



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 《计算机网络》

# 第5章 数据链路层与局域网

詹东阳



# 第5章 数据链路层与局域网

## 本章学习目标

- ❖ 理解数据链路层主要服务
- ❖ 理解链路层寻址及其特点
- ❖ 掌握差错编码原理及典型编码
- ❖ 掌握可靠数据传输基本原理及协议、信道利用率的计算
- ❖ 掌握多路访问控制协议特点
- ❖ 掌握以太网技术、交换机工作原理、VLAN技术等
- ❖ 理解PPP协议
- ❖ 了解链路虚拟化概念及原理

## 主要内容

- ❖ 5.1 数据链路层服务
- ❖ 5.2 差错检测与纠正
- ❖ 5.3 多路访问控制协议
- ❖ 5.4 ARP
- ❖ 5.5 局域网技术
- ❖ 5.6 PPP协议
- ❖ 5.7 链路虚拟化





哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.1 数据链路层服务

詹东阳





# 数据链路层

## 5.1 数据链路层基本服务

- ❖ 向下：利用物理层提供的位流服务
- ❖ 向上：向网络层提供明确的 (well-defined) 服务接口



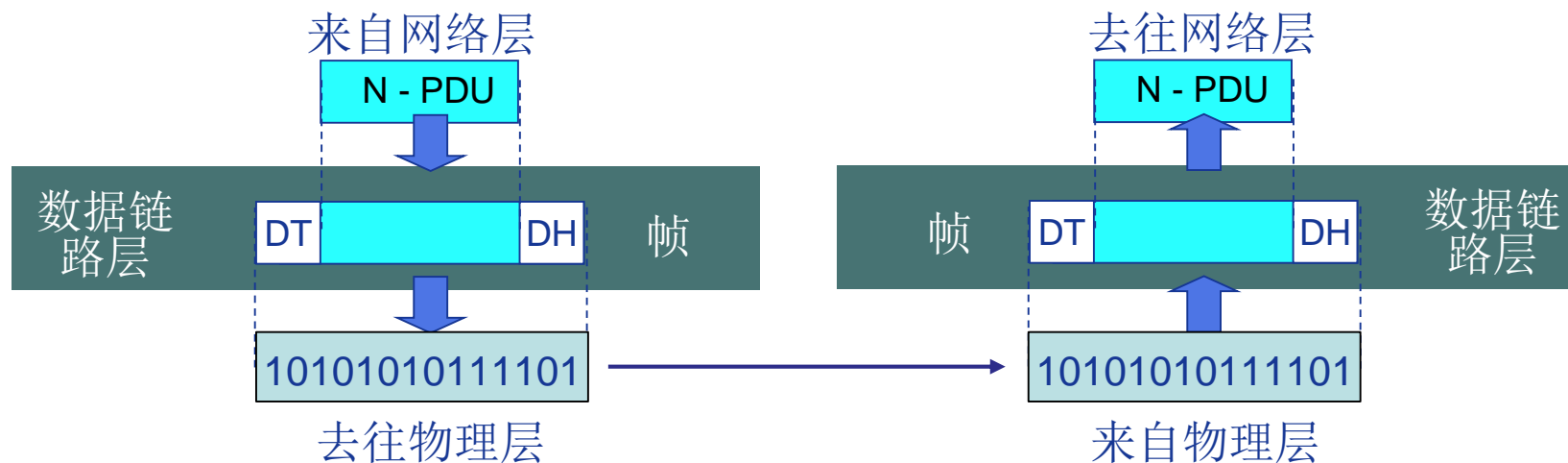
5层参考模型





# 数据链路层功能

## 5.1 数据链路层基本服务



- ❖ 负责结点-结点 (**node-to-node**) 数据传输
- ❖ 组帧 (**Framing**)
- ❖ 物理寻址 (**Physical addressing**)
- ❖ 流量控制 (**Flow control**)
- ❖ 差错控制 (**Error control**)
- ❖ 访问控制 (**Access control**)

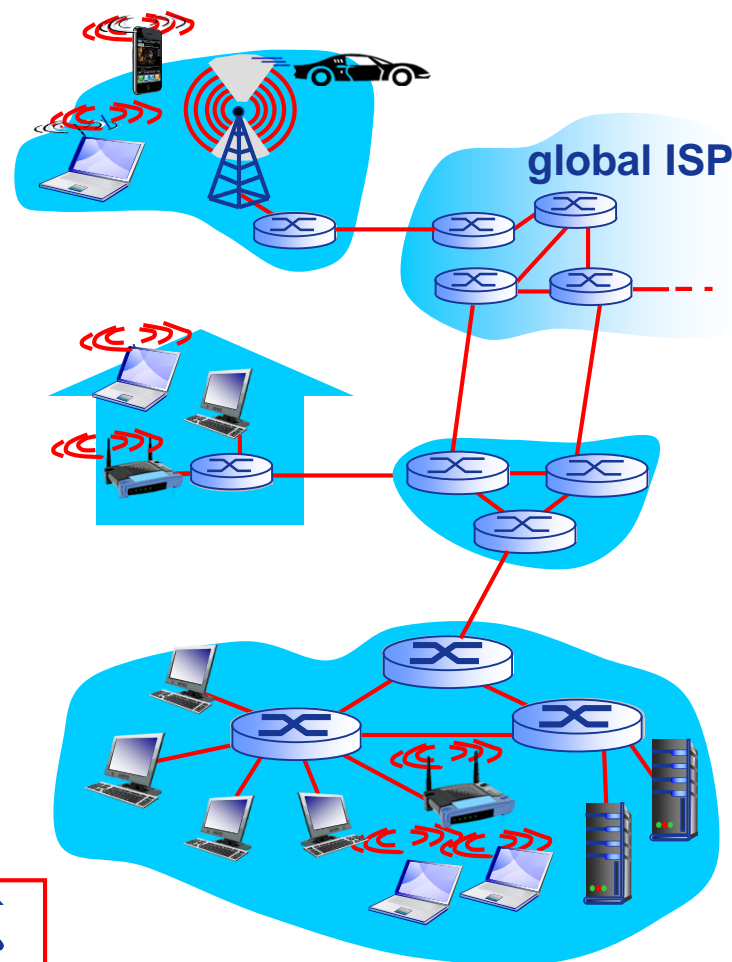




# 术语

## 5.1 数据链路层基本服务

- ❖ 结点(nodes)：主机、路由器、交换机
- ❖ 链路(links)：连接相邻结点的通信信道
  - 有线链路(wired links)
  - 无线链路(wireless links)
  - 局域网(LANs)
- ❖ 帧(frame)：链路层(第2层)数据分组，封装网络层数据报



**数据链路层**负责通过一条链路从一个结点向另一个物理链路直接相连的相邻结点传送数据报。



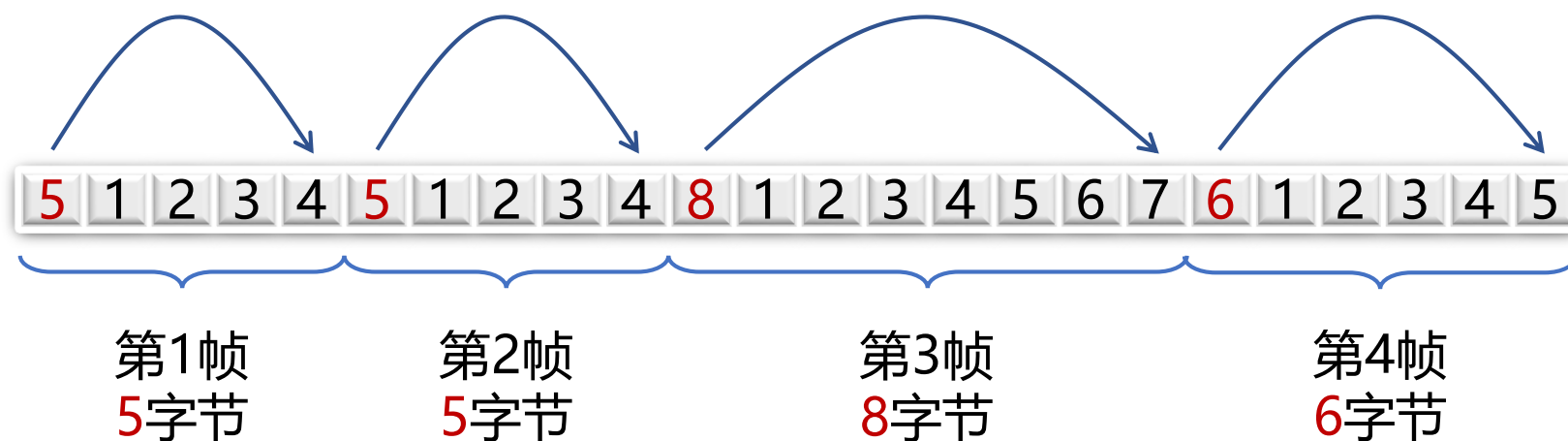


# 链路层服务

## 5.1 数据链路层基本服务

### ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法 (Byte count)



问题：如果某个计数字节出错会发生什么情况？



## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法（Byte count）
  - 带字节填充的定界符法（Flag bytes with byte stuffing）
    - 定界符（FLAG）：一个特殊的字节，比如 01111110，即 0x7E，用于区分前后两个不同的帧



问题：如果有效载荷部分包含与“定界符”相同的字节会有什么问题？

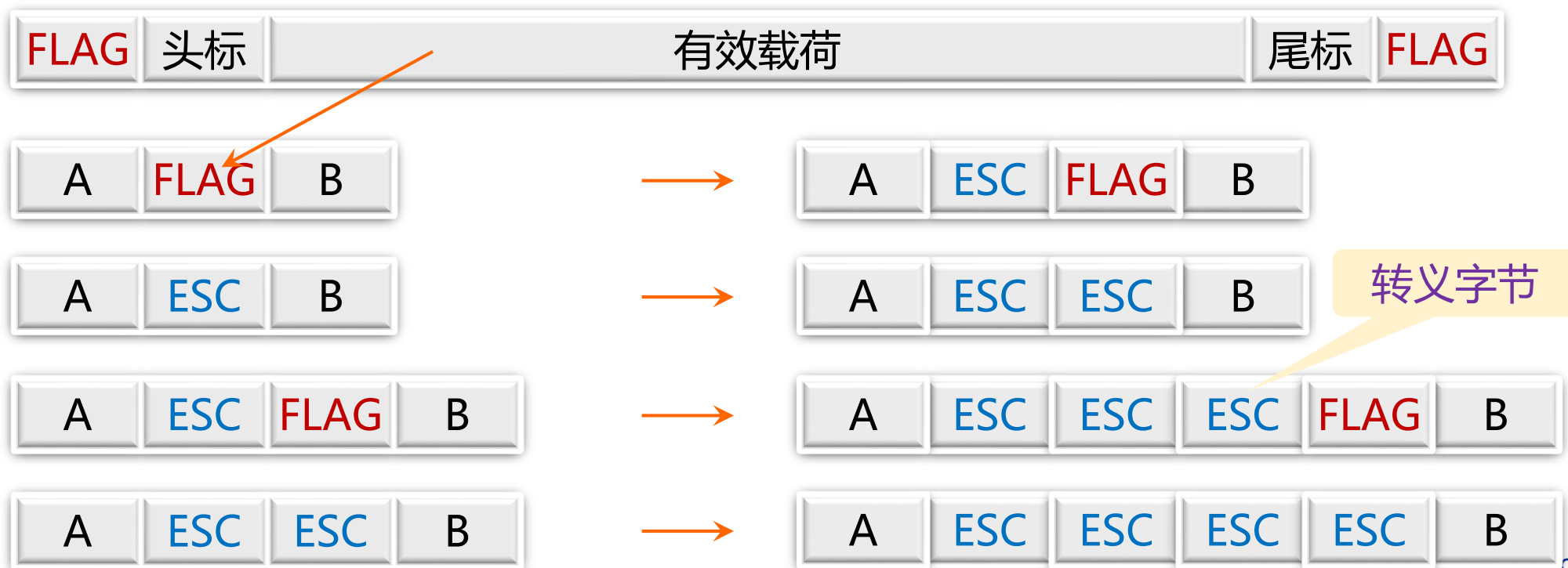




## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法 (Byte count)
  - 带字节填充的定界符法 (Flag bytes with byte stuffing)





## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法（Byte count）
  - 带字节填充的定界符法（Flag bytes with byte stuffing）
  - 带比特填充的定界符法（Flag bits with bit stuffing）
    - 定界符：如两个0比特之间，连续6个1比特，即01111110，0x7E

0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

上一帧

定界符

下一帧

问题：如果有效载荷部分包含与“定界符”相同的位组合如何解决？



## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法 (Byte count)
  - 带字节填充的定界符法 (Flag bytes with byte stuffing)
  - 带比特填充的定界符法 (Flag bits with bit stuffing)
    - 定界符：如两个0比特之间，连续6个1比特，即01111110，0x7E
    - 若在有效载荷中出现连续5个1比特，则直接插入1个0比特

原始载荷

0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0

载荷填充

0 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0



## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 组帧(framing)

- 封装网络层数据报构成数据帧
- 帧同步：从物理层接收的比特流中准确区分出一帧的开始和结束
  - 字节计数法（Byte count）
  - 带字节填充的定界符法（Flag bytes with byte stuffing）
  - 带比特填充的定界符法（Flag bits with bit stuffing）
  - 物理层编码违例（Physical layer coding violations）
    - 核心思想：定界符为不会在数据部分出现码字，例如：
      - 4B/5B编码方案：未使用的码字
      - 前导码：存在很长的前导码（preamble）
        - » 例如：传统以太网、802.11
      - 曼切斯特编码 / 差分曼切斯特编码：比特周期中间信号无跳变
        - » 例如：802.5令牌环网







## 5.1 数据链路层基本服务

## ❖ 差错检测(error detection)

- 信号衰减和噪声会引起差错
- 差错编码

## ❖ 差错纠正(error correction)

- 前向纠错：接收端直接纠正比特差错-纠错码
- 通知发送端重传

## ❖ 链路接入(link access)

- 若物理信道是共享介质，需要解决信道接入(channel access)
- 帧首部中的“MAC”地址，用于标识帧的源和目的

## ❖ 相邻结点间可靠交付

- 在低误码率的有线链路上很少采用 (如光纤，某些双绞线等)
- 无线链路：误码率高，需要可靠数据传输协议
  - 停-等协议
  - 滑动窗口协议



## 5.1 数据链路层基本服务

### ❖ 流量控制(flow control)

- 协调(pacing)相邻的发送结点和接收结点
- 避免接收端被数据“淹没”
- 解决方案：
  - 基于反馈 (feedback-based) 的流量控制
    - 接收方反馈，发送方调整发送速率
  - 基于速率 (rate-based) 的流量控制
    - 发送方根据内建机制，自行限速

### ❖ 全双工和半双工通信控制

- 全双工：链路两端结点同时双向传输
- 半双工：链路两端结点交替双向传输

### ❖ 服务类型

- 无连接服务
- 面向连接服务

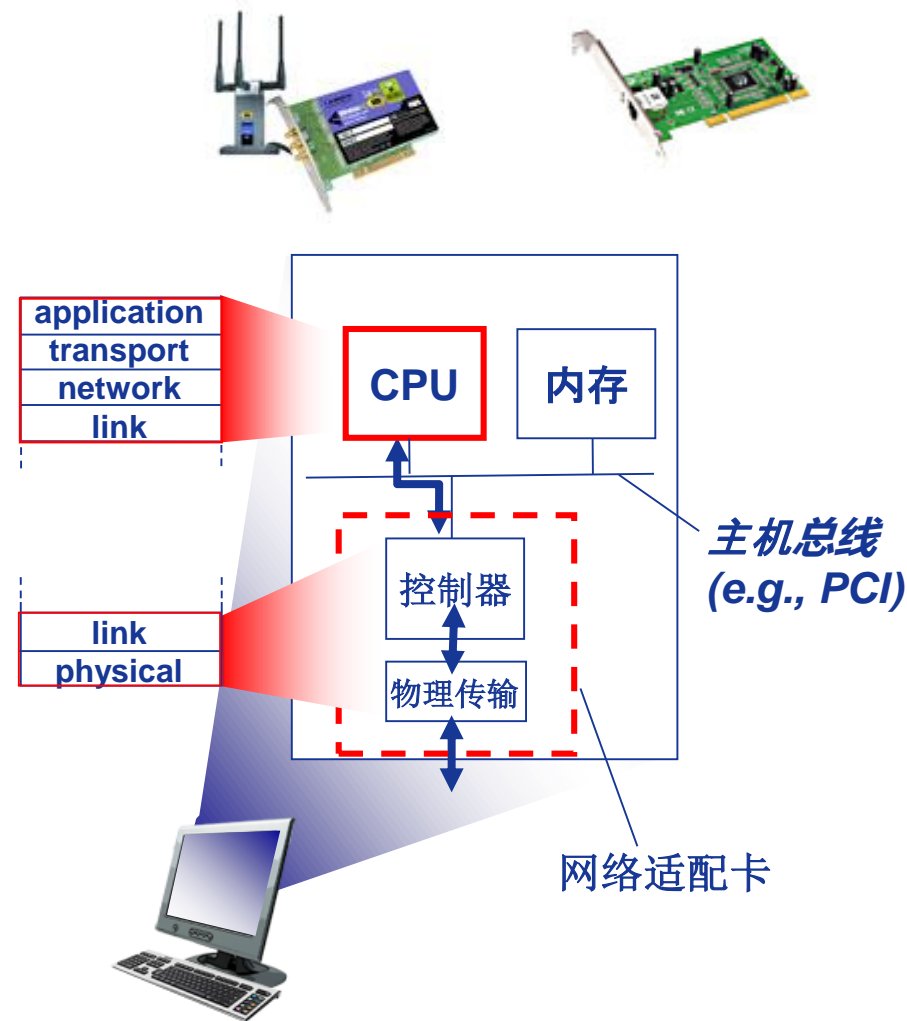




# 链路层的具体实现？

## 5.1 数据链路层基本服务

- ❖ 每个主机或路由器接口
- ❖ 链路层在“适配器”(即网络接口卡-NIC)中实现或者在一个芯片上实现
  - 以太网网卡、802.11网卡；以太网芯片组
  - 实现链路层和物理层
- ❖ 连接主机的系统总线
- ❖ 由硬件、软件与固件组成



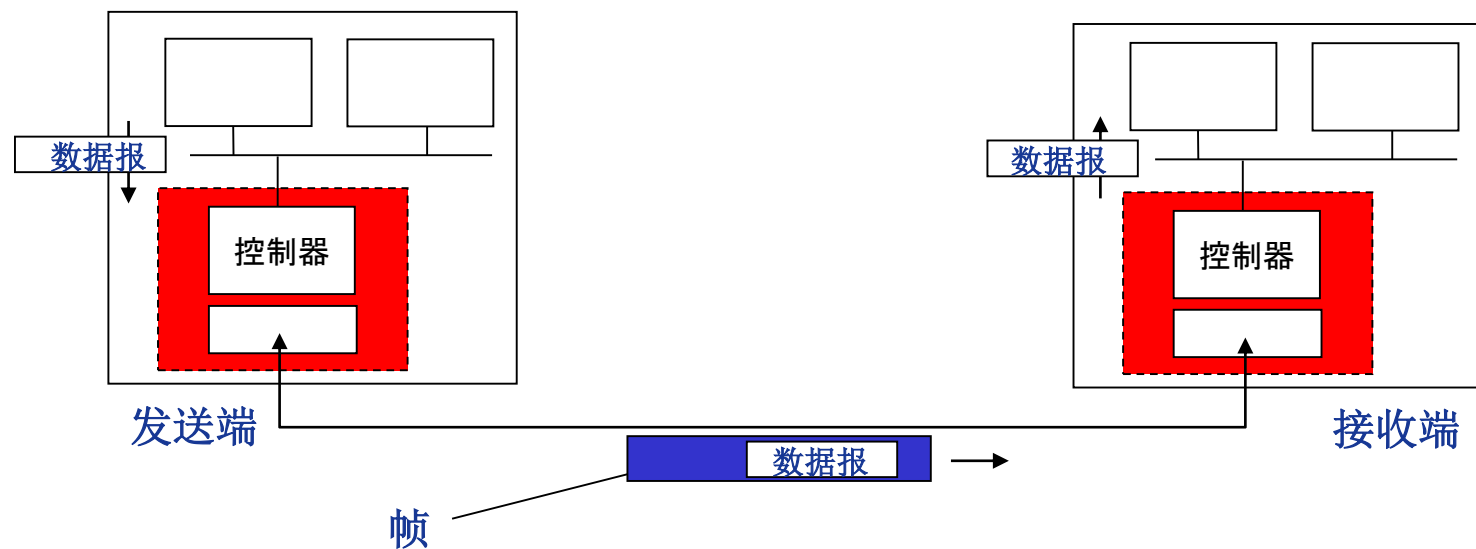


# 网卡间通信

## 5.1 数据链路层基本服务

### ❖ 发送端：

- 将数据报封装成帧
- 增加差错检测比特，实现可靠数据传输和流量控制等.



