



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1章 计算机网络概述

聂兰顺



本章主要内容



- ❖ 1.1 计算机网络基本概念
 - 计算机网络？网络协议？网络分类？.....
- ❖ 1.2 计算机网络的结构
 - 网络边缘、接入网络、网络核心、Internet结构.....
- ❖ 1.3 数据交换
 - 电路交换、报文交换、分组交换
- ❖ 1.4 计算机网络性能指标
 - 速率、带宽、时延、时延带宽积、吞吐量.....
- ❖ 1.5 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
- ❖ 1.6 计算机网络发展历史



1.1 计算机网络基本概念

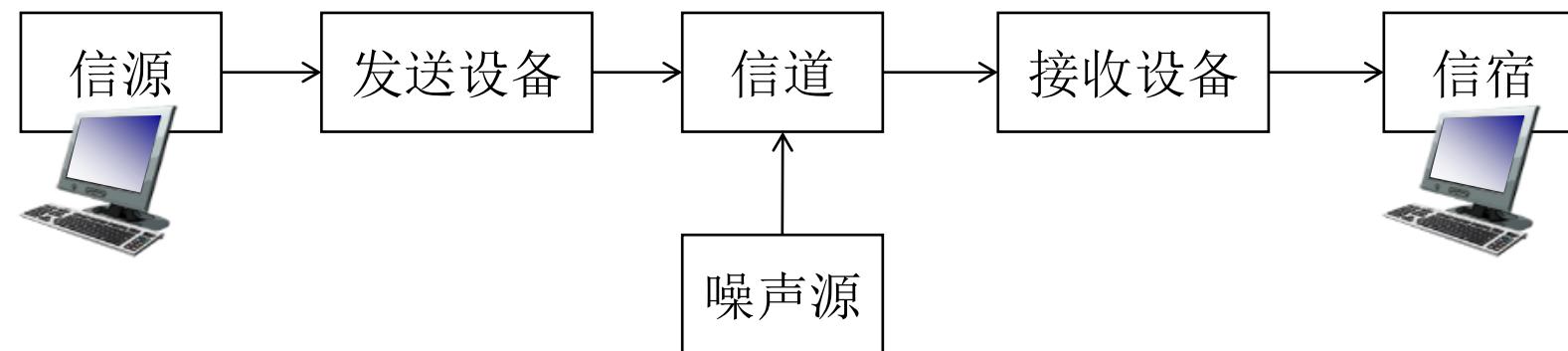
聂生顺



1.1 计算机网络基本概念

技术背景

- ❖ 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

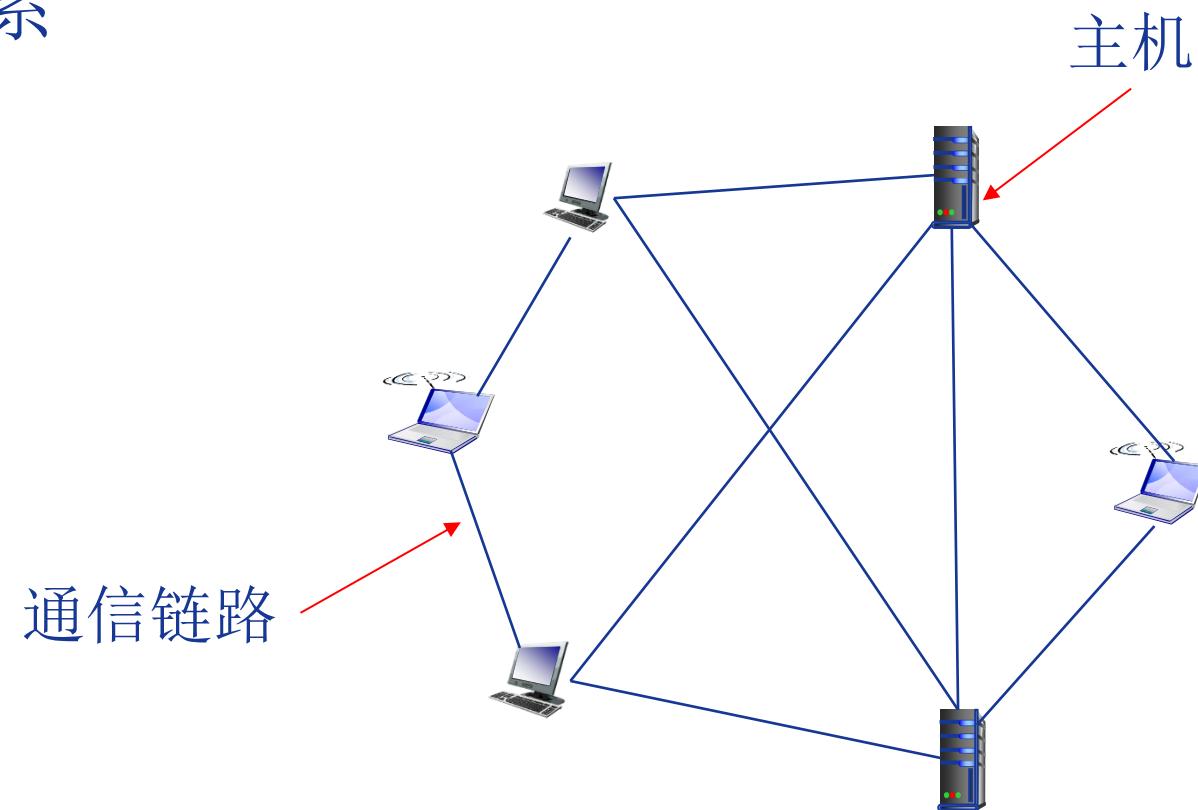




计算机网络？

1.1 计算机网络基本概念

- ❖ 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？

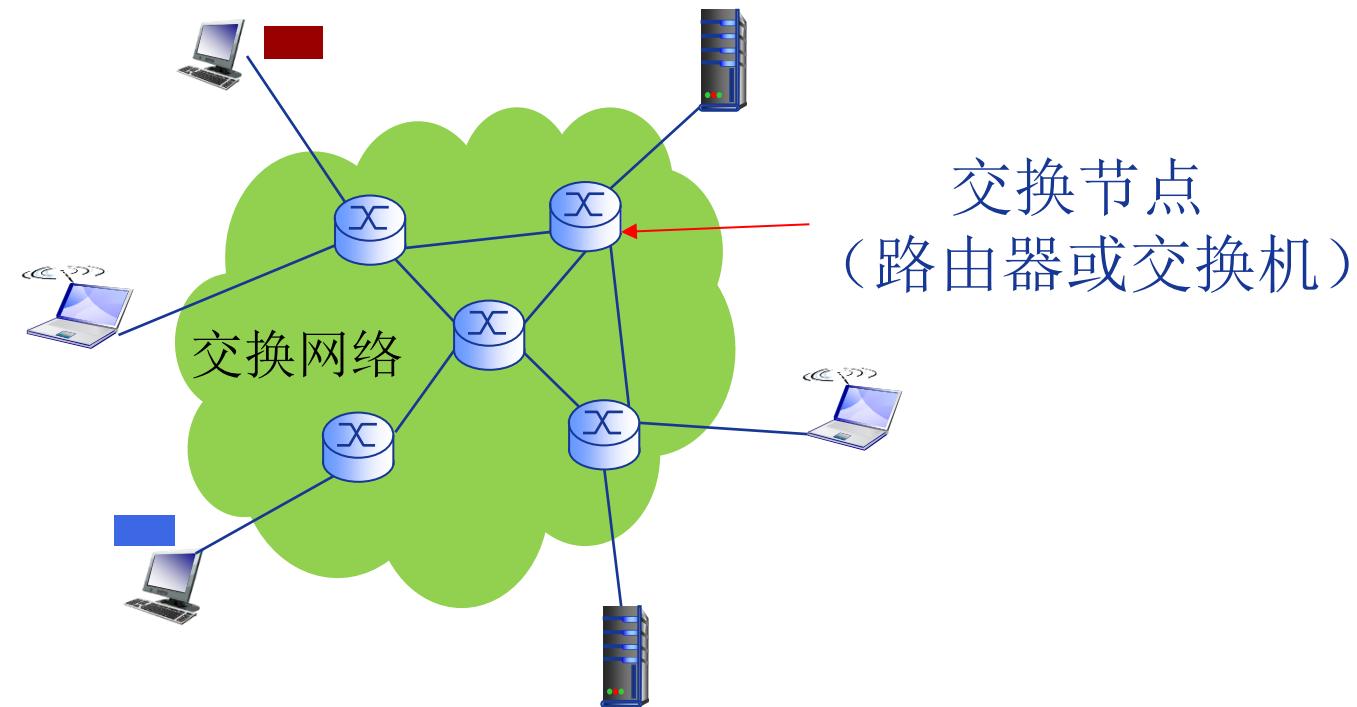




计算机网络

1.1 计算机网络基本概念

- ❖ 通过交换网络互连主机





计算机网络

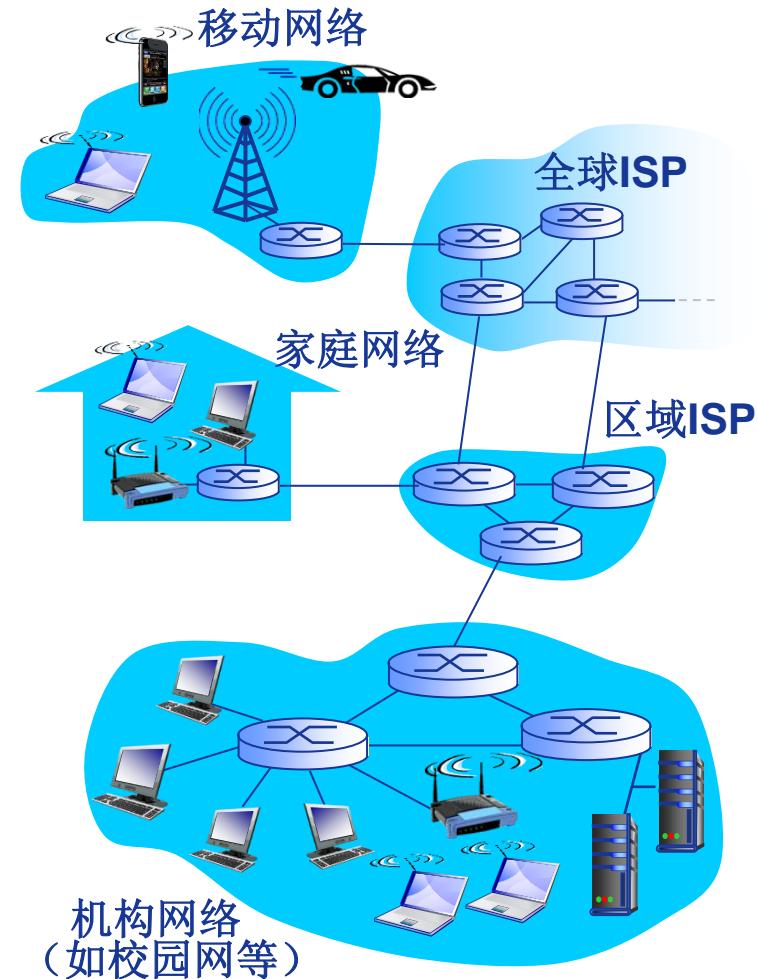
1.1 计算机网络基本概念



什么是Internet? - 组成细节角度

❖ 全球最大的互联网

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





计算机网络

什么是Internet? - 组成细节角度

1.1 计算机网络基本概念

- ❖ 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)

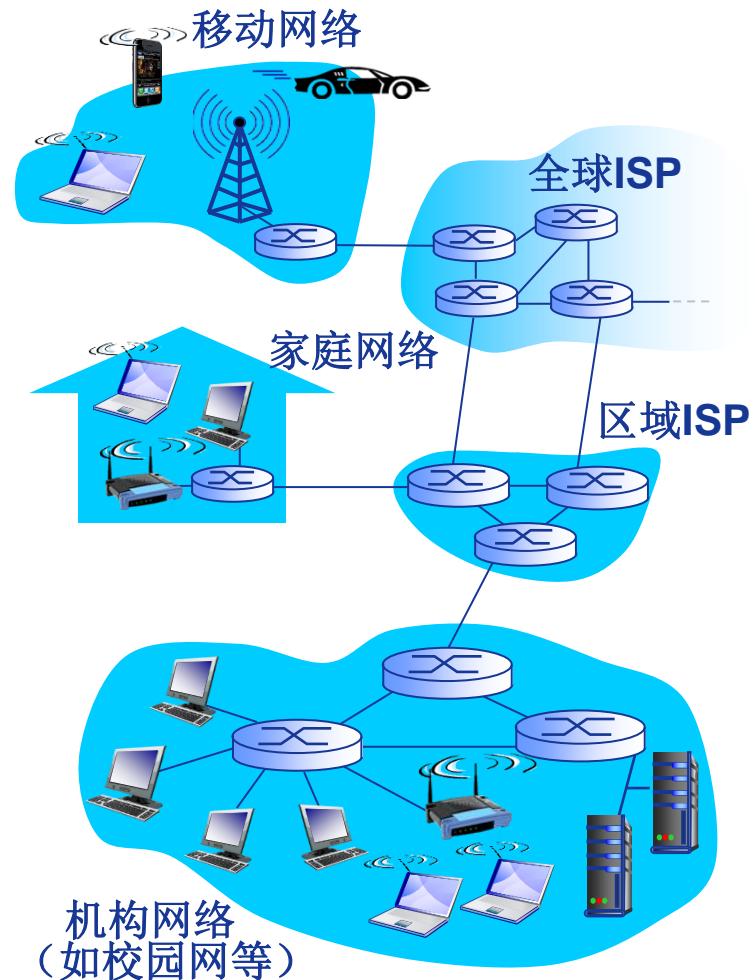




什么是Internet? - 服务角度

1.1 计算机网络基本概念

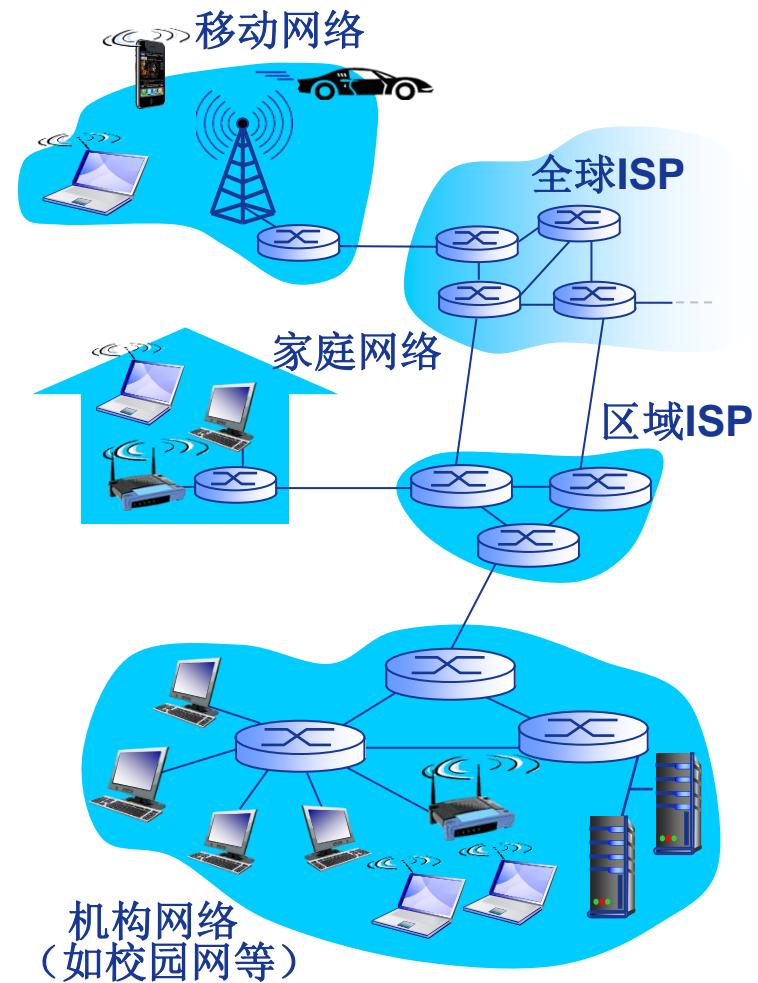
- ❖ 为网络应用提供通信服务的通信基础设施：
 - Web, VoIP, email, 网络游戏, 电子商务, 社交网络, ...
- ❖ 为网络应用提供应用编程接口（API）：
 - 支持应用程序“连接” Internet, 发送/接收数据
 - 提供类似于邮政系统的数据传输服务





问题

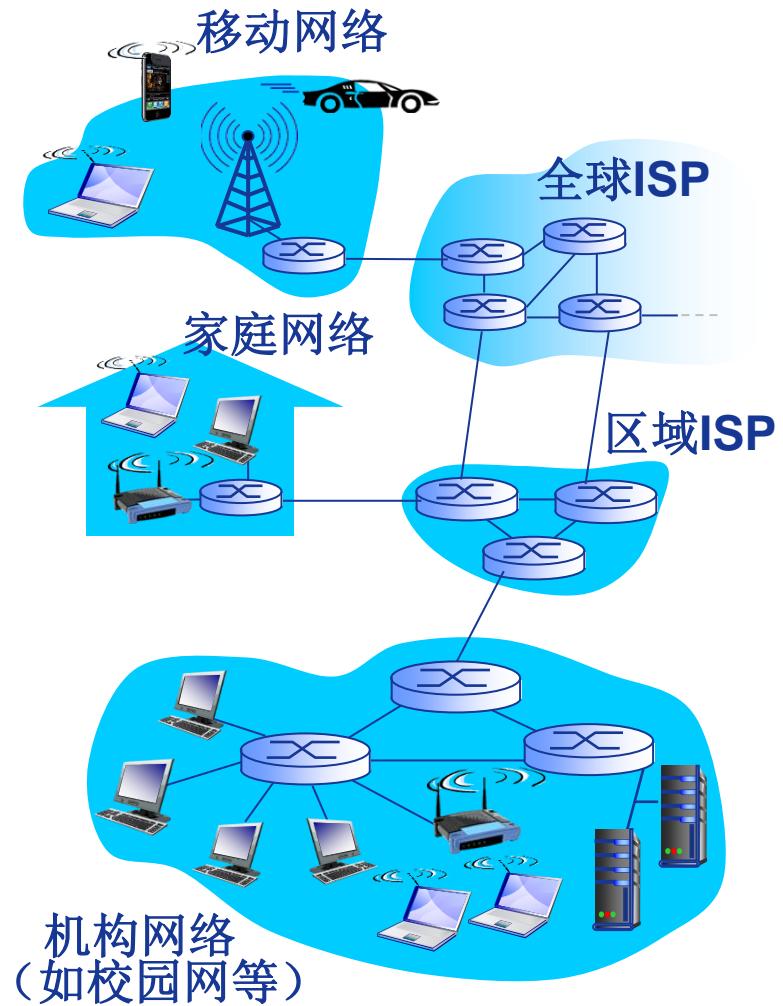
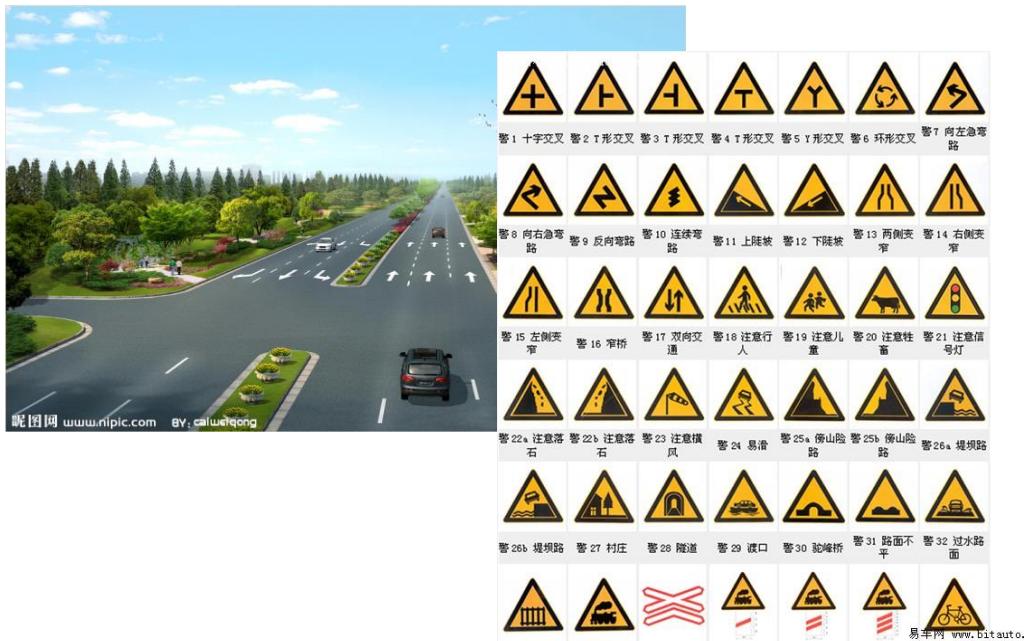
- ❖ Q: 仅有硬件（主机、链路、路由器……）连接，Internet能否顺畅运行？能保证应用数据有序交付吗？……
- ❖ A: No！
- ❖ 还需要协议！



协议?

1.1 计算机网络基本概念

- ❖ 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





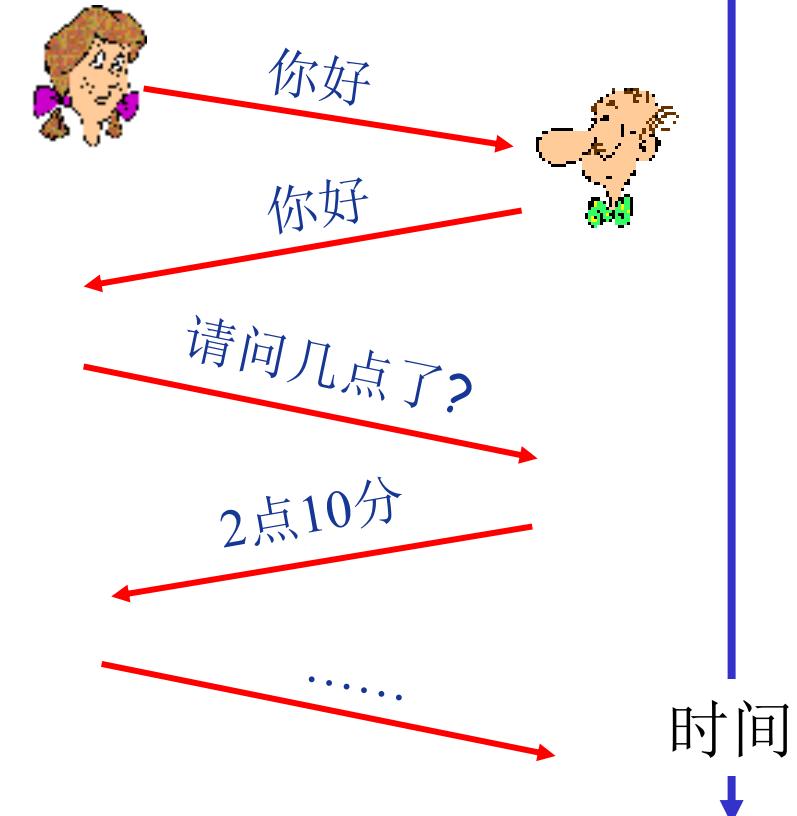
任何通信或信息交换过程都需要规则

1.1 计算机网络基本概念

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”



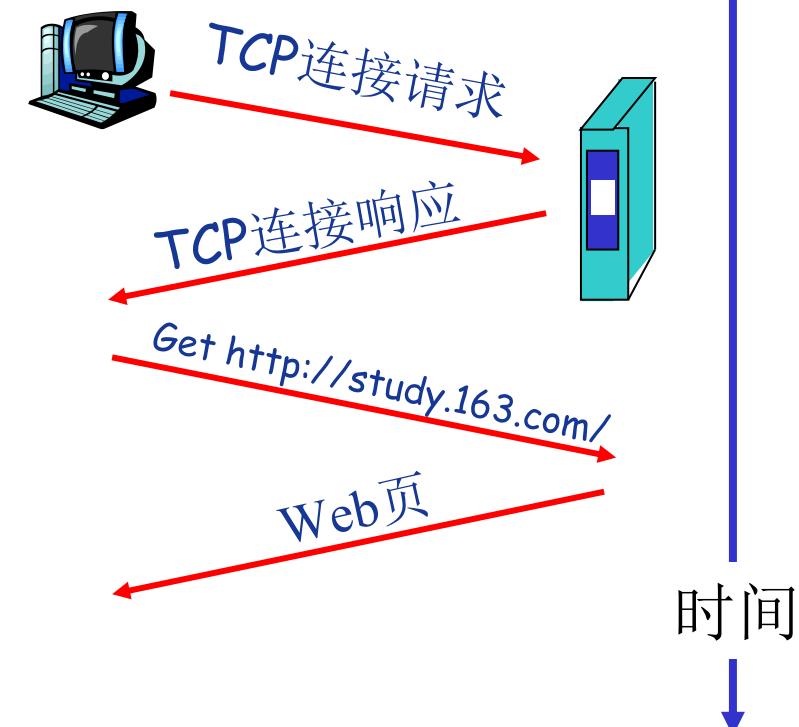


任何通信或信息交换过程都需要规则

1.1 计算机网络基本概念

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)

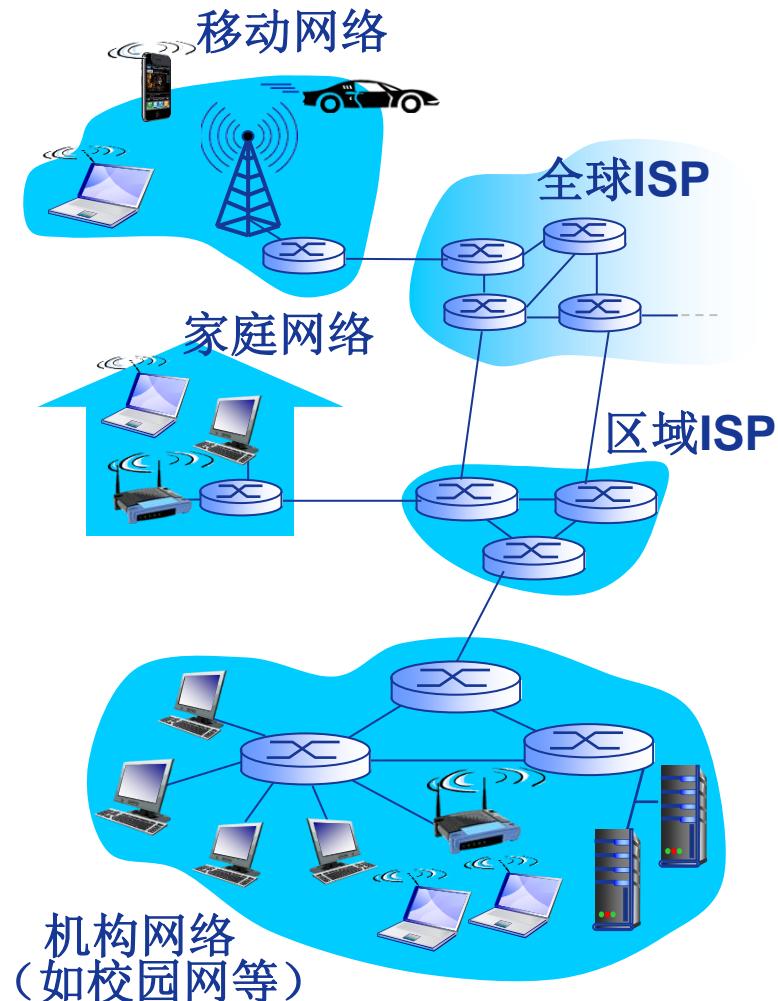
- 事件顺序
- 速度匹配



协议是计算机网络的重要内容

1.1 计算机网络基本概念

- ❖ 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)





计算机网络分类？

1.1 计算机网络基本概念



❖ 按照网络覆盖范围分类：

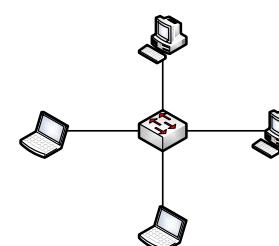
- 个人区域网**PAN** (Personal Area Network) ~10米
- 局域网**LAN** (Local Area Network) ~1公里
- 城域网**MAN** (Metropolitan Area Network) ~5-50公里
- 广域网**WAN** (Wide Area Network) ~几十-几千公里

❖ 按照网络使用者分类：

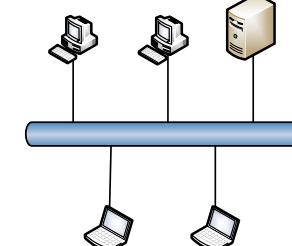
- 专用网(private network)
- 公用网(public network)

