

计算机网络



上课时间：每周一 8:00-9:40、周三 10:00-11:40

上课地点：计算机大楼408

研讨课：每周一 10:00-11:40

实验课：每周三 8:00-9:40

答疑时间和地点：周一18:00-19:40 计算机大楼407

曹晨红

caoch@shu.edu.cn

课程的任务、目的和基本要求



- 了解计算机网络的基本概念
- 掌握计算机网络各层协议的基本工作原理及其所采用的技术
- 学会计算机网络的一些基本设计方法
- 对典型计算机网络（Internet）的特点和具体实现有基本印象
- 为以后计算机网络及其应用的专题学习和研究打下基础
- 实验部分：验证和设计（网络的基本配置、交换机配置、路由器配置等）

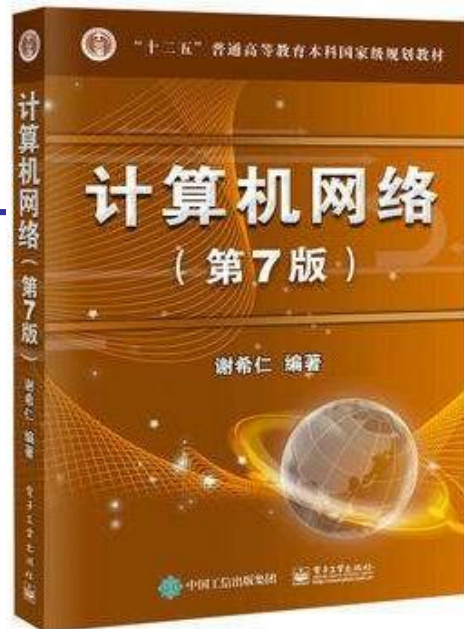
教材及参考书目

■ 教材

- 谢希仁，《计算机网络》（第7版），电子工业出版社

■ 参考书目

- 《Computer Networking: A Top-Down Approach》James Kurose and Keith Ross, 6th edition
- W.Richard Stevens等，《TCP/IP详解》，机械工业出版社
- Andrew S. Tanenbaum，《计算机网络》，清华大学出版社
- Douglas E. Comer，《计算机网络与互联网》，电子工业出版社
- Douglas E. Comer，《用TCP/IP进行网际互联，第1卷》，电子工业出版社



课程其他方面



■ 课程作业

- 不定期布置，总共4-5次课后作业

■ 学时和学分

- 6学分
- 上课40学时
- 实验课，20学时
- 研讨课，10学时

■ 考试评分

- 40%平时分（考勤、实验、作业、研讨）
- 60%最后考试（闭卷）

课程内容



- 第一章 概述
- 第二章 物理层
- 第三章 数据链路层
- 第四章 网络层
- 第五章 运输层
- 第六章 应用层

第 1 章 概述



第1章 概述



- 1.1 计算机网络与互联网
 - 1.1.1 互联网的边缘部分
 - 1.1.2 互联网的核心部分
 - 1.1.3 互联网时代
- 1.2 计算机网络的分类
- 1.3 计算机网络的性能
- 1.4 计算机网络的体系结构（协议分层）

1.1 计算机网络与互联网



- 计算机网络的精确定义并未统一。
- 较好的定义：

计算机网络主要是由一些通用的、**可编程的硬件互连**而成的，而这些硬件并非专门用来实现某一特定目的（例如，传送数据或视频信号）。这些可编程的硬件能够用来传送多种不同类型的数据，并能支持广泛的和日益增长的应用。

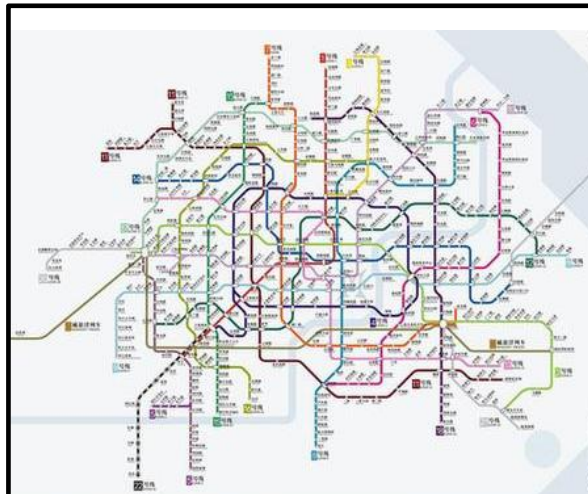
“可编程的硬件”表明这种硬件一定包含有中央处理器 (CPU)

1.1 计算机网络与互联网



■ 根据这个定义：

- 计算机网络所连接的硬件，并不限于一般的计算机，而是包括了智能手机。



由若干**结点(node)**和连接这些结点的**链路(link)**组成

计算机网络的重要功能



■ 连通性 (connectivity)

- 使上网用户之间都可以交换信息（数据，以及各种音频视频），好像这些用户的计算机都可以彼此直接连通一样。

■ 共享 (Sharing)

- 指信息共享、资源共享。
- 资源共享的含义是多方面的。可以是信息共享、软件共享，也可以是硬件共享。
- 由于网络的存在，这些资源好像就在用户身边一样，方便使用。

1.1 计算机网络与互联网



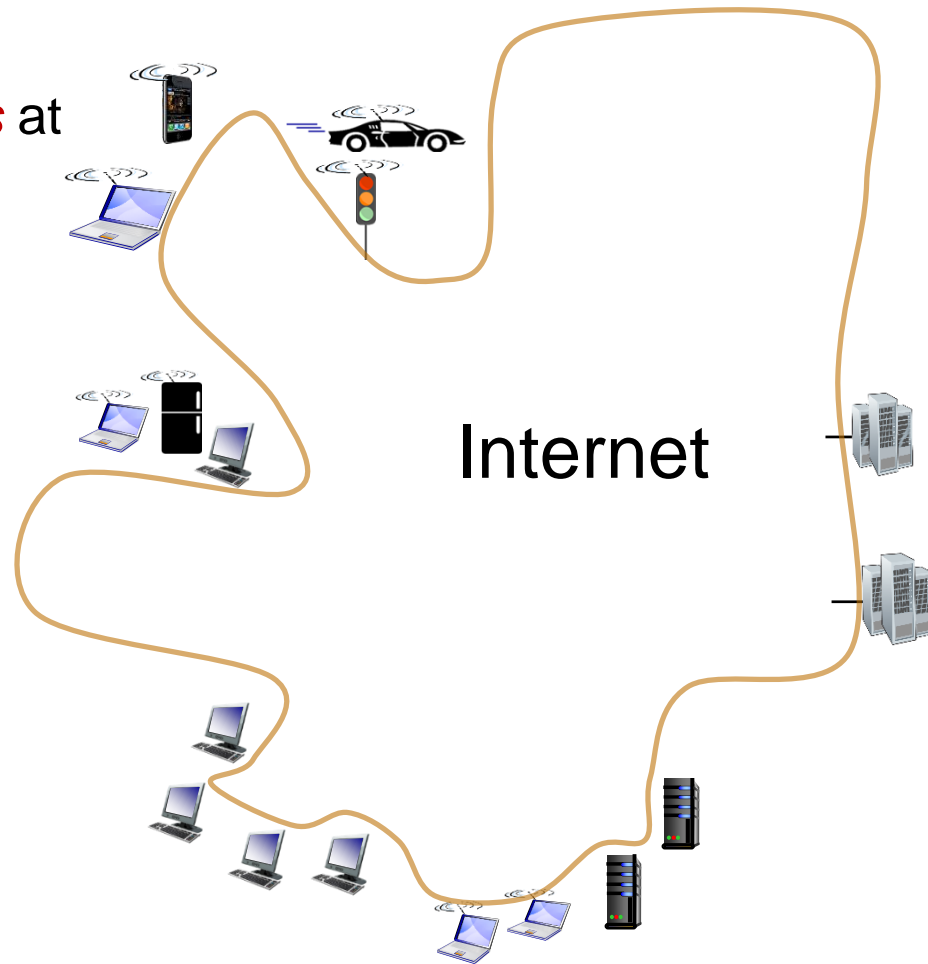
- 上“网”
 - 互联网 (**Internet**)
- 什么是互联网? (**What is the Internet?**)

互联网：“解构”视角



Billions of connected computing *devices*:

- *hosts* = end systems
- running *network apps* at Internet's "edge"



有趣的互联网“端”设备



Amazon Echo



Internet refrigerator



IP picture frame



Pacemaker & Monitor



Tweet-a-watt:
monitor energy use



Security Camera



Slingbox: remote
control cable TV



Web-enabled toaster +
weather forecaster



AR devices



bikes



cars



Internet phones



Gaming devices



sensorize
bed
mattress



Fitbit



scooters

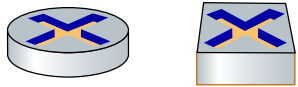
Others?