### ❖ 接收端：

- 检测差错，实现可靠数据传输和流量控制等
- 提取数据报，交付上层协议实体







哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.2 差错检测与纠正

詹东阳



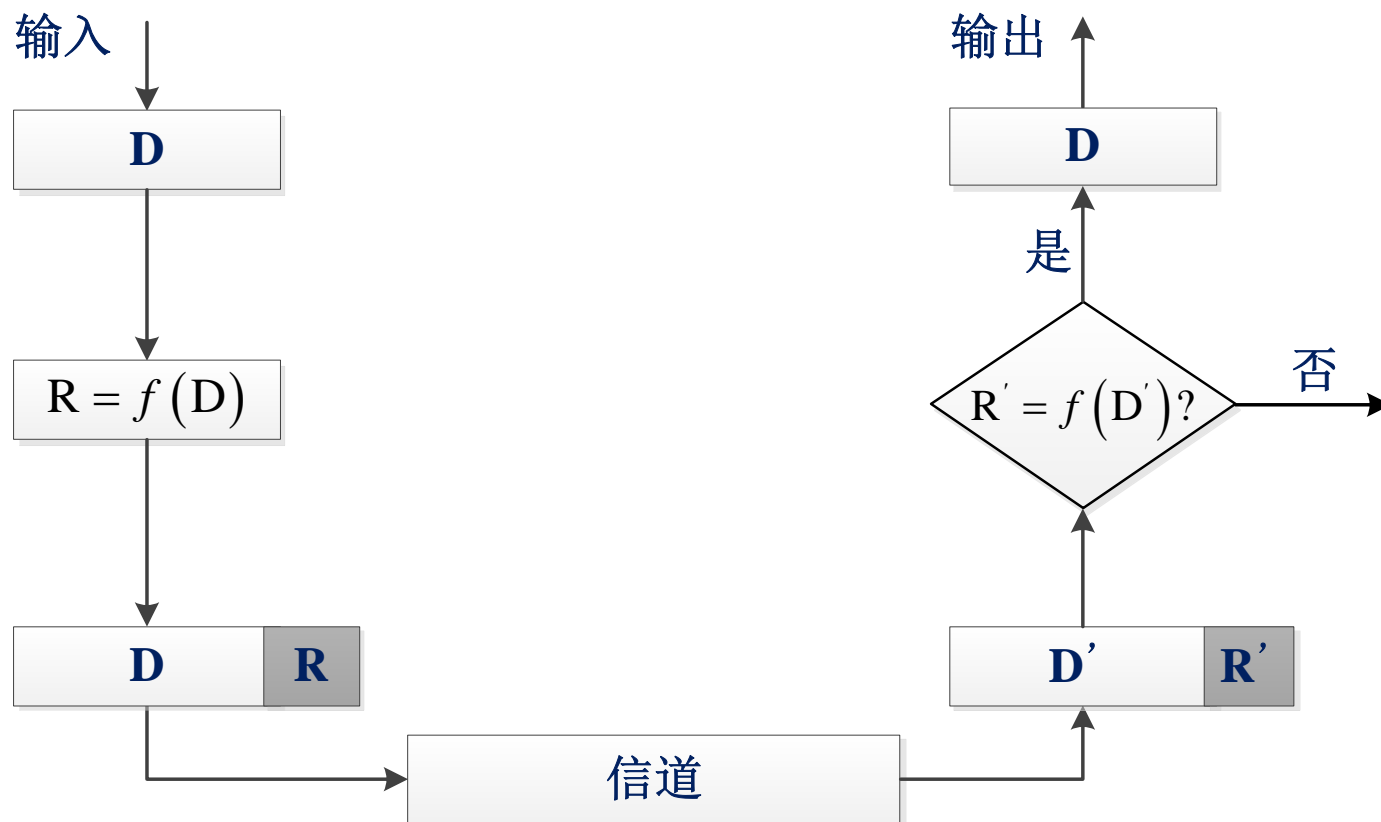
# 差错检测：差错编码

5.1 数据链路层基本服务

## 5.2 差错检测与纠正

差错编码基本原理：

$D \rightarrow DR$ ，其中R为差错检测与纠正比特（冗余比特）



差错编码不能保证100%可靠！



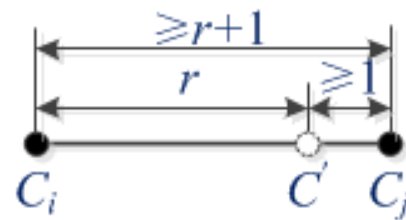


# 差错编码的检错能力

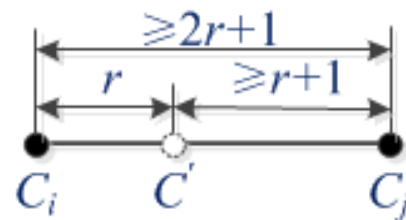
## 5.1 数据链路层基本服务

## 5.2 差错检测与纠正

- ❖ 差错编码可分为检错码与纠错码
- ❖ 汉明距离 (Hamming distance): 两个码字之间对应位不同的数目
- ❖ 对于检错码, 如果编码集的汉明距离  $d_s=r+1$ , 则该差错编码可以检测  $r$  位差错



- 例如, 编码集 {0000, 0101, 1010, 1111} 的汉明距离  $d_s=2$ , 可以100%检测1比特差错
- ❖ 对于纠错码, 如果编码集的汉明距离  $d_s=2r+1$ , 则该差错编码可以纠正  $r$  位差错



- 例如, 编码集 {000000, 010101, 101010, 111111} 的汉明距离  $d_s=3$ , 可以纠正1比特差错, 如100010纠正为101010。





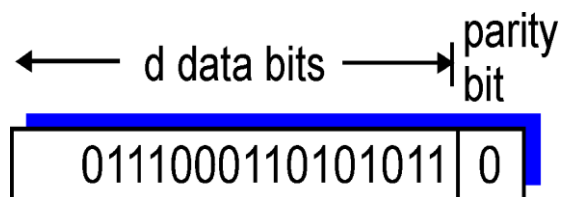
# 奇偶校验码

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

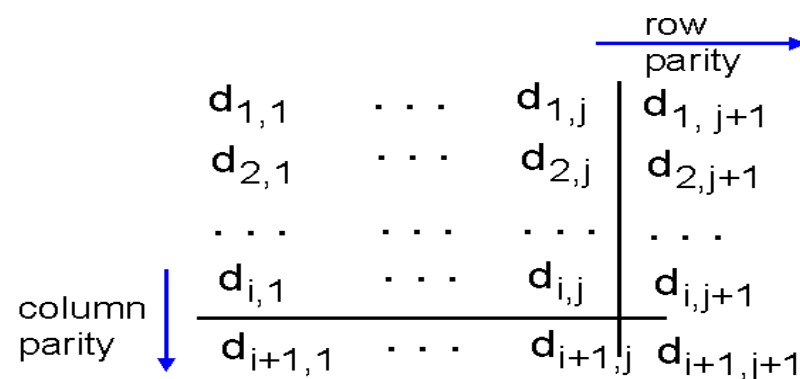
## 1 比特校验位:

- ❖ 检测奇数位差错



## 二维奇偶校验:

- ❖ 检测奇数位差错、部分偶数位差错
- ❖ 纠正同一行/列的奇数位错



1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

*no errors*

1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

*correctable  
single bit error*







# Internet校验和(Checksum)

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

## 发送端:

- ❖ 将“数据”(校验内容)划分为16位的二进制“整数”序列
- ❖ 求和(sum): 补码求和 (最高位进位的“1”, 返回最低位继续加)
- ❖ 校验和(Checksum): sum的反码
- ❖ 放入分组(UDP、TCP、IP)的校验和字段

## 接收端:

- ❖ 与发送端相同算法计算
- ❖ 计算得到的"checksum":
  - 为16位全0 (或sum为16位全1): 无错
  - 否则: 有错





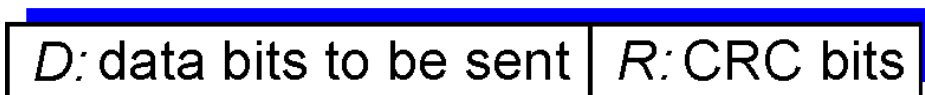
# 循环冗余校验码(CRC)

## 5.1 数据链路层基本服务

## 5.2 差错检测与纠正

- ❖ 检错能力更强大的差错编码
- ❖ 将数据比特,  $D$ , 视为一个二进制数
- ❖ 选择一个  $r+1$  位的比特模式 (生成比特模式),  $G$
- ❖ 目标: 选择  $r$  位的CRC比特,  $R$ , 满足
  - $\langle D, R \rangle$  刚好可以被  $G$  整除(模2)
  - 接收端检错: 利用  $G$  除  $\langle D, R \rangle$ , 余式全0, 无错; 否则, 有错!
  - 可以检测所有突发长度小于  $r+1$  位差错。
- ❖ 广泛应用于实际网络 (以太网, 802.11 WiFi, ATM)

← d bits → ← r bits →



*bit  
pattern*

$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

*mathematical  
formula*





# CRC举例

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

期望:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

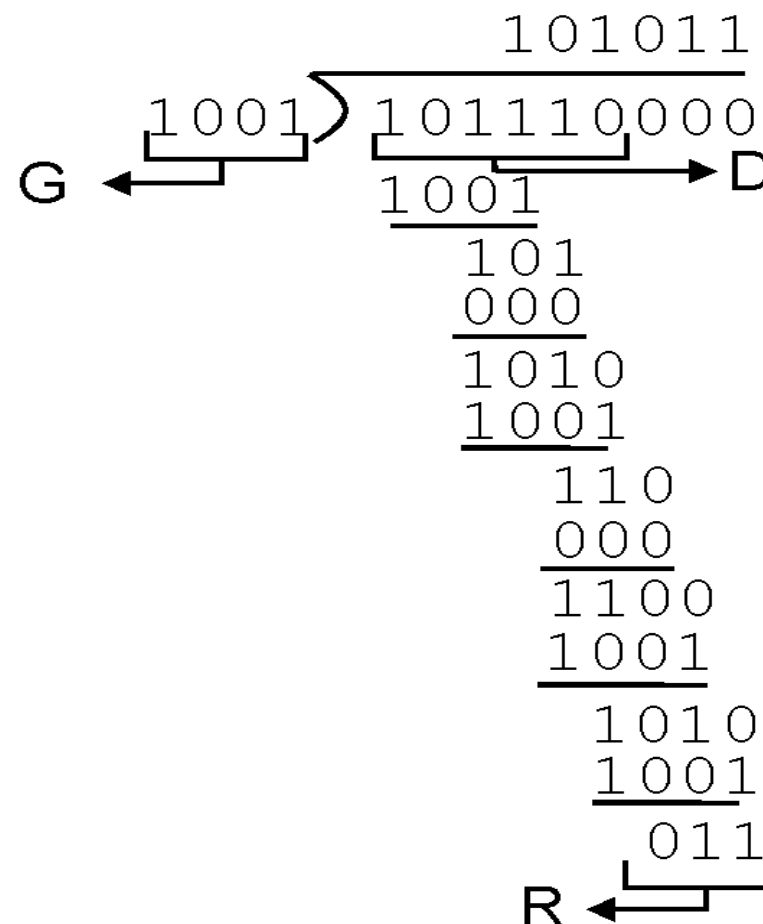
相当于:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

相当于:

如果利用G去除 $D \cdot 2^r$ , 则  
余式即为R:

$$R = \text{余式} \left[ \frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$





## 5.1 数据链路层基本服务

## 5.2 差错检测与纠正

### ❖ 前向纠错（Forward Error Correction, FEC）

- 纠错码

### ❖ 检错重发

- 停-等协议
- 滑动窗口协议

### ❖ 反馈校验

### ❖ 检错丢弃

❖ .....





若数据传输时采用<D,EDC>差错编码，其中D为数据， $EDC=DD$ （即复制两份数据），则该差错编码可以

- ☐ A 检测3个比特差错，纠正3个比特差错
- ☐ B 检测3个比特差错，纠正2个比特差错
- ☐ C 检测2个比特差错，纠正2个比特差错
- ☒ D 检测2个比特差错，纠正1个比特差错





哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.4 多路访问控制协议

詹东阳



# 多路访问控制(MAC)协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 两类“链路”：

### ❖ 点对点链路

- 拨号接入的PPP
- 以太网交换机与主机间的点对点链路

### ❖ 广播链路 (共享介质)

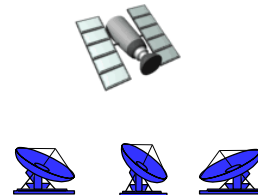
- 早期的总线以太网
- HFC的上行链路
- 802.11无线局域网



共享线路  
(e.g., 总线以太网)



共享RF  
(e.g., 802.11 WiFi)



共享RF  
(e.g., 卫星网络)



共享空气、声频  
(e.g., 鸡尾酒会)





# 多路访问控制(MAC)协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

- ❖ 单一共享广播信道
- ❖ 两个或者两个以上结点同时传输：干扰(interference)
  - 冲突(collision)
    - 结点同时接收到两个或者多个信号→接收失败！

## 多路访问控制协议(multiple access control protocol)

- ❖ 采用分布式算法决定结点如何共享信道，即决策结点何时可以传输数据
- ❖ 必须基于信道本身，通信信道共享协调信息！
  - 无带外信道用于协调







# 理想MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

**5.4 多路访问控制协议**

给定：速率为 $R$  bps的广播信道

期望：

1. 当只有一个结点希望传输数据时，它可以以速率  $R$  发送数据.
2. 当有 $M$ 个结点期望发送数据时，每个结点发送数据的平均速率是 $R/M$
5. 完全分散控制：
  - 无需特定结点协调
  - 无需时钟、时隙同步
4. 简单





# MAC协议分类

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 三大类:

### ❖ 信道划分(channel partitioning)MAC协议

- 多路复用技术
- TDMA、FDMA、CDMA、WDMA等

### ❖ 随机访问(random access)MAC协议

- 信道不划分，允许冲突
- 采用冲突“恢复”机制

### ❖ 轮转(“taking turns”)访问MAC协议

- 结点轮流使用信道





# 信道划分MAC协议：TDMA

5.1 数据链路层基本服务

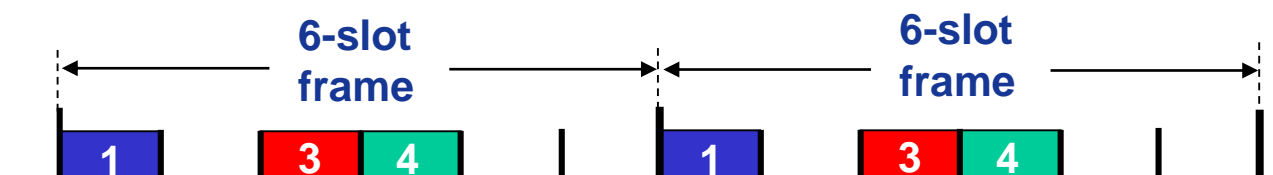
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

**5.4 多路访问控制协议**

## TDMA: time division multiple access

- ❖ “周期性”接入信道
- ❖ 每个站点在每个周期，占用固定长度的时隙(e.g.长度=分组传输时间)
- ❖ 未用时隙空闲(idle)
- ❖ 例如：6-站点LAN，1,3,4传输分组，2,5,6空闲





# 信道划分MAC协议：FDMA

5.1 数据链路层基本服务

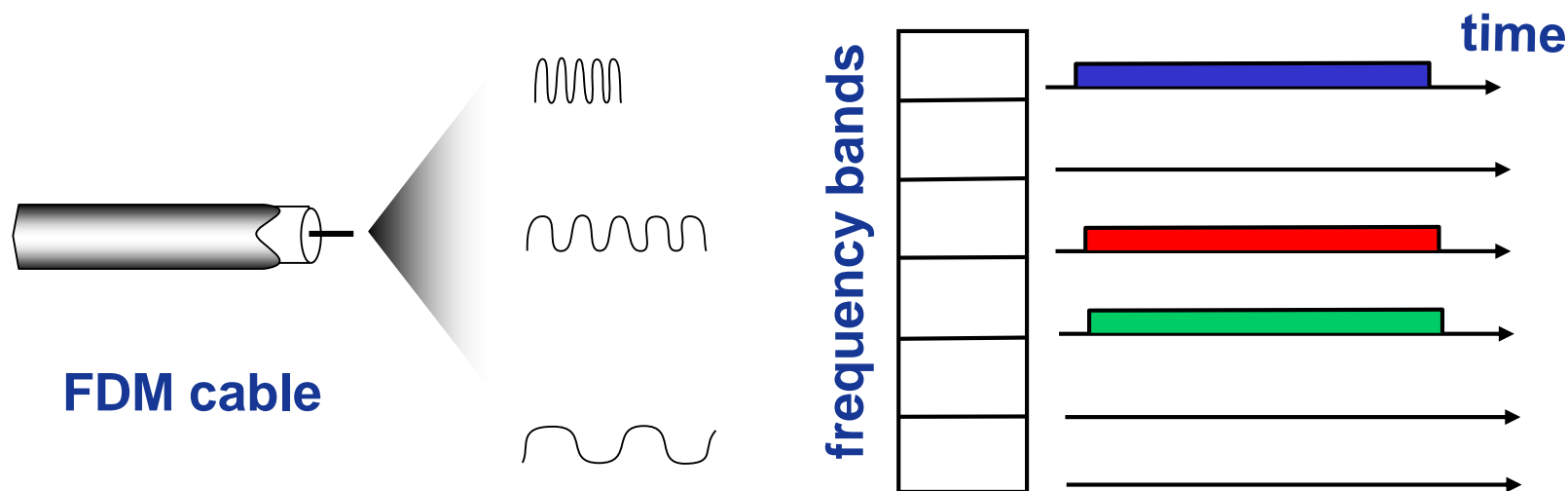
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## FDMA: frequency division multiple access

- ❖ 信道频谱划分为若干频带(frequency bands)
- ❖ 每个站点分配一个固定的频带
- ❖ 无传输频带空闲
- ❖ 例如: 6站点LAN, 1,3,4频带传输数据, 2,5,6频带空闲。







# 随机访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## ❖ 当结点要发送分组时：

- 利用信道全部数据速率 $R$ 发送分组
- 没有事先的结点间协调

## ❖ 两个或多个结点同时传输：→ “冲突”

## ❖ 随机访问MAC协议需要定义：

- 如何检测冲突
- 如何从冲突中恢复 (e.g., 通过延迟重传)

## ❖ 典型的随机访问MAC协议：

- 时隙(slotted)ALOHA
- ALOHA
- CSMA、CSMA/CD、CSMA/CA





# 时隙ALOHA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

假定:

- ❖ 所有帧大小相同
- ❖ 时间被划分为等长的时隙(每个时隙可以传输1个帧)
- ❖ 结点只能在时隙开始时刻发送帧
- ❖ 结点间时钟同步
- ❖ 如果2个或2个以上结点在同一时隙发送帧, 结点即检测到冲突

