



计算机网络 (第5版)

Andrew S. Tanenbaum 编著
清华大学出版社

第 4 章

介质访问控制子层



4.1	信道分配问题
4.2	多路访问协议
4.3	以太网
4.4	无线局域网
4.5	宽带无线
4.6	蓝牙
4.7	RFID
4.8	数据链路层交换

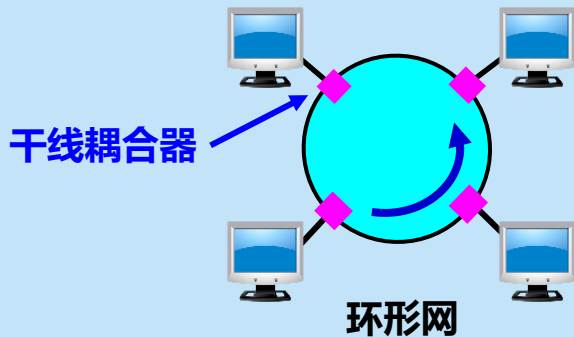
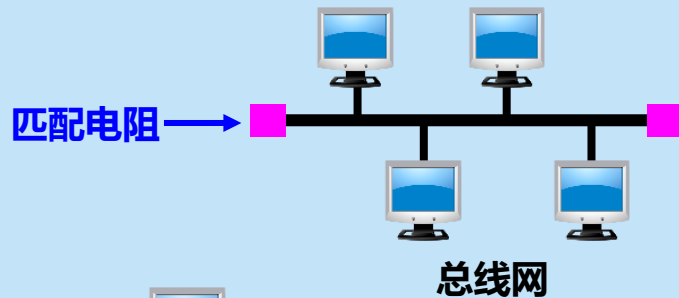
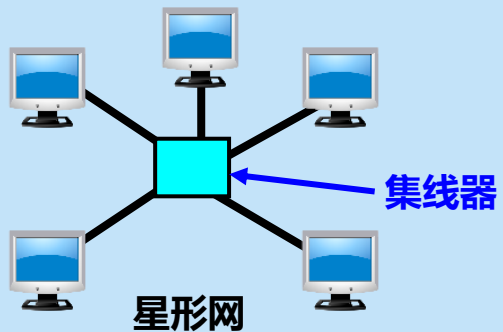


局域网的数据链路层

- 局域网最主要的**特点**是：
 1. 网络为一个单位所拥有；
 2. 地理范围和站点数目均有限。
- 局域网具有如下**主要优点**：
 1. 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。
 2. 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。
 3. 提高了系统的可靠性、可用性和残存性。

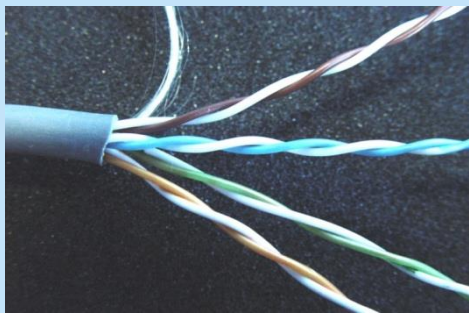


局域网拓扑结构

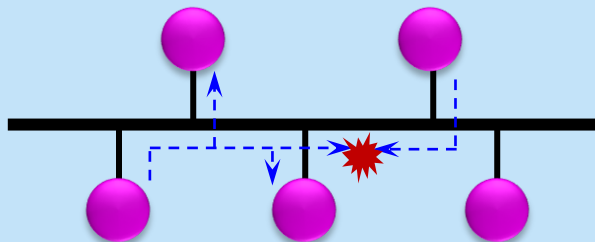




局域网传输媒体



共享信道带来的问题



共享的广播信道

- 使用一对多的**广播通信**方式。
- **问题**：若多个设备在共享的广播信道上同时发送数据，则会造成彼此干扰，导致发送失败。



媒体共享技术

- **静态划分信道**

1. 频分复用
2. 时分复用
3. 波分复用
4. 码分复用

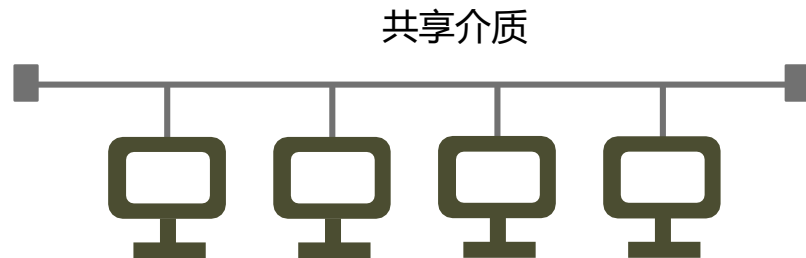
- **动态媒体接入控制（多点接入）**

1. 随机接入
2. 受控接入，如多点线路探询 (polling)，或轮询。



介质访问控制概述

介质访问控制是指将传输介质带宽有效地分配给网上各节点用户的方法。



同步控制

- 为每个节点分配一个专用固定的容量
- 类似频分多路复用或时分多路复用

异步控制

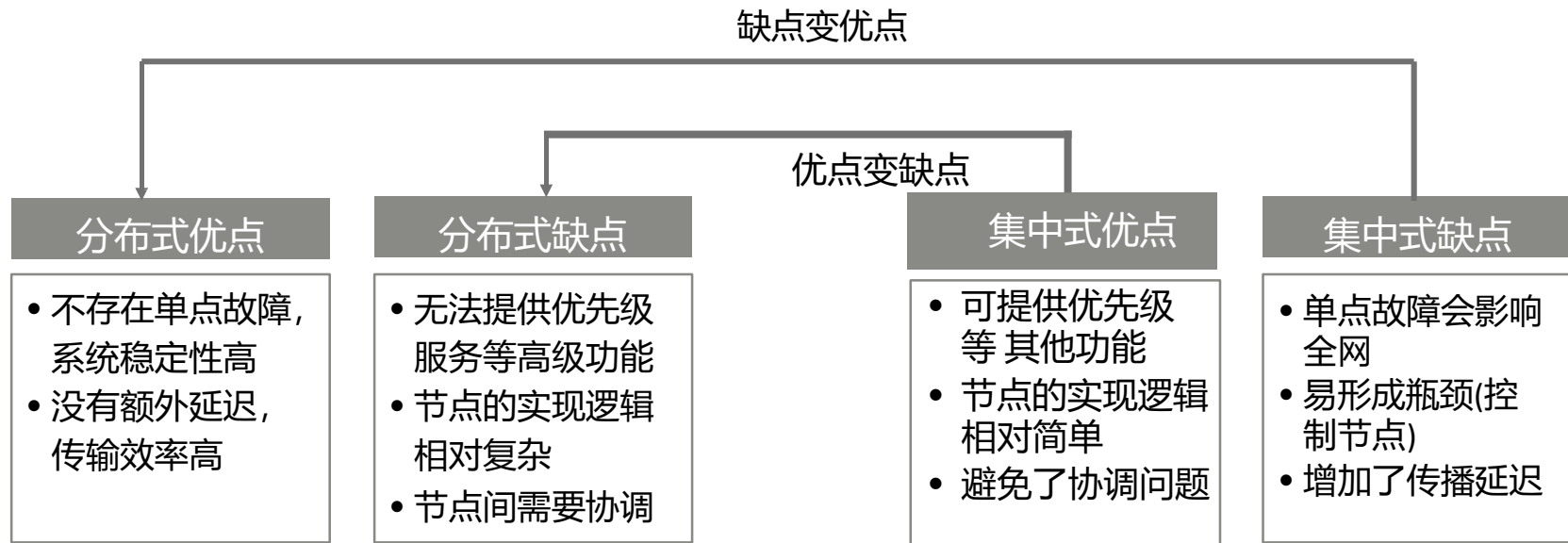
- 把信道容量动态分配给每个需要的节点
- 响应用户的即时需要



异步控制的实现方式

分布式：由各站共同完成介质访问控制，动态确定站的发送顺序。

集中式：指定某个控制器拥有控制网络访问的权利。



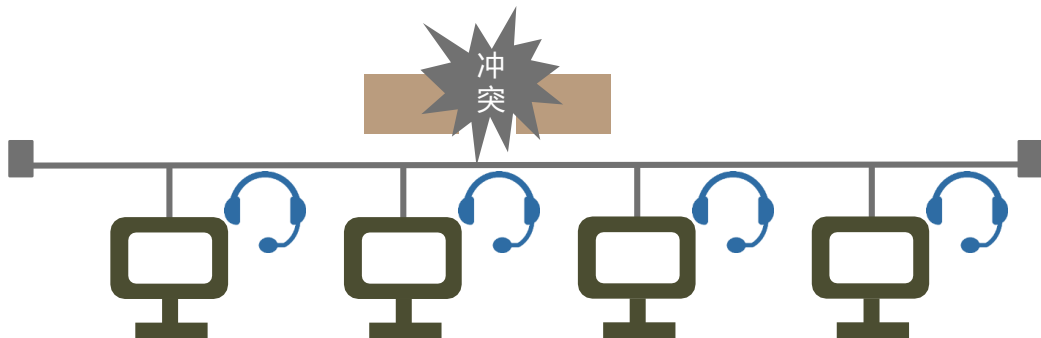


共享介质访问控制

介质访问控制协议（MAC）：将传输介质的容量有效地分配给网上各节点用户的方法。

共享介质假设

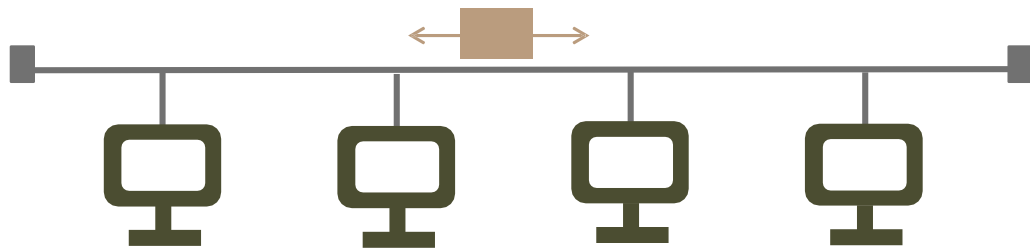
- 节点流量相互独立
- 仅一个信道可用
- 若发送冲突可观察
- 发送时机连续时间
- 发送时机按时间槽
- 发送前可载波侦听
- 发送前无载波侦听





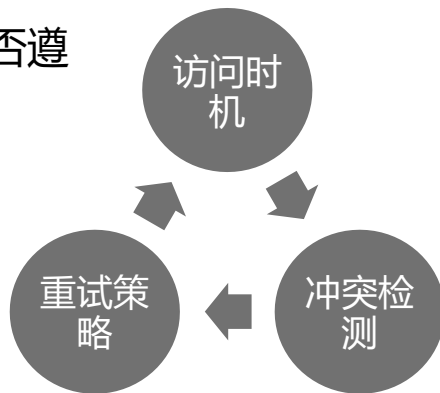
竞争系统及其三大问题

竞争系统：多个用户以某种可能导致冲突的方式共享公用信道的系统。



① 节点访问信道是否遵循某种约束

③ 检测到冲突后如何处理



② 发送数据时如何检测是否发生冲突

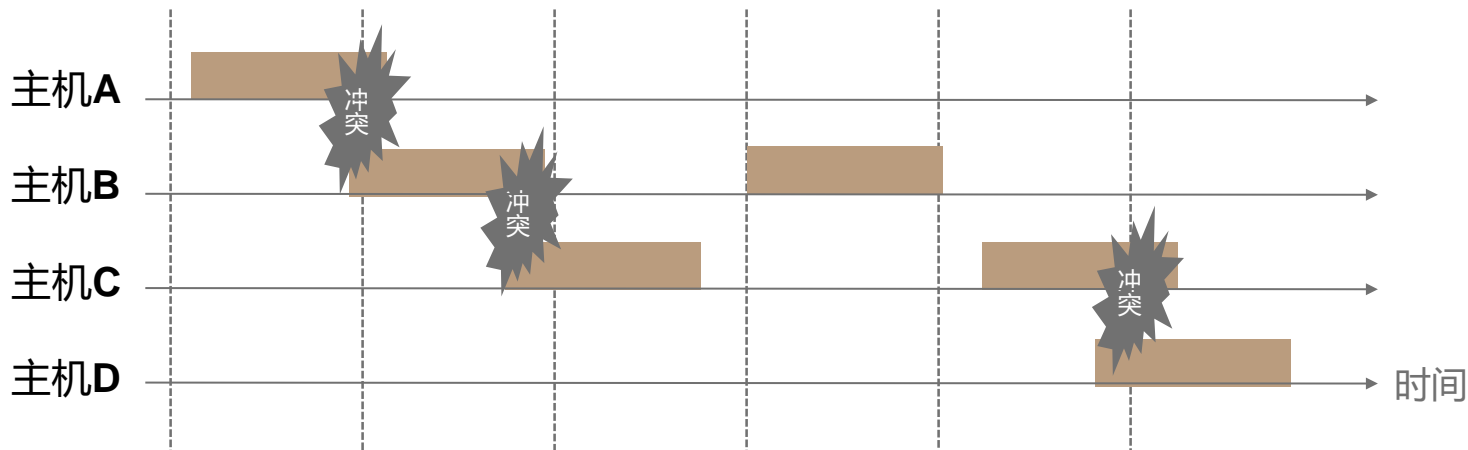
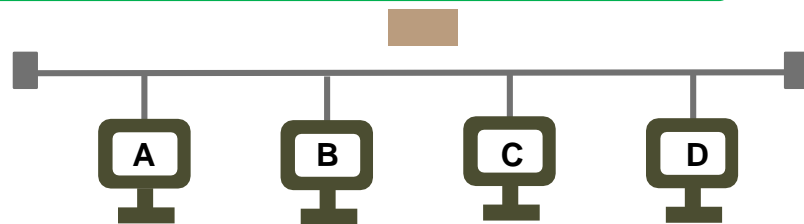




纯ALOHA协议基本思想

基本思想

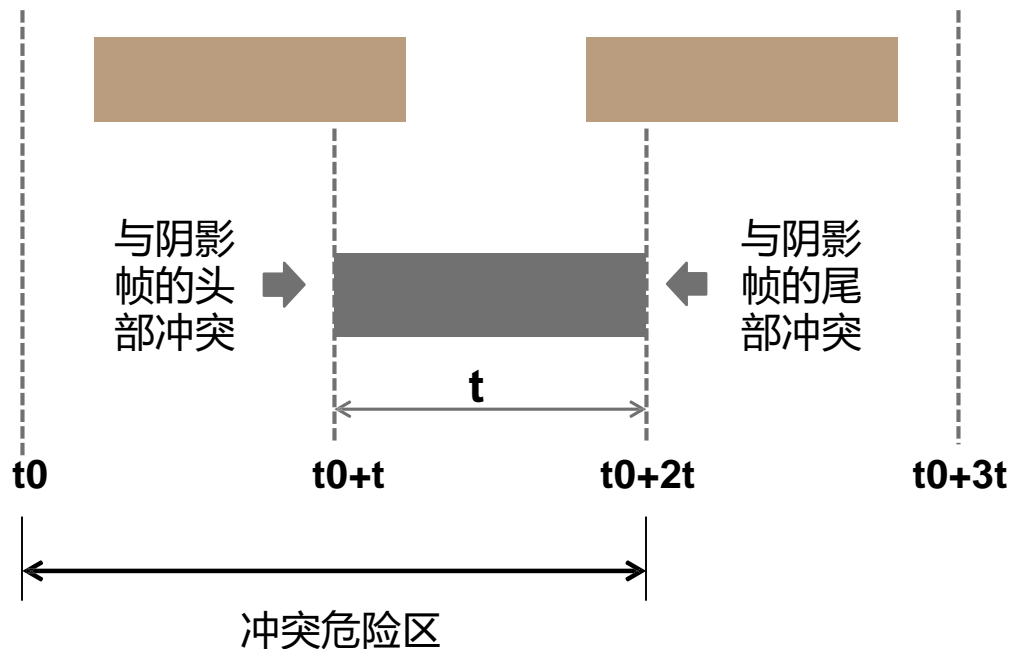
- 按需访问信道
- 不侦听信道
- 发生冲突随机重发



MAC帧



纯ALOHA协议访问方式



能够期待的信道利用率
最多为18%

冲突危险区：一个帧被发送时，在该时间范围内其他节点的发送必将破坏该帧的传输。





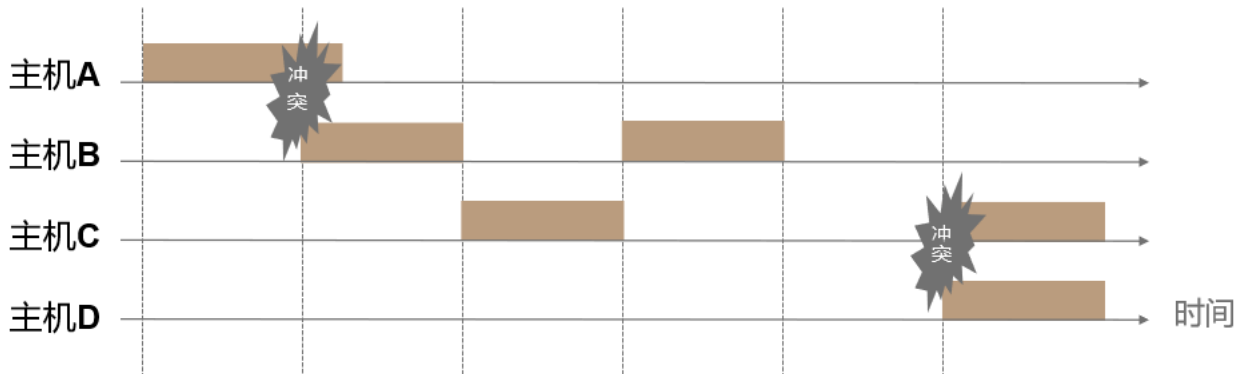
分槽ALOHA协议基本思想

基本思想

- 访问信道只能在时间槽开始时进行
- 不侦听信道
- 发生冲突随机重发

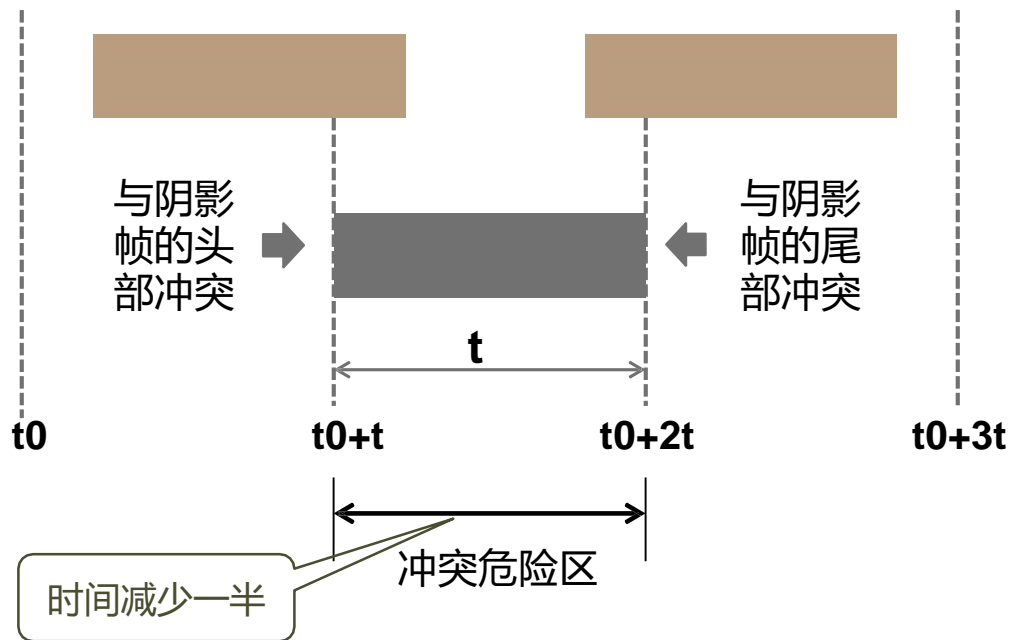
分槽ALOHA假设

- 时间槽长度 \geq 发送一帧的时间
- 各节点只能在下一时间槽的起始时刻开始发送信息





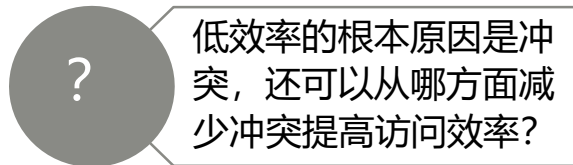
分槽ALOHA协议访问方式



关键：所有用户必须同步



能够期待的信道利用率
最多为36%





载波侦听多路访问(CSMA)