互联网：“解构”视角



Billions of connected computing *devices*:

- *hosts* = end systems
- running *network apps* at Internet's "edge"



Packet switches: forward packets (chunks of data)

- *routers, switches*

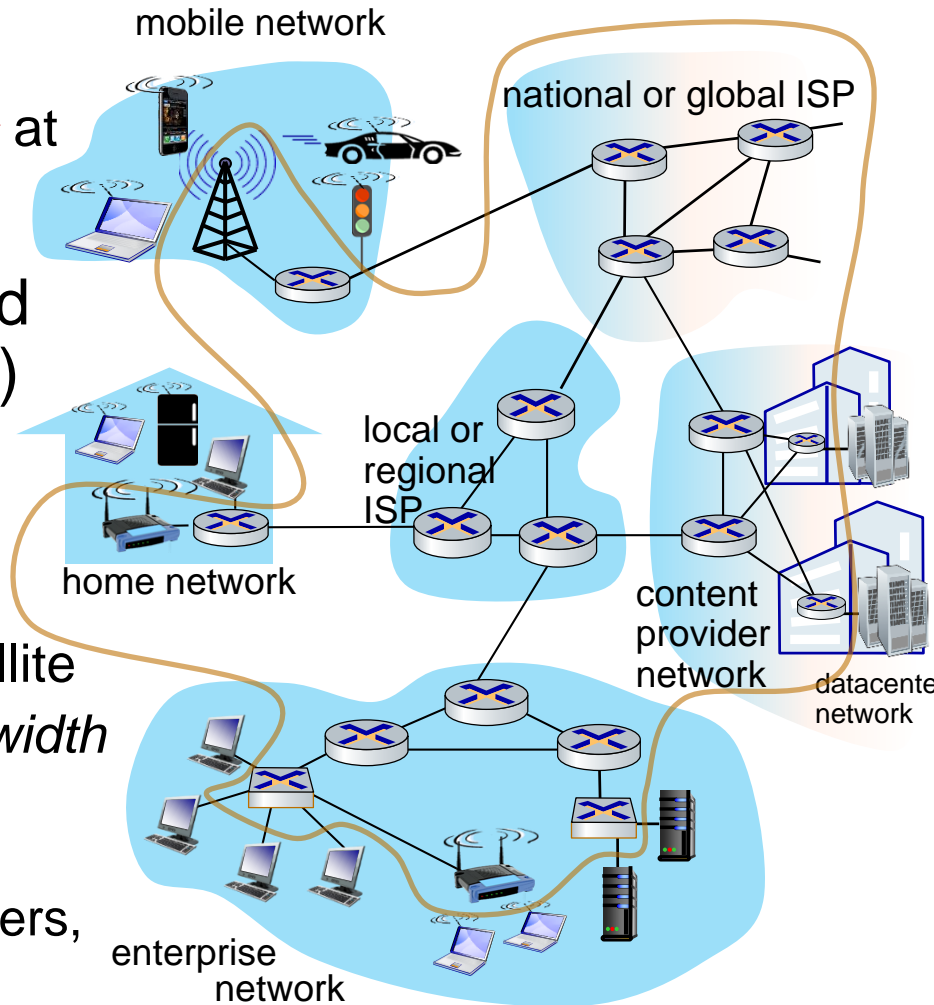


Communication links

- fiber, copper, radio, satellite
- transmission rate: *bandwidth*

Networks

- collection of devices, routers, links: managed by an organization



互联网：“解构”视角



■ 互联网：一种“网络的网络”