运行:

- ❖ 当结点有新的帧时, 在下一个时隙(slot)发送
  - 如果无冲突: 该结点可以在下一个时隙继续发送新的帧
  - 如果冲突: 该结点在下一个时隙以概率 $p$ 重传该帧, 直至成功





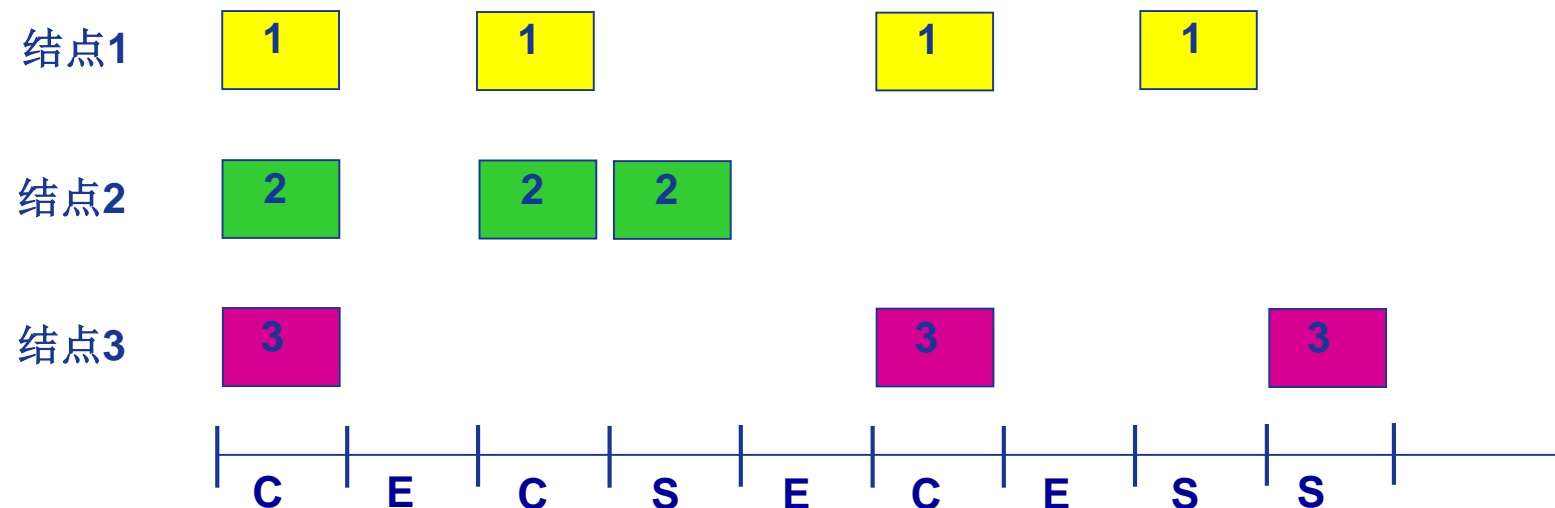
# 时隙ALOHA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



## 优点:

- ❖ 单个结点活动时，可以连续以信道全部速率传输数据
- ❖ 高度分散化：只需同步时隙
- ❖ 简单

## 缺点:

- ❖ 冲突，浪费时隙
- ❖ 空闲时隙
- ❖ 结点也许能以远小于分组传输时间检测到冲突
- ❖ 时钟同步





# 时隙ALOHA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**效率(efficiency):** 长期运行时, 成功发送帧的时隙所占比例。  
(很多结点, 有很多帧待发送)

- ❖ 假设:  $N$  个结点有很多帧待传输, 每个结点在每个时隙均以概率  $p$  发送数据
- ❖ 对于给定的一个结点, 在一个时隙将帧发送成功的概率 =  $p(1-p)^{N-1}$
- ❖ 对于任意结点成功发送帧的概率 =  $Np(1-p)^{N-1}$

- ❖ 最大效率: 求得使  $Np(1-p)^{N-1}$  最大的  $p^*$
- ❖ 对于很多结点, 求  $Np^*(1-p^*)^{N-1}$  当  $N$  趋近无穷时的极限, 可得:

**最大效率 =  $1/e = 0.37$**

**最好情况: 信道被成功利用的时间仅占37%!**





# ALOHA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

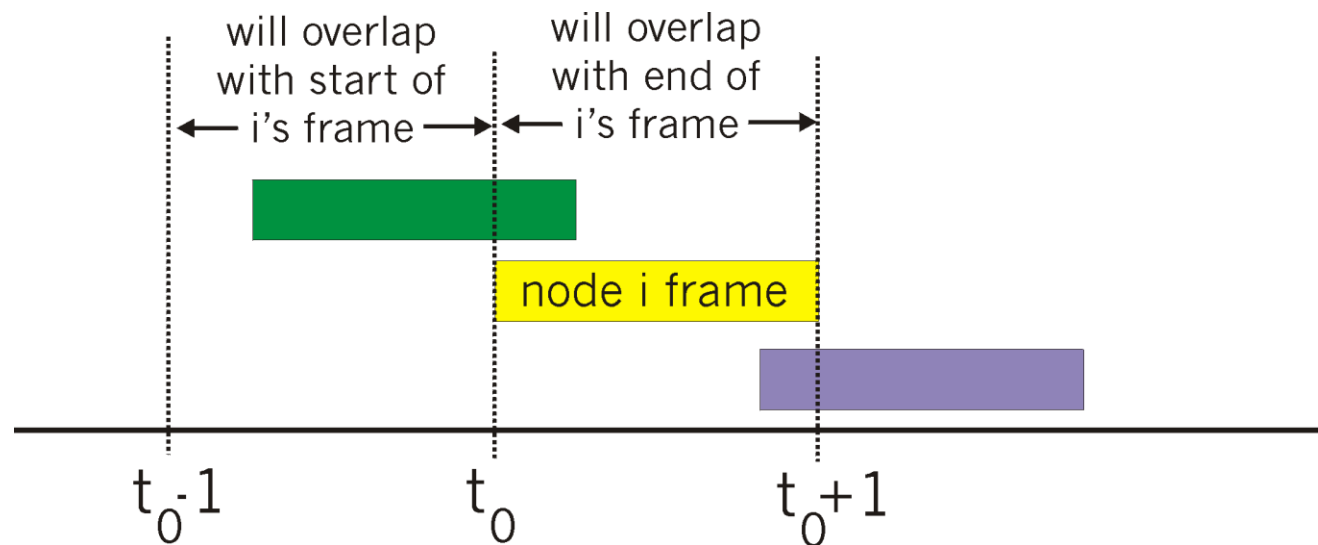
❖ 非时隙(纯)Aloha: 更加简单, 无需同步

❖ 当有新的帧生成时

- 立即发送

❖ 冲突可能性增大:

- 在 $t_0$ 时刻发送帧, 会与在 $[t_0-1, t_0+1]$ 期间其他结点发送的帧冲突





# ALOHA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

**5.4 多路访问控制协议**

$$\begin{aligned} P(\text{给定结点成功发送帧}) &= P(\text{该结点发送}) \cdot \\ &\quad P(\text{无其他结点在}[t_0-1, t_0]\text{期间发送帧}) \cdot \\ &\quad P(\text{无其他结点在}[t_0, t_0+1]\text{期间发送帧}) \\ &= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\ &= p \cdot (1-p)^{2(N-1)} \end{aligned}$$

... 选取最优的 $p$ ，并令 $n \rightarrow \infty$

$$= 1/(2e) = 0.18$$

**比时隙ALOHA协议更差!**





# CSMA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

❖ 载波监听多路访问协议**CSMA** (carrier sense multiple access)

❖ 发送帧之前，监听信道(载波):

- 信道空闲：发送完整帧
- 信道忙：推迟发送

- 1-坚持CSMA
- 非坚持CSMA
- P-坚持CSMA

❖ 冲突可能仍然发生：  
信号传播延迟





# CSMA协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

❖ 载波监听多路访问协议 **CSMA** (carrier sense multiple access)

❖ 发送帧之前，监听信道(载波):

- 信道空闲：发送完整帧
- 信道忙：推迟发送

- 1-坚持CSMA
- 非坚持CSMA
- P-坚持CSMA

❖ 冲突可能仍然发生：  
信号传播延迟

❖ 继续发送冲突帧：浪费信道资源



$t_0$   
time  
↓

$t_1$





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

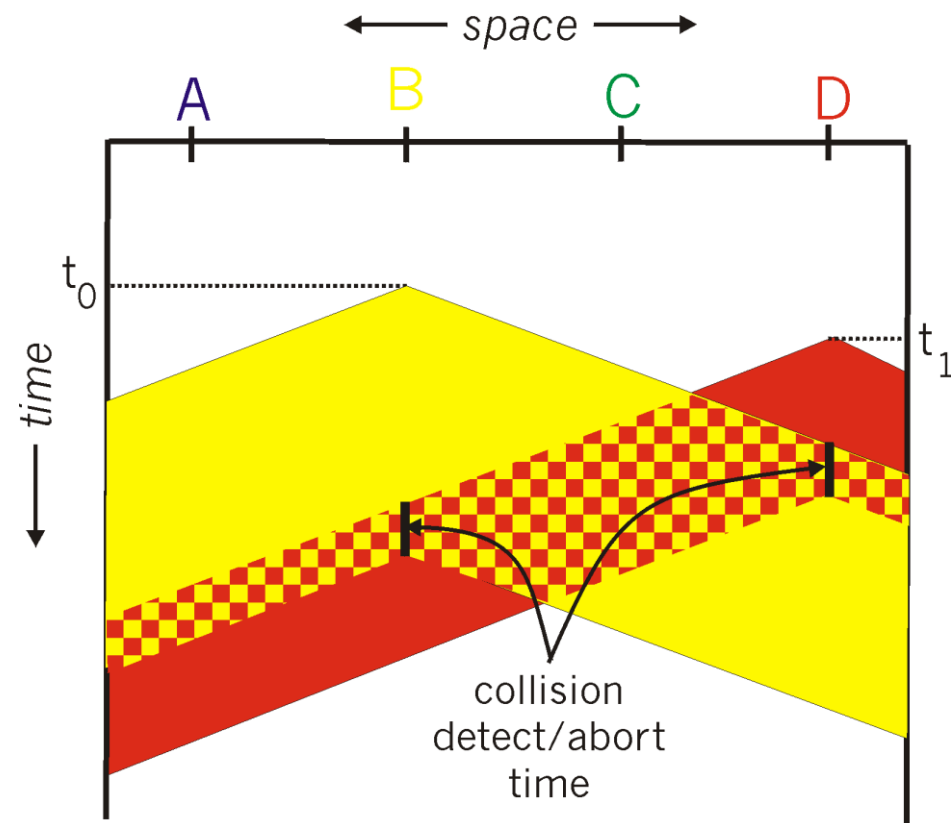
## CSMA/CD: CSMA with Collision Detection

- 短时间内可以检测到冲突
- 冲突后传输中止，减少信道浪费

### ❖ 冲突检测:

- 有线局域网易于实现：测量信号强度，比较发射信号与接收信号
- 无线局域网很难实现：接收信号强度淹没在本地发射信号强度下

“边发边听，不发不听”





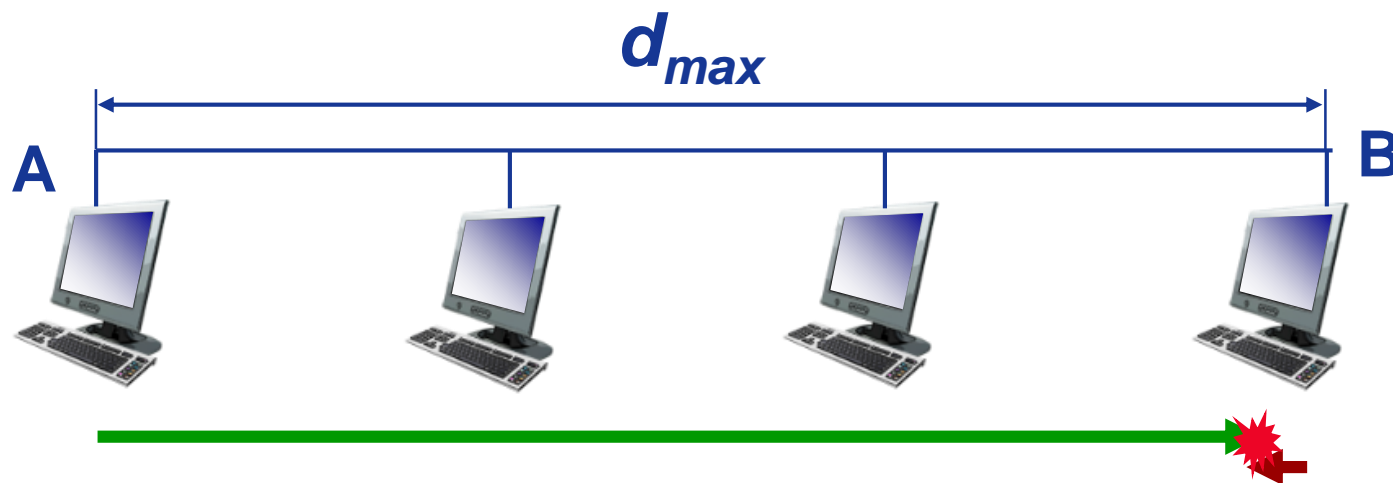
# CSMA/CD协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议



网络带宽:  $R$  bps

数据帧最小长度:  $L_{min}$  (bits)

信号传播速度:  $V$  (m/s)

$$L / R \geq 2d_{max} / V$$

$$L_{min} / R = 2d_{max} / V$$

$$L_{min} / R = RTT_{max}$$





# 例题

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

【例2】在一个采用CSMA/CD协议的网络中，传输介质是一根完整的电缆，传输速率为1 Gbps，电缆中的信号传播速度是 200 000 km/s。若最小数据帧长度减少800比特，则最远的两个站点之间的距离至少需要

A.增加160 m

B.增加80 m

C.减少160 m

D.减少80 m

解：根据CSMA/CD协议工作原理，有

$$L_{\min}/R=2*d_{\max}/V, \text{则 } d_{\max}=(V/2R)*L_{\min}, \text{ 于是}$$

$$\Delta d_{\max}=(V/2R)*\Delta L_{\min}$$

将 $V=200\,000\text{ km/s}$ ,  $R=1\text{ Gbps}$ ,  $\Delta L_{\min}=-800\text{ bit}$ ,代入得:

$$\Delta d_{\max}=(200000*10^3/(2*10^9))*(-800)=-80\text{ m}$$

答案：D





# CSMA/CD效率

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

❖  $T_{\text{prop}}$  = LAN中2个结点间的最大传播延迟

❖  $t_{\text{trans}}$  = 最长帧传输延迟

$$\text{效率} = \frac{1}{1 + 5t_{\text{prop}}/t_{\text{trans}}}$$

❖  $t_{\text{prop}}$  趋近于0或者 $t_{\text{trans}}$  趋近于 $\infty$ 时，效率趋近于1

❖ 远优于ALOHA，并且简单、分散！







# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 信道划分MAC协议：

- 网络负载重时，共享信道效率高，且公平
- 网络负载轻时，共享信道效率低！

## 随机访问MAC协议：

- 网络负载轻时，共享信道效率高，单个结点可以利用信道的全部带宽
- 网络负载重时，产生冲突开销

## 轮转访问MAC协议：

综合两者的优点！





# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

**5.4 多路访问控制协议**

## 轮询(polling):

- ❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据
- ❖ 典型应用：  
“哑(dumb)”从属设备





# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

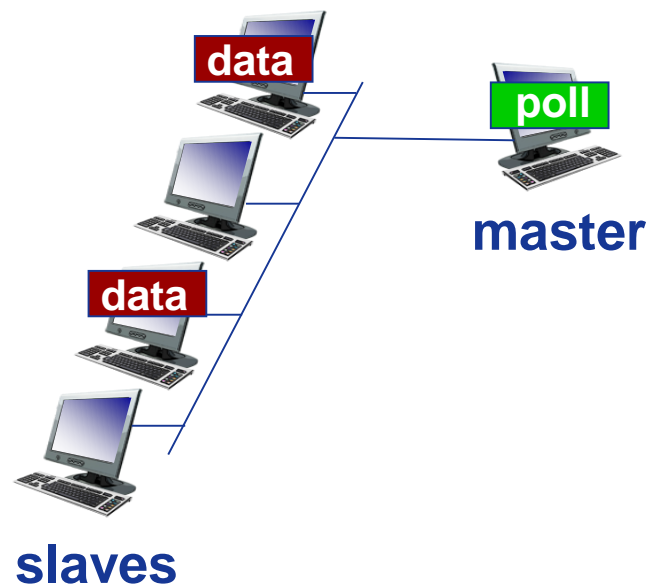
## 轮询(polling):

❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据

❖ 典型应用：  
“哑(dumb)”从属设备

❖ 问题：

- 轮询开销
- 等待延迟
- 单点故障





# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

**5.4 多路访问控制协议**

## 令牌传递(token passing):

- ❖ 控制令牌依次从一个结点传递到下一个结点.
- ❖ 令牌: 特殊帧





# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

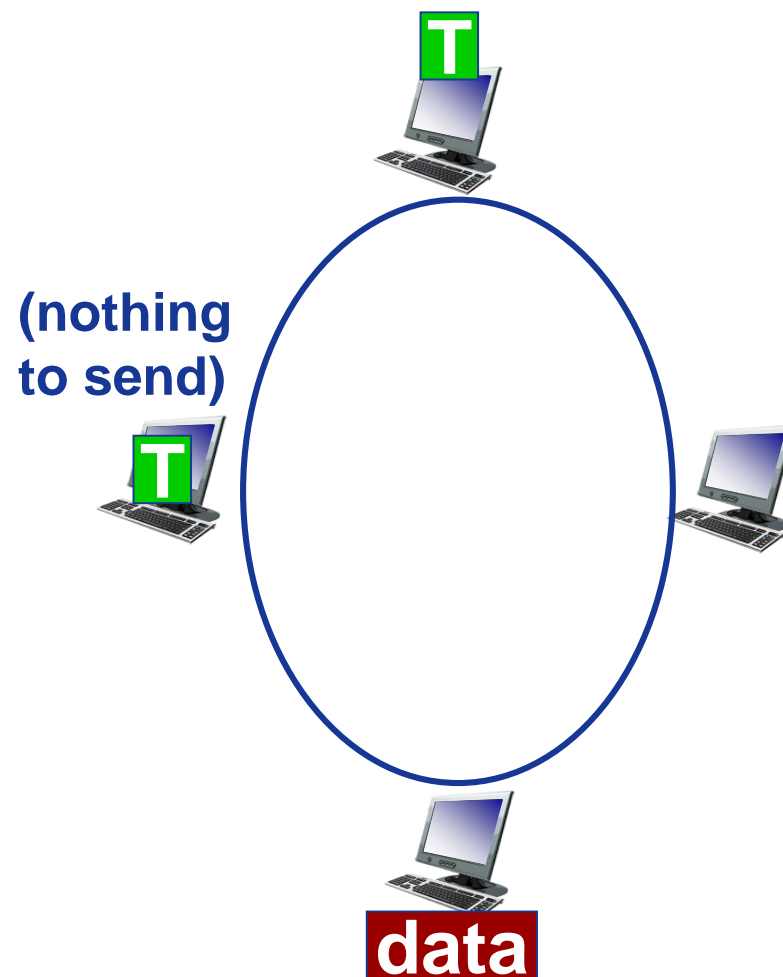
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 令牌传递(token passing):