LAN 主要特性

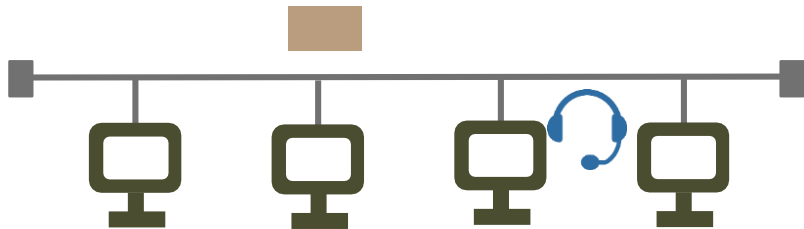
节点间传播延迟 < 帧传输时间

- 传播延迟：信号从一个节点传播到LAN中距离最远的那个节点所需要的时间
- 帧传输时间：即发送一帧所需要的平均时间



载波侦听协议：网络节点侦听载波是否存在(即有无传输)并随之采取相应的行动。

“讲前先听”



CSMA基本思想

- 想要传输的节点首先听一听介质上是否有其他站点在传输(载波侦听);
- **if** 介质忙, **then** 必须等待; **else** 传输。

Carrier Sense Multiple Access: 载波侦听多路访问



以太网

1. 以太网两个标准

- **DIX Ethernet V2** 是世界上第一个局域网产品（以太网）的规约。
- **IEEE 802.3** 是第一个 IEEE 的以太网标准。
- 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。

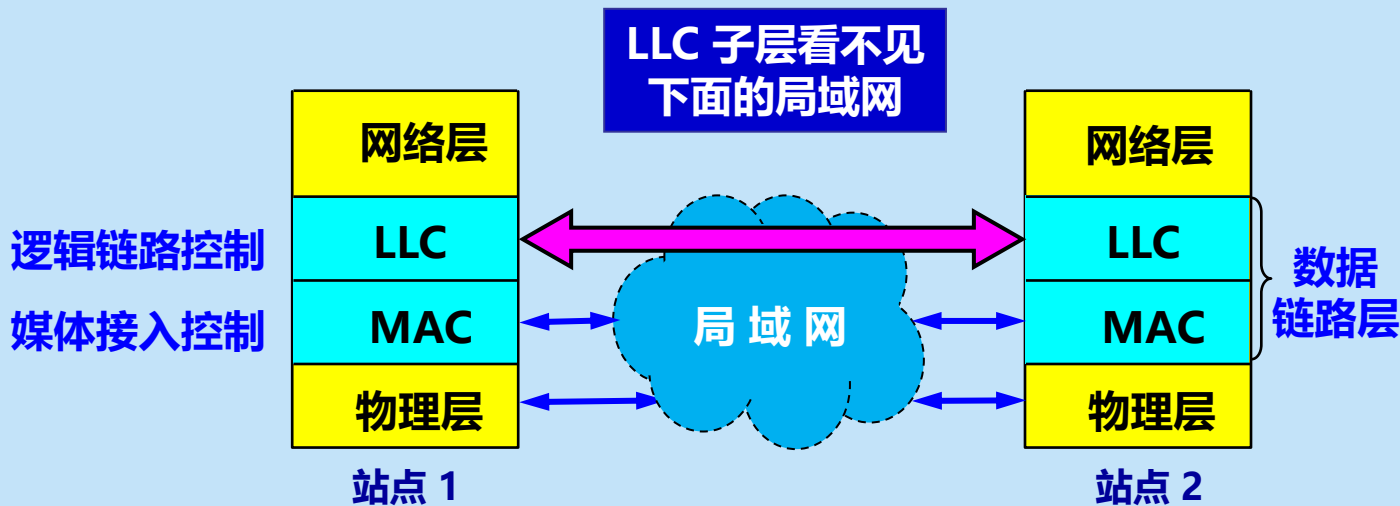


数据链路层的两个子层

- 为了使数据链路层能更好地适应多种局域网标准，IEEE 802 委员会就将局域网的数据链路层拆成**两个子层**：
 1. **逻辑链路控制** LLC (Logical Link Control)子层；
 2. **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。**



局域网对 LLC 子层是透明的





一般不考虑 LLC 子层

- 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。

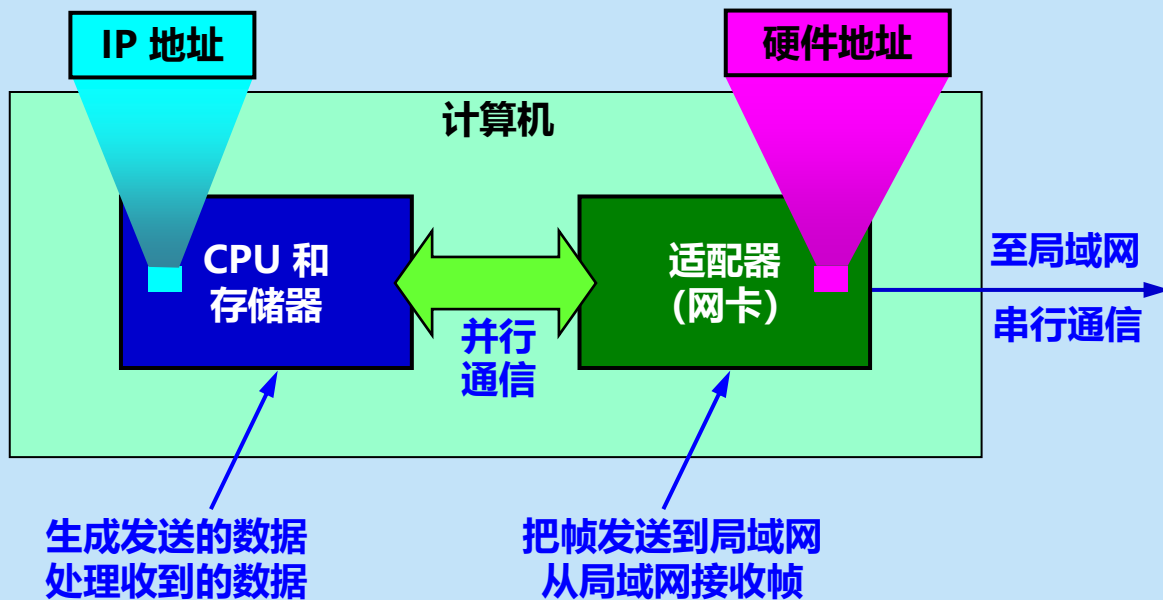


2. 适配器的作用

- 网络接口板又称为**通信适配器** (adapter) 或**网络接口卡** NIC (Network Interface Card), 或 “**网卡**”。
- 适配器的**重要功能**:
 1. **进行串行/并行转换。**
 2. **对数据进行缓存。**
 3. **在计算机的操作系统安装设备驱动程序。**
 4. **实现以太网协议。**



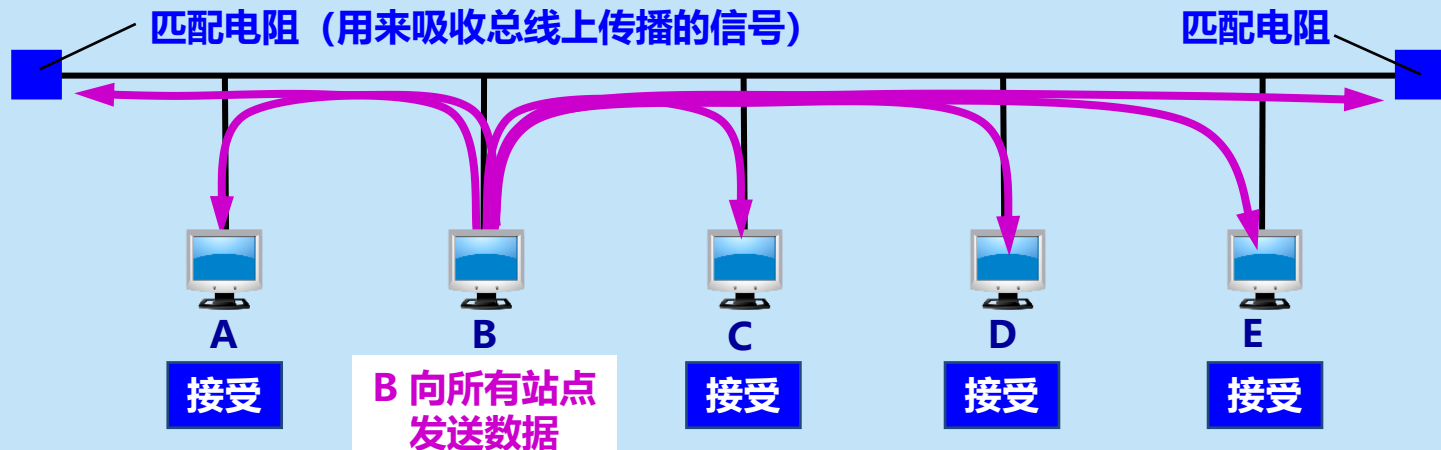
计算机通过适配器和局域网进行通信





3.3.2 CSMA/CD 协议

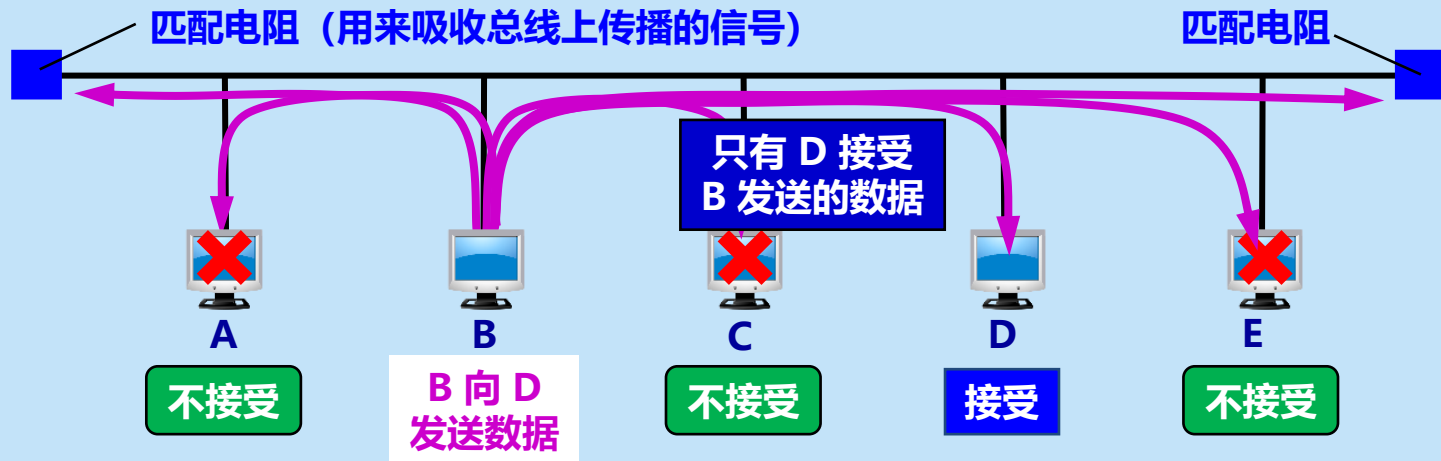
- 最初的以太网是将许多计算机都连接到一根总线上。**易于实现广播通信**。当初认为这样的连接方法既简单又可靠，因为总线上没有有源器件。





3.3.2 CSMA/CD 协议

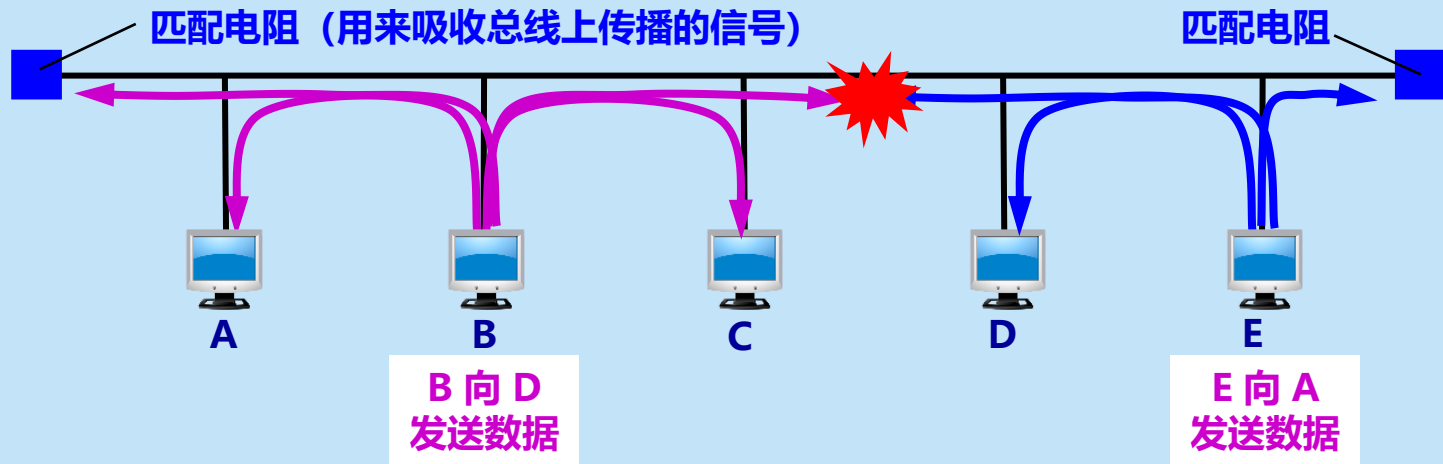
- 为了实现**一对一**通信，将接收站的硬件地址写入帧首部中的**目的地址**字段中。仅当数据帧中的目的地址与适配器的硬件地址一致时，才能接收这个数据帧。





3.3.2 CSMA/CD 协议

- 总线也有**缺点**。若多台计算机或多个站点同时发送时，会产生发送碰撞或冲突，导致发送失败。





以太网采取了两种重要的措施

为了通信的简便，以太网采取了两种重要的措施：

(1) 采用较为灵活的无连接的工作方式

- 不必先建立连接就可以直接发送数据。
- 对发送的数据帧不进行编号，也不要求对方发回确认。
- 这样做的理由是局域网信道的质量很好，因信道质量产生差错的概率是很小的。

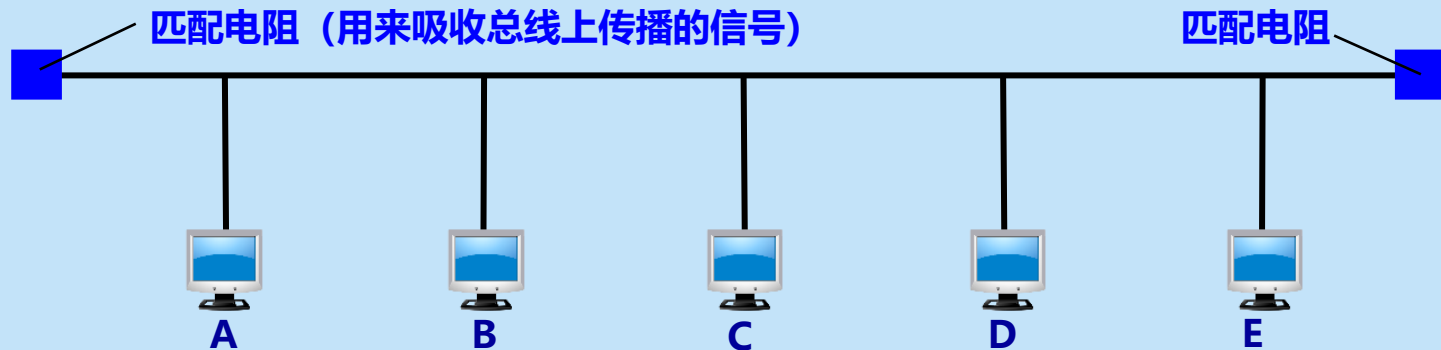


以太网提供的服务

- 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。



如何避免同时发送产生的碰撞？ 采用 CSMA/CD

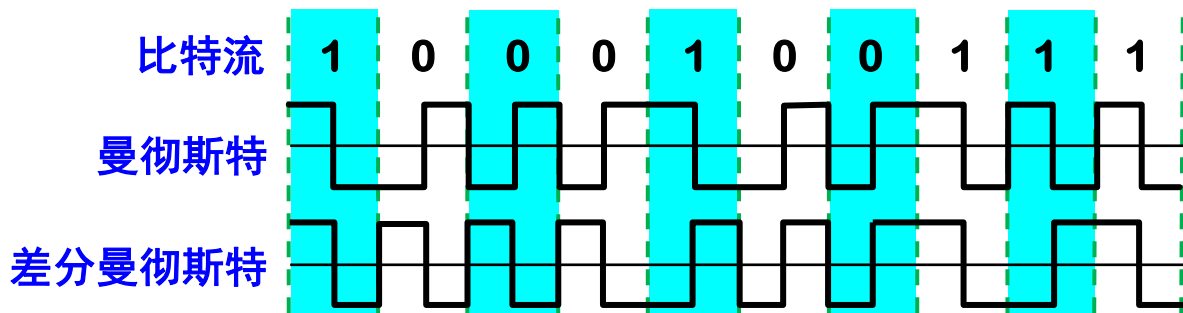


B 向 D 发送数据。能发送吗？
如何避免与其它站的发送产生碰撞？
使用这种方法吧：CSMA/CD!!!



