

VLAN-20)。这问题是互连网络中的通信问题，已经超过了本章数据链路层的范围。这要由属于上面的网络层中的路由器来解决。

不过有的交换机中嵌入了一个用专用芯片构成的转发模块，用来在不同的 VLAN 之间转发帧。这样就可以不必再使用另外的路由器，而就在交换机中实现了第 3 层的转发功能（由于使用硬件转发，转发帧的速率提高了，比使用路由器要快）。这种转发功能被称为第 3 层交换，而这种交换机常称为 L3/L2 交换机。

有了这种第 3 层交换机，连接到不同交换机的 A 和 F，都能不需要经过另外的路由器而相互通信。更详细的转发过程这里就不继续讨论了。

## 3.5 高速以太网

随着电子技术的发展，以太网的速率也不断提升。从传统的 10 Mbit/s 以太网一直发展到现在常用的速率为 1 Gbit/s 的吉比特以太网，甚至更快的以太网。下面简单介绍几种高速以太网技术。

### 3.5.1 100BASE-T 以太网

100BASE-T 是在双绞线上传送 100 Mbit/s 基带信号的星形拓扑以太网，仍使用 IEEE 802.3 的 CSMA/CD 协议，它又称为快速以太网(Fast Ethernet)。用户只要使用 100 Mbit/s 的适配器和 100 Mbit/s 的集线器或交换机，就可很方便地由 10BASE-T 以太网直接升级到 100 Mbit/s，而不必改变网络的拓扑结构。所有在 10BASE-T 上的应用软件和网络软件都可保持不变。100BASE-T 的适配器有很强的自适应性，能够自动识别 10 Mbit/s 和 100 Mbit/s。1995 年 IEEE 已把 100BASE-T 快速以太网定为正式标准 (IEEE 802.3u)，是对现行的 IEEE 802.3 标准的补充。

100BASE-T 可使用以太网交换机提供很好的服务质量，可在全双工方式下工作而无冲突发生。因此，CSMA/CD 协议对全双工方式工作的快速以太网是不起作用的（但在半双工方式工作时则一定要使用 CSMA/CD 协议）。快速以太网使用的 MAC 帧格式仍然是 IEEE 802.3 标准规定的帧格式。

然而 IEEE 802.3u 的标准未包括对同轴电缆的支持。这意味着想从细缆以太网升级到快速以太网的用户必须重新布线。因此，现在 10/100 Mbit/s 以太网都使用无屏蔽双绞线布线。

100 Mbit/s 以太网的新标准改动了原 10 Mbit/s 以太网的某些规定。我们知道，以太网有一个重要的参数  $a$ ，它必须保持为很小的数值。在 3.3.4 节曾给出了参数  $a$  的公式(3-2):

$$a = \frac{\tau}{T_0} \quad (3-2)$$

这里  $\tau$  是以太网单程端到端时延， $T_0$  是帧的发送时间。我们知道， $T_0$  是帧长与发送速率之比，可见为了保持参数  $a$  不变，可以使  $\tau$  与发送速率的乘积不变。在帧长一定的条件下，若数据率提高到 10 倍，可把网络电缆长度（因而使  $\tau$ ）减小到原有数值的十分之一。

在 100 Mbit/s 的以太网中采用的方法是保持最短帧长不变，对于铜缆 100 Mbit/s 以太网，一个网段的最大长度是 100 m，其最短帧长仍为 64 字节，即 512 比特。因此 100 Mbit/s 以太网的争用期是 5.12  $\mu$ s，帧间最小间隔现在是 0.96  $\mu$ s，都是 10 Mbit/s 以太网的 1/10。

表 3-1 是 100 Mbit/s 以太网的新标准规定的三种不同的物理层标准。

表 3-1 100 Mbit/s 以太网的物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
100BASE-TX	铜缆	100 m	两对 UTP 5 类线或屏蔽双绞线 STP
100BASE-T4	铜缆	100 m	4 对 UTP 3 类线或 5 类线
100BASE-FX	光缆	2000 m	两根光纤，发送和接收各用一根