- ❖ 控制令牌依次从一个结点传递到下一个结点.
- ❖ 令牌: 特殊帧
- ❖ 问题:
  - 令牌开销
  - 等待延迟
  - 单点故障



# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

❖ **讨论**：总结两个轮转访问MAC协议：轮询和令牌传递的共同点和不同点？

■ 共同点：

- 开销
- 等待延迟
- 单点故障
- 无冲突
- 信道预约+数据传输

■ 不同点：

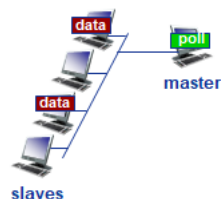
- 轮询：集中式预约（分配）信道
- 令牌：分布式预约信道

■ 能否设计一个新的轮转访问MAC协议？

## 轮转访问MAC协议

### 轮询(polling):

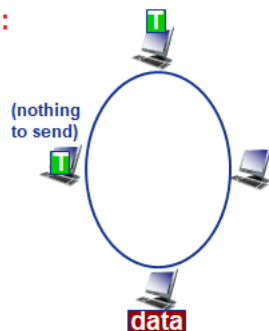
- ❖ 主结点轮流“邀请”从属结点发送数据
- ❖ 典型应用：“哑(dumb)”从属设备
- ❖ 问题：
  - 轮询开销
  - 等待延迟
  - 单点故障



## 轮转访问MAC协议

### 令牌传递(token passing):

- ❖ 控制令牌依次从一个结点传递到下一个结点.
- ❖ 令牌：特殊帧
- ❖ 问题：
  - 令牌开销
  - 等待延迟
  - 单点故障



# 轮转访问MAC协议

5.1 数据链路层基本服务

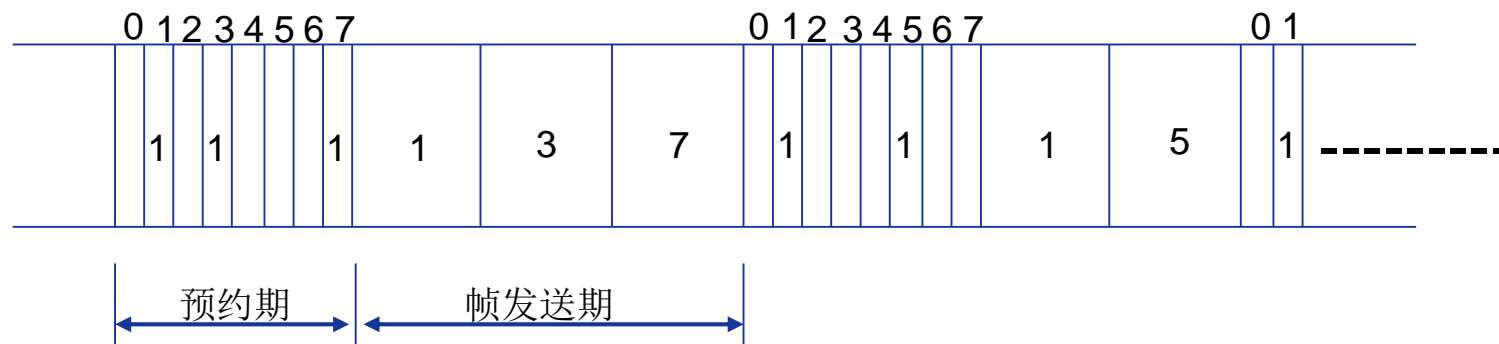
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 比特映像介质访问控制协议:

- ❖ 将时间划分成一系列的**预约周期**和**数据传输周期**
- ❖ 每个预约周期包括N个时隙，每个时隙1比特，对应一个站
- ❖ 任何一个站想发送数据，必须在它的时隙到来时发一个“1”
- ❖ 当预约周期结束后，所有站都知道有哪些站希望发送数据，于是这些预约过的站按编号顺序发送，永不冲突
- ❖ 最后一个站发完数据后，开始新一轮的预约周期





# MAC协议总结

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## ❖ 信道划分MAC协议：时间、频带、码片划分

- TDMA、FDMA、CDMA

## ❖ 随机访问MAC协议：

- ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
- CSMA/CD应用于以太网
- CSMA/CA应用802.11无线局域网

## ❖ 轮转访问MAC协议：

- 主结点轮询；令牌传递；比特映像介质访问控制
- 蓝牙、FDDI、令牌环网





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

假设一个局域网采用时隙ALOHA协议，每个结点以概率 $P=0.5$ 决策下一个时隙发送数据帧。若当前只有两个结点A、B在当前时隙竞争发送帧并产生冲突，则下个时隙A成功发送帧的概率是

A 0.125

B 0.25

C 0.5

D 0.75



提交



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.5 局域网技术

詹东阳



# 链路层寻址：MAC地址

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

❖ 链路层寻址关键需求：唯一

❖ MAC地址(或称LAN地址,物理地址,以太网地址)：

- 作用：用于局域网内标识一个帧从哪个接口发出，到达哪个物理相连的其他接口
- 48位MAC地址(用于大部分LANs)，固化在网卡的 ROM中，有时也可以软件设置
- e.g.: 1A-2F-BB-76-09-AD 16进制表示
- 广播地址：FF-FF-FF-FF-FF-FF

❖ IP地址：

- 32位（IPv4）
- 接口的网络层地址
- 用于标识网络层(第3层)分组，支持分组转发





# MAC地址

5.1 数据链路层基本服务

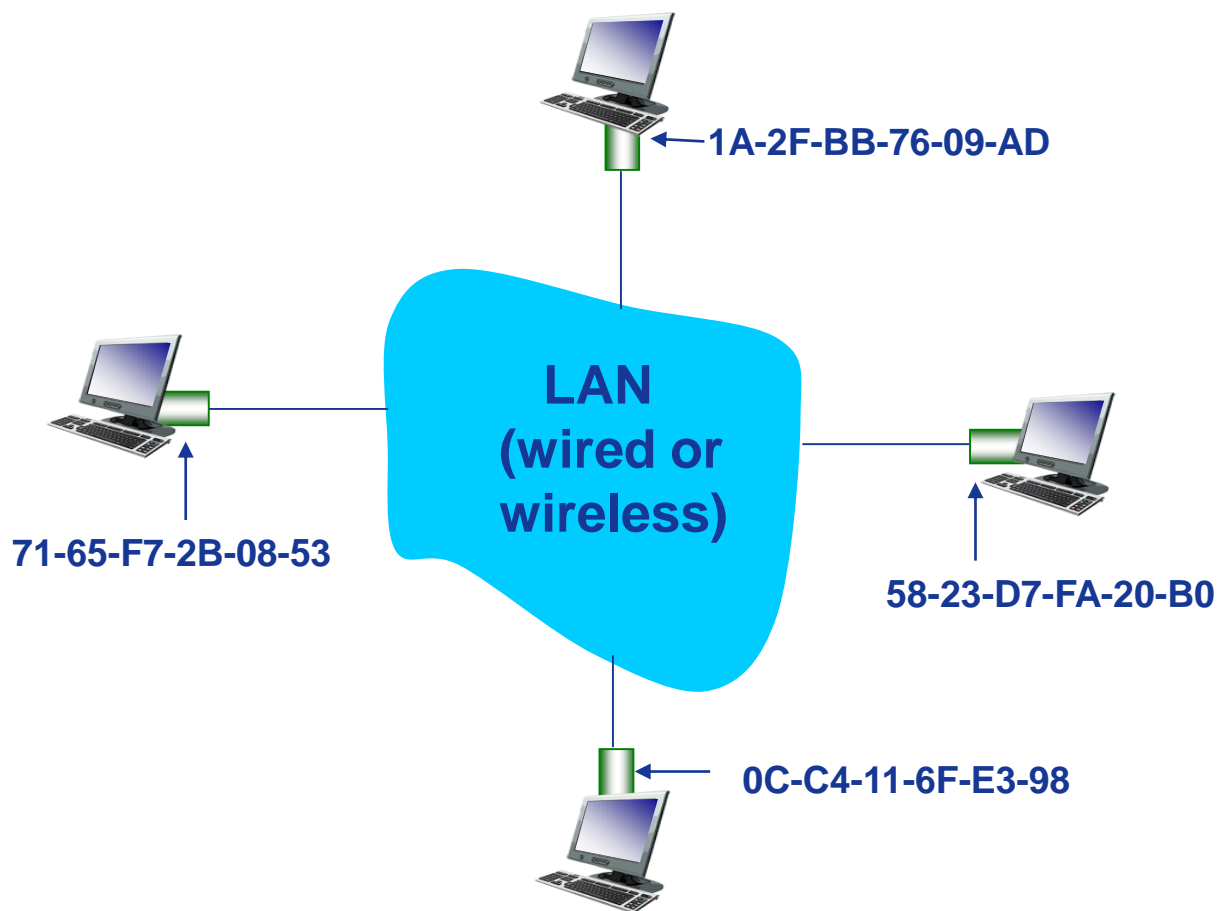
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

局域网中的每块网卡都有一个唯一的**MAC地址**



网络适配器







# MAC地址

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

- ❖ MAC地址由IEEE统一管理与分配
- ❖ 网卡生产商购买MAC地址空间(前24比特)
- ❖ 类比：
  - MAC地址：身份证号
  - IP地址：邮政地址
- ❖ MAC地址是“平面”地址： → 可“携带”
  - 可以从一个LAN移到另一个LAN
- ❖ IP地址是层次地址： → 不可“携带”
  - IP地址依赖于结点连接到哪个子网





# 以太网(Ethernet)

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

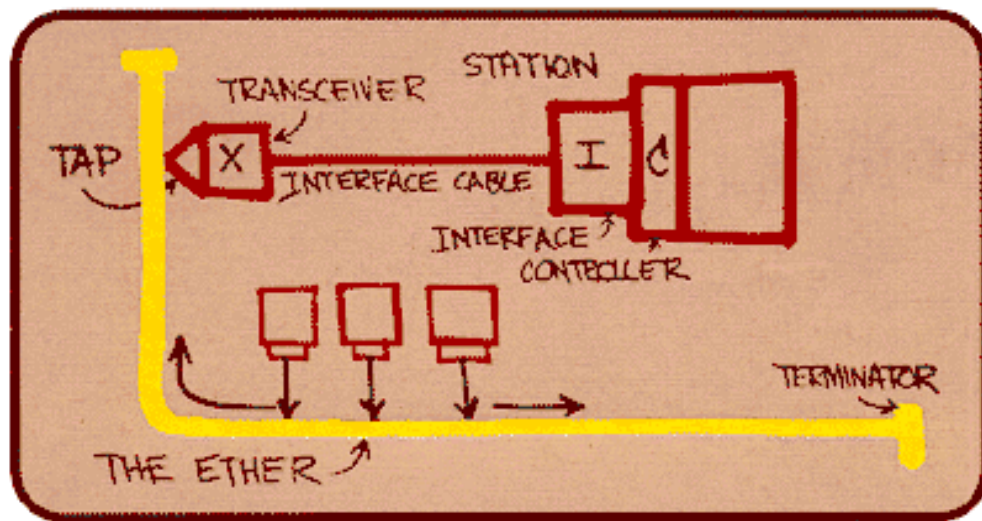
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 5.5 局域网技术

“统治地位”的有线LAN技术:

- ❖ 造价低廉(NIC不足¥100.00)
- ❖ 应用最广泛的LAN技术
- ❖ 比令牌局域网和ATM等, 简单、便宜
- ❖ 满足网络速率需求: 10 Mbps – 400 Gbps



Metcalfe的以太网草图





# 以太网：物理拓扑

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

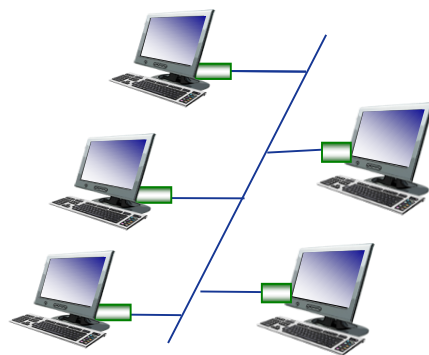
5.5 局域网技术

❖ **总线(bus):** 上世纪90年代中期前流行

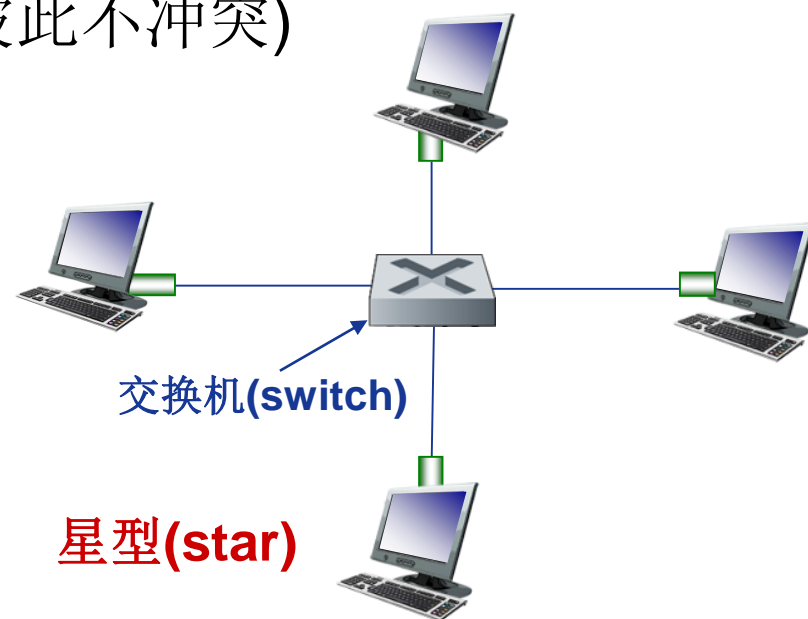
- 所有结点在同一**冲突域(collision domain)** (可能彼此冲突)

❖ **星型(star):** 目前主流网络拓扑

- **中心交换机(switch)**
- **交换式以太网**
- 每个结点一个单独冲突域(结点间彼此不冲突)



**总线(bus):** 同轴电缆



**星型(star)**





# 以太网：不可靠、无连接服务

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

- ❖ 无连接(connectionless): 发送帧的网卡与接收帧的网卡间没有“握手”过程
- ❖ 不可靠(unreliable): 接收网卡不向发送网卡进行确认
  - 差错帧直接丢弃，丢弃帧中的数据恢复依靠高层协议(e.g., TCP)，否则，发生数据丢失
- ❖ 以太网的MAC协议: 采用二进制指数退避算法的CSMA/CD







# 以太网CSMA/CD算法

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术



1. NIC从网络层接收数据报，创建数据帧。

2. 监听信道：

如果NIC监听到信道空闲，则开始发送帧；

如果NIC监听到信道忙，则一直等待到信道空闲，然后发送帧。

5. NIC发送完整个帧，而没有检测到其他结点的数据发送，则NIC确认帧发送成功！

4. 如果NIC检测到其他结点传输数据，则中止发送，并发送堵塞信号(jam signal)

5. 中止发送后，NIC进入二进制指数退避：

- 第 $m$ 次连续冲突后：
  - 取 $n = \text{Min}(m, 10)$
  - NIC 从 $\{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}$ 中随机选择一个数 $K$
  - NIC等待 $K \cdot 512$ 比特的传输延迟时间，再返回第2步
- 连续冲突次数越多，平均等待时间越长。





# 以太网帧结构

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

发送端网卡将IP数据报(或其他网络层协议分组)封装到以太网帧中:



MAC帧格式

(a) DIX Ethernet V2 (b) IEEE 802.3

前导码(Preamble)(8B):

- ❖ 7个字节的10101010, 第8字节为10101011
- ❖ 用于发送端与接收端的时钟同步
- ❖ 通常不计入帧长

# 以太网帧结构

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 目的MAC地址、源MAC地址(各6B):

- 如果网卡的MAC地址与收到的帧的目的MAC地址匹配, 或者帧的目的MAC地址为广播地址(FF-FF-FF-FF-FF-FF), 则网卡接收该帧, 并将其封装的网络层分组交给相应的网络层协议。
- 否则, 网卡丢弃(不接收)该帧。

## ❖ 类型 (Type)(2B): 指示帧中封装的是哪种高层协议的分组(如, IP数据报、Novell IPX数据报、AppleTalk数据报等)

- ❖ 实现多路分解

## ❖ 数据(Data)(46-1500B): 指上层协议载荷。

- ❖  $R=10\text{Mbps}$ ,  $\text{RTT}_{\max}=512\mu\text{s}$ ,  $L_{\min} / R = \text{RTT}_{\max}$
- ❖  $L_{\min}=512\text{bits}=64\text{B}$ ,  $\text{Data}_{\min}=L_{\min}-18=46\text{B}$

## ❖ CRC(4B): 循环冗余校验码

- 丢弃差错帧

6	6	2	46 ~ 1500	4
目的地址	源地址	类型	数 据	校验和





# 以太网标准：链路层与物理层

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

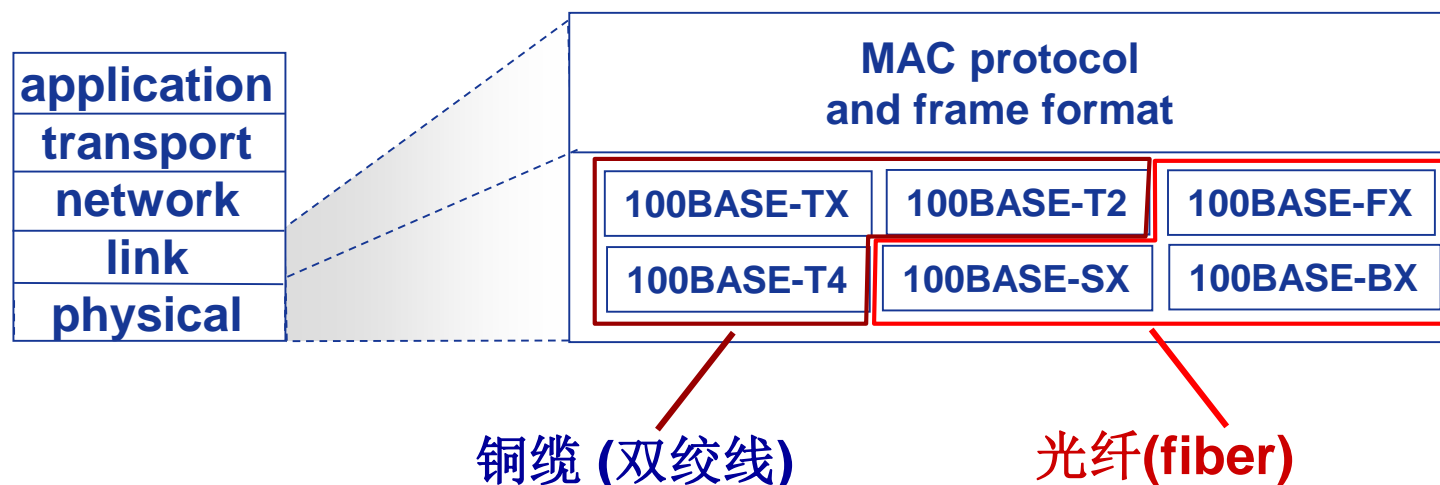
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 许多不同的以太网标准

- 相同的MAC协议和帧格式
- 不同速率: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps, 40Gbps
- 不同物理介质: 光纤, 线缆
- 100Base-T: 快速以太网





5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ gigabit Ethernet( IEEE 802.3ab, 1998 )

- 100Mbps → 1000Mbps( 1Gbps )
- 保留原来的工作方式（帧格式、接口、过程规则）
- 全双工和半双工两种方式工作。
  - 在半双工方式下使用 CSMA/CD（为了向后兼容），增加载波扩充和帧突发
  - 全双工方式不需要使用CSMA/CD（缺省方式）

名称	线缆	最大长度	编码方式	优点
1000Base-SX	光纤	550米	8b/10b	多模光纤（50、62.5微米）
1000Base-LX	光纤	5000米	8b/10b	单模光纤（10微米） 或多模光纤（50、62.5微米）
1000Base-CX	2对STP	25米	8b/10b	屏蔽双绞线
1000Base-T	2对UTP	100米	4D-PAM5	标准5类UTP





