



# 《计算机网络》

## 第1章 计算机网络概述

主讲人：李全龙

# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

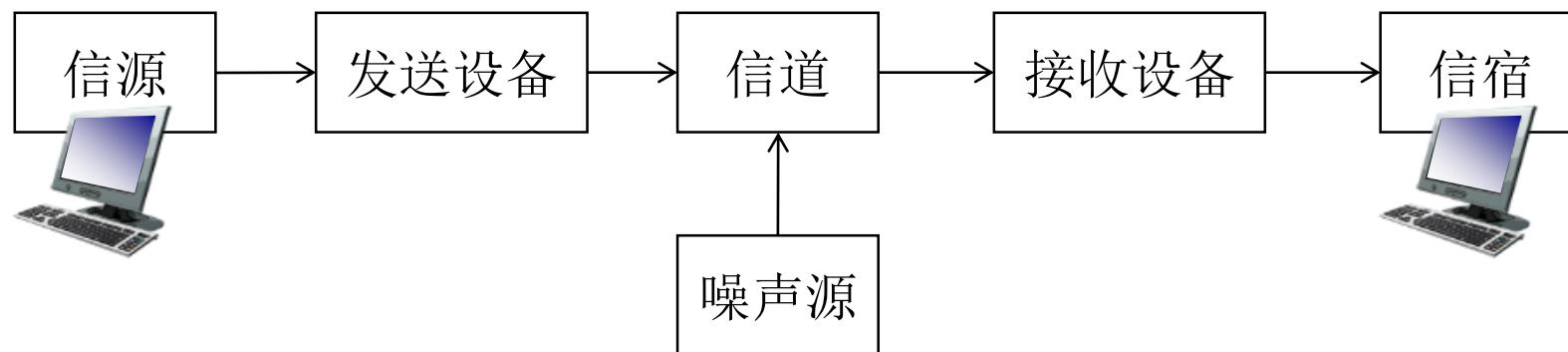
- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 计算机网络=通信技术+计算机技术

- ❖ 计算机网络是通信技术与计算机技术紧密结合的产物
- ❖ 通信系统模型：



- ❖ 计算机网络就是一种通信网络



# 计算机网络？

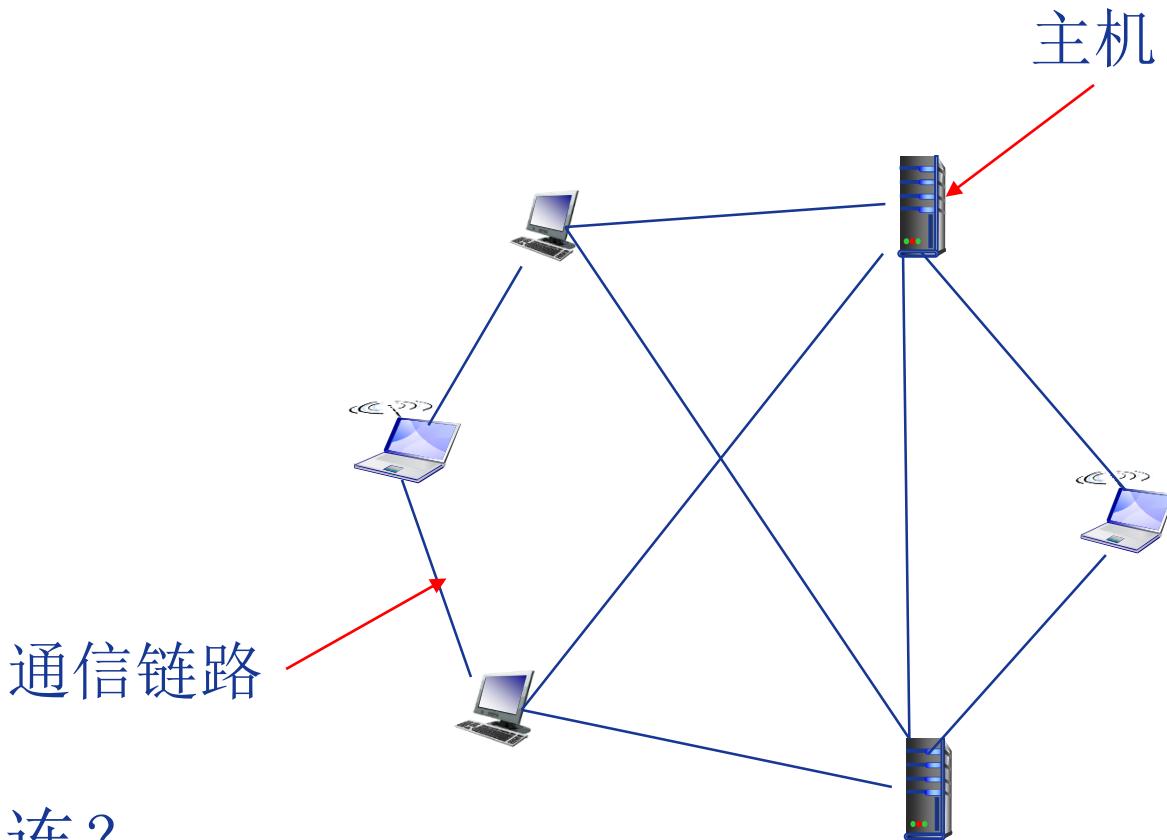
❖ 定义：计算机网络就是互连的、自治的计算机集合。

❖ 自治-无主从关系

❖ 互连-互联互通

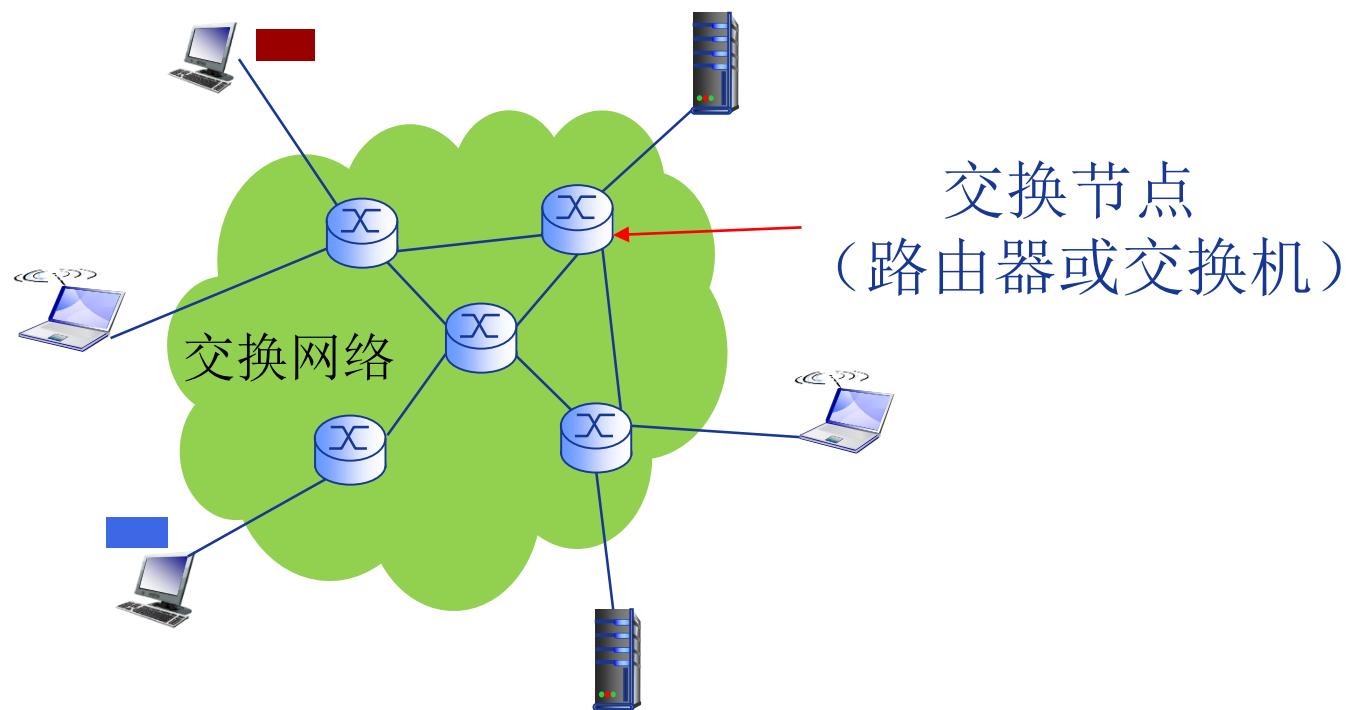
- 通信链路

❖ 距离远、数量大如何保证互连？



# 计算机网络

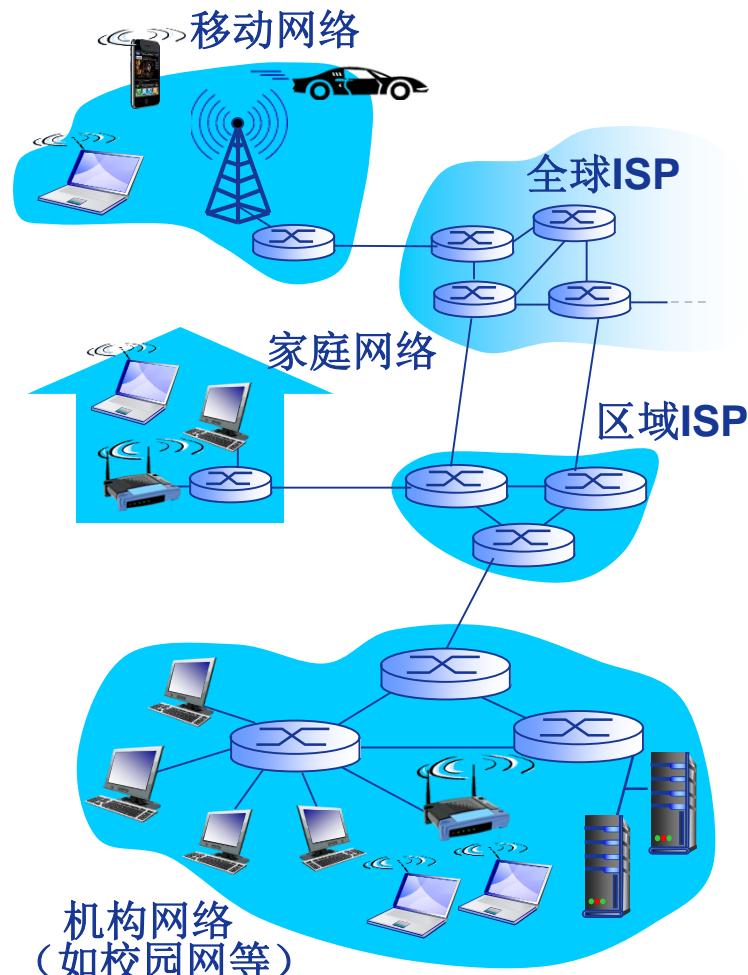
- ❖ 通过交换网络互连主机



# 什么是Internet? - 组成细节角度

## ❖ 全球最大的互联网络

- ISP(Internet Service Provider)网络互连的“网络之网络”



# 什么是Internet? - 组成细节角度

## ❖ 全球最大的互联网络

- ISP网络互连的“网络之网络”

## ❖ 数以百万计的互连的计算设备集合:

- 主机(hosts)=端系统 (end systems)
- 运行各种网络应用

## ❖ 通信链路

- 光纤, 铜缆, 无线电, 卫星.....

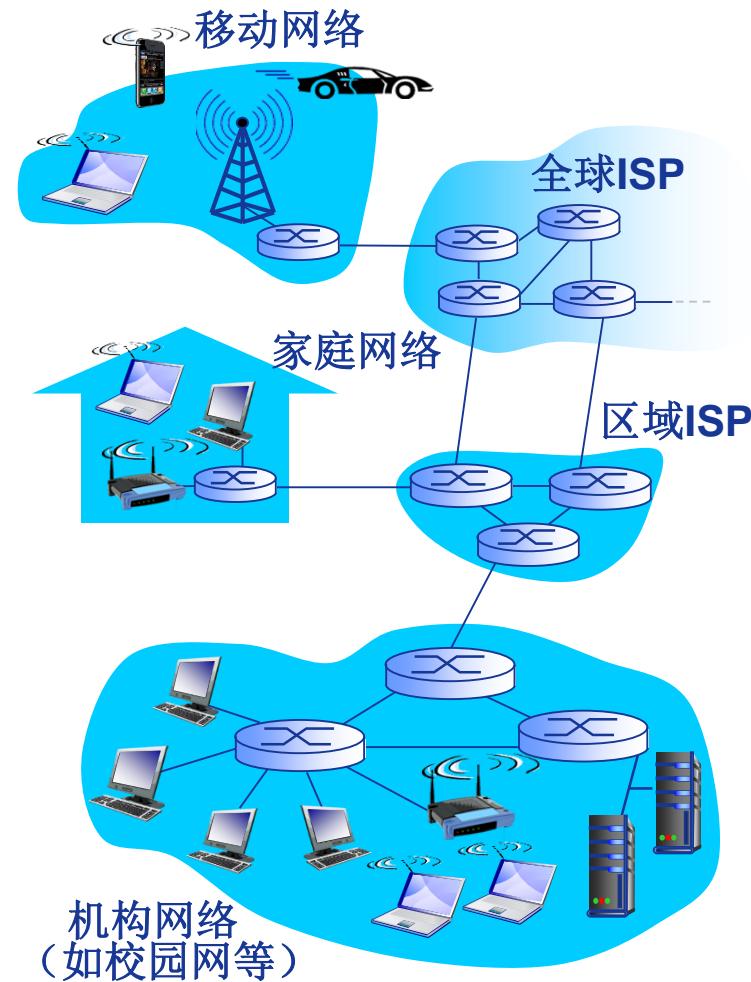
## ❖ 分组交换: 转发分组(数据包)

- 路由器(routers)和  
交换机(switches)



# 什么是Internet? - 服务角度

- ❖ 为网络应用提供通信服务的通信基础设施：
  - Web, VoIP, email, 网络游戏, 电子商务, 社交网络, ...
- ❖ 为网络应用提供应用编程接口（API）：
  - 支持应用程序“连接”Internet, 发送/接收数据
  - 提供类似于邮政系统的数据传输服务

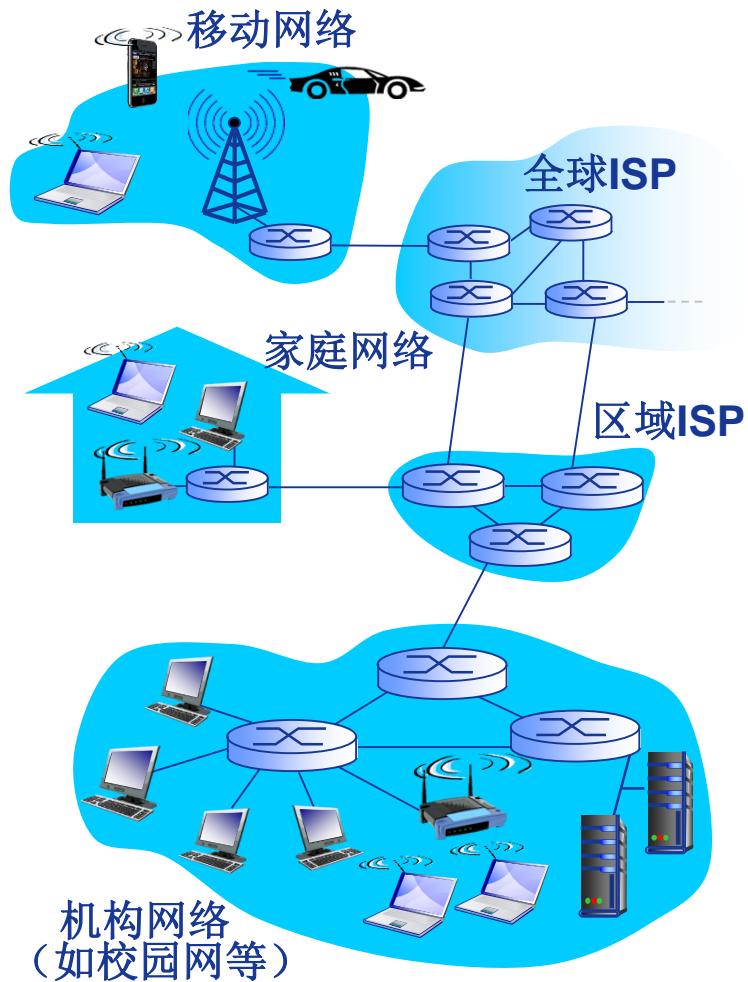


# 问题

❖ Q: 仅有硬件（主机、链路、路由器……）连接，Internet能否顺畅运行？能保证应用数据有序交付吗？……

❖ A: No !

❖ 还需要协议！



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

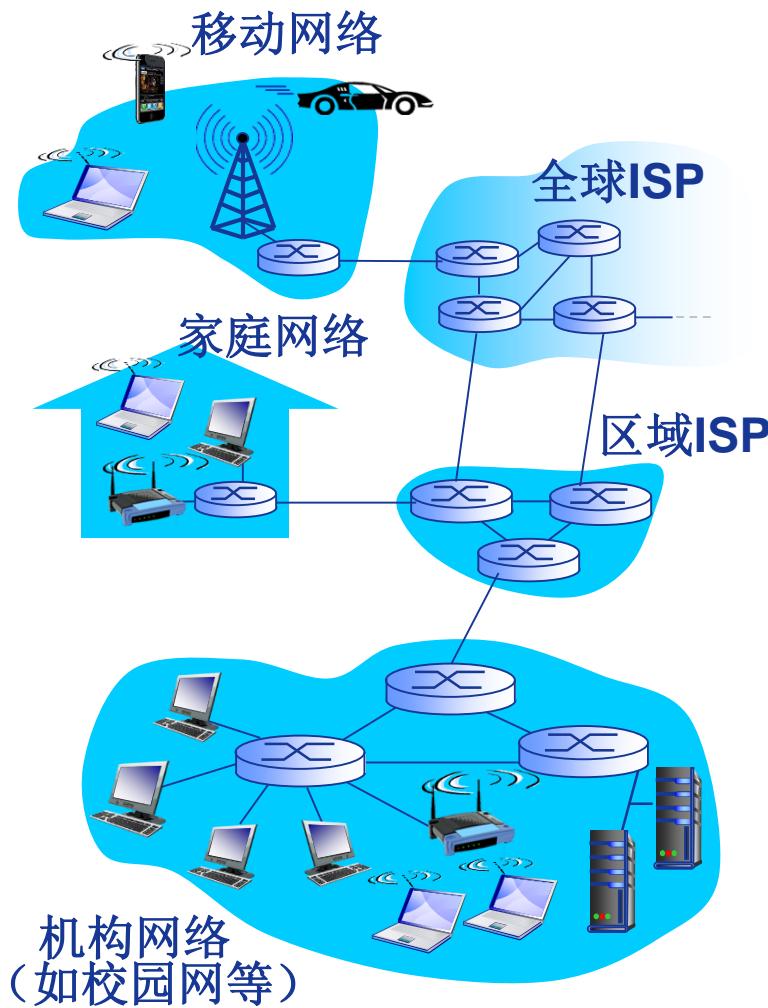
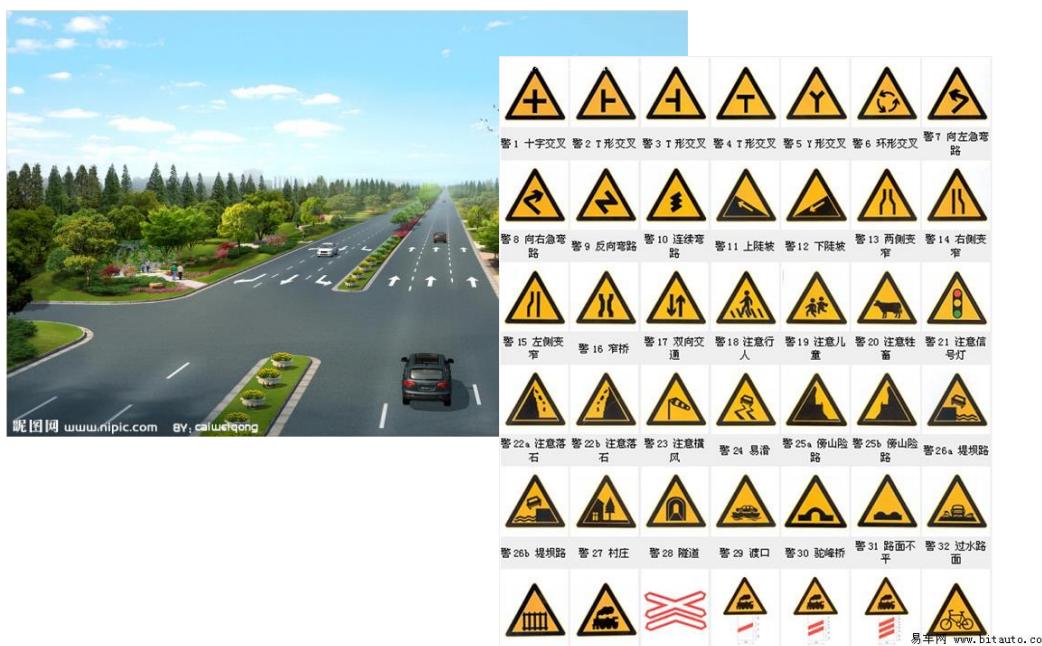
- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 协议是计算机网络有序运行的重要保证

- ❖ 硬件（主机、路由器、通信链路等）是计算机网络的基础
- ❖ 计算机网络中的数据交换必须遵守事先约定好的**规则**
- ❖ 如同交通系统

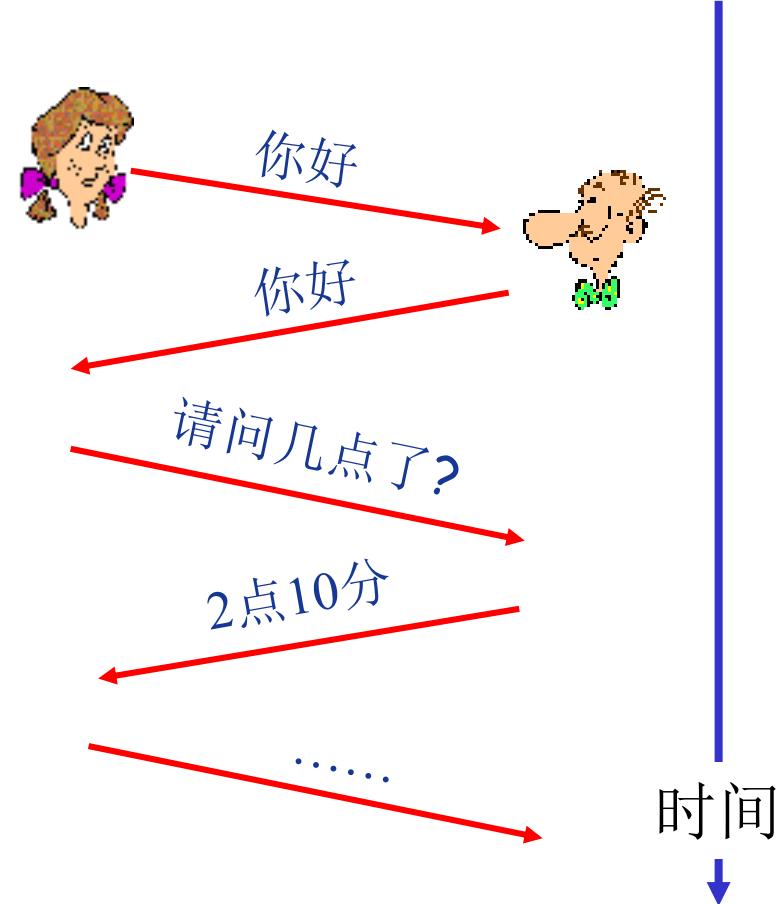


# 任何通信或信息交换过程都需要规则

## 人类交谈：

- ❖ 询问时间
- ❖ 请教问题
- ❖ 人员引荐

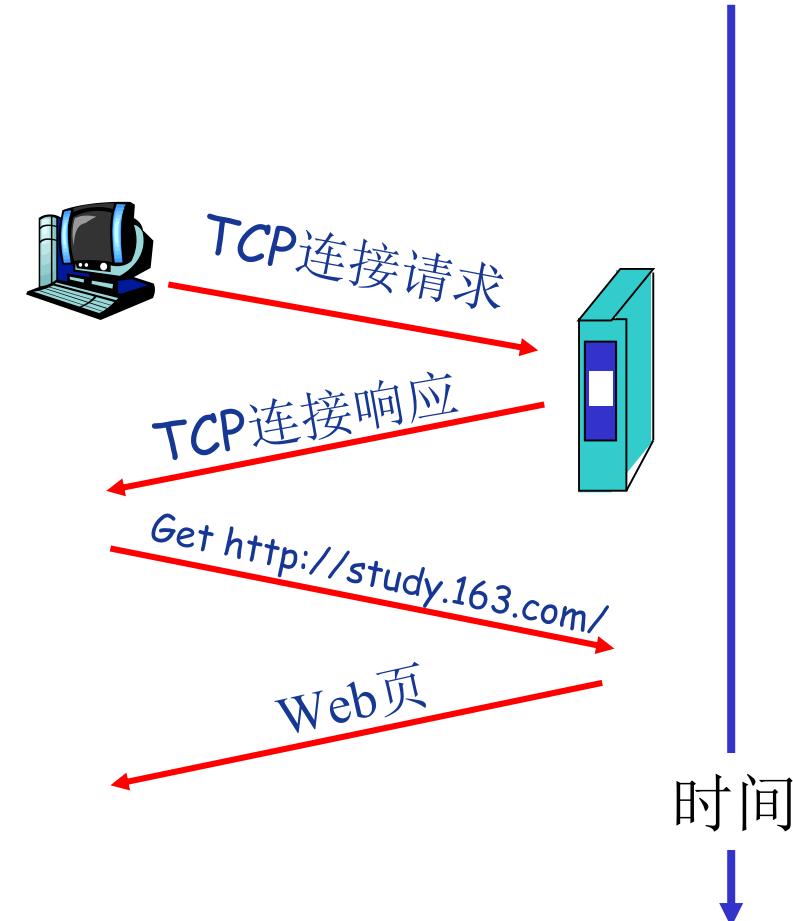
... 发送特定消息  
... 采取特定“动作”



# 任何通信或信息交换过程都需要规则

## 网络通信：

- ❖ 通信主体是“机器”而不是人
- ❖ 交换“电子化”或“数字化”消息
- ❖ 计算机网络的所有通信过程都必须遵守某种/些规则—协议



# 什么是网络协议?

- ❖ 网络协议(network protocol), 简称为协议, 是为进行网络中的数据交换而建立的规则、标准或约定
- ❖ 协议规定了通信实体之间所交换的消息的格式、意义、顺序以及针对收到信息或发生的事件所采取的“动作”(actions)



# 协议的三要素

## ❖ 语法 (Syntax)

- 数据与控制信息的结构或格式
- 信号电平

## ❖ 语义 (Semantics)

- 需要发出何种控制信息
- 完成何种动作以及做出何种响应
- 差错控制

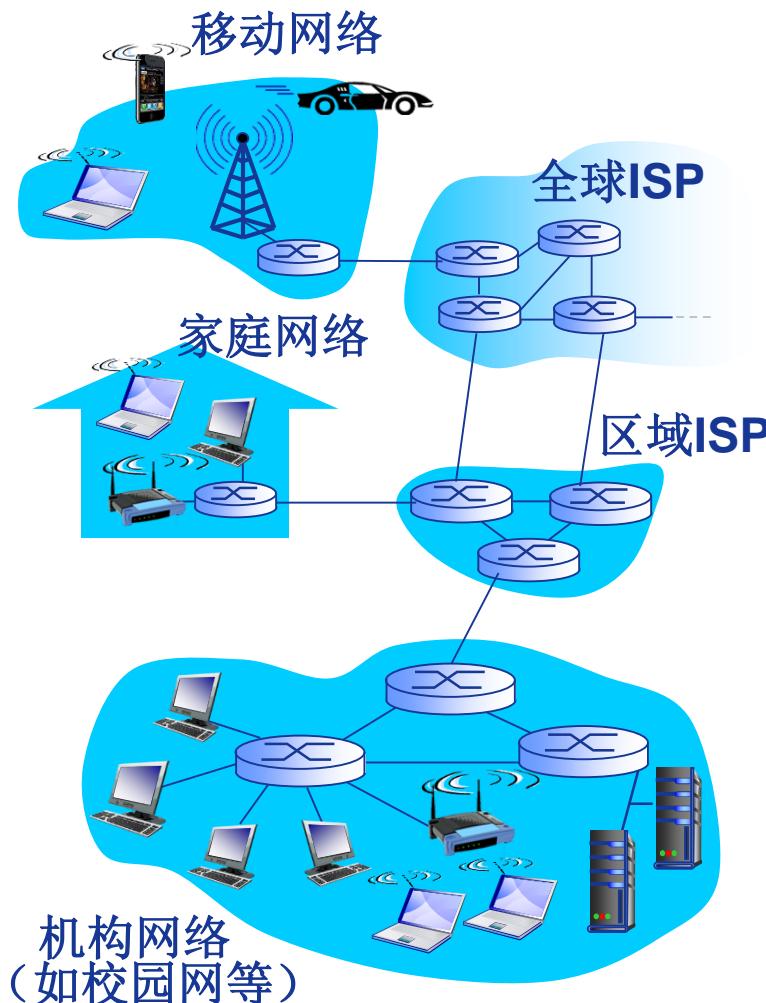
## ❖ 时序 (Timing)

- 事件顺序
- 速度匹配



# 协议是计算机网络的重要内容

- ❖ 协议规范了网络中所有信息发送和接收过程
  - e.g., TCP, IP, HTTP, Skype, 802.11
- ❖ 学习网络的重要内容之一
- ❖ 网络创新的表现形式之一
- ❖ Internet协议标准
  - RFC: Request for Comments
  - IETF: 互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force)