在标准中把上述的 100BASE-TX 和 100BASE-FX 合在一起称为 100BASE-X。

100BASE-T4 使用 4 对 UTP 3 类线或 5 类线时，使用 3 对线同时传送数据（每一对线以  $33\frac{1}{3}$  Mbit/s 的速率传送数据），用 1 对线作为碰撞检测的接收信道。

### 3.5.2 吉比特以太网

IEEE 在 1997 年通过了吉比特以太网的标准 802.3z，并在 1998 年成为正式标准。几年来，吉比特以太网迅速占领了市场，成为以太网的主流产品。

吉比特以太网的标准 IEEE 802.3z 有以下几个特点：

- (1) 允许在 1 Gbit/s 下以全双工和半双工两种方式工作。
- (2) 使用 IEEE 802.3 协议规定的帧格式。
- (3) 在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议，而在全双工方式不使用 CSMA/CD 协议。
- (4) 与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容。

吉比特以太网可用作现有网络的主干网，也可在高带宽（高速率）的应用场合中（如医疗图像或 CAD 的图形等）用来连接计算机和服务器。

吉比特以太网的物理层使用两种成熟的技术：一种来自现有的以太网，另一种则是美国国家标准协会 ANSI 制定的光纤通道 FC (Fibre Channel)。采用成熟技术就能大大缩短吉比特以太网标准的开发时间。

表 3-2 是吉比特以太网的物理层的标准。

表 3-2 吉比特以太网物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
1000BASE-SX	光缆	550 m	多模光纤 (50 和 62.5 $\mu\text{m}$ )
1000BASE-LX	光缆	5000 m	单模光纤 (10 $\mu\text{m}$ ) 多模光纤 (50 和 62.5 $\mu\text{m}$ )
1000BASE-CX	铜缆	25 m	使用 2 对屏蔽双绞线电缆 STP
1000BASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 UTP 5 类线

现在 1000BASE-X (包括表 3-2 中的前两项) 的标准是 IEEE 802.3z，而 1000BASE-T 的标准是 IEEE 802.3ab。

吉比特以太网工作在半双工方式时，就必须进行碰撞检测。由于数据率提高了，因此只有减小最大电缆长度或增大帧的最小长度，才能使参数  $a$  保持为较小的数值。若将吉比特以太网最大电缆长度减小到 10 m，那么网络的实际价值就大大减小。而若将最短帧长提高到 640 字节，则在发送短数据时开销又太大。因此，吉比特以太网仍然保持一个网段的最大长度为 100 m，但采用了“载波延伸”(carrier extension)的办法，使最短帧长仍为 64 字节。

(这样可以保持兼容性)，同时将争用期增大为 512 字节。凡发送的 MAC 帧长不足 512 字节时，就用一些特殊字符填充在帧的后面，使 MAC 帧的发送长度增大到 512 字节，这对有效载荷<sup>①</sup>并无影响。接收端在收到以太网的 MAC 帧后，要把所填充的特殊字符删除后才向高层交付。当原来仅 64 字节长的短帧填充到 512 字节时，所填充的 448 字节就造成了很大的开销。

为此，吉比特以太网还增加了一种功能称为分组突发(packet bursting)。这就是当很多短帧要发送时，第一个短帧要采用上面所说的载波延伸的方法进行填充。但随后的一些短帧则可一个接一个地发送，它们之间只需留有必要的帧间最小间隔即可。这样就形成一串分组的突发，直到达到 1500 字节或稍多一些为止。当吉比特以太网工作在全双工方式时（即通信双方可同时进行发送和接收数据），不使用载波延伸和分组突发。

吉比特以太网交换机可以直接与多个图形工作站相连，也可用作百兆以太网的主干网，与百兆比特或吉比特交换机相连，然后再和大型服务器连接在一起。图 3-29 是吉比特以太网的一种配置举例。

