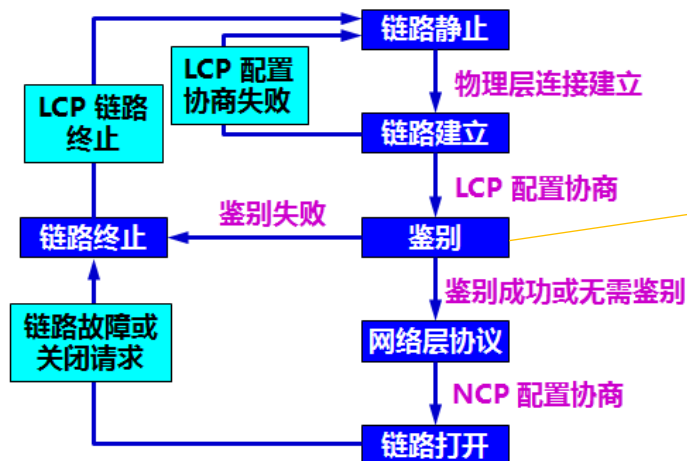


## ● 点对点信道的数据链路层协议——PPP

### ➤ 工作过程

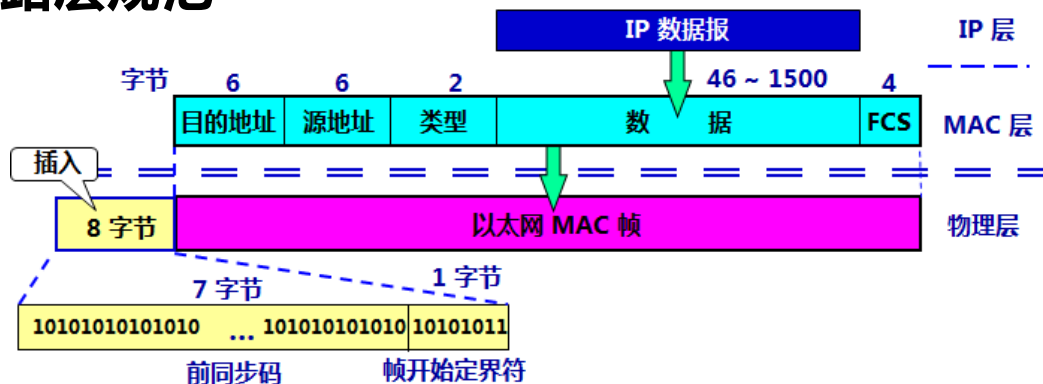


- 口令鉴别协议 (PAP)
- 质询握手鉴别协议 (CHAP)

## ● 广播信道的数据链路层协议

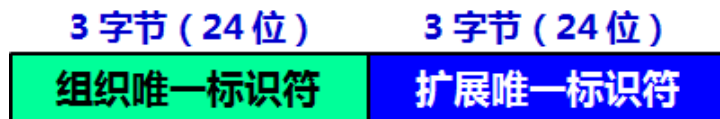
### ➤ 局域网数据链路层规范

### ➤ 以太网帧



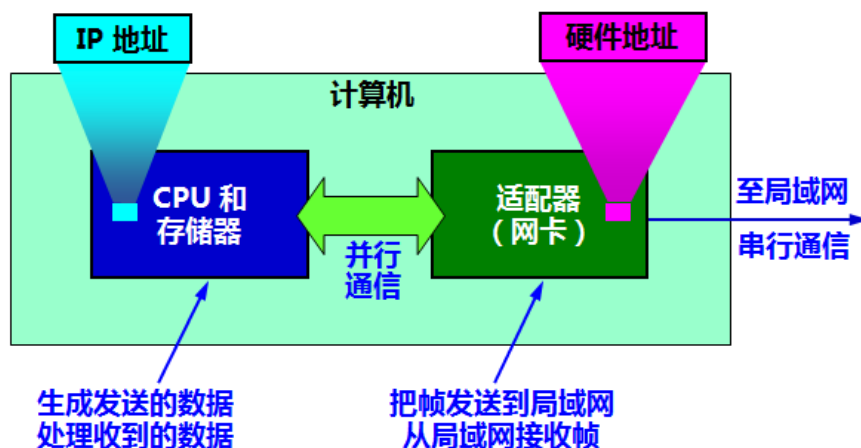
Ethernet II 帧格式

## ➤ MAC地址（硬件地址，物理地址）



48 位的 MAC 地址

## ➤ 网络接口卡（网卡）



数据帧的封装与解封装  
进行串/并、并/串转换  
编译码  
对数据进行缓存  
数据过滤

## ➤ 媒体共享技术 —— 随机接入

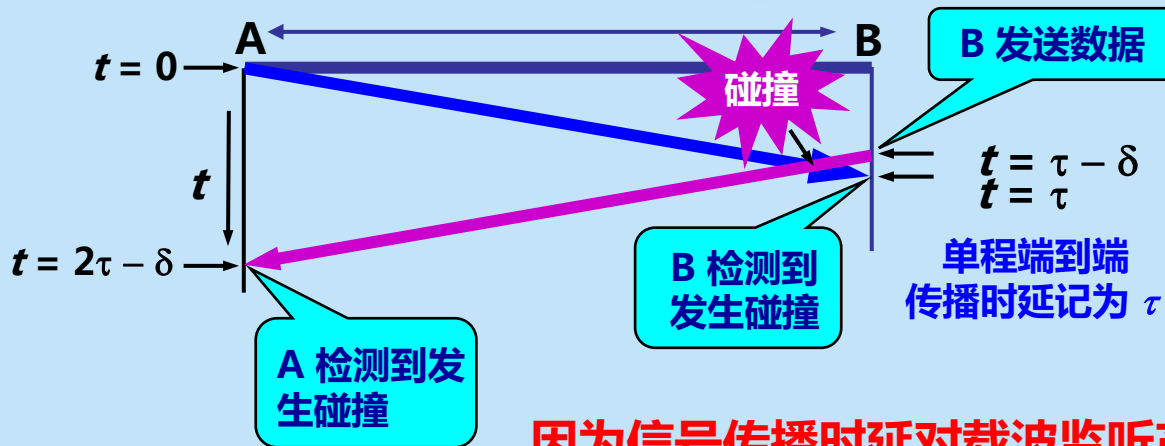
## CSMA/CD 协议

- CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) : **载波监听多址接入 / 碰撞检测** 。
  - **“载波监听”** : 每个站在发送数据**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; 在发送数据**之中**也要不断检测。
    - **总线上并没有什么“载波”**, “载波监听”就是用电子技术**检测**总线上有没有其它计算机发送的**数据信号**。
  - **“多址接入”** : 许多计算机以多址接入的方式连接在一根总线上。
  - **“碰撞检测”** : 适配器**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, 表明发生了碰撞。
    - 所谓**“碰撞”**就是发生了**冲突**, 因此**“碰撞检测”**也称为**“冲突检测”**。

## CSMA/CD 协议

## 为什么要进行碰撞检测？

一个站点需要经过多长时间才能确定数据帧已成功发送？



因为信号传播时延对载波监听产生了影响

- ◆ 站点监听到总线空闲，但总线并不一定是真的空闲。
- ◆ 一个站点发送数据后的一段时间内存在着发生碰撞的可能性。
- ◆ 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。

## CSMA/CD 协议—争用期

- 最先发送数据帧的站，在发送数据帧后**最多**经过时间  $2\tau$ （**两倍的端到端传播时延**）就可知道发送的数据帧是否遭受了碰撞。
- 局域网的端到端往返时延  $2\tau$  称为**争用期**或**碰撞窗口**。
- 经过争用期这段时间还未检测到碰撞，才能确定这次发送不会发生碰撞。
- 10 Mbit/s 局域网取  $51.2\ \mu\text{s}$  为争用期的长度，对于 10 Mbit/s 局域网，在争用期内可发送 512 bit，即 **64 字节**。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**。

