用的 UTP 双绞线的特性阻抗约为 100Ω。按照高频传输线的理论,要求双绞线的两根导

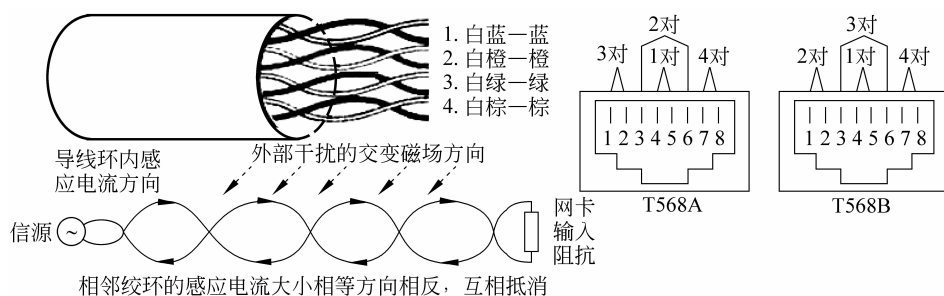


图 3.4 双绞线与 RJ-45 水晶插头的线序

线间距保持不变,施工和安装时不能将双绞线间距拉开,否则改变了该处的特性阻抗。双绞线的终端负载(即网络接口卡)的输入特性阻抗应当等于 100Ω ,否则对输入的数据脉冲信号将会产生反射波,导致传输的误码率增加。

双绞线分为屏蔽双绞线(STP)与非屏蔽双绞线(UTP)两大类。其中屏蔽双绞线有 3 类和 5 类两种,非屏蔽双绞线有 3 类、4 类、5 类、超 5 类 4 种。3 类双绞线的传输速率为 10Mbps,5 类双绞线的速率可达 100Mbps,超 5 类可达 155Mbps 以上。屏蔽双绞线因为电缆的外层有一层铝箔包裹用以减小辐射,制作比较麻烦,再加上价格较非屏蔽双绞线贵,所以在 100Base-TX 网络中常用的是非屏蔽 5 类和超 5 类双绞线。双绞线 568 布线标准分为 EIA/TIA 568A、EIA/TIA 568B 两种。

双绞线用户电缆的接线插头一般为 RJ-45 水晶头,如图 3.4 所示。制作电缆插头时将电缆按照颜色顺序插入水晶头,用专用压线钳压固。电线色码的排序方法有两种,T568A 标准的线序从左到右为: 1. 白绿,2. 绿,3. 白橙,4. 蓝,5. 白蓝,6. 橙,7. 白棕,8. 棕。T568B 标准的线序从左到右为: 1. 白橙,2. 橙,3. 白绿,4. 蓝,5. 白蓝,6. 绿,7. 白棕,8. 棕。国内网络工程中常用 T568B 标准。

双绞线用户电缆按接线方式分为两种:直连方式,两个端头的水晶头都使用相同的接线顺序标准,用于将计算机与各种网络交换机和集线器等设备的互联,如图 3.5(a)所示;交叉连线方式,一个端头使用 T568A 线序,另一个端头则使用 T568B 线序,用于直接将两台主机的网络接口互连,或是将两个没有级联口的 HUB 进行级联,如图 3.5(b)所示。

