



计算机网络（第 8 版）

第 3 章

数据链路层

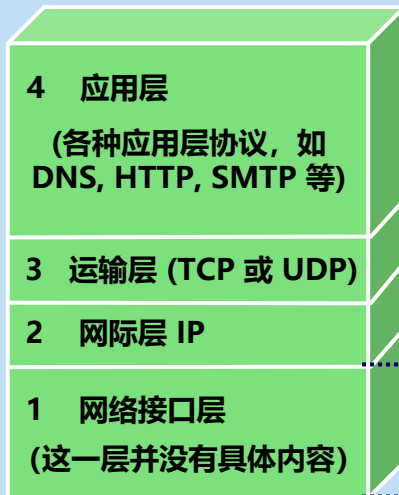
计算机网络体系结构

OSI 的七层协议体系结构



(a)

TCP/IP 的四层协议体系结构



(b)

五层协议的体系结构



(c)

3.1

使用点对点信道的数据链路层

3.2

点对点协议 PPP

3.3

使用广播信道的数据链路层

3.4

扩展的以太网

3.5

高速以太网

3.4 \ 3.5

扩展以太网
高速以太网

3.4

扩展的以太网

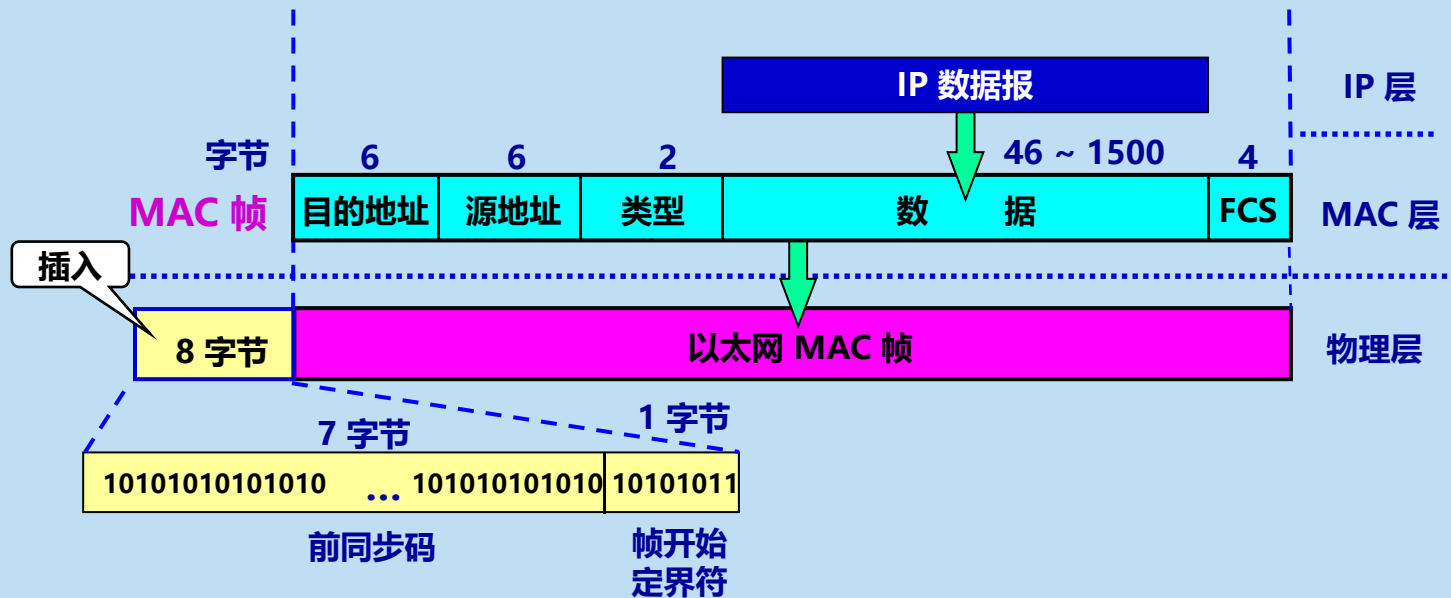
3.5

高速以太网

2. MAC 帧的格式

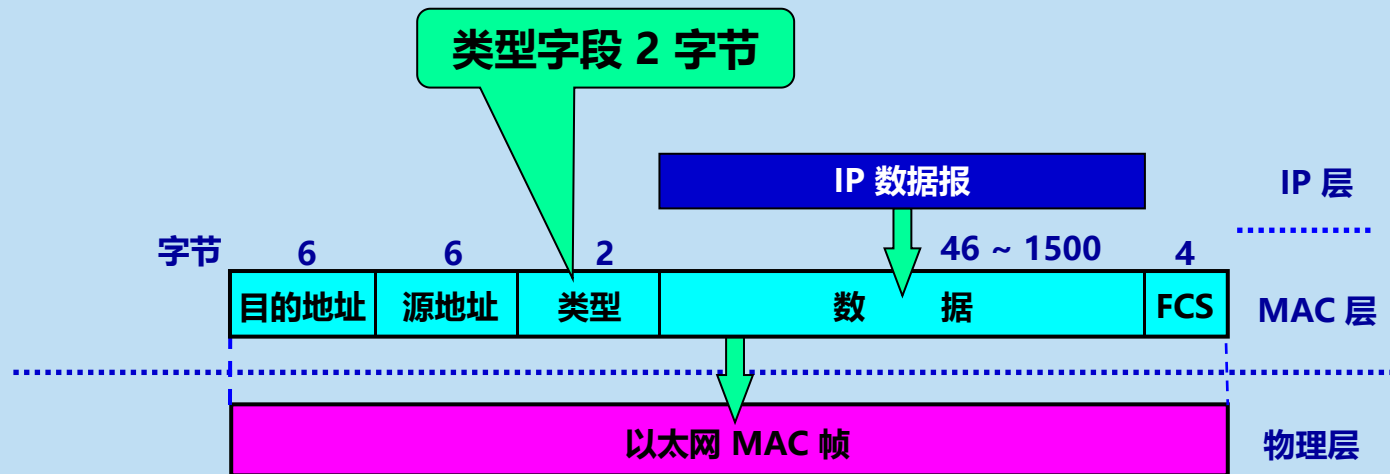
- 常用的以太网 MAC 帧格式有 2 种标准：
 1. DIX Ethernet V2 标准
 2. IEEE 的 802.3 标准
- 最常用的 MAC 帧是**以太网 V2 的格式**。

以太网 V2 的 MAC 帧格式



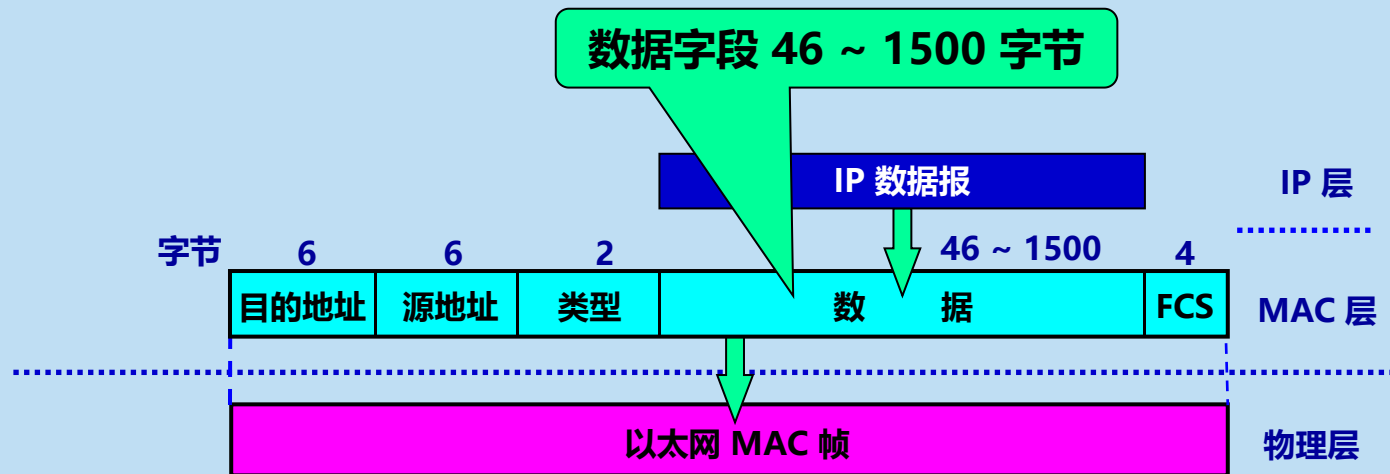
以太网 V2 的 MAC 帧格式

类型字段用来标志^{上一层}使用的是什么协议，以便把收到的 MAC 帧的数据上交给上一层的这个协议。

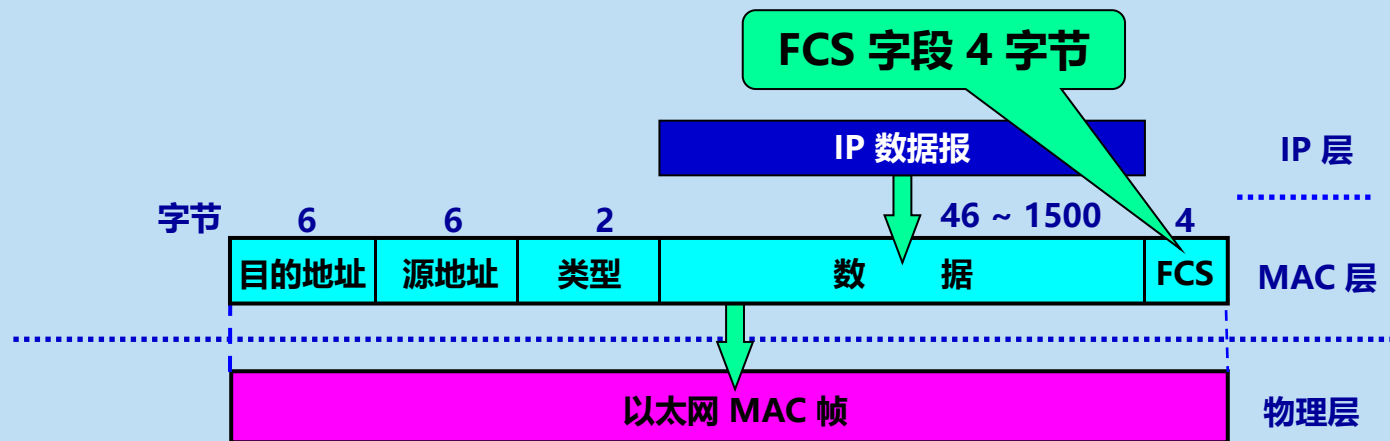


以太网 V2 的 MAC 帧格式

数据字段的正式名称是 **MAC 客户数据字段**。
最小长度 64 字节 - 18 字节的首部和尾部 = 数据字段的最小长度 (46字节)



