

第 3 章 数据链路层



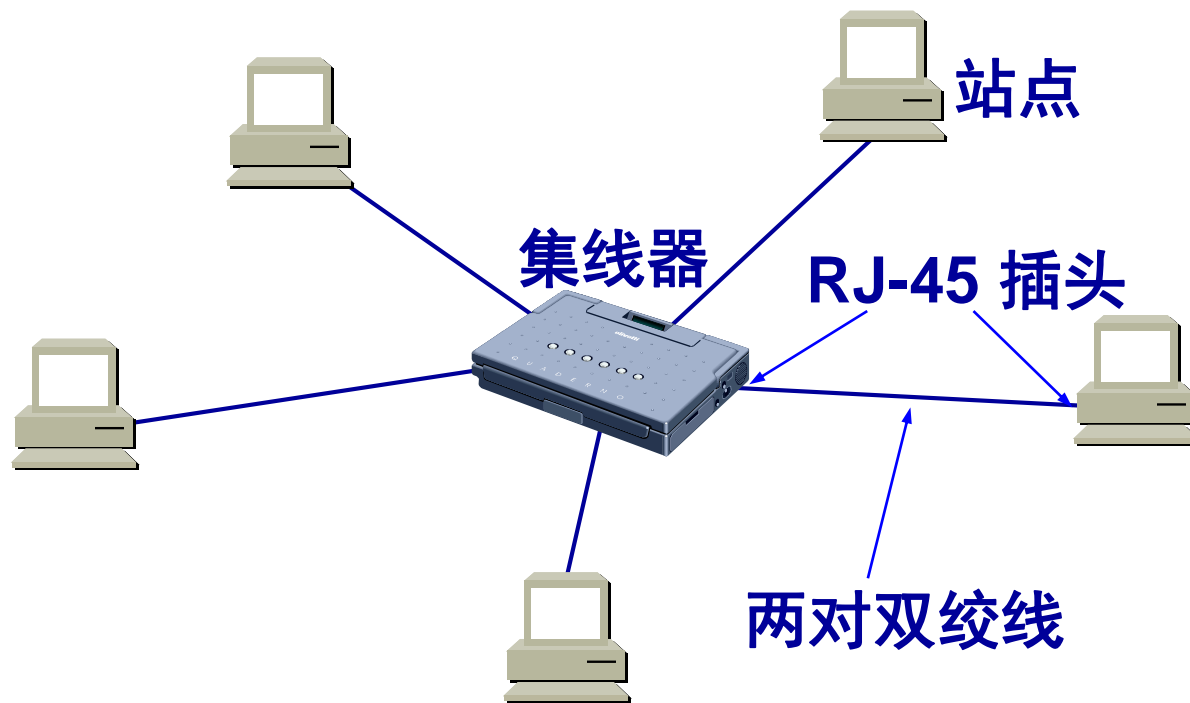
下

3.3.3 使用集线器的星形拓扑



- 传统以太网最初是使用粗同轴电缆，后来演进到使用比较便宜的细同轴电缆，最后发展为使用更便宜和更灵活的双绞线。
- 采用双绞线的以太网采用星形拓扑，在星形的中心则增加了一种可靠性非常高的设备，叫做**集线器** (hub)。

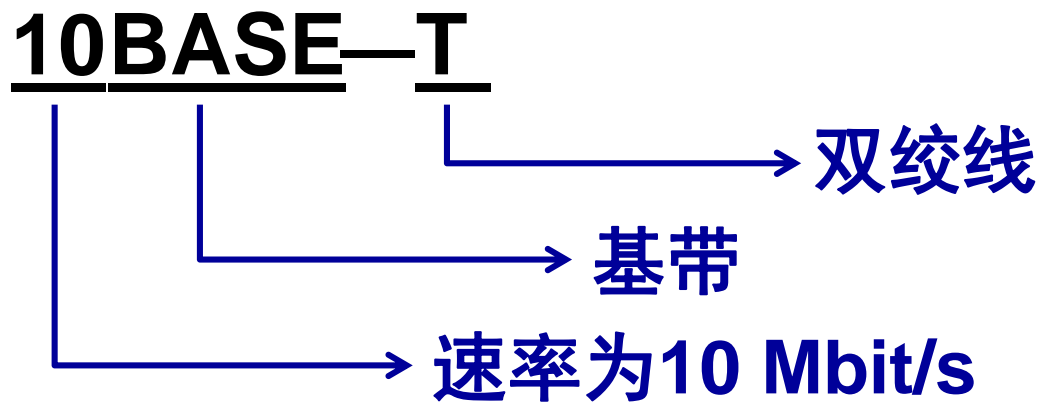
使用集线器的双绞线以太网



星形以太网 10BASE-T



- 1990 年，IEEE 制定出星形以太网 10BASE-T 的标准 802.3i。

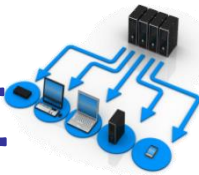


星形以太网 10BASE-T



- 使用无屏蔽双绞线，采用星形拓扑。
- 每个站需要用两对双绞线，分别用于发送和接收。
- 双绞线的两端使用 RJ-45 插头。
- 集线器使用了大规模集成电路芯片，因此集线器的可靠性提高。
- 10BASE-T 的通信距离稍短，每个站到集线器的距离不超过 100 m。

10BASE-T 以太网在局域网中的统治地位



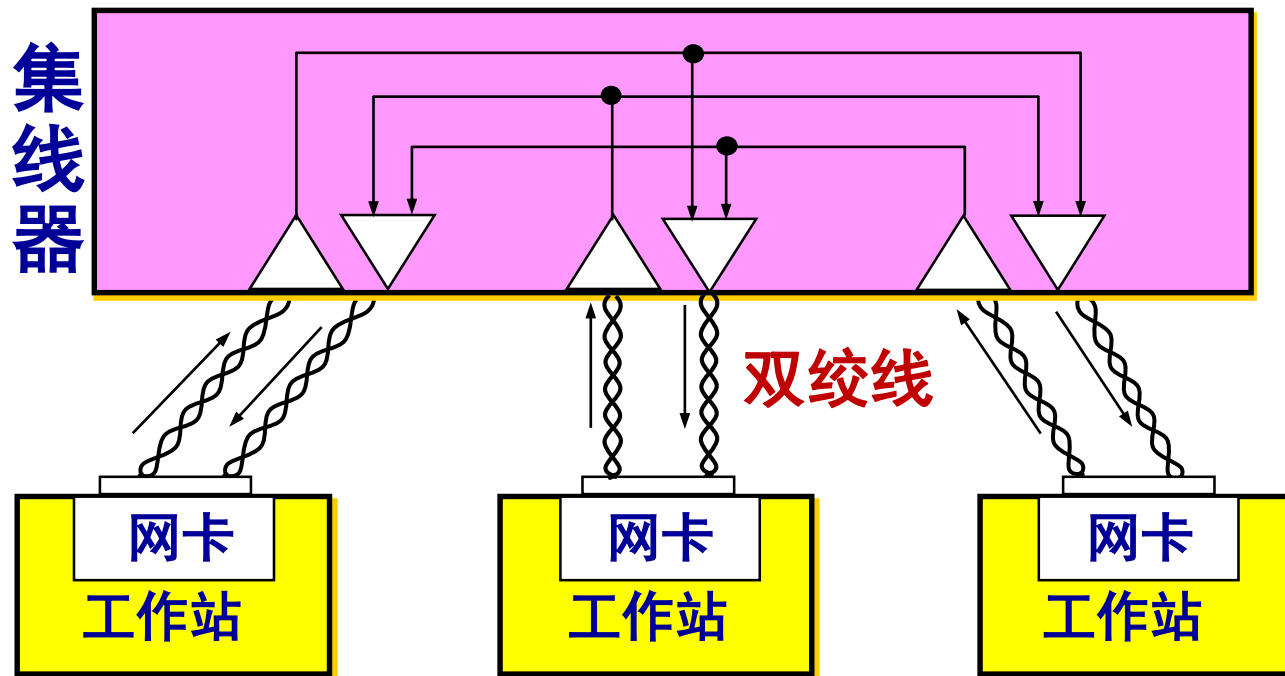
- 这种 10 Mbit/s 速率的无屏蔽双绞线星形网的出现，既降低了成本，又提高了可靠性。具有很高的性价比。
- 10BASE-T 双绞线以太网的出现，是局域网发展史上的一个非常重要的里程碑，从此以太网的拓扑就从总线形变为更加方便的星形网络，而以太网也就在局域网中占据了统治地位。

集线器的一些特点



- (1) 集线器是使用电子器件来模拟实际电缆线的工作，因此整个系统仍然像一个传统的以太网那样运行。
- (2) 使用集线器的以太网在逻辑上仍是一个总线网，各工作站使用的还是 CSMA/CD 协议，并共享逻辑上的总线。
- (3) 集线器很像一个多接口的转发器，工作在物理层。
- (4) 集线器采用了专门的芯片，进行自适应串音回波抵消，减少了近端串音。

具有三个接口的集线器



3.3.4 以太网的信道利用率

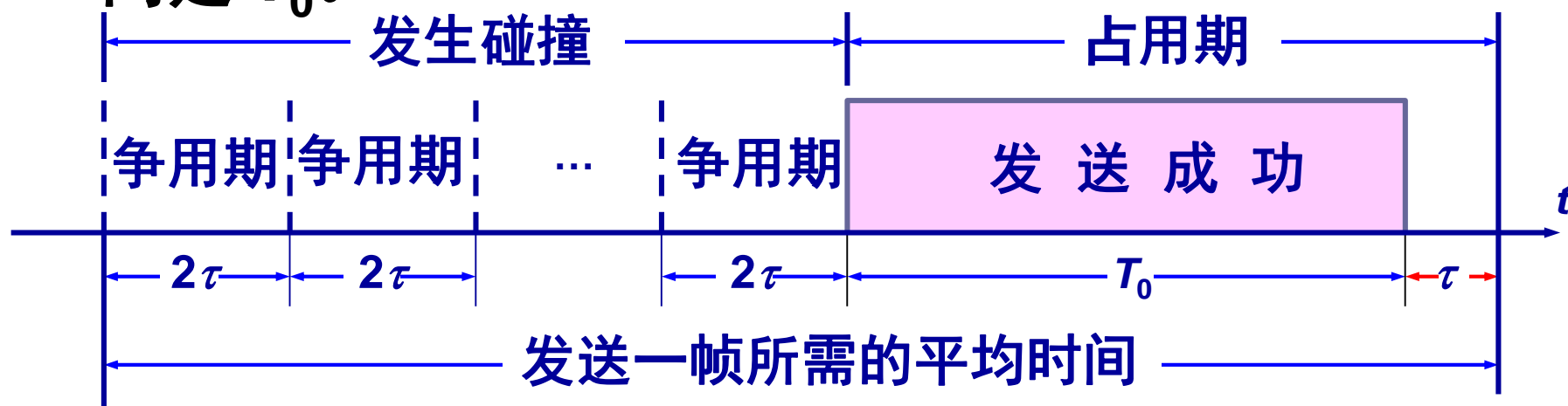


- 多个站在以太网上同时工作就可能会发生碰撞。
- 当发生碰撞时，信道资源实际上是被浪费了。因此，以太网总的信道利用率并不能达到100%。
- 假设 τ 是以太网单程端到端传播时延。则争用期长度为 2τ ，即端到端传播时延的两倍。
- 设帧长为 L (bit)，数据发送速率为 C (bit/s)，则帧的发送时间为 $T_0 = L/C$ (s)。

以太网信道被占用的情况



- 一个站在发送帧时出现了碰撞。经过一个争用期 2τ 后，可能又出现了碰撞。这样经过若干个争用期后，一个站发送成功了。假定发送帧需要的时间是 T_0 。



以太网信道被占用的情况



- 注意到，成功发送一个帧需要占用信道的时间是 $T_0 + \tau$ ，比这个帧的发送时间要多一个单程端到端时延 τ 。
- 这是因为当一个站发送完最后一个比特时，这个比特还要在以太网上传播。
- 在最极端的情况下，发送站在传输媒体的一端，而比特在媒体上传输到另一端所需的时间是 τ 。

参数 α 与利用率



- 要提高以太网的信道利用率，就必须减小 τ 与 T_0 之比。
- 在以太网中定义了参数 α ，它是以太网单程端到端时延 τ 与帧的发送时间 T_0 之比：

$$\alpha = \tau / T_0$$

- $\alpha \rightarrow 0$ ，表示一发生碰撞就立即可以检测出来，并立即停止发送，因而信道利用率很高。
- α 越大，表明争用期所占的比例增大，每发生一次碰撞就浪费许多信道资源，使得信道利用率明显降低。

