



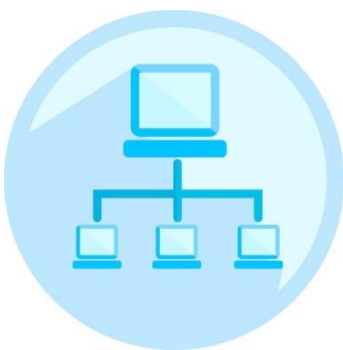
# 计算机网络



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



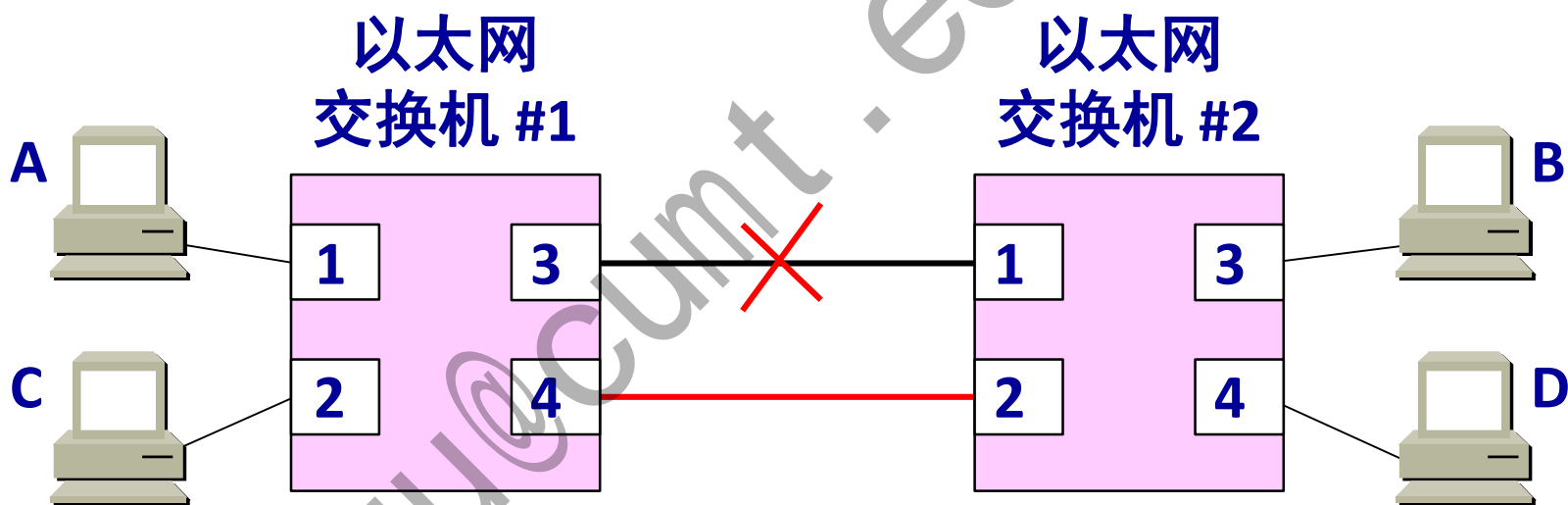
- 应用层(application layer)
- 运输层(transport layer)
- 网络层(network layer)
- 数据链路层(data link layer)
- 物理层(physical layer)