以太网 V2 的 MAC 帧格式



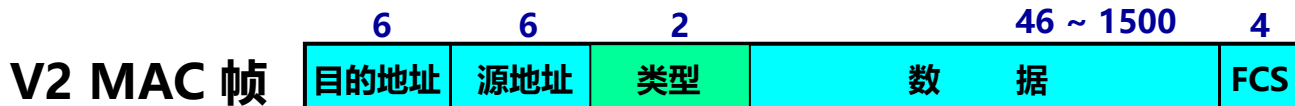
当数据字段的长度小于 46 字节时，应在数据字段的后面加入整数字节的**填充字段**，以保证以太网的 MAC 帧长不小于 64 字节。

无效的 MAC 帧

- 帧的长度不是整数个字节;
- 用收到的帧检验序列 FCS 查出有差错;
- 数据字段的长度不在 46 ~ 1500 字节之间。

- 对于检查出的无效 MAC 帧就简单地**丢弃**。
- 以太网**不负责重传**丢弃的帧。

IEEE 802.3 MAC 与以太网 V2 MAC 帧格式的区别



- 当“长度/类型”字段值**大于** 0x0600 时，表示“类型”；**小于** 0x0600 时，表示“长度”。
- 当“长度/类型”字段值**小于** 0x0600 时，数据字段必须**装入**逻辑链路控制 LLC 子层的 **LLC 帧**。
- 在 802.3 标准的文档中，MAC 帧格式包括了 8 字节的前同步码和帧开始定界符。

现在市场上流行的都是以太网 V2 的 MAC 帧，但大家也常常把它称为 IEEE 802.3 标准的 MAC 帧。

3.4 扩展的 以太网

3.4.1

在物理层扩展以太网

3.4.2

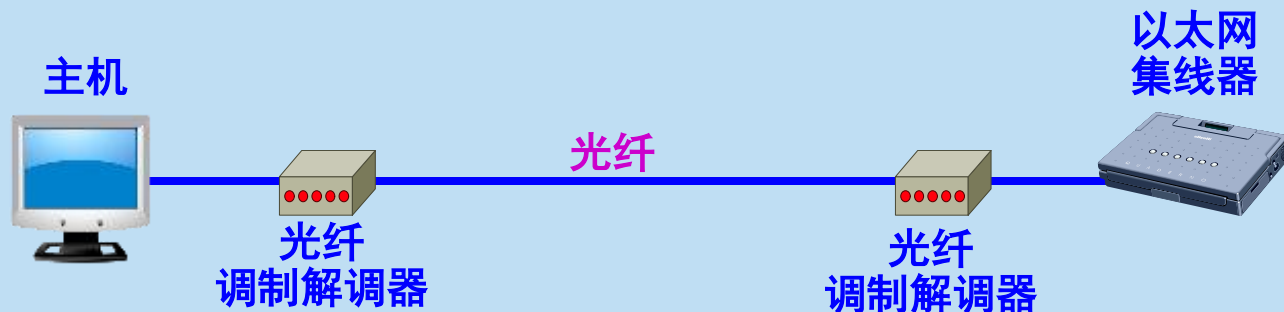
在数据链路层扩展以太网

3.4.3

虚拟局域网

3.4.1 在物理层扩展以太网

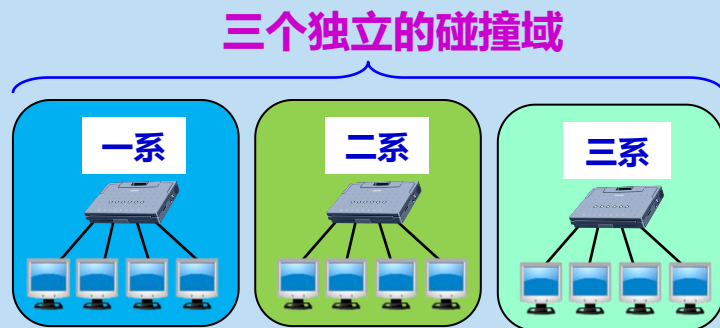
● 使用光纤扩展



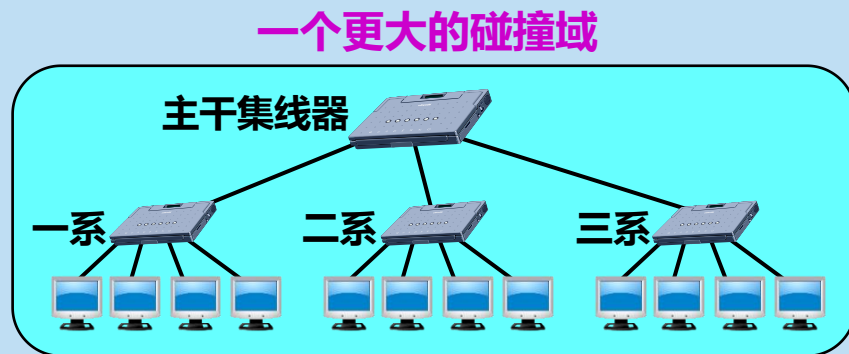
主机使用光纤和一对光纤调制解调器连接到集线器

3.4.1 在物理层扩展以太网

● 使用集线器扩展



三个独立的以太网



一个扩展的以太网

用多个集线器连成更大的以太网

用集线器扩展以太网

- **优点**

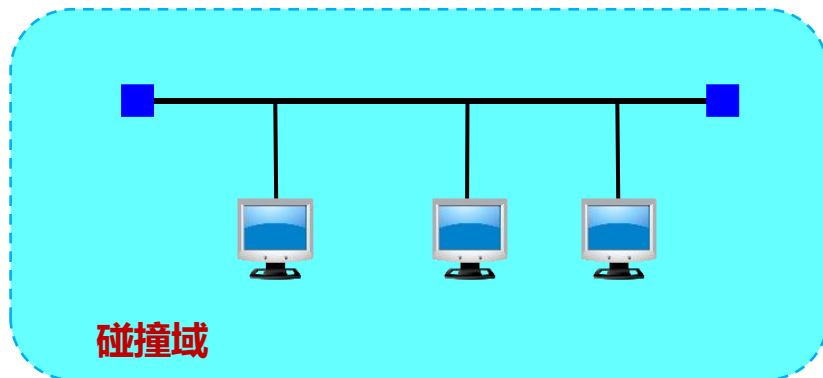
1. 使原来属于不同碰撞域（冲突域）的计算机能够**跨碰撞域通信**。
2. 扩大了以太网覆盖的地理范围。

- **缺点**

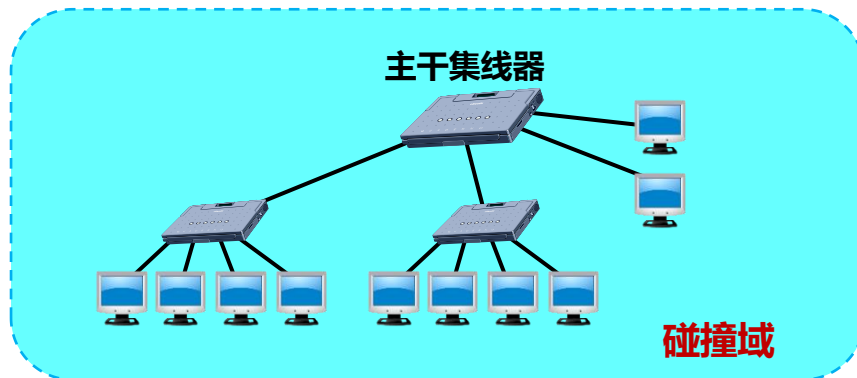
1. 碰撞域增大了，总的吞吐量未提高。
2. 如果使用不同的以太网技术（如数据率不同），那么就不能用集线器将它们互连起来。

碰撞域

- **碰撞域** (collision domain) 又称为**冲突域**，指网络中一个站点发出的帧会与其他站点发出的帧产生碰撞或冲突的那部分网络。
- **碰撞域越大，发生碰撞的概率越高。**



