

# 第3章 数据链路层



河北师范大学软件学院  
Software College of Hebei Normal University

# 回顾

- 数据 信号 模拟信号 模拟数据 基带信号
- 带通信号 数字信号 数字数据 码元 信道
- 单工通信 半双工通信 全双工通信
- 奈奎斯特Nyquist定理 香农Shannon公式
- 频分复用 时分复用 波分复用 CDMA
- CDMA计算

# 指引

## ➤ 数据链路层基本概念及基本问题

### ■ 基本概念

### ■ 三个基本问题

## ➤ 两种情况下的数据链路层

### ■ 使用点对点信道的数据链路层

### ■ 使用广播信道的数据链路层

## ➤ 以太网（以太网）

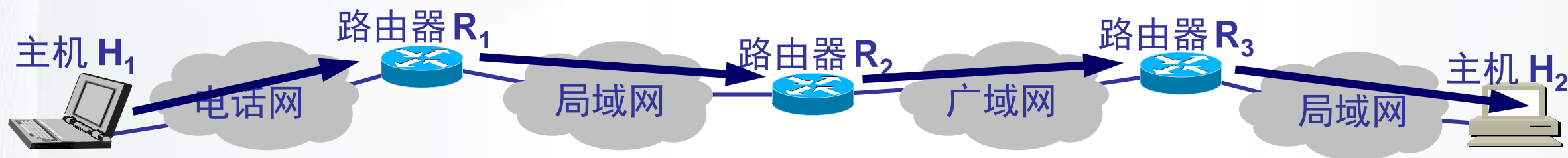
## ➤ 扩展以太网

## ➤ 高速以太网

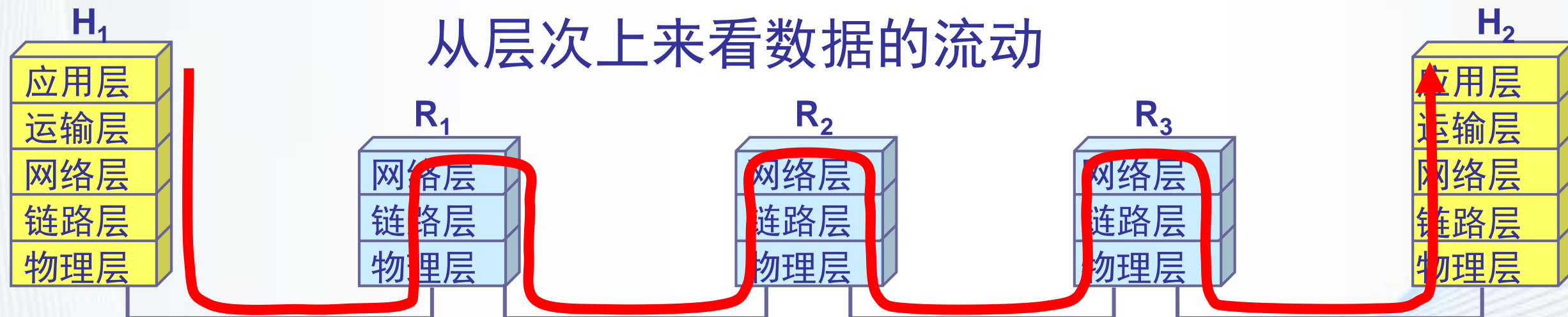


# 数据链路层的简单模型

主机  $H_1$  向  $H_2$  发送数据

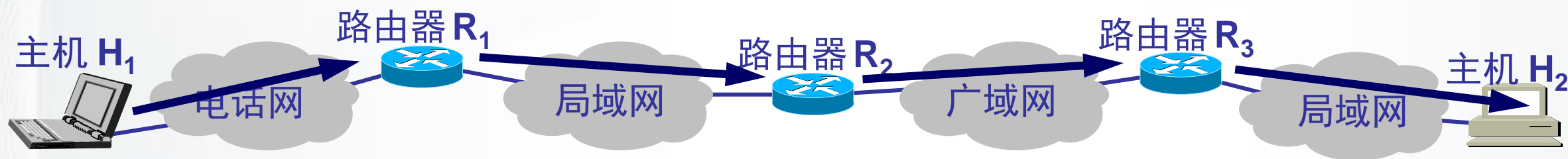


从层次上来看数据的流动

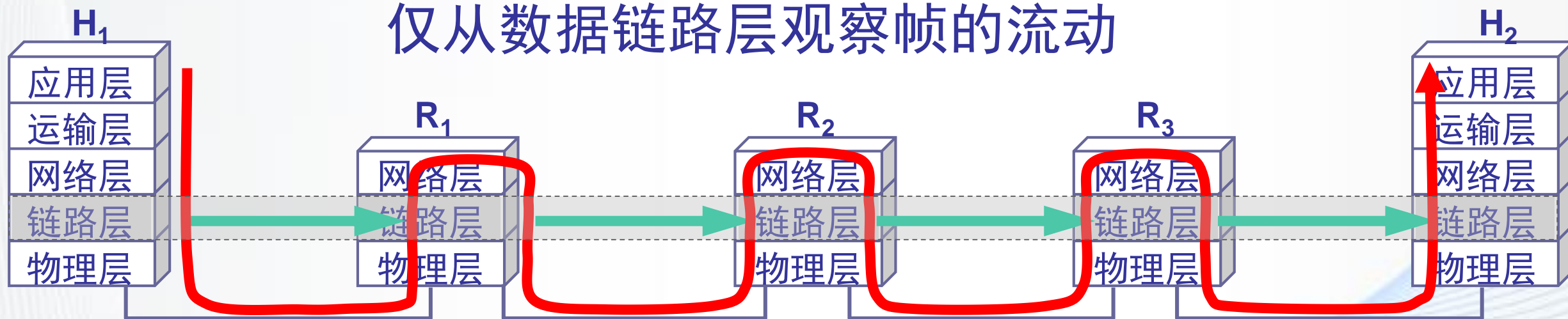


# 数据链路层的简单模型

主机  $H_1$  向  $H_2$  发送数据



仅从数据链路层观察帧的流动





# 数据链路层的信道类型

- 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。广播信道上连接的主机很多，因此必须使用专用的共享信道协议来协调这些主机的数据发送。

# 链路和数据链路

## ➤ 链路(link)

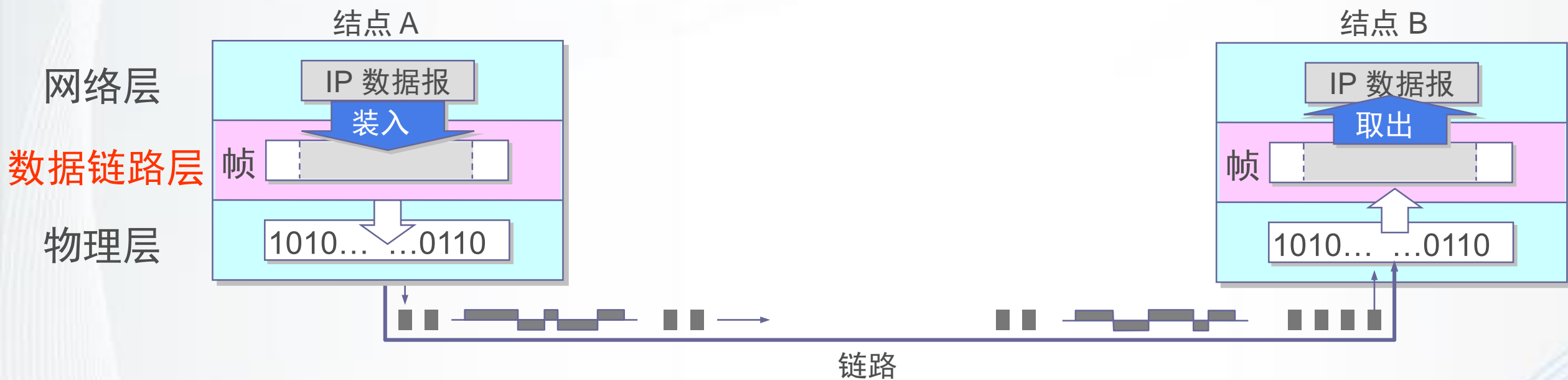
- 是一条点到点的物理线路段，中间没有任何其他的交换结点。
- 一条链路只是一条通路的一个组成部分。

## ➤ 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。

# 帧

## ➤数据链路层传送的是帧





# 数据链路层像个数字管道

- 常常在两个对等的的数据链路层之间画出一个数字管道，而在这条数字管道上传输的数据单位是帧。



# 指引

- 数据链路层基本概念及基本问题
  - 基本概念
  - 三个基本问题
- 两种情况下的数据链路层
  - 使用点对点信道的数据链路层
  - 使用广播信道的数据链路层
- 以太网局域网（以太网）
- 扩展以太网
- 高速以太网

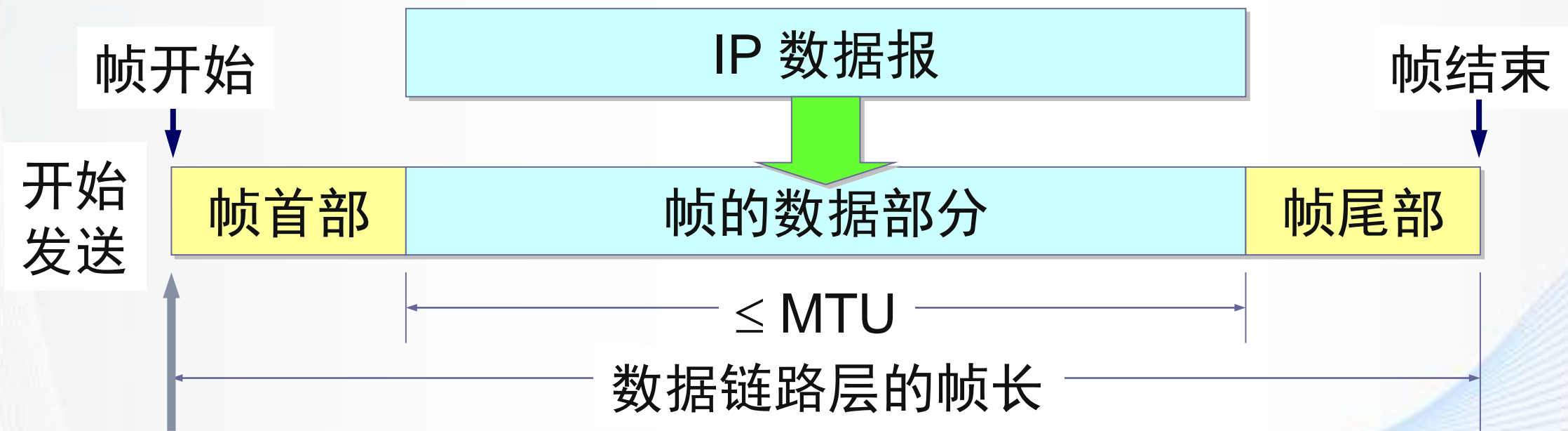


# 数据链路层的三个基本问题

- 封装成帧
- 透明传输
- 差错检测

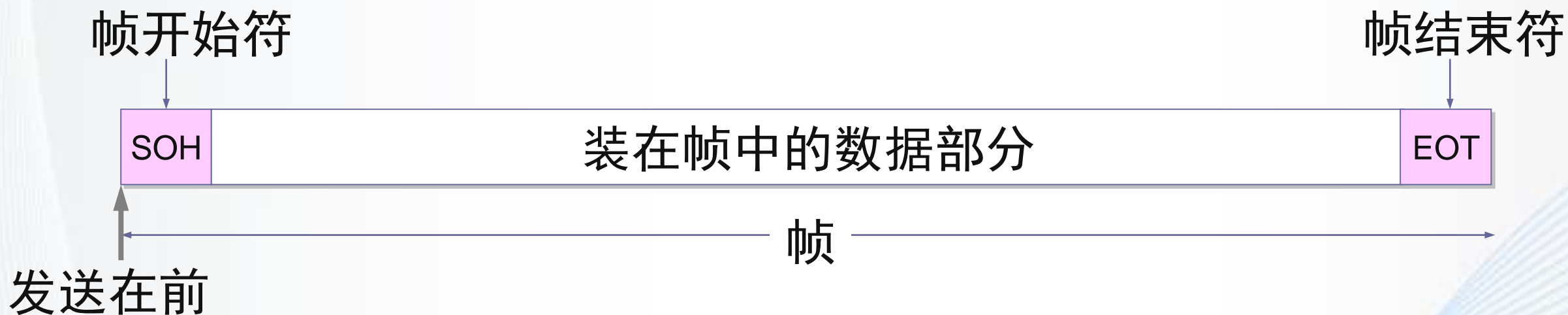
# 封装成帧

- 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。



# 用控制字符进行帧定界的方法举例

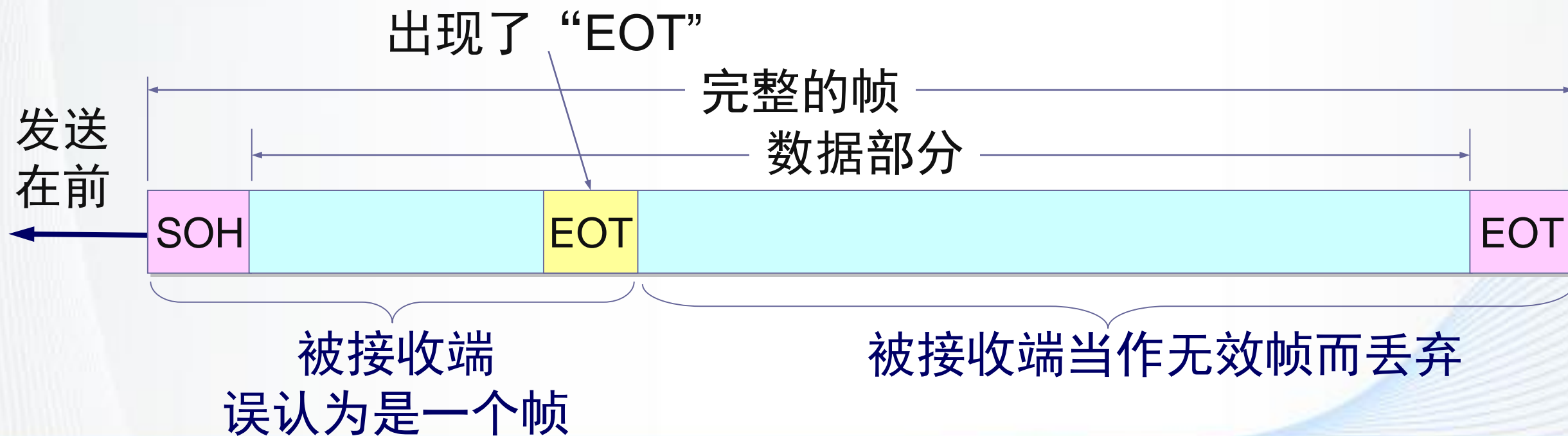
➤试想：帧还未发送完，发送端出了问题，只能重发该帧。  
接收端却收到了前面的“半截帧”，它会抛弃吗？为什么？