## Q30: 交换机的冗余链路方案?

- 网络中的单点故障会导致网络的无法访问。
- 使用备份连接，即冗余链路，可以提高网络的健全性、稳定性。



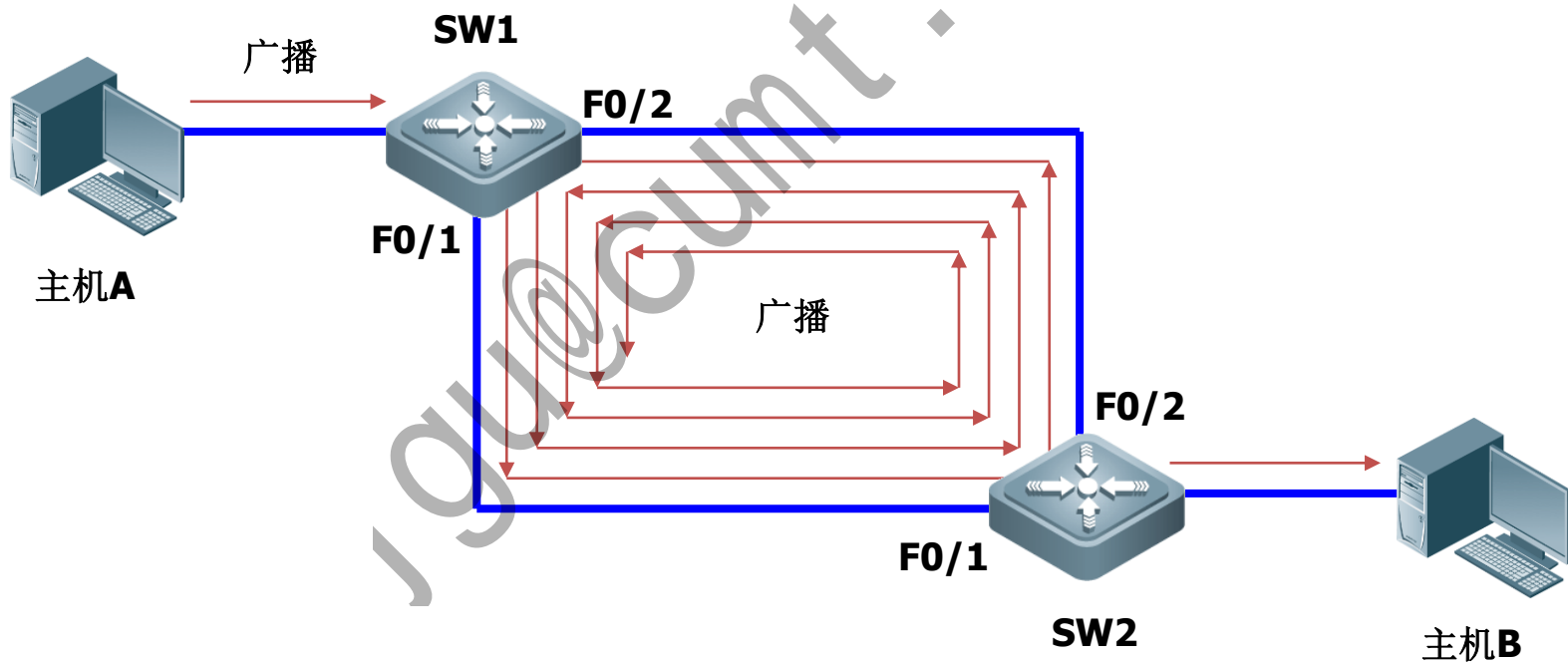
冗余拓扑带来的问题：广播风暴、多帧复制、  
MAC地址表抖动





# (1) 广播风暴

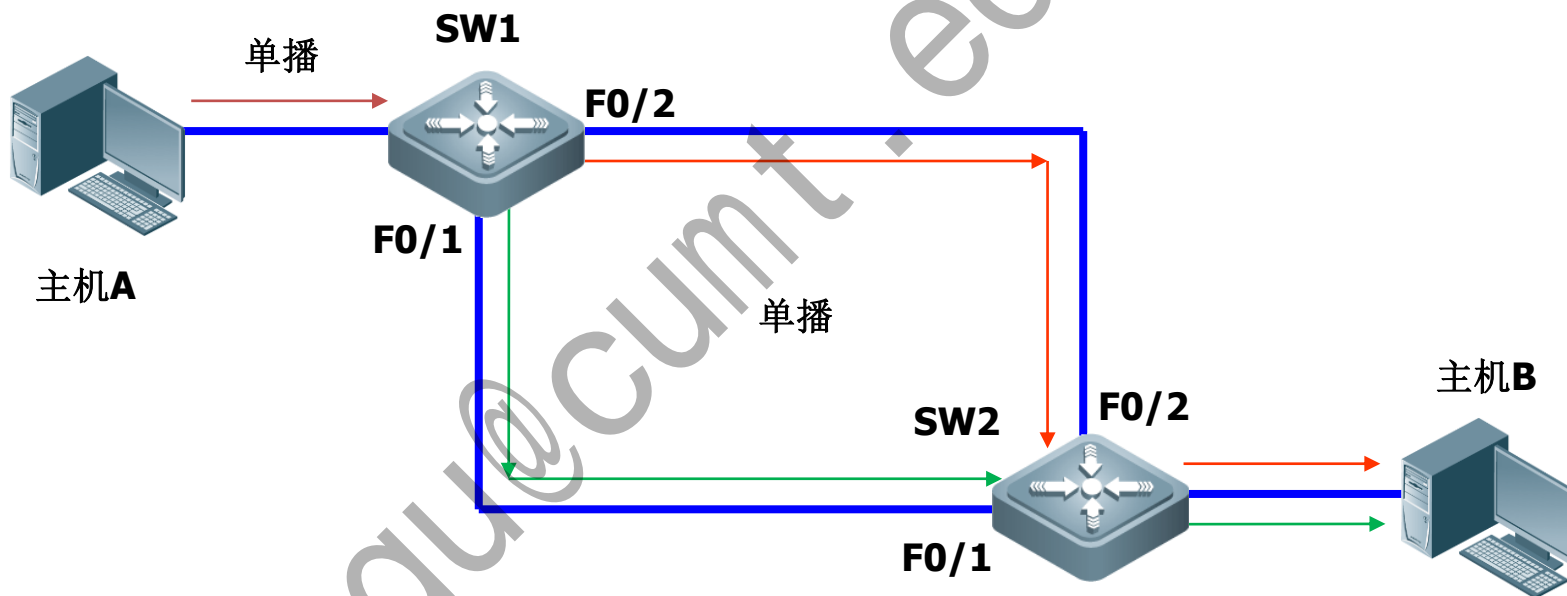
- 2层环路会导致广播在网络中不停地转发，形成**广播风暴**。
- 会瞬间耗尽交换机所有处理能力，使交换机无法转发其它数据。





## (2) 多帧复制

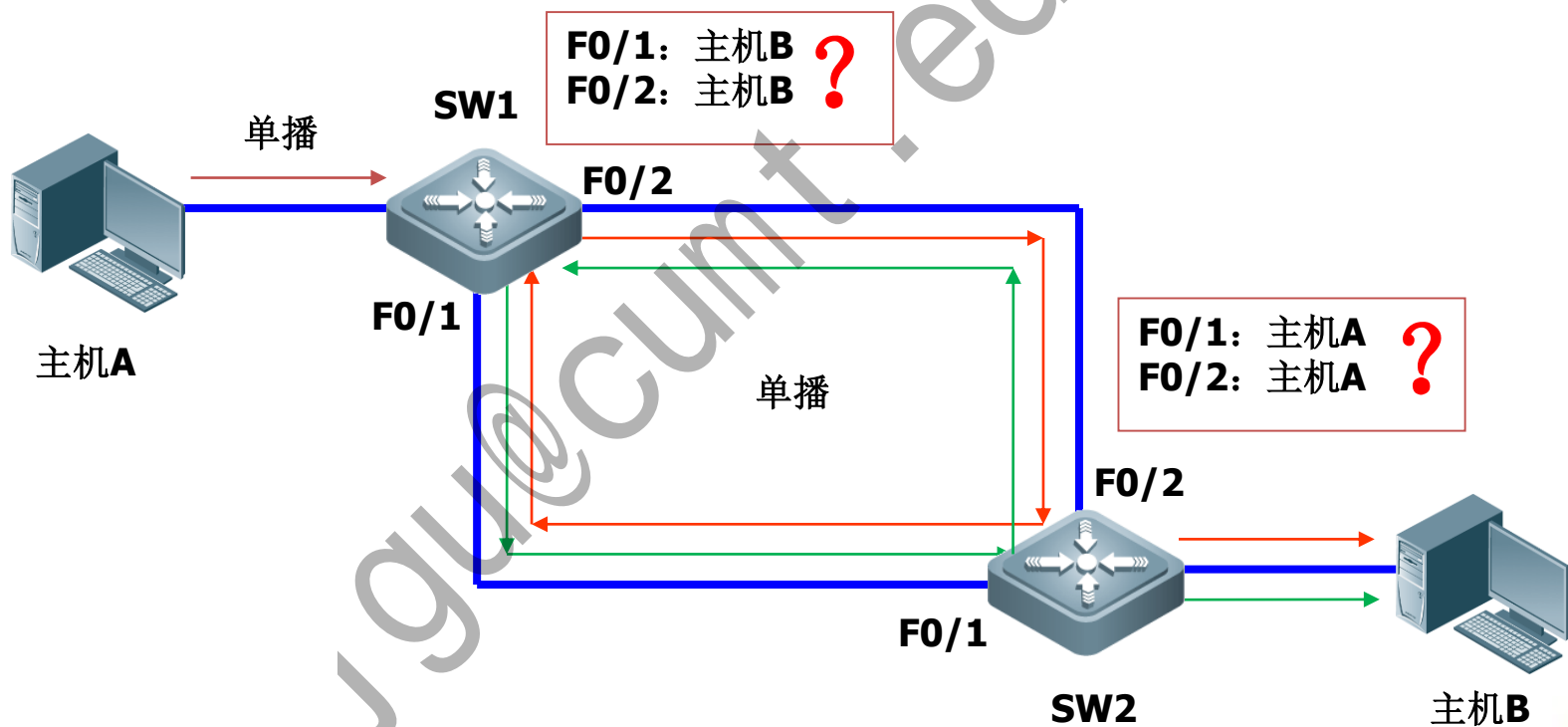
- 2层环路会导致目标节点收到多个相同的数据帧。从而既浪费节点的处理能力又浪费网络带宽。