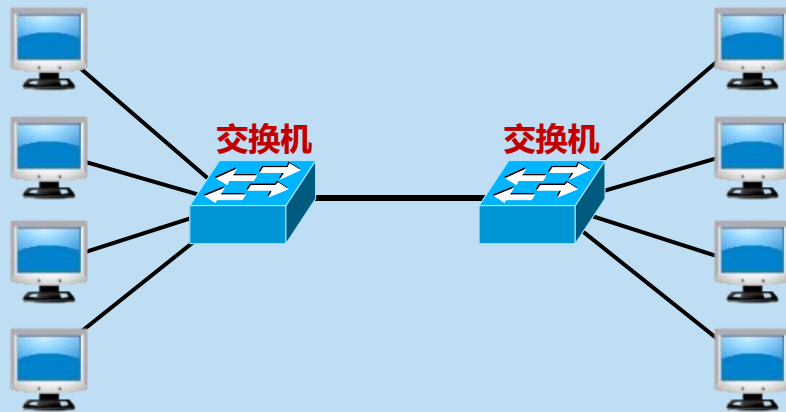
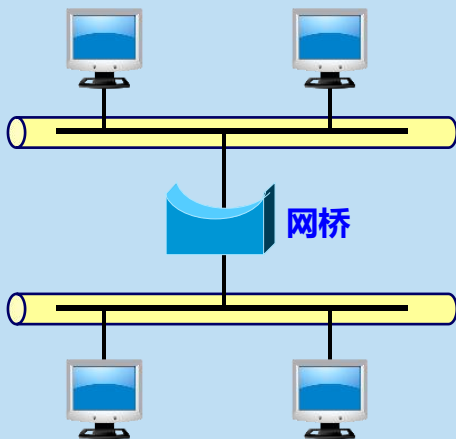
总线形以太网



使用集线器的星形以太网

3.4.2 在数据链路层扩展以太网

- 更为常用。早期使用**网桥**，现在使用以太网**交换机**。



网桥与以太网交换机

网桥

- 工作在数据链路层。
- 根据 MAC 帧的目的地址对收到的帧进行转发和过滤。或者转发，或者丢弃。

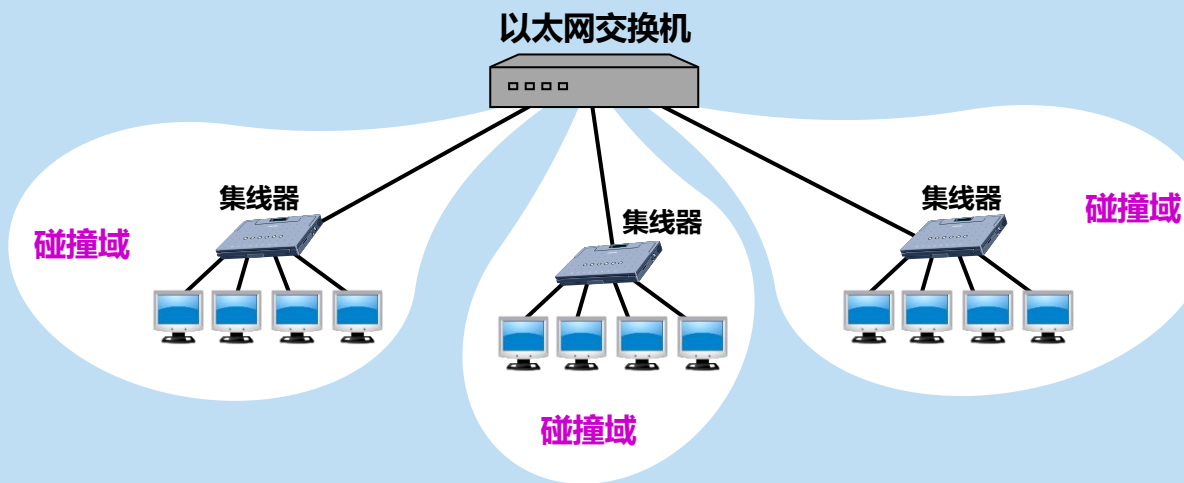
交换机

- 工作在数据链路层。
- 多端口的网桥。
- 可明显地提高以太网的性能。

1. 以太网交换机的特点

- 每个接口都直接与一个单台主机或另一个以太网交换机相连，并且一般都工作在全双工方式。
- 以太网交换机具有并行性。
 - ◆ 能同时连通多对接口，使多对主机能同时通信。
 - ◆ 相互通信的主机都独占传输媒体，无碰撞地传输数据。

1. 以太网交换机的特点



以太网交换机的每个接口都是一个碰撞域

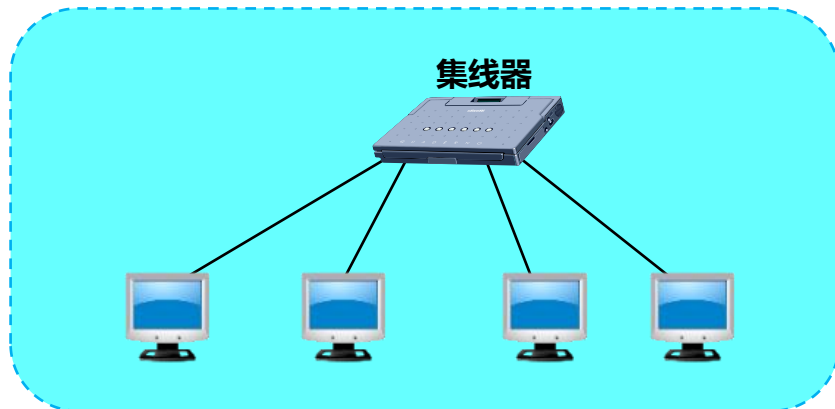
1. 以太网交换机的特点

- 接口**有存储器**。
- **即插即用**。其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**）是通过**自学习算法**自动地逐渐建立起来的。这种交换表就是一个内容可寻址存储器 CAM (Content addressable Memory)。
- 使用**专用的交换结构芯片**，用硬件转发，其转发速率要比使用软件转发的网桥快很多。