## CSMA/CD 协议—争用期

- 10 Mbit/s 局域网的5-4-3规则
  - 5 : 5个网段
  - 4 : 4个网络延长设备（中继器或集线器）
  - 3 : 只有3个网段可接计算机等网络设备
- 争用期51.2  $\mu\text{s}$ 
  - 在极限情况下，局域网中两个收发器之间的最大距离为2.5km，往返5km；
  - 同轴电缆的时延特性为5 $\mu\text{s}/\text{km}$ ，端到端往返时延为25 $\mu\text{s}$ ；
  - 加上中继器等处理时延
- 5-4-3规则的采用与网络所允许的最大延时有关
  - 限制传输距离
  - 限制网络延长设备的数量



### CSMA/CD 协议—检测到碰撞后如何操作？

- 每一个正在发送数据的站，一旦发现总线上出现碰撞，适配器就要**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。



如何确定重传  
时间呢？

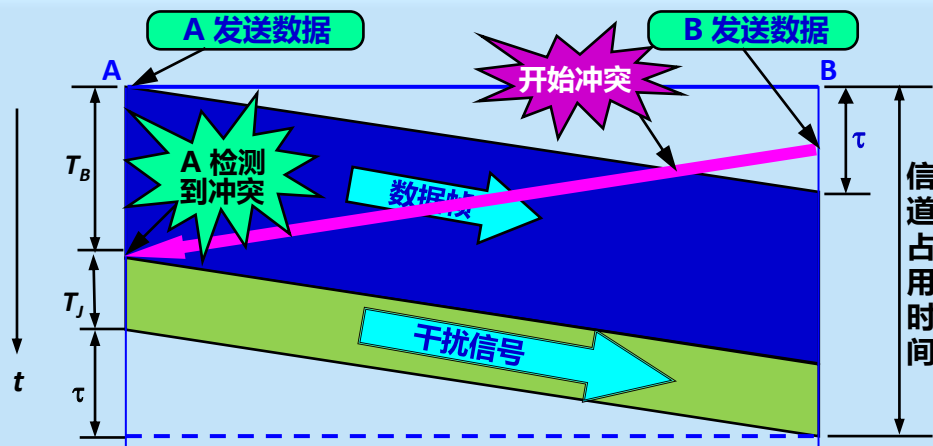
## CSMA/CD 协议—碰撞后重传的时机

**截断二进制指数退避算法** (truncated binary exponential type)

- 规定发生碰撞的站点在停止发送数据后，要推迟（退避）一个**随机时间**才能再发送数据。
  - **基本退避时间**取为争用期  $2\tau$ 。
  - 定义重传次数  $k$ ， $k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$
  - 从整数集合  $[0, 1, \dots, (2^k - 1)]$  中**随机**地取出一个数，记为  $r$ ，则重传所需的时延就是  $r$  倍的基本退避时间。
  - 当  $k \leq 10$  时，参数  $k$  等于重传次数。
  - 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告。
- 该算法可以使重传需要推迟的平均时间随重传次数的增多而增大（也称为**动态退避**），从而减小了发生碰撞的概率，有利于整个系统的稳定。



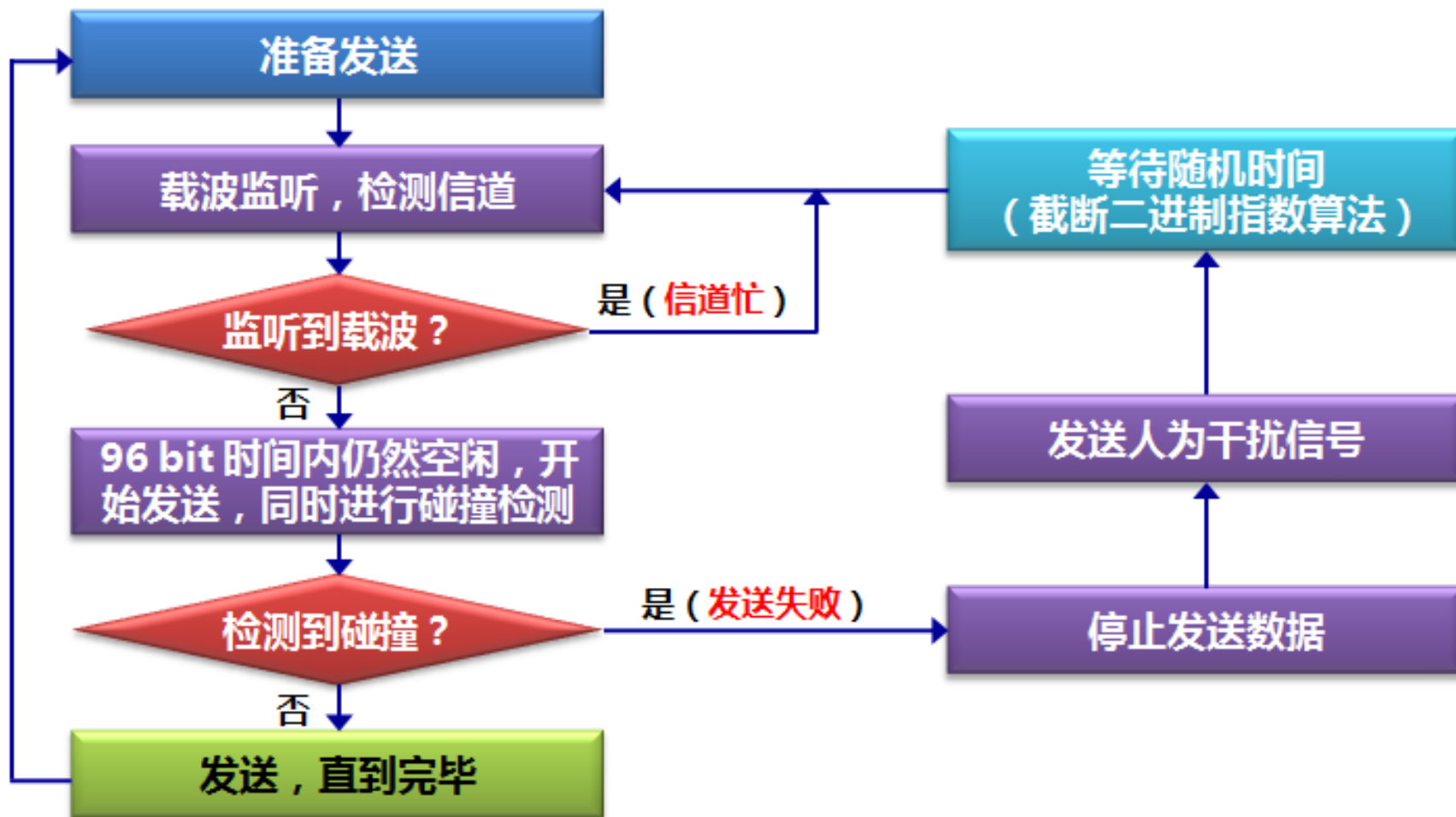
## CSMA/CD 协议—人为干扰信号



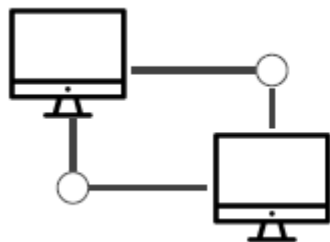
## 注意：

- ◆ 发生碰撞后，发送端需强化碰撞。
- ◆ 立即停止发送数据，再继续发送若干比特(32bit、48bit或64bit)的人为干扰信号，让所有用户都知道发生了碰撞。
- ◆ 以太网还规定了帧间最小间隔为  $9.6 \mu s$ 。

