



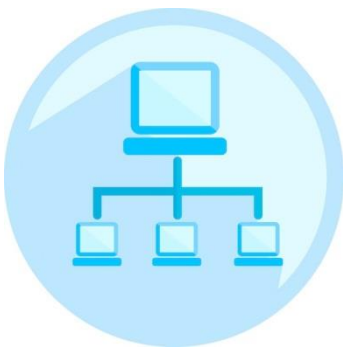
# 计算机网络



顾 军

计算机学院

[jgu@cumt.edu.cn](mailto:jgu@cumt.edu.cn)





# 专题3：数据帧怎么到达目的结点



- 应用层(application layer)
- 运输层(transport layer)
- 网络层(network layer)
- 数据链路层(data link layer)
- 物理层(physical layer)





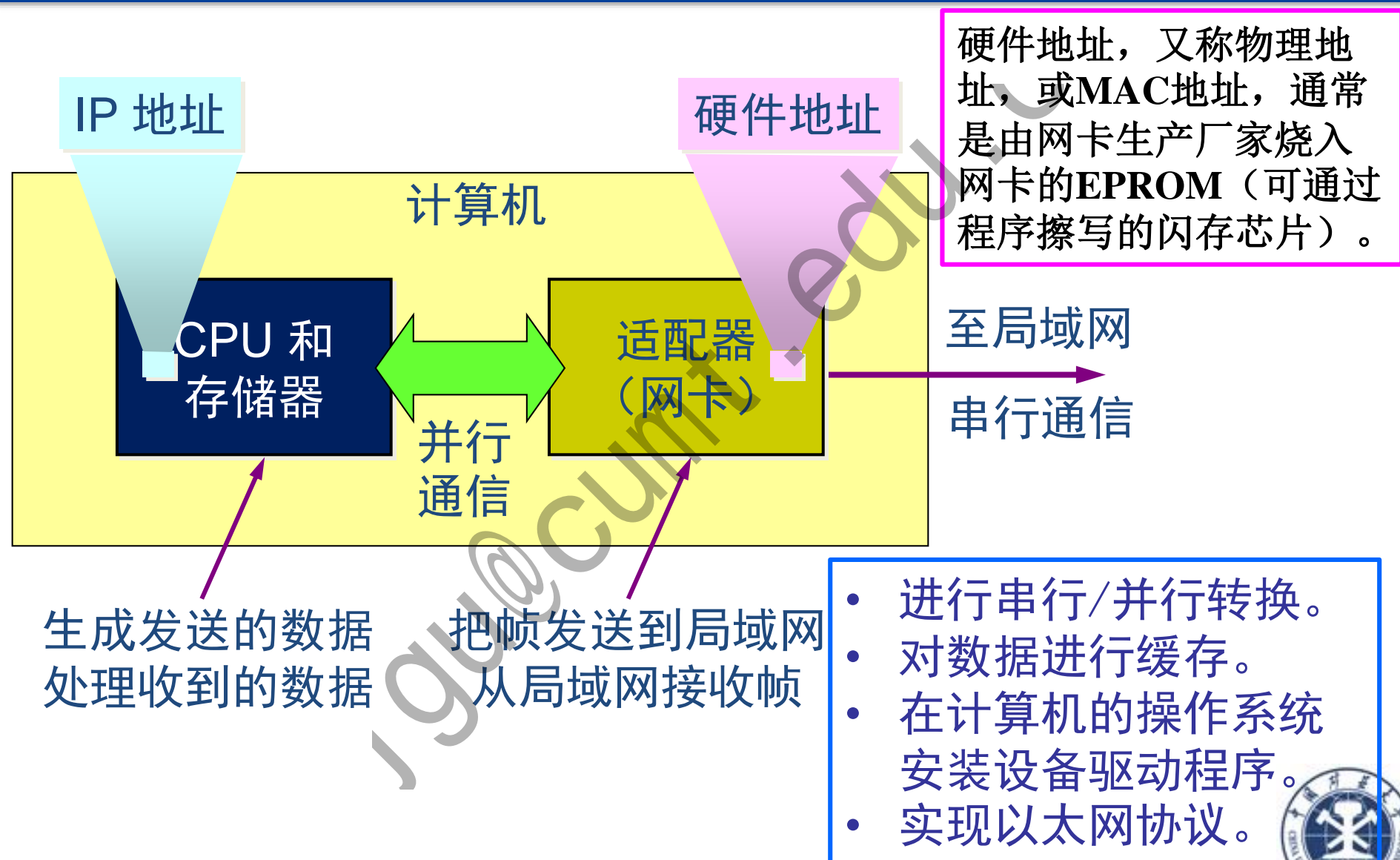
## Q11: 谁来处理MAC帧 ?

- 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”。
- 现在实现广播信道数据链路层协议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。





# 计算机通过适配器和局域网进行通信

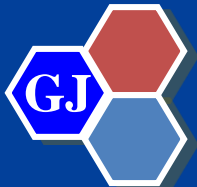




# 适配器有过滤功能

- 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）





# 适配器检查 MAC 地址

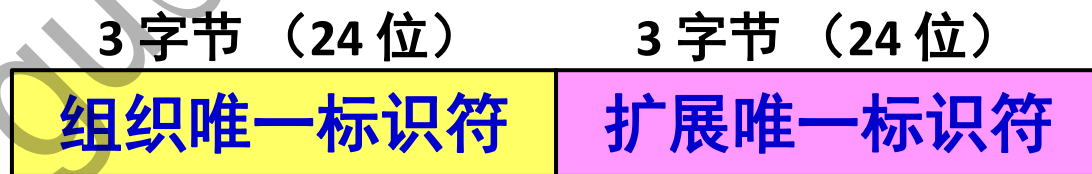
- 所有的适配器都至少能够识别**单播地址和广播地址**。
- 有的适配器可用编程方法识别多播地址。
  - 当OS启动时，对适配器初始化，使其能够识别某些多播地址。
  - 只有目的地址才能使用广播地址和多播地址。
- 以**混杂方式** (promiscuous mode) 工作的以太网适配器只要“听到”有帧在以太网上传输就都接收下来。
  - “黑客”常用来“窃听”网上用户口令。





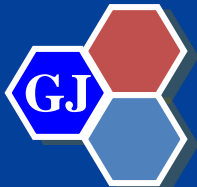
## Q12: MAC地址的格式设计 ?