❖ 按照网络拓扑分类：

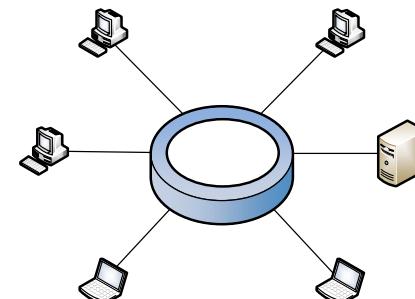
- 总线网络
- 星形网络
- 树形网络
- 网状网络



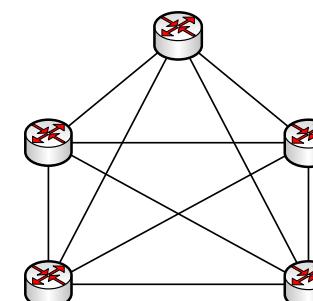
(a) 星形拓扑



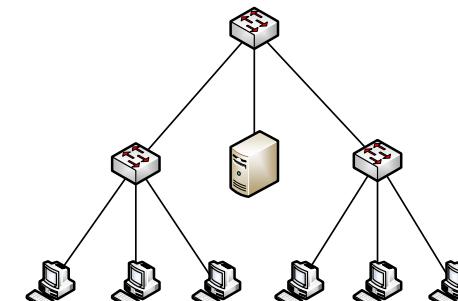
(b) 总线拓扑



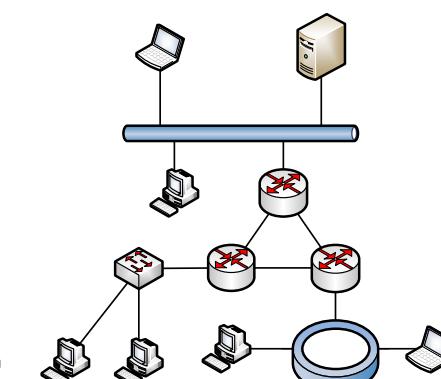
(c) 环形拓扑



(d) 网状拓扑



(e) 树形拓扑



(f) 混合拓扑



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

1.2 计算机网络结构

聂生顺



计算机网络结构

❖ 网络边缘:

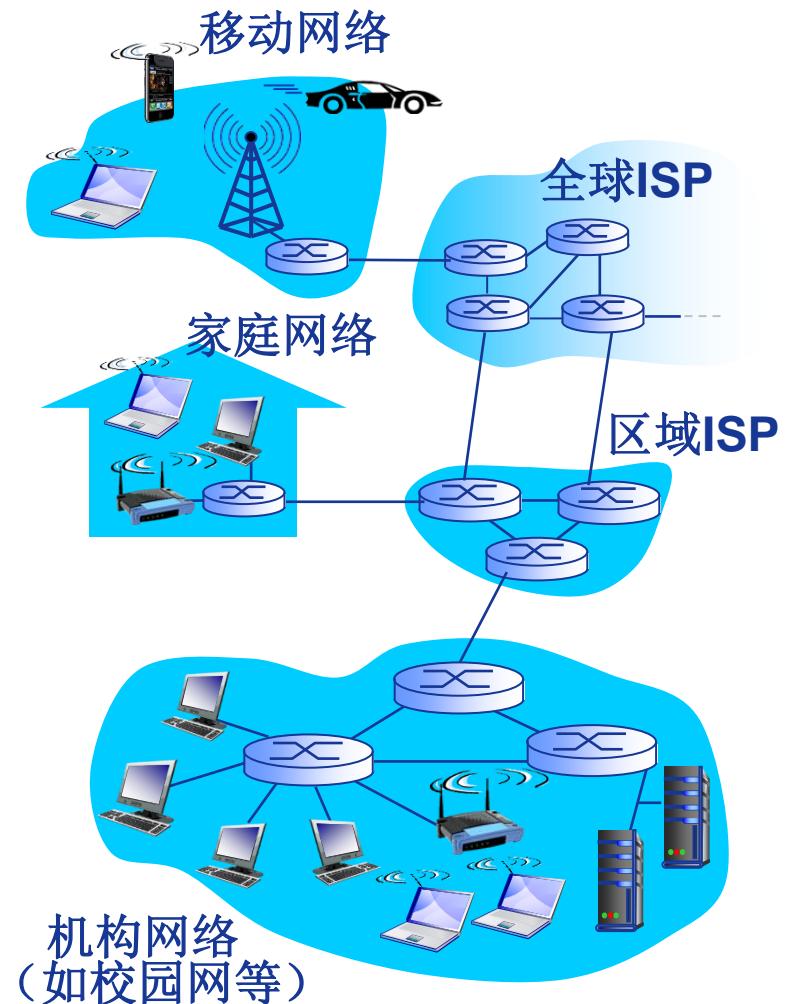
- 主机
- 网络应用

❖ 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

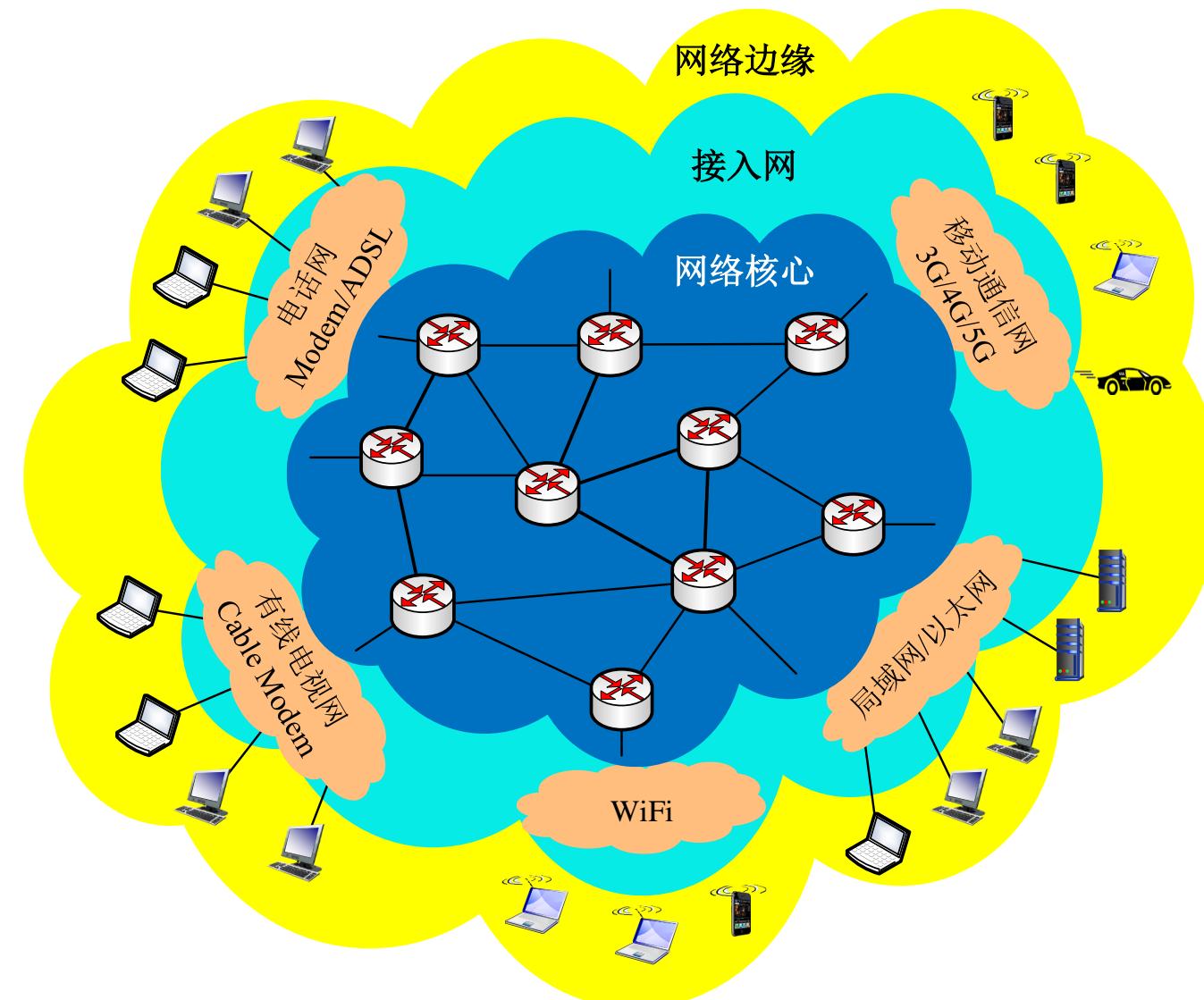




计算机网络结构

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构





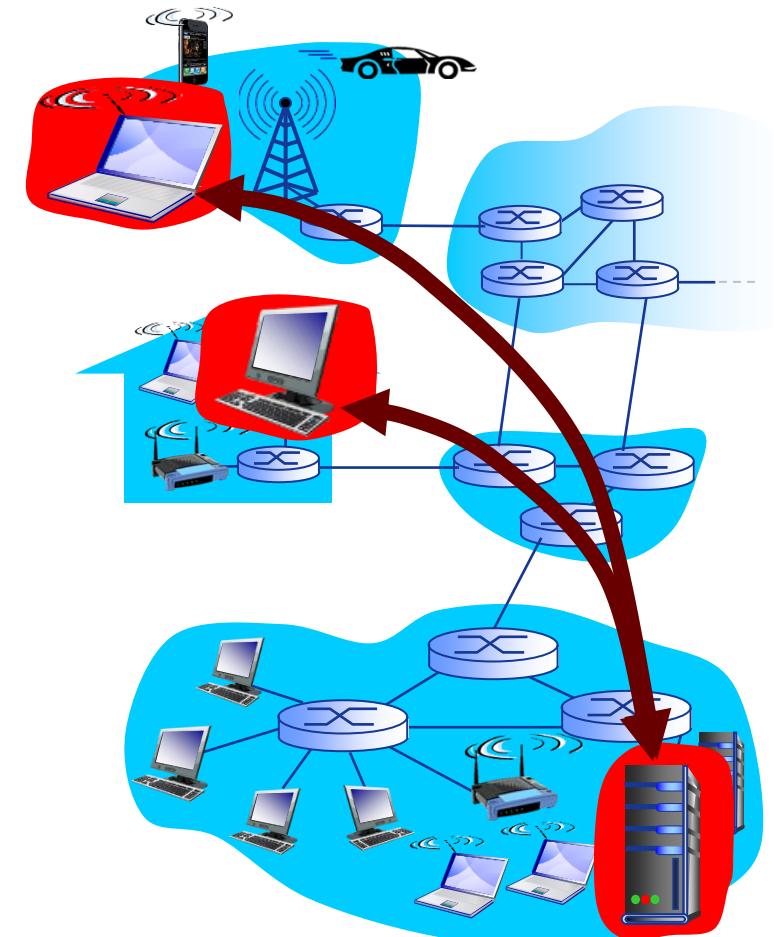
网络边缘

❖ 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:

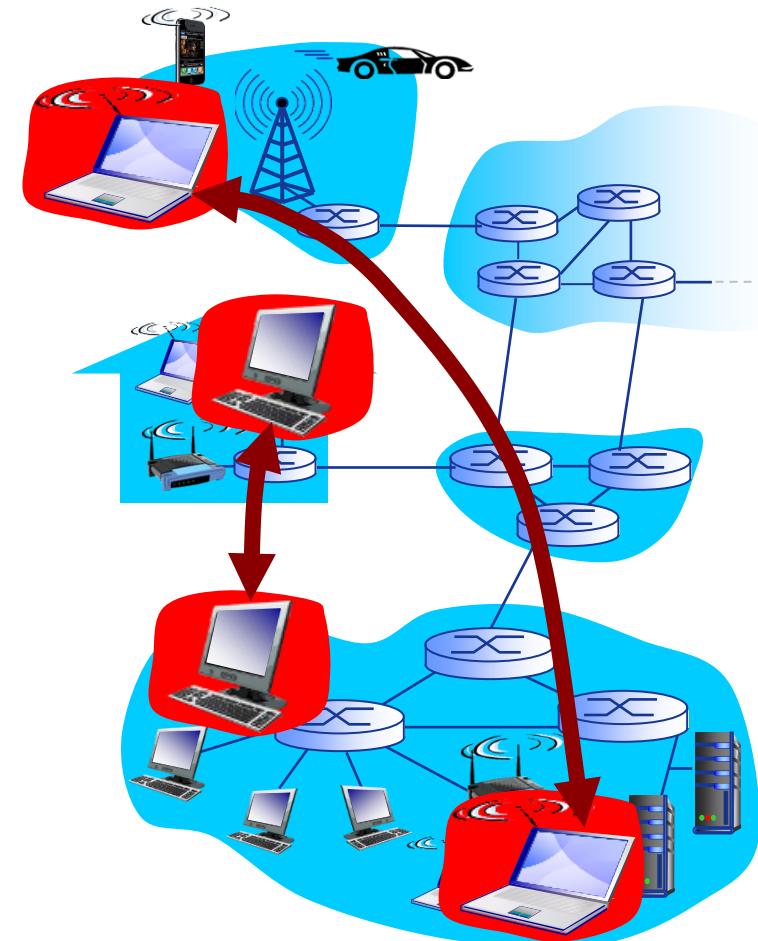
- 客户发送请求, 接收服务器响应
- 如: Web应用, 文件传输FTP应用





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





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



接入网络

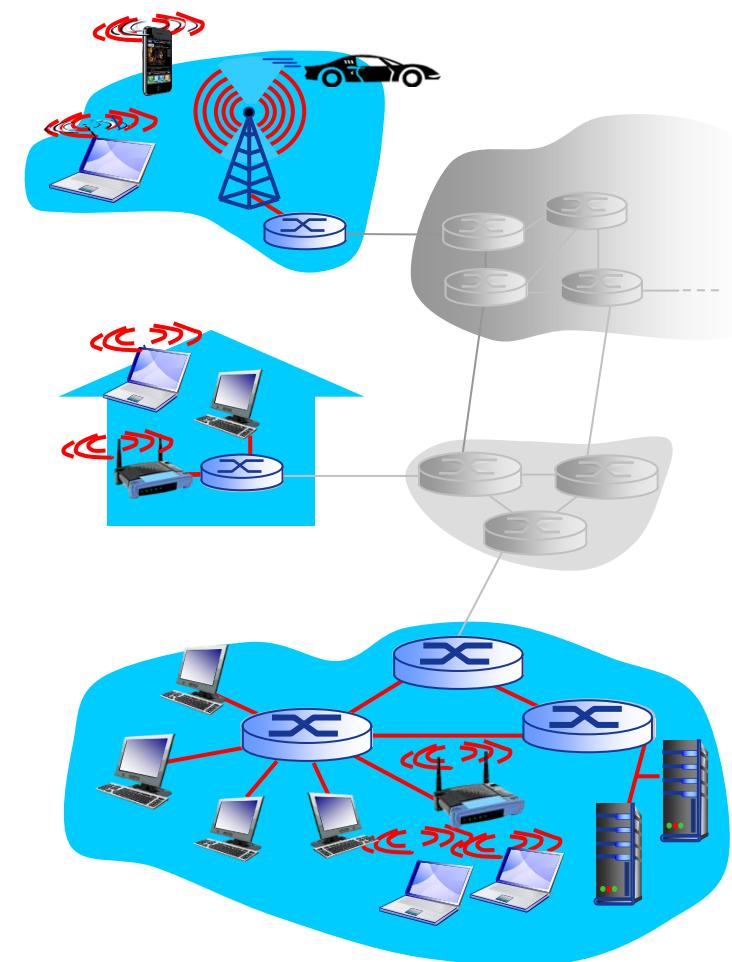
Q: 如何将网络边缘接入核心网（边缘路由器）？

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

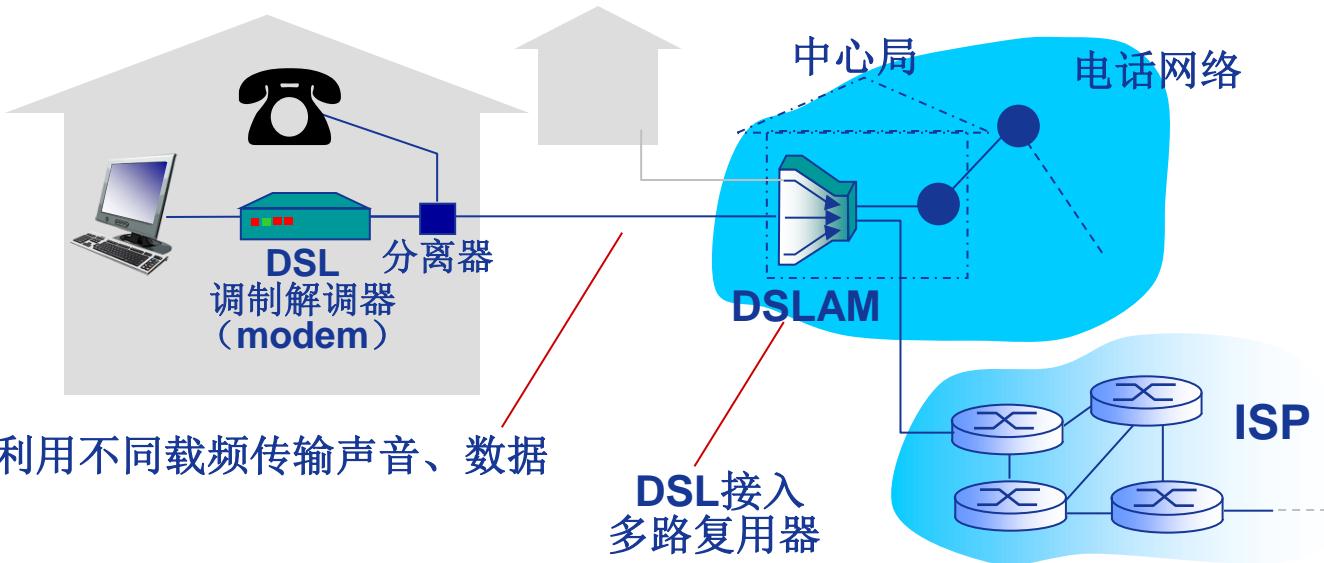
用户关心是：

- ❖ 带宽(bandwidth) (bps)?
- ❖ 共享/独占?





接入网络：数字用户线路 (DSL)



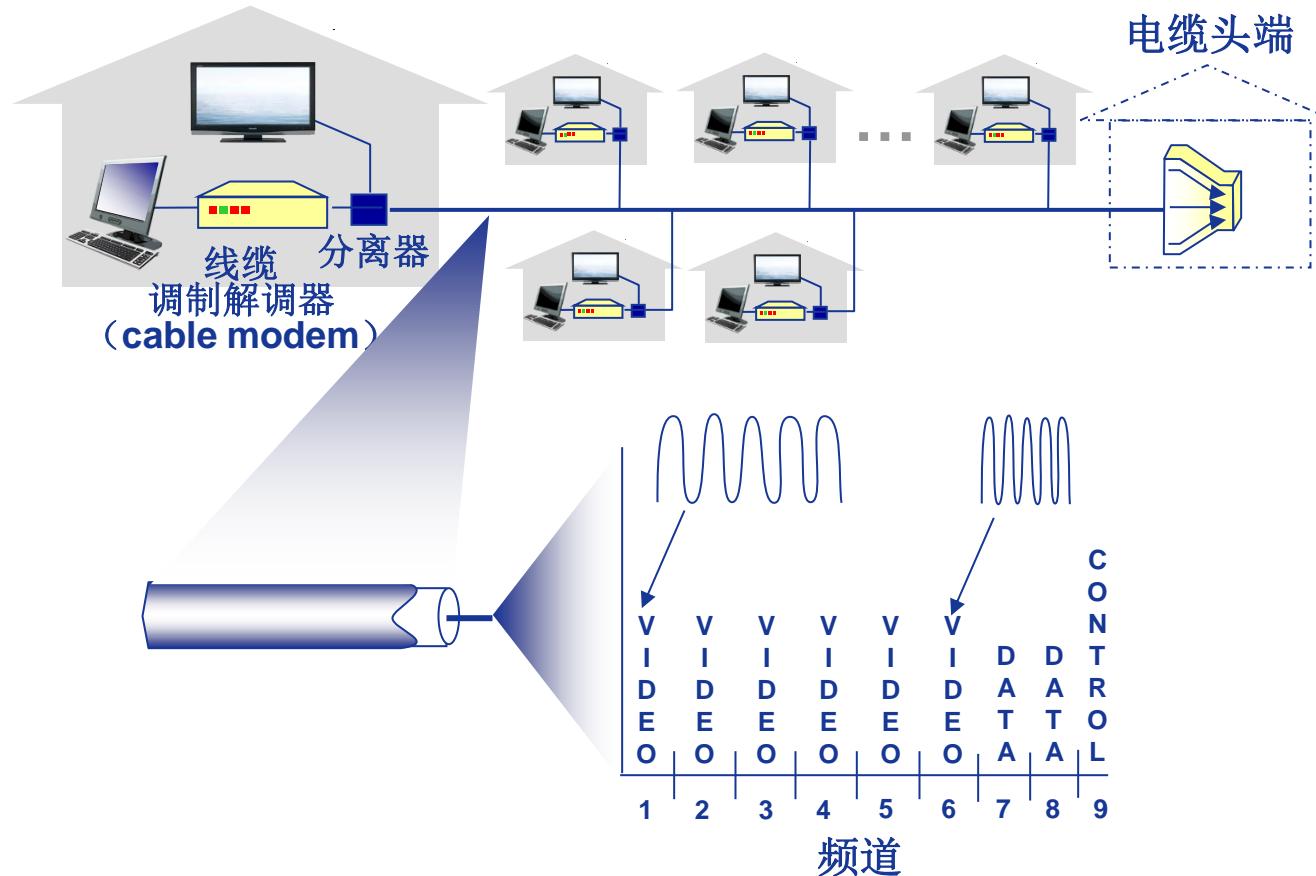
- ❖ 利用已有的电话线连接中心局的DSLAM
 - 数据通信通过DSL电话线接入Internet
 - 语音（电话）通过DSL电话线接入电话网
- ❖ 3.5-16 Mbps 上行传输速率
- ❖ 24 -52 Mbps 下行传输速率
- ❖ FDM: >50 kHz - 1 MHz 用于下行
4 kHz - 50 kHz 用于上行
0 kHz - 4 kHz 用于传统电话



接入网络：电缆网络

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



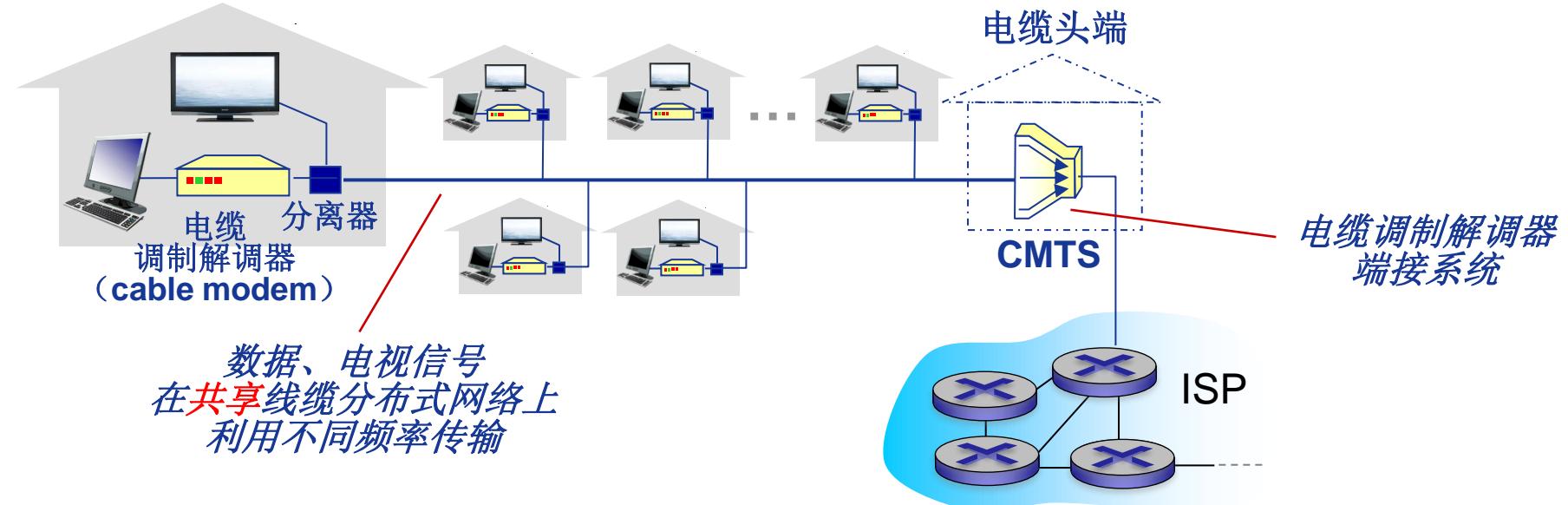
频分多路复用: 在不同频带 (载波) 上传输不同频道





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



- ❖ **HFC:**混合光纤同轴电缆（hybrid fiber coax）
 - 非对称：下行高达**40Mbps-1.2Gbps**传输速率，
上行为**30-100Mbps**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)

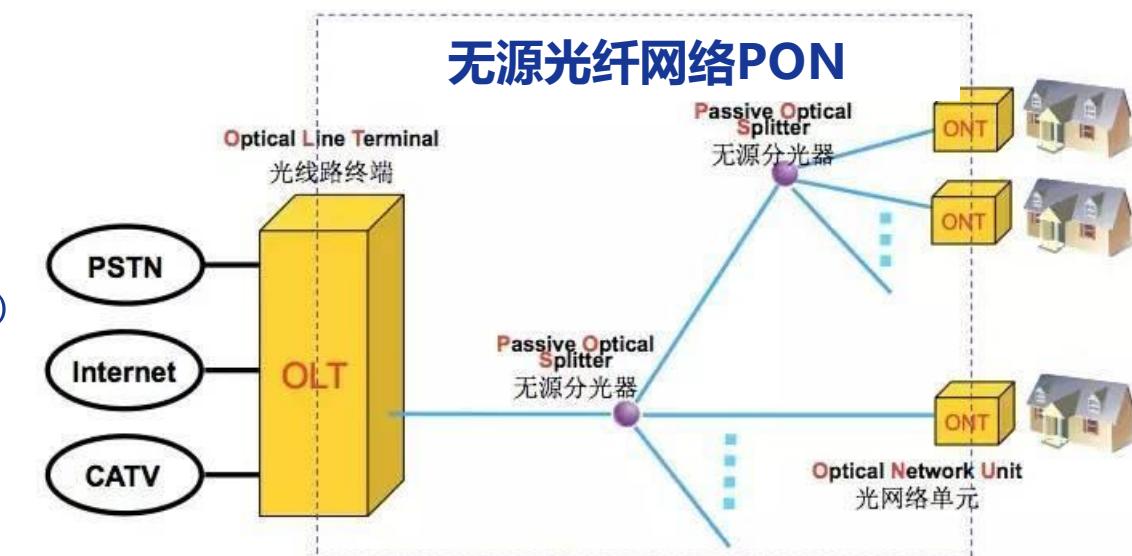
◆ 光纤到户FTTH

- 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

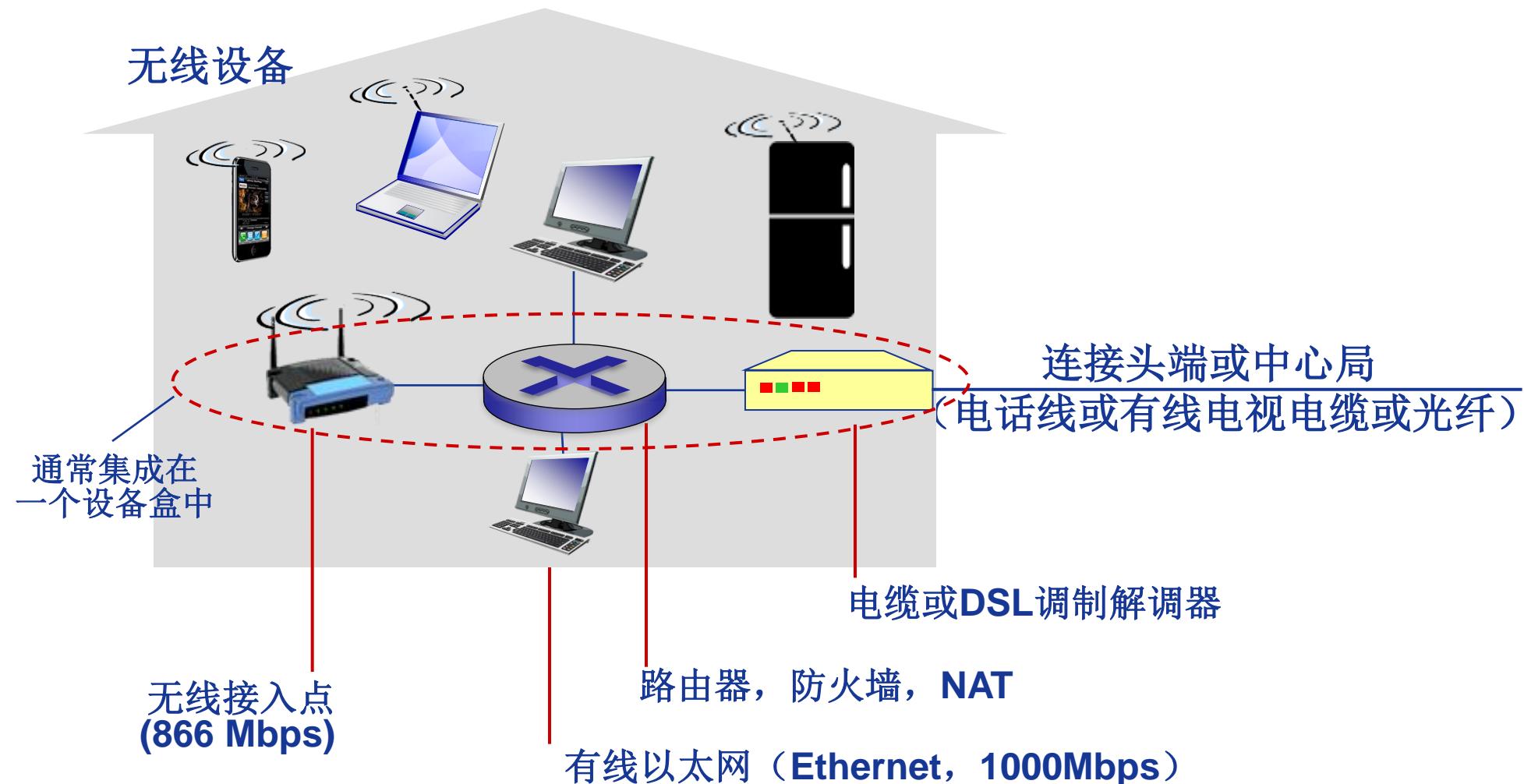




典型家庭网络的接入

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



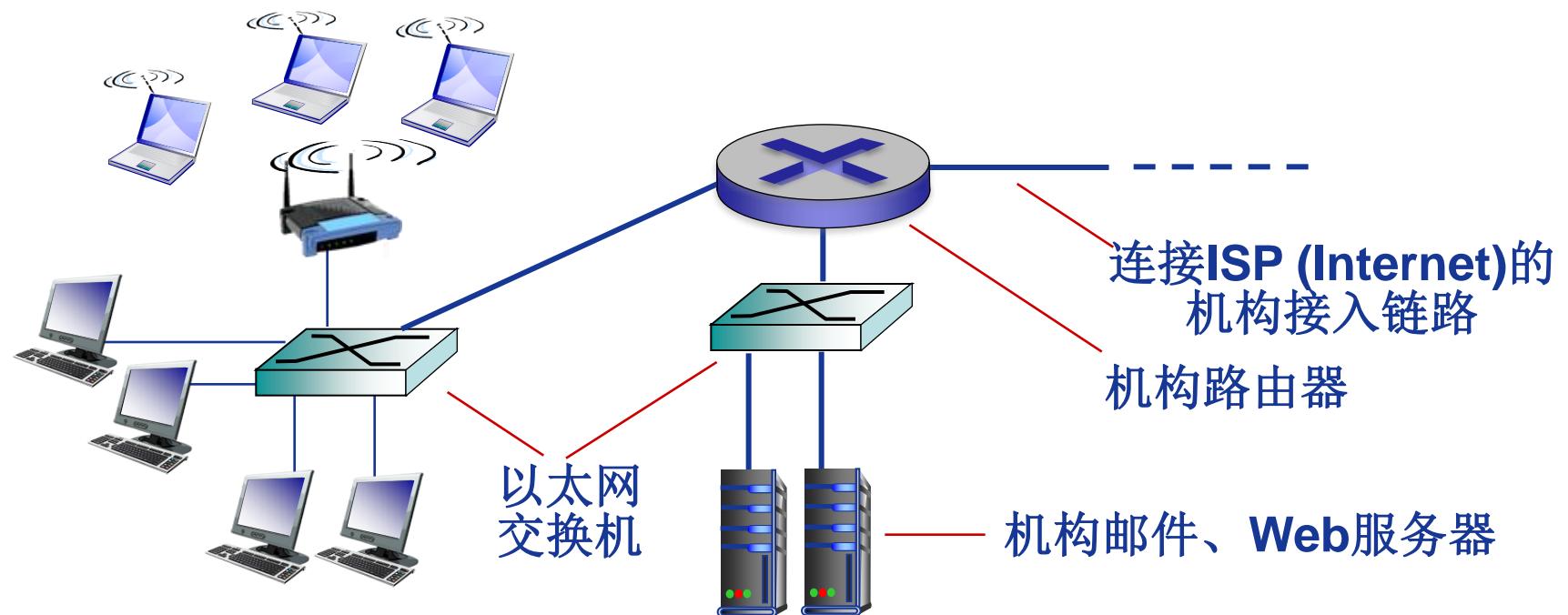


计算机网络

机构（企业）接入网络 (Ethernet)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



- ❖ 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)
- 802.11ac (WiFi5): 866Mbps 传输速率
- WiFi6 (802.11ax) 最高速率可达9.6Gbps



to Internet

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、1Gbps
- 3G、4G、5G: LTE
- 移动互联网





