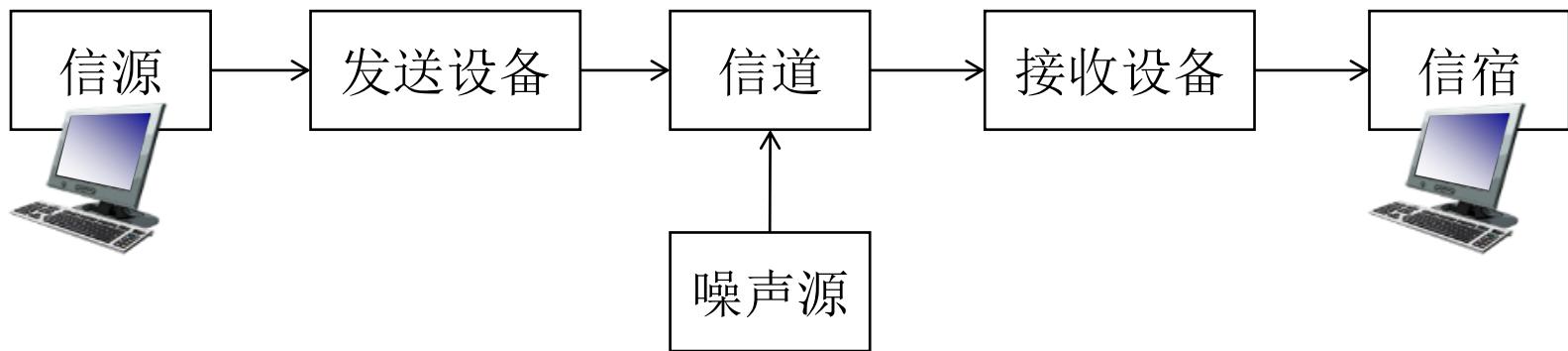


本讲主题

什么是计算机网络？

计算机网络=通信技术+计算机技术

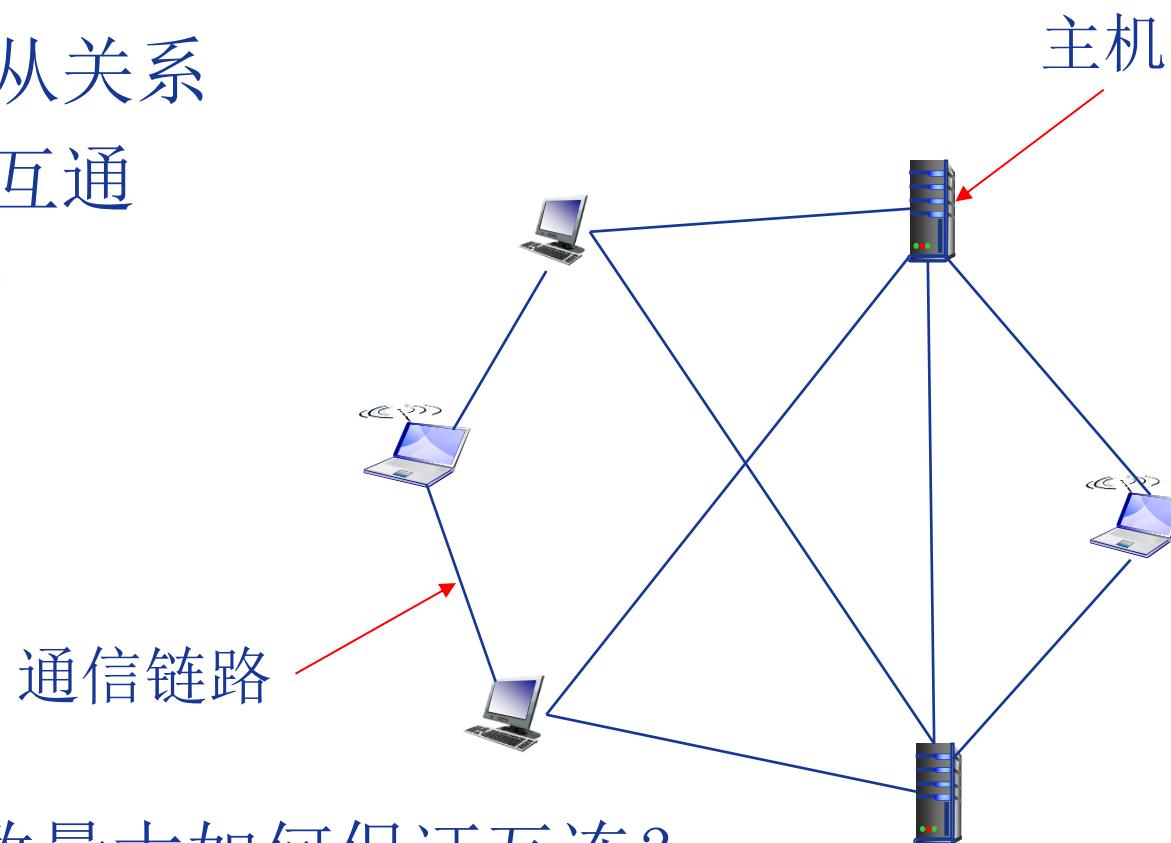
- ❖ 计算机网络是通信技术与计算机技术紧密结合的产物
- ❖ 通信系统模型：



- ❖ 计算机网络就是一种通信网络

计算机网络？

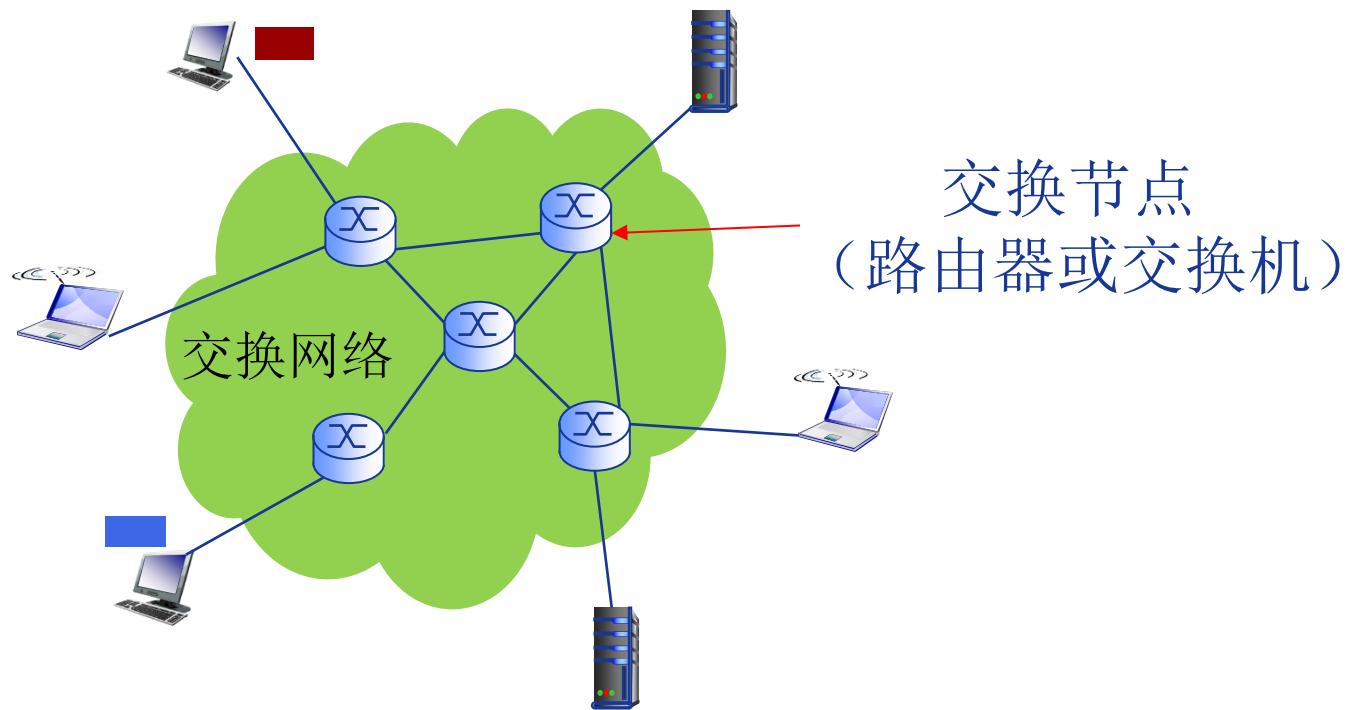
- ❖ 定义：计算机网络就是互连的、自治的计算机集合。
- ❖ 自治-无主从关系
- ❖ 互连-互联互通
 - 通信链路



- ❖ 距离远、数量大如何保证互连？

计算机网络

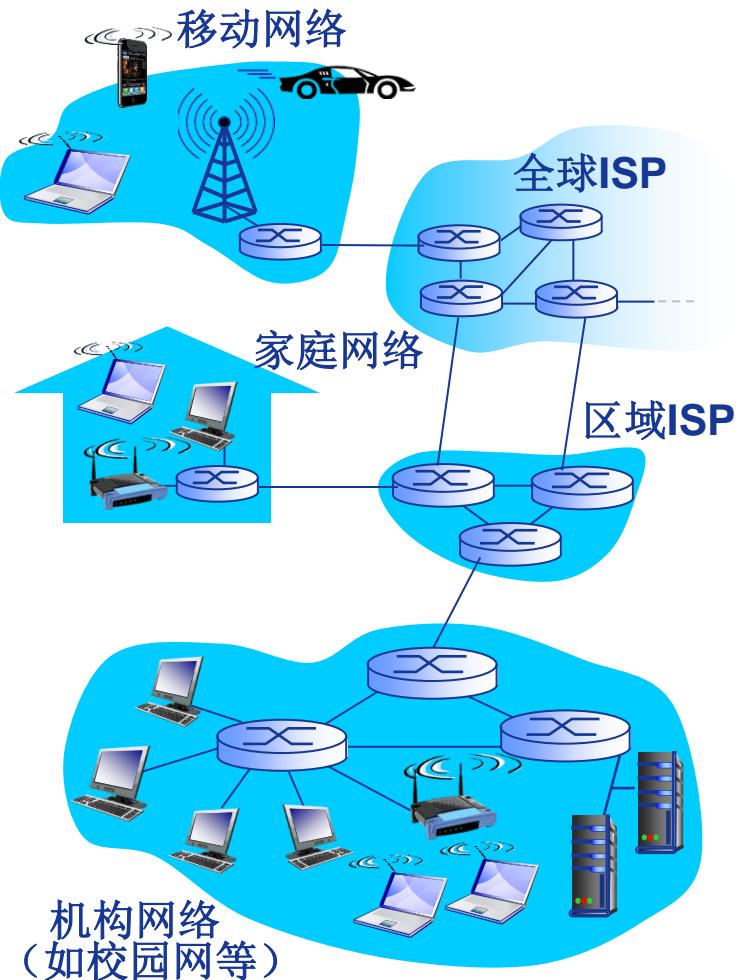
- ❖ 通过交换网络互连主机



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”



PC



服务器



无线笔记本



智能手机



无线链路



有线链路



路由器

❖ 数以百万计的互连的计算设备集合:

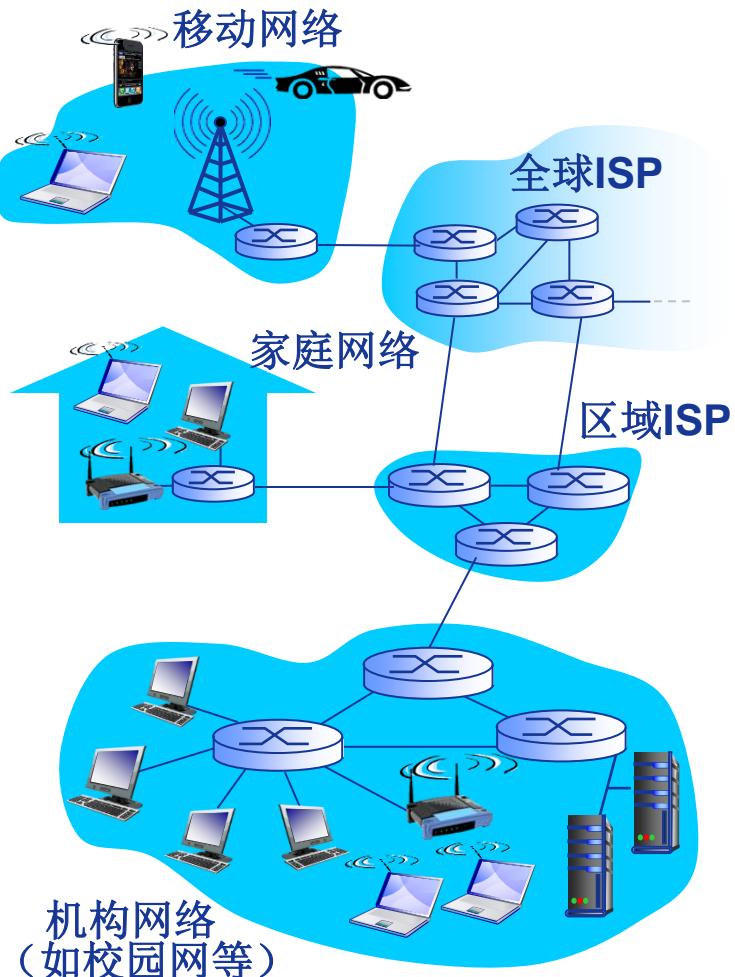
- 主机(hosts)=端系统(end systems)
- 运行各种网络应用

❖ 通信链路

- 光纤, 铜缆, 无线电, 卫星.....

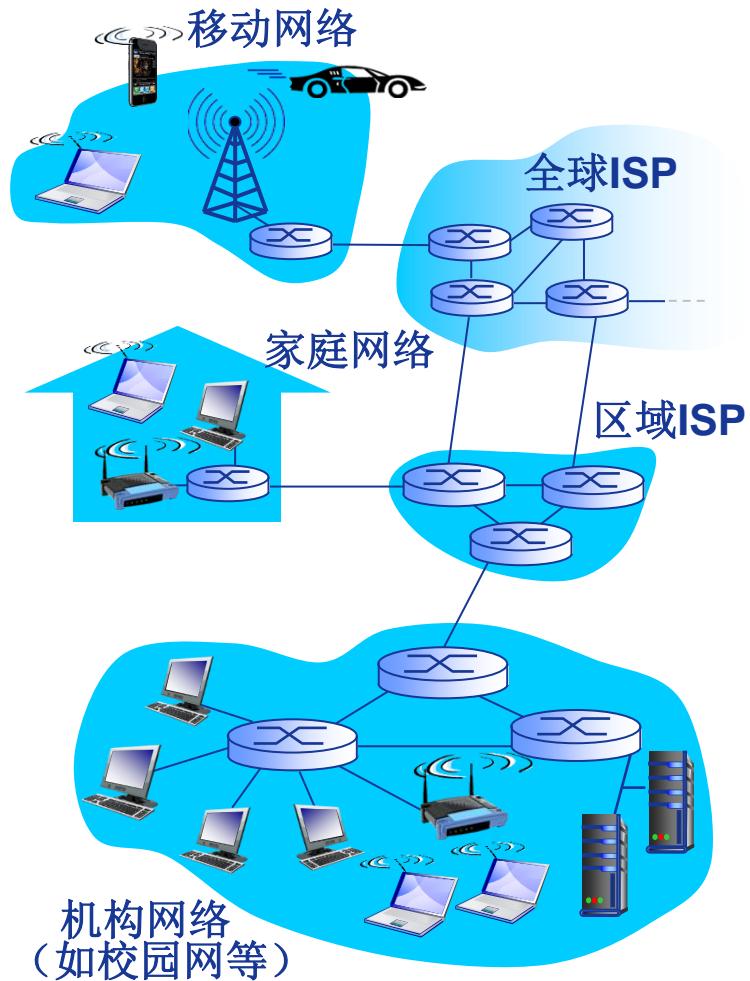
❖ 分组交换: 转发分组(数据包)

- 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

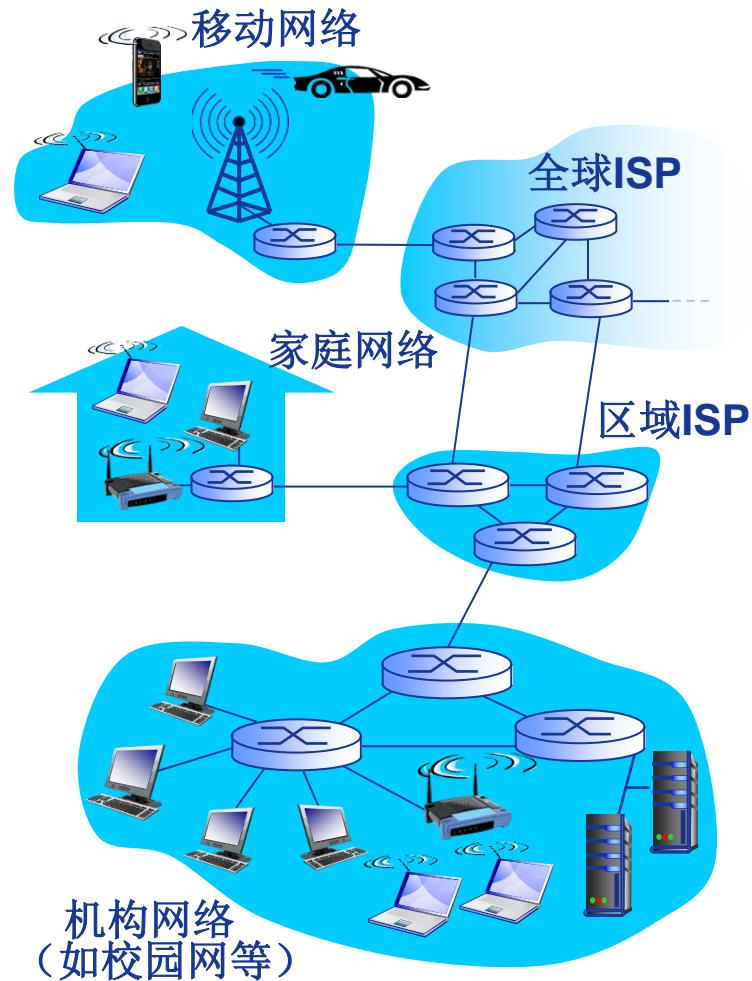


问题

- ❖ 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！

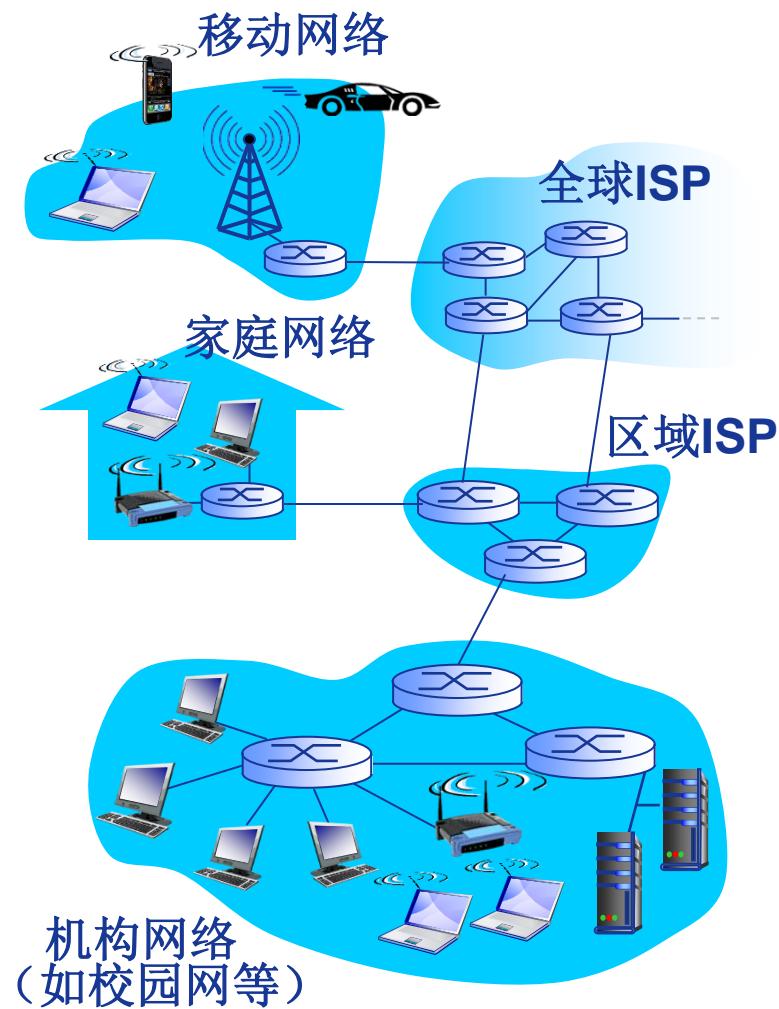
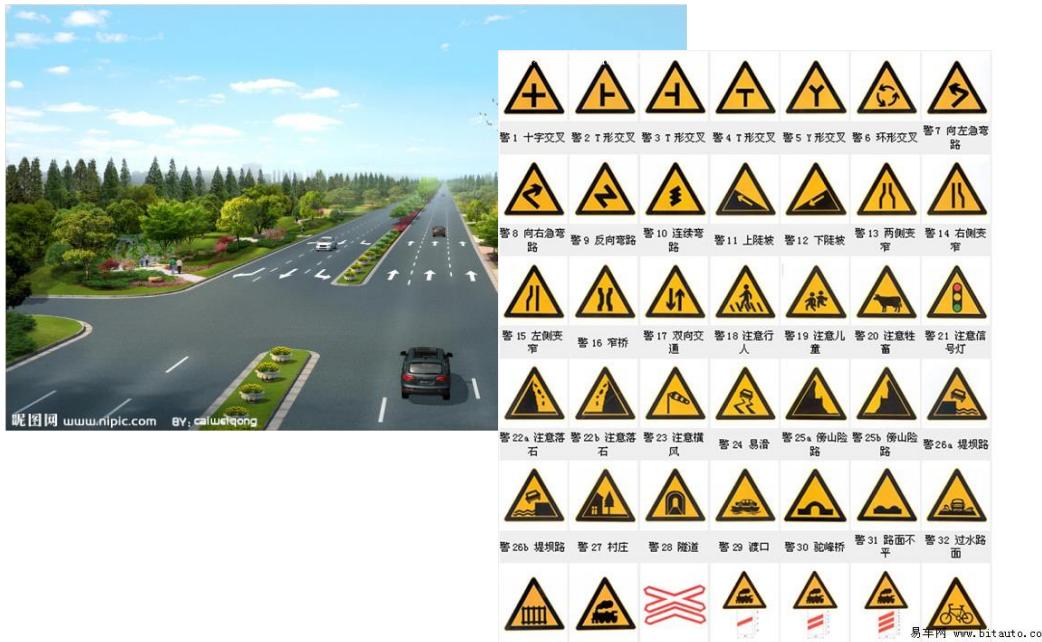