对以太网参数 α 的要求



- 为提高利用率，以太网的参数 α 的值应当尽可能小些。

$$\alpha = \frac{D_{\text{距离}} \cdot C_{\text{发送速率}}}{v * L_{\text{帧长}}}$$

- 对以太网参数 α 的要求是：
 - 当数据率一定时，以太网的连线的距离受到限制，否则 τ 的数值会太大。（ D 小， α 小）
 - 以太网的帧长不能太短，否则 T_0 的值会太小，使 α 值太大。（ L 要大一些， α 小）

信道利用率的最大值 S_{\max}



- 在理想化的情况下，以太网上的各站发送数据都不会产生碰撞（这显然已经不是 CSMA/CD，而是需要使用一种特殊的调度方法），即总线一旦空闲就有某一个站立即发送数据。
- 发送一帧占用线路的时间是 $T_0 + \tau$ ，而帧本身的发送时间是 T_0 。于是我们可计算出理想情况下的极限信道利用率 S_{\max} 为

$$S_{\max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a}$$

- 只有当参数 a 远小于 1 才能得到尽可能高的极限信道利用率。
- 据统计，当以太网的利用率达到 30% 时就已经处于重载的情况。很多的网络容量被网上的碰撞消耗掉了。

判断题



- 1. 数据发送速率不变，要保证原有的信道利用率，如果最大传输距离变短，需要增加最短帧的长度（ ）
- 2. 最大距离不变，数据发送速率提高，需要增加最短帧的长度（ ）

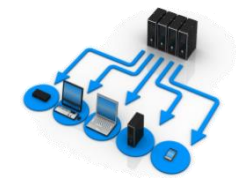
3.3.5 以太网的 MAC 层



重点介绍：

- **1. MAC 层的硬件地址**
- **2. MAC 帧的格式**

1. MAC 层的硬件地址

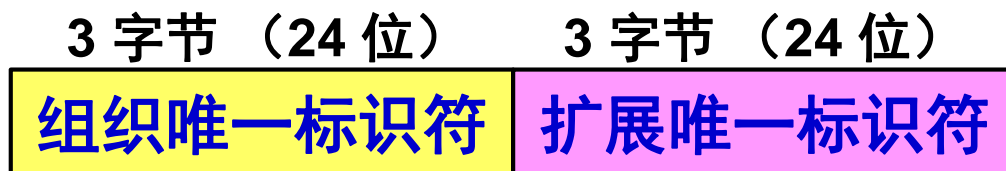


- 在局域网中，**硬件地址**又称为**物理地址**，或 **MAC 地址**。
- 802 标准所说的“地址”严格地讲应当是每一个站的“**名字**”或**标识符**。

48 位的 MAC 地址



- IEEE 802 标准规定 MAC 地址字段可采用 6 字节 (48位) 或 2 字节 (16 位) 这两种中的一种。
- IEEE 的注册管理机构 RA 负责向厂家分配地址字段 6 个字节中的前三个字节 (即**高位 24 位**)，称为**组织唯一标识符**。
- 地址字段 6 个字节中的后三个字节 (即**低位 24 位**) 由厂家自行指派，称为**扩展唯一标识符**，**必须保证生产出的适配器没有重复地址**。



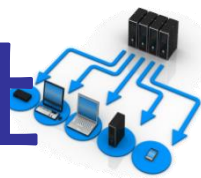
48 位的 MAC 地
址

48 位的 MAC 地址

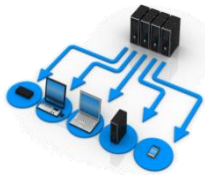


- 一个地址块可以生成 2^{24} 个不同的地址。这种 48 位地址称为 MAC-48，它的通用名称是 EUI-48。
- 生产适配器时，6 字节的 MAC 地址已被固化在适配器的 ROM，因此，MAC 地址也叫做**硬件地址** (hardware address)或**物理地址**。 “
- MAC地址” 实际上就是适配器地址或适配器标识符.
- 如 一台主机网卡的mac地址为**00-3e-01-23-4e-3c**

单站地址，组地址，广播地址



- IEEE 规定**目的地址字段**的第一字节的最低位为 I/G 位。I/G 表示 Individual / Group。
- 当 I/G 位 = 0 时，地址字段表示一个**单站地址**。
- 当 I/G 位 = 1 时，表示**组地址**，用来进行多播（以前曾译为组播）。此时，IEEE 只分配地址字段前三个字节中的 23 位。
- 所有 48 位都为 1 时，为广播地址。只能作为目的地址使用。



目的MAC地址

■ 目的地址 “发往本站的帧” 包括以下三种帧：

■ 单播 (unicast) 帧（一对一）

➤ 例如目的地址 第一个字节

0000000**0**

■ 广播 (broadcast) 帧（一对全体）

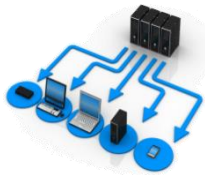
➤ 48位均为1

■ 多播 (multicast) 帧（一对多）

➤ 例如目的地址 第一个字节

0000000**1**

适配器检查 MAC 地址



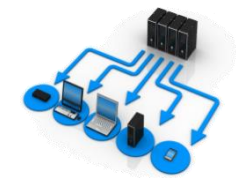
- 适配器从网络上每收到一个 MAC 帧就首先用硬件检查 MAC 帧中的 MAC 地址。
 - 如果是发往本站的帧则收下，然后再进行其他的处理。
 - 否则就将此帧丢弃，不再进行其他的处理。

适配器检查 MAC 地址



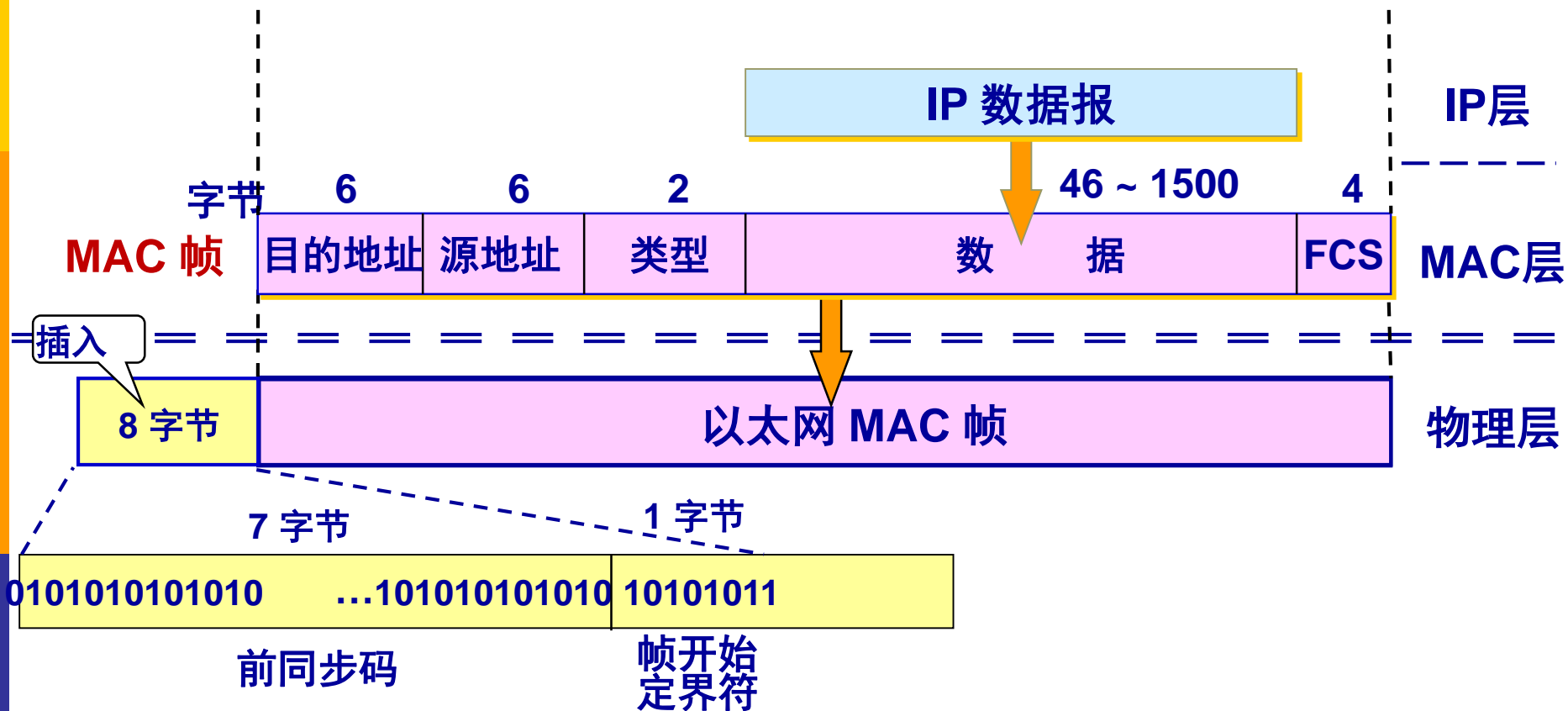
- 所有的适配器都至少能够识别前两种帧，即能够识别单播地址和广播地址。
- 有的适配器可用编程方法识别多播地址。
- 只有目的地址才能使用广播地址和多播地址。
- 以混杂方式 (promiscuous mode) 工作的以太网适配器只要“听到”有帧在以太网上传输就都接收下来。

2. MAC 帧的格式

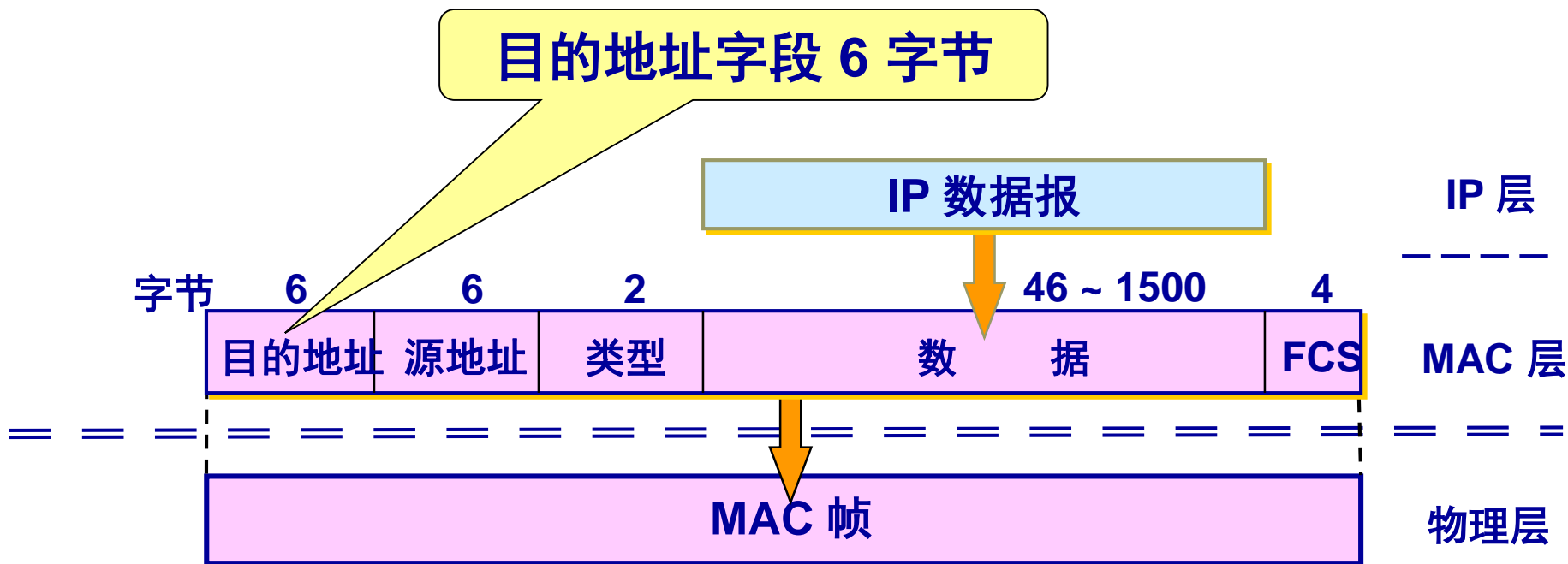


- 常用的以太网 MAC 帧格式有两种标准：
 - DIX Ethernet V2 标准
 - IEEE 的 802.3 标准
- 最常用的 MAC 帧是以太网 V2 的格式。

