



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



## 以太网采取的 2 种重要措施

### 提供不可靠的交付服务

尽最大努力的交付。

对有差错帧是否需要重传则由高层来决定。

### 同一时间只能允许 一台计算机发送

以太网采用最简单的随机接入。

使用 CSMA/CD 协议减少冲突发生的概率。



## CSMA/CD协议的基本原理

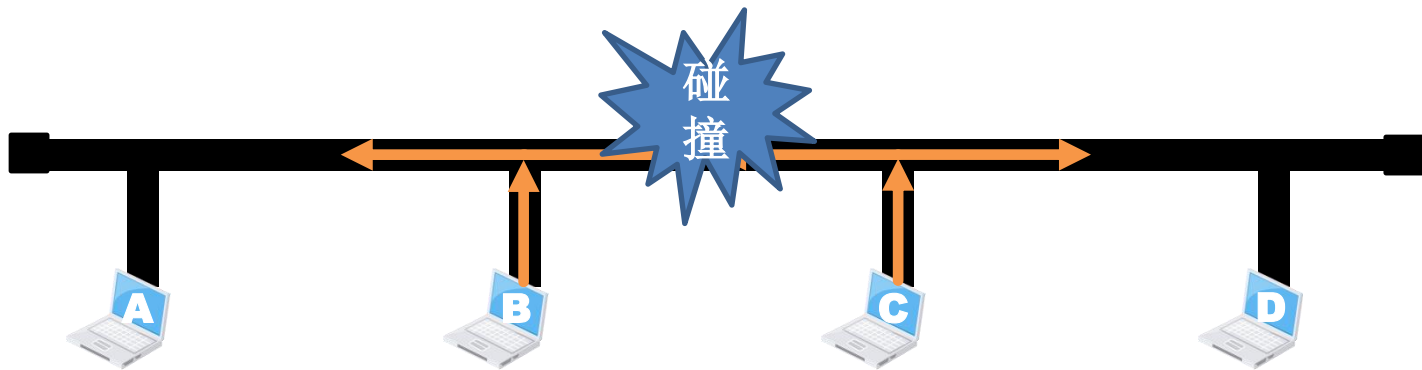
共享总线以太网具有**天然的广播特性**，即使总线上某个站点给另一个站点发送单播帧，表示帧的信号也会沿着总线传播到总线上的其他各站点。





## CSMA/CD协议的基本原理

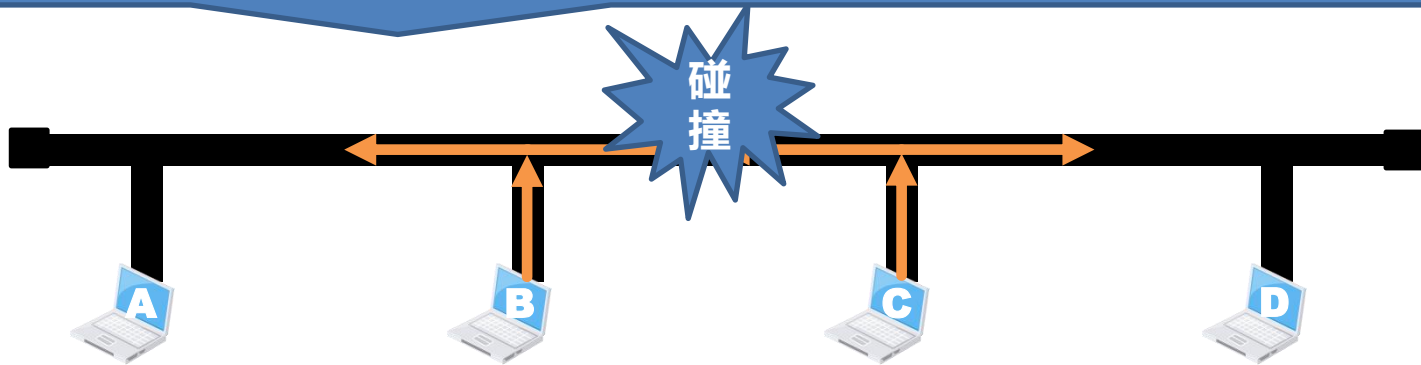
- 当两个或多个站点同时使用总线发送帧时，就会产生信号碰撞。





## CSMA/CD协议的基本原理

共享总线以太网的一个重要问题：如何协调总线上的各站点争用总线。



为了解决各站点争用总线的问题，共享总线以太网使用了一种专用协议 **CSMA/CD**，它是**载波监听多址接入/碰撞检测**（**C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess **C**ollision **D**etection）的英文缩写词。



# CSMA/CD协议的基本原理

## 多址接入 M A

- 多个站点连接在一条总线上，竞争使用总线。

## 载波监听 CS

- 每个站点在发送帧之前，先要检测一下总线上是否有其他站点在发送帧（“**先听后说**”）：
  - 若检测到总线空闲96比特时间（发送96比特所耗费的时间，也称为帧间最小间隔），则发送这个帧；
  - 若检测到总线忙，则继续检测并等待总线转为空闲96比特时间，然后发送这个帧。

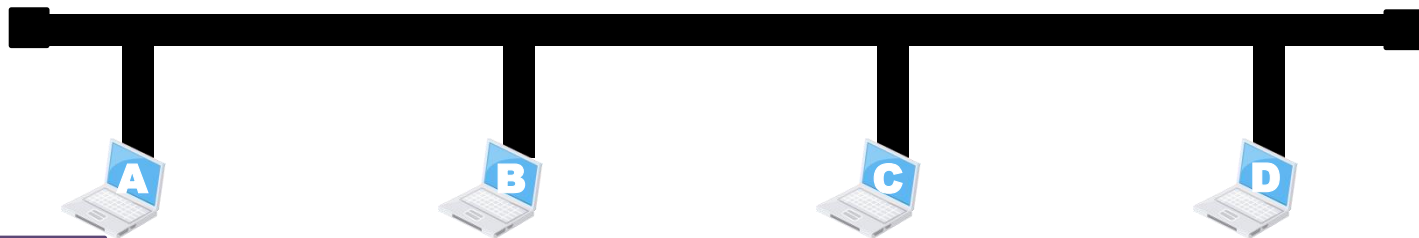
## 碰撞检测 C D

- 每个正在发送帧的站点边发送边检测碰撞（“**边说边听**”）：
  - 一旦发现总线上出现碰撞，立即停止发送，退避一段随机时间后再次从载波监听开始进行发送（“一旦冲突，立即停说，等待时机，重新再说”）。