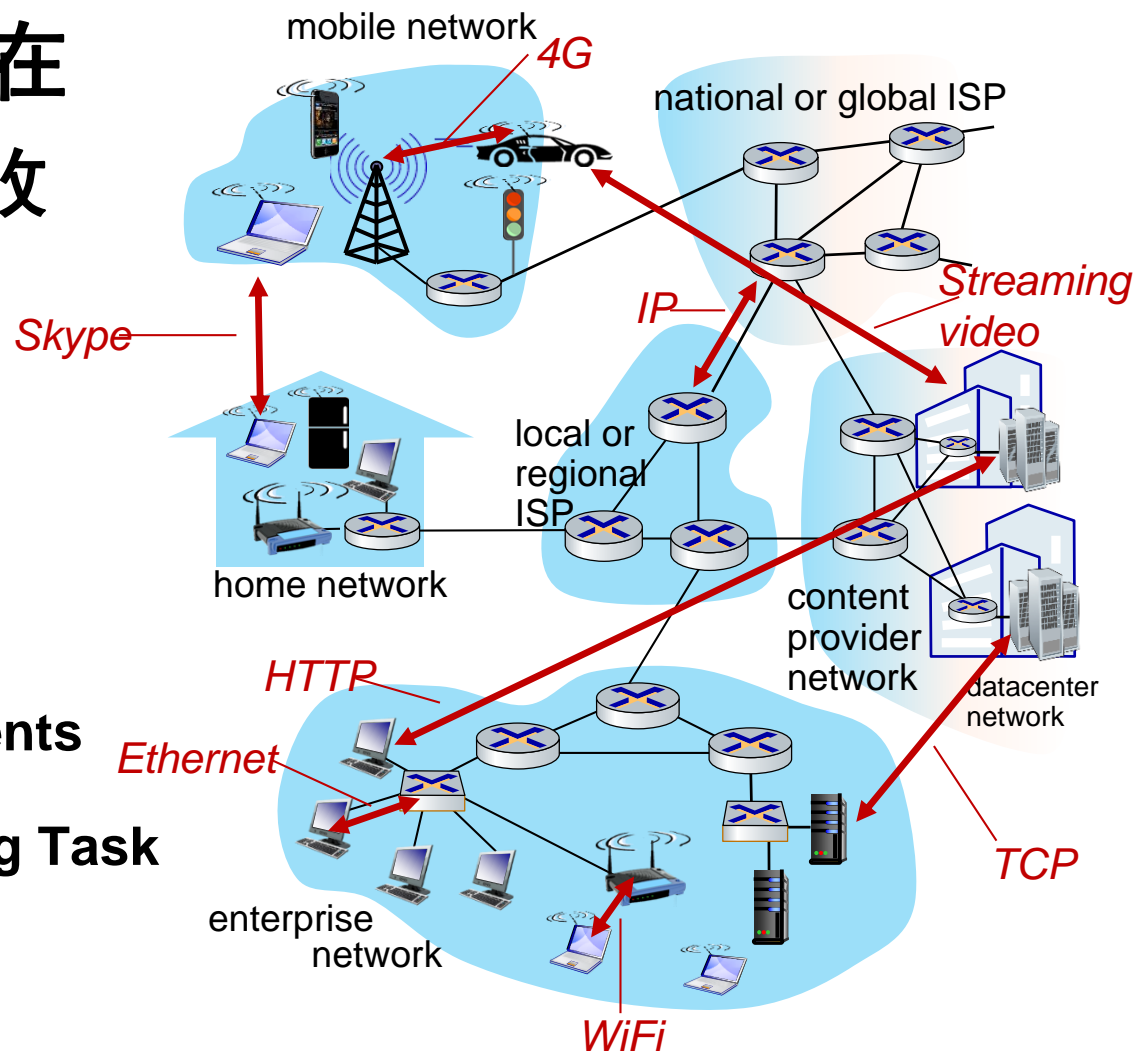
■ 互联网中协议无处不在

■ 控制消息的发送、接收

- e.g., HTTP (Web), streaming video, Skype, TCP, IP, WiFi, 4G, Ethernet

■ 互联网标准

- RFC: Request for Comments
- IETF: Internet Engineering Task Force

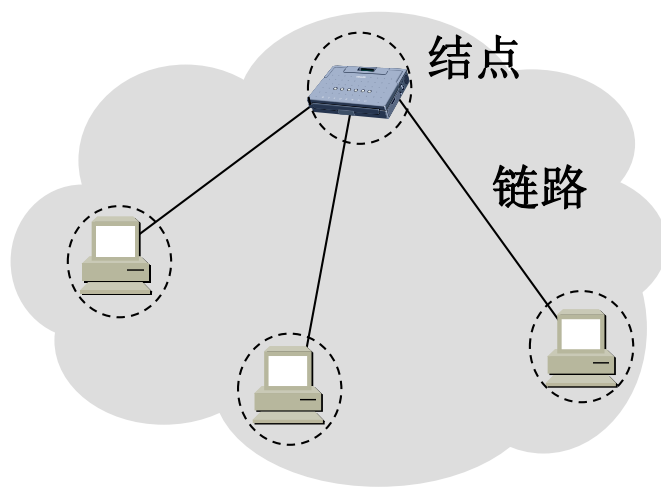
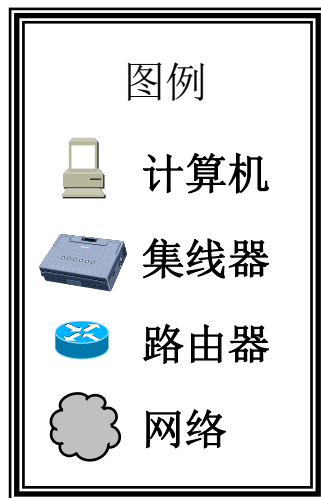


网络、互连网、互联网

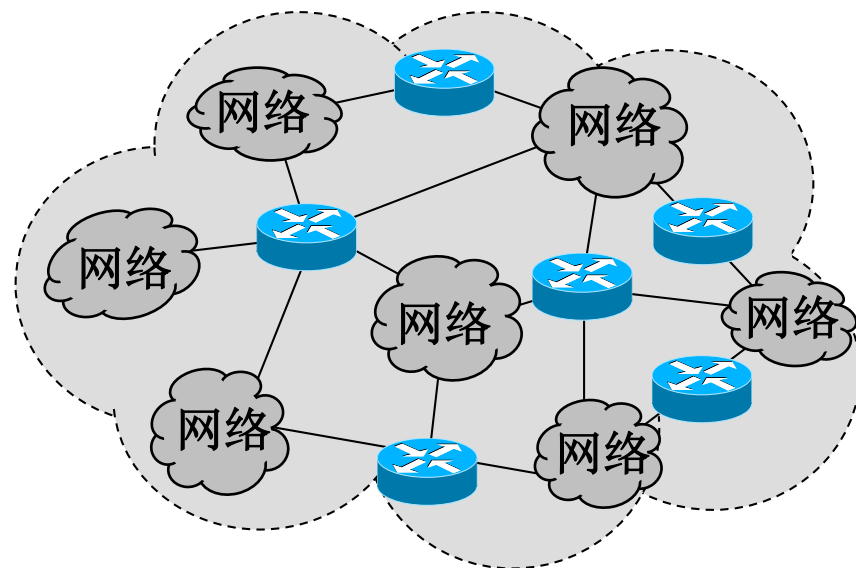


计算机网络（网络）

互连网（网络的网络）



(a)



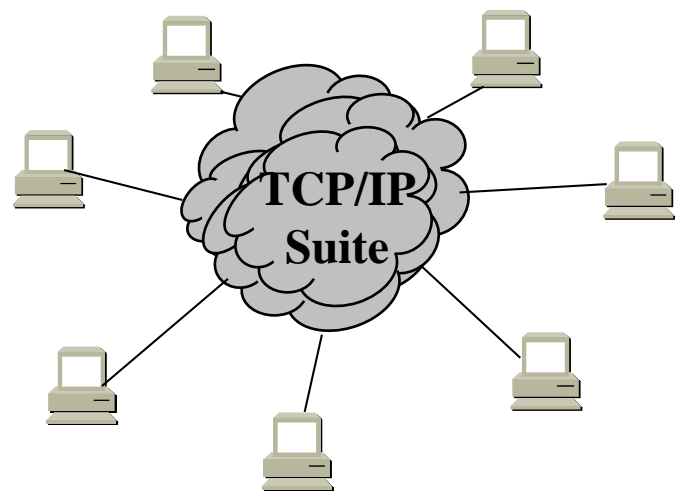
(b)

简单的网络 (a) 和 由网络构成的互连网 (b)

网络、互连网、互联网



互联网 (Internet)



(c)

■ 网络

- 许多计算机连接在一起。

■ 互连网 (internet)

- 通用名词，泛指在由多个计算机网络通过路由器互连而成的网络。

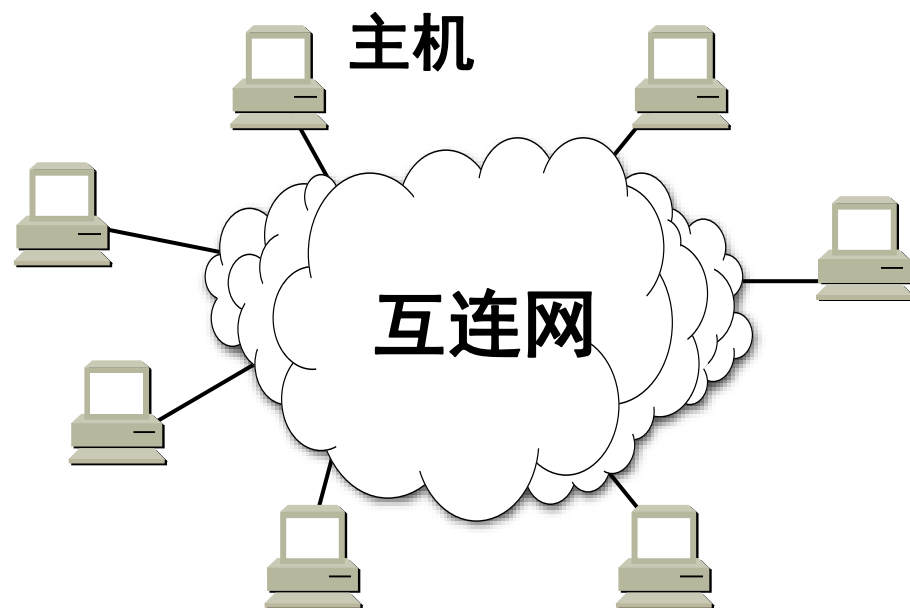
■ 互联网 (Internet)

- 专用名词，全球最大的一个互连网。它由美国阿帕网 (ARPANET) 发展而成，主要采用TCP/IP协议作为通信的规则。

关于“云”



- 当使用一朵“云”来表示网络时，可能会有两种不同的情况：
 1. 云表示的网络已经包含了和网络相连的计算机。
 2. 云表示的网络里面就只剩下许多路由器和连接这些路由器的链路，把有关的计算机画在云的外面。习惯上，与网络相连的计算机常称为**主机 (host)**。