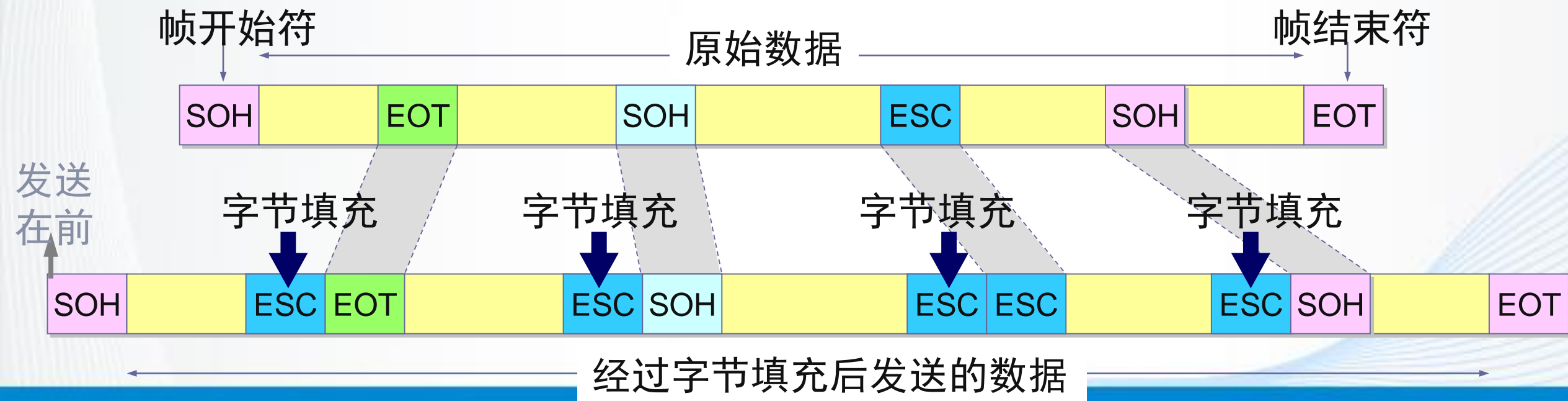
# 透明传输

- 若传输的数据是ASCII码中“可打印字符(共95个)”集时，一切正常。
- 若传输的数据不是仅由“可打印字符”组成时，就会出问题，如下图。



# 用字节填充法解决透明传输的问题

- 发送端的数据链路层在数据中出现控制字符“SOH”或“EOT”的前面插入一个转义字符“ESC” (其十六进制编码是 1B)。
- 字节填充(byte stuffing)或字符填充(character stuffing)——接收端的数据链路层在将数据送往网络层之前删除插入的转义字符。
- 如果转义字符也出现数据当中，那么应在转义字符前插入一个转义字符。当接收端收到连续的两个转义字符时，就删除其中前面的一个。



# 差错控制

- 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 CRC

- 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。
- 我们在 每组数据 的后面再添加供差错检测用的  $n$  位冗余码一起发送。

# 循环冗余检验 CRC

## ➤ 冗余码的计算

- 用二进制的模 2 运算进行  $2^n$  乘  $M$  的运算，这相当于在  $M$  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  $R$ ，余数  $R$  比除数  $P$  少 1 位，即  $R$  是  $n$  位。



# 冗余码的计算举例

- $M = 101001$  ( $k = 6$ ) , 除数  $P = 1101$  ( $n = 3$ )
- 被除数是  $2^n M = 101001000$ 。
- 模 2 运算的结果是：商  $Q = 110101$ , 余数  $R = 001$ 。
- 把余数  $R$  作为冗余码添加在数据  $M$  的后面发送出去。发送的数据是：  $2^n M + R$ , 即：  $101001001$ , 共  $(k + n)$  位。
- 注：可以用生成多项式来表示循环冗余的除数，例  $P(X) = X^3 + X^2 + 1$  可以表示  $1101$  这个除数。
- 练：  $101101$  的生成多项式  $P(X) = ?$

# 循环冗余检验的计算过程

$$\begin{array}{r} 110101 \leftarrow Q \text{ (商)} \\ P \text{ (除数)} \rightarrow 1101 \overline{) 101001000 \leftarrow 2^n M \text{ (被除数)}} \\ \underline{1101} \phantom{0000000} \\ 1110 \phantom{000000} \\ \underline{1101} \phantom{00000} \\ 0111 \phantom{00000} \\ \underline{0000} \phantom{00000} \\ 1110 \phantom{00000} \\ \underline{1101} \phantom{00000} \\ 0110 \phantom{00000} \\ \underline{0000} \phantom{00000} \\ 1100 \phantom{00000} \\ \underline{1101} \phantom{00000} \\ 001 \leftarrow R \text{ (余数), 作为 FCS} \end{array}$$

# 帧检验序列 FCS

- 在数据后面添加上的冗余码称为帧检验序列 FCS (Frame Check Sequence)。
- 循环冗余检验 CRC 和帧检验序列 FCS并不等同。
  - CRC 是一种常用的检错方法，而 FCS 是添加在数据后面的冗余码。
  - FCS 可以用 CRC 这种方法得出，但 CRC 并非用来获得 FCS 的唯一方法。

# 接收端对收到的每一帧进行CRC检验

## ➤检验：

- 若得出的余数  $R = 0$ ，则判定这个帧没有差错，就接受(accept)。
- 若余数  $R \neq 0$ ，则判定这个帧有差错，就丢弃。

## ➤特点：

- 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。

# 小结：CRC差错检测技术

- 仅用循环冗余检验 CRC 差错检测技术只能做到无差错接受(accept)。
  - “无差错接受”是指：“凡是接受的帧（即不包括丢弃的帧），我们都能以非常接近于 1 的概率认为这些帧在传输过程中没有产生差错”。也就是说：“凡是接收端数据链路层接受的帧都没有传输差错”（有差错的帧就丢弃而不接受）。
- 要做到“可靠传输”（即发送什么就收到什么）就必须再加上确认和重传机制。
  - 考虑：帧重复、帧丢失、帧乱序的情况
- 可以说“CRC是一种无比特差错，而不是无传输差错的检测机制”。
  - OSI/RM模型的观点：数据链路层要做成无传输差错的！但这种理念目前不被接受！

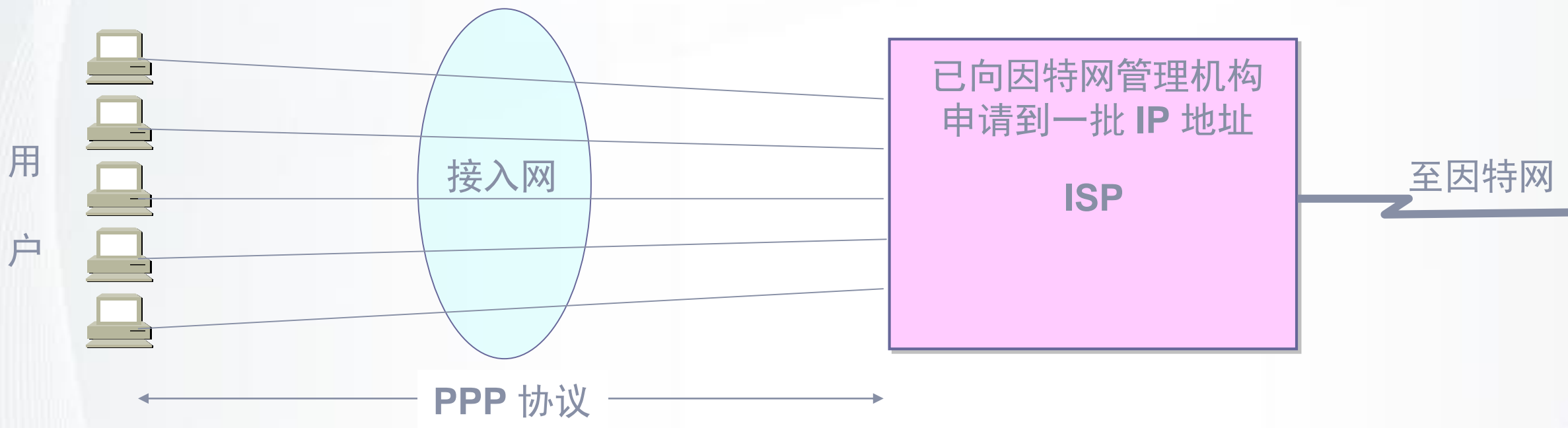


# 指引

- 数据链路层基本概念及基本问题
  - 基本概念
  - 三个基本问题
- 两种情况下的数据链路层
  - 使用点对点信道的数据链路层
  - 使用广播信道的数据链路层
- 以太网局域网（以太网）
- 扩展以太网
- 高速以太网



# PPP协议使用场合



# PPP协议

- 现在全世界使用得最多的数据链路层协议是点对点协议 PPP (Point-to-Point Protocol)。
- 用户使用拨号电话线接入因特网时，一般都是使用 PPP 协议。

# PPP协议

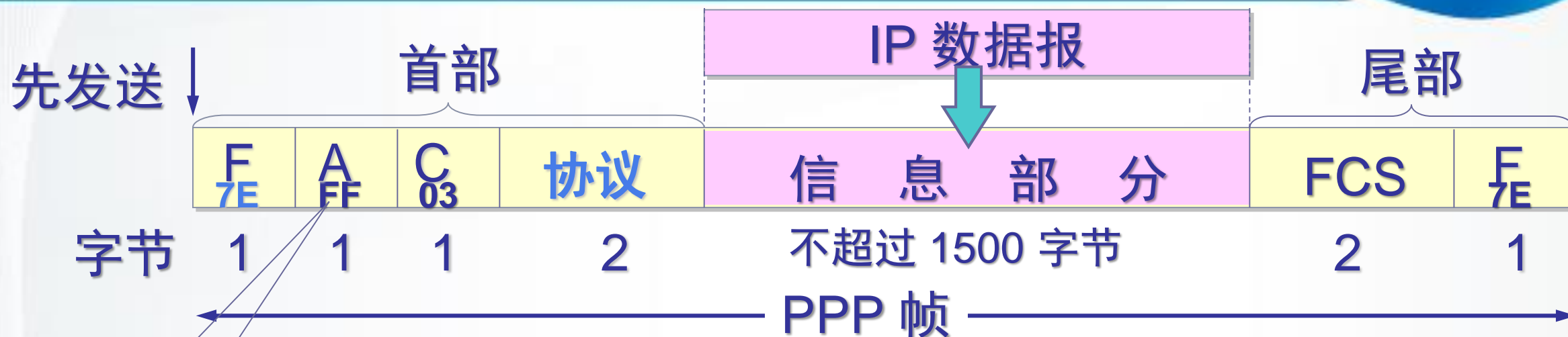
## ➤ PPP协议应该满足的要求：

- 简单——这是首要的要求
- 封装成帧
- 透明性
- 多种网络层协议
- 多种类型链路
- 差错检测
- 检测连接状态
- 最大传送单元
- 网络层地址协商
- 数据压缩协商

## • PPP协议不需要满足的要求：

- 纠错
- 流量控制
- 序号
- 多点线路
- 半双工或单工链路

# PPP协议帧格式



FF、03是固定的

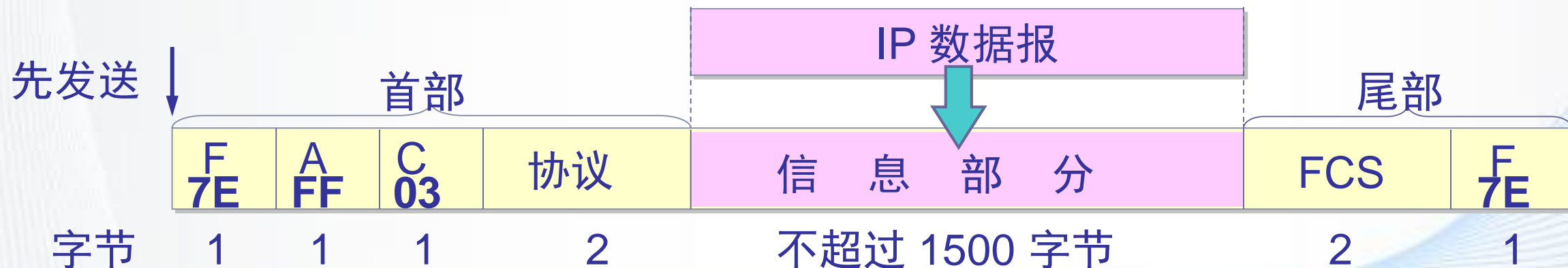
## ► PPP 有一个 2 个字节的协议字段。

- 0x0021 — PPP 帧的信息字段就是 IP 数据报。
- 0xC021 — 信息字段是 PPP 链路控制数据。
- 0x8021 — 表示这是网络控制数据。
- 0xC023 — 信息字段是安全性认证 PAP。
- 0xC025 — 信息字段是 LQR。
- 0xC223 — 信息字段是安全性认证 CHAP。



# PPP协议帧格式

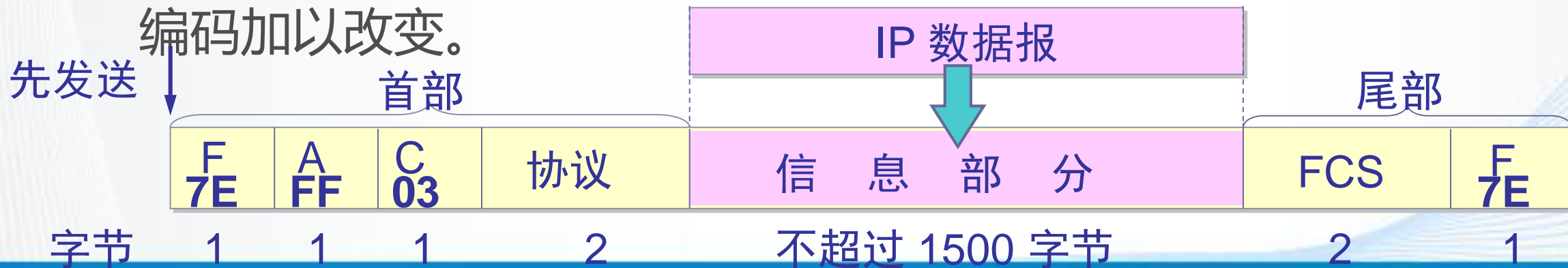
- 标志字段 F = 0x7E （符号 “0x” 表示后面的字符是用十六进制表示。十六进制的 7E 的二进制表示是 01111110）。
- 地址字段 A 只置为 0xFF。地址字段实际上并不起作用。
- 控制字段 C 通常置为 0x03。
- PPP 是面向字节的，所有的 PPP 帧的长度都是整数字节。



