

第 3 章 数据链路层



第 3 章 数据链路层



- 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

数据链路层基本概念

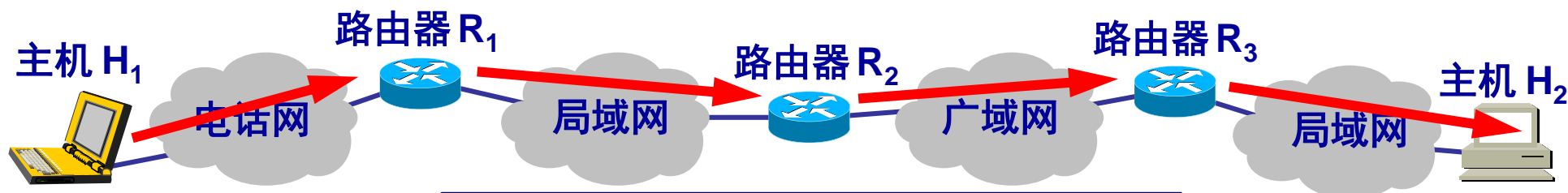


数据链路层的主要作用是如何将**数据**
可靠地传输到相邻节点。

数据链路层的简单模型

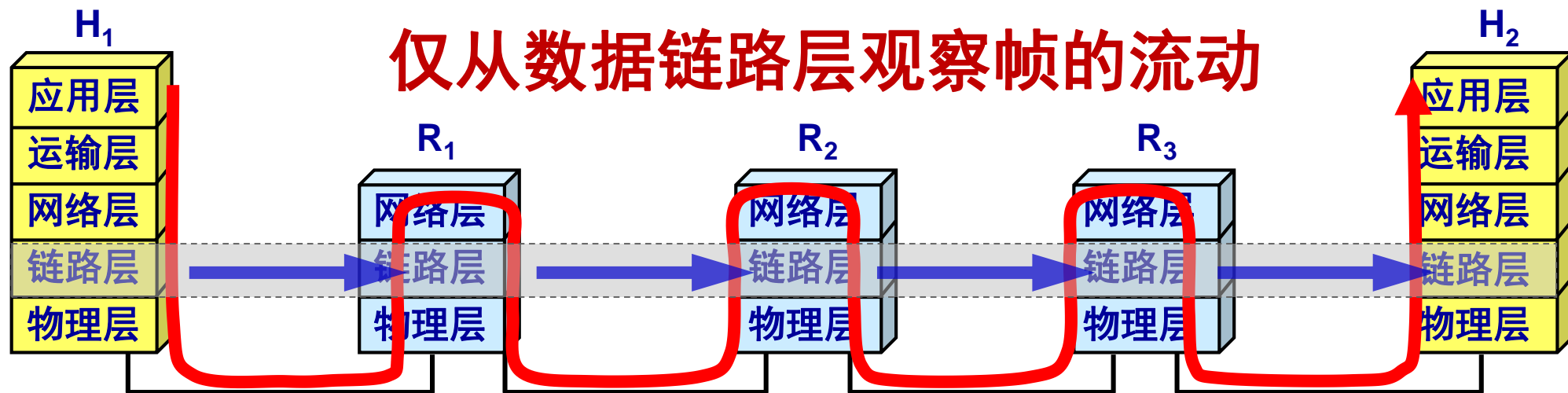


主机 H₁ 向 H₂ 发送数据



H₁ 到 H₂ 所经过的网络可以是多种的

仅从数据链路层观察帧的流动



不同的链路层可能采用不同的数据链路层协议

只考虑数据在数据链路层的流动

数据链路层使用的信道



数据链路层使用的信道主要有以下两种类型：

- **点对点信道**。这种信道使用**一对一的点对点通信**方式。
- **广播信道**。这种信道使用**一对多的广播通信**方式，因此过程比较复杂。

3.1 使用点对点信道的数据链路层



- 3.1.1 数据链路
- 3.1.2 三个基本问题

3.1.1 数据链路



- **物理链路 (link)** 是一条点到点的物理线路段，中间没有任何其他的交换结点。
 - 物理链路（媒介）是长期存在的，数据链路通常有时效性。
- **数据链路 (data link)** 除了物理线路外，还必须有通信协议来控制这些数据的传输。若把实现这些协议的硬件和软件加到链路上，就构成了数据链路。
 - 现在最常用的方法是使用适配器（即网卡）来实现这些协议的硬件和软件。
 - 一般的适配器都包括了数据链路层和物理层这两层的功能。

3.1.2 三个基本问题



- 数据链路层协议有许多种，但有三个基本问题则是共同的。这三个基本问题是：

(1) 封装成帧

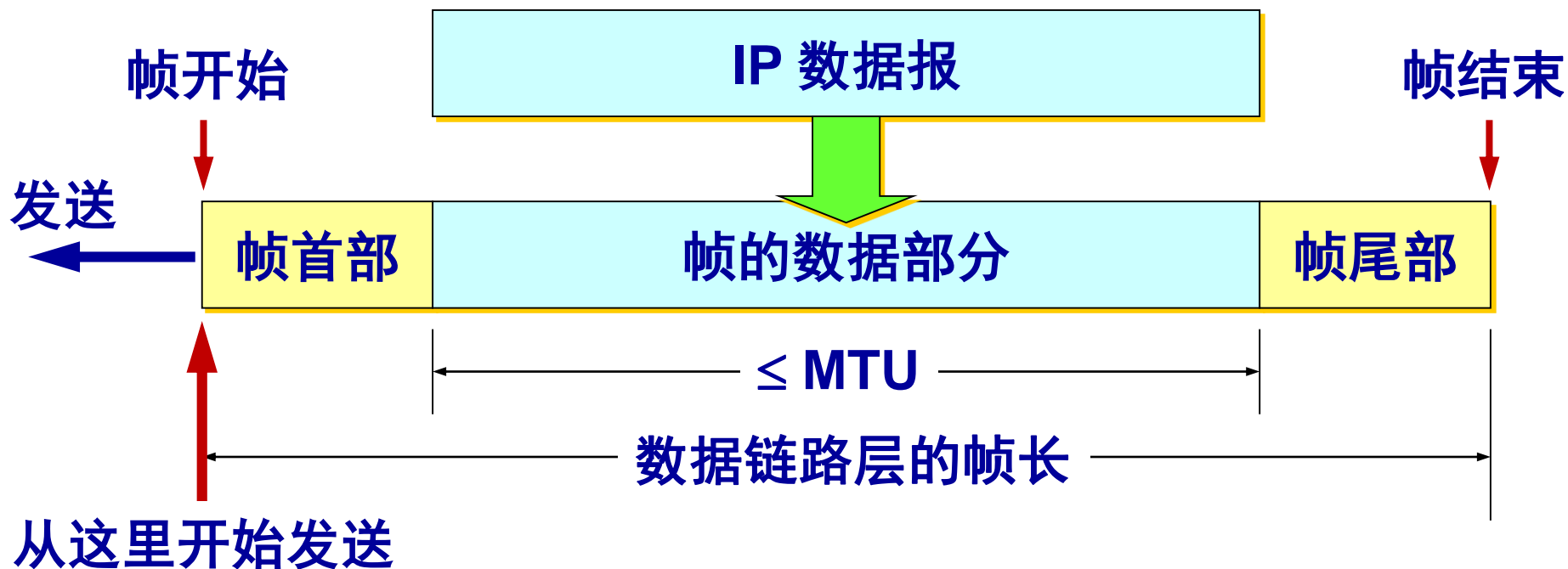
(2) 透明传输

(3) 差错控制

1. 封装成帧



- **封装成帧** (framing) 就是在一段数据的前后分别添加首部和尾部，然后就构成了一个帧。确定帧的界限。
- 首部和尾部的一个重要作用就是进行**帧定界**。

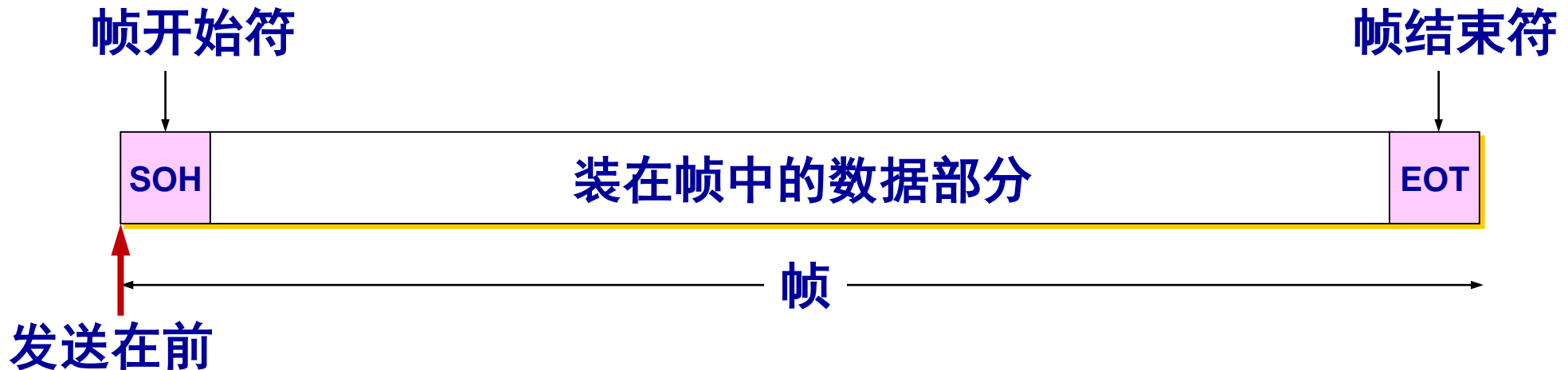


用帧首部和帧尾部封装成帧

用控制字符进行帧定界的方法举例



- 当数据是由可打印的 ASCII 码组成的文本文件时，帧定界可以使用特殊的**帧定界符**。
- 控制字符 SOH (Start Of Header) 放在一帧的最前面，表示帧的首部开始。另一个控制字符 EOT (End Of Transmission) 表示帧的结束。