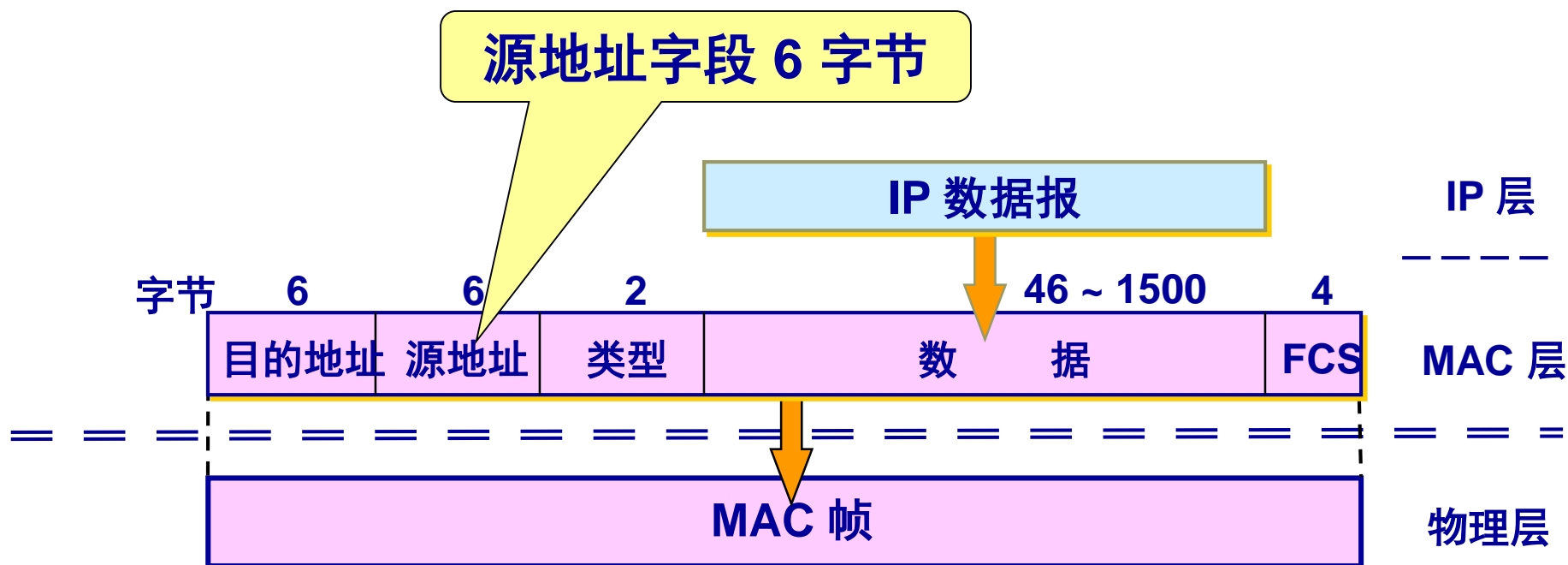
以太网V2的 MAC 帧格式



以太网 V2 的 MAC 帧格式



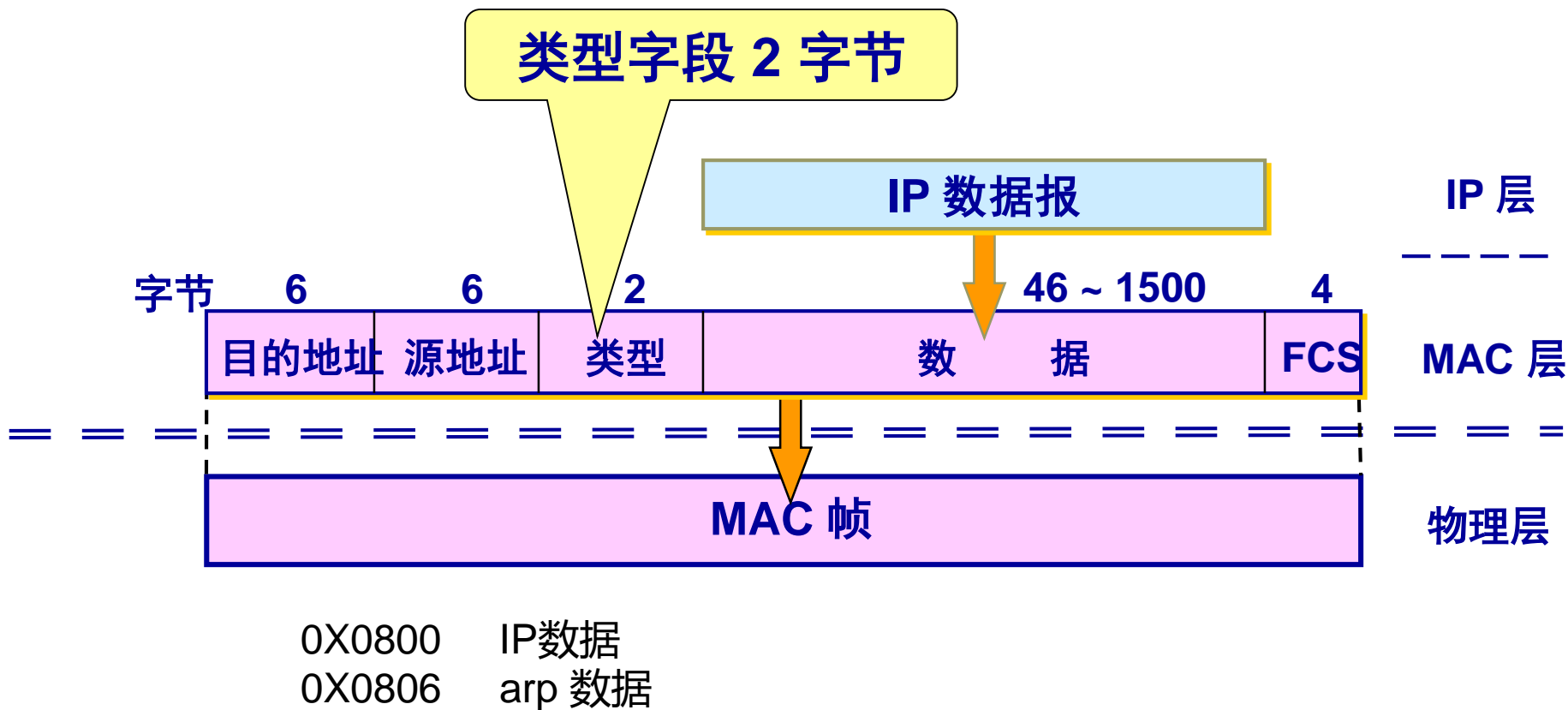
以太网 V2 的 MAC 帧格式



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。

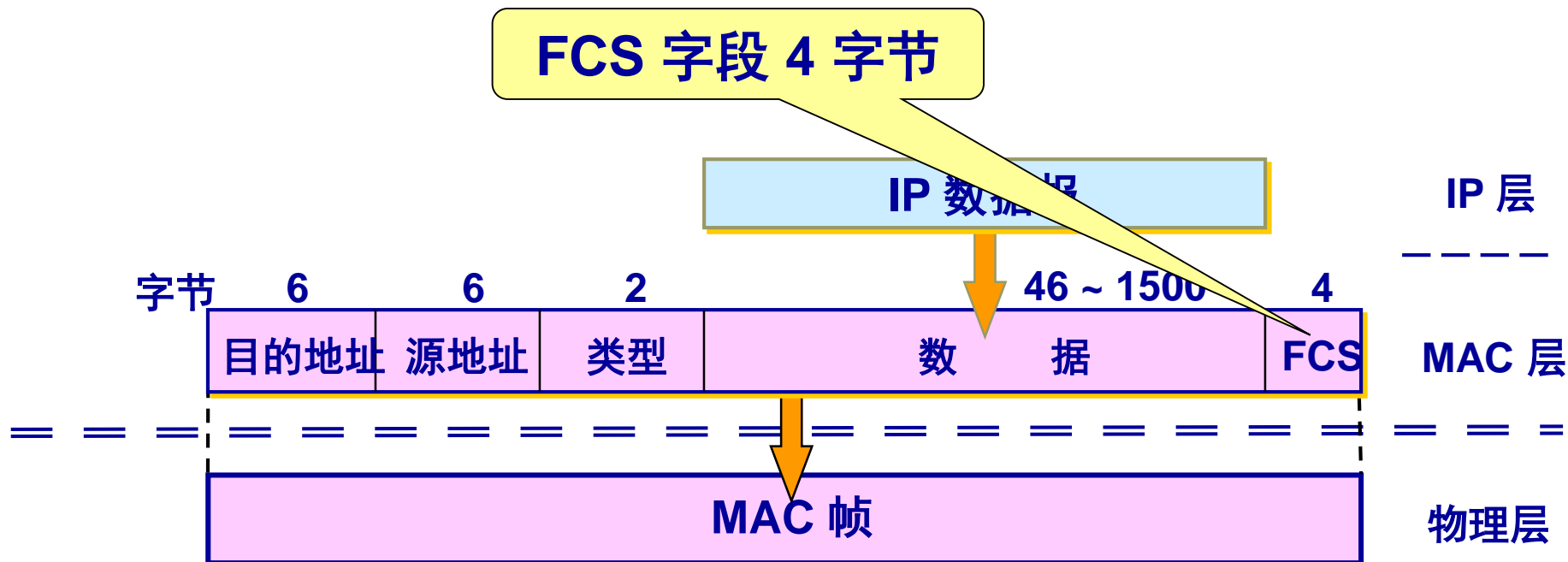


以太网 V2 的 MAC 帧格式



当传输媒体的误码率为 1×10^{-8} 时，
MAC 子层可使未检测到的差错小于 1×10^{-14} 。

FCS 字段 4 字节

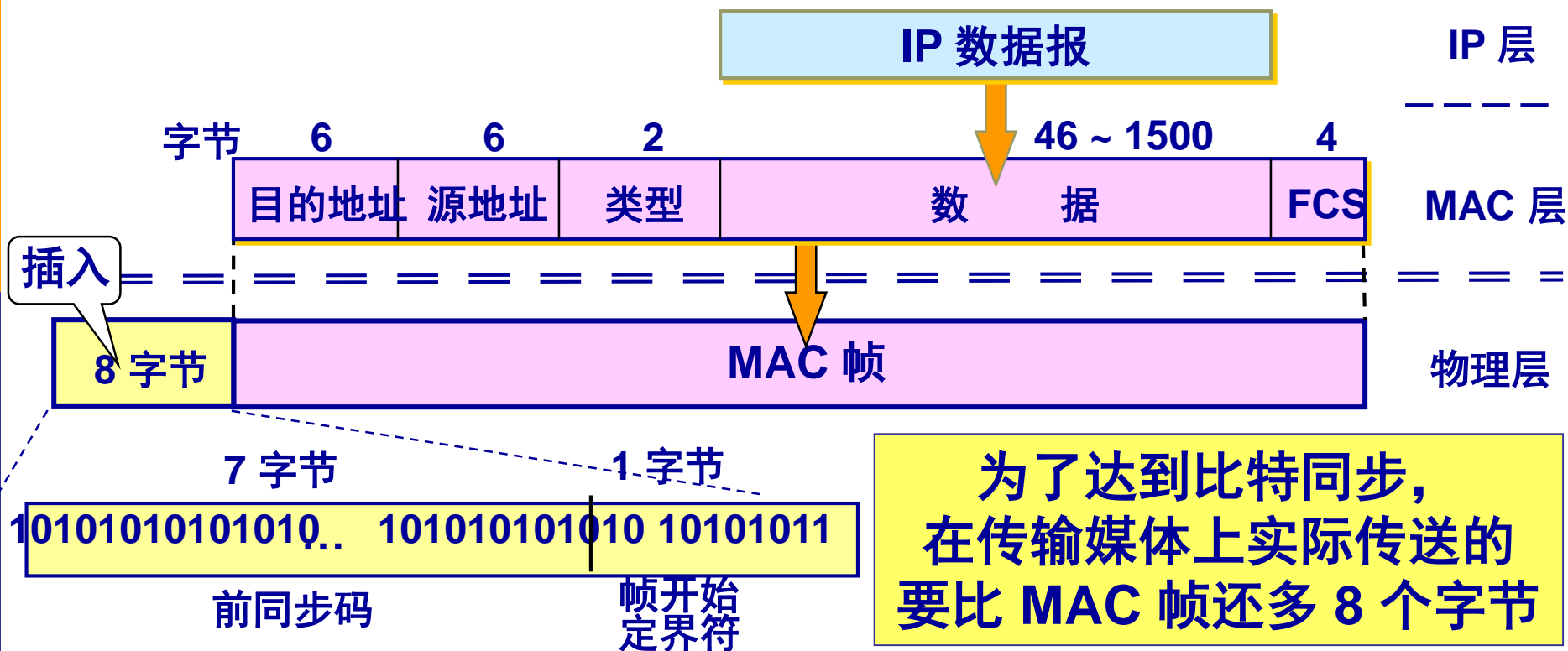


当数据字段的长度小于 46 字节时，
应在数据字段的后面加入整数字节的填充字段，
以保证以太网的 MAC 帧长不小于 64 字节。

以太网 V2 的 MAC 帧格式



在帧的前面插入（硬件生成）的 8 字节中，第一个字段共 7 个字节，是前同步码，用来迅速实现 MAC 帧的比特同步。第二个字段 1 个字节是帧开始定界符，表示后面的信息就是 MAC 帧。