# 字节填充

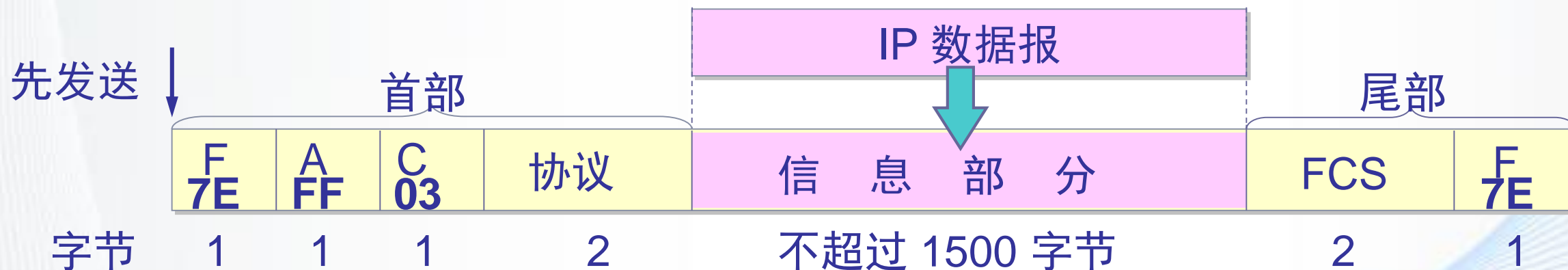
➤问题：信息字段中出现了标志字段的值，可能会被误认为是“标志”，怎么办？

- 将信息字段中出现的每个 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)。
- 若信息字段中出现 ASCII 码的控制字符（即数值小于 0x20 的字符），则在该字符前面要加入一个 0x7D 字节，同时将该字符的编码加以改变。



# 零比特填充方法

- PPP 协议用在 SONET/SDH 链路时，是使用同步传输（一连串的比特连续传送）。这时 PPP 协议采用零比特填充方法来实现透明传输。
- 在发送端，只要发现有 5 个连续 1，则立即填入一个 0。接收端对帧中的比特流进行扫描。每当发现 5 个连续 1 时，就把这 5 个连续 1 后的一个 0 删除。



# 零比特填充法

信息字段中出现了和  
标志字段 F 完全一样  
的 8 比特组合

发送端在 5 个连 1 之后  
填入 0 比特再发送出去

在接收端把 5 个连 1  
之后的 0 比特删除

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

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

发送端填入 0 比特

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

接收端删除填入的 0 比特

# 不使用序号和确认机制

- PPP 协议之所以不使用序号和确认机制是出于以下的考虑：
  - 在数据链路层出现差错的概率不大时，使用比较简单的 PPP 协议较为合理。
  - 在因特网环境下，PPP 的信息字段放入的数据是 IP 数据报。数据链路层的可靠传输并不能够保证网络层的传输也是可靠的。
  - 帧检验序列 FCS 字段可保证无差错接受。

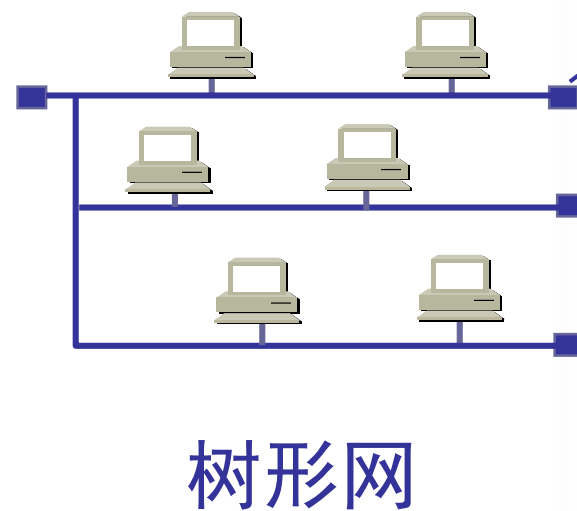
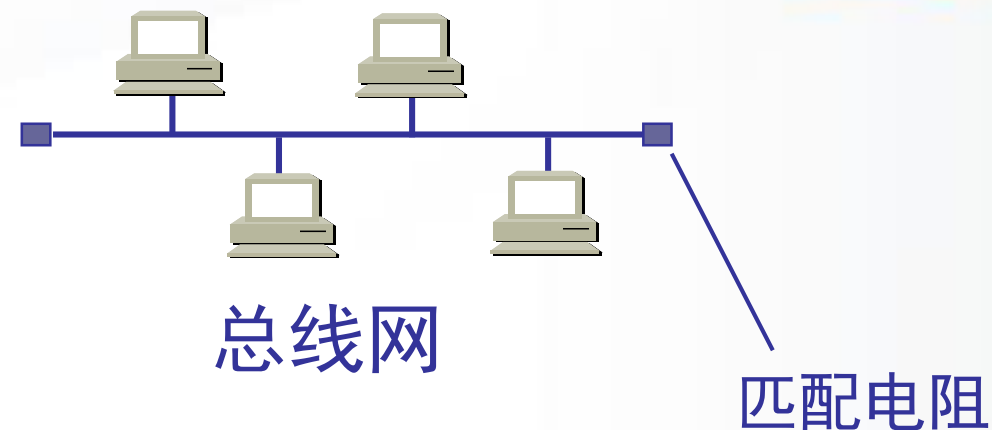
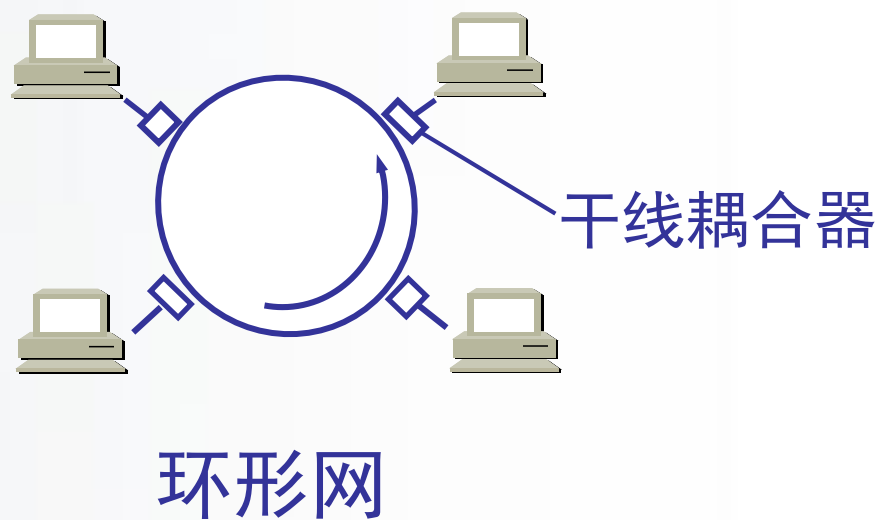
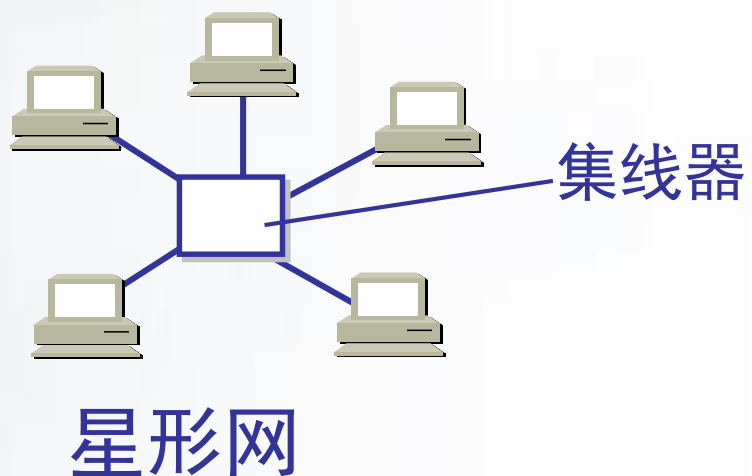
# 指引

- 数据链路层基本概念及基本问题
  - 基本概念
  - 三个基本问题
- 两种情况下的数据链路层
  - 使用点对点信道的数据链路层
  - 使用广播信道的数据链路层
- 以太局域网（以太网）
- 扩展以太网
- 高速以太网





# 局域网的拓扑



# 局域网的特点与优点

- 局域网最主要的特点是：网络为一个单位所拥有，且地理范围和站点数目均有限。
- 局域网具有如下的一些主要优点：
  - 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。
  - 提高了系统的可靠性、可用性和生存性。

# 共享通信媒体

## ➤静态划分信道

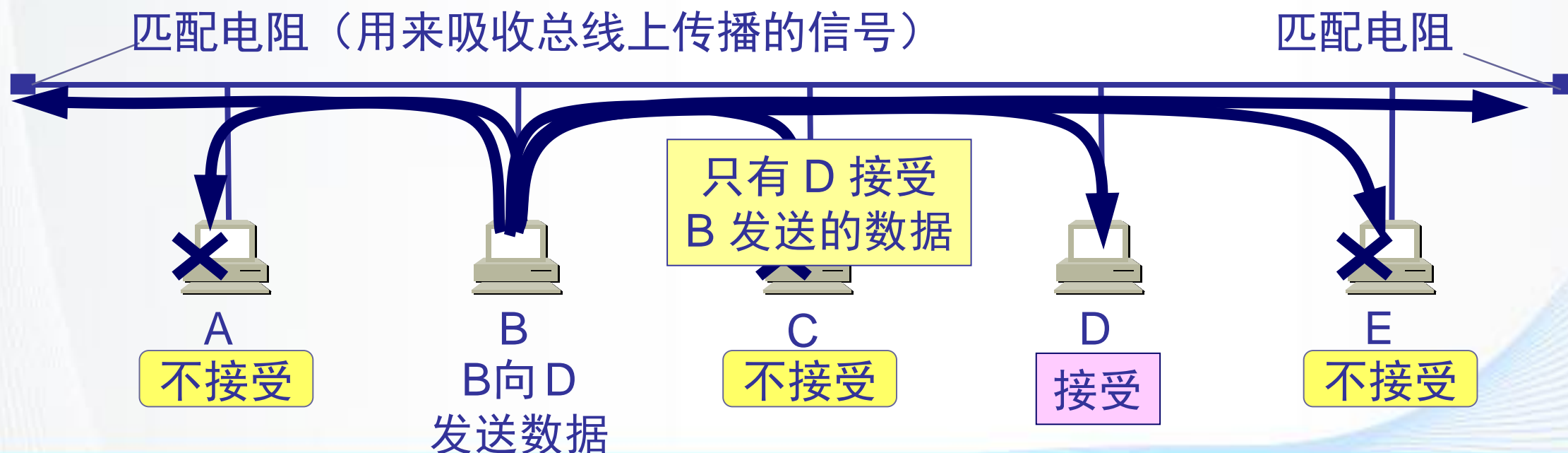
- 频分复用
- 时分复用
- 波分复用
- 码分复用

## ➤动态媒体接入控制（多点接入）

- 随机接入（主要被以太网采用！）
- 受控接入，如多点线路探询(polling)，或轮询。（目前已不被采用）

# 认识以太网

- 最初的以太网是将许多计算机都连接到一根总线上。当初认为这样的连接方法既简单又可靠，因为总线上没有有源器件。



# 认识以太网

- 总线上的每一个工作的计算机都能检测到 B 发送的数据信号。
- 由于只有计算机 D 的地址与数据帧首部写入的地址一致，因此只有 D 才接收这个数据帧。
- 其他所有的计算机（A, C 和 E）都检测到不是发送给它们的数据帧，因此就丢弃这个数据帧而不能够收下来。
- 具有广播特性的总线上实现了一对一的通信。

# 载波监听多点接入/碰撞检测 CSMA/CD

- CSMA/CD 表示 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。
- “载波监听”就是用电子技术检测总线上有没有其他计算机发送的数据信号。



# 碰撞检测

- “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。
  - 当几个站同时在总线上发送数据时，总线上的信号电压摆动值将会增大（互相叠加）。
  - 当一个站检测到的信号电压摆动值超过一定的门限值时，就认为总线上至少有两个站同时在发送数据，表明产生了碰撞。
  - 所谓“碰撞”就是发生了冲突。因此“碰撞检测”也称为“冲突检测”。

# 碰撞检测

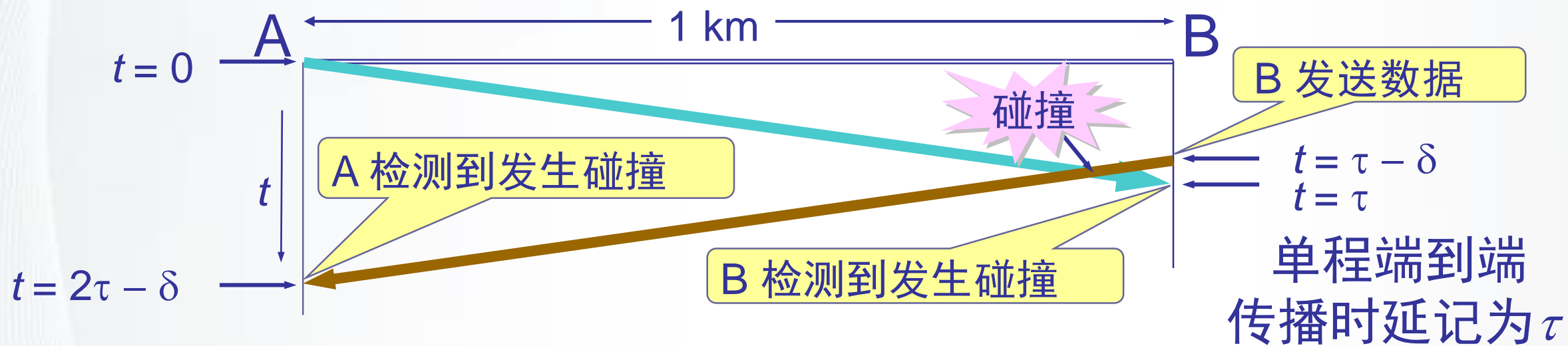
## ➤检测到碰撞后

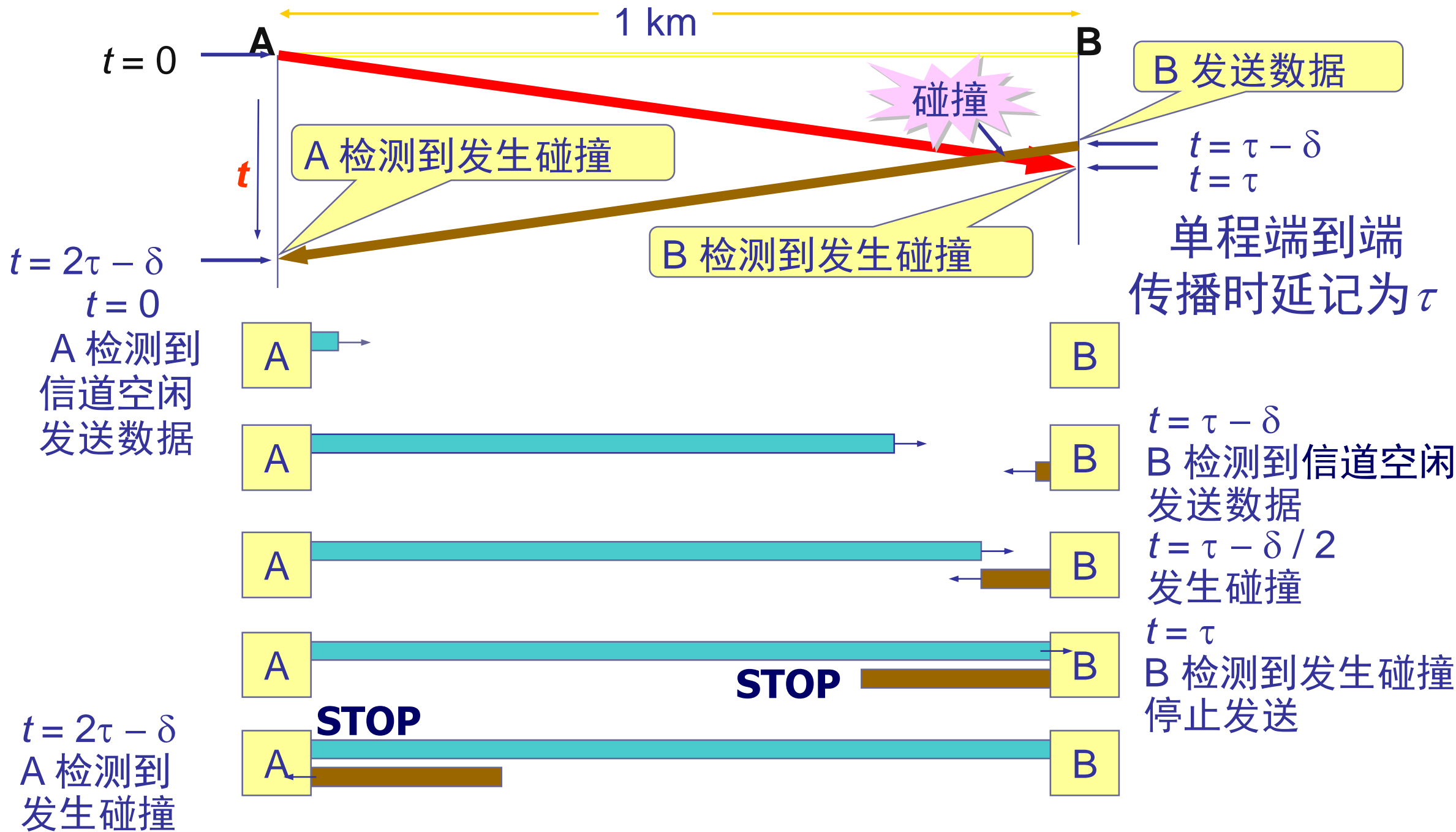
- 在发生碰撞时，总线上传输的信号产生了严重的失真，无法从中恢复出有用的信息来。
- 每一个正在发送数据的站，一旦发现总线上出现了碰撞，就要立即停止发送，免得继续浪费网络资源，然后等待一段随机时间后再次发送。