本讲主题

什么是网络协议？

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

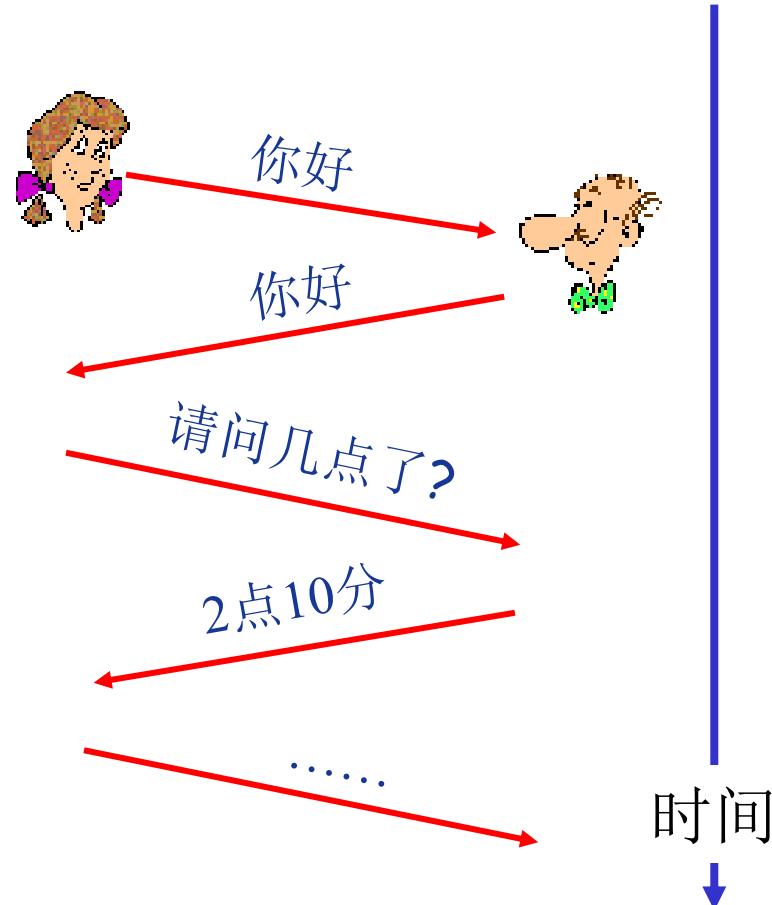


任何通信或信息交换过程都需要规则

人类交谈：

- ❖ 询问时间
- ❖ 请教问题
- ❖ 人员引荐

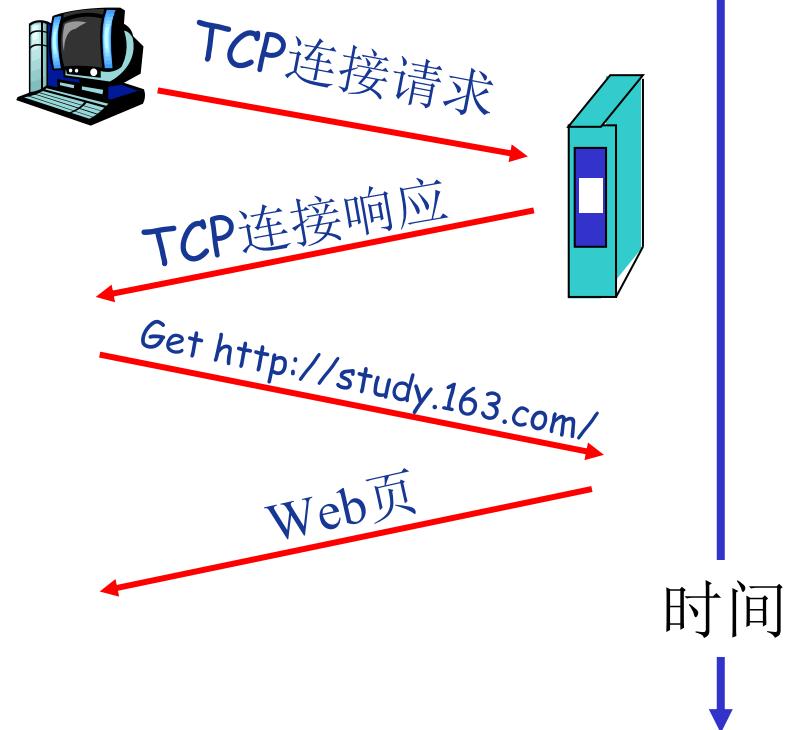
... 发送特定消息
... 采取特定“动作”



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)

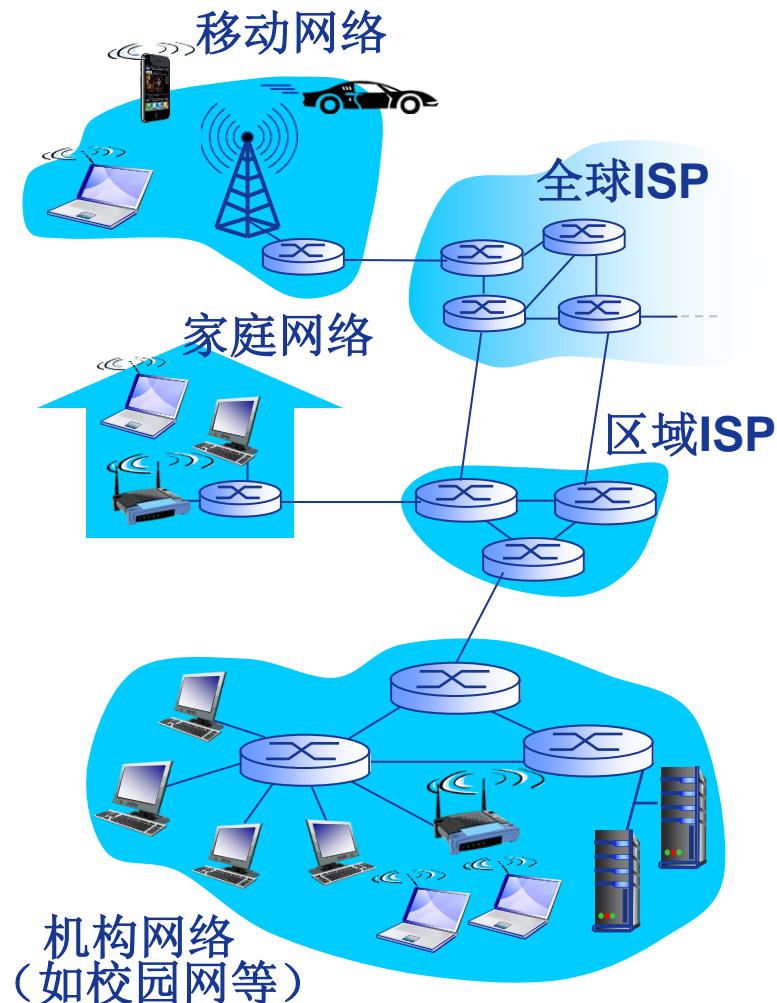
- 需要发出何种控制信息
- 完成何种动作以及做出何种响应
- 差错控制

❖ 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)



本讲主题

计算机网络的结构

计算机网络结构

❖ 网络边缘：

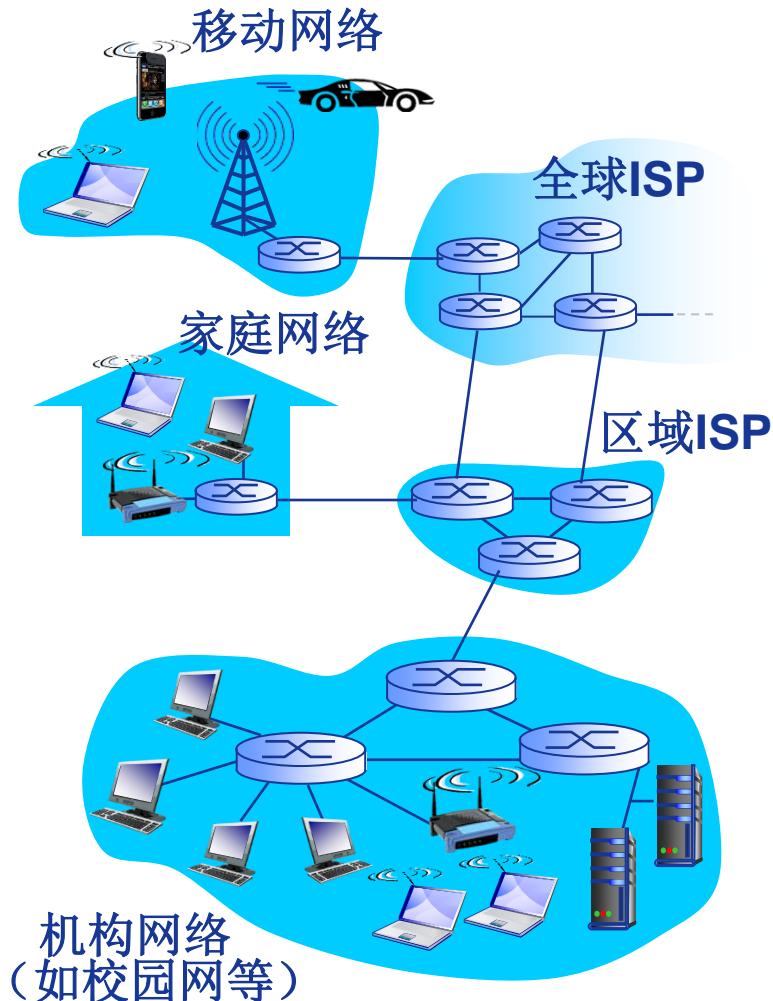
- 主机
- 网络应用

❖ 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



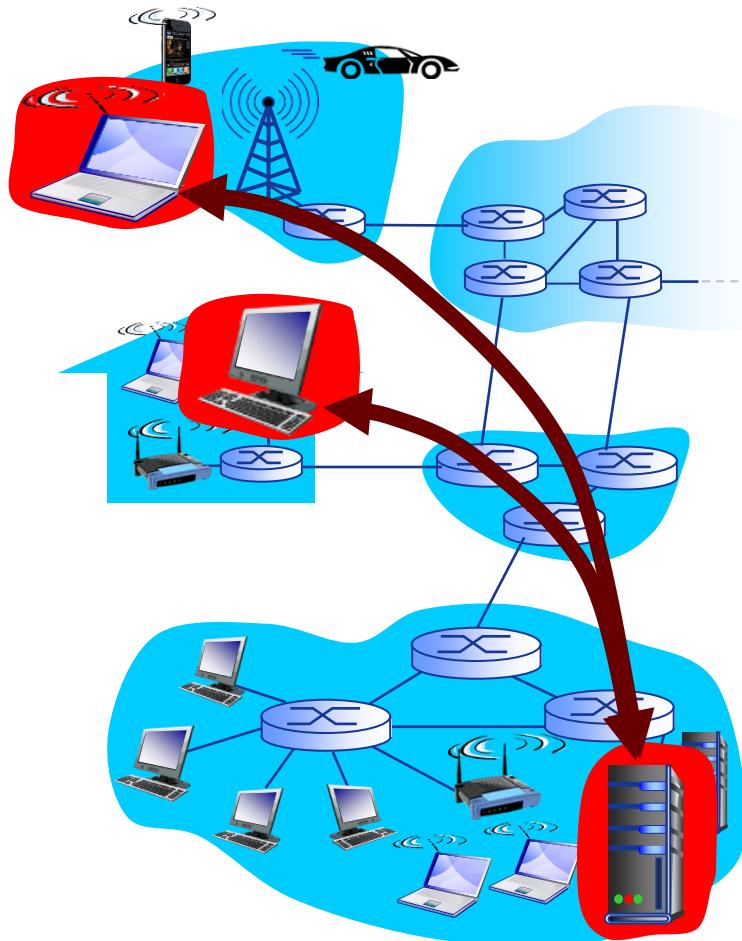
网络边缘

❖ 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):

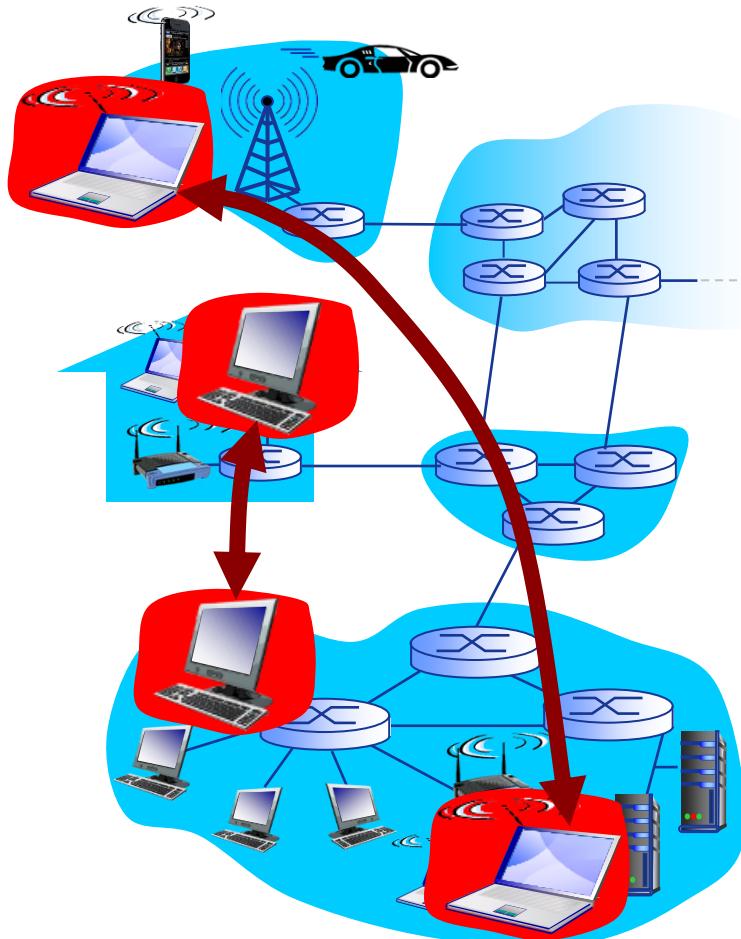
- 位于“网络边缘”
- 运行网络应用程序
 - 如: Web, email

❖ 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



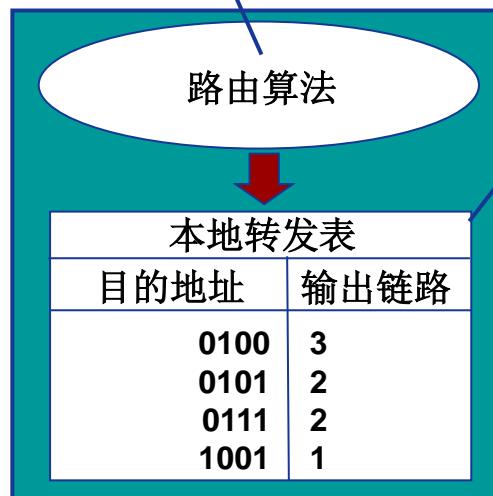
网络核心

- ❖ 互联的路由器网络
- ❖ 网络核心的关键功能:**路由+转发**

路由(*routing*):

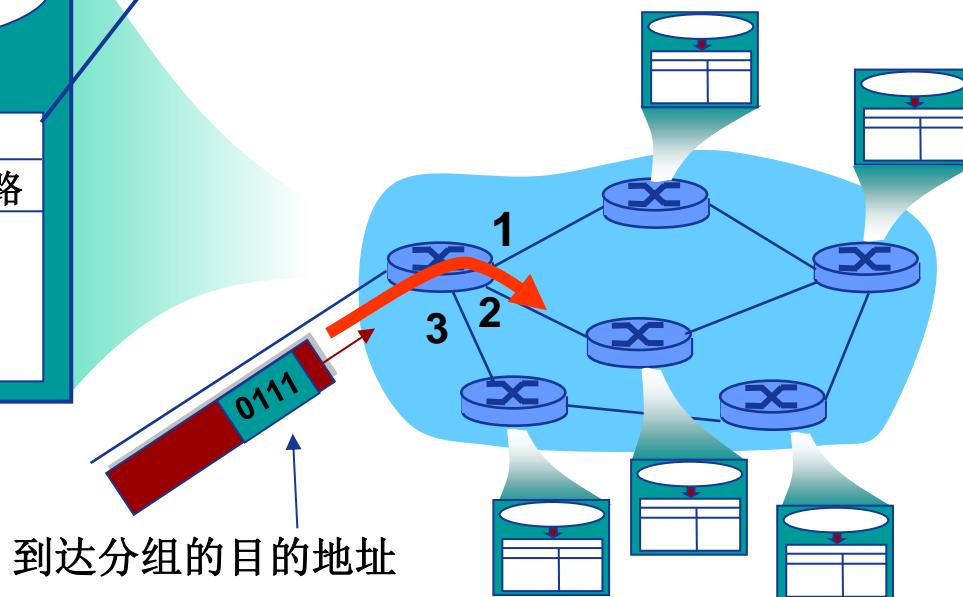
确定分组从源到目的传输路径

- 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



本讲主题

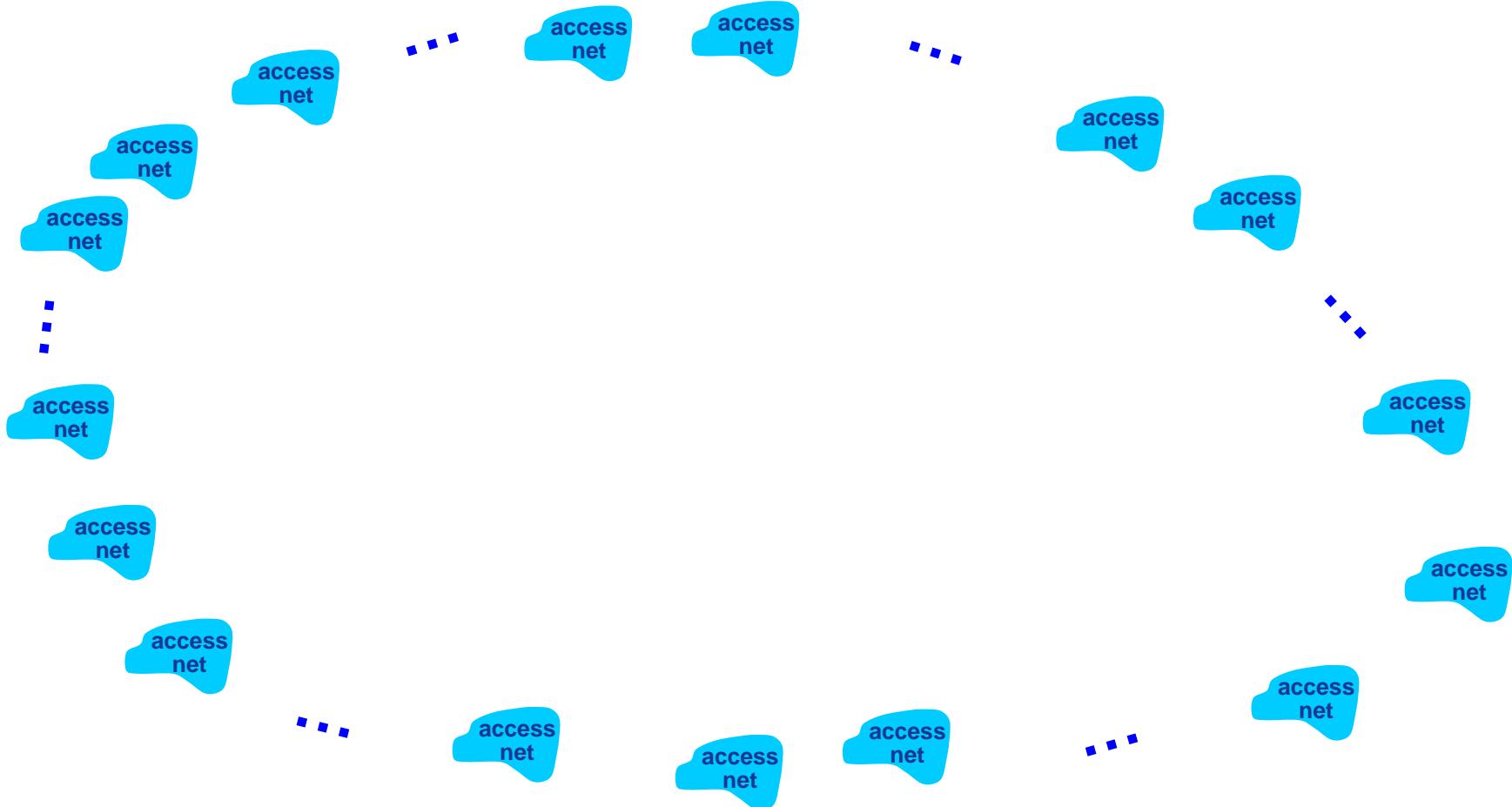
Internet结构

Internet结构: 网络之网络

- ❖ 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?