以太网采取了两种重要的措施

(2) 以太网发送的数据都使用曼彻斯特 (Manchester) 编码



曼彻斯特编码缺点是：它所占的频带宽度比原始的基带信号增加了一倍。



以太网提供的服务

- 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。
- 总线上并没有什么“载波”。因此，“**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”。

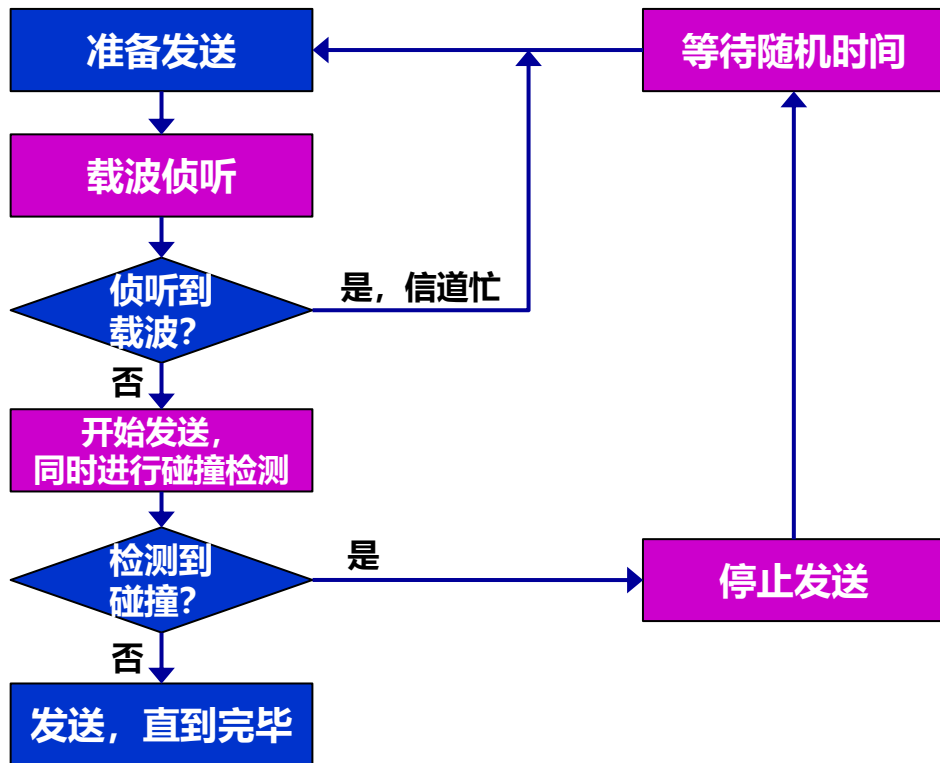


检测到碰撞后

- 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。

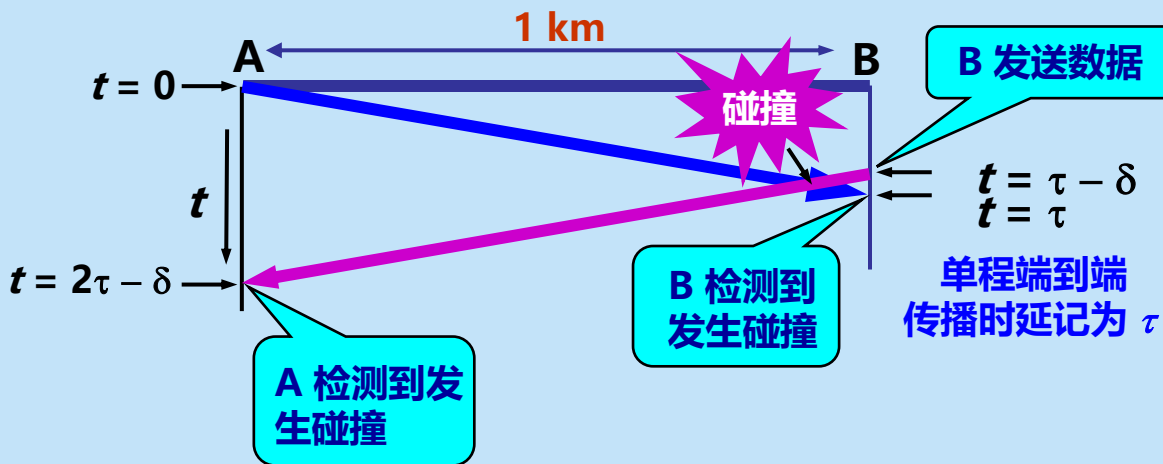


CSMA/CD 协议工作流程





为什么要进行碰撞检测？ 因为信号传播时延对载波监听产生了影响



A 需要单程传播时延的 2 倍的时间，才能检测到与 B 的发送产生了冲突



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 2τ （**两倍的端到端往返时延**）就可知道发送的数据帧是否遭受了碰撞。
- 以太网的端到端往返时延 2τ 称为**争用期**，或**碰撞窗口**。
- 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。



二进制指数类型退避算法 (truncated binary exponential type)

- 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。
 1. **基本退避时间**取为争用期 2τ 。
 2. 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。
 3. 参数 k 按下面的公式计算：
$$k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$$
 4. 当 $k \leq 10$ 时，参数 k 等于重传次数。
 5. 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告。



二进制指数类型退避算法 (truncated binary exponential type)

- 例如:

第 1 次冲突重传时:

$k = 1$, r 为 $\{0, 1\}$ 集合中的任何一个数。

第 2 次冲突重传时:

$k = 2$, r 为 $\{0, 1, 2, 3\}$ 集合中的任何一个数。

第 3 次冲突重传时:

$k = 3$, r 为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 集合中的任何一个数。



10 Mbit/s 以太网争用期的长度

- 10 Mbit/s 以太网取 $51.2 \mu\text{s}$ 为争用期的长度。
- 对于 10 Mbit/s 以太网，在争用期内可发送 512 bit，即 64 字节。

这意味着：

以太网在发送数据时，若前 64 字节没有发生冲突，则后续的数据就不会发生冲突。



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。



覆盖范围

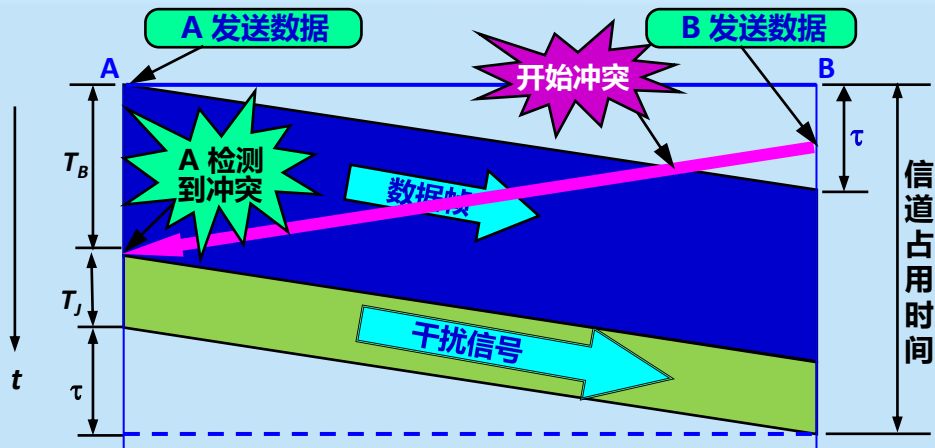
- 在 10 Mbit/s 以太网 51.2 μs 的争用期内，信号能传输多远的距离？
- 以太网上最大的端到端单程时延必须小于争用期的一半（即 25.6 μs ），这相当于以太网的最大端到端长度约为 5 km。

（长度 = $25.6 \mu\text{s} * (2C/3) * 3 * 10^8 \text{ m/s}$ ） \rightarrow 5km 左右

数字信号在总线上的传输的速度为 $(2C/3)$ ，其中C为光速 = $3 * 10^8 \text{ m/s}$



人为干扰信号



注意：B 也能够检测到冲突，并立即停止发送数据帧，接着就发送干扰信号。这里为了简单起见，只画出 A 发送干扰信号的情况。(冲突加强信号)



CSMA/CD 协议的重要特性

- 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。

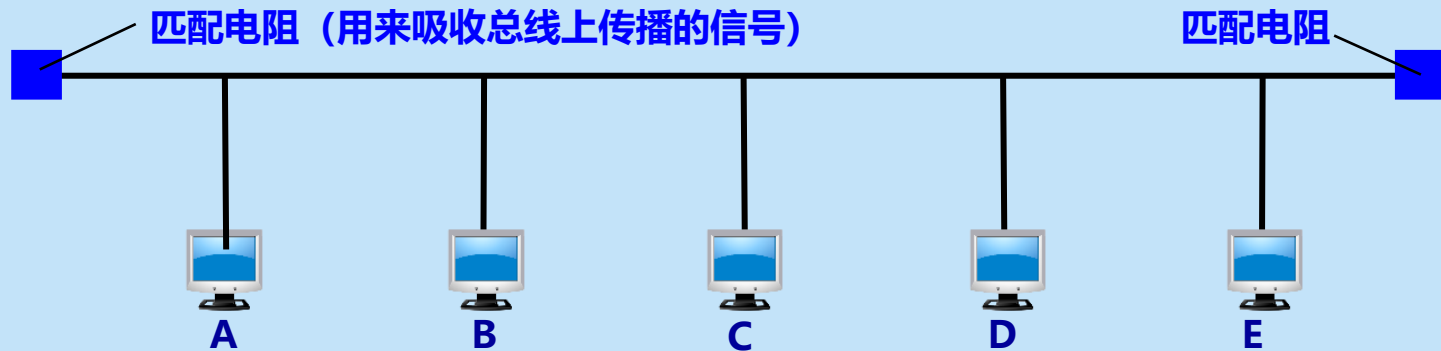


3.3.3 使用集线器的星形拓扑

- 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)。

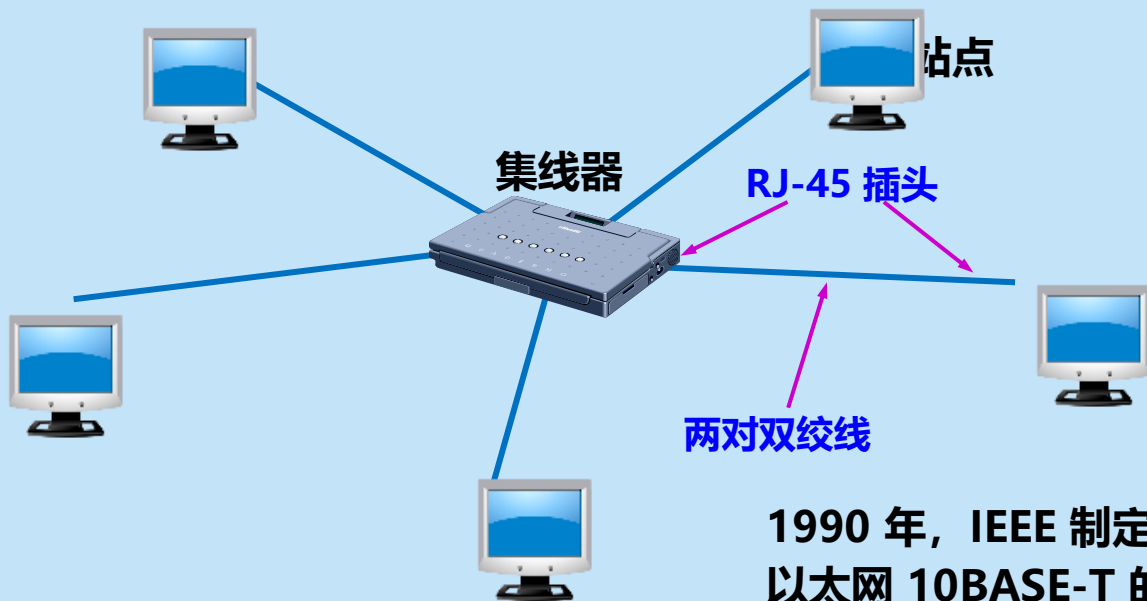


传统以太网使用同轴电缆，采用总线形拓扑结构





使用集线器的双绞线以太网





星形以太网 10BASE-T

10BASE — T

→ 双绞线

→ 基带

→ 速率为 10 Mbit/s



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 100m。



10BASE-T 以太网在局域网中的统治地位

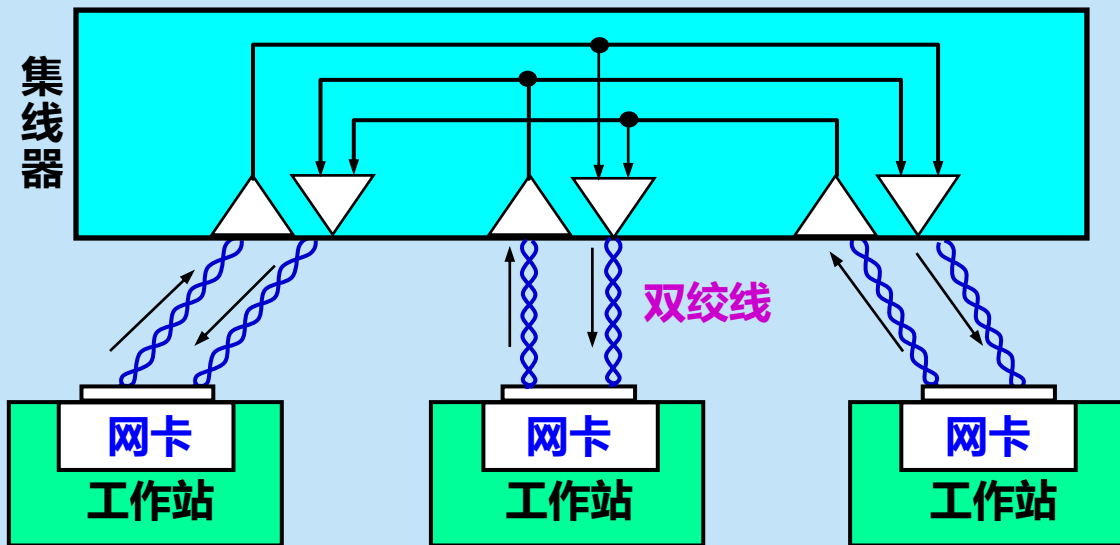
- 这种 10 Mbit/s 速率的无屏蔽双绞线星形网的出现，既降低了成本，又提高了可靠性。具有很高的性价比。
- 10BASE-T 双绞线以太网的出现，是局域网发展史上的一个非常重要的里程碑，它为以太网在局域网中的统治地位奠定了牢固的基础。
- 从此以太网的拓扑就从总线形变为更加方便的星形网络，而以太网也就在局域网中占据了统治地位。



集线器的一些特点

- 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。
- 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。
- 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





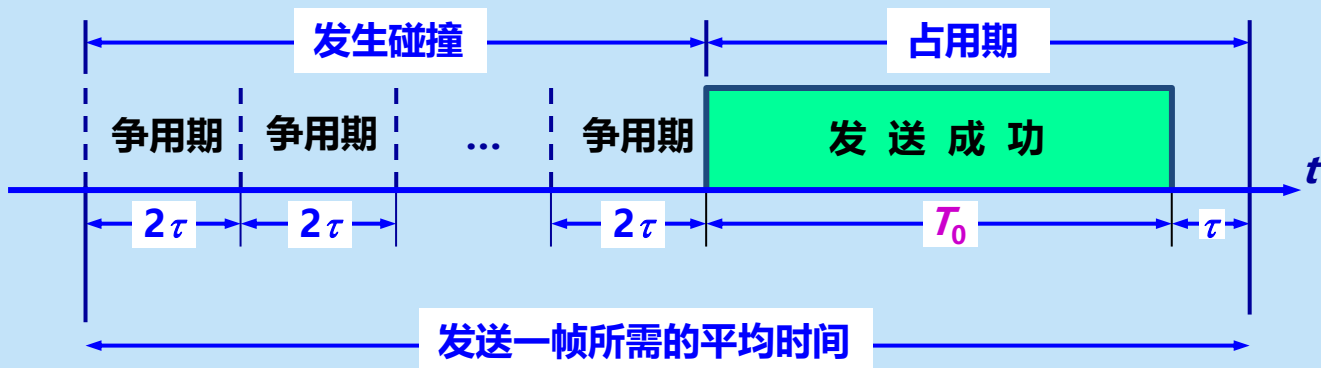
3.3.4 以太网的信道利用率

- 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，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。
- 设帧长为 L (bit)，数据发送速率为 C (bit/s)，则帧的发送时间为 $T_o = L/C$ (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 a 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 a ，它是以太网单程端到端时延 τ 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。



对以太网参数 a 的要求

- 为提高利用率，以太网的参数 a 的值应当尽可能小些。
- 对以太网参数 a 的要求是：
 1. 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。
 2. 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，我们可以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。



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**。
- 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。

请注意，如果连接在局域网上的主机或路由器安装有多个适配器，那么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。



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。

3 字节 (24 位)

3 字节 (24 位)

组织唯一标识符

扩展唯一标识符

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 EUI-48。



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）。此时，IEEE 只分配地址字段前三个字节中的 23 位。
- 当 I/G 位分别为 0 和 1 时，一个地址块可分别生成 2^{23} 个单个站地址和 2^{23} 个组地址。
- 所有 48 位都为 1 时，为广播地址。只能作为目的地址使用。



全球管理与本地管理

- IEEE 把地址字段第一字节的最低第 2 位规定为 G/L 位，表示 Global / Local。
- 当 G/L 位 = 0 时，是全球管理（保证在全球没有相同的地址），厂商向 IEEE 购买的 OUI 都属于全球管理。
- 当 G/L 位 = 1 时，是本地管理，这时用户可任意分配网络上的地址。



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。
 1. 如果是发往本站的帧则收下，然后再进行其他的处理。
 2. 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：
 1. 单播 (unicast) 帧 (一对一)
 2. 广播 (broadcast) 帧 (一对全体)
 3. 多播 (multicast) 帧 (一对多)