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 计算机网络结构

## ❖ 网络边缘:

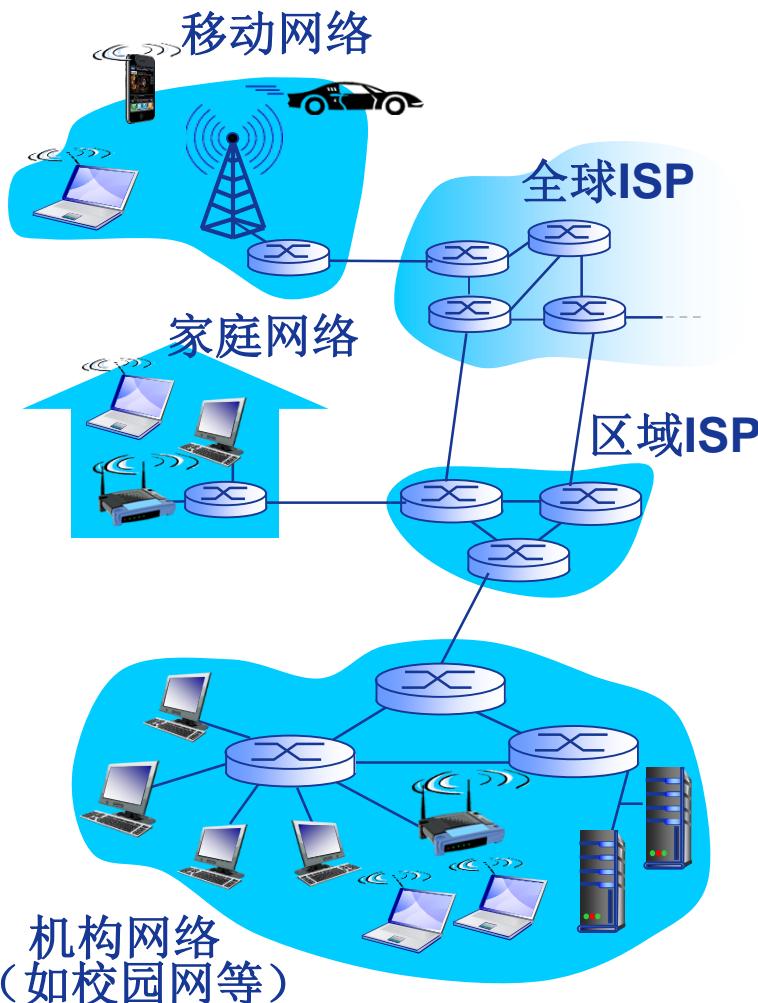
- 主机
- 网络应用

## ❖ 接入网络，物理介质:

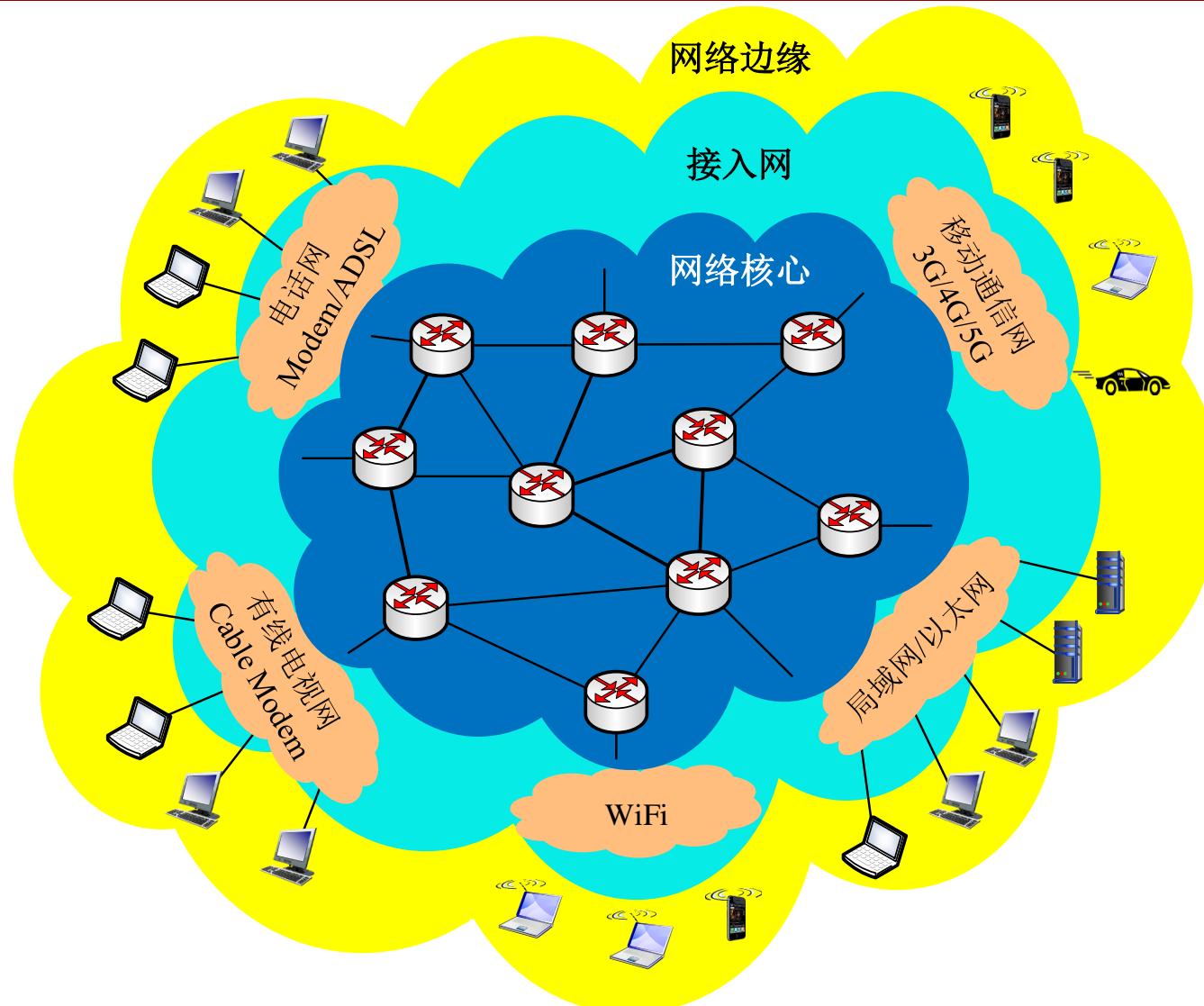
- 有线或无线通信链路

## ❖ 网络核心（核心网络）:

- 互联的路由器（或分组转发设备）
- 网络之网络



# 计算机网络结构



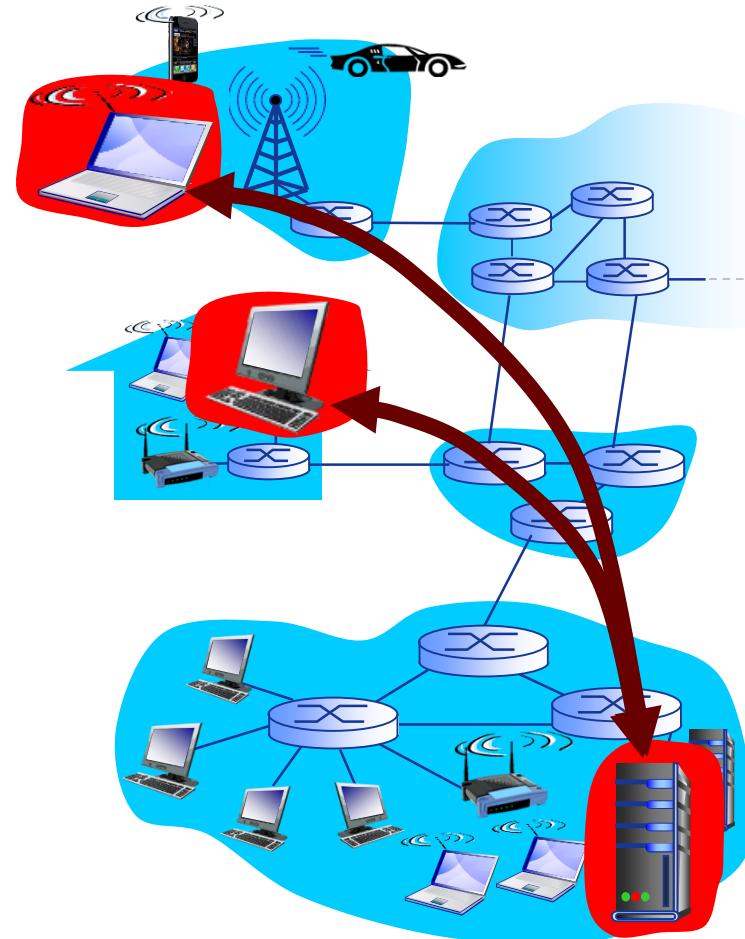
# 网络边缘

## ❖ 主机(端系统):

- 位于“网络边缘”
- 运行网络应用程序
  - 如: Web, email

## ❖ 客户/服务器(client/server)应用模型:

- 客户发送请求, 接收服务器响应
- 如: Web应用, 文件传输FTP应用



# 网络边缘

## ❖ 主机(端系统):

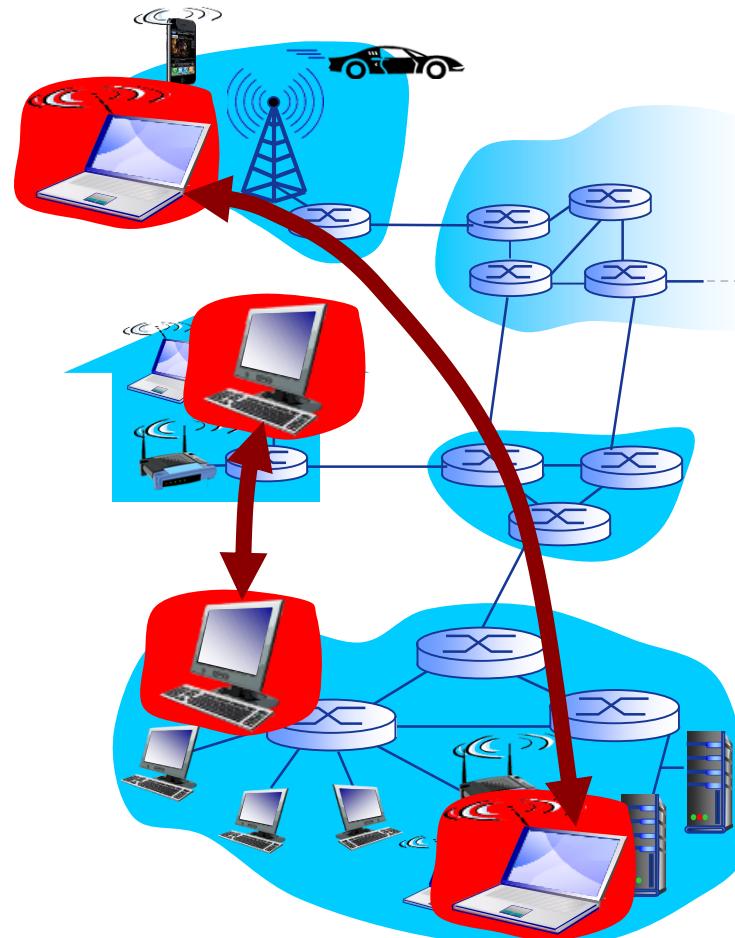
- 位于“网络边缘”
- 运行网络应用程序
  - 如: Web, email

## ❖ 客户/服务器(client/server)应用模型:

- 客户发送请求, 接收服务器响应
- 如: Web应用, 文件传输FTP应用

## ❖ 对等(peer-peer, P2P)应用模型:

- 无(或不仅依赖)专用服务器
- 通信在**对等**实体之间直接进行
- 如: Gnutella, BT, Skype, QQ



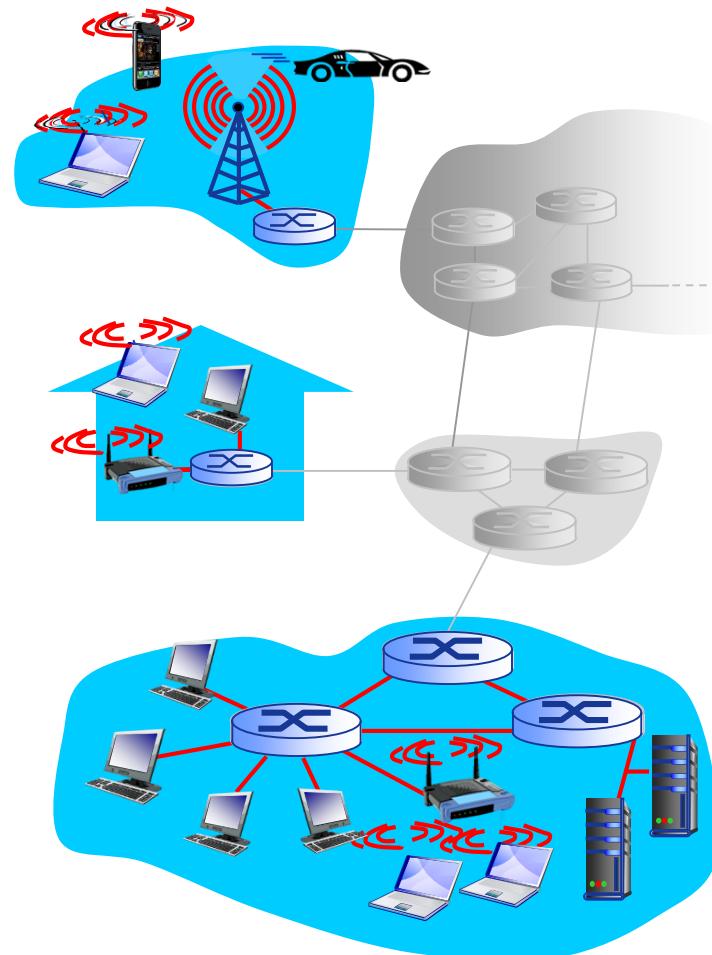
Q: 如何将网络边缘接入核心网（边缘路由器）？

A: 接入网络

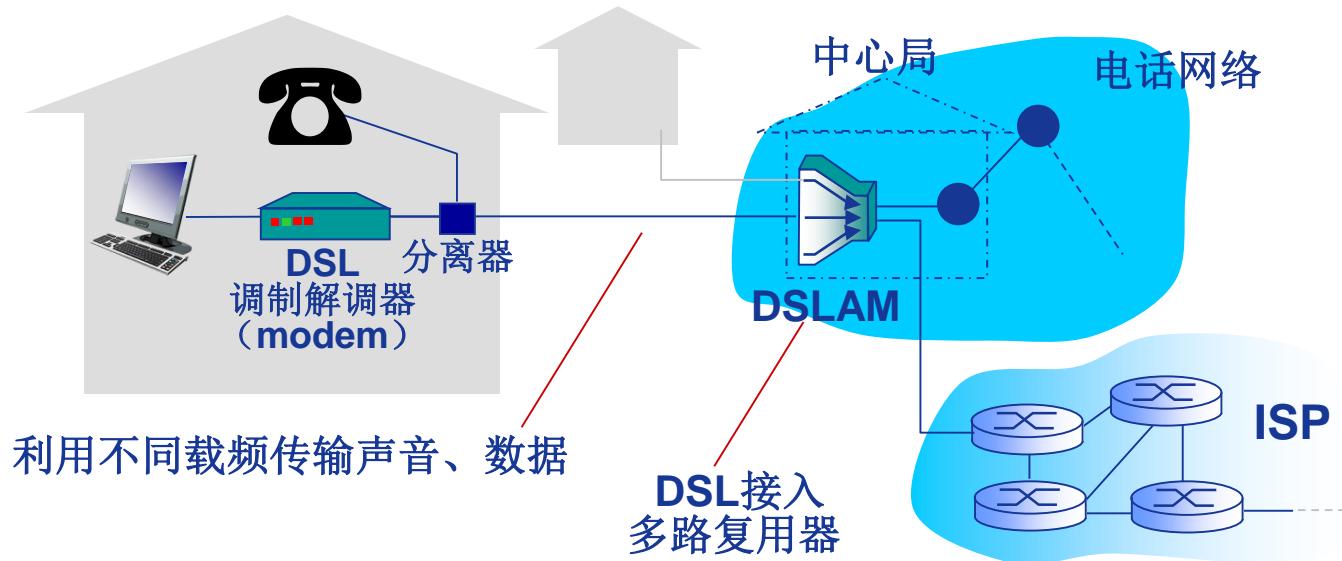
- ❖ 住宅（家庭）接入网络
- ❖ 机构接入网络（学校，企业等）
- ❖ 移动接入网络

用户关心是：

- ❖ 带宽(bandwidth) (bps)？
- ❖ 共享/独占？



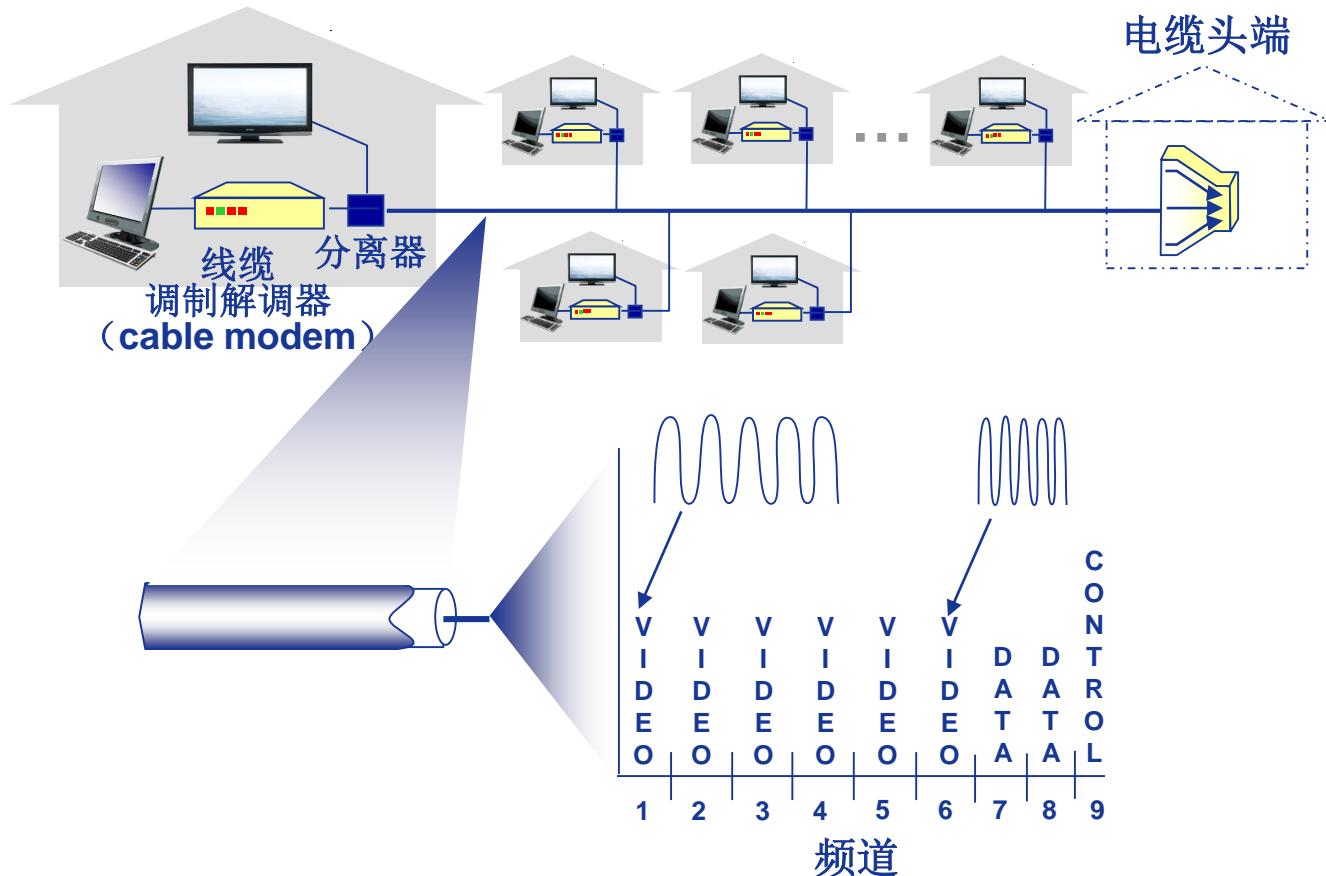
# 接入网络: 数字用户线路 (DSL)



- ❖ 利用已有的电话线连接中心局的DSLAM
  - 数据通信通过DSL电话线接入Internet
  - 语音（电话）通过DSL电话线接入电话网
- ❖ < 2.5 Mbps上行传输速率 (典型速率 < 1 Mbps)
- ❖ < 24 Mbps下行传输速率 (典型速率 < 10 Mbps)
- ❖ FDM:
  - >50 kHz - 1 MHz用于下行  
4 kHz - 50 kHz用于上行
  - 0 kHz - 4 kHz用于传统电话



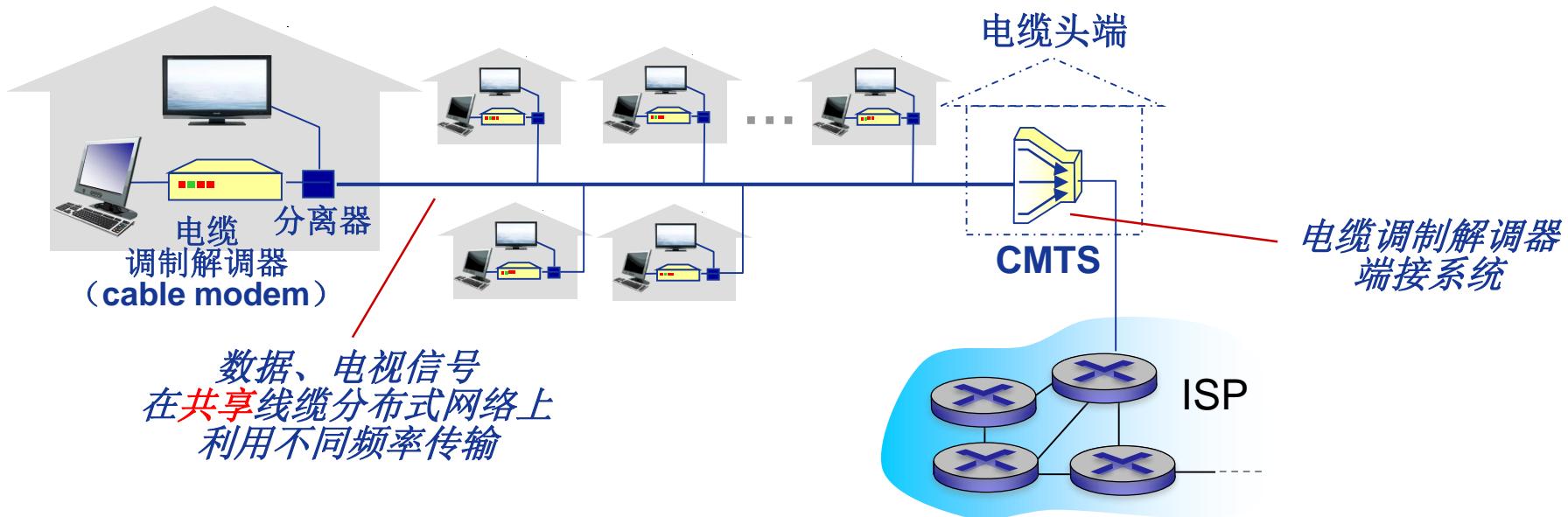
# 接入网络：电缆网络



频分多路复用：在不同频带（载波）上传输不同频道



# 接入网络：电缆网络



- ❖ **HFC:**混合光纤同轴电缆（hybrid fiber coax）
  - 非对称: 下行高达**30Mbps**传输速率, 上行为**2 Mbps**传输速率
- ❖ 各家庭（设备）通过电缆网络→光纤接入**ISP**路由器
  - 各家庭**共享**家庭至电缆头端的**接入网络**
  - 不同于**DSL**的**独占**至中心局的接入



# 接入网络：光纤到户FTTH

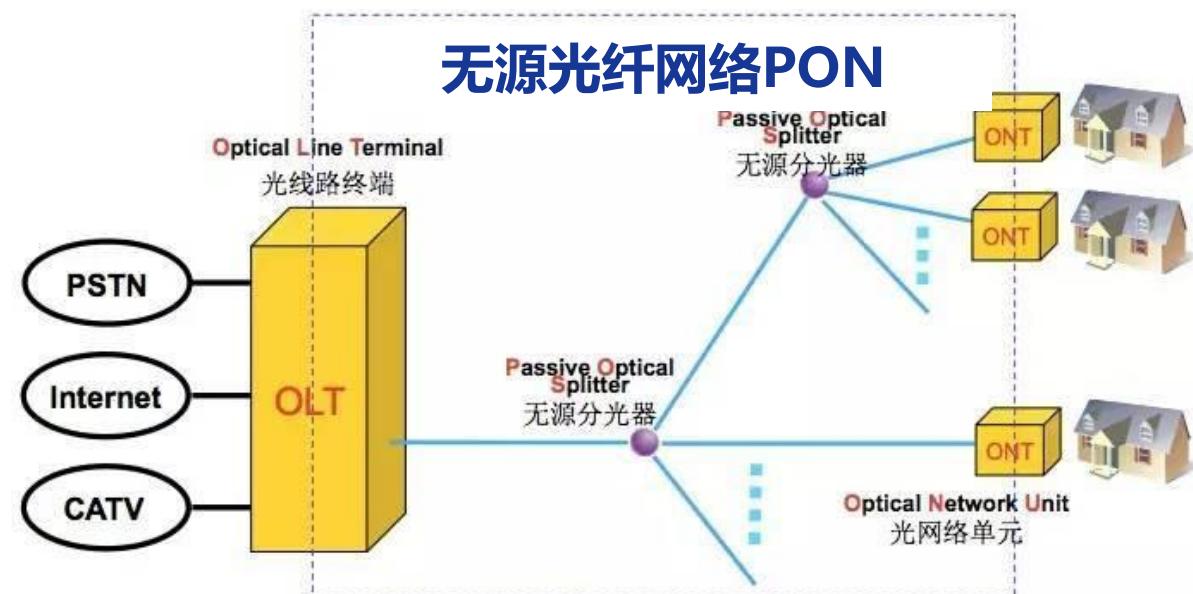
## ❖ 光纤到户FTTH

- FTTH: Fiber To The Home
- 我国及全球先进地区普遍采用的光纤通信的传输方法
- 分为两类：有源光纤网络AON和无源光纤网络PON
- 带宽大、线路稳定

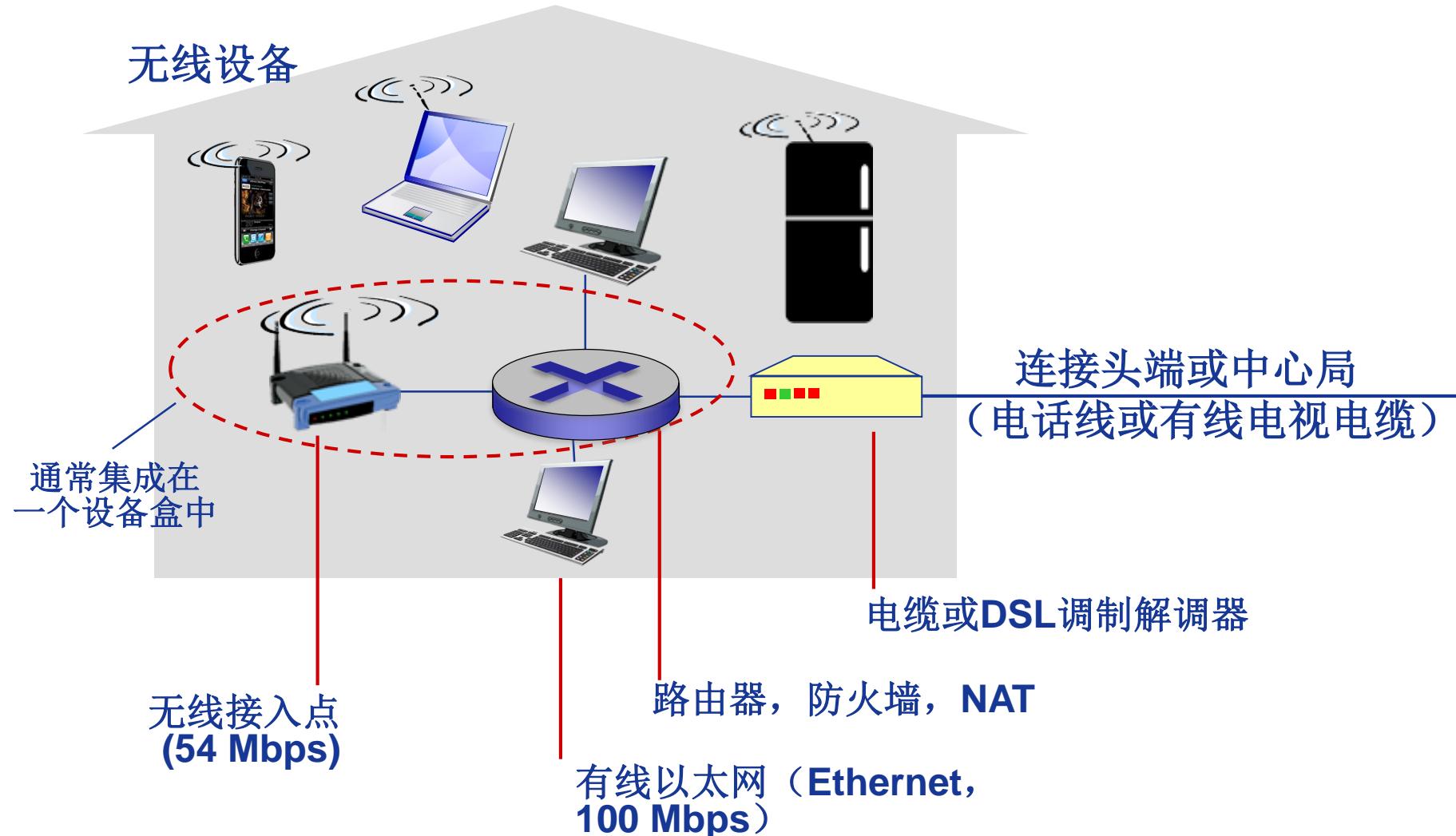
我国FTTH用户  
已接近5亿

## ❖ 无源光纤网络PON

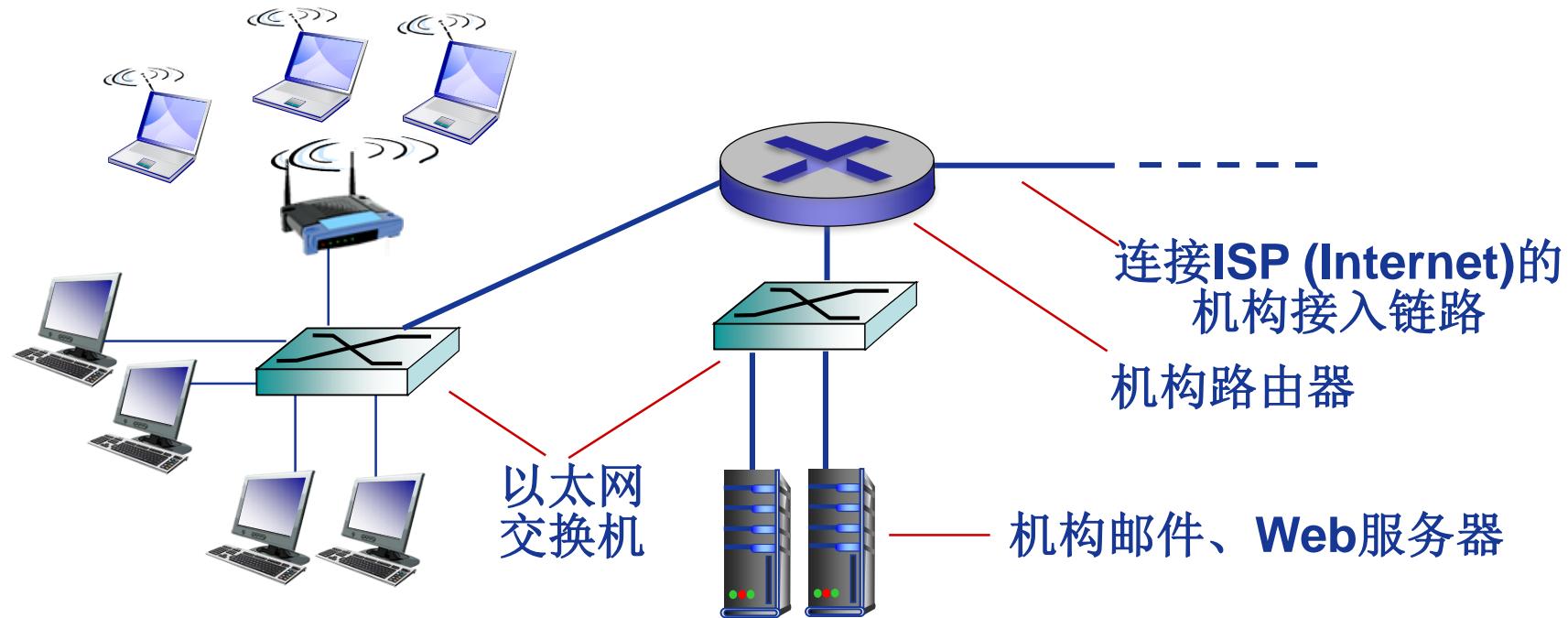
- PON: Passive Optical Network
- OLT: 局端的光线路终端
- ONU光网络单元（如光猫ONT）
- 光猫ONT通过一个或多个无源分光器，连接到局端的光线路终端OLT



# 典型家庭网络的接入



# 机构（企业）接入网络 (Ethernet)



- ❖ 主要用于公司、高校、企业等组织机构
- ❖ 典型传输速率：10 Mbps, 100Mbps, 1Gbps, 10Gbps
- ❖ 目前，端系统通常直接连接以太网交换机（switch）



# 无线接入网络

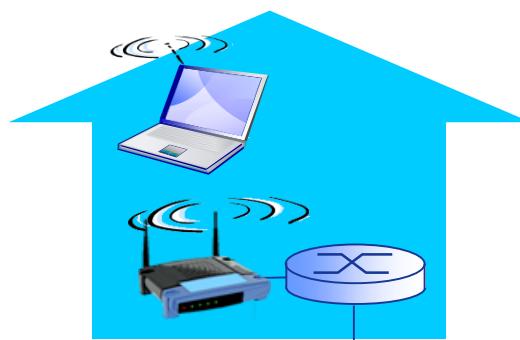
- 通过共享的无线接入网络连接端系统与路由器
  - 通过基站（base station）或称为“接入点”（access point）

## 无线局域网（LANs）：

- 同一建筑物内 (30m)
- 802.11b/g (WiFi): 11Mbps、54Mbps传输速率

## 广域无线接入：

- 通过电信运营商（蜂窝网），接入范围在几十公里~
- 带宽：1 Mbps、10 Mbps、100Mbps
- 3G、4G: LTE
- 移动互联网



*to Internet*



*to Internet*



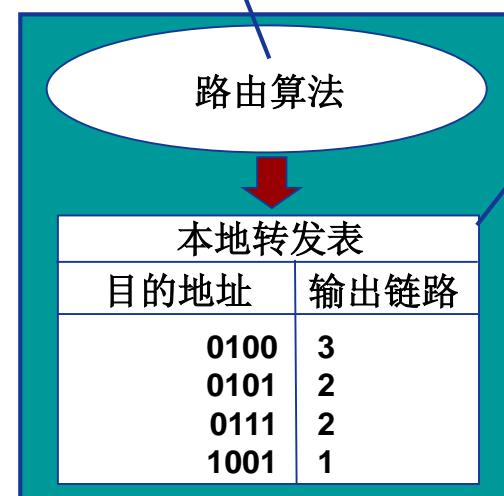
# 网络核心

- ❖ 互连的路由器网络
- ❖ 网络核心的关键功能:**路由+转发**

## 路由(**routing**):

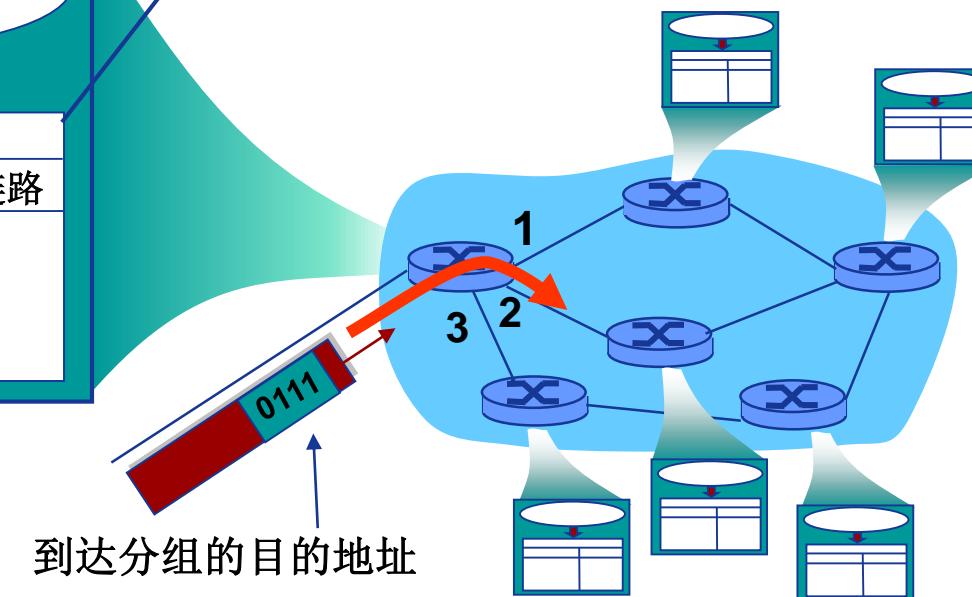
确定分组从源到目的传输路径

- 路由算法



## 转发(**forwarding**):

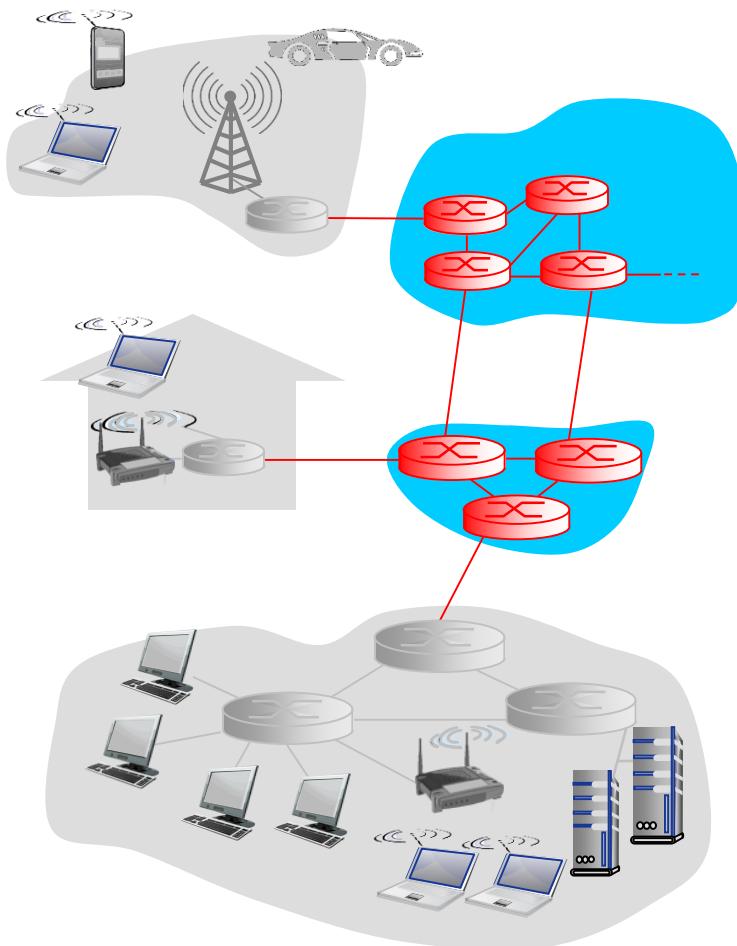
将分组从路由器的输入端口交换至正确的输出端口



网络核心解决的基本问题：

❖ Q：如何实现数据从源主机通过网络核心送达目的主机？

❖ A：数据交换  
(Data Exchange)



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史

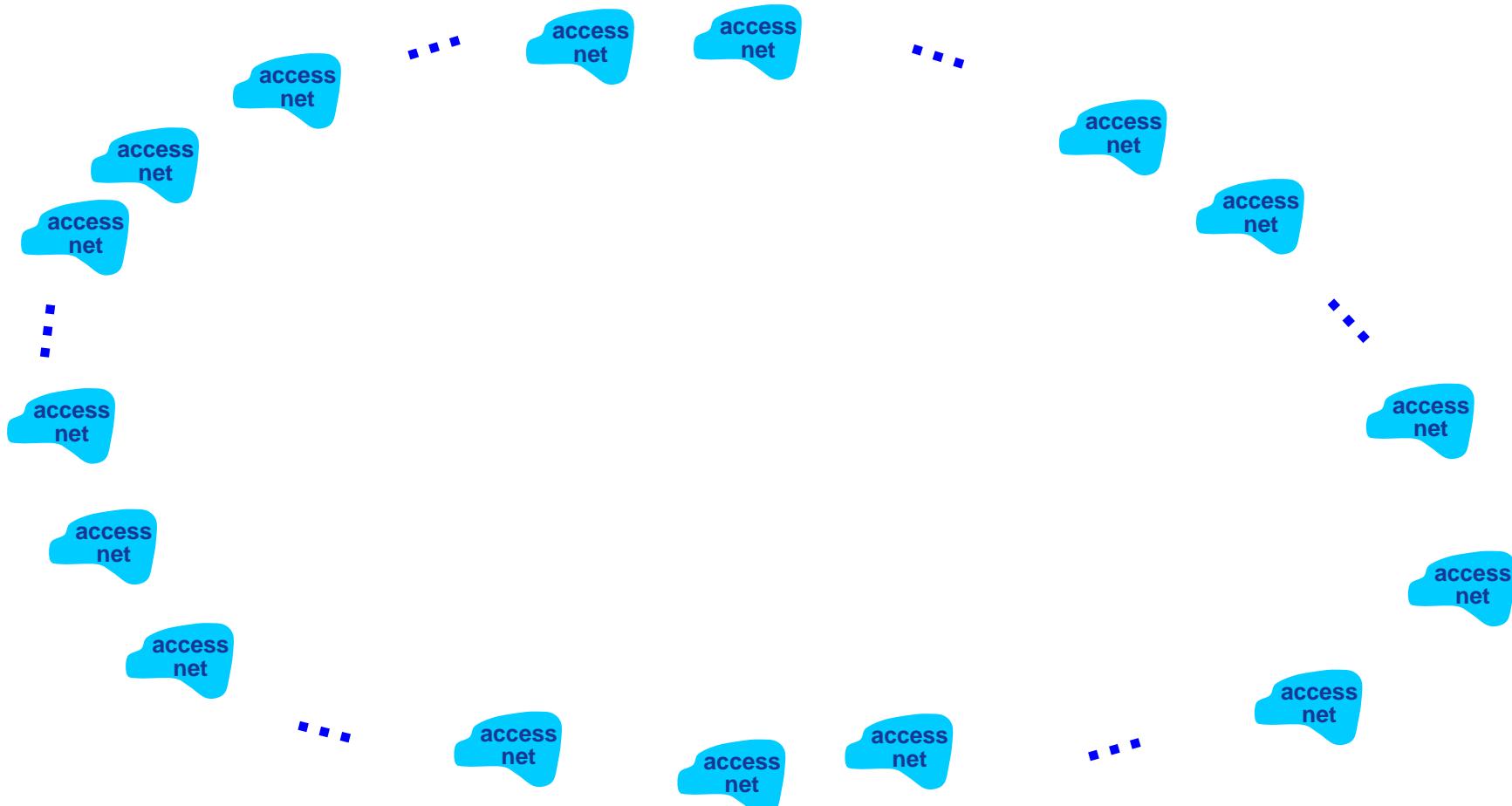


- ❖ 端系统通过接入ISP（access ISPs）连接到 Internet
  - 家庭、公司和大学ISPs
- ❖ 接入ISP必须进一步互连
  - 这样任意两个主机才可以互相发送分组
- ❖ 构成复杂的网络互连的网络
  - 经济和国家政策是网络演进的主要驱动力
- ❖ 当前Internet结构?
  - 无人能给出精确描述



# Internet结构: 网络之网络

Q: 数以百万计的接入ISP是如何互连在一起的呢?