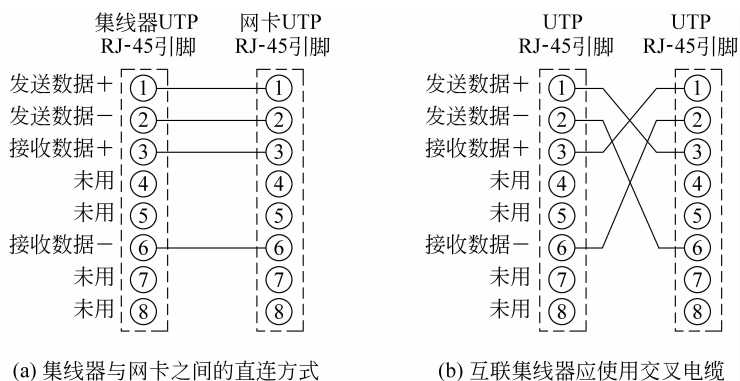


图 3.5 以太网的两种双绞线用户电缆接线方式

在 100Base-TX 以太网中,只使用了电缆中 4 对双绞线中的 2 对,线端①②用于发送,线端③⑥用于接收,当 A 和 B 两台主机直接互联时,应当把 A 机的发送端口接到 B 机的接收端口,而 A 机的接收端口接到 B 机的发送端口,因此需要在制作水晶头接线时将线对进行交叉。其余的 2 对双绞线④⑤和⑦⑧可分别用于传输音频小信号,或给终端设备传输小功率直流电源(如网络监控摄像机等的供电 12V DC, < 500mA)。这种应用称为 POE(Power Over Ethernet)。

2. 利用多模和单模光纤传输

当以太网的干线传输距离大于 100m 后,可使用光纤收发器将双绞线的电信号转换为光信号,然后采用两根光纤传输光信号,一根用于发送,另一根用于接收。光纤的纤芯由两种不同折射率的玻璃拉丝而成。其工作原理是:光线在均匀传输媒质中沿直线传输,入射在两种不同折射率的媒质交界面上时产生反射和折射。当光线从高密度媒质入射到与低密度媒质的分界面时,如果入射角大于临界角就会产生全反射,使光线反射回高密度媒质中传播。

光纤利用全反射原理来引导光的传输,如图 3.6 所示。光纤的芯体材料为高折射率玻璃纤维,外部包裹着一层低折射率的玻璃包层。光纤的外包层直径为 $125\mu\text{m}$,而芯径分为 3 种:阶跃折射率多模光纤的芯径为 $62.5\mu\text{m}$,渐变折射率多模光纤的芯径为 $50\mu\text{m}$,单模光纤的芯径为 $7\sim 9\mu\text{m}$ 左右。

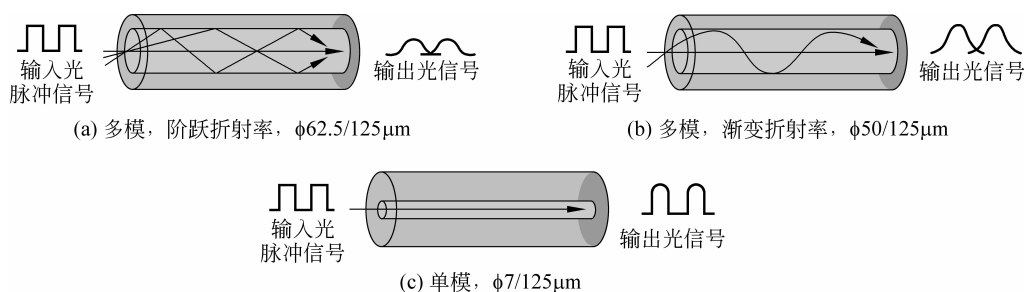


图 3.6 单模光纤与多模光纤的外径与内径比较

阶跃折射率多模光纤的纤芯折射率大于包层折射率,利用光在两种密度玻璃分界面上的全反射原理工作,如图 3.6(a)所示。由于光在纤芯内有多种路径传输,光源发出光脉冲的不同成分会沿不同路径到达终端,产生的时延不同,因而导致接收到的光脉冲前后沿展宽。当光脉冲间距较小时,接收端收到的相邻脉冲的前后沿相互重叠而不能识别是几个脉冲,所以能传输的最高脉冲频率较低。多模光纤的芯径较粗,便于与网卡和 LED 发光二极管进行光耦合,因此光纤收发器价格低廉,常用于局域网和设备机房内。

渐变折射率多模光纤的纤芯中折射率是渐变的,在中心处折射率最高,从中心向边缘逐渐降低,在与包层交界处最低。光线从纤芯向包层传输时产生渐变折射,又返回到中心,有自汇聚效果,如图 3.6(b)所示。它的传输频率比阶跃折射率多模光纤高,但是比单模光纤低。常用于 GE 局域网等,型号为 G. 651 序列。