## CSMA/CD 协议的流程



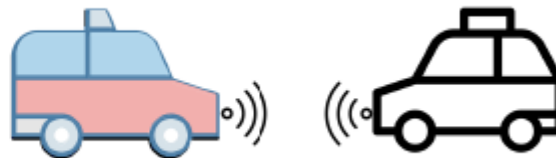
## CSMA/CD 协议的要点和特性



多址接入



载波监听



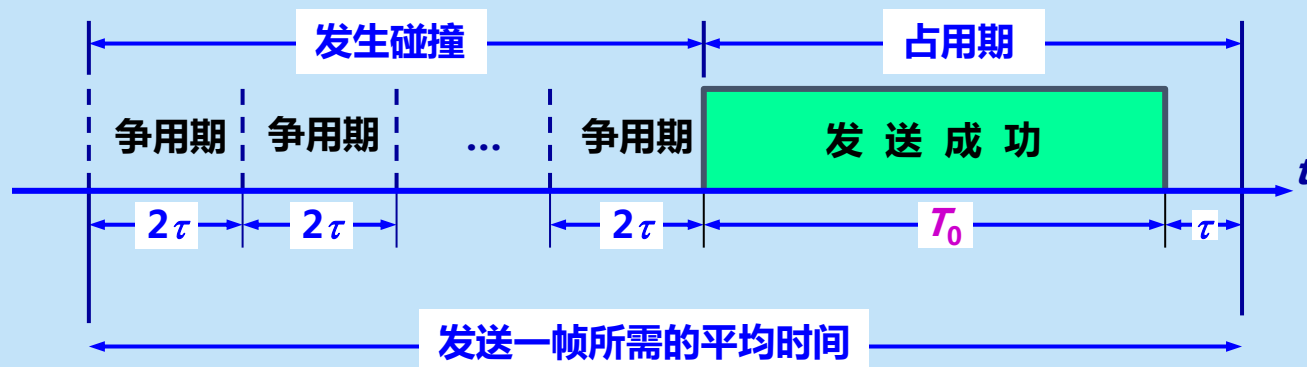
碰撞检测

先听后发，边发边听，冲突停止，延时重发

- 使用 CSMA/CD 协议时，各站点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。

## 以太网的信道利用率

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



## 以太网的信道利用率

- 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：

$$a = \tau / T_0$$

$a \rightarrow 0$ ，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。

- 要求：
  - 数据率一定时，以太网的连线的长度要有限制，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。

## 以太网的信道利用率

- 在理想化的情况下，网络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  $T_0$ ，因此可计算出理想情况下的极限信道利用率  $S_{\max}$ ，即

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

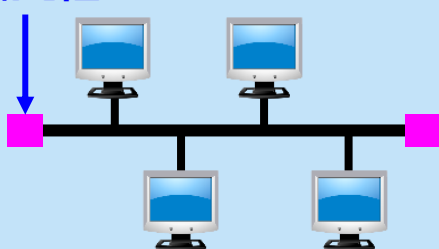
- 只有当参数  $a$  远小于 1 才能得到尽可能高的极限信道利用率。
- 据统计，当网络利用率达到 30% 时就已经处于重载的情况。很多的网络容量被网上的碰撞消耗掉了。

## 小 结

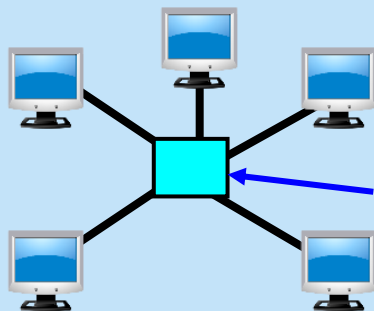
广播信道数据链路层	广播信道的特点	广播功能，便于扩展，可靠性强
	网络拓扑结构	总线型，星型，环型
	信道划分方法	动态划分
	两个标准	DIX Ethernet II IEEE 802.3
	适配器的作用	发送/接收帧 串/并、并/串转换 编译码 数据缓存 数据过滤
	CSMA/CD协议	多址接入 载波监听 冲突检测 截断二进制指数退避算法 64字节最小帧要求

## 局域网拓扑结构

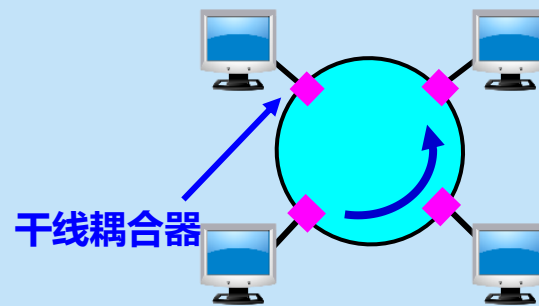
匹配电阻



总线网



星形网



环形网



封闭环路  
不便于扩充

从网络体系结构看，对局域网覆盖范围的扩展既可以在物理层进行，也可以在数据链路层进行，这种扩展的局域网在网络层看来仍然是一个网络。



### 网络中的中介设备

- **提供连通性，确保数据能流过网络。**
- 中介设备根据功能分为两类
  - **连接设备**：建立物理网络连接，不改变数据或传输路径。
  - **互联设备**：在网络中搬运数据，将数据引导到网络中的特定位置，将数据转换为另一种格式。

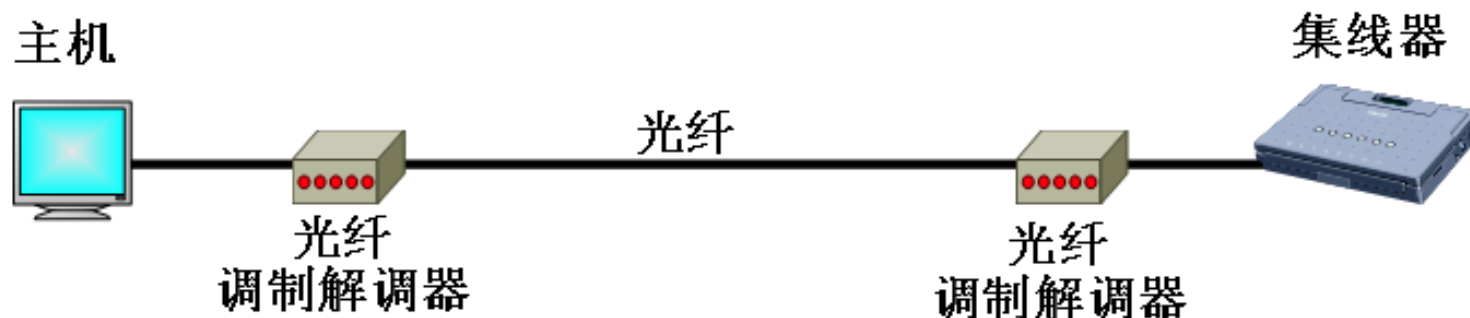
网卡、放大器、中继器、集线器

网桥、交换机、路由器

扩展层次	使用的设备	用 途
物理层	转发器 (中继器)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 连接局域网中物理特性相同的两个网段</li> <li>■ 对衰减的信号进行放大, 恢复信号的波形和强度, 保持与原数据相同</li> <li>■ 实现点对点通信</li> </ul>
	光纤和光纤调制解调器	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 扩展主机和集线器之间的距离</li> </ul>
	集线器	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 多接口转发器</li> <li>■ 使用电子器件模拟电缆线工作, 各台连接到端口上的主机共享逻辑上的总线</li> <li>■ 能够实现“一对多”通信, 使用广播技术将接收到的数据广播到其他所有端口</li> </ul>
数据链路层	网桥	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 连接同构网络中不同的子网</li> <li>■ 最简单的网桥有两个端口, 每个端口与一个子网相连</li> </ul>
	交换机	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 多端口的网桥</li> <li>■ 兼具中继器、集线器、网桥的功能</li> </ul>