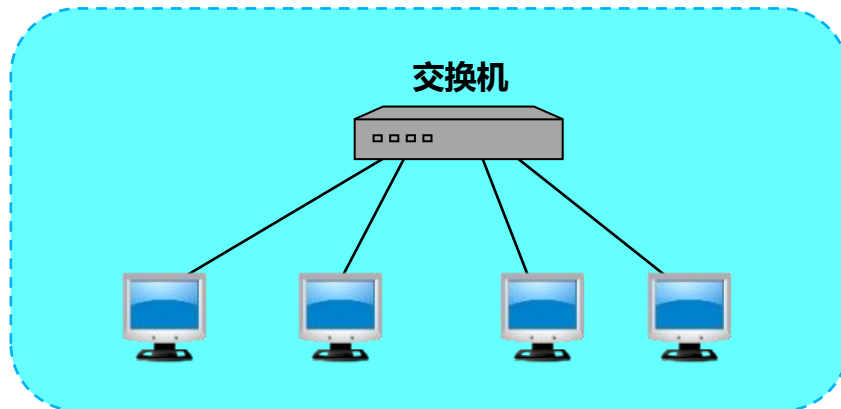
以太网交换机的性能远远超过普通的集线器，而且价格并不贵。

以太网交换机的优点

每个用户独享带宽，增加了总容量



- N 个用户共享集线器提供的带宽 B 。
- 平均每个用户仅占有 B/N 的带宽。

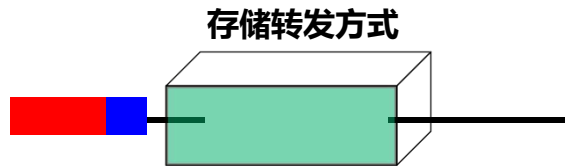


- 交换机为每个端口提供带宽 B 。
- N 个用户，每个用户独占带宽 B 。
- 交换机总容量达 $B \times N$ 。

以太网交换机的交换方式

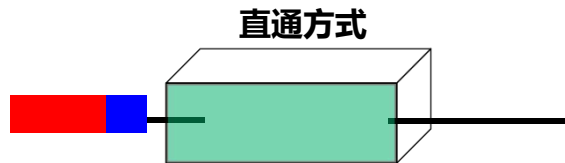
● 存储转发方式

- ◆ 把整个数据帧先缓存，再进行处理。

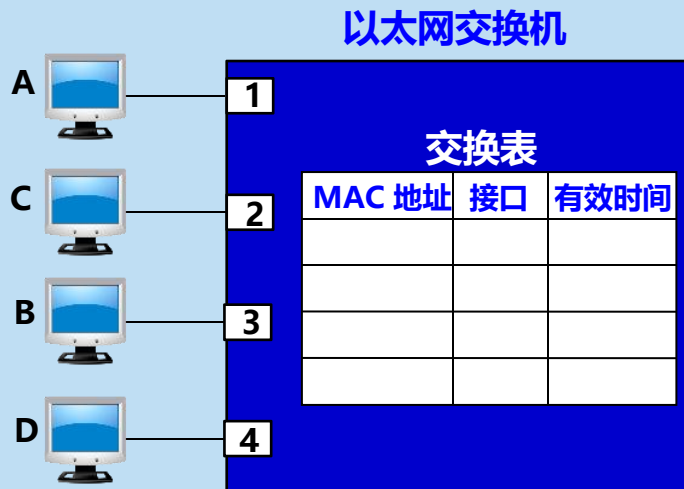


● 直通 (cut-through) 方式

- ◆ 接收数据帧的同时立即按数据帧的目的 MAC 地址决定该帧的转发接口。
- ◆ 缺点：不检查差错就直接将帧转发出去，有可能转发无效帧。

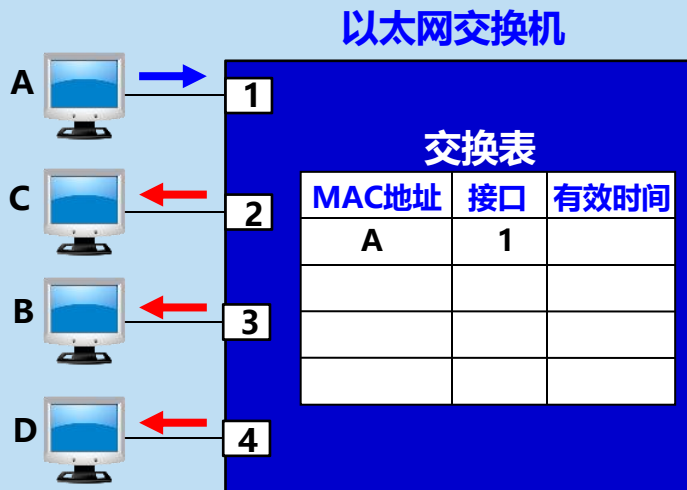


2. 以太网交换机的自学习功能



开始时，交换表是空的

2. 以太网交换机的自学习功能



以太网帧

目的地址	源地址	类型	数据	FCS
B	A			

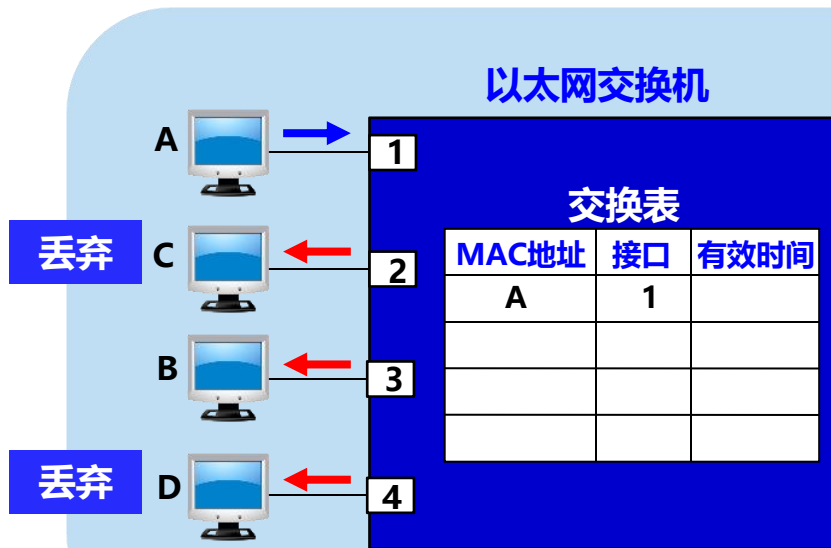
A 先向 B 发送一帧。该帧从接口 1 进入到交换机。

交换机收到帧后，先查找交换表。没有查到应从哪个接口转发这个帧给 B。

交换机把这个帧的源地址 A 和接口 1 写入交换表中。

交换机向除接口 1 以外的所有的接口广播这个帧。

2. 以太网交换机的自学习功能

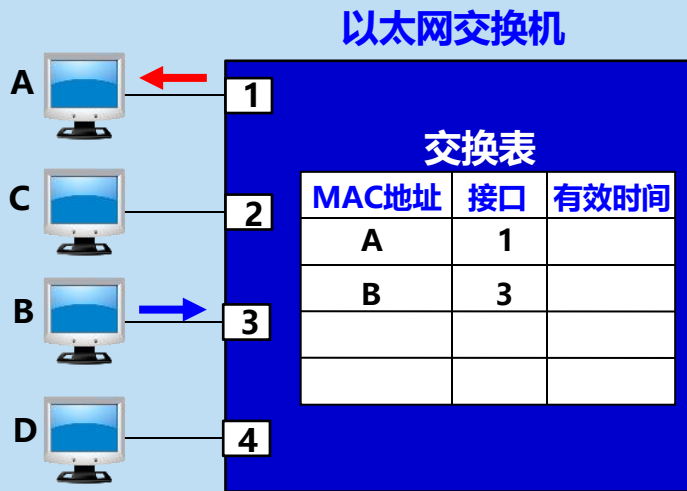