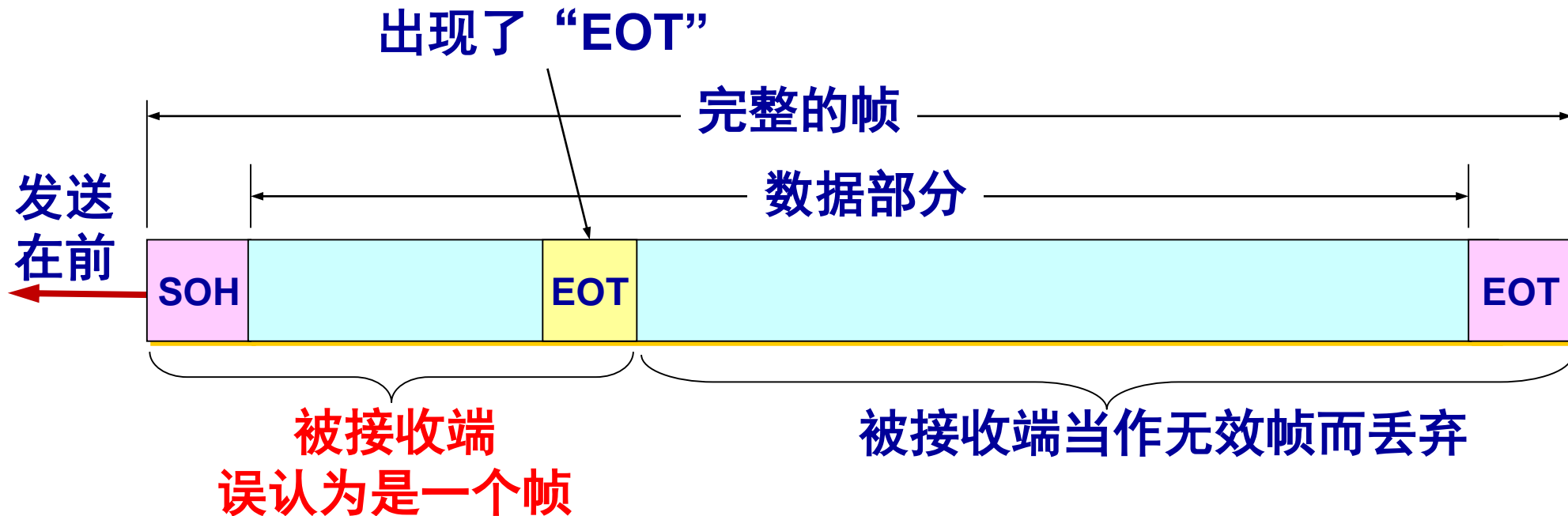


用控制字符进行帧定界的方法举例

2. 透明传输

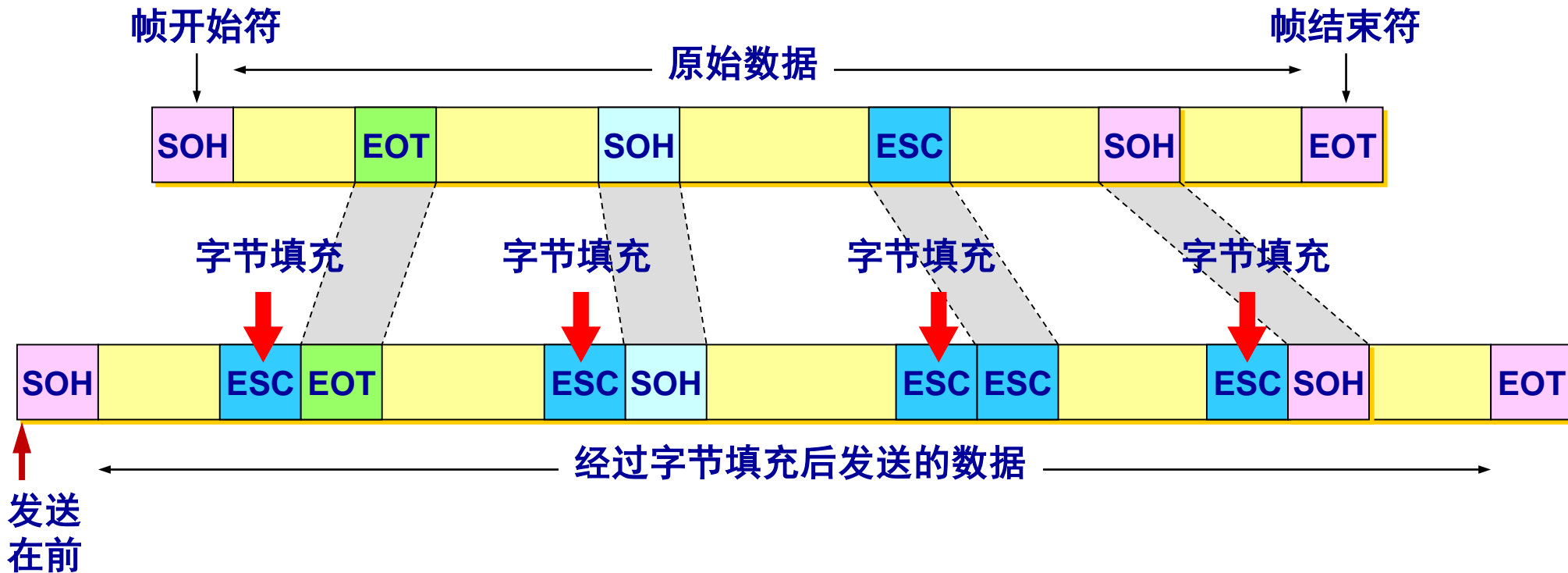


- 如果数据中的某个字节的二进制代码恰好和 SOH 或 EOT 一样，数据链路层就会错误地“找到帧的边界”。



数据部分恰好出现与 EOT 一样的代码

用字节填充法解决透明传输的问题



用字节填充法解决透明传输的问题

3. 差错检测



- 在传输过程中可能会产生**比特差错**：1 可能会变成 0 而 0 也可能变成 1。
- 在一段时间内，传输错误的比特占所传输比特总数的比率称为**误码率 BER (Bit Error Rate)**。
- 误码率与信噪比有很大的关系。
- 为了保证数据传输的可靠性，在计算机网络传输数据时，必须采用各种**差错检测措施**。

循环冗余检验的原理



- 在数据链路层传送的帧中，广泛使用了**循环冗余检验 CRC** 的检错技术。
- 在发送端，先把数据划分为组。假定每组 k 个比特。
- 假设待传送的一组数据 $M = 101001$ （现在 $k = 6$ ）。我们在 M 的后面再添加供差错检测用的 n 位**冗余码**一起发送。

冗余码的计算



- M 后面添加 n 个 0。
- 得到的 $(k + n)$ 位的数除以事先选定好的长度为 $(n + 1)$ 位的除数 P ，得出商是 Q 而余数是 R ， R 是 n 位。
- 将余数 R 作为冗余码拼接在数据 M 后面发送出去。

接收端对收到的每一帧进行 CRC 检验



- (1) 若得出的余数 $R = 0$ ，则判定这个帧没有差错，就**接受** (accept)。
- (2) 若余数 $R \neq 0$ ，则判定这个帧有差错，就**丢弃**。
- 但这种检测方法并不能确定究竟是哪一个或哪几个比特出现了差错。
- 只要经过严格的挑选，并使用位数足够多的除数 P ，那么出现检测不到的差错的概率就很小很小。

3.2 点对点协议 PPP



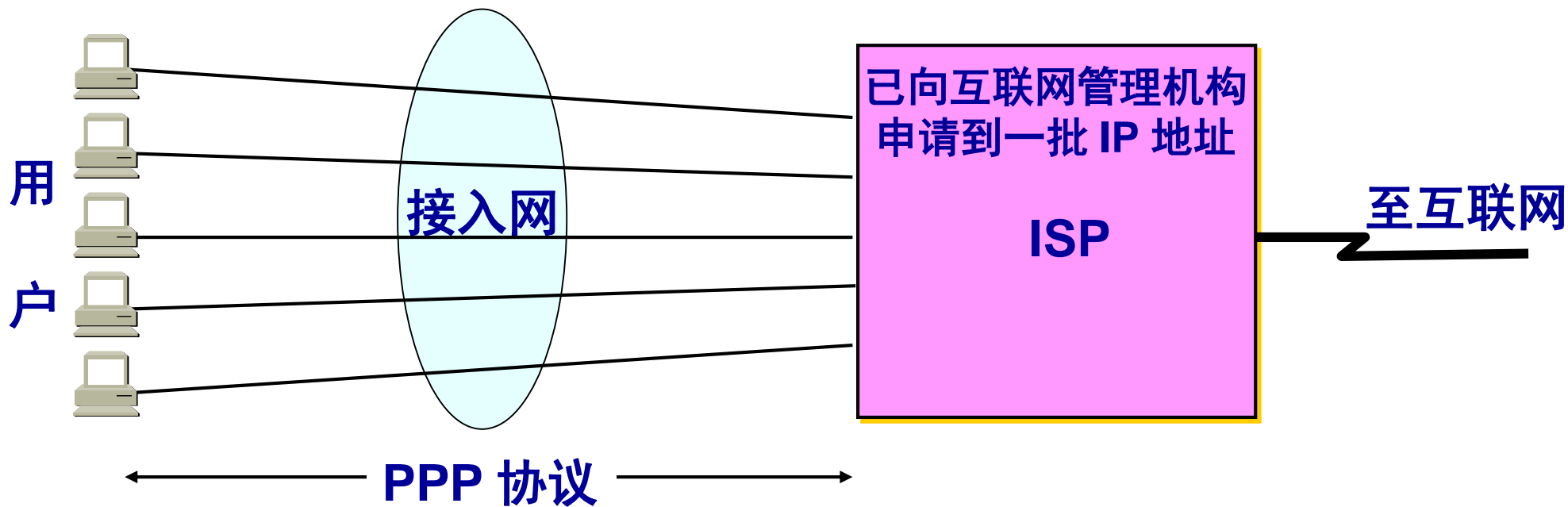
- 3.2.1 PPP 协议的特点
- 3.2.2 PPP 协议的帧格式

3.2.1 PPP 协议的特点



- 对于点对点的链路，目前使用得最广泛的数据链路层协议是**点对点协议 PPP (Point-to-Point Protocol)**。
- PPP 协议在1994年就已成为互联网的正式标准。