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。
- （有效的 MAC 帧长度为 64 ~ 1518 字节之间）。

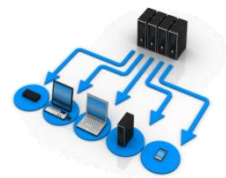
对于检查出的无效 MAC 帧就简单地丢弃。以太网不负责重传丢弃的帧。

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

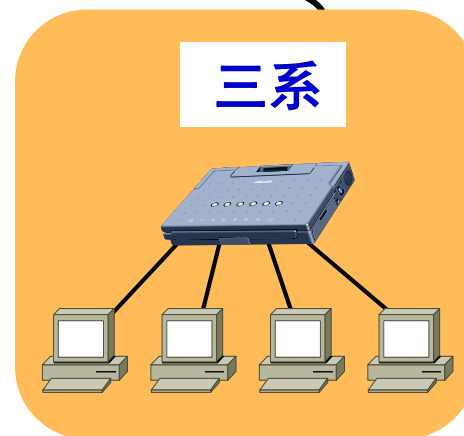
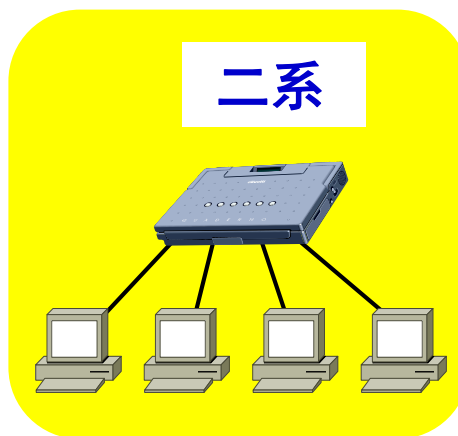
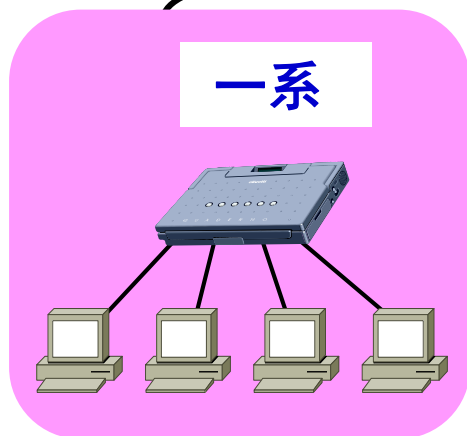
3.4.1 在物理层扩展以太网



■ 使用集线器扩展

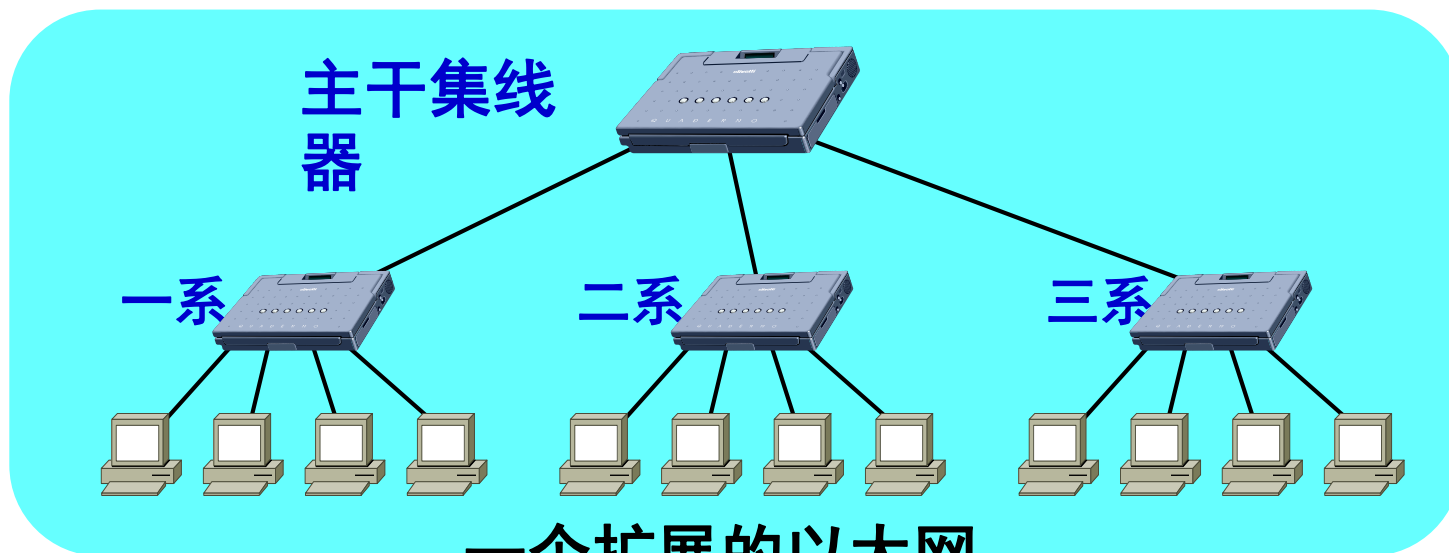
- 使用多个集线器可连成更大的、多级星形结构的以太网。
- 共享式以太网
- 例如，一个学院的三个系各有一个 10BASE-T 以太网，可通过一个主干集线器把各系的以太网连接起来，成为一个更大的以太网。

三个独立的碰撞域



三个独立的以太网

一个更大的碰撞域



一个扩展的以太网

冲突域、广播域



- **冲突域（碰撞域）：**网络中一些站点发出的帧会与其他站点发出的帧产生冲突的那部分网络。
- **广播域** 一个网卡发出一个广播消息，能收到这个广播消息的所有网卡的集合。
-
- **一般** 一个网段就是一个冲突域， 一个局域网就是一个广播域。

用集线器扩展以太网



■ 优点

- 使原来属于不同碰撞域的以太网上的计算机能够进行跨碰撞域的通信。
- 扩大了以太网覆盖的地理范围。

■ 缺点

- 碰撞域增大了，但总的吞吐量并未提高。
- 如果不同的碰撞域使用不同的数据率，那么就不能用集线器将它们互连起来。

3.4.2 在数据链路层扩展以太网

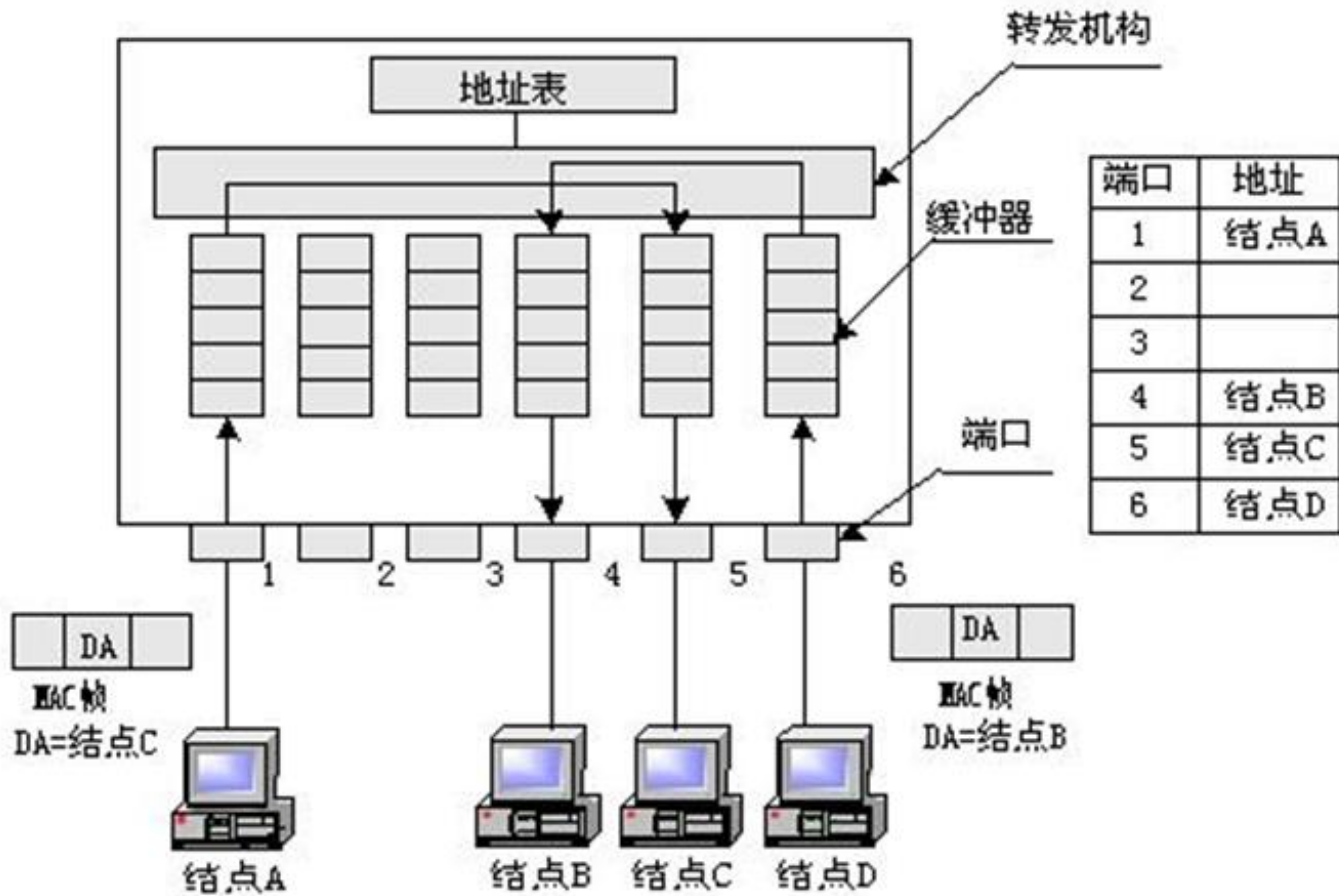


- 扩展以太网更常用的方法是在数据链路层进行。
- 早期使用**网桥**，现在使用以太网**交换机**。
 - **网桥**工作在数据链路层。
 - 它根据 **MAC 帧**的目的地址对收到的帧进行转发和过滤。
- 1990 年问世的**交换式集线器 (switching hub)** 可明显地提高以太网的性能。
- **交换式集线器**常称为**以太网交换机 (switch)** 或**第二层交换机 (L2 switch)**，强调这种交换机工作在数据链路层。

交换机



交换机内部结构



1. 以太网交换机的特点



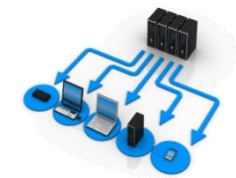
- 以太网交换机实质上就是一个**多接口的网桥**。
 - 通常都有十几个或更多的接口。
- 每个接口都直接与一个单台主机或另一个以太网交换机相连，并且一般都**工作在全双工方式**。
- 以太网交换机**具有并行性**。
 - 能同时连通多对接口，使多对主机能同时通信。
- **相互通信的主机都是独占传输媒体，无碰撞地传输数据。**