单模光纤为阶跃折射率光纤,它的芯径很小,不同光束的传播路径几乎相同,用激光二极管 LD 为光源。单模光纤的模式色散很小,主要受材料色散的影响,光脉冲传输频率很高,用于高速主干网络和长距离传输,如图 3.6(c)所示。常用型号为 G. 652 序列等。

图 3.7 为不同波长的光在光纤中传输每公里长度的衰减曲线图,其中有几段衰耗较小的区域称为低损耗传输窗口。第一窗口: $0.8 \sim 1.1\mu\text{m}$,第二窗口: $1.3\mu\text{m}$ 附近,第三窗口: $1.5\mu\text{m}$ 附近。后两个低损耗窗口的衰减分别约为 0.4dB/km 和 0.2dB/km 。每个窗口的覆盖频率范围有几个 THz ($1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$)。光纤内的光速约 $2 \times 10^8\text{m/s}$,每公里延时约 $5\mu\text{s}$ 。曲线中的衰减峰值是由于纤芯中的 OH 粒子的谐振吸收所致,新型的无水吸收峰光纤已经能基本消除曲线中的 OH 谐振衰耗峰,实现全波段光的传输能力。

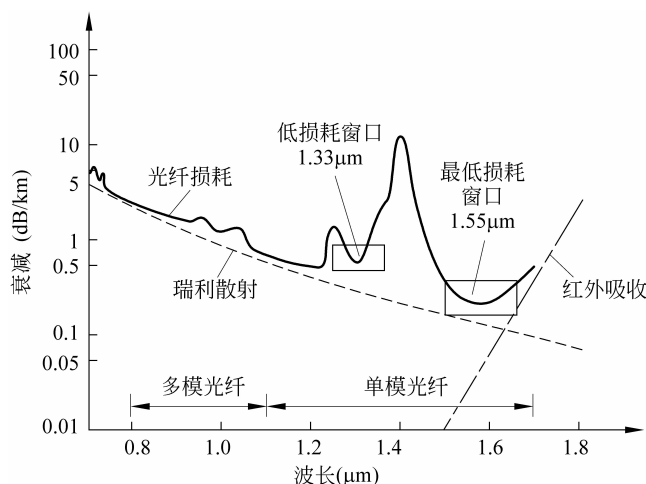


图 3.7 不同波长的光在光纤中的传输衰减特性

光纤通信使用两类光源：发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 和激光二极管 (Laser Diode, LD)。它们的主要差别在于发光的强度、波长、光谱纯度,以及可调制的最大速率。LED 的发光强度正比于输入电流,当输入电流为 50mA 时,发光强度约几 mW 。LED 发射的光谱带宽较大,它的幅度调制频率范围为 $1\text{kHz} \sim 100\text{MHz}$,常用于局域网和遥控器等,在多模光纤局域网中使用 $0.85\mu\text{m}$ 波长的红外 LED。LD 的发光强度比 LED 大几个数量级,有些 LD 的工作截止频率可达 11Gbps ,发射的光谱较窄,可以将多个不同波长的 LD 的发射光注入同一根光纤,实现波分多路复用 WDM。LD 的发光强度受温度和注入电流影响较大,控制电路较复杂,常用于长距离大容量光纤通信等。光纤通信的接收端利用 PIN 光/电二极管将光信号转换为电信号。在同一个光纤链路中,不同工作波长和模式的光纤网络接口设备不能混用。

图 3.8 所示为 3 种不同类型的光缆连接器。SC (Subscriber Channel) 光缆连接器常用于网络交换机中,采用推拉式固定方法,拔插较方便。ST (Straight-tip) 光缆连接器用于将光缆连接到跳线设备上,采用卡式固定方法,比 SC 更可靠。MT-RJ 光缆连接器, RX 接收端与 TX 发送端固定在一起。还有 LC 光纤连接器等多种不同规格,适用于不同的应用场合。