用户到 ISP 的链路使用 PPP 协议





PPP 协议应满足的需求

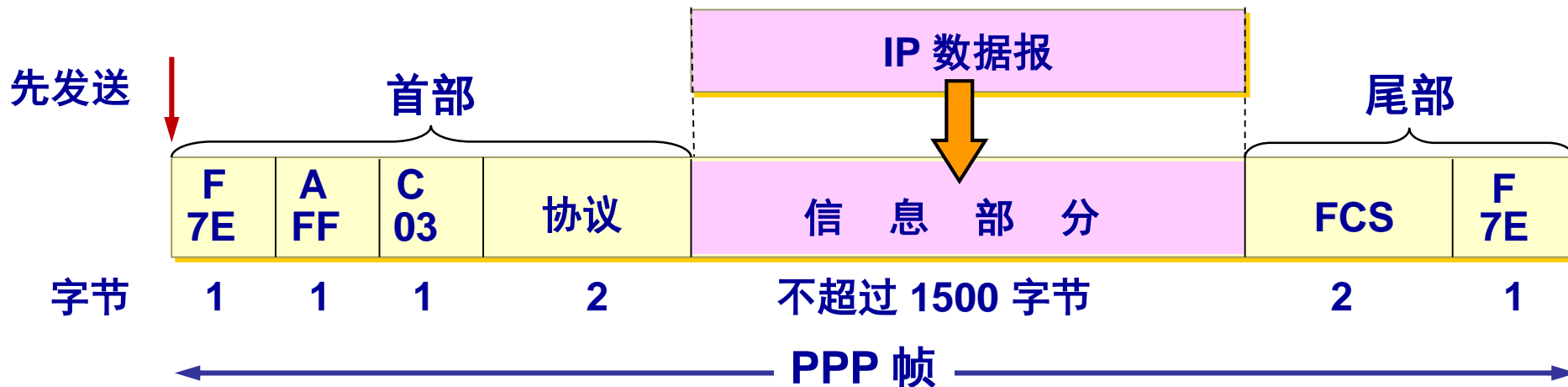
- **简单** —— **这是首要的要求。**
- **封装成帧** —— 必须规定特殊的字符作为帧定界符。
- **透明性** —— 必须保证数据传输的透明性。
- **多种网络层协议** —— 能够在同一条物理链路上同时支持多种网络层协议。
- **多种类型链路** —— 能够在多种类型的链路上运行。
- **差错检测** —— 能够对接收端收到的帧进行检测，并立即丢弃有差错的帧。

PPP 协议应满足的需求（续）



- **检测连接状态** —— 能够及时自动检测出链路是否处于正常工作状态。
- **最大传送单元** —— 必须对每一种类型的点对点链路设置最大传送单元 MTU 的标准默认值，促进各种实现之间的互操作性。
- **网络层地址协商** —— 必须提供一种机制使通信的两个网络层实体能够通过协商知道或能够配置彼此的网络层地址。
- **数据压缩协商** —— 必须提供一种方法来协商使用数据压缩算法。

3.2.2 PPP 协议的帧格式



PPP 有一个 2 个字节的协议字段。其值

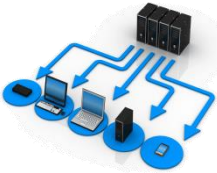
- 若为 0x0021，则信息字段就是 IP 数据报。
- 若为 0x8021，则信息字段是网络控制数据。
- 若为 0xC021，则信息字段是 PPP 链路控制数据。
- 若为 0xC023，则信息字段是鉴别数据。

透明传输问题



- 当 PPP 用在同步传输链路时，协议规定采用硬件来完成**比特填充**。
- 当 PPP 用在异步传输时，就使用一种特殊的**字符填充法**。

零比特填充



信息字段中出现了和标志字段 F 完全一样的 8 比特组合

0 1 0 **0 1 1 1 1 1 0 0** 0 1 0 1 0

会被误认为是标志字段 F

发送端在 5 个连 1 之后填入 0 比特再发送出去

0 1 0 **0 1 1 1 1 0** 0 1 0 0 0 1 0 1 0

发送端填入 0 比特

接收端把 5 个连 1 之后的 0 比特删除

0 1 0 **0 1 1 1 1 0** 0 1 0 0 0 1 0 1 0

接收端删除填入的 0 比特

零比特的填充与删除

字符填充



- 将信息字段中出现的每一个 `0x7E` 字节转变成为 2 字节序列 (`0x7D, 0x5E`)。
- 若信息字段中出现一个 `0x7D` 的字节, 则将其转变成为 2 字节序列 (`0x7D, 0x5D`)

思考问题1:



- 为什么要 $0x7E \rightarrow (0x7D, 0x5E)$, 再 $0x7D \rightarrow (0x7D, 0x5D)$?

思考问题1:



- 为什么要 $0x7E \rightarrow (0x7D, 0x5E)$, 再 $0x7D \rightarrow (0x7D, 0x5D)$?
- $0x7E \rightarrow (0x7D, 0x5E)$.
 - 避免“信息字段”里的字符和“标志字段 Flag”重复
- $0x7D \rightarrow (0x7D, 0x5D)$
 - 避免“信息字段”里的字符和转义字符重复。

3.3 使用广播信道的数据链路层



- 3.3.1 局域网的数据链路层
- 3.3.2 CSMA/CD 协议
- 3.3.3 使用集线器的星形拓扑
- 3.3.4 以太网的信道利用率
- 3.3.5 以太网的 MAC 层

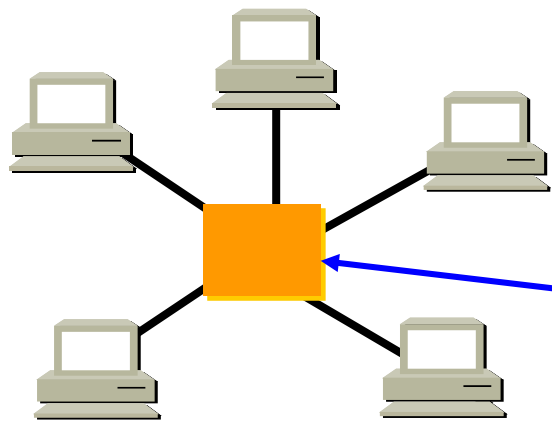
3.3.1 局域网的数据链路层



- 局域网最主要的**特点**是：
 - 网络为一个单位所拥有；
 - 地理范围和站点数目均有限。

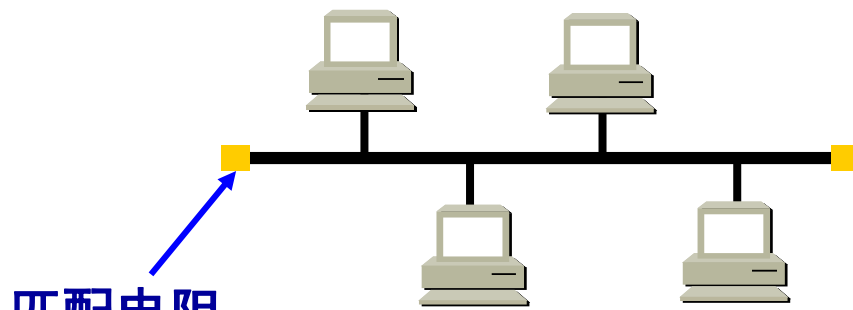
- 局域网具有如下**主要优点**：
 - 具有**广播功能**，从一个站点可很方便地访问全网。局域网上的主机可共享连接在局域网上的各种硬件和软件资源。
 - 便于系统的扩展和逐渐地演变，各设备的位置可灵活调整和改变。