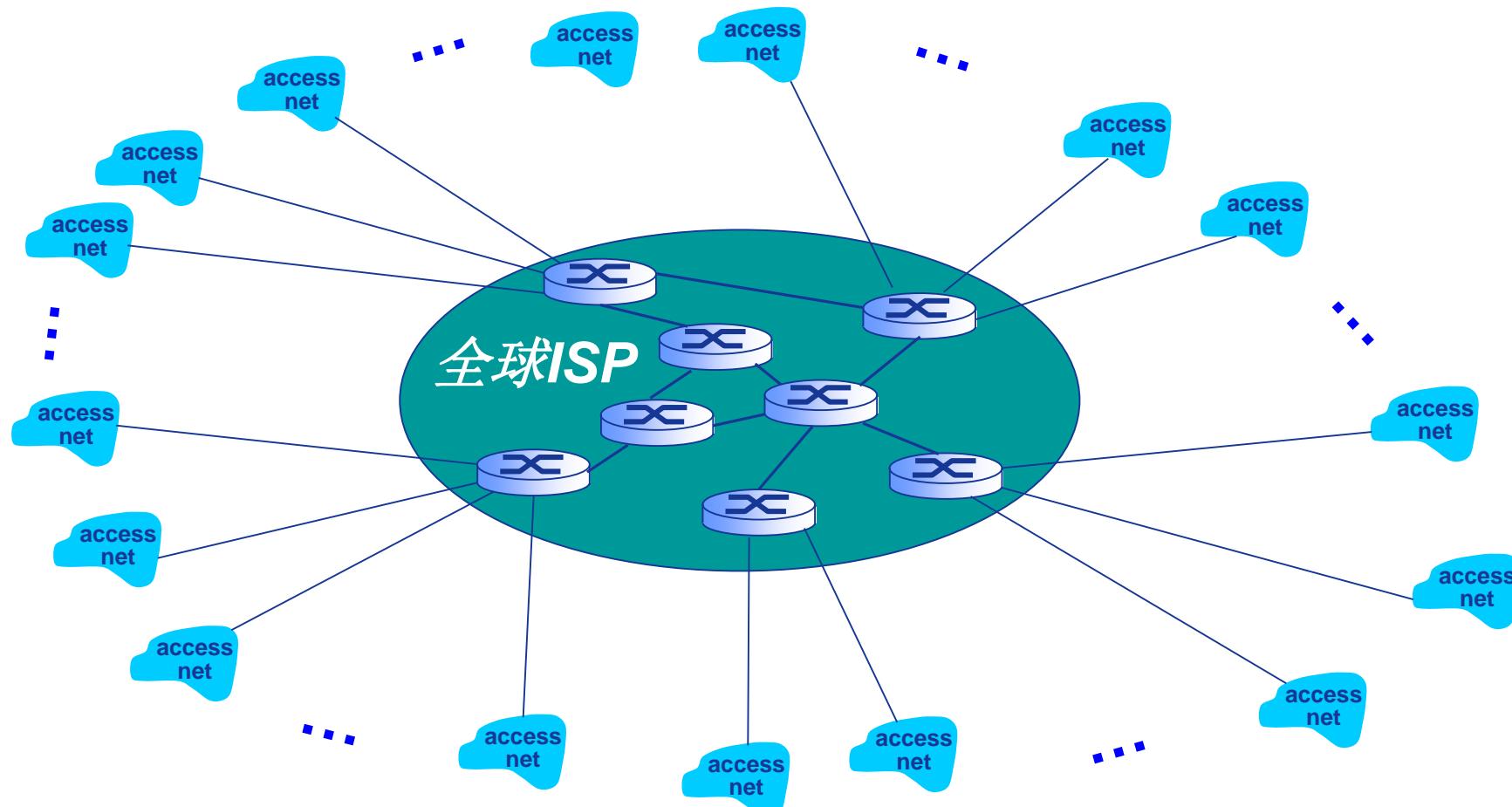
# Internet结构: 网络之网络

可选方案: 每个接入ISP直接彼此互连?



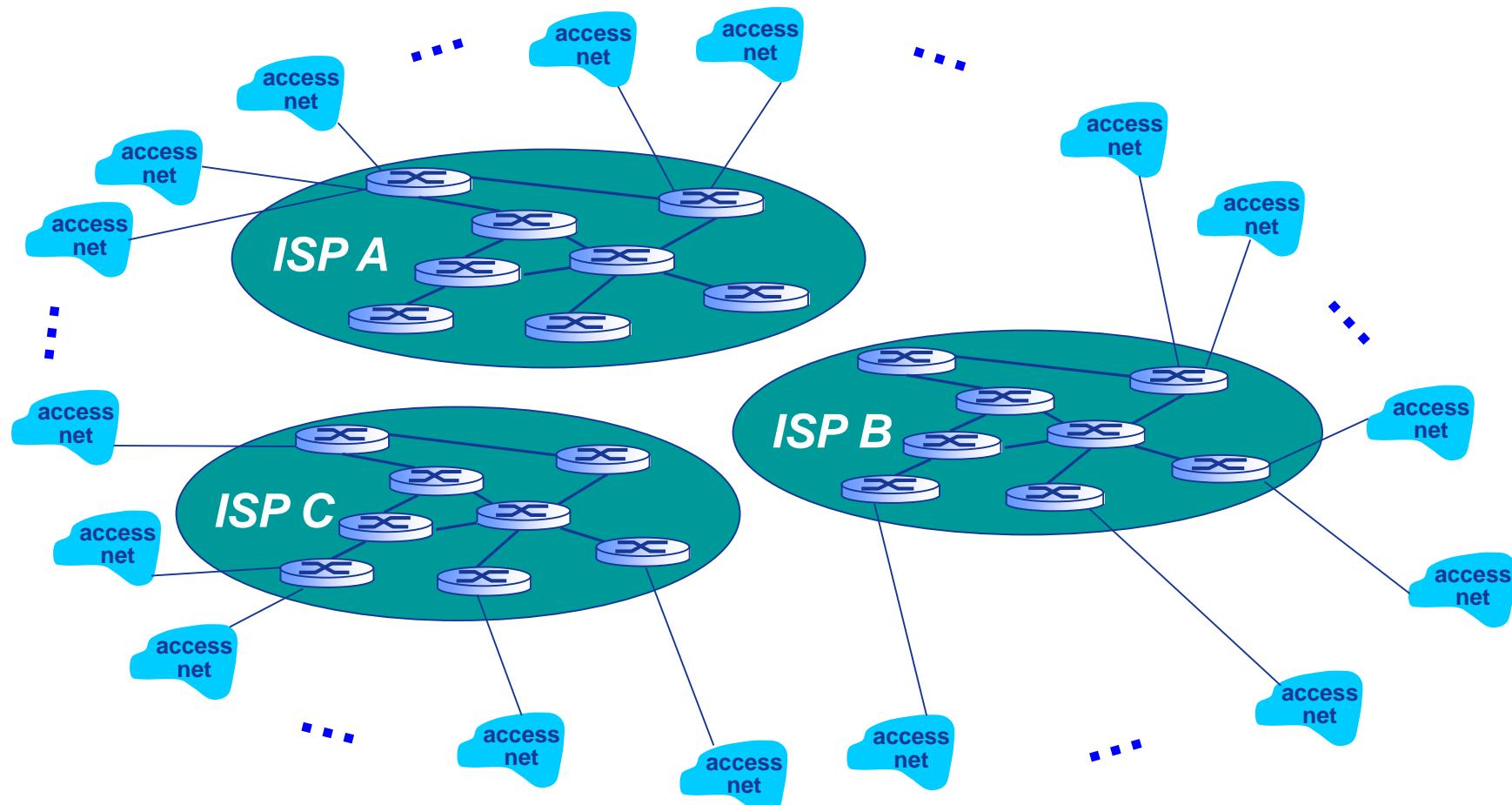
# Internet结构: 网络之网络

可选方案: 将每个接入ISP连接到一个国家或全球ISP  
(Global ISP) ?



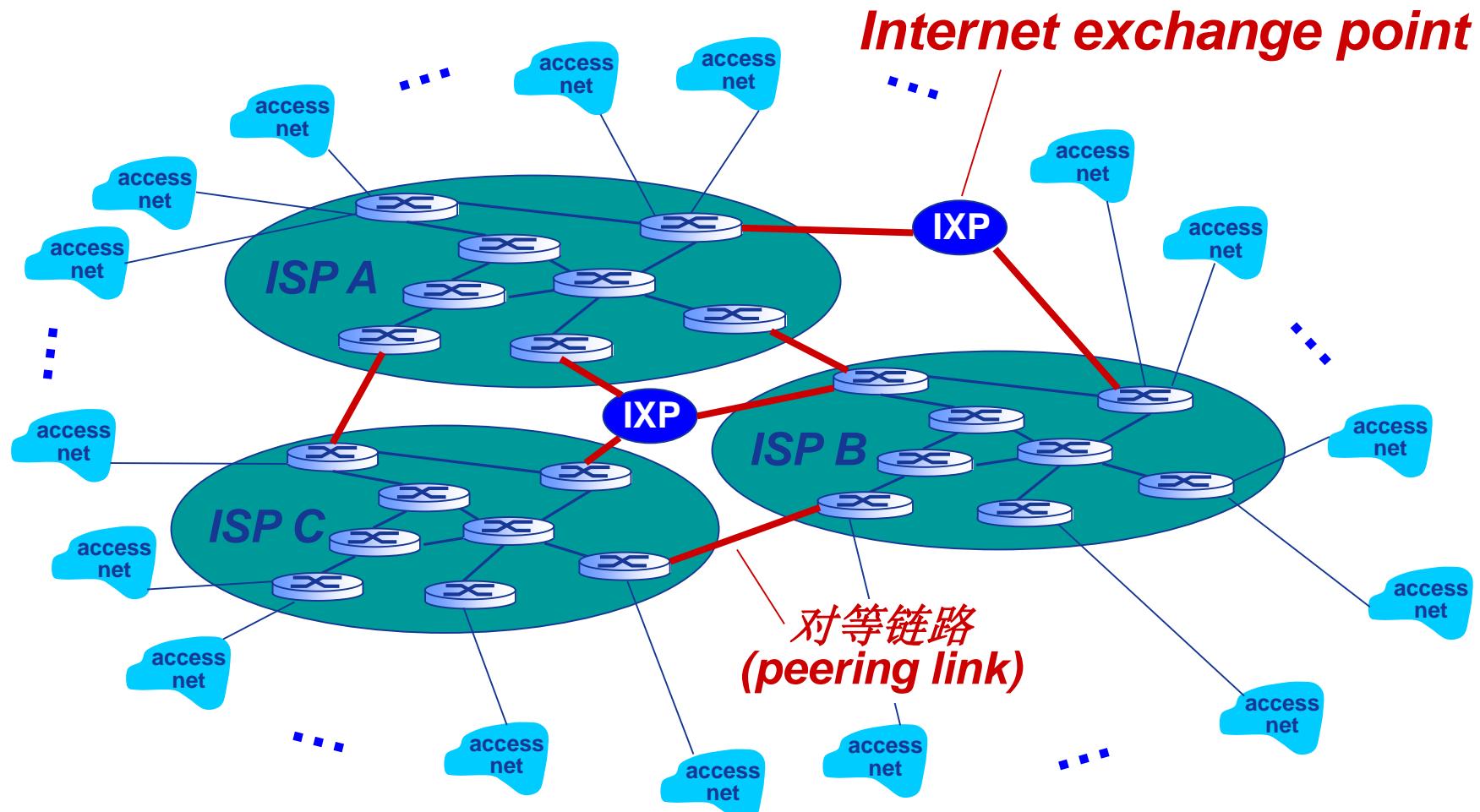
# Internet结构: 网络之网络

但是从商业角度，必定有竞争者…



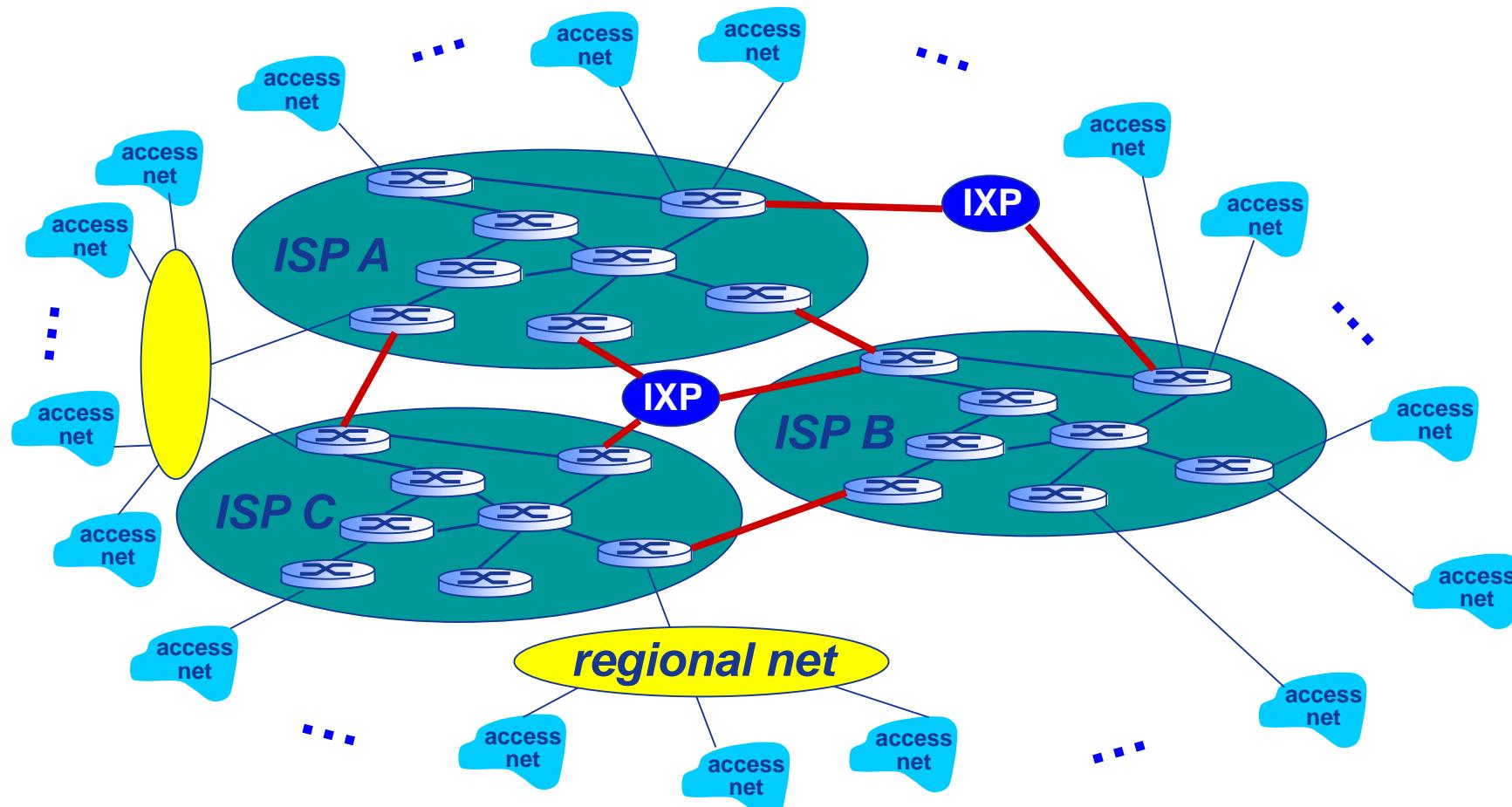
# Internet结构: 网络之网络

但是从商业角度，必定有竞争者…，这些ISP网络必须互连



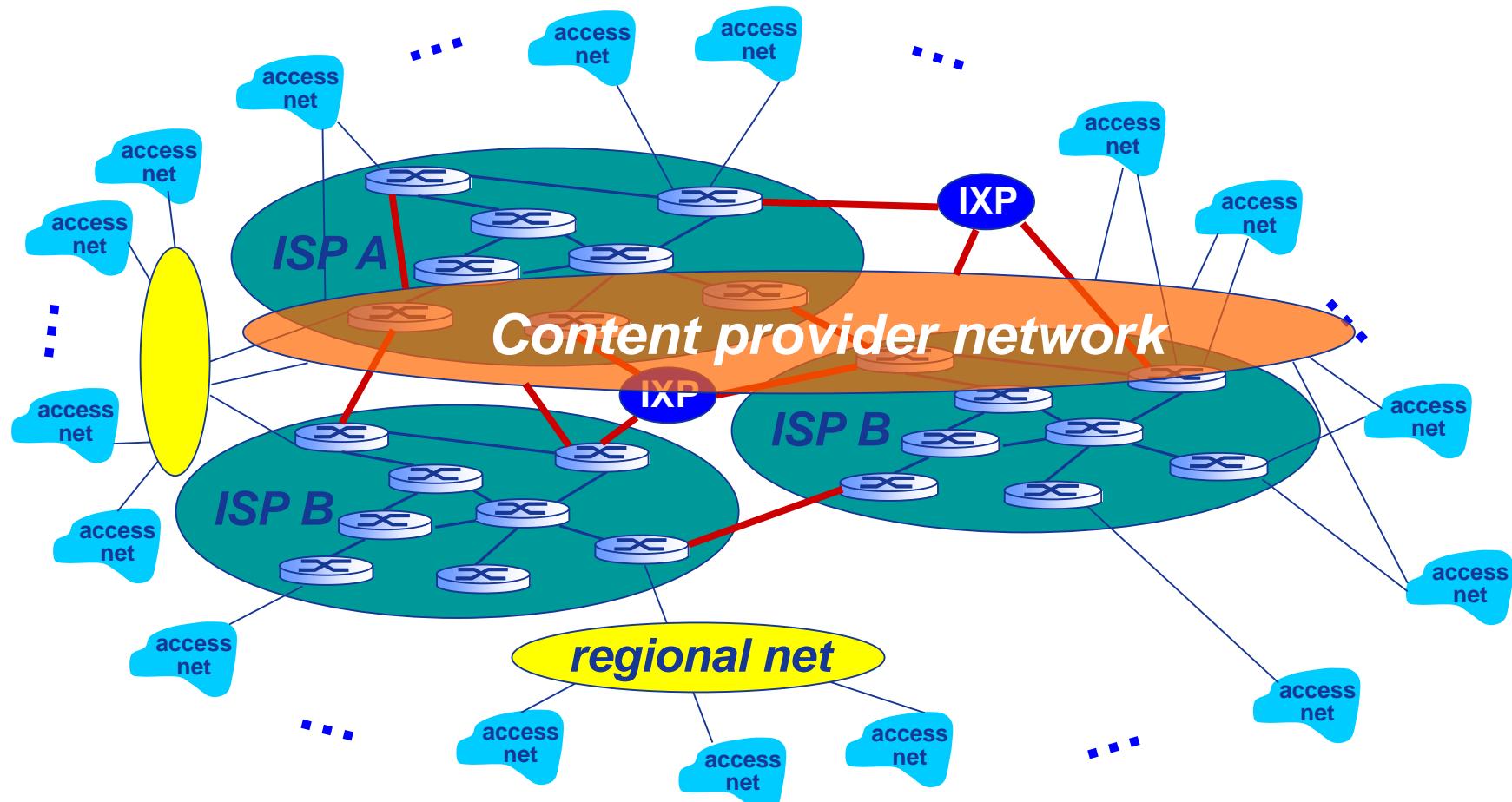
# Internet结构: 网络之网络

...可能出现区域网络 (regional networks) 连接接入ISP和运营商ISP

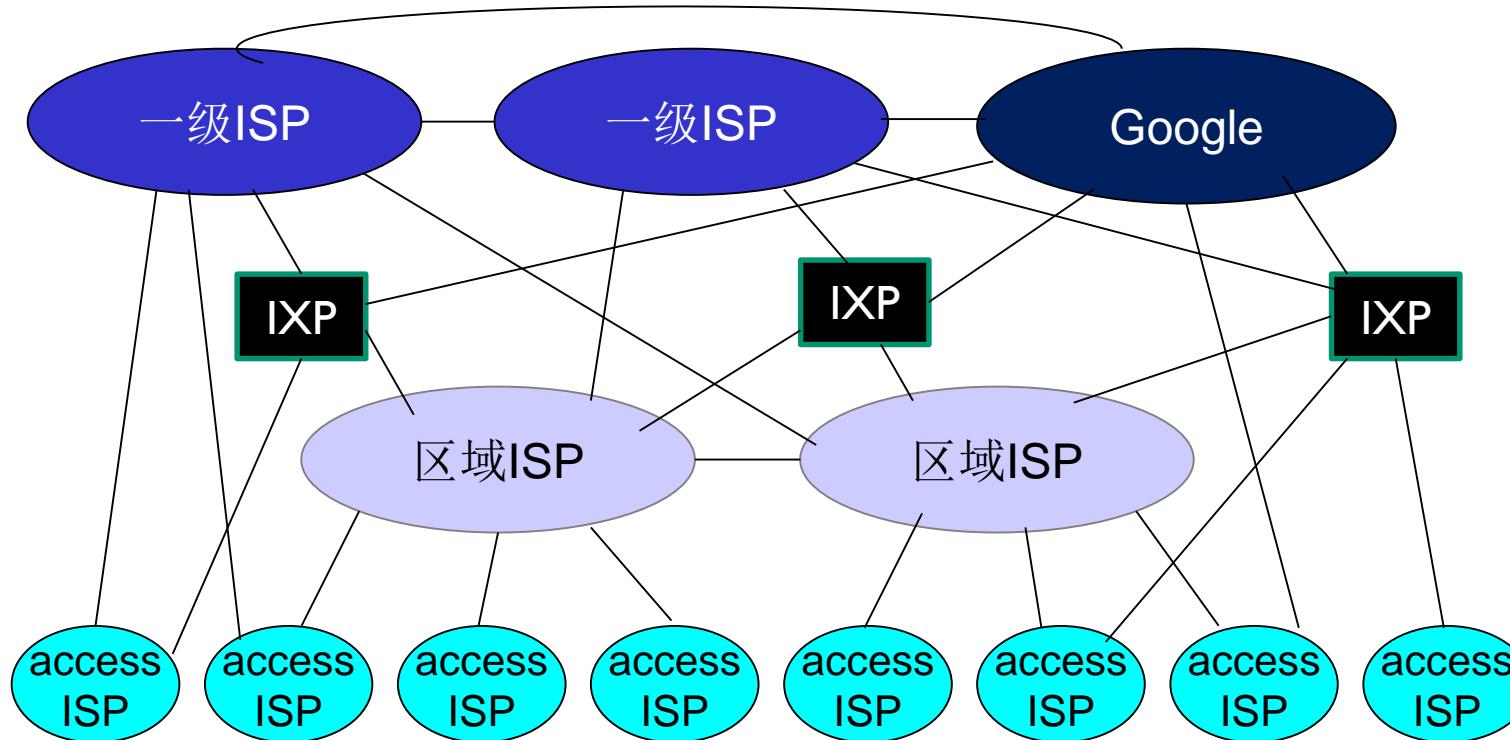


# Internet结构: 网络之网络

... 内容提供商网络(content provider networks, 如: Google, Microsoft等) 可能运行其自己的网络, 并就近为端用户提供服务、内容



# Internet结构: 网络之网络



- ❖ 在网络中心: 少数互连的大型网络
  - “一级” (tier-1) 商业ISPs (如: 网通、电信、Sprint、AT&T), 提供国家或国际范围的覆盖
  - 内容提供商网络 (content provider network, 如: Google): 私有网络, 连接其数据中心与Internet, 通常绕过一级ISP和区域ISPs



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

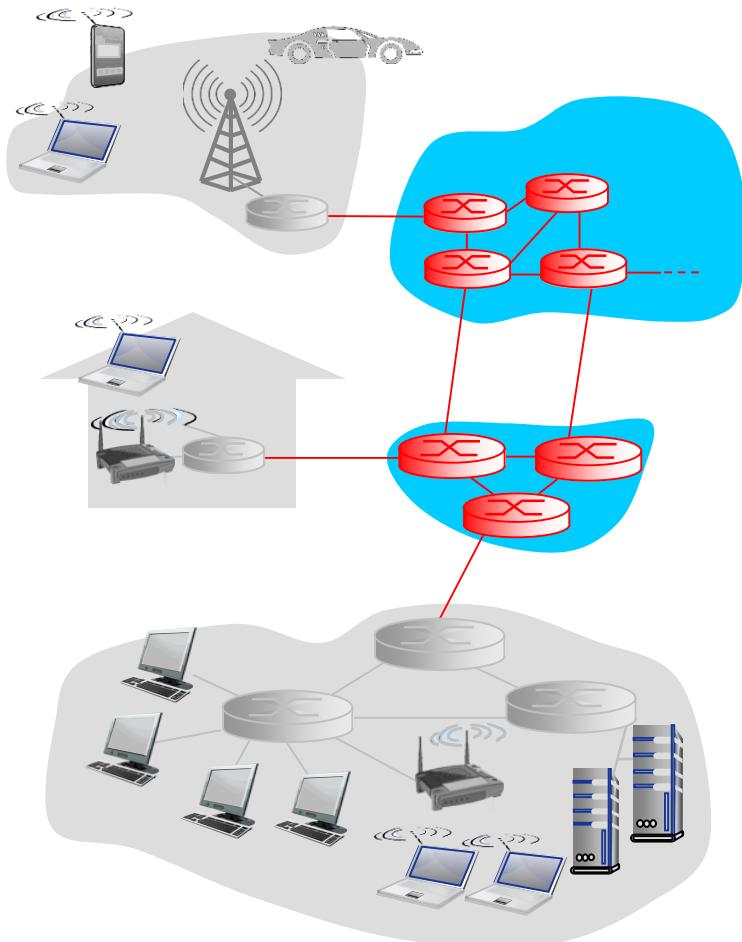
- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 网络核心

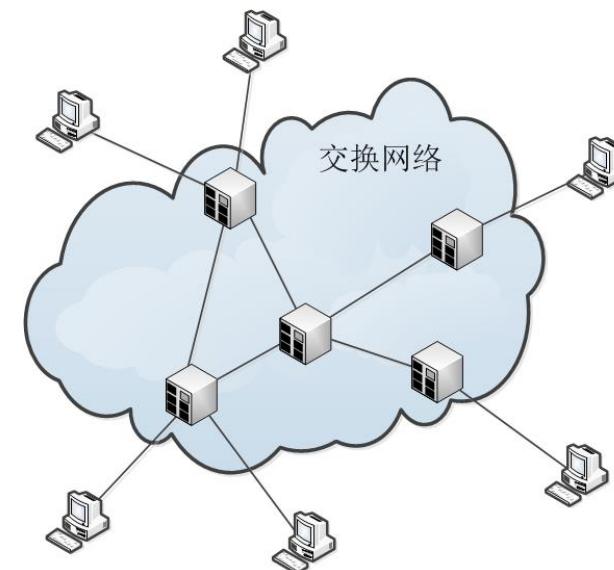
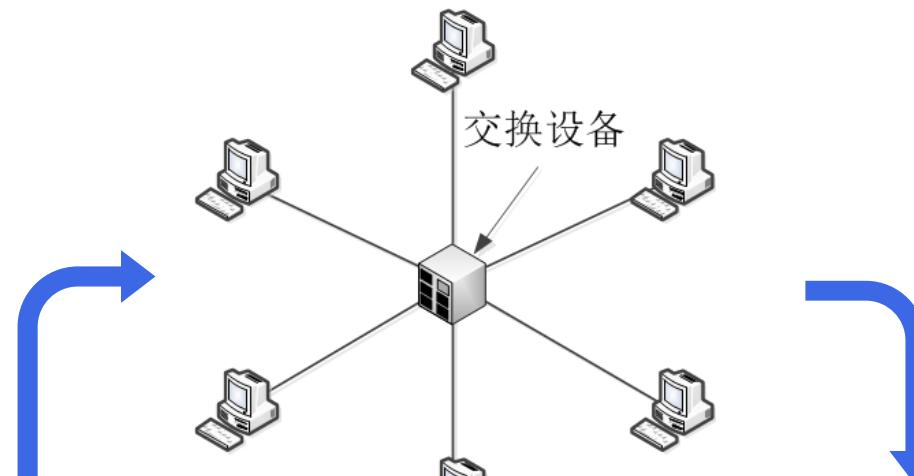
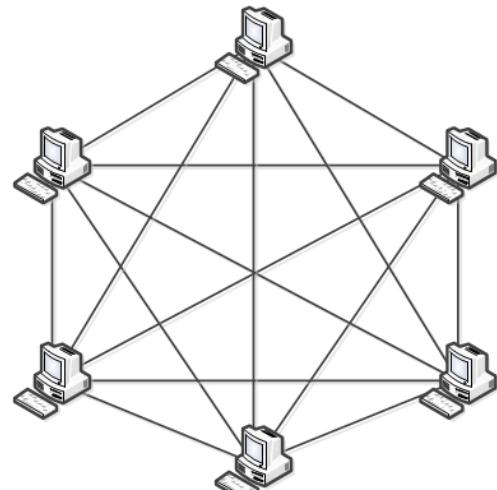
- ❖ 互联的路由器网络
- ❖ **Q:** 如何实现数据通过网络核心从源主机到达目的主机?
- ❖ **A:数据交换**



# 为什么需要数据交换?

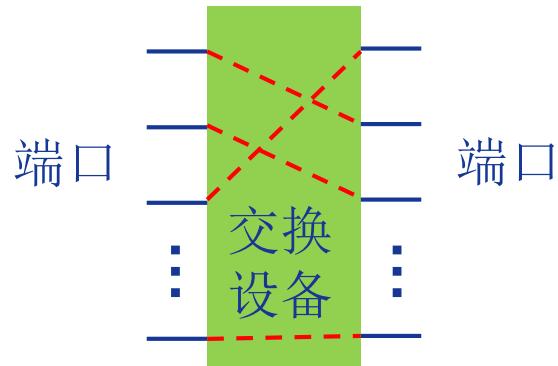
- ❖  $N^2$ 链路问题
- ❖ 连通性
- ❖ 网络规模

$$\frac{N(N-1)}{2}$$

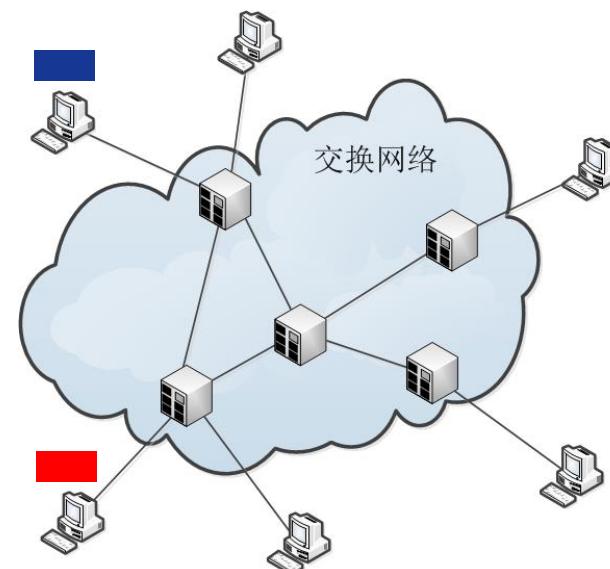


# 交换?

❖ 动态转接



❖ 动态分配传输资源



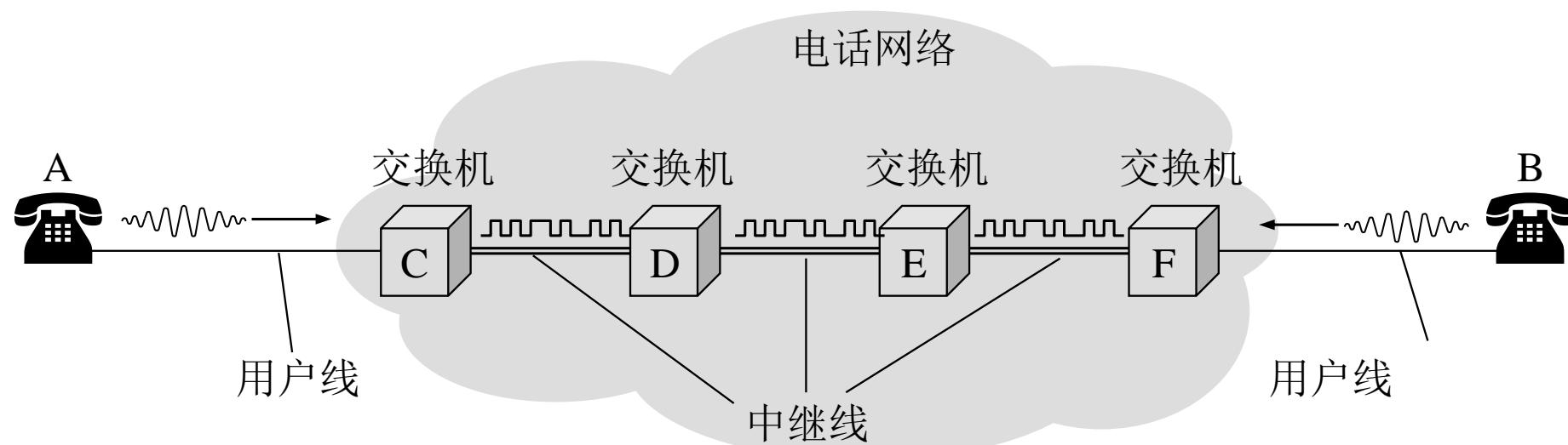
# 数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换