### (3) MAC地址表抖动

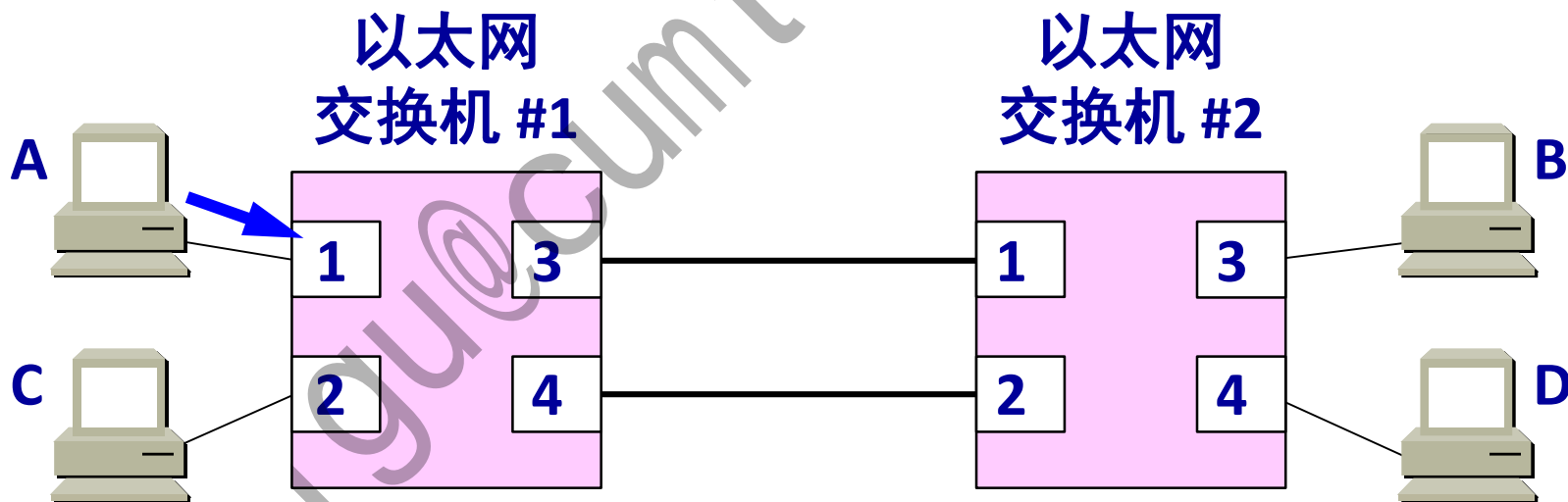
- 交换机上的 MAC地址表不稳定，导致交换机在 MAC地址表学习上浪费更多资源。





# 原因分析

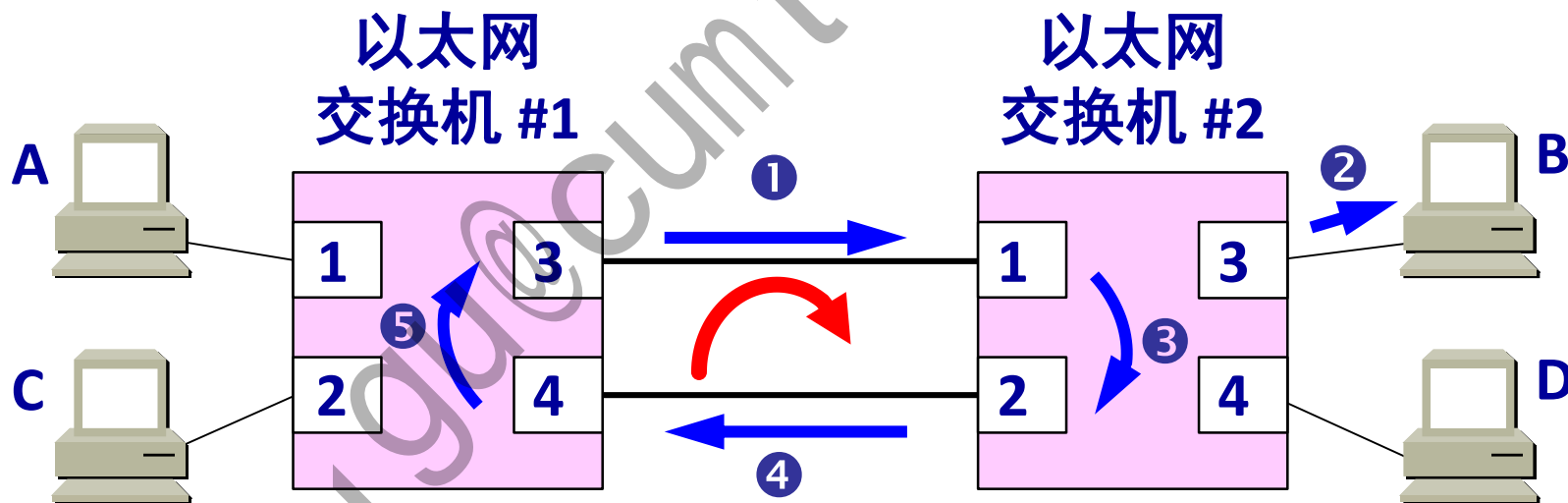
- 增加冗余链路时，**自学习**的过程就可能导致以太网帧在网络的某个环路中无限制地兜圈子。
- 如图，假定开始时，交换机 #1 和 #2 的交换表都是空的，主机 A 通过接口交换机 #1 向主机 B 发送一帧。





# 自学习过程会产生环路

- 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







# 交换机使用生成树协议破解环路

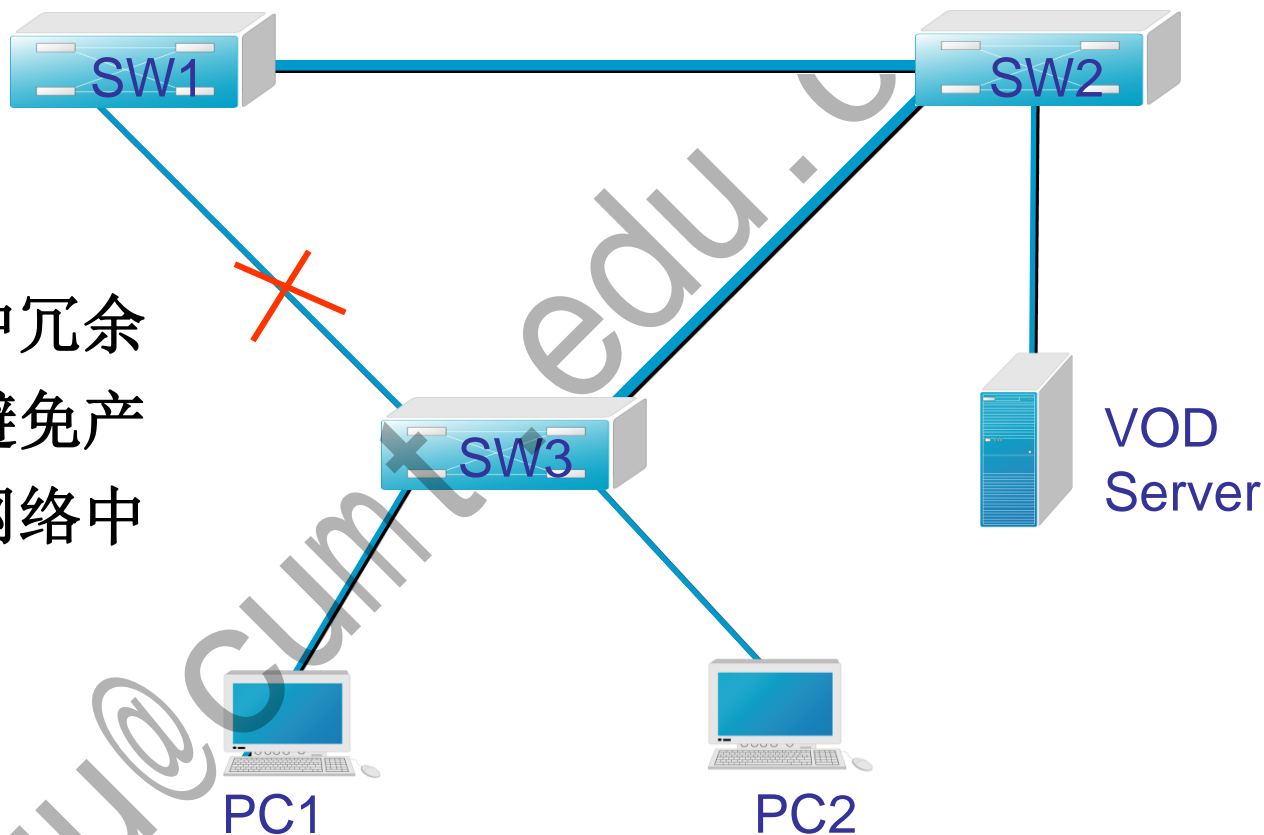
- IEEE 802.1D 标准制定了一个**生成树协议 STP** (Spanning Tree Protocol).
  - 主要作用：避免回路，冗余备份。
- 其要点是：**不改变网络的实际拓扑，但在逻辑上则切断某些链路，使得从一台主机到所有其他主机的路径是无环路的树状结构，从而消除了兜圈子现象。**
- 具体做法：网络中存在备份链路时，只允许主链路激活，如果主链路因故障而被断开后，备用链路才会被打开。