局域网拓扑结构



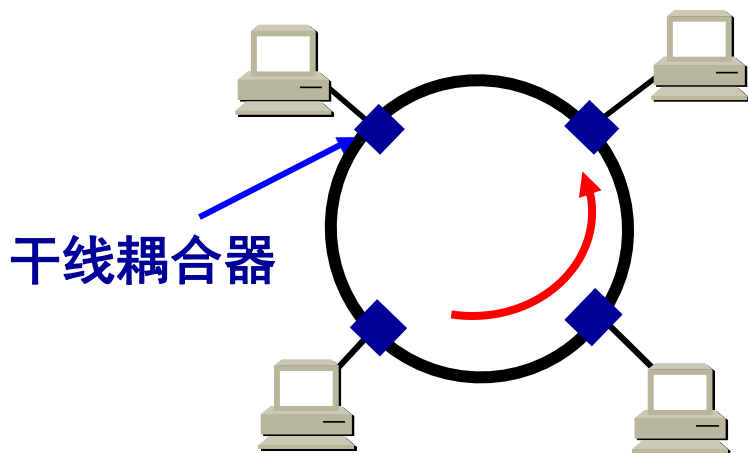
星形网

集线器



匹配电阻

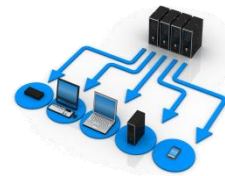
总线网



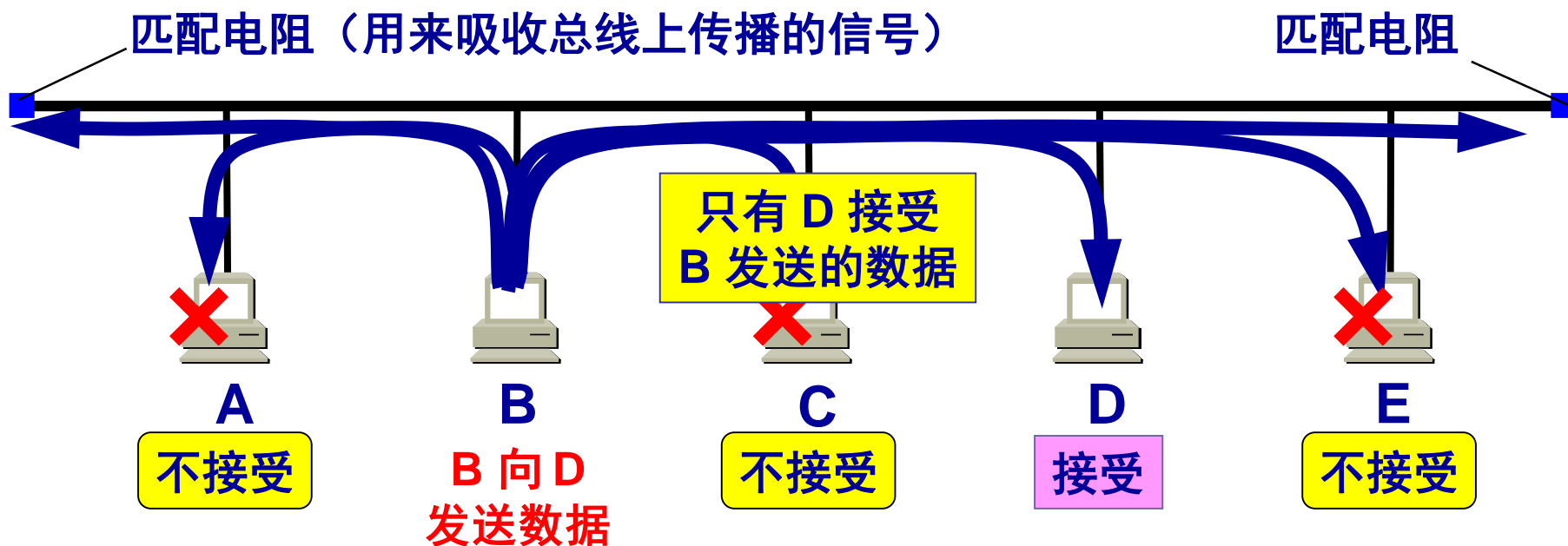
干线耦合器

环形网

3.3.2 CSMA/CD 协议



- 最初的以太网是将许多计算机都连接到一根总线上，认为这样的连接方法既简单又可靠。



CSMA/CD协议



- **CSMA/CD 含义：载波监听多点接入 / 碰撞检测** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)。
- **“多点接入”** 表示许多计算机以多点接入的方式连接在一根总线上。
- **“载波监听”** 是指每一个站在发送数据之前先要检测一下总线上是否有其他计算机在发送数据，如果有，则暂时不要发送数据，以免发生碰撞。
- **“碰撞检测”** 就是计算机边发送数据边检测信道上的信号电压大小。

CSMA/CD协议的要点

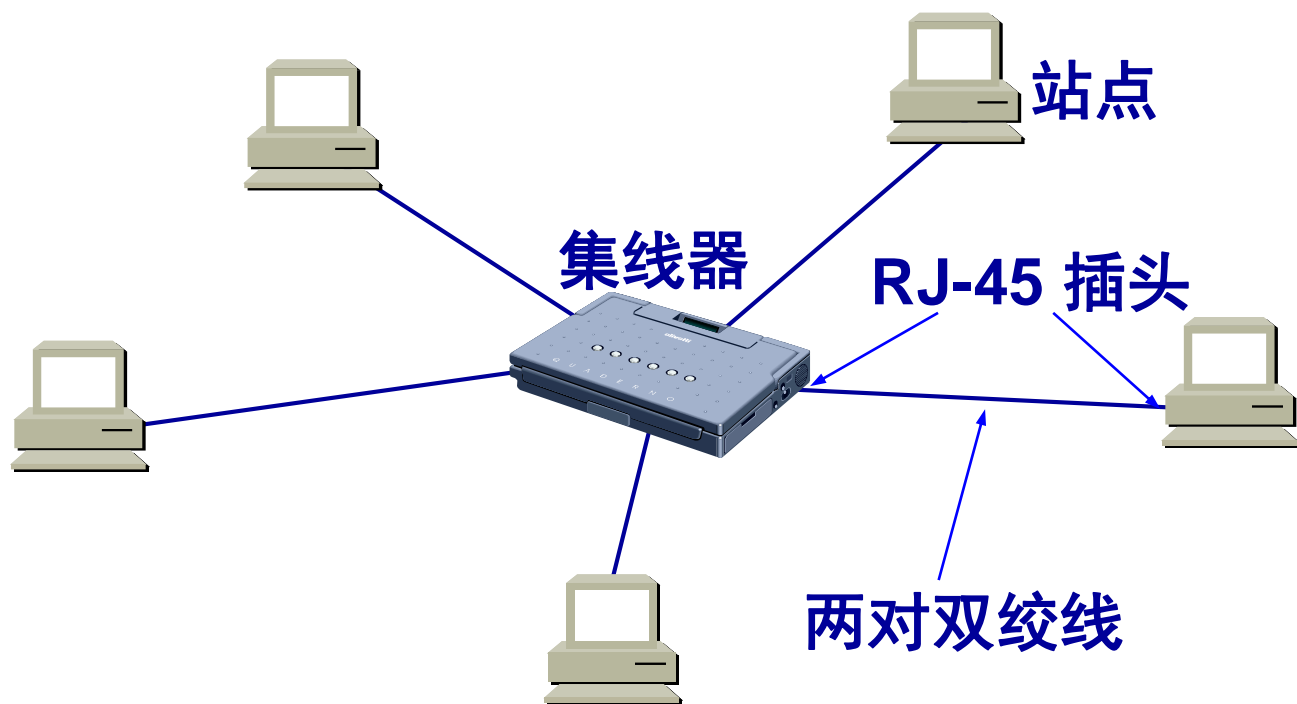


- **(1) 准备发送。**但在发送之前，必须先检测信道。
- **(2) 检测信道。**若检测到信道忙，则应不停地检测，一直等待信道转为空闲。若检测到信道空闲，并在 96 比特时间内信道保持空闲（保证了帧间最小间隔），就发送这个帧。
- **(3) 检查碰撞。**在发送过程中仍不停地检测信道，即网络适配器要边发送边监听。这里只有**两种可能性**：
 - **①发送成功：**在争用期内一直未检测到碰撞。这个帧肯定能够发送成功。发送完毕后，其他什么也不做。然后回到 (1)。
 - **②发送失败：**在争用期内检测到碰撞。这时立即停止发送数据，并按规定发送人为干扰信号。适配器接着就执行指数退避算法，等待 r 倍 512 比特时间后，返回到步骤 (2)，继续检测信道。但若重传达 16 次仍不能成功，则停止重传而向上报错。

3.3.3 使用集线器的星形拓扑



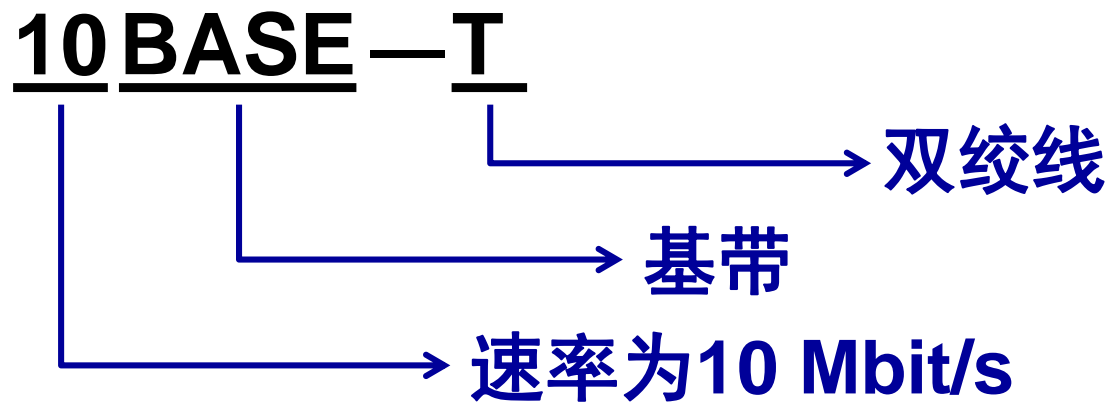
- 采用双绞线的以太网采用星形拓扑，在星形的中心则增加了**集线器 (hub)**。



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。



10BASE-T以太网的统治地位



- 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**。
- 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。
- (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。

3.3.4 以太网的信道利用率

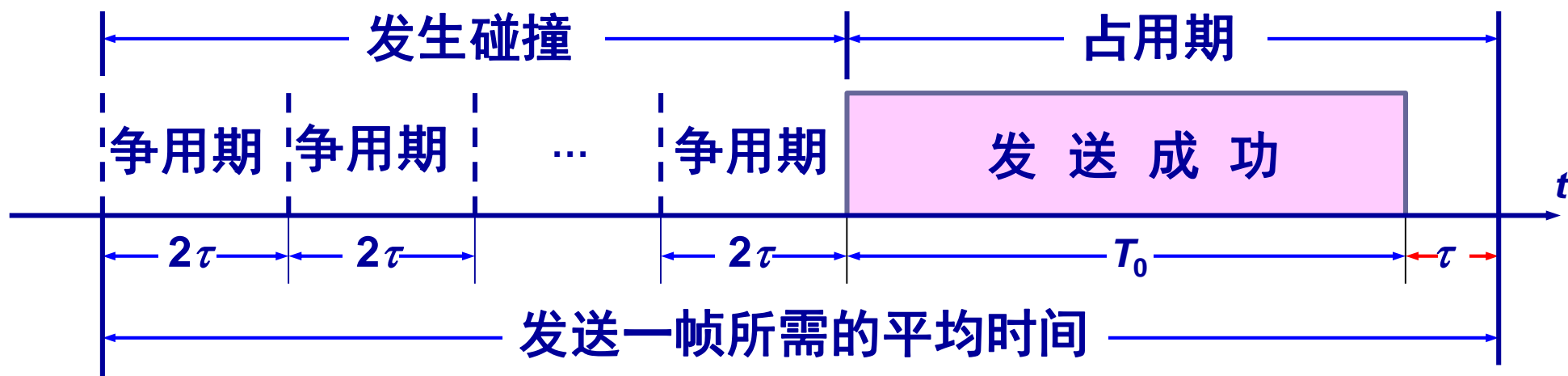


- 多个站在以太网上同时工作就可能会发生碰撞。
- 当发生碰撞时，信道资源实际上是被浪费了。因此，当扣除碰撞所造成的信道损失后，**以太网总的信道利用率并不能达到 100%**。
- 假设 τ 是以太网单程端到端传播时延。则争用期长度为 2τ ，即端到端传播时延的两倍。检测到碰撞后不发送干扰信号。

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 。



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 ：

$$\alpha = \tau / T_0$$

- 对以太网参数 α 的要求是：

- 当数据率一定时，以太网的连线的长度受到限制，否则 τ 的数值会太大。
- 以太网的帧长不能太短，否则 T_0 的值会太小，使 α 值太大。

3.3.5 以太网的 MAC 层



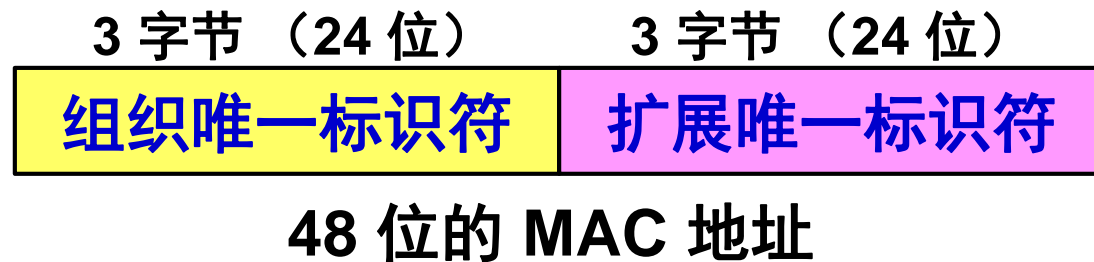
重点介绍：

- 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**。
- MAC地址是局域网通信设备或端口的**唯一标识符**。