# 电磁波在总线上的有限传播速率的影响

- 当某个站监听到总线是空闲时，也可能总线并非真正是空闲的。
- A 向 B 发出的信息，要经过一定的时间后才能传送到 B。
- B 若在 A 发送的信息到达 B 之前发送自己的帧(因为这时 B 的载波监听检测不到 A 所发送的信息)，则必然要在某个时间和 A 发送的帧发生碰撞。
- 碰撞的结果是两个帧都变得无用。

# 传播时延对载波监听的影响





# 重要特性

- 使用 CSMA/CD 协议的以太网不能进行全双工通信而只能进行双向交替通信（半双工通信）。
- 每个站在发送数据之后的一小段时间内，存在着遭遇碰撞的可能性。
- 这种发送的不确定性使整个以太网的平均通信量远小于以太网的最高数据率。



# 争用期

- 最先发送数据帧的站，在发送数据帧后至多经过时间  $2\tau$  （两倍的端到端时延）就可知道发送的数据帧是否遭受了碰撞。
- 经过争用期这段时间还没有检测到碰撞，才能肯定这次发送不会发生碰撞。
- 以太网的争用期
  - 以太网的端到端往返时延  $2\tau$  称为争用期，或碰撞窗口。通常，取  $51.2\ \mu\text{s}$  为争用期的长度。
  - 对于  $10\ \text{Mbit/s}$  以太网，在争用期内可发送  $512\ \text{bit}$ ，即  $64\ \text{字节}$ 。
  - 以太网在发送数据时，若前  $64\ \text{字节}$  未发生冲突，则后续的数据就不会发生冲突。

# 最短有效帧长

## ➤最短有效帧长

- 如果发生冲突，就一定是在发送的前 64 字节之内。
- 由于一检测到冲突就立即中止发送，这时已经发送出去的数据一定小于 64 字节。
- 以太网规定了最短有效帧长为 64 字节，凡长度小于 64 字节的帧都是由于冲突而异常中止的无效帧。

# 二进制指数类型退避算法

- 发生碰撞的站在停止发送数据后，要推迟（退避）一个随机时间才能再发送数据。
  - 确定基本退避时间，一般是取为争用期  $2\tau$ 。
  - 定义参数  $k$  ,  $k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$
  - 从整数集合  $[0, 1, \dots, (2^k - 1)]$  中随机地取出一个数，记为  $r$ 。重传所需的时延就是  $r$  倍的基本退避时间。
  - 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告。
- P88例子

# 指引

## ➤ 数据链路层基本概念及基本问题

- 基本概念
- 三个基本问题

## ➤ 两种情况下的数据链路层

- 使用点对点信道的数据链路层
- 使用广播信道的数据链路层

## ➤ 以太网（以太网）

## ➤ 扩展以太网

## ➤ 高速以太网



# 指引

## ➤ 以太网局域网（以太网）

- 概述
- 拓扑
- 信道利用率
- MAC层

# 以太网的两个标准

- DIX Ethernet V2 是世界上第一个局域网产品（以太网）的规约。
- IEEE 的 802.3 标准。
- DIX Ethernet V2 标准与 IEEE 的 802.3 标准只有很小的差别，因此可以将 802.3 局域网简称为“以太网”。
- 严格说来，“以太网”应当是指符合 DIX Ethernet V2 标准的局域网



# 以太网与数据链路层的两个子层

➤为了使数据链路层能更好地适应多种局域网标准，802 委员会就将局域网的数据链路层拆成两个子层：

- 逻辑链路控制 LLC (Logical Link Control)子层
- 媒体接入控制 MAC (Medium Access Control)子层

➤与接入到传输媒体有关的内容都放在 MAC子层，而 LLC 子层则与传输媒体无关，不管采用何种协议的局域网对 LLC 子层来说都是透明的。

➤由于 TCP/IP 体系经常使用的局域网是 DIX Ethernet V2 而不是 802.3 标准中的几种局域网，因此现在 802 委员会制定的逻辑链路控制子层 LLC（即 802.2 标准）的作用已经不大了。

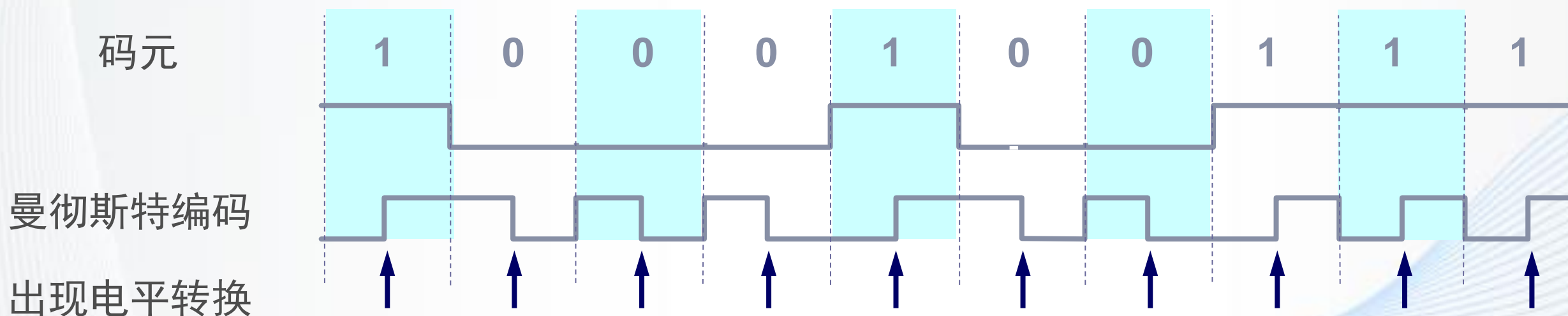
➤很多厂商生产的适配器上就仅装有 MAC 协议而没有 LLC 协议。

# 以太网提供的服务

- 以太网提供的服务是不可靠的交付，即尽最大努力的交付。
- 当目的站收到有差错的数据帧时就丢弃此帧，其他什么也不做。差错的纠正由高层来决定。
- 如果高层发现丢失了一些数据而进行重传，但以太网并不知道这是一个重传的帧，而是当作一个新的数据帧来发送。

# 曼彻斯特编码

➤以太网发送的数据都使用曼彻斯特编码。为什么要编码？  
曼彻斯特编码：以半个符号宽的先负后正（1、0）的脉冲代表数字信号1，而以半个符号的先正后负的脉冲（0、1）代表数字信号0。目前最广泛应用的以太局域网，在数据传输时就采用这种数字编码方式。



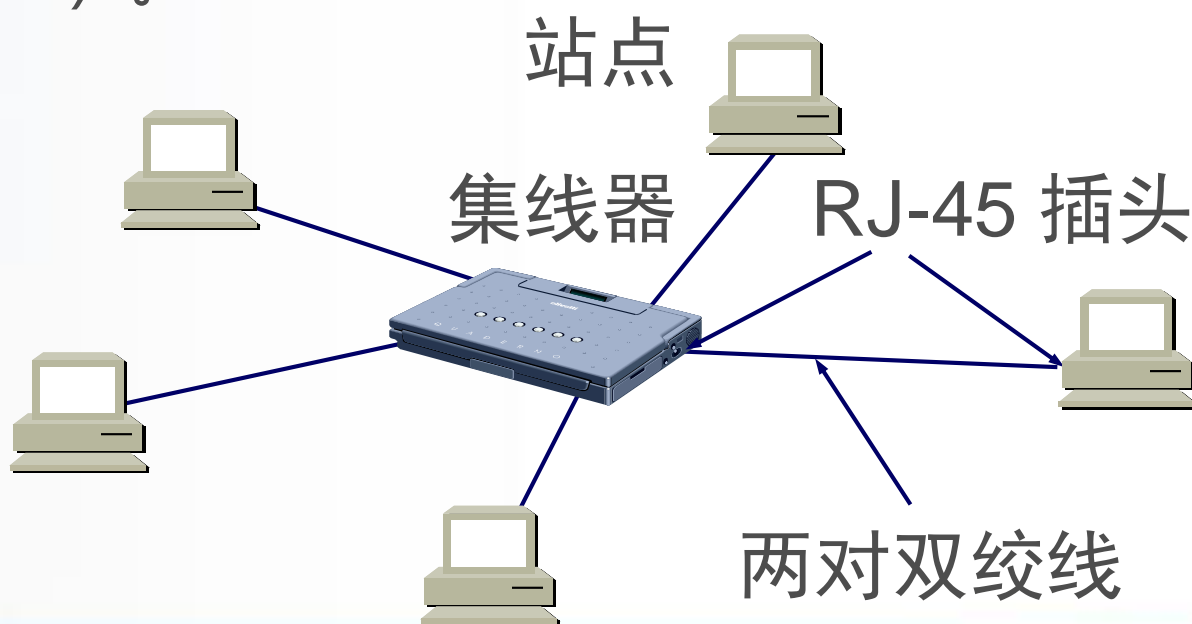
# 指引

## ➤ 以太网局域网（以太网）

- 概述
- 拓扑
- 信道利用率
- MAC层

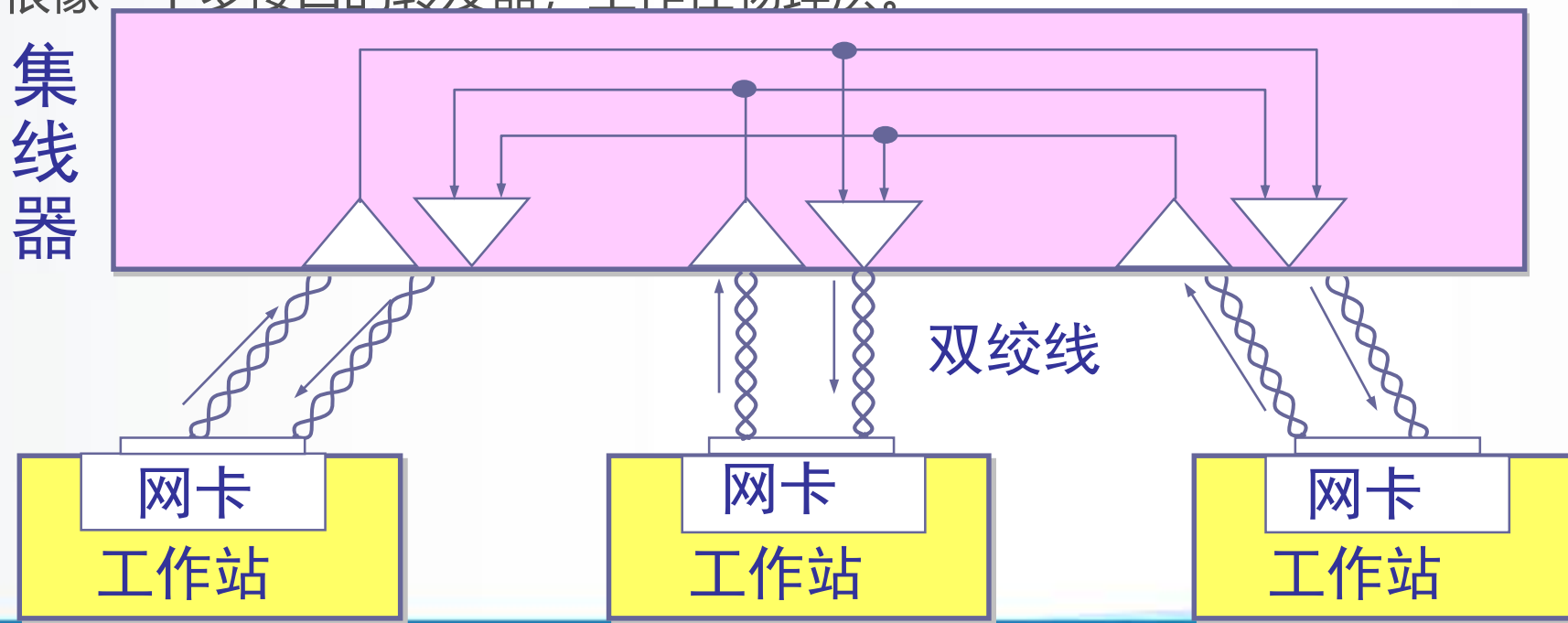
# 星型拓扑

- 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。不用电缆而使用无屏蔽双绞线。每个站需要用两对双绞线，分别用于发送和接收
- 这种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)。



# 集线器的一些特点

- 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。集线器使用了大规模集成电路芯片，因此这样的硬件设备的可靠性已大大提高了。
- 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。
- 集线器很像一个多接口的转发器，工作在物理层。





# 10Base-T

- 10BASE-T 的通信距离稍短，每个站到集线器的距离不超过 100 m。
- 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。
- 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，它为以太网在局域网中的统治地位奠定了牢固的基础。
- 其他：100Base-FX、100Base-T和100Base-T4....