以太网帧

目的地址	源地址	类型	数据	FCS
B	A			

由于与该帧的目的地址不相符，C 和 D 将丢弃该帧。

2. 以太网交换机的自学习功能



以太网帧

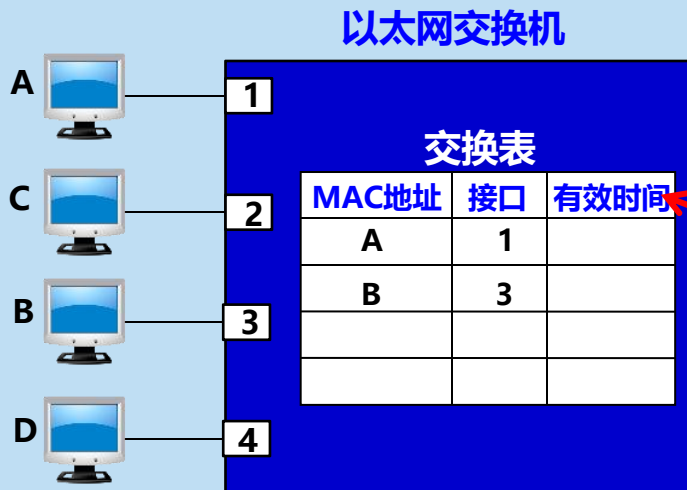
目的地址	源地址	类型	数据	FCS
A	B			

B 向 A 发送一帧。该帧从接口 3 进入到交换机。

交换机收到帧后，先查找交换表。发现交换表中的 MAC 地址有 A，表明要发送给 A 的帧应从接口 1 转发出去。于是就把这个帧传送到接口 1 转发给 A。

交换机把这个帧的源地址 B 和接口 3 写入交换表中。

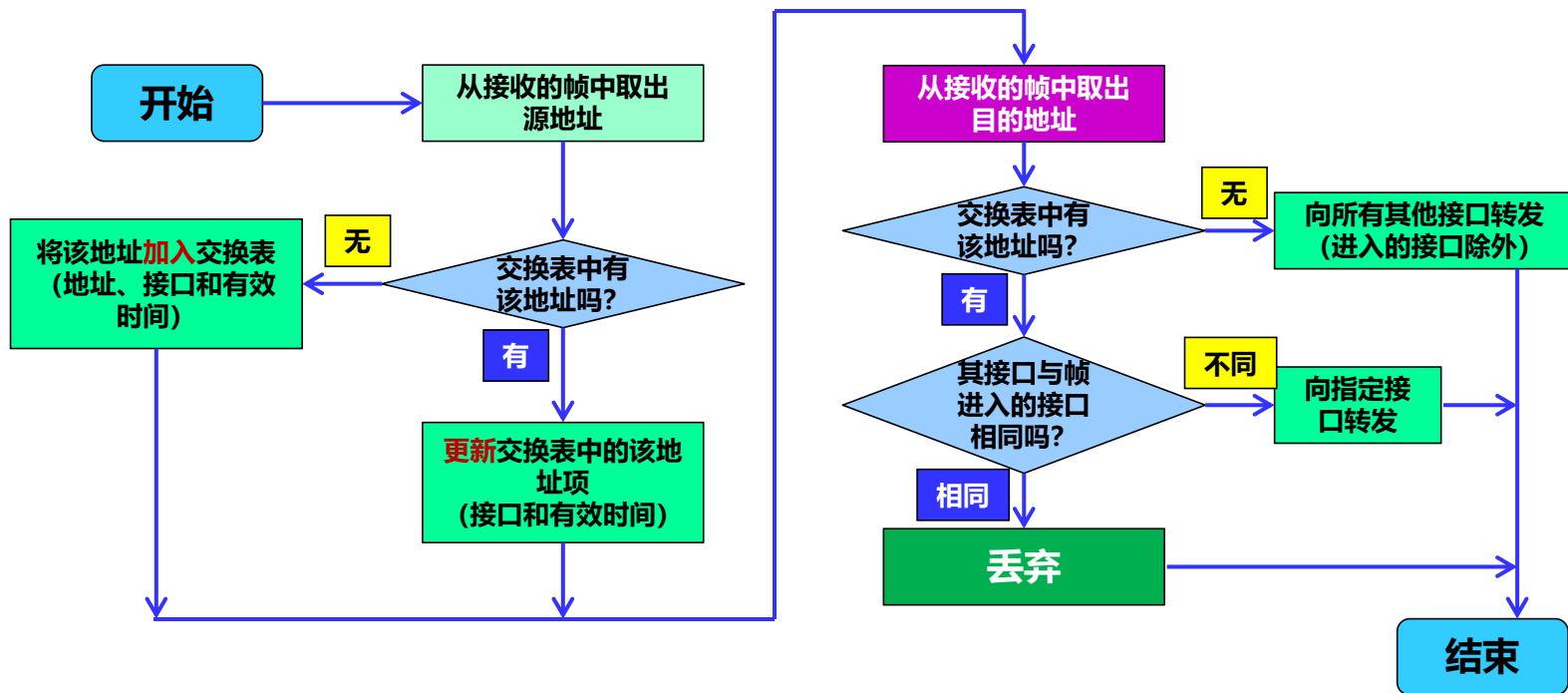
2. 以太网交换机的自学习功能



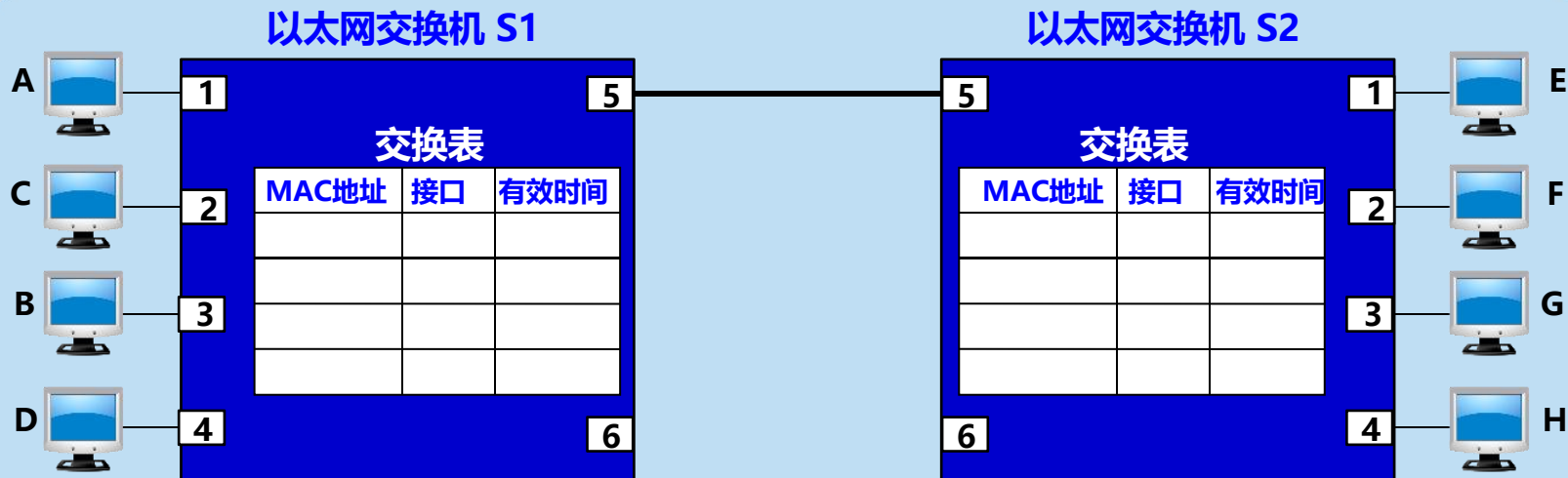
考虑到可能有时要在交换机的接口更换主机，或者主机要更换其网络适配器，这就需要更改交换表中的项目。为此，在交换表中每个项目都设有一定的**有效时间**。**过期的项目就自动被删除。**

这种自学习方法使得以太网交换机能够即插即用，不必人工进行配置。

交换机自学习和转发帧的步骤归纳

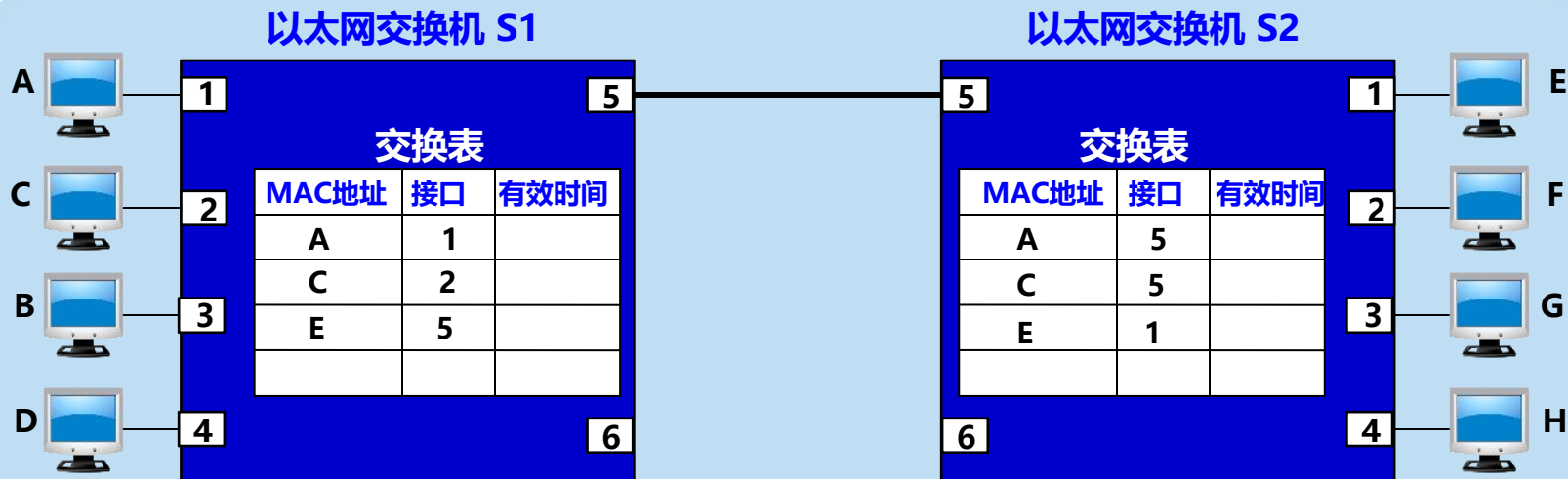


2 台以太网交换机互连



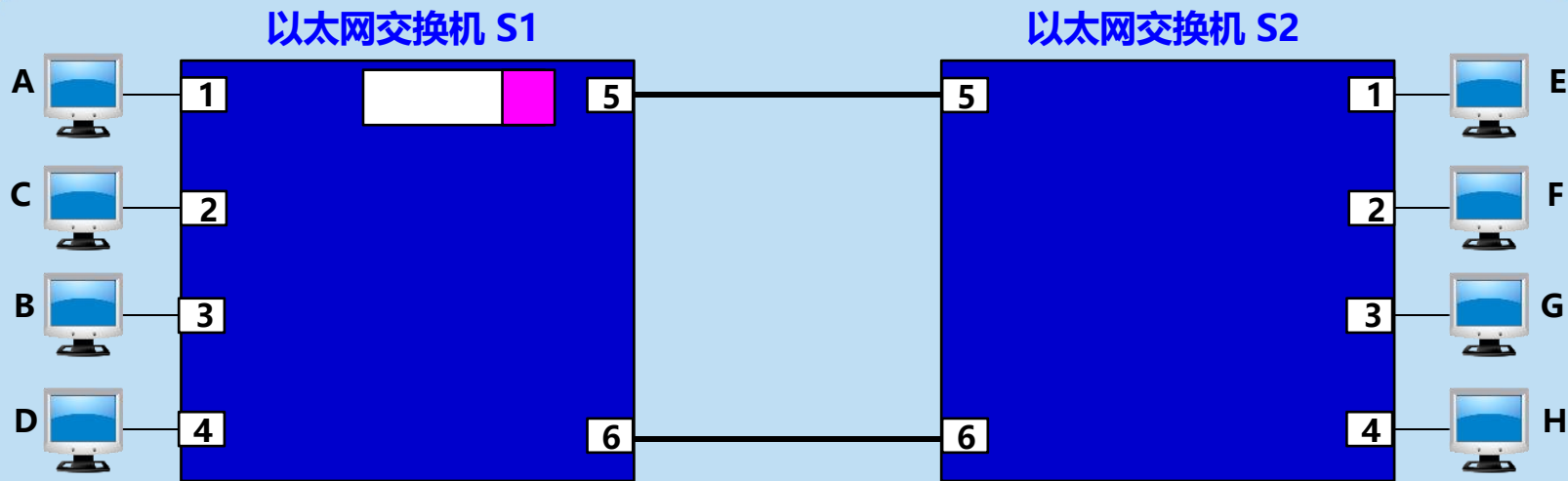
假设：A 向 B 发送了一帧，C 向 E 发送了一帧，E 向 A 发送了一帧。
 请分析：此时，S1 和 S2 的交换表内容分别是什么？

2 台以太网交换机互连



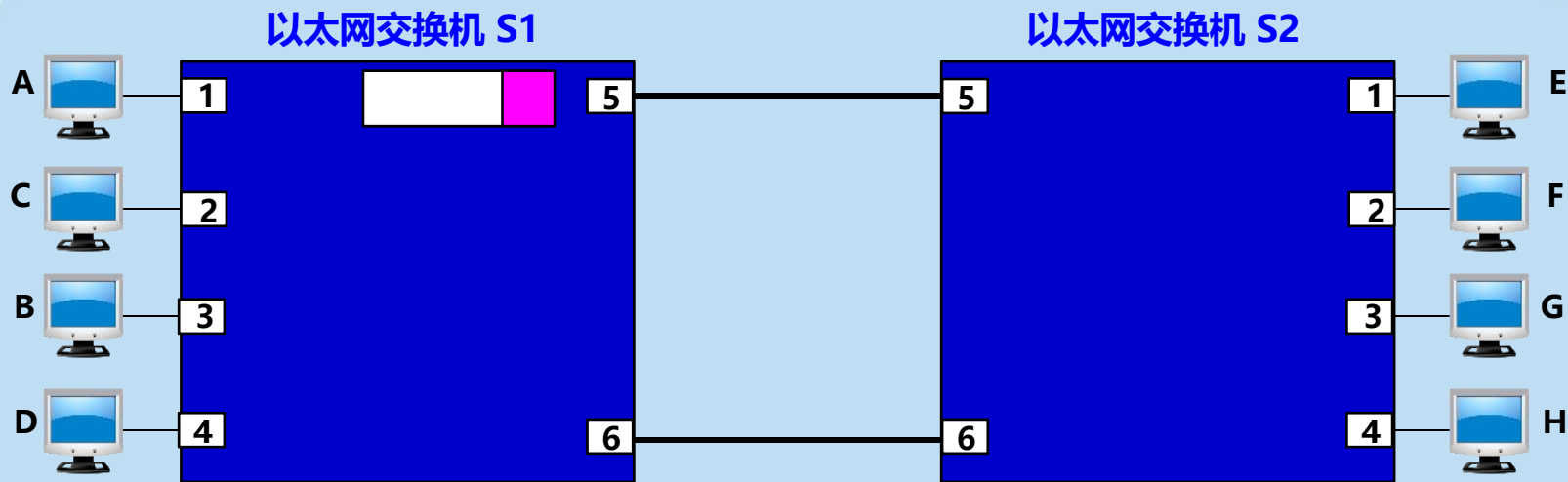
假设：A 向 B 发送了一帧，C 向 E 发送了一帧，E 向 A 发送了一帧。
 请分析：此时，S1 和 S2 的交换表内容分别是什么？