# CSMA/CD协议的基本原理

多址接入 MA

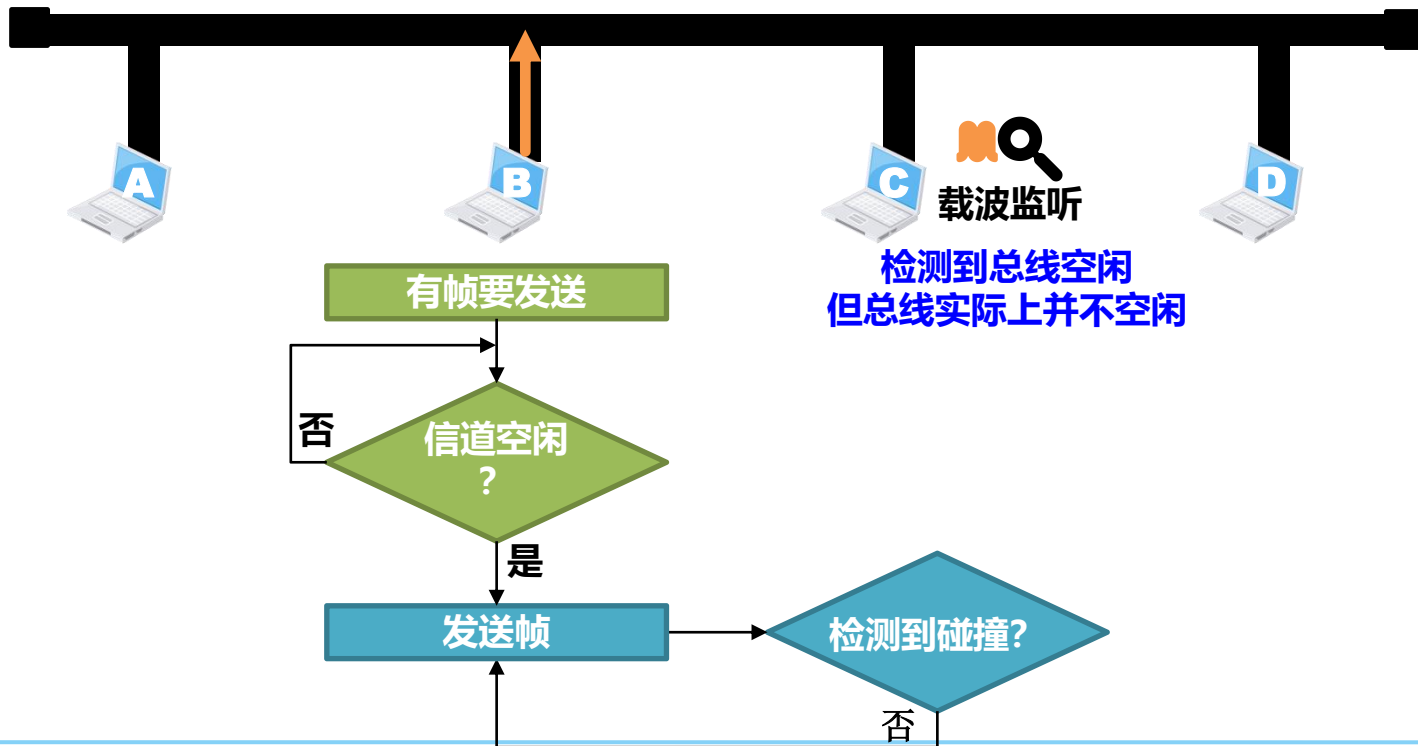


载波监听 CS



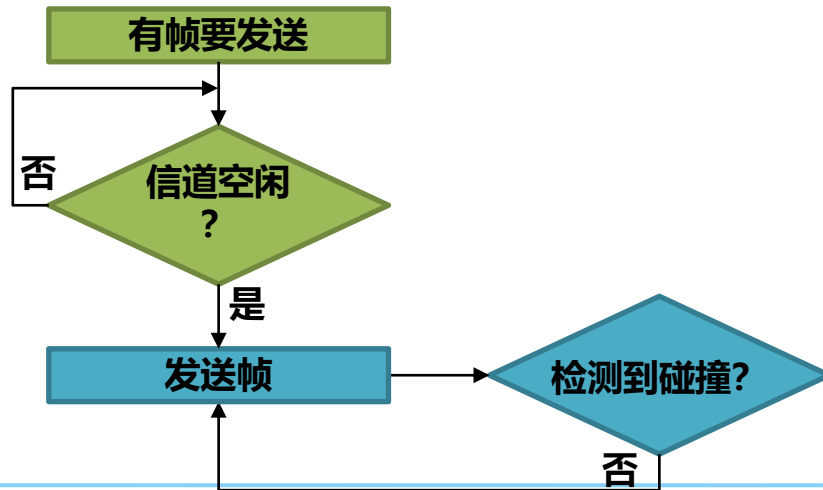
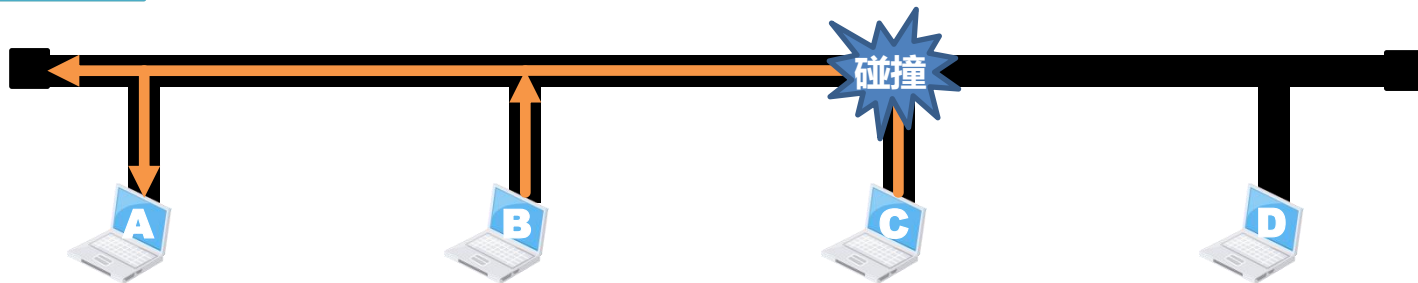


## 碰撞检测



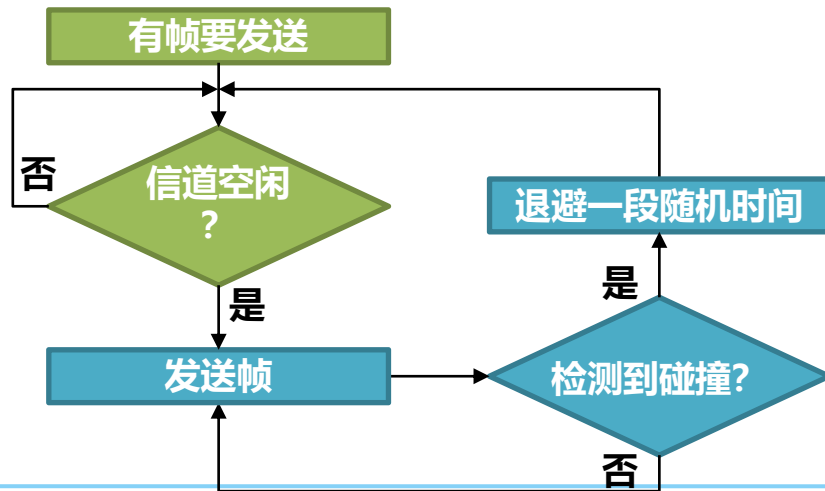
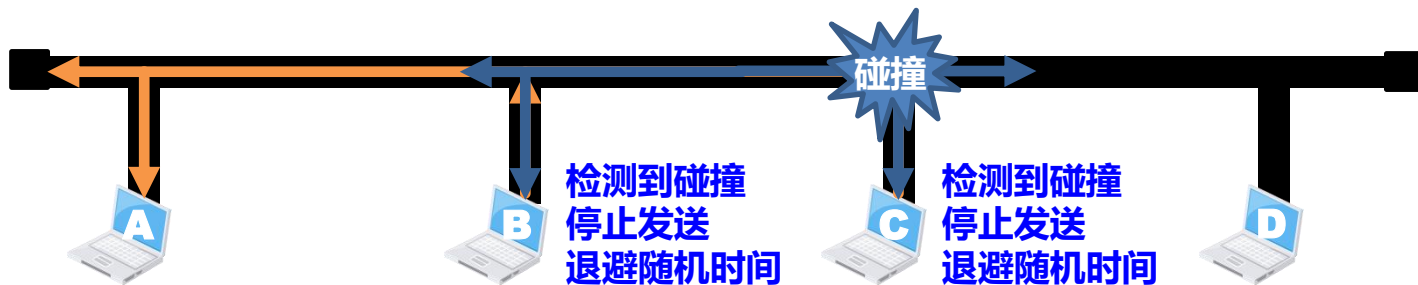