### 在物理层扩展局域网——光纤和光纤调制解调器

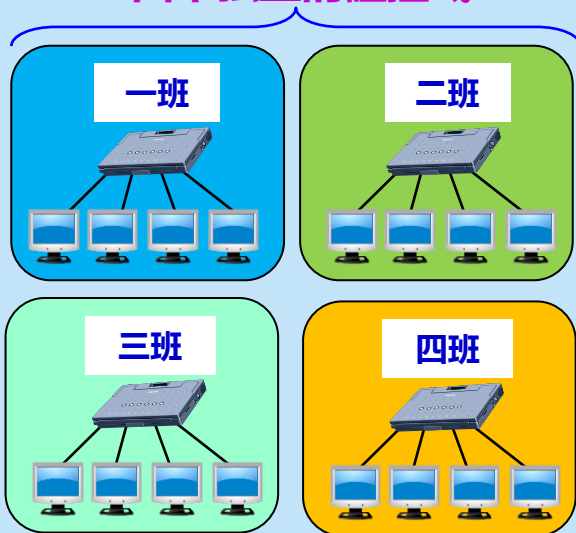
- 主机使用光纤（通常是一对光纤）和一对光纤调制解调器连接到集线器
  - 光纤：时延小，带宽宽。
  - 光纤调制解调器：进行电信号和光信号转换。
- 可以很容易地使主机和几千米以外的集线器相连接。



## 在物理层扩展局域网—集线器

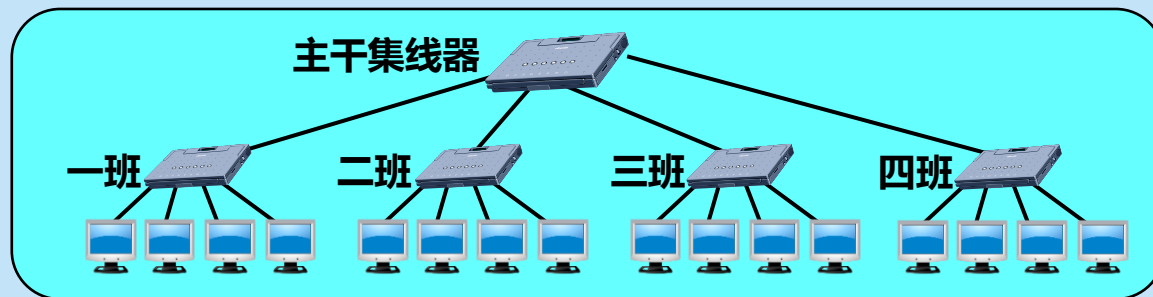
- 将多个局域网网段连成更大的、多级星形结构的局域网。

四个独立的碰撞域



四个独立的局域网

一个更大的碰撞域



一个扩展的局域网

### ➤ 优点

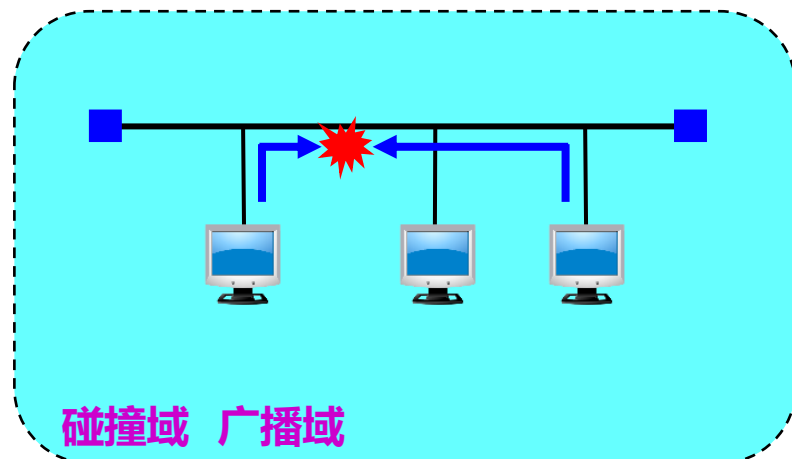
- 使原来属于不同碰撞域的局域网上的计算机能够进行跨碰撞域的通信。
- 扩大了局域网覆盖的地理范围。

### ➤ 缺点

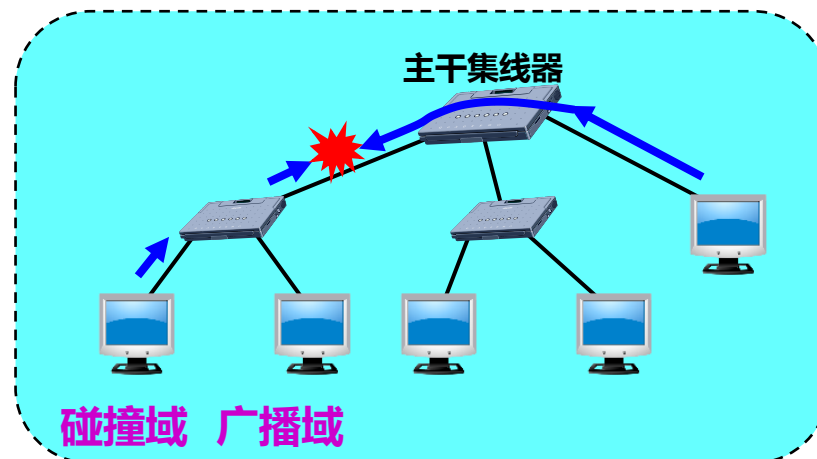
- 碰撞域增大了，但总吞吐量并未提高。
- 若不同碰撞域使用不同的数据率，则不能用集线器进行互连。

## 在物理层扩展局域网——碰撞域

- 所有计算机都处于同一个**碰撞域**（或冲突域）中和同一个**广播域**中。



总线形局域网

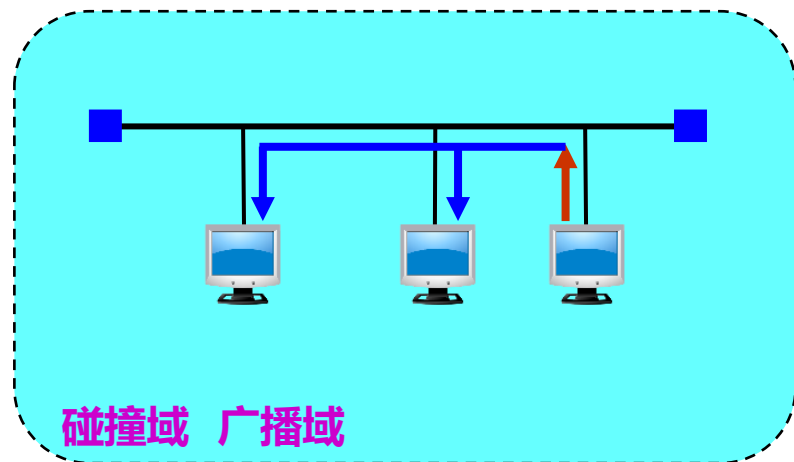


使用集线器的星形局域网

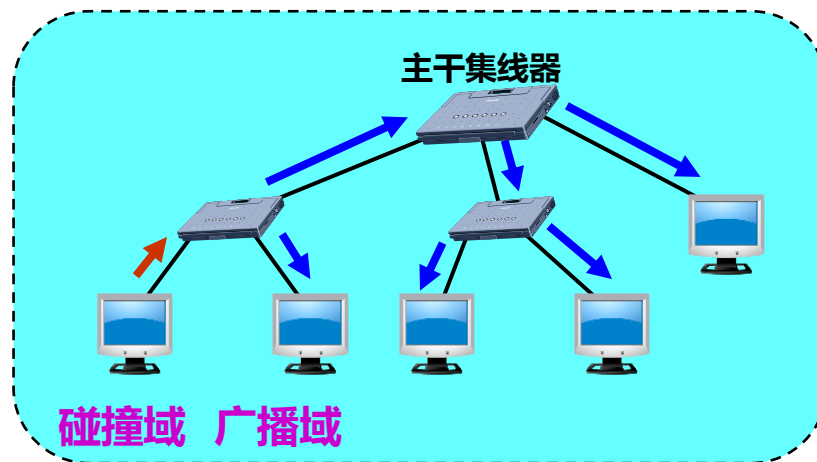
**碰撞域（或冲突域）**：指这样一部分网络，其中任何两台或多台设备同时传输数据时将引发冲突，必须重传。