# 解决方法：生成树思想

- 临时关闭网络中冗余的链路，可以避免产生转发的帧在网络中不断地兜圈子。

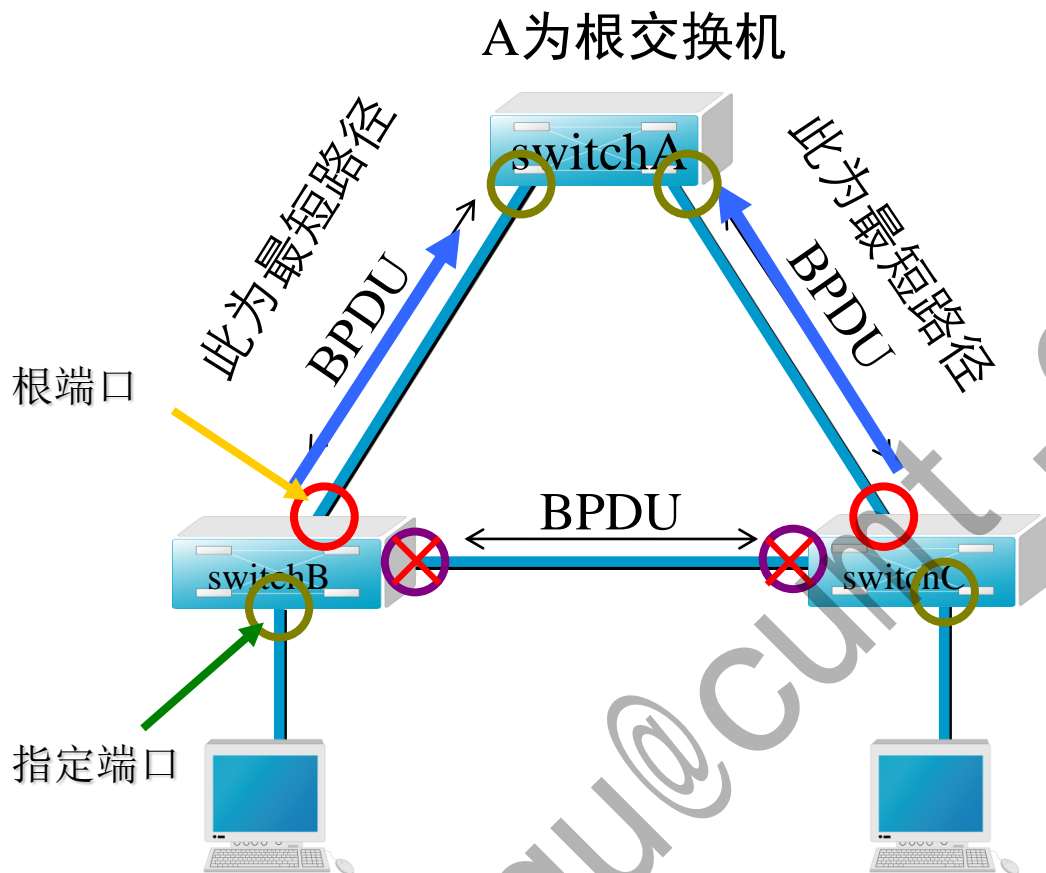


- 主链路出现故障，自动切换到备份链路，保证网络的正常通信。





# 生成树协议的工作过程



网桥协议数据单元 (Bridge Protocol Data Unit) 是一种生成树协议问候数据包, 它以可配置的间隔发出, 用来在网络的网桥间进行信息交换。

- 1、选举根交换机 (RootBridge)
- 2、所有非根交换机选择一条到达根交换机的最短路径
- 3、所有非根交换机产生一个根端口
- 4、每个LAN确定指定端口
- 5、将所有根端口和指定端口设为转发状态
- 6、将其他端口设为阻塞状态

快速生成树协议  
RSTP(Rapid Spanning Tree Protocol): IEEE 802.1w





## Q31: 高速以太网的发展之路(自学)?

- 速率达到或超过 100 Mb/s 的以太网称为**高速以太网**，依然使用802.3帧格式。
- 高速以太网类型
  - 快速以太网(100Mb/s, 802.3u标准)
  - 吉比特以太网(1000Mb/s, 802.3z标准)
  - 10 吉比特以太网(万兆以太网)
  - 40 吉比特以太网
  - 100 吉比特以太网





# 与提高带宽相关的因素

极限信息传输速率  $C$  { 奈氏准则:  $C = 2 * W * \log_2 N$   
香农公式:  $C = W \log_2(1 + S/N)$  b/s



100BASE-T以太网



千兆以太网



万兆以太网

传输媒介 质量更好的双绞线, 光纤

CSMA/CD 最好不用, 全双工通信

同步技术 自同步, 同步以太网(SyncE)

电缆长度 缩小传播时延 vs. 扩大覆盖范围

帧间间隔 减少链路的空闲时间

编码技术 提高效率 (曼切斯特编码、差分曼切斯特编码、4B/5B、8B/10B、64B/66B)