# 碰撞检测 CD



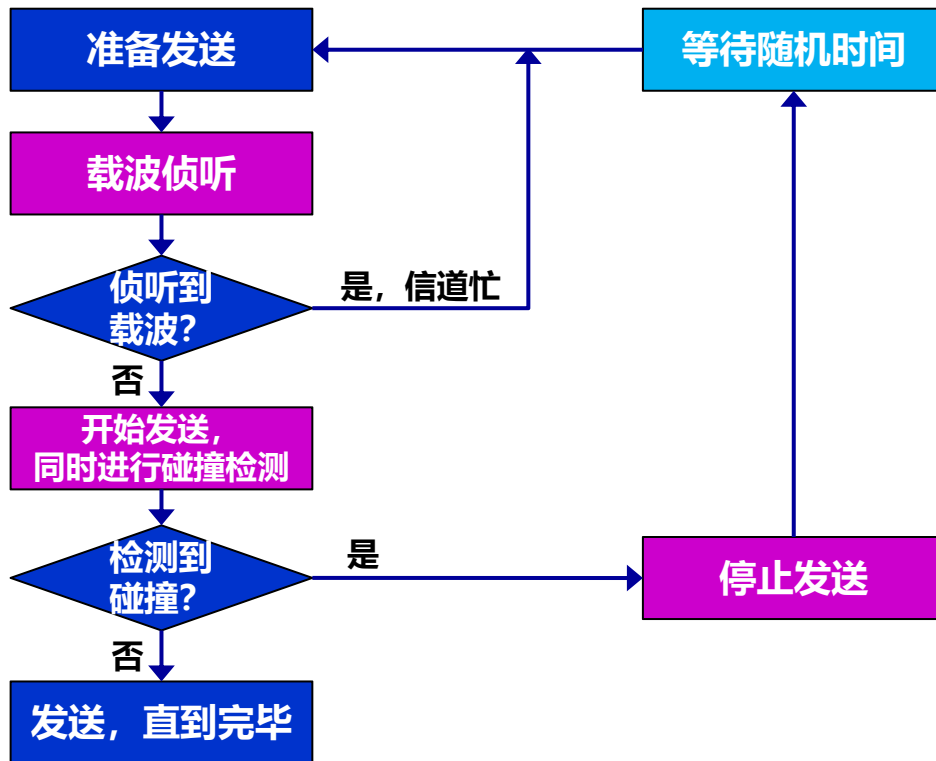


# 碰撞检测CD





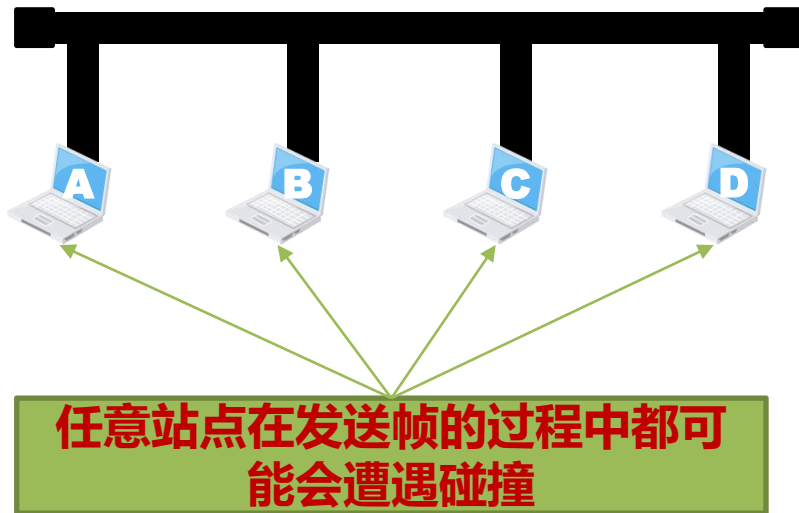
# CSMA/CD 协议工作流程





## 共享式以太网的争用期

■ 共享总线以太网上的任意站点在发送帧的过程中都可能会遭遇碰撞。

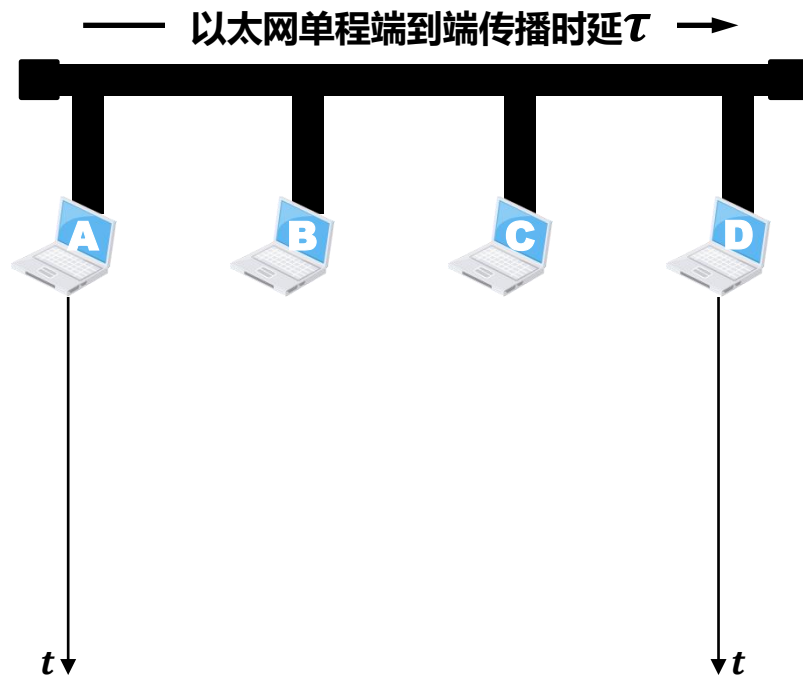


某个站点从发送帧开始，最长要经过多长时间，才能检测出自己发送的帧与其他站点发送的帧产生了碰撞？



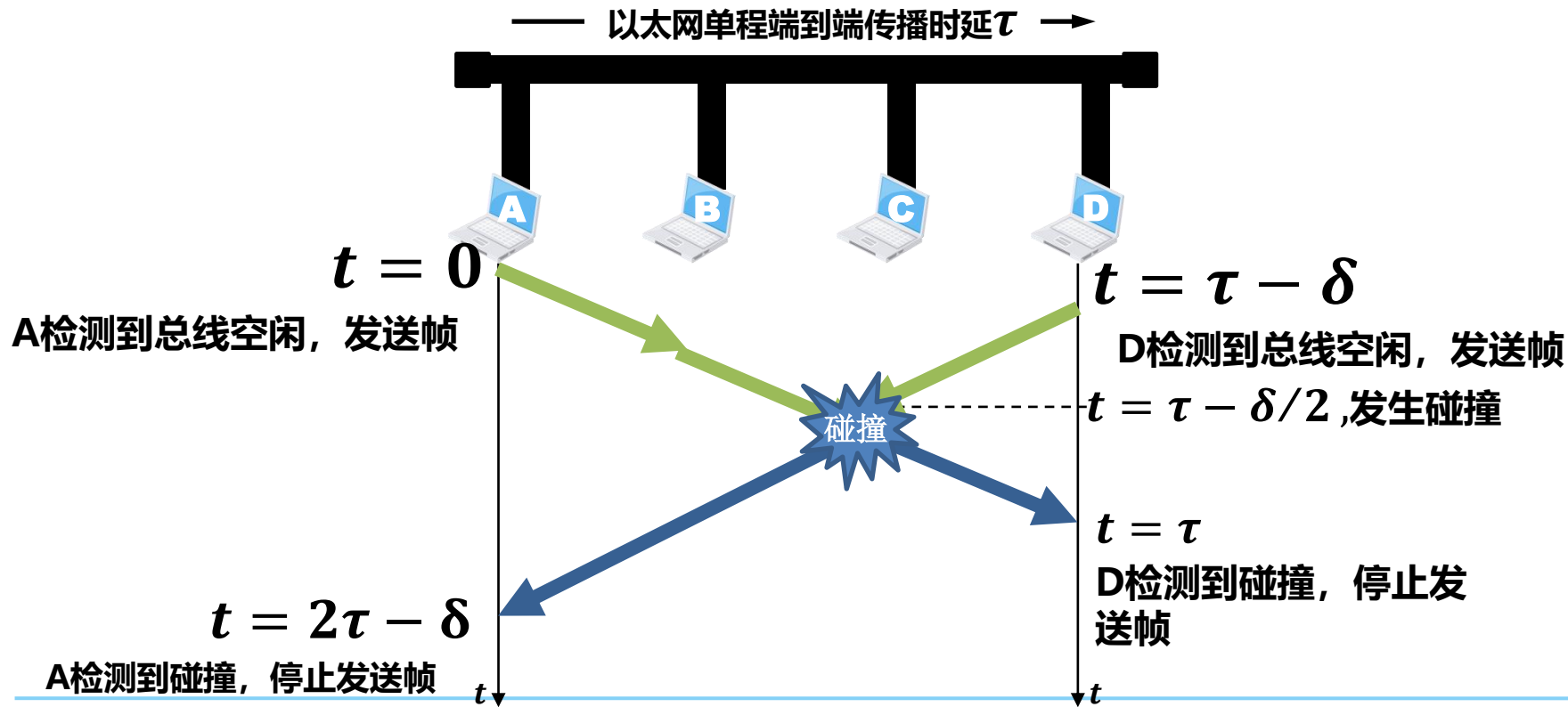


## 共享式以太网的争用期





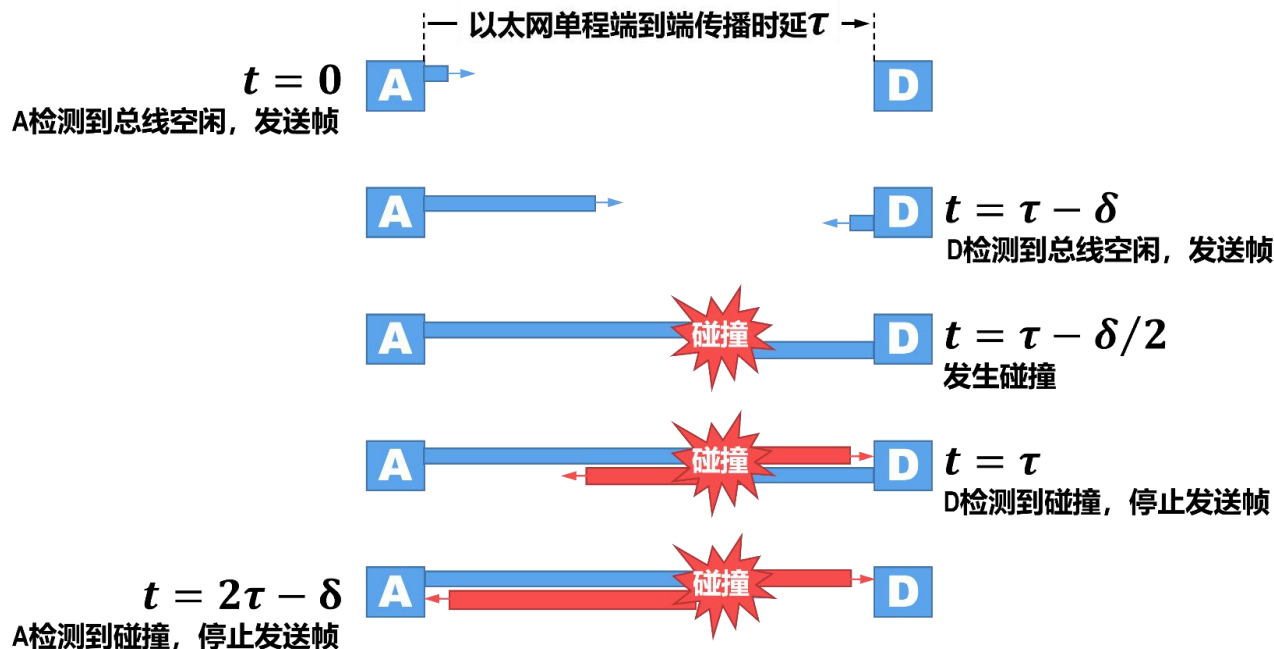
## 共享式以太网的争用期





## 共享式以太网的争用期

站点从发送帧开始，最多经过时长 $2\tau$ （即 $\delta \rightarrow 0$ ）就可检测出所发送的帧是否遭遇了碰撞。





## 共享式以太网的争用期

- 站点从发送帧开始，最多经过时长 $2\tau$ （即 $\delta \rightarrow 0$ ）就可检测出所发送的帧是否遭遇了碰撞。
- 因此，共享总线以太网的端到端往返时间 $2\tau$ 被称为争用期（Contention Period）或碰撞窗口（Collision Window），它是一个非常重要的参数。
  - 站点从发送帧开始，经过争用期 $2\tau$ 这段时间还没有检测到碰撞，就可以肯定这次发送不会产生碰撞。
- 从争用期的概念可以看出，共享总线以太网上的每一个站点从发送帧开始，到之后的一小段时间内，都有可能遭遇碰撞，而这一小段时间的长短是不确定的，它取决于另一个发送帧的站点与本站点的距离，但不会超过总线的端到端往返传播时延，即一个争用期 $2\tau$ 。



■ 10Mb/s共享总线以太网(传统以太网)规定: 争用期 $2\tau$  的值为512比特的发送时间, 即 $51.2\mu s$ 。