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。

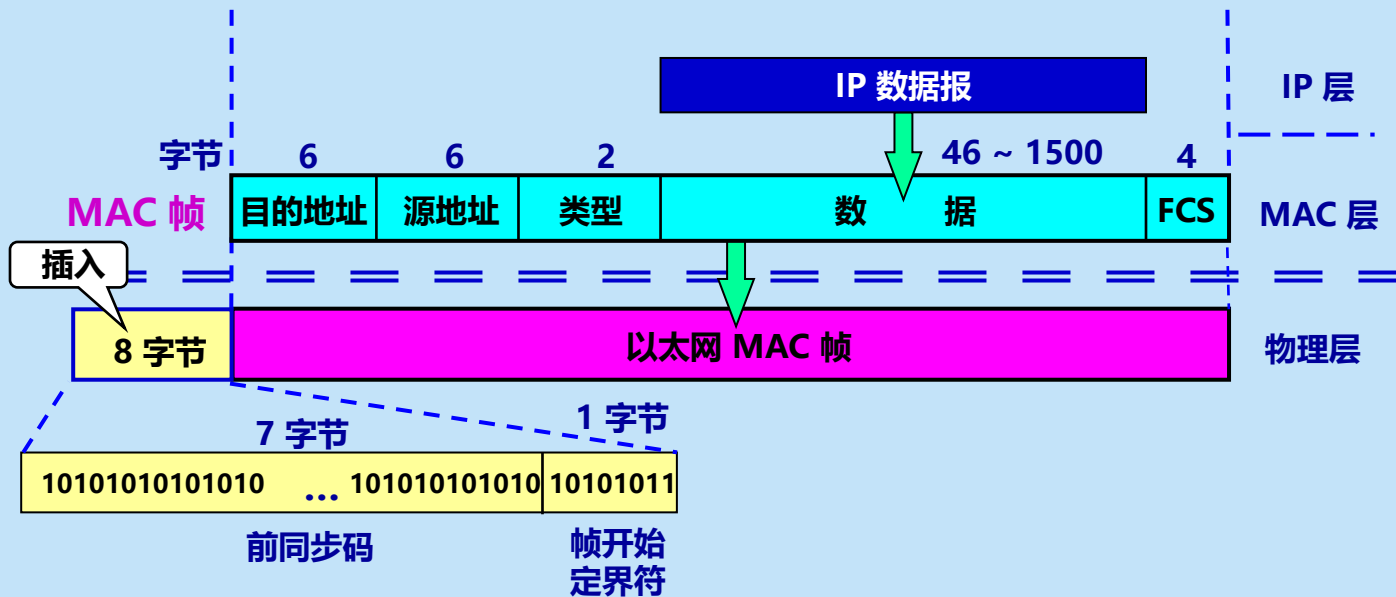


2. MAC 帧的格式

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

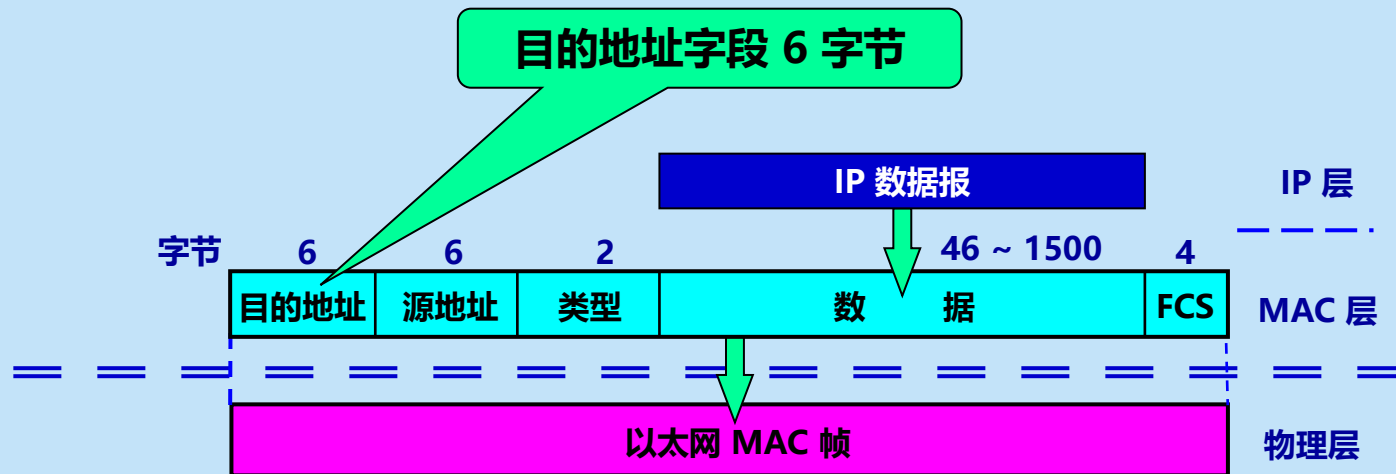


以太网 V2 的 MAC 帧格式



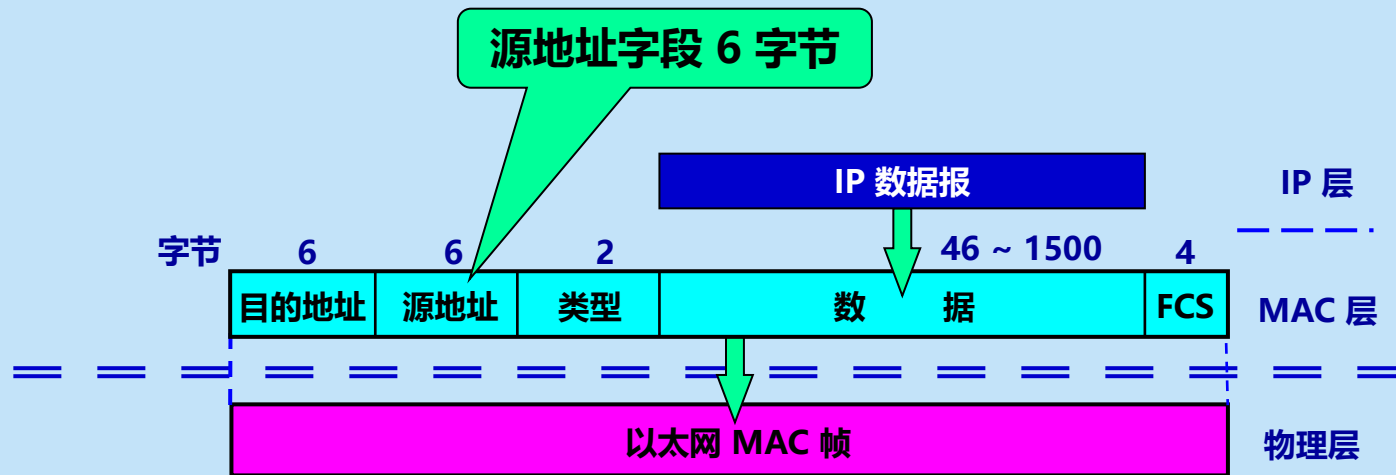


以太网 V2 的 MAC 帧格式





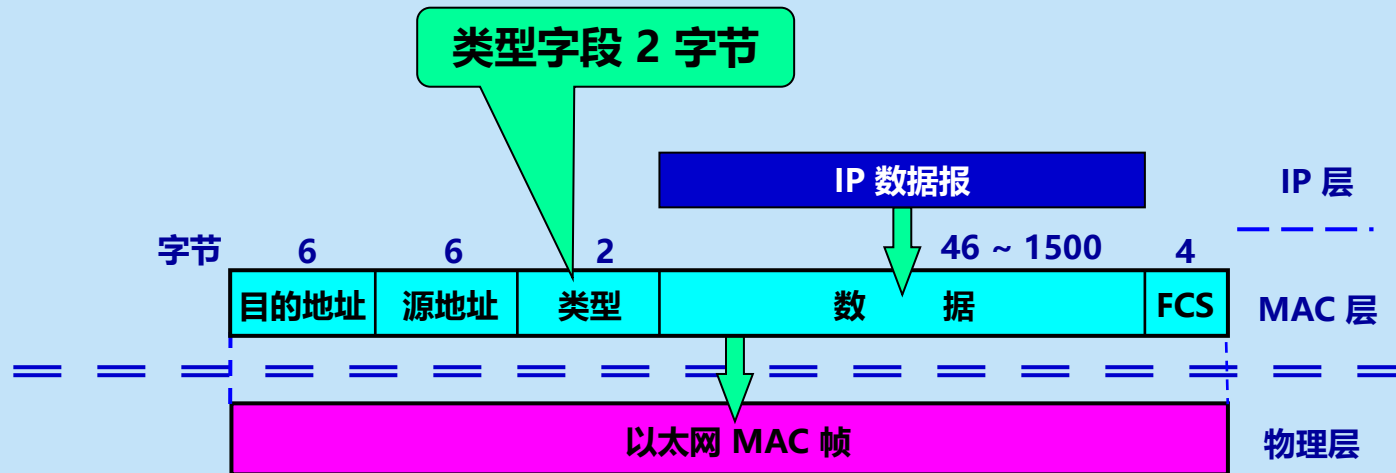
以太网 V2 的 MAC 帧格式





以太网 V2 的 MAC 帧格式

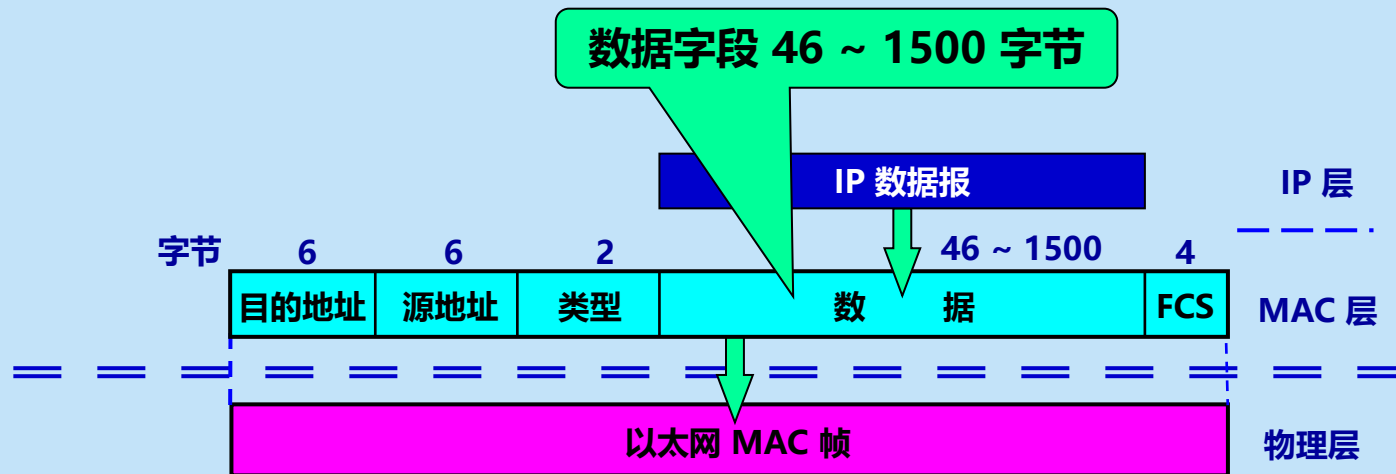
类型字段用来标志^{上一层}使用的是**什么协议**，以便把收到的 MAC 帧的数据上交给**上一层的这个协议**。





以太网 V2 的 MAC 帧格式

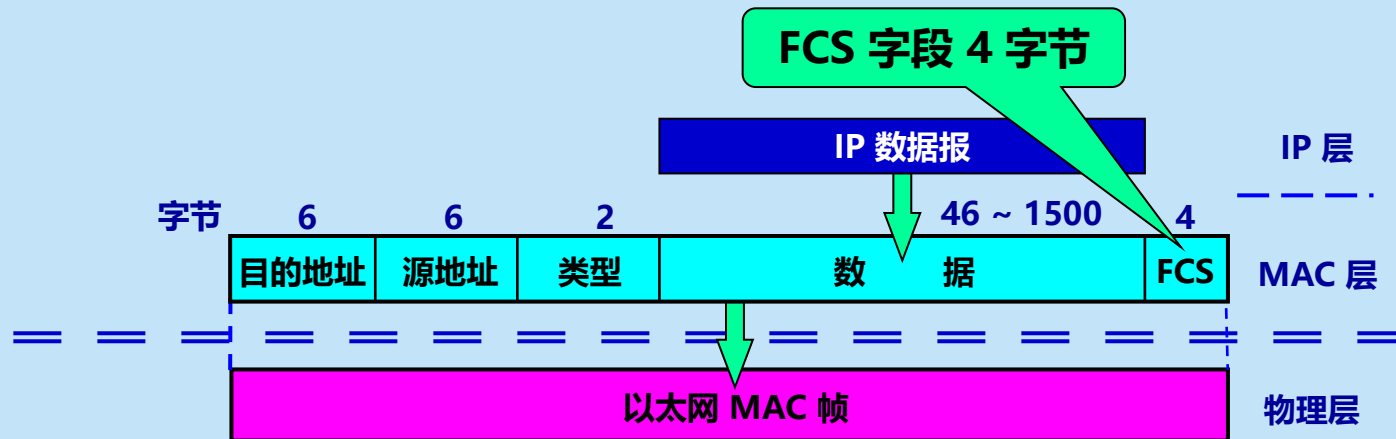
数据字段的正式名称是 **MAC 客户数据字段**。
最小长度 64 字节 - 18 字节的首部和尾部 = 数据字段的最小长度 (46字节)





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} 。

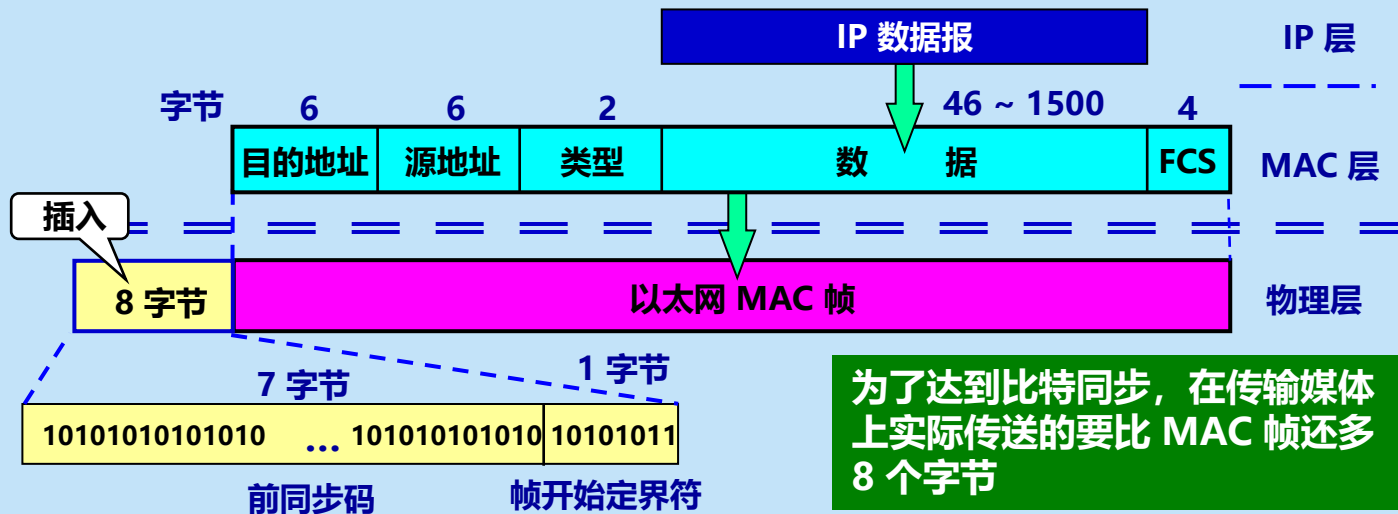


当数据字段的长度小于 46 字节时，应在数据字段的后面加入整数字节的**填充字段**，以保证以太网的 MAC 帧长不小于 64 字节。



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

- 数据字段的长度与长度字段的值不一致；
- 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。



IEEE 802.3 MAC 帧格式

与以太网 V2 MAC 帧格式相似，区别在于：

- IEEE 802.3 规定的 MAC 帧的第三个字段是“**长度 / 类型**”。
 1. 当这个字段值大于 0x0600 时（相当于十进制的 1536），就表示“**类型**”。这样的帧和以太网 V2 MAC 帧完全一样。
 2. 当这个字段值小于 0x0600 时才表示“**长度**”。
- 当“长度/类型”字段值小于 0x0600 时，数据字段必须装入上面的逻辑链路控制 LLC 子层的 LLC 帧。

现在市场上流行的都是以太网 V2 的 MAC 帧，但大家也常常把它称为 IEEE 802.3 标准的 MAC 帧。

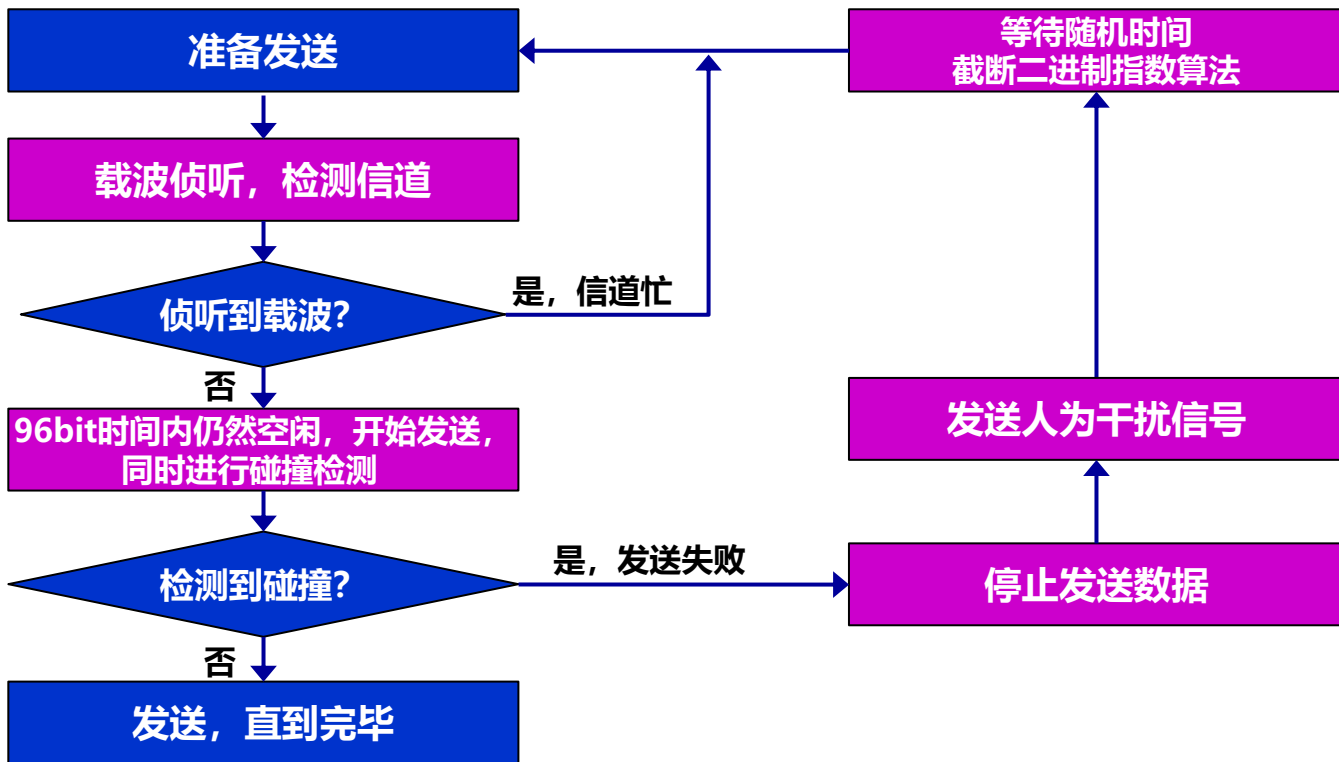


帧间最小间隔

- 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。



CSMA/CD 协议的要点





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

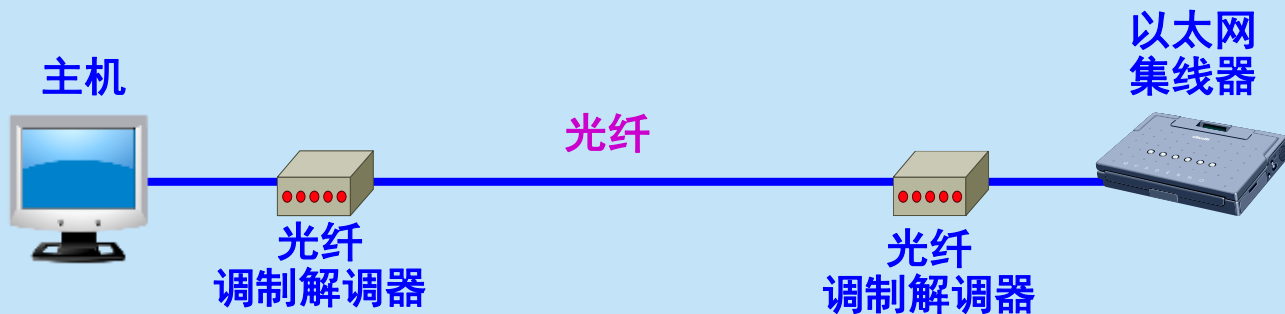
虚拟局域网



3.4.1 在物理层扩展以太网

● 使用光纤扩展

1. 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。
2. 很容易使主机和几公里以外的集线器相连接。