## 在物理层扩展局域网—广播域

- 所有计算机都处于同一个**碰撞域**（或冲突域）中和同一个**广播域**中。



总线形局域网



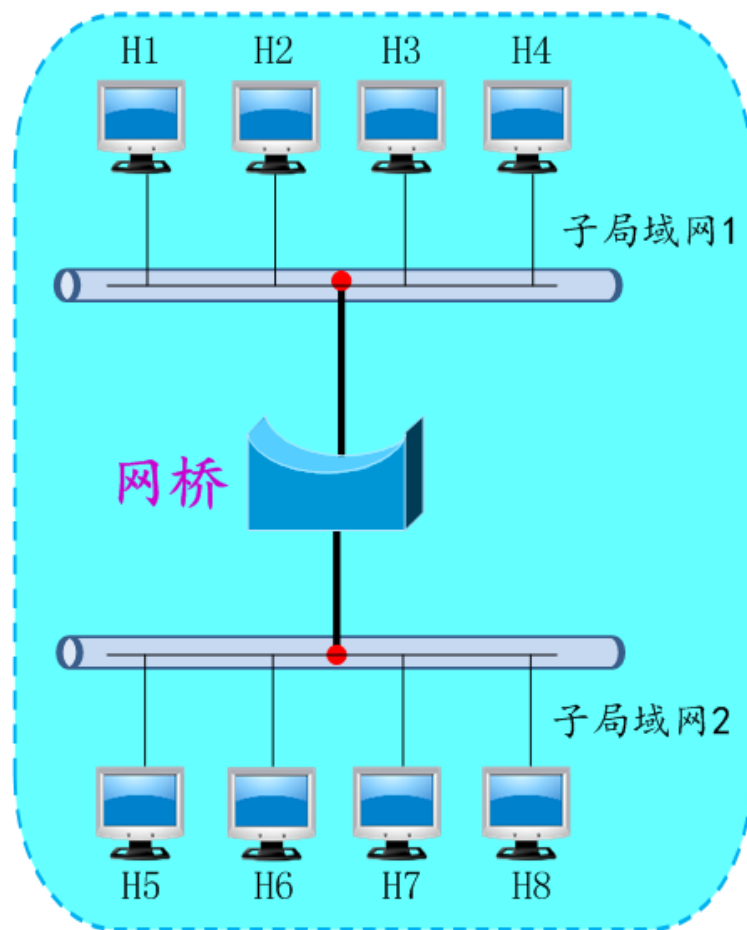
使用集线器的星形局域网

**广播域**：指这样一部分网络，其中任何一台设备发出的广播数据都能被该部分网络中的所有其他设备所接收。

## 在数据链路层扩展局域网—网桥

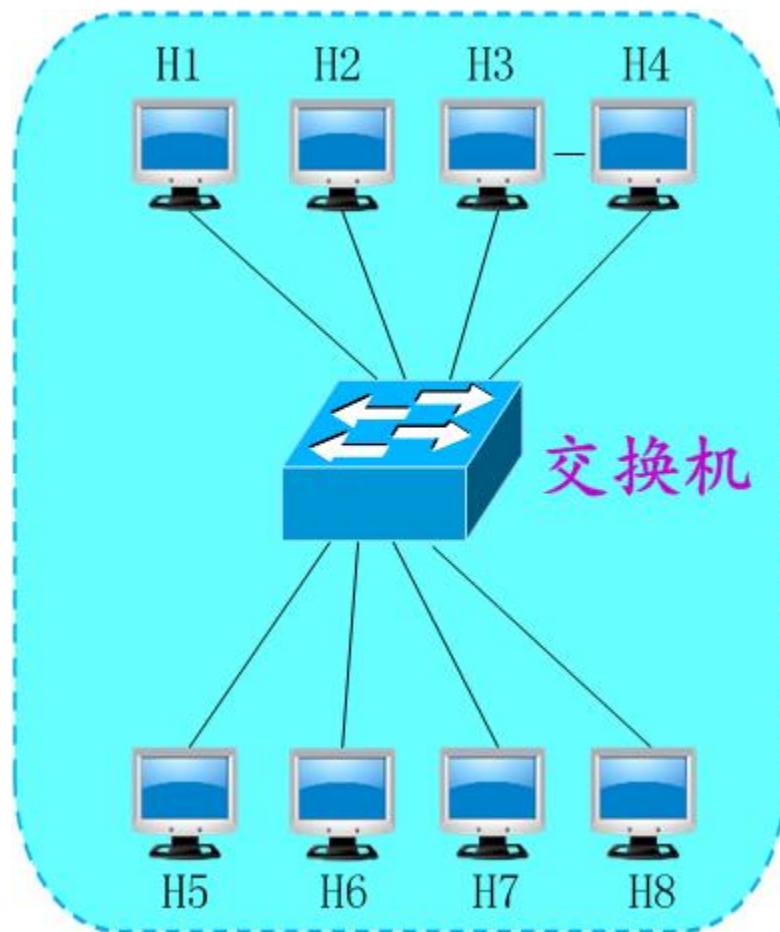
## ● 扩展局域网更常用的方法是在数据链路层进行。

- 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，并不是向所有的端口转发此帧，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端口，或把它丢弃。
- 隔离碰撞域。



## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

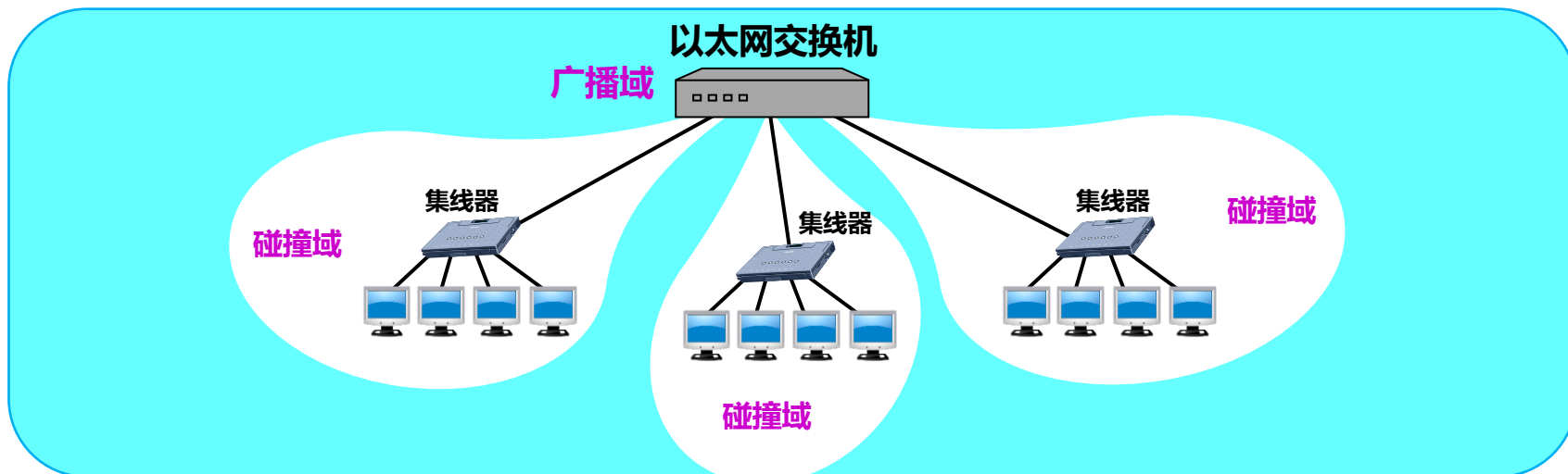
- 以太网交换机实质上就是一个**多端口的网桥**，通常都有十几个或更多的接口。
- 每个端口都直接与一个单台主机或另一个以太网交换机相连，并且一般都工作在**全双工方式**。
- 以太网交换机具有**并行性**，能同时连通多对端口，使多对主机能**同时通信**。
- 以太网交换机使用了专用的交换结构芯片，**用硬件转发**，其转发速率要比使用软件转发的网桥快很多。