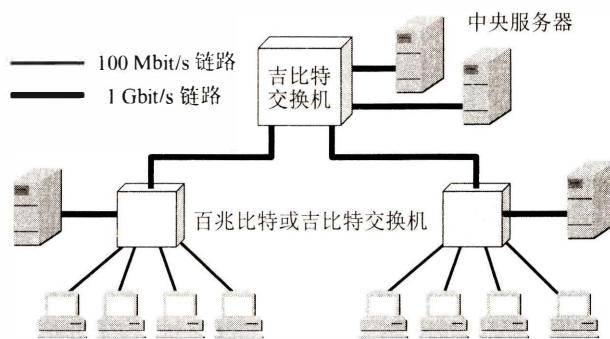


图 3-29 吉比特以太网的配置举例

### 3.5.3 10 吉比特以太网(10GbE)和更快的以太网

10GbE 并非把吉比特以太网的速率简单地提高到 10 倍，因为还有许多技术上的问题要解决。下面是 10GbE 的主要特点。顺便指出，10 吉比特就是  $10 \times 10^9$  比特，有人愿意称之为“万兆比特”。虽然“万”是中国的一种常用的计量单位，但这与国际上通用的表示方法不一致，因此本书不予采用。

10GbE 的帧格式与 10 Mbit/s, 100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 以太网的帧格式完全相同，并保留了 802.3 标准规定的以太网最小帧长和最大帧长。这就使用户在将其已有的以太网进行升级时，仍能和较低速率的以太网很方便地通信。

10GbE 只工作在全双工方式，因此不存在争用问题，当然也不使用 CSMA/CD 协议。这就使得 10GbE 的传输距离大大提高了（因为不再受必须进行碰撞检测的限制）。

① 注：有效载荷(payload)是个很常用的名词，它表示在一个分组中，去掉首部和尾部（如果有尾部的话）的控制字段后，剩下的有用的数据部分。显然，在不同层次中，有效载荷所代表的内容是不一样的。例如，数据链路层一个帧的有效载荷，就包含了网络层 IP 数据报的 IP 首部和数据部分，而从网络层看，只有 IP 数据报中的数据部分，才是网络层 IP 数据报的有效载荷。如果 IP 数据报中的数据是运输层的 TCP 报文段，那么从运输层看，其有效载荷只是运输层 TCP 报文段中的数据部分（要把 TCP 的首部去除）。

表 3-3 是 10GbE 的物理层标准。

表 3-3 10GbE 的物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
10GBASE-SR	光缆	300 m	多模光纤 ( $0.85 \mu\text{m}$ )
10GBASE-LR	光缆	10 km	单模光纤 ( $1.3 \mu\text{m}$ )
10GBASE-ER	光缆	40 km	单模光纤 ( $1.5 \mu\text{m}$ )
10GBASE-CX4	铜缆	15 m	使用 4 对双芯同轴电缆(twinax)
10GBASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 6A 类 UTP 双绞线

表 3-3 中的前三项的标准是 IEEE 802.3ae，在 2002 年 6 月完成。第四项的标准是 IEEE 802.3ak，完成于 2004 年。最后一项的标准是 IEEE 802.3an，完成于 2006 年。

以太网的技术发展得很快。在 10GbE 之后又制定了 40GbE/100GbE（即 40 吉比特以太网和 100 吉比特以太网）的标准 IEEE 802.3ba-2010 和 802.3bm-2015。表 3-4 是 40GbE 和 100GbE 的物理层名称及传输距离，其中有两项带\*号的是 802.3bm 提出的。

表 3-4 40GbE/100GbE 的物理层标准

物理层	40GbE	100GbE
在背板上传输至少超过 1 m	40GBASE-KR4	
在铜缆上传输至少超过 7 m	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10
在多模光纤上传输至少 100 m	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10, *100GBASE-SR4
在单模光纤上传输至少 10 km	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
在单模光纤上传输至少 40 km	*40GBASE-ER4	100GBASE-ER4

需要指出的是，40GbE/100GbE 以太网只工作在全双工的传输方式（因而不使用 CSMA/CD 协议），并且仍然保持了以太网的帧格式以及 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长。100GbE 在使用单模光纤传输时，仍然可以达到 40 km 的传输距离，但这需要波分复用（使用 4 个波长复用一根光纤，每一个波长的有效传输速率是 25 Gbit/s）。