单站地址，组地址，广播地址



- IEEE规定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）。
- 所有 48 位都为 1 时，为广播地址。只能作为目的地址使用。

适配器检查 MAC 地址



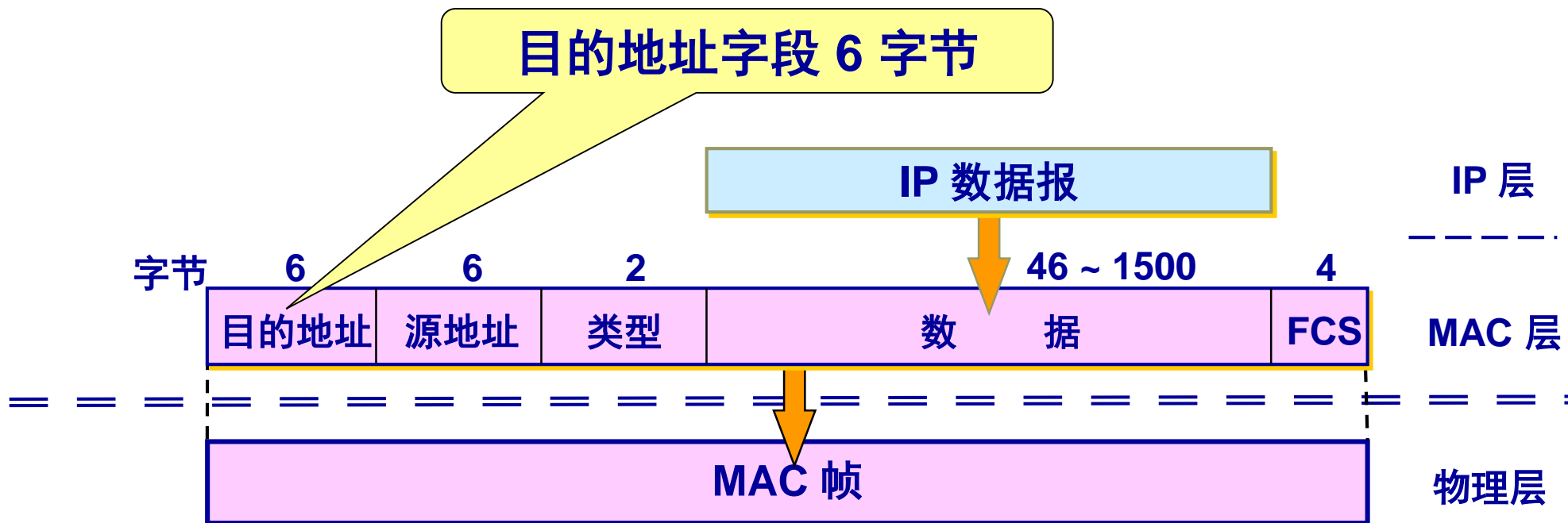
- 适配器从网络上每收到一个 MAC 帧就首先用硬件检查 MAC 帧中的 MAC 地址。
 - 如果是发往本站的帧则收下，然后再进行其他的处理。
 - 否则就将此帧丢弃，不再进行其他的处理。
- “发往本站的帧” 包括以下三种帧：
 - 单播 (unicast) 帧 (一对一)
 - 广播 (broadcast) 帧 (一对全体)
 - 多播 (multicast) 帧 (一对多)

2. MAC 帧的格式

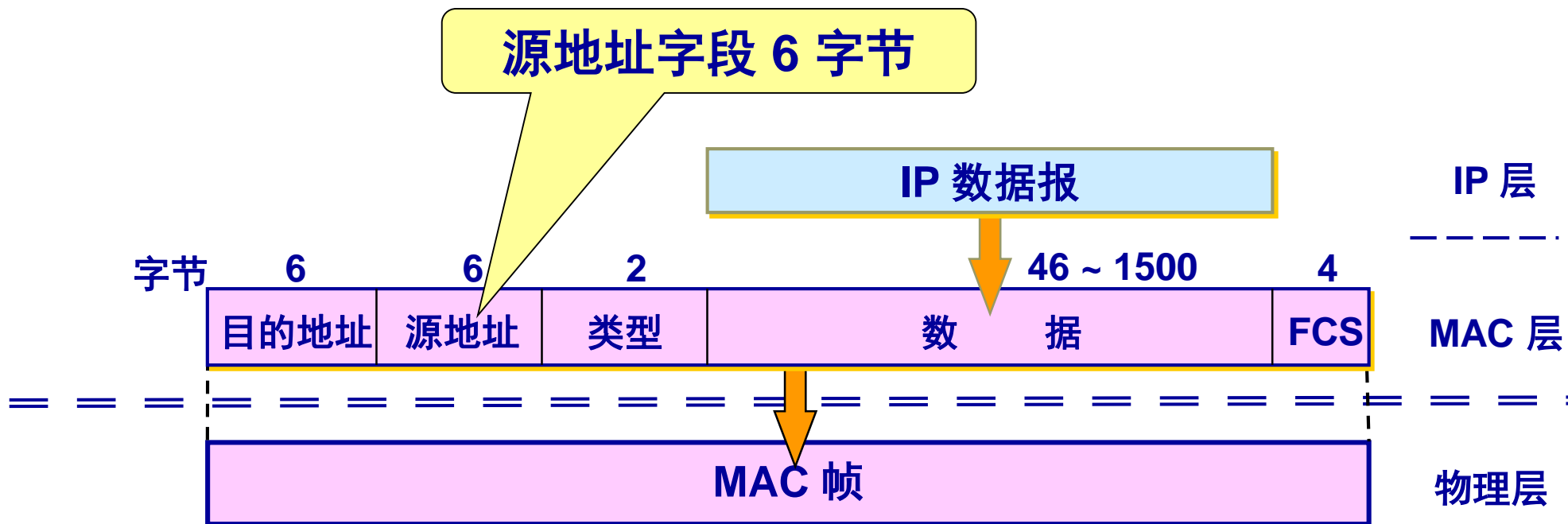


- 最常用的 MAC 帧是以太网 V2 的格式。

以太网 V2 的 MAC 帧格式



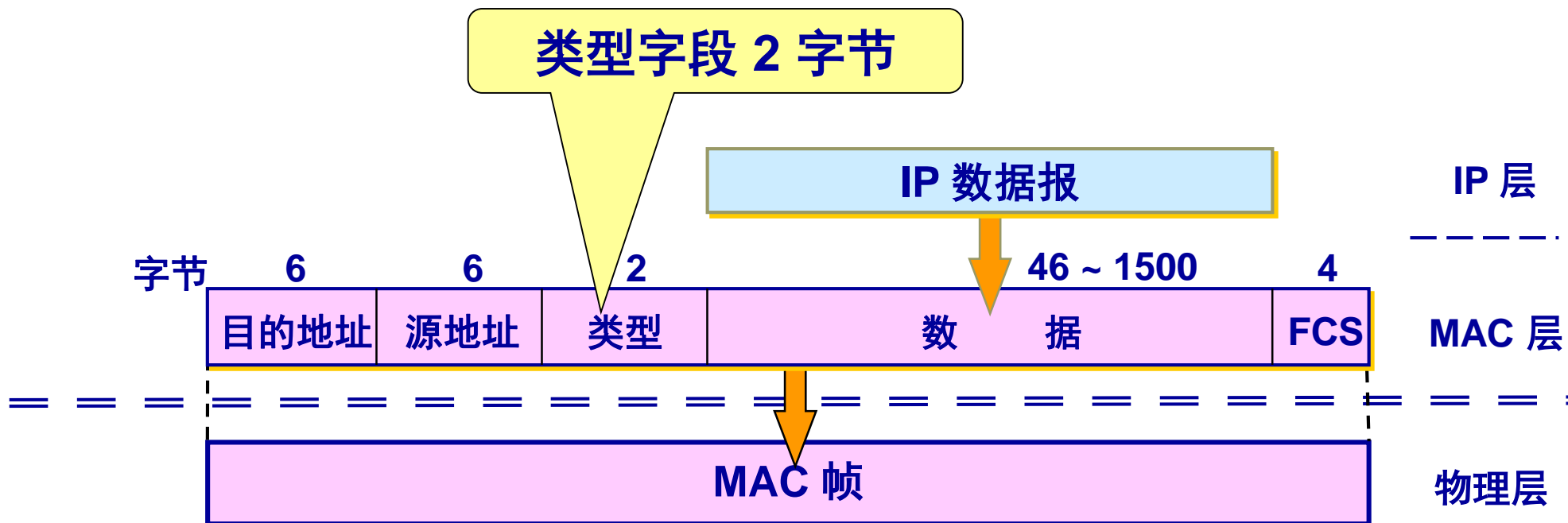
以太网 V2 的 MAC 帧格式



以太网 V2 的 MAC 帧格式



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。



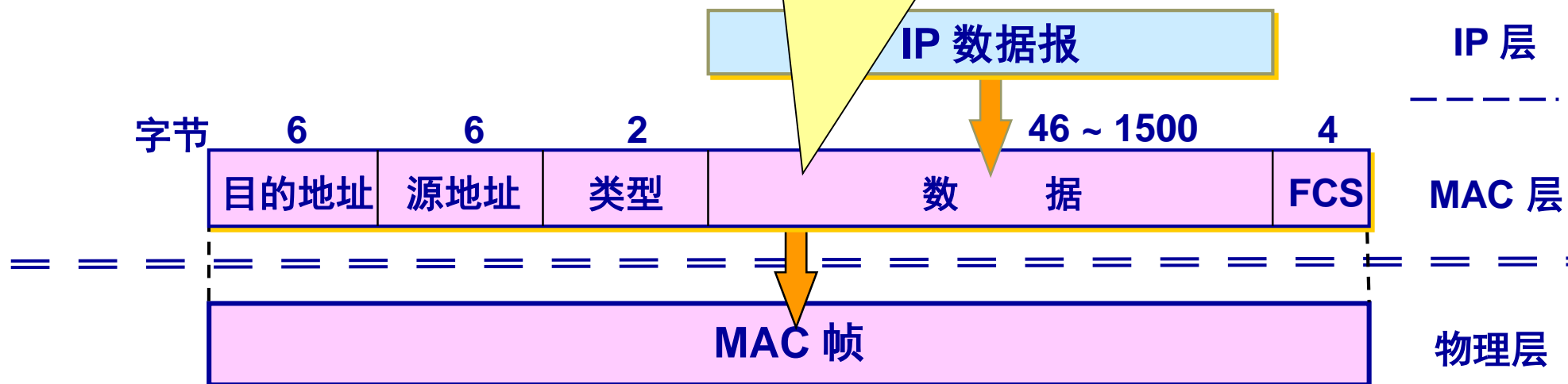
以太网 V2 的 MAC 帧格式



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)