# 万兆以太网

- 5.1 数据链路层基本服务
- 5.2 差错检测与纠正
- 5.3 可靠数据传输原理
- 5.4 多路访问控制协议

## 5.5 局域网技术

### ❖ 10-Gigabit Ethernet( IEEE 802.3ae, 2002 )

- 1Gbps → 10Gbps
- 常记为10GE, 10GbE 或 10 GigE
- 只支持全双工，不再使用CSMA/CD
- 保持兼容性
- 重点是超高速的物理层



10GBASE-SR SFP +收发器

名称	线缆	最大长度	编码方式	优点
10GBase-SR	光纤	最多300米	64b/66b	多模光纤（0.85微米）
10GBase-LR	光纤	10千米	64b/66b	单模光纤（1.3微米）
10GBase-ER	光纤	40千米	64b/66b	单模光纤（1.5微米）
10GBase-CX4	4对双轴	15米	8b/10b	双轴铜缆
10GBase-T	4对UTP	100米	64b/65b	6a类UTP



# 40G-100G以太网

## 5.1 数据链路层基本服务

## 5.2 差错检测与纠正

### 5.3 可靠数据传输原理

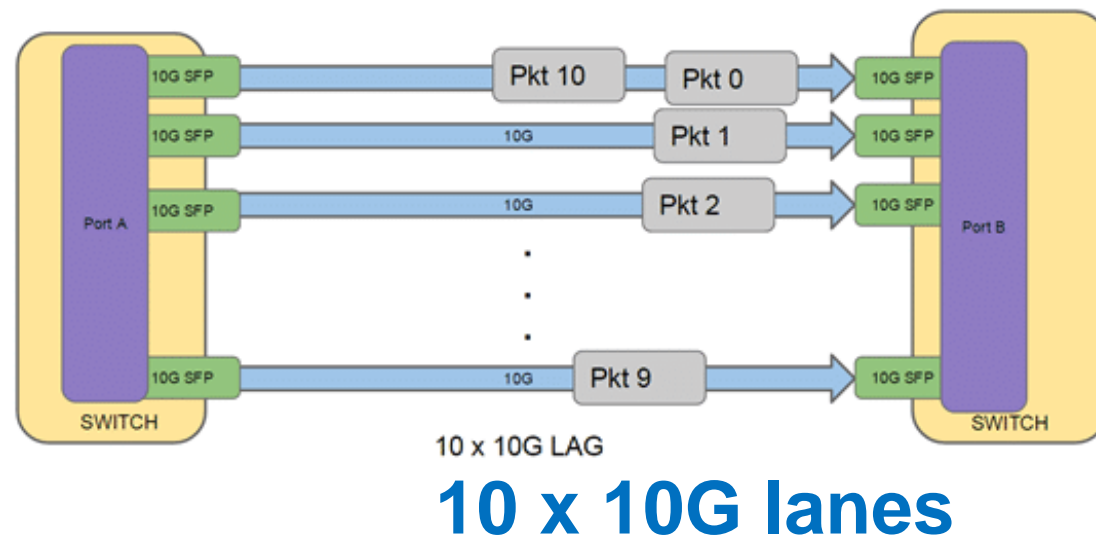
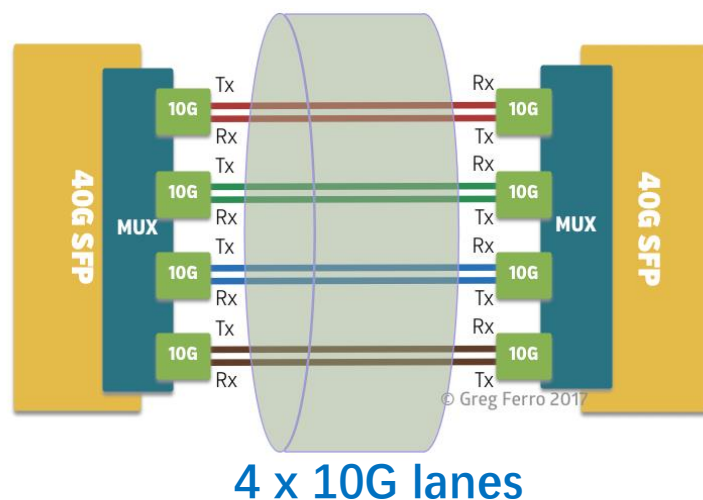
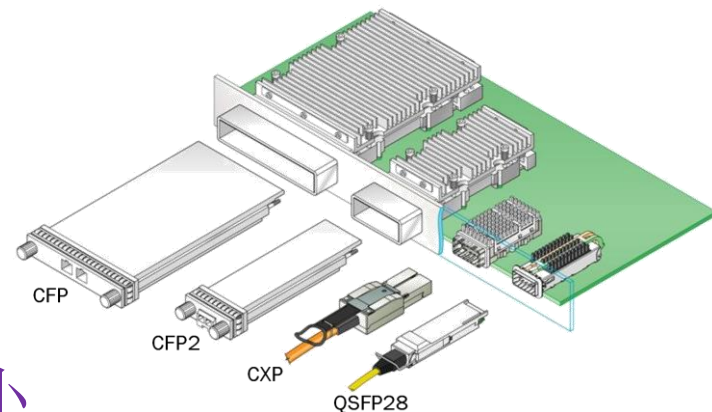
## 5.4 多路访问控制协议

## 5.5 局域网技术



❖ 40 Gigabit Ethernet (40GbE) and 100 Gigabit Ethernet (100GbE), 2010

- 10Gbps → 40Gbps & 100Gbps
  - 只支持全双工
  - 保留以太网帧格式和MAC方法
  - 保留当前802.3标准的最小帧和最大帧大小
  - 联网设备可以通过可插拔模块支持不同的物理层类型
- 
- A diagram showing three types of network modules: CFP (Compact Form-factor Pluggable), CFP2, and CXP (Compact Form-factor Pluggable 2). The CFP module is a long, thin, rectangular module with a single connector. The CFP2 module is a similar module but with a different connector. The CXP module is a shorter, wider module with a different connector. The diagram illustrates the physical layer types supported by the network equipment.





# 40G-100G以太网

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 40 Gigabit Ethernet (40GbE) and 100 Gigabit Ethernet (100GbE), 2010

- 40/100 GbE提供多种物理层规范 (PHY) , 定义了许多端口类型, 具有不同的光学和电气接口, 以便在单模光纤、多模光纤、双芯铜缆、双绞线和网络设备背板上运行。

名称	最大长度	40G以太网	100G以太网
改进的背板	1米	40GBASE-KR4	100GBASE-KR4 100GBASE-KR2
双芯铜缆	7米	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10 100GBASE-CR4 100GBASE-CR2
8类双绞线	30米	40GBASE-T	-
多模光纤	100米/OM3, 125米/OM4	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10 100GBASE-SR4 100GBASE-SR2
单模光纤	500米	-	100GBASE-DR
单模光纤	2千米	40GBASE-FR	100GBASE-FR1
单模光纤	10千米	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4 100GBASE-LR1
单模光纤	40千米	40GBASE-ER4	100GBASE-ER4
单模光纤	80千米	-	100GBASE-ZR



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

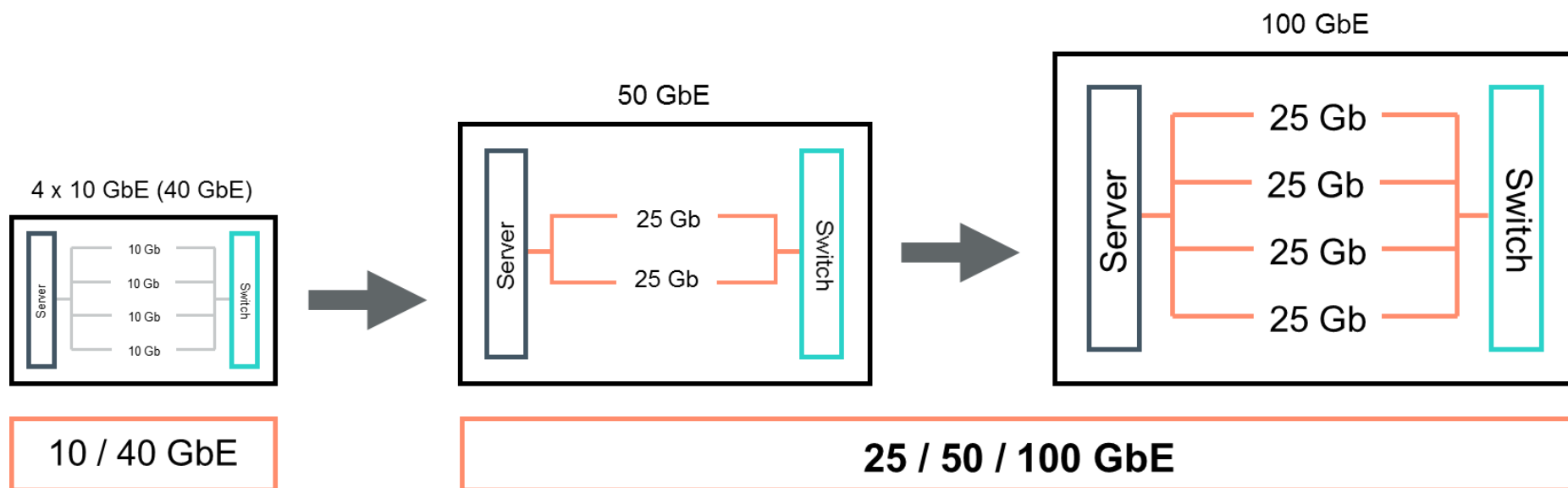
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 25/50G和第二代100G以太网

- 25G以太网标准 (IEEE 802.3by) 是由IEEE和IEEE-SA于2014年发布, 该标准弥补了10G以太网的低带宽和40G以太网的高成本缺陷。25G以太网采用了25Gb/s单通道物理层技术, 可基于4个25Gbps光纤通道实现100G传输。







# 以太网的未来

5.1 数据链路层基本服务

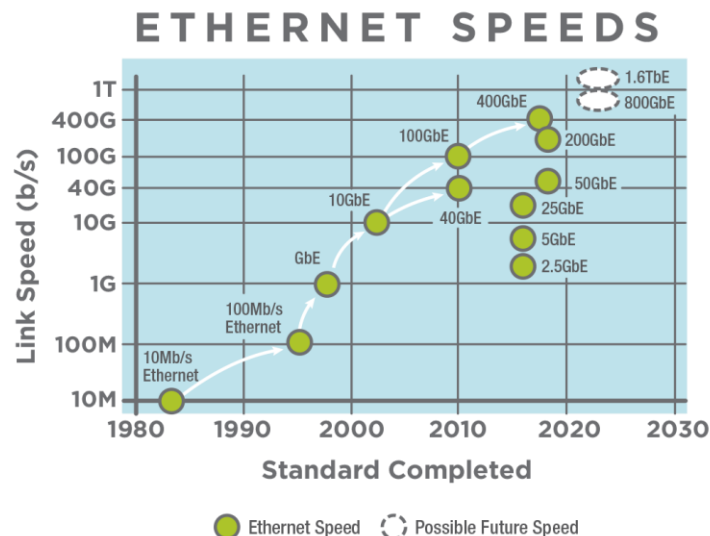
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

- ❖ 2017年，由IEEE P802.3bs工作组使用与100GbE大致相似的技术开发的**400GbE**和**200GbE**标准获得批准。
  - 保留以太网帧格式
  - 保留以太网最小帧长和最大帧长
- ❖ 2020年，以太网技术联盟（Ethernet Technology Consortium）宣布开发**800G以太网**规范，以满足数据中心网络不断增长的性能需求。
- ❖ 以太网联盟的2020技术路线图预计2020年-2030年之间，**800Gbps**和**1.6Tbps**的速度将成为IEEE标准。





# 以太网交换机(switch)

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 链路层设备

- 存储-转发以太网帧
- 检验到达帧的目的MAC地址，选择性(selectively) 向一个或多个输出链路转发帧
- 利用CSMA/CD访问链路，发送帧

## ❖ 透明(transparent)

- 主机感知不到交换机的存在

## ❖ 即插即用(plug-and-play)

## ❖ 自学习(self-learning)

- 交换机无需配置







# 交换机：多端口间同时传输

5.1 数据链路层基本服务

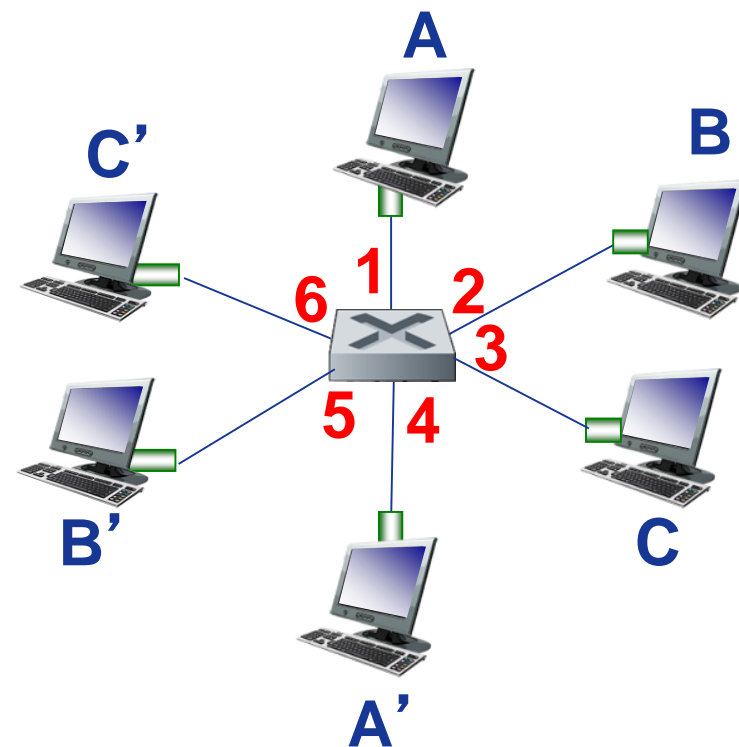
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

- ❖ 主机利用独享(dedicated)链路直接连接交换机
- ❖ 交换机缓存帧
- ❖ 交换机在每段链路上利用CSMA/CD收发帧，但无冲突，且可以全双工
  - 每段链路一个独立的冲突域
- ❖ 交换(switching): A-A' 与 B-B' 的传输可以同时进行，没有冲突



6个接口交换机  
(1,2,3,4,5,6)





# 交换机转发表：交换表

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

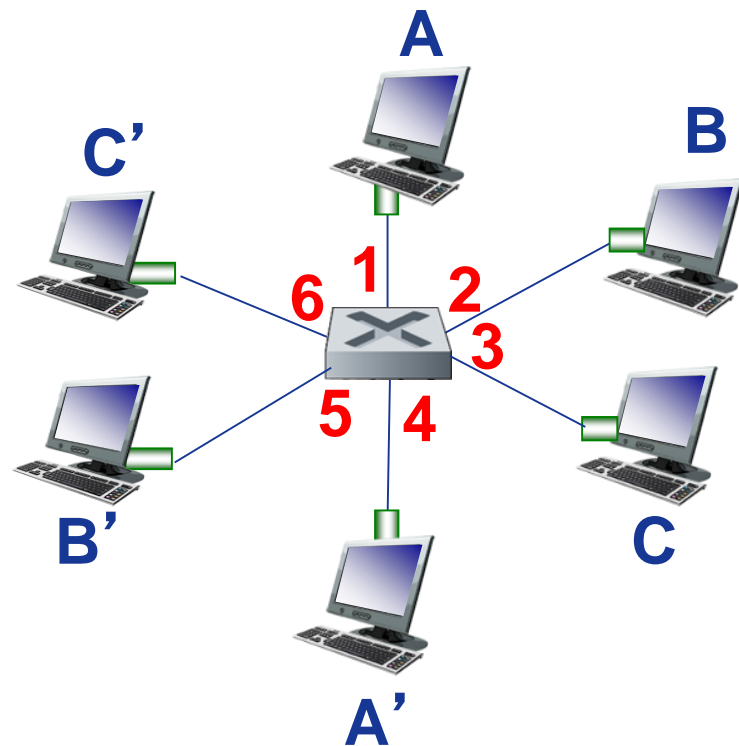
Q: 交换机怎么知道A' 可以通过接口4到达，而B' 可以通过接口5到达？

❖ A: 每个交换机有一个**交换表**  
(**switch table**), 每个入口(**entry**):

- (主机的**MAC**地址, 到达主机的接口, 时间戳)
- 看起来很像路由表!

❖ Q: 交换表入口信息如何创建和维护？

- 类似于路由协议？



6个接口交换机  
(1,2,3,4,5,6)



5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

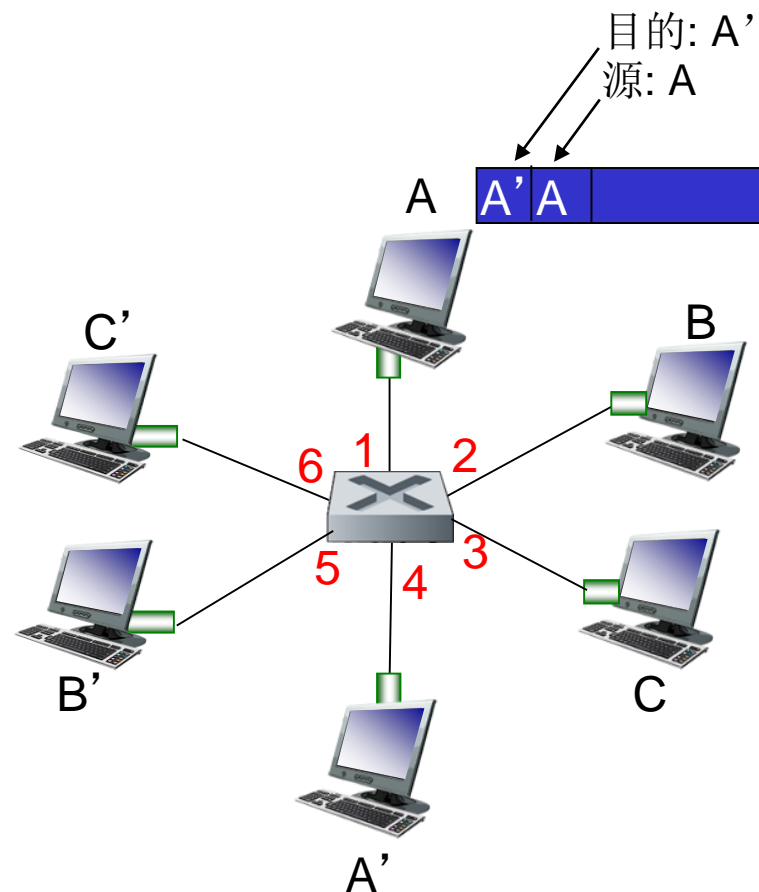
5.5 局域网技术

## ❖ 交换机通过自学习，获知到达主机的接口信息

- 当收到帧时，交换机“学习”到发送帧的主机（通过帧的源MAC地址），位于收到该帧的接口所连接的LAN网段
- 将发送主机MAC地址/接口信息记录到交换表中

交换表  
(初始为空)