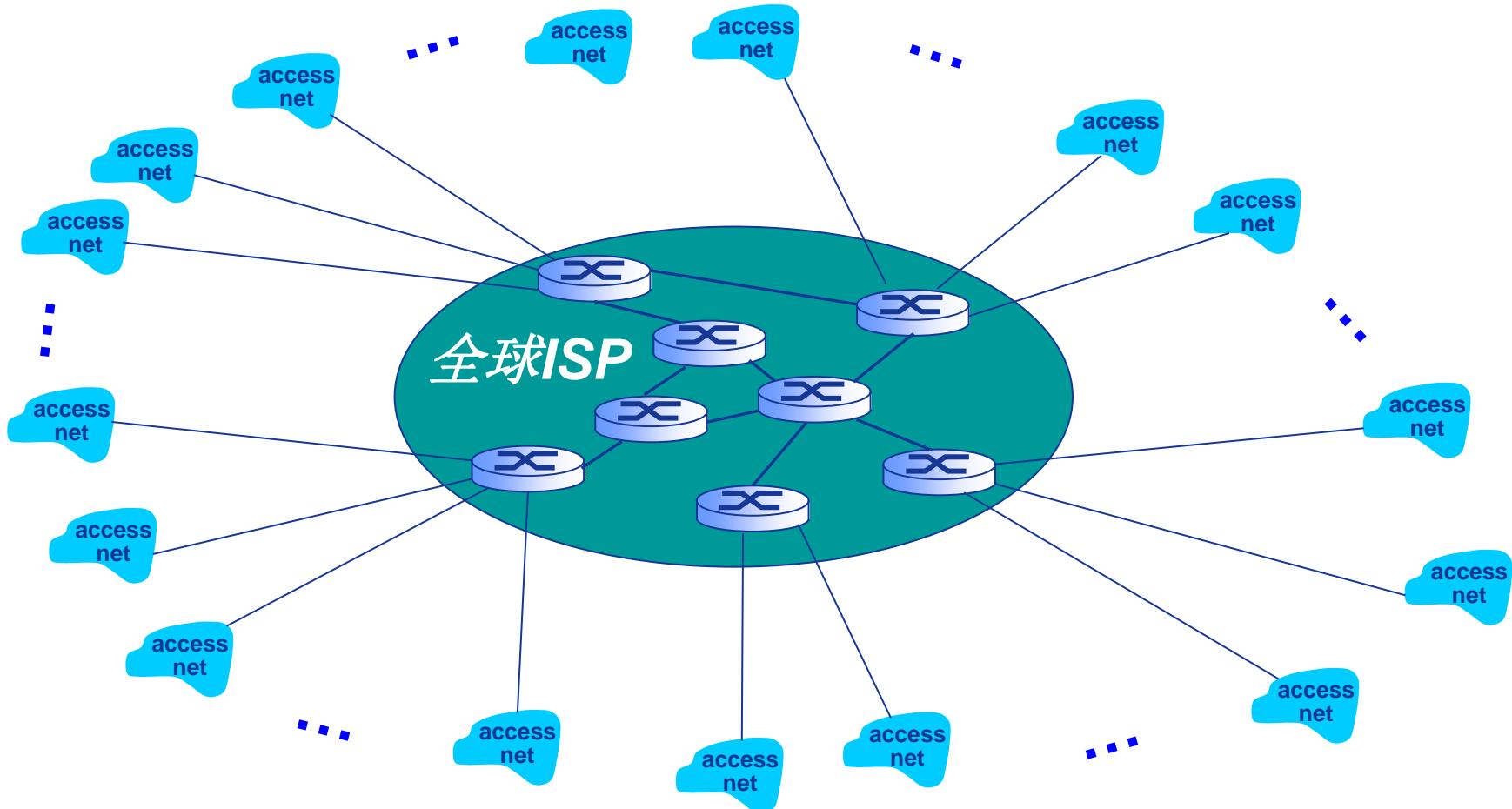
Internet结构: 网络之网络

可选方案: 每个接入ISP直接彼此互连?