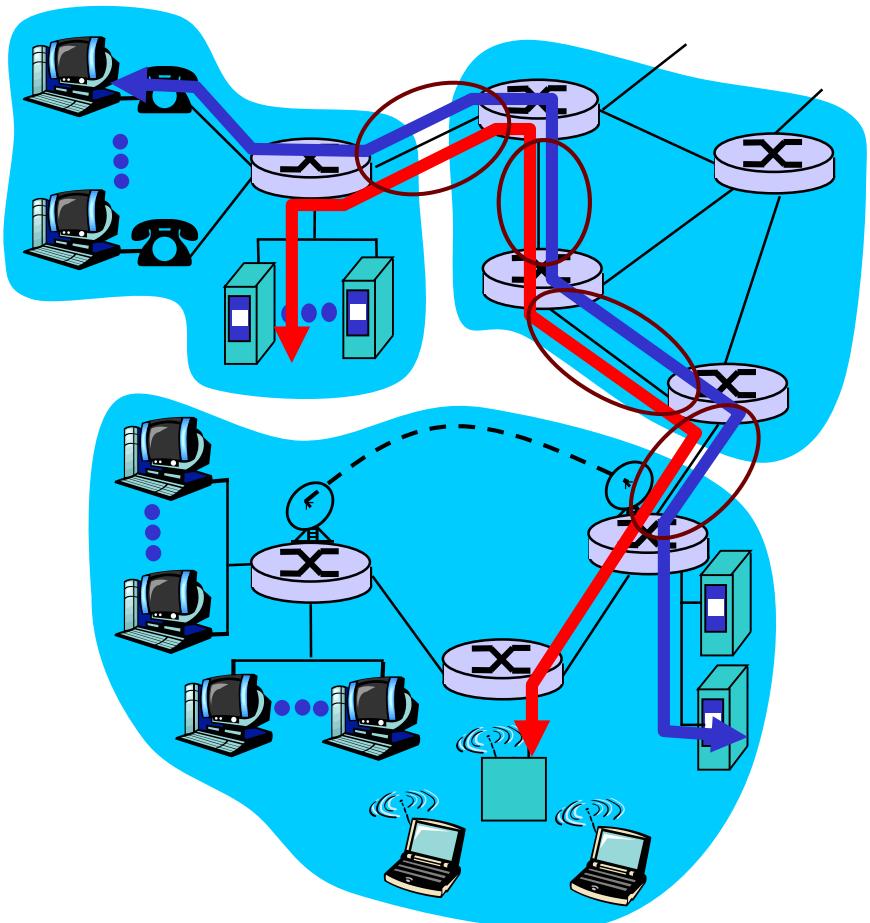
# 电路交换的特点

- ❖ 最典型电路交换网络：电话网络
- ❖ 电路交换的三个阶段：
  - 建立连接（呼叫/电路建立）
  - 通信
  - 释放连接（拆除电路）
- ❖ 独占资源



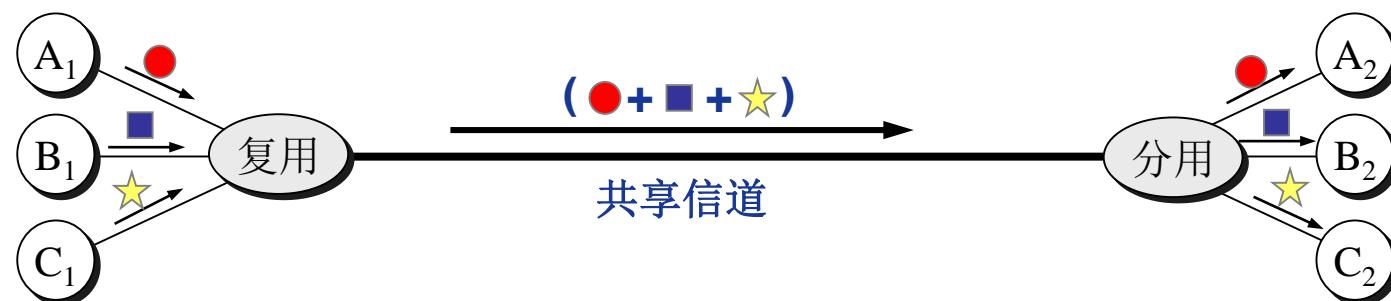
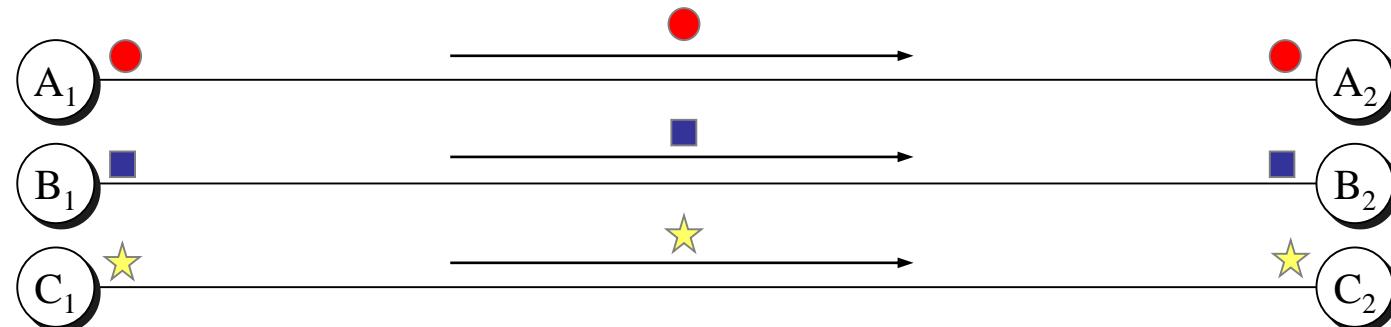
# 电路交换网络的链路共享？

电路交换网络如何共享中继线？  
—多路复用（Multiplexing）



# 多路复用?

- ❖ 多路复用(multiplexing), 简称复用, 是通信技术中的基本概念



# 多路复用?

多路复用(Multiplexing): 链路/网络资源(如带宽)划分为“资源片”

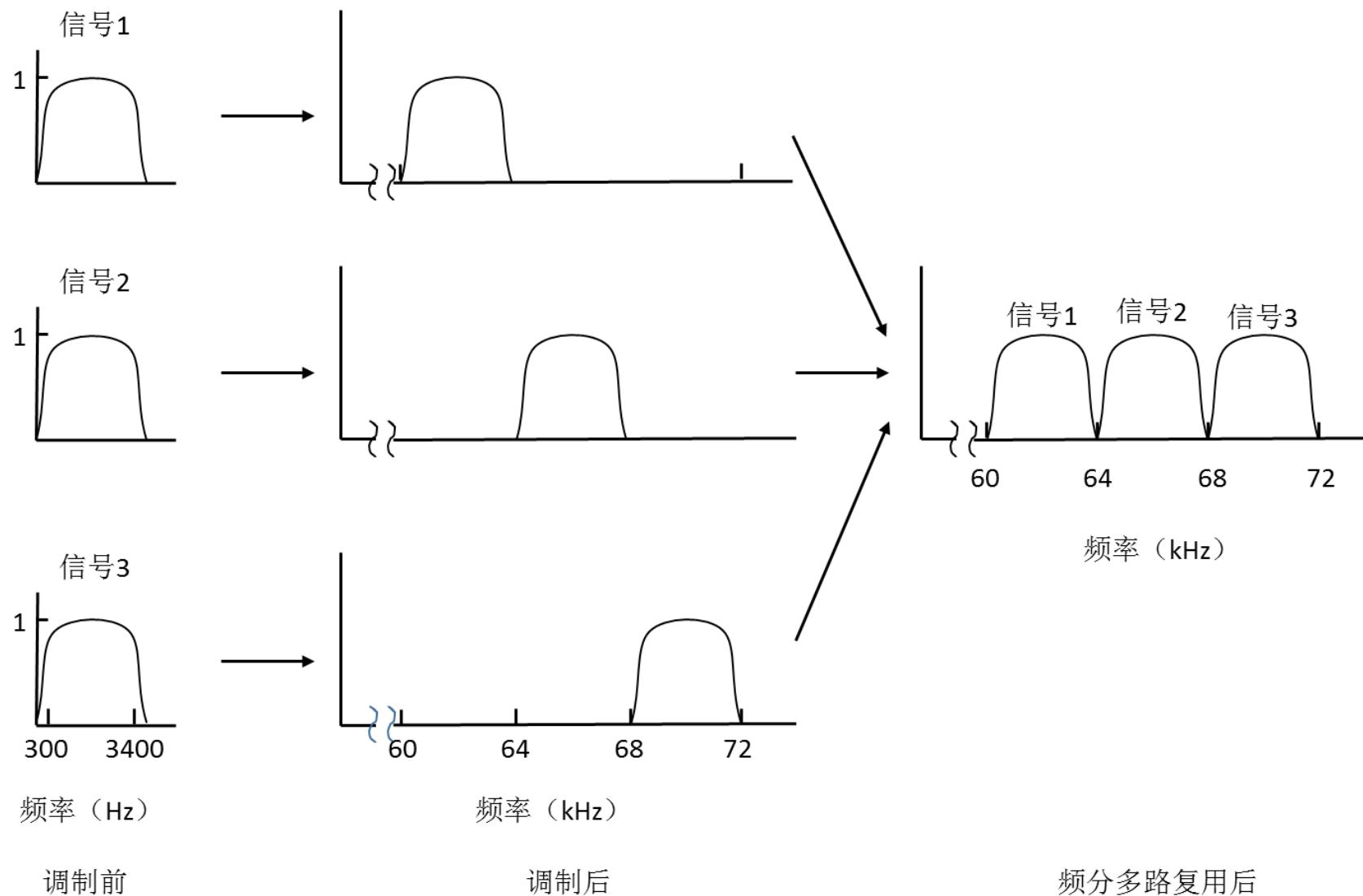
- ❖ 将资源片分配给各路“呼叫”(calls)
- ❖ 每路呼叫独占分配到的资源片进行通信
- ❖ 资源片可能“闲置”(*idle*) (无共享)

典型多路复用方法:

- ❖ 频分多路复用( frequency division multiplexing-**FDM** )
- ❖ 时分多路复用( time division multiplexing-**TDM** )
- ❖ 波分多路复用(Wavelength division multiplexing-**WDM**)
- ❖ 码分多路复用( Code division multiplexing-**CDM** )



# 频分多路复用FDM

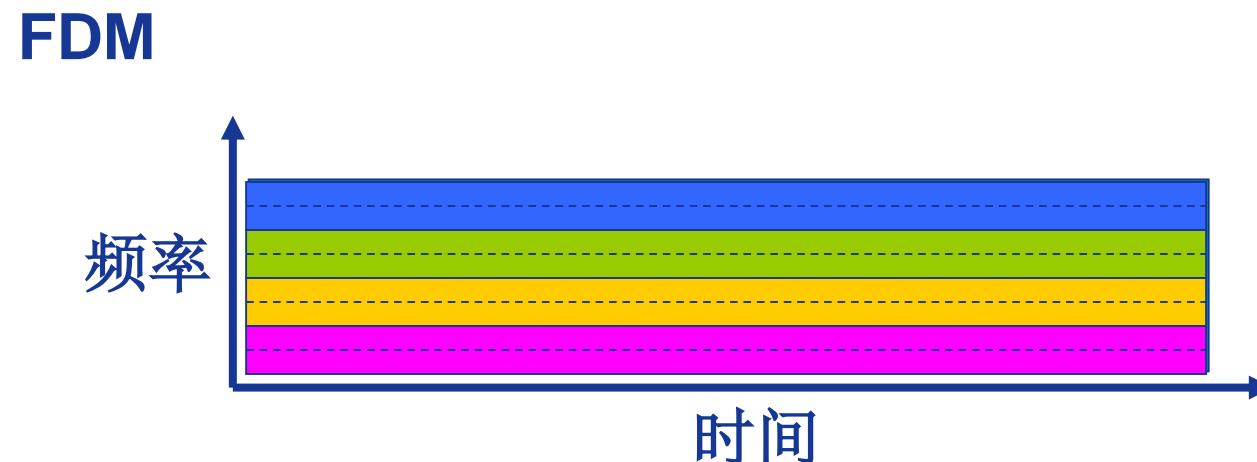


# 频分多路复用FMD

- ❖ 频分多路复用的各用户占用不同的带宽资源（请注意，这里的“带宽”是频率带宽（单位：Hz）而不是数据的发送速率）
- ❖ 用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带

例如：

4个用户



# 时分多路复用TDM

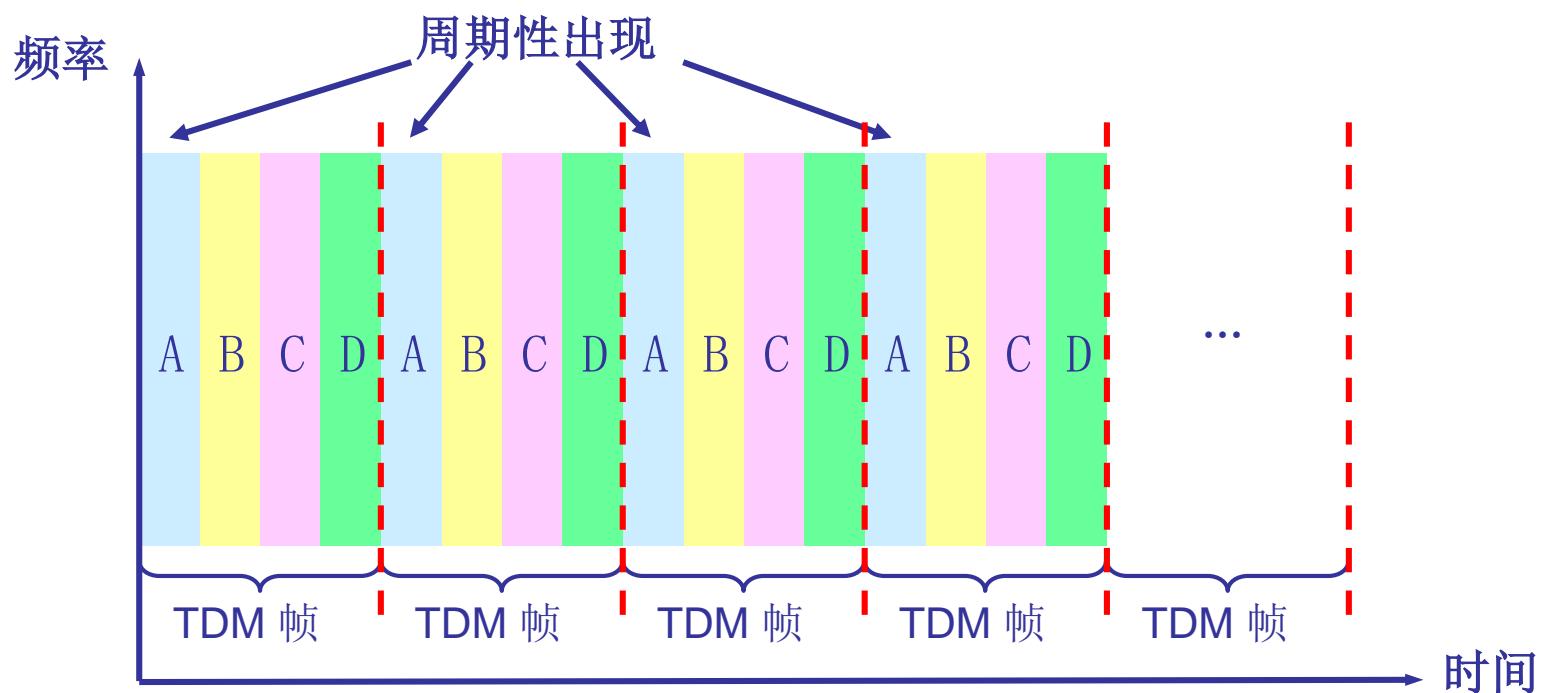
- ❖ 时分复用则是将时间划分为一段段等长的**时分复用帧**（TDM 帧），每个用户在每个 TDM 帧中占用固定序号的时隙
- ❖ 每用户所占用的时隙是**周期性**出现（其周期就是 TDM 帧的长度）



- ❖ 时分复用的所有用户是在不同的时间占用**相同的**频带宽度

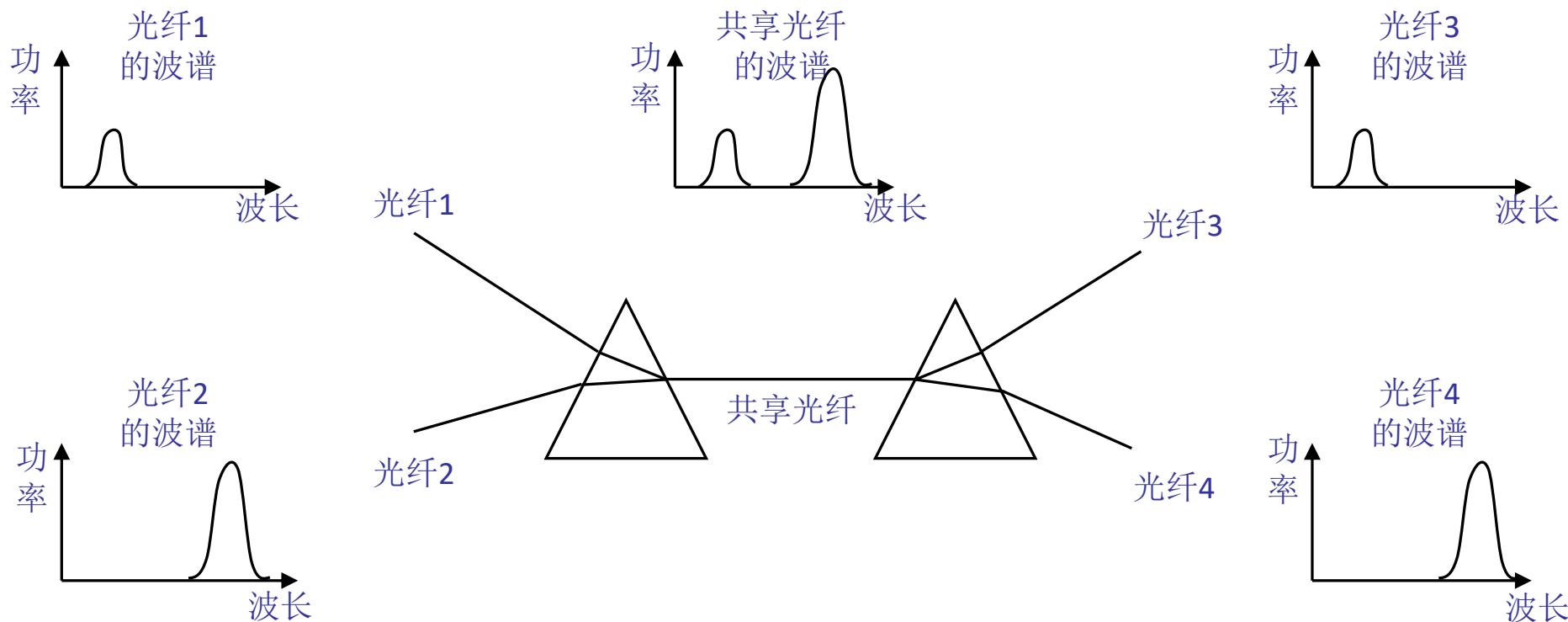


# 时分多路复用TDM

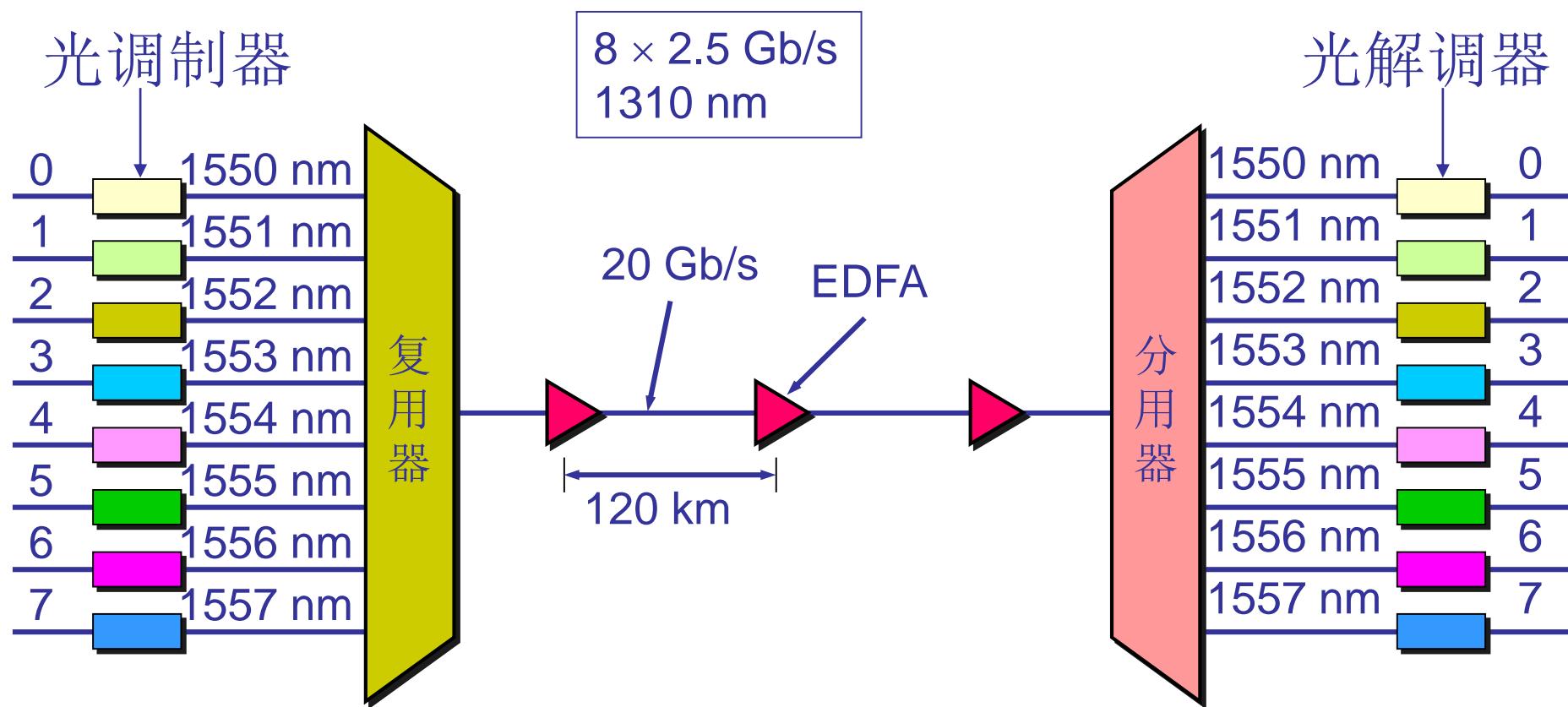


# 波分多路复用WDM

❖ 波分复用就是光的频分复用



# 波分多路复用WDM



# 码分多路复用 CDM

- ❖ 广泛应用于无线链路共享 (如蜂窝网, 卫星通信等)
- ❖ 每个用户分配一个唯一的  $m$  bit 码片序列(chipping sequence), 其中 “0” 用 “-1” 表示、 “1” 用 “+1” 表示, 例如:
  - S 站的码片序列: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
- ❖ 各用户使用相同频率载波, 利用各自码片序列编码数据
- ❖ 编码信号 = (原始数据)  $\times$  (码片序列)
  - 如发送比特 1 (+1), 则发送自己的  $m$  bit 码片序列
  - 如发送比特 0 (-1), 则发送该码片序列的  $m$  bit 码片序列的反码
- ❖ 各用户码片序列相互正交(orthogonal)

$$\frac{1}{m} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad \frac{1}{m} \mathbf{S}_i \cdot \bar{\mathbf{S}}_j = \begin{cases} -1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$



# 码分多路复用CDM

- 令 $\{d_i\}$ 为原始数据序列，各用户的叠加向量为

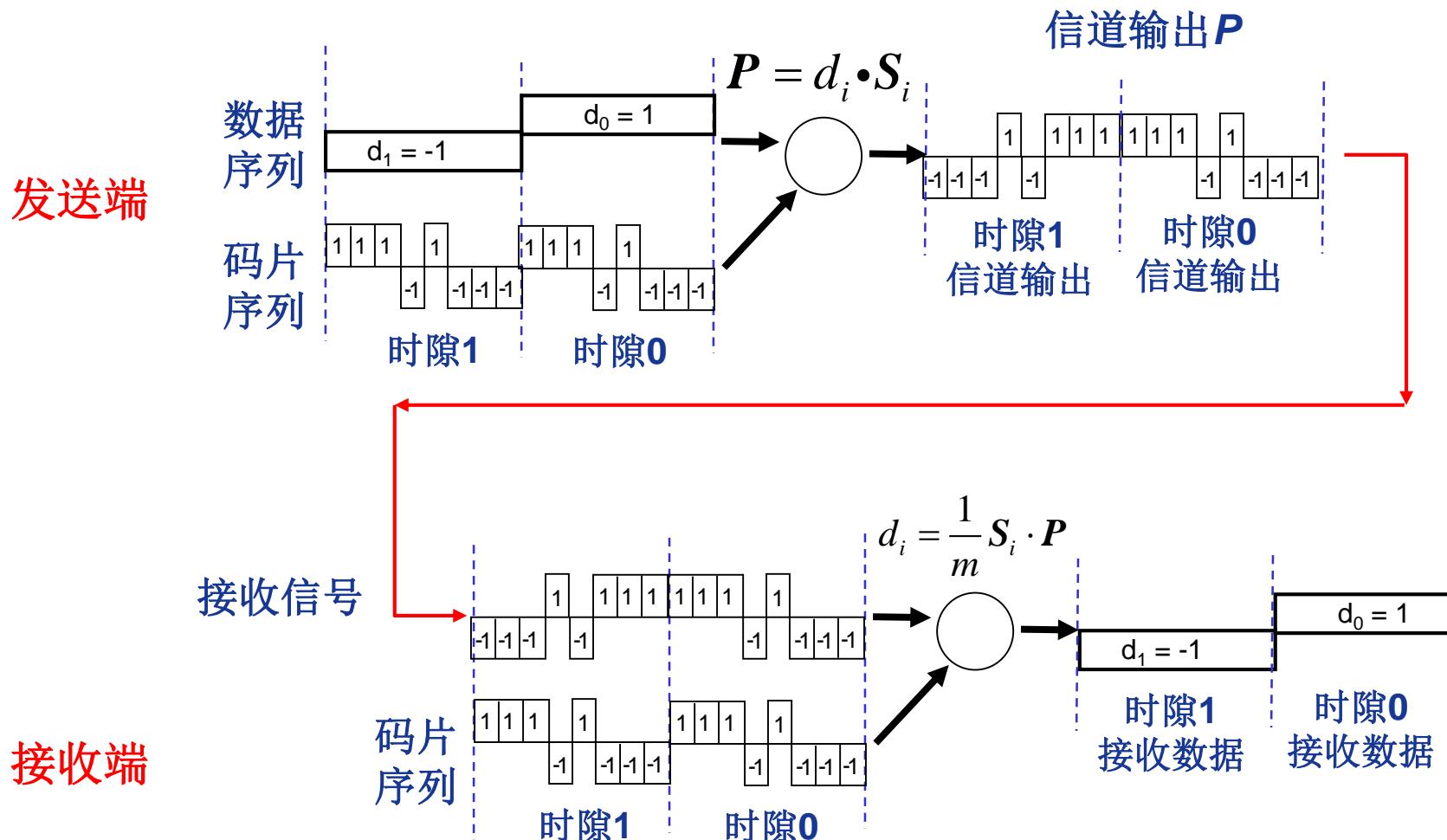
$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^N d_i \cdot \mathbf{S}_i = \sum_{i=1}^N \overset{(-)}{\mathbf{S}}_i$$

- 解码：码片序列与编码信号的内积

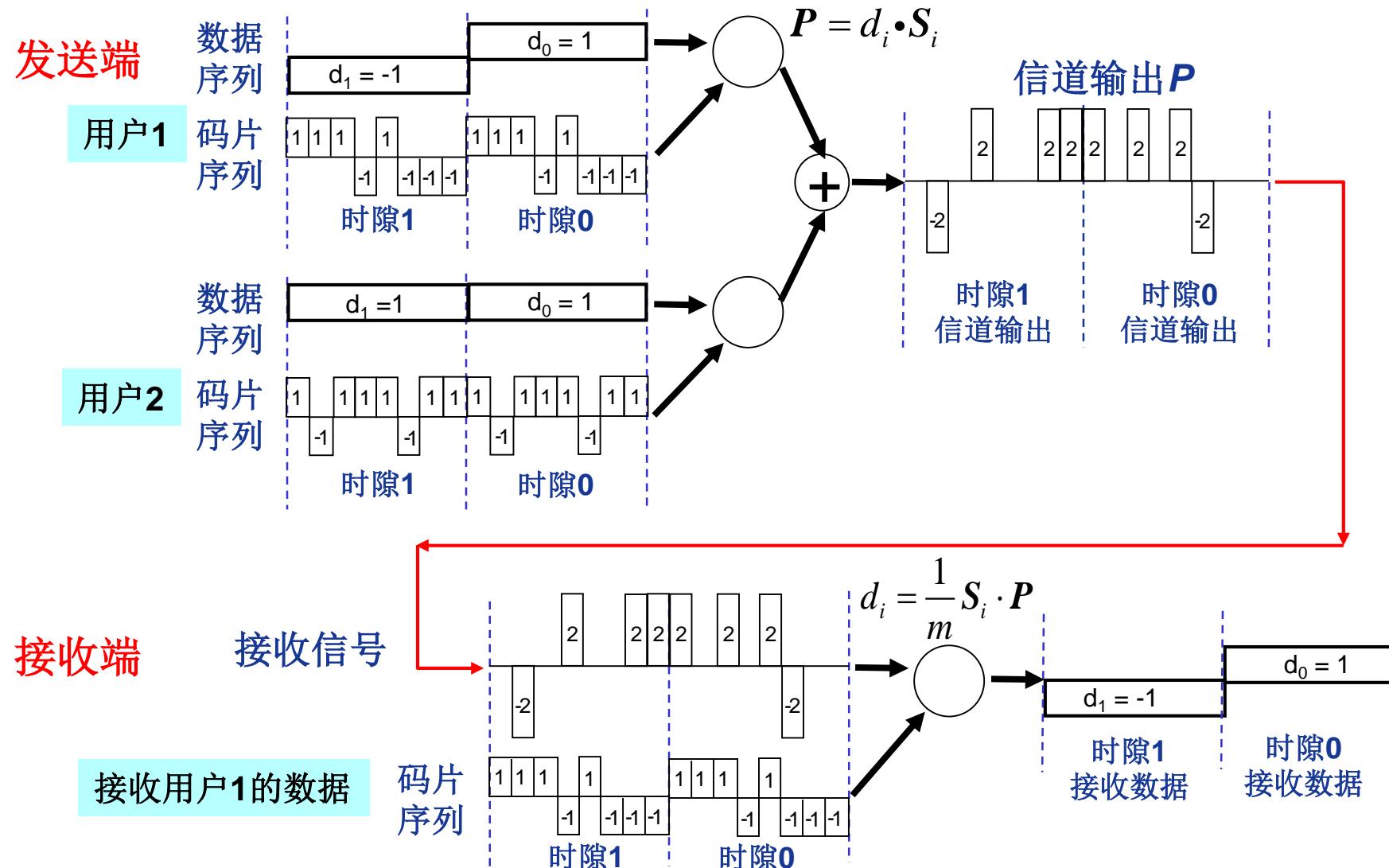
$$d_i = \frac{1}{m} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{P} = \begin{cases} 1 & \mathbf{S}_i \in \mathbf{P} \\ -1 & \overline{\mathbf{S}}_i \in \mathbf{P} \\ 0 & \mathbf{S}_i, \overline{\mathbf{S}}_i \notin \mathbf{P} \end{cases}$$



# 码分多路复用编/解码举例



# 码分多路复用编/解码举例



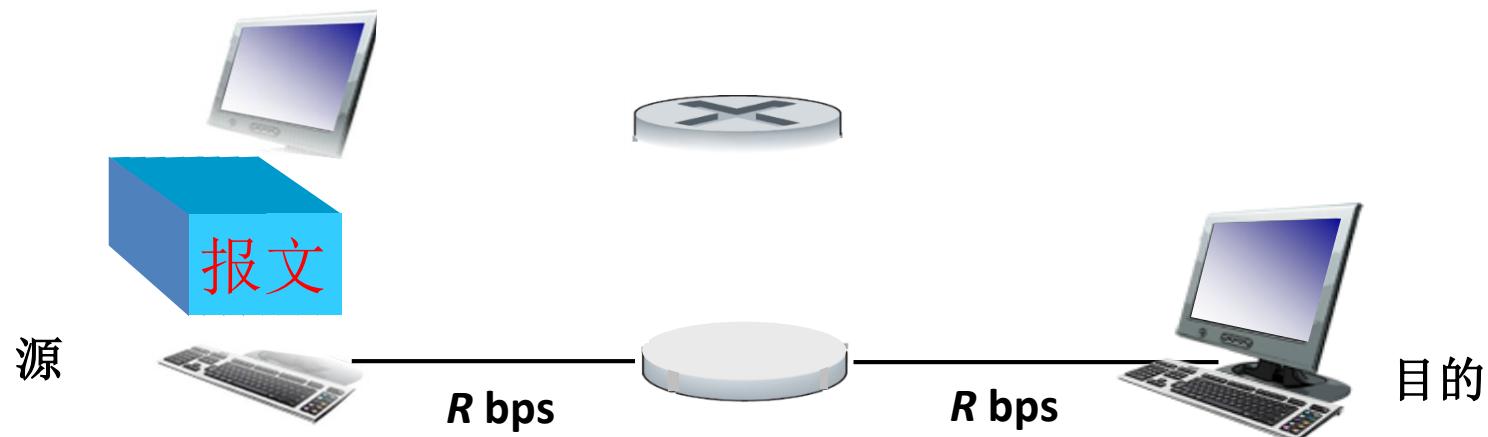
# 数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换



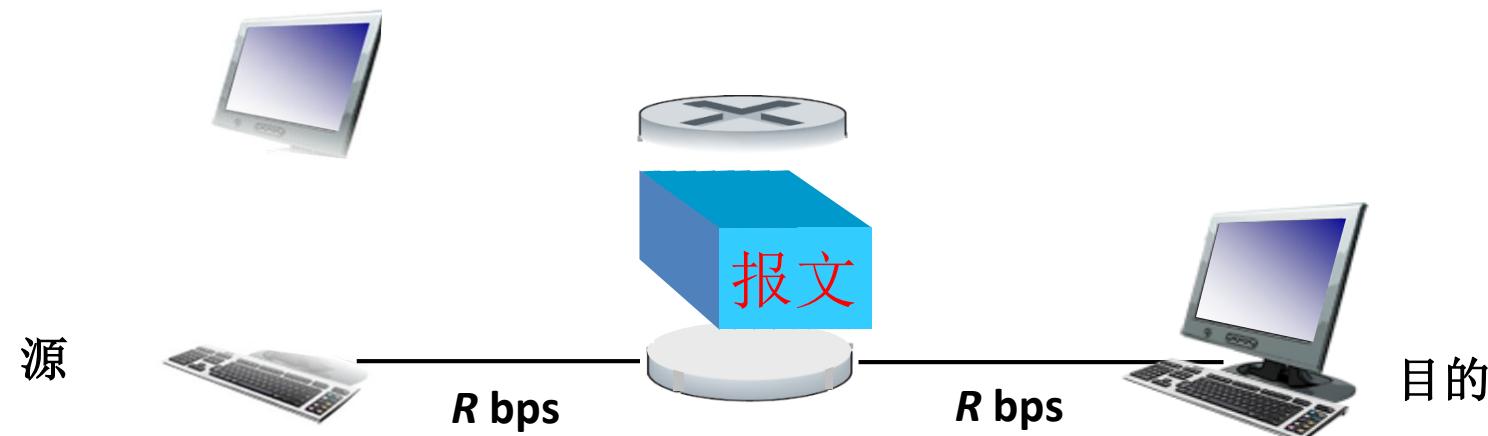
# 报文交换 (message switching)