1. 以太网交换机的特点

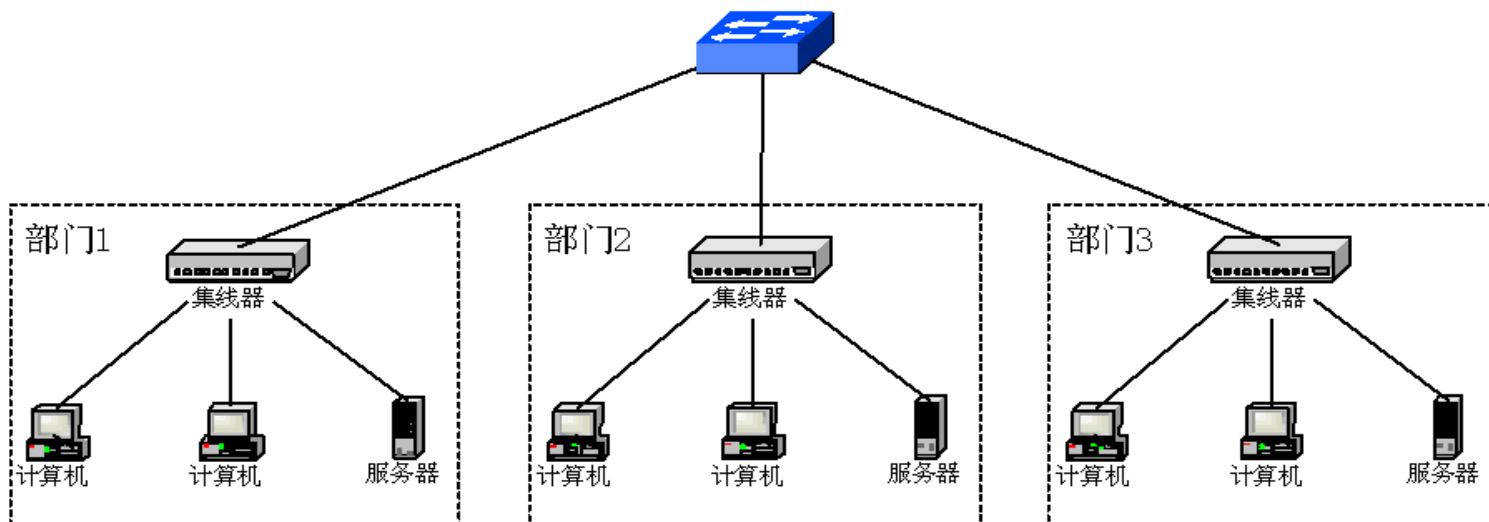


- 以太网交换机的**接口有存储器**，能在输出端口繁忙时把到来的帧进行缓存。
- 以太网交换机是一种**即插即用**设备，其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**）是通过**自学习算法**自动地逐渐建立起来的。
- 以太网交换机使用了**专用的交换结构芯片**，用硬件转发，其转发速率要比使用软件转发的网桥快很多。

以太网交换机的优点



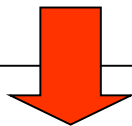
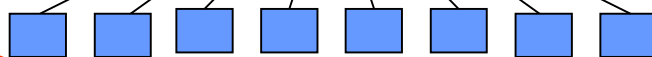
- 1. 用户独享带宽，增加了总容量。
 - 对于普通 10 Mbit/s 的共享式以太网，若共有 N 个用户，则每个用户占有的平均带宽只有总带宽 (10 Mbit/s) 的 N 分之一。
 - 使用以太网交换机时，虽然在每个接口到主机的带宽还是 10 Mbit/s，但由于一个用户在通信时是独占，因此对于拥有 N 个接口的交换机的总容量为 $N \times 10$ Mbit/s。



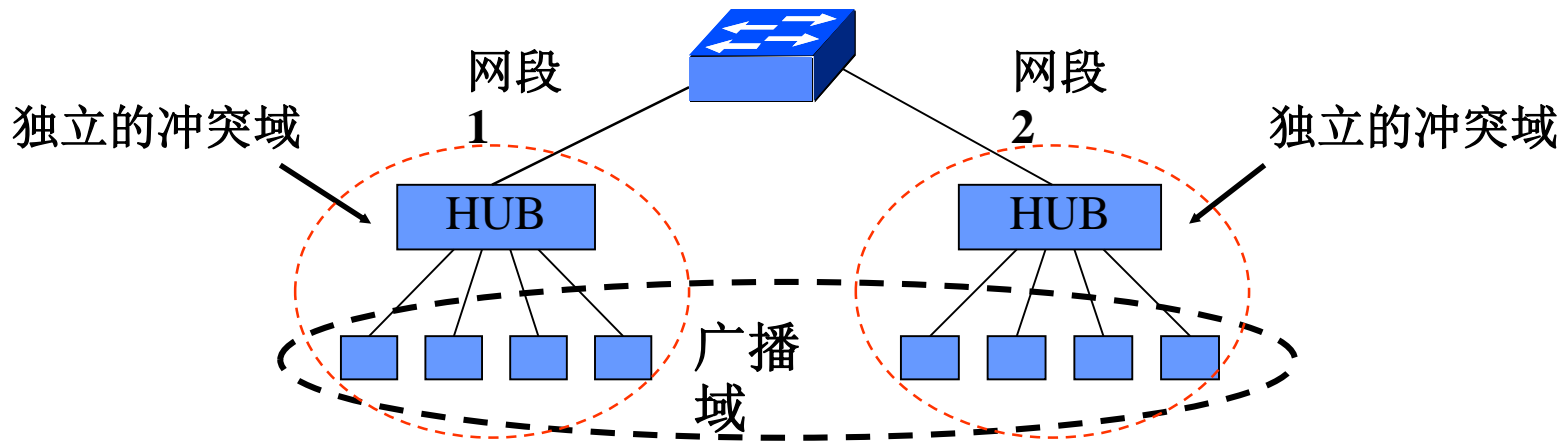


冲突域/广播域

HUB

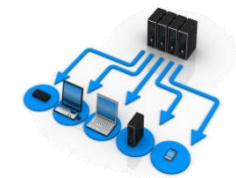


网桥或网络交换机



❖ 交换机只能分隔冲突域，但不能分隔广播域

以太网交换机的优点



- 2. 从共享总线以太网转到交换式以太网时，所有接入设备的软件和硬件、适配器等都不需要做任何改动。
- 3. 以太网交换机一般都具有多种速率的接口，方便了各种不同情况的用户。

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后再进行处理。

■ 直通 (cut-through) 方式

- 接收数据帧的同时就立即按数据帧的目的 MAC 地址决定该帧的转发接口，因而提高了帧的转发速度。
- 缺点是它不检查差错就直接将帧转发出去，因此有可能也将一些无效帧转发给其他的站。

在某些情况下，仍需要采用基于软件的存储转发方式进行交换，例如，当需要进行线路速率匹配、协议转换或差错检测时。

2. 以太网交换机的自学习功能



- 以太网交换机运行自学习算法自动维护**交换表**。
- 开始时，以太网交换机里面的交换表是空的。



交换表一开始是空的

按照以下自学习算法 处理收到的帧和建立交换表



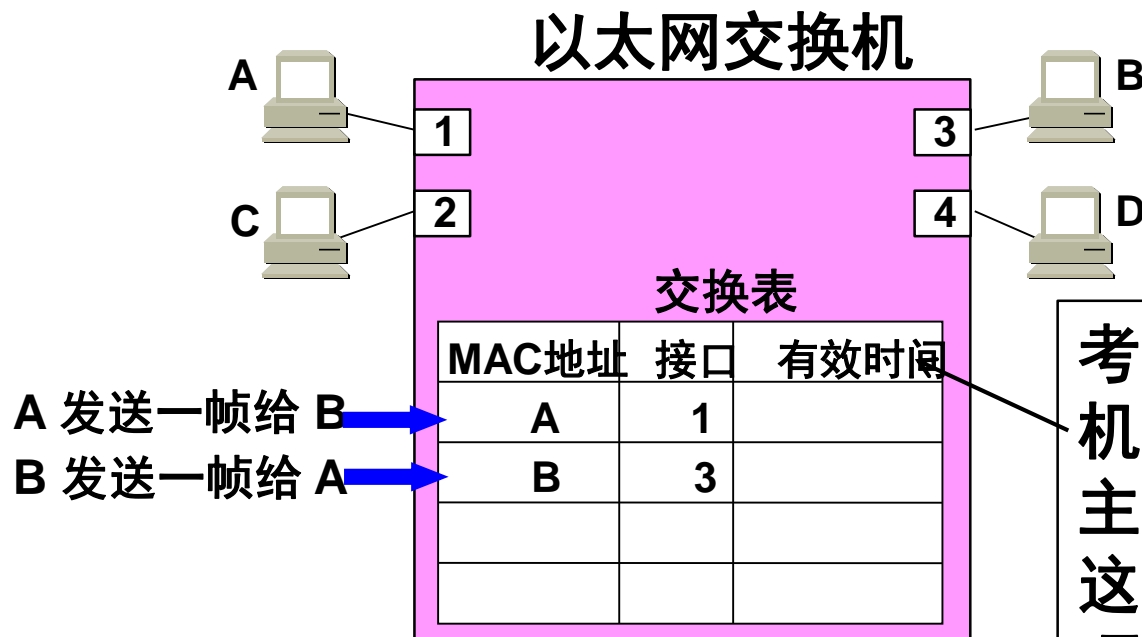
- A 先向 B 发送一帧，从接口 1 进入到交换机。
- 交换机收到帧后，**先查找交换表**，**没有查到**应从哪个接口转发这个帧。
- 交换机把这个帧的**源地址 A** 和**接口 1** 写入交换表中，并向除接口1以外的所有的接口**广播**这个帧。
- C 和 D 将丢弃这个帧，因为目的地址不对。只 B 才收下这个目的地址正确的帧。这也称为**过滤**。
- 从新写入交换表的项目 (A, 1) 可以看出，以后不管从哪一个接口收到帧，只要其目的地址是A，就应当把收到的帧从接口1转发出去。

按照以下自学习算法 处理收到的帧和建立交换表



- B 通过接口 3 向 A 发送一帧。
- 交换机查找交换表，发现交换表中的 MAC 地址有 A。表明要发送给 A 的帧（即目的地址为 A 的帧）应从接口 1 转发。于是就把这个帧传送到接口 1 转发给 A。显然，现在已经没有必要再广播收到的帧。
- 交换表这时新增加的项目 (B, 3)，表明今后如有发送给 B 的帧，就应当从接口 3 转发出去。
- 经过一段时间后，只要主机 C 和 D 也向其他主机发送帧，以太网交换机中的交换表就会把转发到 C 或 D 应当经过的接口号（2 或 4）写入到交换表中。

按照以下自学习算法 处理收到的帧和建立交换表



交换了两帧后的交换表

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。

以太网交换机的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，因此非常方便。

交换机自学习和转发帧的步骤归纳



- 交换机收到一帧后先进行**自学习**。查找交换表中与收到帧的**源地址有无相匹配**的项目。
 - 如没有，就在交换表中增加一个项目（源地址、进入的接口和有效时间）。
 - 如有，则把原有的项目进行更新（进入的接口或有效时间）。
- **转发帧**。查找交换表中与收到帧的**目的地址有无相匹配**的项目。
 - 如没有，则向所有其他接口（进入的接口除外）转发。
 - 如有，则按交换表中给出的接口进行转发。
 - 若交换表中给出的接口就是该帧进入交换机的接口，则应丢弃这个帧（因为这时不需要经过交换机进行转发）。