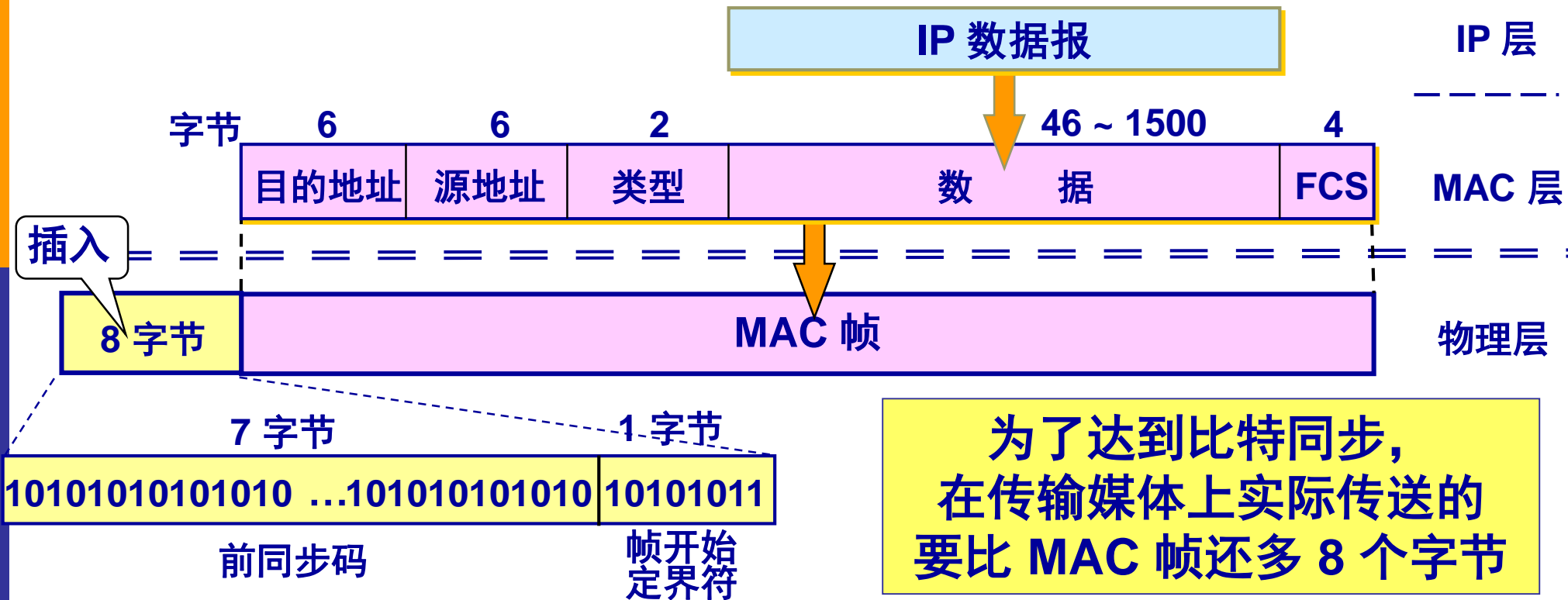
数据字段 46 ~ 1500 字节



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。



思考问题2:



- 为什么MAC帧格式没有结束符，但PPP却要有？

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。

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

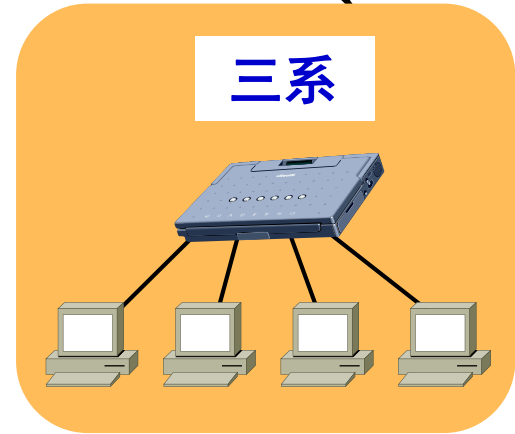
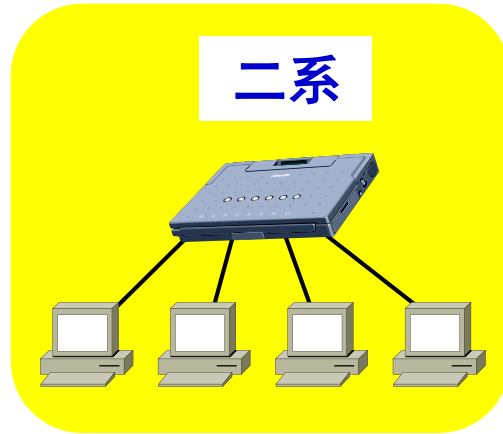
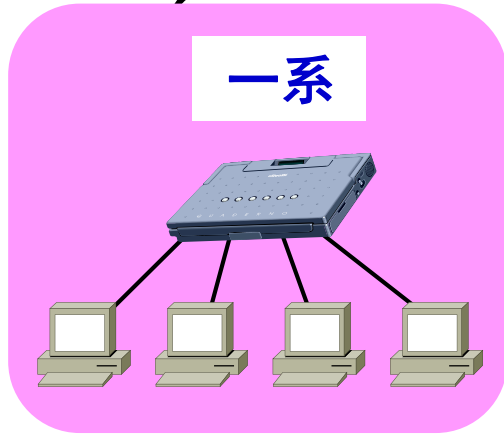
3.4.1 在物理层扩展以太网



■ 使用集线器扩展

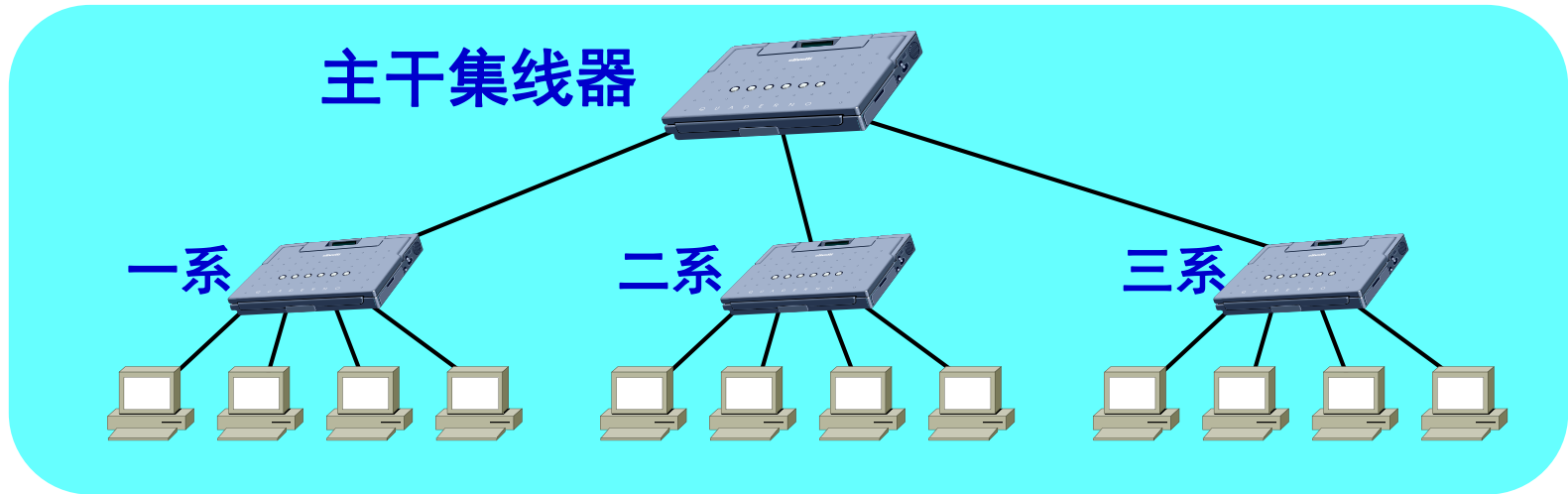
- 使用多个集线器可连成更大的、多级星形结构的以太网。
- 例如，一个学院的三个系各有一个 10BASE-T 以太网，可通过一个主干集线器把各系的以太网连接起来，成为一个更大的以太网。

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

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

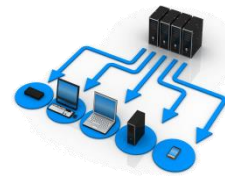
- 碰撞域增大了，但总的吞吐量并未提高。
- 如果不同的碰撞域使用不同的数据率，那么就不能用集线器将它们互连起来。

3.4.2 在数据链路层扩展以太网



- 扩展以太网早期使用**网桥**，现在使用以太网**交换机**。
 - **网桥**根据 MAC 帧的目的地址对收到的帧进行转发和过滤。
 - 当网桥收到一个帧时，并不是向所有的接口转发此帧，而是先检查此帧的目的 MAC 地址，然后再确定将该帧转发到哪一个接口，或把它丢弃。
- **交换机**，即以太网交换机 (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。

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



- **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传输速率 (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都是 10 Mbit/s。
- **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。**
- **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。**