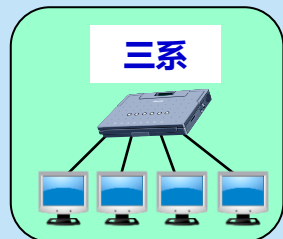
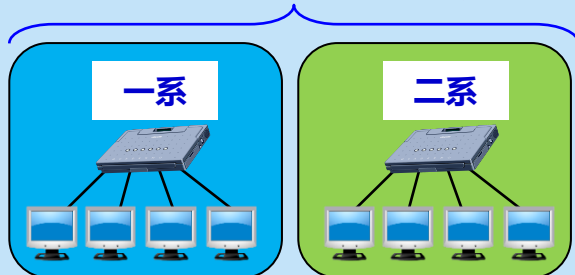


主机使用光纤和一对光纤调制解调器连接到集线器

3.4.1 在物理层扩展以太网

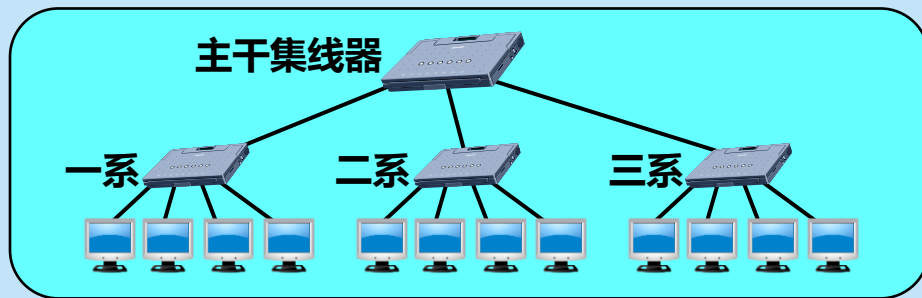
- **使用集线器扩展：**将多个以太网段连成更大的、多级星形结构的以太网。

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

1. 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。
2. 扩大了以太网覆盖的地理范围。

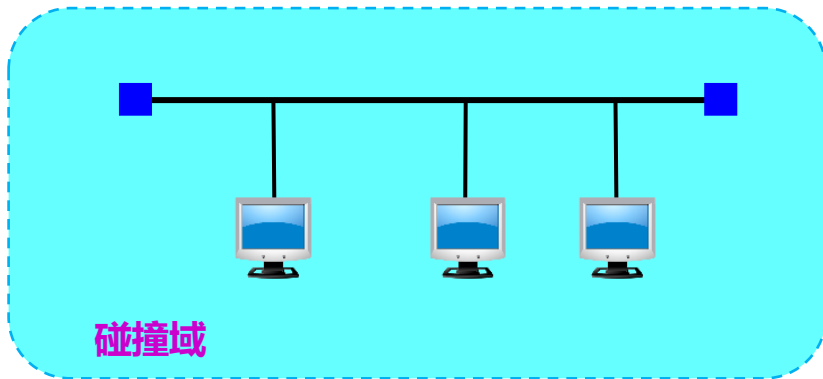
● 缺点

1. 碰撞域增大了，但总的吞吐量并未提高。
2. 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。

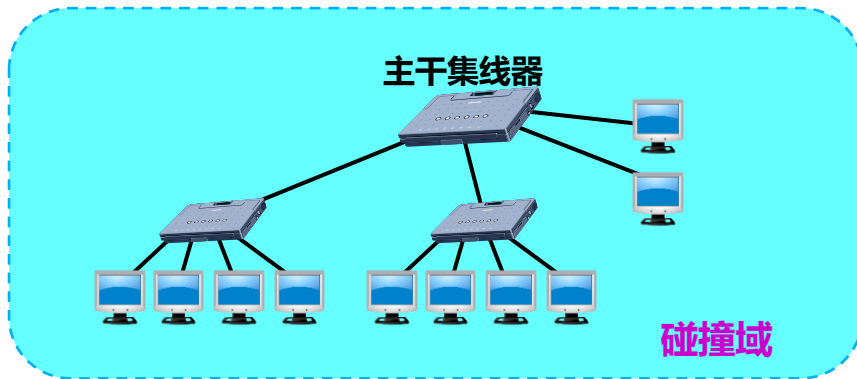


碰撞域

- **碰撞域 (collision domain)** 又称为**冲突域**，是指网络中一个站点发出的帧会与其他站点发出的帧产生碰撞或冲突的那部分网络。
- 碰撞域越大，发生碰撞的概率越高。



总线形以太网

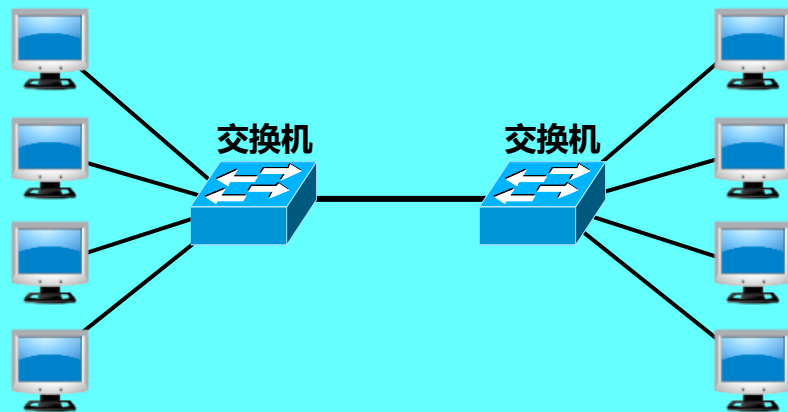
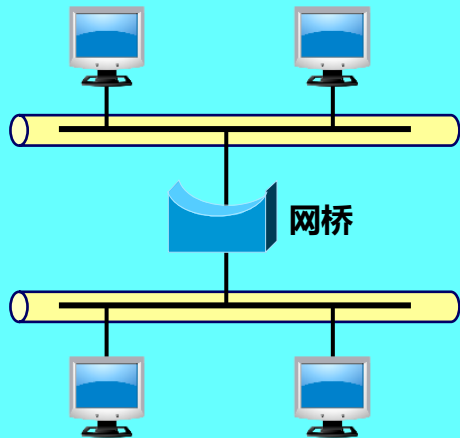


使用集线器的星形以太网



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**。





网桥与以太网交换机

- 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。

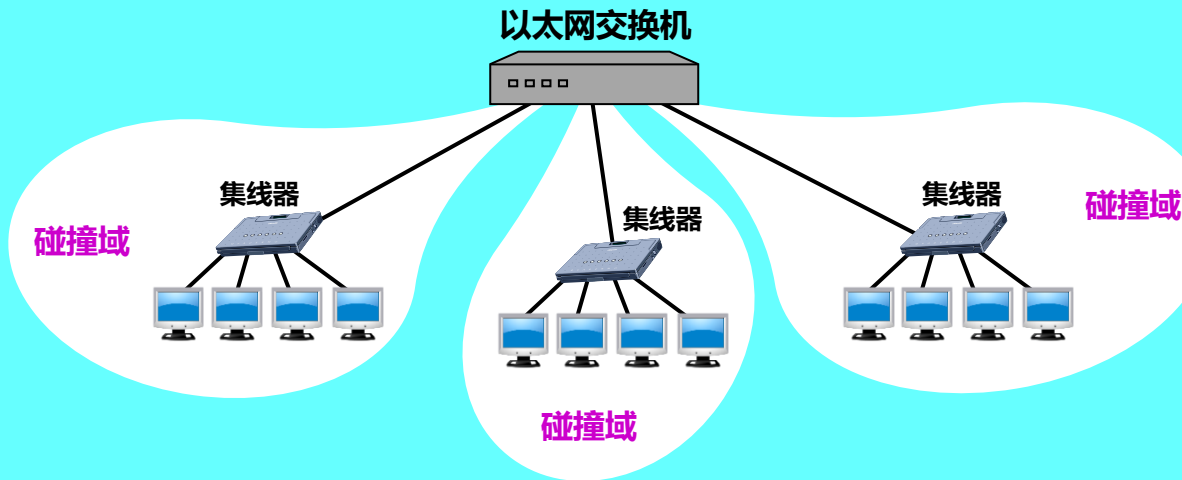


1. 以太网交换机的特点

- 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。

1. 以太网交换机的特点

- 相互通信的主机都是独占传输媒体，**无碰撞**地传输数据。



以太网交换机的每个接口是一个碰撞域

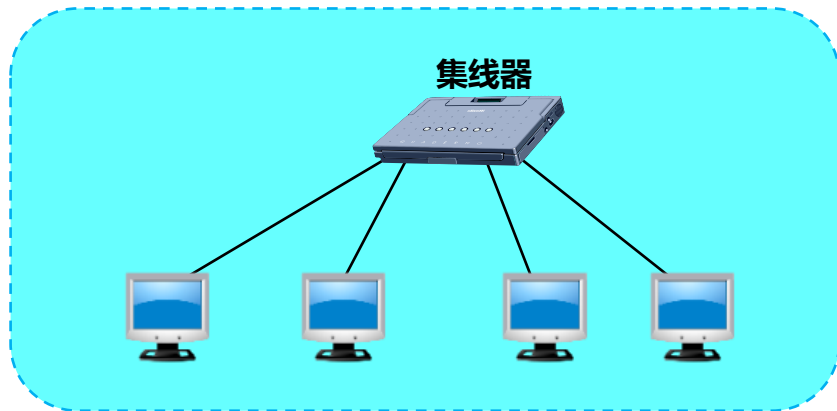


1. 以太网交换机的特点

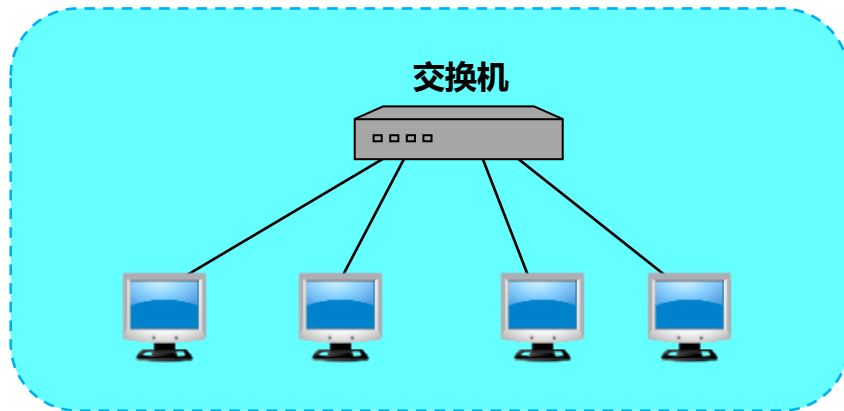
- 以太网交换机的**接口有存储器**，能在输出端口繁忙时把到来的帧进行缓存。
- 以太网交换机是一种**即插即用**设备，其内部的**帧交换表**（又称为**地址表**）是通过**自学习算法**自动地逐渐建立起来的。
- 以太网交换机使用了**专用的交换结构芯片**，用硬件转发，其转发速率要比使用软件转发的网桥快很多。
- 以太网交换机的性能远远超过普通的集线器，而且价格并不贵。

以太网交换机的优点

- 用户独享带宽，增加了总容量。



- 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 $B \times N$ 。



以太网交换机的优点

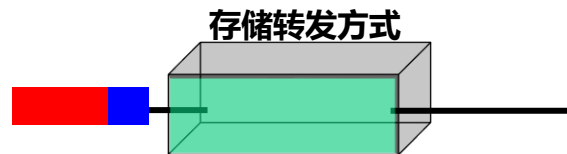
- 从共享总线以太网转到交换式以太网时，所有**接入设备**的软件和硬件、适配器等都不需要做任何改动。
- 以太网交换机一般都具有多种速率的接口，方便了各种不同情况的用户。



以太网交换机的交换方式

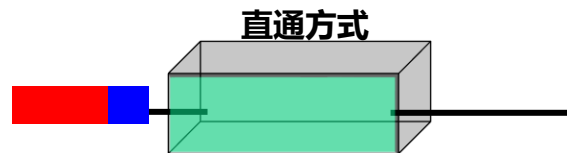
- 存储转发方式

- 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。

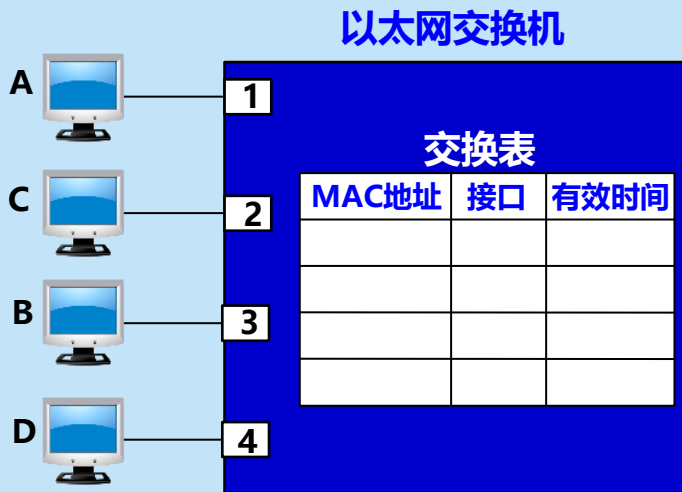


在某些情况下，仍需要采用基于软件的存储转发方式进行交换，例如，当需要进行线路速率匹配、协议转换或差错检测时。



2. 以太网交换机的自学习功能

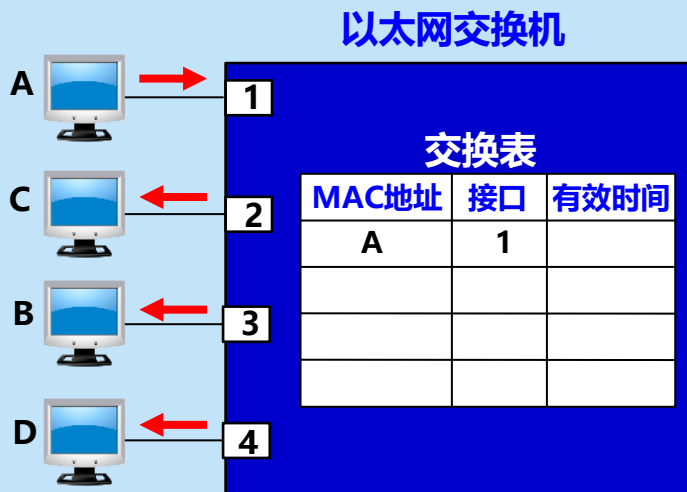
- 以太网交换机运行自学习算法自动维护交换表。



开始时，交换表是空的

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。



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。

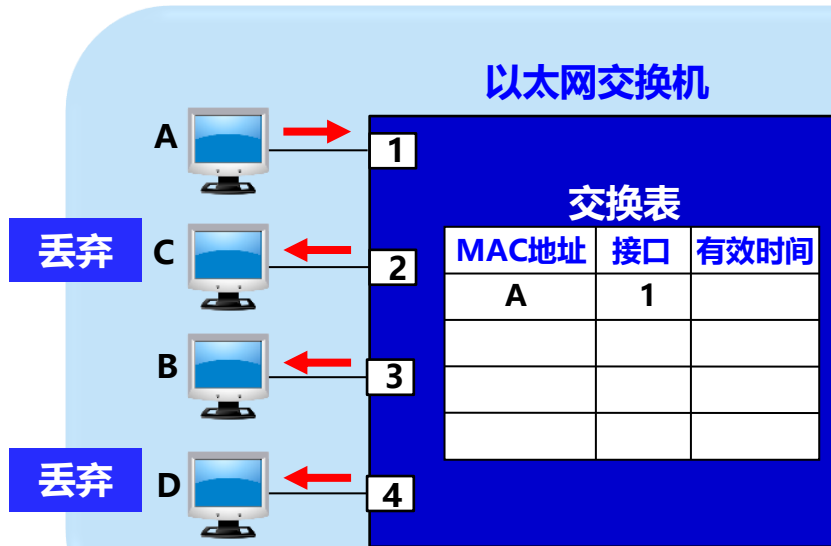
交换机收到帧后，先查找交换表。没有查到应从哪个接口转发这个帧给 B。

交换机把这个帧的源地址 A 和接口 1 写入交换表中。

交换机向除接口 1 以外的所有的接口广播这个帧。

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。



以太网帧

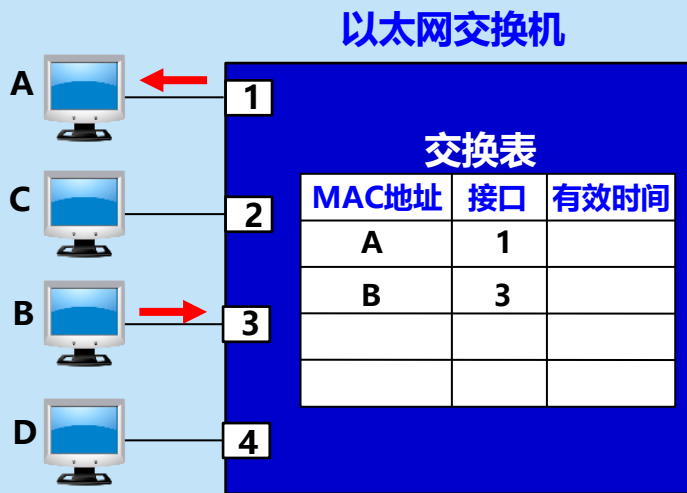
目的地址	源地址	类型	数据	FCS
B	A			

由于与该帧的目的地址不相符，C 和 D 将丢弃该帧。



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。



以太网帧

目的地址	源地址	类型	数据	FCS
A	B			

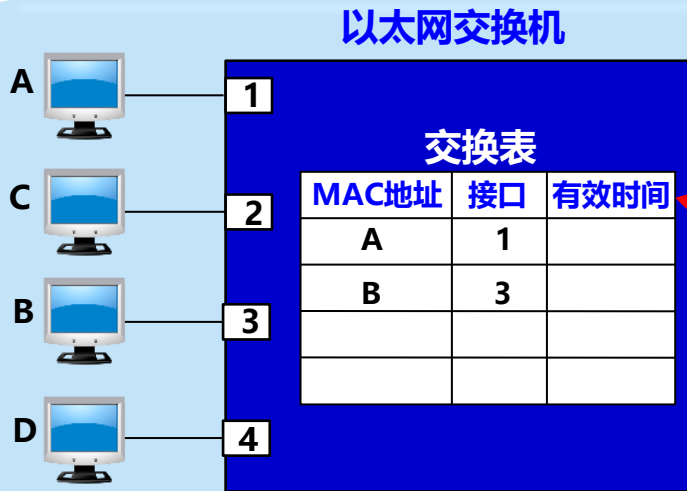
B 向 A 发送一帧。该帧从接口 3 进入到交换机。

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 的帧应从接口 1 转发出去。于是就把这个帧传送到接口 1 转发给 A。