由于大型数据中心迫切需要非常高速的数据传送，在 2017 年 12 月，更高速率的以太网标准颁布了，这就是 IEEE 802.3bs 标准，共有两种速率，即 200GbE（速率为 200 Gbit/s）和 400GbE（速率为 400 Gbit/s），全部用光纤传输（单模和多模）。根据传输方式的不同，传输距离从 100 m 至 10 km 不等。今后还会有更快的以太网问世。

现在以太网的工作范围已经从局域网（校园网、企业网）扩大到城域网和广域网，从而实现了端到端的以太网传输。这种工作方式的好处是：

(1) 以太网是一种经过实践证明的成熟技术，无论是互联网服务提供者 ISP 还是端用户都很愿意使用以太网。当然对 ISP 来说，使用以太网还需要在更大的范围进行试验。

(2) 以太网的互操作性也很好，不同厂商生产的以太网都能可靠地进行互操作。

(3) 在广域网中使用以太网时，其价格大约只有同步光纤网 SONET 的五分之一。以太网还能够适应多种传输媒体，如铜缆、双绞线以及各种光缆。这就使具有不同传输媒体的用户在进行通信时不必重新布线。

(4) 端到端的以太网连接使帧的格式全都是以太网的格式，而不需要再进行帧的格式转换，这就简化了操作和管理。

以太网从 10 Mbit/s 到 10 Gbit/s 甚至到 400 Gbit/s 的演进，证明了以太网是：

- (1) 可扩展的（速率从 10 Mbit/s 到 400 Gbit/s）。
- (2) 灵活的（多种媒体、全/半双工、共享/交换）。
- (3) 易于安装的。
- (4) 稳健性好的。

### 3.5.4 使用以太网进行宽带接入

现在人们也在使用以太网进行宽带接入互联网。为此，IEEE 在 2001 年初成立了 802.3EFM 工作组<sup>①</sup>，专门研究高速以太网的宽带接入技术问题。

以太网接入的一个重要特点是它可以提供双向的宽带通信，并且可以根据用户对带宽的需求灵活地进行带宽升级（例如，把 10 兆的以太网交换机更新为吉比特的以太网交换机）。当城域网和广域网都采用吉比特以太网或 10 吉比特以太网时，采用以太网接入可以实现端到端的以太网传输，中间不需要再进行帧格式的转换。这就提高了数据的传输效率且降低了传输的成本。

然而以太网的帧格式标准中，在地址字段部分并没有用户名字段，也没有让用户键入密码来鉴别用户身份的过程。如果网络运营商要利用以太网接入到互联网，就必须解决这个问题。

于是有人就想办法把数据链路层的两个成功的协议结合起来，即把 PPP 协议中的 PPP 帧再封装到以太网中来传输。这就是 1999 年公布的 PPPoE (PPP over Ethernet)，意思是“在以太网上运行 PPP” [RFC 2516]。现在的光纤宽带接入 FTTx 都要使用 PPPoE 的方式进行接入。

例如，如果使用光纤到大楼 FTTB 的方案，就在每个大楼的楼口安装一个光网络单元 ONU（其作用和以太网交换机差不多），然后根据用户所申请的带宽，用 5 类线（请注意，到这个地方，传输媒体已经变为铜线了）接到用户家中。如果大楼里上网的用户很多，那么还可以在每一个楼层再安装一个 100 Mbit/s 的以太网交换机。各大楼的以太网交换机通过光缆汇接到光汇接点（光汇接点一般通过城域网连接到互联网的主干网）。

使用这种方式接入到互联网时，在用户家中不再需要使用任何调制解调器，只要一个 RJ-45 的插口即可。用户把自己的个人电脑通过 5 类网线连接到墙上的 RJ-45 插口中，然后在 PPPoE 弹出的窗口中键入在网络运营商处购买的用户名（就是一串数字）和密码（严格说就是口令），就可以进行宽带上网了。请注意，使用这种以太网宽带接入时，从用户家中的个人电脑到户外的第一个以太网交换机的带宽是能够得到保证的。因为这个带宽是用户独占的，没有和其他用户共享。但这个以太网交换机到上一级的交换机的带宽，是许多用户共享的。因此，如果过多的用户同时上网，则有可能使每一个用户实际上享受到的带宽减少。这时，网络运营商就应当及时进行扩容，以保证用户的利益不受损伤。