$$\text{争用期 } 2\tau = \frac{512 \text{ b}}{10 \text{ Mb/s}} = \frac{512 \text{ b}}{10 \times 10^6 \text{ b/s}} = 51.2 \mu s$$

$$\text{单程端到端传播时延 } \tau = \frac{51.2 \mu s}{2} = 25.6 \mu s$$

假设信号的传播速率为  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$\text{则总线长度为 } 2 \times 10^8 \text{ m/s} \times 25.6 \mu s = 5120 \text{ m}$$

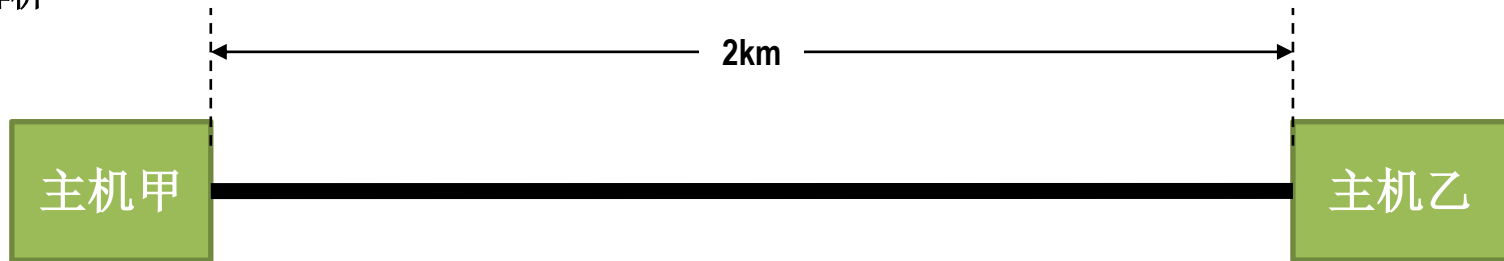
共享总线以太网规定:  
总线长度不能超过  
2500m。



【2010年 题47】某局域网采用CSMA/CD协议实现介质访问控制，数据传输速率为10Mbps，主机甲和主机乙之间的距离为2km，信号传播速度是200 000km/s。请回答下列问题，要求说明理由或写出计算过程。

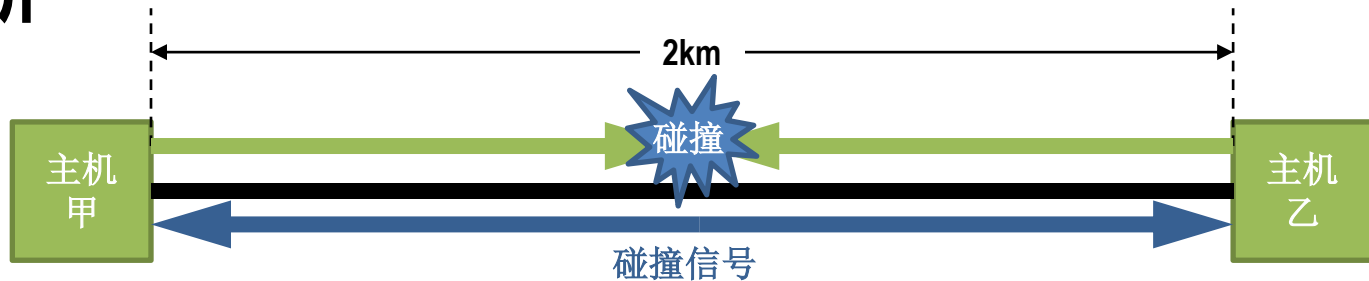
(1) 若主机甲和主机乙发送数据时发生冲突，则从开始发送数据时刻起，到**两台主机均**检测到冲突时刻止，最短需经过多长时间？最长需经过多长时间（假设主机甲和主机乙发送数据过程中，其他主机不发送数据）？

解析



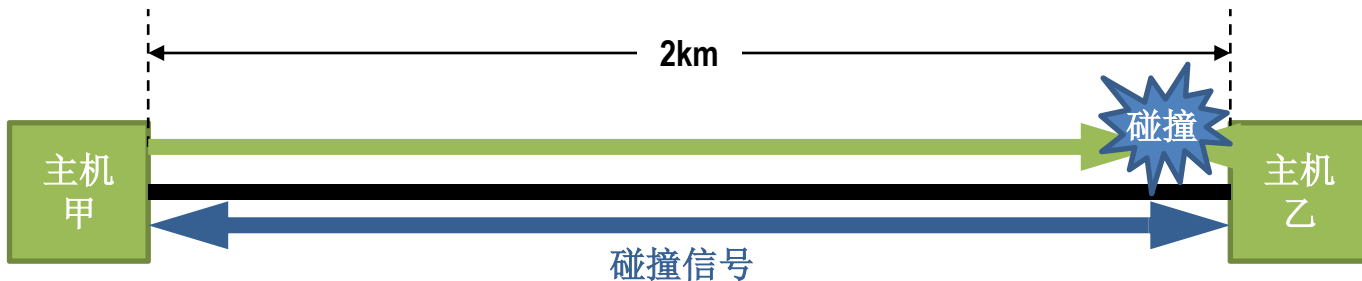


## 解析



**最短需要经过的时长：两主机之间信号的单程传播时延，记为 $\tau$ 。**





**最短需要经过的时长：**两主机之间信号的单程传播时延，记为 $\tau$ 。

**最长需要经过的时长：**两主机之间信号的往返传播时延，记为 $2\tau$ 。

$$\tau = \frac{2km}{200000km/s} = 10^{-5} s$$



■ 为了确保共享总线以太网上的每一个站点在发送完一个完整的帧之前，能够检测出是否产生了碰撞，**帧的发送时延就不能少于共享总线以太网端到端的往返时间，即一个争用期 $2\tau$ 。**