交换机把这个帧的源地址 B 和接口 3 写入交换表中。

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。

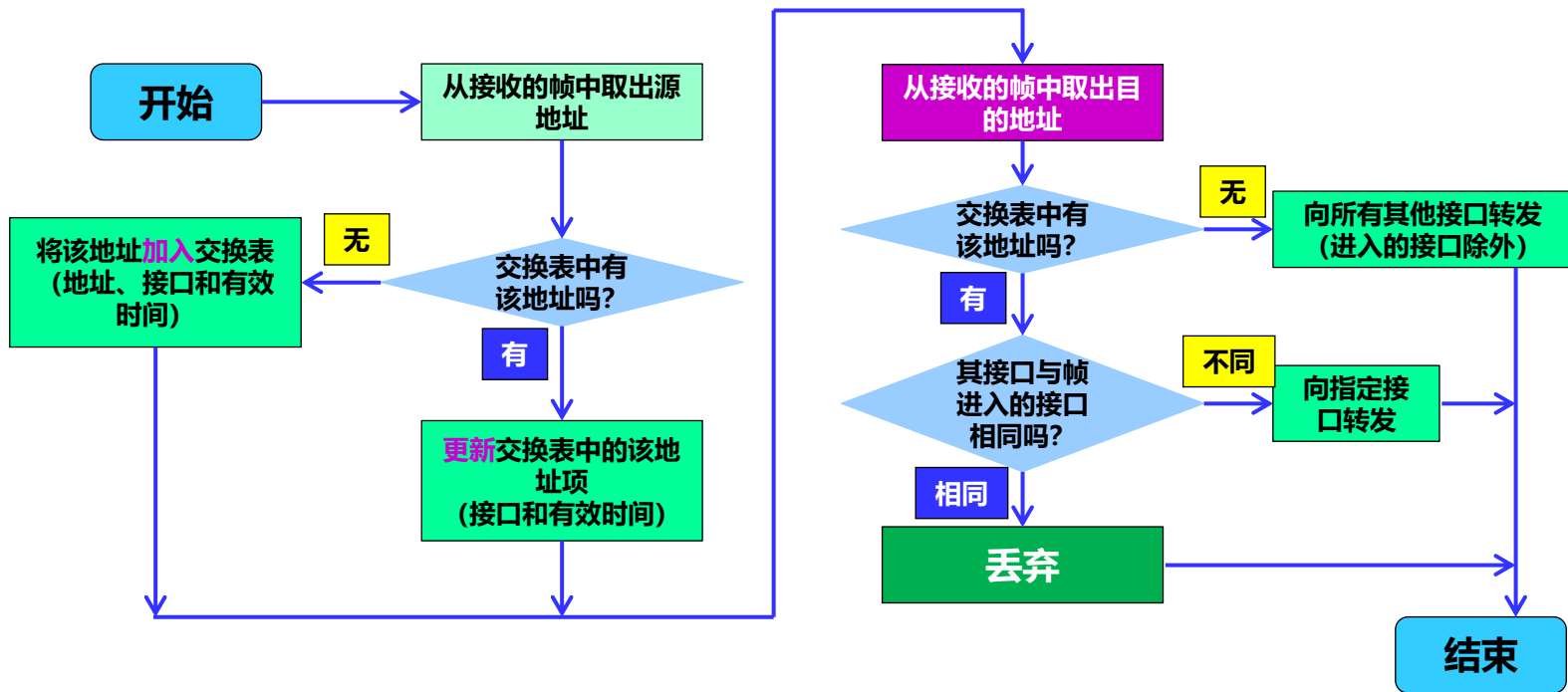


考虑到可能有时要在交换机的接口更换主机，或者主机要更换其网络适配器，这就需要更改交换表中的项目。为此，在交换表中每个项目都设有一定的**有效时间**。**过期的项目就自动被删除**。

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。

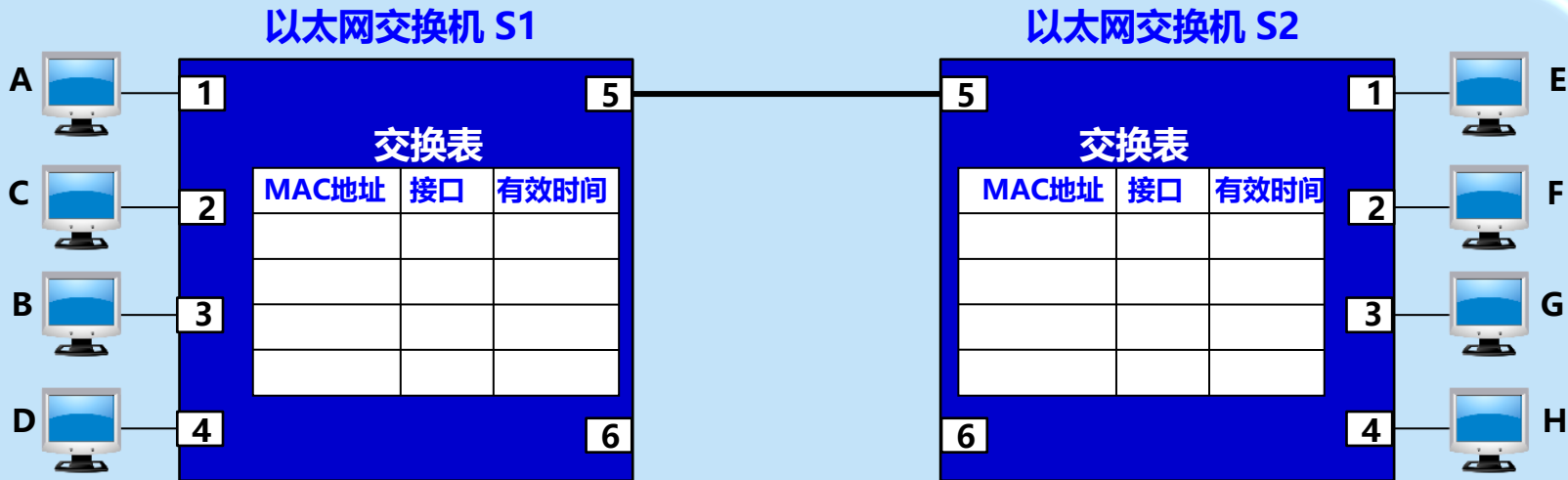


交换机自学习和转发帧的步骤归纳



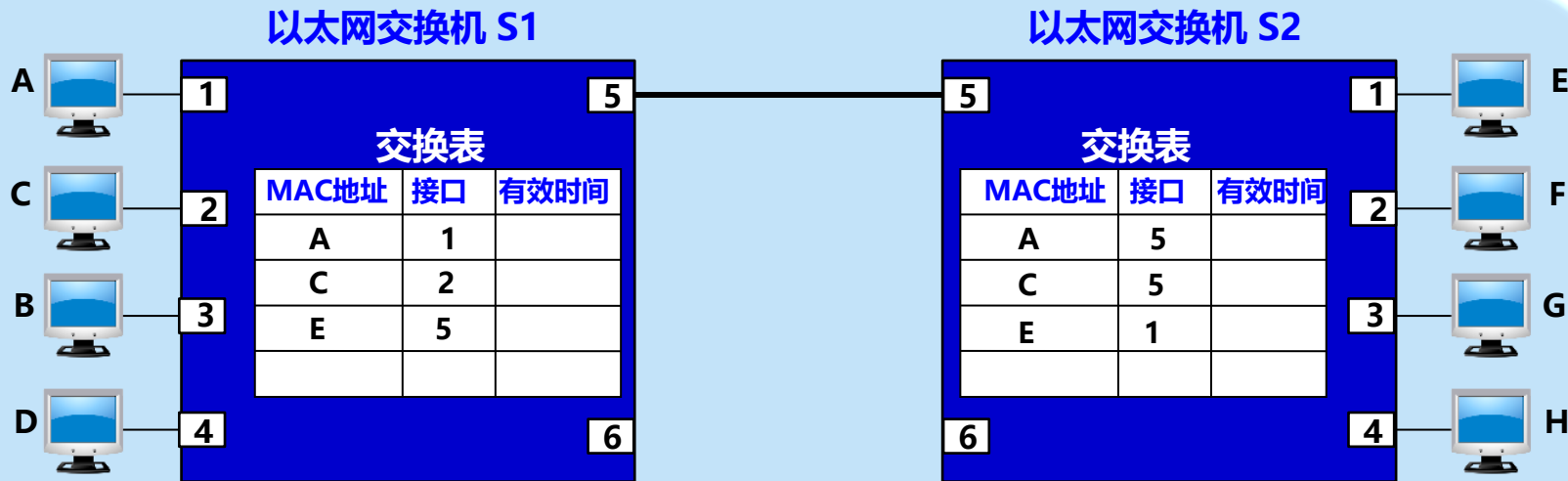


理解以太网交换机的自学习功能





理解以太网交换机的自学习功能

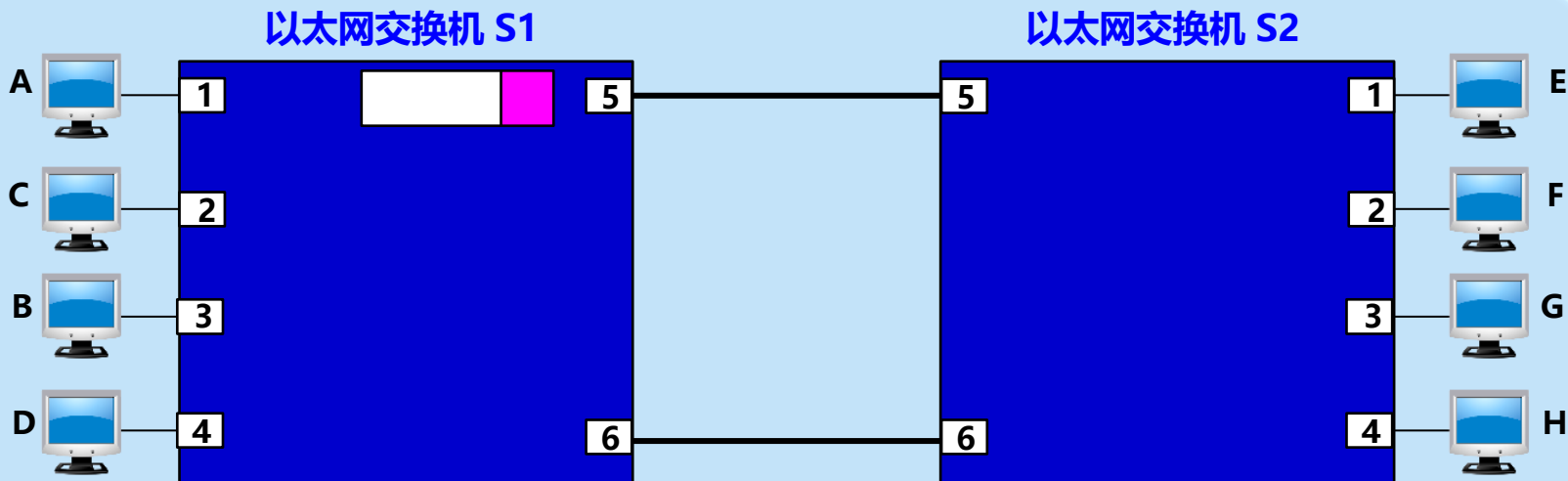


假设：A 向 B 发送了一帧，C 向 E 发送了一帧，E 向 A 发送了一帧。

请分析：此时，S1 和 S2 的交换表内容分别是什么？



存在的问题：回路

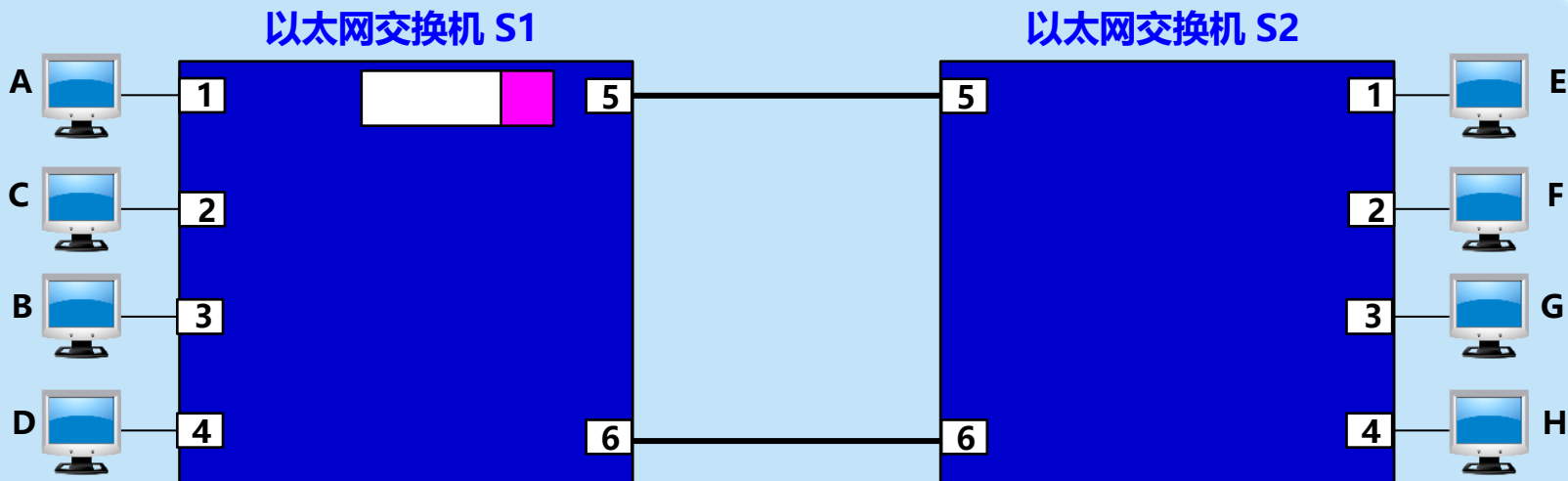


假定开始时，交换机 S1 和 S2 的交换表都是空的。

假定：主机 A 向主机 E 发送一帧。



存在的问题：回路



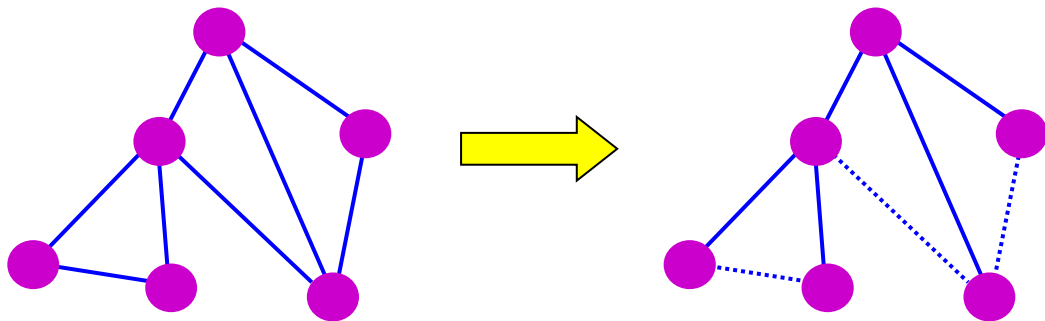
假定开始时，交换机 S1 和 S2 的交换表都是空的。

假定：主机 A 向主机 E 发送一帧。



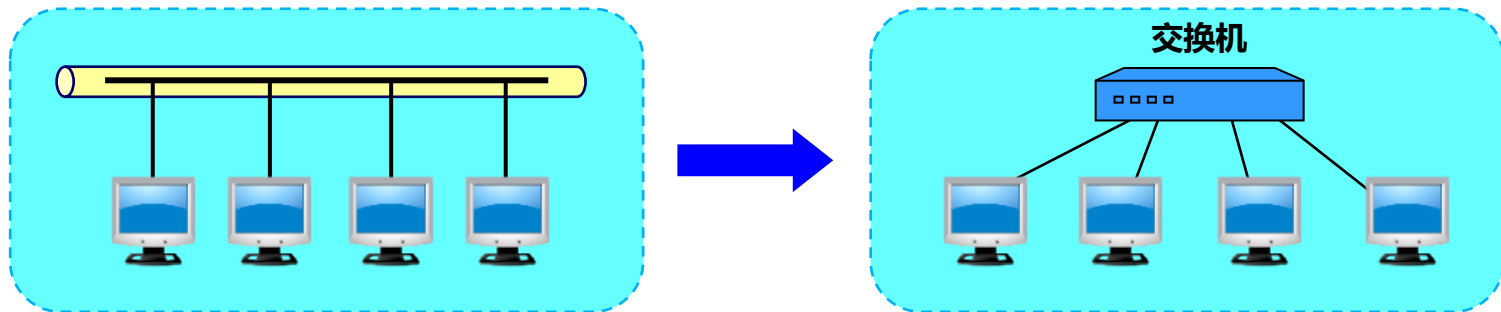
交换机使用了生成树协议

- IEEE 802.1D 标准制定了一个**生成树协议 STP** (Spanning Tree Protocol)。
- 其**要点**是：**不改变**网络的**实际拓扑**，但在逻辑上则切断某些链路，使得从一台主机到所有其他主机的路径是**无环路的树状结构**，从而消除了兜圈子现象。



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，以全双工方式工作。但仍然采用以太网的帧结构。



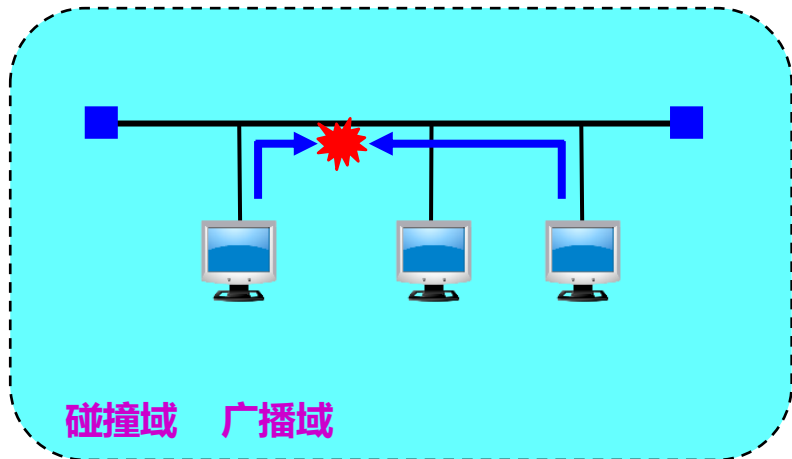


局域网存在的问题

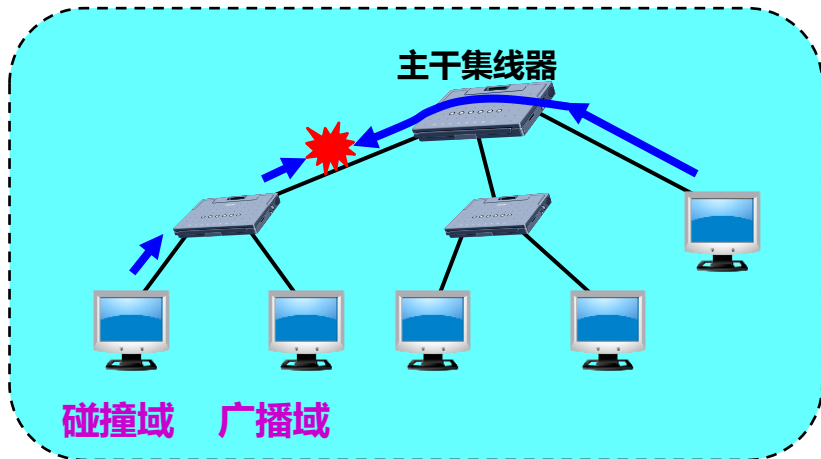
- 局域网存在的以下几个方面的问题：
 1. 扩展性
 2. 安全性
 3. 可管理性 等