- IEEE 的注册管理机构 RA(Registration Authority) 负责向厂家分配地址字段的前三个字节(即高位 24 位), 而后三个字节(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。

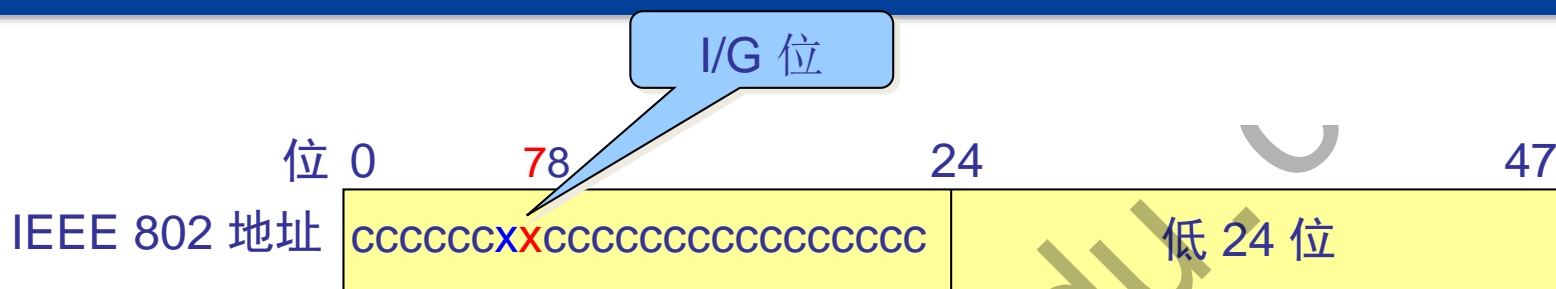


48 位的 MAC 地址





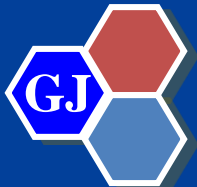
# 单站地址，组地址，广播地址



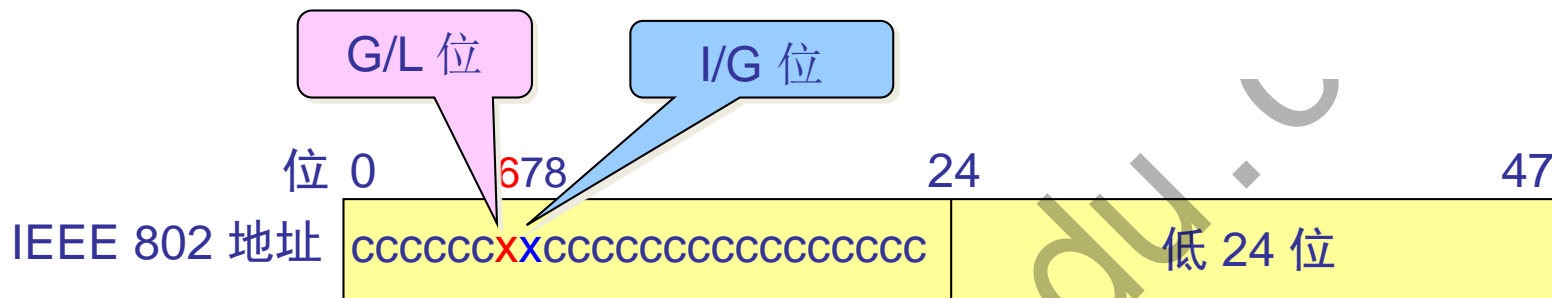
- ◆ 个人/组 (I/G, Individual/Group)位：第一个字节的最低位，用来确定地址是单播还是多播地址。
  - ▣ 当 **I/G位=0** 时，地址字段表示一个单站地址。
  - ▣ 当 **I/G位=1** 时，表示组地址，用来进行多播（又译为组播）。此时，IEEE 只分配地址字段前三个字节中的23位。
- ◆ 当 I/G 位分别为 0 和 1 时，一个地址块可分别生成  $2^{24}$  个单个站地址和  $2^{24}$  个组地址。
- ◆ 所有 48 位都为 1 时，为广播地址。只能作为目的地址使用。







# 全球管理与本地管理

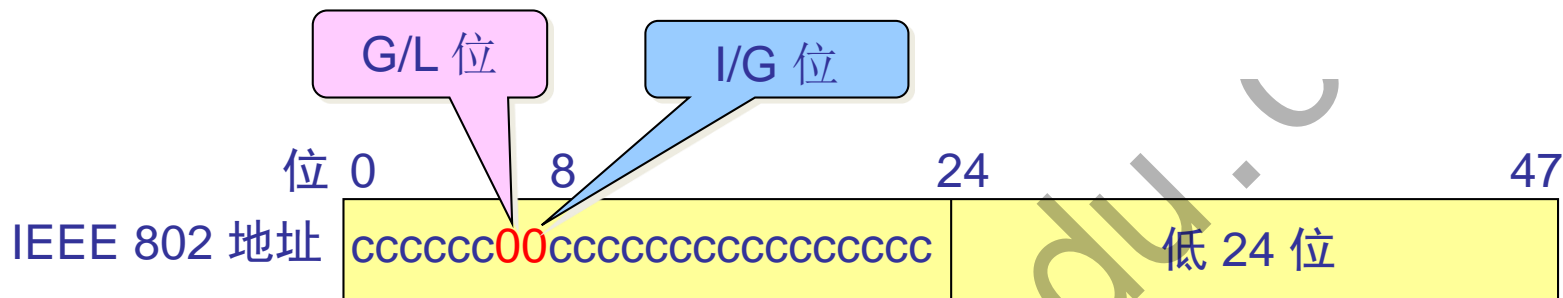


- ◆ 全局/本地 (G/L, Global / Local)位：第一个字节的第七位，用于确定该地址是全局管理的还是本地管理的。
  - 当 **G/L位=0** 时，是全球管理（保证在全球没有相同的地址），厂商向IEEE购买的 OUI 都属于全球管理。
  - 当 **G/L位=1** 时，是本地管理，这是用户可任意分配网络上的地址。





# 全局管理的单播MAC 地址



- ◆ 对于典型的 802.x网络适配器地址，G/L 和 I/G 位均设置为 0，对应于全局管理的单播MAC 地址。

查看本机的MAC地址：

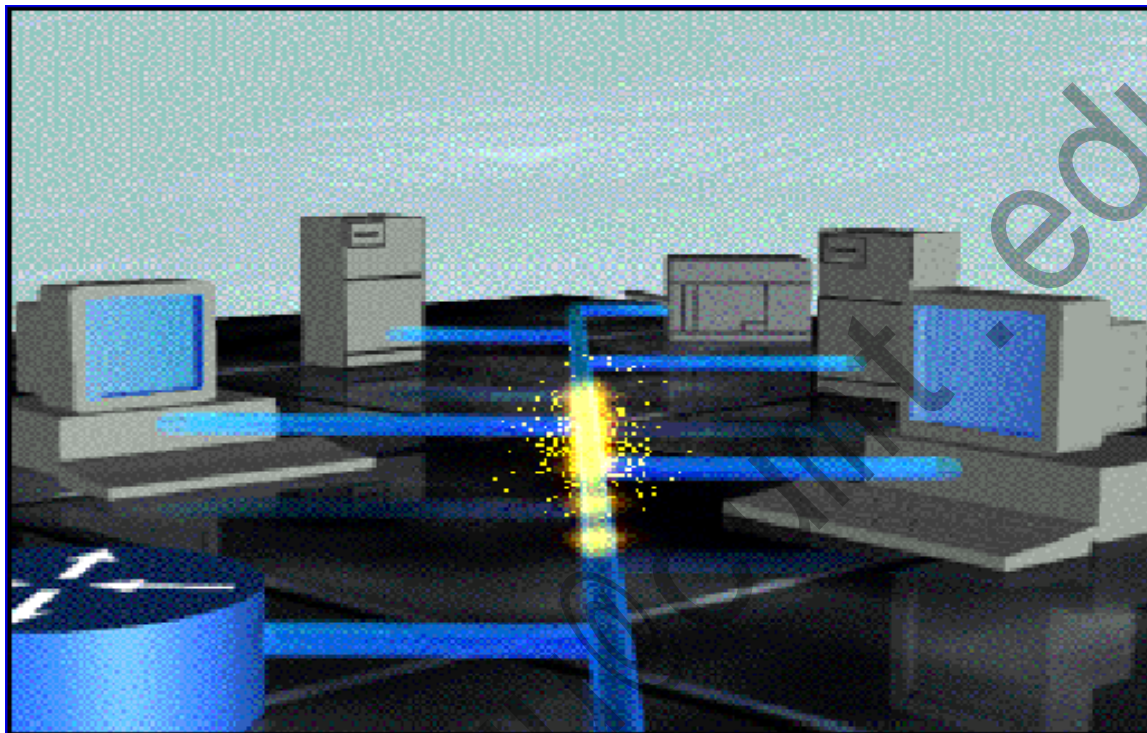
- (1) Command下： `ipconfig /all`
- (2)通过本地连接查找mac地址