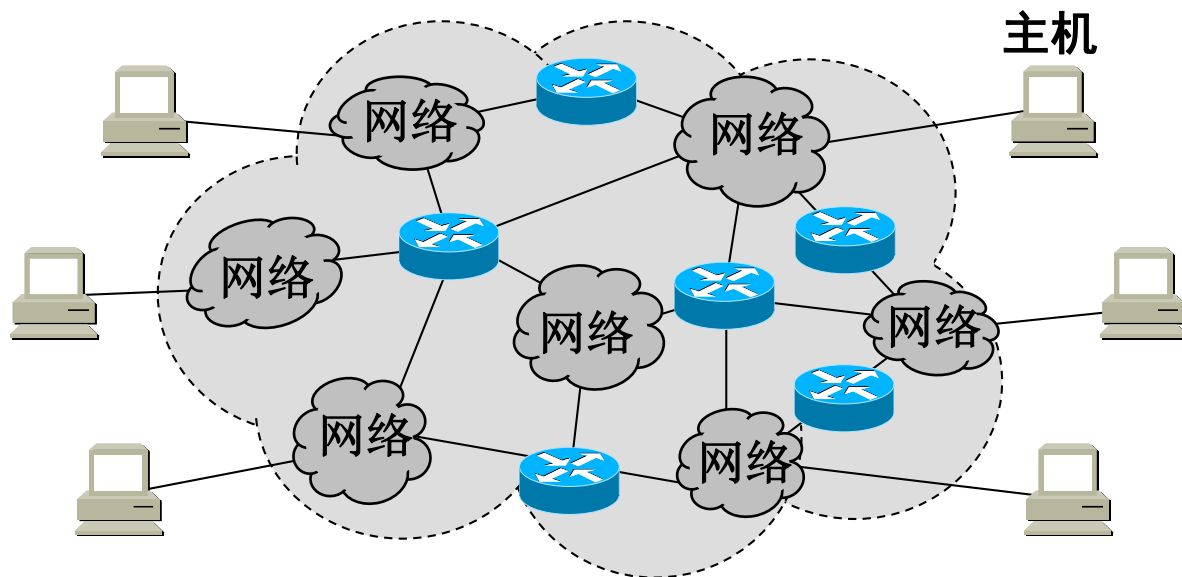
互连网与所连接的主机

基本概念要清楚



- **网络**把许多计算机连接在一起。
- **互连网**则把许多网络通过路由器连接在一起。
- 与网络相连的计算机常称为**主机**。

互连网（网络的网络）



主机可以是计算机，也可以是智能手机等智能机器。

互联网的组成



从互联网的工作方式上看，可以划分为两大块：

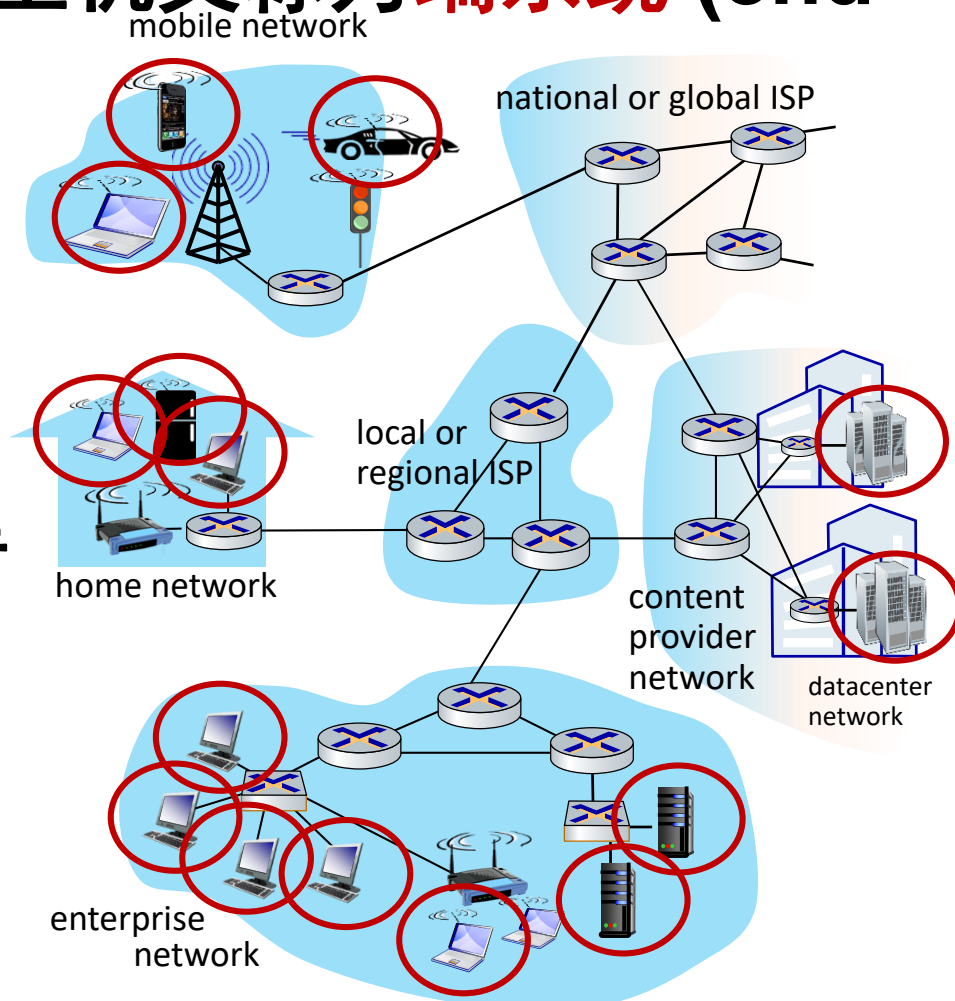
- (1) **边缘部分：** 由所有连接在互联网上的主机组成。这部分是用户直接使用的，用来进行通信（传送数据、音频或视频）和资源共享。
- (2) **核心部分：** 由大量网络和连接这些网络的路由器组成。这部分是为边缘部分提供服务的（提供连通性和交换）。