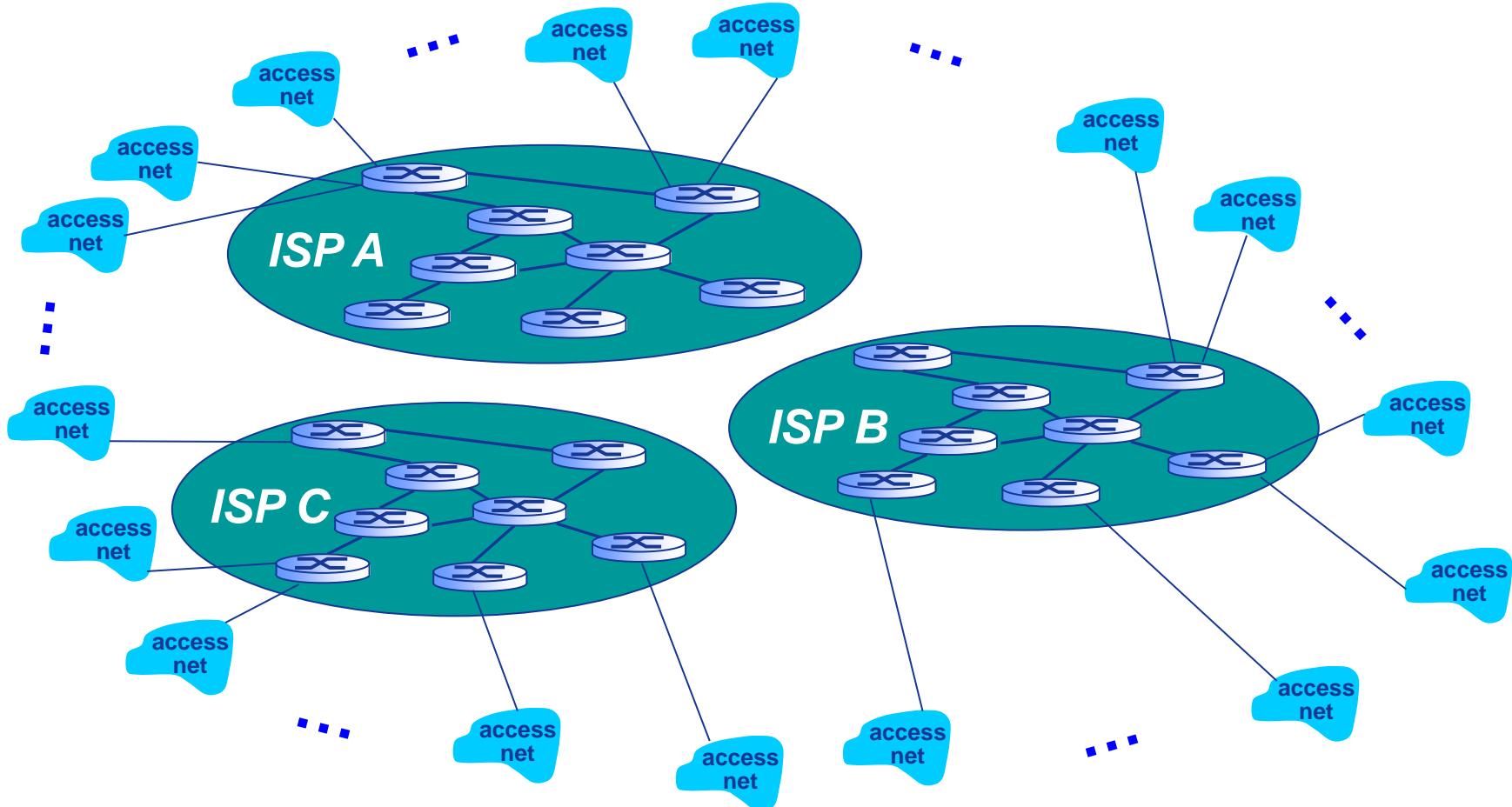
Internet结构: 网络之网络

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



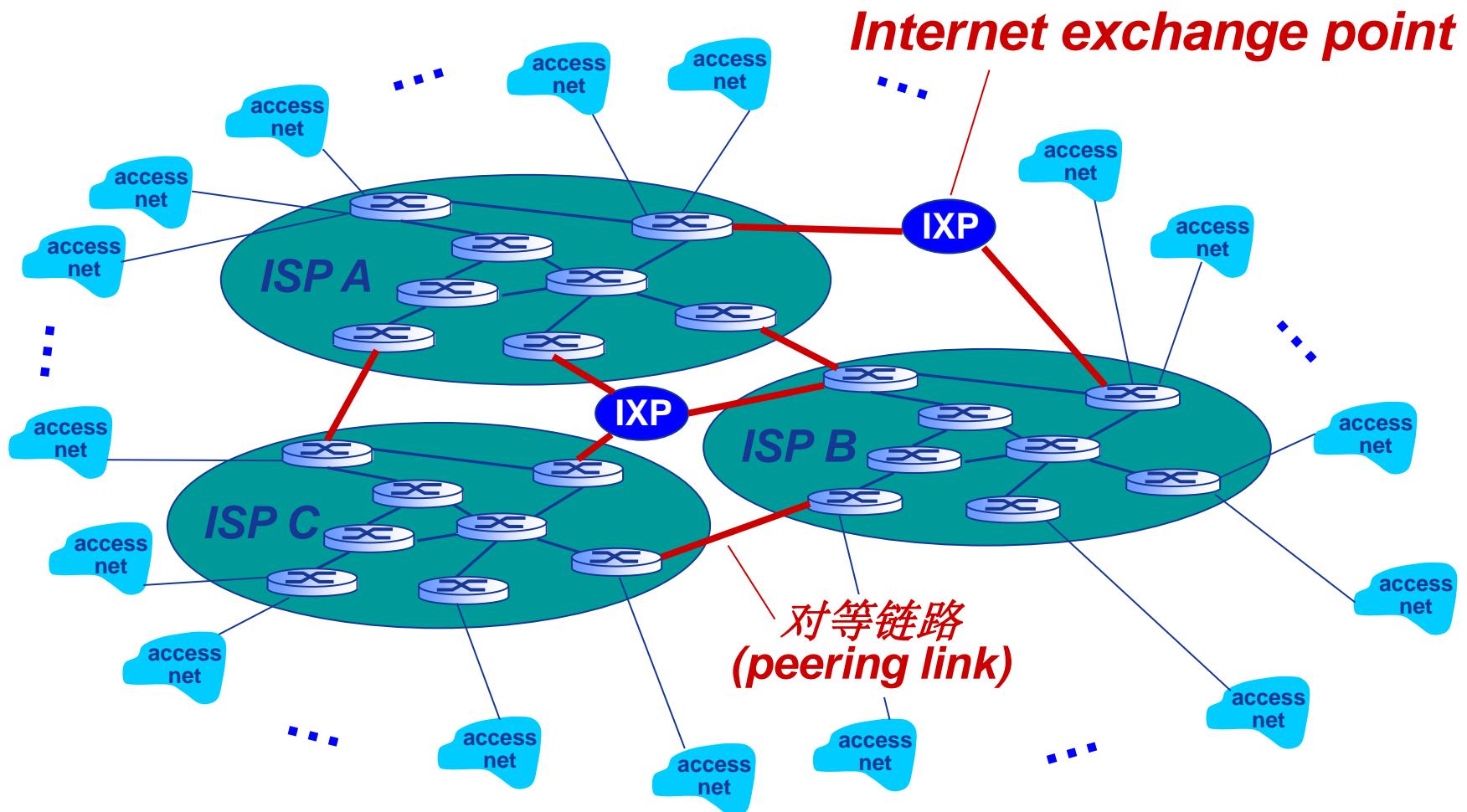
Internet结构: 网络之网络

但是从商业角度，必定有竞争者…



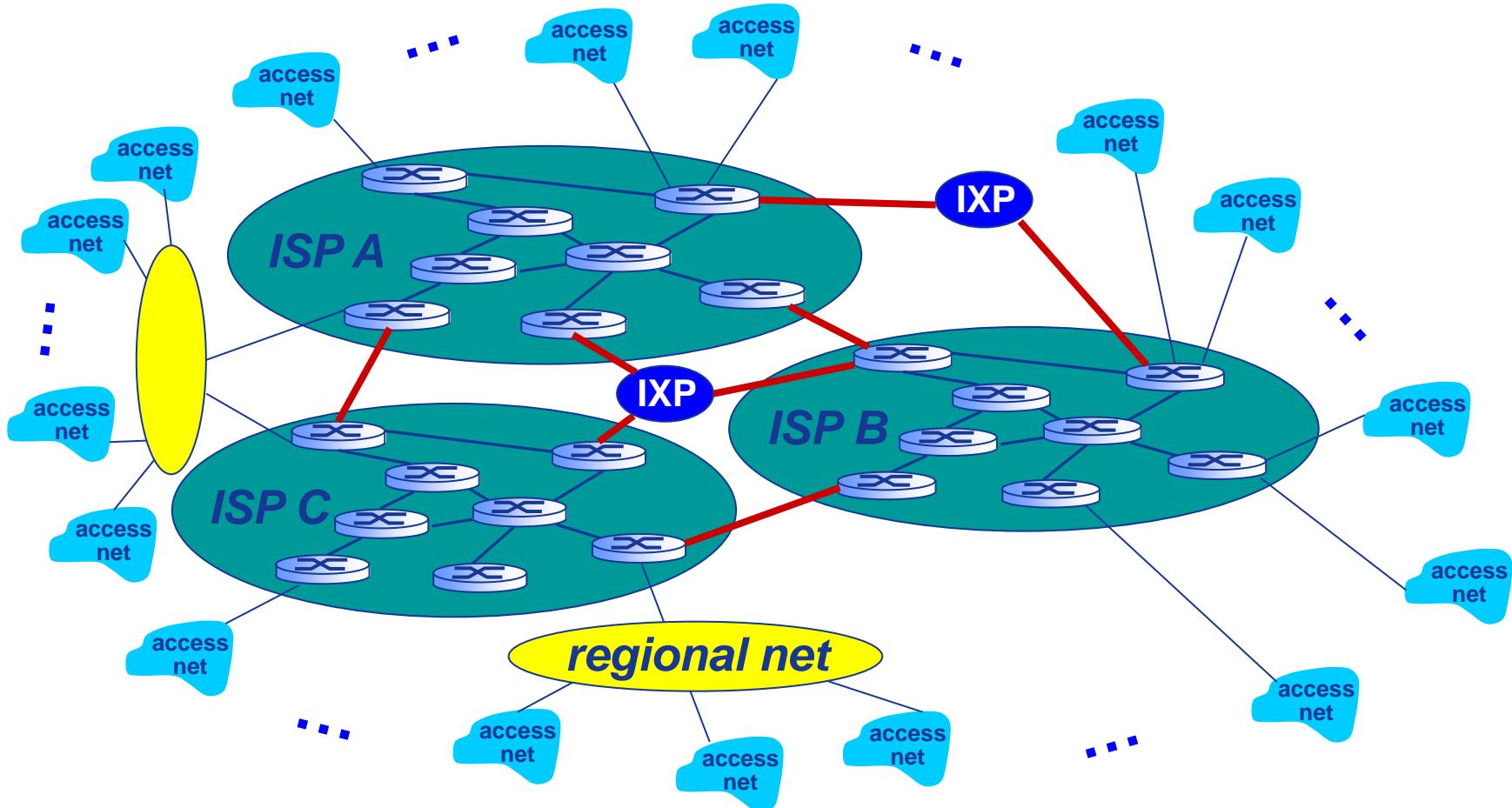
Internet结构: 网络之网络

但是从商业角度，必定有竞争者…，这些ISP网络必须互连



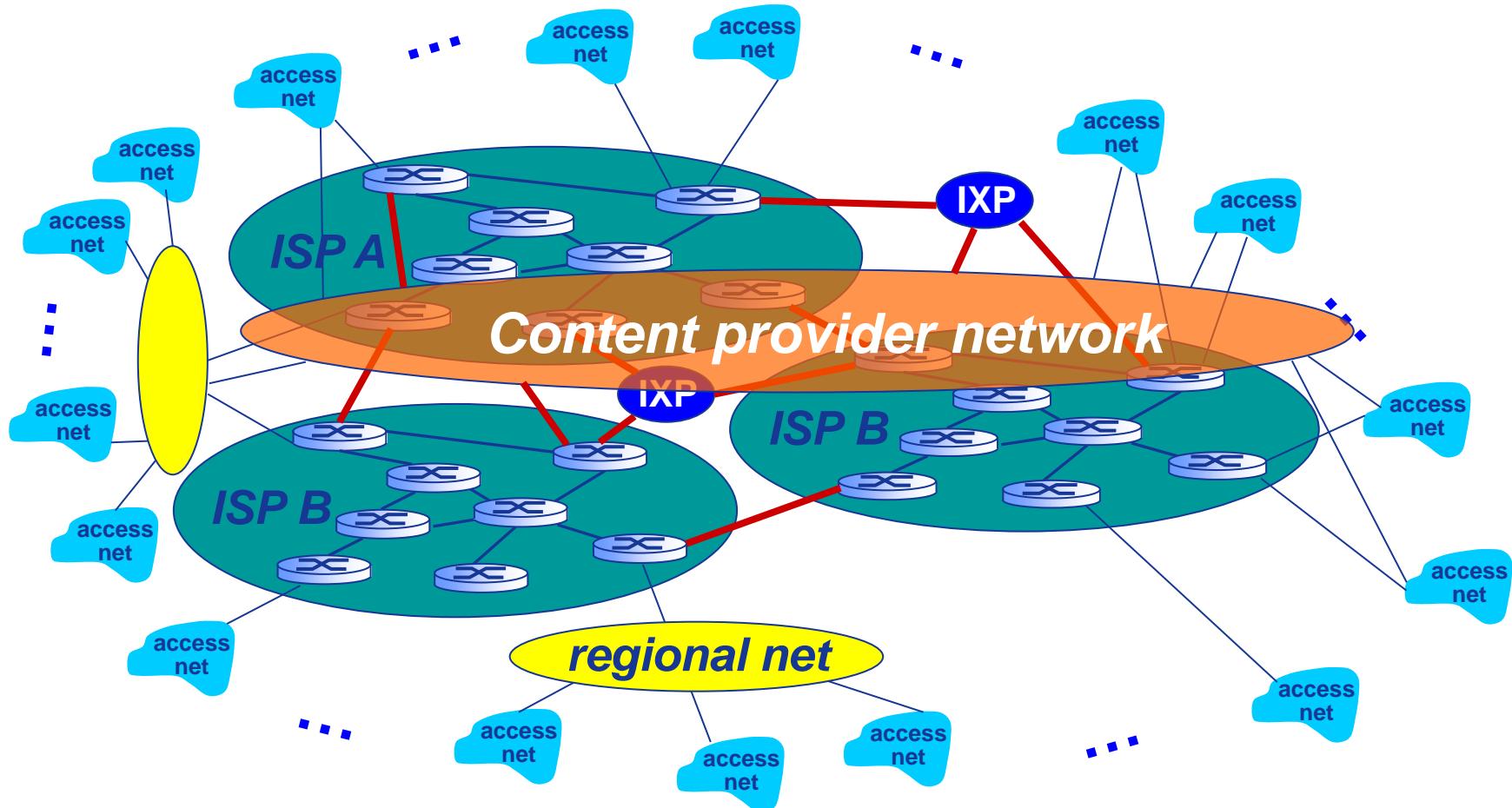
Internet结构: 网络之网络

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

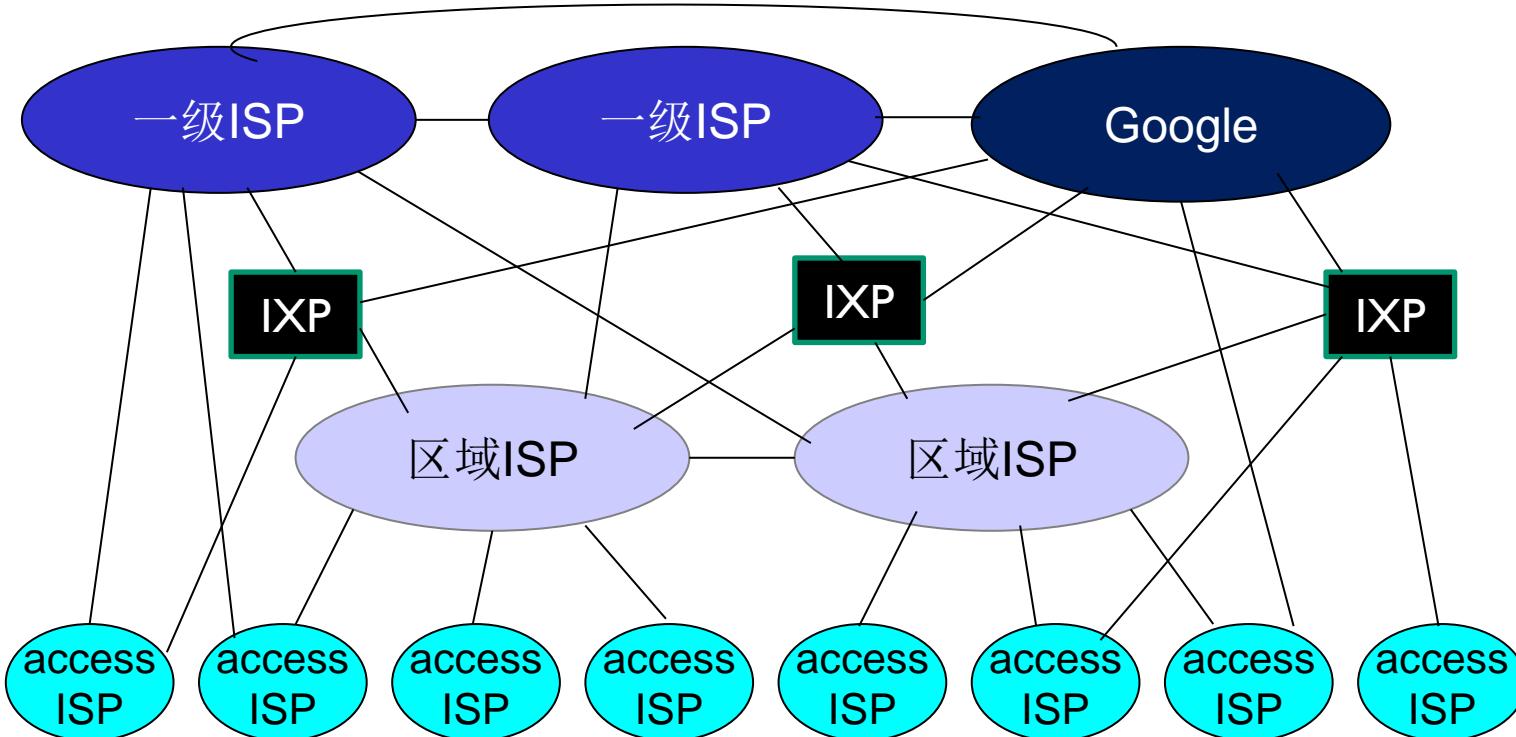


Internet结构: 网络之网络

... 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



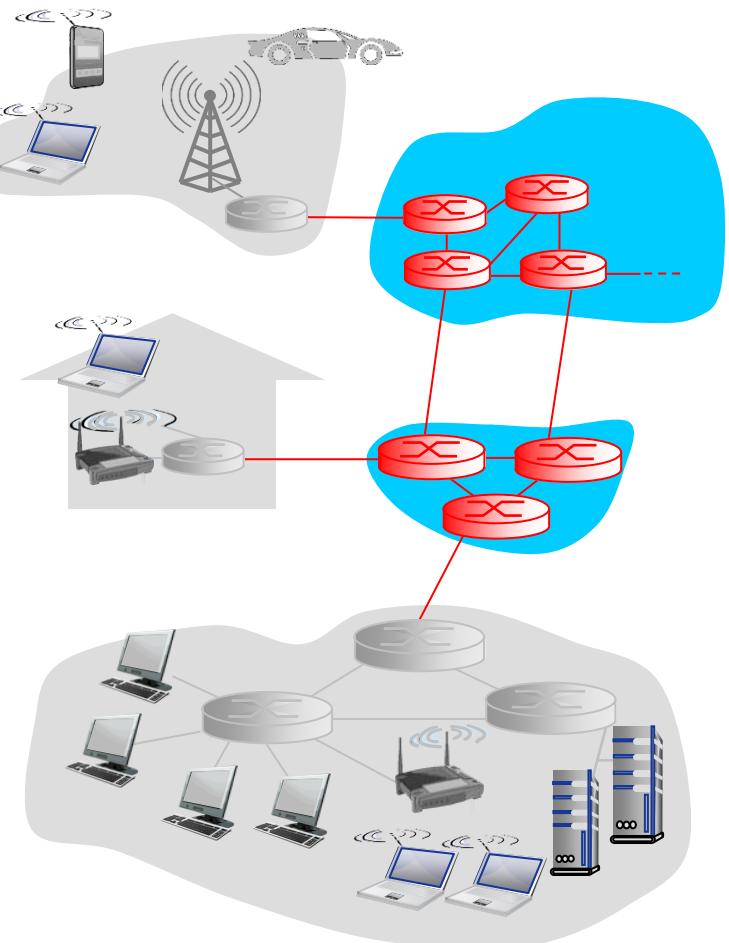
- ❖ 在网络中心: 少数互连的大型网络
 - “一级” (tier-1) 商业ISPs (如: 网通、电信、Sprint、AT&T), 提供国家或国际范围的覆盖
 - 内容提供商网络 (content provider network, 如: Google): 私有网络, 连接其数据中心与Internet, 通常绕过一级ISP和区域ISPs

本讲主题

数据交换-电路交换

网络核心

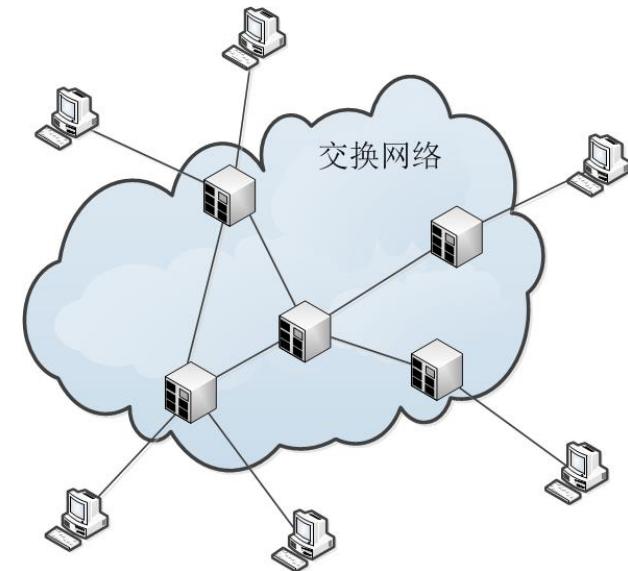
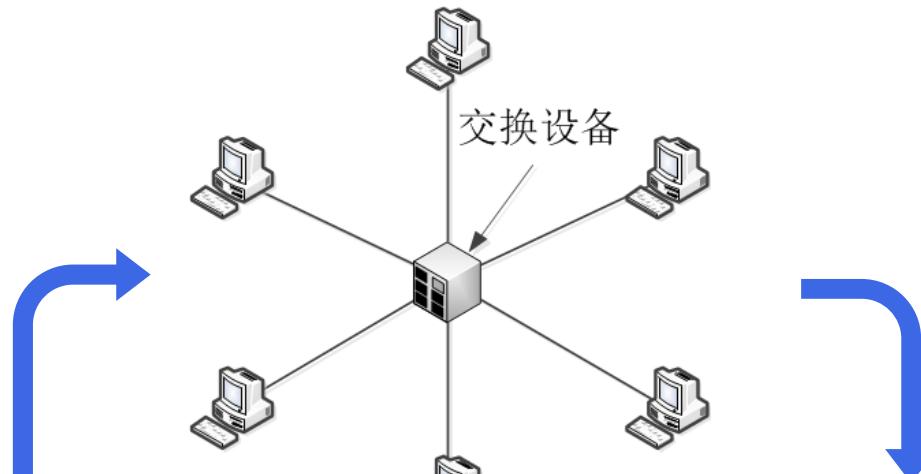
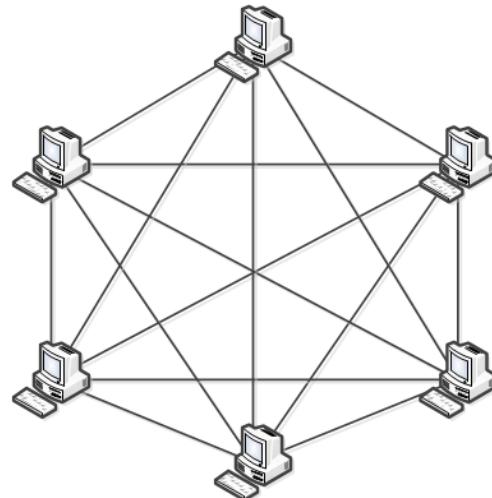
- ❖ 互联的路由器网络
- ❖ Q: 如何实现数据通过网络核心从源主机到达目的主机?
- ❖ A: 数据交换



为什么需要数据交换？

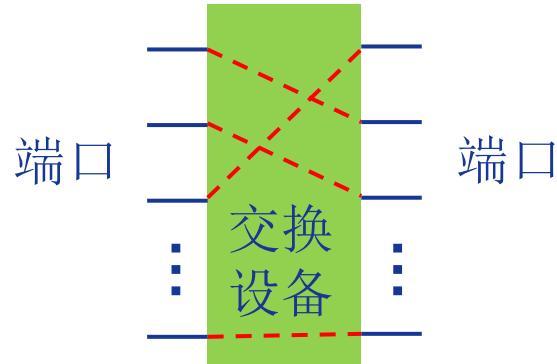
- ❖ N^2 链路问题
- ❖ 连通性
- ❖ 网络规模

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

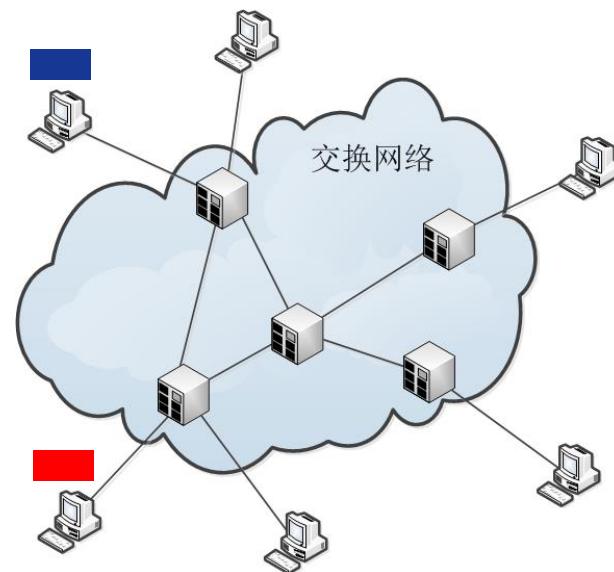


交换?

- ❖ 动态转接



- ❖ 动态分配传输资源

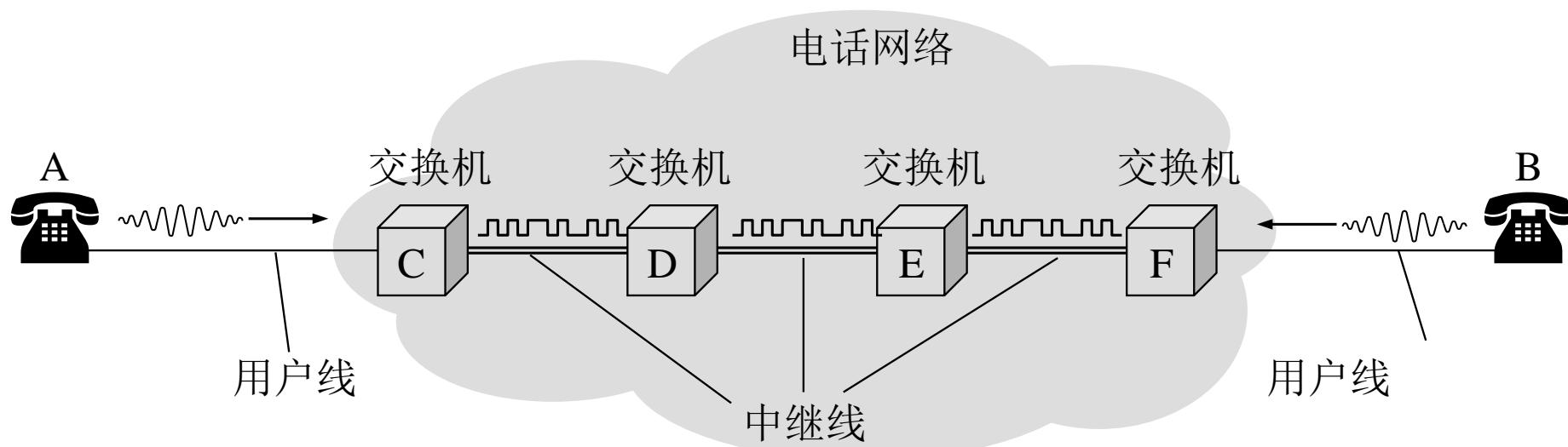


数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换

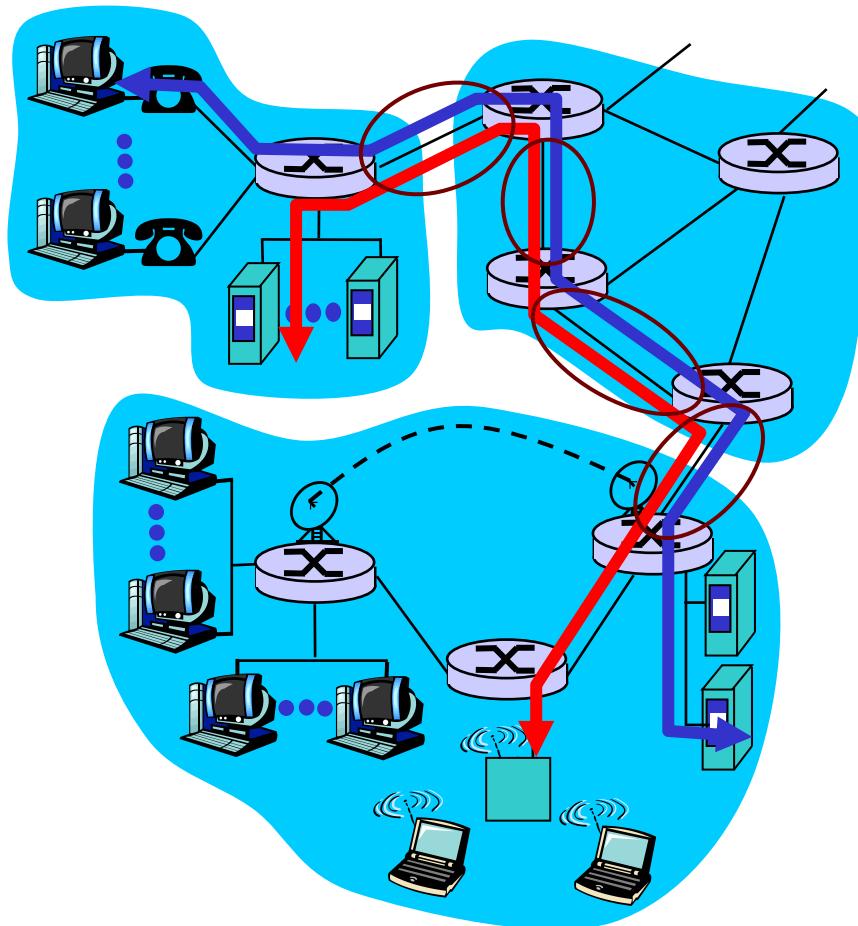
电路交换的特点

- ❖ 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）

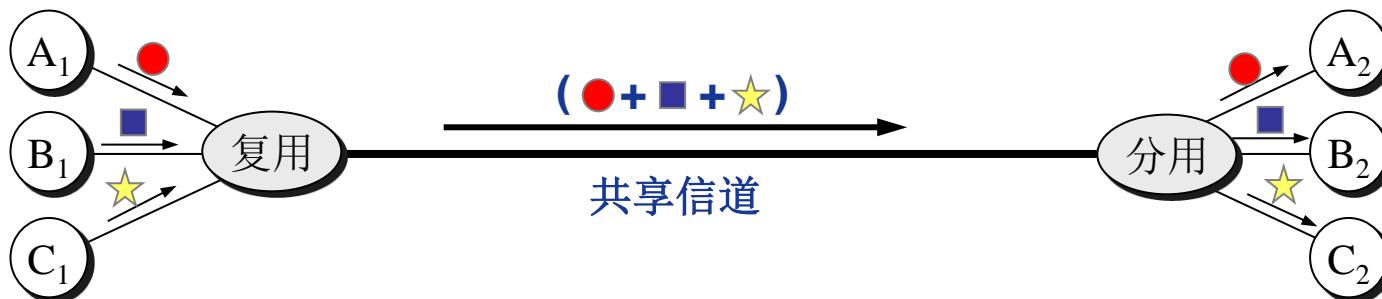
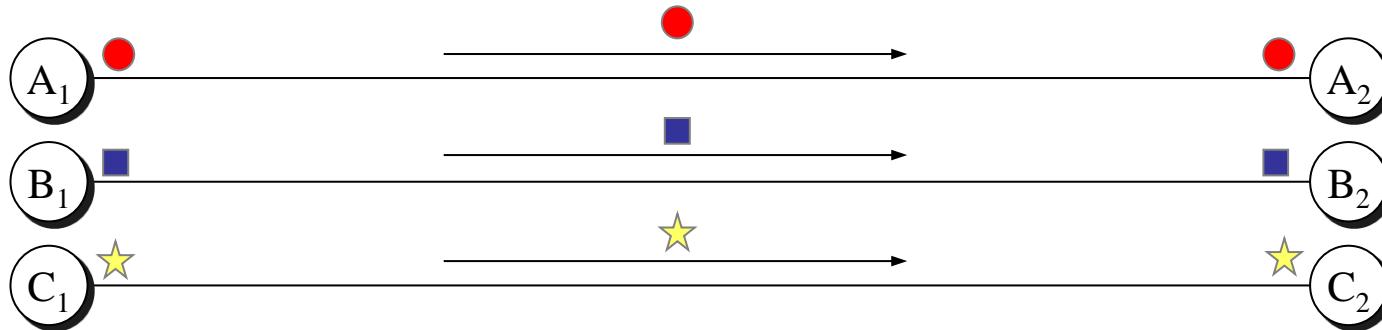


本讲主题

多路复用

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):

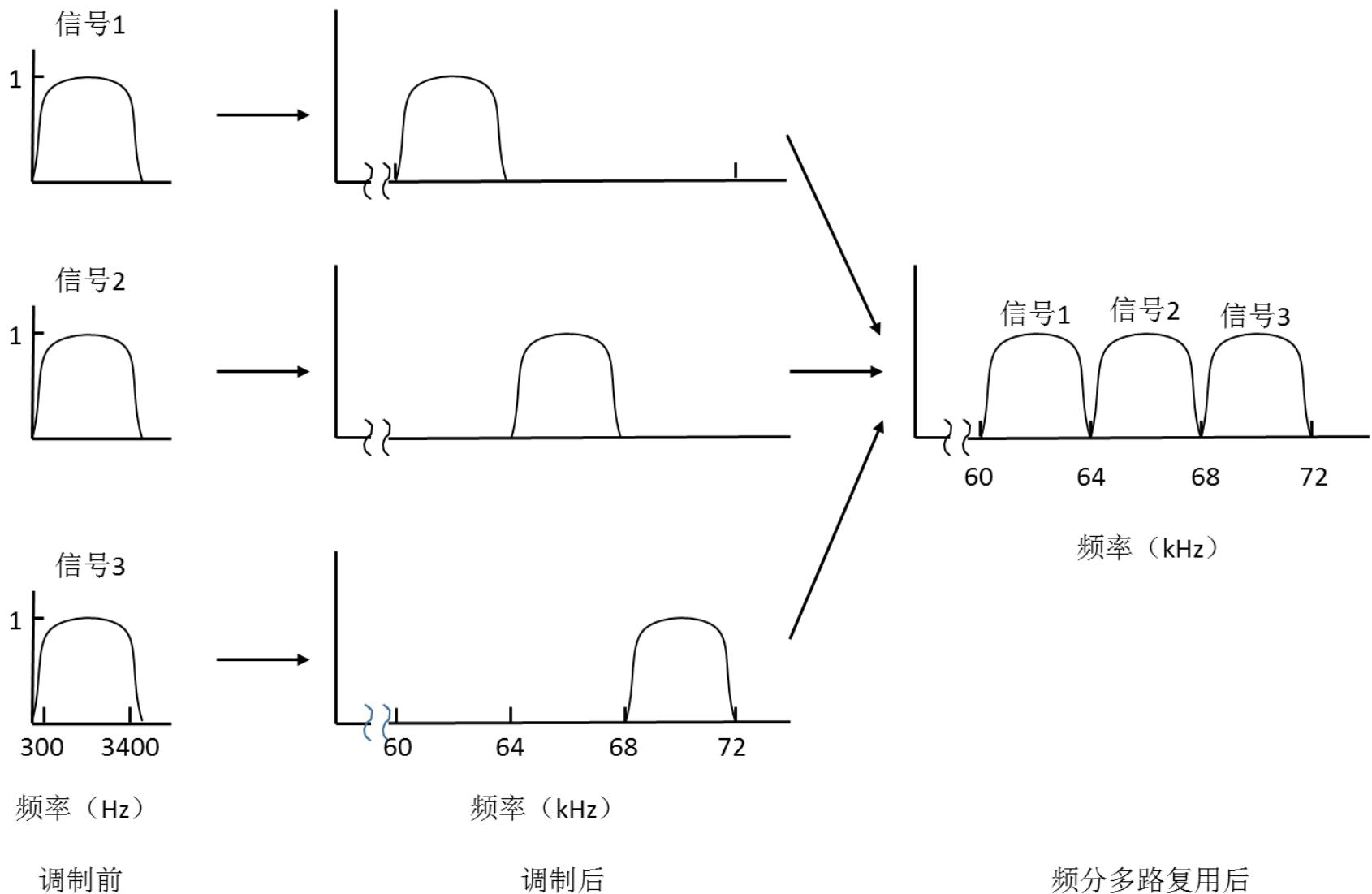
链路/网络资源（如带宽）划分为“资源片”