3. 从总线以太网到星形以太网

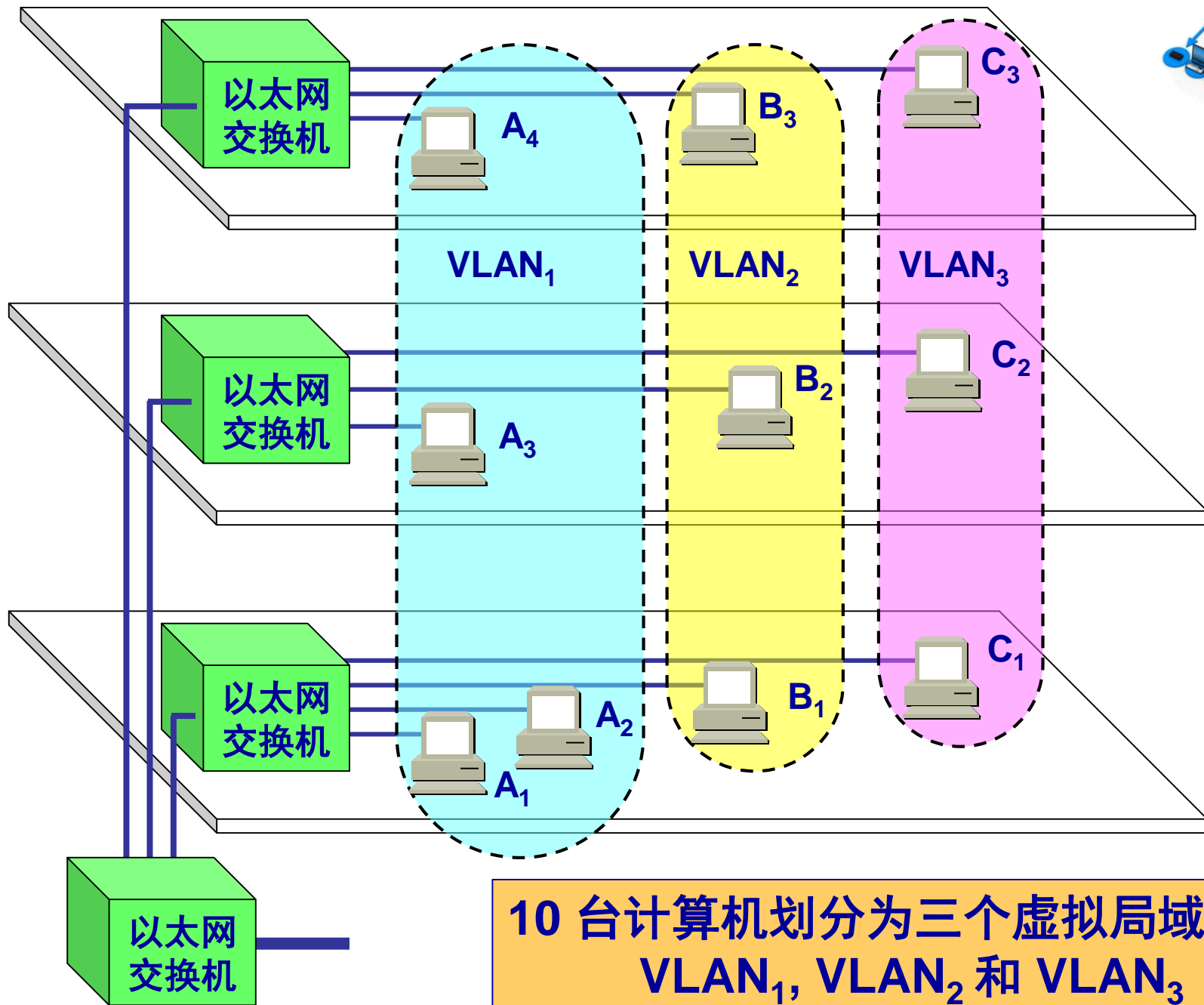


- 早期，以太网采用无源的总线结构。
- 现在，采用以太网交换机的星形结构成为以太网的首选拓扑。
- 总线以太网使用 CSMA/CD 协议，以半双工方式工作。
- 以太网交换机不使用共享总线，没有碰撞问题，因此不使用 CSMA/CD 协议，而是以全双工方式工作。但仍然采用以太网的帧结构。