存在的问题：回路



假定开始时，交换机 S1 和 S2 的交换表都是空的。
假定：主机 A 向主机 E 发送一帧。

存在的问题：回路



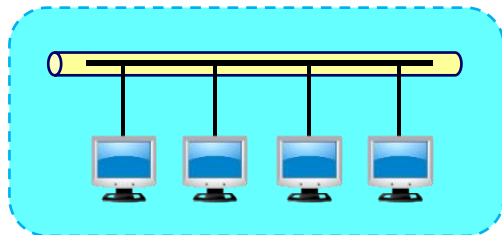
假定开始时，交换机 S1 和 S2 的交换表都是空的。
假定：主机 A 向主机 E 发送一帧。

3. 从总线以太网到星形以太网

早期

采用无源的总线结构。

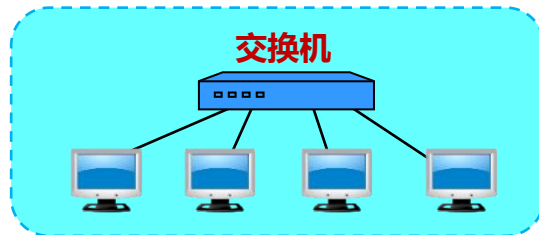
使用 CSMA/CD 协议，以半双工方式工作。



现在

以太网交换机为中心的星形结构

不使用共享总线，没有碰撞问题，不使用 CSMA/CD 协议，以全双工方式工作。但仍然采用以太网的帧结构。



3.4.3 虚拟局域网

以太网存在的主要问题



广播风暴



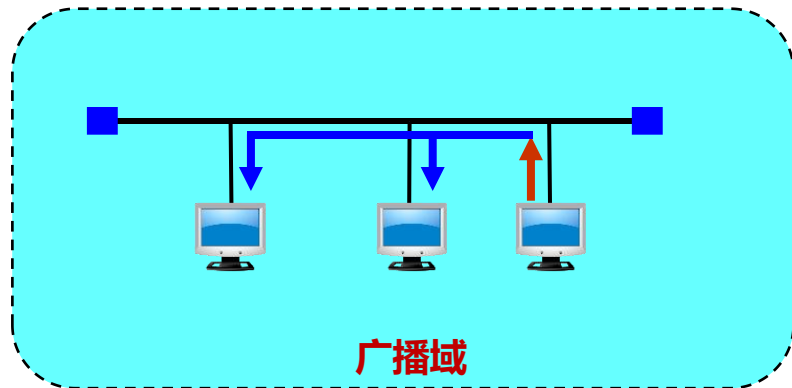
安全问题



管理困难 等

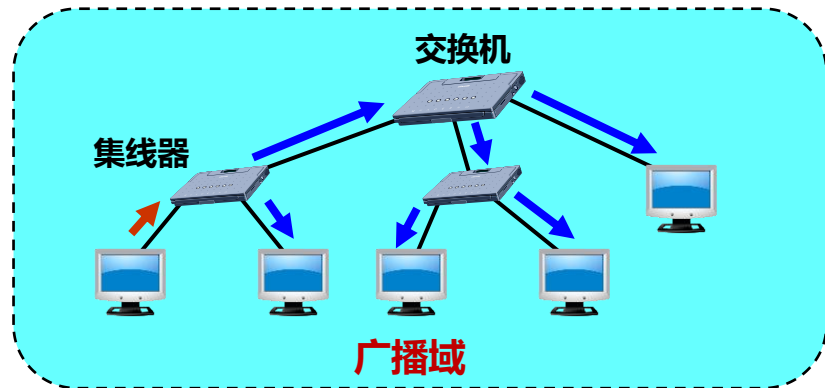
广播风暴

一个以太网是一个广播域



广播域

总线形以太网



广播域

使用交换机的星形以太网

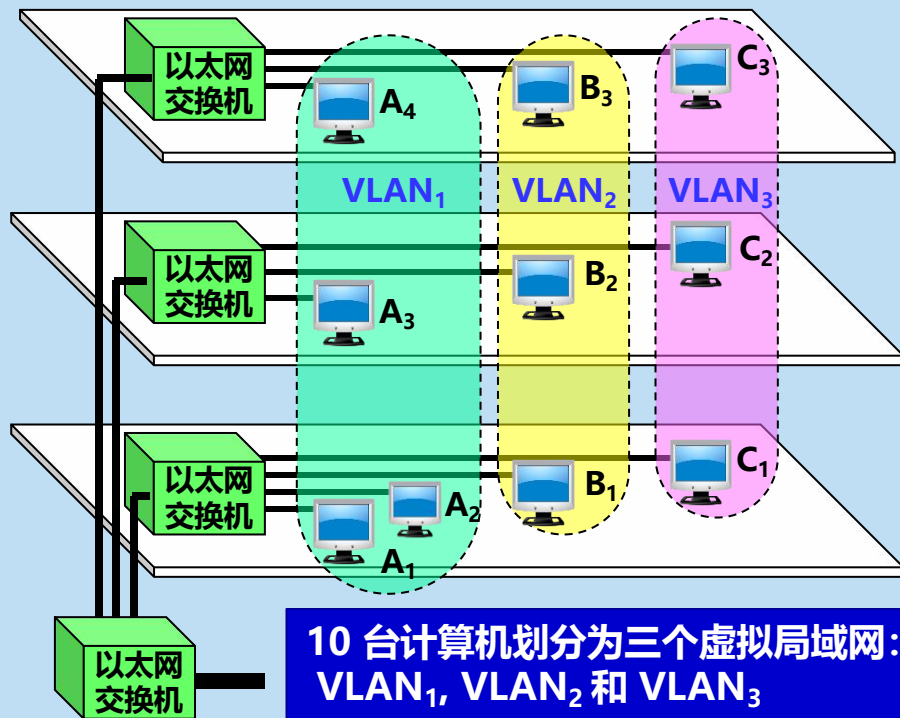
广播域 (broadcast domain)：指这样一部分网络，其中任何一台设备发出的广播通信都能被该部分网络中的所有其他设备所接收。