# 标准以太网

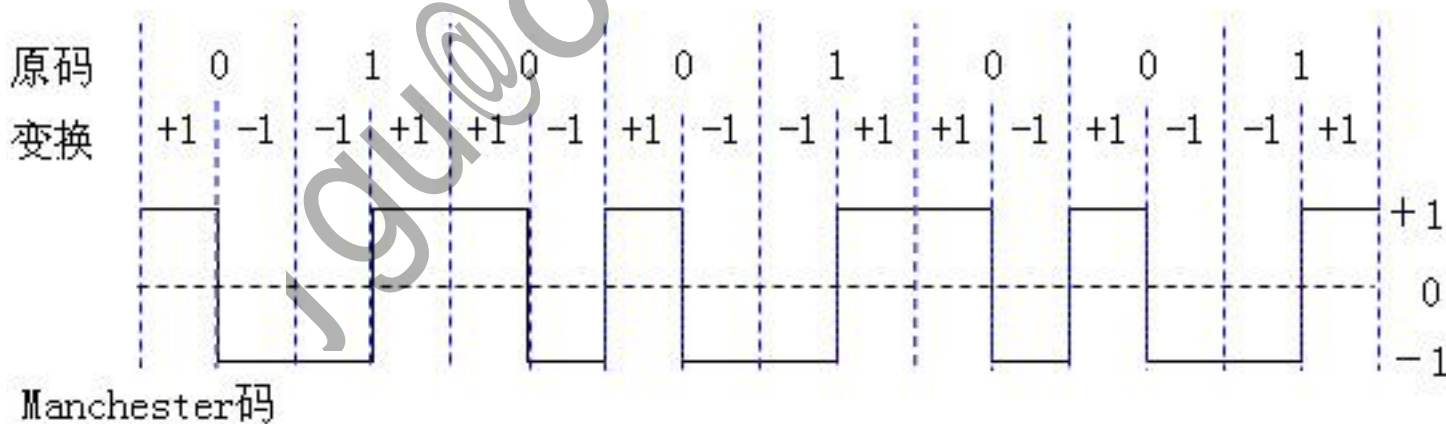
- 10Mbps的带宽，遵循IEEE 802.3标准
- 使用CSMA / CD（带有碰撞检测的载波侦听多路访问）的访问控制方法，帧间最小间隔为 $9.6 \mu\text{s}$ ，相当于96比特时间
- 两种传输介质：双绞线和同轴电缆。
  - ▣ 10Base-5 使用粗同轴电缆，最大网段长度为500m，基带传输方法；
  - ▣ 10Base-2 使用细同轴电缆，最大网段长度为185m，基带传输方法；
  - ▣ 10Base-T 使用双绞线电缆，最大网段长度为100m；
  - ▣ 1Base-5 使用双绞线电缆，最大网段长度为500m，传输速度为1Mbps；
  - ▣ 10Broad-36 使用同轴电缆（RG-59 / U CATV），最大网段长度为3600m，是一种宽带传输方式；
  - ▣ 10Base-F 使用光纤传输介质，传输速率为10Mbps；





# 曼切斯特编码

- 曼切斯特（**Manchester**）编码可以保证线路中码流有充分的跳变，因为它是在用电平从“-1”到“+1”的跳变来表示“1”，用电平从“+1”到“-1”的跳变来表示“0”，**自带同步信号**。
- 但是这种编码方式用2bit表示1bit的数据，效率太低，只有**50%**。虽然线路的有效带宽只有10Mbps，但实际带宽却是20Mbps。





# 快速以太网

- 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)，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。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64字节不变，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  $0.96 \mu\text{s}$ 。

$$a = \frac{\tau}{T_0} = \frac{\tau}{L/C} = \frac{\tau C}{L}$$





# 快速以太网物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
100BASE-TX	双绞线	100 m	2 对 UTP 5 类线或屏蔽双绞线 STP，分别用于发送和接收数据，支持全双工
100BASE-FX	光纤	150m、412m、2000m或更长至10km，与所使用的光纤类型和工作模式有关	多模光纤连接的最大距离为550米，单模光纤连接的最大距离为3000米，支持全双工
100BASE-T4	双绞线	100 m	4 对 UTP 3 类线或 5 类线(3对发送数据，1对检测冲突)





# 100 Mb/s 以太网的三种不同物理层标准

- 100BASE-TX

- 使用 2 对 UTP 5 类线或屏蔽双绞线 STP，一对用于发送，一对用于接收数据。
- 在传输中使用4B/5B和MLT-3编码方式，发送码流先进行4B/5B编码，再进行MLT-3编码，最后再上线路传输。
- 信号频率为125MHz。
- 网段最大长度：100米。
- 支持全双工的数据传输。





# 100 Mb/s 以太网的三种不同物理层标准

- 100BASE-FX

- 使用 2 对光纤，纤维直径 $62.5/125\mu\text{m}$ 。
- 在传输中使用**4B/5B**和**NRZI**编码方式，信号频率为125MHz。
- 多模光纤连接的最大距离为550米，单模光纤连接的最大距离为3000米。
- 网段最大长度：150m、412m、2000m或更长至10km，与所使用的光纤类型和工作模式有关。
- 支持全双工的数据传输。
- 特别适合于有电气干扰的环境、较大距离连接、或高保密环境等情况。





# 100 Mb/s 以太网的三种不同物理层标准

- 100BASE-T4

- 使用 4 对 UTP 3 类线或 5 类线

- ✓ 站点发送使用三对线(1/2、4/5、7/8)来发送数据，使用一对线(3/6)来检测冲突；

- ✓ 站点接收数据时，使用三对线(3/6、7/8、4/5)接收数据。

- ✓ 每一对线的数据传送速率为1000/3 Mb/s，均工作于半双工模式。

- 在传输中使用8B/6T编码方式（8比特被映射为6个三进制位），信号频率为25MHz，符合EIA586结构化布线标准。

- 网段最大长度：100米。





## 4B/5B编码

- 4B/5B编码用5bit的二进制数来表示4bit二进制数，编码的效率是80%。
- 5bit码共有32种组合，但只采用其中的16种对应4bit码的16种，其他的16种或者未用或者用作控制码，以表示帧的开始和结束、光纤线路的状态（静止、空闲、暂停）等。
- 如何从32种组合中选取16种就需要满足两个规则：
  - 1) 每个5比特码组中不含多于3个“0”
  - 2) 或者5比特码组中包含不少于2个“1”
- 此规则是怎么来的？这就要从MLT-3码的特点来解释了





# MLT-3编码

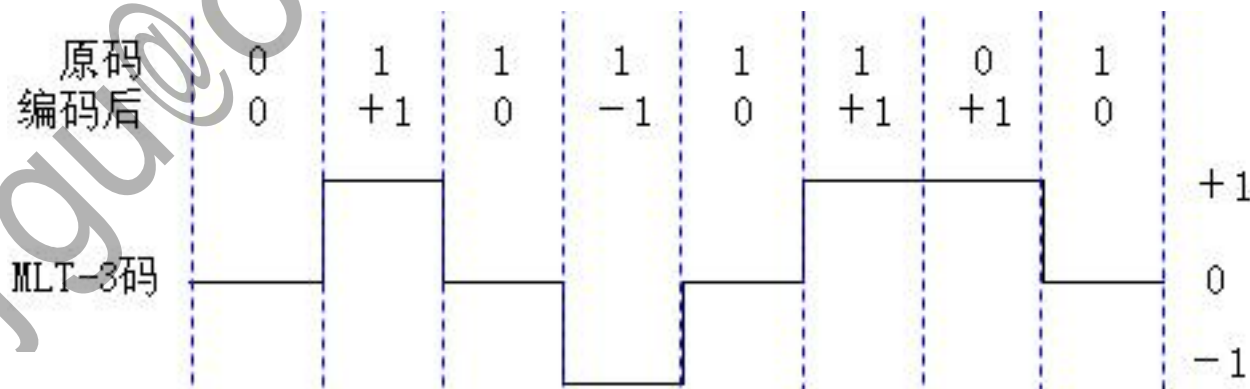
- **MLT-3码**(Multi-Level Transmit -3, 多电平传输码)的特点简单的说就是：逢“1”跳变，逢“0”不跳变。
- 为了让4B/5B编码后的码流中有足够多的跳变就需要编码后的码流中有尽量多的“1”和尽量少的“0”。





# MLT-3编码

- MLT-3是双极性码，有-1、0、1三种电平。
  - 1) 如果下一输入为“0”，则电平保持不变；
  - 2) 如果下一输入为“1”，则产生跳变，此时又分两种情况：
    - ✓(a) 如果前一输出是“+1”或“-1”，则下一输出为“0”；
    - ✓(b) 如果前一输出非“0”，其信号极性和最近一个非“0”相反。