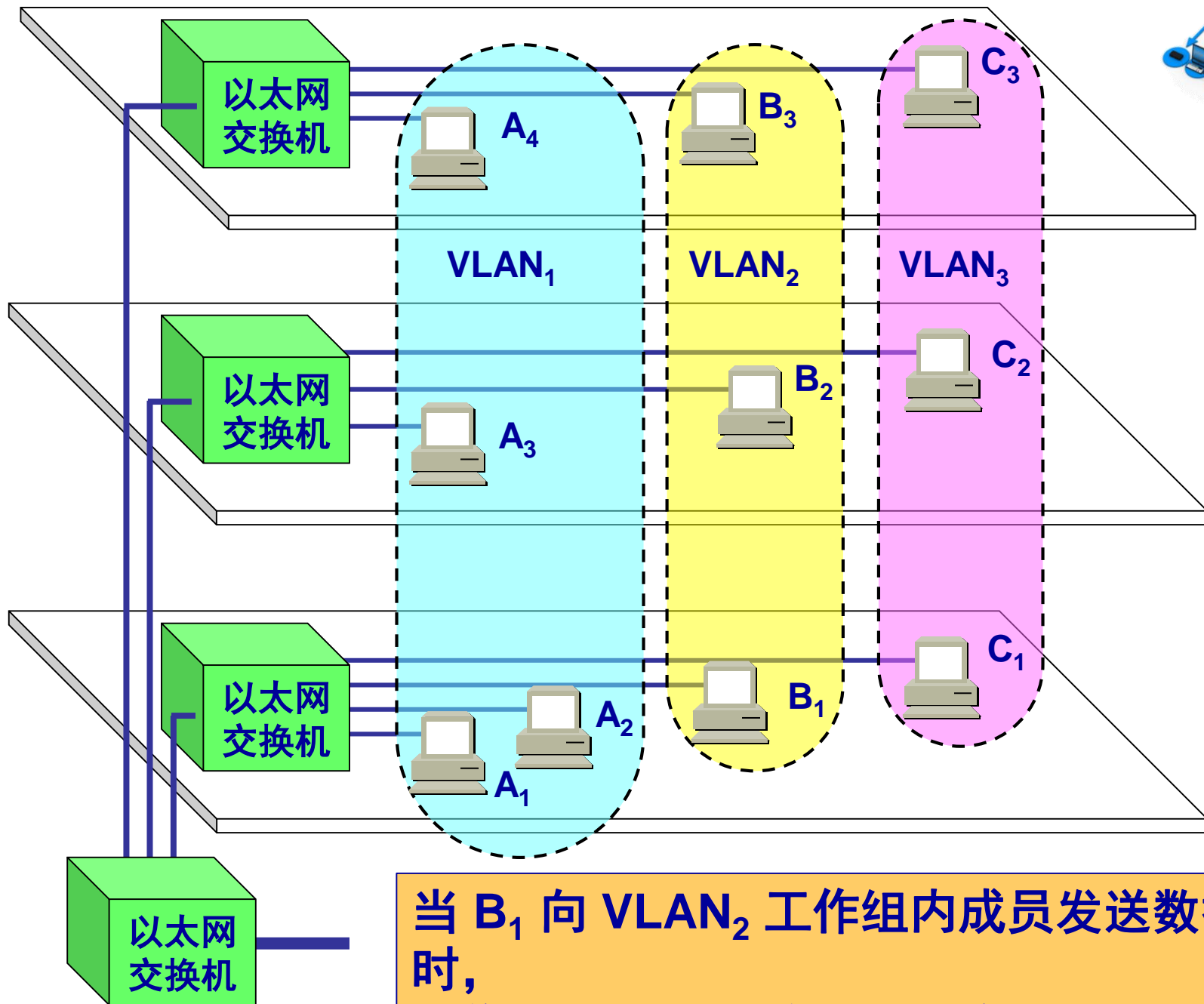
3.4.3 虚拟局域网

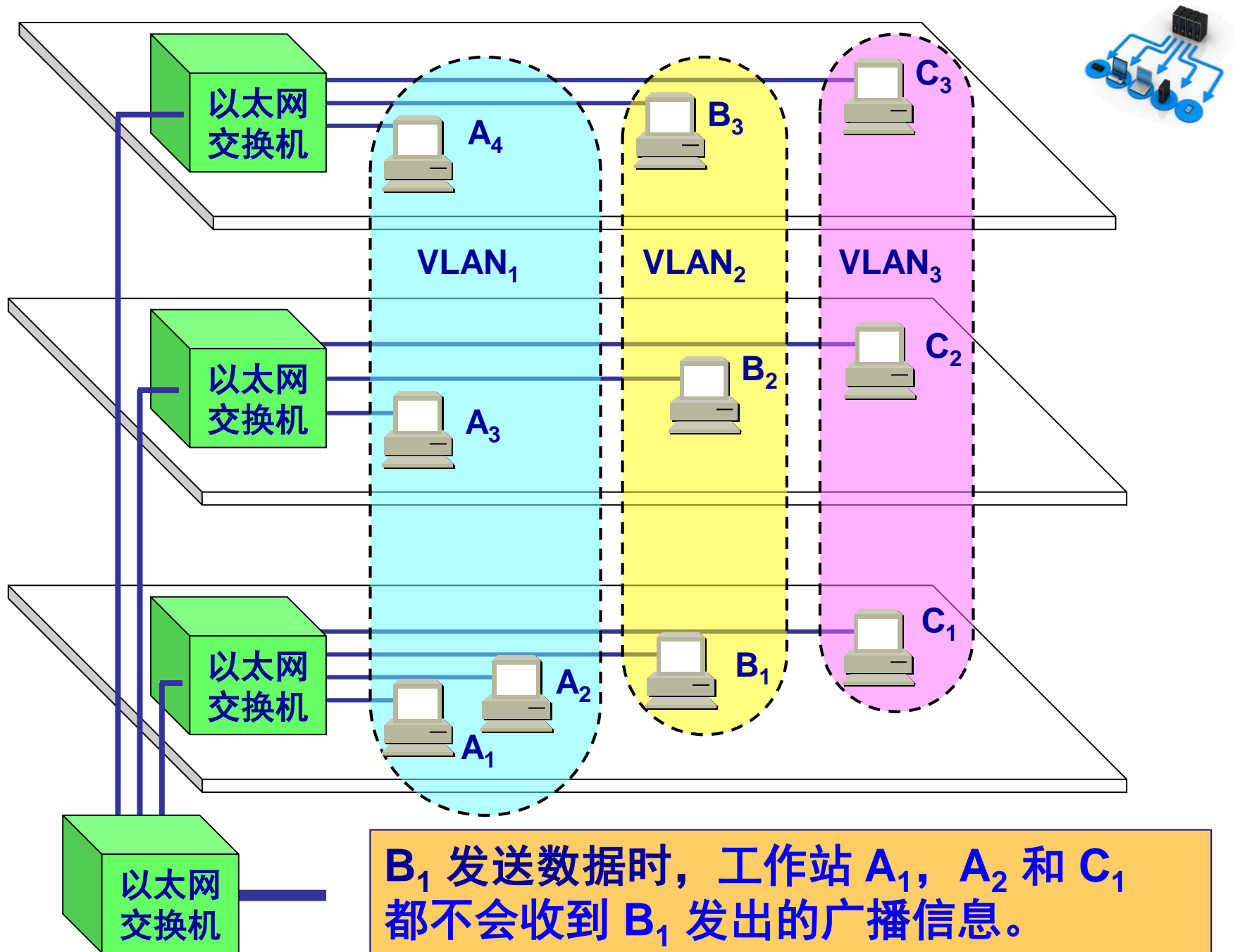


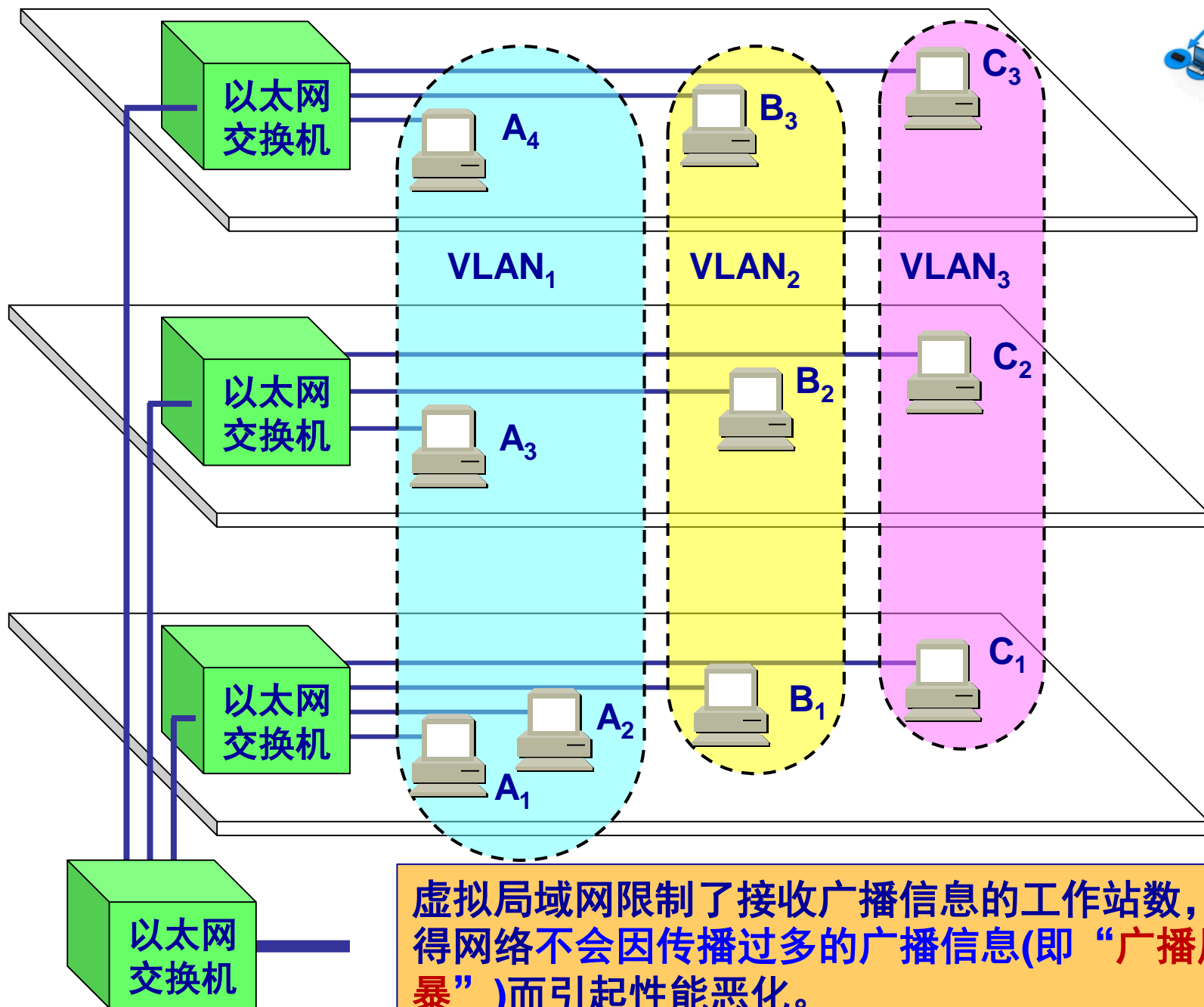
- 利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN (Virtual LAN)。
- **虚拟局域网 VLAN** 是由一些局域网网段构成的**与物理位置无关的逻辑组**，而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符，指明发送这个帧的计算机是属于哪一个 VLAN。
- **虚拟局域网其实只是局域网给用户提供服务，而并不是一种新型局域网。**
- 由于虚拟局域网是用户和网络资源的逻辑组合，因此可按照需要将有关设备和资源非常方便地重新组合，使用户从不同的服务器或数据库中存取所需的资源。



10 台计算机划分为三个虚拟局域网：
VLAN₁, VLAN₂ 和 VLAN₃





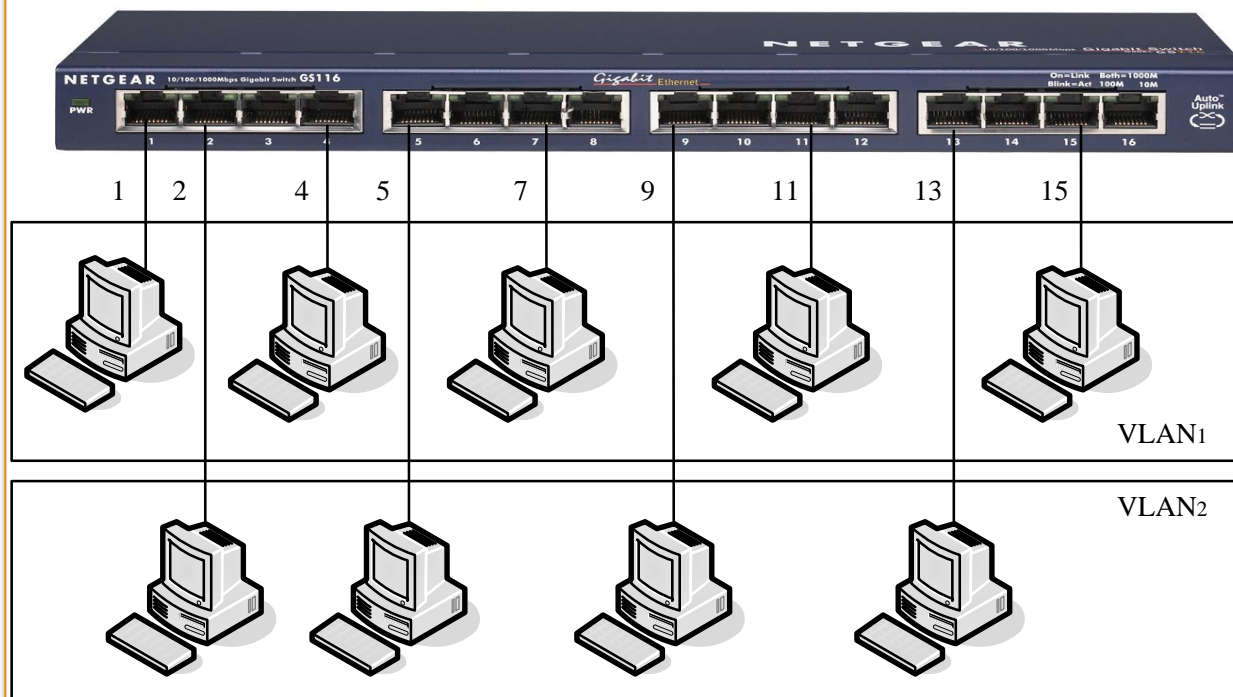


虚拟局域网限制了接收广播信息的工作站数，使得网络不会因传播过多的广播信息(即“**广播风暴**”)而引起性能恶化。

VLAN的划分方法-基于端口划分VLAN



交换机



VLAN与端口对照表

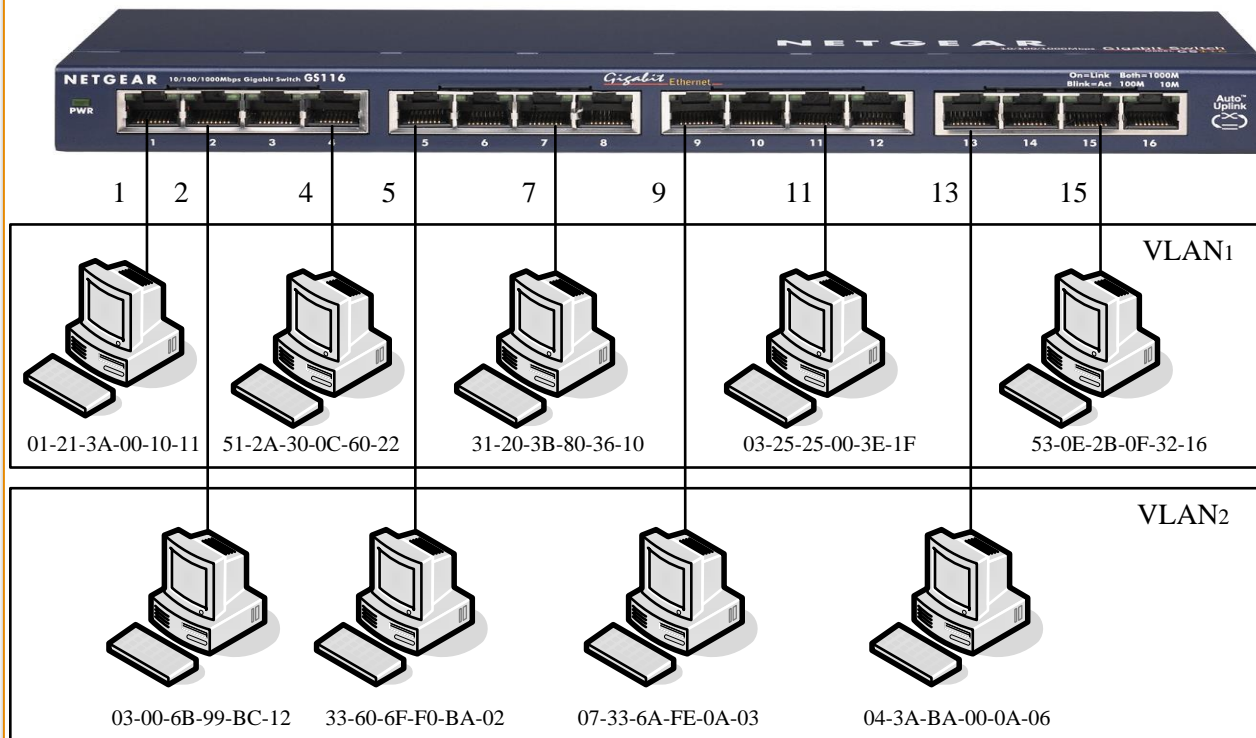
VLAN	端口号
VLAN1	1
	4
	7
	11
	15
VLAN2	2
	5
	9
	13

VLAN的划分方法-基于主机MAC地址划分

VLAN



交换机



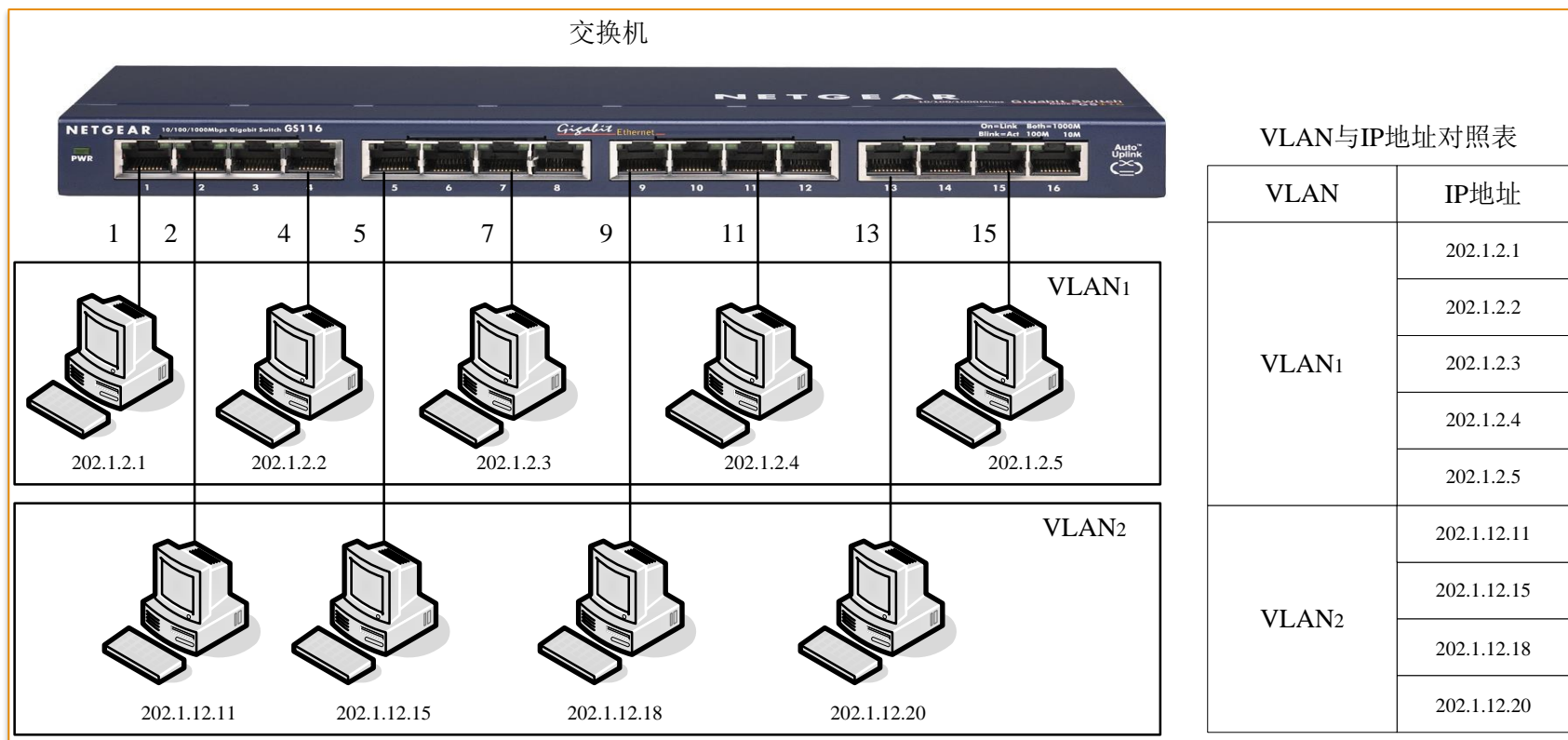
VLAN与MAC地址对照表

VLAN	MAC地址
VLAN1	01-21-3a-00-10-11
	51-2A-30-0C-60-22
	31-20-3B-80-36-10
	03-25-25-00-3E-1F
	53-0E-2B-0F-32-16
VLAN2	03-00-6B-99-BC-12
	33-60-6F-F0-BA-02
	07-33-6A-FE-0A-03
	04-3A-BA-00-0A-06