# 指引

## ➤ 以太网局域网（以太网）

- 概述
- 拓扑
- 信道利用率
- MAC层

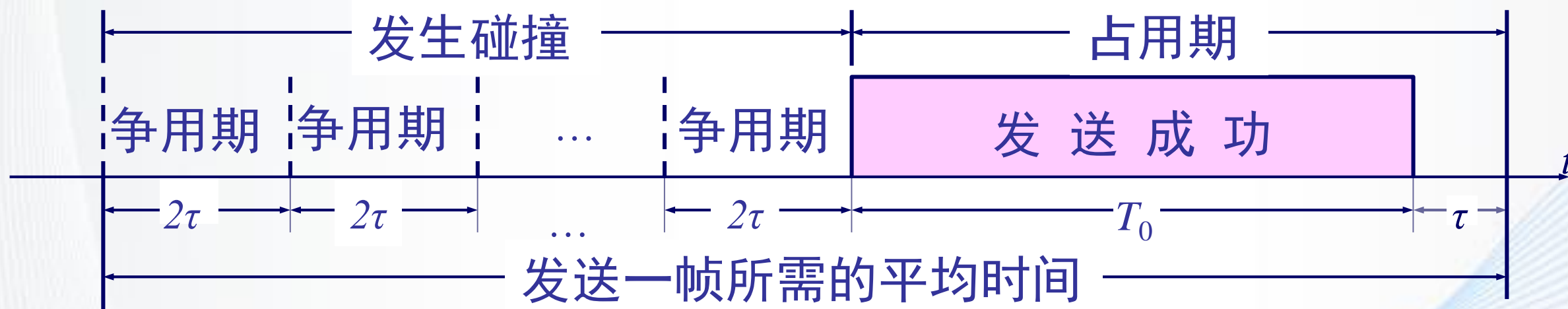
# 以太网的信道利用率

## ➤以太网的信道被占用的情况：

- 争用期长度为  $2\tau$ ，即端到端传播时延的两倍。检测到碰撞后不发送干扰信号。
- 帧长为  $L$  (bit)，数据发送速率为  $C$  (bit/s)，因而帧的发送时间为  $L/C = T_0$  (s)。

# 以太网的信道利用率

➤ 一个帧从开始发送，经可能发生的碰撞后，将再重传数次，到发送成功且信道转为空闲(即再经过时间  $\tau$  使得信道上无信号在传播)时为止，是发送一帧所需的平均时间。



# 以太网的信道利用率: 参数a

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

$$a = \frac{\tau}{T_0}$$

➤  $a \rightarrow 0$  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。

➤  $a$  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。

# 以太网的信道利用率：最大值

## ➤对以太网参数的要求

- 当数据率一定时，以太网的连线的长度受到限制，否则  $\tau$  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  $a$  值太大。

## ➤信道利用率的极大值

- 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：

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



# 指引

## ➤ 以太网局域网（以太网）

- 概述
- 拓扑
- 信道利用率
- **MAC层**

# MAC层的硬件地址(MAC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。
- 但鉴于大家都早已习惯了将这种 48 位的“名字”称为“地址”，所以本书也采用这种习惯用法，尽管这种说法并不太严格。
  - IEEE 的注册管理机构 RA 负责向厂家分配地址字段的前三个字节(即高位 24 位)。
  - 地址字段中的后三个字节(即低位 24 位)由厂家自行指派，称为扩展标识符，必须保证生产出的适配器没有重复地址。
  - 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。
  - “MAC地址”实际上就是适配器地址或适配器标识符EUI-48。

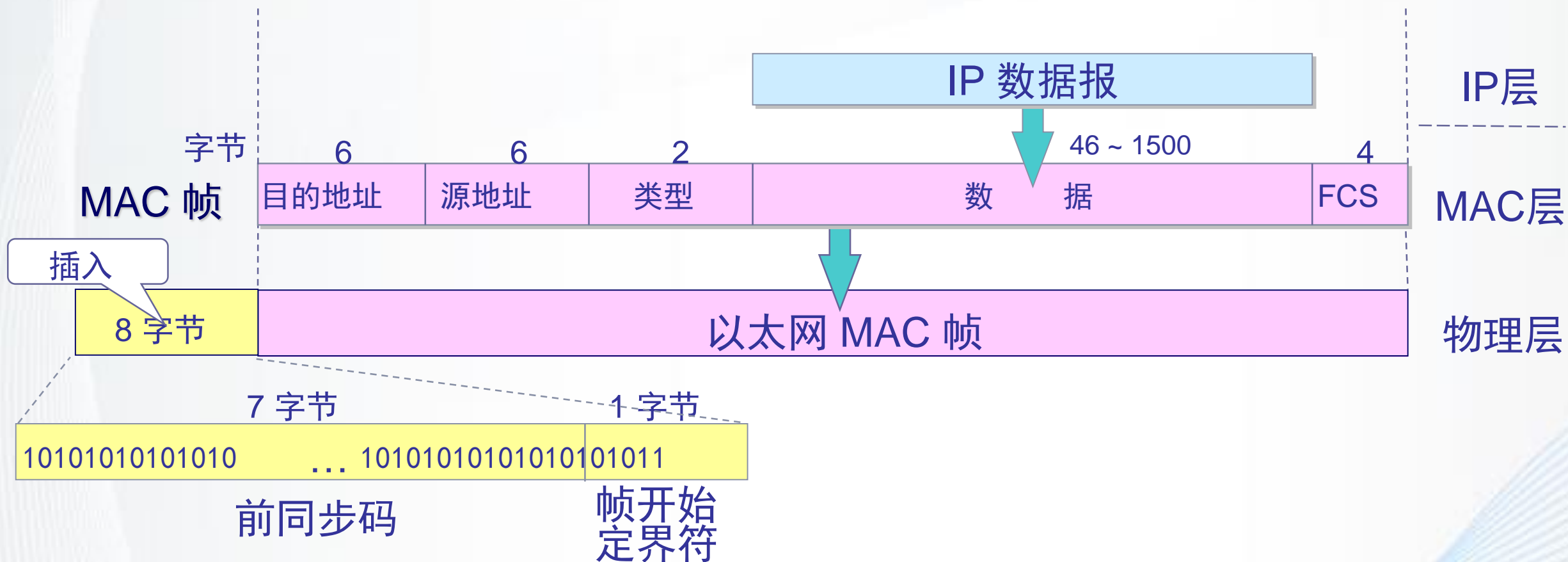
# 适配器检查 MAC 地址

- 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）

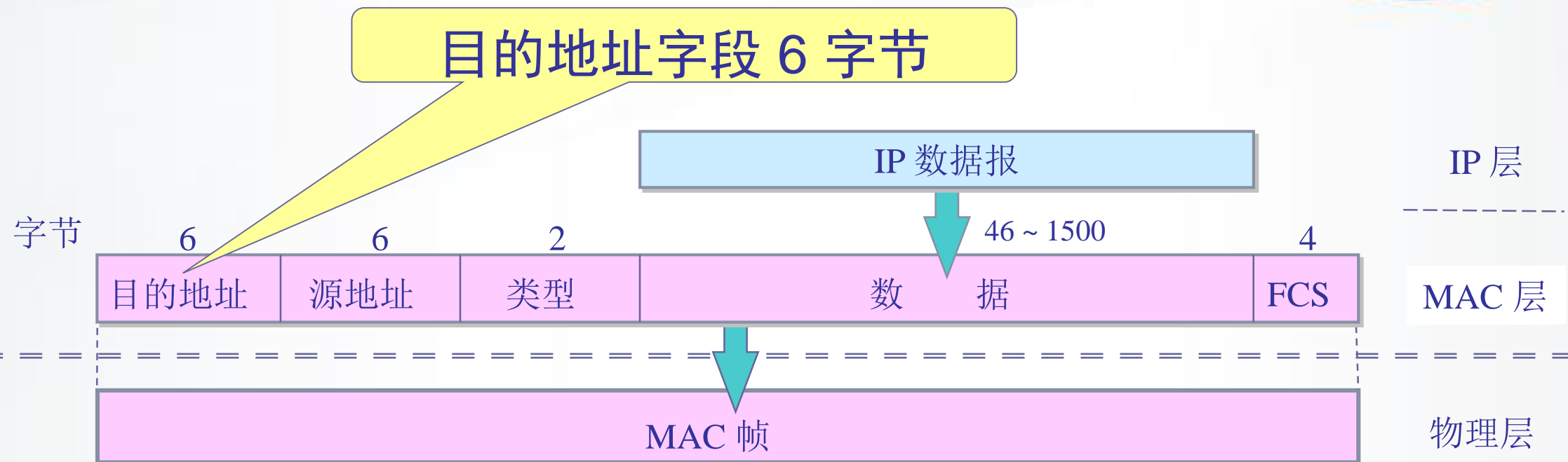
# MAC帧格式

- 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。

# MAC帧格式

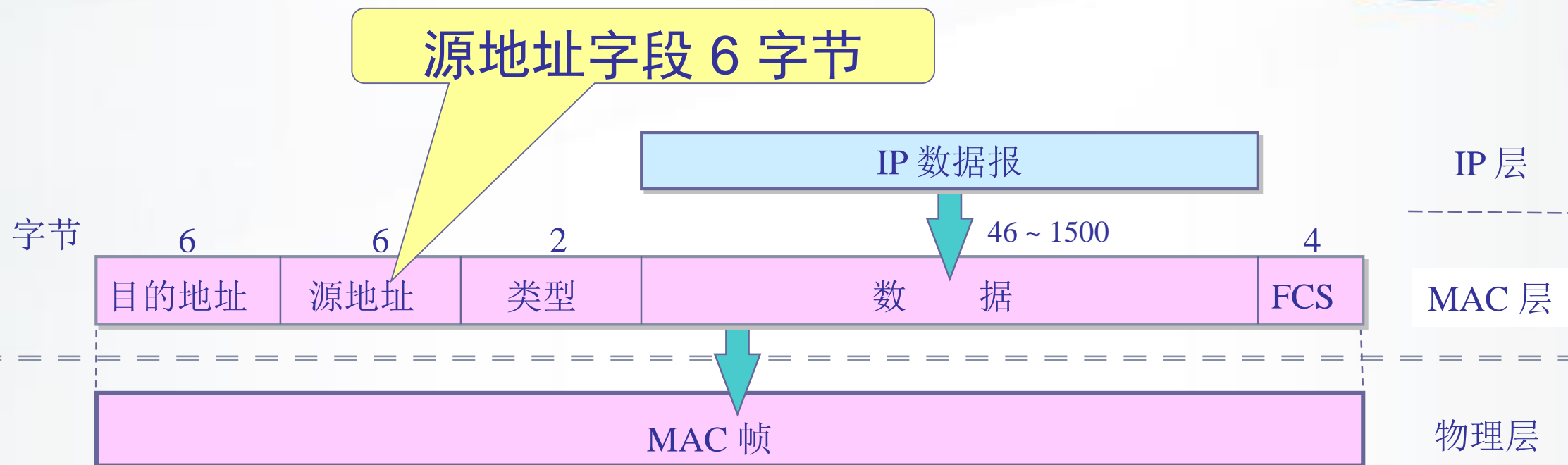


# 以太网 V2 的 MAC 帧格式



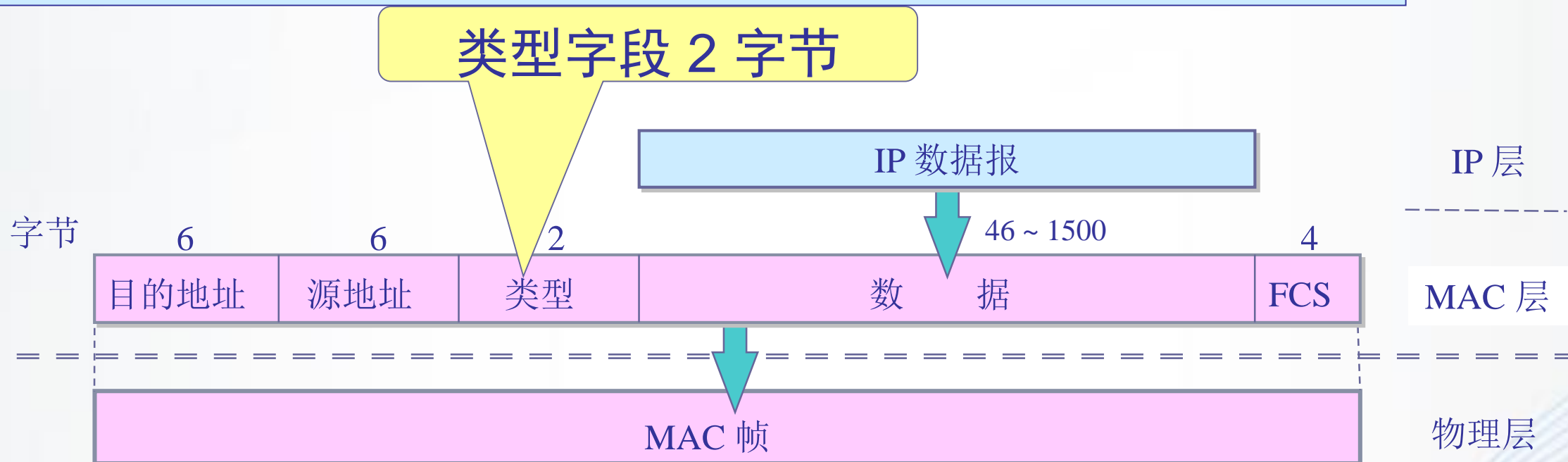


# 以太网 V2 的 MAC 帧格式



# 以太网 V2 的 MAC 帧格式

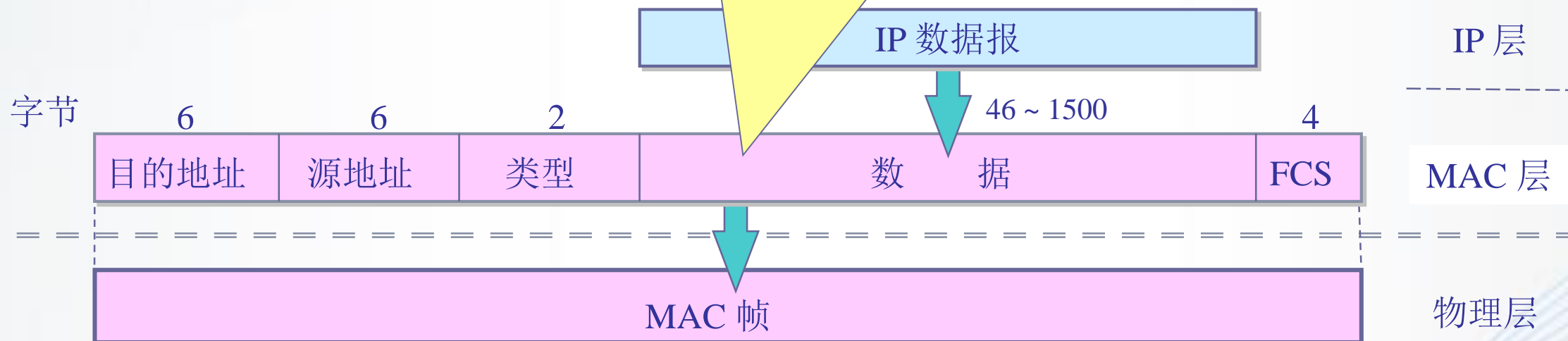
类型字段用来标志上一层使用的是什麼协议，以便把收到的 MAC 帧的数据上交给上一层的这个协议。