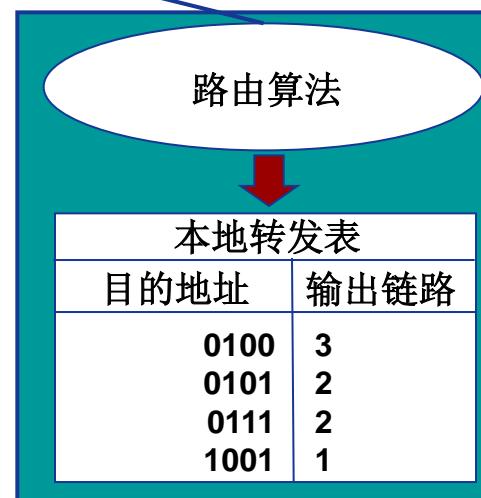
网络核心

- ❖ 互联的路由器网络
- ❖ 网络核心的关键功能:**路由+转发**

路由(**routing**):

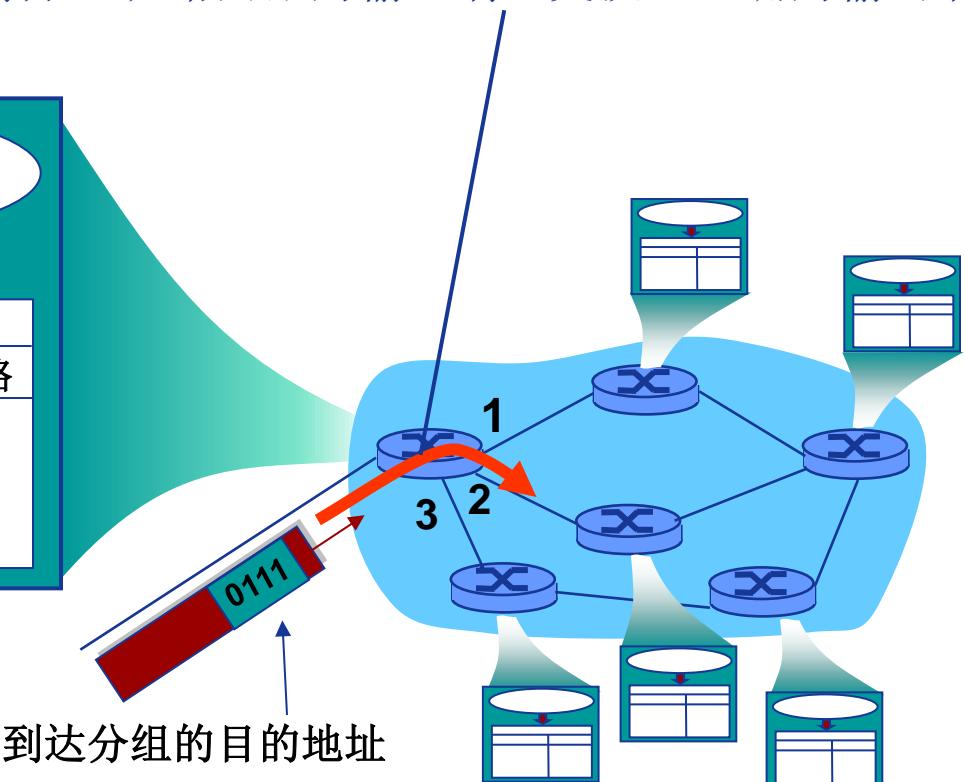
确定分组从源到目的传输路径

- 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



到达分组的目的地址

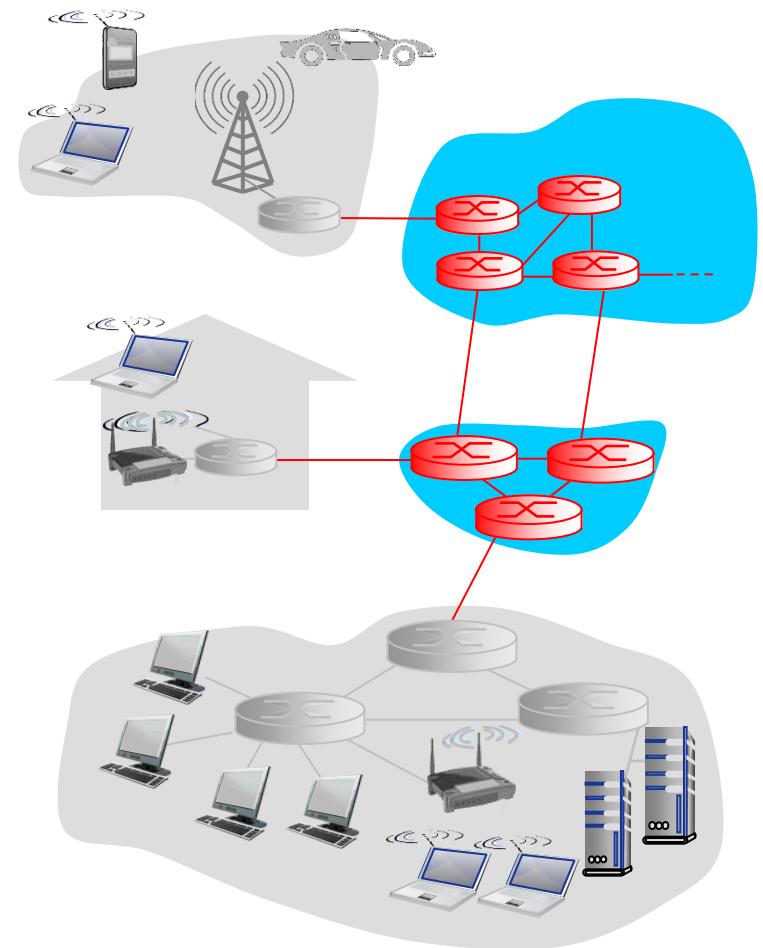


网络核心

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 Switching)





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



计算机网络

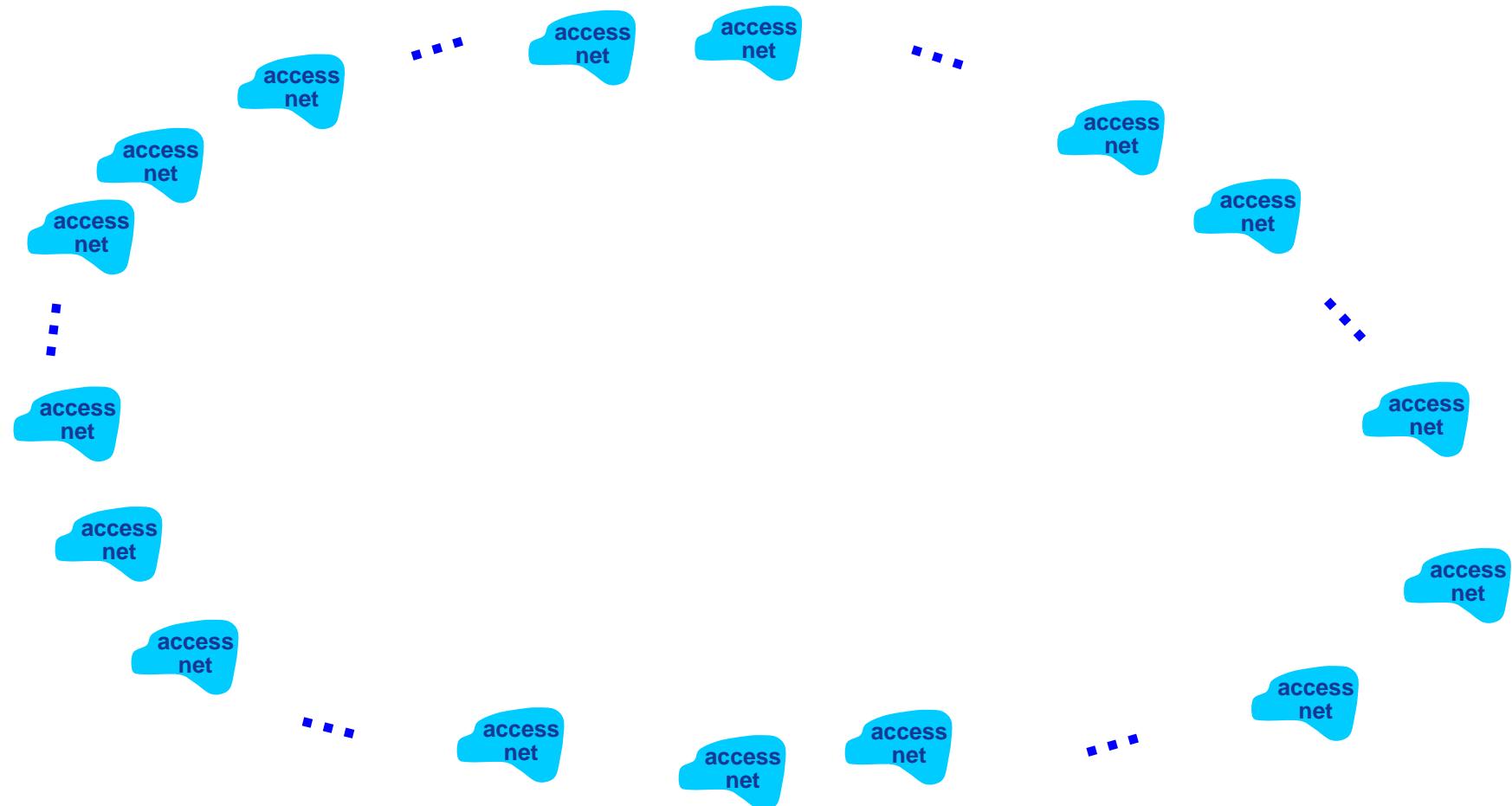
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



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

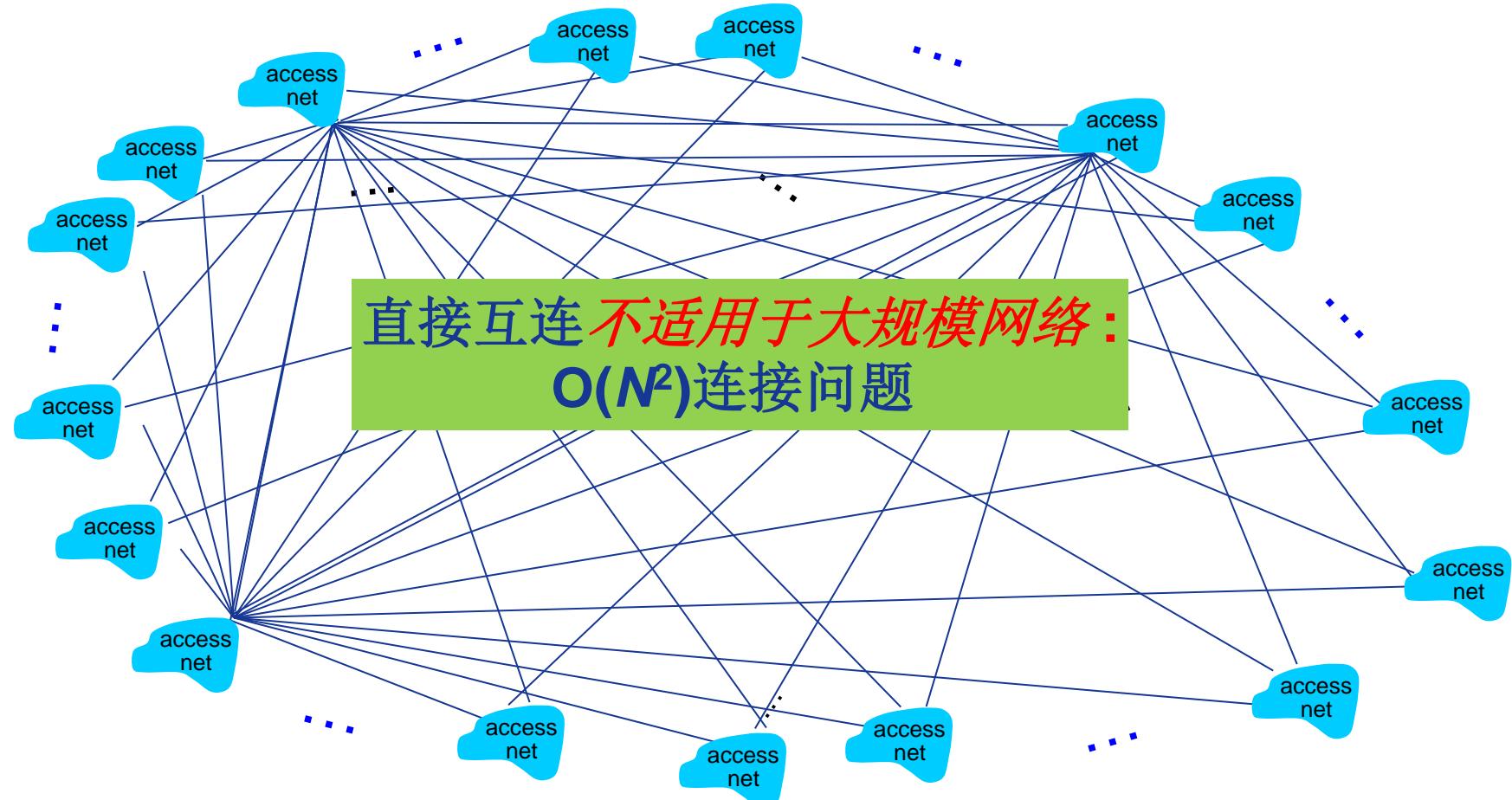
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



可选方案：每个接入ISP直接彼此互连？

直接互连不适用于大规模网络：
 $O(N^2)$ 连接问题





计算机网络

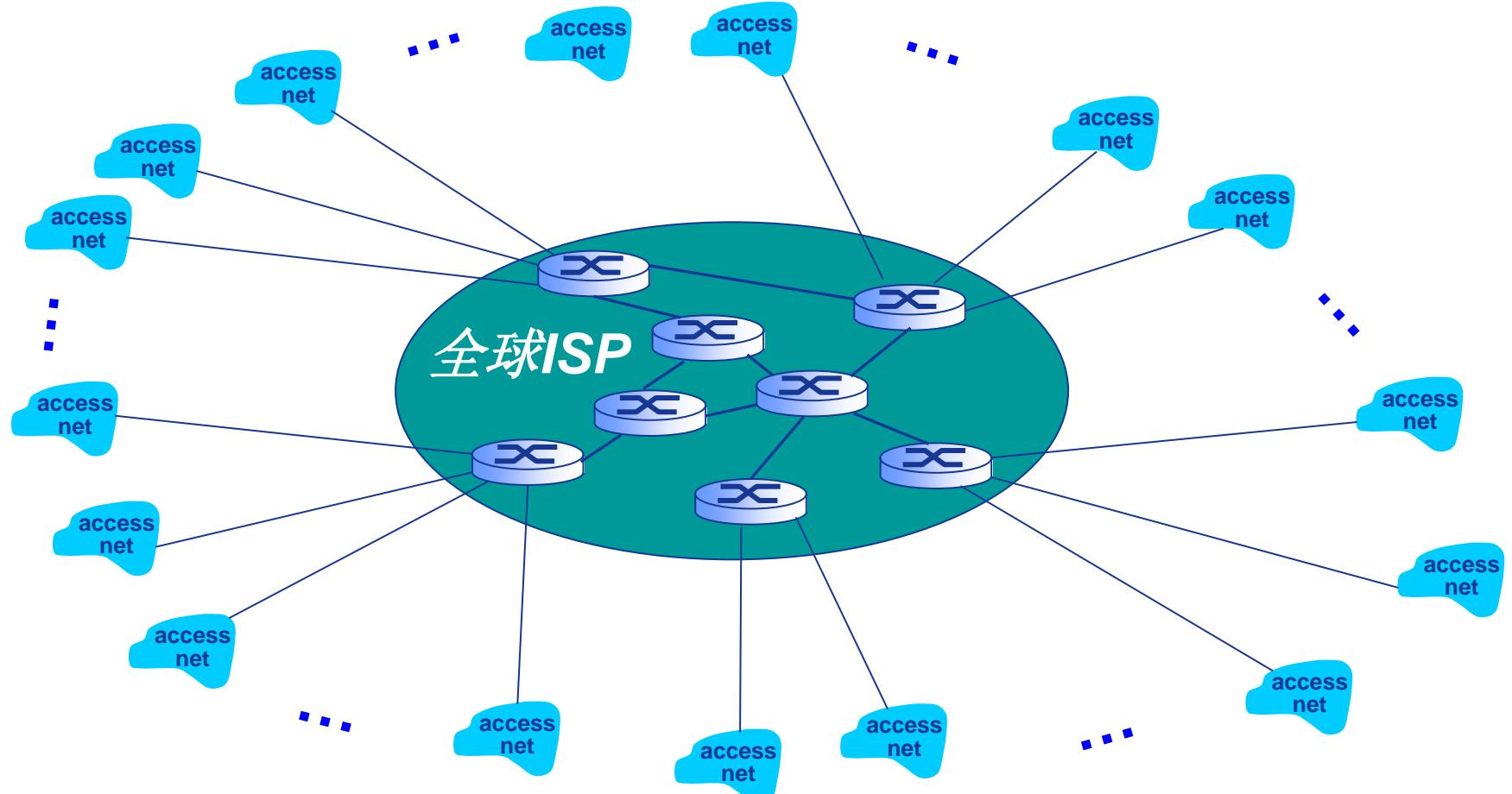
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



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）？



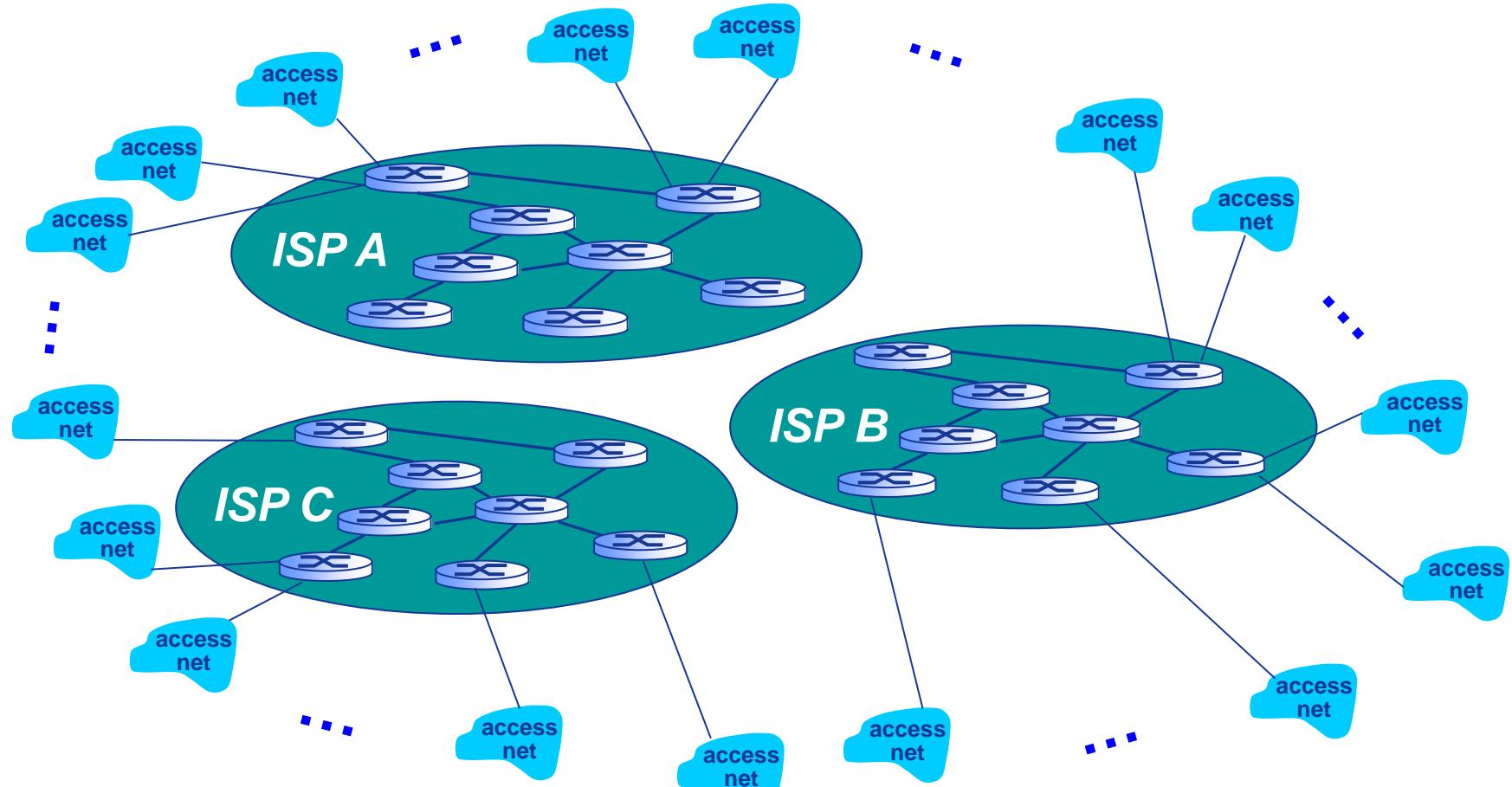


计算机网络

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

但是从商业角度，必定有竞争者…





Internet结构：网络之网络

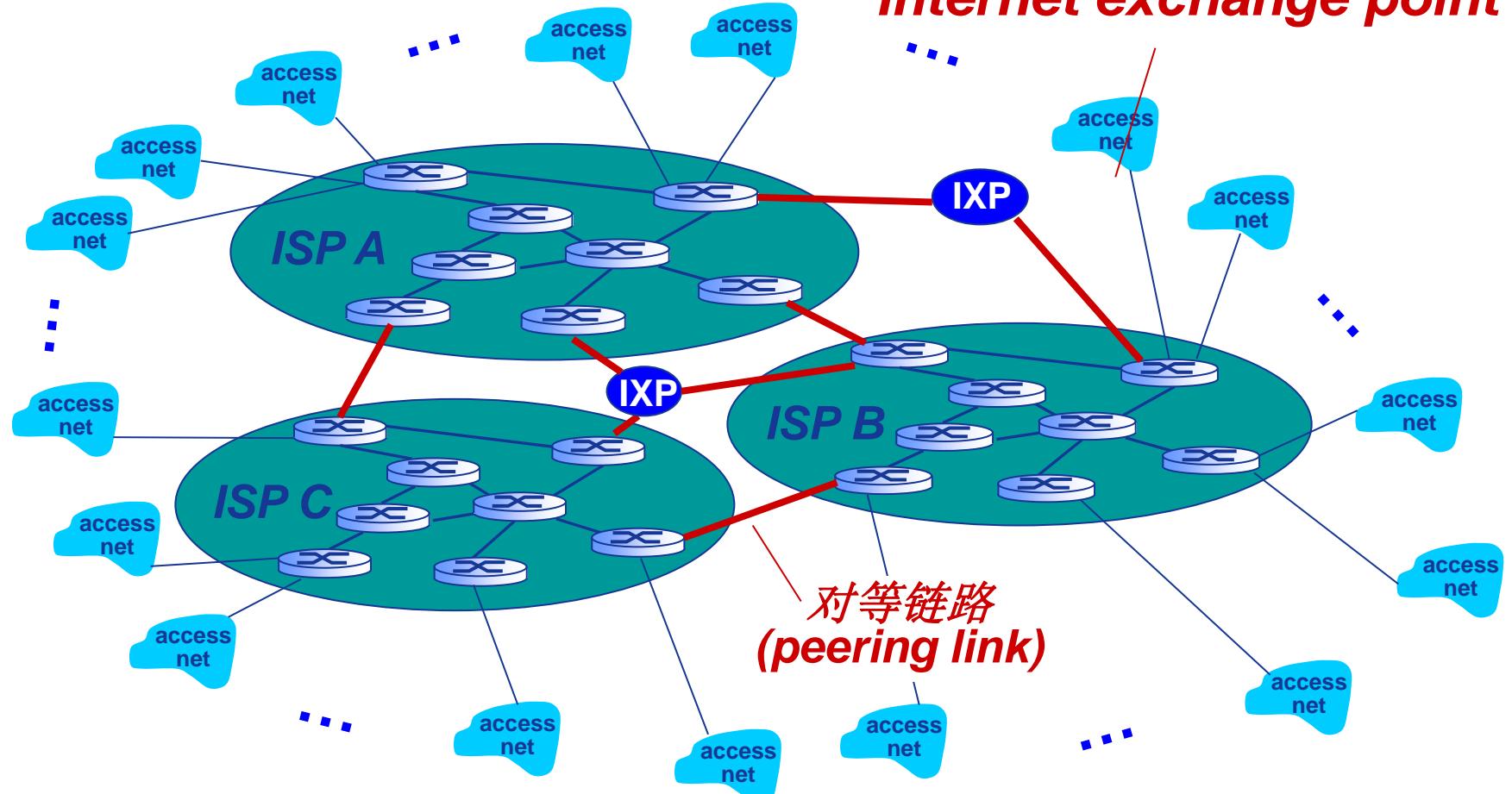
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