- ❖ 报文：源（应用）发送信息整体
  - 比如：一个文件



# 报文交换 (message switching)

- ❖ 报文：源（应用）发送信息整体
  - 比如：一个文件



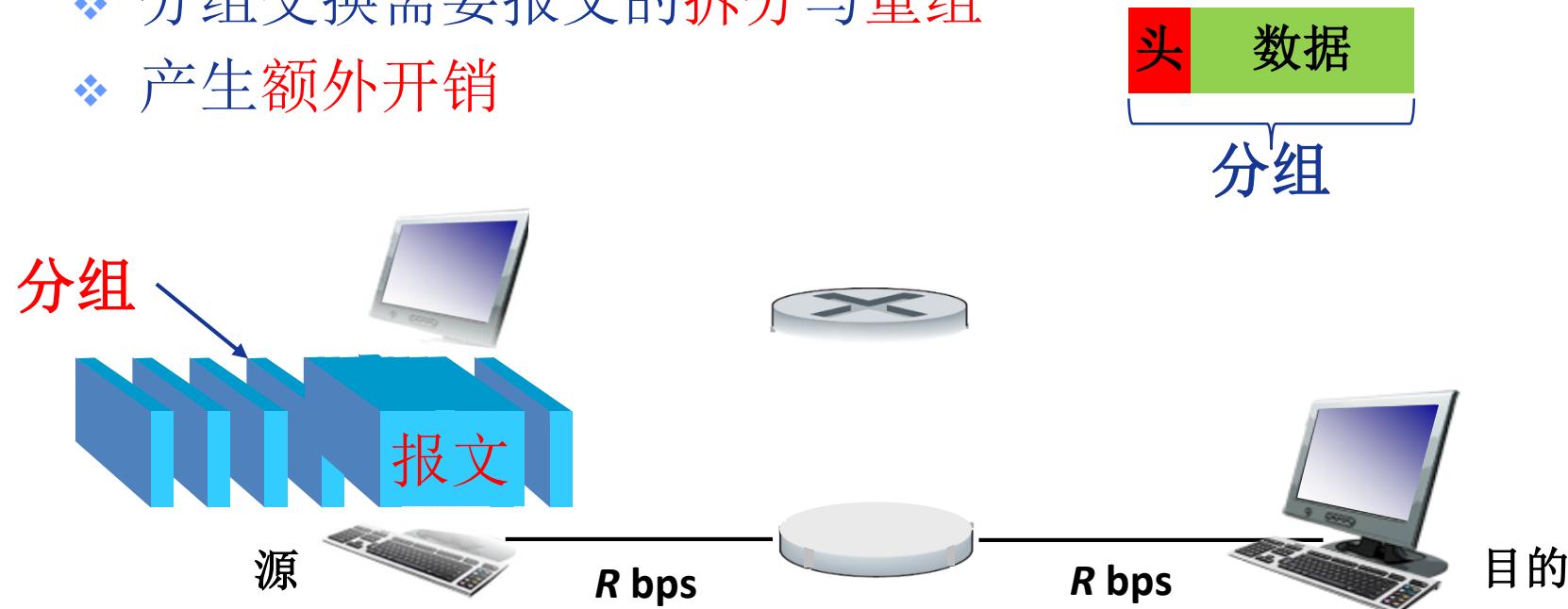
# 数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换



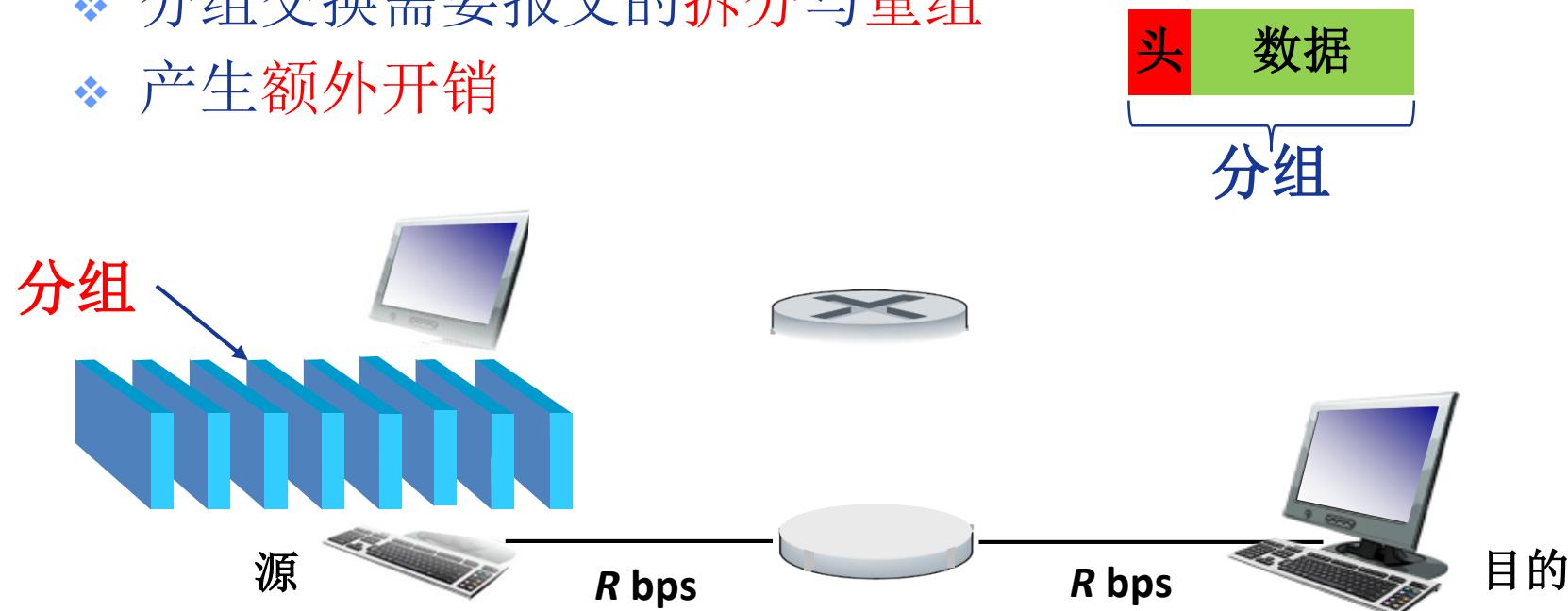
# 分组交换 (package switching)

- ❖ 分组：报文分拆出来的一系列相对较小的数据包
- ❖ 分组交换需要报文的拆分与重组
- ❖ 产生额外开销



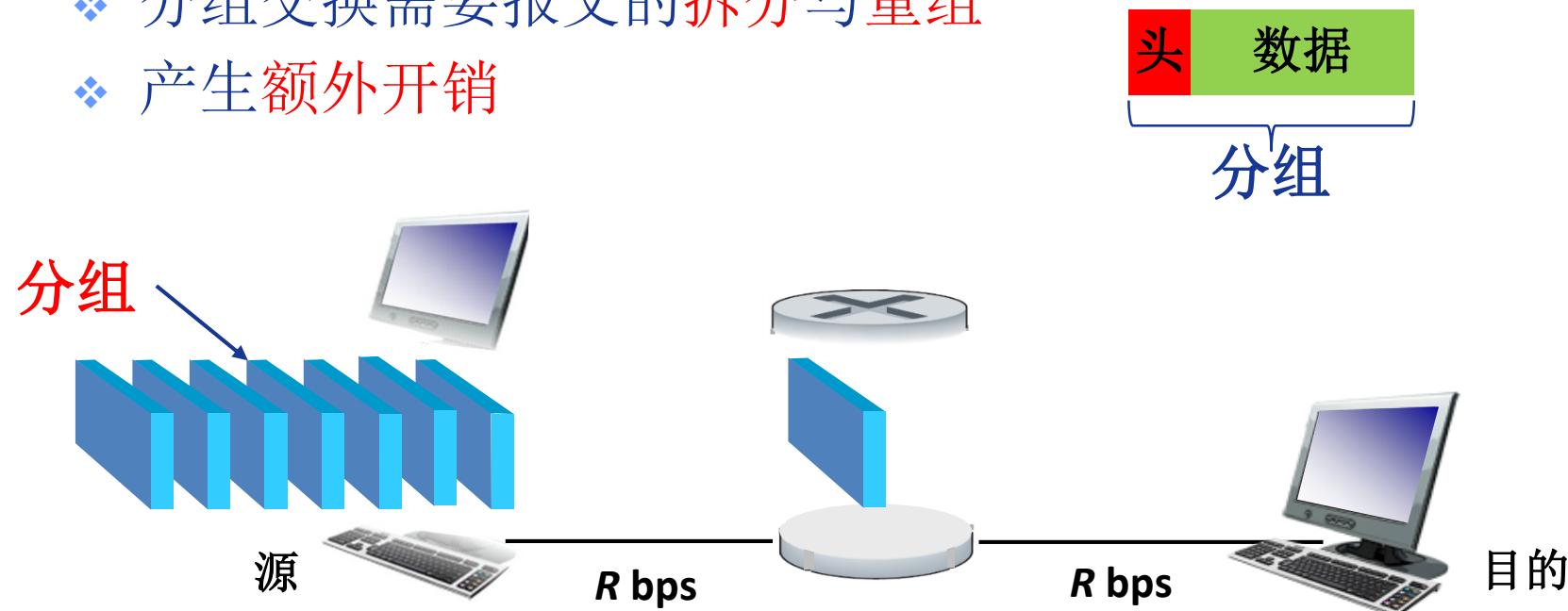
# 分组交换 (package switching)

- ❖ 分组：报文分拆出来的一系列相对较小的数据包
- ❖ 分组交换需要报文的拆分与重组
- ❖ 产生额外开销



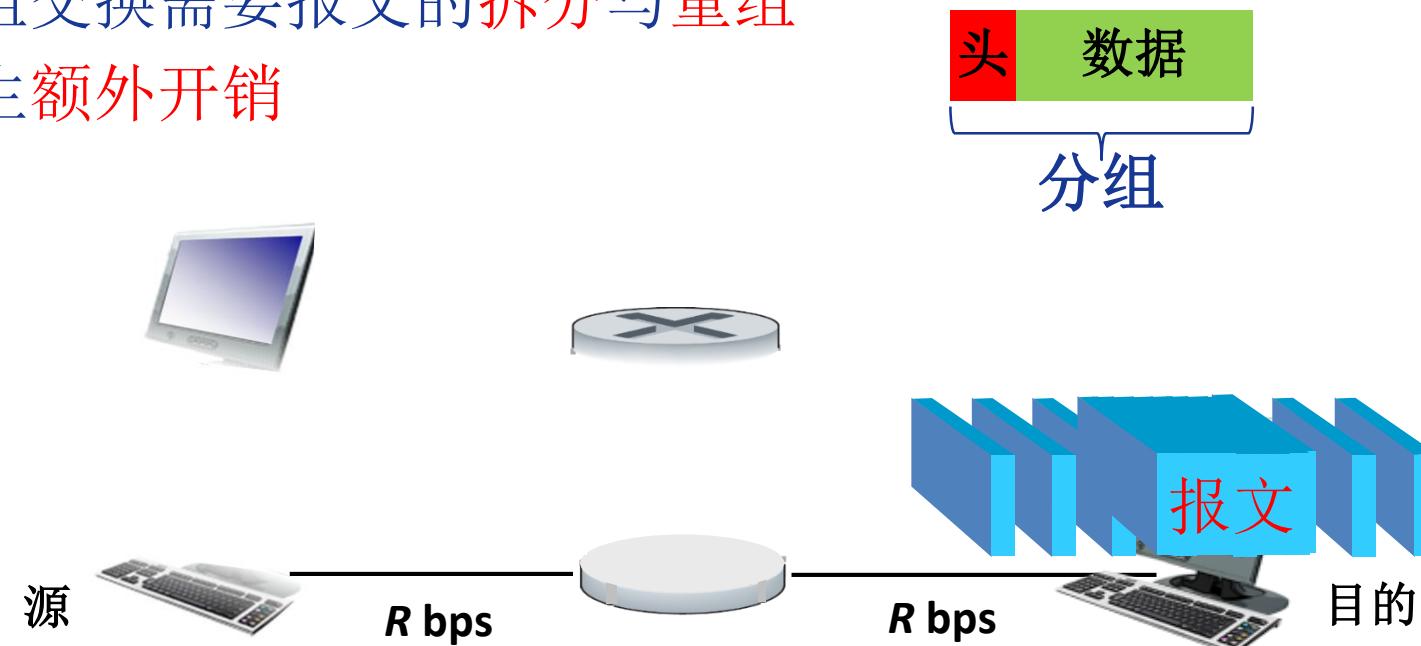
# 分组交换 (package switching)

- ❖ 分组：报文分拆出来的一系列相对较小的数据包
- ❖ 分组交换需要报文的拆分与重组
- ❖ 产生额外开销

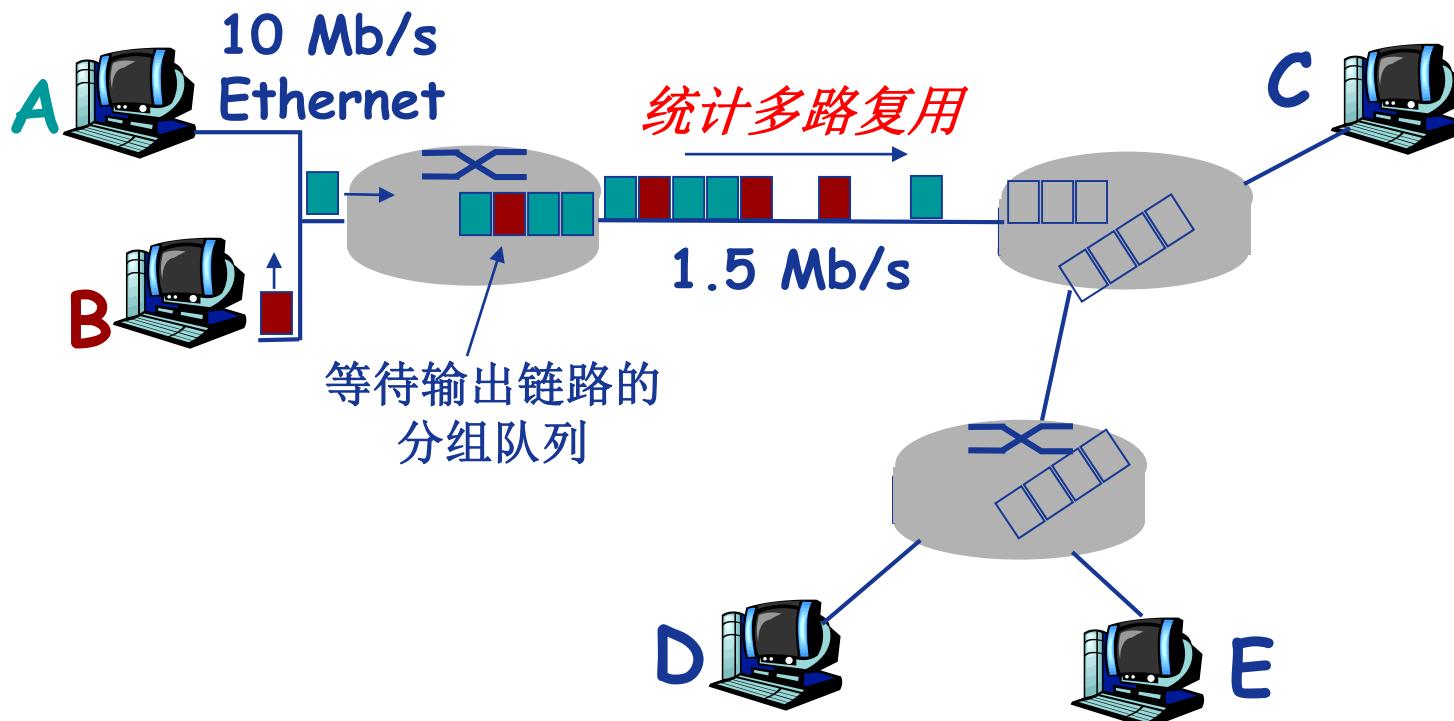


# 分组交换 (package switching)

- ❖ 分组：报文分拆出来的一系列相对较小的数据包
- ❖ 分组交换需要报文的拆分与重组
- ❖ 产生额外开销



# 分组交换:统计多路复用 (Statistical Multiplexing)

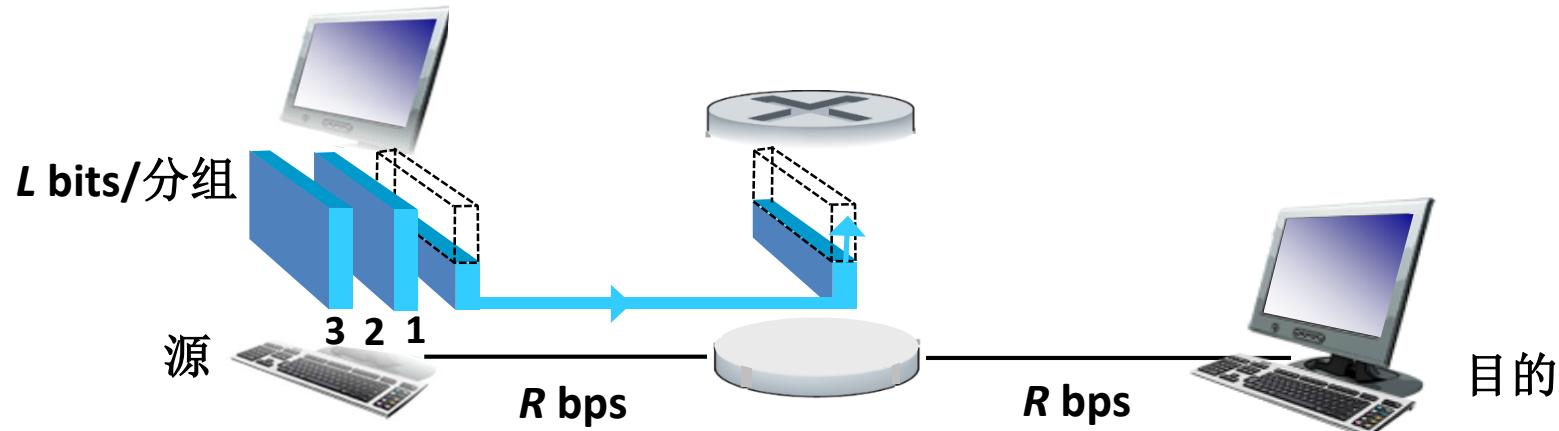


A & B分组序列不确定，按需共享链路

*statistical multiplexing.*



# 存储-转发 (store-and-forward)



- ❖ 报文交换与分组交换均采用**存储-转发**交换方式
- ❖ 区别：
  - 报文交换以完整**报文**进行“存储-转发”
  - 分组交换以较小的**分组**进行“存储-转发”
- ❖ 哪种交换更好呢？



# 分组交换: 传输延迟

发送主机:

- ❖ 接收应用报文（消息）
- ❖ 拆分为较小长度为  $L$  bits 的分组（*packets*）
- ❖ 在传输速率为  $R$  的链路上传输分组

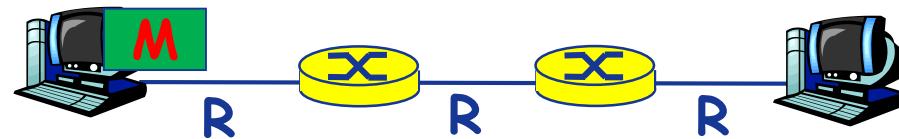


$$\text{分组传输延迟 (时延)} = \frac{L \text{ (bits)}}{R \text{ (bits/sec)}}$$

(delay)



# 报文交换 vs 分组交换?



## ❖ 报文交换:

- 报文长度为  $M$  bits
- 链路带宽为  $R$  bps
- 每次传输报文需要  $M/R$  秒

## ❖ 分组交换:

- 报文被拆分为多个分组
- 分组长度为  $L$  bits
- 每个分组传输时延为  $L/R$  秒

## 例:

❖  $M=7.5$  Mbits,  
 $L=1500$  bits

▪  $M=5000L$

❖  $R = 1.5$  Mbps

## ❖ 报文交换:

▪ 报文交付时间=? sec

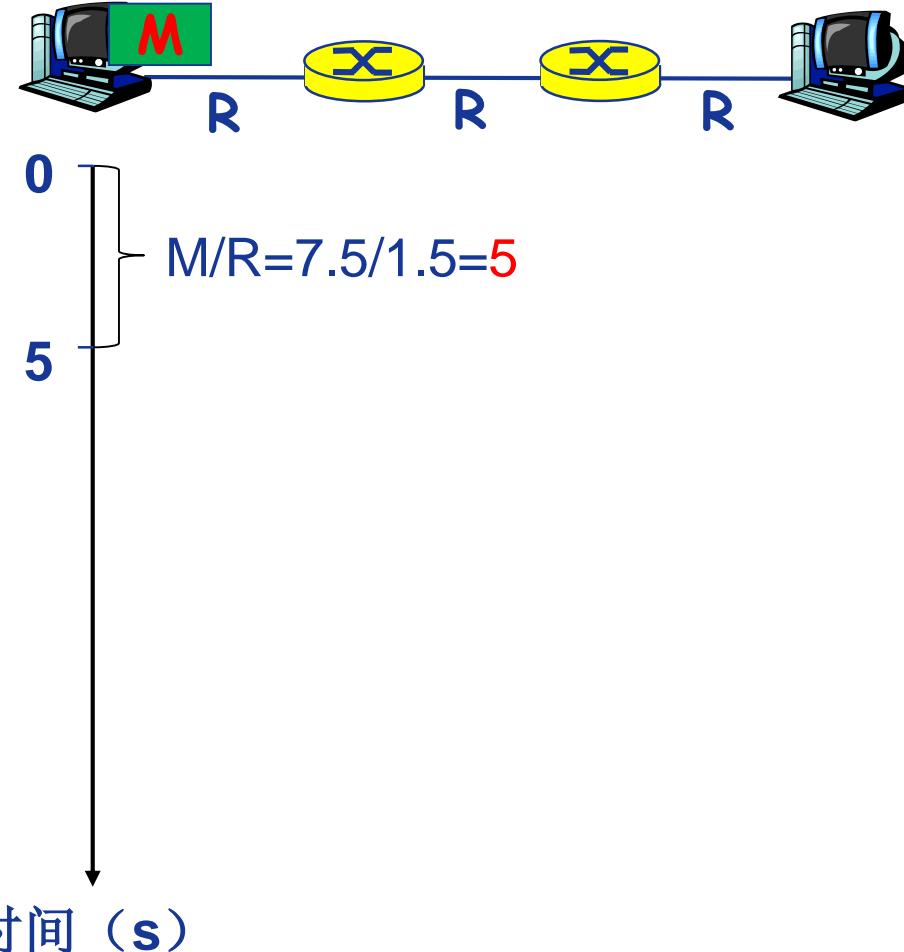
## ❖ 分组交换:

▪ 报文交付时间=? sec



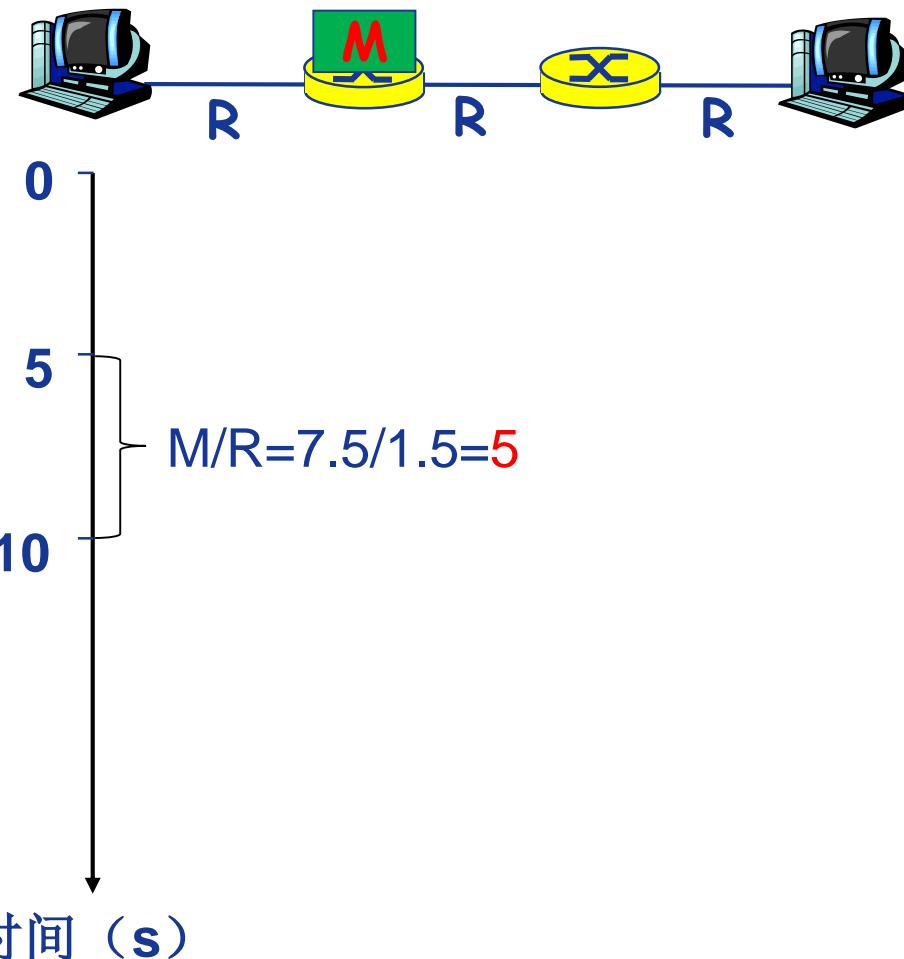
# 报文交换 vs 分组交换?

报文交换



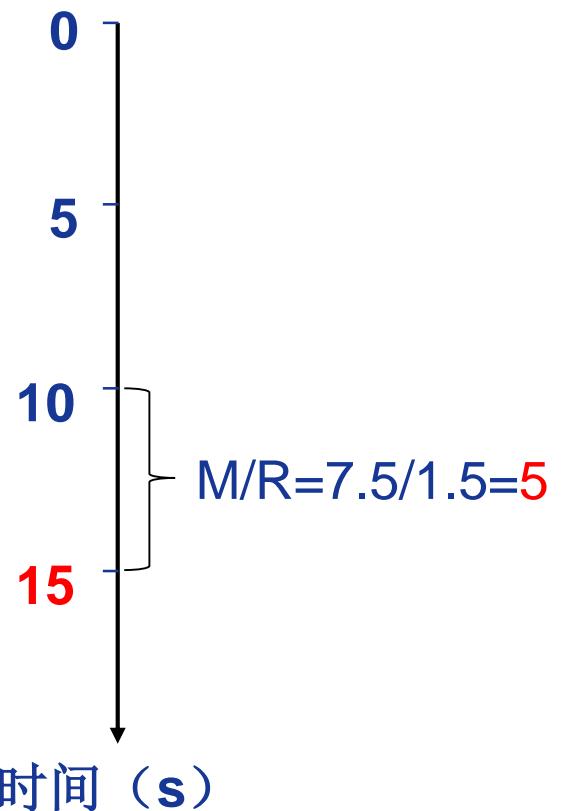
# 报文交换 vs 分组交换?

报文交换



# 报文交换 vs 分组交换?

报文交换



例:

- ❖  $M=7.5 \text{ Mbits}$ ,  
 $L=1500 \text{ bits}$ 
  - $M=5000L$
- ❖  $R = 1.5 \text{ Mbps}$
- ❖ 报文交换:
  - 报文交付时间为 **15 s**
- ❖ 路由器至少需要多大缓存?



# 报文交换 vs 分组交换?

分组交换



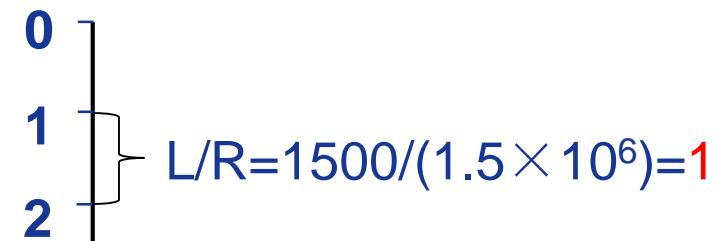
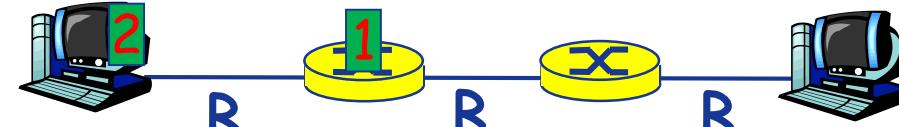
$$L/R = 1500/(1.5 \times 10^6) = 1$$

时间 (ms)

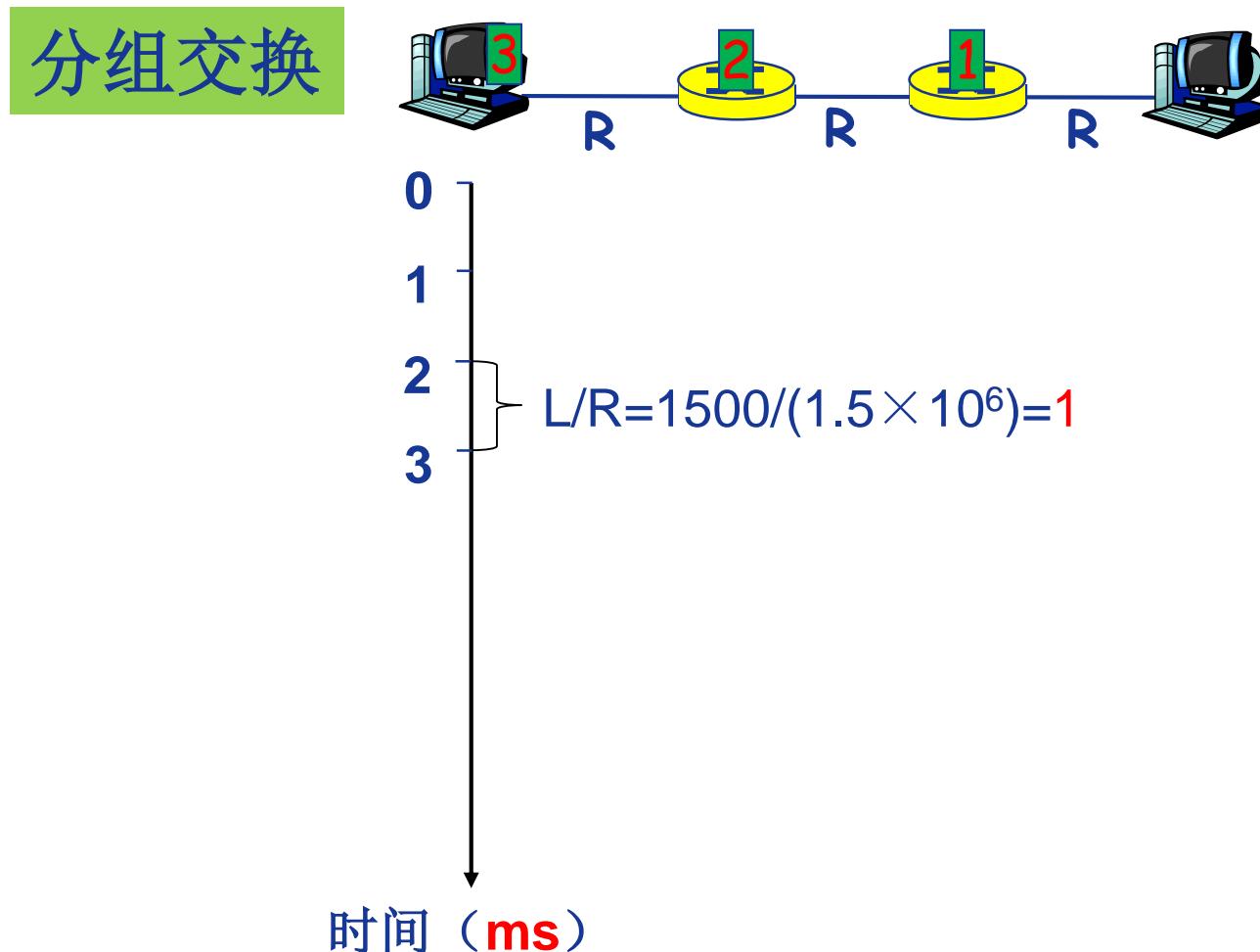


# 报文交换 vs 分组交换?

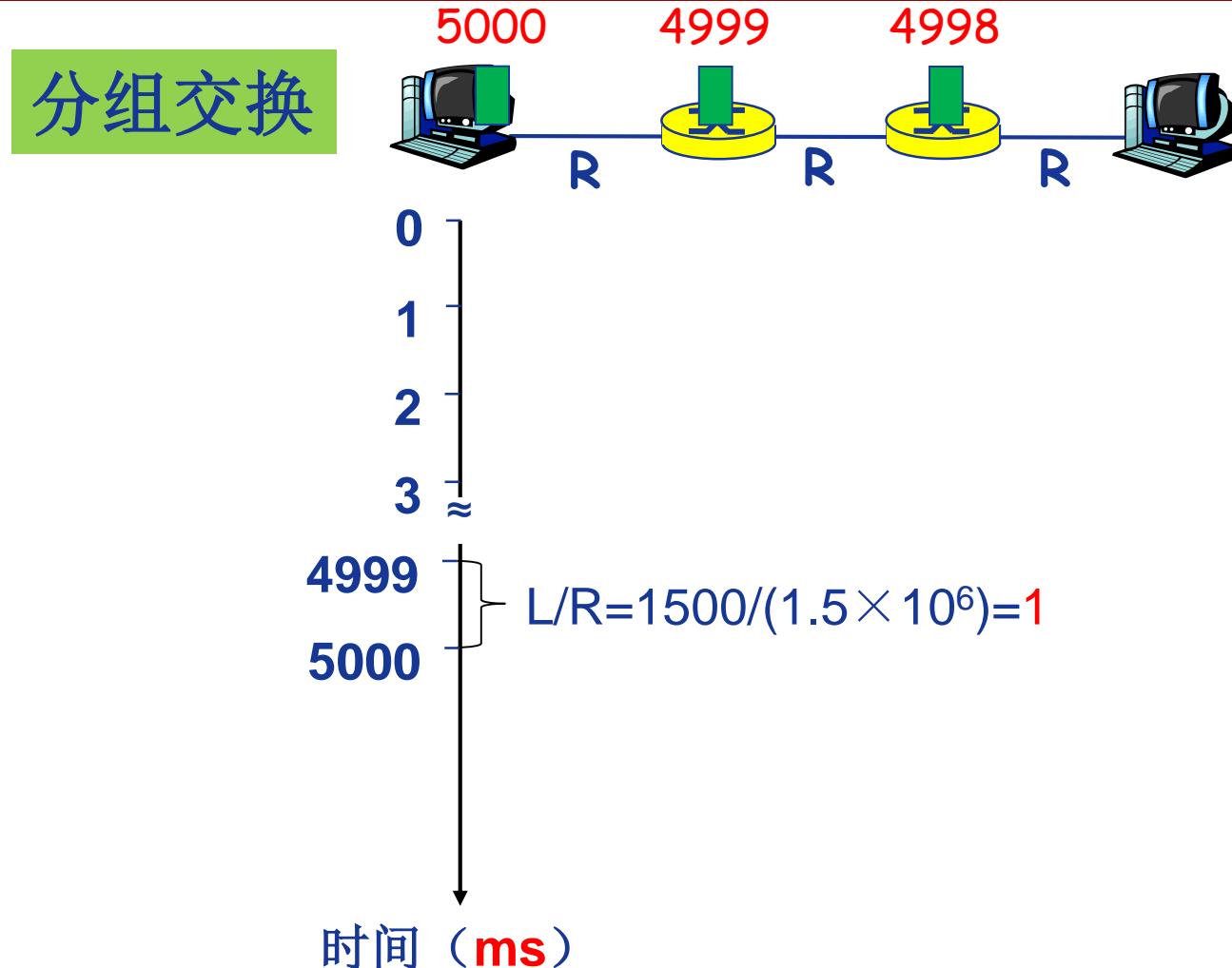
分组交换



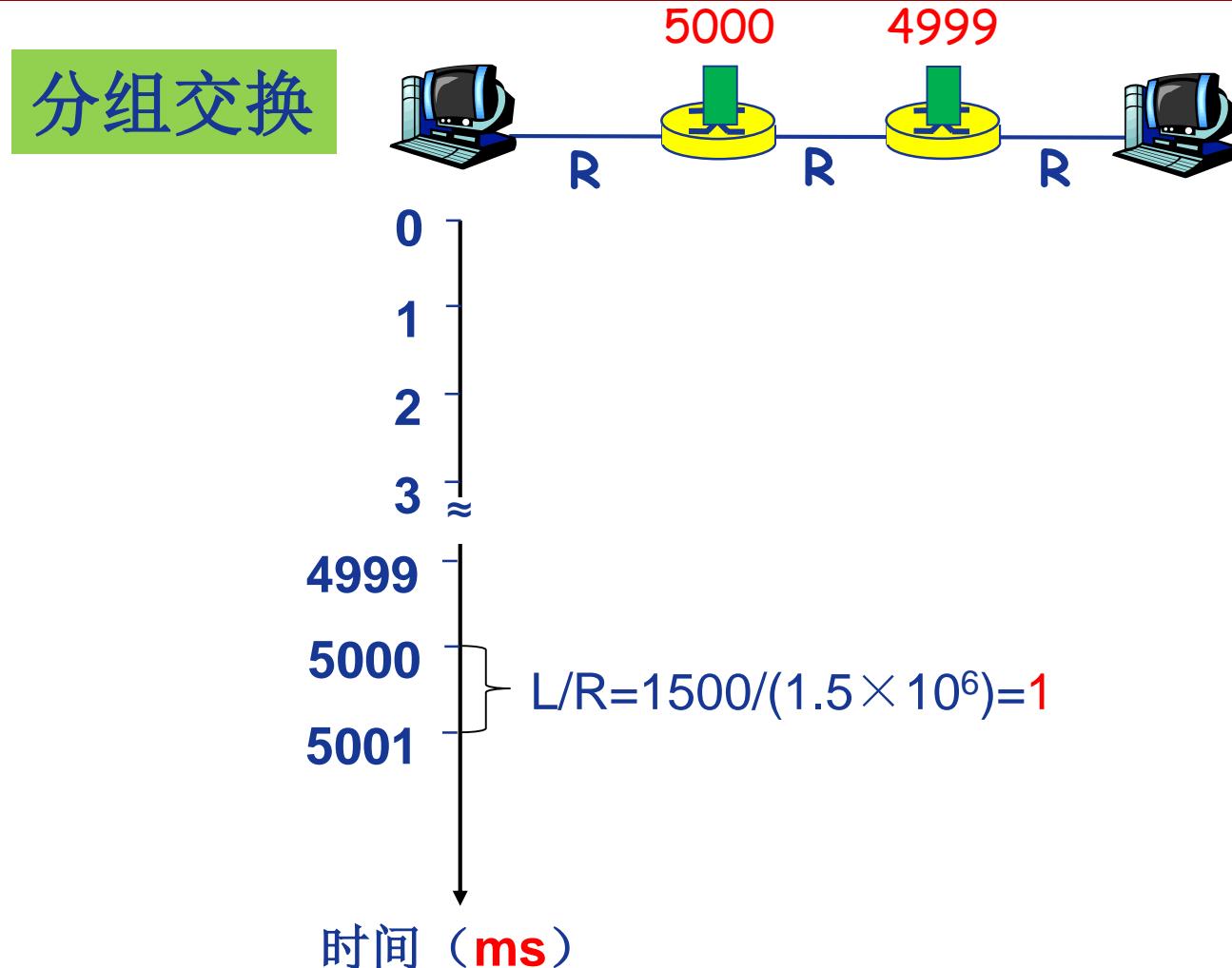
# 报文交换 vs 分组交换?