# 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

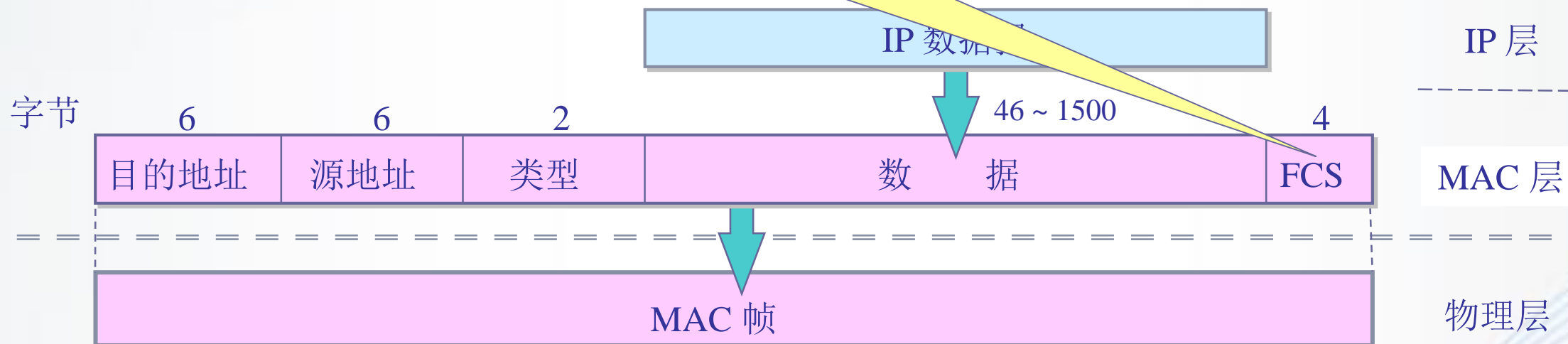
数据字段 46 ~ 1500 字节



# 以太网 V2 的 MAC 帧格式

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

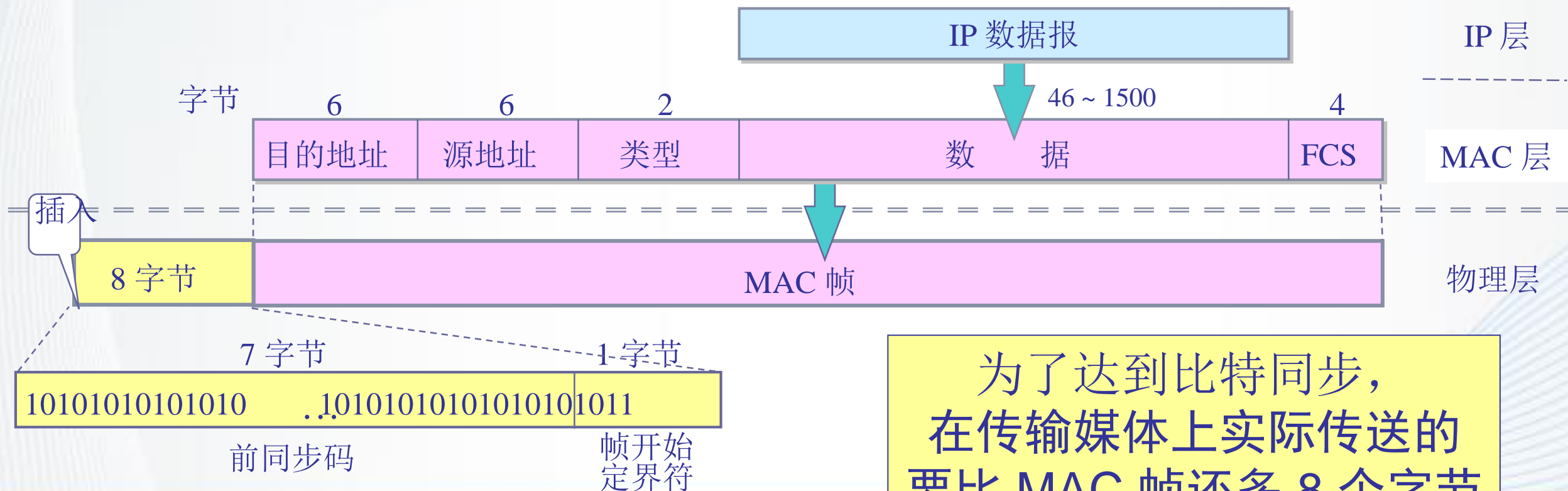
FCS 字段 4 字节



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

在帧的前面插入的 8 字节中的第一个字段共 7 个字节，是前同步码，用来迅速实现 MAC 帧的比特同步。第二个字段是帧开始定界符，表示后面的信息就是 MAC 帧。



为了达到比特同步，  
在传输媒体上实际传送的  
要比 MAC 帧还多 8 个字节

# 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。
- 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。



# 帧间最小间隔

- 帧间最小间隔为  $9.6\ \mu\text{s}$ ，相当于 96 bit 的发送时间。
- 一个站在检测到总线开始空闲后，还要等待  $9.6\ \mu\text{s}$  才能再次发送数据。
- 这样做是为了使刚刚收到数据帧的站的接收缓存来得及清理，做好接收下一帧的准备。

# 指引

- 数据链路层基本概念及基本问题
  - 基本概念
  - 三个基本问题
- 两种情况下的数据链路层
  - 使用点对点信道的数据链路层
  - 使用广播信道的数据链路层
- 以太局域网（以太网）
- 扩展以太网
- 高速以太网



# 在物理层考虑扩展

- 主机使用光纤和一对光纤调制解调器连接到集线器



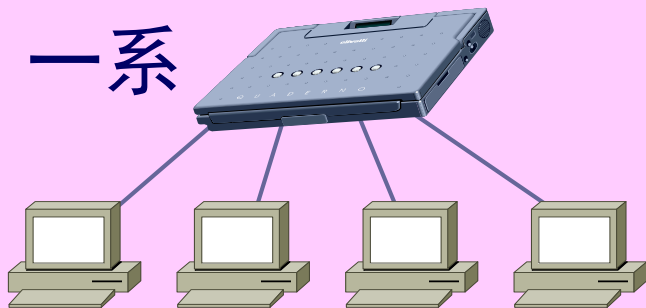
# 在物理层考虑扩展

➤ 某大学有三个系，各自有一个局域网

三个独立的碰撞域

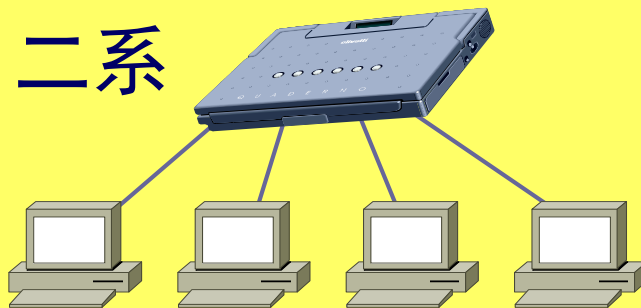
碰撞域

一系



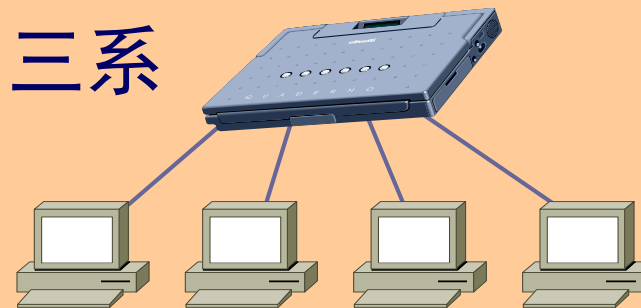
碰撞域

二系



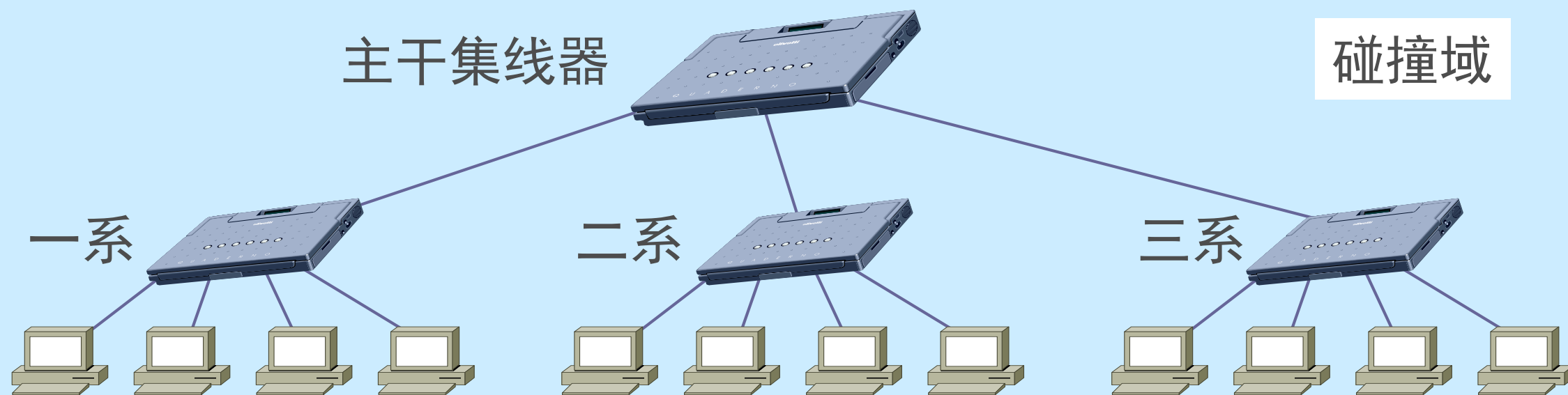
碰撞域

三系



# 在物理层考虑扩展

➤ 一个更大的碰撞域



# 在物理层考虑扩展

## ➤ 用集线器扩展局域网优点

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

## ➤ 用集线器扩展局域网缺点

- 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。



# 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。
  - 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。
- 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。

# 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。

# 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。

# 以太网交换机的自学习功能

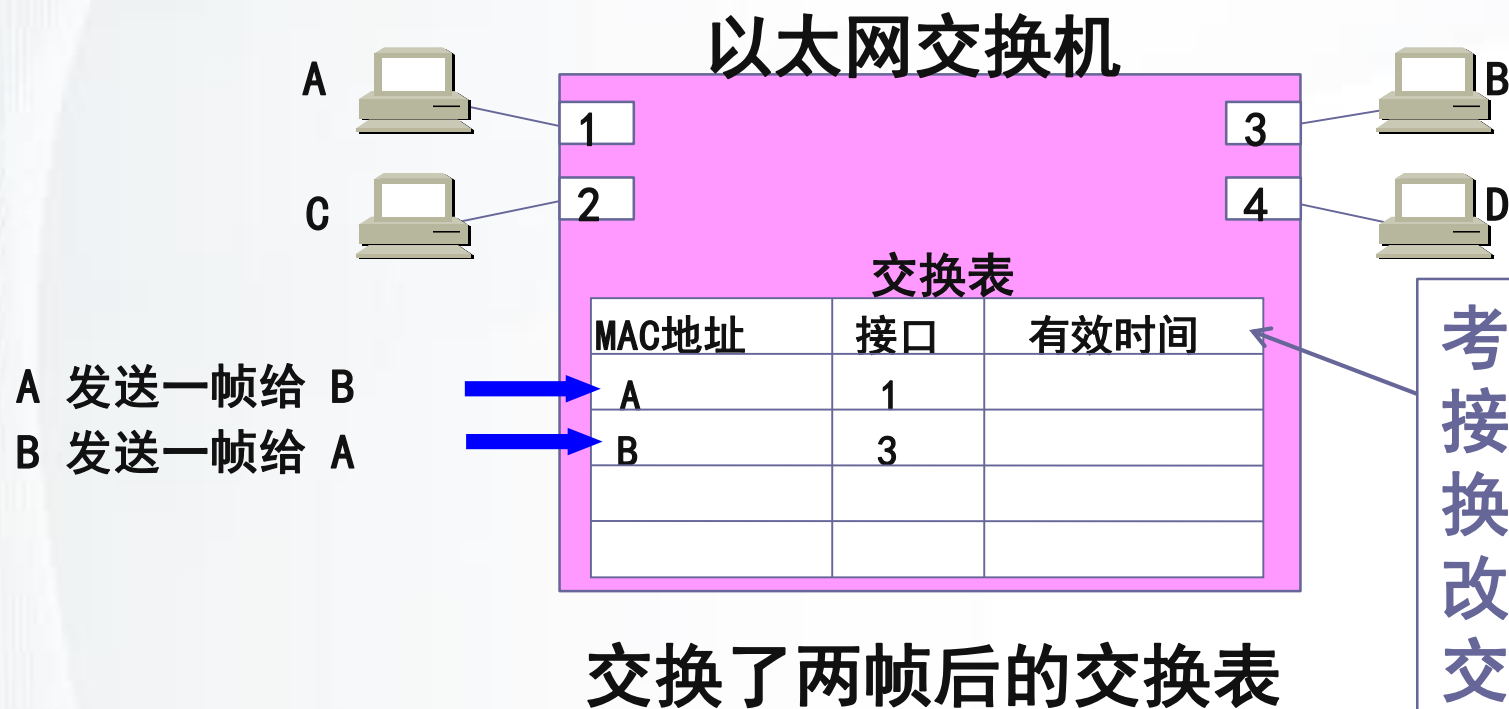
- 以太网交换机运行自学习算法自动维护交换表。
- 开始时，以太网交换机里面的交换表是空的。



交换表一开始是空的



# 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。

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。

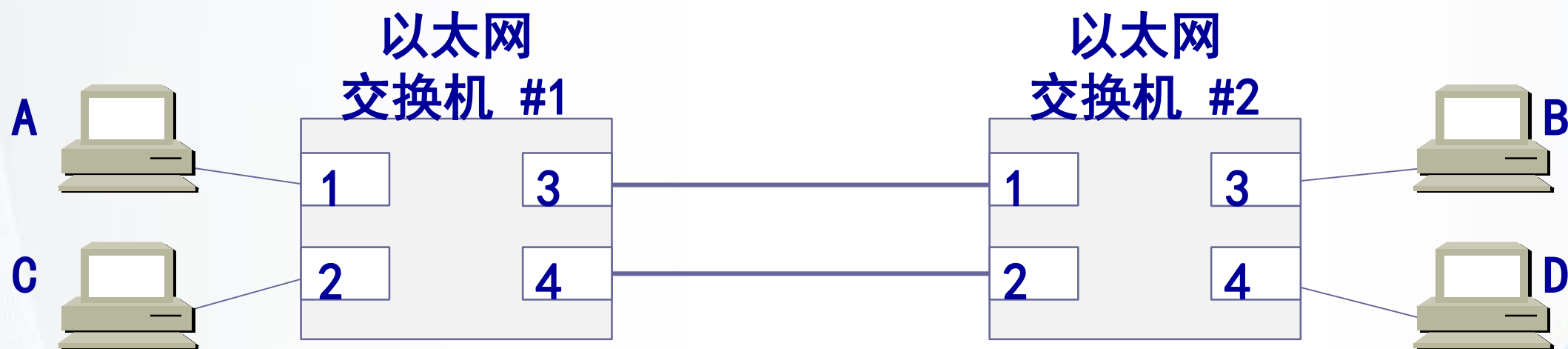


# 交换机自学习和转发帧的步骤归纳

- 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）。

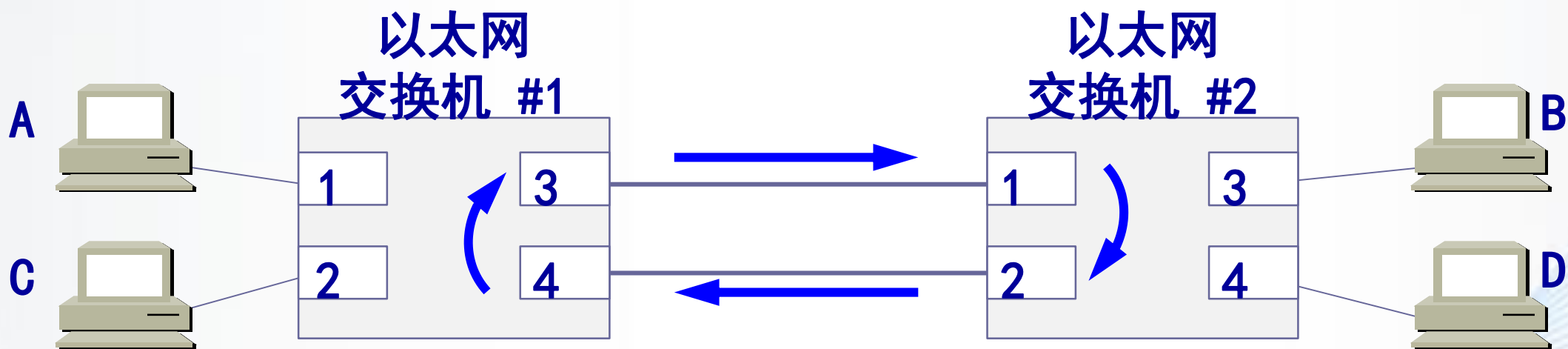
# 交换机使用了生成树协议

- 增加冗余链路时，自学习的过程就可能导致以太网帧在网络的某个环路中无限制地兜圈子。
- 如图，假定开始时，交换机 #1 和 #2 的交换表都是空的，主机 A 通过接口交换机 #1 向主机 B 发送一帧。