## Q13: 如何处理广播时的信号碰撞？

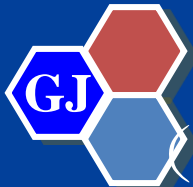
所谓“碰撞”就是发生了冲突。



- 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。

- 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。





# CSMA/CD

## (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)

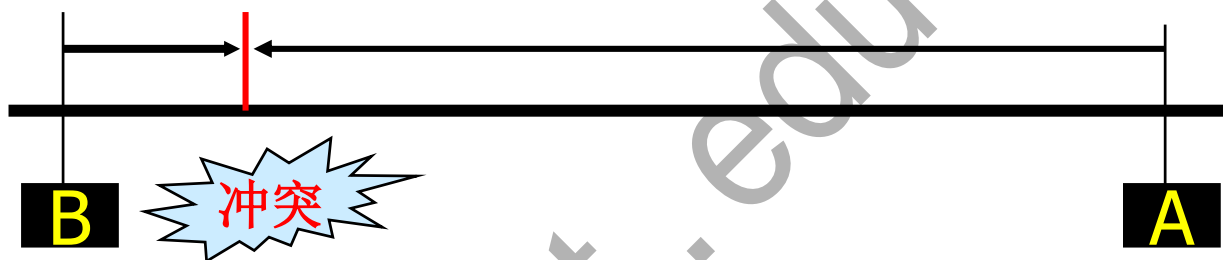
- “**多点接入**”表示许多计算机以多点接入的方式连接在一根总线上。
- “**载波监听**”指每一个站在发送数据之前先要检测一下总线上是否有其他计算机在发送数据，如果有，则暂时不要发送数据，以免发生碰撞。
  - 总线上并没有什么“载波”。“载波监听”就是用电子技术检测总线上有没有其他计算机发送的数据信号。
- “**碰撞检测**”就是计算机边发送数据边检测信道上的信号电压大小，也称为“**冲突检测**”。
  - 每一个正在发送数据的站，一旦**发现**总线上出现了碰撞，就要立即停止发送，免得继续浪费网络资源，然后等待一段**随机时间**后再次发送。





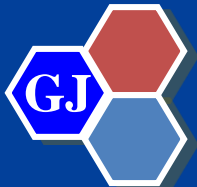
## Q14: 怎么确定发送数据没有被碰撞？

- 由于电磁波在总线上的传播速率有限，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。

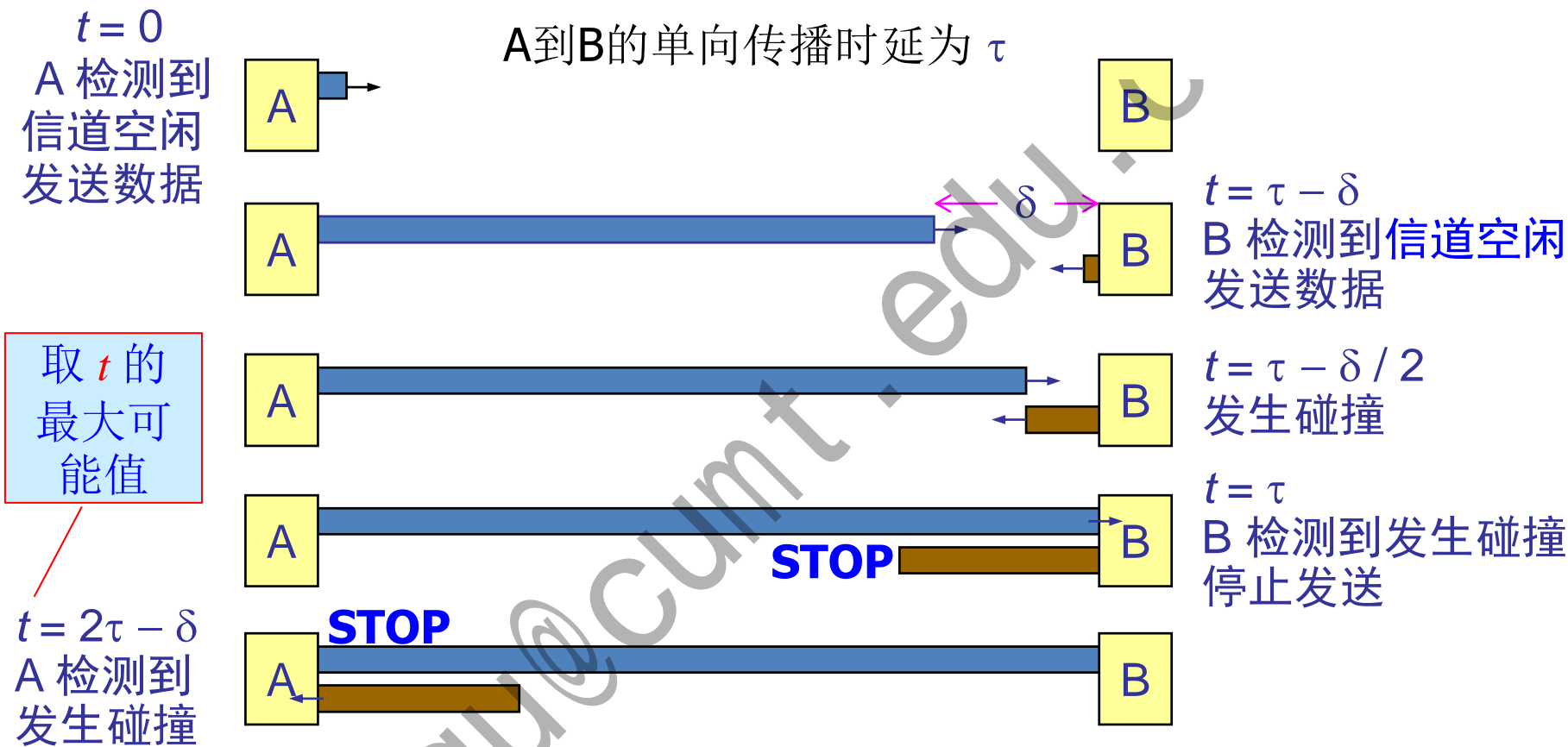


- A 向 B 发出的信息，要经过一定的时间后才能传送到 B；
- B 若在 A 发送的信息到达 B 之前发送自己的帧(因为这时 B 的载波监听检测不到 A 所发送的信息)；
- 则必然会在某个时间和 A 发送的帧发生碰撞。
- 碰撞的结果是两个帧都变得无用。





# 要经过多长时间才能知道自己发送的数据和其它站发送的数据是否发生碰撞？



由于局域网上任意两个站之间的传播时延有长有短，因此局域网必须按照**最坏情况**设计，即取分别离总线两端最近的两个站之间的传播时延（这两个站之间的距离最大）为端到端传播时延。