- ❖ 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FDM

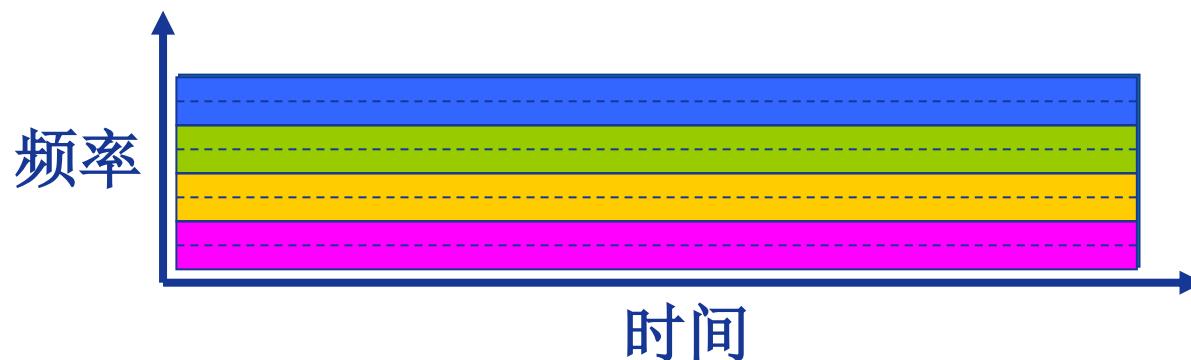
- ❖ 频分多路复用的各用户占用不同的带宽资源（请注意，这里的“带宽”是频率带宽（单位：Hz）而不是数据的发送速率）
- ❖ 用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带

例如：

4个用户



FDM



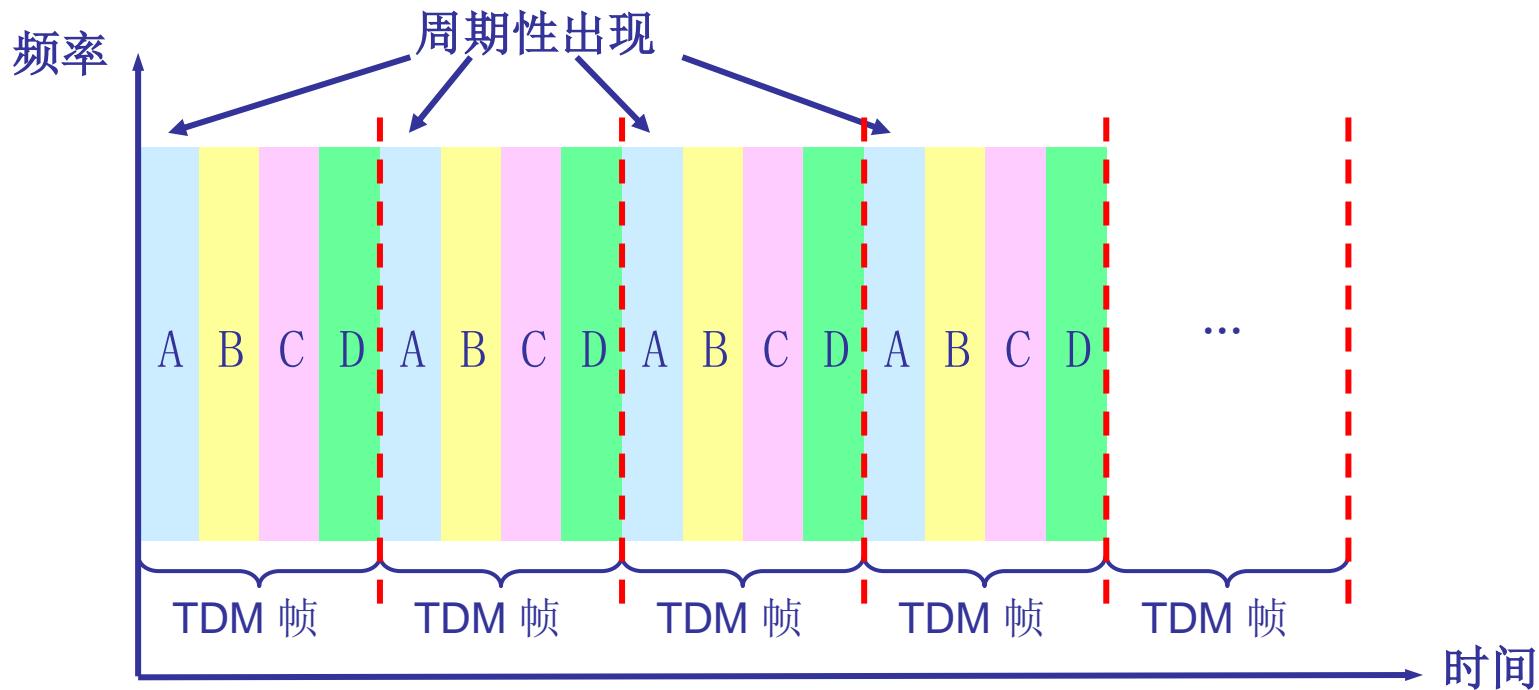
时分多路复用TDM

- ❖ 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）



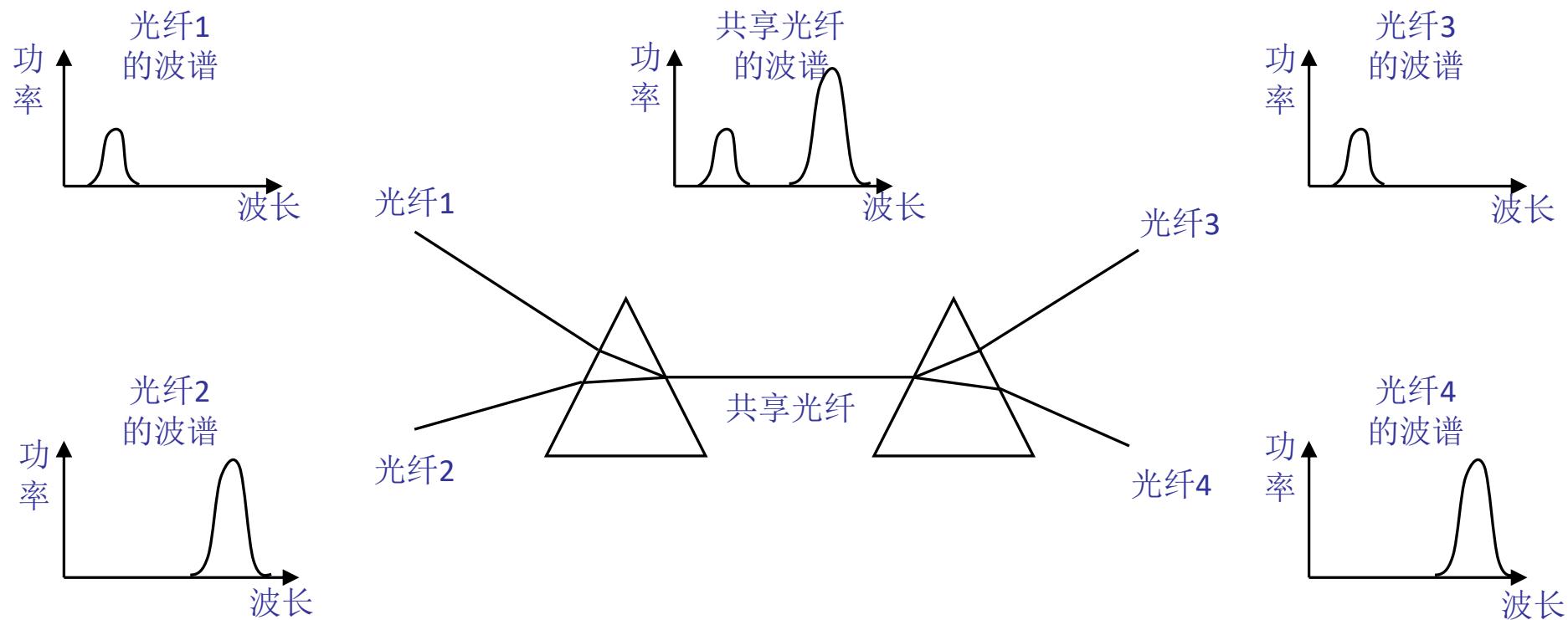
- ❖ 时分复用的所有用户是在不同的时间占用**相同的频带宽度**

时分多路复用TDM

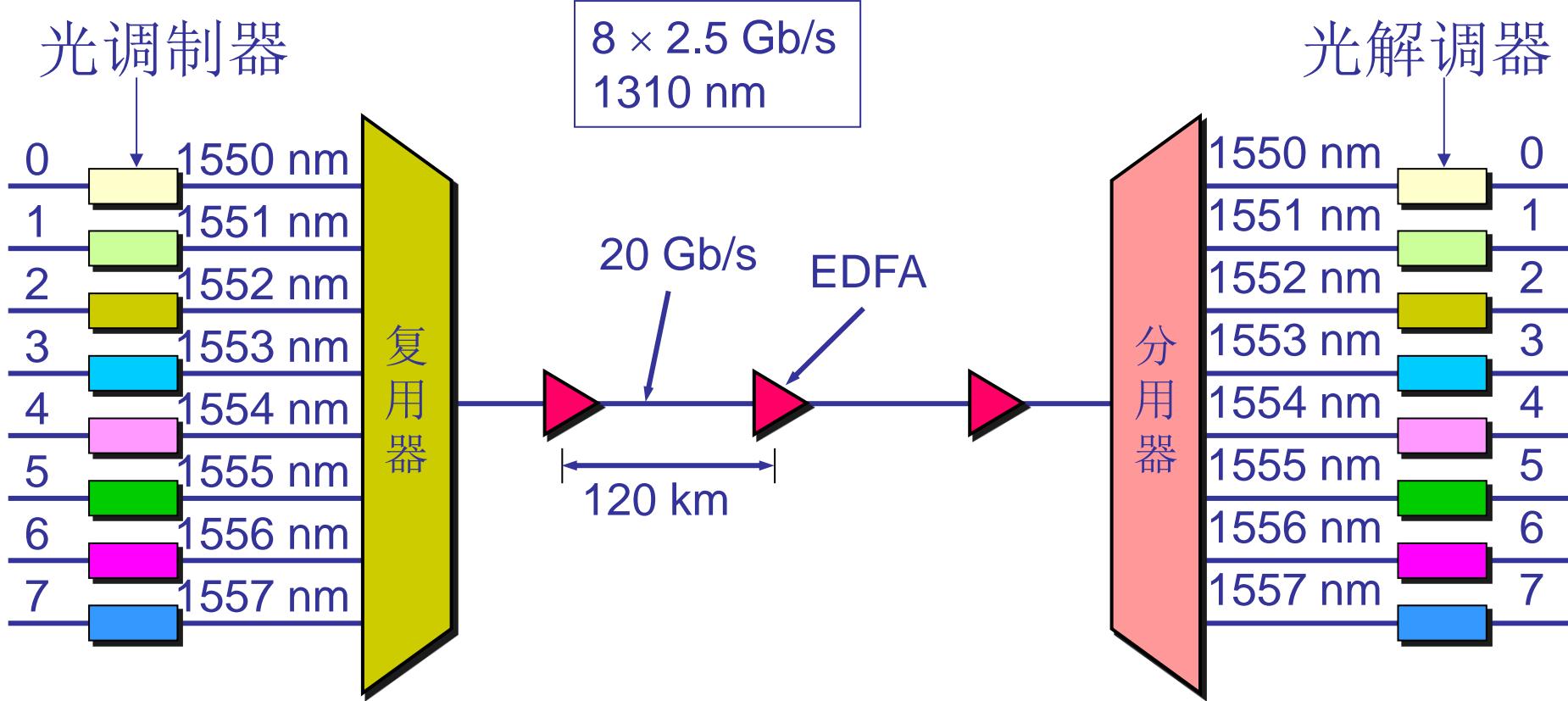


波分多路复用WDM

❖ 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

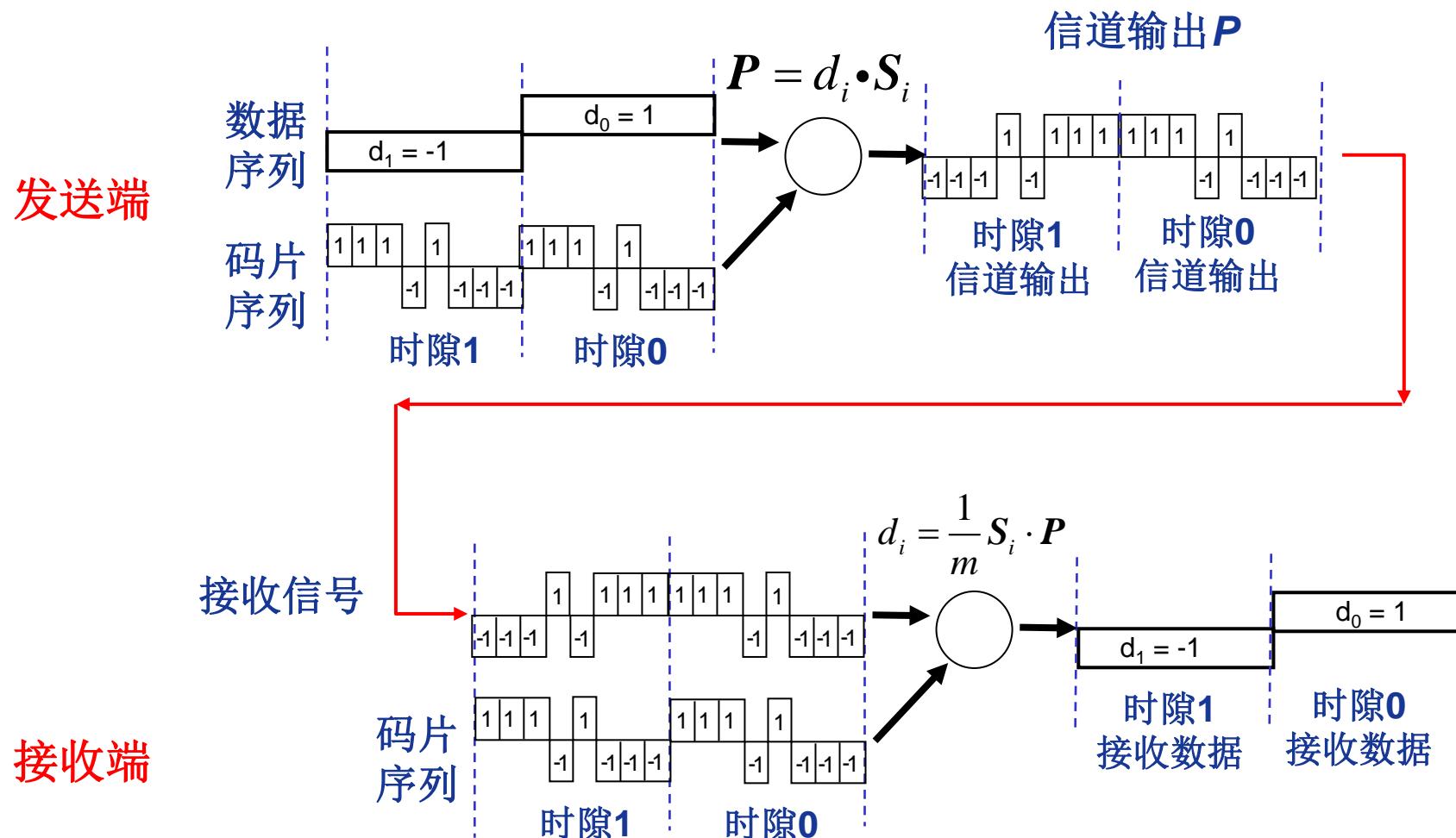
- 令 $\{d_i\}$ 为原始数据序列，各用户的叠加向量为

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

- 解码：码片序列与编码信号的内积

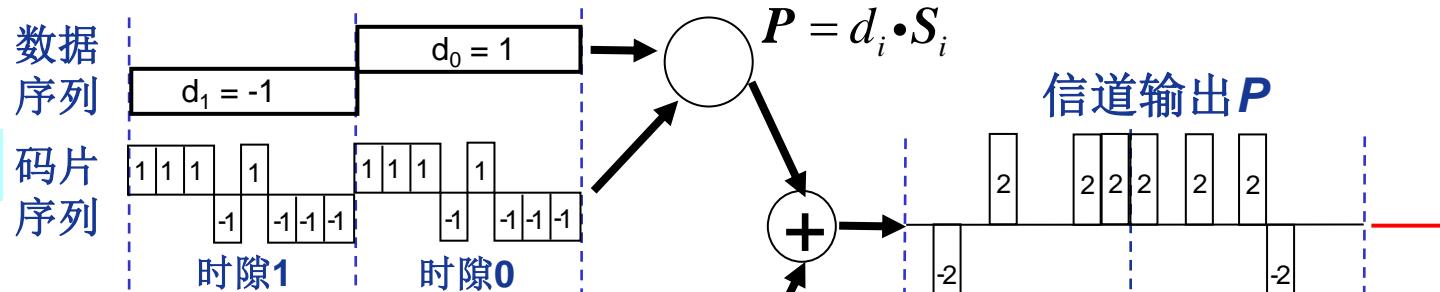
$$\frac{1}{m} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{P} = \begin{cases} 1 & \mathbf{S}_i \in \mathbf{P} \\ -1 & \bar{\mathbf{S}}_i \in \mathbf{P} \\ 0 & \mathbf{S}_i, \bar{\mathbf{S}}_i \notin \mathbf{P} \end{cases}$$

码分多路复用编/解码举例



码分多路复用编/解码举例

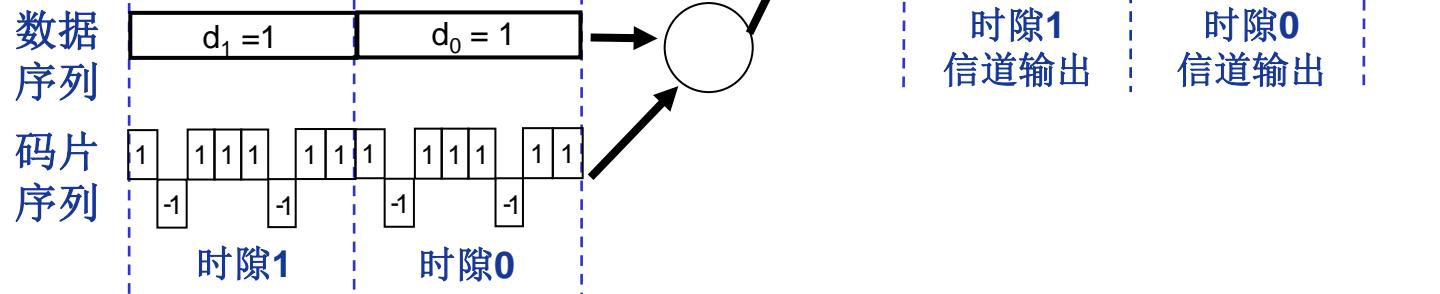
发送端



信道输出 P

时隙1 信道输出
时隙0 信道输出

用户2 码片序列



接收端

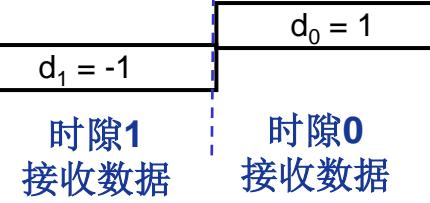
接收信号

接收用户1的数据

码片序列

时隙1 时隙0

$$d_i = \frac{1}{m} S_i \cdot P$$



本讲主题

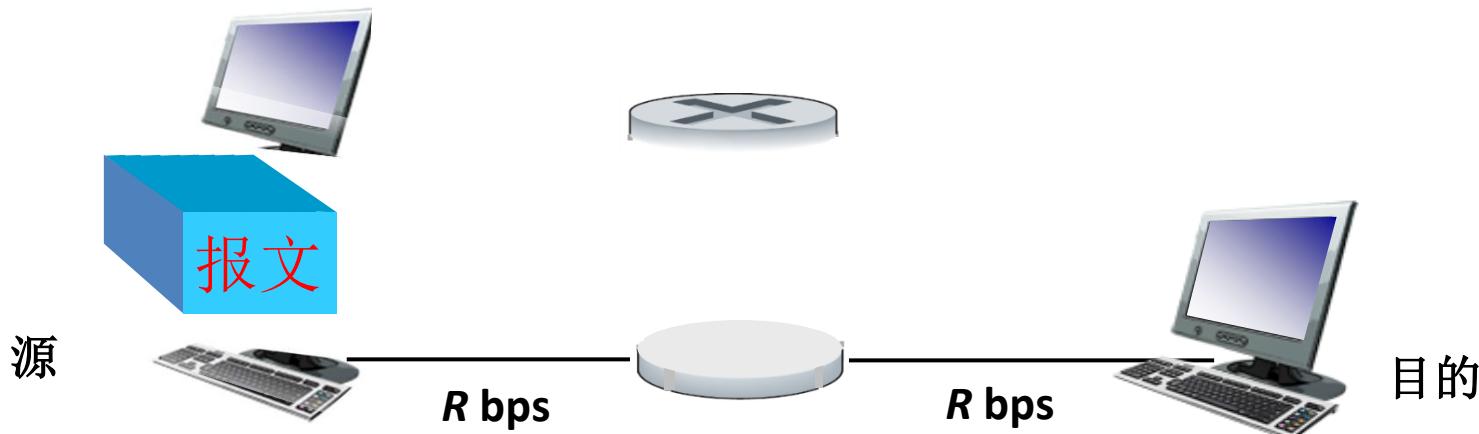
数据交换—报文、分组交换（1）

数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换

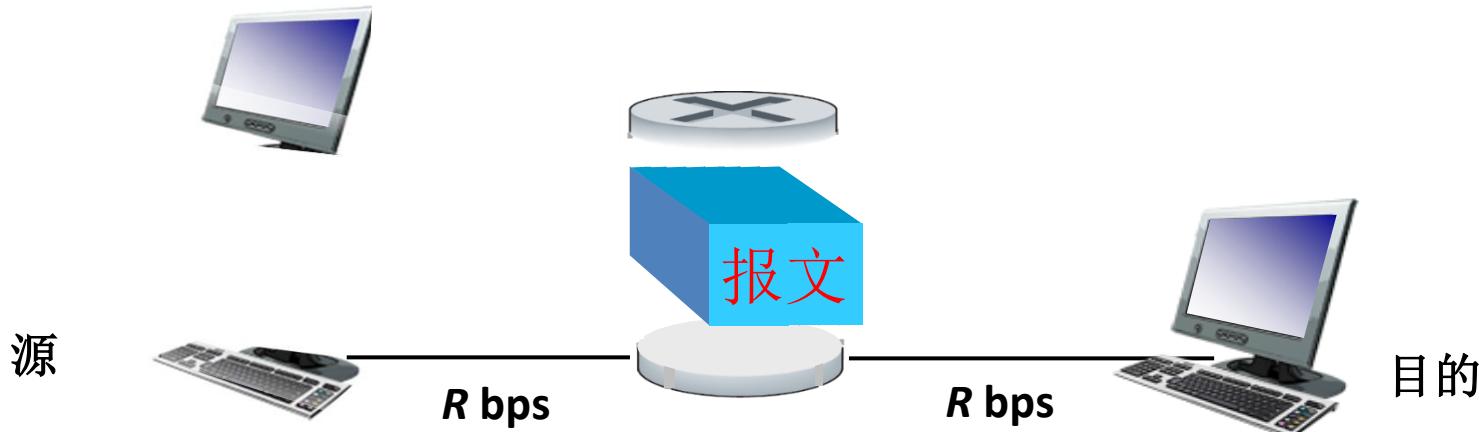
报文交换 (message switching)