MAC地址	接口	TTL
A	1	60





# 交换机：帧过滤/转发

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**

当交换机收到帧：

1. 记录帧的源MAC地址与输入链路接口

2. 利用目的MAC地址检索交换表

5. if 在交换表中检索到与目的MAC地址匹配的入口(entry)

then {

if 目的主机位于收到帧的网段

then 丢弃帧

else 将帧转发到该入口指向的接口

}

else 泛洪(flood) /\* 向除收到该帧的接口之外的所有接口转发 \*/





# 自学习与转发过程举例

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

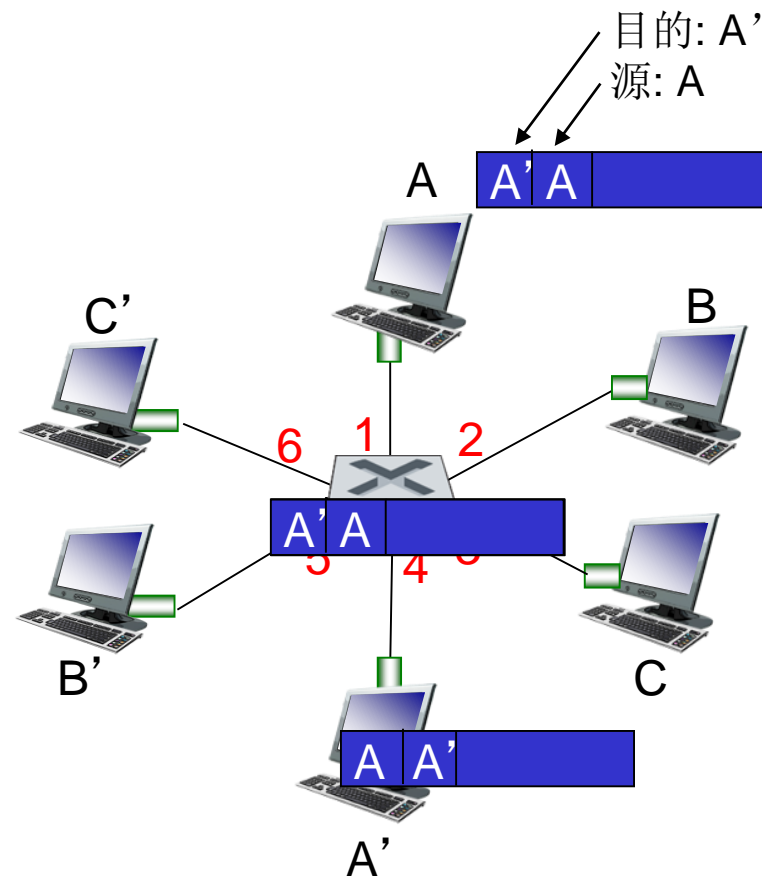
5.5 局域网技术

❖ 目的MAC地址A'，位置未知：  
泛洪

❖ 目的MAC地址A，位置已知：  
选择性转发

交换表  
(初始为空)

MAC地址	接口	TTL
A	1	60
A'	4	60







# 交换机互联

5.1 数据链路层基本服务

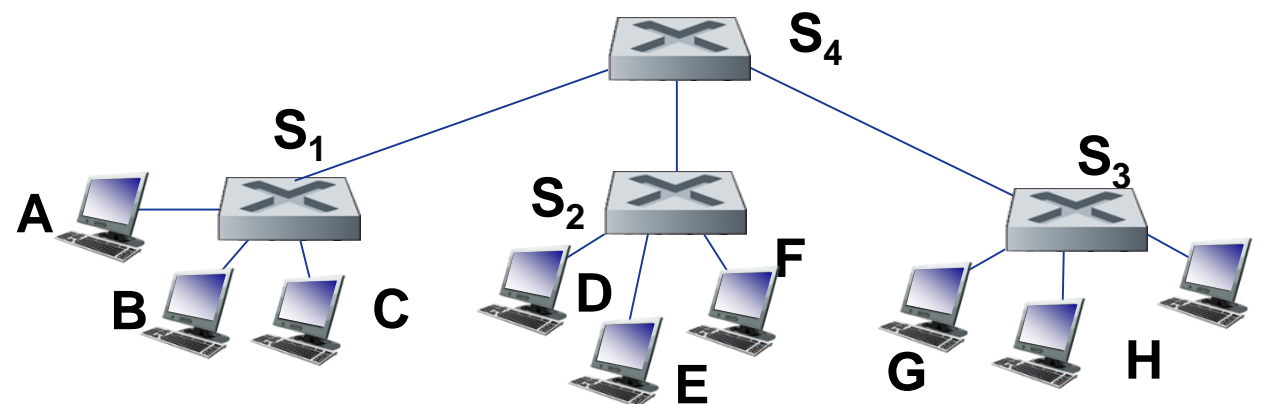
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 交换机可以互联



**Q:** 当A向G发送帧时， $S_1$ 怎么知道通过 $S_4$ 转发？ $S_4$ 又怎么知道通过 $S_3$ 转发？

**A:** 自学习！（工作过程与单一交换机情形相同！）





# 交换机的交换模式

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 存储转发模式 (Store and Forward)

- 默认模式

## ❖ 直通模式 (Cut-through)

- 边收边发
- 接收到帧的目的地址，即开始转发

## ❖ 无碎片模式 (Fragment-free)

- 接收到帧的前64字节，即开始转发





# 组织机构(Institutional)网络

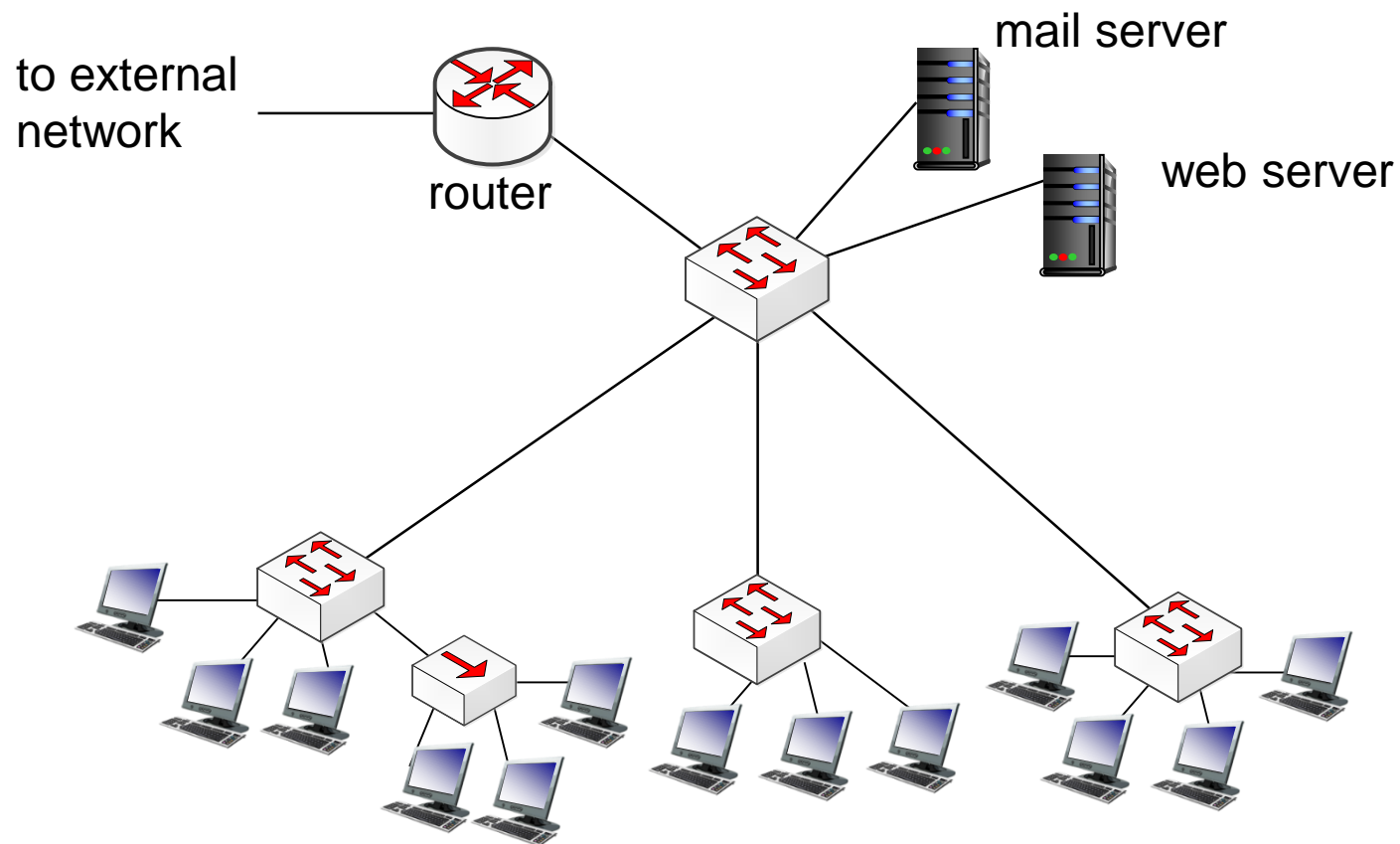
5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**





# 组织机构(Institutional)网络

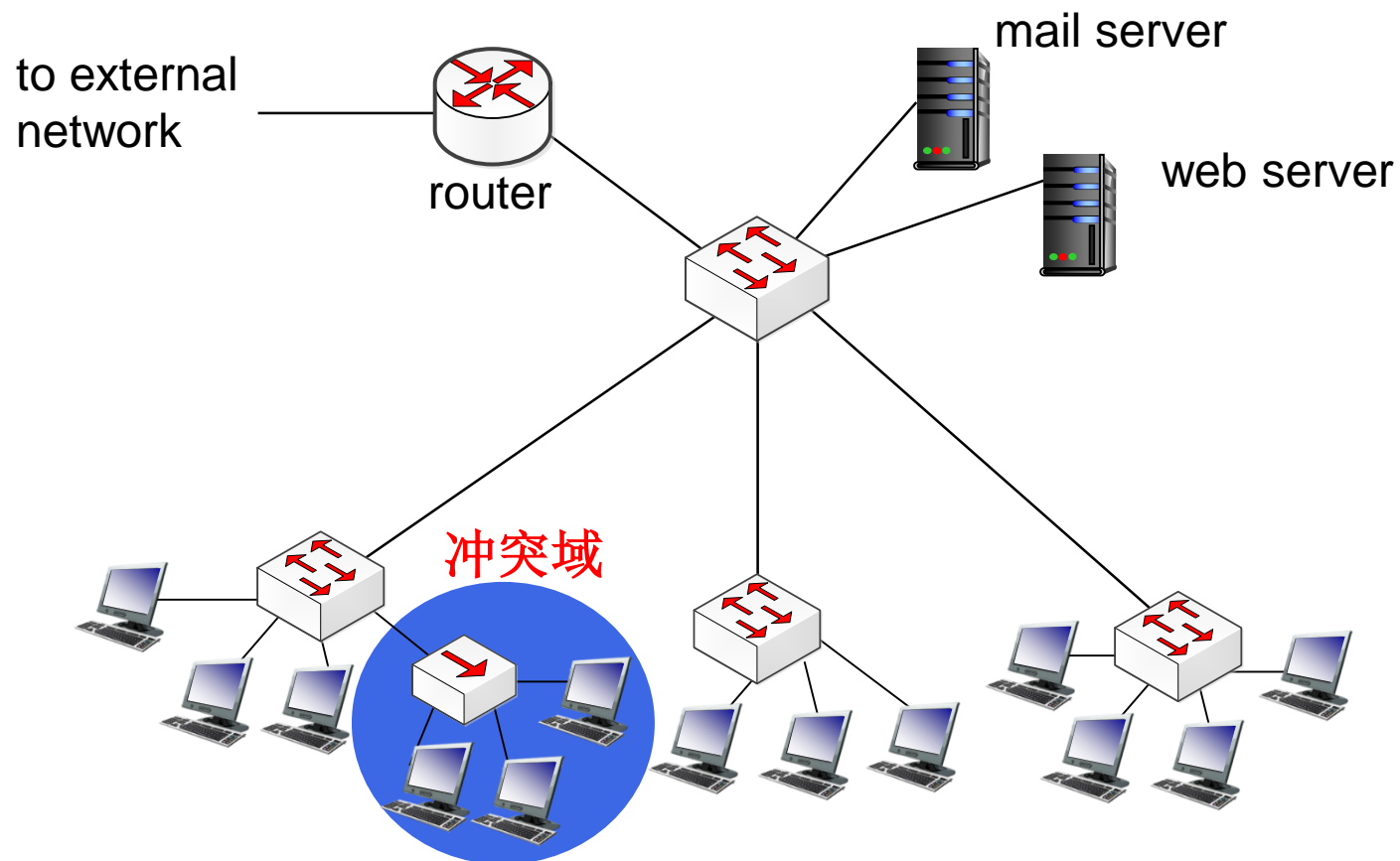
5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**







# 组织机构(Institutional)网络

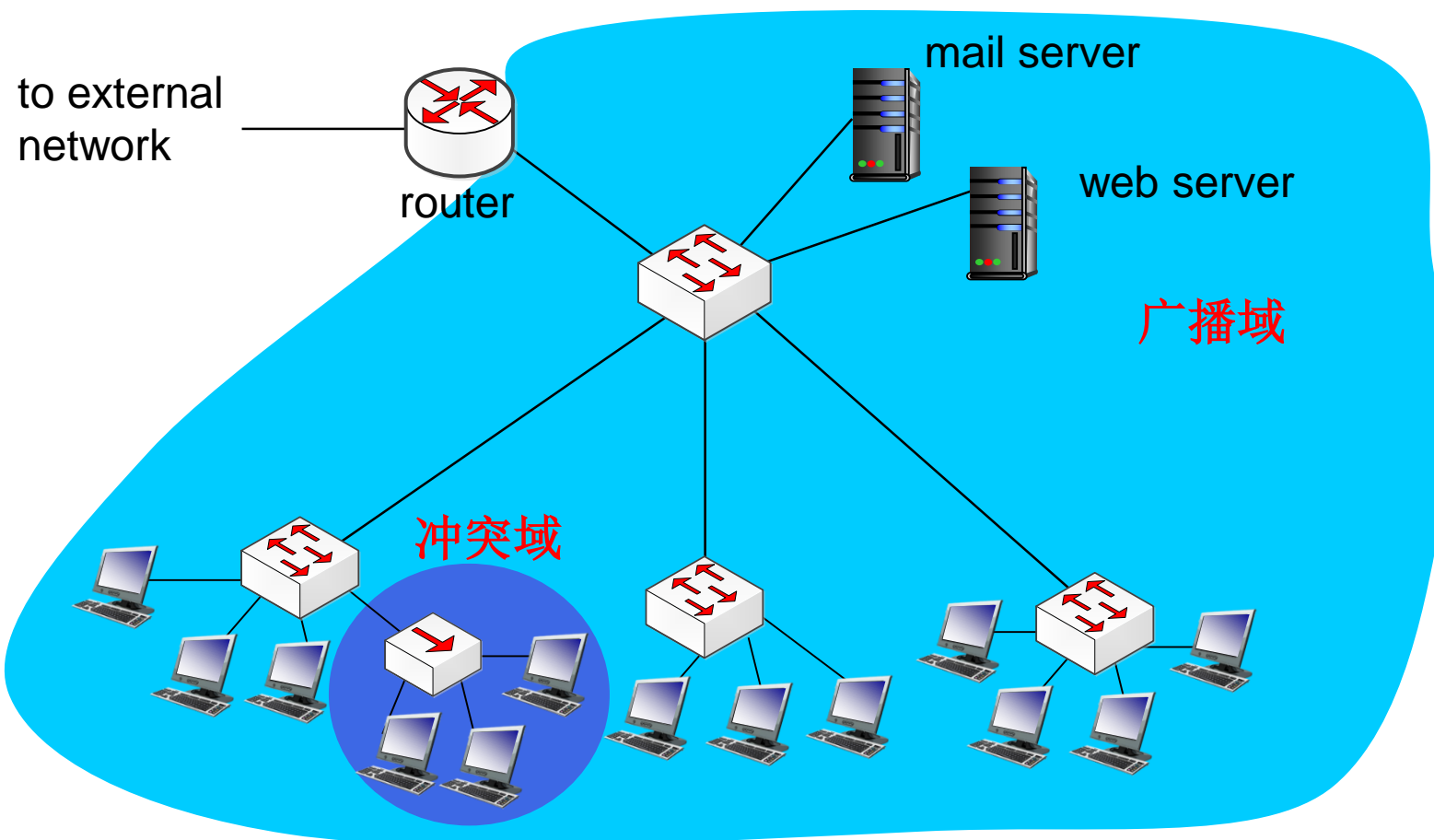
5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**





# 链路层设备 VS 物理层设备

- 5.1 数据链路层基本服务
- 5.2 差错检测与纠正
- 5.3 可靠数据传输原理
- 5.4 多路访问控制协议

## 5.5 局域网技术

	集线器 (hub)	交换机 (switch)	网桥 (bridge)
层次	1	2	2
流量(冲突域) 隔离	no	yes	yes
广播域隔离	no	no	no
即插即用	yes	yes	yes
优化路由	no	no	no
直通传输 (Cut through)	yes	yes	yes

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**



对于100 Mbps的以太网交换机，当输出端口无排队，以直通交换（cut-through switching）方式转发一个以太网帧（不包括前导码）时，引入的转发延迟至少是

- ☐ A 0  $\mu\text{s}$
- ☒ B 0.48  $\mu\text{s}$
- ☐ C 5.12  $\mu\text{s}$
- ☐ D 121.44  $\mu\text{s}$

提交



# VLANs: 动机

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

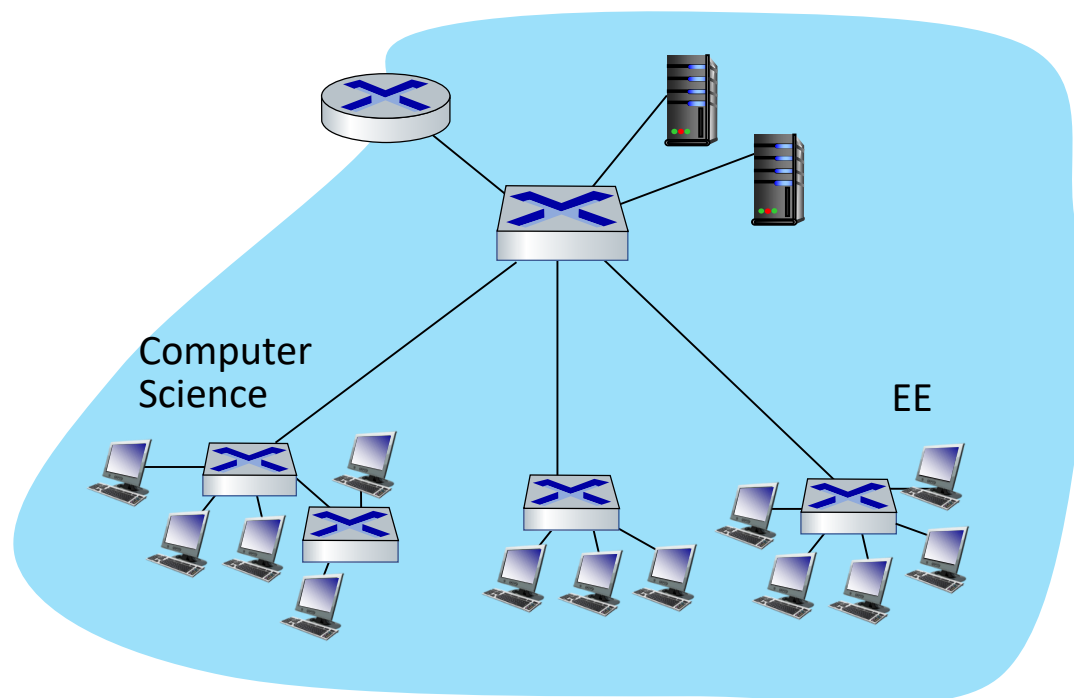
5.4 多路访问控制协议

**5.5 局域网技术**

**Q: 在较大规模的局域网中, 用户改变接入点时, 会发生什么问题?**

❖ 单一广播域:

- 所有第2层广播流量(ARP, DHCP, 未知目的MAC地址位置)必须穿越整个LAN
- 安全/隐私、效率问题





# VLANs: 动机

5.1 数据链路层基本服务

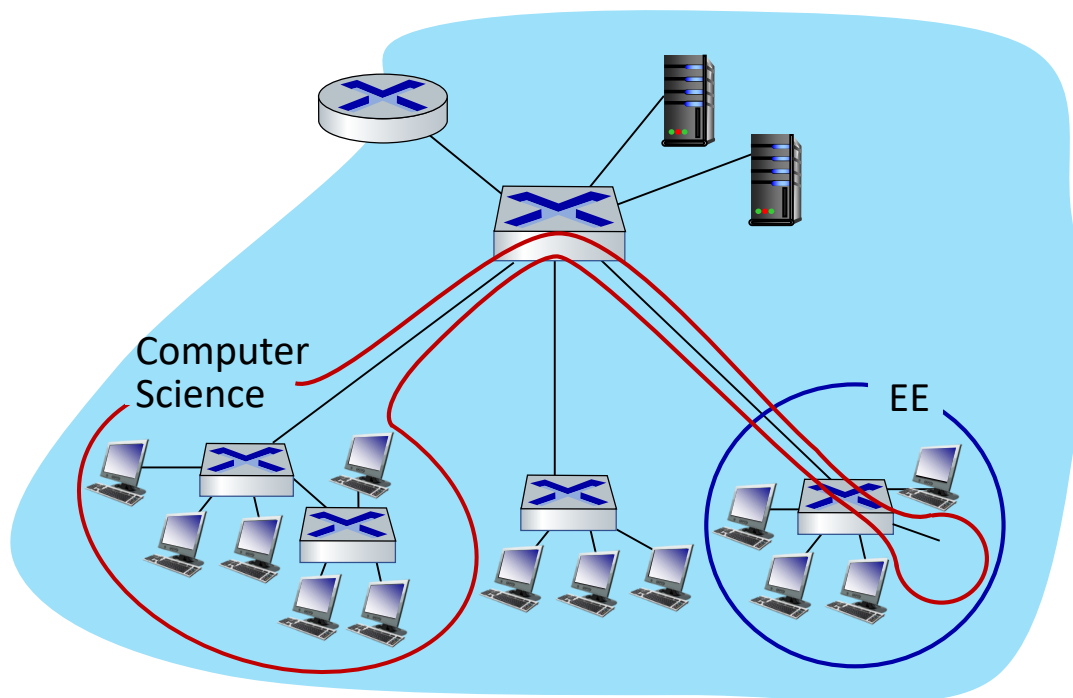
5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

**Q: 在较大规模的局域网中, 用户改变接入点时, 会发生什么问题?**



## ❖ 单一广播域:

- 所有第2层广播流量(ARP, DHCP, 未知目的MAC地址位置)必须穿越整个LAN
- 安全/隐私、效率问题

## ❖ 管理问题:

- CS user moves office to EE - *physically* attached to EE switch, but wants to remain *logically* attached to CS switch





# VLANs

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

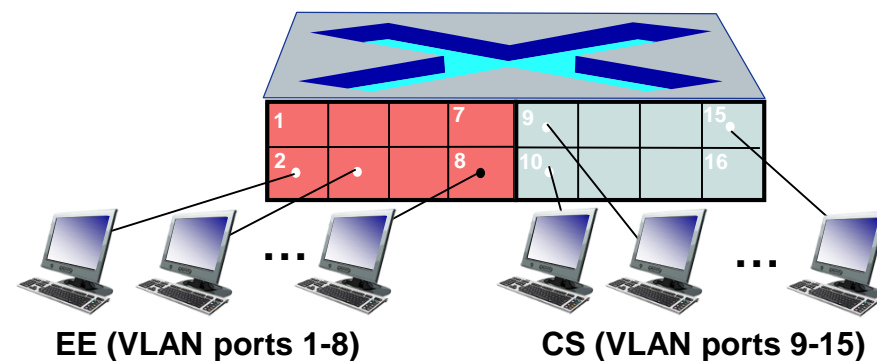
5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

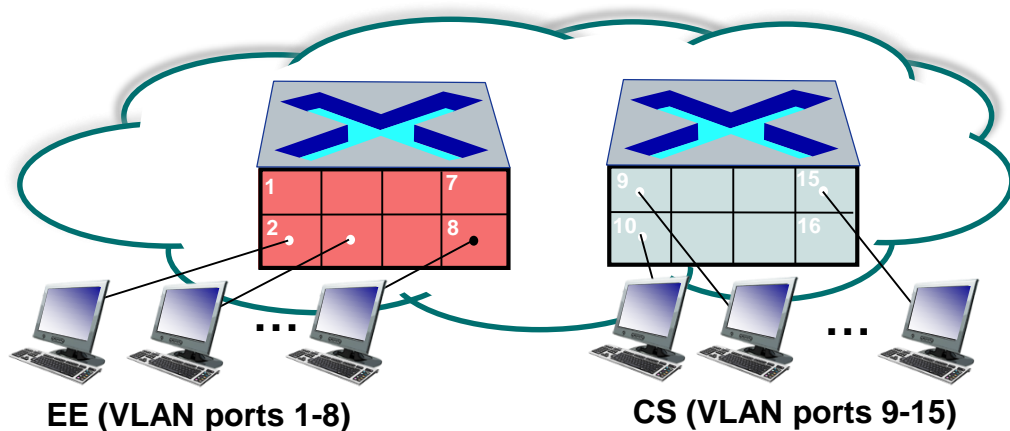
## 虚拟局域网(Virtual Local Area Network)

支持VLAN划分的交换机，可以在一个物理LAN架构上配置、定义多个VLAN

基于端口的VLAN: 分组交换机端口 (通过交换机管理软件), 于是, 单一的物理交换机 .....



...就像多个虚拟交换机一样运行



# 基于端口的VLAN

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

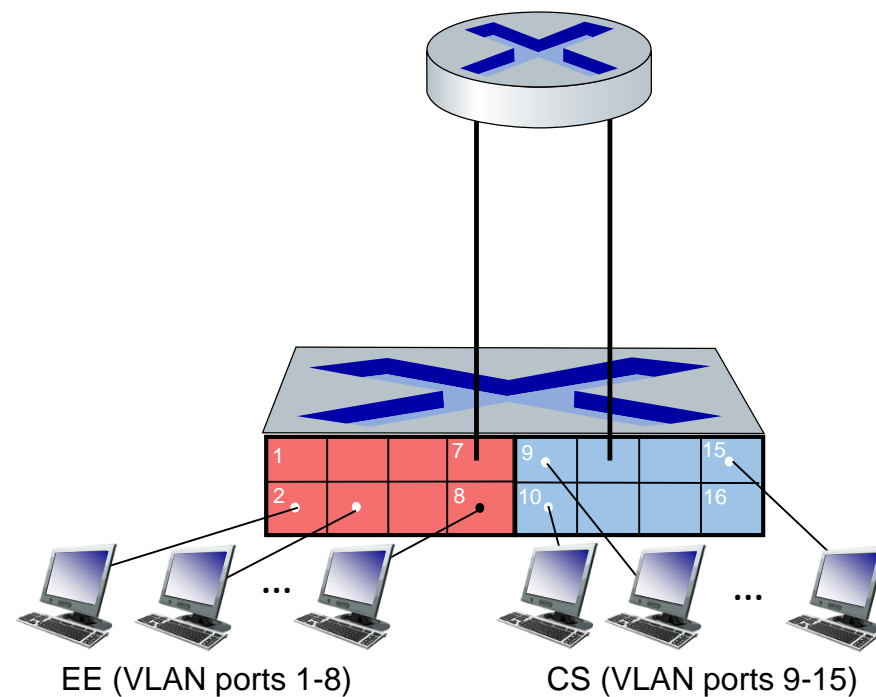
5.5 局域网技术

❖ **流量隔离(traffic isolation):** 去往/来自端口1-8的帧只到达端口1-8

- 也可以基于MAC地址定义VLAN, 而不是交换端口

❖ **动态成员:** 端口可以动态分配给不同VLAN

❖ **在VLAN间转发:** 通过路由(就像在独立的交换机之间)  
实践中, 厂家会将交换机与路由器集成在一起





# 跨越多交换机的VLAN

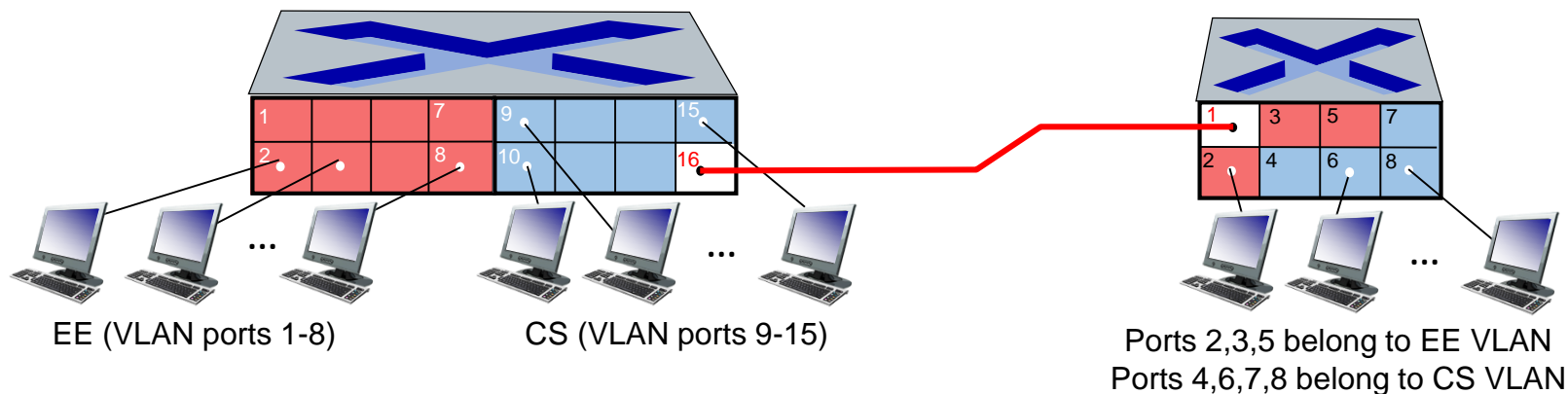
5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

## 5.5 局域网技术



### ❖ 多线缆连接

- 每个线缆连接一个VLAN

### ❖ 中继端口(trunk port): 在跨越多个物理交换机定义的VLAN承载帧

- 为多VLAN转发802.1帧容易产生歧义 (必须携带VLAN ID信息)
- 802.1q协议为经过中继端口转发的帧增加/去除额外的首部域







# 802.1Q VLAN帧格式

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

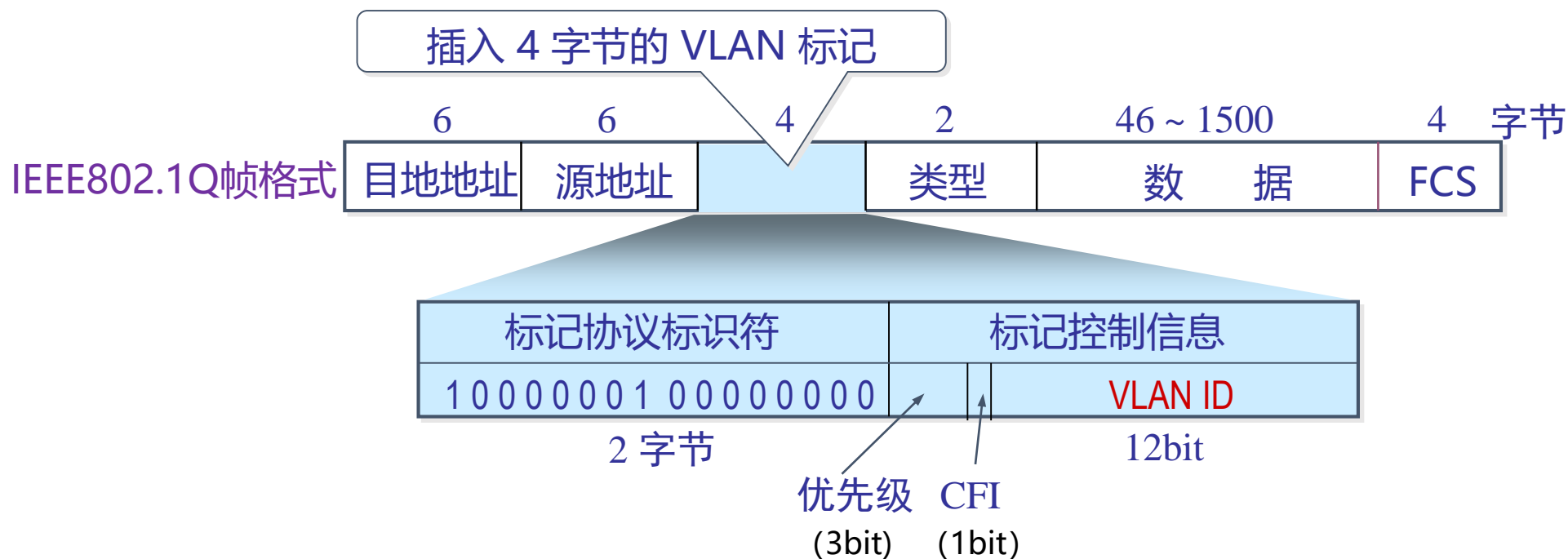
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 帧标记标准：IEEE802.1Q

- 带VLAN标记的帧称为**标记帧**（Tagged Frame）
- 普通以太网帧称为**无标记帧**（Untagged Frame）





# 其他VLAN划分方法

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

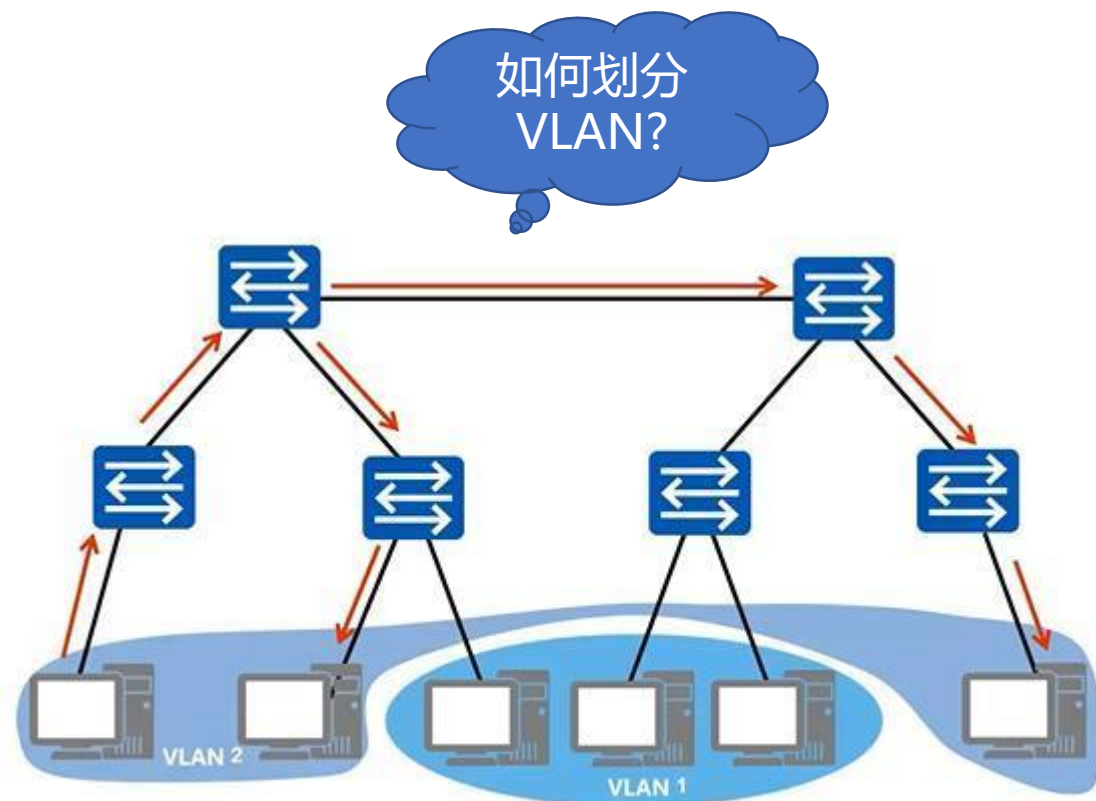
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

## ❖ 其他VLAN划分方法？

- 基于MAC地址的VLAN
- 基于协议的VLAN
- 基于子网的VLAN

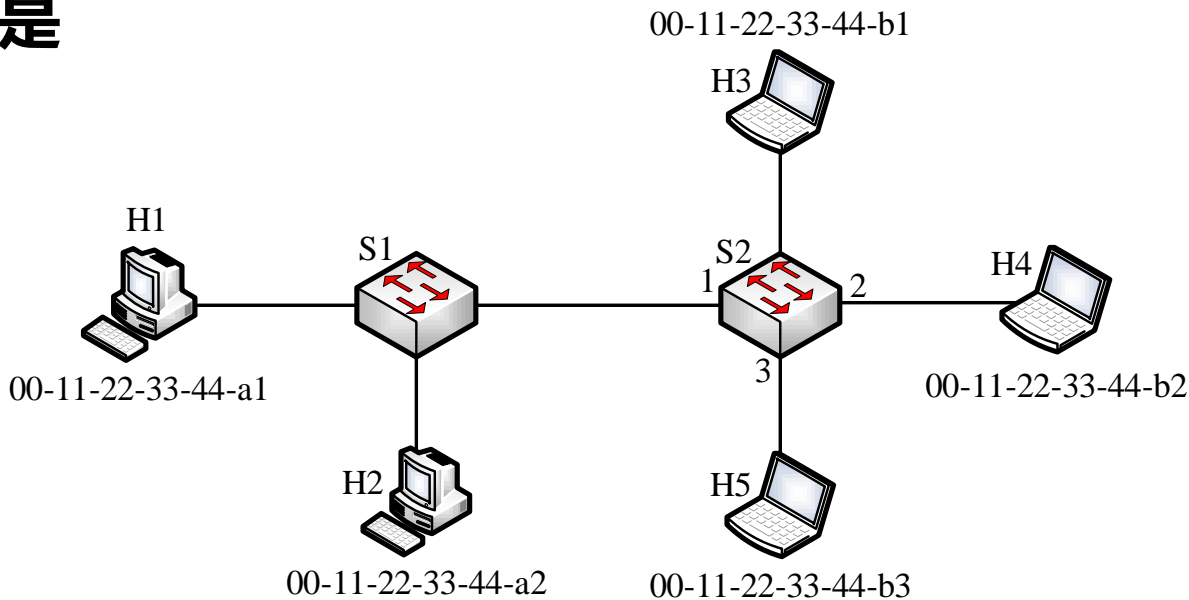


- 5.1 数据链路层基本服务
- 5.2 差错检测与纠正
- 5.3 可靠数据传输原理
- 5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术



某以太网拓扑如下图所示，S1、S2为以太网交换机，S1当前转发表如下表所示，S2当前转发表为空。若主机H5向主机H1发送1个帧，且此时主机H1~H4均在进行网络嗅探（sniffing），则能够接收到该帧的主机是



S1当前转发表

目的MAC地址	端口
00-11-22-33-44-a1	1

- A

{H1}
- B

{ H1, H2}
- C

{ H1, H3, H4}
- D

{ H1, H2, H3, H4}

提交



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.6 PPP协议

詹东阳





# 点对点数据链路控制

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

❖ 一个发送端，一个接收端，一条链路：比广播链路容易

- 无需介质访问控制(Media Access Control)
- 无需明确的MAC寻址
- e.g., 拨号链路, ISDN链路

❖ 常见的点对点数据链路控制协议：

- HDLC: High Level Data Link Control
- PPP (Point-to-Point Protocol)





# PPP协议简介

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

**5.6 PPP协议**

- ❖ PPP (Point-to-Point Protocol)协议由IETF制定，1994年成为正式标准（RFC1661）
- ❖ PPP协议是目前使用最多的数据链路层协议之一
- ❖ 能够在不同的链路上运行
- ❖ 能够承载不同的网络层分组
- ❖ 特点：简单、灵活





# PPP设计需求

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

❖ **组帧**：将网络层数据报封装到数据链路层帧中

- 可以同时承载任何网络层协议分组(**不仅IP数据报**)
- 可以向上层实现分用（多路分解）

❖ **比特透明传输**：数据域必须支持承载任何比特模式

- 异步传输时：字节填充
- 同步传输时：零比特填充

❖ **差错检测**：(无纠正)

❖ **连接活性(connection liveness)检测**：检测、并向网络层通知链路状态

❖ **网络层地址协商**：端结点可以学习/配置彼此网络地址





# PPP无需支持的功能

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

**5.6 PPP协议**

- ❖ 无需差错纠正/恢复
- ❖ 无需流量控制
- ❖ 不存在乱序交付
- ❖ 无需支持多点链路

**差错恢复、流量控制等由高层协议处理！**





# PPP数据帧

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

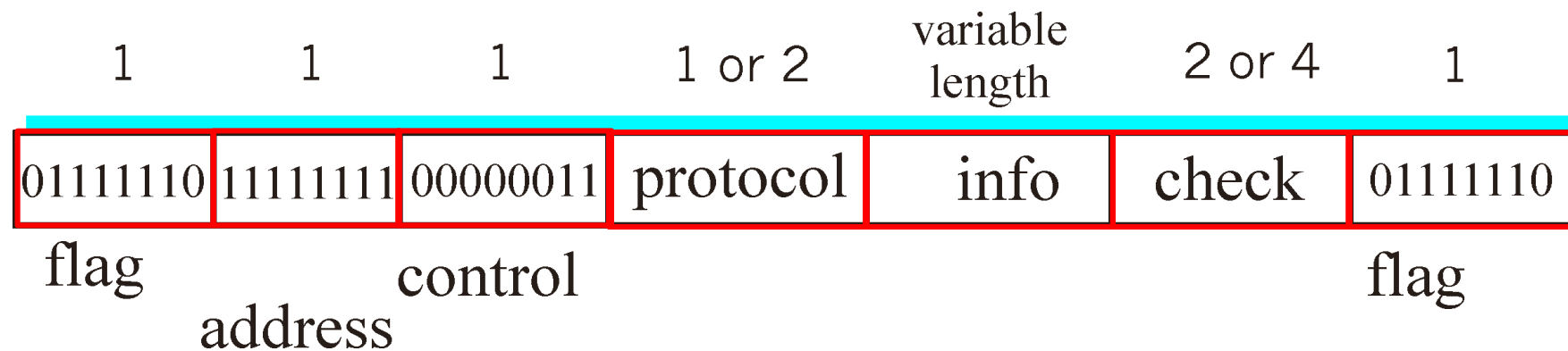
5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

- ❖ **标志(Flag):** 定界符(delimiter)
- ❖ **地址(Address):** 无效(仅仅是一个选项)
- ❖ **控制(Control):** 无效; 未来可能的多种控制域
- ❖ **协议(Protocol):** 上层协议 (eg, PPP-LCP, IP, IPCP, etc)
- ❖ **信息(info):** 上层协议分组数据
- ❖ **校验(check):** CRC校验, 用于差错检测





# PPP协议的透明传输

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

❖ 数据域必须允许包含标志模式<01111110> (0x7E)

■ Q: 如何判断该作为数据接收, 还是作为标志处理?