光纤通信的优点为: 高带宽,目前使用的波分多路复用光纤通信技术,能以 1600Gbps 的速率传输数据;信号衰减小,无中继距离可达 50km 以上;无电磁干扰;光纤的抗腐蚀能力比铜缆更强;重量轻;不易被窃听。光纤通信的缺点为安装和维护较困难,要使用专门的连接工具和设备。一般用于通信距离大于双绞线的传输距离的网络链路中。

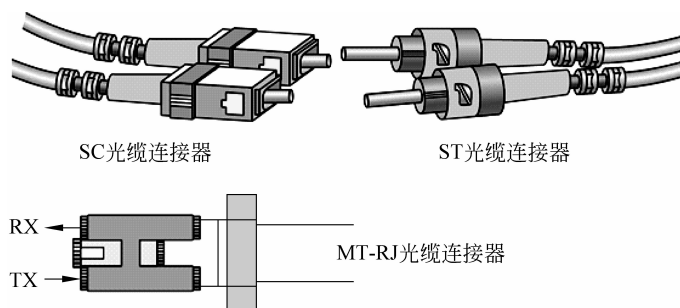


图 3.8 3 种不同类型的光缆连接器

3. 利用单模光纤的波分多路复用传输

上述利用两根单模光纤传输以太网基带信号的方案,适用于传输距离 3~10km 以内的园区网主干线,其缺点是对光纤的利用率较低。波分多路复用传输 (Wave-Division Multiplexing, WDM) 利用光纤中同时传输不同波长的光,构成多个不同光信道的方式,可以大大提高光纤的利用率。WDM 分为粗波分多路复用 CWDM 和密集波分多路复用 DWDM 两大类。

当前成熟和廉价的 CWDM 可在一根单模光纤中传输 1310nm、1510nm 或 1550nm 波长的光,构成 3 个单向或双向的信道,例如在 EPON 以太网无源光纤网络中的应用。在长距离单模光纤主干传输网中可使用 DWDM,将波长 1530~1560nm 范围内的光谱分为数十个信道,每个光信道的光谱宽度仅为 0.8~2nm,并与 EDFA 掺铒光纤放大器配合使用,可极大地提高光纤中的光信道数量和传输距离。

4. 利用 SDH 数据通信网络传输

在构建一个传输距离为数十至数百公里的省域或城域高速以太网时,可利用同步数据网 SDH 提供的时分多路复用的数据传输信道,来实现多个以太局域网之间的远程点对点的高速率传输。这种方案的优缺点的介绍,参看第 2.4 节基于 SDH 的多业务传输平台 MSTP 在互联网中的应用。

3.1.4 IEEE 802.3u 快速以太网

为了提高以太网的传输速率,以太网的标准进行了一些改进,其中包括交换式的以太网和全双工的以太网技术。在全双工交换式以太网中,不再使用 CSMA/CD 的媒体访问方法。每台工作站通过两对双绞线直接连接到交换机,交换机的每个端口都有缓存器,信号的发送和接收可以同时进行,不会产生信号的冲突,不再需要载波侦听和冲突检测。但是为了保持不同速率以太网的兼容性,仍然保留 MAC 层的功能。

1995 年制定的 IEEE 802.3u 标准使以太网可以工作在 100Mbps 的传输速率,被称为 FE 快速以太网。为了与已有的 10Mbps 标准以太网相互兼容,快速以太网采用了相同的帧格式、接口和通信规程。CSMA/CD 的媒体访问控制策略对线缆上的往返传输延迟与帧发送时间之比很敏感,为了获得好的运行效果,这一比值应当保持很小。因此,最小帧长的发送时间应当大于信号在电缆上的往返传播延迟时间。当速率从 10Mbps 提高到 100Mbps 后,包的发送时间减小了 10 倍。为了在集线器的以太网上继续采用 CSMA/CD 的 MAC 协