- ❖ 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

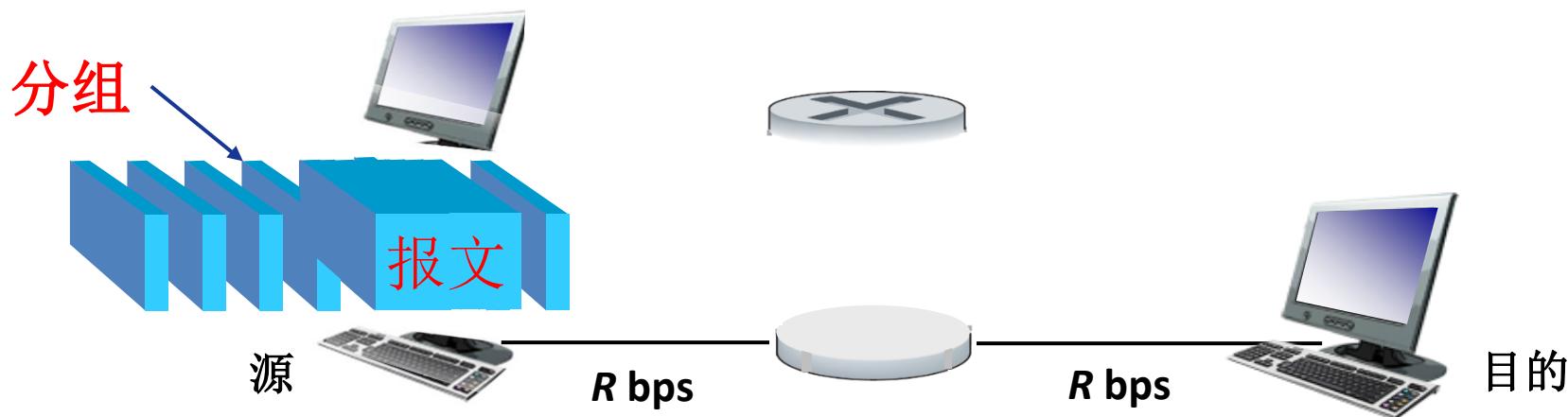


数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换

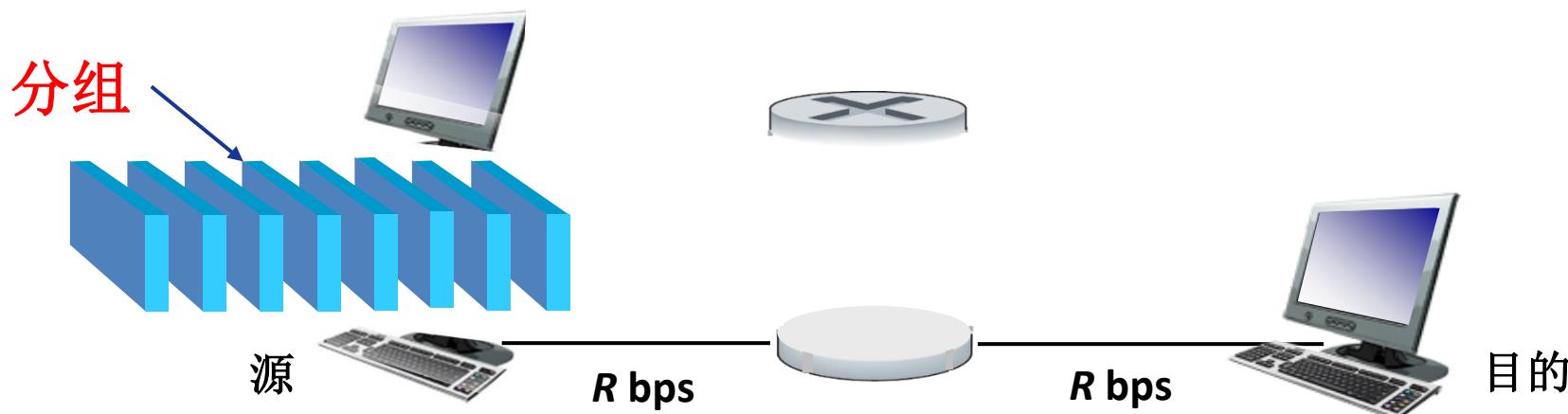
分组交换 (package switching)

- ❖ 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



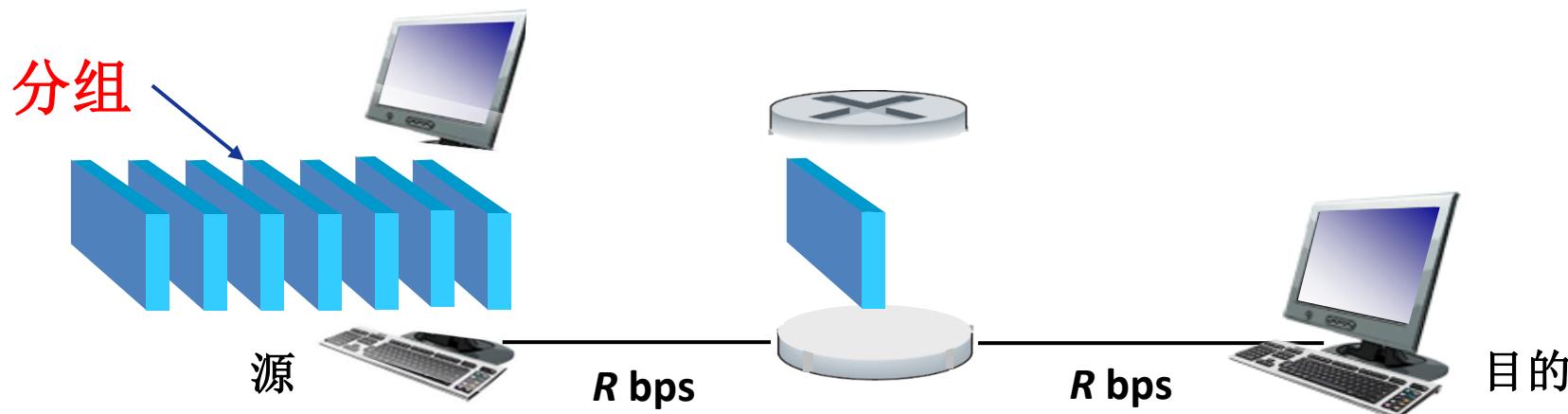
分组交换 (package switching)

- ❖ 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



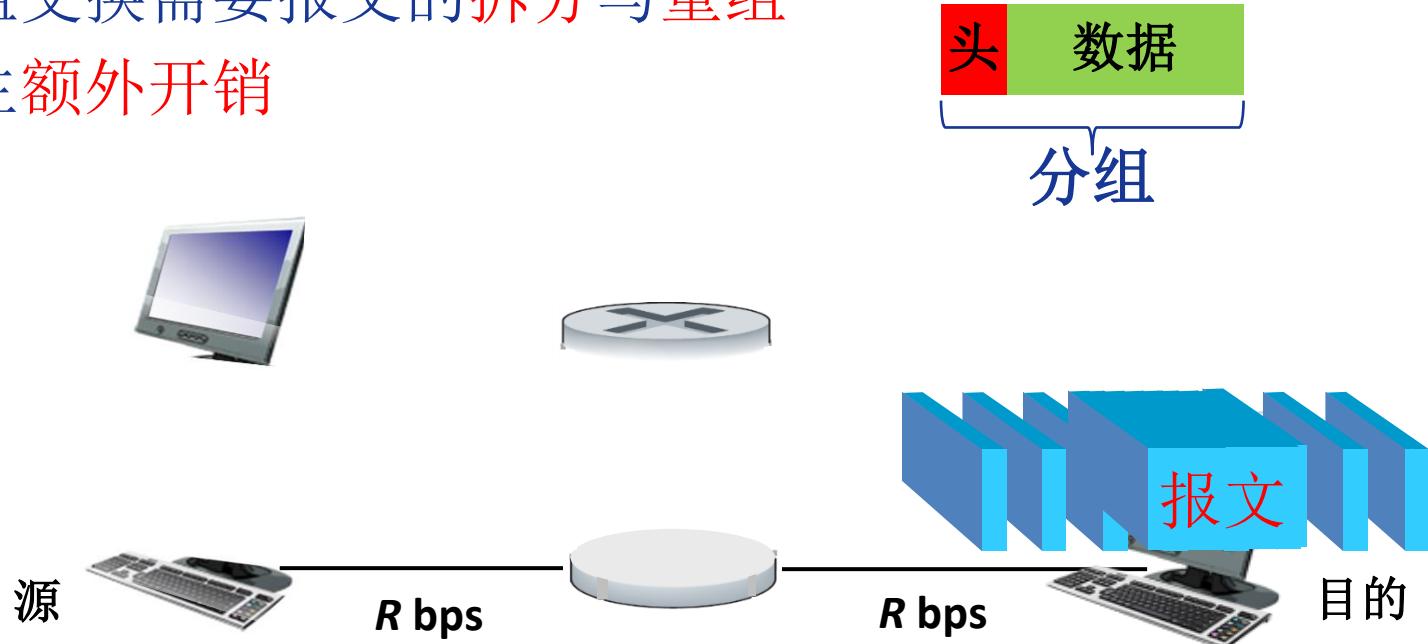
分组交换 (package switching)

- ❖ 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

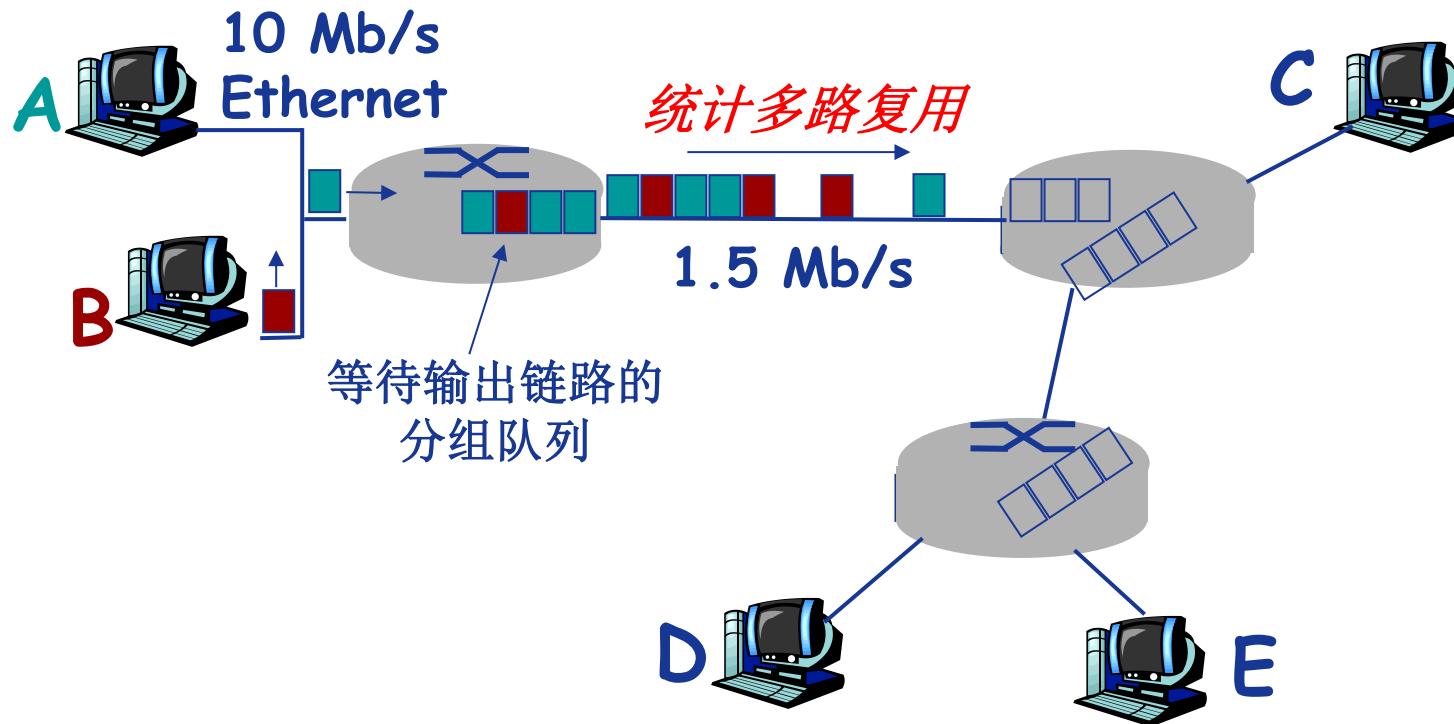


分组交换 (package switching)

- ❖ 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



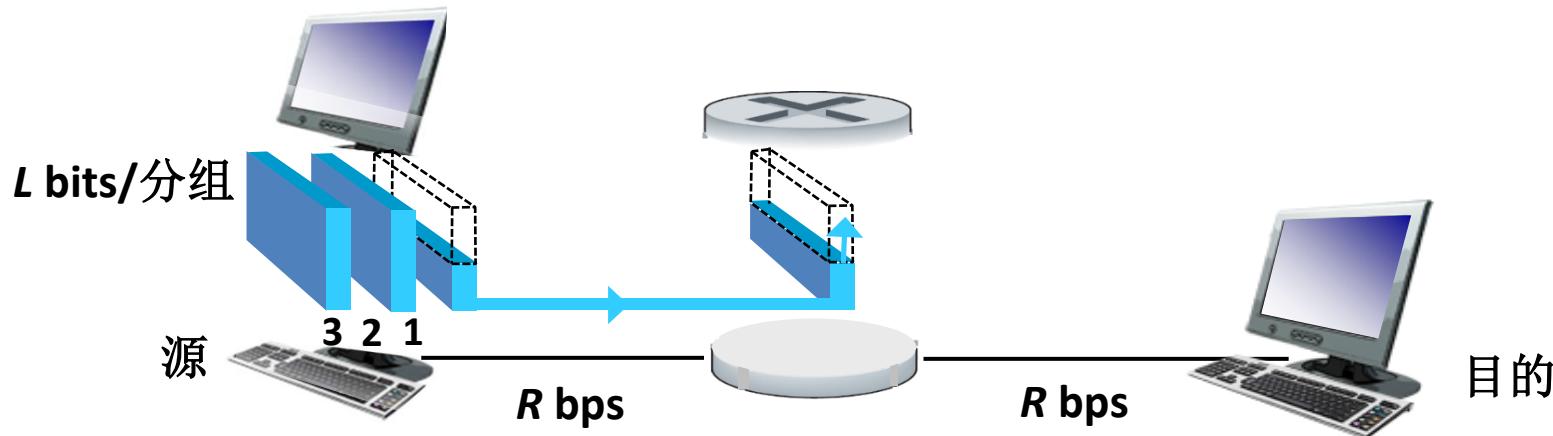
分组交换:统计多路复用 (Statistical Multiplexing)



A & B分组序列不确定，按需共享链路

→ *statistical multiplexing*.

存储-转发 (store-and-forward)

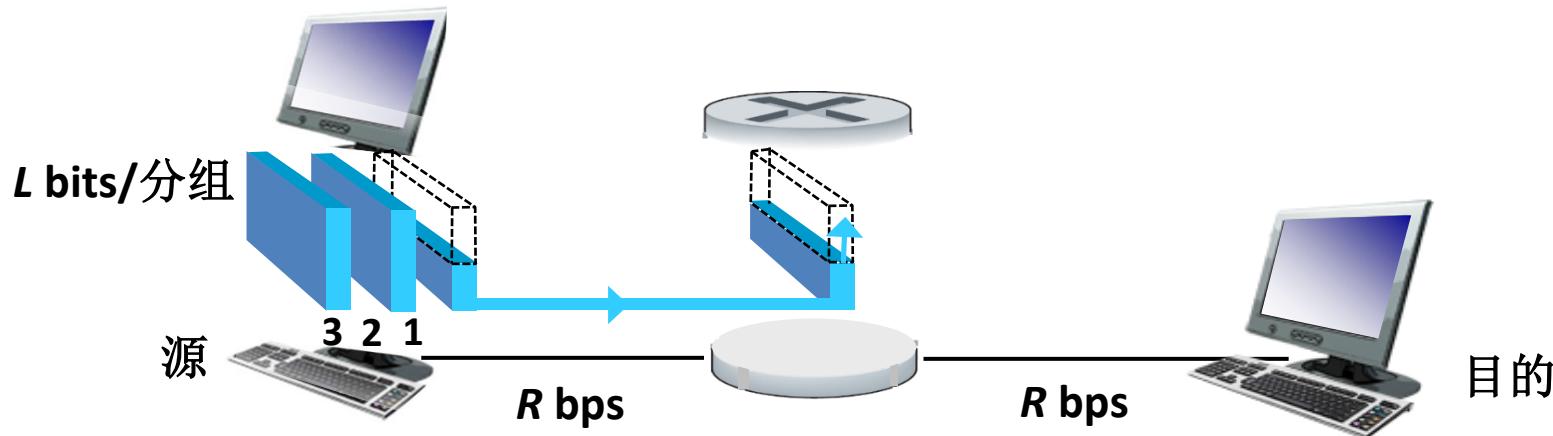


- ❖ 报文交换与分组交换均采用存储-转发交换方式
- ❖ 区别：
 - 报文交换以完整报文进行“存储-转发”
 - 分组交换以较小的分组进行“存储-转发”
- ❖ 哪种交换更好呢？

本讲主题

数据交换—报文、分组交换（2）

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:

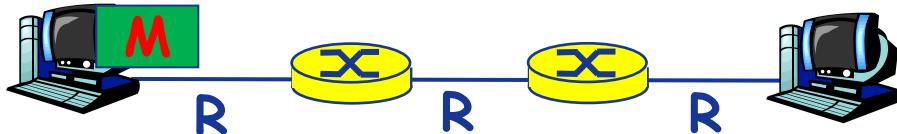
- ❖ 接收应用报文（消息）
- ❖ 拆分为较小长度为 L bits 的分组（*packets*）
- ❖ 在传输速率为 R 的链路上传输分组



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

(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



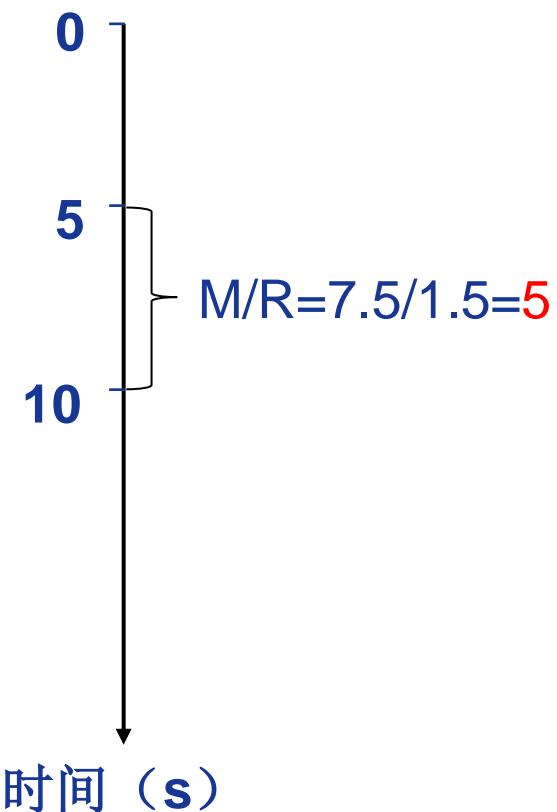
0
M/R=7.5/1.5=5

5

时间 (s)

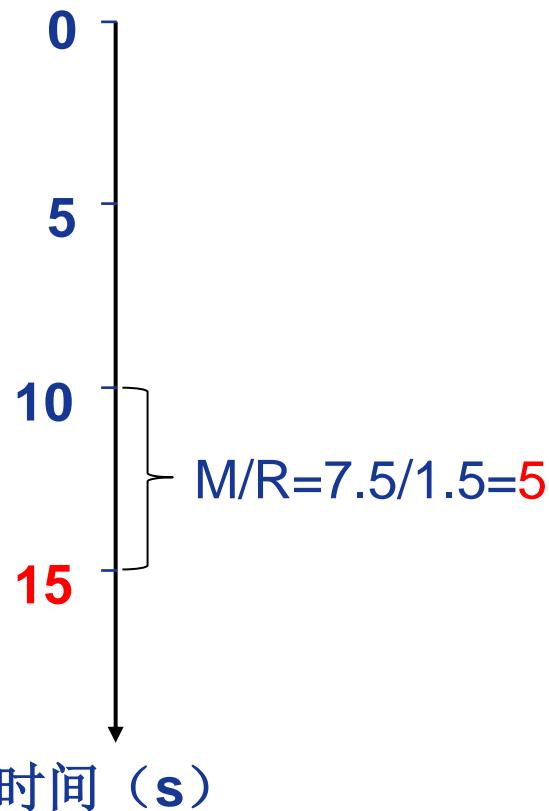
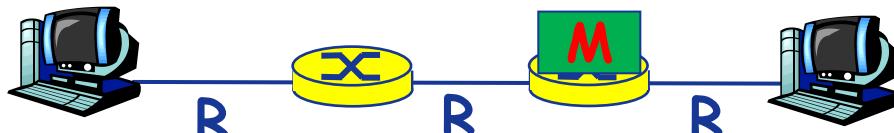
报文交换 vs 分组交换?