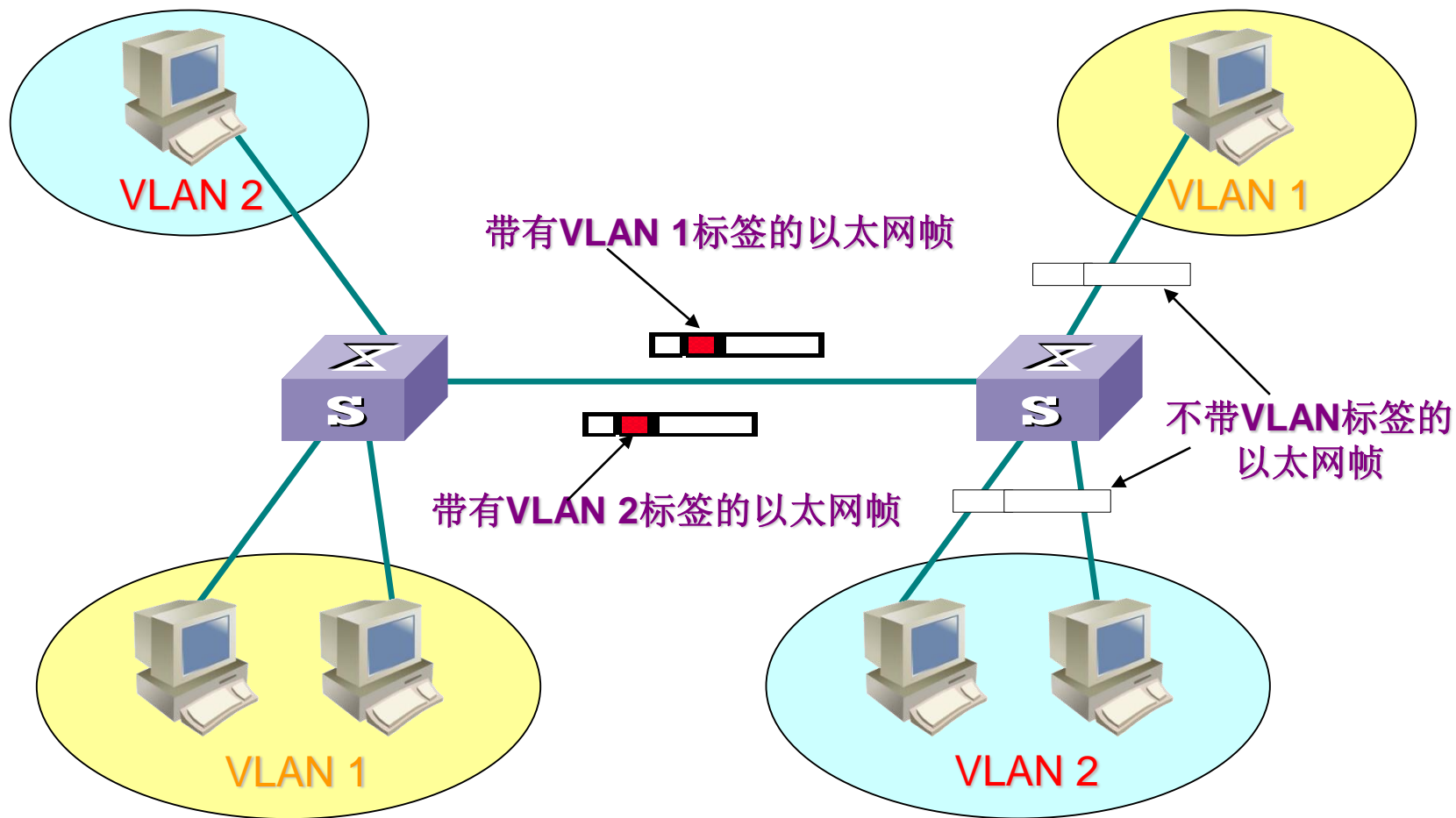
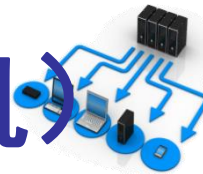


VLAN的划分方法-基于IP地址

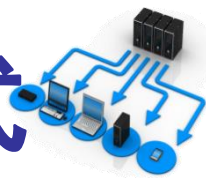
■ 基于网络层地址或协议的VLAN划分方法



帧在网络通信中的变化（跨交换机）

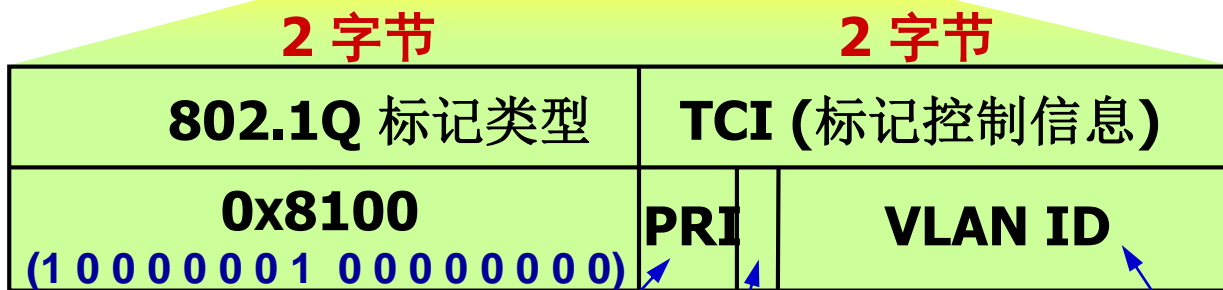


虚拟局域网使用的以太网帧格式



- IEEE 批准了 802.3ac 标准，该标准定义了以太网的帧格式的扩展，以支持虚拟局域网。
- 虚拟局域网协议允许在以太网的帧格式中插入一个4字节的标识符，称为 **VLAN 标记 (tag)**，用来指明发送该帧的计算机属于哪一个虚拟局域网。
- 插入 VLAN 标记得出的帧称为 **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



用户优先级
3 位

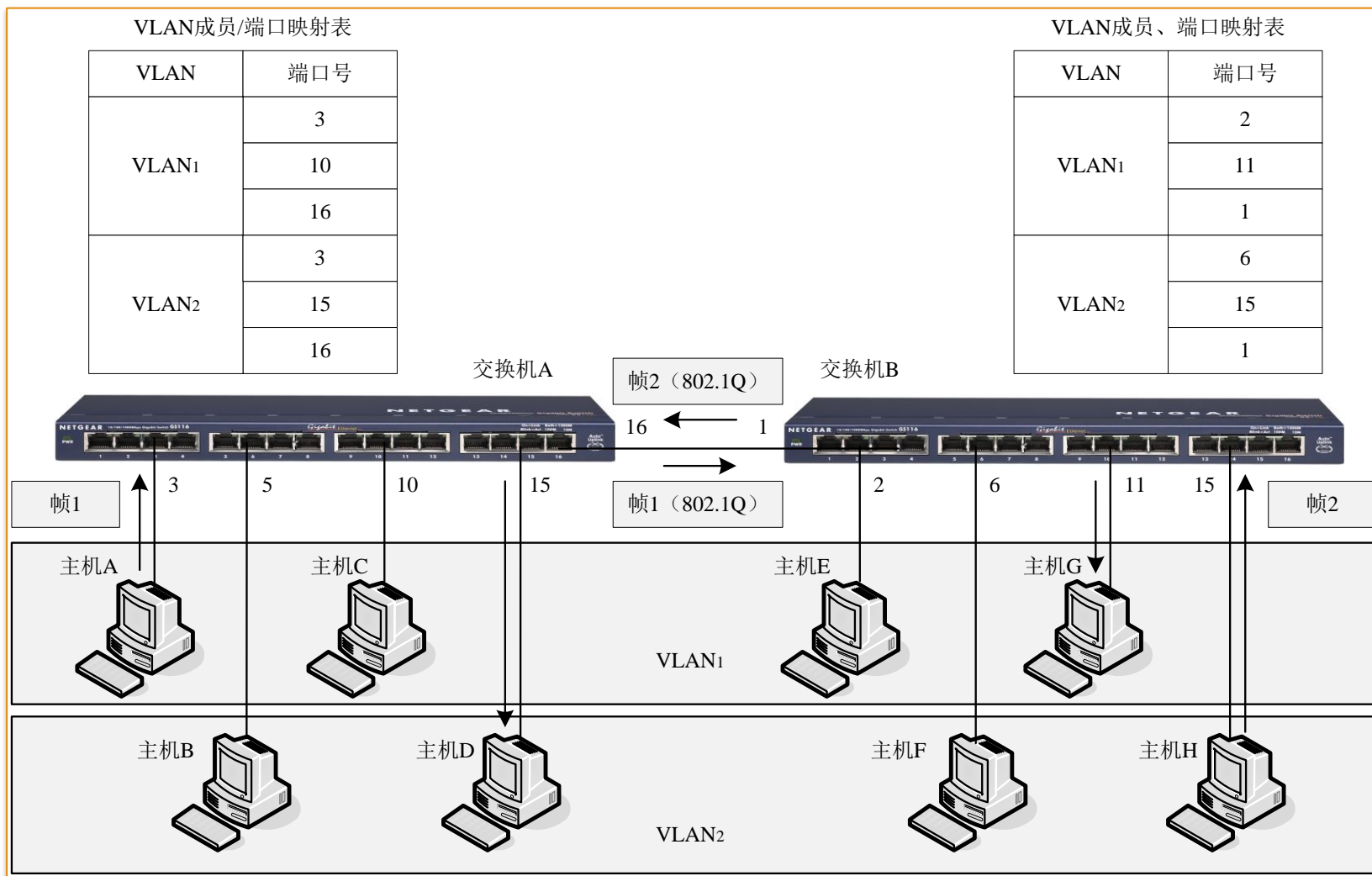
规范格式指示符(CFI)
1 位

VLAN 标识符
12 位 (4096个VLAN)

以太网 MAC 帧的最大帧长从原来的 1518 字节变为 1522 字节。

插入 VLAN 标记后变成了 802.1Q 帧

VLAN数据帧交换过程



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

3.5.1 100BASE-T 以太网



- 速率达到或超过 100 Mbit/s 的以太网称为**高速以太网**。
- 100BASE-T 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。
- 100BASE-T 以太网又称为**快速以太网** (Fast Ethernet)。
- 1995 年IEEE已把 100BASE-T 的快速以太网定为正式标准，其代号为 **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。
- MAC 帧格式仍然是 802.3 标准规定的。
- 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 m。
- 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 以太网的三种不同的物理层标准



■ 100BASE-TX

- 使用 2 对 UTP 5 类线 或 屏蔽双绞线 STP。
- 网段最大程度：100米。

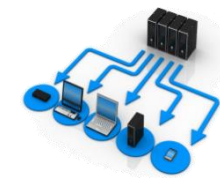
■ 100BASE-T4

- 使用 4 对 UTP 3 类线 或 5 类线。
- 网段最大程度：100米。

■ 100BASE-FX

- 使用 2 对光纤。
- 网段最大程度：2000米。

3.5.2 吉比特以太网



- 允许在 1 Gbit/s 下以全双工和半双工两种方式工作。
- 使用 IEEE 802.3 协议规定的帧格式。
- 在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议，全双工方式不使用 CSMA/CD 协议。
- 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。

3.6 小结

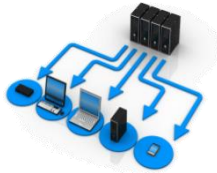
- （1）数据链路层的点对点信道和广播信道的特点，以及这两种信道所使用的协议 (PPP 协议以及CSMA/CD协议)的特点。
- （2）数据链路层的三个基本问题：封装成帧、透明传输和差错检测。
- （3）以太网MAC层的硬件地址。适配器、集线器、以太网交换机的作用以及使用场合。

3.6 小结

- (4) IEEE802.3 CSMA/CD协议的基本原理。
- (5) 高速以太网技术，包括快速以太网、千兆以太网和10吉比特以太网/100吉比特以太网技术等。

作业

- 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-25, 3-30



The end