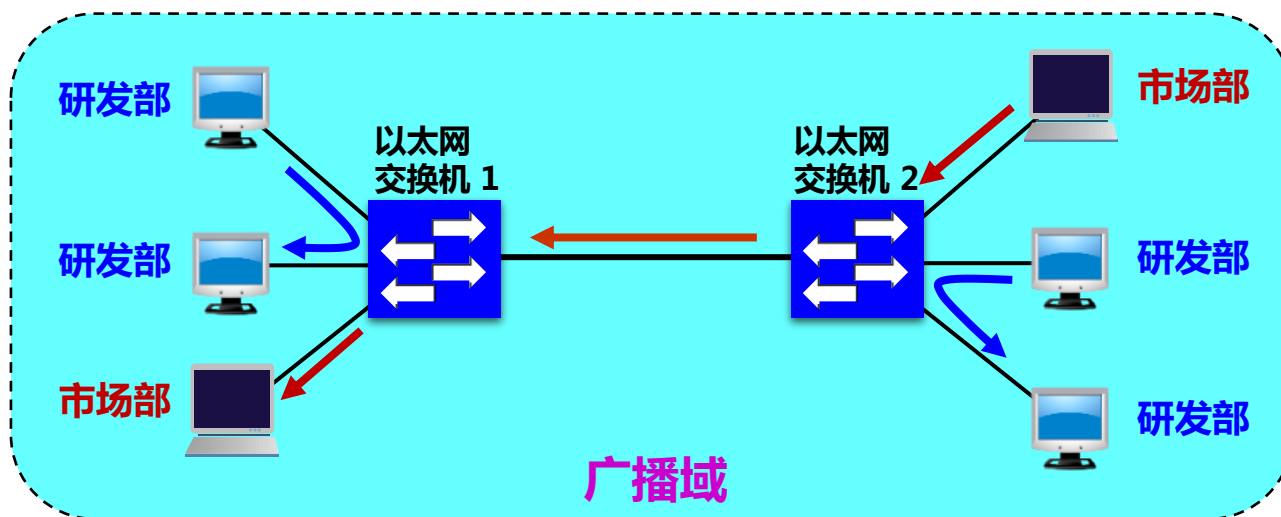
## 在数据链路层扩展以太网—以太网交换机

- 每个端口都处于一个**独立的碰撞域**（或**冲突域**）中，但所有计算机都处于**同一个广播域**中。



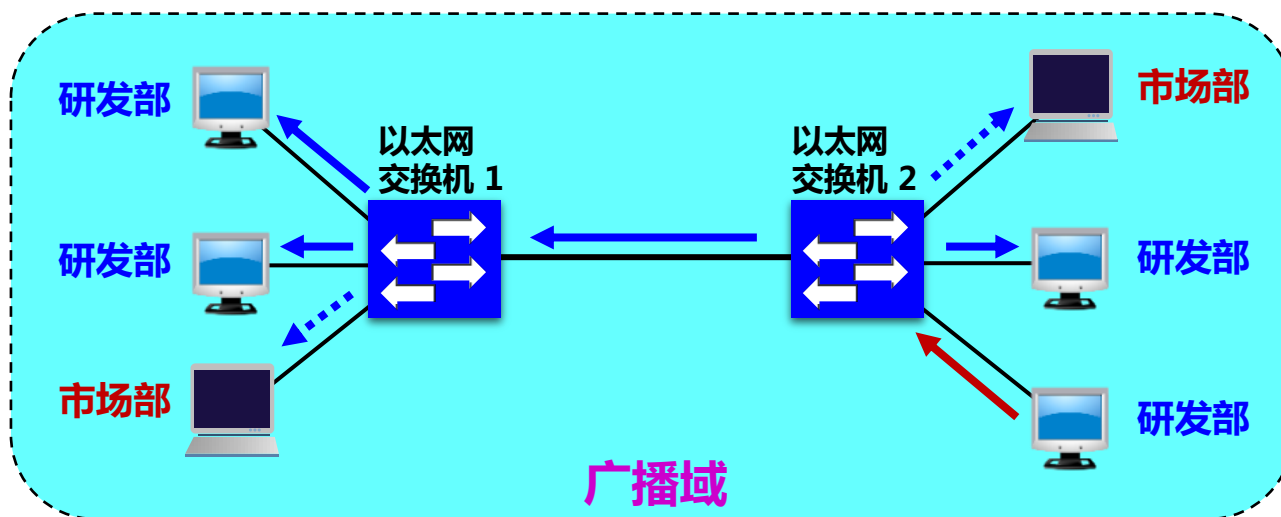
## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

- 每个端口都处于一个**独立的碰撞域**（或**冲突域**）中，但所有计算机都处于**同一个广播域**中。



## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

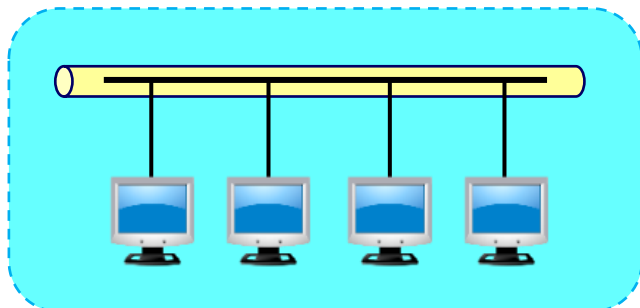
- 每个端口都处于一个**独立的碰撞域**（或**冲突域**）中，但所有计算机都处于**同一个广播域**中。