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?

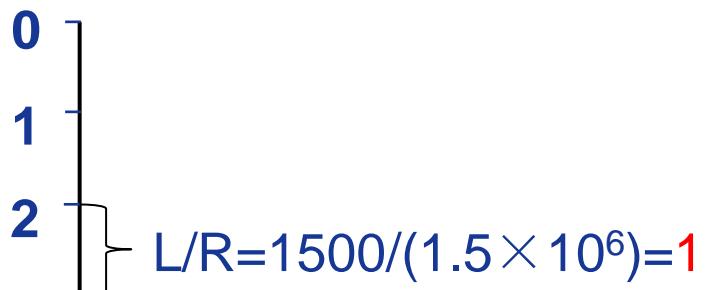
分组交换



时间 (ms)

报文交换 vs 分组交换?

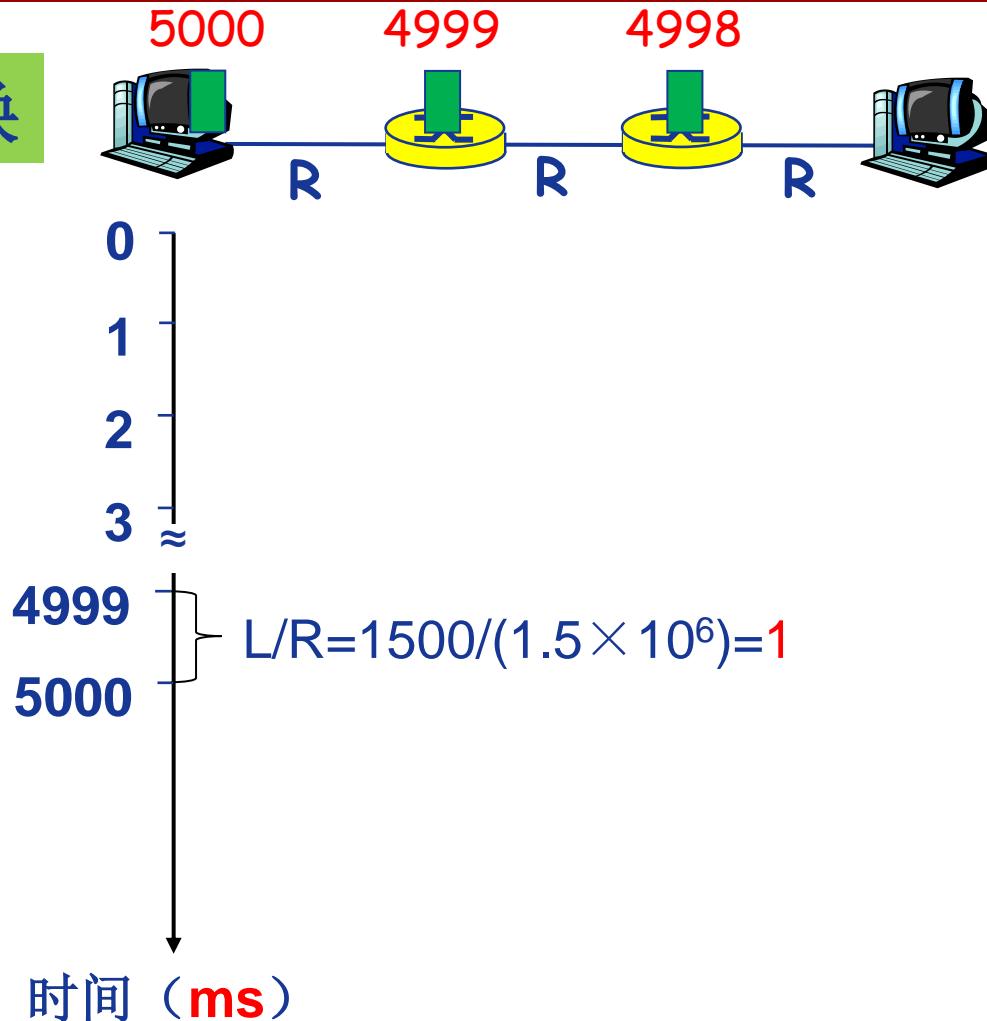
分组交换



时间 (ms)

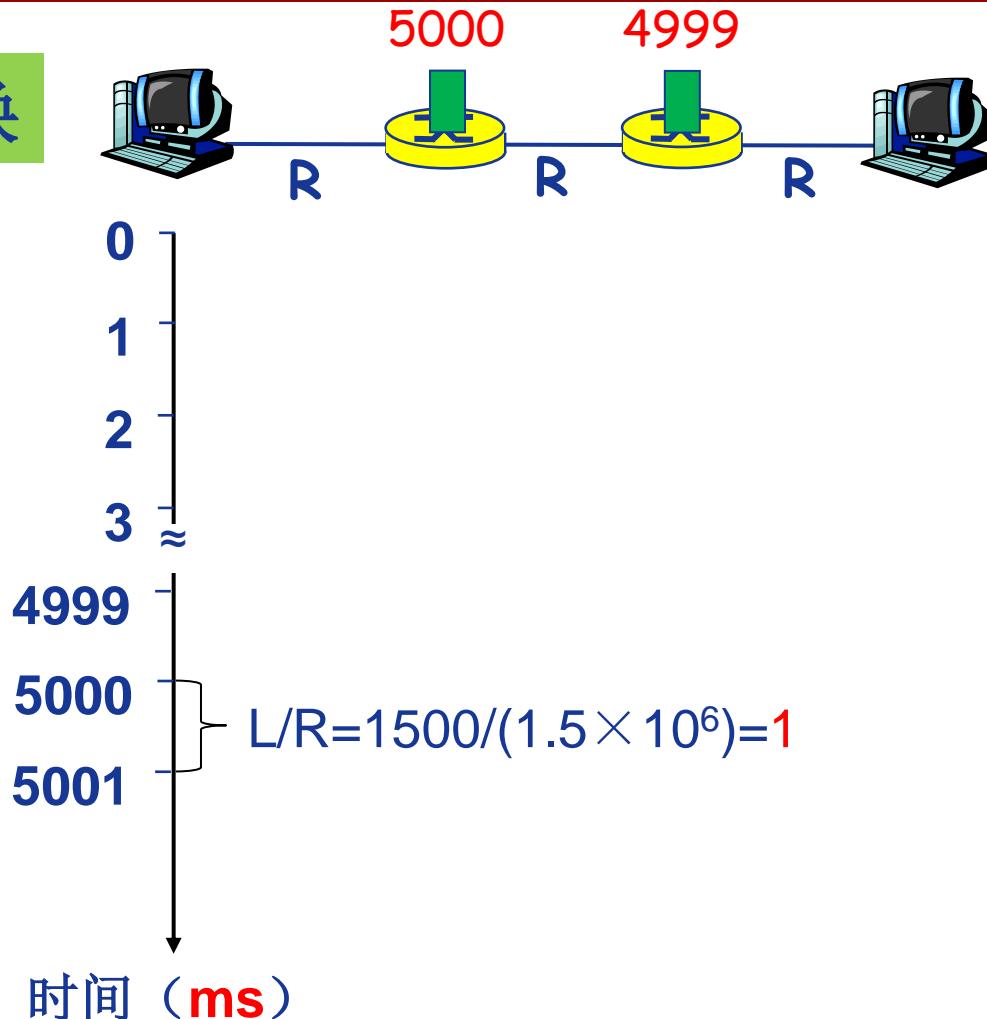
报文交换 vs 分组交换?

分组交换



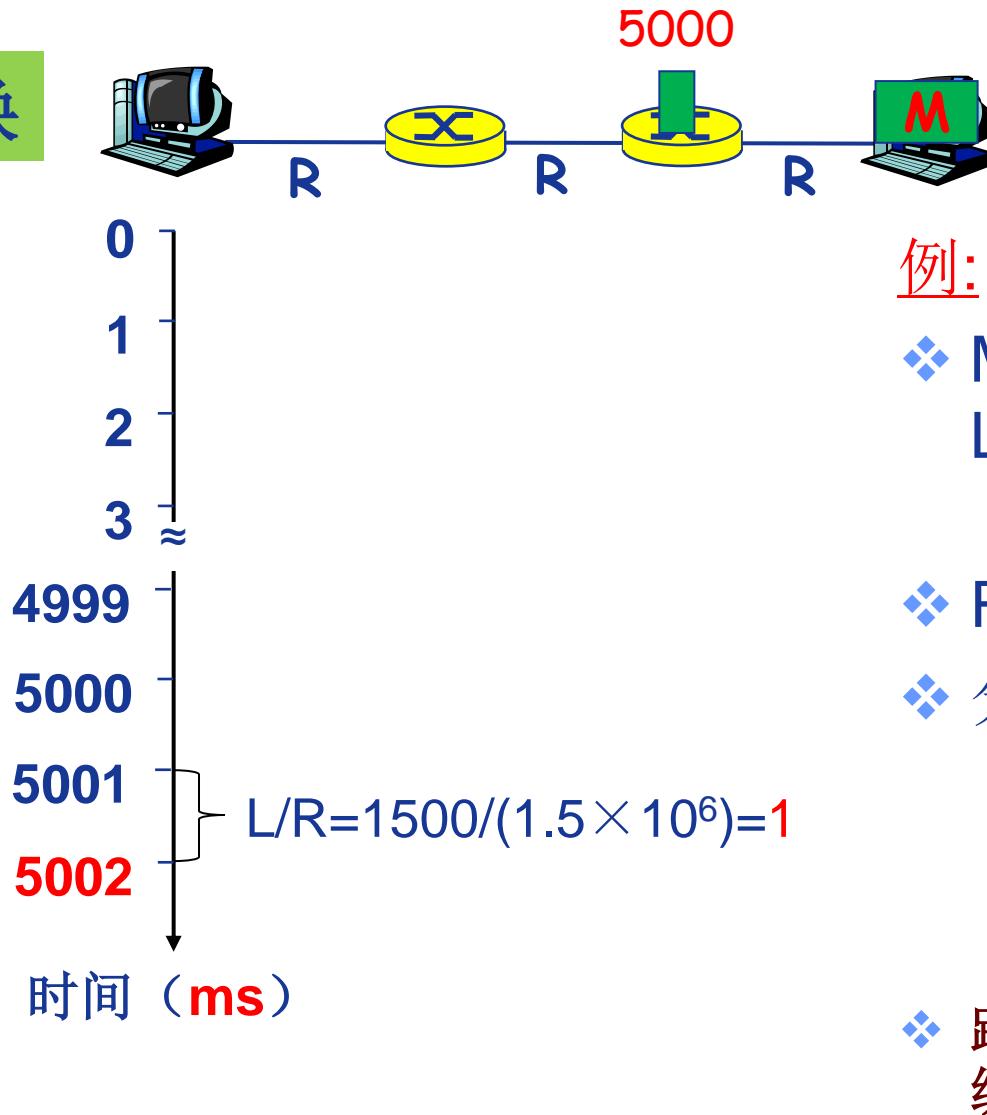
报文交换 vs 分组交换?

分组交换



报文交换 vs 分组交换?

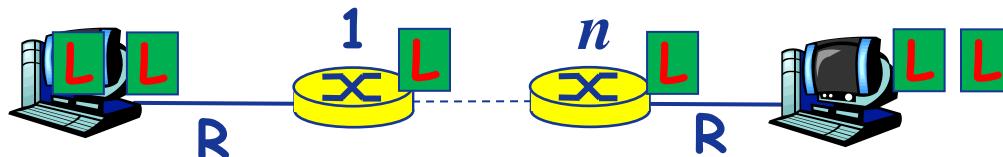
分组交换



例:

- ❖ $M=7.5 \text{ Mbits}$,
 $L=1500 \text{ bits}$
 - $M=5000L$
- ❖ $R = 1.5 \text{ Mbps}$
- ❖ 分组交换:
 - 报文交付时间
 $=5002 \text{ ms}$
 $=5.002 \text{ sec}$
- ❖ 路由器至少需要多大缓存?

分组交换的报文交付时间

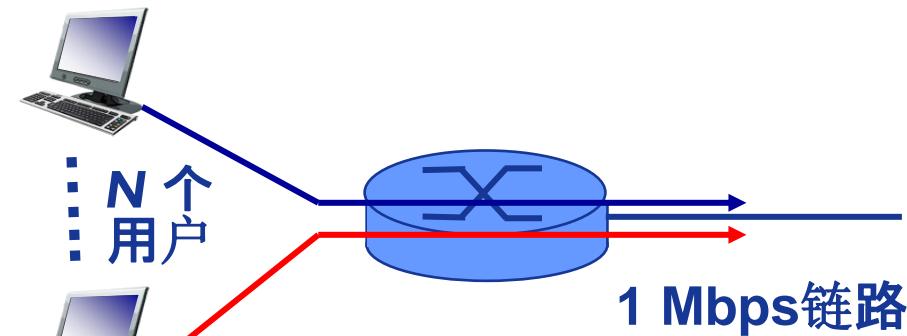


- ❖ 报文: M bits
- ❖ 链路带宽 (数据传输速率) : R bps
- ❖ 分组长度 (大小) : L bits
- ❖ 跳步数: h
- ❖ 路由器数: n

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

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

本讲主题

计算机网络性能 (1)

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

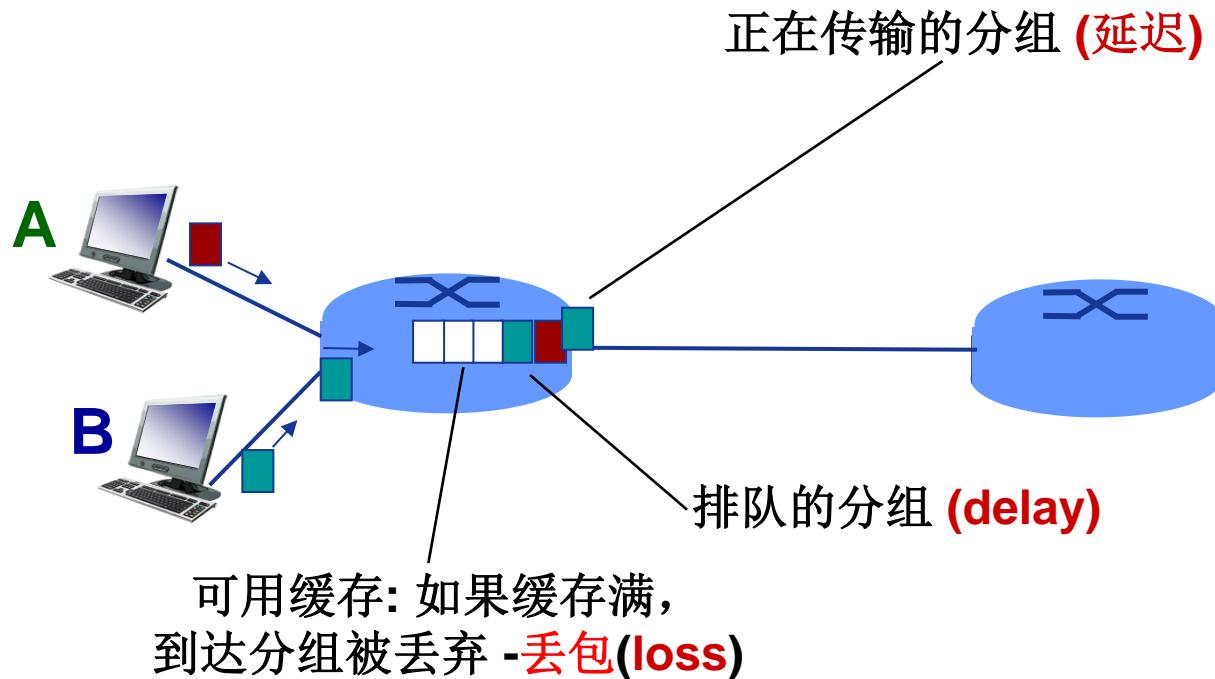
- ❖ “带宽” (bandwidth) 原本指信号具有的频带宽度，即最高频率与最低频率之差，单位是赫兹 (Hz)
- ❖ 网络的“带宽” 通常是数字信道所能传送的“**最高数据率**”，单位： b/s (bps)
- ❖ 常用的带宽单位：
 - kb/s (10^3 b/s)
 - Mb/s (10^6 b/s)
 - Gb/s (10^9 b/s)
 - Tb/s (10^{12} b/s)

延迟/时延(delay或latency)

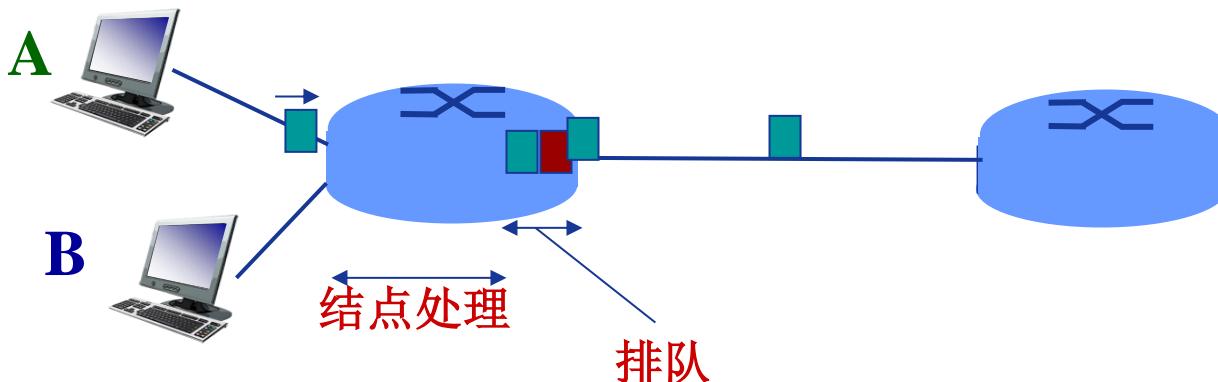
Q:分组交换为什么会产生丢包和时延?

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



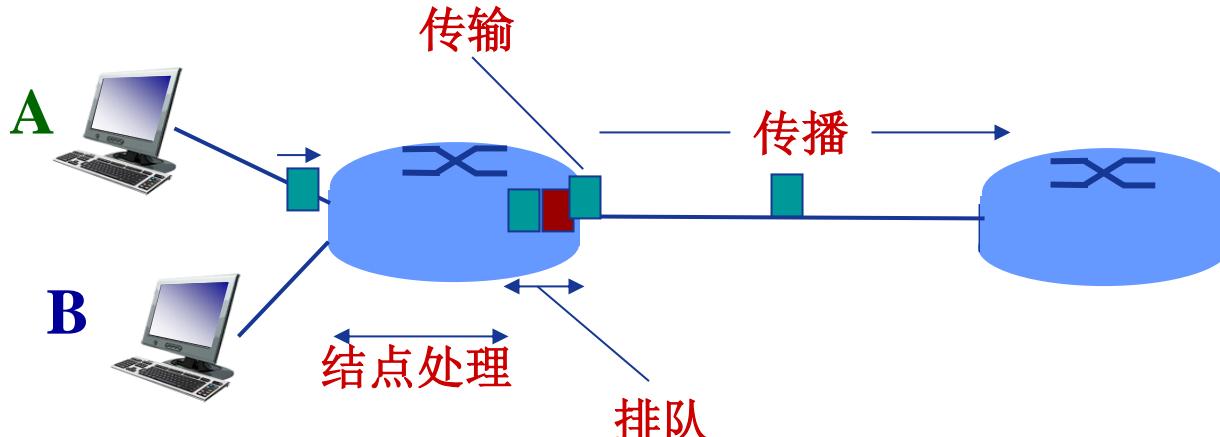
d_{proc} : 结点处理延迟
(nodal processing delay)

- 差错检测
- 确定输出链路
- 通常< msec

d_{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_{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_{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



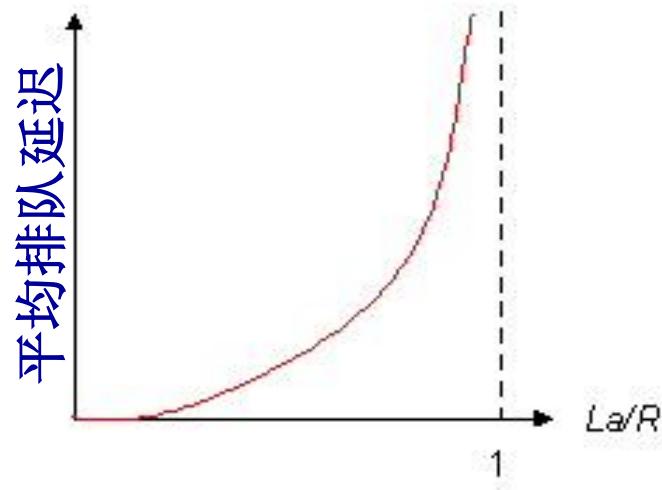
- ❖ 车速为 100 km/hr ~ 信号传播速度
- ❖ 收费站放行一台车用时 12 秒 ~ 比特传输时间
- ❖ 车 ~ 比特；车队 ~ 分组
- ❖ 车队通过收费站时间 ~ 传输延迟 (120秒)
- ❖ 每台车从第一个收费站跑到第二个收费站用时
~ 传播延迟 (1小时)

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!