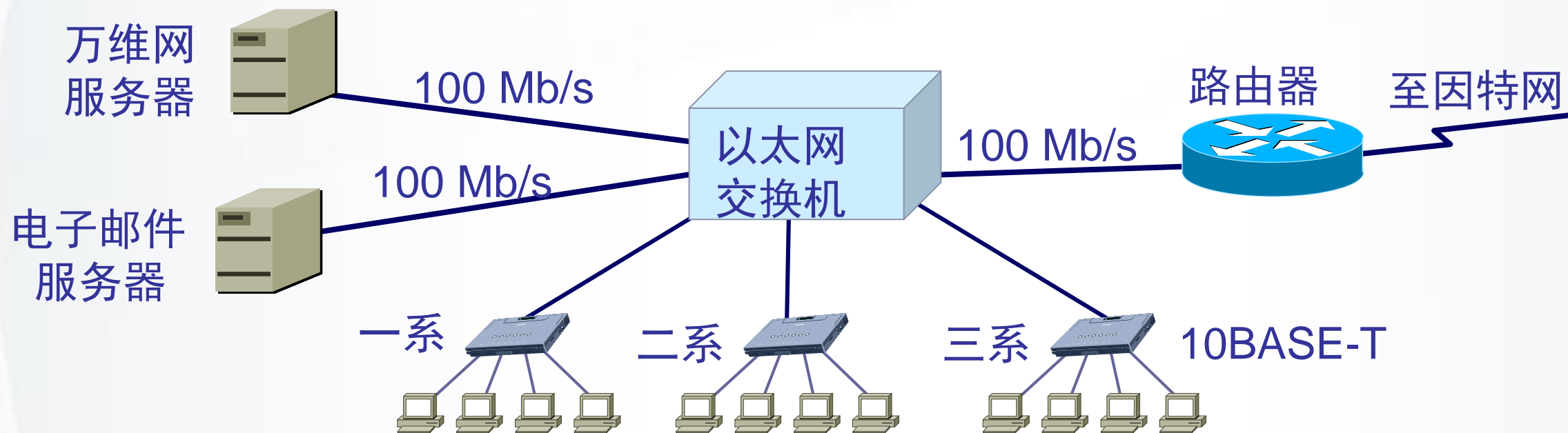
# 交换机使用了生成树协议

➤按交换机自学习和转发方法，该帧的某个走向如下：离开交换机 #1 的接口 3 → 交换机 #2 的接口 1 → 接口 2 → 交换机 #1 的接口 4 → 接口 3 → 交换机 #2 的接口 1 →.....。这样就无限制地循环兜圈子下去，白白消耗了网络资源。



在两个交换机之间兜圈子的帧

# 用交换机扩展以太网



# 独占传输媒体的带宽

- 对于普通 10 Mb/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 Mb/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 Mb/s，但由于一个用户在通信时是独占而不是和其他网络用户共享传输媒体的带宽，因此对于拥有  $N$  对接口的交换机的总容量为  $N \times 10 \text{ Mb/s}$ 。这正是交换机的最大优点。

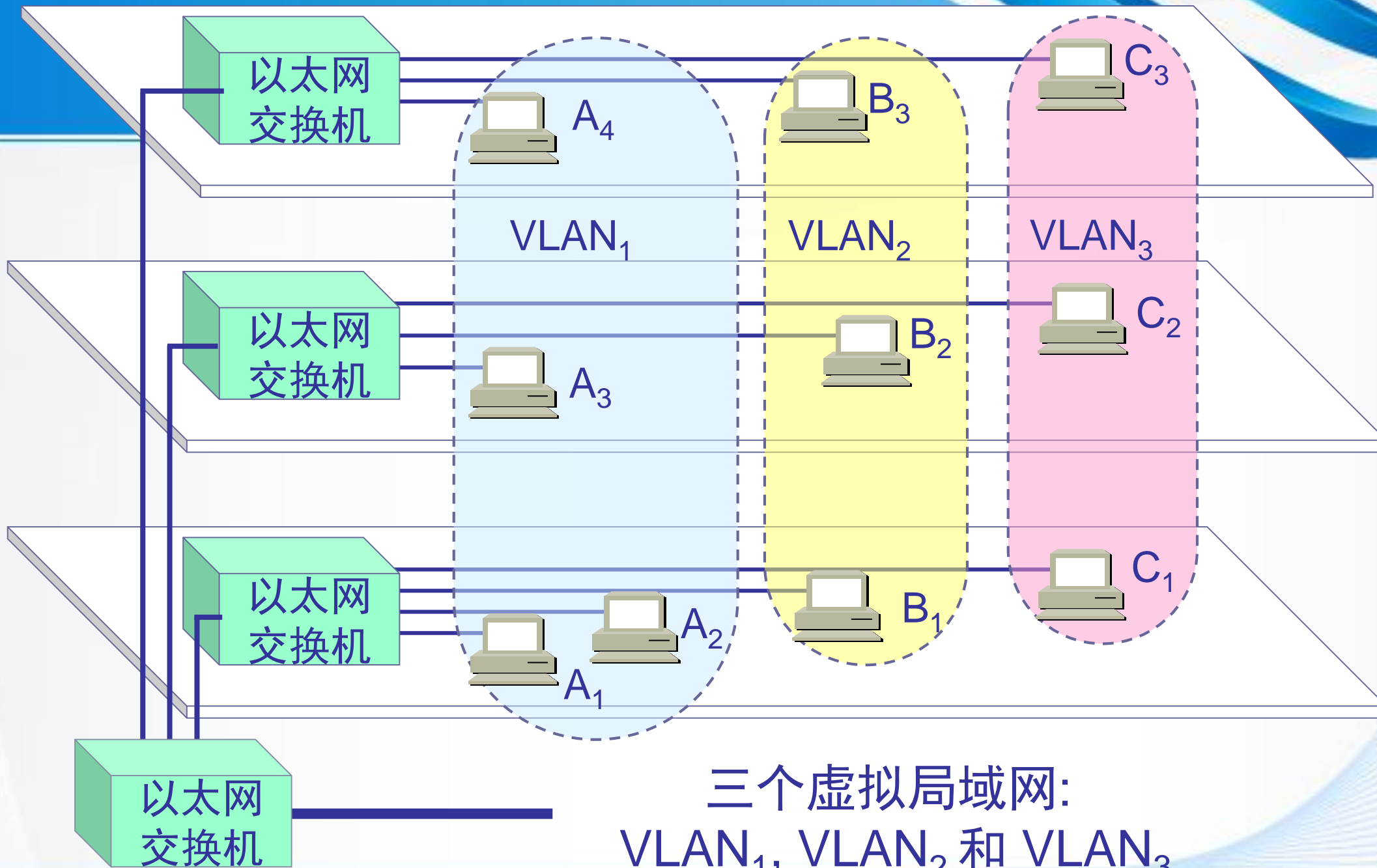
# 动手实验

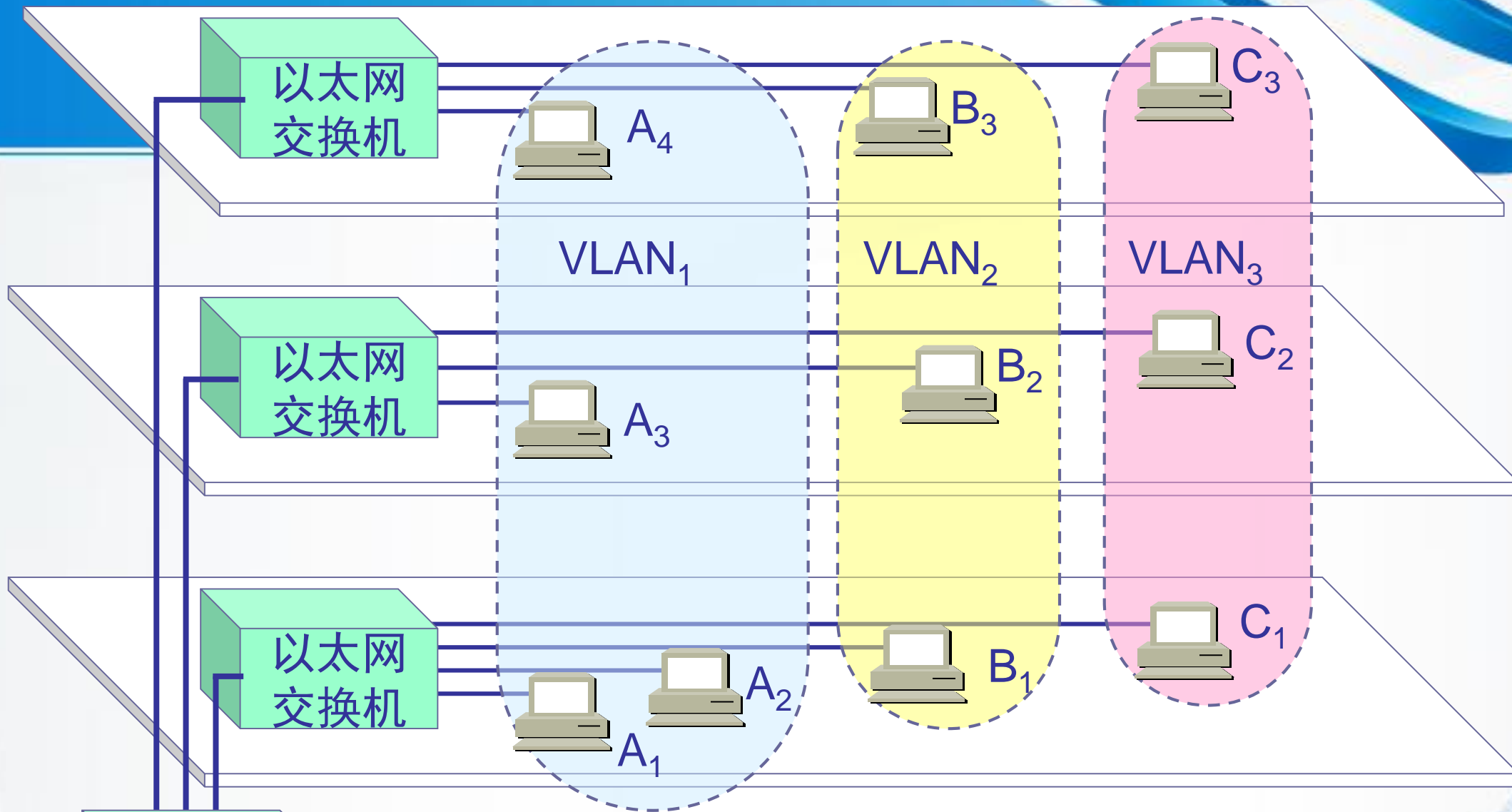
- 实验3-1： PacketTracer的使用及路由器的基本命令
- 实验3-2： 局域网连接
- 实验3-3： 查看交换机的MAC地址表
- 扩展实验3-2： 生成树



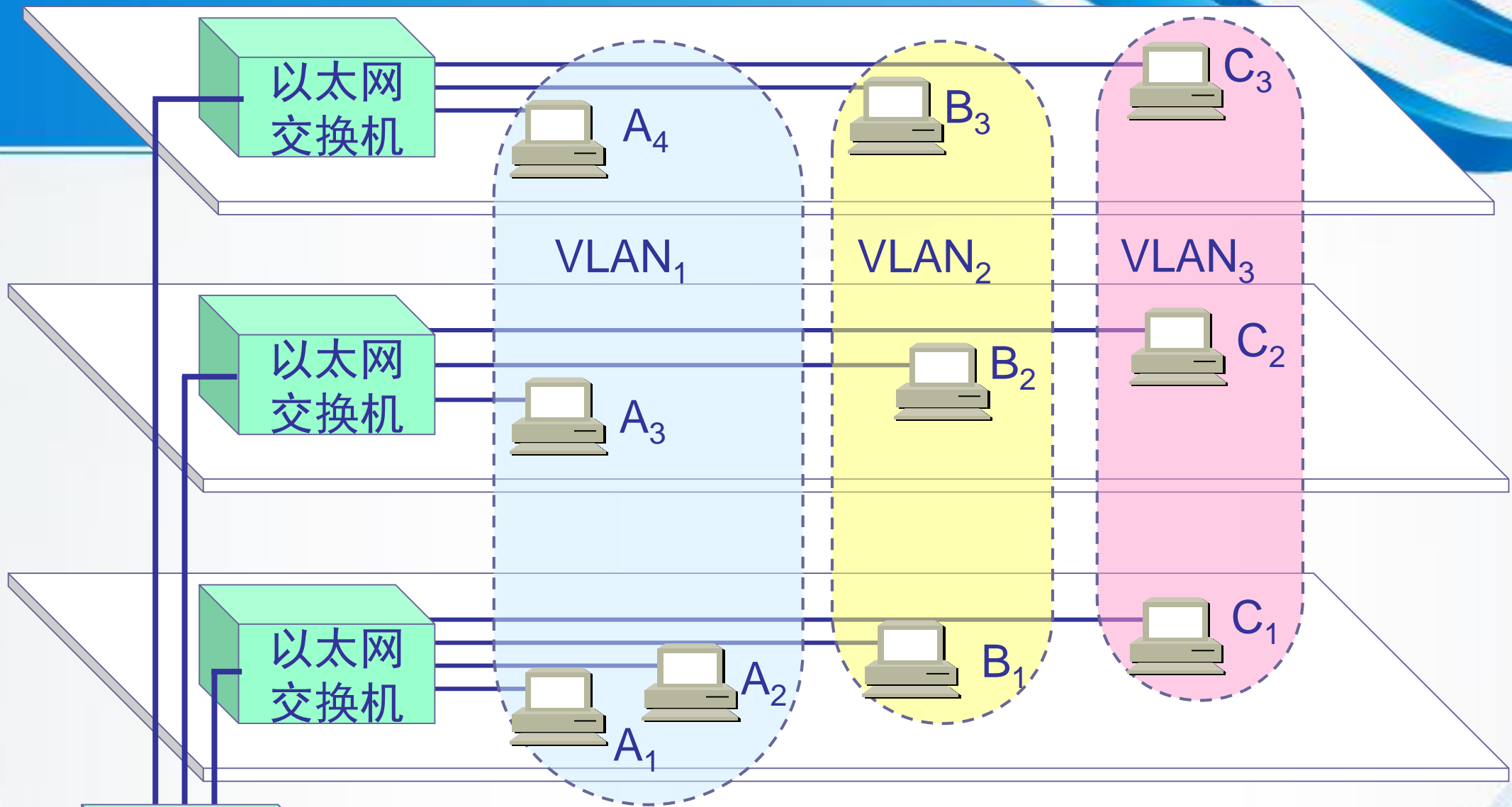
# 虚拟局域网

- 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。
  - 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，指明发送这个帧的工作站是属于哪一个 VLAN。
- 虚拟局域网其实只是局域网给用户提供服务的一种服务，而不是一种新型局域网。