■ 对于 $10Mb/s$ 的共享总线以太网，其争用期 $2\tau$  的值规定为 $51.2\mu s$ ，因此其**最小帧长为 $512b$ ，即 $64B$ 。**

$$10Mb/s \times 51.2\mu s = 512b = \mathbf{64B}$$

□ 由于发送帧的站点边发送帧边检测碰撞，一旦检测到碰撞就立即中止帧的发送，此时已发送的数据量一定小于 $64B$ 。因此，接收站点收到**长度小于 $64B$ 的帧**，就可判定这是一个**遭遇了碰撞而异常中止的无效帧**，将其丢弃即可。



## 共享式以太网的最小帧长和最大帧长

以太网V2的MAC帧（最大长度1518B）				
目的地址	源地址	类型	数据载荷	FCS
6B	6B	2B	46B ~ 1500B	4B



## 共享式以太网的最小帧长和最大帧长

以太网V2的MAC帧（最大长度 <b>1518B</b> ）				
目的地址	源地址	类型	数据载荷	FCS
6B	6B	2B	46B ~ 1500B	4B

满足最小帧长为**64B**的要求

$$(6B + 6B + 2B + 46B + 4B = 64B)$$



## 共享式以太网的退避算法

- 在使用**CSMA/CD**协议的共享总线以太网中，正在发送帧的站点一边发送帧一边检测碰撞，当检测到碰撞时就立即停止发送，**退避一段随机时间**后再重新发送。
- 共享总线以太网中的各站点采用**截断二进制指数退避**（Truncated Binary Exponential Backoff）算法来选择退避的随机时间。





## 共享式以太网的退避算法 — 截断二进制指数退避算法

The diagram illustrates the formula for the truncated binary exponential backoff algorithm. It consists of three main components arranged horizontally: an orange circle on the left, a purple square in the middle, and a green rectangle on the right. The orange circle contains the text "退避时间" (Retention Time). To its right is an equals sign. The purple square contains the text "基本退避时间" (Basic Retention Time). To its right is a large black multiplication symbol (X). The green rectangle contains the text "随机数  $r$ " (Random Number  $r$ ).

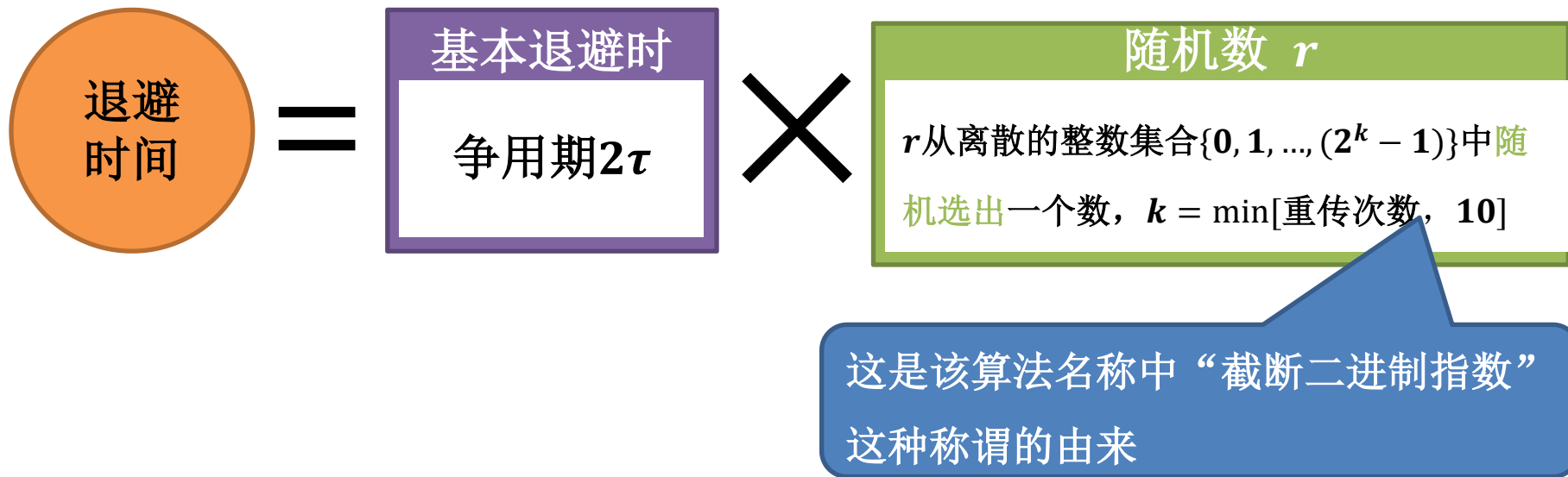
$$\text{退避时间} = \text{基本退避时间} \times \text{随机数 } r$$



$$\text{退避时间} = \begin{matrix} \text{基本退避时} \\ \text{争用期 } 2\tau \end{matrix} \times \text{随机数 } r$$

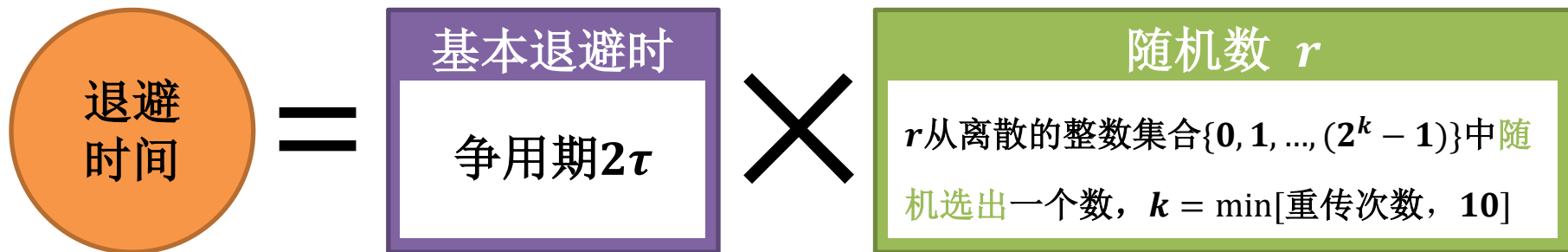


## 共享式以太网的退避算法——截断二进制指数退避算法





## 共享式以太网的退避算法 —— 截断二进制指数退避算法



重传次数	$k$	离散的整数集合 $\{0, 1, \dots, (2^k - 1)\}$	可能的退避时间
1	1	$\{0, 1\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau$
2	2	$\{0, 1, 2, 3\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau, 2 \times 2\tau, 3 \times 2\tau$
10	10	$\{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, 1023\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau, 2 \times 2\tau, \dots, 1023 \times 2\tau$



## 共享式以太网的退避算法——截断二进制指数退避算法

如果连续多次发送碰撞，就表明可能有较多的站点参与竞争信道。但使用上述退避算法可使重传需要推迟的平均时间随重传次数而增大（即动态退避），因而减小产生碰撞的概率。

当重传达16次仍不能成功时，就表明同时打算发送帧的站点太多，以至于连续产生碰撞，此时应放弃重传并向高层报告。

重传次数	$k$	离散的整数集合 $\{0, 1, \dots, (2^k - 1)\}$	可能的退避时间
1	1	$\{0, 1\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau$
2	2	$\{0, 1, 2, 3\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau, 2 \times 2\tau, 3 \times 2\tau$
10	10	$\{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, 1023\}$	$0 \times 2\tau, 1 \times 2\tau, 2 \times 2\tau, \dots, 1023 \times 2\tau$