## 在数据链路层扩展局域网——以太网交换机的优点

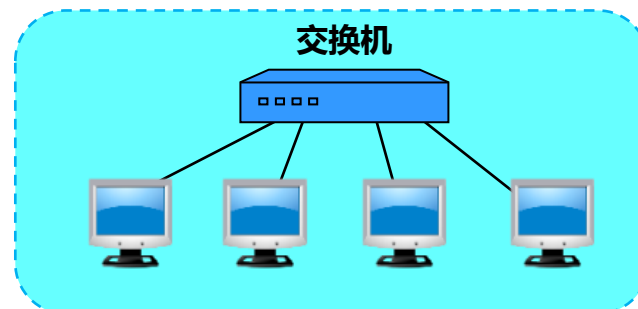
早期

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

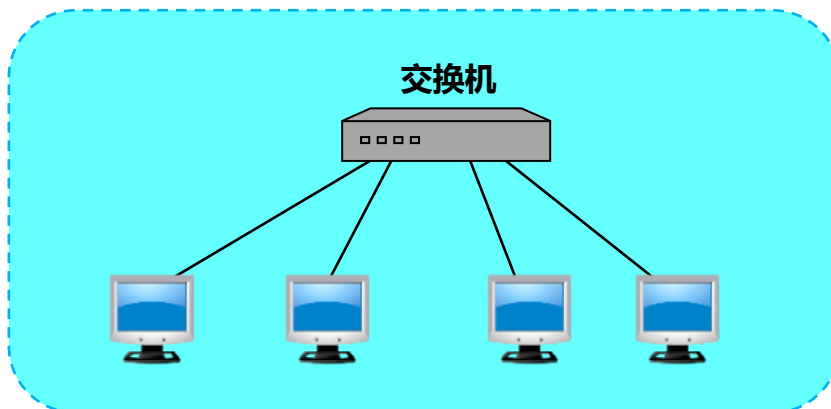
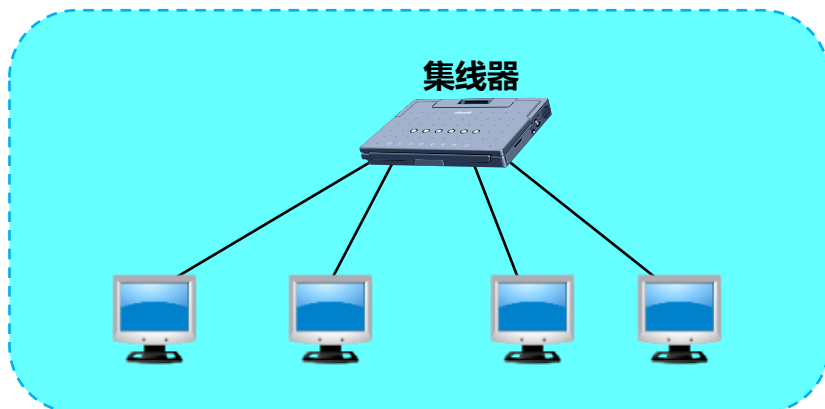
以太网交换机为中心的星形结构

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。

## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机的优点

以太网交换机的性能远远超过普通的集线器。

- 用户独享带宽，增加了总容量。
- 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端口，方便了各种不同情况的用户。



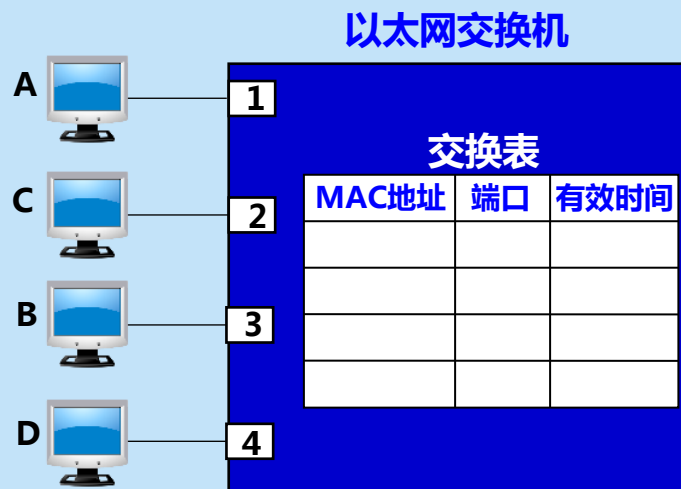
- N 个用户共享集线器提供的带宽 B。
- 平均每个用户仅占有  $B/N$  的带宽。

- 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。
- 交换机总带宽达  $B \times N$ 。

## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

## 自学习功能

- 以太网交换机通过**自学习算法**自动地逐渐建立其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**），因此是一种**即插即用**的设备。

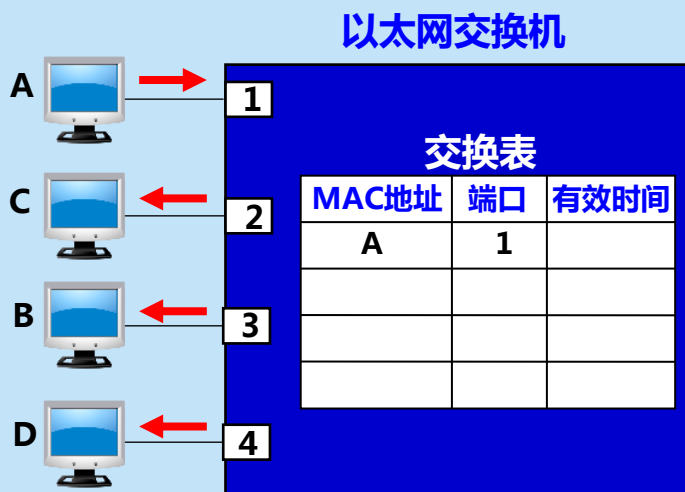


开始时，交换表是空的

## 在数据链路层扩展局域网——以太网交换机

## 自学习功能

- 以太网交换机通过**自学习算法**自动地逐渐建立其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**），因此是一种**即插即用**的设备。



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。该帧从端口 1 进入到交换机。

交换机收到帧后，先查找交换表。没有查到应从哪个端口转发这个帧给 B。

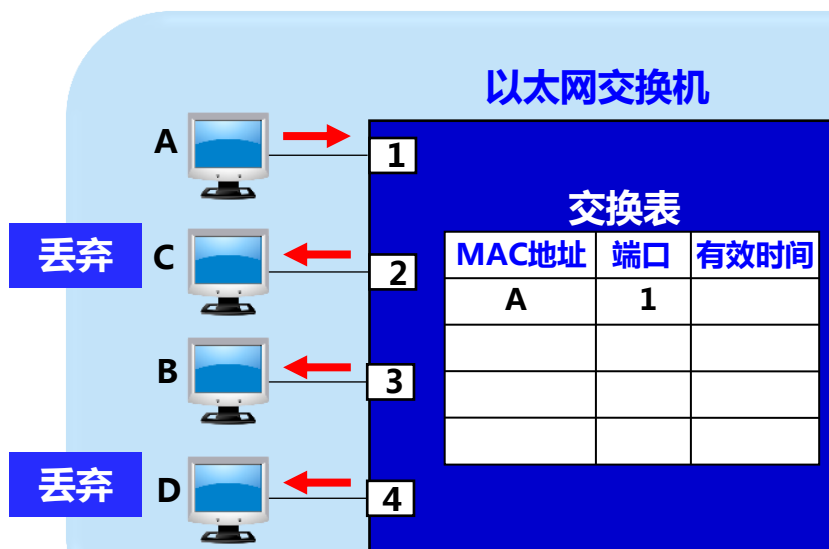
交换机把这个帧的源地址 A 和端口 1 写入交换表中。

交换机向除端口 1 以外的所有的端口广播这个帧。

## 在数据链路层扩展局域网--以太网交换机

## 自学习功能

- 以太网交换机通过**自学习算法**自动地逐渐建立其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**），因此是一种**即插即用**的设备。



以太网帧

目的地址	源地址	类型	数据	FCS
B	A			

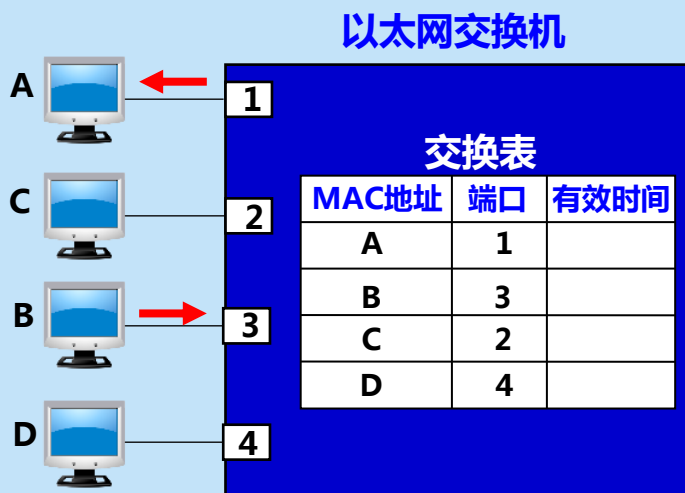
由于与该帧的目的地址不相符，C 和 D 将丢弃该帧。



## 在数据链路层扩展局域网--以太网交换机

## 自学习功能

- 以太网交换机通过**自学习算法**自动地逐渐建立其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**），因此是一种**即插即用**的设备。