❖ 异步传输时: 字节填充(Byte Stuffing)

■ 转义字符: 0x7D

■ 将信息字段中出现的0x7E 字节转变成成为2字节序列(0x7D, 0x5E)

■ 若信息字段中出现一个0x7D 字节, 则将其转变成成为2字节序列(0x7D, 0x5D)

■ 若信息字段中出现 ASCII 码的控制字符 (即数值小于 0x20 的字符), 则在该字符前面要加入一个 0x7D 字节, 同时将该字符的编码加以改变





# PPP协议的透明传输

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

## ❖ 同步传输时：零比特填充

- 采用比特填充方法来实现透明传输
- 信息字段中出现了和标志字段 F 完全一样的 8 比特组合 (0x7E)
- 发送端在 5 个连 1 之后填入 0 比特再发送出去；
- 在接收端把 5 个连 1 之后的 0 比特删除

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0

会被误认为是标志字段 F

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

发送端填入 0 比特

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

接收端删除填入的 0 比特

# PPP数据控制协议

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

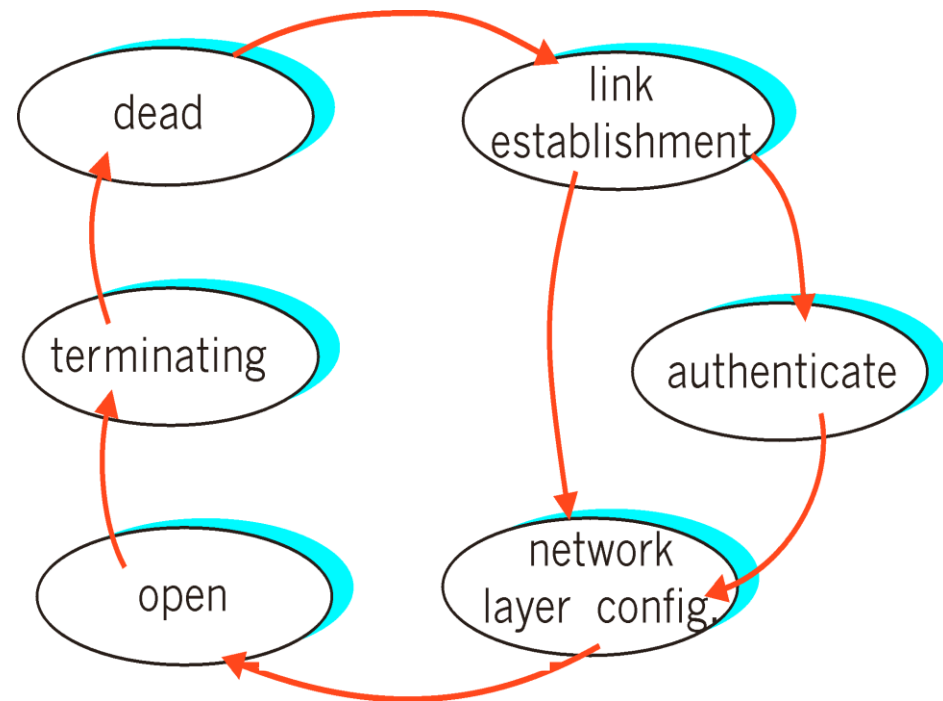
在交换网络层数据之前，  
PPP数据链路两端必须：

## ❖ 配置PPP链路

- 最大帧长
- 身份认证(authentication)
- etc.

## ❖ 学习/配置网络层信息

- 对于IP协议：通过交换IPCP协议 (IP Control Protocol ) 报文 (IP分组首部的“上层协议”字段取值：8021)，完成IP地址等相关信息配置







# PPPoE概述

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

## ❖ Ethernet优点

- 原理简单，应用非常广，设备成本低

## ❖ Ethernet缺点

- 安全性较低、不宜管理：使用广播信道，造成了安全性较低，无认证功能

## ❖ PPP优点

- 原理简单
- 安全性高：点对点信道，提供认证机制
- 提供良好的访问控制和计费功能





# PPPoE概述

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

## ❖ PPPoE (Point-to-Point Protocol over Ethernet)

- 提供在以太网链路上的PPP连接
- 实现了传统以太网不能提供的身份验证、加密，以及压缩等功能
- 实现基于用户的访问控制、计费、业务类型分类等，运营商广泛支持
- PPPoE使用Client/Server模型，服务器通常是接入服务器



# PPPoE组网方式

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

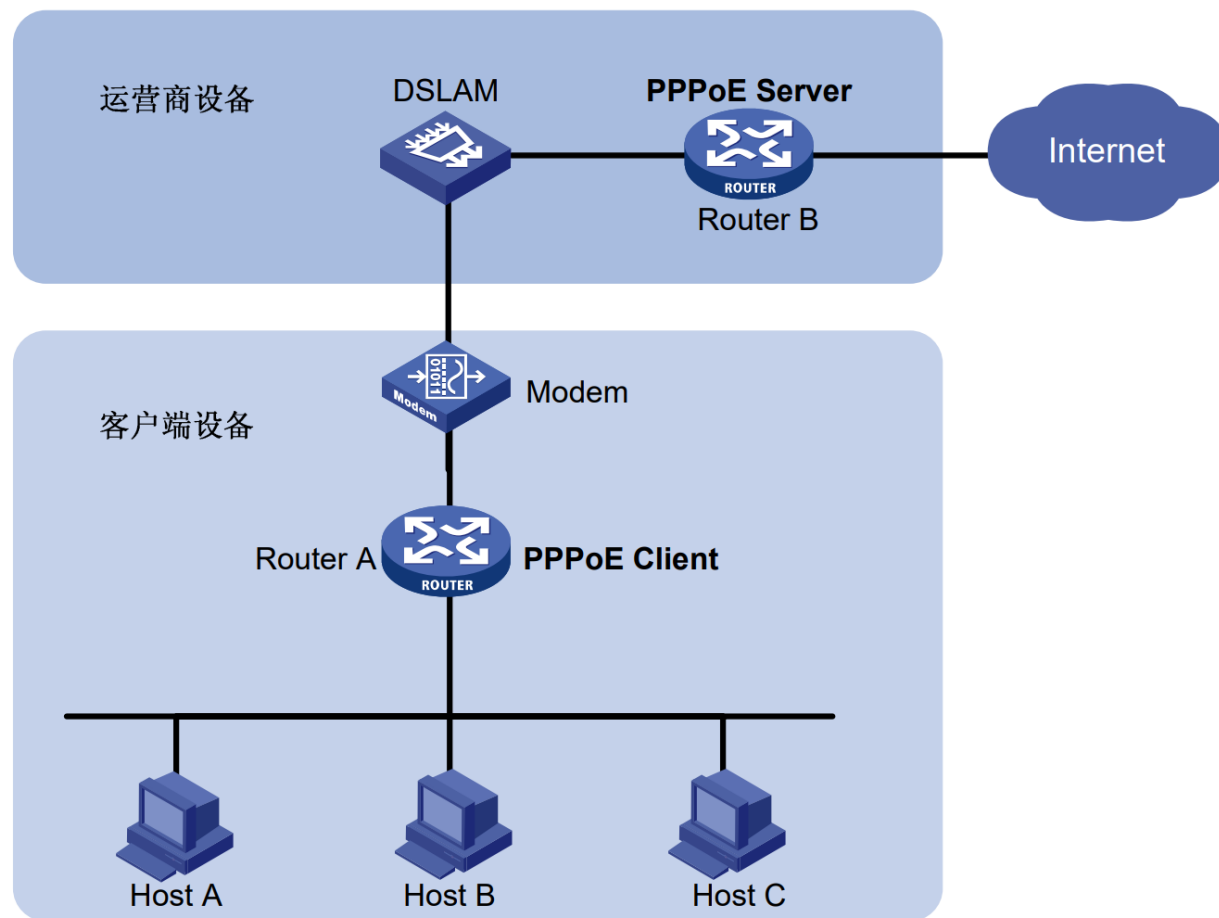
5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

## ❖ 组网方式1

- 设备之间建立 PPP 会话，所有主机通过同一个 PPP 会话传送数据，主机上不用安装 PPPoE 客户端拨号软件，一般是一个机构共用一个账号
- PPPoE Client 位于机构内
- PPPoE Server 是运营商的设备





# PPPoE组网方式

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

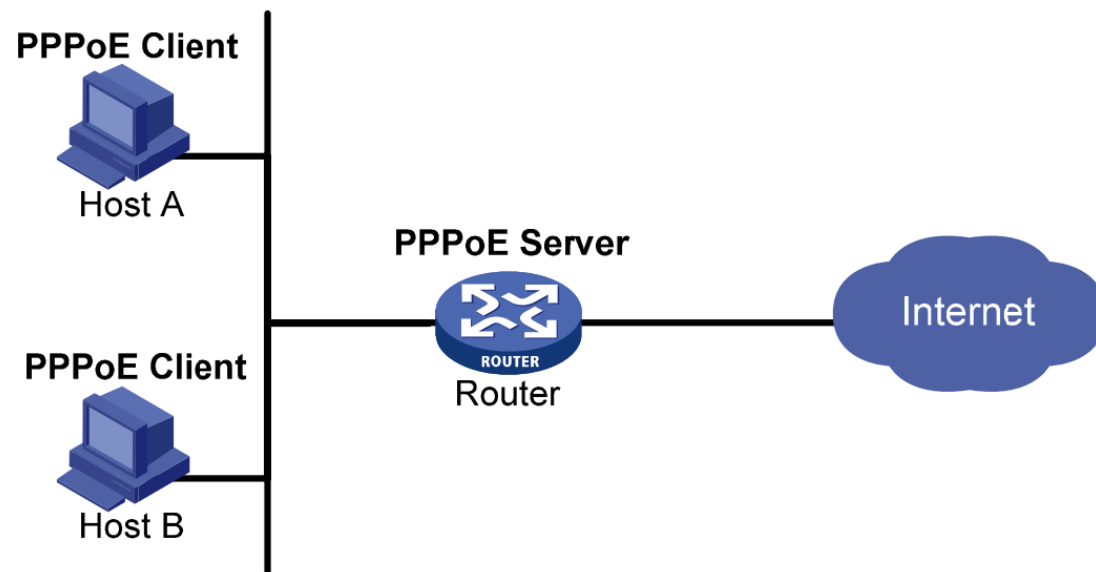
5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

## ❖ 组网方式2

- PPP 会话建立在主机和运营商的路由器之间，为每一个主机建立一个 PPP 会话，每个主机都是 PPPoE Client，每个主机有一个帐号，方便运营商对用户进行计费和控制
- 主机上需要安装PPPoE客户端软件







# PPPoE工作过程

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

**5.6 PPP协议**

## ❖ PPPoE可分为三个阶段：

### ■ Discovery阶段

- 获取对方以太网地址，确定PPPoE会话ID

### ■ Session阶段

- PPP协商阶段
- PPP数据传输

### ■ Terminate阶段

- 会话建立以后的任意时刻，发送报文结束会话





哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



## 5.7 链路虚拟化

詹东阳



# Virtualization of networks

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

**5.7 链路虚拟化**

资源虚拟化：系统工程中一个强大的抽象概念：

❖ 计算实例：虚拟内存、虚拟设备

- Virtual machines: e.g., java

- IBM VM os from 1960's/70's

❖ 抽象分层：不关注下层的细节，只抽象处理下层





# Internet: 虚拟化网络

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

**5.7 链路虚拟化**

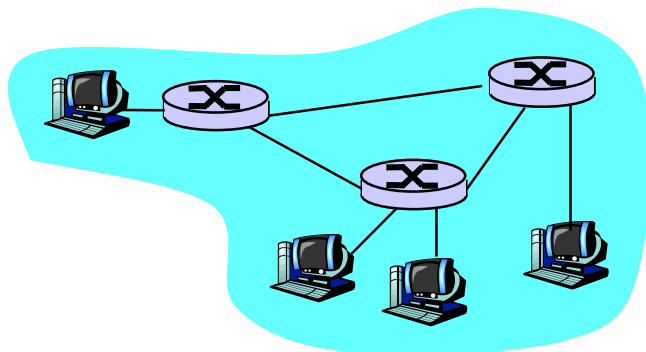


## 1974: 多种不相连的网络

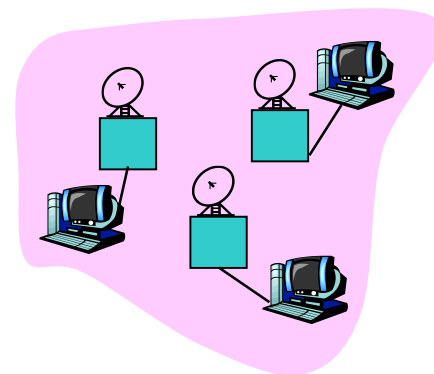
- ARPAnet
- data-over-cable networks
- packet satellite network (Aloha)
- packet radio network

... 不同的:

- addressing conventions
- packet formats
- error recovery
- routing



ARPAnet



satellite net

"A Protocol for Packet Network Intercommunication",  
V. Cerf, R. Kahn, IEEE Transactions on Communications,  
May, 1974, pp. 637-648.





# Internet: 虚拟化网络

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

5.7 链路虚拟化

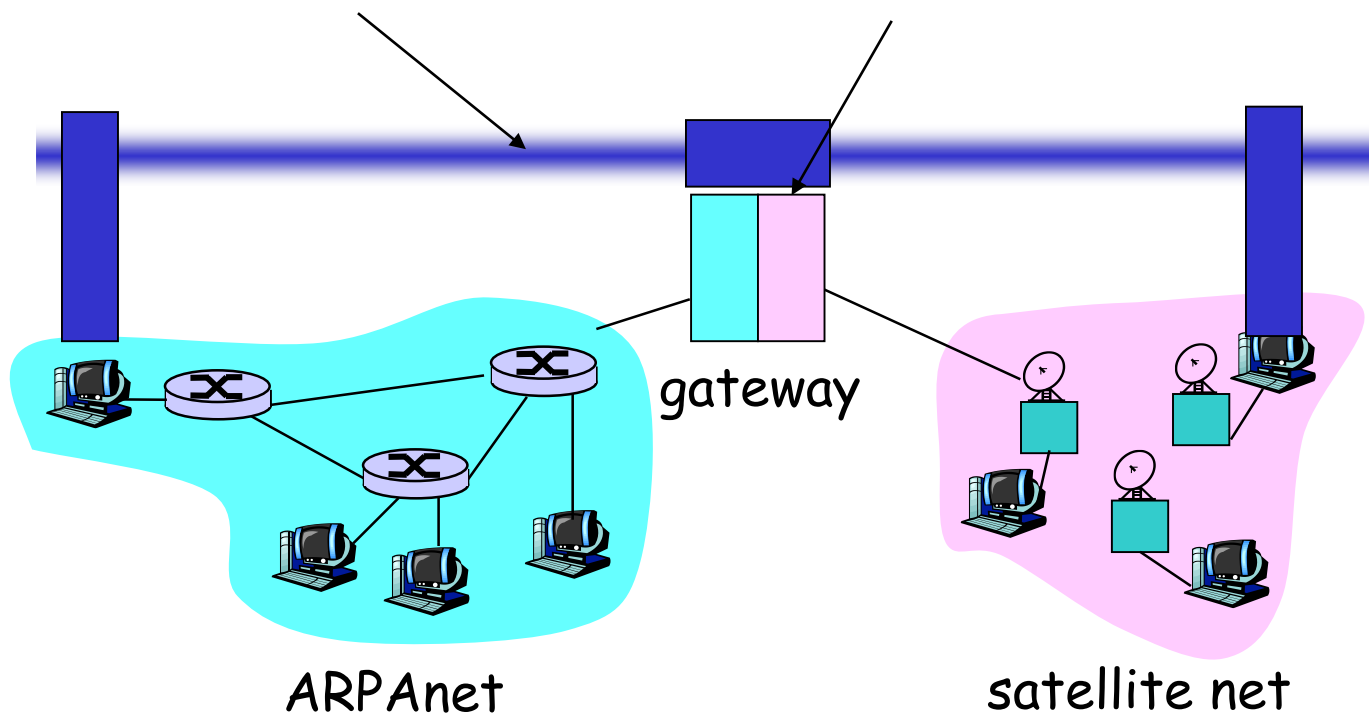


跨网络层 (IP):

- 寻址: 尽管潜在的本地网络存在异构性, 但多个网络看起来是一个单一、统一的实体
- 网络之网络

Gateway:

- “将跨网络数据包嵌入本地数据包格式或提取出来”
- (在互联网层面) 路由到下一个网关





# Cerf & Kahn的互联网体系结构

5.1 数据链路层基本服务

5.2 差错检测与纠正

5.3 可靠数据传输原理

5.4 多路访问控制协议

5.5 局域网技术

5.6 PPP协议

5.7 链路虚拟化



## What is virtualized?

- ❖ 两层寻址：互联网络和本地网络
- ❖ 新的层次 (IP) 使不同的网络在互联网络层一致
- ❖ 底层本地网络技术
  - cable
  - satellite
  - 56K telephone modem
  - today: ATM, MPLS

... “invisible” at internetwork layer. Looks like a link layer technology to IP!



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



立足航天，服务国防，面向国民经济主战场

谢谢！