## 共享式以太网的信道利用率





## 共享式以太网的信道利用率



■ 考虑以下这种理想情况：

- ☐ 总线一旦空闲就有某个站点立即发送帧
- ☐ 各站点发送帧都不会产生碰撞
- ☐ 发送一帧占用总线的时间为  $T_0 + \tau$ ，而帧本身的发送时间是  $T_0$

极限信道利用率 
$$S_{max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{T_0}} = \frac{1}{1 + a}$$





极限信道利用率  $S_{max} \uparrow = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{T_0}} = \frac{1}{1 + a} \downarrow$

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

参数  $a$  的值应尽量小，以提高信道利用率

共享总线以太网端到端的距离不应太长 帧的长度应尽量大

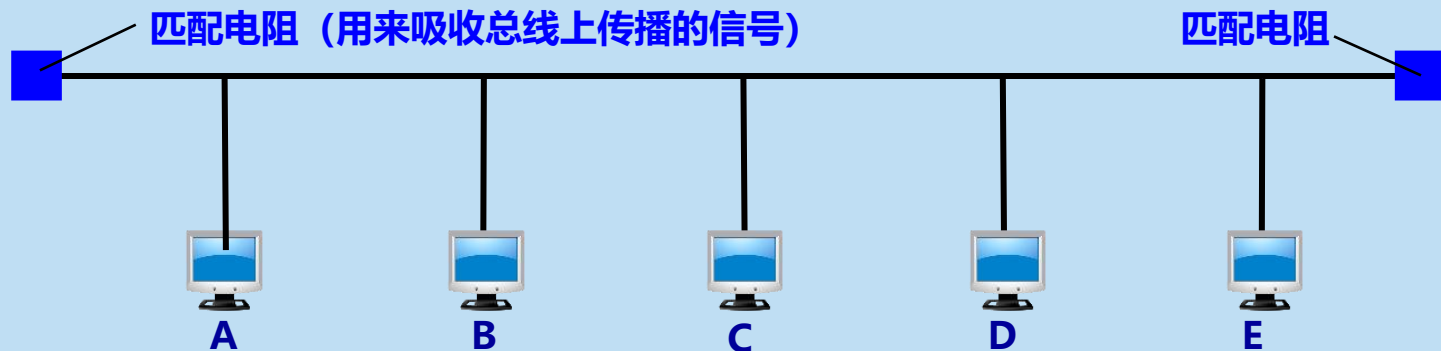


### 3.3.3 使用集线器的星形拓扑

- 传统以太网传输媒体：**粗同轴电缆** → **细同轴电缆** → **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)。

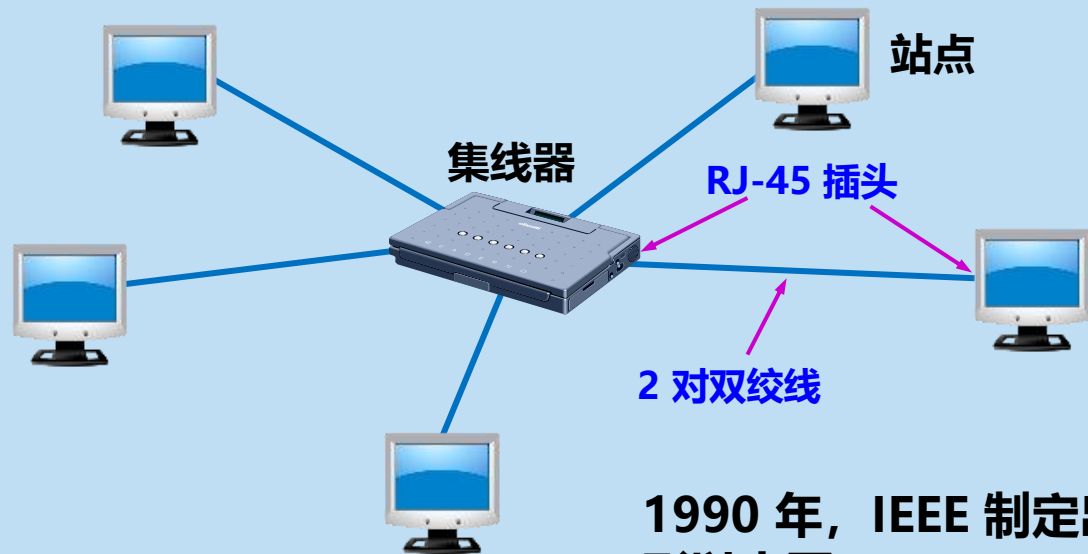


## 传统以太网使用同轴电缆，采用总线形拓扑结构





## 采用双绞线的以太网采用星形拓扑

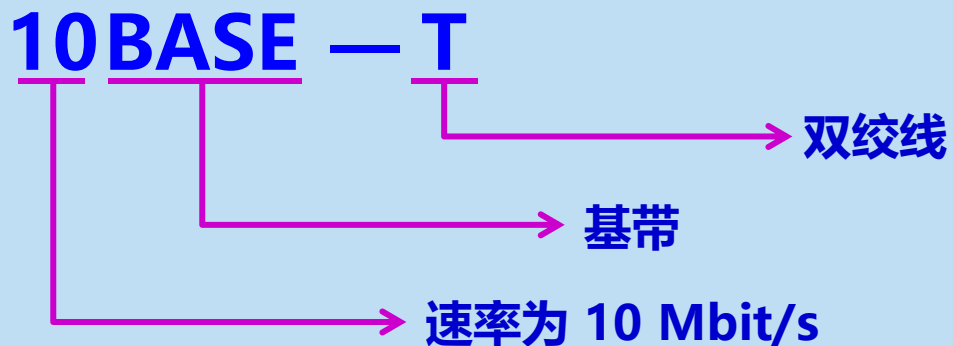


每个站到集线器的距离不超过 100 m。

1990 年, IEEE 制定出采用双绞线的星形以太网 10BASE-T 的标准 **802.3i**。



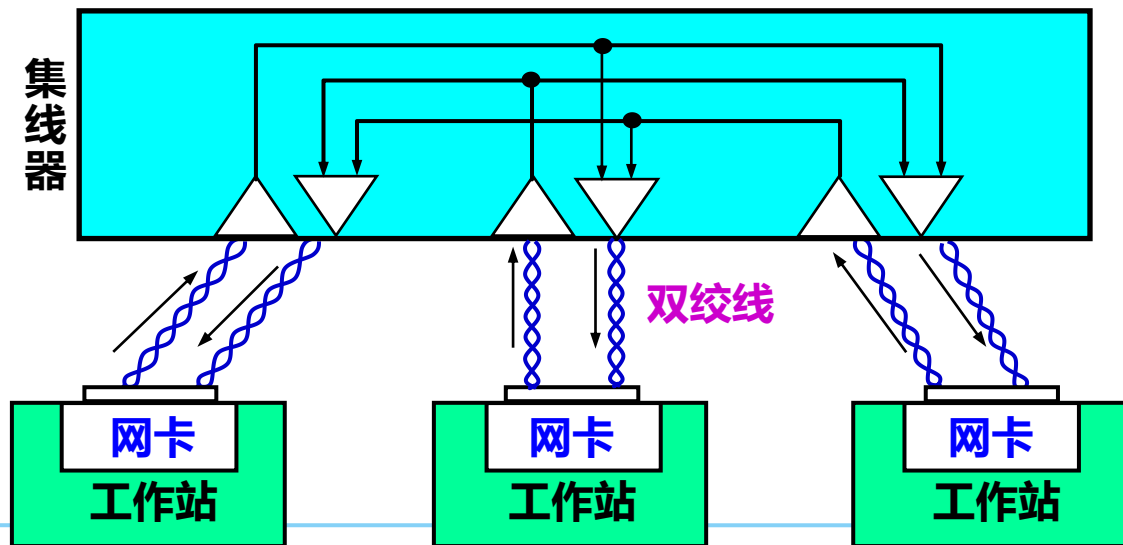
## 星形以太网 10BASE-T





## 集线器的一些特点

- 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。
- 很像一个多接口的转发器，**工作在物理层**。





### 3.3.5 以太网的 MAC 层

**主要内容：**

- **1. MAC 层的硬件地址**
- **2. MAC 帧的格式**



## 1. MAC 层的硬件地址

- **硬件地址**又称为**物理地址**，或 **MAC 地址**。
- IEEE 802 标准为局域网规定了一种 48 位的全球地址（简称为地址）是指局域网上的每一台计算机中**固化在适配器的 ROM 中的地址**。