总线以太网 和 10Base_T 星形以太网

- 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。



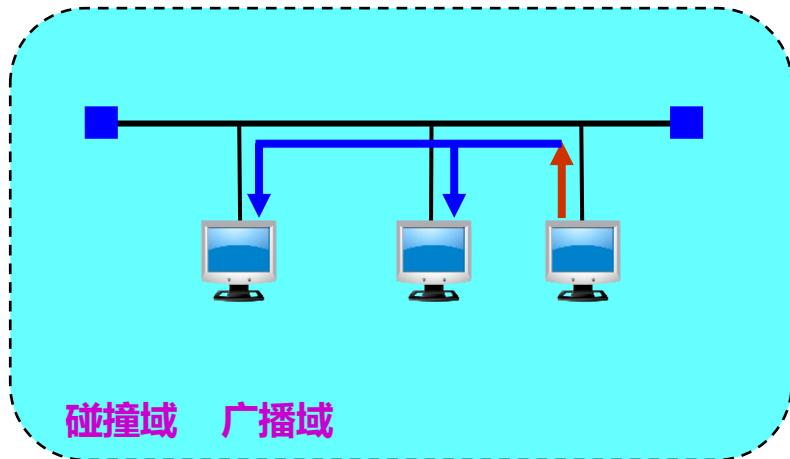
总线形以太网



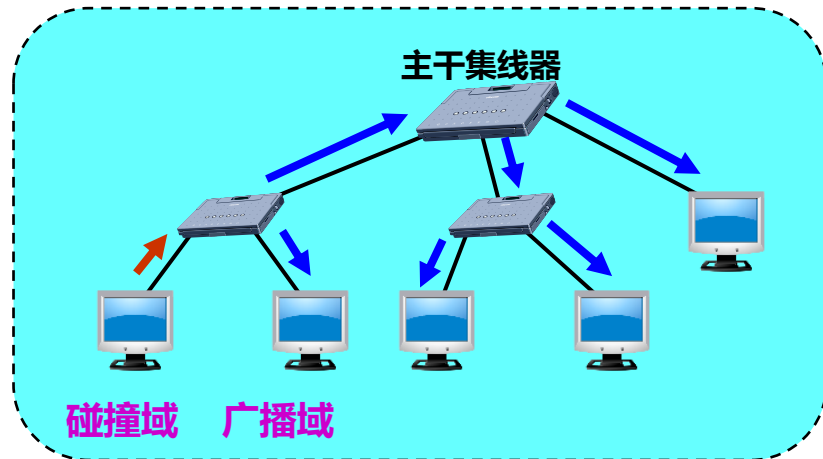
使用集线器的星形以太网

总线以太网 和 10Base_T 星形以太网

- 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。



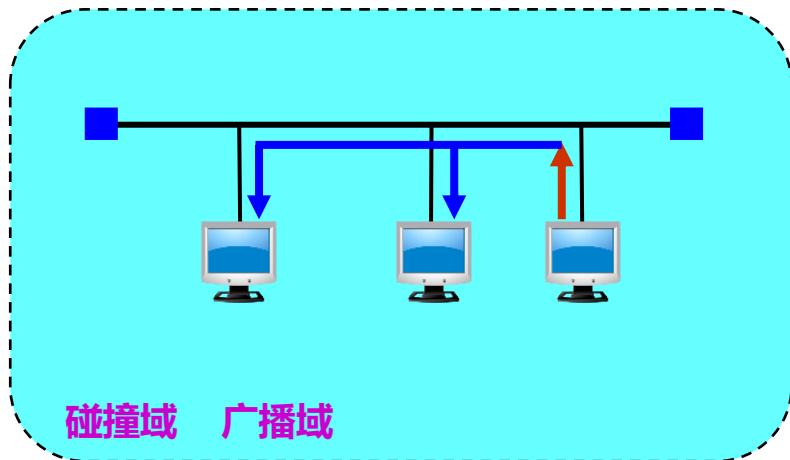
总线形以太网



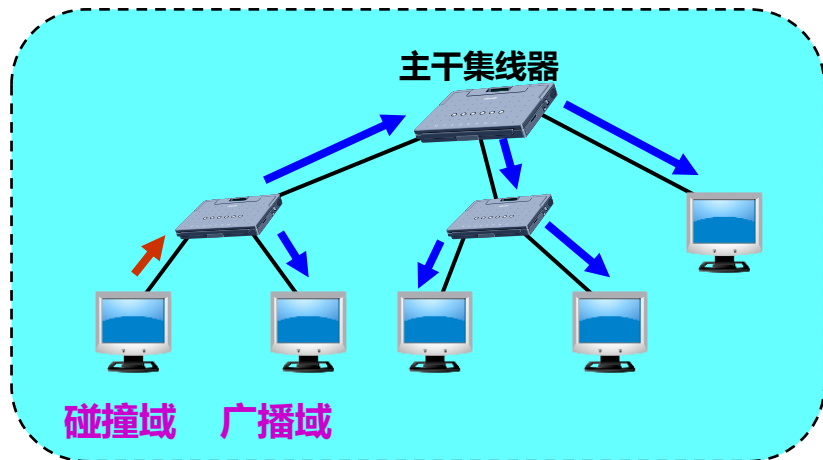
使用集线器的星形以太网

广播域

- 广播域 (broadcast domain)**：指这样一部分网络，其中任何一台设备发出的广播通信都能被该部分网络中的所有其他设备所接收。



总线形以太网

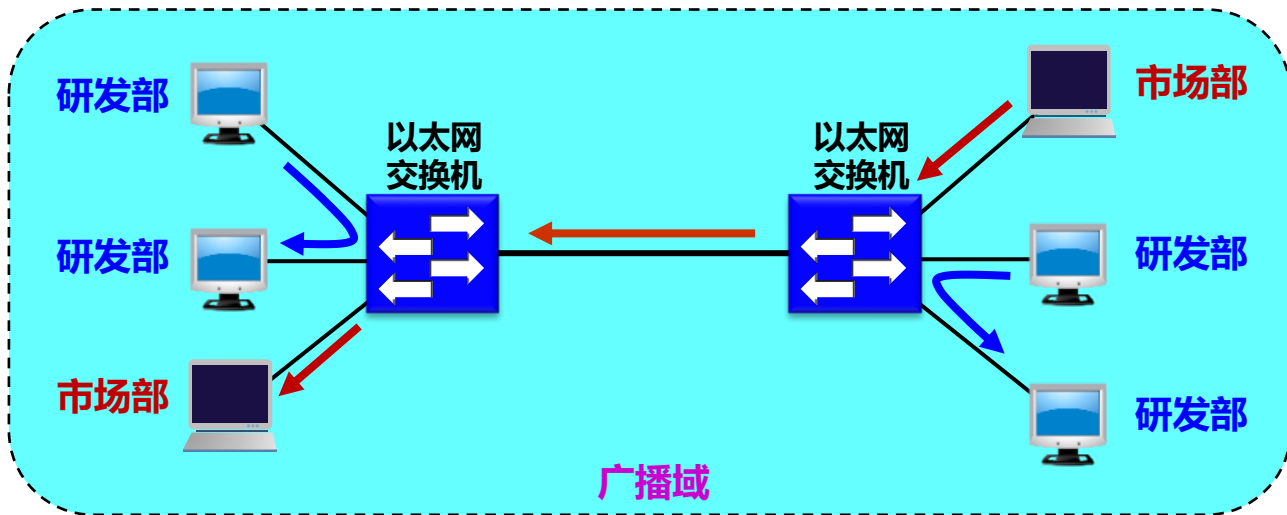


使用集线器的星形以太网



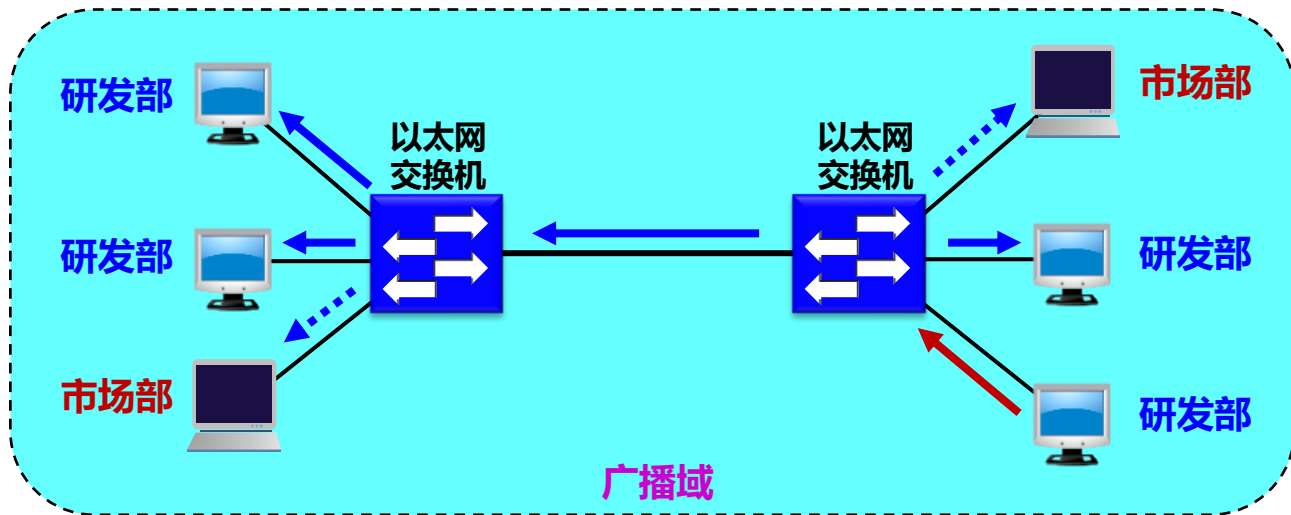
采用以太网交换机的星形以太网

- 每个接口都处于一个**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。



采用以太网交换机的星形以太网

- 每个接口都处于一个**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。





3.4.3 虚拟局域网

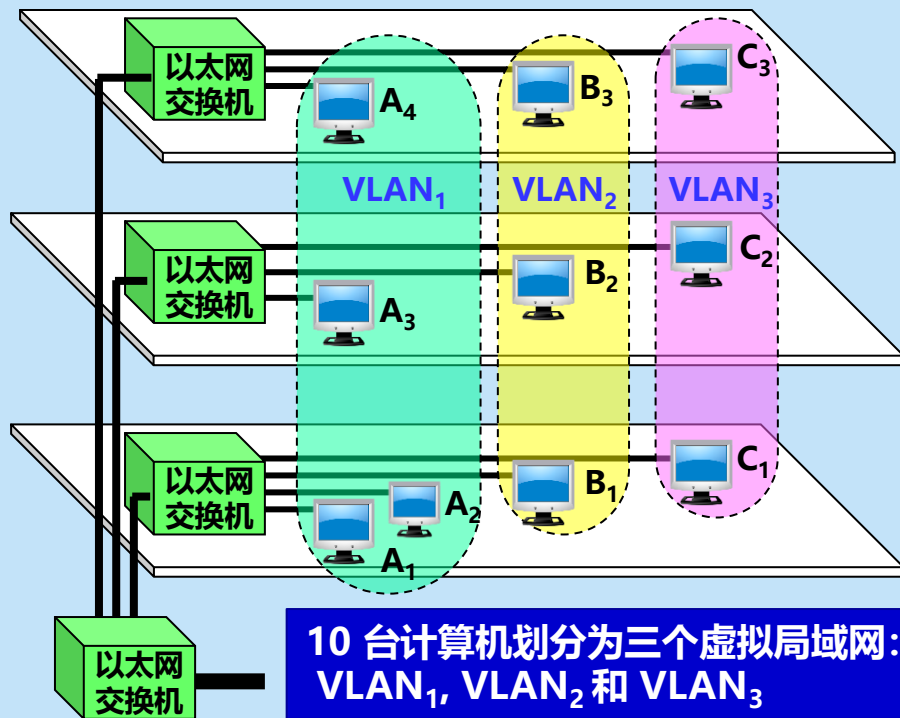
- 利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN (Virtual LAN)。
- IEEE 802.1Q 对虚拟局域网 VLAN 的**定义**:

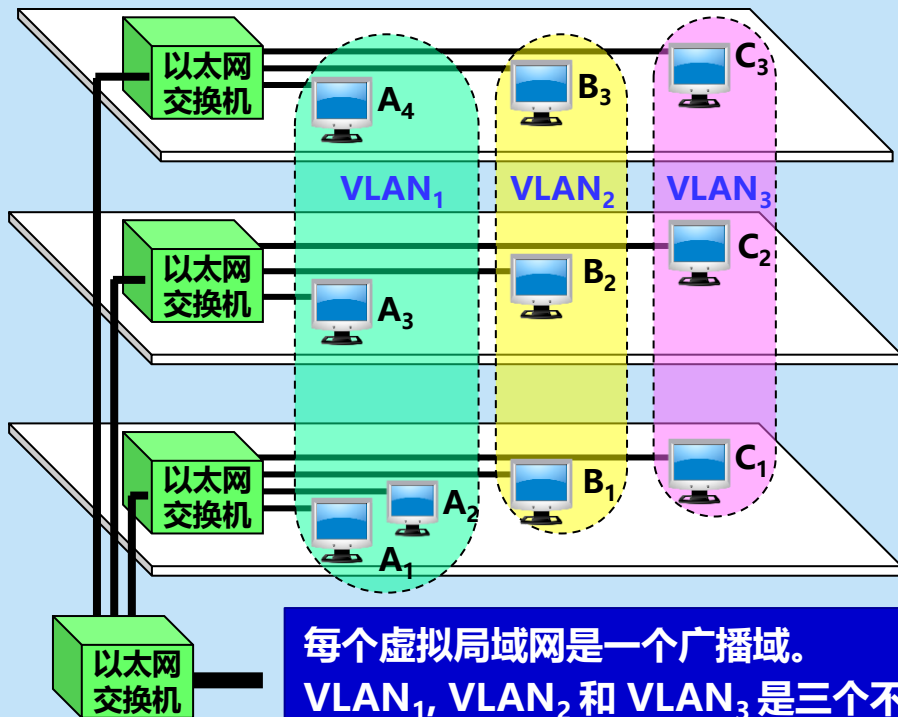
虚拟局域网 VLAN 是由一些局域网网段构成的**与物理位置无关的逻辑组**，而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符，指明发送这个帧的计算机是属于哪一个 VLAN。

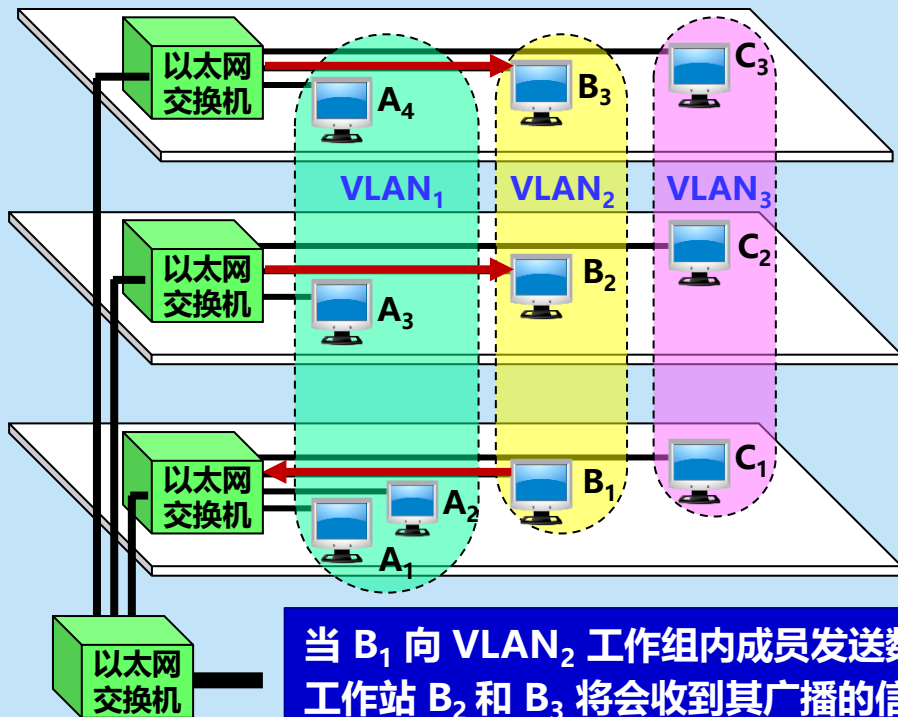


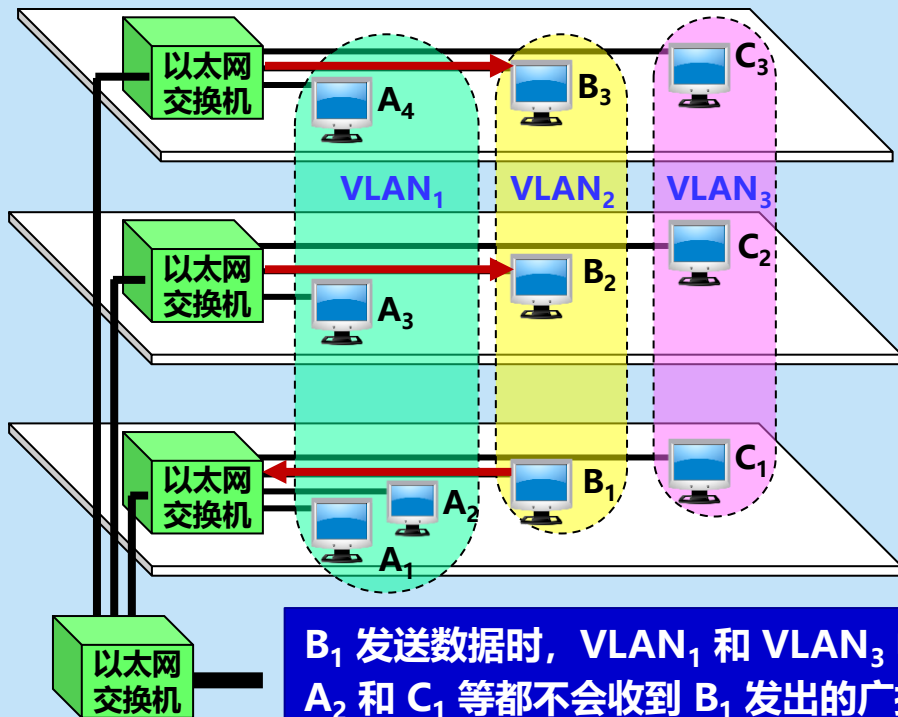
3.4.3 虚拟局域网

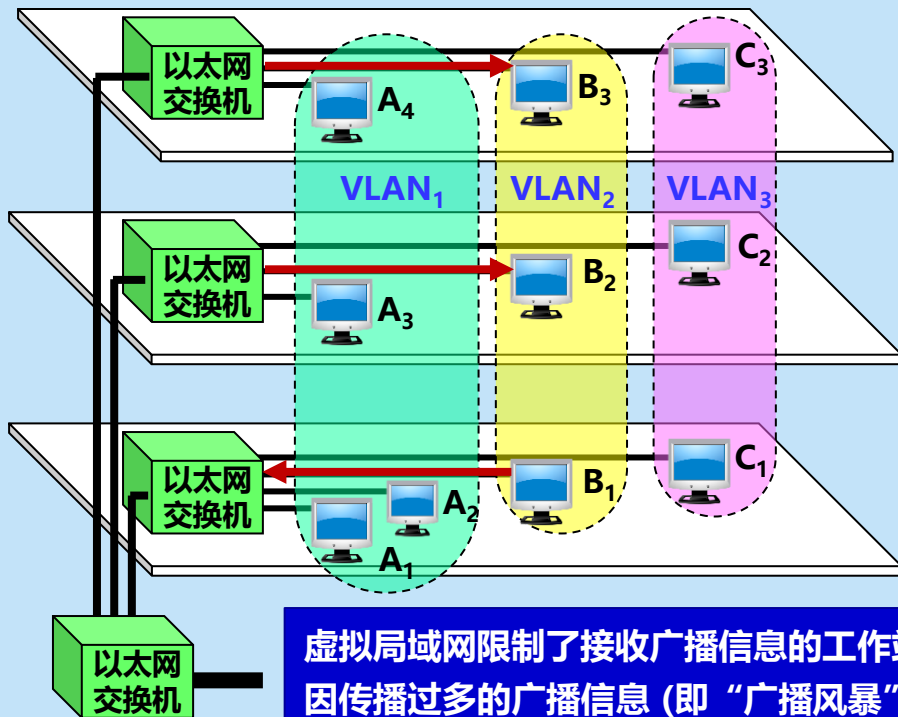
- 虚拟局域网其实只是局域网给用户提供服务，而并不是一种新型局域网。
- 由于虚拟局域网是用户和网络资源的逻辑组合，因此可按照需要将有关设备和资源非常方便地重新组合，使用户从不同的服务器或数据库中存取所需的资源。