但是从商业角度，必定有竞争者…，这些ISP网络必须互连

Internet exchange point





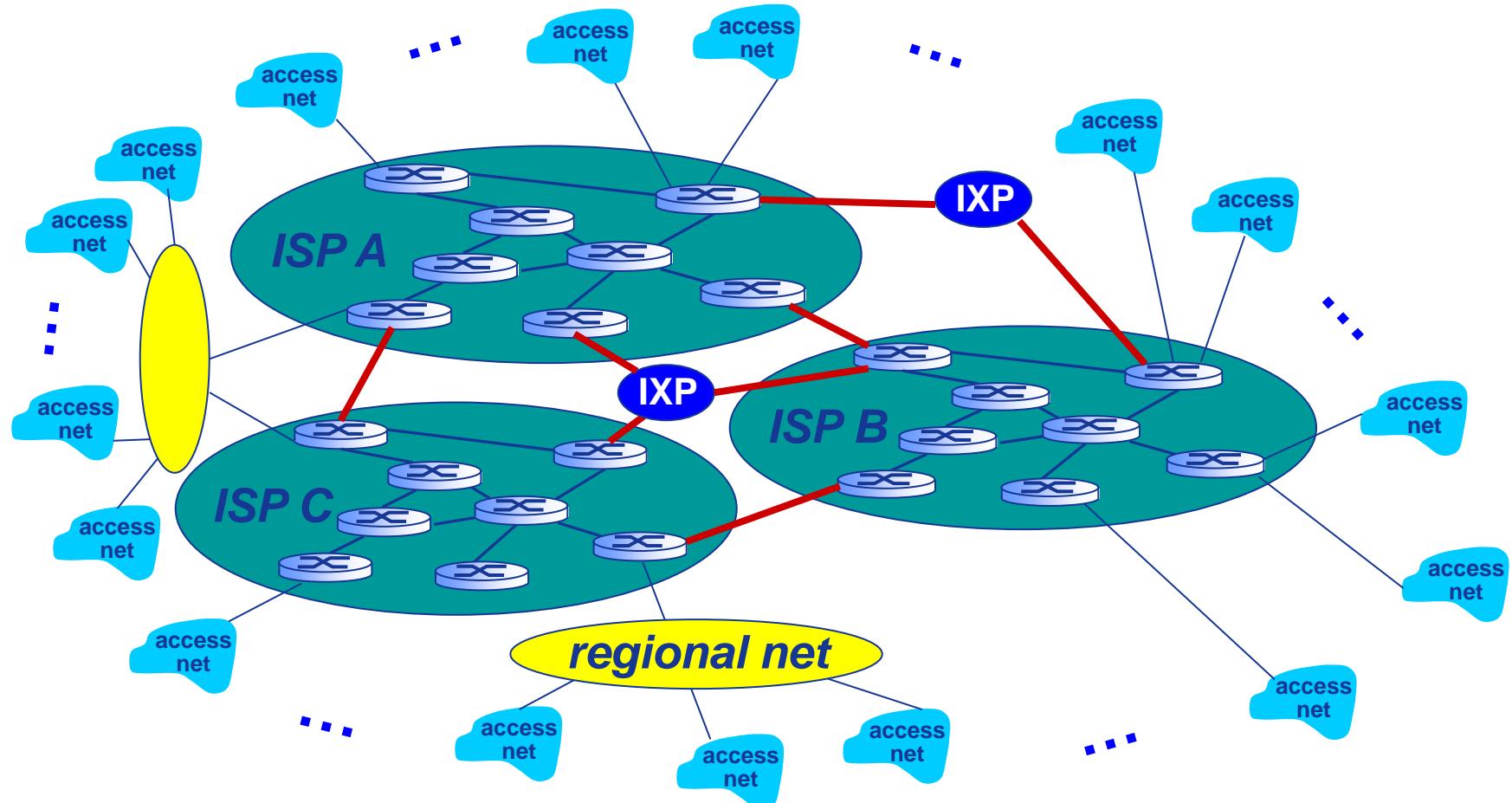
Internet结构：网络之网络

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



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





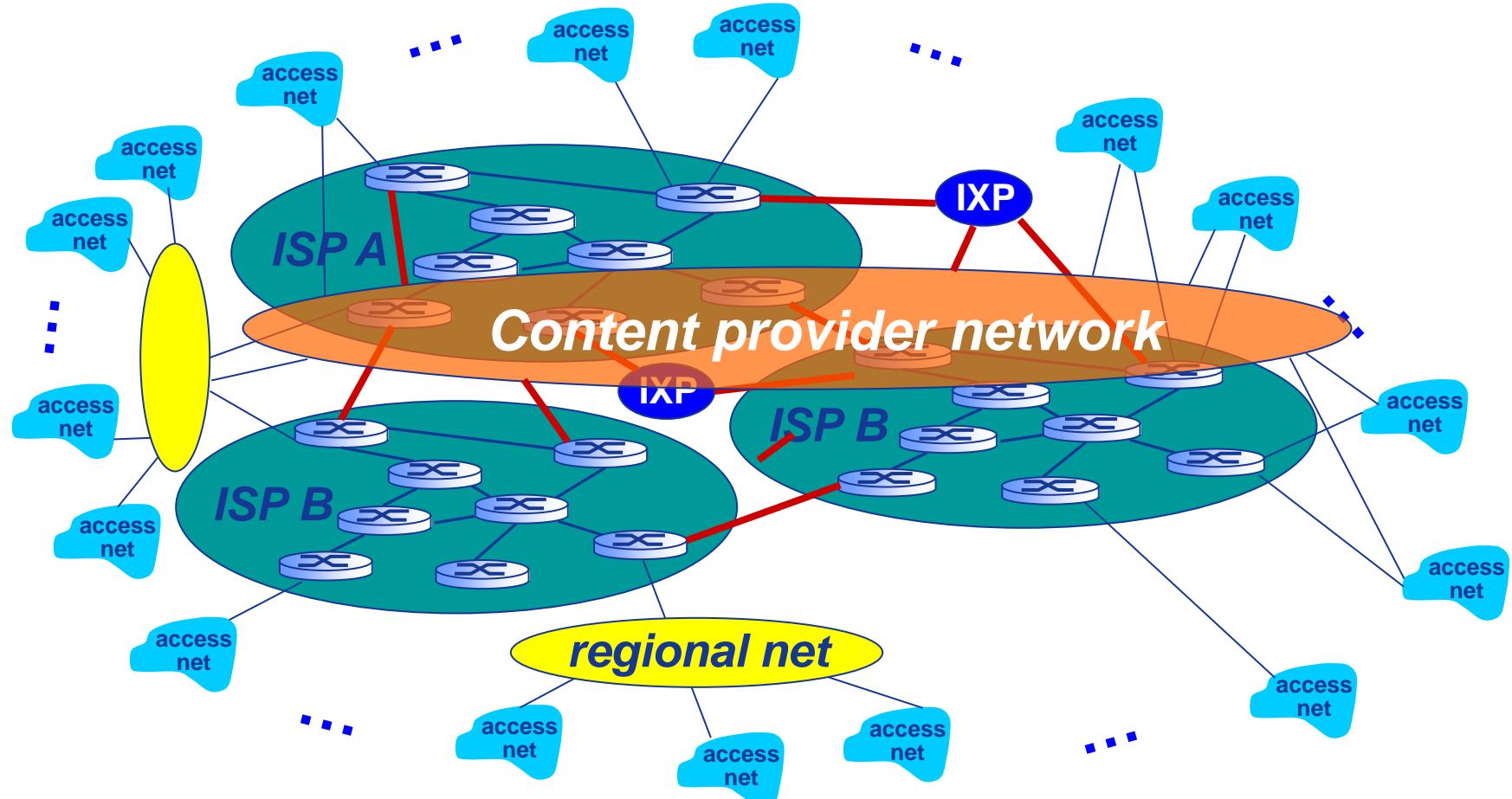
计算机网络

Internet结构：网络之网络

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

... 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

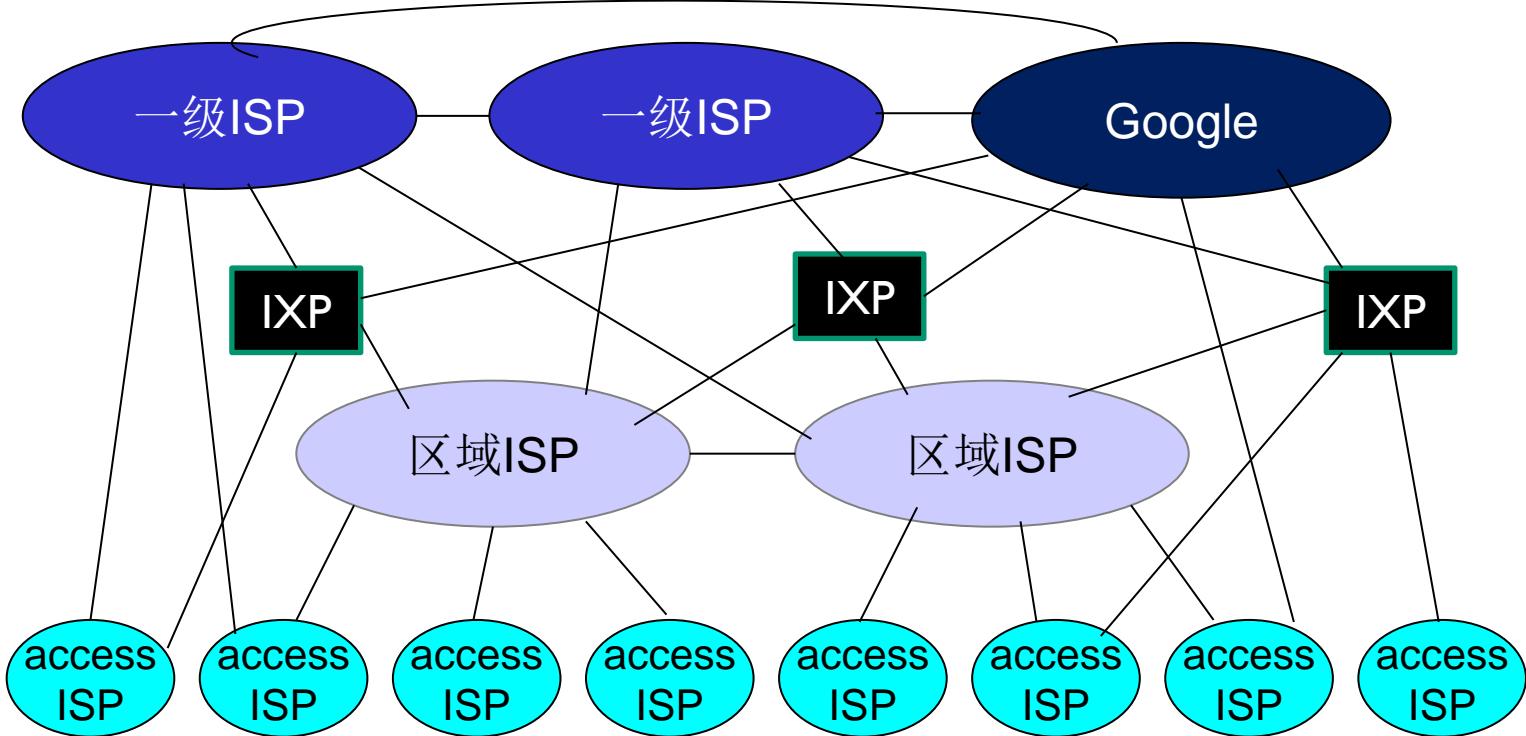




Internet结构：网络之网络

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构



- ❖ 在网络中心: 少数互连的大型网络
 - “一级” (tier-1)商业ISPs (如: 中国联通、中国电信、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





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

1.3 数据交换

聂生顺



1.1 计算机网络基本概念

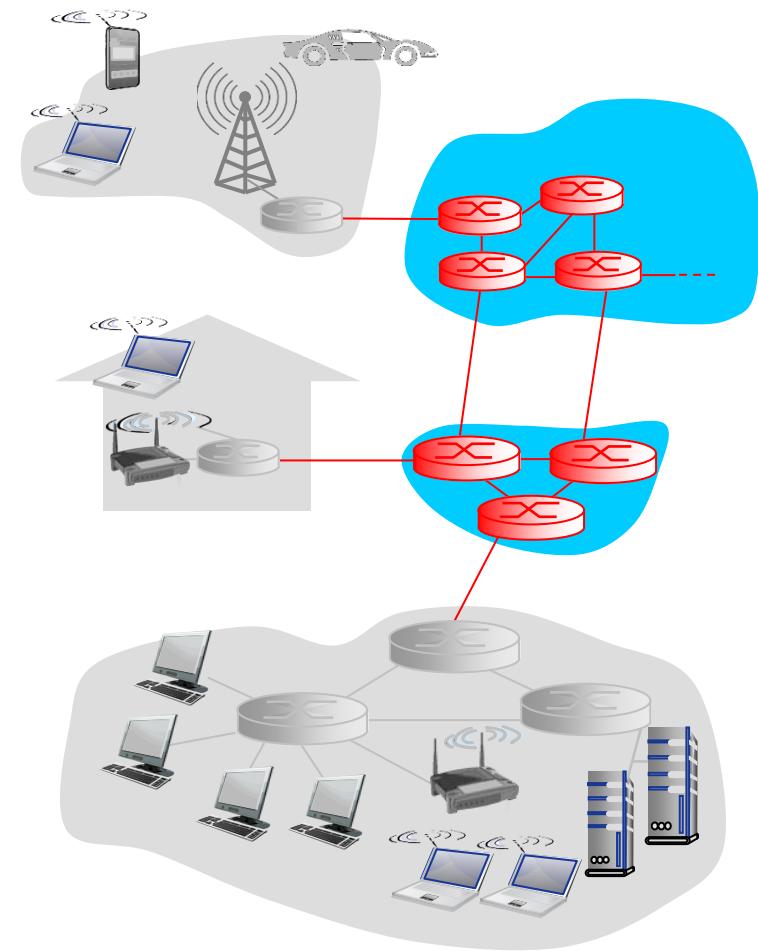
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



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





交换 ?

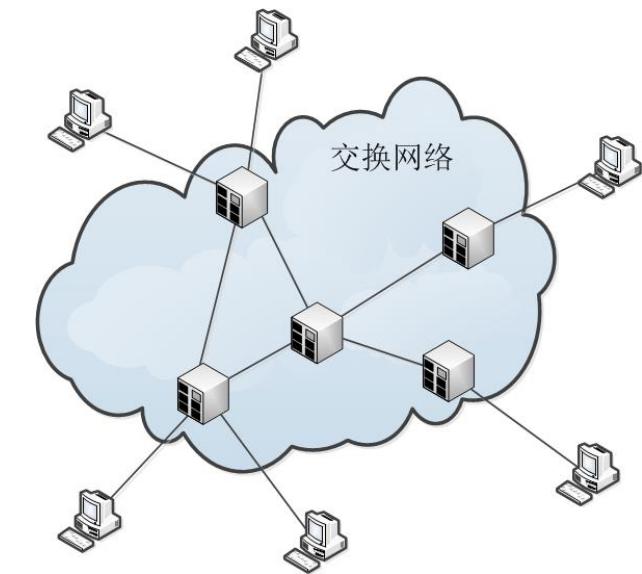
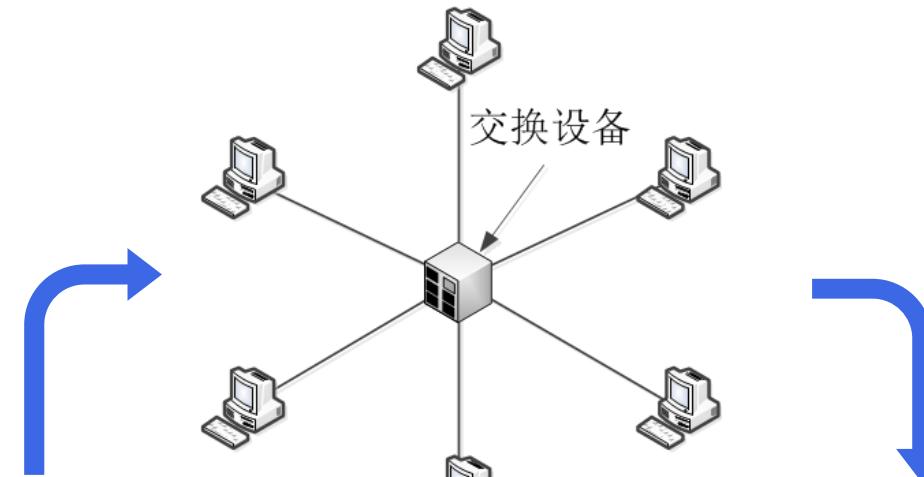
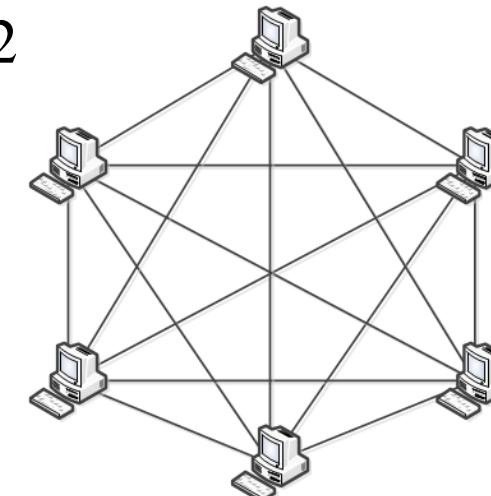
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ N^2 链路问题
- ❖ 连通性
- ❖ 网络规模

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





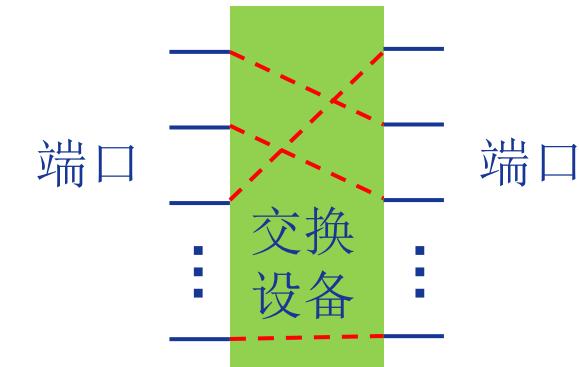
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

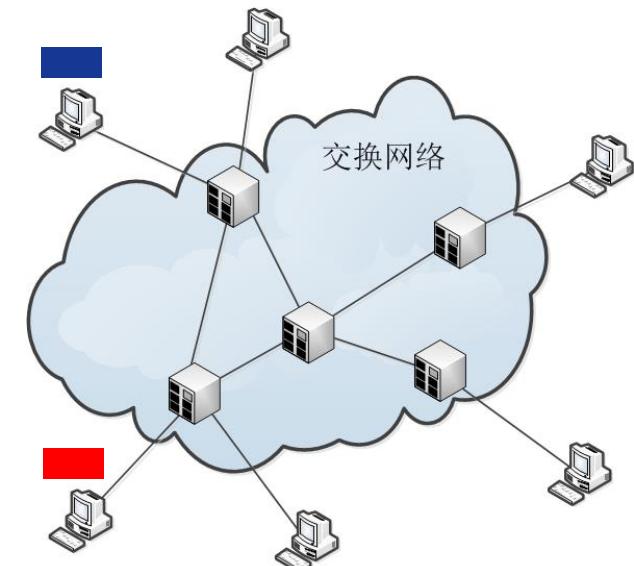
1.3 数据交换

交换 ?

❖ 动态转接



❖ 数据交换 (Data Exchange) ?





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

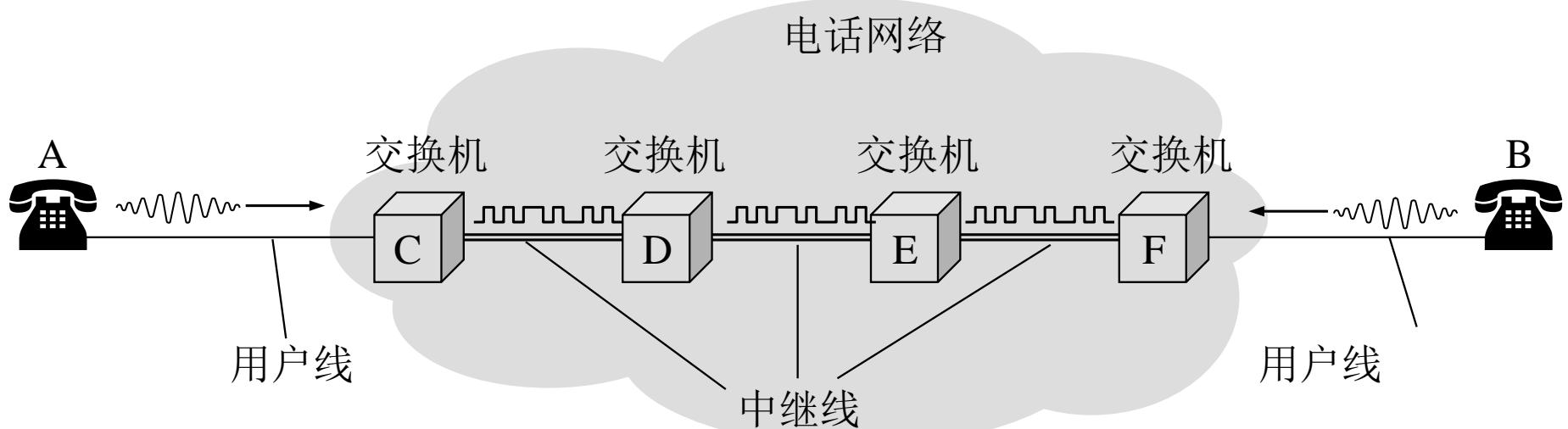


❖ 最典型电路交换网络：电话网络

❖ 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





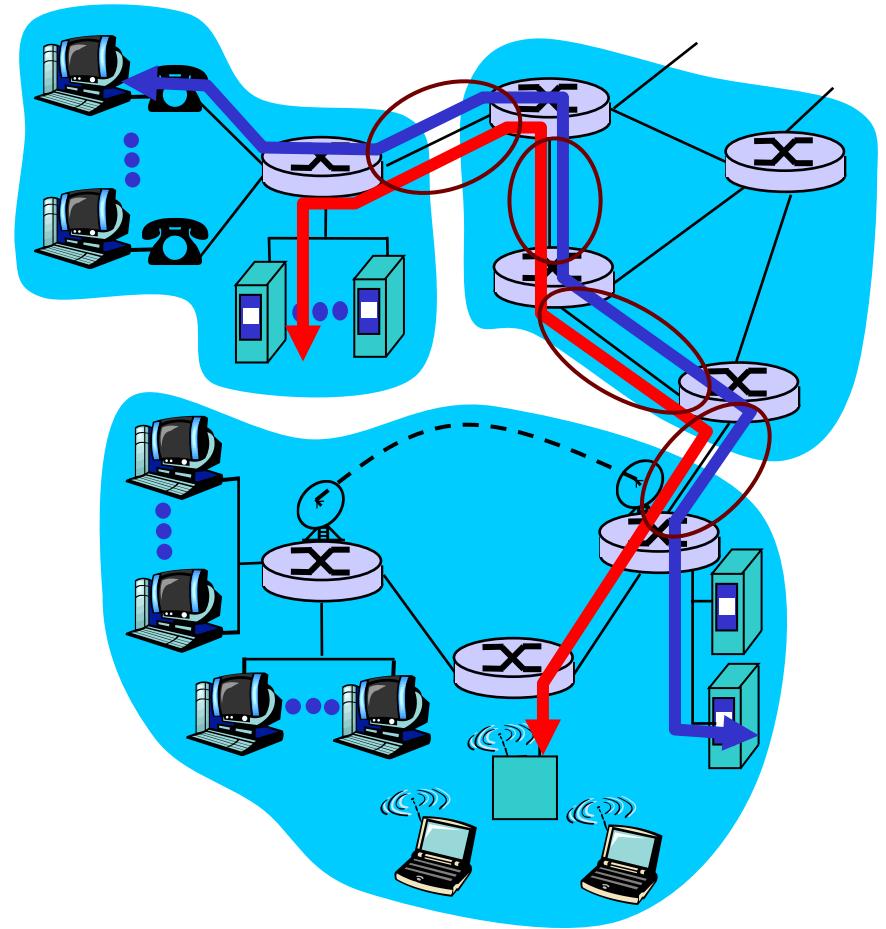
电路交换网络的链路共享？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

电路交换网络如何共享中继线?
—多路复用（Multiplexing）





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换



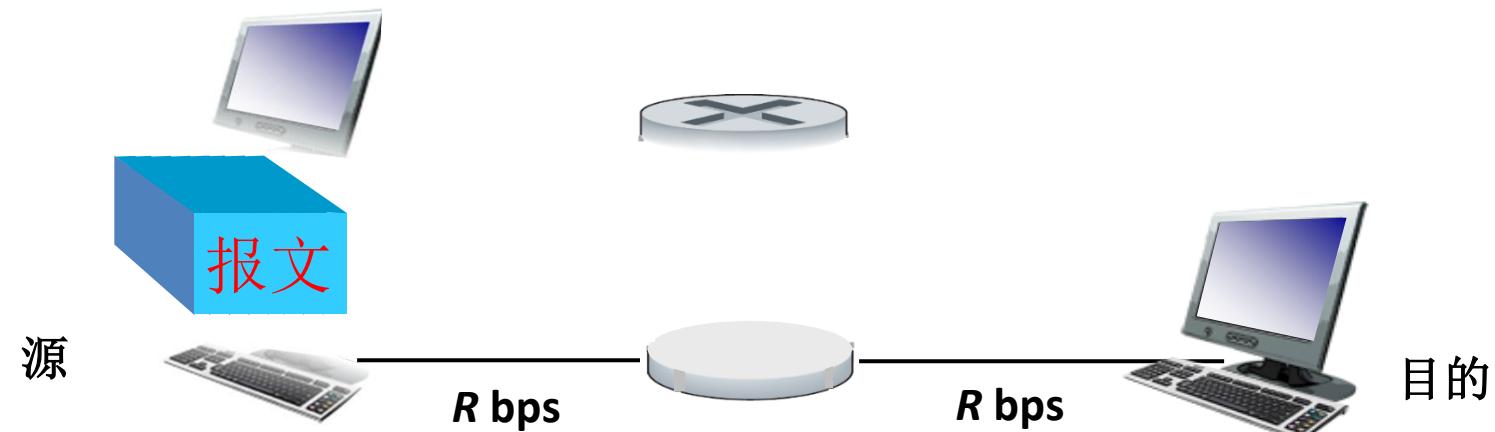
报文交换 (message switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 报文：源（应用）发送信息整体
 - 比如：一个文件





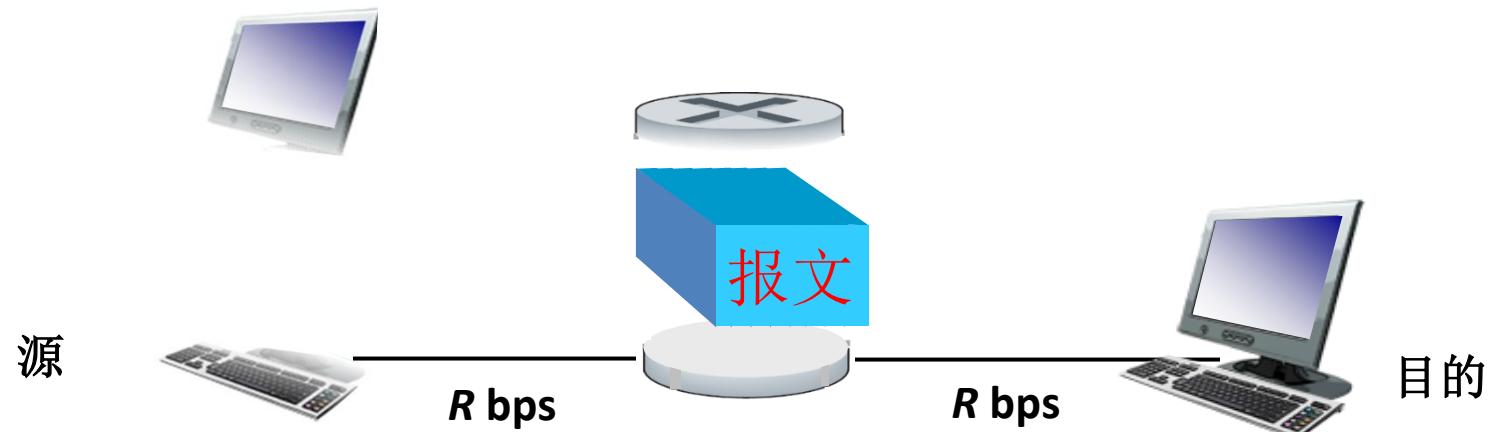
报文交换 (message switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 报文：源（应用）发送信息整体
 - 比如：一个文件





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

数据交换的类型

- ❖ 电路交换
- ❖ 报文交换
- ❖ 分组交换



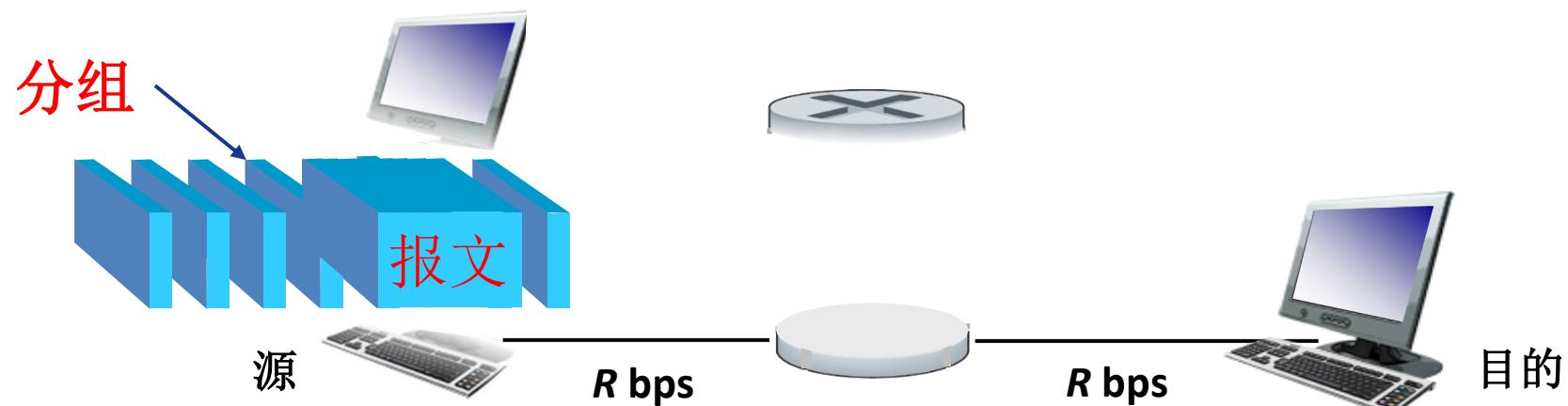
分组交换 (package switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 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