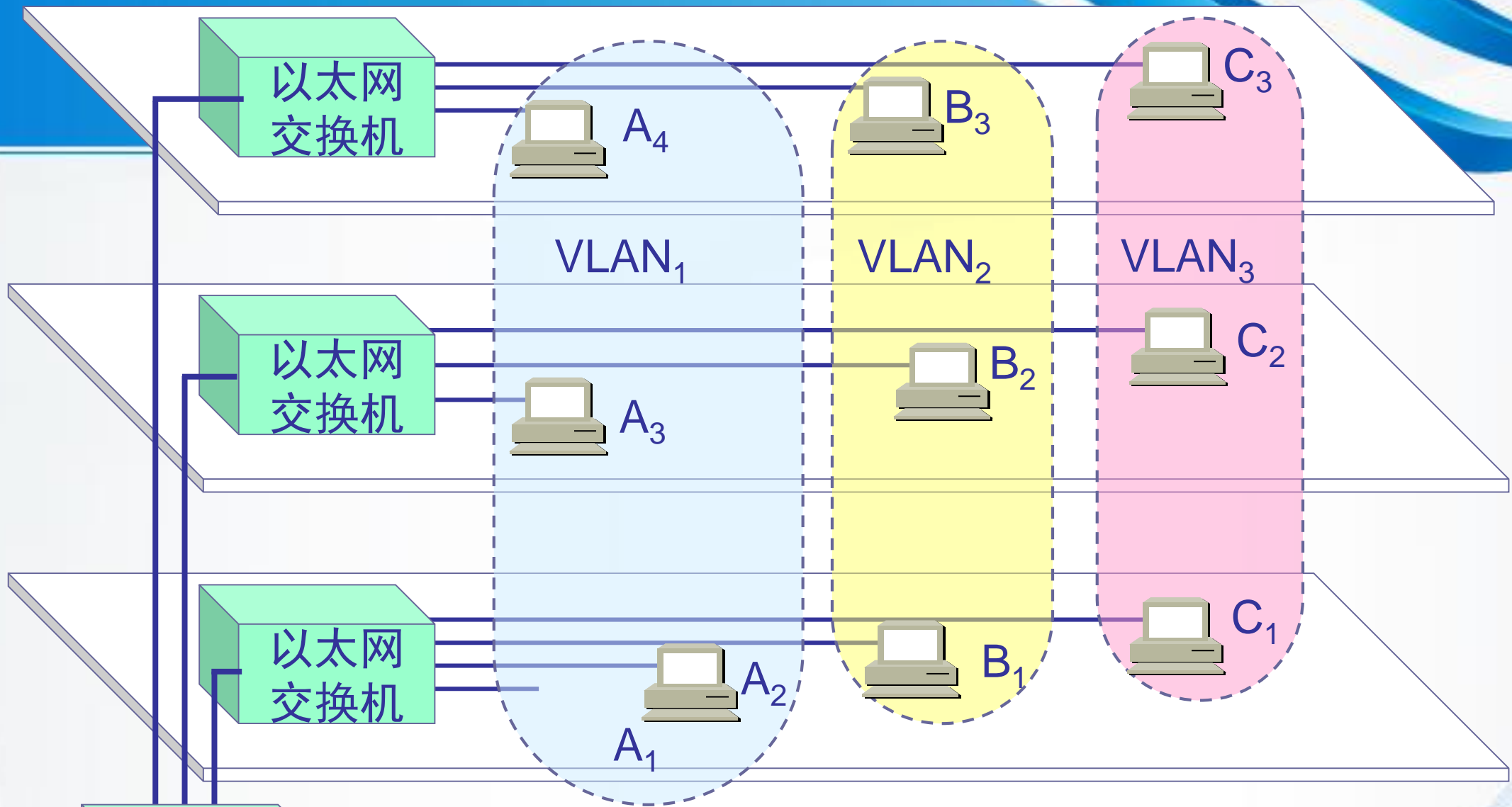




当 B<sub>1</sub> 向 VLAN<sub>2</sub> 工作组内成员发送数据时，  
工作站 B<sub>2</sub> 和 B<sub>3</sub> 将会收到广播的信息。



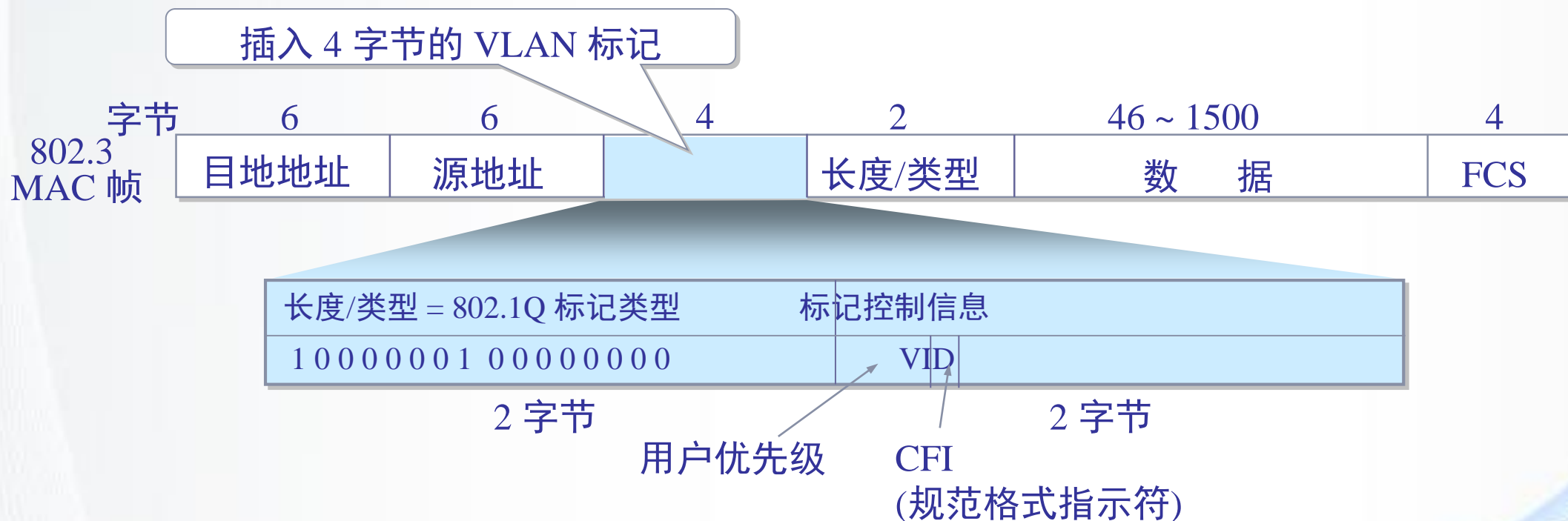
B<sub>1</sub> 发送数据时，工作站 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> 和 C<sub>1</sub> 都不会收到 B<sub>1</sub> 发出的广播信息。



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。

# 虚拟局域网帧格式

➤ 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工作站属于哪一个虚拟局域网。





# 指引

- 数据链路层基本概念及基本问题
  - 基本概念
  - 三个基本问题
- 两种情况下的数据链路层
  - 使用点对点信道的数据链路层
  - 使用广播信道的数据链路层
- 以太局域网（以太网）
- 扩展以太网
- 高速以太网



# 100BASE-T 以太网

- 速率达到或超过 100 Mb/s 的以太网称为高速以太网。
- 在双绞线上传送 100 Mb/s 基带信号的星型拓扑以太网，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)。
- 100Base-T以太网的物理层：
  - 100BASE-TX：使用 2 对 UTP 5 类线或屏蔽双绞线 STP。
  - 100BASE-FX：使用 2 对光纤。
  - 100BASE-T4：使用 4 对 UTP 3 类线或 5 类线。

# 100Base-T特点

- 可在全双工方式下工作而无冲突发生。因此，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  $0.96\ \mu\text{s}$ 。

# 吉比特以太网

- 允许在 1 Gb/s 下全双工和半双工两种方式工作。
- 使用 802.3 协议规定的帧格式。
- 在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议（全双工方式不需要使用 CSMA/CD 协议）。
- 与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容。
- 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。

# 吉比特以太网的物理层

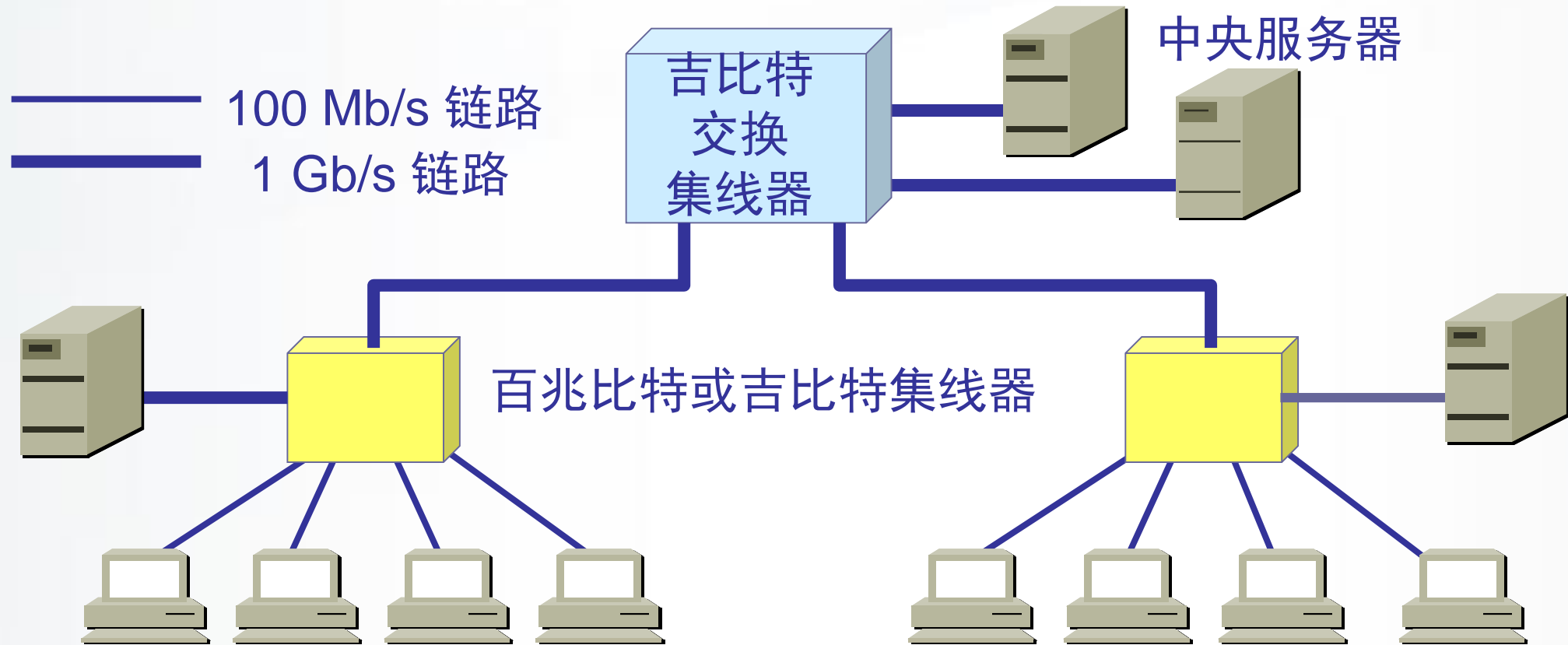
## ➤ 1000BASE-X 基于光纤通道的物理层：

- 1000BASE-SX SX表示短波长
- 1000BASE-LX LX表示长波长
- 1000BASE-CX CX表示铜线

## ➤ 1000BASE-T

- 使用 4对 5 类线 UTP

# 吉比特以太网的配置举例





# 10吉比特以太网

- 10 吉比特以太网与 10 Mb/s, 100 Mb/s 和 1 Gb/s 以太网的帧格式完全相同。
- 10 吉比特以太网还保留了 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长, 便于升级。
- 10 吉比特以太网不再使用铜线而只使用光纤作为传输媒体。
- 10 吉比特以太网只工作在全双工方式, 因此没有争用问题, 也不使用 CSMA/CD 协议。

# 10吉比特以太网的物理层

- 局域网物理层的数据率是 10.000 Gb/s。
- 广域网物理层具有另一种数据率，这是为了和所谓的“Gb/s”的 SONET/SDH（即OC-192/STM-64）相连接。
  - 为了使 10 吉比特以太网的帧能够插入到 OC-192/STM-64 帧的有效载荷中，就要使用可选的广域网物理层，其数据率为 9.95328 Gb/s。

# 端到端的以太网传输

- 10 吉比特以太网的出现，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：
  - 成熟的技术
  - 互操作性很好
  - 在广域网中使用以太网时价格便宜。
  - 统一的帧格式简化了操作和管理。

# 以太网从 10 Mb/s 到 10 Gb/s 的演进

- 以太网从 10 Mb/s 到 10 Gb/s 的演进证明了以太网是：
  - 可扩展的（从 10 Mb/s 到 10 Gb/s）。
  - 灵活的（多种传输媒体、全/半双工、共享/交换）。
  - 易于安装。
  - 稳健性好。

# 使用高速以太网进行宽带接入

- 以太网已成功地把速率提高到  $1 \sim 10 \text{ Gb/s}$ ，所覆盖的地理范围也扩展到了城域网和广域网，因此现在人们正在尝试使用以太网进行宽带接入。
- 以太网接入的重要特点是它可提供双向的宽带通信，并且可根据用户对带宽的需求灵活地进行带宽升级。
- 采用以太网接入可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和降低了传输的成本。

# 本章小结

- 数据链路层的基本概念
- 三个基本问题
- PPP协议
- 以太网
- 扩展以太网



Thank You!  
Any Questions?