# 争用期

- 如果在**最大时间长度**里都没有检测到碰撞，那就意味着A发送的信号已经占据了整个信道，其它站点都会因为监听到信道不空闲，而不会发送数据，从而保证了A发送的数据不会被冲突。
- 因此，最先发送数据帧的站，在发送数据帧后至多经过**两倍的总线端到端传输时延**或总线的**端到端往返传播时延**，即 **$2\tau$** 的时间，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  $2\tau$  称为**争用期**，或**碰撞窗口**。







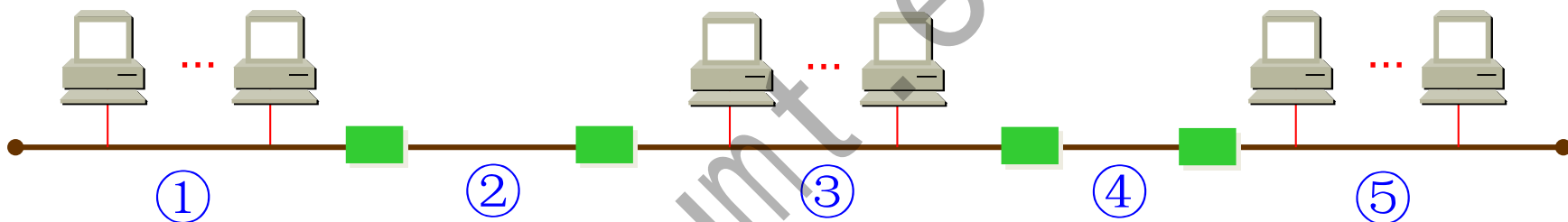
-





# 最坏情况下总线端到端长度的设定

- 10Mbps总线结构以太网有个5-4-3原则：10Mbps以太网最多只能有5个网段，4个转发器/中继器，而其中只允许3个网段有设备，其它两个网段只是用来扩展和延长传输距离，而不连接任何站点。



- 目的是减少竞争站点的个数，从而减少发生冲突的概率。
- 按照此标准组成的共享局域网，总站数少于1024个，全长小于2500米（粗同轴电缆）或500米（双绞线）。
- 假设最大端到端长度约为5km，那么将比任何实际以太网的覆盖范围都大的多。





# 争用期的长度



$\delta \rightarrow 0$

$t \rightarrow 2\tau$

电磁波在1km电缆的传播时延约为 $5\mu\text{s}$ 。(记住)

- 在理想的情况下，5km长度总线的端到端时延可以记为 $25\mu\text{s}$ ，再考虑到其它许多因素，如：存在的转发器所增加的时延，以及强化碰撞的干扰信号的持续时间，实际上的时延一定会比 $25\mu\text{s}$ 大些。
- 由此可见，两倍的端到端时延应大于 $50\mu\text{s}$ 。





# 争用期的长度

- 以太网**规定**争用期的长度为 **$51.2 \mu\text{s}$** 。
  - 最大的端到端时延必须小于争用期的一半，即  $25.6 \mu\text{s}$ 。
  - 实际使用的各种以太网都能在争用期  $51.2 \mu\text{s}$  内检测到可能发生的碰撞。
- 对于  $10 \text{ Mb/s}$  以太网，在争用期  $51.2 \mu\text{s}$  内可发送  $512 \text{ bit}$ ，即  $64$  字节。
  - 也可以说争用期是 **$512$  比特时间**。
  - $1$  比特时间就是发送  $1$  比特所需的时间。
    - ▣ **这个时间单位与数据率密切相关。**





# 最短有效帧长

- 由于发送站一检测到冲突就立即中止发送，此时的数据发送时间少于  $51.2\ \mu\text{s}$ ，因此，这时已经发送出去的数据一定小于  $10\text{Mbps} \times 51.2\ \mu\text{s} = 512\ \text{bits} = 64$  字节。
- 也就是说，如果前 64 字节没有发生冲突，则后续数据就不会发生冲突。
- 因此，以太网规定最短有效帧长为 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。
- 只要收到这种帧，就应当立即将其丢弃。

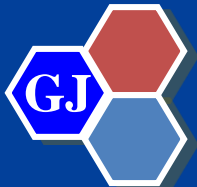




## Q15: 发生碰撞后须等待多长时间？

- 以太网使用截断二进制指数退避 (truncated binary exponetial backoff) 算法让发生碰撞的站在停止发送数据后，不是等待信道变为空闲后就立即再发送数据，而是推迟（也叫退避）一个随机的时间。





# 二进制指数类型退避算法

- 基本退避时间取为争用期  $2\tau$ 。
- 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。
- 参数  $k$  按下面的公式计算：
$$k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$$
- 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。

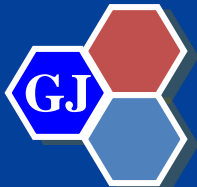




# 重传次数

- 若连续多次发生冲突，就表明可能有较多的站参与争用信道。
- 但是，使用二进制指数类型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（这也称为动态退避），因而减少发生碰撞的概率，有利于整个系统的稳定。



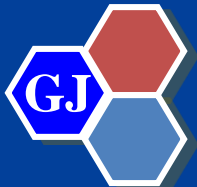


# 公平性问题

- 适配器对过去发生过的碰撞**无记忆功能**，每发送一个新的帧，就要执行一次CSMA/CD算法。
- 当好几个适配器正在执行该算法时，很可能会有某一个适配器发送的新帧能够碰巧立即成功插入到信道中，得到了发送权，而已经推迟好几次发送的站，有可能很不巧，还要继续执行退避算法，继续等待。







# 帧间距/帧间间隔



- 以太网发送方式是一个帧一个帧发送的，帧与帧之间需要间隙，即帧间距IFG，也可称其为IPG (Interpacket Gap)。
- IFG指的是一段**时间**，不是**距离**，单位通常用微秒( $\mu\text{s}$ )或纳秒(ns)。
- 网络设备和组件在接收一个帧之后，需要一段短暂的时间来恢复并为接收下一帧做准备，因此需要IFG。





# 帧间最小间隔



- 以太网规定了帧间最小间隔为 $9.6\ \mu\text{s}$ ，相当于96比特时间。
- 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。