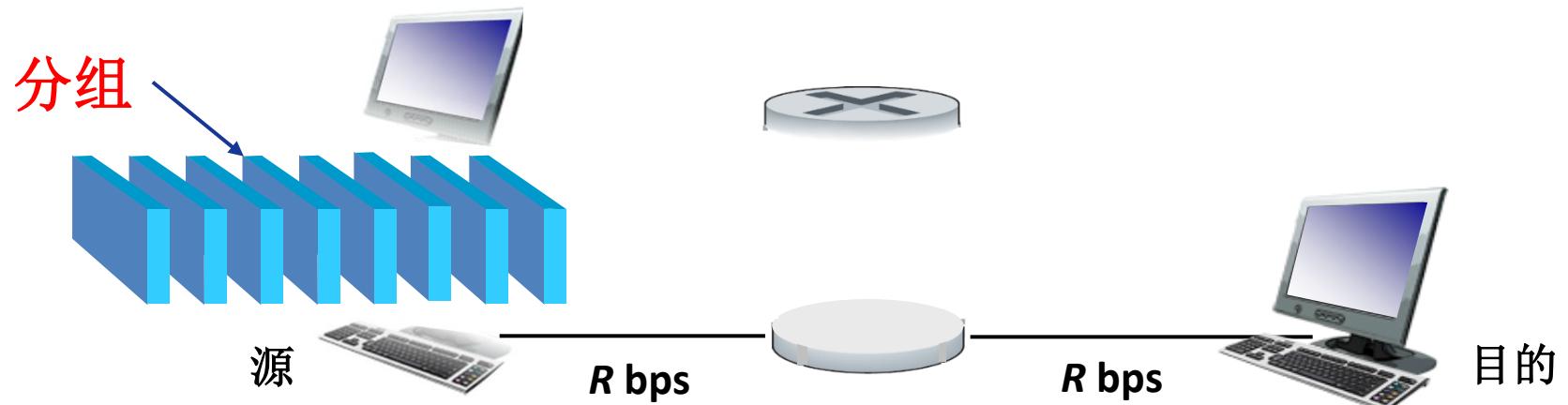
分组交换 (package switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 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





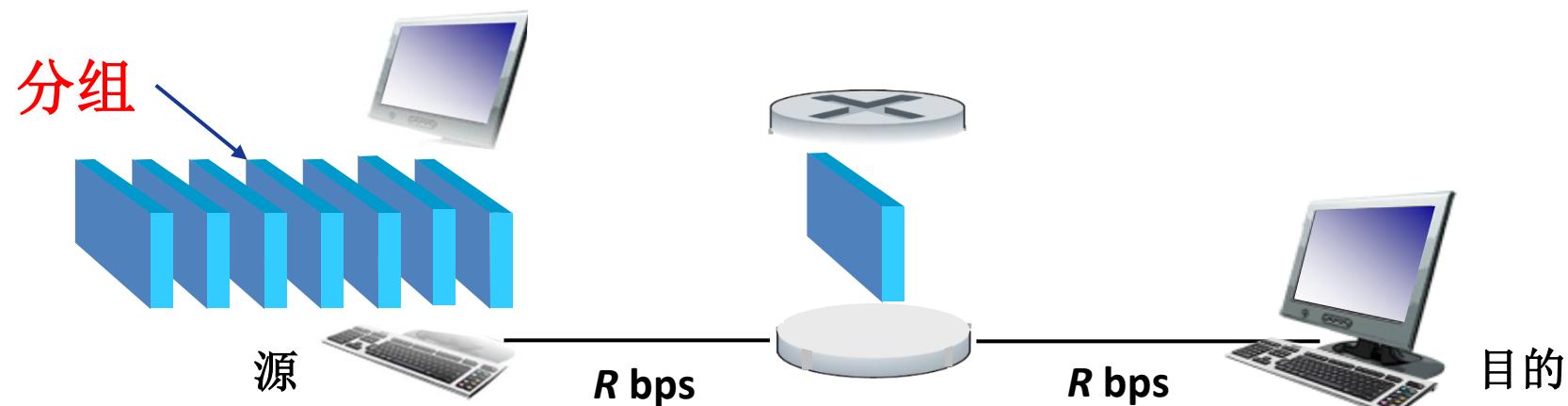
分组交换 (package switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 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





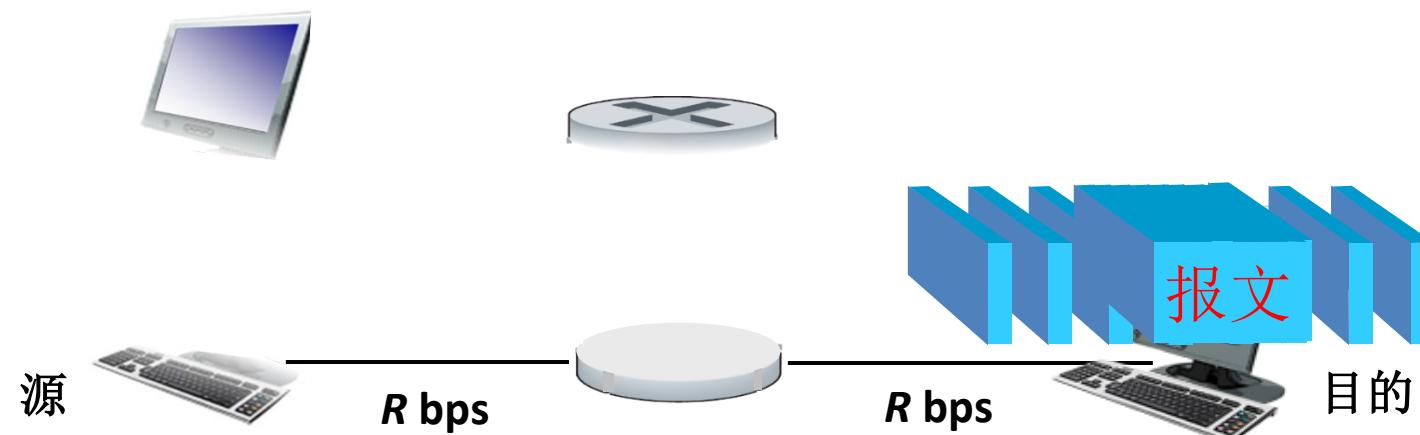
分组交换 (package switching)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 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)

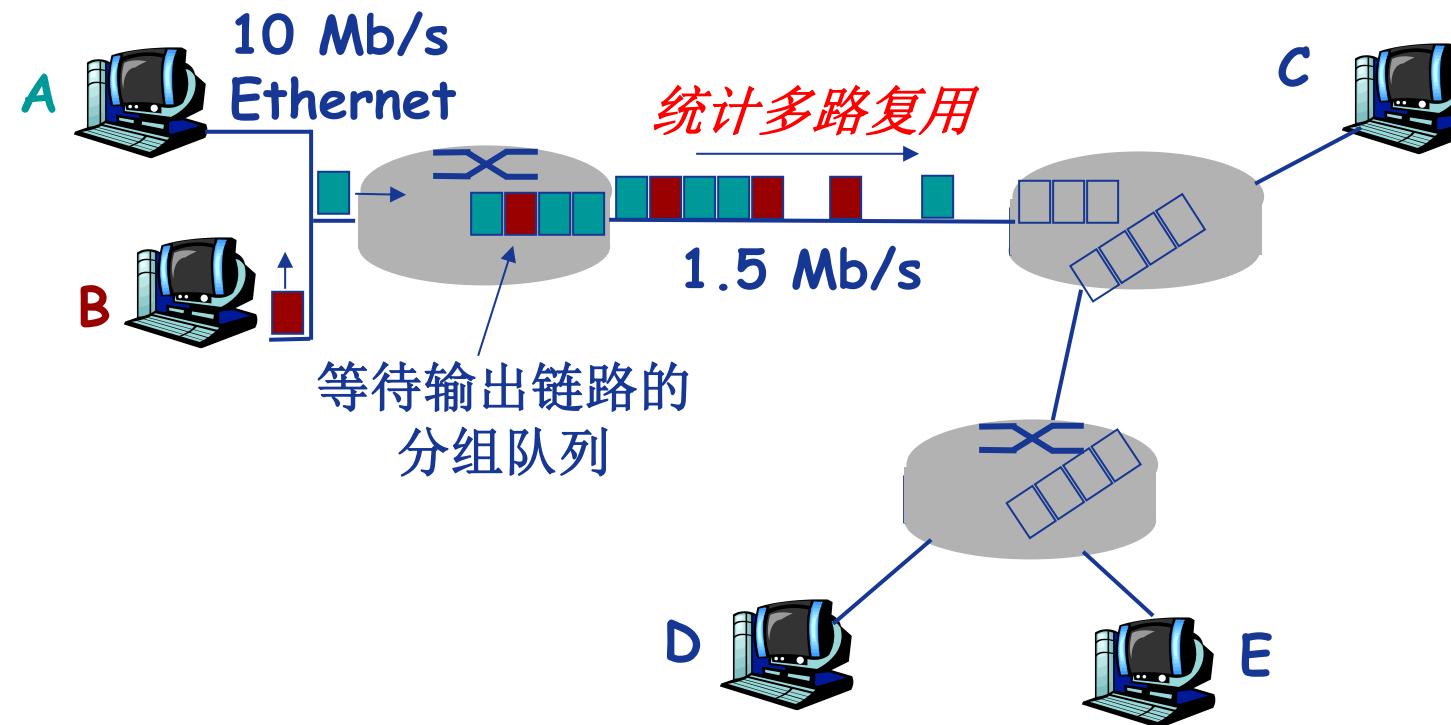
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

A & B分组序列不确定，按需共享链路

-*statistical multiplexing*





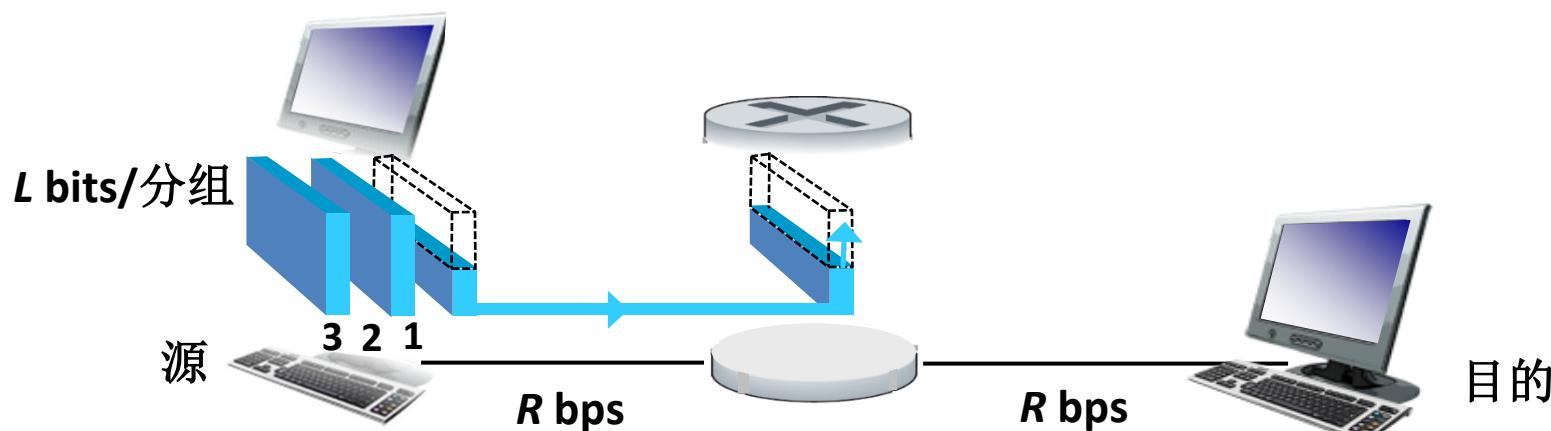
存储-转发 (store-and-forward)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- ❖ 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？





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 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



❖ 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:

❖ $M=7.5 \text{ Mbits}, L=1500 \text{ bits}$

- $M=5000L$

❖ $R = 1.5 \text{ Mbps}$

❖ 报文交换:

- 报文交付时间=? sec

❖ 分组交换:

- 报文交付时间=? sec



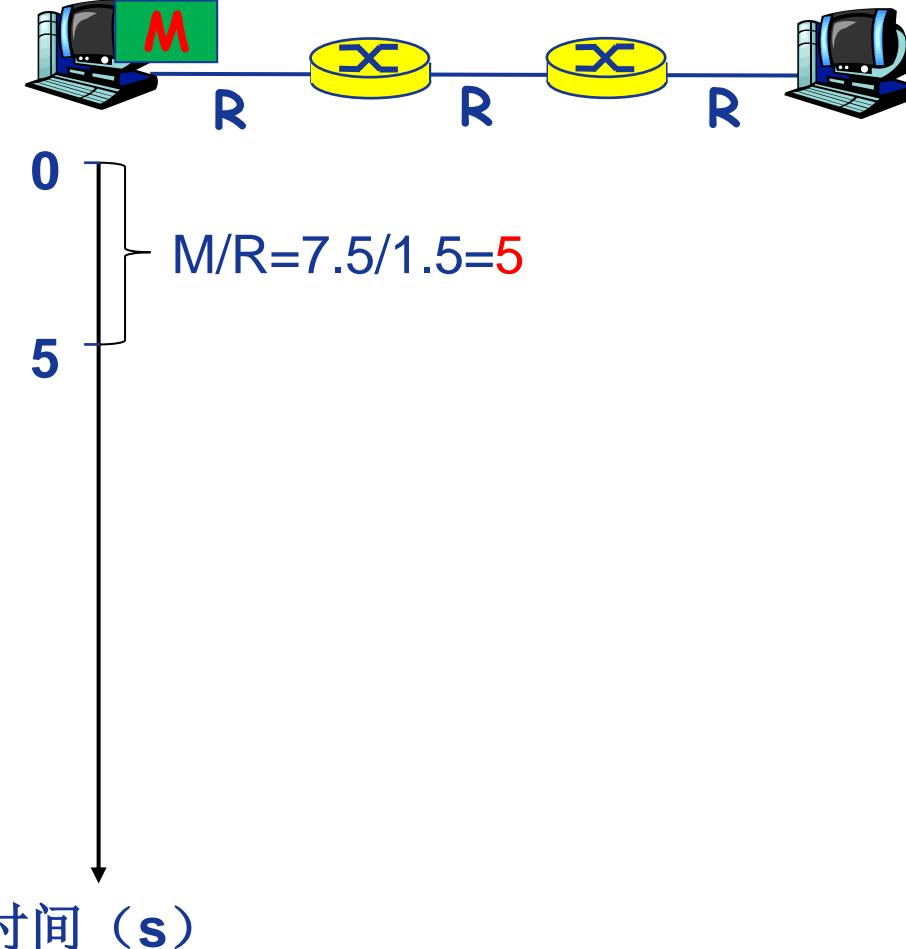
报文交换 VS 分组交换？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

报文交换





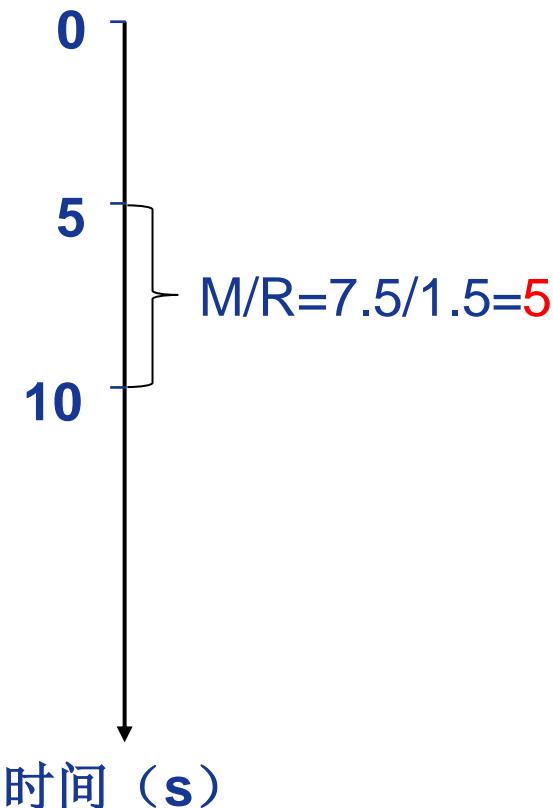
报文交换 VS 分组交换？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

报文交换





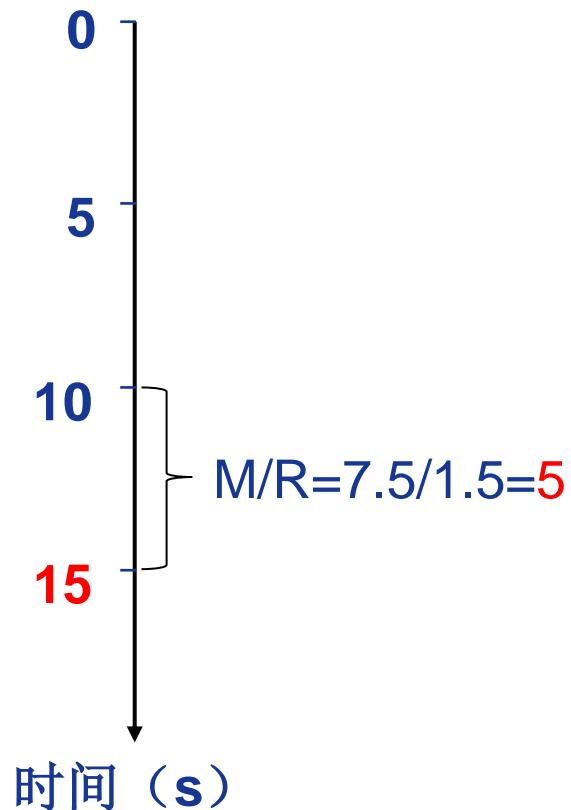
报文交换 VS 分组交换？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

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=**15 s**
- ❖ 路由器至少需要多大缓存?





报文交换 VS 分组交换 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

分组交换



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

时间 (ms)





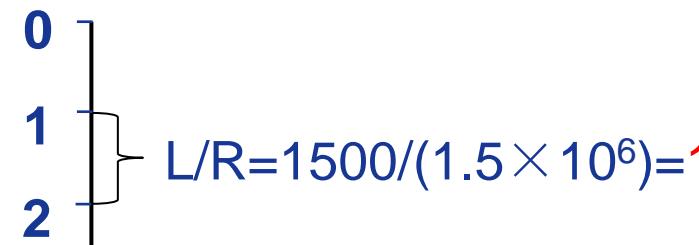
报文交换 VS 分组交换 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

分组交换





1.1 计算机网络基本概念

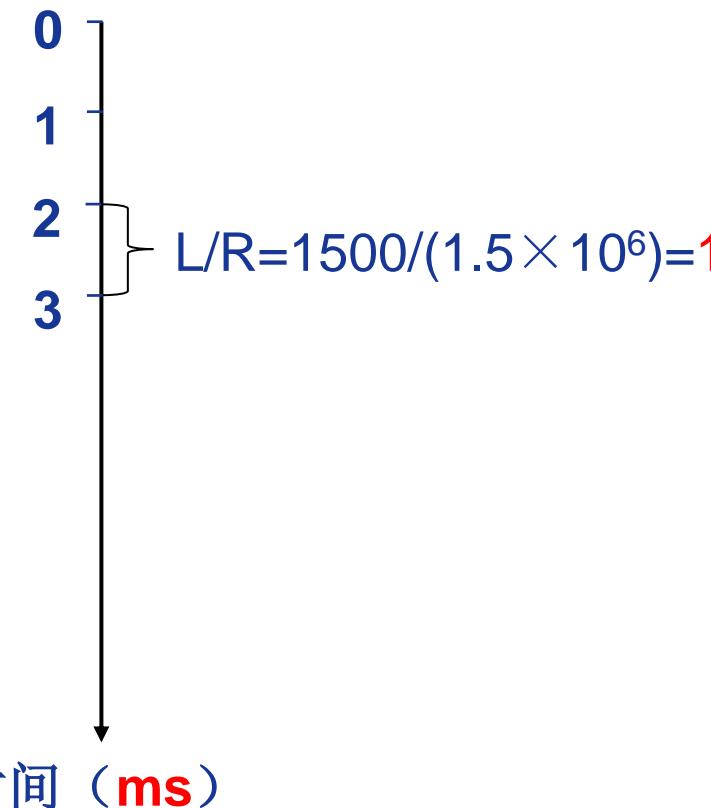
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



报文交换 VS 分组交换？

分组交换





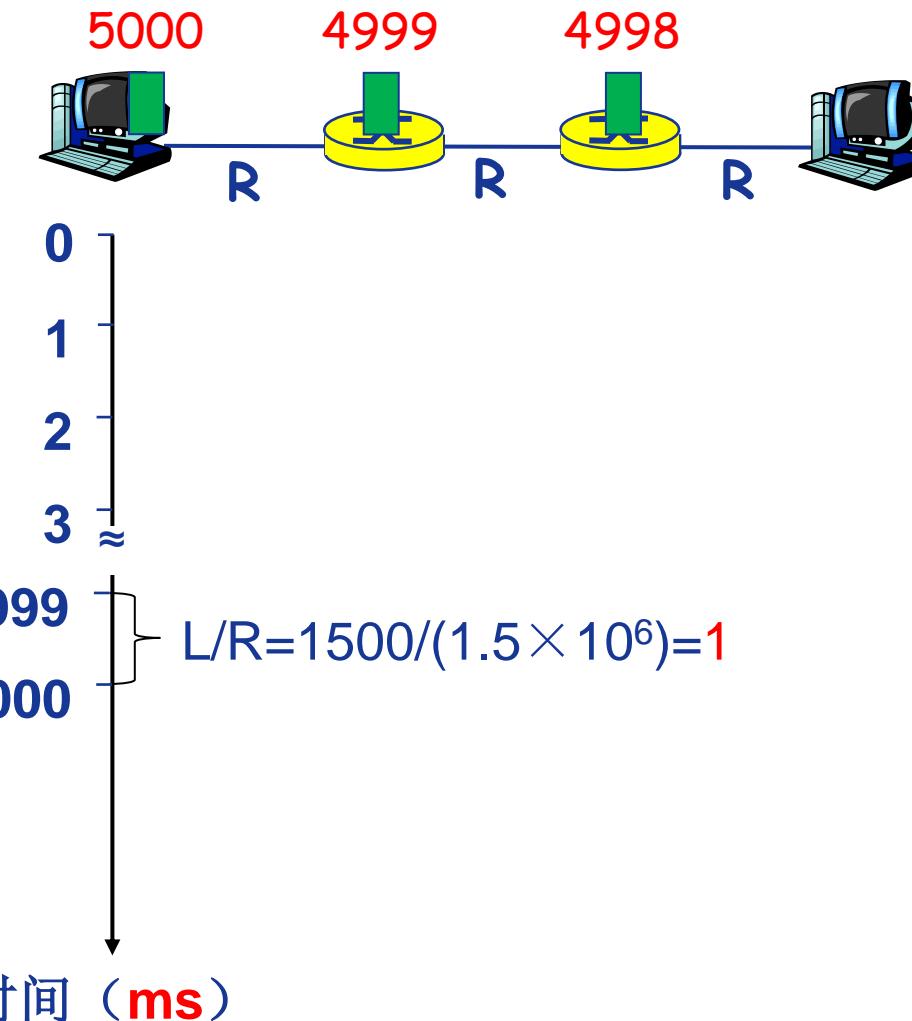
报文交换 VS 分组交换 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

分组交换





计算机网络

1.1 计算机网络基本概念

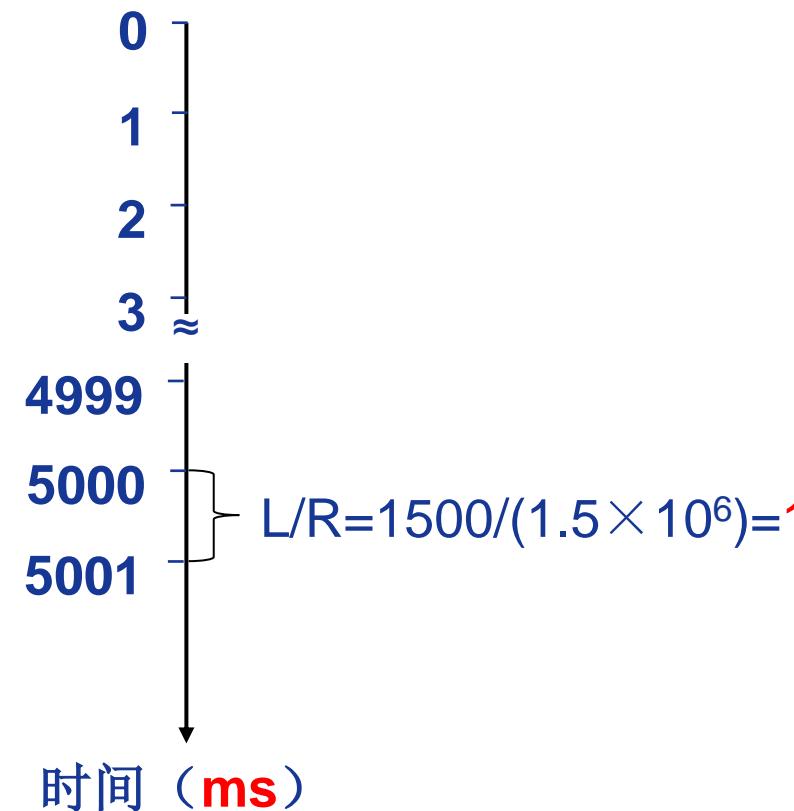
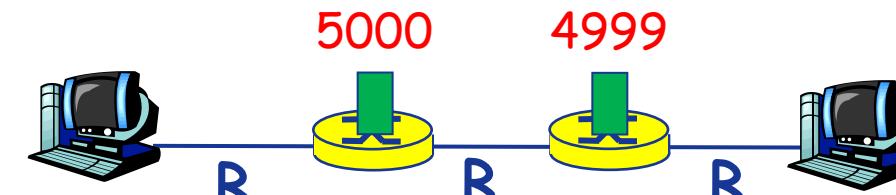
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



报文交换 VS 分组交换 ?