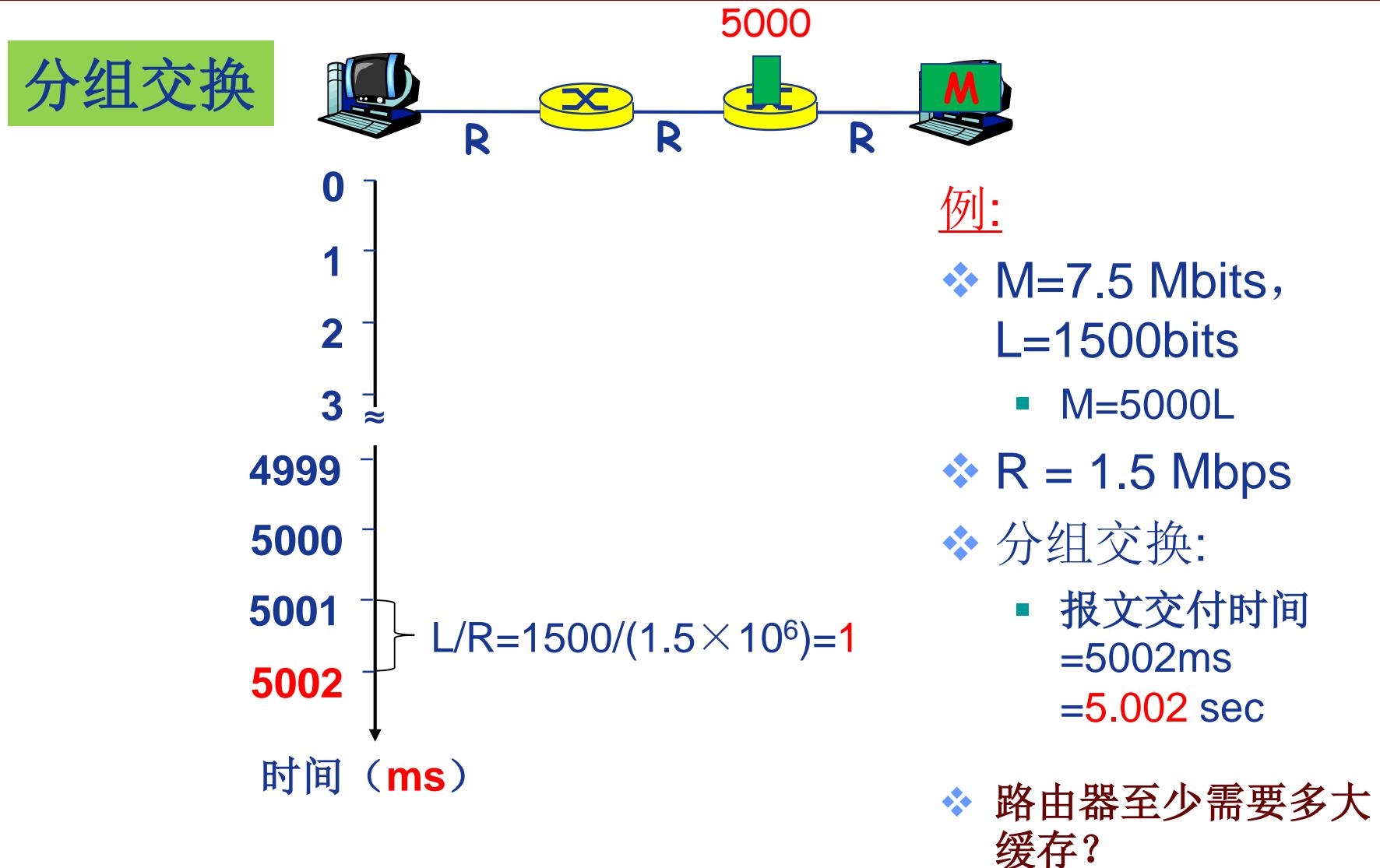
# 报文交换 vs 分组交换?



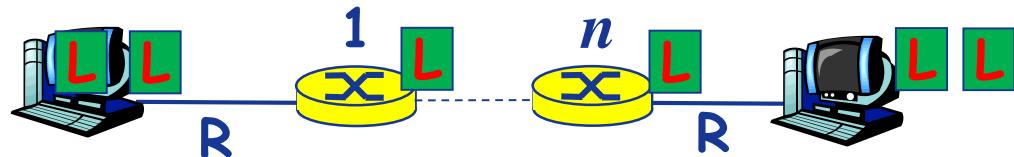
# 报文交换 vs 分组交换?



# 报文交换 vs 分组交换?



# 分组交换的报文交付时间



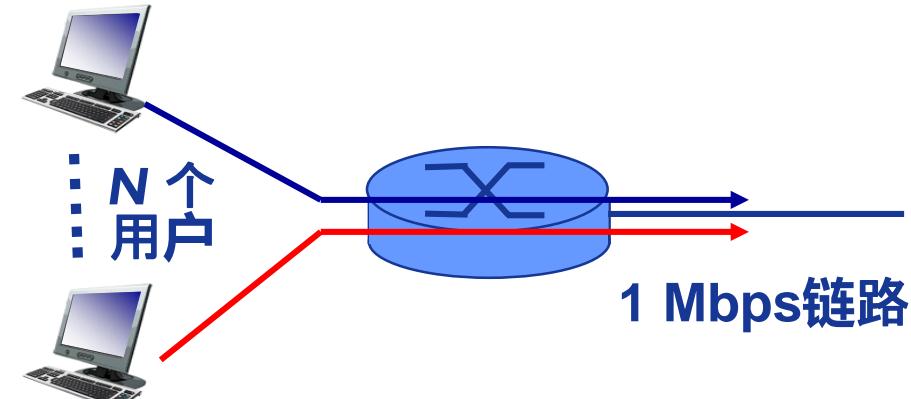
- ❖ 报文:  $M$  bits
- ❖ 链路带宽 (数据传输速率) :  $R$  bps
- ❖ 分组长度 (大小) :  $L$  bits
- ❖ 跳步数:  $h$
- ❖ 路由器数:  $n$

$$\begin{aligned}T &= M/R + (h-1)L/R \\&= M/R + nL/R\end{aligned}$$



# 分组交换 vs 电路交换?

- 例:
- 1 Mb/s链路
- 每个用户:
  - ✓ “活动”时需100 kb/s
  - ✓ 平均活动时间10%
- 电路交换:
  - ✓ 10用户
- 分组交换:
  - ✓ 对于35个用户, 大于10个用户同时活动的概率  
**<0.0004**



分组交换允许更多用户同时使用网络!  
——网络资源充分共享



# 分组交换 vs 电路交换？

分组交换绝对优于电路交换？

- ❖ 适用于**突发**数据传输网络
  - 资源充分共享
  - 简单、无需呼叫建立
- ❖ 可能产生拥塞（**congestion**）：分组延迟和丢失
  - 需要协议处理可靠数据传输和拥塞控制
- ❖ **Q:** 如何提供电路级性能保障?
  - 例如，音/视频应用所需的带宽保障



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 速率

- ❖ 速率即数据率(data rate)或称数据传输速率或比特率(bit rate)
  - 单位时间(秒)传输信息(比特)量
  - 计算机网络中最重要的一个性能指标
  - 单位: b/s(或bps)、kb/s、Mb/s、Gb/s
  - $k=10^3$ 、 $M=10^6$ 、 $G=10^9$
- ❖ 速率往往是指额定速率或标称速率



# 带宽

- ❖ “带宽” (bandwidth) 原本指信号具有的频带宽度，即最高频率与最低频率之差，单位是赫兹 (Hz)
- ❖ 网络的“带宽”通常是数字信道所能传送的“最高数据率”，  
单位： b/s (bps)
- ❖ 常用的带宽单位：
  - kb/s ( $10^3$  b/s)
  - Mb/s ( $10^6$  b/s)
  - Gb/s ( $10^9$  b/s)
  - Tb/s ( $10^{12}$  b/s)

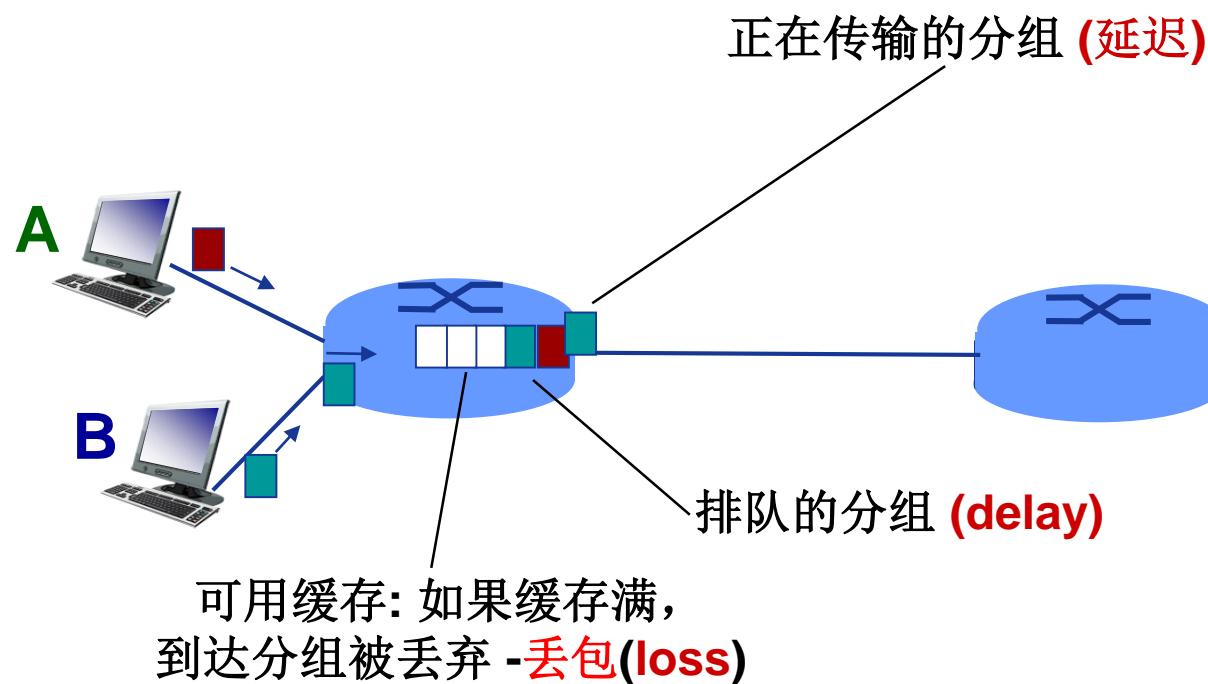


# 延迟/时延(delay或latency)

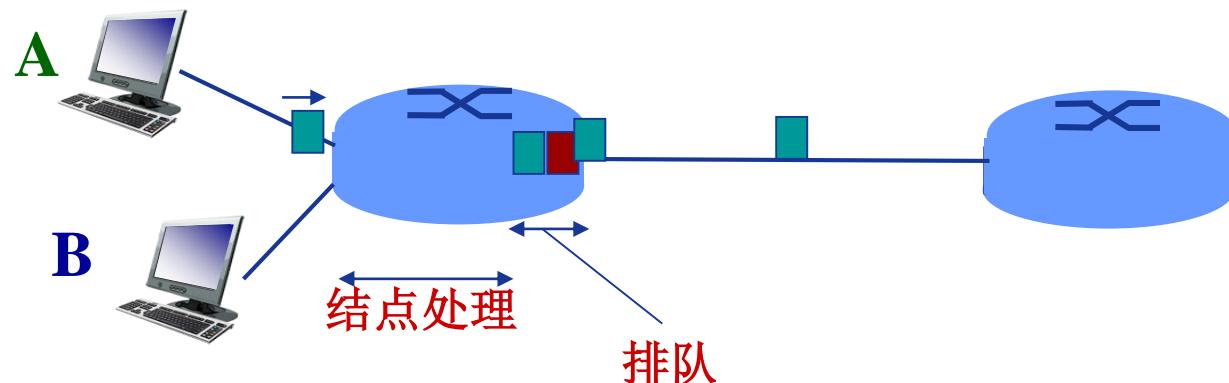
**Q:**分组交换为什么会发生丢包和时延?

**A:**分组在路由器缓存中排队

- ❖ 分组到达速率超出输出链路容量时
- ❖ 分组排队，等待输出链路可用



# 四种分组延迟



$d_{\text{proc}}$ : 结点处理延迟  
(nodal processing delay)

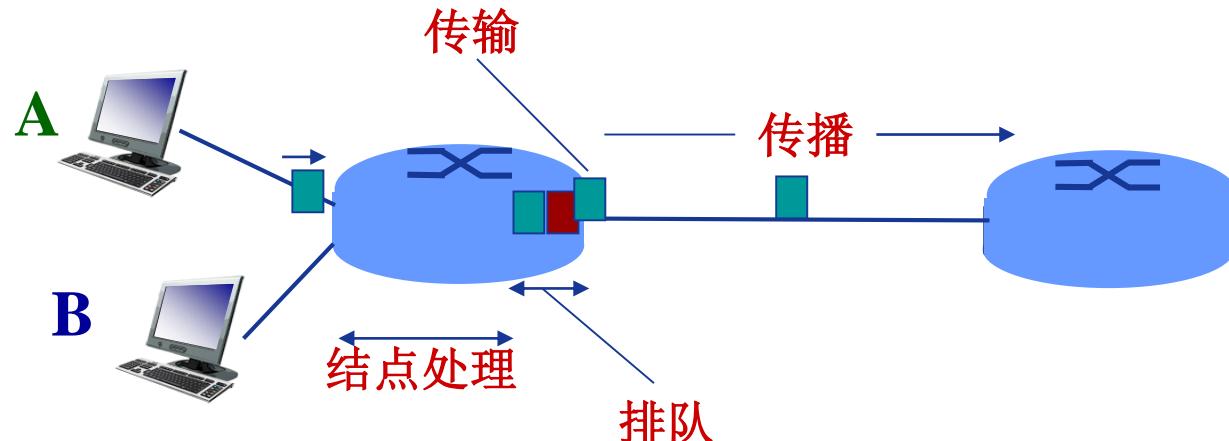
- 差错检测
- 确定输出链路
- 通常< msec

$d_{\text{queue}}$ : 排队延迟  
(queueing delay)

- 等待输出链路可用
- 取决于路由器拥塞程度



# 四种分组延迟



$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

$d_{\text{trans}}$ : 传输延迟  
(transmission delay)

- $L$ : 分组长度(bits)
- $R$ : 链路带宽 (bps)
- $d_{\text{trans}} = L/R$

$d_{\text{prop}}$ : 传播延迟 (propagation delay)

- $d$ : 物理链路长度
- $s$ : 信号传播速度 ( $\sim 2 \times 10^8$  m/sec)
- $d_{\text{prop}} = d/s$



# 类比：车队



- ❖ 车速为  $100 \text{ km/hr}$  ~ 信号传播速度
- ❖ 收费站放行一台车用时  $12 \text{ 秒}$  ~ 比特传输时间
- ❖ 车 ~ 比特；车队 ~ 分组
- ❖ 车队通过收费站时间 ~ 传输延迟 ( $120\text{秒}$ )
- ❖ 每台车从第一个收费站跑到第二个收费站用时  
~ 传播延迟 ( $1\text{小时}$ )

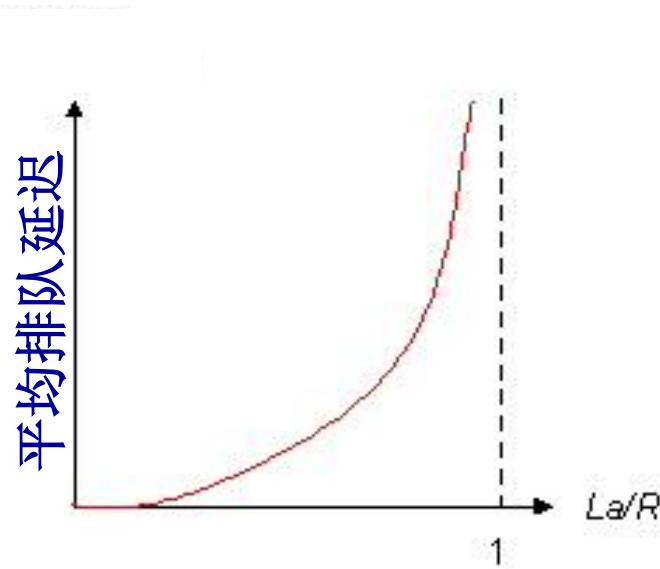


# 排队延迟

- ❖  $R$ : 链路带宽(bps)
- ❖  $L$ : 分组长度 (bits)
- ❖  $a$ : 平均分组到达速率

流量强度 (traffic intensity)  
 $= La/R$

- ❖  $La/R \sim 0$ : 平均排队延迟很小
- ❖  $La/R \rightarrow 1$ : 平均排队延迟很大
- ❖  $La/R > 1$ : 超出服务能力, 平均排队延迟无限大!



$La/R \sim 0$



$La/R \rightarrow 1$



# 时延带宽积

$$\begin{aligned}\text{时延带宽积} &= \text{传播时延} \times \text{带宽} \\ &= d_{\text{prop}} \times R \text{ (bits)}\end{aligned}$$

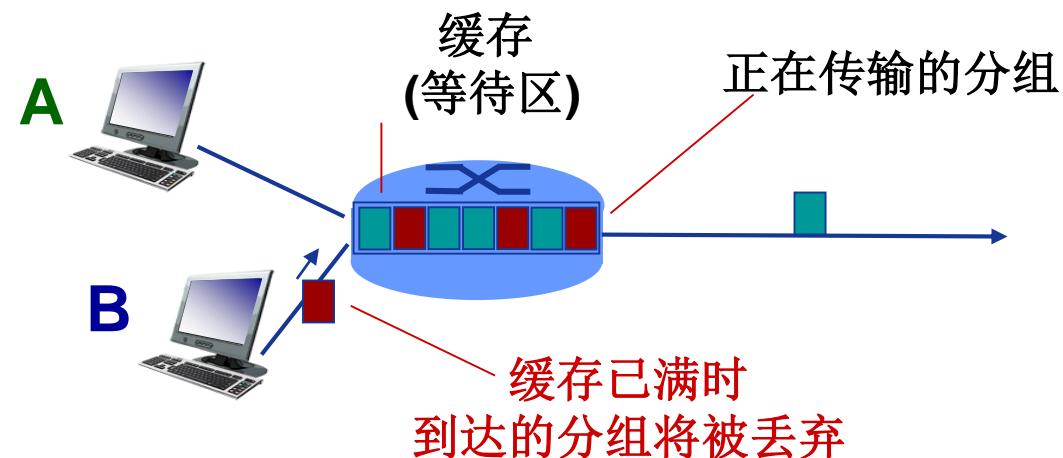


- ❖ 链路的时延带宽积又称为以比特为单位的链路长度



# 分组丢失（丢包）

- ❖ 队列缓存容量有限
- ❖ 分组到达已满队列将被丢弃（即丢包）
- ❖ 丢弃分组可能由前序结点或源重发（也可能不重发）

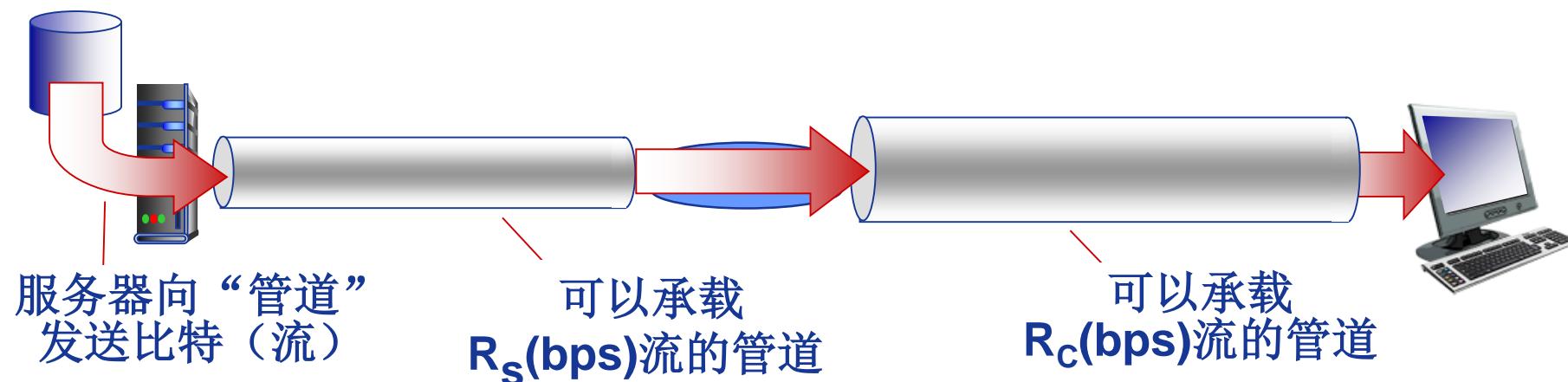


$$\text{丢包率} = \frac{\text{丢包数}}{\text{已发分组总数}}$$



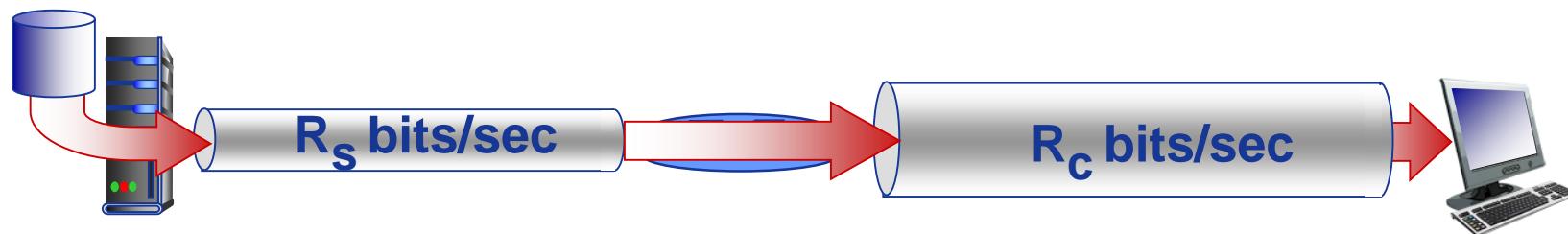
# 吞吐量/率 (Throughput)

- ❖ 吞吐量: 表示在发送端与接收端之间传送数据速率 (b/s)
  - 即时吞吐量: 给定时刻的速率
  - 平均吞吐量: 一段时间的平均速率

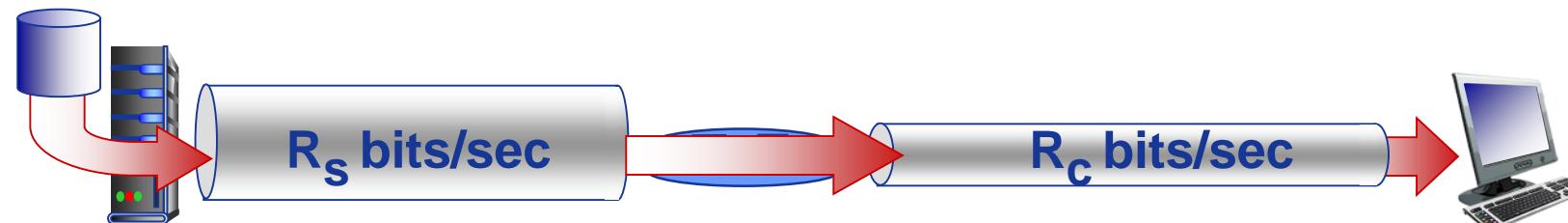


# 吞吐量/率 (Throughput)

- ❖ 若  $R_s < R_c$ , 则端到端的吞吐量是多少?



- ❖ 若  $R_s > R_c$ , 则端到端的吞吐量是多少?



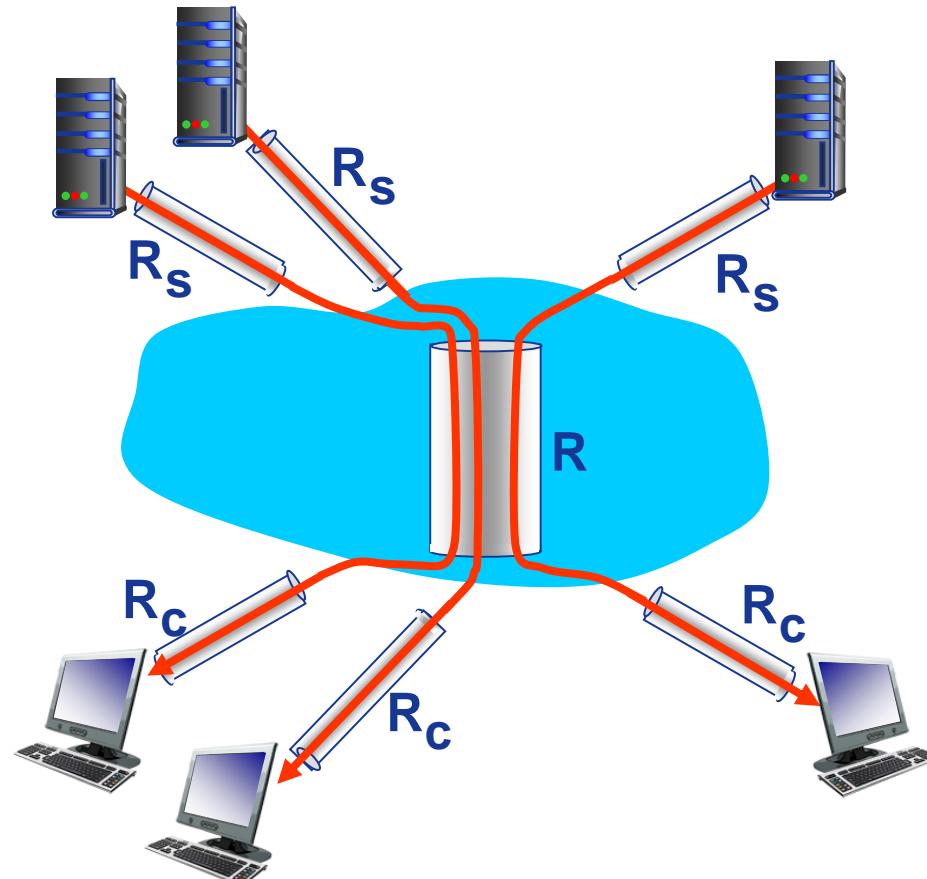
## 瓶颈链路 (*bottleneck link*)

端到端路径上，限制端到端吞吐量的链路。



# 吞吐量: Internet场景

- ❖ 每条“连接”的端到端吞吐量:  
 $\min(R_c, R_s, R/10)$
- ❖ 实际网络:  $R_c$  或  $R_s$  通常是瓶颈



10条“连接”共享  
主干网瓶颈链路  $R$  bits/sec



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

计算机网络发展历史



# 为什么需要计算机网络体系结构？

计算机网络是一个非常复杂的系统,涉及许多组成部分:

- 主机 (hosts)
- 路由器 (routers)
- 各种链路 (links)
- 应用 (applications)
- 协议 (protocols)
- 硬件、软件
- .....

问题:

是否存在一种系统结构有效描述网络?

利用什么样的结构?

....

至少用于讨论网络?

A: 分层结构



# 复杂系统的分层结构

- ❖ 类比：航空旅行



- ❖ 每层完成一种（类）特定服务/功能
  - 每层依赖底层提供的服务，通过层内动作完成相应功能



# 计算机网络的体系结构?

- ❖ 网络体系结构是从功能上描述计算机网络结构
- ❖ 计算机网络体系结构简称网络体系结构(network architecture)  
是分层结构
- ❖ 每层遵循某个/些网络协议完成本层功能
- ❖ **计算机网络体系结构**是计算机网络的各层及其协议的集合
- ❖ 体系结构是一个计算机网络的功能层次及其关系的**定义**
- ❖ 体系结构是**抽象的**

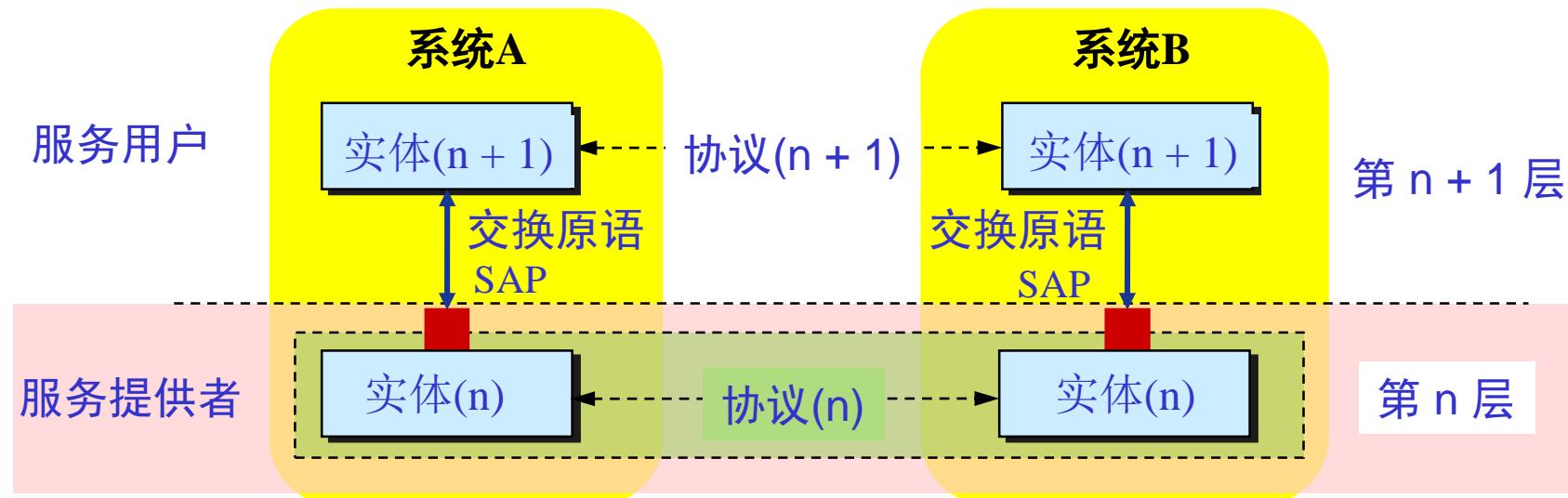


# 为什么采用分层结构?

- ❖ 结构清晰，有利于识别复杂系统的部件及其关系
  - 分层的参考模型（reference model）
- ❖ 模块化的分层易于系统更新、维护
  - 任何一层服务实现的改变对于系统其它层都是透明的
  - 例如，登机过程的改变并不影响航空系统的其它部分（层）
- ❖ 有利于标准化
- ❖ 分层是否有不利之处？



# 分层网络体系结构基本概念



- ❖ **实体(entity)** 表示任何可发送或接收信息的硬件或软件进程。
- ❖ 协议是控制**两个对等实体**进行通信的规则的集合，协议是“**水平的**”
- ❖ 任一层实体需要使用**下层服务**，遵循本层协议，实现本层功能，向**上层**提供服务，服务是“**垂直的**”。
- ❖ 下层协议的实现对上层的服务用户是**透明的**。
- ❖ 同系统的相邻层实体间通过**接口**进行交互，通过**服务访问点 SAP (Service Access Point)**，**交换原语**，指定请求的特定服务。