2. 以太网交换机的自学习功能

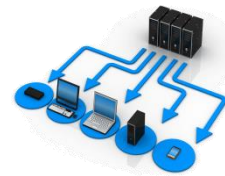


- 以太网交换机运行自学习算法自动维护**交换表**。
- 开始时，以太网交换机里面的交换表是空的。



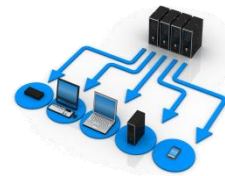
交换表一开始是空的

按照以下自学习算法 处理收到的帧和建立交换表



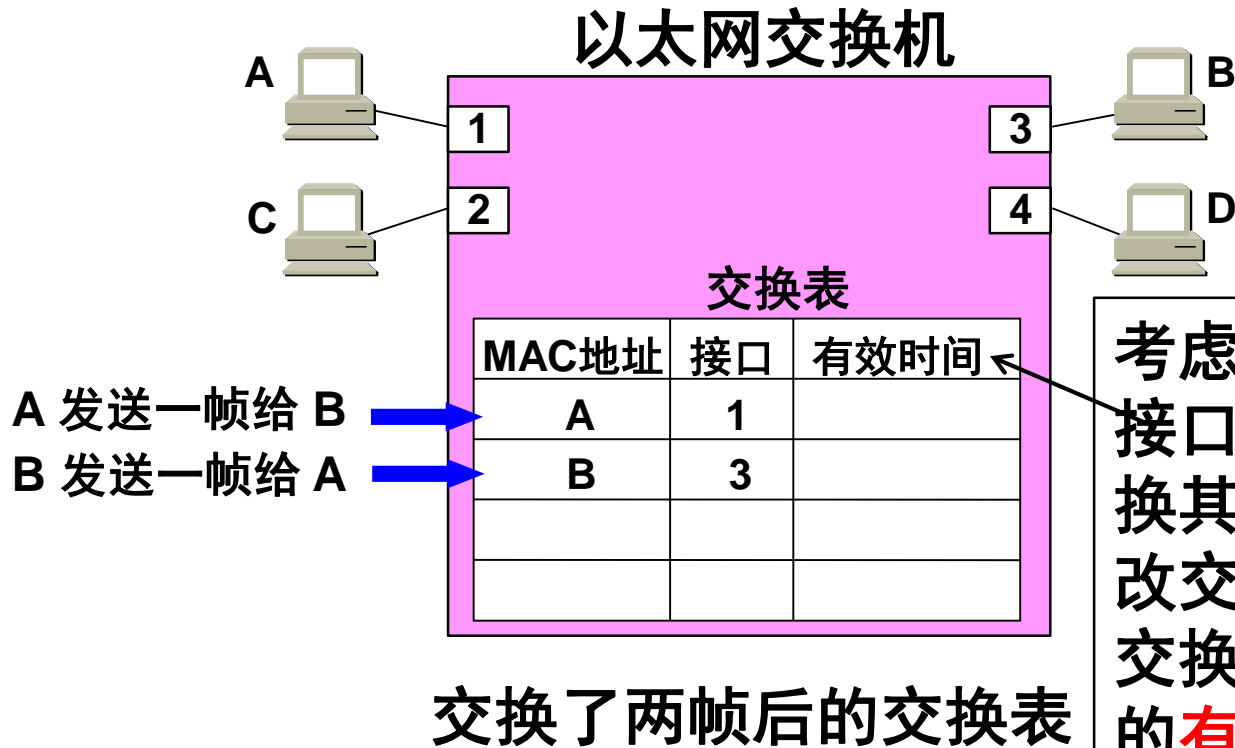
- A 先向 B 发送一帧，从接口 1 进入到交换机。
- 交换机收到帧后，**先查找交换表**，**没有查到**应从哪个接口转发这个帧。
- 交换机把这个帧的**源地址 A**和**接口1**写入交换表中，并向除接口1以外的所有的接口**广播**这个帧。
- C 和 D 将丢弃这个帧，因为目的地址不对。只 B 才收下这个目的地址正确的帧。这也称为**过滤**。
- 从新写入交换表的项目 (A, 1) 可以看出，以后不管从哪一个接口收到帧，只要其目的地址是A，就应当把收到的帧从接口1转发出去。

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



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。（默认300s）

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

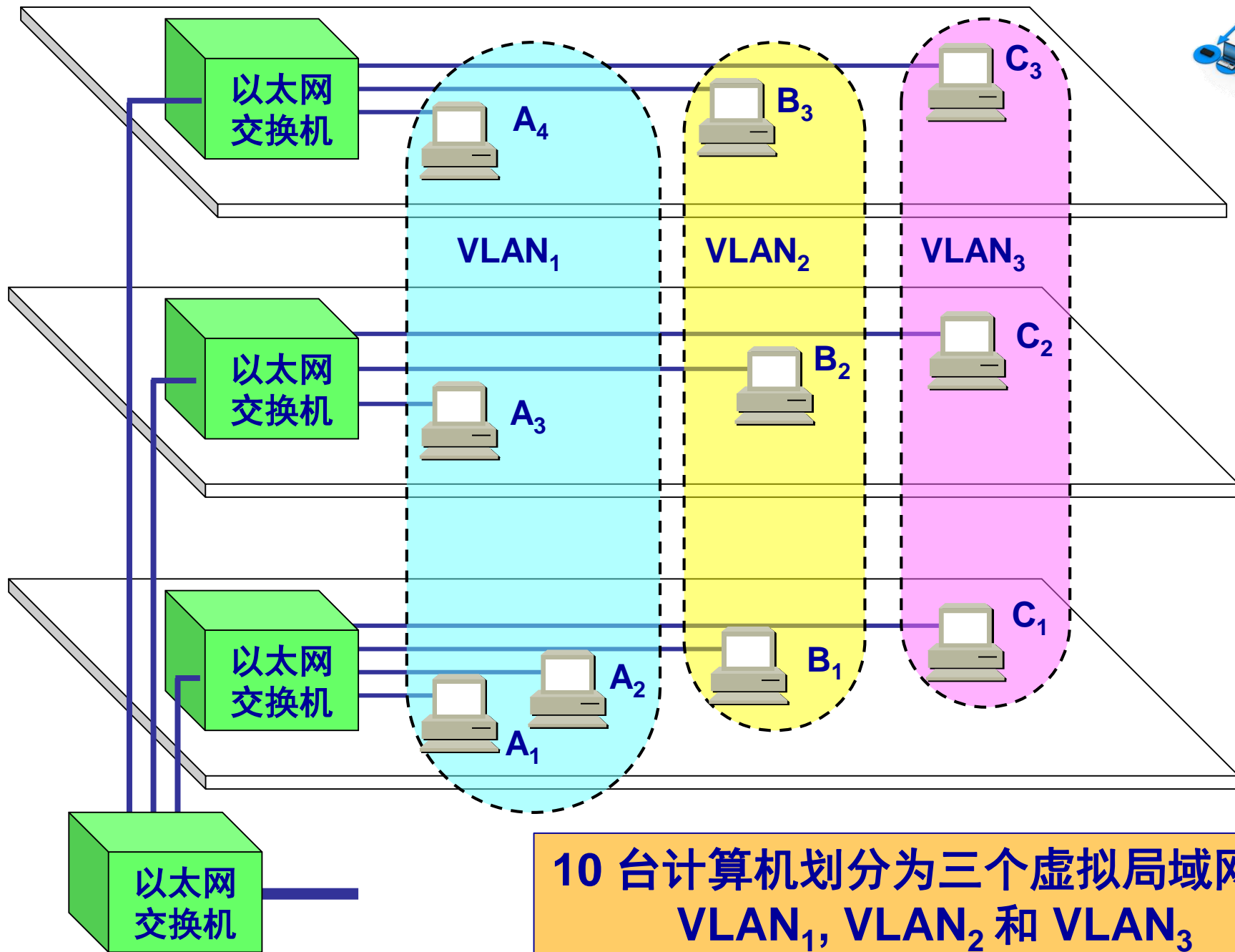


- 交换机收到一帧后先进行**自学习**。查找交换表中与收到帧的**源地址有无相匹配**的项目。
 - 如没有，就在交换表中增加一个项目（源地址、进入的接口和有效时间）。
 - 如有，则把原有的项目进行更新（进入的接口或有效时间）。
- **转发帧**。查找交换表中与收到帧的**目的地址有无相匹配**的项目。
 - 如没有，则向所有其他接口（进入的接口除外）转发。
 - 如有，则按交换表中给出的接口进行转发。
 - 若交换表中给出的接口就是该帧进入交换机的接口，则应丢弃这个帧（因为这时不需要经过交换机进行转发）。