分组交换





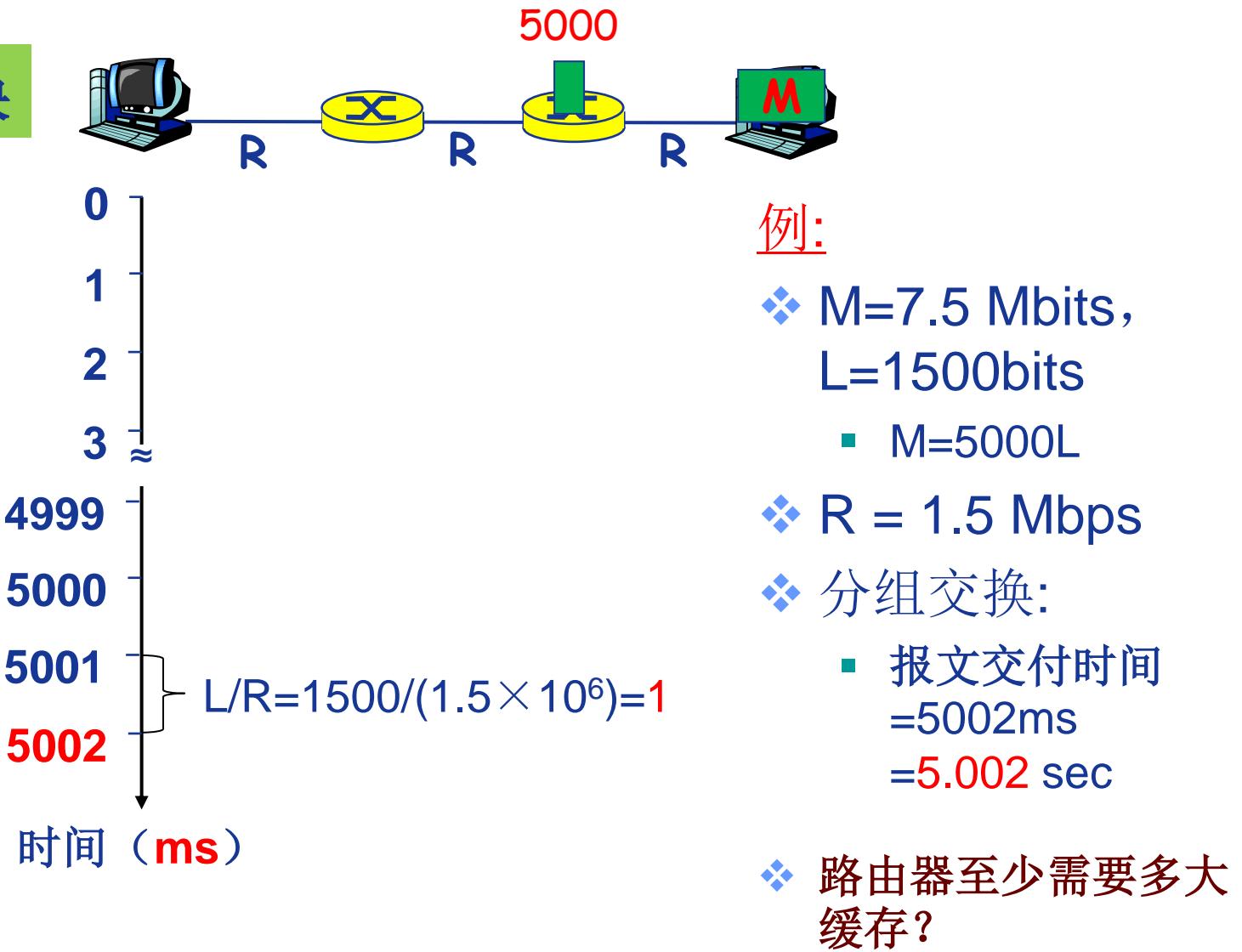
报文交换 VS 分组交换 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

分组交换



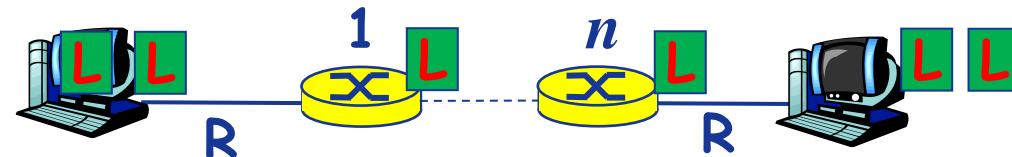


分组交换的报文交付时间

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



- ❖ 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

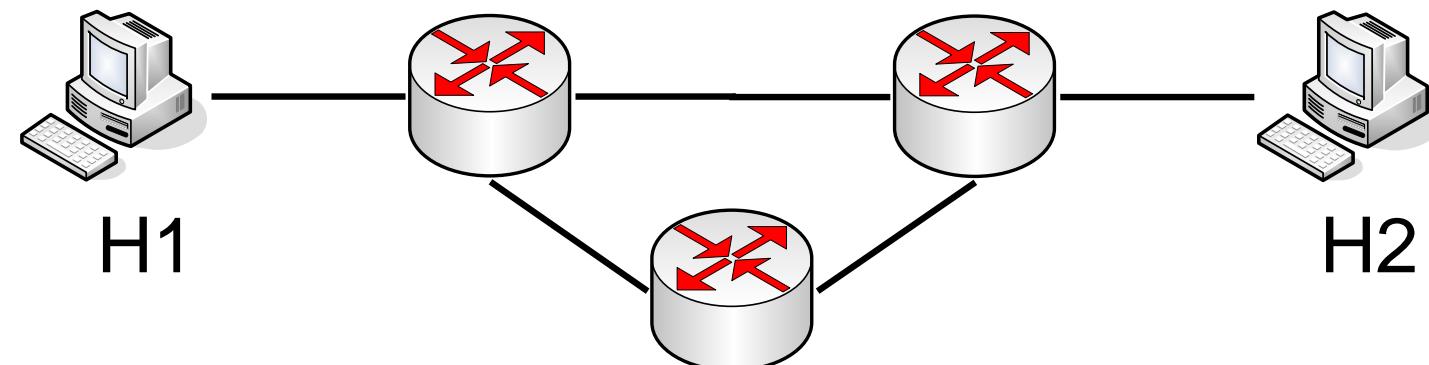
$$\begin{aligned} T &= M/R + (h-1)L/R \\ &= M/R + nL/R \end{aligned}$$





例题

【例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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



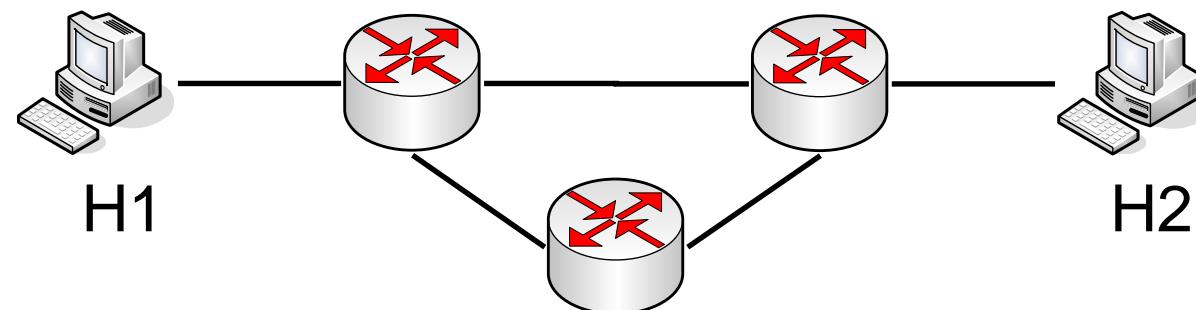
【解例1】980 000 B大小的文件需要分1000个分组，每个分组1 000 B。H1发送整个文件需要的传输延迟为：

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

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，用时最少，所以再加上最后一个分组的两次转发的传输延迟，即：

$$2 \times 1000 \times 8 / 100\ 000\ 000 = 0.16\text{ms}.$$

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



单选题 1分

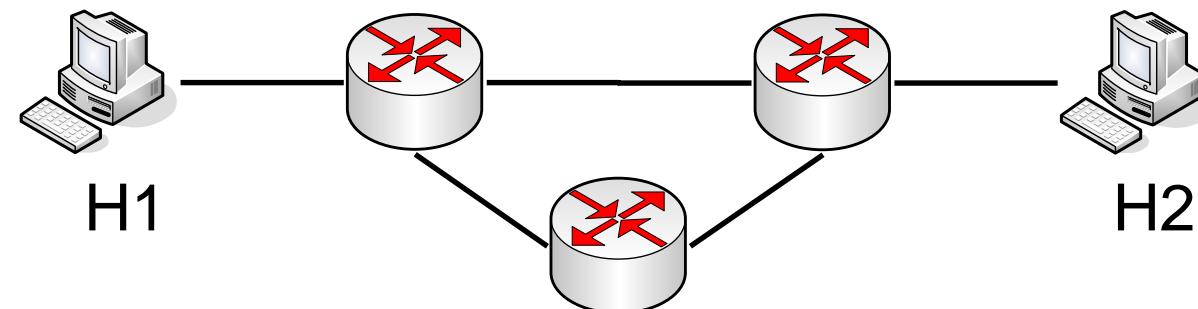
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换



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100Mbps，分组大小为1000B，其中分组头大小为20B。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，需要的时间最多是_____。



A

80ms

B

80.08ms

C

80.16ms

D

80.24ms

提交



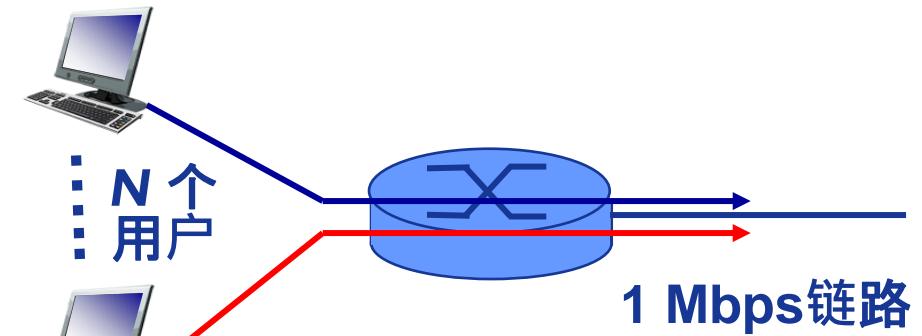
分组交换 VS 电路交换 ?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

- 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





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

1.4 计算机网络性能指标

聂生顺



计算机网络性能指标

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标





速率

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



- ❖ 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



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



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“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)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

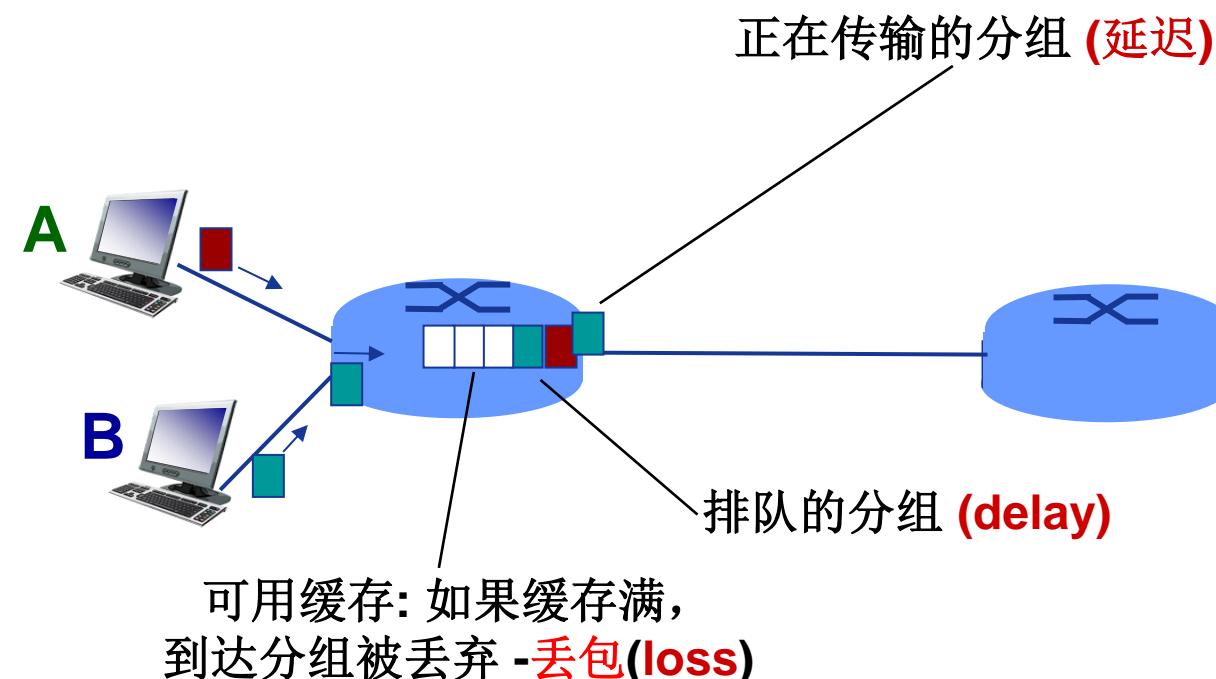
1.4 计算机网络性能指标



Q:分组交换为什么会发生时延和丢包?

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





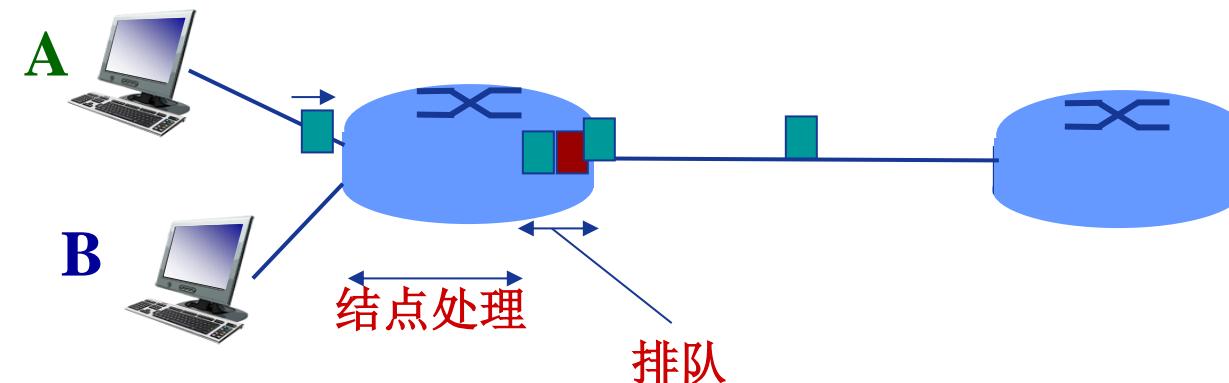
四种分组延迟

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



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



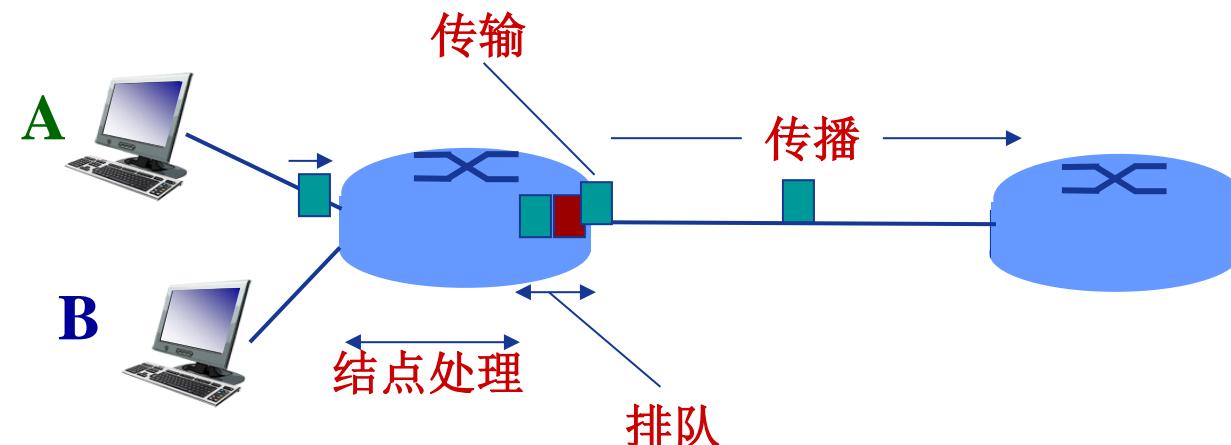
四种分组延迟

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



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

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_{trans} 与 d_{prop} 完全不同!

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)
- $d_{\text{prop}} = d/s$





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



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)



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

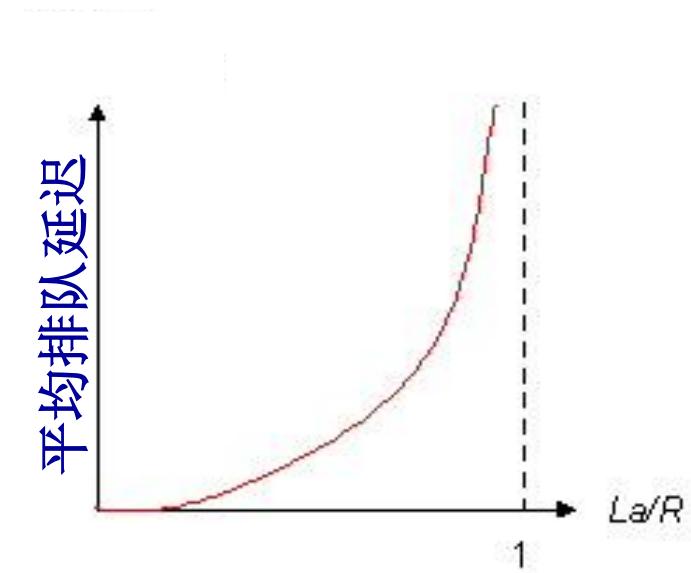
1.4 计算机网络性能指标

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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

❖ 链路的时延带宽积又称为以比特为单位的链路长度

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





往返时间 RTT (Round-Trip Time)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

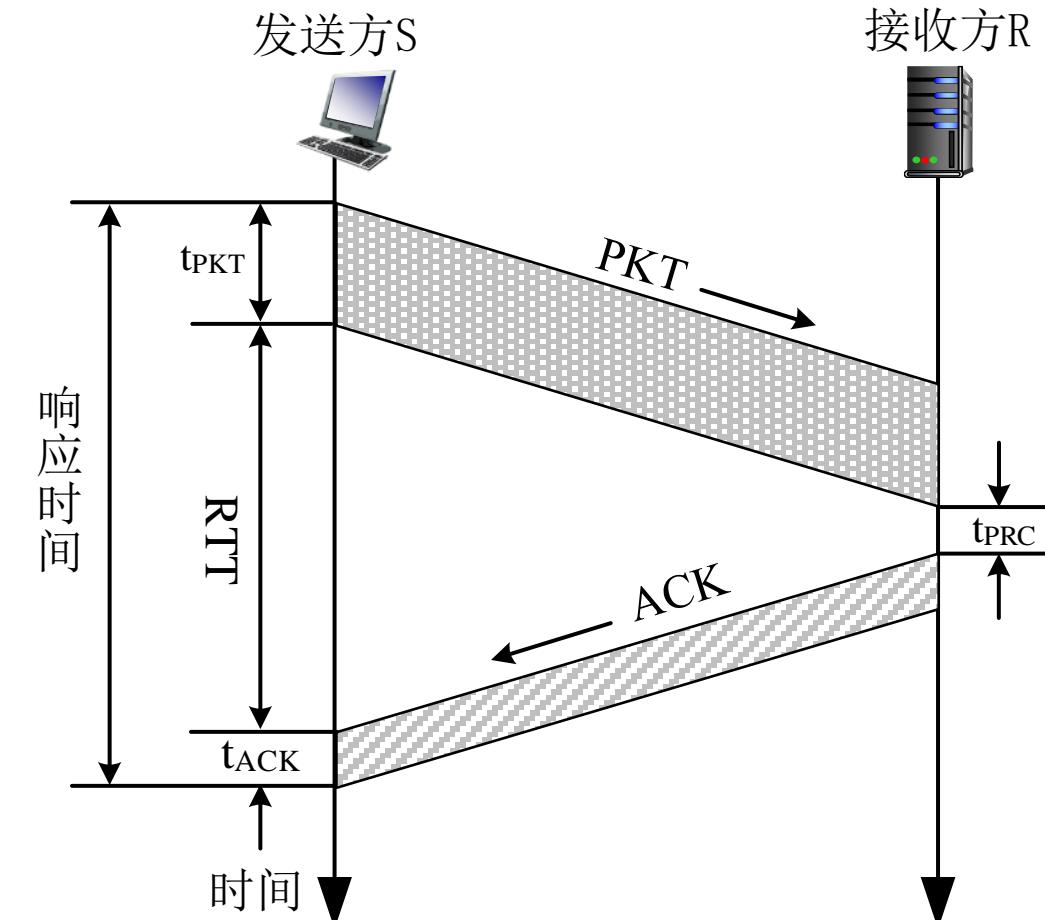


- ❖ 从发送方发送完数据，到发送方开始接到确认分组数据所经历的时间。

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= S \text{到} R \text{的传播时延 } t_p \\ &\quad + R \text{处理分组时延 } t_{PRC} \\ &\quad + R \text{到} S \text{的传播时延 } t_p \\ &= 2t_p + t_{PRC} \end{aligned}$$

$$\text{响应时间} = t_{PKT} + \text{RTT} + t_{ACK}$$

*注意：不同教材对RTT定义有差异！





1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

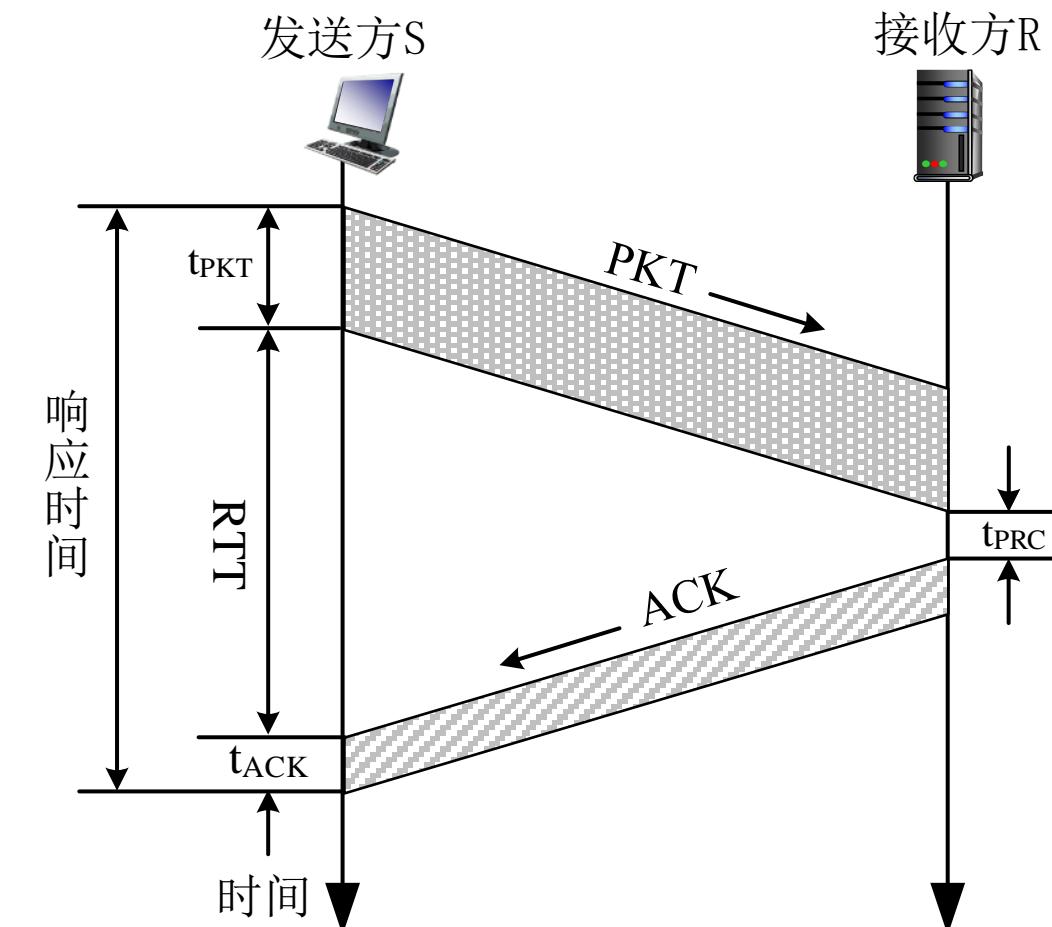
1.4 计算机网络性能指标



利用率

- ◆ 信道利用率指出某信道有百分之几的时间是被利用
- ◆ 网络利用率则是全网络的信道利用率的加权平均值

$$U = \frac{t_{PKT}}{t_{PKT} + RTT + t_{ACK}}$$





分组丢失（丢包）

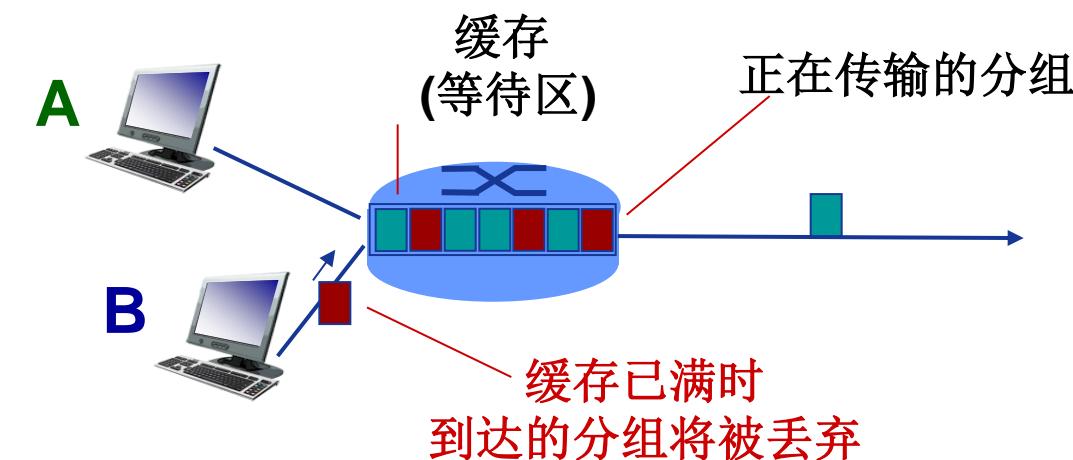
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

- ❖ 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)

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

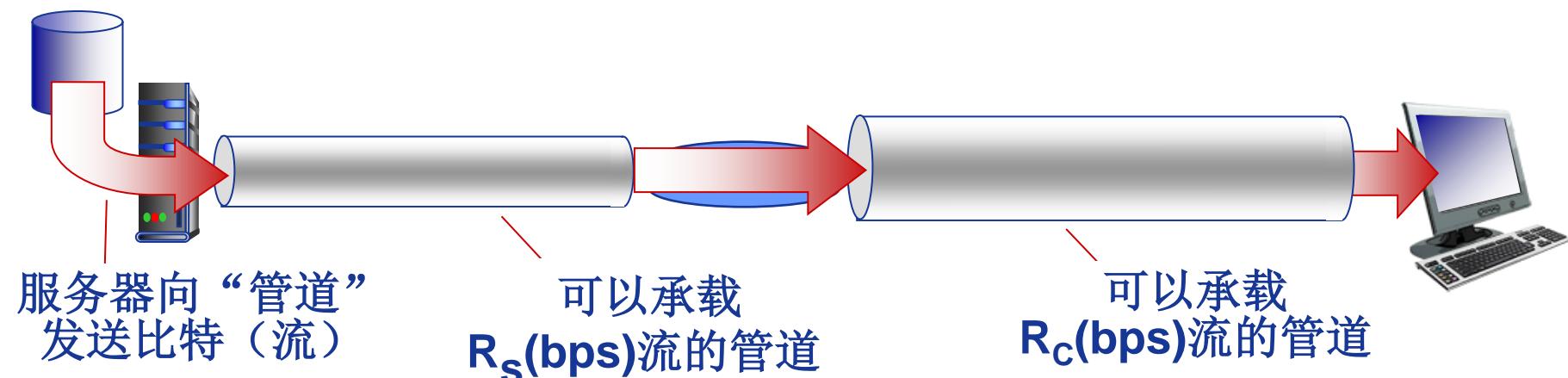
1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



❖ **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)

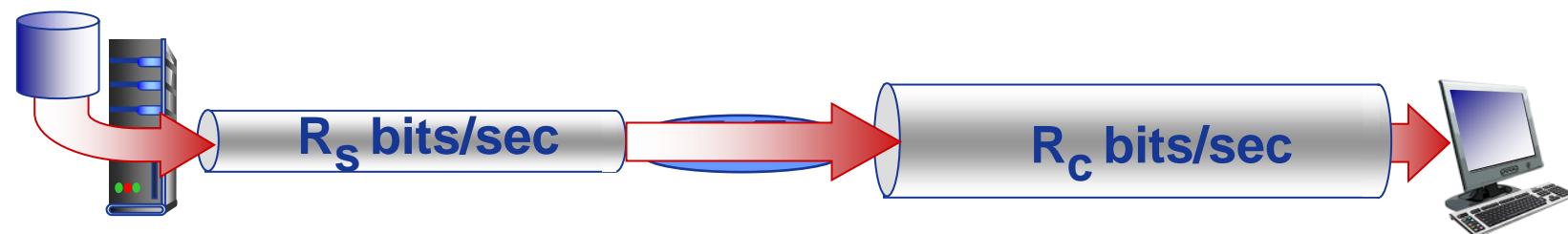
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

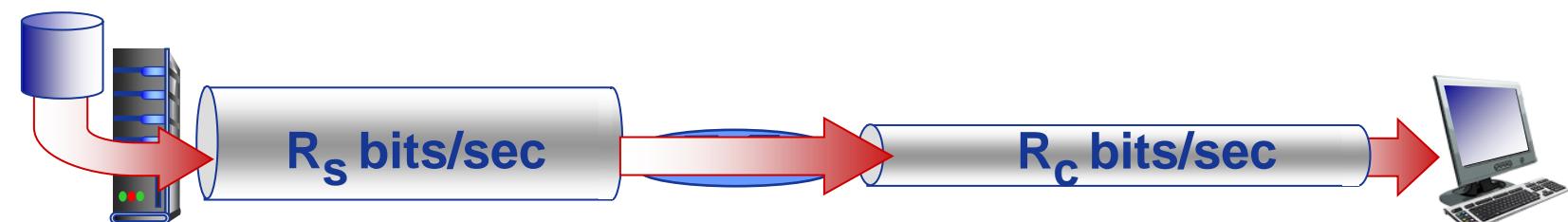
1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

- ❖ 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，限制端到端最大吞吐量的链路。



吞吐量: Internet场景

1.1 计算机网络基本概念

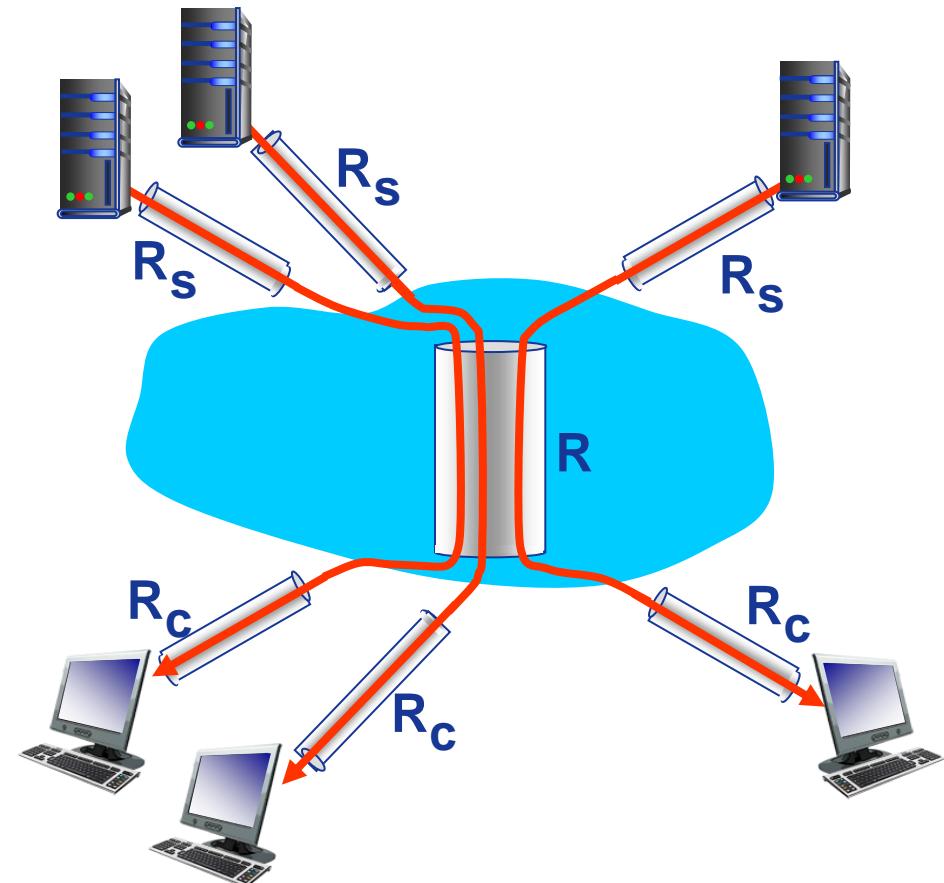
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