虚拟局域网优点

- 虚拟局域网（VLAN）技术具有以下主要优点：
 1. 改善了性能
 2. 简化了管理
 3. 降低了成本
 4. 改善了安全性



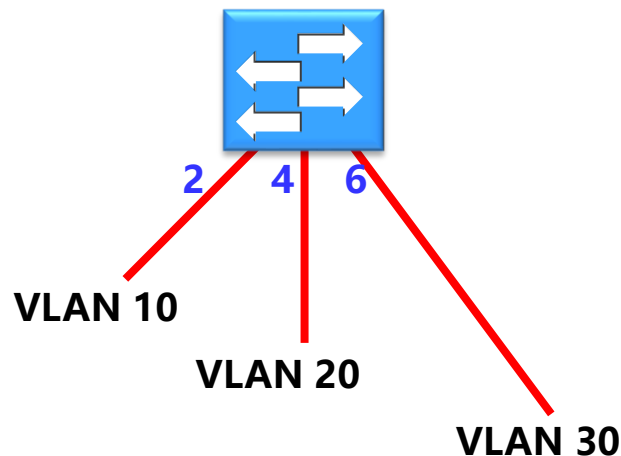
划分虚拟局域网的方法

- 基于交换机端口
- 基于计算机网卡的MAC地址
- 基于协议类型
- 基于IP子网地址
- 基于高层应用或服务



基于交换机端口的方法

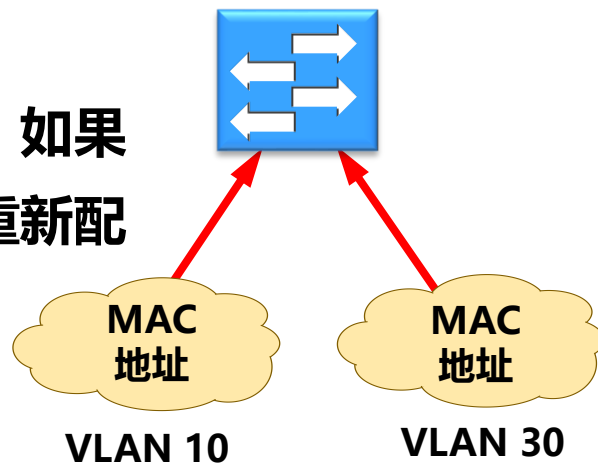
- 最简单、也是最常用的方法。
- 属于在第一层划分虚拟局域网的方法。
- **缺点**：不允许用户移动。



基于计算机网卡的MAC地址的方法

- 根据用户计算机的MAC地址划分虚拟局域网。
- 属于在第二层划分虚拟局域网的方法。
- 允许用户移动。
- **缺点**：需要输入和管理大量的MAC地址。如果用户的MAC地址改变了，则需要管理员重新配置VLAN。

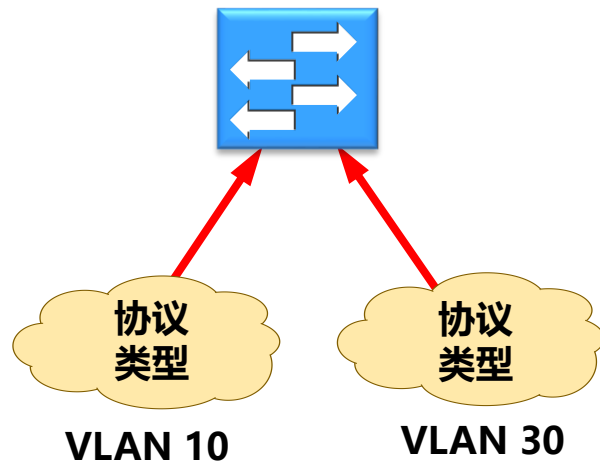
MAC 地址	VLAN
00-15-F5-CC-C8-14	10
C0-AB-D5-00-18-F4	10
C0-C5-18-DE-BC-E6	30



基于协议类型的方法

- 根据以太网帧的第三个字段“类型”字段确定该类型的协议属于哪一个虚拟局域网。
- 属于在第二层划分虚拟局域网的方法。

“类型”	VLAN
IP	10
IPX	30
.....	...

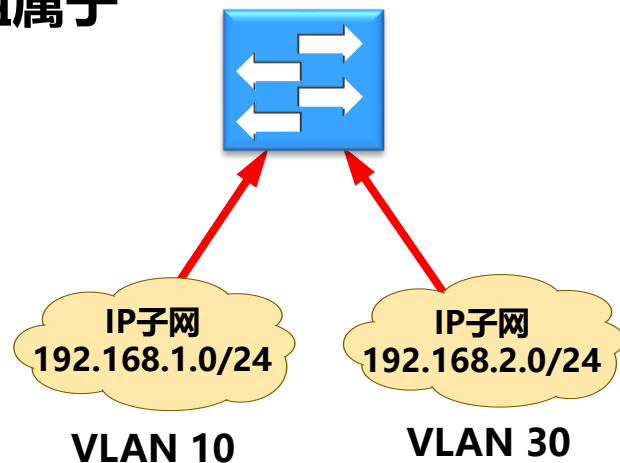




基于IP子网地址的方法

- 根据以太网帧的第三个字段“类型”字段和IP分组首部中的源 IP 地址字段确定该 IP 分组属于哪一个虚拟局域网。
- 属于在第三层划分虚拟局域网的方法。

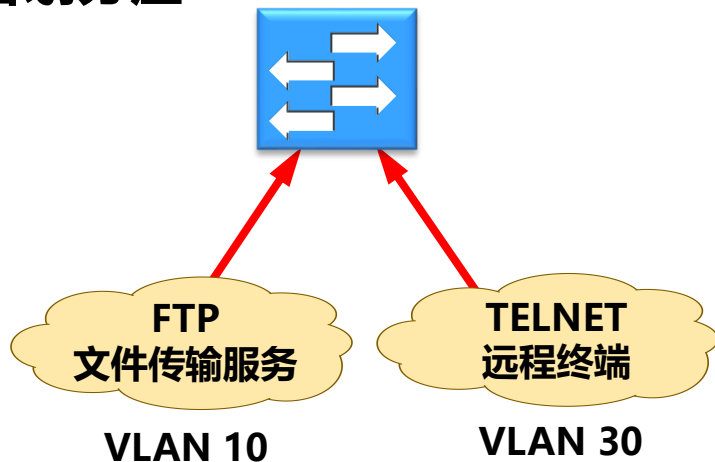
IP 子网	VLAN
192.168.1.0/24	10
192.168.2.0/24	30
.....	...



基于高层应用或服务的方法

- 根据高层应用或服务、或者它们的组合划分虚拟局域网。
- 更加灵活，但更加复杂。

应用	VLAN
FTP	10
TELNET	30
.....	...





各种VLAN划分方法的优点与缺点

划分方法	类型	优 点	缺 点	应用范围
基于端口的VLAN	静态VLAN	划分简单；性能好； 大部分交换机支持； 交换机负担小；	手工设置较烦琐； 用户变更端口时，必须重新定义	应用广泛
基于MAC的VLAN	动态VLAN	用户位置改变时不用重新配置； 安全性好	所有用户都必须配置； 交换机执行效率降低， 必须架设VMPS服务器	一般
基于协议的VLAN	动态VLAN	管理方便； 维护工作量小	交换机负担较重	支持较少
基于IP组播的VLAN	动态VLAN	可扩大到广域网；很容易 通过路由器进行扩展	不适合局域网； 效率不高	应用较少

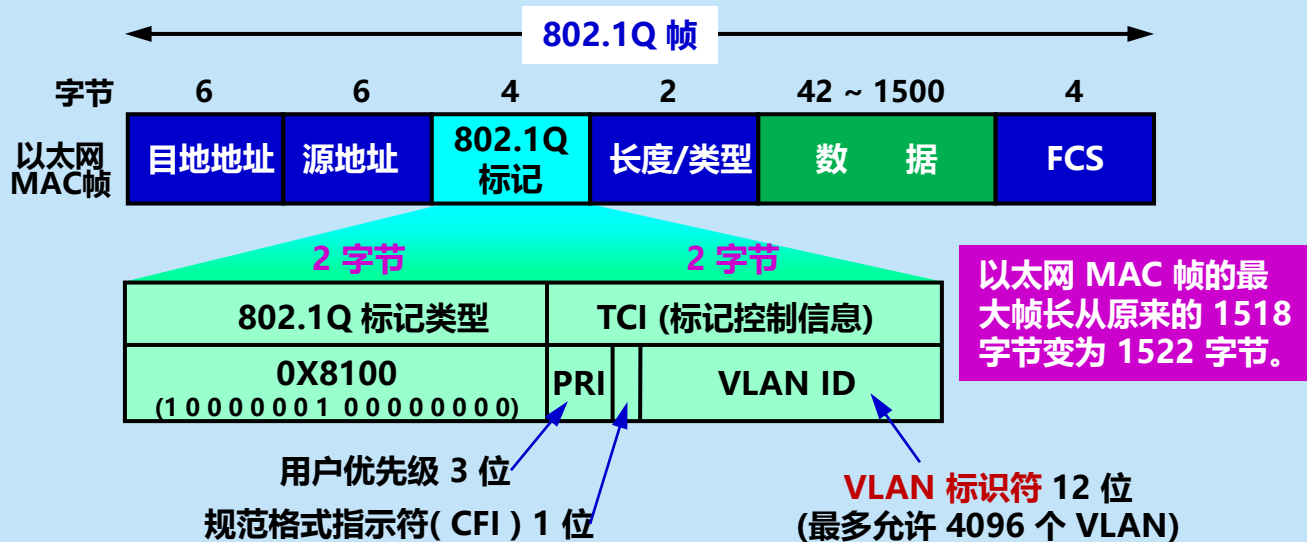


虚拟局域网使用的以太网帧格式

- 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)，用来指明该帧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**。



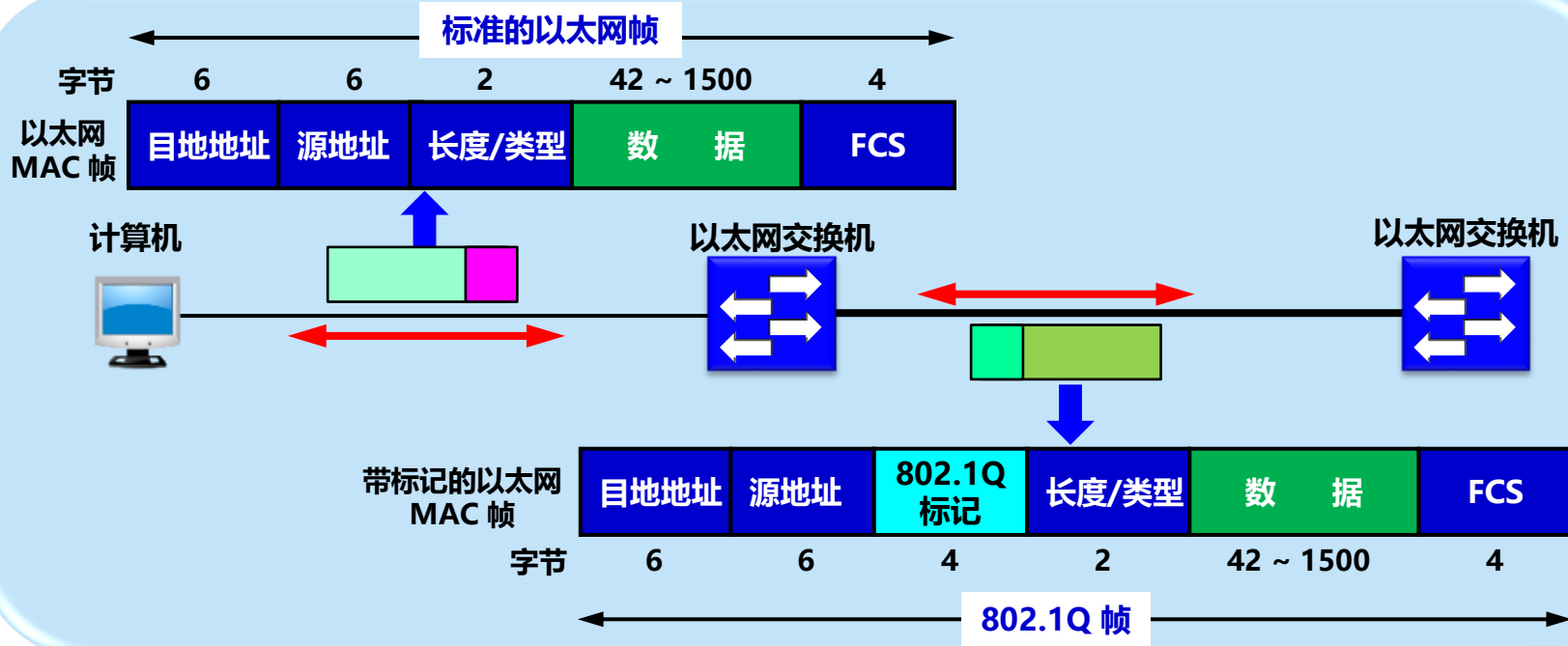
虚拟局域网使用的以太网帧格式



插入 VLAN 标记后变成了 802.1Q 帧



虚拟局域网使用的以太网帧格式





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

3.5.4

使用以太网进行宽带接入



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 米。
- 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**

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

- **100BASE-T4**

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

- **100BASE-FX**

1. 使用 2 对光纤。
2. 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。



吉比特以太网的物理层

- **使用两种成熟的技术：**一种来自现有的以太网，另一种则是美国国家标准协会 ANSI 制定的光纤通道 FC (Fiber Channel)。

吉比特以太网物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
1000BASE-SX	光缆	550 m	多模光纤 (50 和 62.5 μm)
1000BASE-LX	光缆	5000 m	单模光纤 (10 μm)
1000BASE-CX	铜缆	25 m	使用 2 对屏蔽双绞线电缆 STP
1000BASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 UTP 5 类线



半双工方式工作的吉比特以太网

- 吉比特以太网工作在半双工方式时，就必须进行碰撞检测。
- 为保持 64 字节最小帧长度，以及 100 米的网段的最大长度，吉比特以太网增加了两个功能：
 1. 载波延伸 (carrier extension)
 2. 分组突发 (packet bursting)



载波延伸

- 使最短帧长仍为 64 字节（这样可以保持兼容性），同时将争用时间增大为 512 字节。
- 凡发送的 MAC 帧长不足 512 字节时，就用一些特殊字符填充在帧的后面，使 MAC 帧的发送长度增大到 512 字节。接收端在收到以太网的 MAC 帧后，要将所填充的特殊字符删除后才向高层交付。

载波延伸

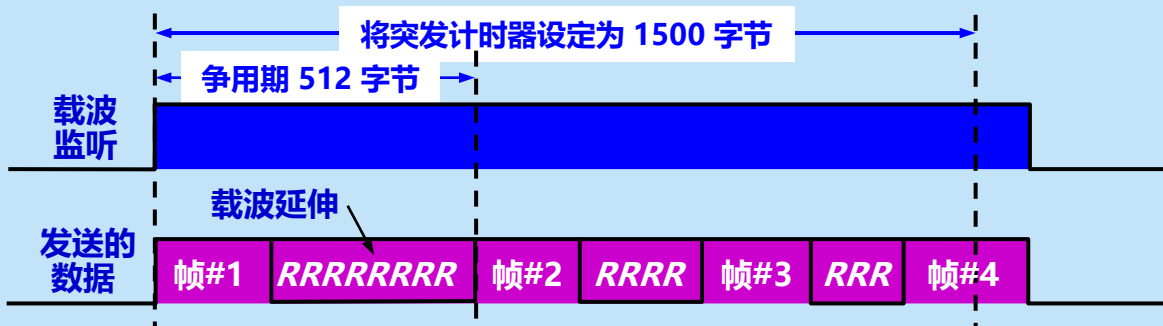




分组突发

- 当很多短帧要发送时，第一个短帧要采用载波延伸方法进行填充，随后的一些短帧则可一个接一个地发送，只需留有必要的帧间最小间隔即可。这样就形成可一串分组的突发，直到达到 1500 字节或稍多一些为止。

分组突发





全双工方式工作的吉比特以太网

- 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。**



3.5.3 10 吉比特以太网和更快的以太网

- 10 吉比特以太网 (10GE) 并非把吉比特以太网的速率简单地提高到 10 倍，其主要特点有：
 1. 与 10 Mbit/s、100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 以太网的帧格式完全相同。
 2. 保留了 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长，便于升级。
 3. 不再使用铜线而只使用光纤作为传输媒体。
 4. 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

10GE 的物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
10GBASE-SR	光缆	300 m	多模光纤 (0.85 μm)
10GBASE-LR	光缆	10 km	单模光纤 (1.3 μm)
10GBASE-ER	光缆	40 km	单模光纤 (1.5 μm)
10GBASE-CX4	铜缆	15 m	使用 4 对双芯同轴电缆 (twinax)
10GBASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 6A 类 UTP 双绞线



40GE/100GE 的物理层

40GE/10GE 的物理层标准

物理层	40GE	100GE
在背板上传输至少超过 1 m	40GBASE-KR4	
在铜缆上传输至少超过 7 m	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10
在多模光纤上传输至少 100 m	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10, *100GBASE-SR4
在单模光纤上传输至少 10 km	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
在单模光纤上传输至少 40 km	*40GBASE-ER	100GBASE-ER4



端到端的以太网传输

- 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有：
 1. 技术成熟；
 2. 互操作性很好；
 3. 在广域网中使用以太网时价格便宜；
 4. 采用统一的以太网帧格式，简化了操作和管理。



3.5.4 使用以太网进行宽带接入

- IEEE 在 2001 年初成立了 802.3 EFM 工作组，专门研究高速以太网的宽带接入技术问题。
- 以太网宽带接入具有以下**特点**：
 1. 可以提供**双向**的宽带通信。
 2. 可以根据用户对带宽的需求灵活地进行带宽**升级**。
 3. 可以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且降低了传输的成本。
 4. **但是不支持用户身份鉴别**。



PPPoE

- **PPPoE** (PPP over Ethernet) 的意思是“在以太网上运行 PPP”，它把 PPP 协议与以太网协议结合起来——将 PPP 帧再封装到以太网中来传输。
- 现在的光纤宽带接入 FTTx 都要使用 PPPoE 的方式进行接入。在 PPPoE 弹出的窗口中键入在网络运营商购买的用户名和密码，就可以进行宽带上网了。
- 利用 ADSL 进行宽带上网时，从用户个人电脑到家中的 ADSL 调制解调器之间，也是使用 RJ-45 和 5 类线（即以太网使用的网线）进行连接的，并且也是使用 PPPoE 弹出的窗口进行拨号连接的。