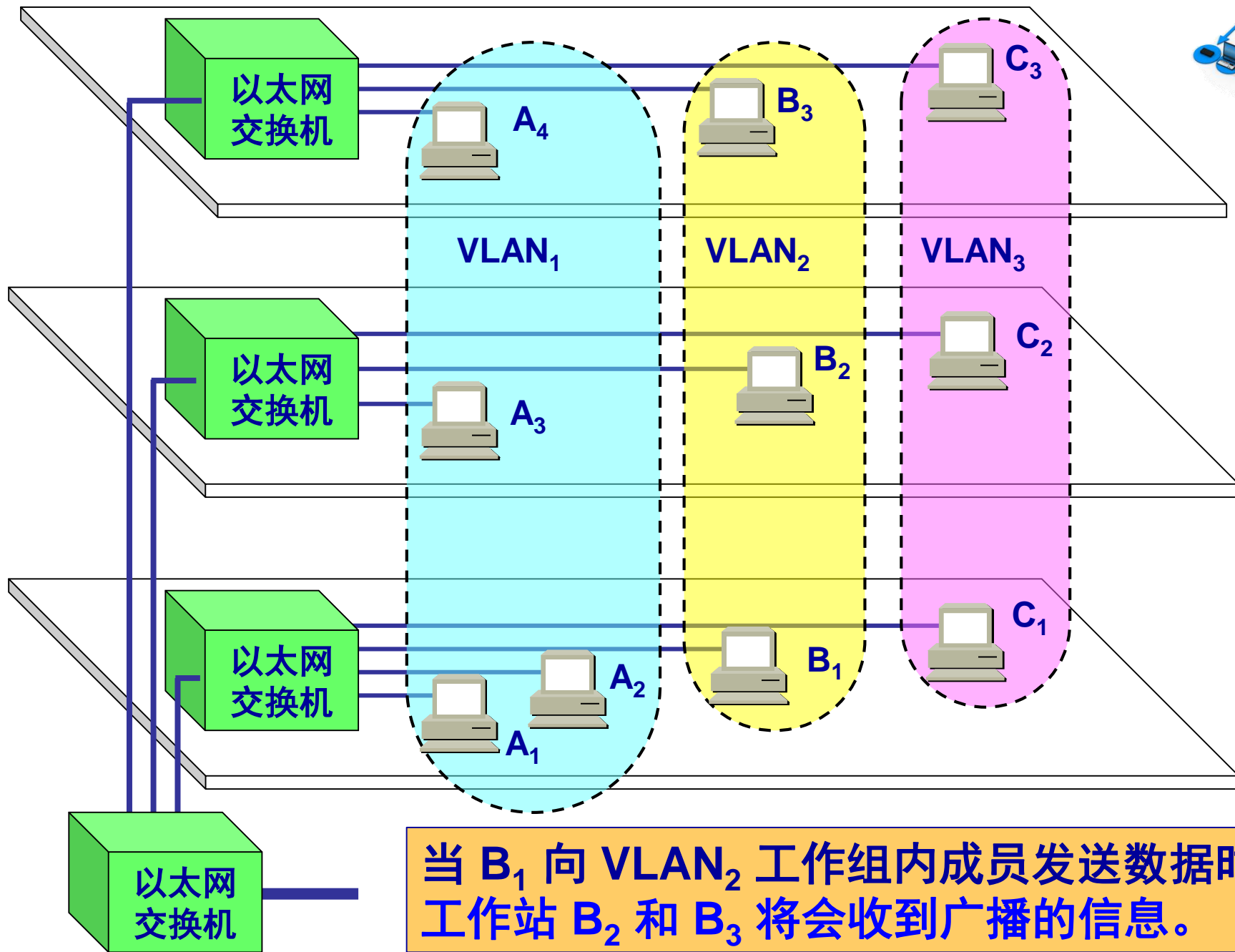
3.4.3 虚拟局域网



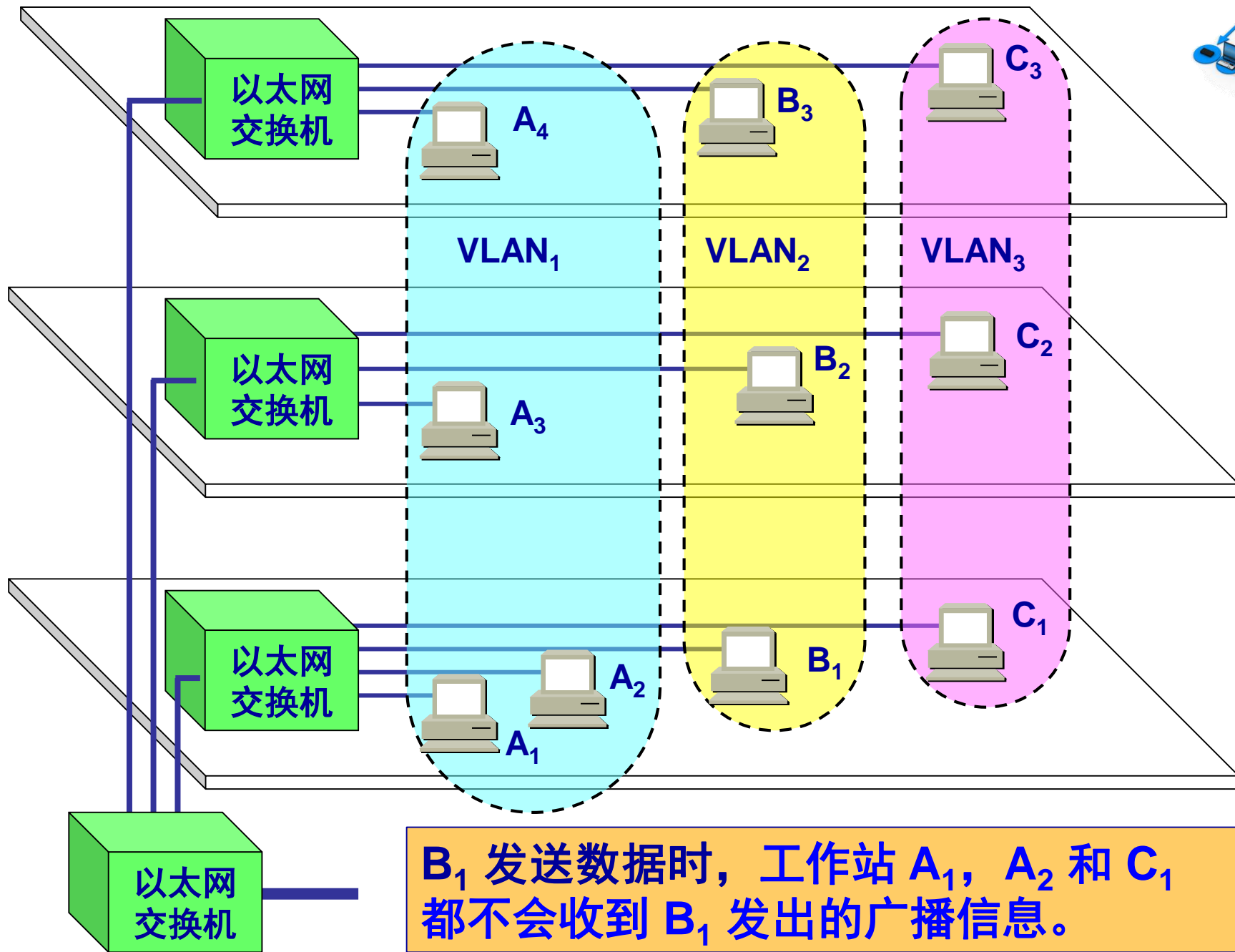
- 利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN (Virtual LAN)。
- **虚拟局域网 VLAN** 是由一些局域网网段构成的**与物理位置无关的逻辑组**，而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符，指明发送这个帧的计算机是属于哪一个 VLAN。
- **虚拟局域网其实只是局域网给用户提供服务，而并不是一种新型局域网。**
- 由于虚拟局域网是用户和网络资源的逻辑组合，因此可按照需要将有关设备和资源非常方便地重新组合，使用户从不同的服务器或数据库中存取所需的资源。

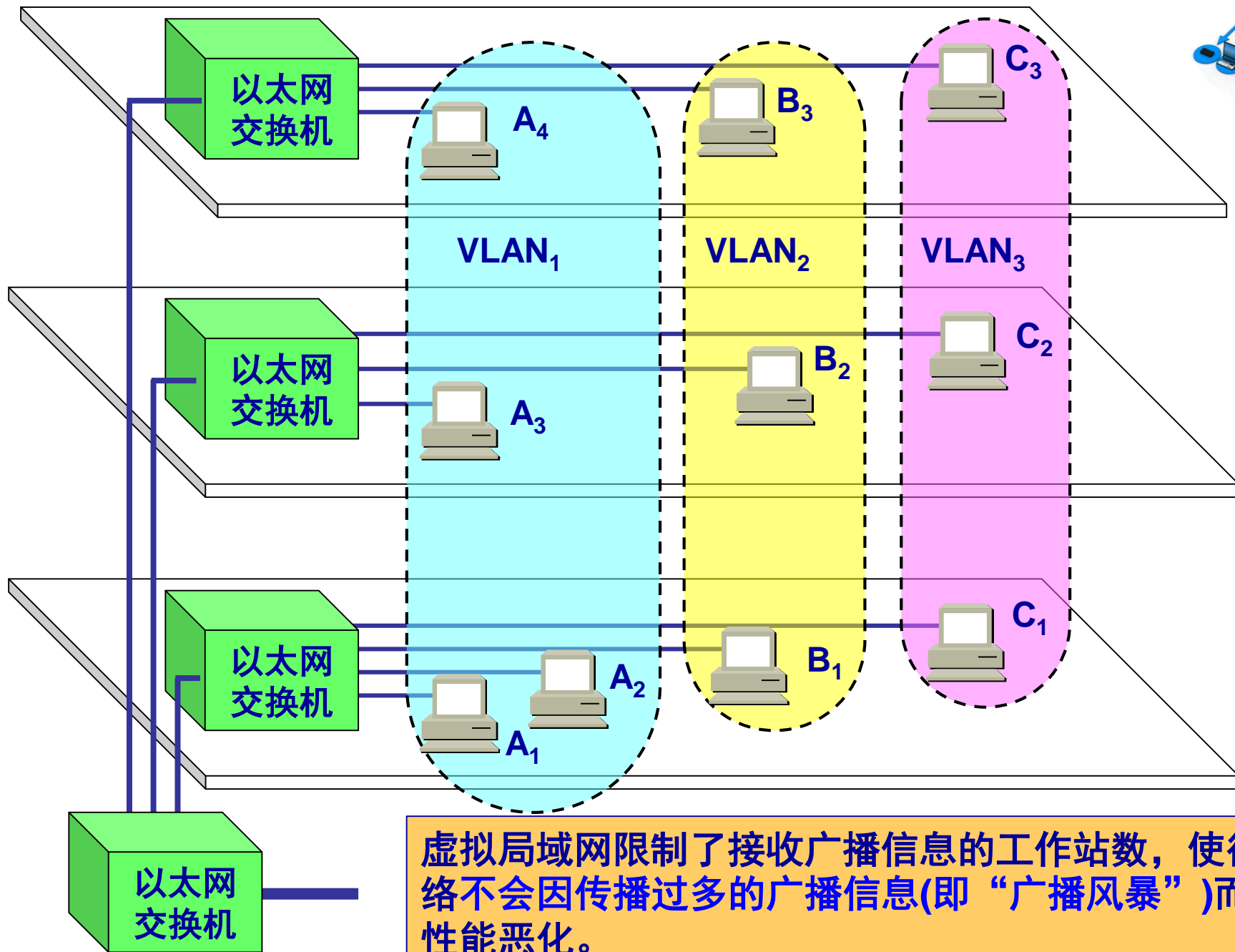


10 台计算机划分为三个虚拟局域网：
VLAN₁, VLAN₂ 和 VLAN₃



当 B₁ 向 VLAN₂ 工作组内成员发送数据时，工作站 B₂ 和 B₃ 将会收到广播的信息。





虚拟局域网使用的以太网帧格式



- 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**。

一些有趣的课外知识



- 现在以太网达到什么传输速度？ 100Gb/s
- PPPoE：将 PPP 帧再封装到以太网中来传输。
 - 现在的光纤宽带接入 FTTx 和 ADSL 都使用 PPPoE 进行连接的。
- 无线网络的CSMA/CA