- 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



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

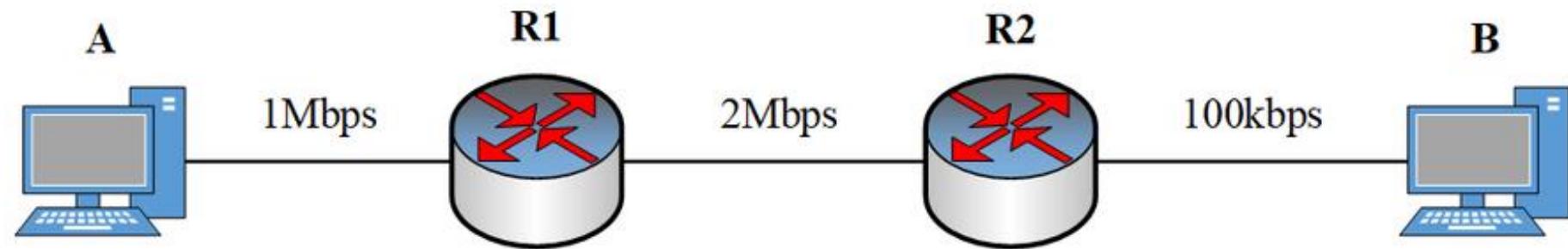
1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



例题

【例2】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，为什么？
(注： $1k=10^3$, $1M=10^6$)



1.1 计算机网络基本概念

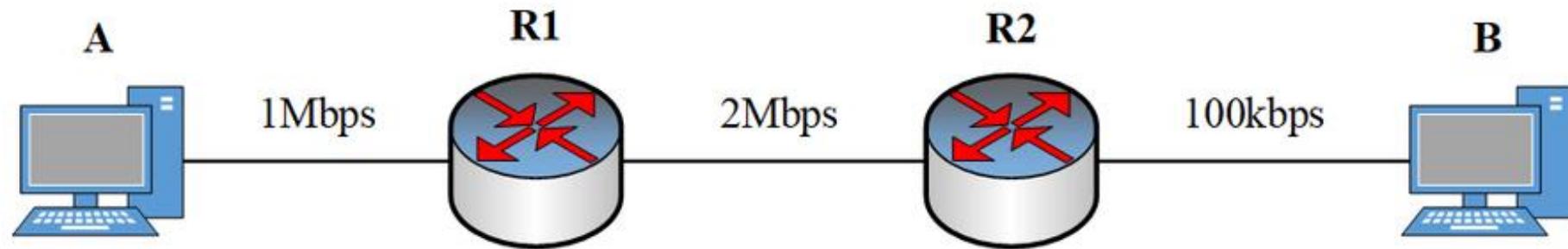
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

例题

【例2】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： $TH = \min(1\text{Mbps}, 2\text{Mbps}, 100\text{kbps}) = 100\text{kbps}$ ；



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

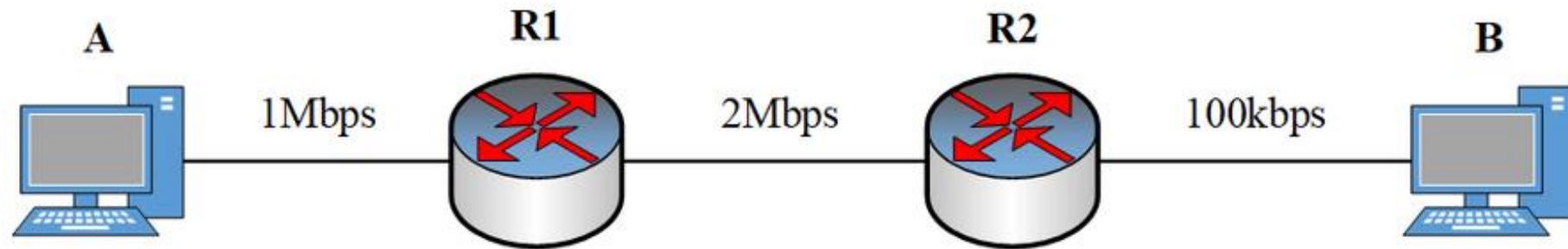
1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



例题

【例2】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： $T=4\times8\times10^6/(100\times10^3)=320s$ ；



例题3

1.1 计算机网络基本概念

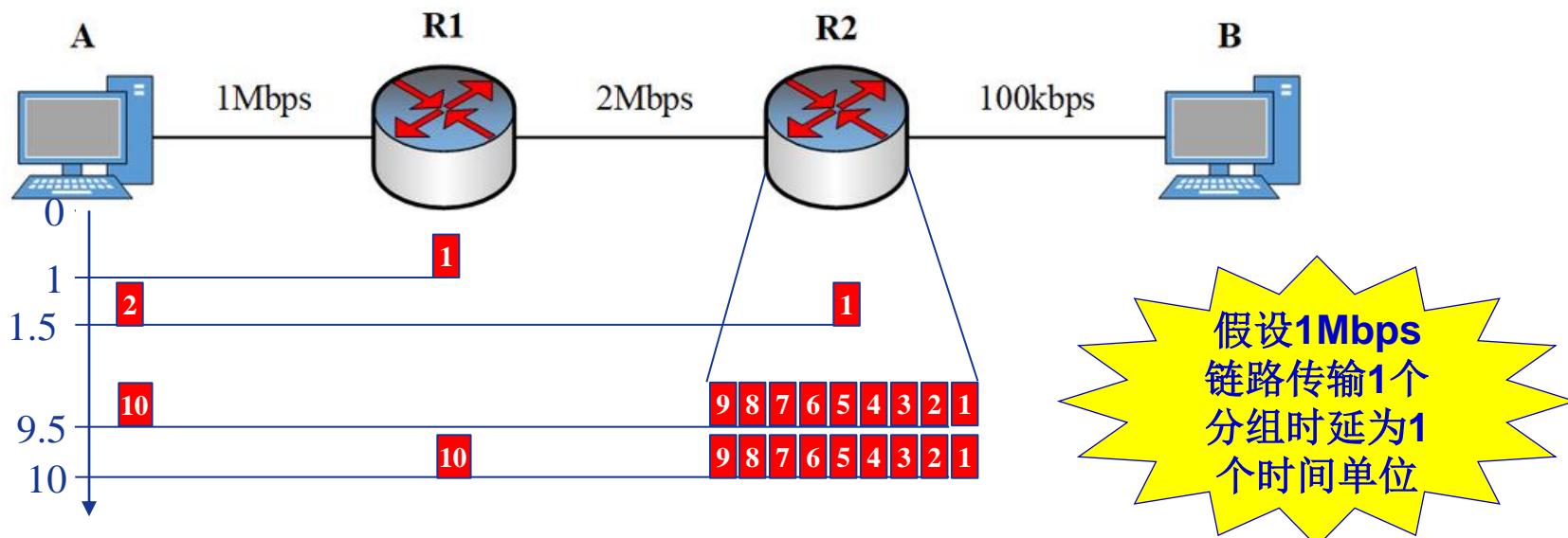
1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



【例2】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1Mbps、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。

单选题 1分

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标



在分组交换网络中，主要取决于网络拥塞程度的时间延迟是

- A 结点处理时延
- B 排队时延
- C 传输时延
- D 传播时延

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

1.5 计算机网络体系结构

聂生顺



为什么需要计算机网络体系结构?

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 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:

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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



❖ 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？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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**



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



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？



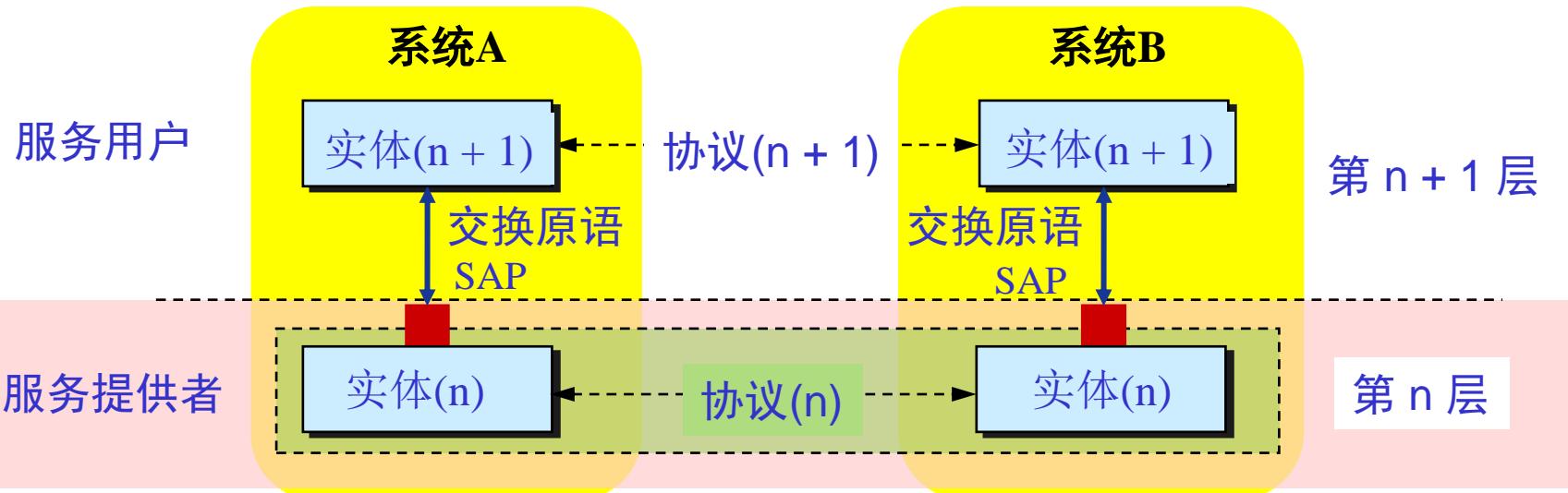
分层网络体系结构基本概念

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

- ❖ 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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

- 7: **应用层 (Application)**
- 6: **表示层 (Presentation)**
- 5: **会话层 (Session)**
- 4: **传输层 (Transport)**
- 3: **网络层 (Network)**
- 2: **数据链路层 (Data link)**
- 1: **物理层 (Physical)**



OSI 参考模型解释的通信过程

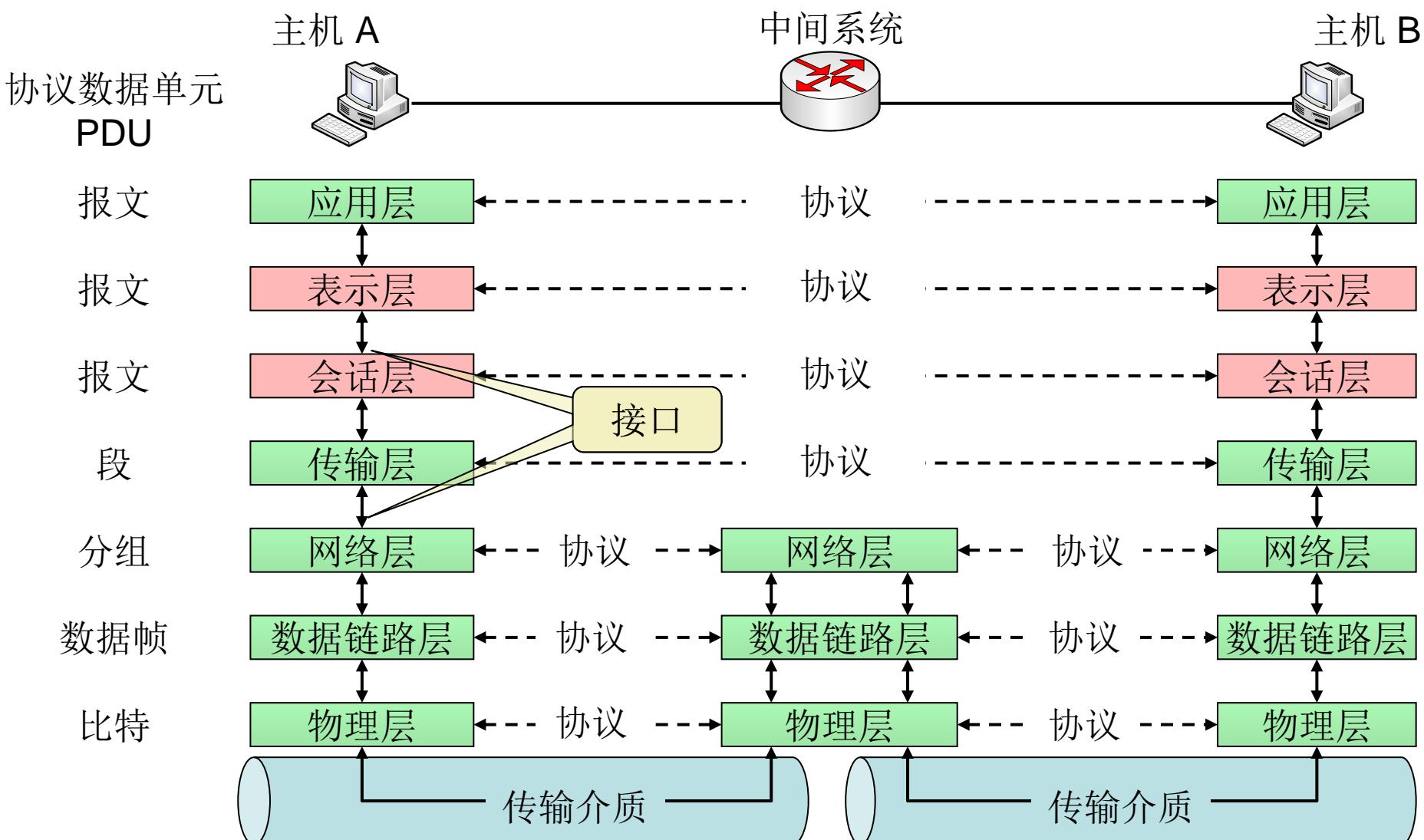
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构





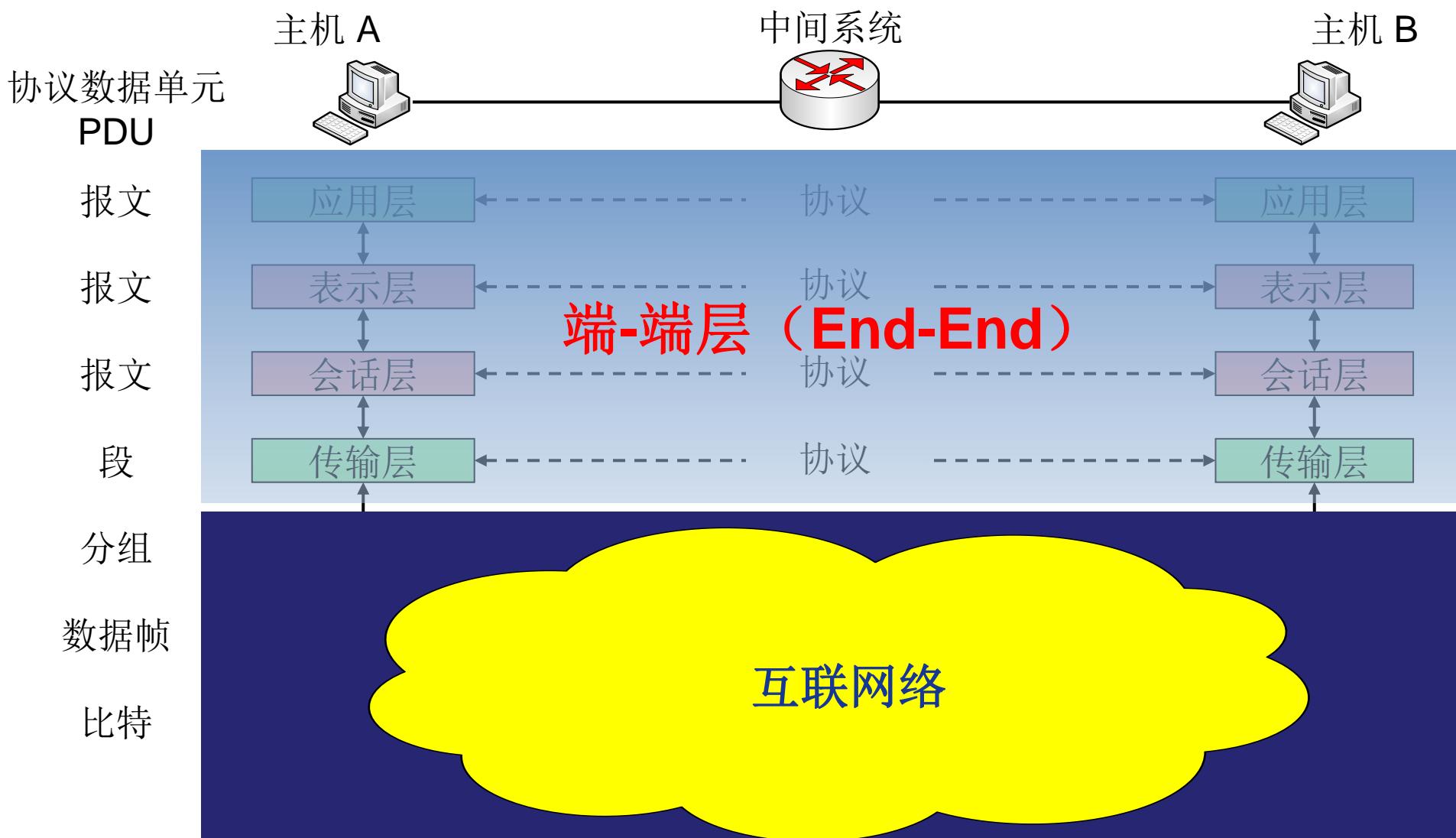
OSI 参考模型解释的通信过程

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



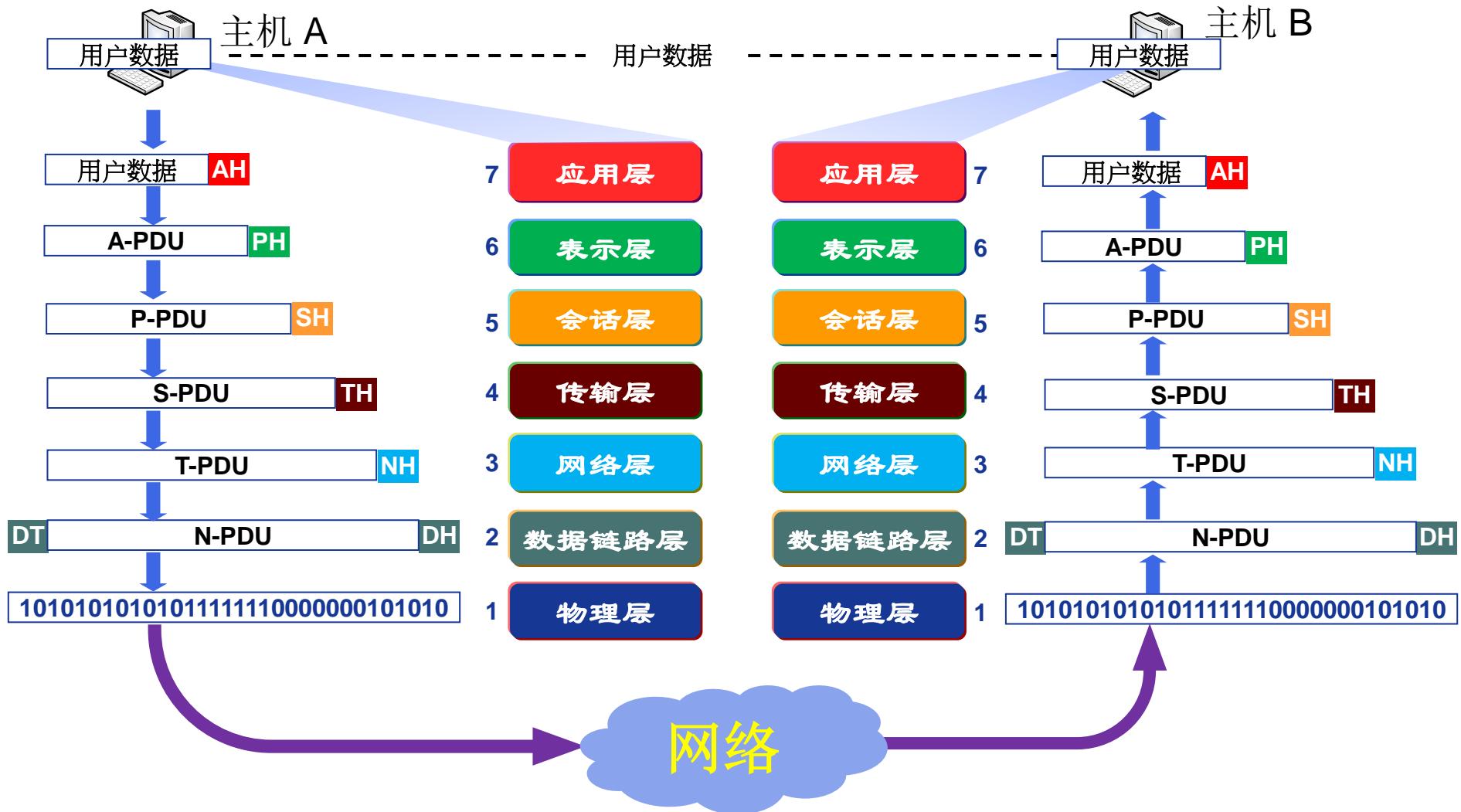
OSI 参考模型数据封装与通信过程

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



为什么需要数据封装？

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

❖ 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

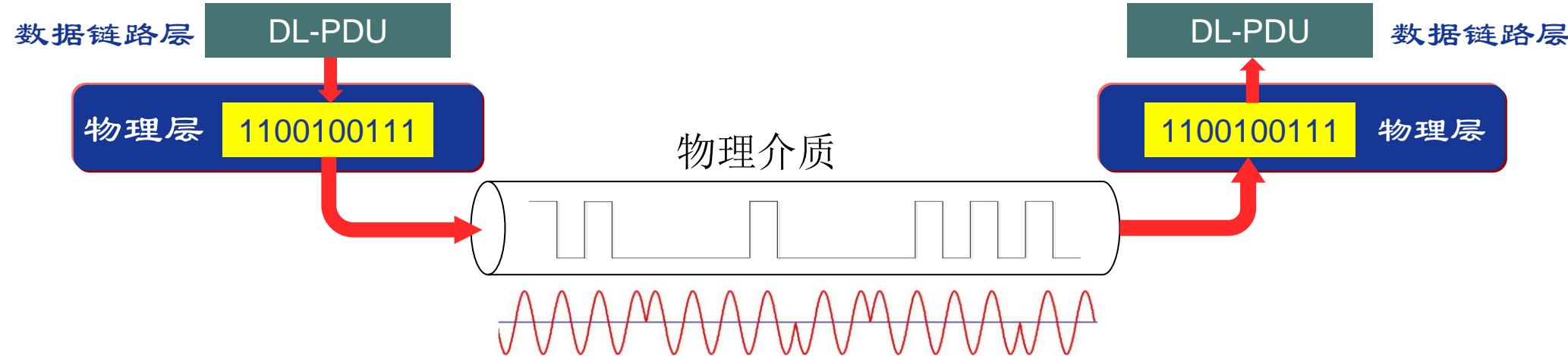
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

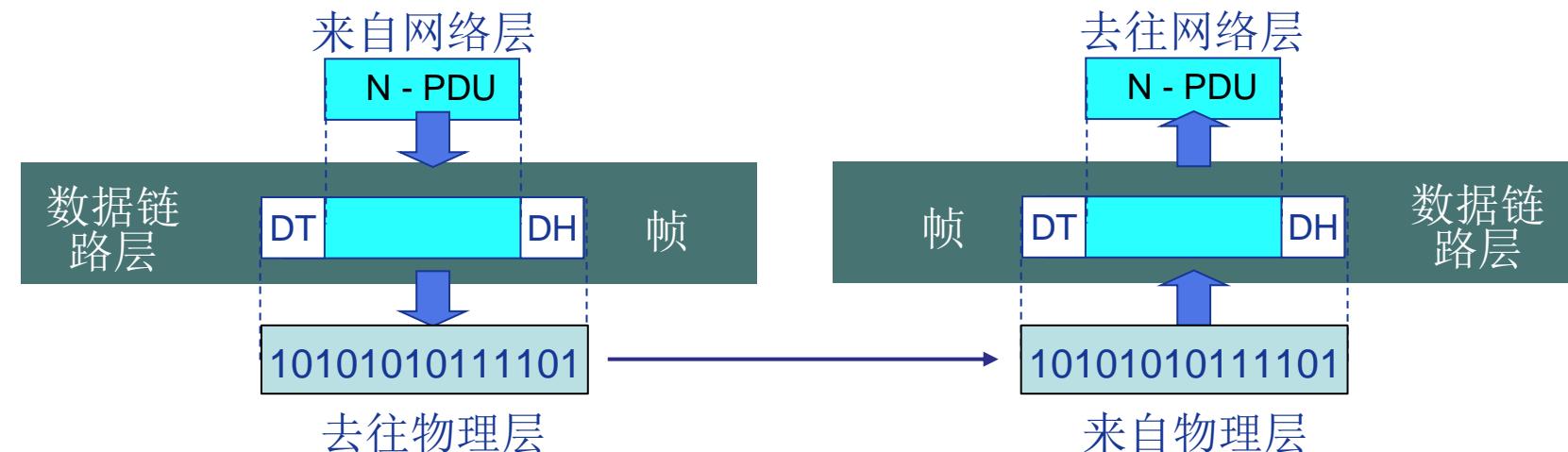
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

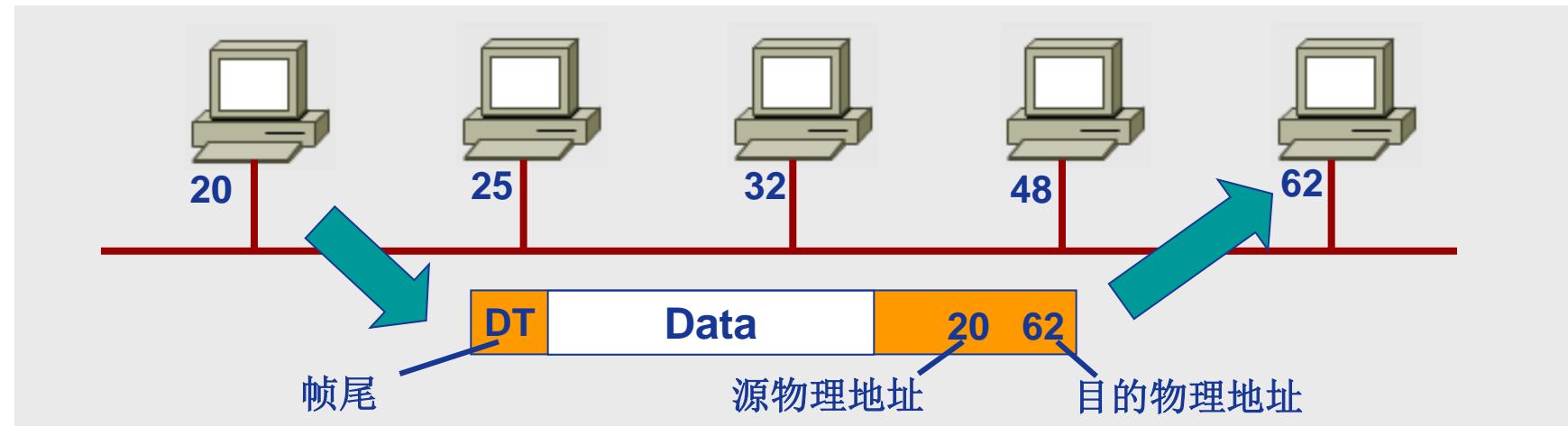
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

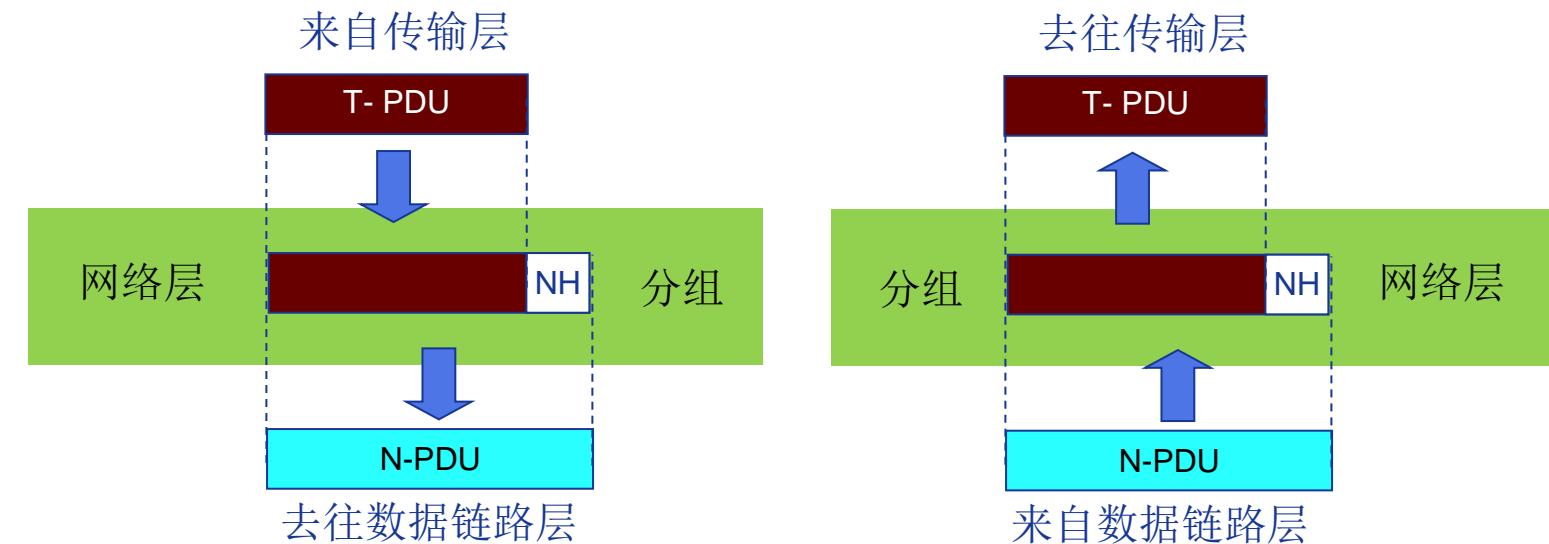
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