1.1.1 互联网的边缘部分



- 处在互联网边缘的部分就是连接在互联网上的所有的主机(hosts)。这些主机又称为端系统 (end systems)。

- 端系统：请求服务的客户(Client)或提供服务的服务器(Server)
- 服务器通常在数据中心里



端系统之间通信的含义



- “主机 A 和主机 B 进行通信” 实际上是指：
“运行在主机 A 上的某个程序和运行在主机 B 上的另一个程序进行通信”。

即“主机 A 的某个进程和主机 B 上的另一个进程进行通信”。
简称为“计算机之间通信”。

端系统之间的两种通信方式



端系统之间的通信方式通常可划分为两大类：

- **客户-服务器方式**（C/S 方式）

即 Client/Server 方式，简称为 C/S 方式。

- 发送电子邮件、信息检索

- **对等方式**（P2P 方式）

即 Peer-to-Peer 方式，简称为 P2P 方式。

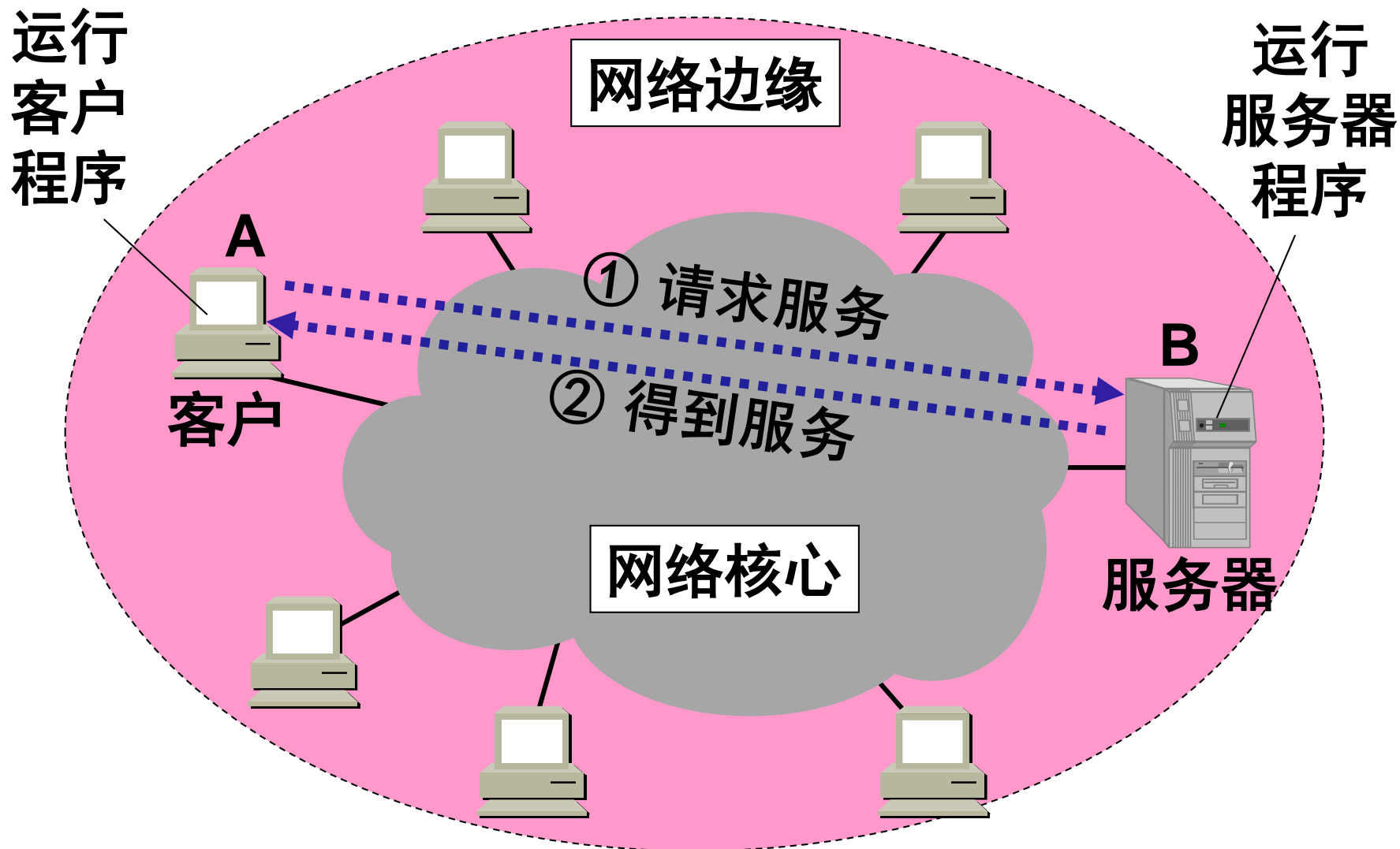
1. 客户-服务器方式



- **客户** (client) 和**服务器** (server) 都是指通信中所涉及的两个应用进程。
- 客户-服务器方式所描述的是进程之间服务和被服务的关系。
- 客户是**服务的请求方**，服务器是**服务的提供方**。

服务请求方和服务提供方都要使用网络核心部分所提供的服务。

客户-服务器工作方式



客户 A 向服务器 B 发出请求服务，服务器 B 向客户 A 提供服务

客户软件的特点



- 被用户调用后运行，在打算通信时主动向远地服务器发起通信（请求服务）。因此，客户程序必须知道服务器程序的地址。
- 不需要特殊的硬件和很复杂的操作系统。

服务器软件的特点



- 一种专门用来提供某种服务的程序，**可同时处理**多个远地或本地客户的请求。
- 系统启动后即自动调用并**一直不断地运行着**，**被动地等待**并接受来自各地的客户的通信请求。
因此，**服务器程序不需要知道客户程序的地址**。
- 一般需要强大的硬件和高级的操作系统支持。

客户与服务器的通信关系建立后，通信可以是双向的，客户和服务器都可发送和接收数据。

2. 对等连接方式



- **对等连接** (peer-to-peer, 简写为 **P2P**) 是指两个主机在通信时并不区分哪一个是服务请求方还是服务提供方。
- 只要两个主机都运行了对等连接软件 (P2P 软件), 它们就可以进行**平等的、对等连接通信**。
- 双方都可以下载对方已经存储在硬盘中的共享文档。

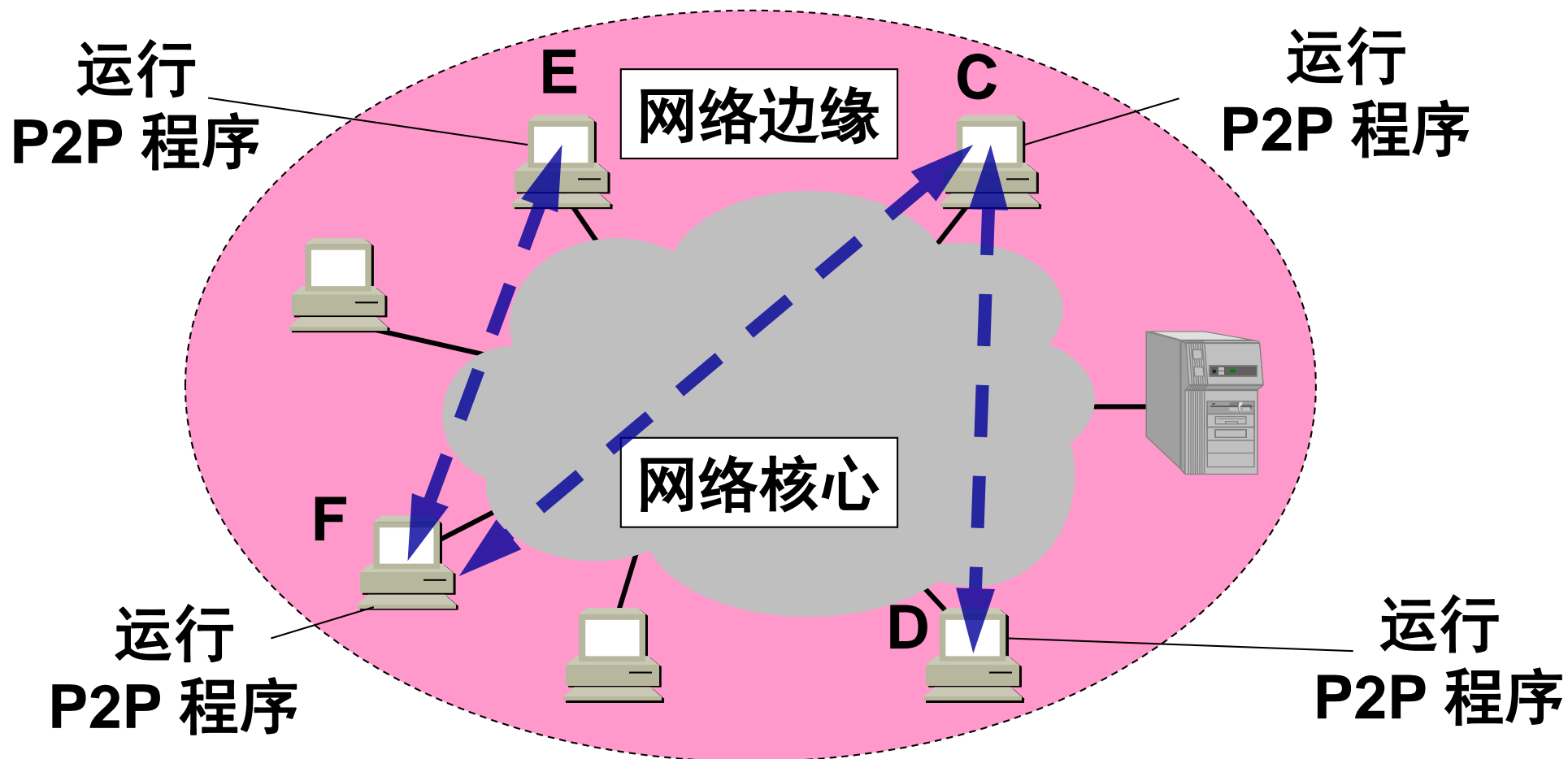
对等连接方式的特点



- 对等连接方式从本质上看仍然是使用客户服务器方式，只是对等连接中的**每一个主机既是客户又是服务器**。
- 例如主机 C 请求 D 的服务时，C 是客户，D 是服务器。但如果 C 又同时向 F 提供服务，那么 C 又同时起着服务器的作用。