顺便指出，当用户利用 ADSL（非对称数字用户线）进行宽带上网时，从用户个人电脑到家中的 ADSL 调制解调器之间，也是使用 RJ-45 和 5 类线（即以太网使用的网线）进行连

---

<sup>①</sup> 注：通信网的数字化是从主干网开始的，最后剩下的一段模拟线路是用户线，因此这一段用户线常称为是通信线路数字化过程中的“最后一英里”。IEEE 802.3EFM 中的“EFM”表示“Ethernet in the First Mile”，意思是说从用户端开始算，“第一英里”采用以太网，也就是说，EFM 表示“采用以太网接入”。

接的，并且也是使用 PPPoE 弹出的窗口进行拨号连接的。但是用户个人电脑发送的以太网帧到了家里的 ADSL 调制解调器后，就转换成为 ADSL 使用的 PPP 帧。需要注意的是，在用户家中墙上是通过电话使用的 RJ-11 插口，用普通的电话线传送 PPP 帧。这已经和以太网没有关系了。所以这种上网方式不能称为以太网上网，而是利用电话线宽带接入到互联网。

## 本章的重要概念

- 链路是从一个节点到相邻节点的一段物理线路，数据链路则是在链路的基础上增加了一些必要的硬件（如网络适配器）和软件（如协议的实现）。
- 数据链路层使用的信道主要有点对点信道和广播信道两种。
- 数据链路层传送的协议数据单元是帧。数据链路层的三个基本问题是：封装成帧、透明传输和差错检测。
- 循环冗余检验 CRC 是一种检错方法，而帧检验序列 FCS 是添加在数据后面的冗余码。
- 点对点协议 PPP 是数据链路层使用最多的一种协议，它的特点是：简单；只检测差错，而不是纠正差错；不使用序号，也不进行流量控制；可同时支持多种网络层协议。
- PPPoE 是为宽带上网的主机使用的链路层协议。
- 局域网的优点是：具有广播功能，从一个站点可很方便地访问全网；便于系统的扩展和逐渐演变；提高了系统的可靠性、可用性和生存性。
- 共享通信媒体资源的方法有二：一是静态划分信道（各种复用技术），二是动态媒体接入控制，又称为多点接入（随机接入或受控接入）。
- IEEE 802 委员会曾把局域网的数据链路层拆成两个子层，即逻辑链路控制（LLC）子层（与传输媒体无关）和媒体接入控制（MAC）子层（与传输媒体有关）。但现在 LLC 子层已成为历史。
- 计算机与外界局域网的通信要通过网络适配器，它又称为网络接口卡或网卡。计算机的硬件地址就在适配器的 ROM 中。
- 以太网采用无连接的工作方式，对发送的数据帧不进行编号，也不要对方发回确认。目的站收到有差错帧就把它丢弃，其他什么也不做。
- 以太网采用的协议是具有冲突检测的载波监听多点接入 CSMA/CD。协议的要点是：发送前先监听，边发送边监听，一旦发现总线上出现了碰撞，就立即停止发送。然后按照退避算法等待一段随机时间后再次发送。因此，每一个站在自己发送数据之后的一小段时间内，存在着遭遇碰撞的可能性。以太网上各站点都平等地争用以太网信道。
- 传统的总线以太网基本上都是使用集线器的双绞线以太网。这种以太网在物理上是星形网，但在逻辑上则是总线网。集线器工作在物理层，它的每个端口仅仅简单地转发比特，不进行碰撞检测。
- 以太网的硬件地址，即 MAC 地址实际上就是适配器地址或适配器标识符，与主机所在的地点无关。源地址和目的地址都是 48 位长。
- 以太网的适配器有过滤功能，它只接收单播帧、广播帧或多播帧。
- 使用集线器可以在物理层扩展以太网（扩展后的以太网仍然是一个网络）。
- 交换式集线器常称为以太网交换机或第二层交换机（工作在数据链路层）。它就是