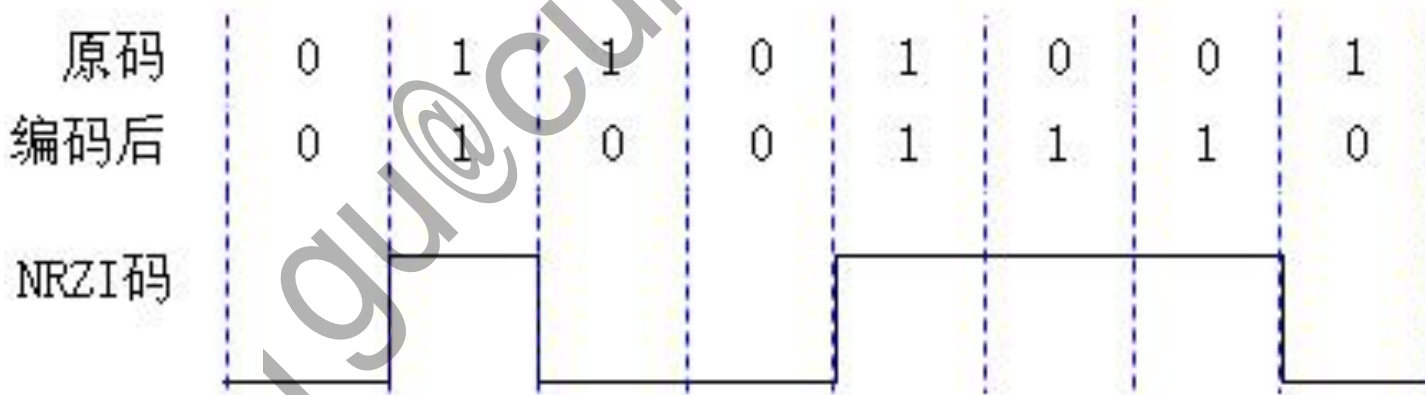






# NRZI编码

- NRZI即Non-Return to Zero Inverted, 非归零反转码, 编码不改变信号速率。
  - 1) 如果下一个输入二进制位是“1”, 则下一个编码后的电平是当前电平跳变后的电平;
  - 2) 如果下一个输入二进制位是“0”, 则编码后的电平与当前保持一致。





# 吉比特以太网

- 使用 802.3 协议规定的帧格式。
- 允许在 1 Gb/s 下全双工和半双工两种方式工作。
  - 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。

**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 $\mu\text{m}$ )
1000BASE-LX	光缆	5000 m	单模光纤 (10 $\mu\text{m}$ ) 多模光纤 (50和62.5 $\mu\text{m}$ )
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

- 吉比特以太网工作在半双工方式时，就必须进行碰撞检测。
- 在数据传输率提高的情况下，为了保持64字节最小帧长度，以及100米的网段最大长度，吉比特以太网增加了两个功能：
  - 载波延伸
  - 分组突发

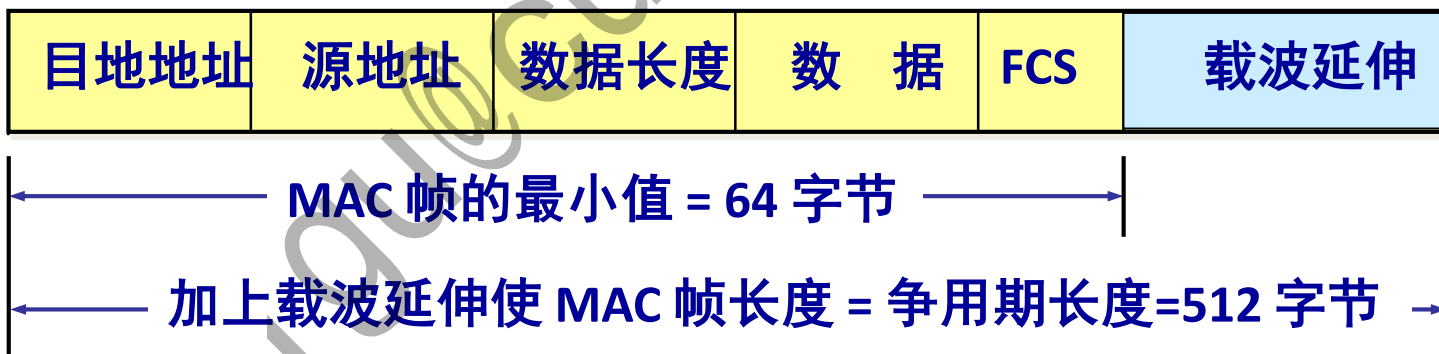
$$a = \frac{\tau}{T_0} = \frac{\tau}{L/C} = \frac{\tau C}{L}$$





# 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。



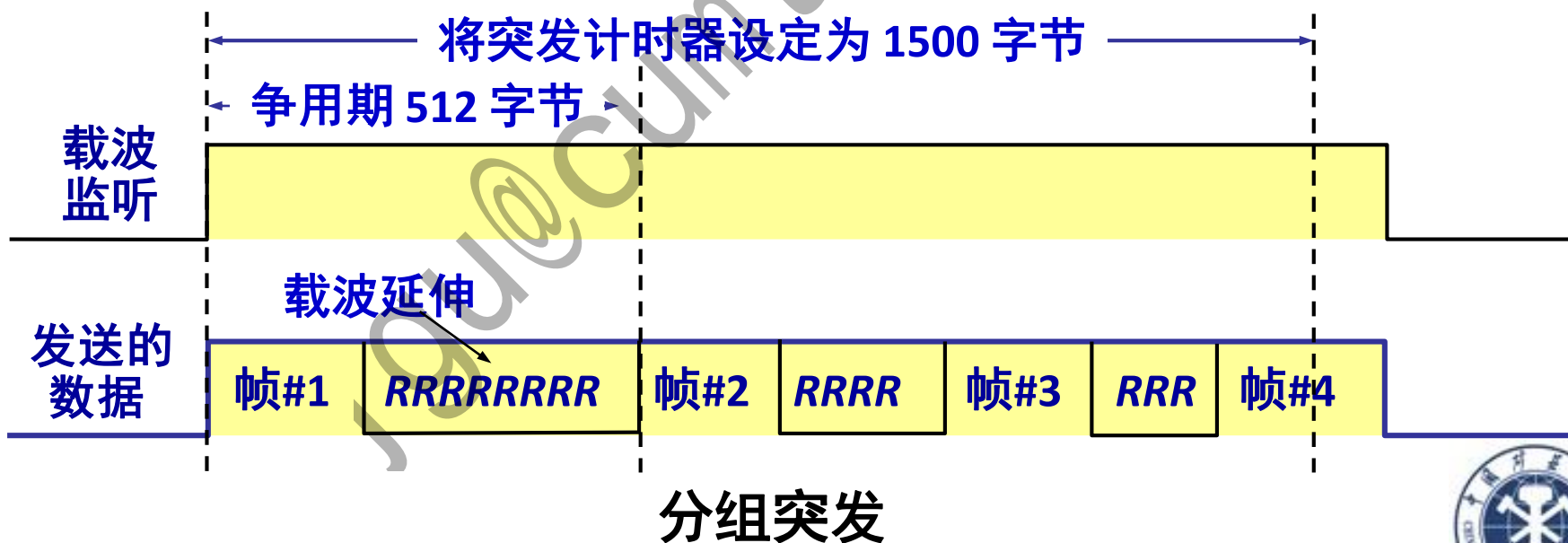
载波延伸





# 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。这样就形成一串分组的突发，直到达到 1500 字节或稍多一些为止。





# 全双工方式

- 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。





# 千兆以太网的技术标准

- 千兆以太网技术有两个标准：
  - IEEE802.3z工作组负责制定光纤（单模或多模）和同轴电缆的全双工链路标准，制定了光纤和短程铜线连接方案的标准。
  - IEEE802.3ab工作组负责制定基于UTP的半双工链路的千兆以太网标准，产生IEEE802.3ab标准及协议，制定了五类双绞线上较长距离连接方案的标准。