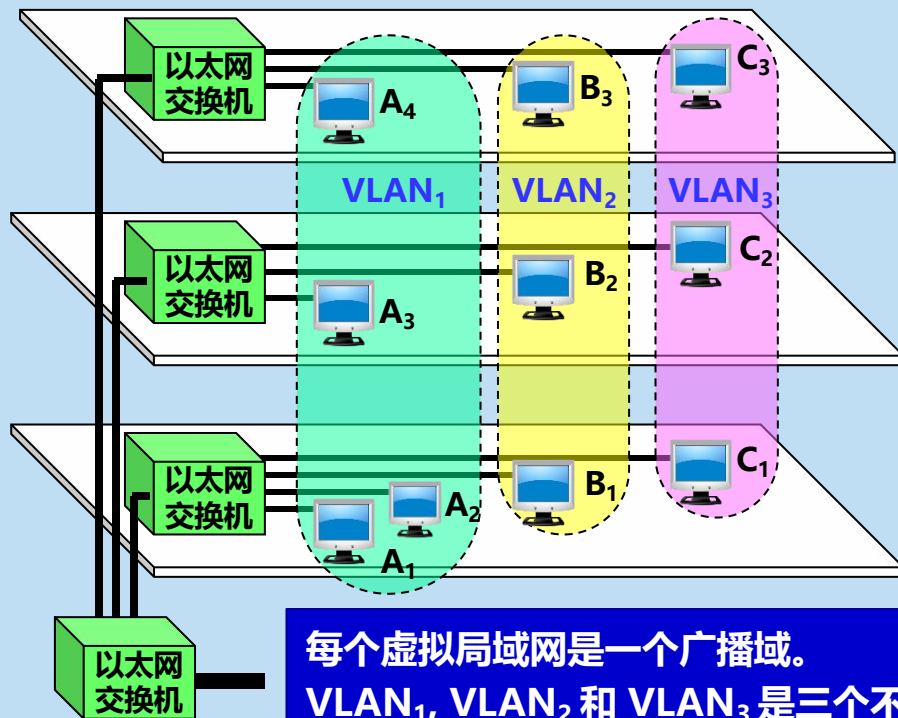
虚拟局域网 VLAN

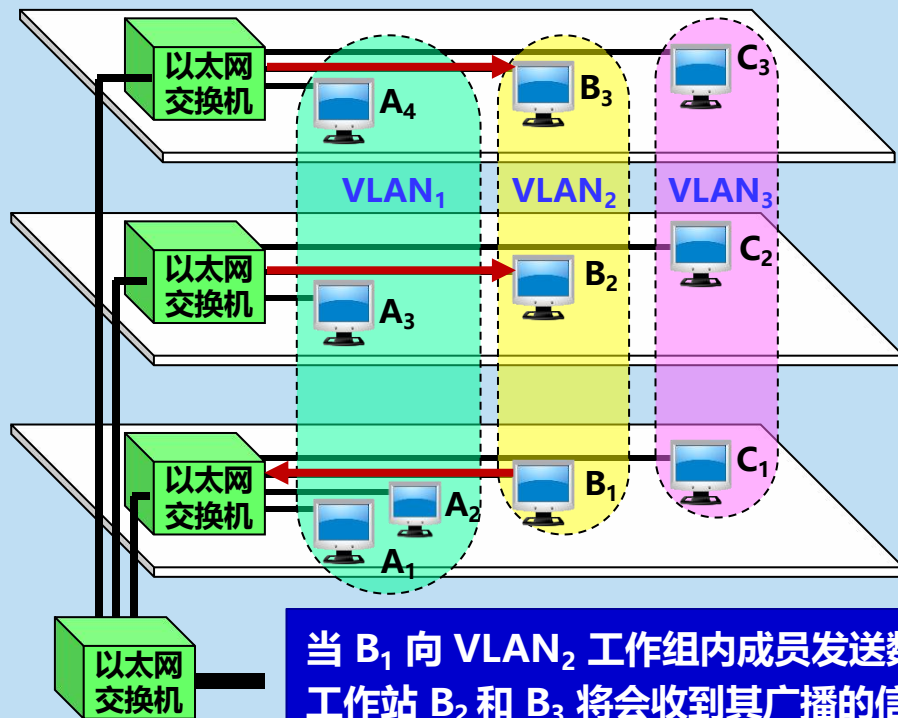
- 利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN (Virtual LAN)。
- IEEE 802.1Q 对虚拟局域网 VLAN 的定义：

虚拟局域网 VLAN 是由一些局域网网段构成的**与物理位置无关的逻辑组**，而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符，指明发送这个帧的计算机是属于哪一个 VLAN。

虚拟局域网其实只是局域网给用户提供的**一种服务**，**并不是一种新型局域网**。





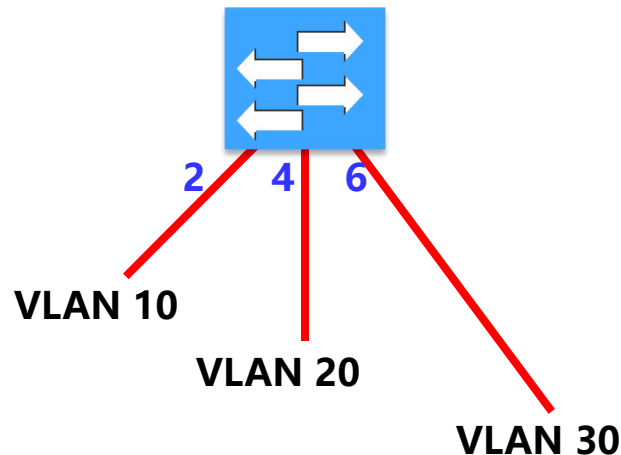


划分虚拟局域网的方法

- 基于交换机端口
- 基于计算机网卡的 MAC 地址
- 基于协议类型
- 基于 IP 子网地址
- 基于高层应用或服务

基于交换机端口的的方法

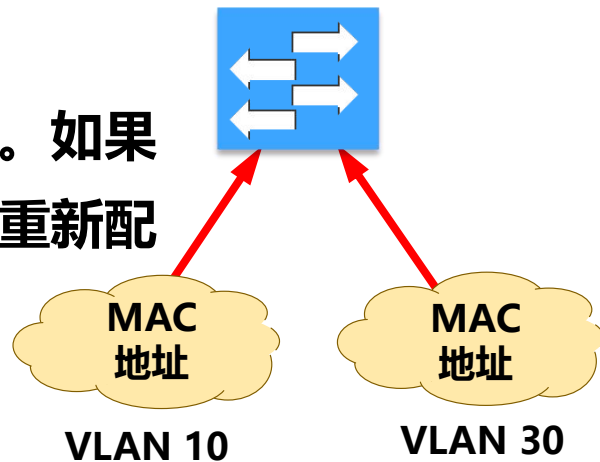
- 最简单、也是最常用的方法。
- 属于在第 1 层划分虚拟局域网的方法。
- **缺点：**不允许用户移动。



基于计算机网卡的 MAC 地址的方法

- 根据用户计算机的 **MAC 地址**划分虚拟局域网。
- 属于在第 2 层划分虚拟局域网的方法。
- 允许用户移动。
- **缺点：**需要输入和管理大量的 MAC 地址。如果用户的 MAC 地址改变了，则需要管理员重新配置VLAN。

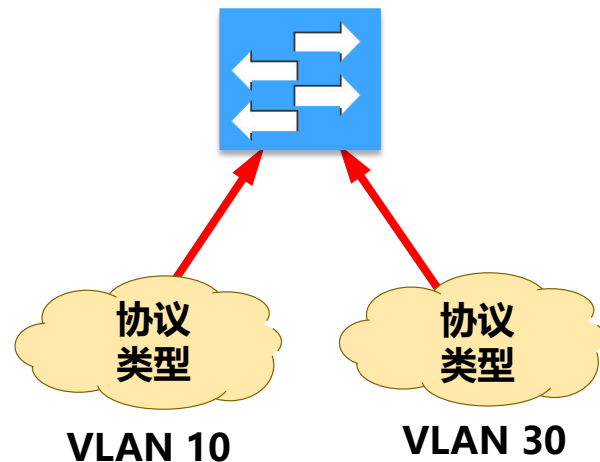
MAC 地址	VLAN
00-15-F5-CC-C8-14	10
C0-AB-D5-00-18-F4	10
C0-C5-18-DE-BC-E6	30



基于协议类型的方法

- 根据以太网帧的第三个字段 **“类型”** 确定该类型的协议属于哪一个虚拟局域网。
- 属于在第 2 层划分虚拟局域网的方法。

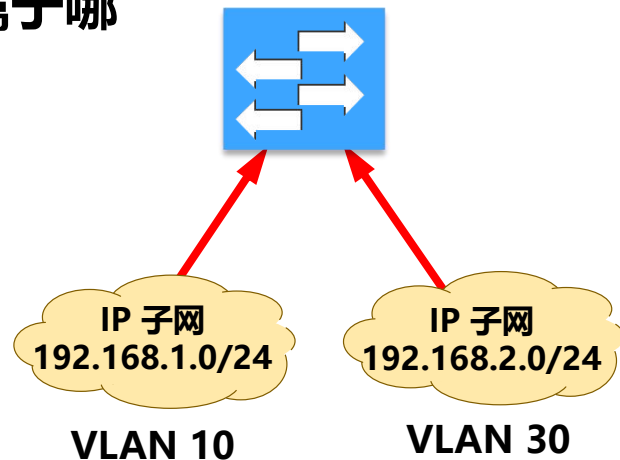
“类型”	VLAN
IP	10
IPX	30
.....	...



基于 IP 子网地址的方法

- 根据以太网帧的第三个字段 **“类型”** 和 IP 分组首部中的**源 IP 地址**字段确定该 IP 分组属于哪一个虚拟局域网。
- 属于在第 3 层划分虚拟局域网的方法。

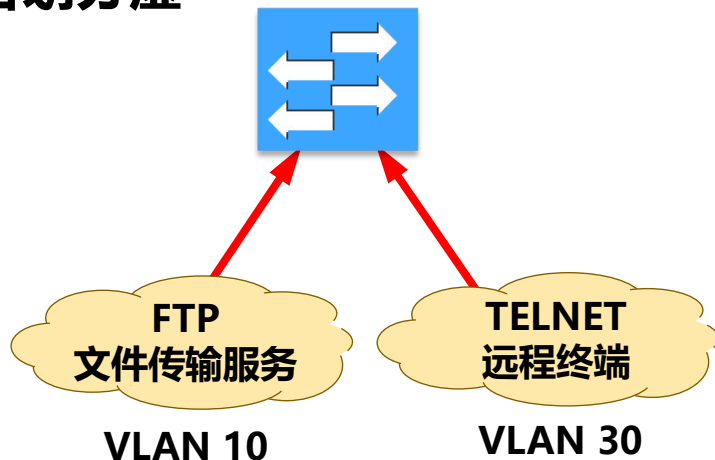
IP 子网	VLAN
192.168.1.0/24	10
192.168.2.0/24	30
.....	...