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。该帧从端口 3 进入到交换机。

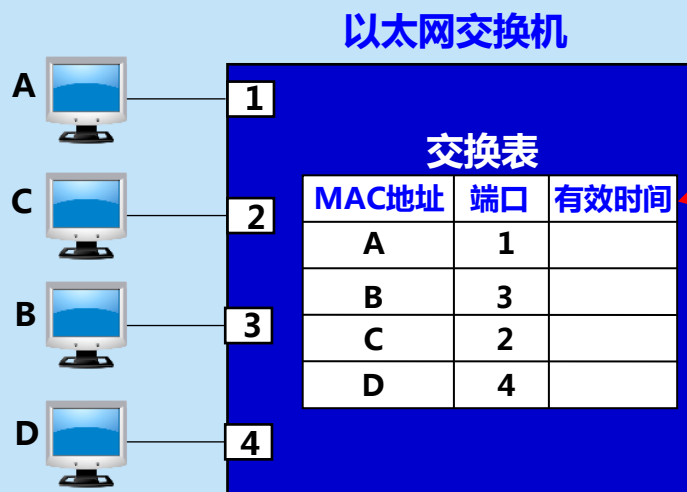
交换机收到帧后，先查找交换表。发现交换表中的 MAC 地址有 A，表明要发送给 A 的帧应从端口 1 转发出去。于是就把这个帧传送到端口 1 转发给 A。

交换机把这个帧的源地址 B 和端口 3 写入交换表中。

## 在数据链路层扩展局域网--以太网交换机

## 自学习功能

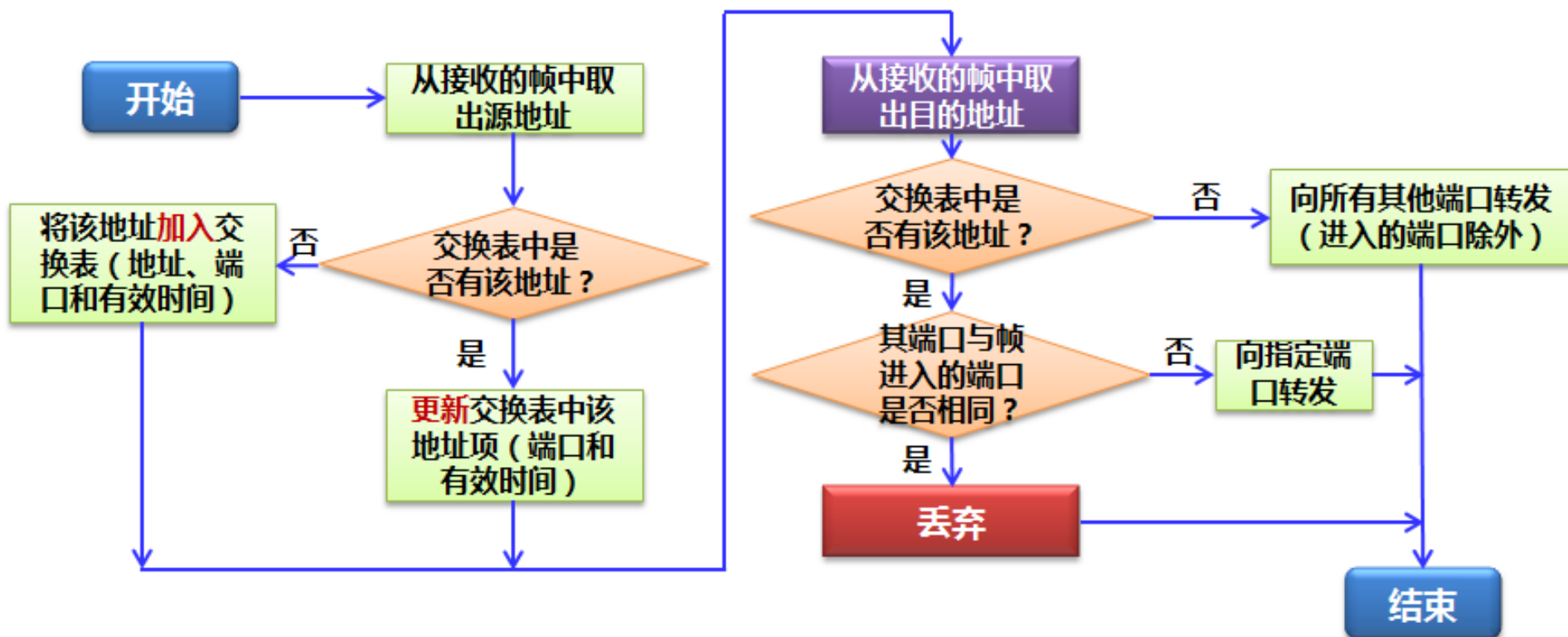
- 以太网交换机通过**自学习算法**自动地逐渐建立其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**），因此是一种**即插即用**的设备。



**有效时间**：解决交换机端口更换主机或主机更换其网络适配器的  
问题。  
**过期的项目就自动被  
删除。**

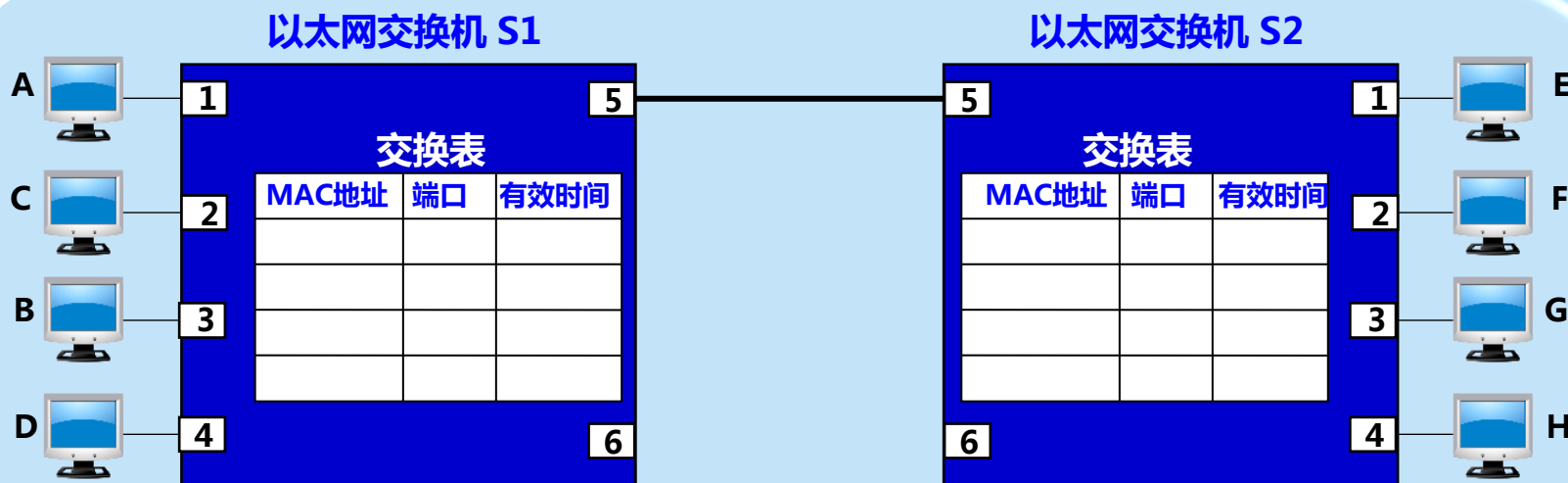
## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

## ● 以太网交换机自学习和转发帧的流程



## 在数据链路层扩展局域网—以太网交换机

例



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？