# IEEE802.3z标准

- IEEE802.3z定义了基于光纤和短距离铜缆的1000Base-X，采用8B/10B编码技术，信道传输速度为1.25Gbit/s，去耦后实现1000Mbit/s传输速度。
  - 1000Base-SX 只支持多模光纤，可以采用直径为62.5um或50um的多模光纤，工作波长为770-860nm，传输距离为220-550m。
  - 1000Base-LX 多模光纤：可以采用直径为62.5um或50um的多模光纤，工作波长范围为1270-1355nm，传输距离为550m。
  - 1000Base-LX单模光纤：可以支持直径为9um或10um的单模光纤，工作波长范围为1270-1355nm，传输距离为5km左右。
  - 1000Base-CX 采用150欧屏蔽双绞线（STP），传输距离为25m。





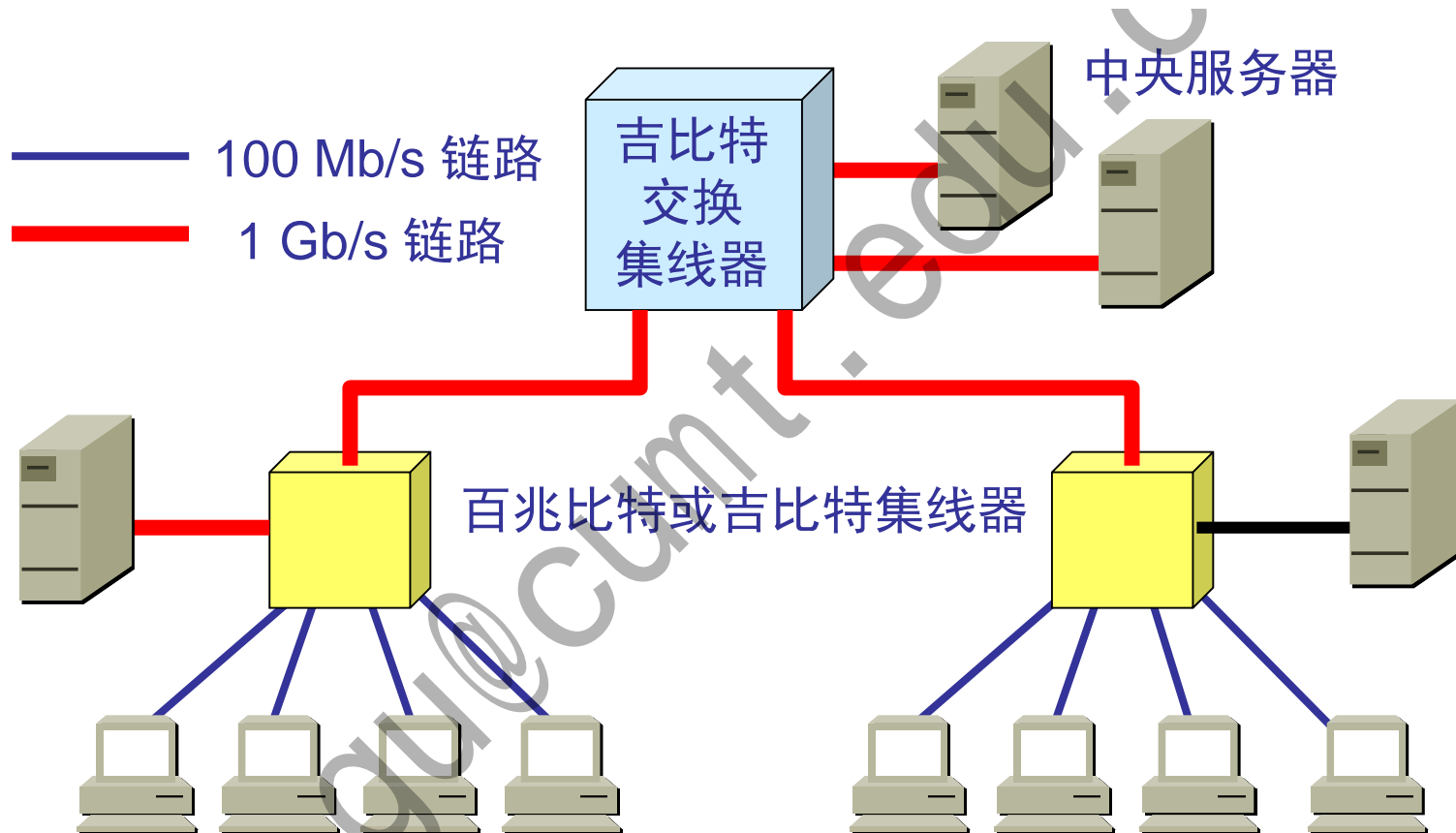
# IEEE802.3ab标准

- IEEE802.3ab定义基于5类UTP的1000Base-T标准，其目的是在5类UTP上以1000Mbit/s速率传输100m。
  - 保护用户在5类UTP布线系统上的投资。
  - 1000Base-T是100Base-T自然扩展，与10Base-T、100Base-T完全兼容。
- 在5类UTP上达到1000Mbit/s的传输速率需要解决5类UTP的串扰和衰减问题，因此IEEE802.3ab工作组的开发任务要比IEEE802.3z复杂些。





# 吉比特以太网的配置举例



1000Base-T





# 千兆以太网编码方法

- 千兆以太网用的是**8B/10B编码**与**NRZ编码**组合方式；
- 直观的理解就是把8bit数据编码成10bit来传输。
- 根本目的是“直流平衡（DC Balance）”。
  - 当高速串行流的逻辑1或逻辑0有多个位没有产生变化时，信号的转换就会因为电压位阶的关系而造成信号错误，直流平衡可以克服以上问题。





## 8B/10B编码

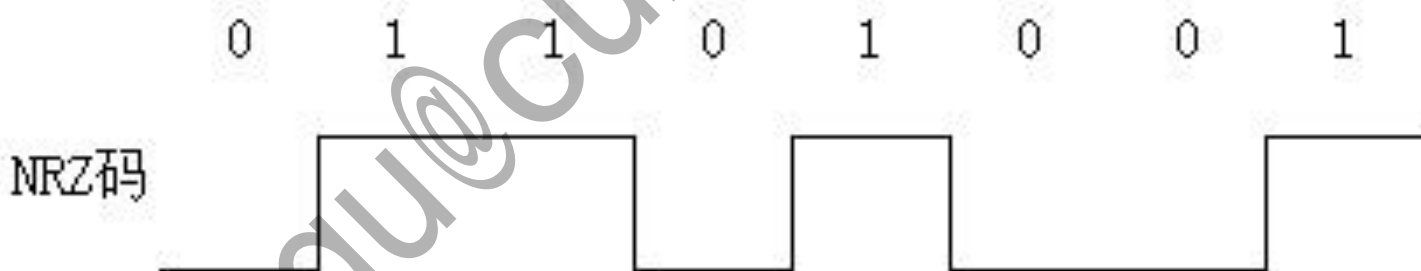
- 8B/10B编码是将一组连续的8位数据分解成两组数据，一组3位，一组5位，经过编码后分别成为一组4位的代码和一组6位的代码，从而组成一组10位的数据发送出去。
- 相反，解码是将1组10位的输入数据经过变换得到8位数据位。
- 8B/10B编码是目前许多高速串行总线采用的编码机制，如 USB3.0、1394b、Serial ATA、PCI Express、Infini-band、Fiber Channel、RapidIO等总线或网络等。