对等连接工作方式可支持大量对等用户（如上百万个）同时工作。

对等连接工作方式（P2P 方式）



第1章 概述

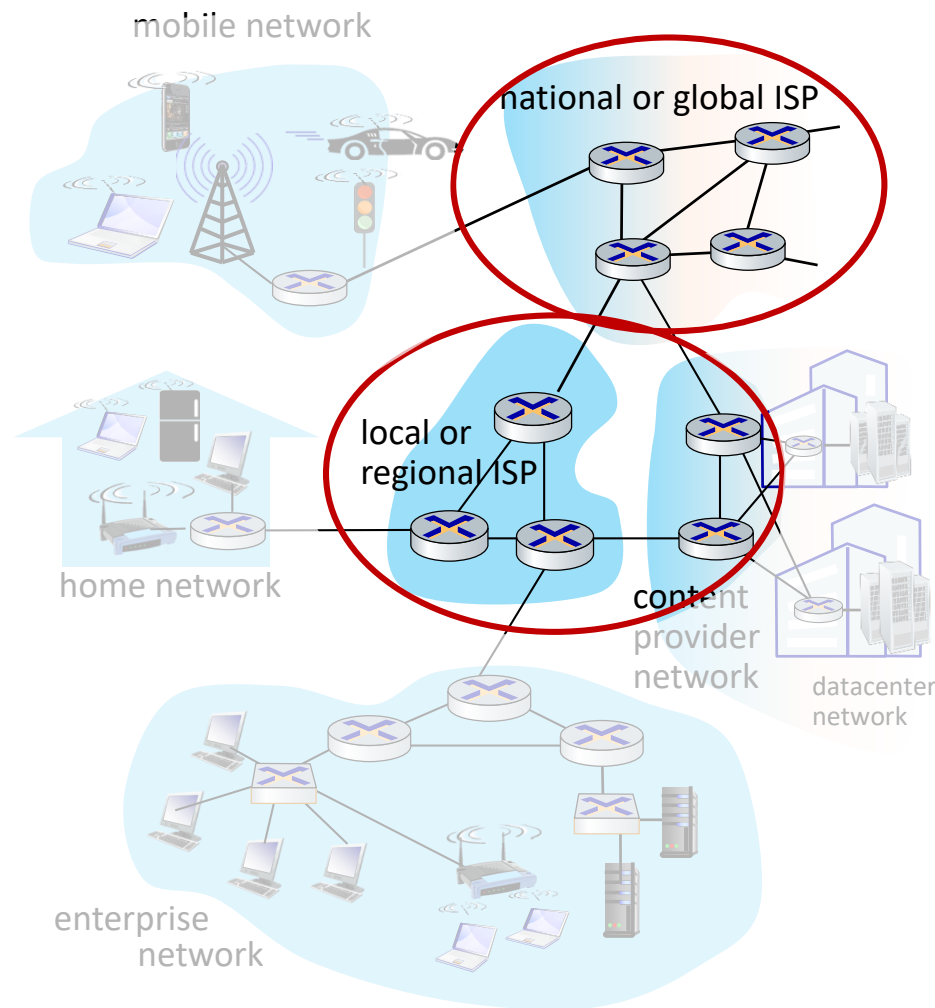


- 1.1 计算机网络与互联网
 - 1.1.1 互联网的边缘部分
 - 1.1.2 互联网的核心部分
- 1.4 计算机网络在我国的发展
- 1.5 计算机网络的类别
- 1.6 计算机网络的性能
- 1.7 计算机网络的体系结构（协议分层）

1.1.2 互联网的核心部分



- 在网络核心部分起特殊作用的是**路由器 (router)**。
- 路由器是实现**分组交换 (packet switching)**的关键构件，其任务是**转发收到的分组**，这是网络核心部分最重要的功能。
- **分组交换**是网络核心部分最重要的功能