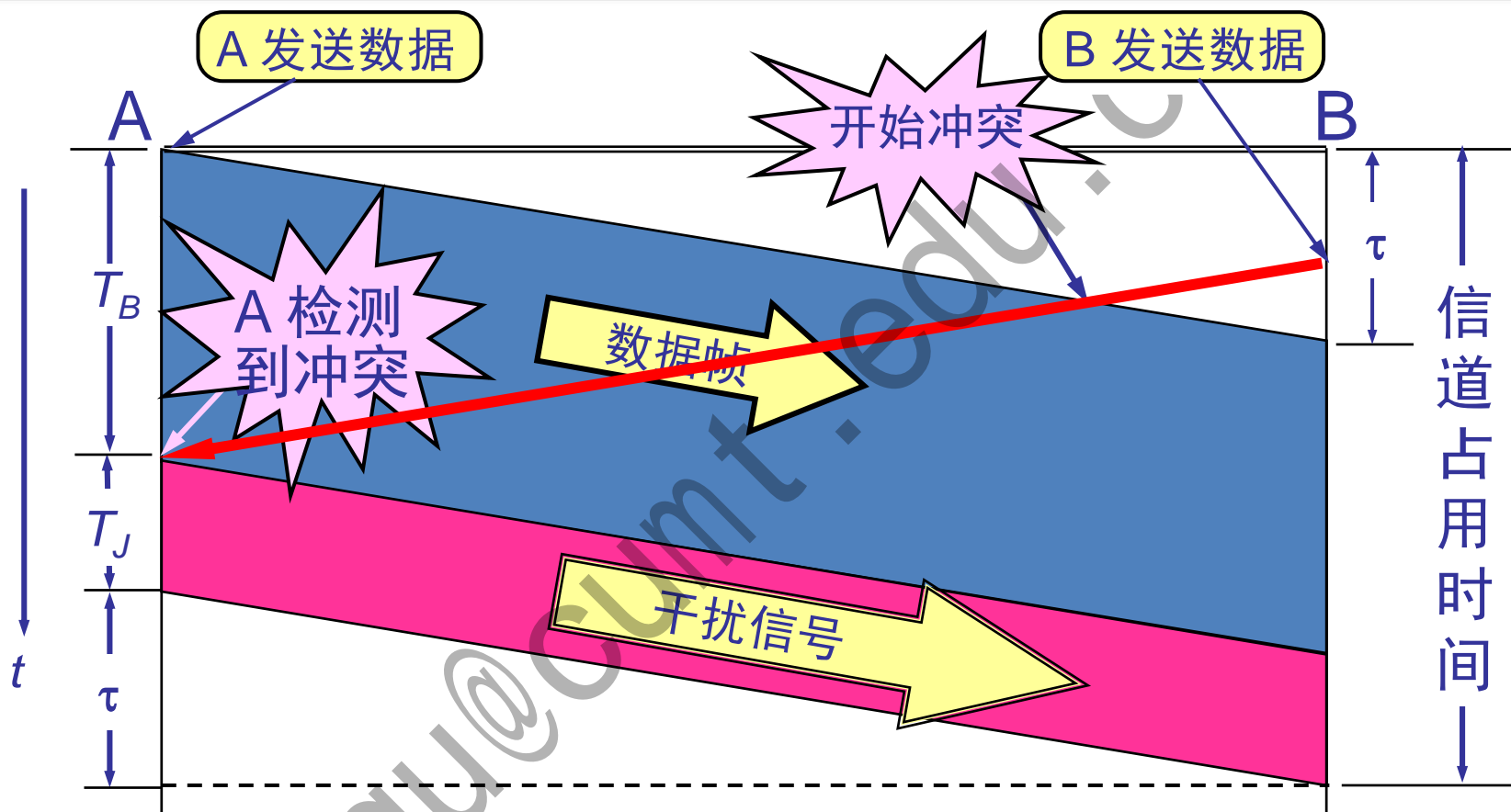
## Q16: 为什么要强化碰撞 ?

- 当发送数据的站一旦发现发生了碰撞时：
  - 立即停止发送数据；
  - 再继续发送32比特或48比特的人为干扰信号(jamming signal)，以便让所有用户都知道现在已经发生了碰撞。
  - 人为干扰信号比正常数据信号的振幅更大、频率更高，从而能够让其它站点更容易发现碰撞的发生，而不需要等待多个正常数据信号发生叠加后才能侦听出发生冲突。





# 人为干扰信号

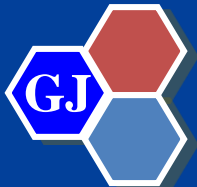




## Q17: CSMA/CD协议的要点?

- (1)准备发送：适配器从网络层获得一个分组，加上以太网的首部和尾部，组成以太网帧，放入适配器的缓存中。
  - 以太网每发送完一帧，一定要把已发送的帧暂时保留一下。如果在争用期内检测出发生了碰撞，那么还要在推迟一段时间后再把这个暂时保留的帧重传一次。





- (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)在发送过程中仍不停地检测信道，及网络适配器要边发送边监听。

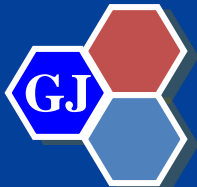




- 两种可能性:

- (3-1) 一是发送成功: 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), 准备发送新的以太网帧。
- (3-2) 二是发送失败: 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。若重传16次仍不能成功, 则停止重传而向上报错。



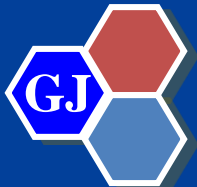


## Q18: 以太网的信道利用率 ?

- 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。
- 据统计，当以太网的**利用率达到30%**时，就已经处于重载状态。因此，很多的网络容量是被网上的碰撞消耗掉的。

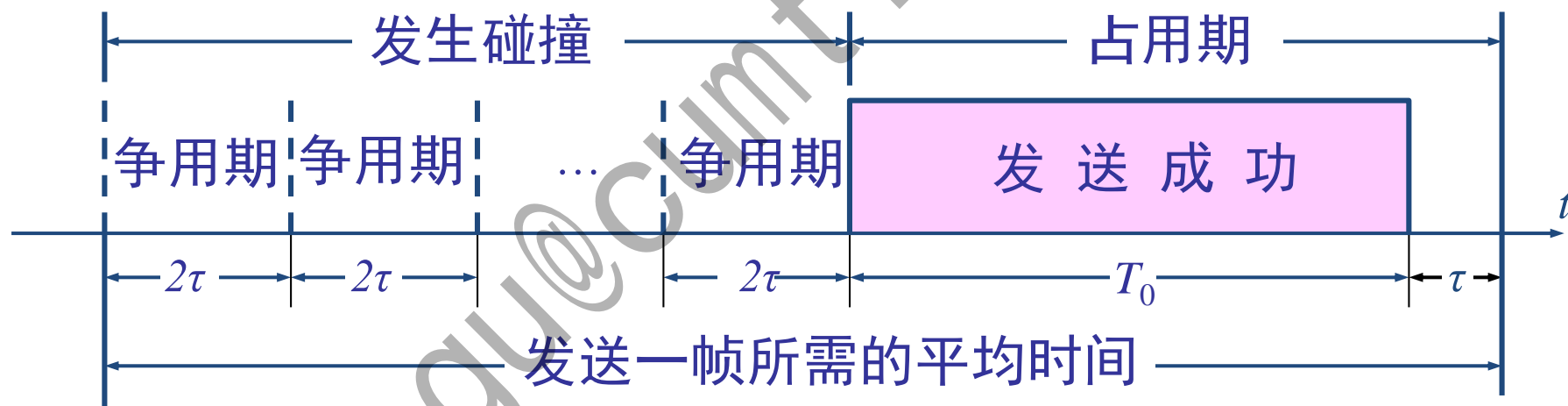






## 发送一帧所需的平均时间

- 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  $\tau$  让最后一个比特完成传输，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。