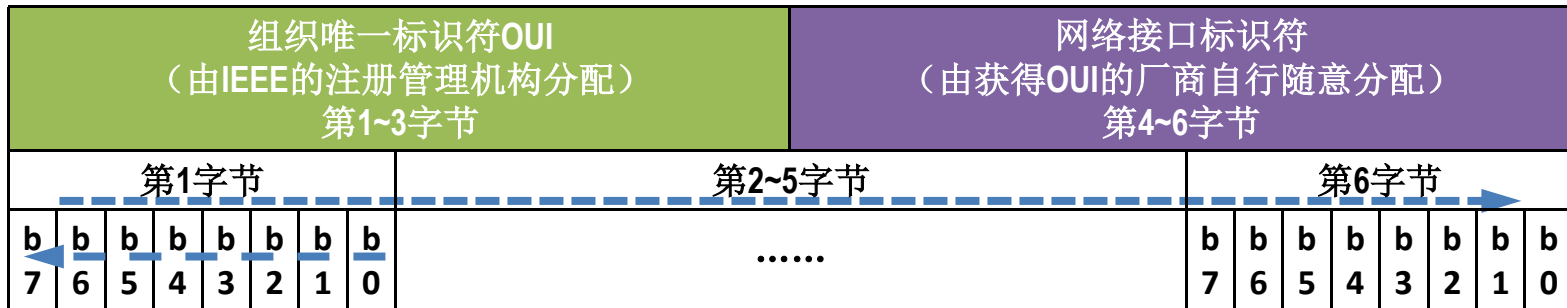
**注意：**如果连接在局域网上的主机或路由器安装有多个适配器，这样的主机或路由器就有多个“地址”。更准确些说，这种 48 位“地址”应当是某个**接口的标识符**。



02

# MAC地址

## IEEE 802局域网的MAC地址发送顺序

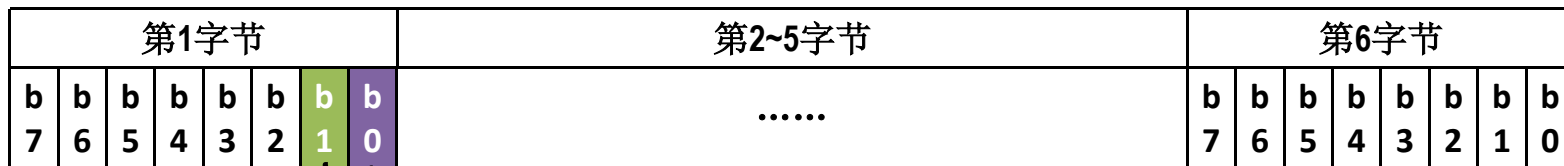


字节发送顺序： 第1字节 → 第6字节

字节内的比特发送顺序： b0 → b7



# IEEE 802局域网的MAC地址格式



**G/L** (**G**lobal/**L**ocal)

**G/L=0**: 全球管理

**G/L=1**: 本地管

**I/G** (**I**ndividual/**G**roup)

**I/G=0**: 单播地址

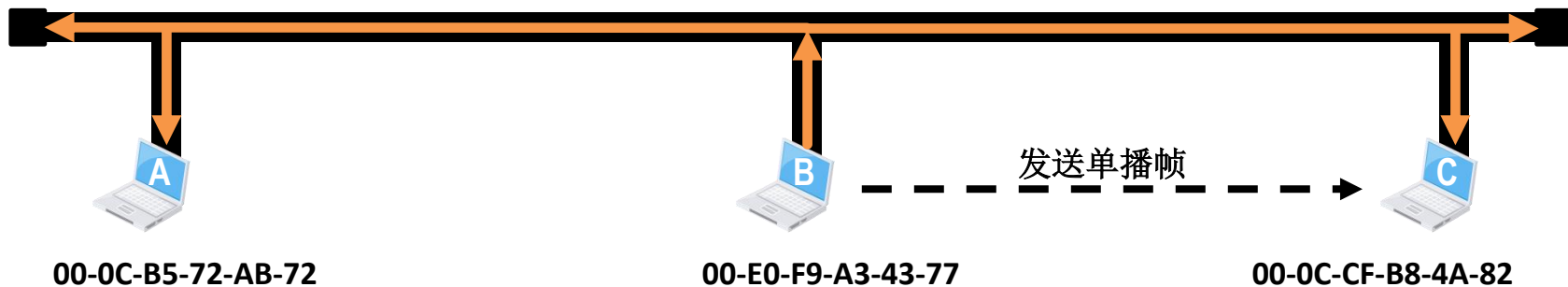
**I/G=1**: 多播地址

第1字节的 b1位	第1字节的 b0位	MAC地址类型	地址 占比	地址 数量
<b>0</b>	<b>0</b>	全球 单播 (由厂商生产网络设备时固化在设备中)	<b>1/4</b>	<b>2<sup>48</sup></b> ≈ 280 万 亿
	<b>1</b>	全球 多播 (交换机、路由器等标准网络设备所支持的多播地址)	<b>1/4</b>	
<b>1</b>	<b>0</b>	本地 单播 (由网络管理员分配, 优先级高于网络接口的全球单播地址)	<b>1/4</b>	
	<b>1</b>	本地 多播 (可由用户对网卡编程实现, 以表明其属于哪些多播组)	<b>1/4</b>	



## MAC地址

### 单播MAC地址举例



#### 帧的首部

目的地址: 00-0C-CF-B8-4A-82

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

数据载荷和帧尾部

.....

#### 帧的首部

目的地址: 00-0C-CF-B8-4A-82

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

数据载荷和帧尾部

.....

#### 帧的首部

目的地址: 00-0C-CF-B8-4A-82

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

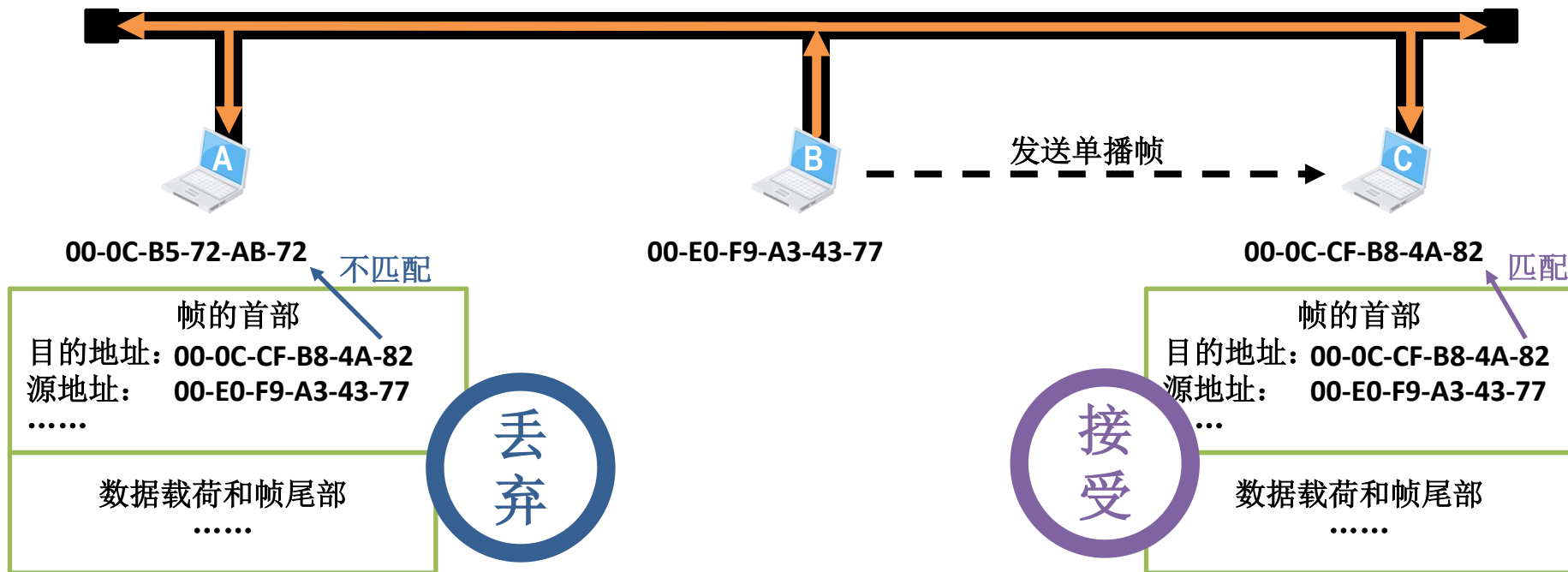
数据载荷和帧尾部

.....