1.1.2 互联网的核心部分



- **典型的交换技术包括：**
 - 电路交换
 - 分组交换
 - 报文交换
- **互联网的核心部分采用了分组交换技术**

电路交换的主要特点



2 部电话机只需要用 1 对电线直接连接就能够互相通话。



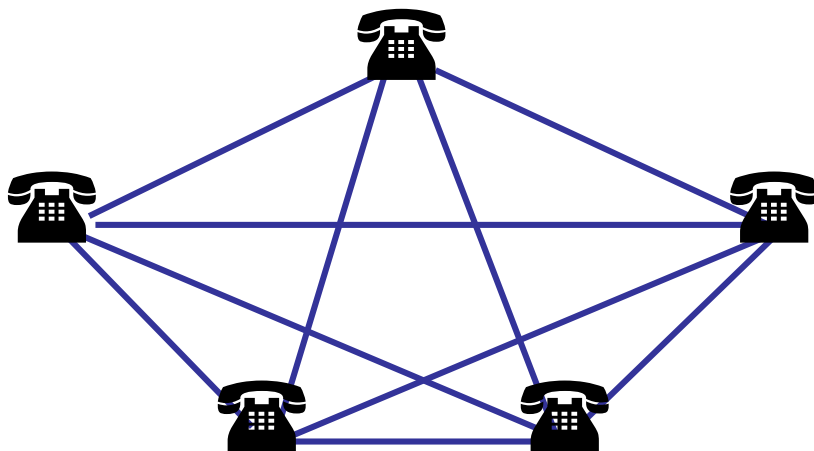
(a) 两部电话直接相连

电话机的不同连接方法

电路交换的主要特点



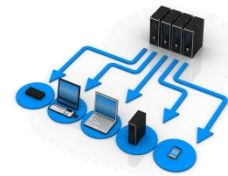
5 部电话机两两直接相连，需 10 对电线。



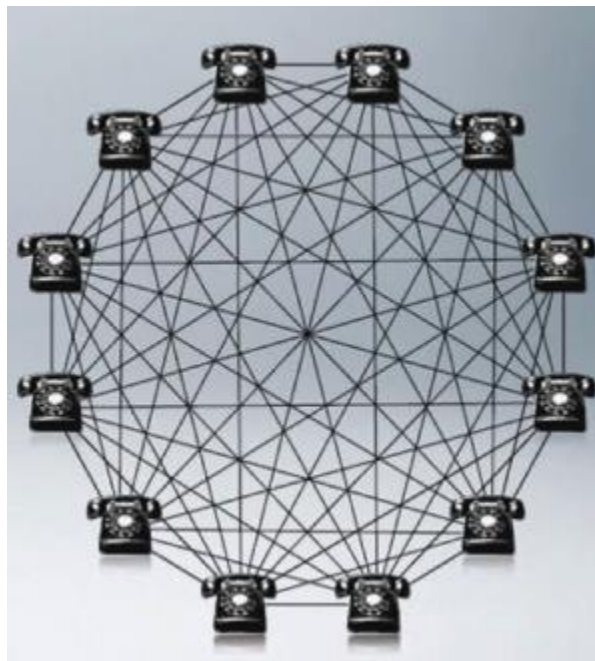
(b) 5 部电话机两两直接相连

电话机的不同连接方法

电路交换的主要特点



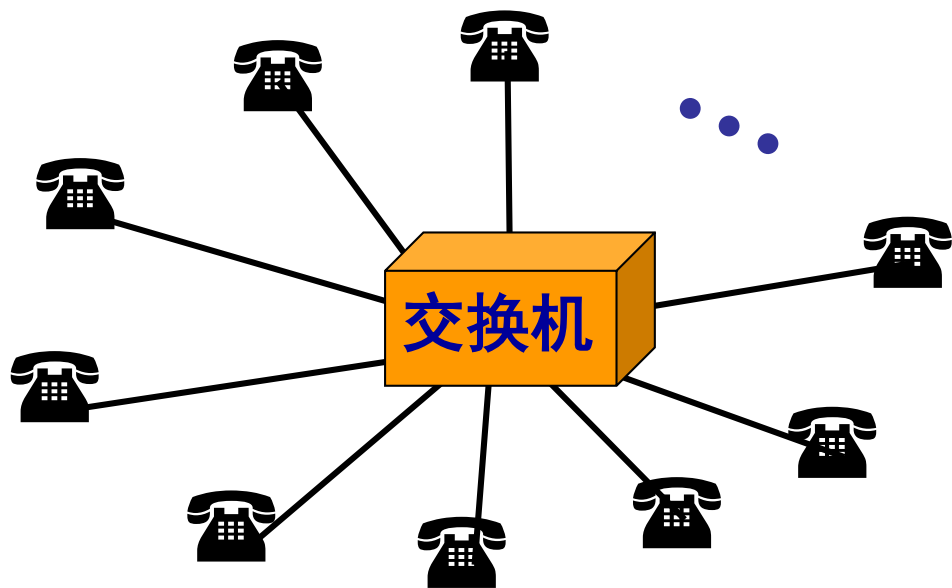
N 部电话机两两直接相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线。这种直接连接方法所需要的电线对的数量与电话机数量的平方（ N^2 ）成正比。



使用交换机



- 当电话机的数量增多时，就要使用**交换机**来完成全网的交换任务。



(c) 用交换机连接许多部电话
电话机的不同连接方法

每一部电话都直接连接到交换机上，而交换机使用交换的方法，让电话用户彼此之间可以很方便地通信。
所采用的交换方式就是**电路交换 (circuit switching)**。



“交换”的含义



- 在这里，“**交换**”(switching)的含义就是**转接**——把一条电话线转接到另一条电话线，使它们连通起来。
- 从通信资源的分配角度来看，“交换”就是按照某种方式**动态地分配**传输线路的资源。
- 如果通信资源不足，主叫用户会听到忙音，表示电信网不接受用户的呼叫，需等待一段时间后再拨

电路交换特点

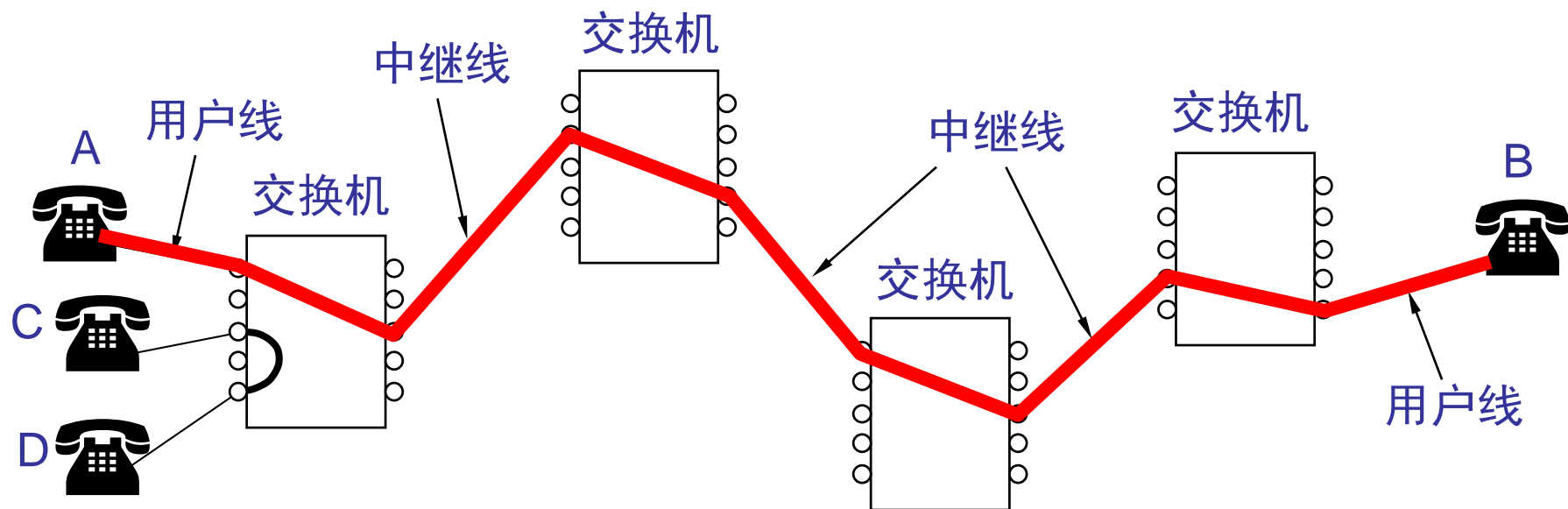


- 电路交换必定是**面向连接**的。
- 电路交换分为三个阶段：
 - **建立连接**：建立一条**专用的物理通路**，以保证双方通话时所需的通信资源在通信时不会被其他用户占用；
 - **通话**：主叫和被叫双方**一直占用通信资源**；
 - **释放连接**：释放刚才使用的这条专用的物理通路（释放刚才占用的所有通信资源）。

电路交换举例



- A 和 B 通话经过四个交换机
- 通话在 A 到 B 的连接上进行



电路交换的用户始终占用端到端的通信资源

电路交换传送计算机数据效率低

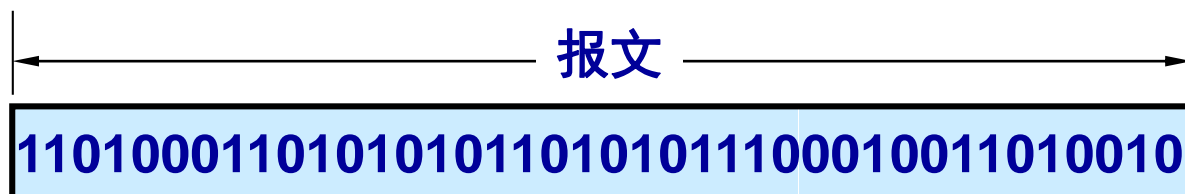


- 计算机数据具有突发性
 - 数据传输的不确定性（时间和数据大小）
- 导致通信线路的利用率很低
 - 在通话的全部时间，通话的两个用户始终占据端到端的固定传输带宽
 - 用来传送数据的时间往往不到10%甚至1%
- 例如，当用户阅读屏幕上的信息或计算机正在处理而结果尚未返回时。