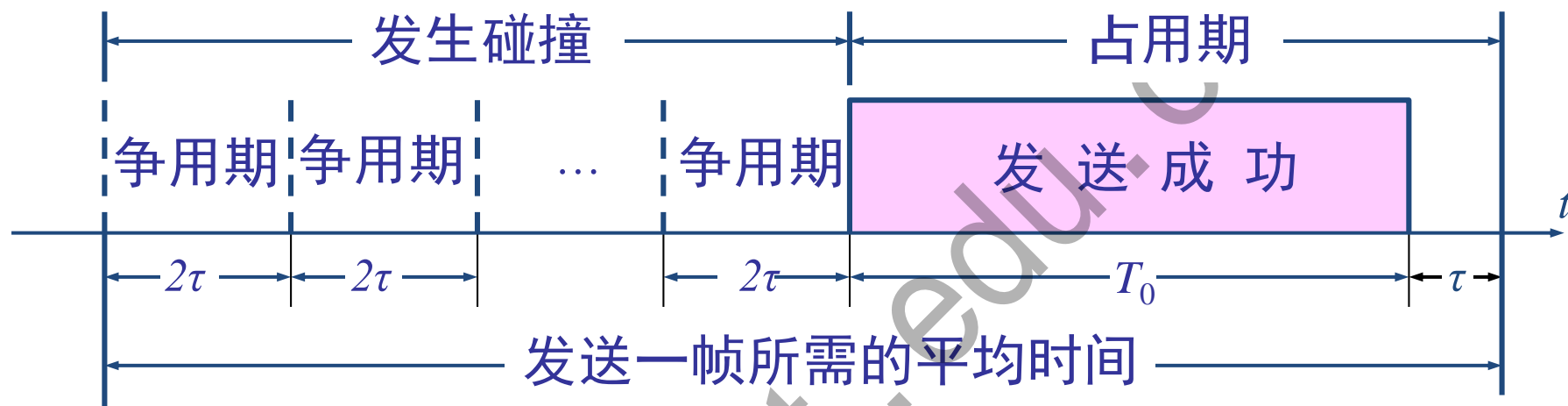
$\tau$  是单程端到端时延

$T_0 = L/C$ ，帧长为  $L$  (bit)，数据发送速率为  $C$  (b/s)





## 参数 $a$



- 在以太网中定义了参数  $a$  评估信道利用率，它是以太网单程端到端时延  $\tau$  与帧的发送时间  $T_0$  之比：

$a$  值越小，表示  $\tau$  相对于  $T_0$  在发送一帧所需的平均时间中占比就越高，那么成功发送帧的时间就越多，信道就越繁忙，信道利用率也就越高。

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





## 参数 $a$

分母应大些——  
以太网的帧长不能太短，否则  $\tau_0$  的值会太小，使  $a$  值太大。

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

分子应小些——  
当数据率一定时，以太网连线的长度受到限制，不能太长，否则  $\tau$  的值会太大。

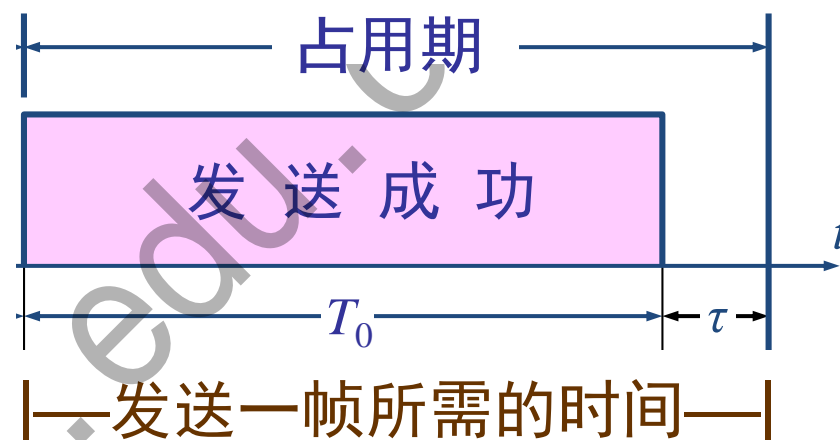
- $a \rightarrow 0$  表示一发生碰撞就立即可以检测出来，并立即停止发送，因而信道利用率很高。
- $a$  越大，表明争用期所占的比例增大，每发生一次碰撞就浪费许多信道资源，使得信道利用率明显降低。

要提高以太网的信道利用率，就必须减小  $\tau$  与  $T_0$  之比





# 信道利用率的最大值 $S_{\max}$



- 在理想化情况下，假定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），并且能够非常有效地利用网络的传输资源，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  $T_0$ 。





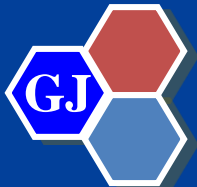
# 信道利用率的最大值 $S_{\max}$

- 理想情况下的极限信道利用率  $S_{\max}$ :

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

- 当参数  $a$  远小于 1 才能得到尽可能高的极限信道利用率。
- 反之，若参数  $a$  远大于 1，则极限信道利用率就远小于 1，而这时实际的信道利用率就更小了。





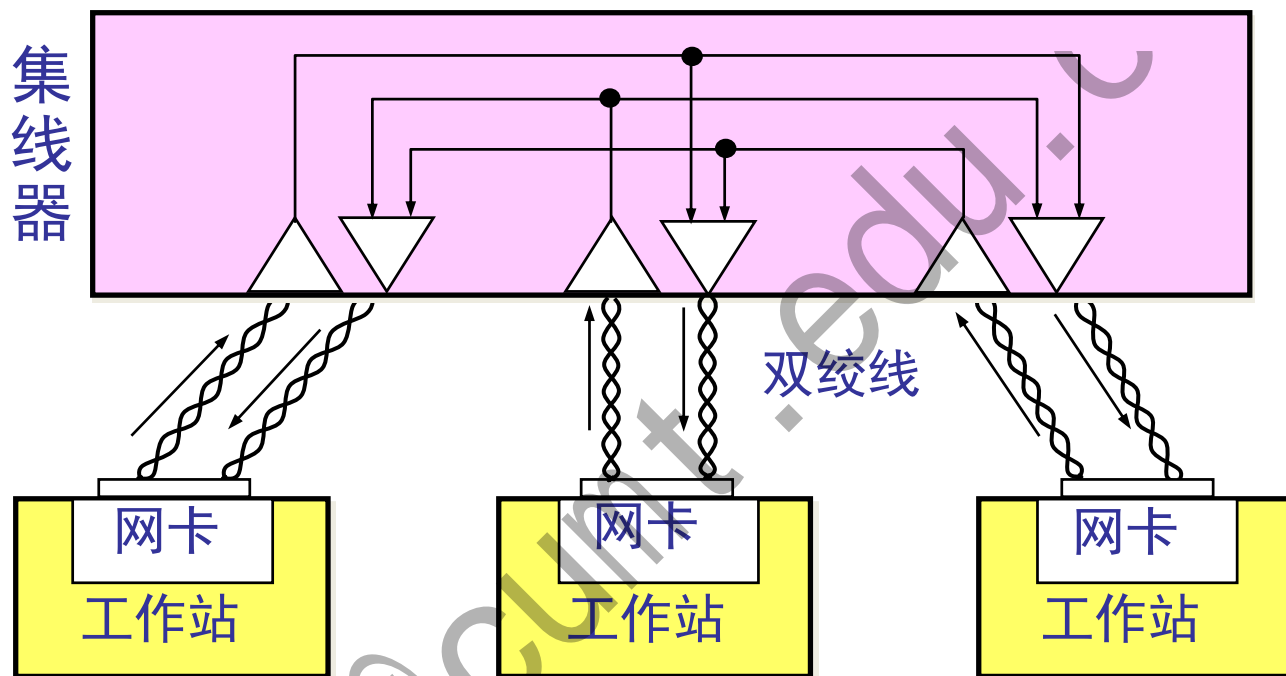
## Q19: 星形拓扑的以太网 ?