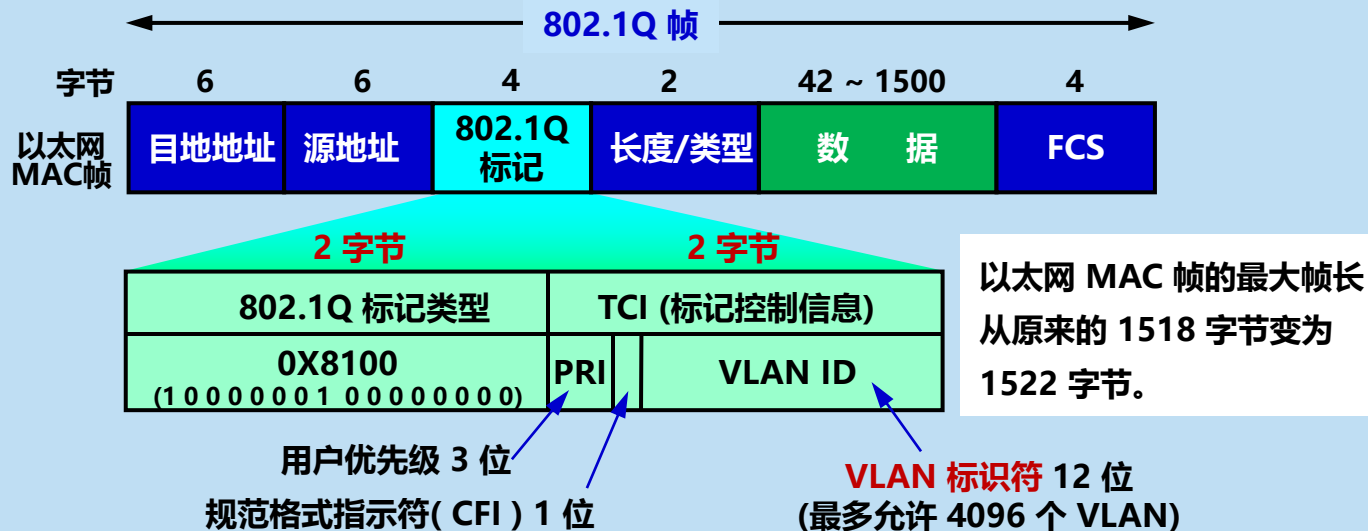
基于高层应用或服务的方法

- 根据高层应用或服务、或者它们的组合划分虚拟局域网。
- 更加灵活，但更加复杂。

应用	VLAN
FTP	10
TELNET	30
.....	...

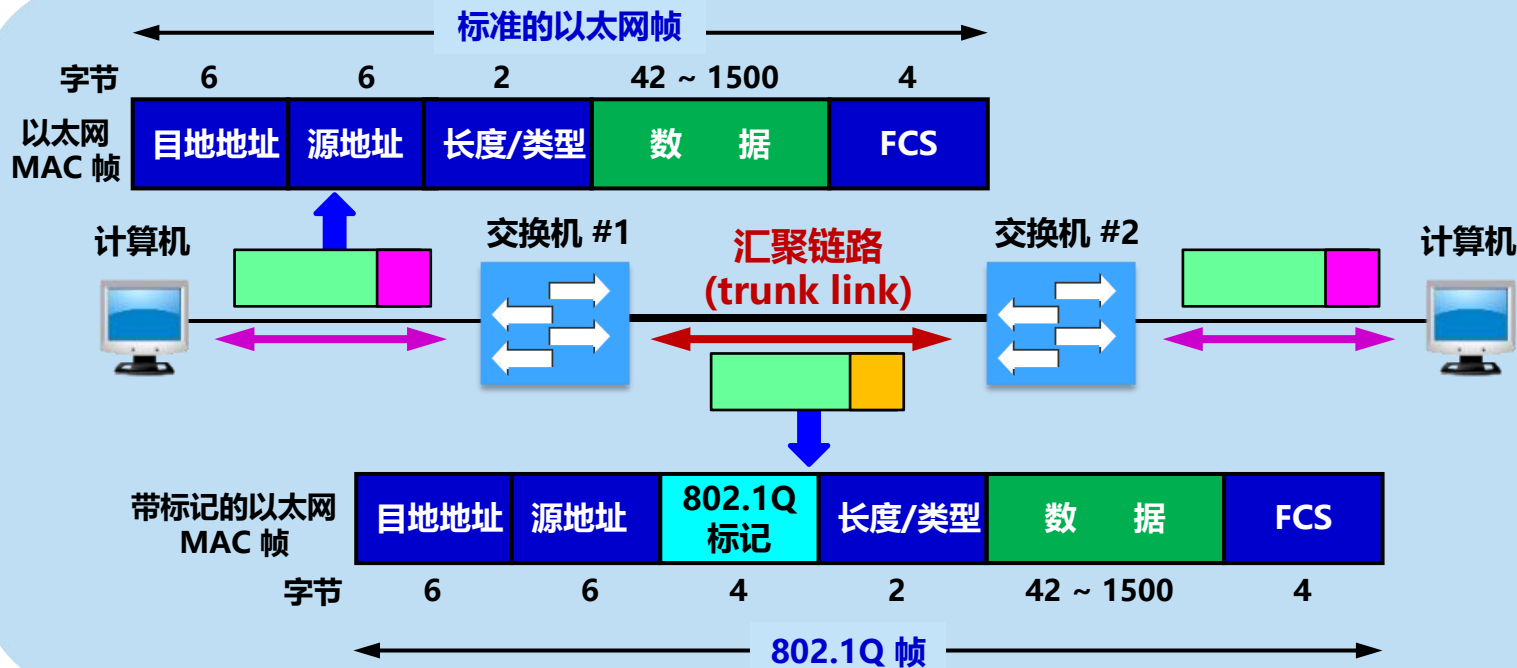


虚拟局域网使用的以太网帧格式



标准以太网帧插入 4 字节的 VLAN 标记后变成了 802.1Q 帧
(或带标记的以太网帧)

虚拟局域网使用的以太网帧格式



3.5

高速以太网

3.5.1

100BASE-T 以太网

3.5.2

吉比特以太网

3.5.3

10 吉比特以太网 (10GE) 和更快的以太网

3.5.4

使用以太网进行宽带接入

3.5.1 100BASE-T 以太网

- 又称为**快速以太网** (Fast Ethernet)。
- 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。
- 1995 定为正式标准: IEEE 802.3u。

100BASE-T 以太网的特点

- 可在**全双工**方式下工作而无冲突发生。
- 在全双工方式下工作时，**不使用 CSMA/CD 协议**。
- 使用 **IEEE 802.3 协议规定的 MAC 帧格式**。
- 保持最短帧长不变，但将一个网段的**最大电缆长度减小到 100 米**。
- 帧间时间间隔从原来的 $9.6\ \mu\text{s}$ 改为现在的 **$0.96\ \mu\text{s}$** 。

100 Mbit/s 以太网的 3 种不同的物理层标准

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	2 根光纤，发送和接收各用一根。

3.5.2 吉比特以太网

特点:

1. 允许在 1 Gbit/s 下以全双工和半双工 2 种方式工作。
2. 使用 IEEE 802.3 协议规定的 MAC 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。

吉比特以太网的物理层

- **使用 2 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 (Fiber Channel)。

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 μm)
1000BASE-LX	光缆	5000 m	单模光纤 (10 μm) 多模光纤 (50 和 62.5 μm)
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

半双工方式工作的吉比特以太网

- 半双工时采用 CSMA/CD，必须进行碰撞检测。
- 为保持 64 字节最小帧长度，以及 100 米的网段的最大长度，增加了 2 个功能：
 1. 载波延伸 (carrier extension)
 2. 分组突发 (packet bursting)

注意：全双工方式工作的吉比特以太网不使用载波延伸和分组突发。

载波延伸

将争用时间增大为 **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。



分组突发

当很多短帧要发送时，第 1 个短帧采用载波延伸方法进行填充，随后的一些短帧则可一个接一个地发送，只需留有必要的帧间最小间隔即可。这样就形成可一串分组的突发，直到达到 1500 字节或稍多一些为止。

分组突发



3.5.3 10 吉比特以太网 (10GE) 和更快的以太网

- 10 吉比特以太网 (10GE) 主要特点:
 1. 万兆比特。
 2. 与 10、100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 以太网的帧格式完全相同。
 3. 保留了 IEEE 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长。
 4. 只使用光纤作为传输媒体。
 5. 只工作在全双工方式，没有争用问题，不使用 CSMA/CD 协议。

10GE 以太网的物理层

10GE 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 μm)
10GBASE-LR	光缆	10 km	单模光纤 (1.3 μm)
10GBASE-ER	光缆	40 km	单模光纤 (1.5 μm)
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

40GE/100GE 以太网的物理层

40GE/10GE 的物理层标准

物理层	40GE	100GE
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-ER	100GBASE-ER4

端到端的以太网传输

- 以太网的工作范围已经扩大到城域网和广域网，实现了端到端的以太网传输。
- 好处：
 1. 技术成熟；
 2. 互操作性很好；
 3. 在广域网中使用以太网时价格便宜；
 4. 采用统一的以太网帧格式，简化了操作和管理。

3.5.4 使用以太网进行宽带接入

- IEEE 在 2001 年初成立了 802.3 EFM 工作组，专门研究高速以太网的宽带接入技术问题。
- 以太网宽带接入具有以下**特点**：
 1. 可以提供**双向**的宽带通信。
 2. 可以根据用户对带宽的需求灵活地进行**带宽升级**。
 3. 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。
 4. 但**不支持**用户身份鉴别。

PPPoE

- **PPPoE** (PPP over Ethernet) : 在以太网上运行 PPP。
- 将 PPP 帧封装到以太网中来传输。
- 现在的光纤宽带接入 FTTx 都要使用 PPPoE 的方式进行接入。
- 利用 ADSL 进行宽带上网时, 从用户个人电脑到家中的 ADSL 调制解调器之间的连接也使用 RJ-45 和 5 类线, 也使用 PPPoE。