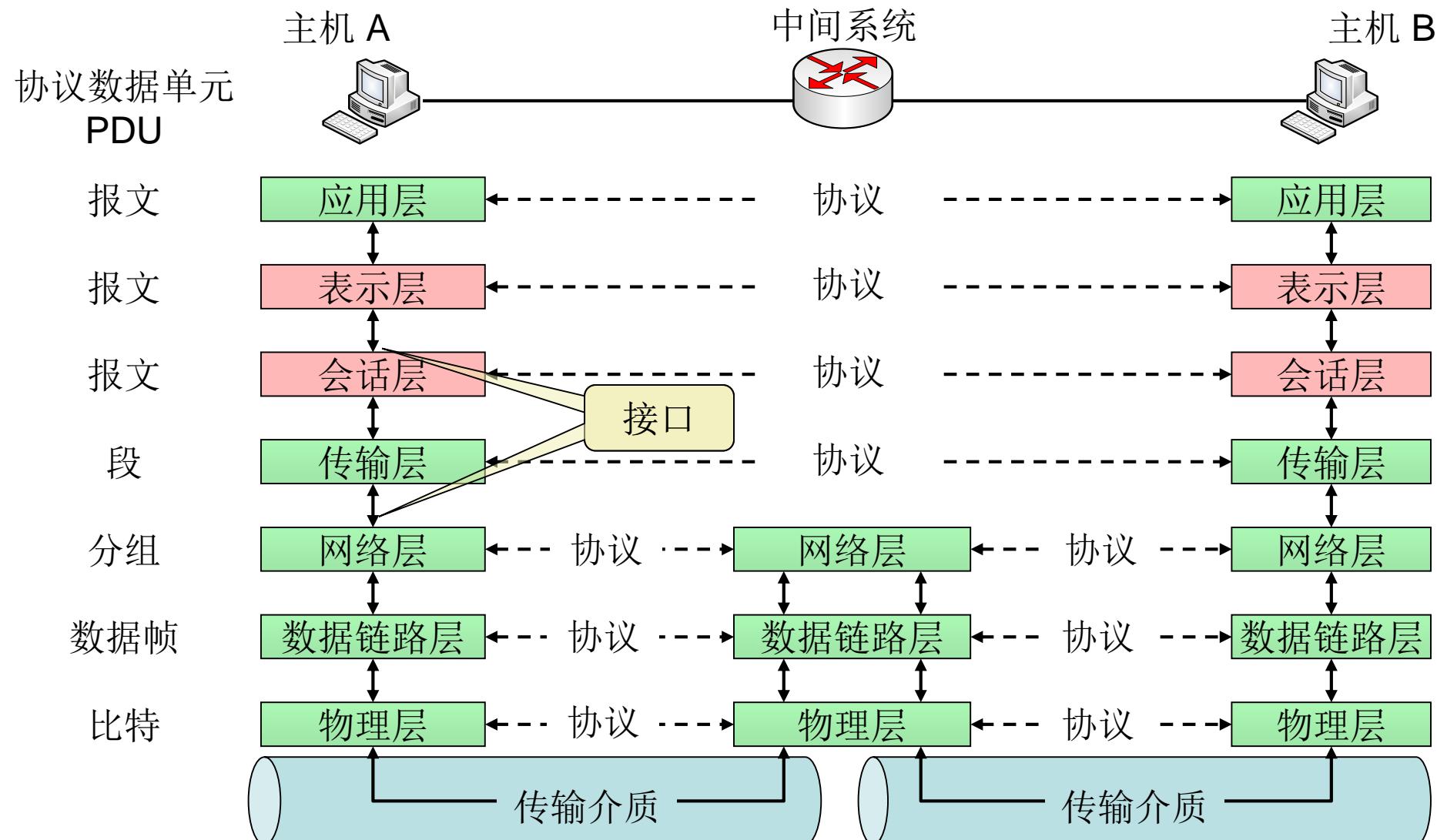


# OSI参考模型

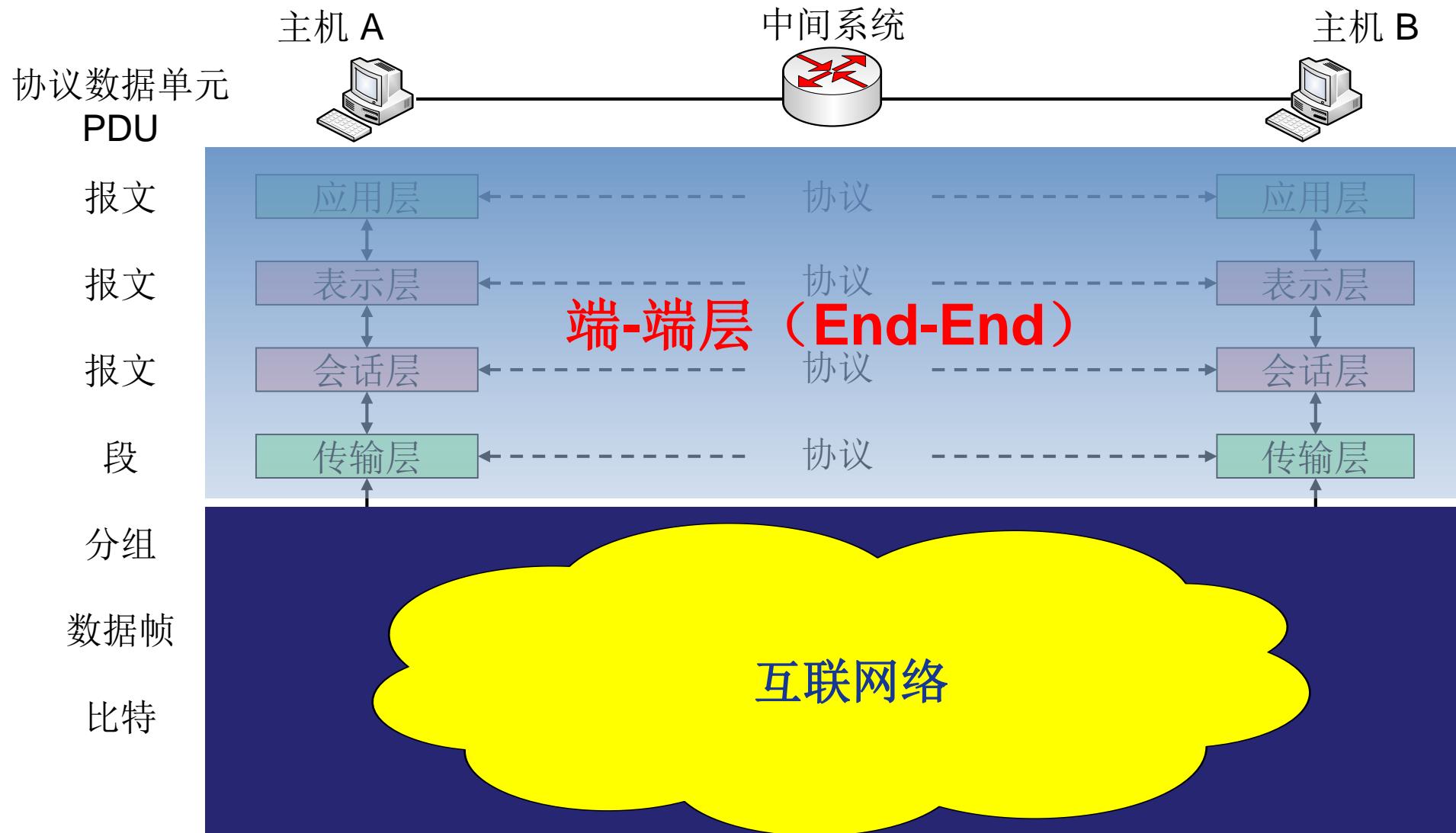
- ❖ 开放系统互连 (OSI)参考模型是由国际标准化组织 (ISO) 于1984年提出的分层网络体系结构模型
- ❖ 目的是支持异构网络系统的互联互通
- ❖ 异构系统互连的国际标准
- ❖ 理解网络通信过程的最佳学习工具 (理论模型)
  - 理论成功，市场失败
- ❖ 7层 (功能) ,每层完成特定的网络功能



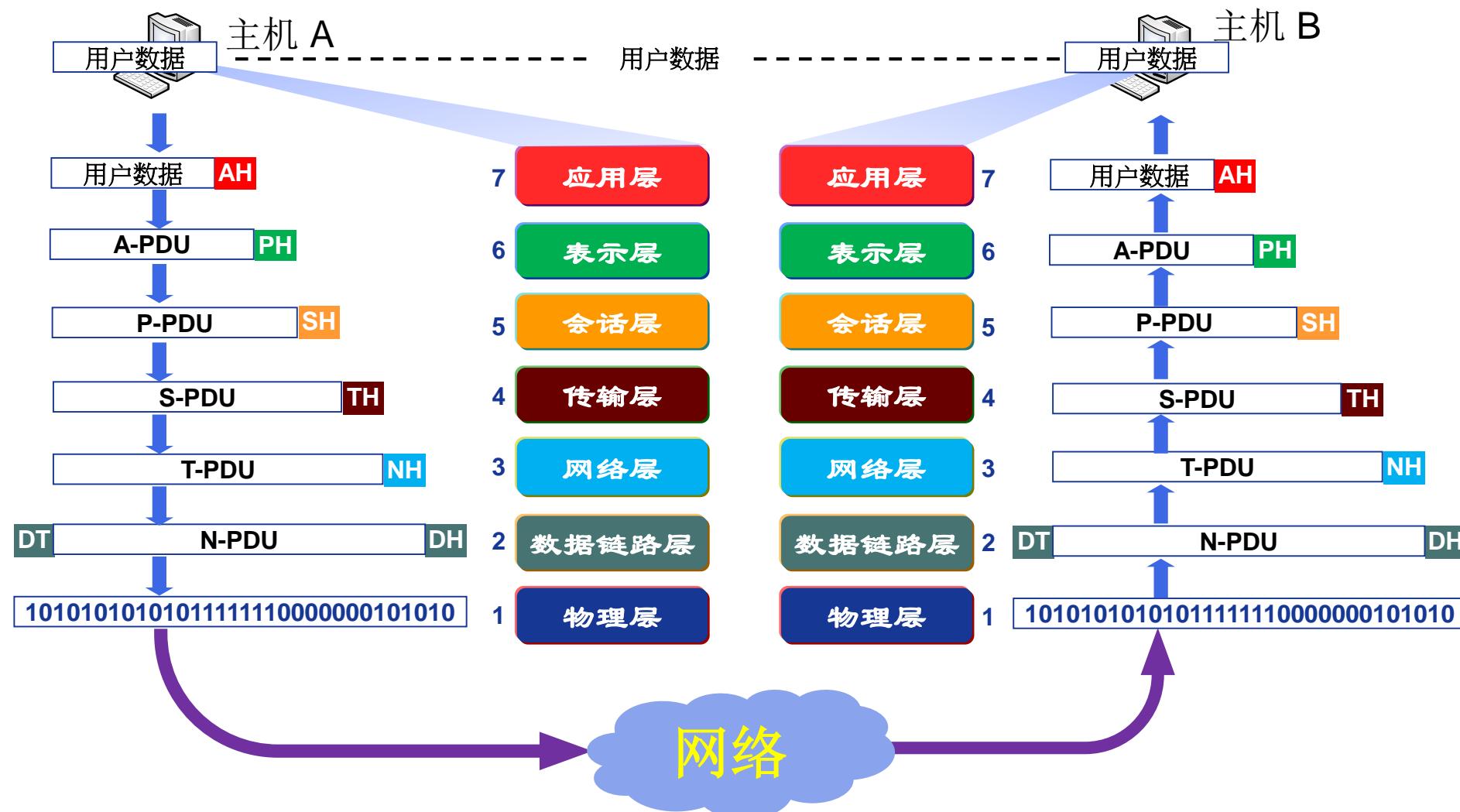
# OSI参考模型解释的通信过程



# OSI参考模型解释的通信过程



# OSI参考模型数据封装与通信过程



# 为什么需要数据封装？

- ❖ 增加控制信息

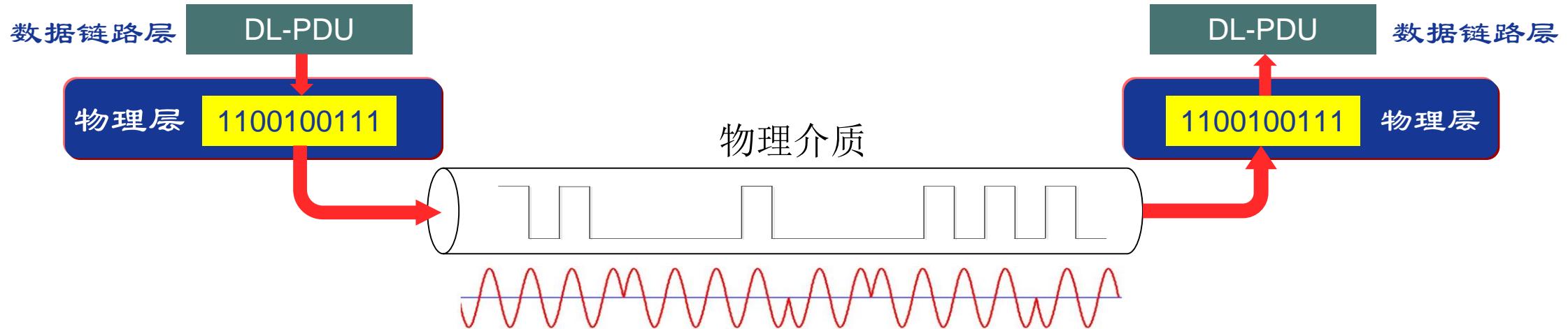
- 构造协议数据单元 (PDU)

- ❖ 控制信息主要包括：

- 地址 (**Address**)：标识发送端/接收端
  - 差错检测编码 (**Error-detecting code**)：用于差错检测或纠正
  - 协议控制 (**Protocol control**)：实现协议功能的附加信息，如：优先级 (**priority**)、服务质量 (**QoS**)、和安全控制等



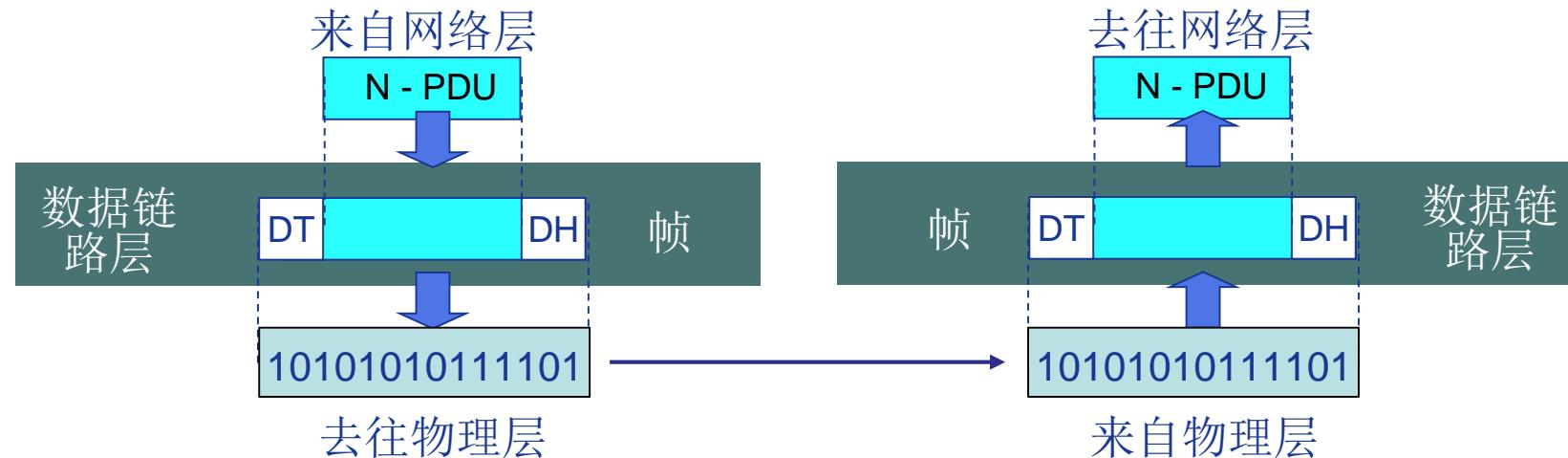
# 物理层功能



- ❖ 接口特性
  - 机械特性、电气特性、功能特性、规程特性
- ❖ 比特编码
- ❖ 数据率
- ❖ 比特同步
  - 时钟同步
- ❖ 传输模式
  - 单工（Simplex）、半双工（half-duplex）、全双工（full-duplex）



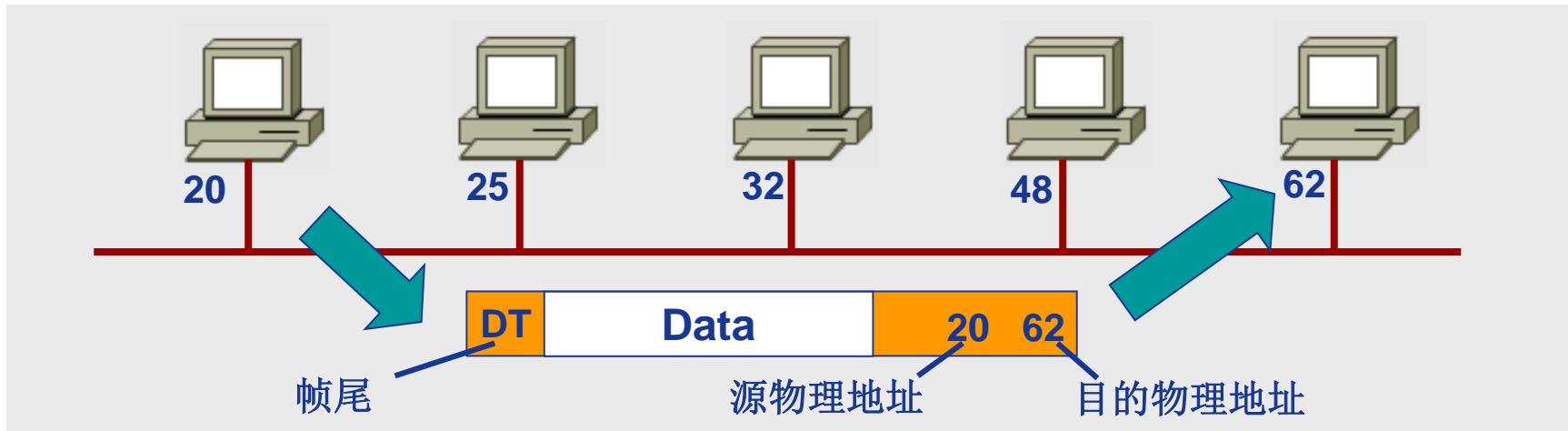
# 数据链路层功能



- ❖ 负责**结点-结点 (node-to-node)** 数据传输
- ❖ 组帧 (**Framing**)
- ❖ 物理寻址 (**Physical addressing**)
  - 在帧头中增加发送端和/或接收端的**物理地址**标识数据帧的发送端和/或接收端



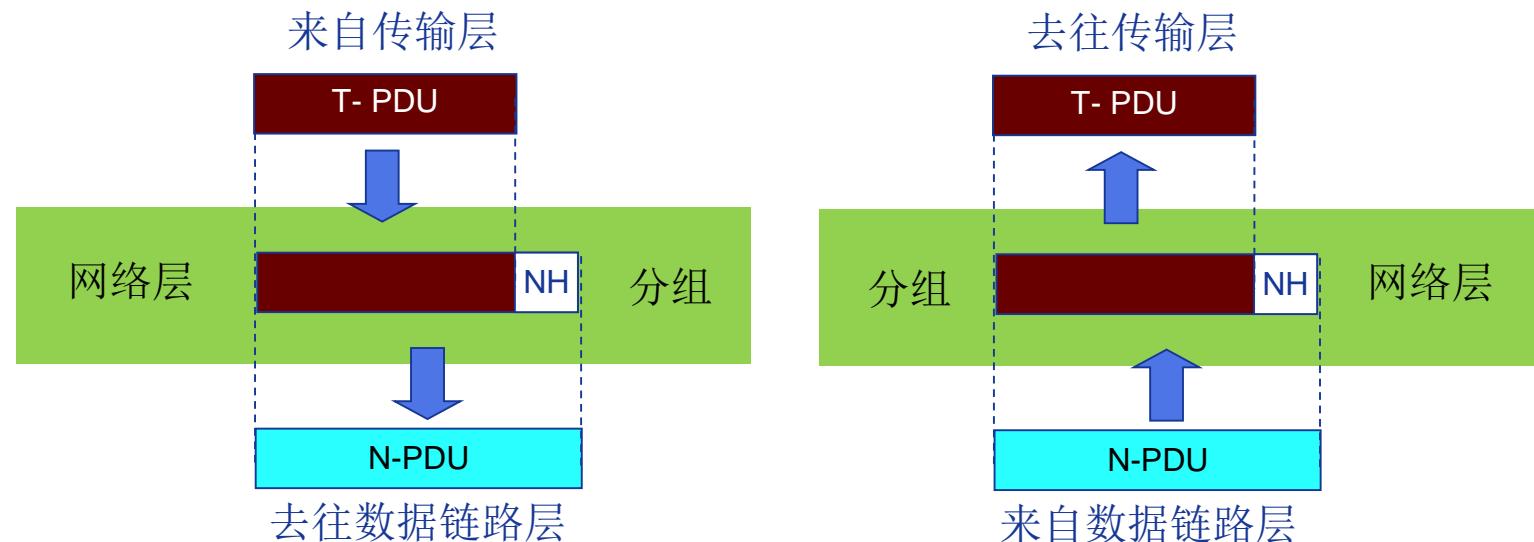
# 数据链路层功能



- ❖ 流量控制 (Flow control)
  - 避免淹没接收端
- ❖ 差错控制 (Error control)
  - 检测并重传损坏或丢失帧，并避免重复帧
- ❖ 访问控制 (Access control)
  - 在任一给定时刻决定哪个设备拥有链路（物理介质）控制使用权



# 网络层功能



- ❖ 负责源主机到目的主机数据分组 (packet) 传输
  - 可能穿越多个网络
- ❖ 逻辑寻址 (Logical addressing)
  - 全局唯一逻辑地址，确保数据分组被送达目的主机，如IP地址

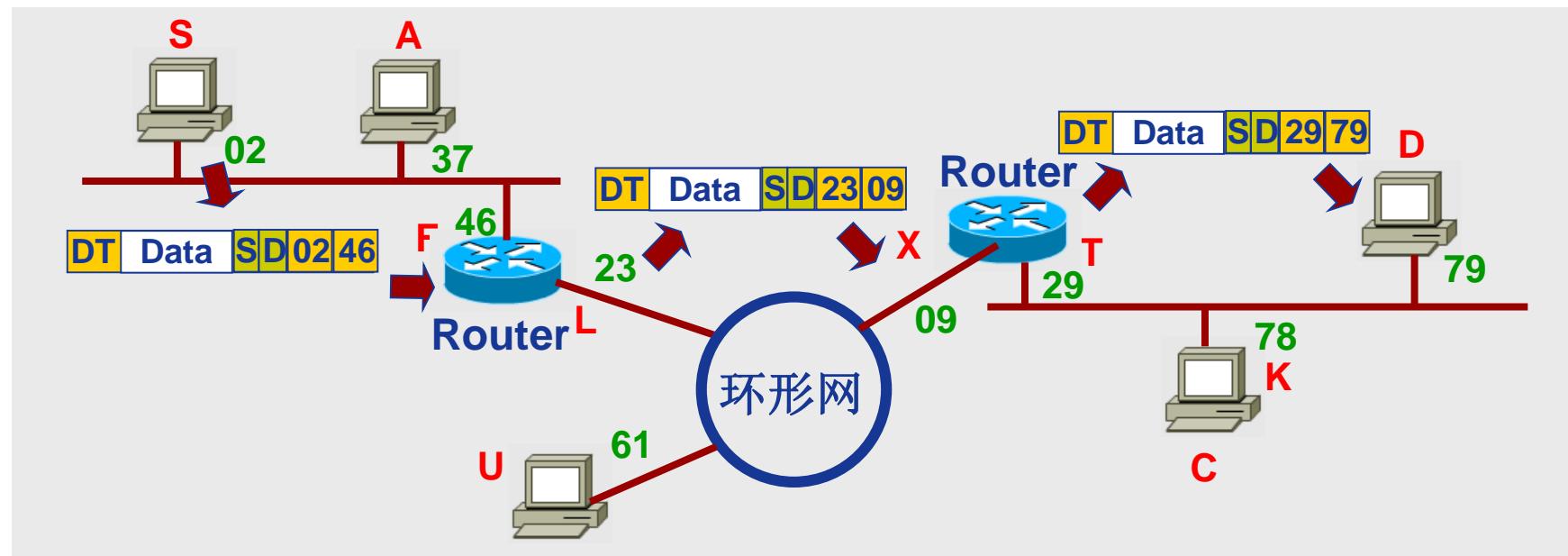


# 网络层功能

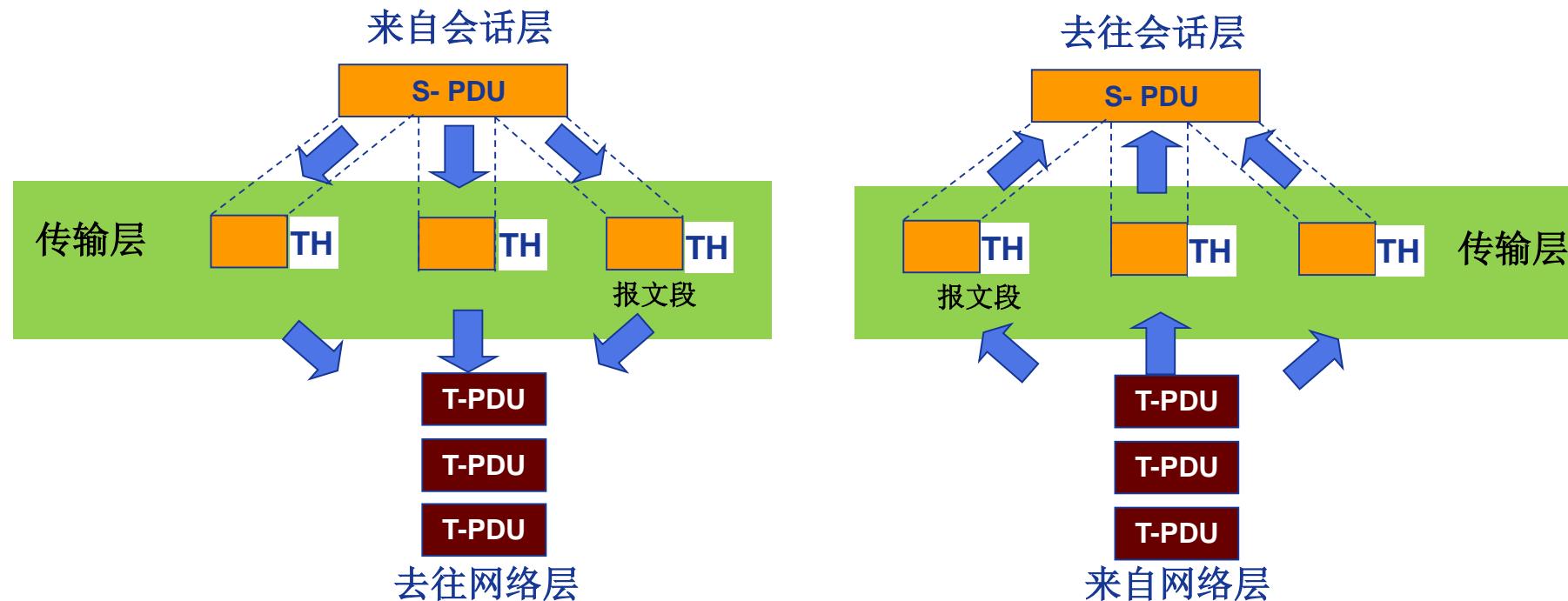
## ❖ 路由 (Routing)

- 路由器（或网关）互连网络，并路由分组至最终目的主机

## ❖ 转发 (Forwarding)



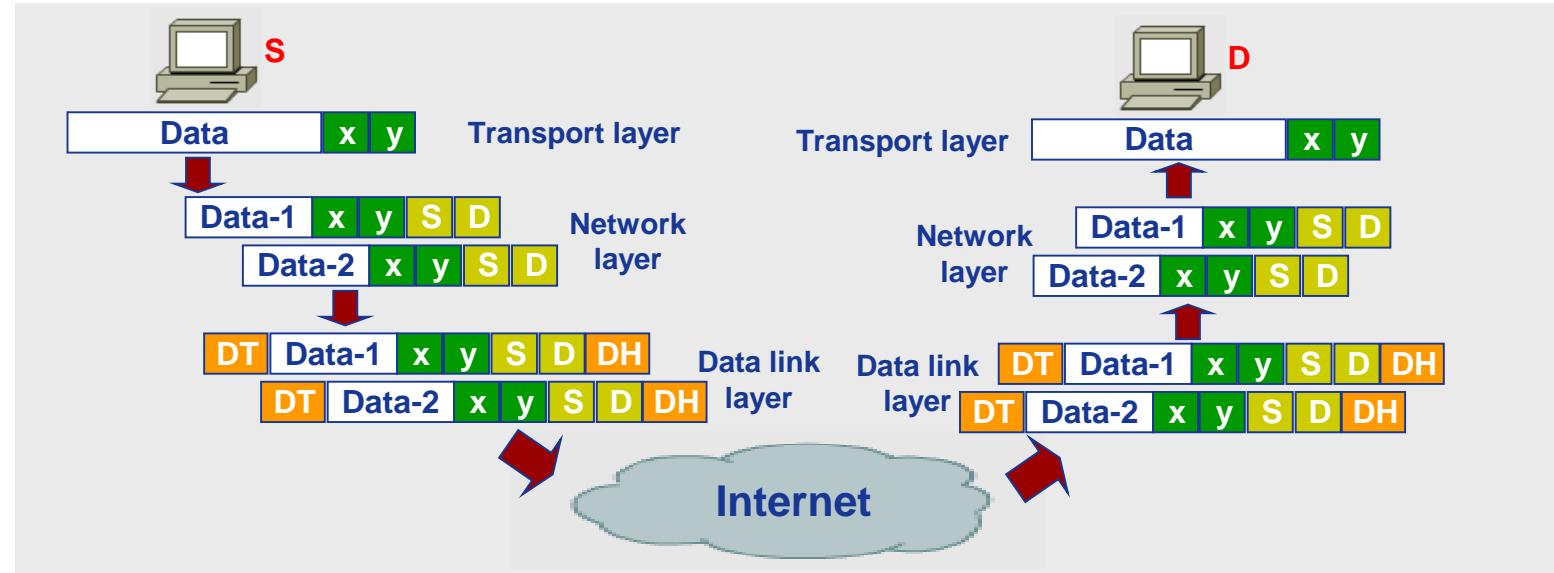
# 传输层功能



负责源-目的（端-端）的（进程间）完整报文传输



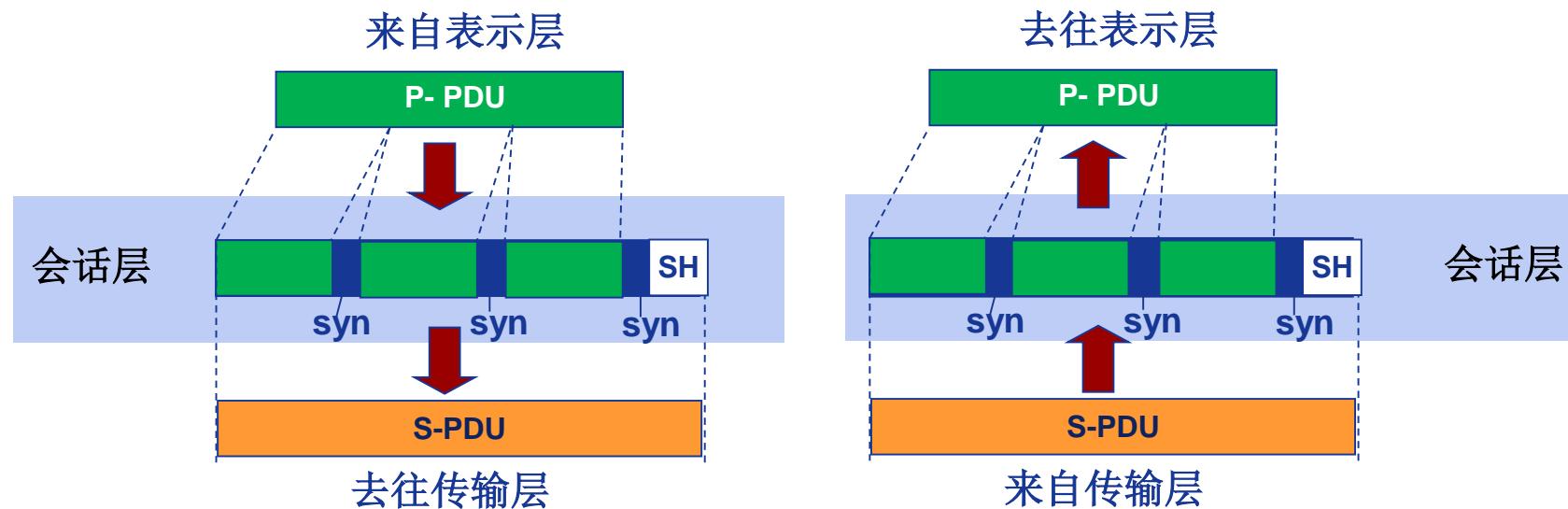
# 传输层功能



- ❖ 分段与重组
- ❖ SAP寻址
  - 确保将完整报文提交给正确进程，如端口号
- ❖ 连接控制
- ❖ 流量控制
- ❖ 差错控制



# 会话层功能



## ❖ 对话控制 (dialog controlling)

- 建立、维护

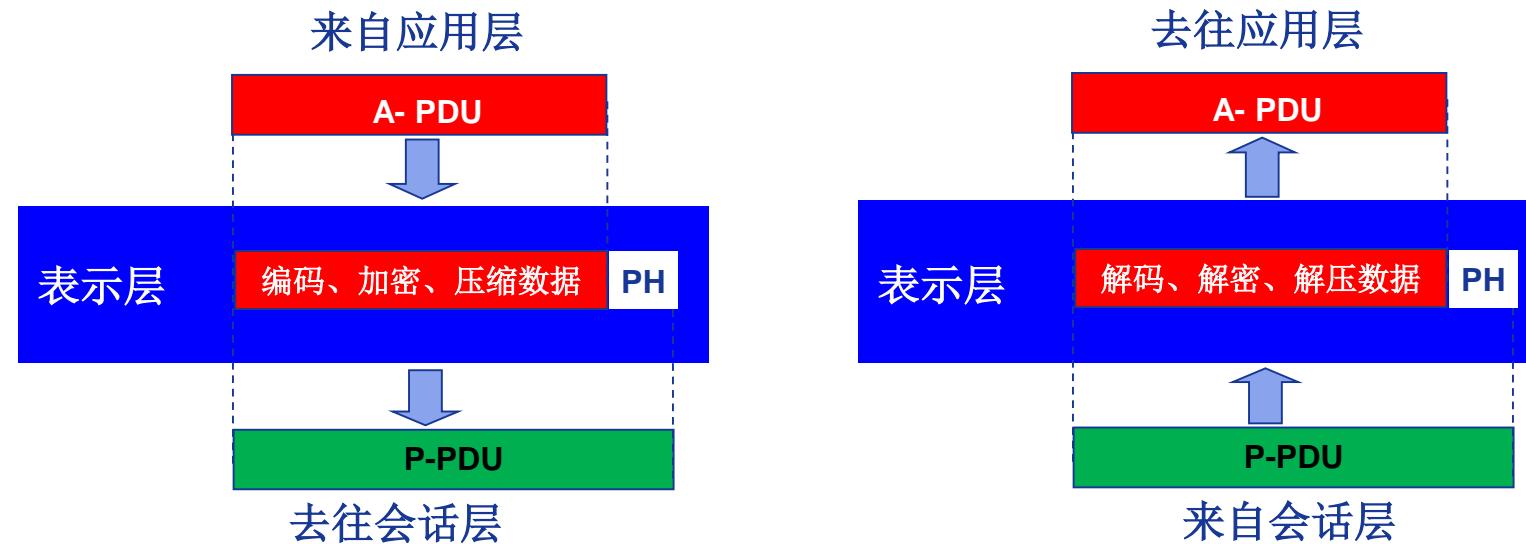
## ❖ 同步

- 在数据流中插入“同步点”

## ❖ 最“薄”的一层



# 表示层功能

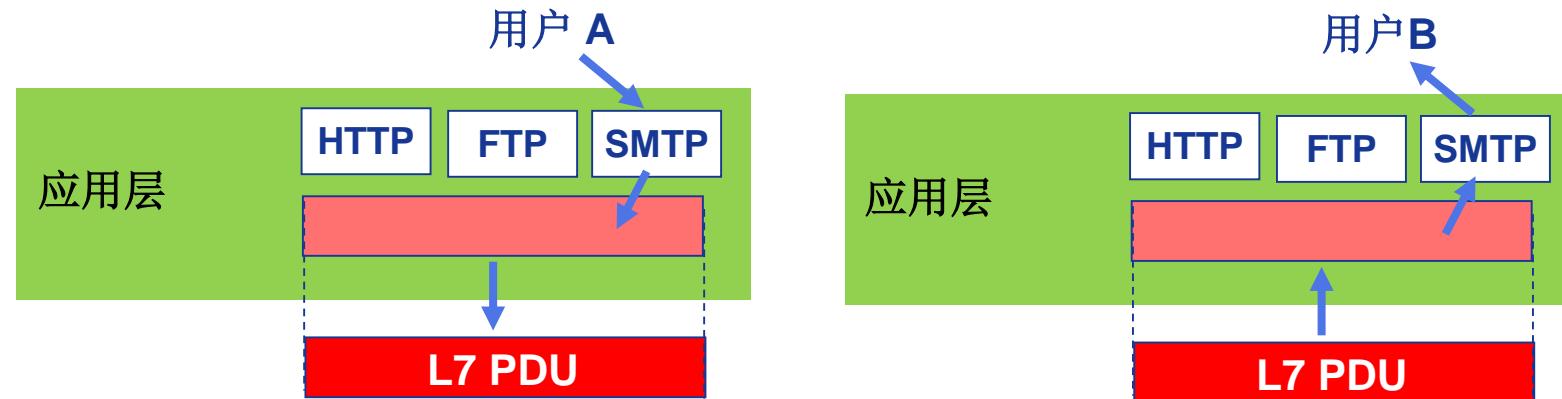


处理两个系统间交换信息的语法与语义 (**syntax and semantics**) 问题

- ❖ 数据表示转化
  - 转换为主机独立的编码
- ❖ 加密/解密
- ❖ 压缩/解压缩



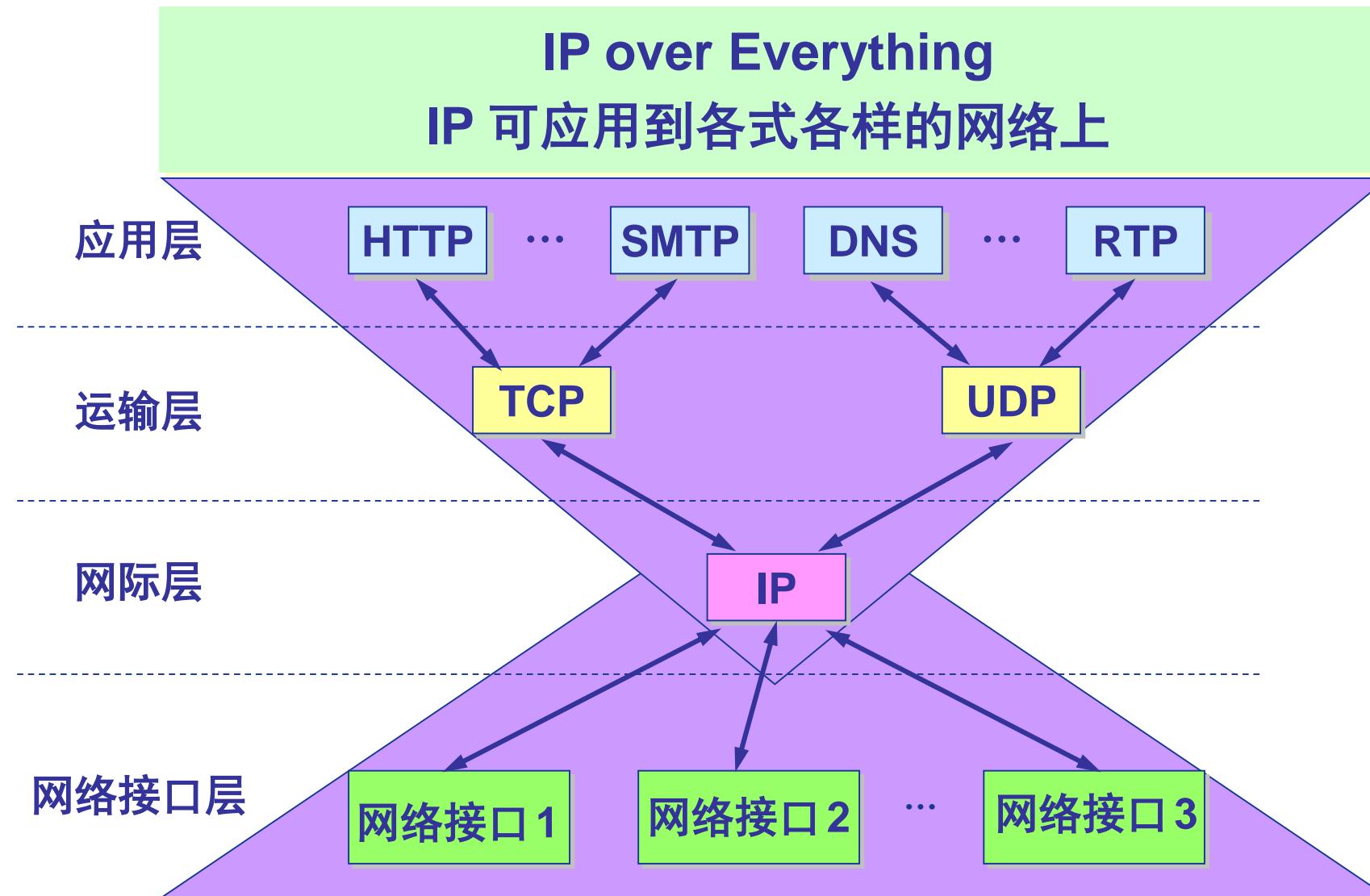
# 应用层功能



- ❖ 支持用户通过用户代理（如浏览器）或网络接口使用网络（服务）
- ❖ 典型应用层服务：
  - 文件传输（FTP）
  - 电子邮件（SMTP）
  - Web（HTTP）
  - .....