- 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)。





# 集线器工作在物理层



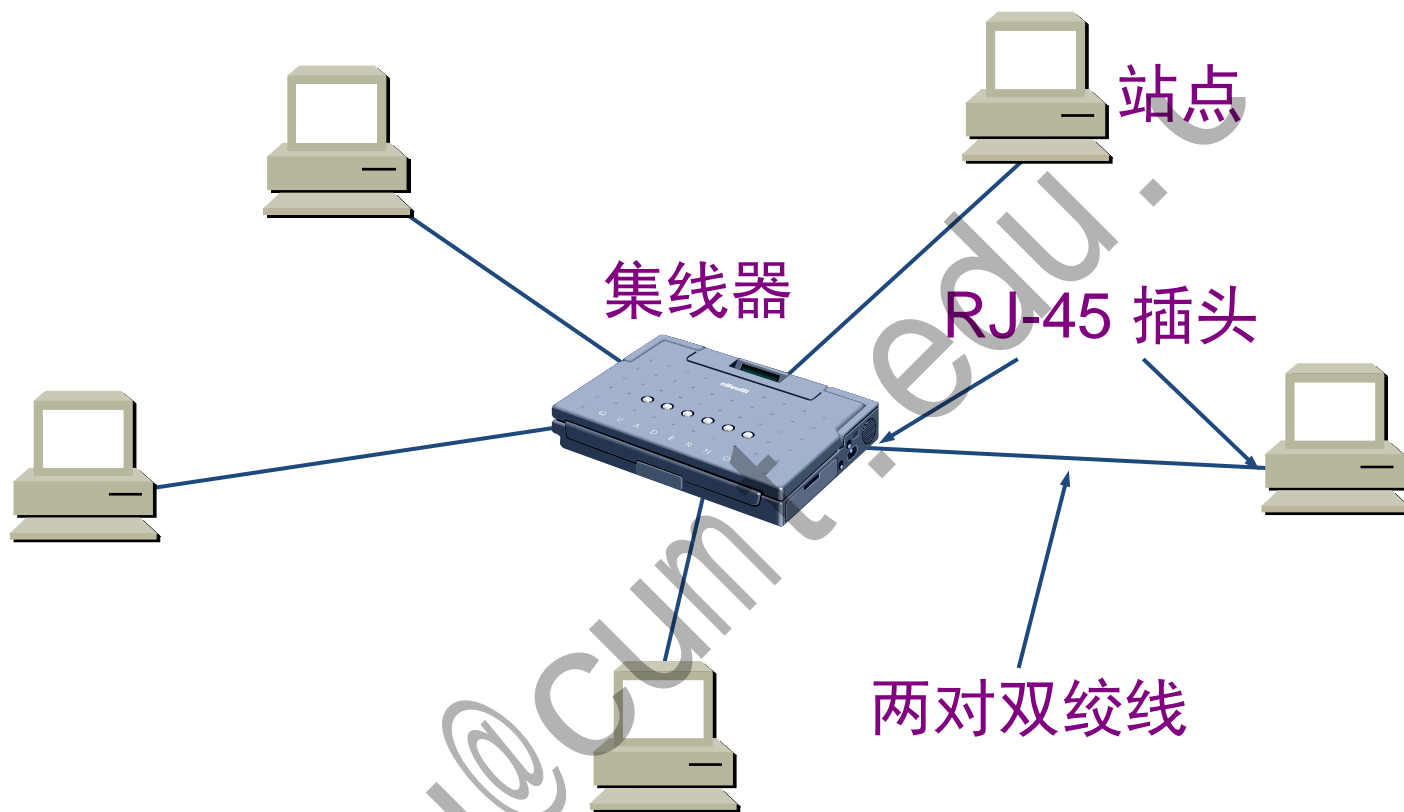
集线器很像一个多接口的转发器，工作在物理层。

- 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。





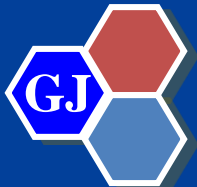
# 使用集线器的共享式以太网



使用集线器的共享式以太网在物理上是一个星形网，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。

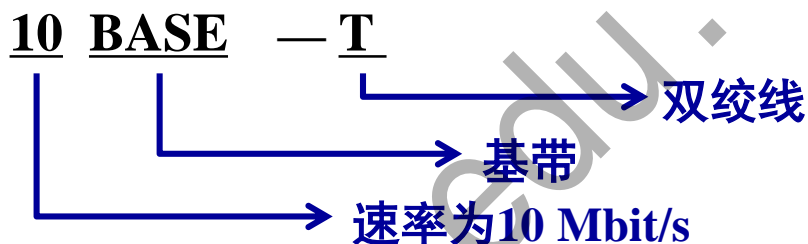






# 星形以太网 10BASE-T

- 1990年 IEEE 制定出星形以太网 10BASE-T 的标准 802.3i。



- 使用无屏蔽双绞线，采用星形拓扑，既降低了成本，又提高了可靠性，具有很高的性价比。
- 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 100 m。