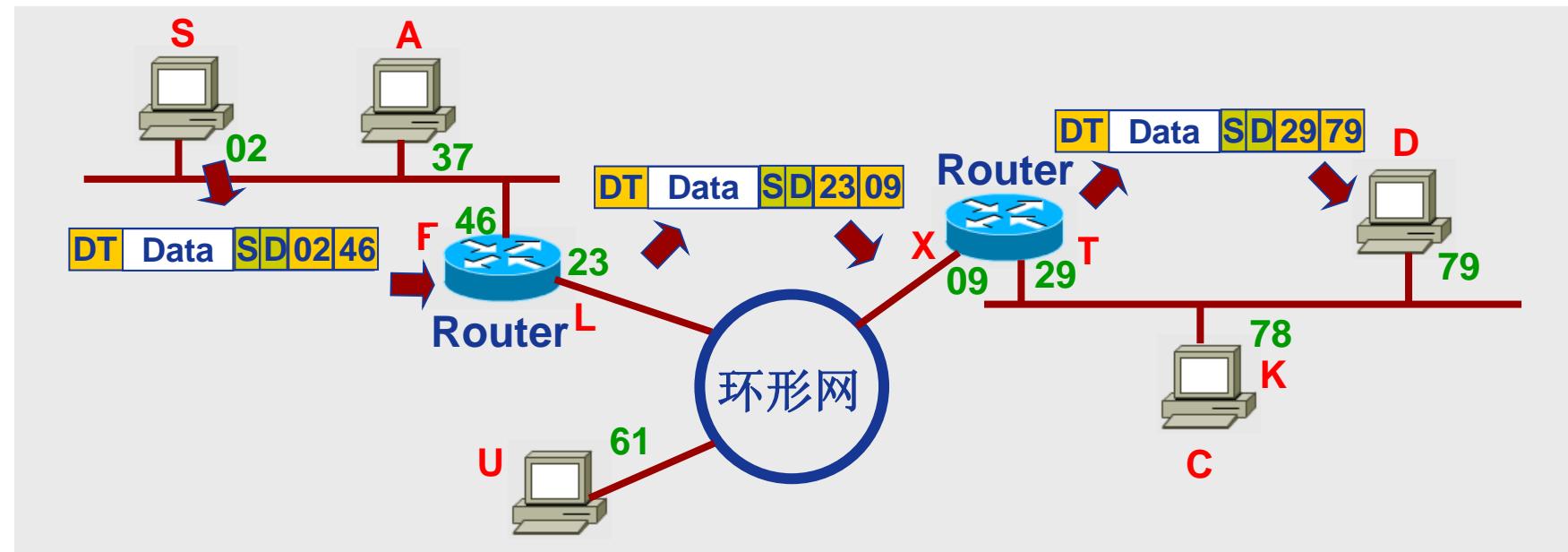
1.5 计算机网络体系结构



❖ 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)





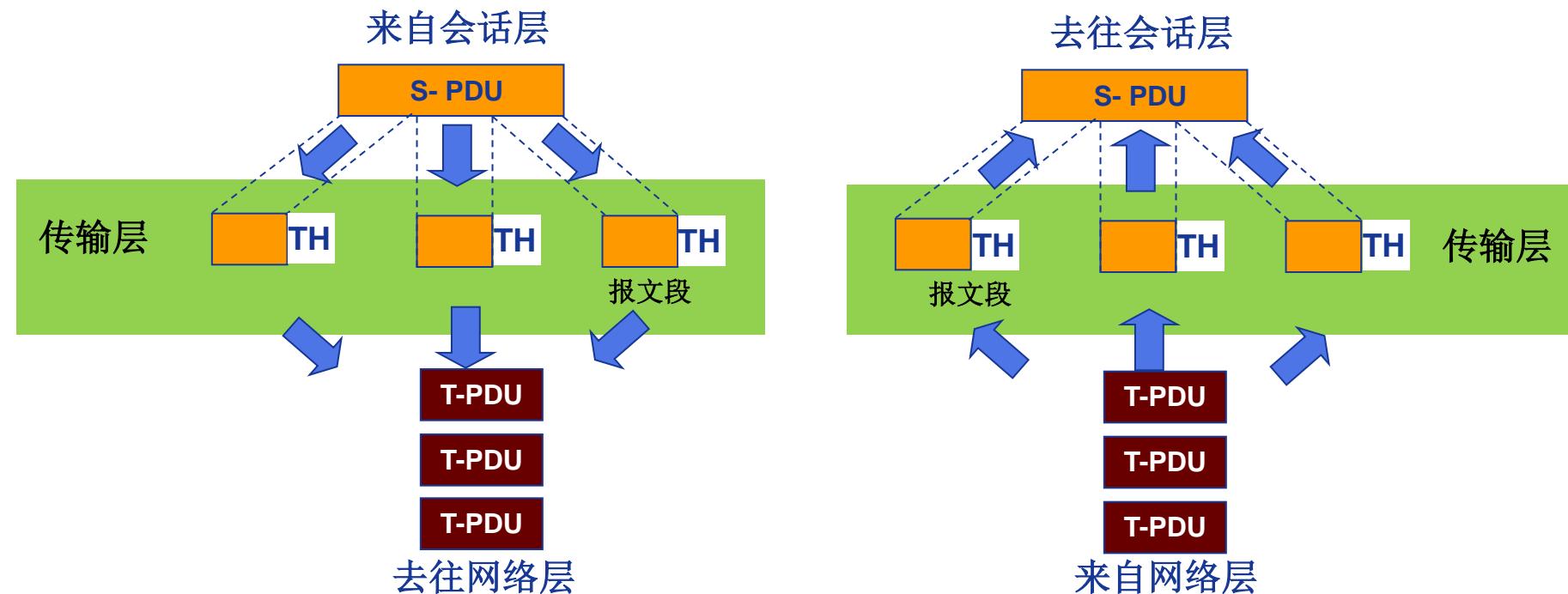
传输层功能

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

负责源-目的（端-端）的（进程间）完整报文传输



传输层功能

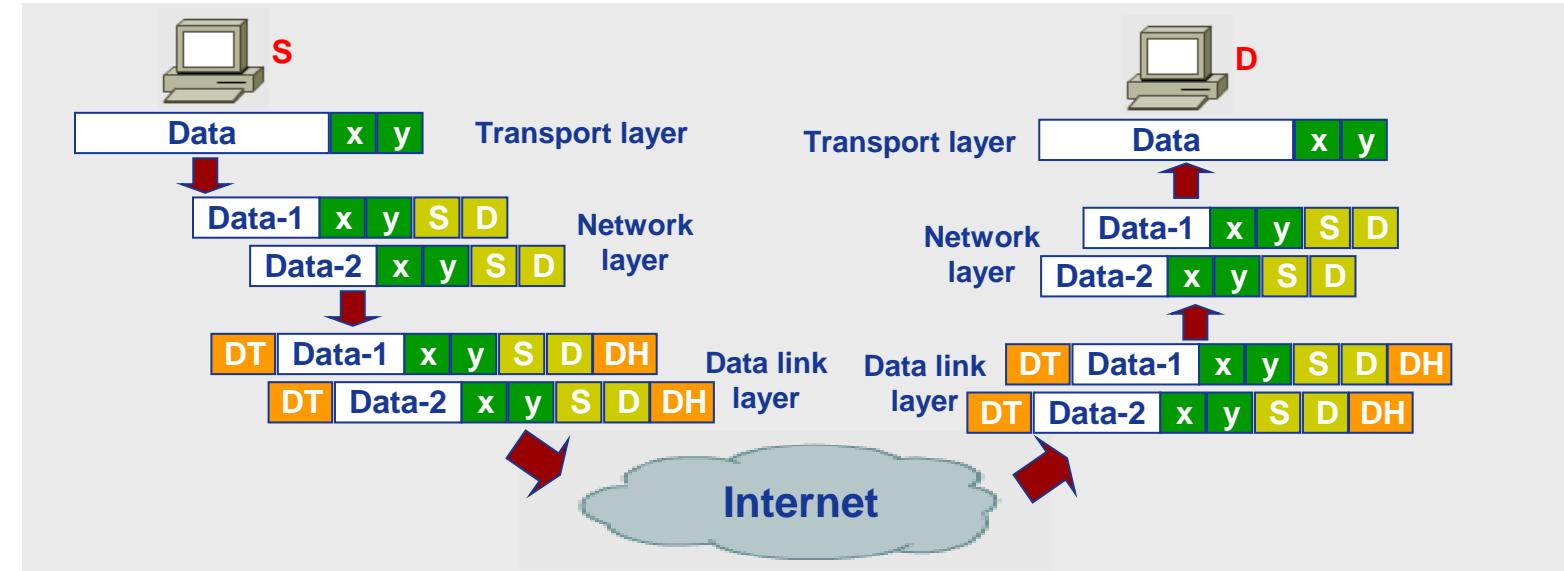
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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



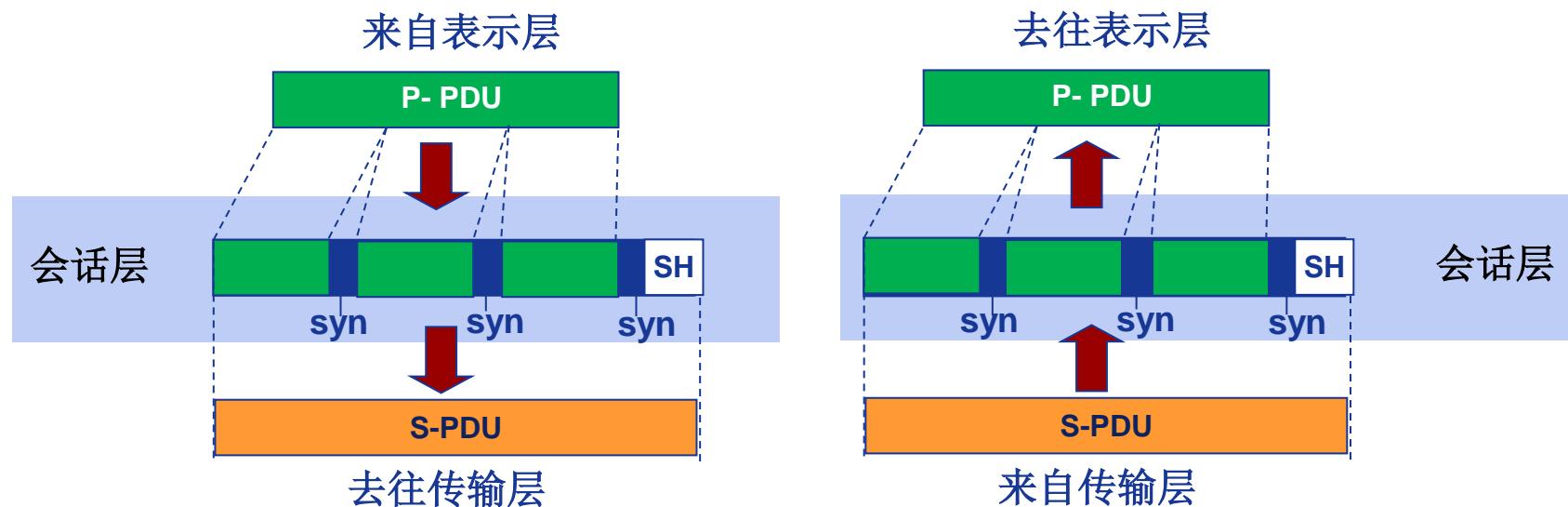
会话层功能

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

❖ 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



1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

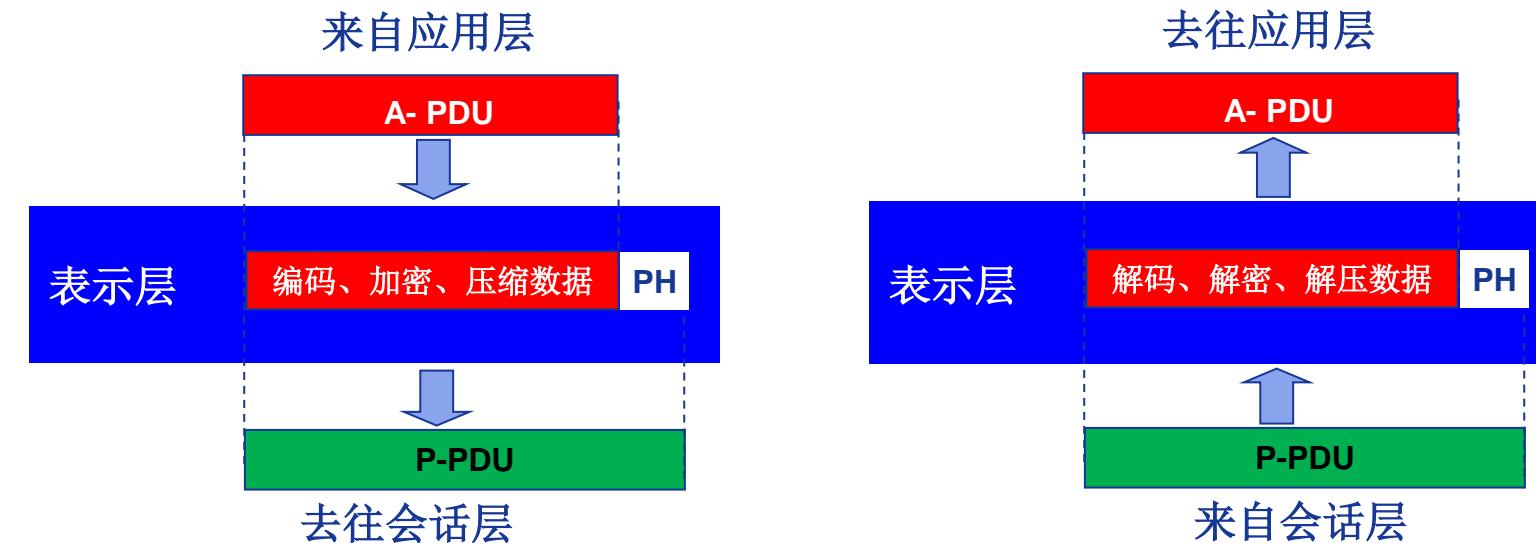
1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



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

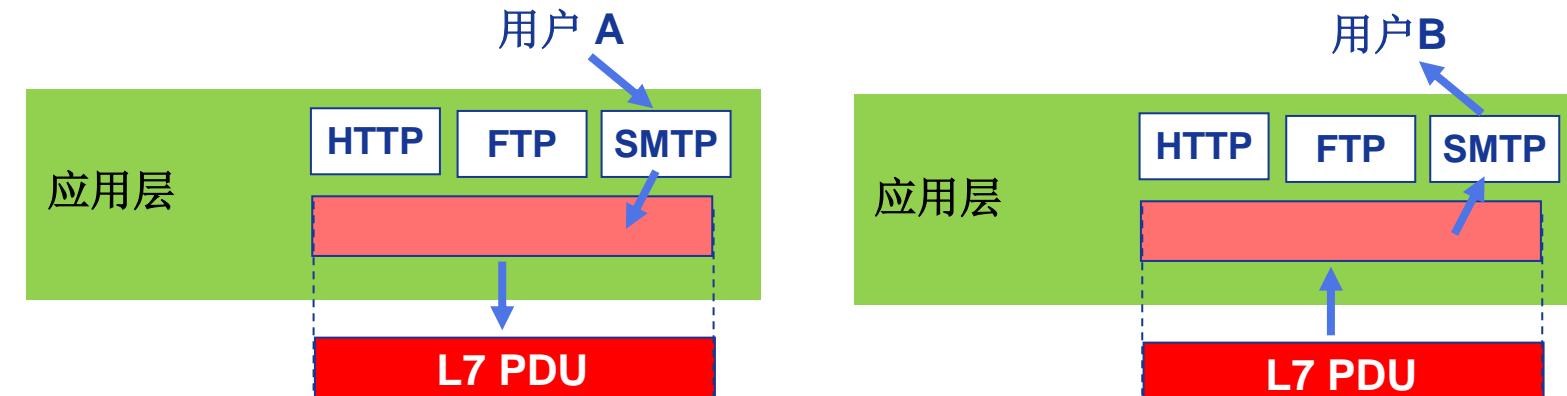
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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模型

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

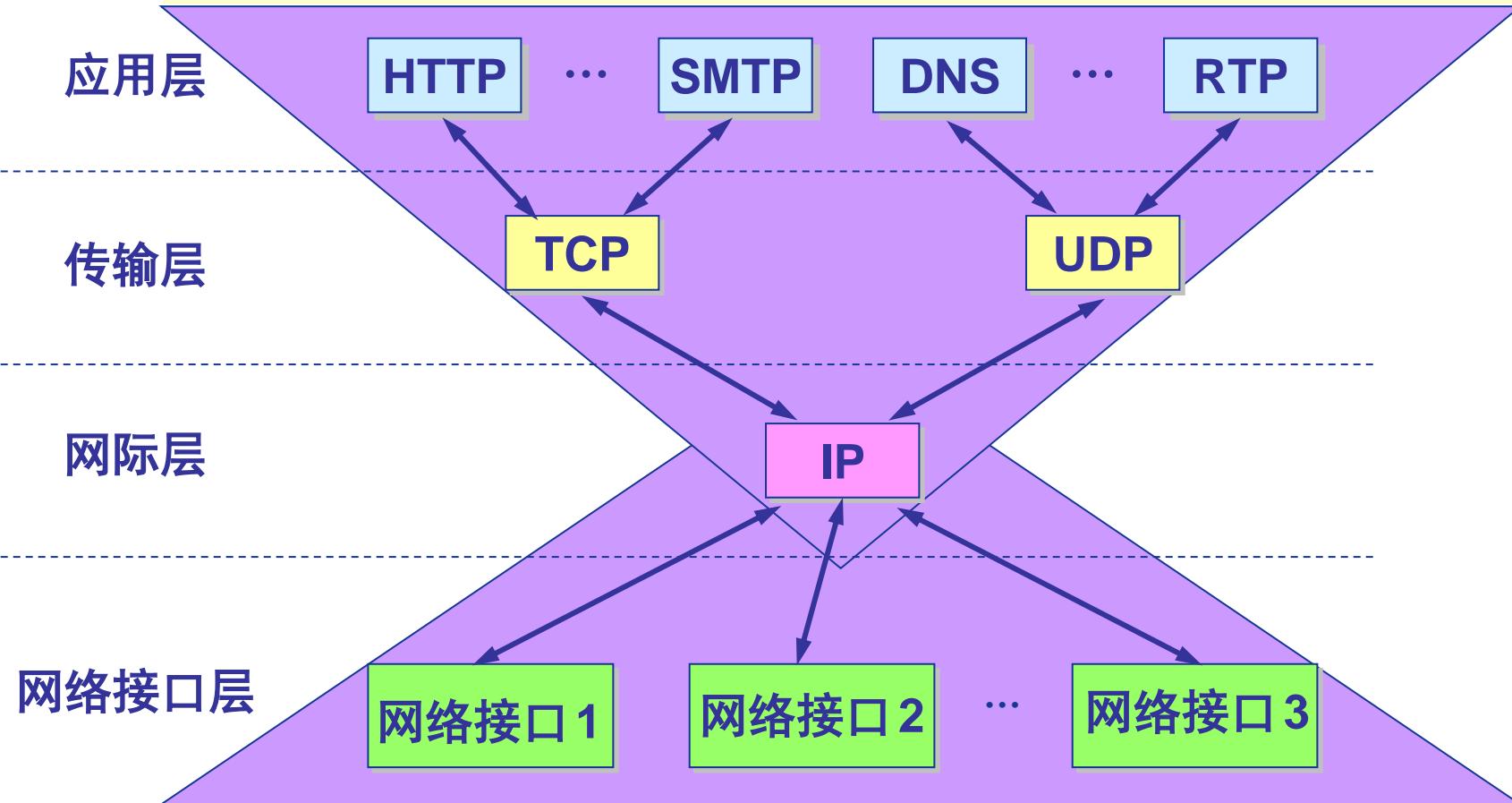
1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



IP over Everything

IP 可应用到各式各样的网络上





5层参考模型

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



- ❖ 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

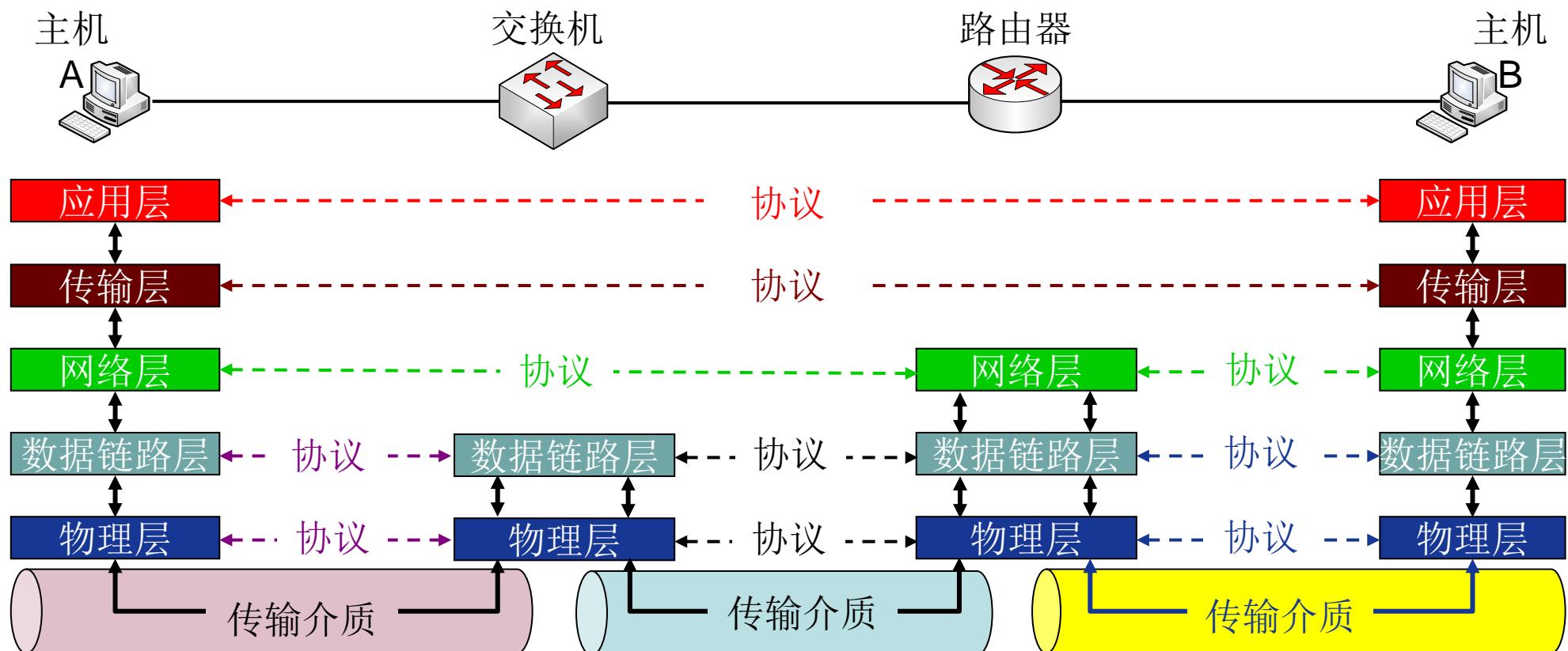
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构





5层模型的数据封装

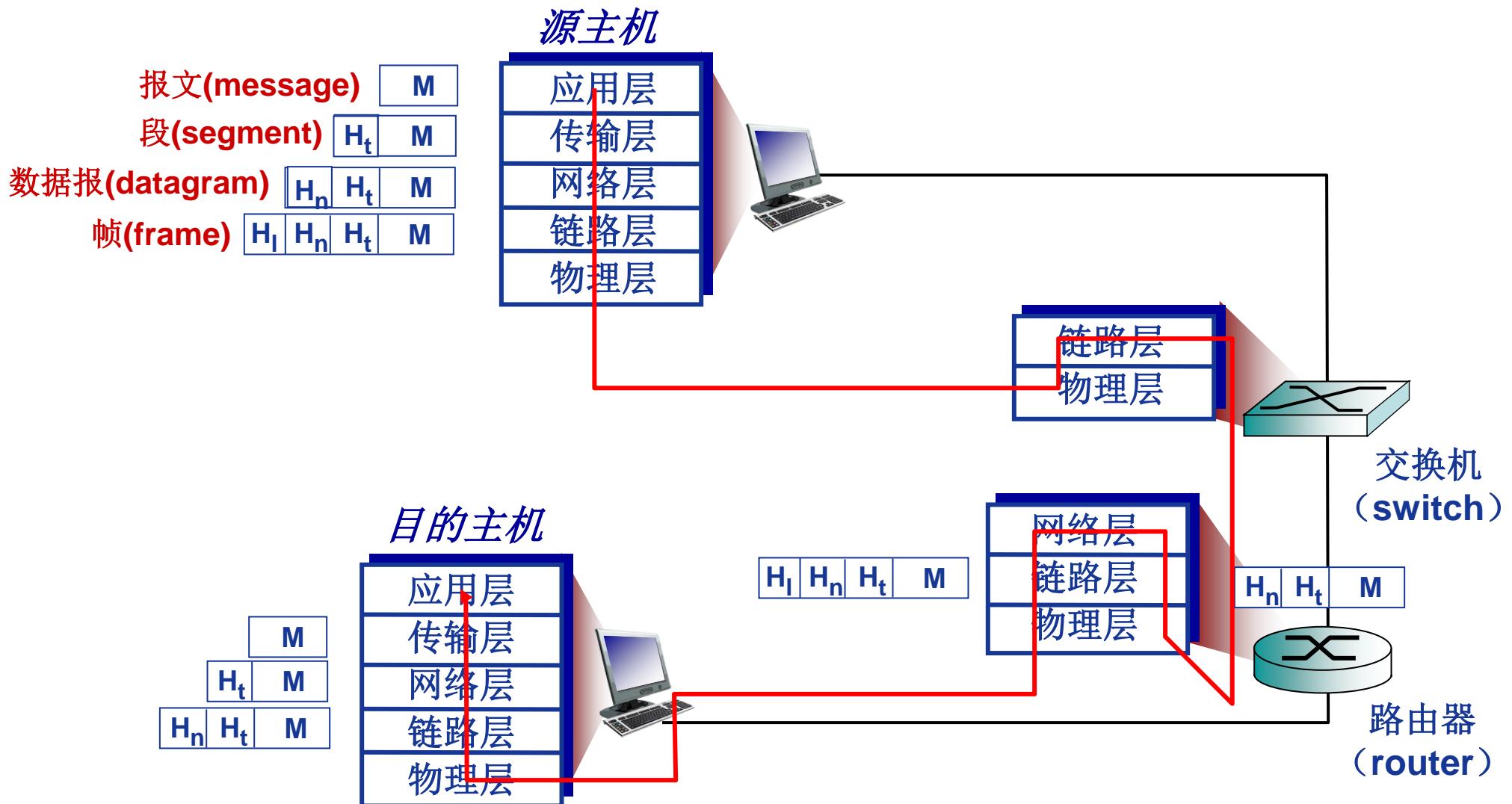
1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



单选题 1分

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构



在OSI参考模型中，自下而上第一个提供端到端服务的层次是

- A 数据链路层
- B 传输层
- C 会话层
- D 应用层

提交



1.6 计算机网络发展历史（略）

聂生顺



计算机网络与Internet发展历史

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

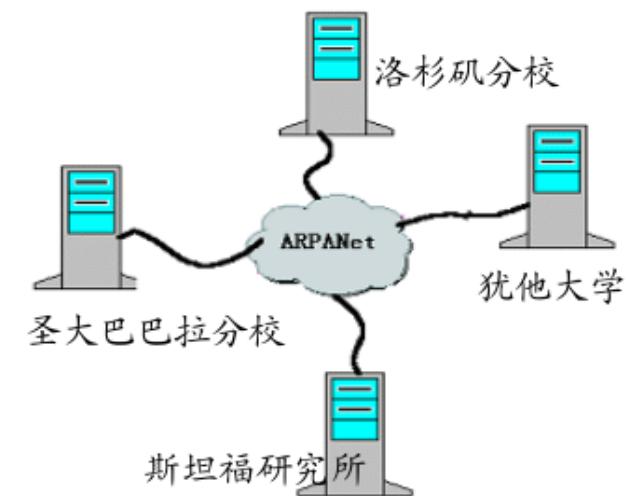
1.5 计算机网络体系结构

1.6 计算机网络发展历史



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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

1.6 计算机网络发展历史



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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

1.6 计算机网络发展历史



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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

1.6 计算机网络发展历史



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

1.1 计算机网络基本概念

1.2 计算机网络结构

1.3 数据交换

1.4 计算机网络性能指标

1.5 计算机网络体系结构

1.6 计算机网络发展历史



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）



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！

聂兰顺