## MAC地址

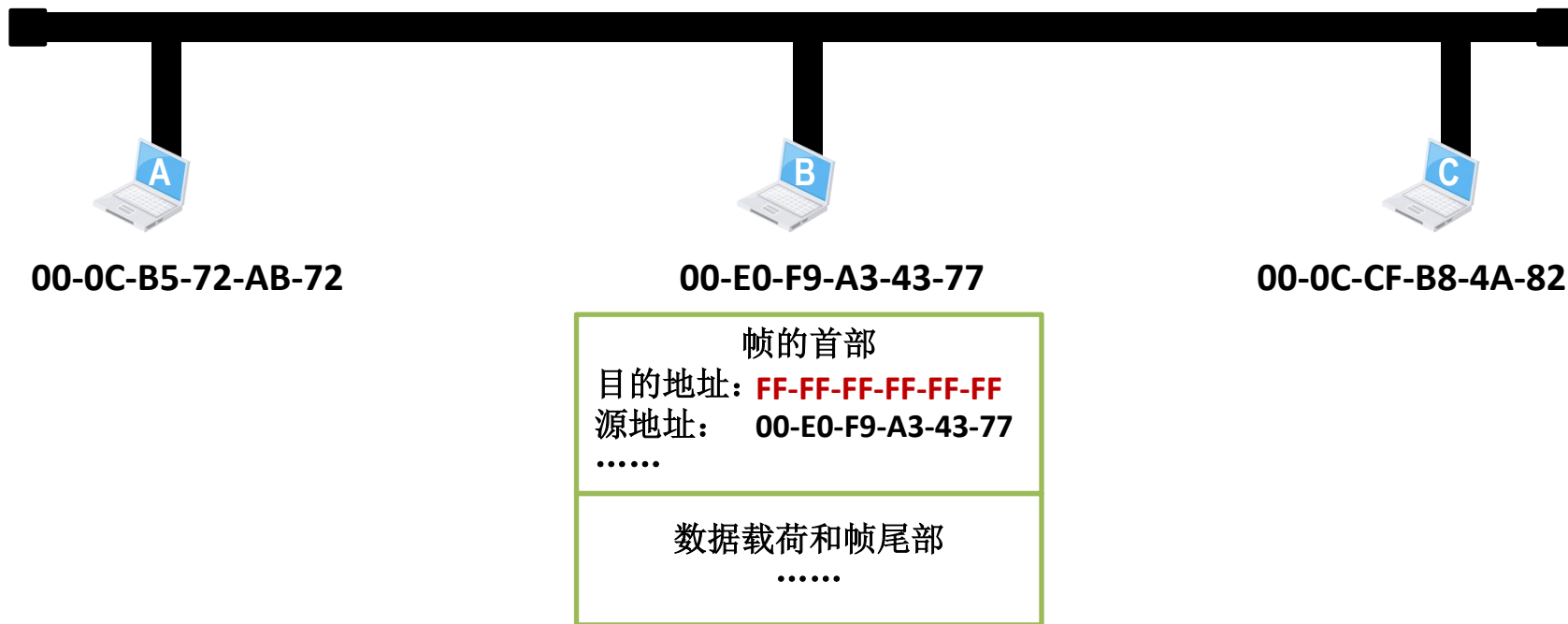
### 单播MAC地址举例





## MAC地址

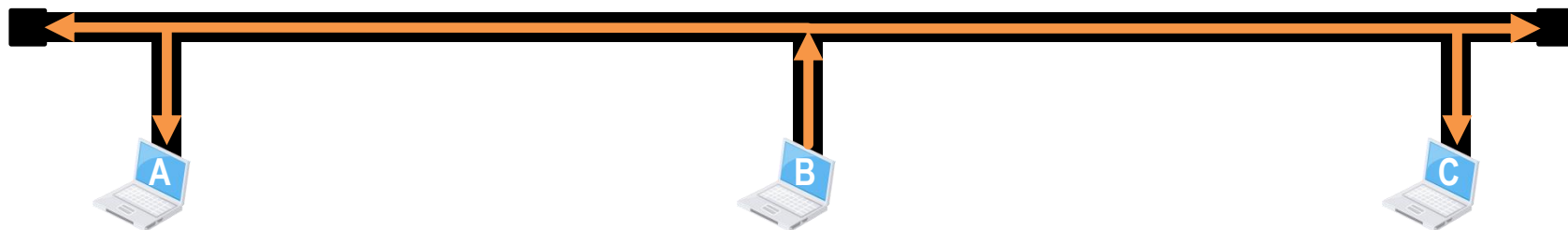
### 广播MAC地址举例





## MAC地址

### 广播MAC地址举例



00-0C-B5-72-AB-72

帧的首部

目的地址: FF-FF-FF-FF-FF-FF

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

数据载荷和帧尾部

.....

00-E0-F9-A3-43-77

帧的首部

目的地址: FF-FF-FF-FF-FF-FF

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

数据载荷和帧尾部

.....

00-0C-CF-B8-4A-82

帧的首部

目的地址: FF-FF-FF-FF-FF-FF

源地址: 00-E0-F9-A3-43-77

.....

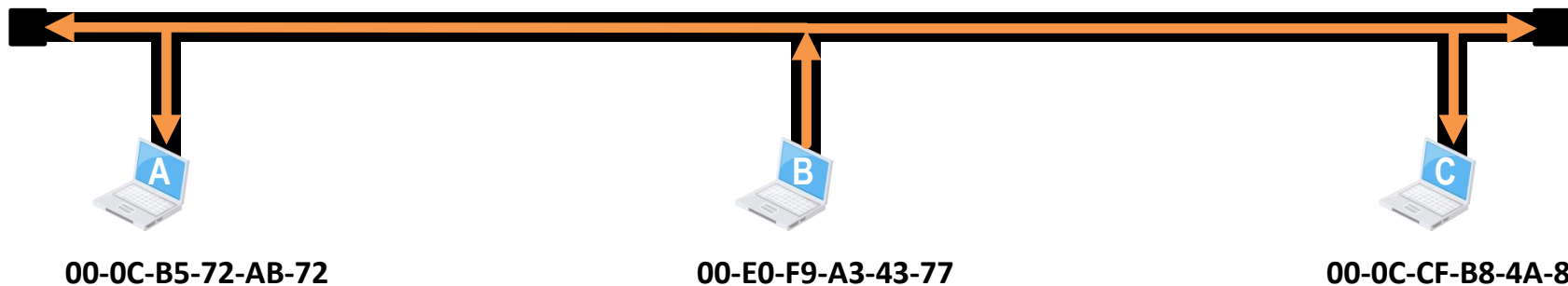
数据载荷和帧尾部

.....



MAC地址

## 广播MAC地址举例



帧的首部

目的地址: **FF-FF-FF-FF-FF-FF**  
 源地址: **00-E0-F9-A3-43-77**  
 .....

广播地址

接受

数据载荷和帧尾部  
 .....

广播地址

接受

帧的首部

目的地址: **FF-FF-FF-FF-FF-FF**  
 源地址: **00-E0-F9-A3-43-77**  
 .....

数据载荷和帧尾部  
 .....



## MAC地址

■ 网卡从网络上每收到一个帧，就检查帧首部中的目的MAC地址，按以下情况处理：

- (1) 如果目的MAC地址是广播地址（FF-FF-FF-FF-FF-FF），则接受该帧。
- (2) 如果目的MAC地址与网卡上固化的全球单播MAC地址相同，则接受该帧。
- (3) 如果目的MAC地址是网卡支持的多播地址，则接受该帧。
- (4) 除上述（1）、（2）和（3）情况外，丢弃该帧。

■ 网卡还可被设置为一种特殊的工作方式：**混杂方式（Promiscuous Mode）**。工作在混杂方式的网卡，只要收到共享媒体上传来的帧就会收下，而不管帧的目的MAC地址是什么。

- ☐ 对于网络维护和管理人员，这种方式可以监视和分析局域网上的流量，以便找出提高网络性能的具体措施。
- ☐ **嗅探器（Sniffer）**就是一种工作在混杂方式的网卡，再配合相应的工具软件（WireShark），就可以作为一种非常有用的网络工具来学习和分析网络。
- ☐ 混杂方式就像一把“双刃剑”，黑客常利用这种方式非法获取网络用户的口令。



## 本讲小结

**掌握：**

- CSMA/CD
- 争用期 ( $2\tau$ )
- 二进制指数退避算法
- 以太网的信道利用率
- 以太网的MAC地址