# TCP/IP参考模型

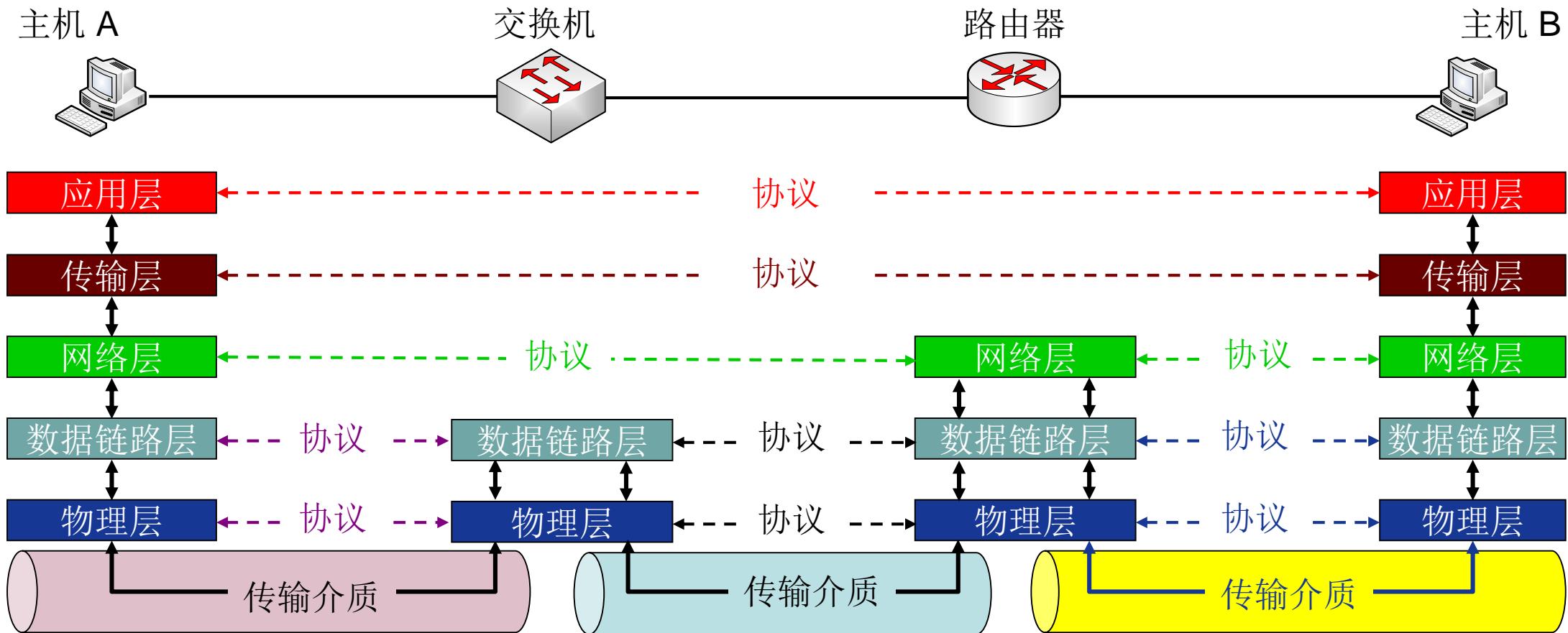


# 5层参考模型

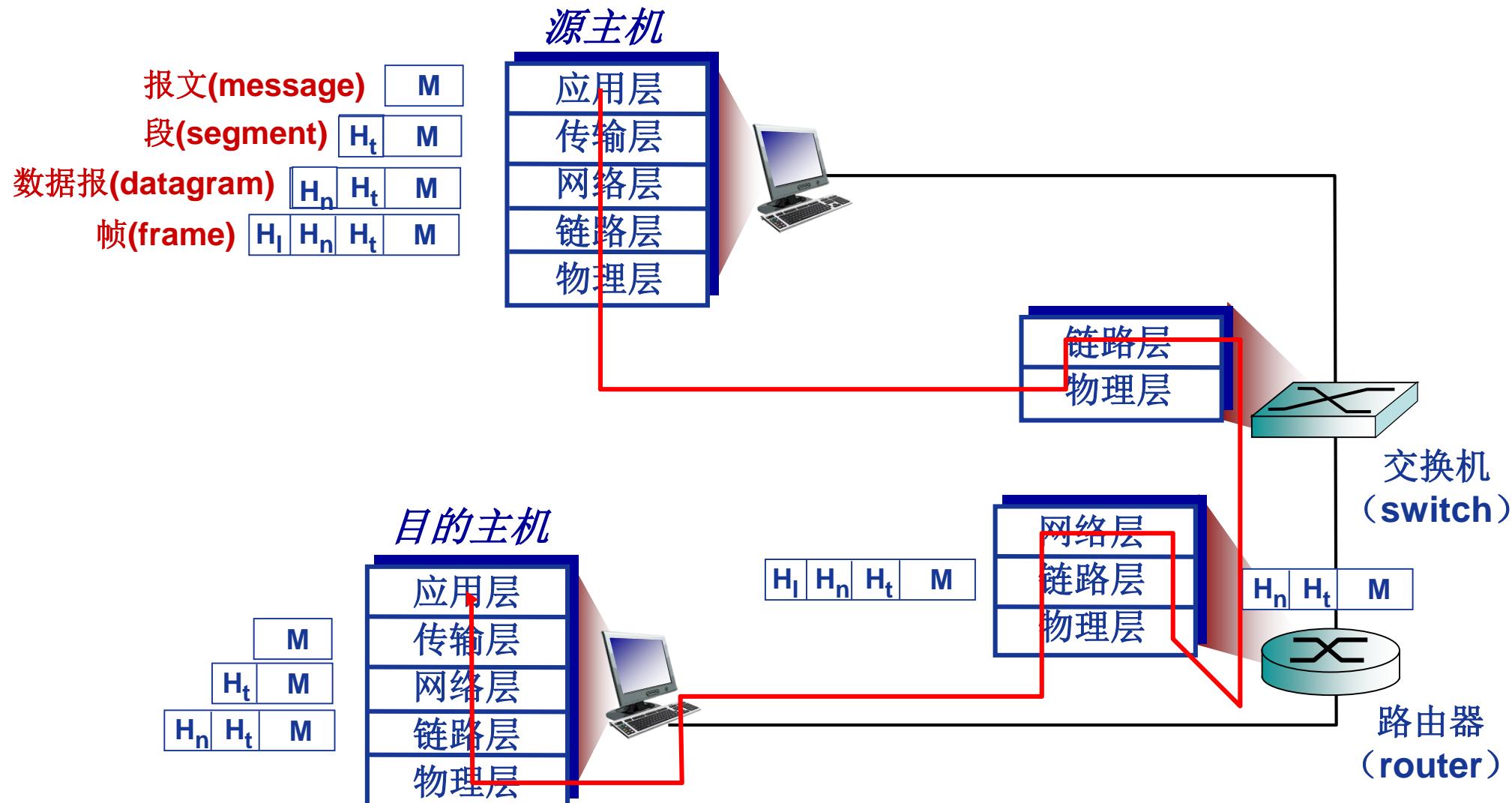
- ❖ 综合 OSI 和 TCP/IP 的优点
- ❖ 应用层: 支持各种网络应用
  - FTP, SMTP, HTTP
- ❖ 传输层: 进程-进程的数据传输
  - TCP, UDP
- ❖ 网络层: 源主机到目的主机的数据分组路由与转发
  - IP协议、路由协议等
- ❖ 链路层: 相邻网络元素（主机、交换机、路由器等）的数据传输
  - 以太网（Ethernet）、802.11（WiFi）、PPP
- ❖ 物理层: 比特传输



# 5层参考模型下的网络通信过程



# 5层模型的数据封装



# 主要内容

计算机网络？

网络协议？

计算机网络的结构

Internet结构

网络核心-数据交换

- 电路交换
- 报文交换
- 分组交换
- 多路复用

计算机网络性能

- 速率
- 带宽
- 时延
- 时延带宽积
- 吞吐量

计算机网络体系结构

- OSI参考模型
- TCP/IP参考模型
- 五层参考模型

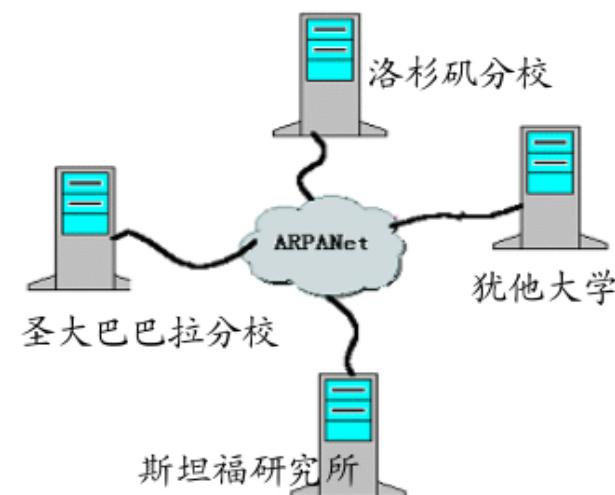
计算机网络发展历史（略）



# 计算机网络与Internet发展历史

## 1961-1972: 早期分组交换原理的提出与应用

- ❖ 1961: Kleinrock – 排队论证实分组交换的有效性
- ❖ 1964: Baran – 分组交换应用于军事网络
- ❖ 1967: ARPA (Advanced Research Projects Agency) 提出ARPAnet构想
- ❖ 1969: 第一个ARPAnet 结点运行
- ❖ 1972:
  - ARPAnet公开演示
  - 第一个主机-主机协议NCP (Network Control Protocol)
  - 第一个e-mail程序
  - ARPAnet拥有15个结点



# 计算机网络与Internet发展历史

## 1972-1980: 网络互连，大量新型、私有网络的涌现

- ❖ 1970: 在夏威夷构建了 ALOHAnet 卫星网络
- ❖ 1974: Cerf 与 Kahn – 提出网络互连体系结构
- ❖ 1976: Xerox 设计了以太网
- ❖ 70's 后期:
  - 私有网络体系结构: DECnet, SNA, XNA
  - 固定长度分组交换 (ATM 先驱)
- ❖ 1975: ARPAnet 移交给美国国防部通信局管理
- ❖ 1979: ARPAnet 拥有 200 结点

Cerf 与 Kahn 网络互连基本原则:

- 极简 (minimalism)、自治 (autonomy) - 无需改变内部网络实现网络互连
- 尽力服务 (best effort service) 模型
- 无状态路由器
- 分散控制

—当今 Internet 体系结构



# 计算机网络与Internet发展历史

## 1980-1990: 新型网络协议与网络的激增

- ❖ 1983: 部署TCP/IP
- ❖ 1982: 定义了smtp电子邮件协议
- ❖ 1983: 定义了DNS
- ❖ 1985: 定义了FTP协议
- ❖ 1988: TCP拥塞控制
- ❖ 新型国家级网络: CSnet, BITnet, NSFnet, Minitel (法国)
- ❖ 1986: NSFnet初步形成了一个由骨干网、区域网和校园网组成的三级网络
- ❖ 100,000台主机连接公共网络



# 计算机网络与Internet发展历史

## 1990, 2000's: 商业化, Web, 新应用

- ❖ 1990's早期: ARPAnet退役
- ❖ 1991: NSF解除NSFnet的商业应用限制(1995年退役), 由私营企业经营
- ❖ 1992: 因特网协会ISOC成立
- ❖ 1990s后期: Web应用
  - 超文本(hypertext) [Bush 1945, Nelson 1960's]
  - HTML, HTTP: Berners-Lee
  - 1994: Mosaic、Netscape浏览器
  - 1990's后期: Web开始商业应用

## 1990's后期 – 2000's:

- ❖ 更多极受欢迎的网络应用: 即时消息系统(如QQ), P2P文件共享
- ❖ 网络安全引起重视
- ❖ 网络主机约达50000, 网络用户达1亿以上
- ❖ 网络主干链路带宽达到Gbps



# 计算机网络与Internet发展历史

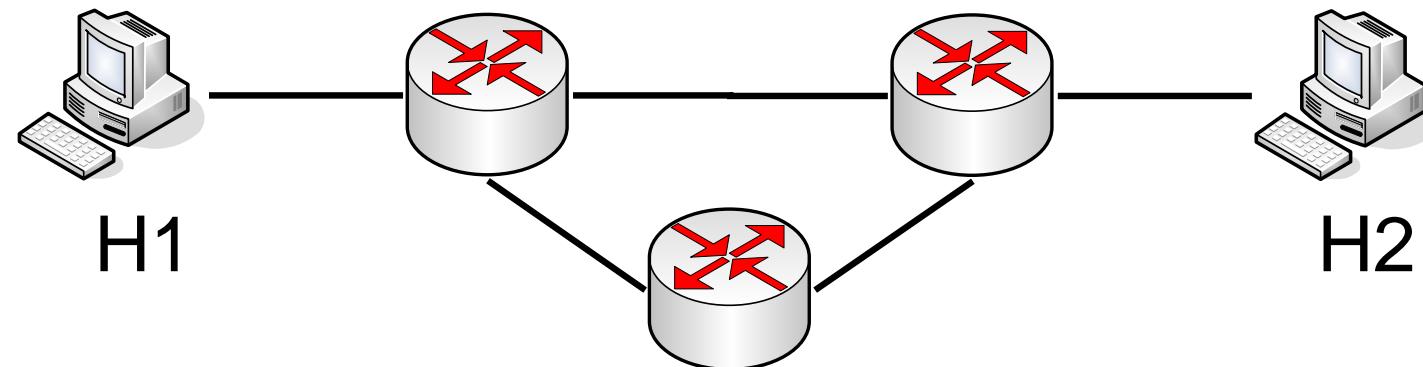
2005-今

- ❖ ~50亿（2016）终端（智能手机和平板电脑）接入互联网，全球互联网用户达38.9亿（2018）
- ❖ 宽带接入的快速部署
- ❖ 无处不在的高速无线接入快速增长
- ❖ 出现在线社交网络：
  - Facebook: 很快拥有10亿用户
- ❖ 服务提供商 (如Google, Microsoft) 创建其自己的专用网络
  - 绕开Internet，提供“即时”接入搜索、email等服务
- ❖ 电子商务、大学、企业等开始在“云”中运行自己的服务 (如，Amazon EC2、Azure)



# 例题1

- ❖ 在下图所示的采用“存储-转发”方式的分组交换网络中，所有链路的数据传输速率为100 Mbps，分组大小为1 000 B，其中分组头大小为20 B。若主机H1向主机H2发送一个大小为980 000 B的文件，则在不考虑分组拆装时间和传播延迟的情况下，从H1发送开始到H2接收完为止，需要的时间至少是？



# 例题1

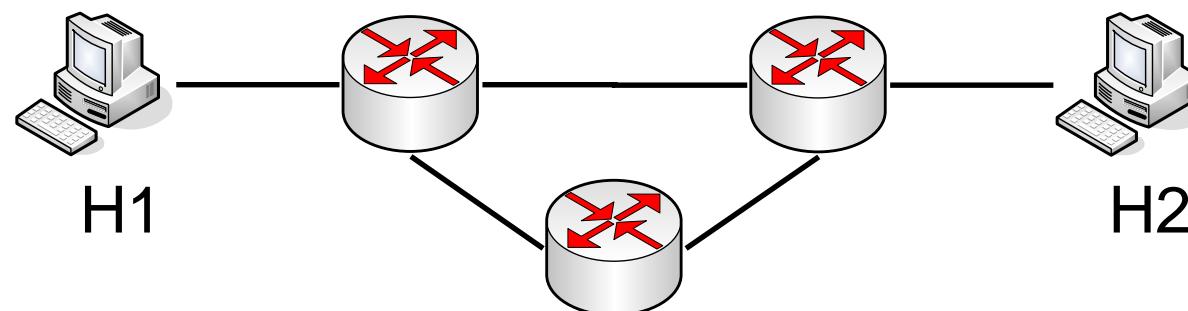
❖ 【解】980 000 B大小的文件需要分**1000**个分组，每个分组1 000 B。  
。H1发送整个文件需要的传输延迟为：

$$(980\ 000 + 20 * 1000) * 8 / 100\ 000\ 000 = \textcolor{red}{80} \text{ms};$$

根据路由选择基本原理，所有数据分组应该经过两个路由器的转发，所以再加上最后一个分组的两次转发的传输延迟，即：

$$2 * 1000 * 8 / 100\ 000\ 000 = \textcolor{red}{0.16} \text{ms}.$$

所以，H2收完整个文件至少需要 $80 + 0.16 = \textcolor{red}{80.16}$ ms。

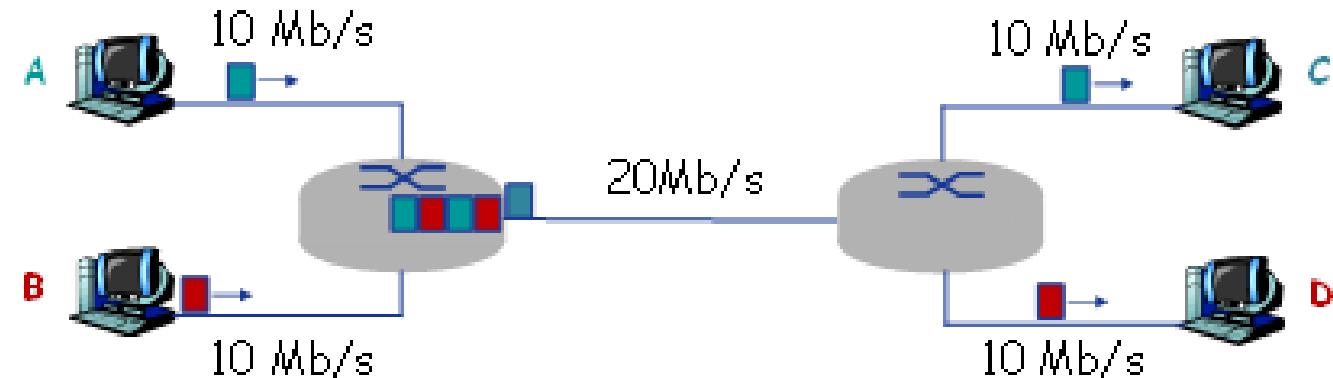


## 例题2

如下图所示网络。A在 $t=0$ 时刻开始向C发送一个2Mbits的文件；B在 $t=0.1+e$ 秒（ $e$ 为无限趋近于0的小正实数）向D发送一个1Mbits的文件。忽略传播延迟和结点处理延迟。

请回答下列问题：

- 1) 如果图中网络采用存储-转发方式的报文交换，则A将2Mbits的文件交付给C需要多长时间？B将1Mbits的文件交付给D需要多长时间？

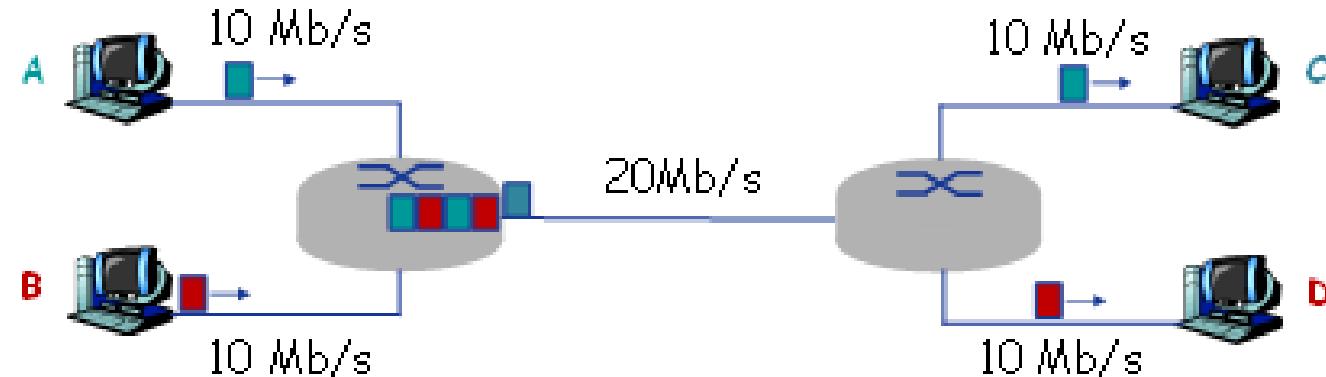


## 例题2

如下图所示网络。A在t=0时刻开始向C发送一个2Mbits的文件；B在t=0.1+e秒（e为无限趋近于0的小正实数）向D发送一个1Mbits的文件。忽略传播延迟和结点处理延迟。

请回答下列问题：

- 1) 如果图中网络采用存储-转发方式的报文交换，则A将2Mbits的文件交付给C需要多长时间？B将1Mbits的文件交付给D需要多长时间？



**解：**由于A先发完报文，所以A的报文在左侧路由器输出链路队列中排在B的报文前面。因此，A向C交付2Mbits报文所需时间为：

$$2/10 + 2/20 + 2/10 = 0.5 \text{ s} = 500 \text{ ms};$$

B向D交付1Mbits文件所需时间为：

$$1/10 + 2/20 \text{ (排队时延)} + 1/20 + 1/10 = 0.35 \text{ s} = 350 \text{ ms}.$$



## 例题2

如下图所示网络。A在t=0时刻开始向C发送一个2Mbits的文件；B在t=0.1+e秒（e为无限趋近于0的小正实数）向D发送一个1Mbits的文件。忽略传播延迟和结点处理延迟。

请回答下列问题：

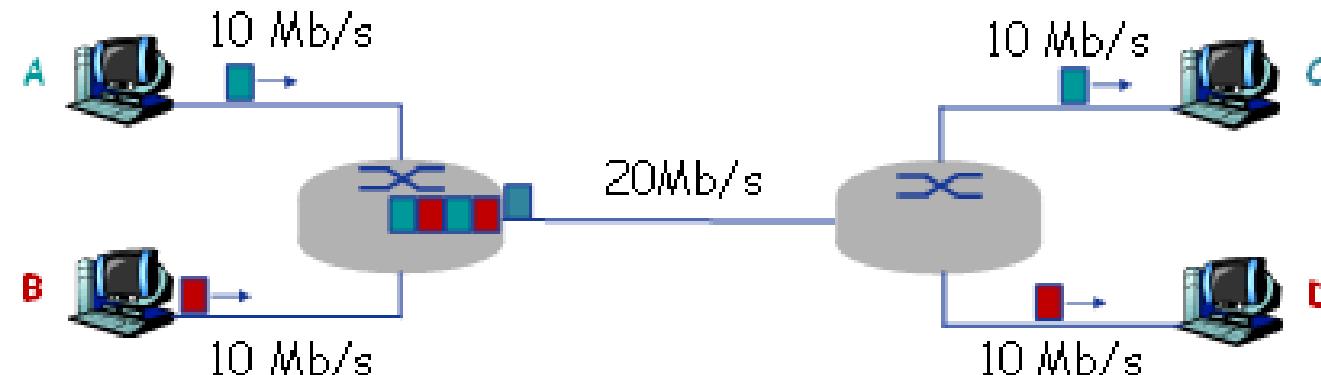
- 2) 如果采用存储-转发方式的分组交换，分组长度为等长的1kbytes，且忽略分组头开销以及报文的拆装开销，则A将2Mbits的文件交付给C需要大约多长时间？B将1Mbits的文件交付给D需要大约多长时间？

**解：**A向C交付2Mbits文件所需时间约为：

$$2/10 + 1000/2000000 + 1000/1000000 = 0.20015 \text{ s} \approx 0.2 \text{ s} = 200 \text{ ms};$$

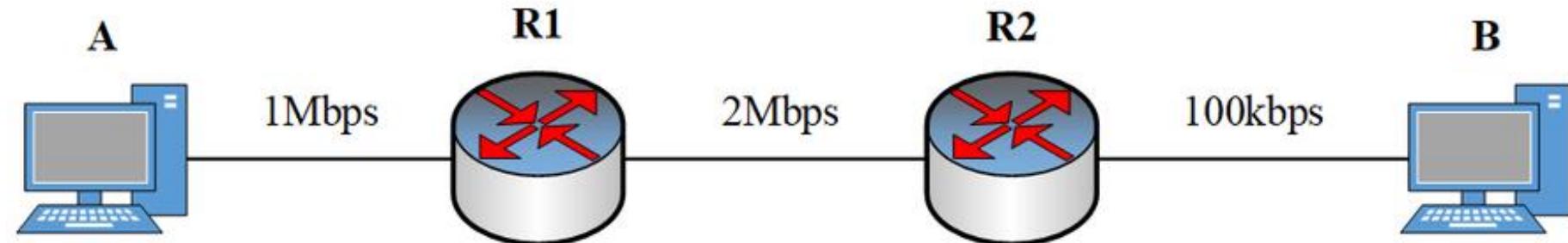
B向D交付1Mbits文件所需时间约为：

$$\begin{aligned} & 1/10 + 1000/2000000(\text{排队}) + 1000/2000000 + 1000/1000000 \\ & = 0.1002 \text{ s} \approx 0.1 \text{ s} = 100 \text{ ms}. \end{aligned}$$



# 例题3

如下图所示网络，主机A通过路由器R1和R2连接主机B，三段链路带宽分别是**100kbps**、**2Mbps**和**1Mbps**。假设A以存储-转发的分组交换方式向B发送一个大文件。



请回答下列问题：

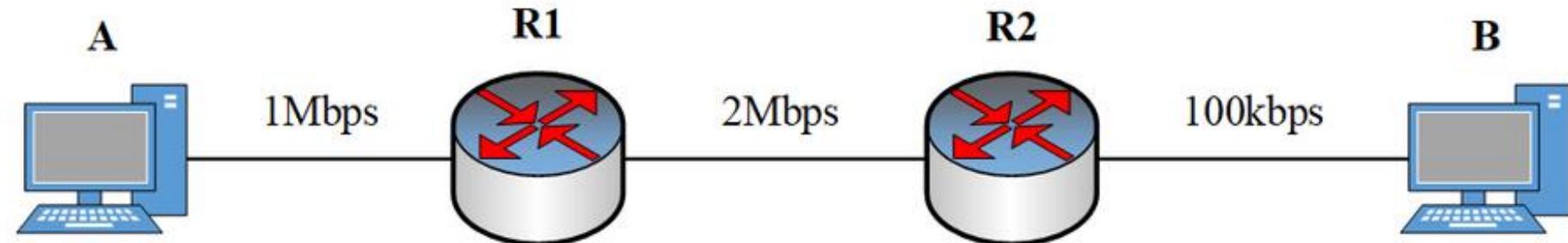
- 1) 假设网络没有其他流量，则传送该文件可以达到的最大吞吐量是多少？
- 2) 假设文件大小为**4MB**，则**A**传输该文件到**主机B**大约需要多少时间？
- 3) 分组在路由器中会发生排队吗？如果会，会在哪个路由器排队？如果不排，为什么？

(注：  $1k=10^3$ ,  $1M=10^6$ )



# 例题3

如下图所示网络，主机A通过路由器R1和R2连接主机B，三段链路带宽分别是**100kbps、2Mbps和1Mbps**。假设A以存储-转发的分组交换方式向B发送一个大文件。



请回答下列问题：

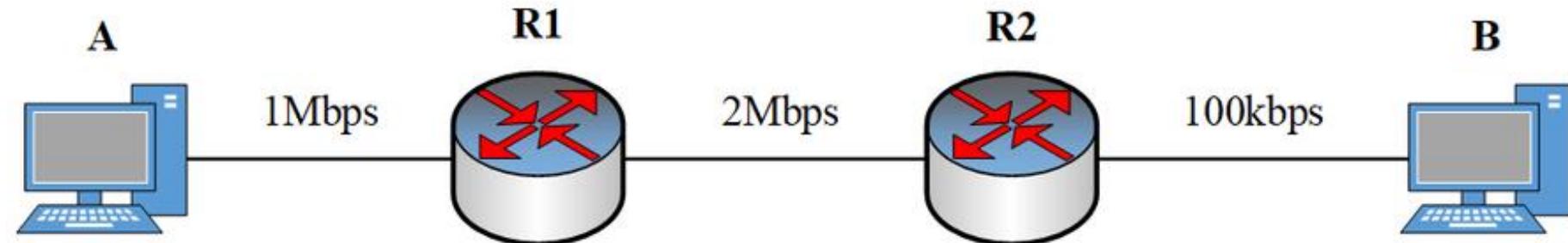
1) 假设网络没有其他流量，则传送该文件可以达到的最大吞吐量是多少？

答：最大吞吐量为： $TH = \min(1\text{Mbps}, 2\text{Mbps}, 100\text{kbps}) = 100\text{kbps}$ ；



# 例题3

如下图所示网络，主机A通过路由器R1和R2连接主机B，三段链路带宽分别是**100kbps**、**2Mbps**和**1Mbps**。假设A以存储-转发的分组交换方式向B发送一个大文件。



请回答下列问题：

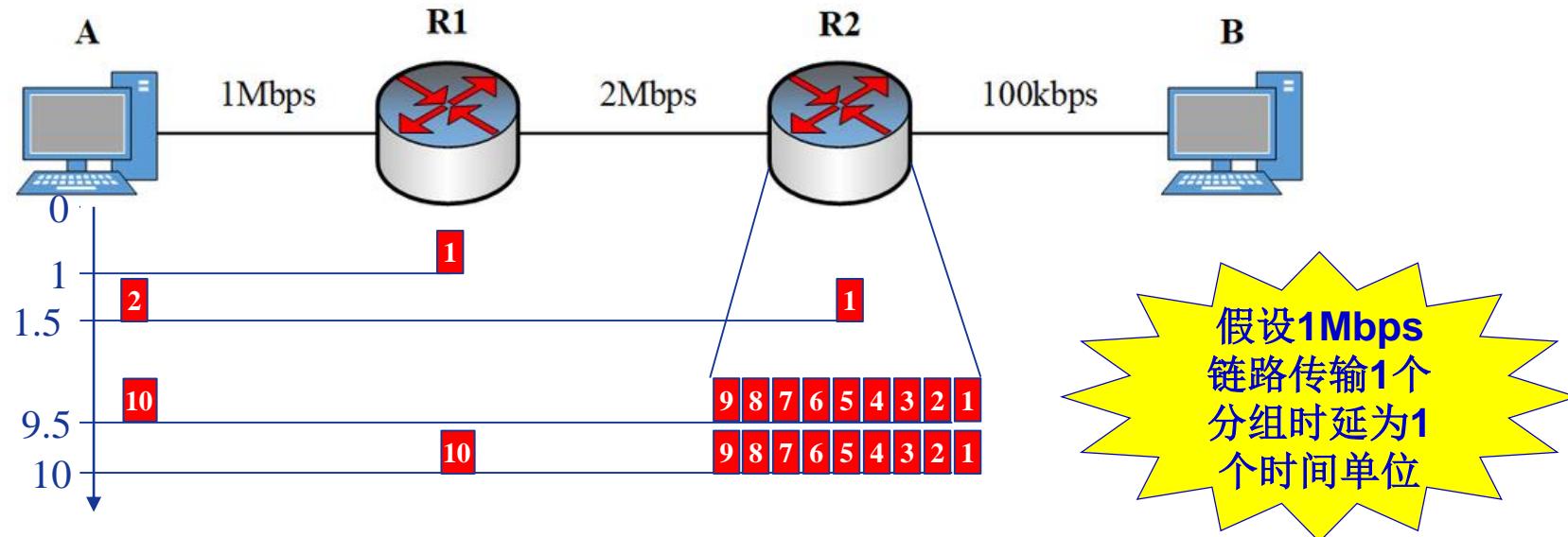
- 1) 假设网络没有其他流量，则传送该文件可以达到的最大吞吐量是多少？
- 2) 假设文件大小为**4MB**，则**A**传输该文件到**主机B**大约需要多少时间？

答：大约需要时间为：**T=4×8×10^6/(100×10^3)=320s；**



# 例题3

如下图所示网络，主机A通过路由器R1和R2连接主机B，三段链路带宽分别是100kbps、2Mbps和1Mbps。假设A以存储-转发的分组交换方式向B发送一个大文件。



请回答下列问题：

- 3) 分组在路由器中会发生排队吗？如果会，会在哪个路由器排队？如果不，为什么？

答：会发生排队，会在R2发生排队。





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！