## Q20: 如何在物理层扩展以太网 ?

- 使用光纤扩展

- 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。
- 很容易使主机和几公里以外的集线器相连接。



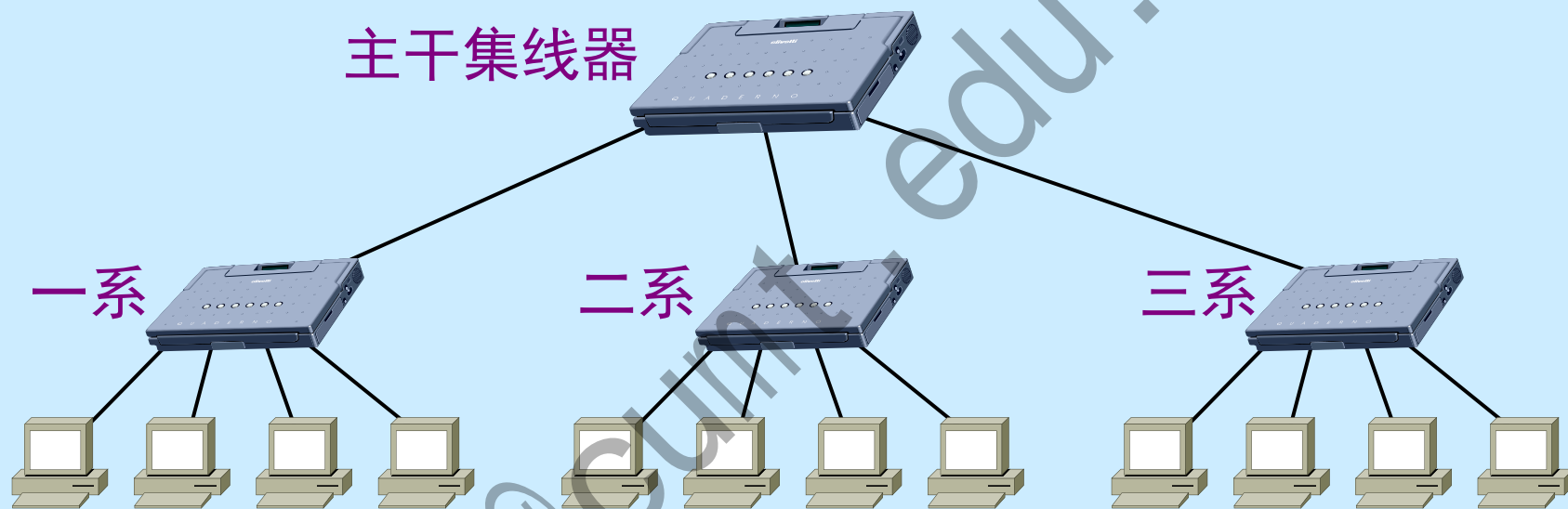
主机使用光纤和一对光纤调制解调器连接到集线器





# 用多个集线器可连成更大的局域网

- 使用集线器扩展



扩大了局域网覆盖的地理范围

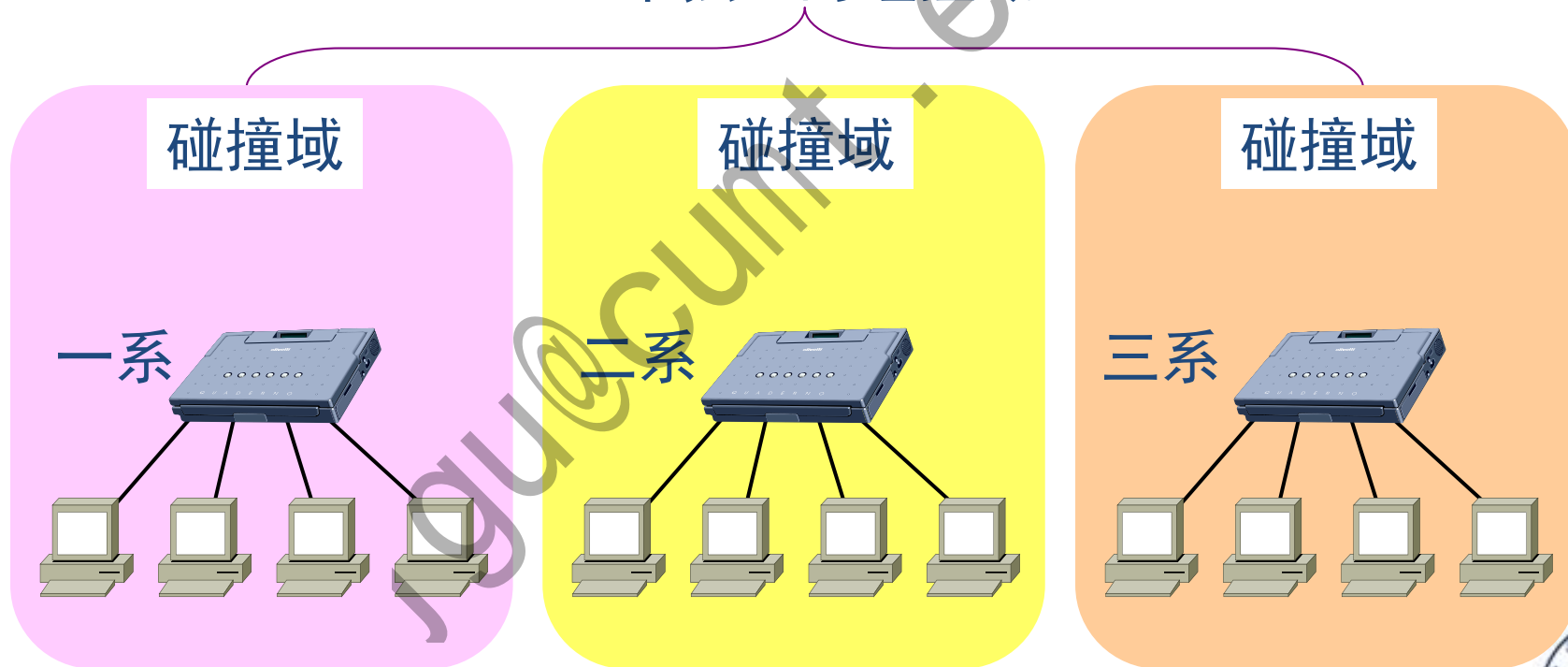




# 用集线器扩展以太网的不足

某大学有三个系，各自有一个局域网

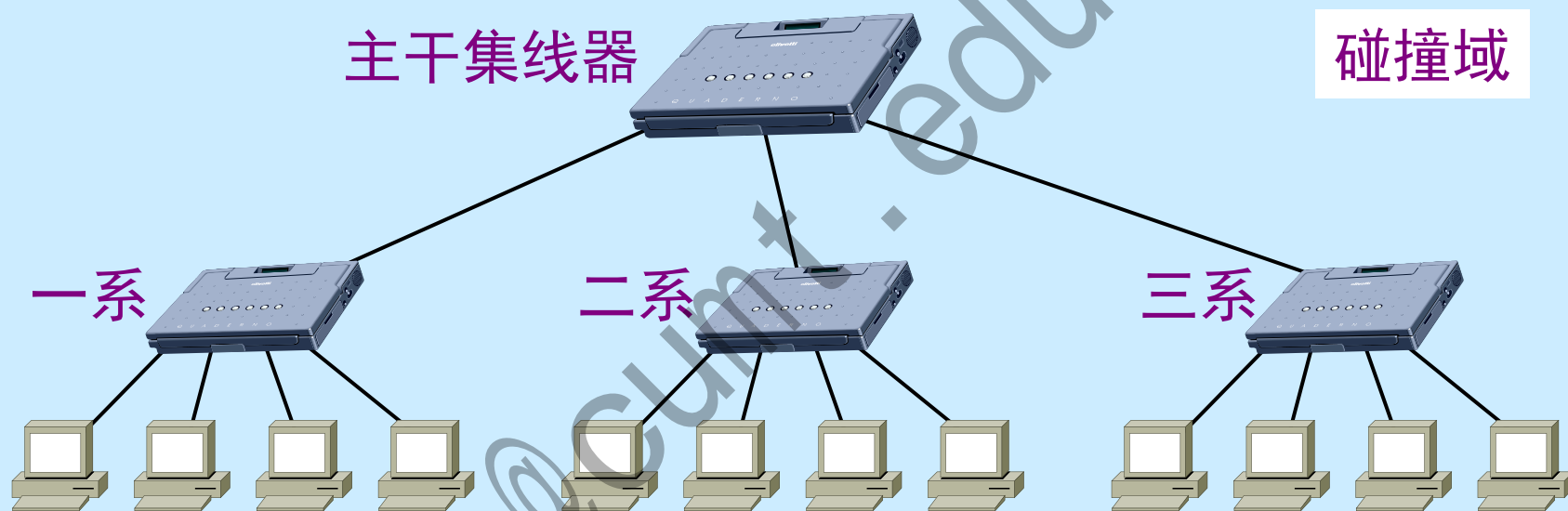
三个独立的碰撞域





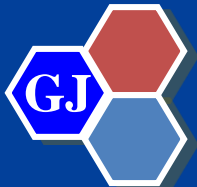
# 用集线器组成更大的局域网 都在一个碰撞域中

一个更大的碰撞域



增大了局域网中发生碰撞的概率



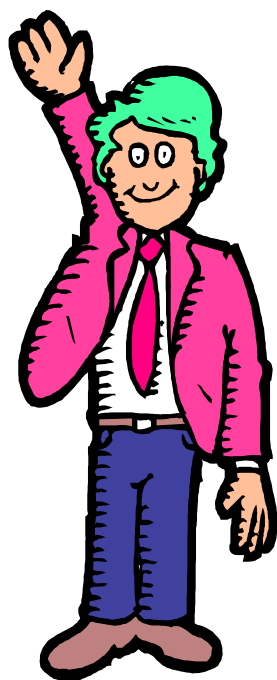


# 用集线器扩展以太网的优缺点

- 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。

结论：不能只从物理信号上下手，还必须从**数据帧**入手，在**数据链路层**做文章，增强网络互连设备对通信过程的控制能力。





**THANK  
YOU!**