$La/R \sim 0$



$La/R \rightarrow 1$

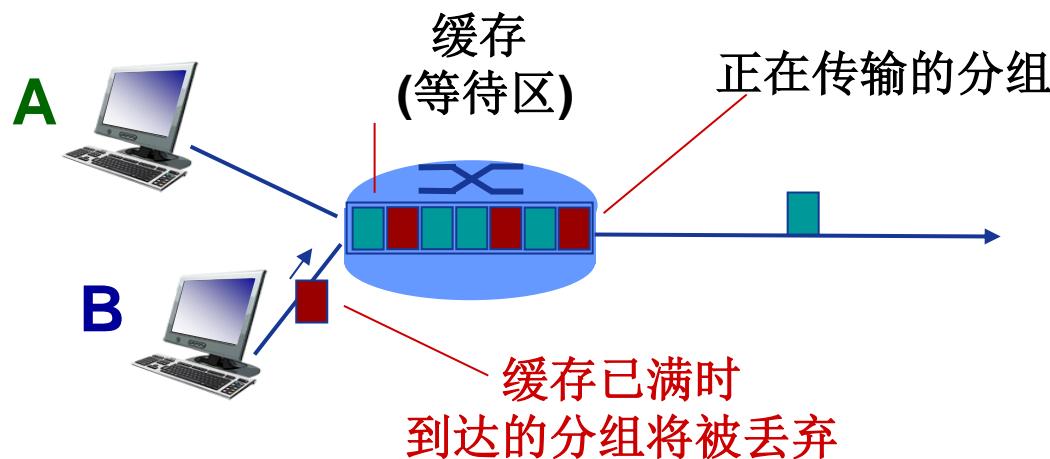


本讲主题

计算机网络性能（2）

分组丢失（丢包）

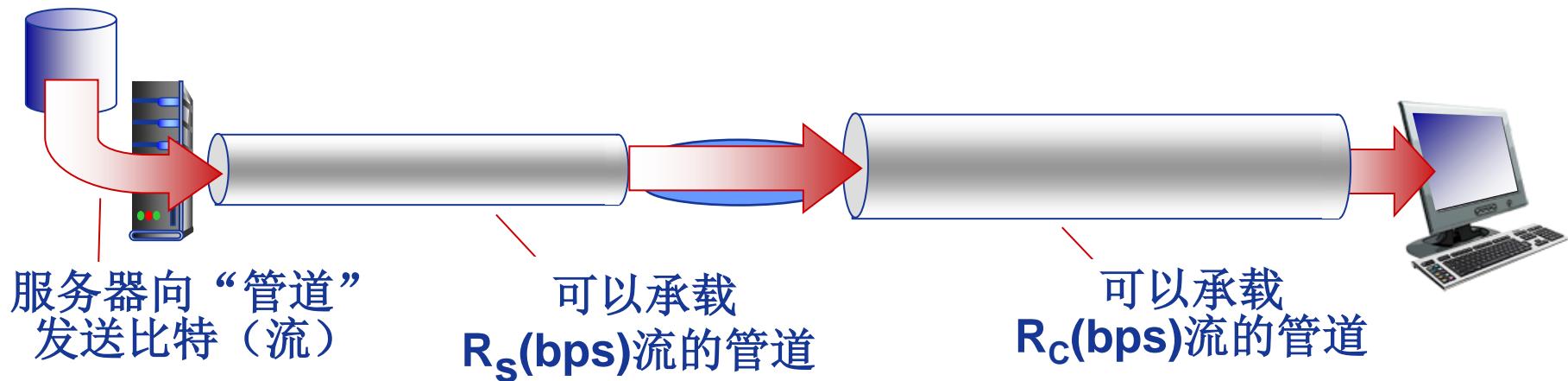
- ❖ 队列缓存容量有限
- ❖ 分组到达已满队列将被丢弃（即丢包）
- ❖ 丢弃分组可能由前序结点或源重发（也可能不重发）



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

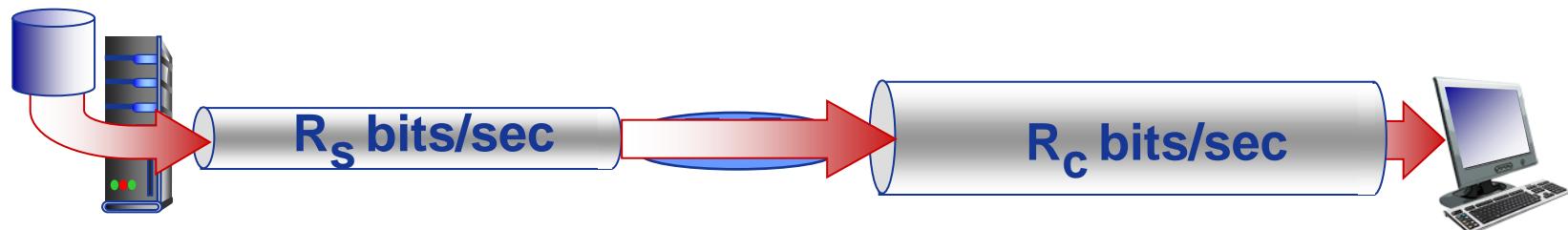
吞吐量/率 (Throughput)

- ❖ **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

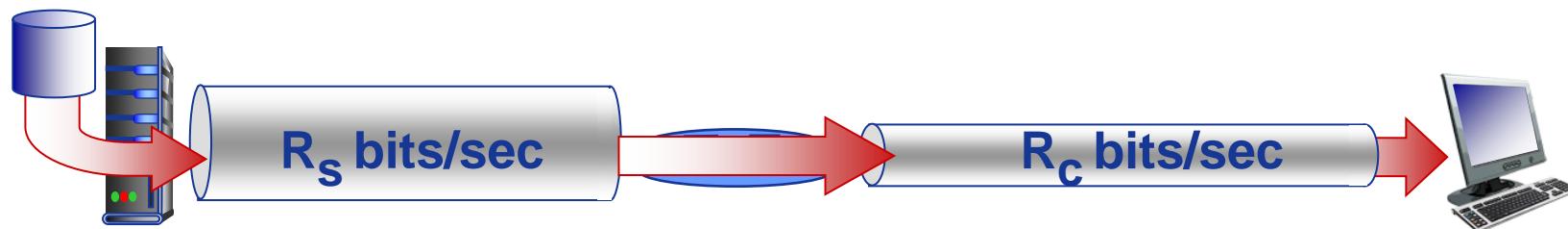


吞吐量/率 (Throughput)

- ❖ 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?

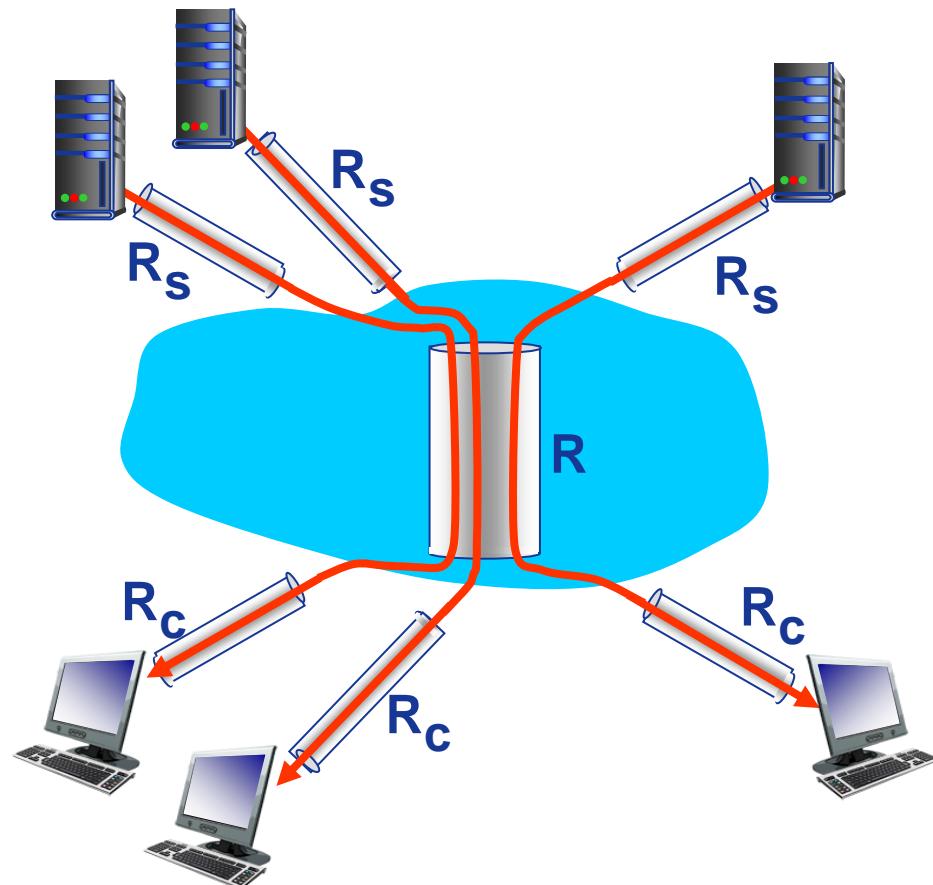


瓶颈链路 (*bottleneck link*)

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

本讲主题

计算机网络体系结构

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

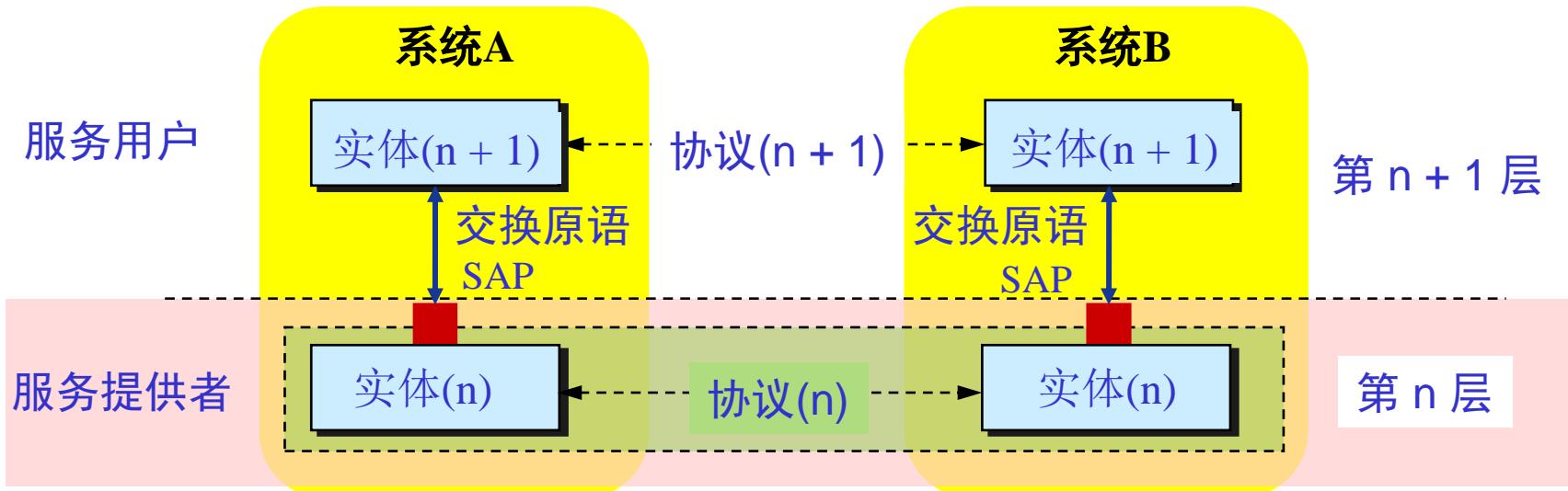
计算机网络的体系结构？

- ❖ 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

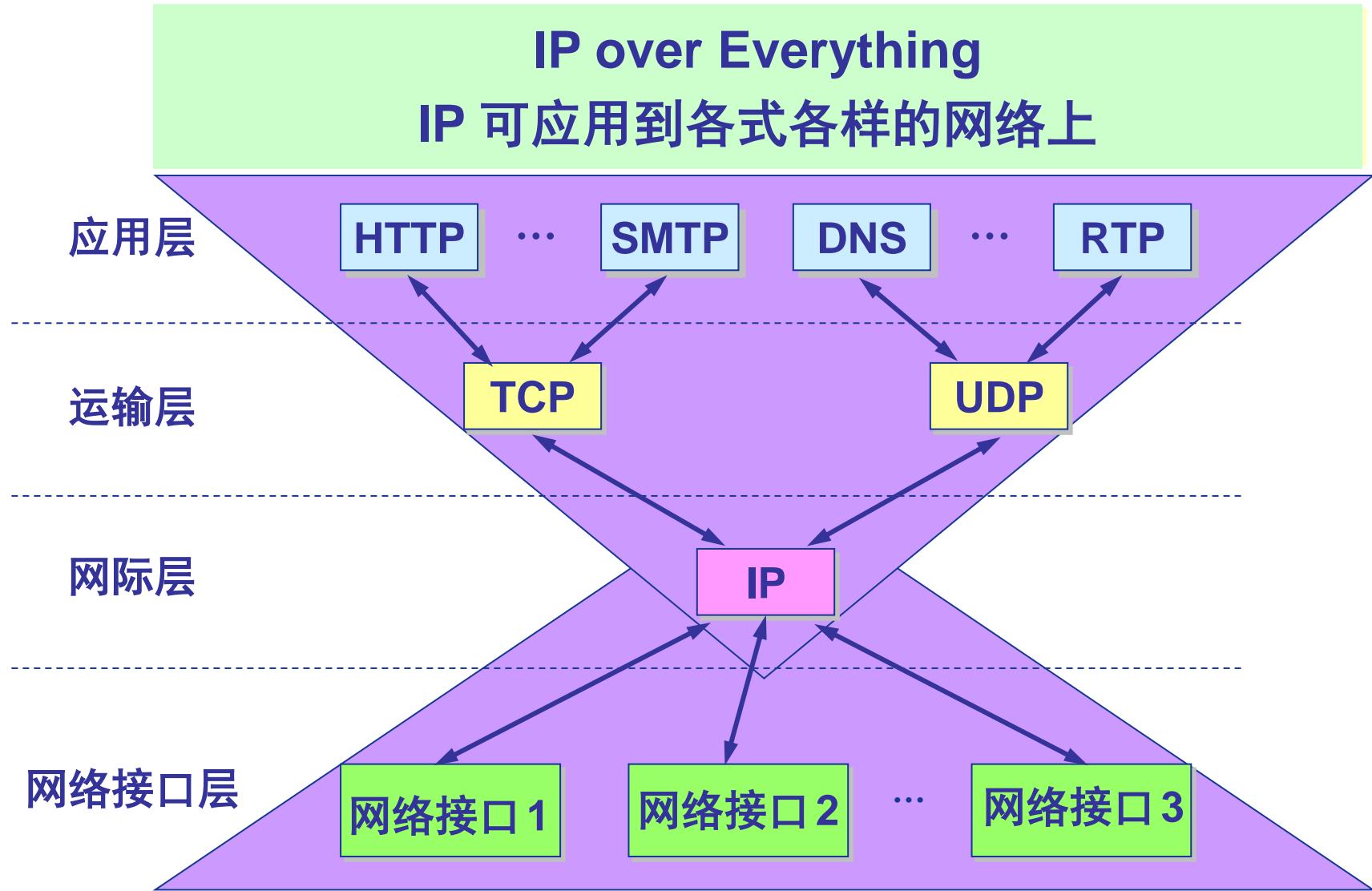


- ❖ 实体(entity) 表示任何可发送或接收信息的硬件或软件进程。
- ❖ 协议是控制两个对等实体进行通信的规则的集合，协议是“水平的”。
- ❖ 任一层实体需要使用下层服务，遵循本层协议，实现本层功能，向上层提供服务，服务是“垂直的”。
- ❖ 下层协议的实现对上层的服务用户是透明的。
- ❖ 同系统的相邻层实体间通过接口进行交互，通过服务访问点 **SAP (Service Access Point)**，交换原语，指定请求的特定服务。

本讲主题

OSI参考模型（1）

TCP/IP参考模型

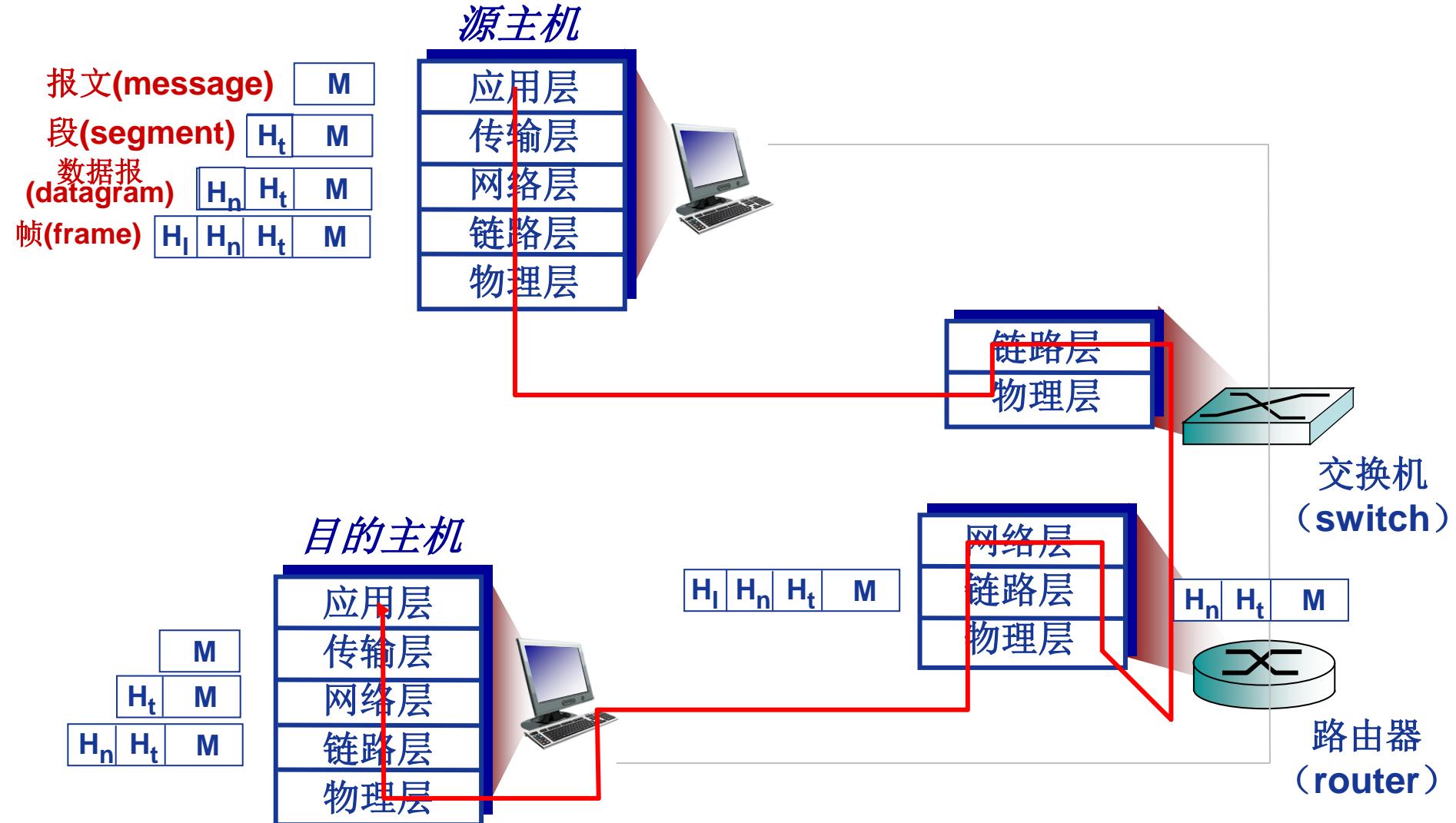


5层参考模型

- ❖ 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层模型的数据封装



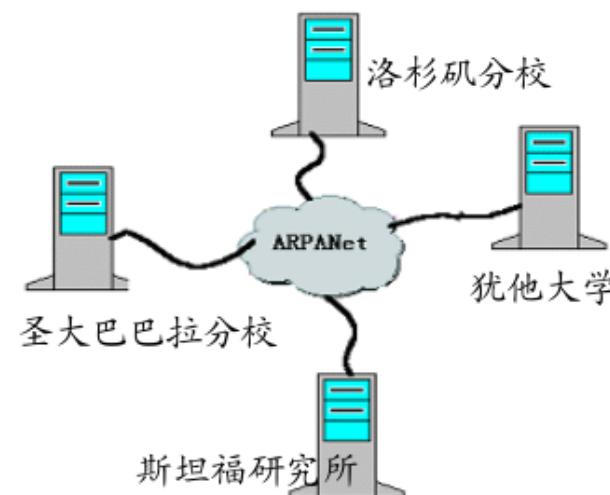
本讲主题

计算机网络与Internet发展历史

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

- ❖ ~7.5亿主机
 - 智能手机和平板电脑
- ❖ 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)