# NRZ编码

- NRZ即Non-Return to Zero Code，非归零码，NRZ是一种很简单的编码方式，用0电位和1电位分别表示二进制的“0”和“1”，编码后速率不变，有很明显的直流成份，不适合电接口传输，但是光接口STM-NO、1000Base-SX、1000Base-LX采用此码型。





# 10 吉比特以太网

- 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：
  - 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。
  - 保留了 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长，便于升级。
  - 不再使用铜线而只使用光纤作为传输媒体。
  - 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	多波多模光纤 (0.85 $\mu\text{m}$ )
10GBASE-LR	光缆	10 km	单模光纤 (1.3 $\mu\text{m}$ )
10GBASE-ER	光缆	40 km	单模光纤 (1.5 $\mu\text{m}$ )
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







# 万兆以太网编码方法

- 万兆以太网PCS（Physical Coding Sublayer，物理编码子层）用的是**64B/66B编码**；
- 它并不是真正的编码，而是一种基于扰码机制编解码方式，是IEEE推荐的10G通信的标准编码方式。
- 优点
  - （1）编码开销小：8B/10B编码的开销约为20%，而64B/66B编码的开销约为3%；
  - （2）码字长。





# 万兆以太网编码方法

- 缺点

- （1）对齐时间长：通过数据流中的有效同步位进行数据块对齐，正确匹配后才进入Lock状态完成定界，然后通过不间断的识别这两位，维持锁定；
- （2）DC不平衡：由于电口传输有一个相关时间常数，在下一位发送之前，高速接口经常不允许全电压摆幅。因此，‘1’或者‘0’数量的连续不均衡会导致差分对眼图中心电位的偏移，会导致接收端电路设计的复杂、增加误码率。
- （3）对发送端扰码器及接收端的解扰码起要求较高。





# 更快的以太网

- ▣ 40GE/100GE（即 40 吉比特以太网和 100 吉比特以太网）
  - 40GE的标准 IEEE 802.3ba-2010, 100 吉比特以太网的标准 802.3bm-2015。
  - 40GE/100GE 只工作在全双工的传输方式（因而不使用 CSMA/CD协议），并仍保持了以太网的帧格式以及 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长。
  - 100GE 在使用单模光纤传输时，仍然可以达到 40 km的传输距离，但这是需要波分复用（使用 4 个波长复用一根光纤，每一个波长的有效传输速率是 25 Gbits/s）





# 40GE/100GE 的物理层

## 40GE/10 GE 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





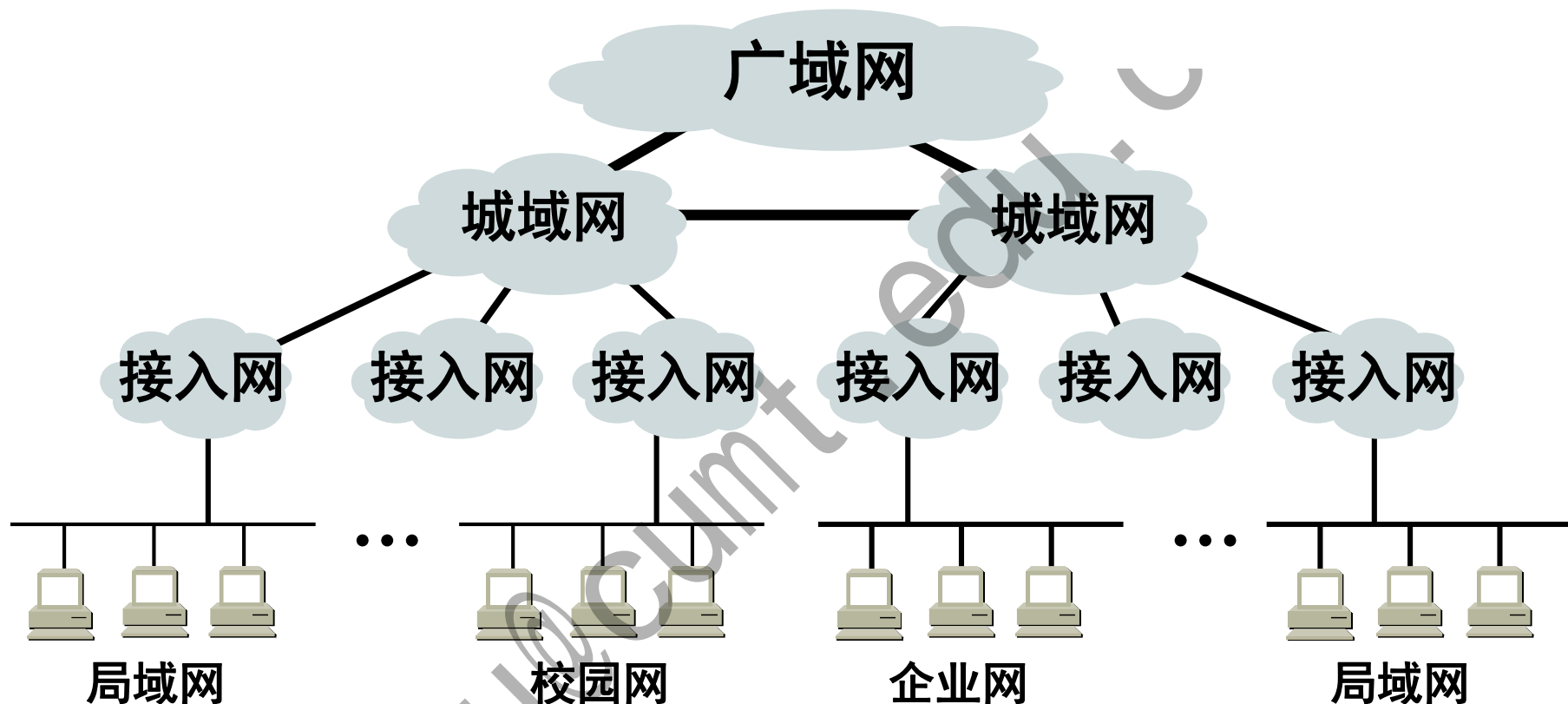
# 为什么以太网能从 10 Mb/s 演进到 100 Gb/s

- 因为以太网有以下优点：
  - 可扩展的（从 10 Mb/s 到 100 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。





# 以太网应用范围不断扩展



- 10 吉比特以太网出现以后，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。

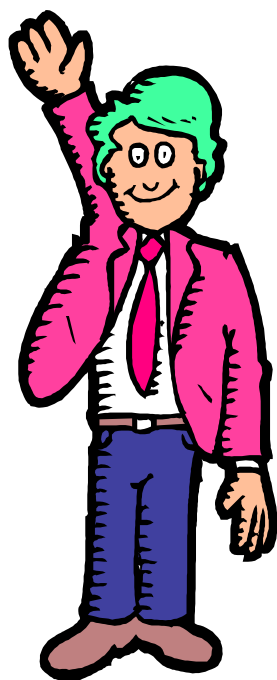




# 端到端的以太网传输

- 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。
- 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。





**THANK  
YOU!**