2. 分组交换



- 分组交换则采用**存储转发**技术。
- 在发送端，先把较长的**报文****划分**成较短的、**固定**长度的**数据段**。

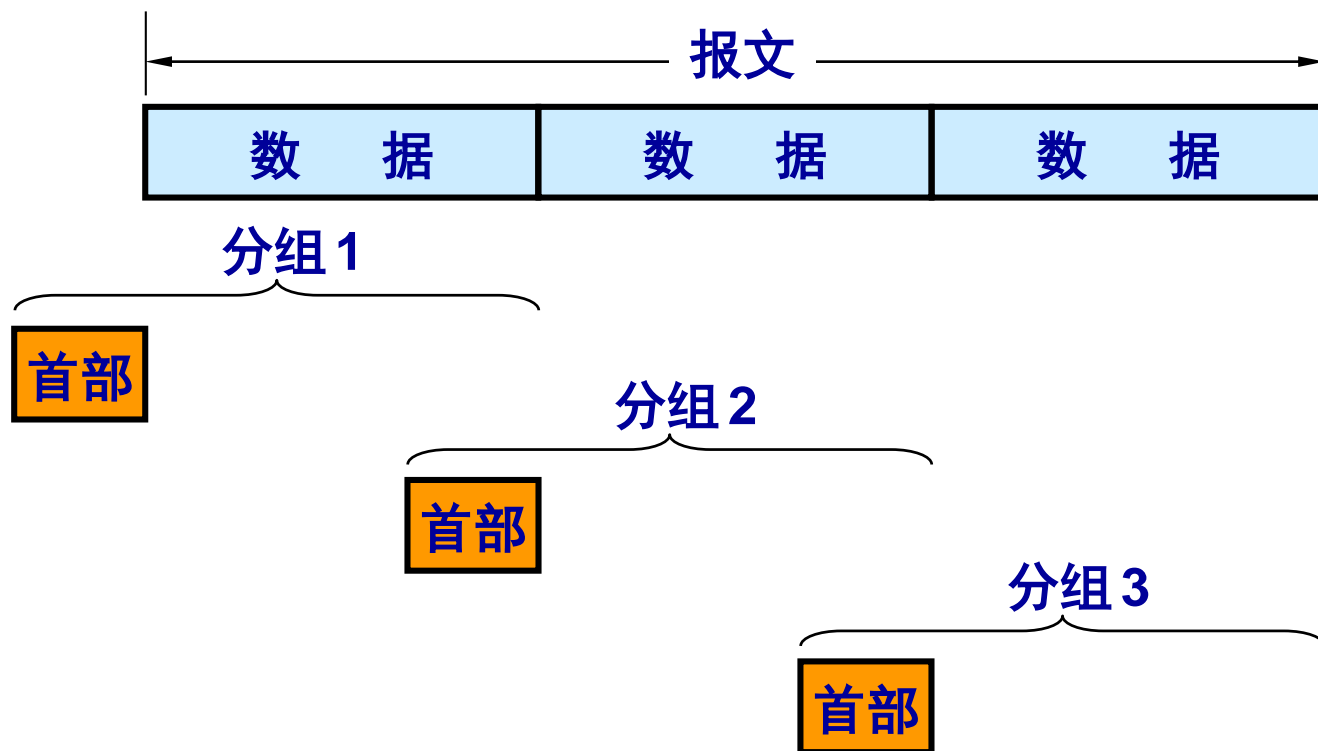


假定这个报文较长
不便于传输

添加首部构成分组



- 每一个数据段前面添加上**首部**构成**分组(packet)**。

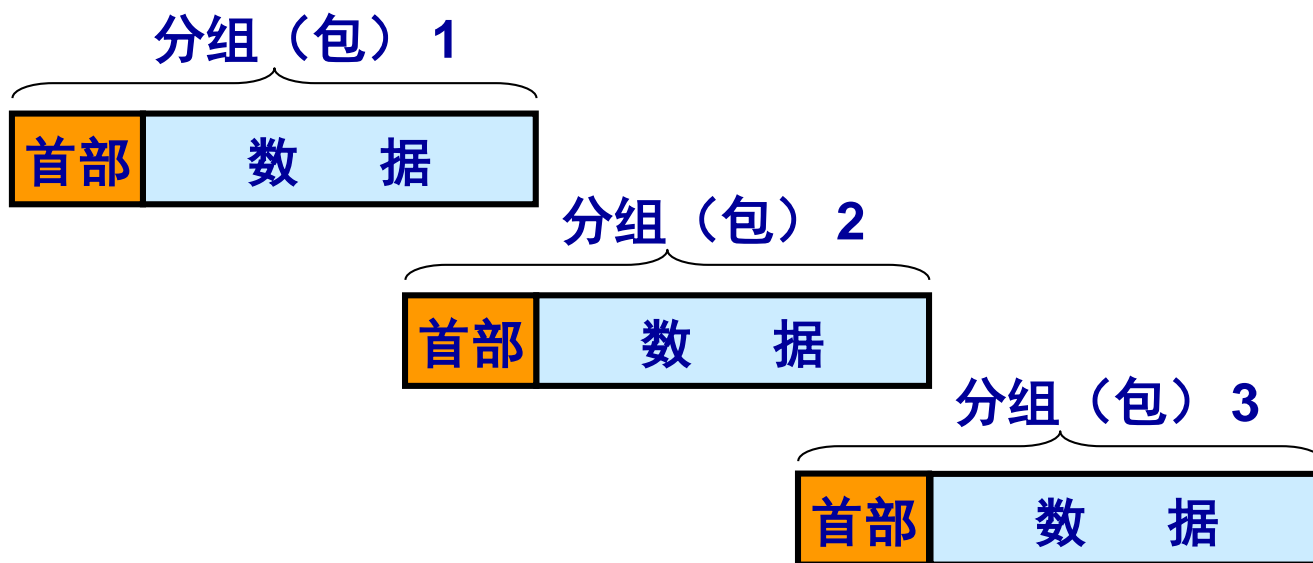


请注意：现在左边是“前面”

分组交换的传输单元



- 分组交换网以“**分组**”（也称为“**包**”，首部也可称为“**包头**”）作为数据传输单元。
- **依次**把各分组发送到接收端（假定接收端在左边）

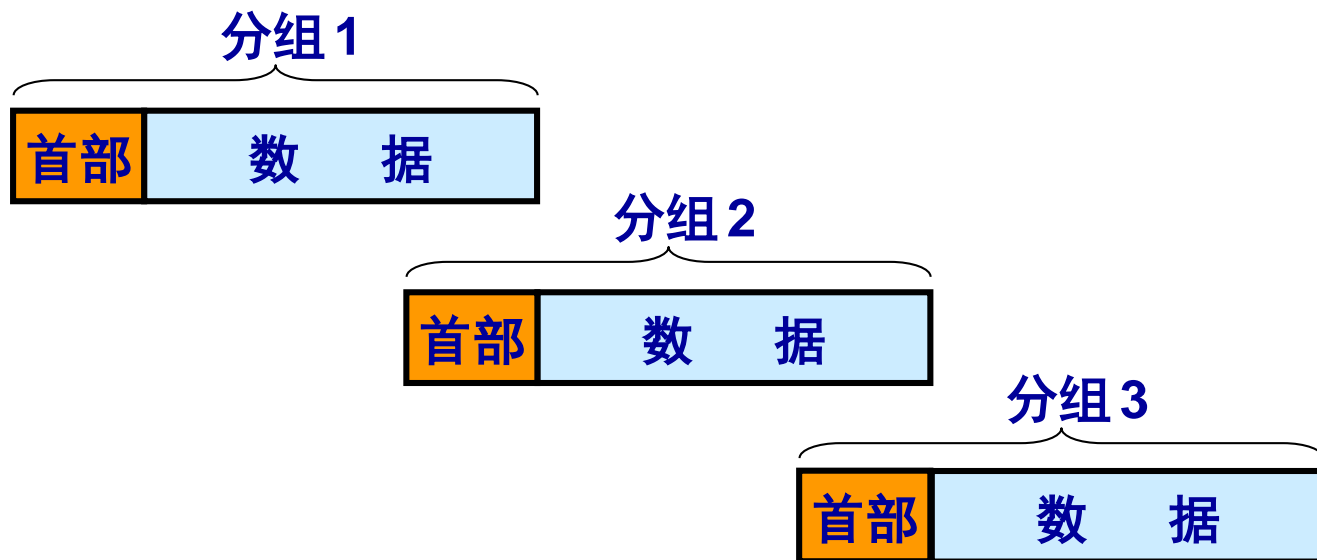


以分组为基本单位在网络中传送

收到分组后剥去首部



- 接收端收到分组后剥去首部还原成报文。

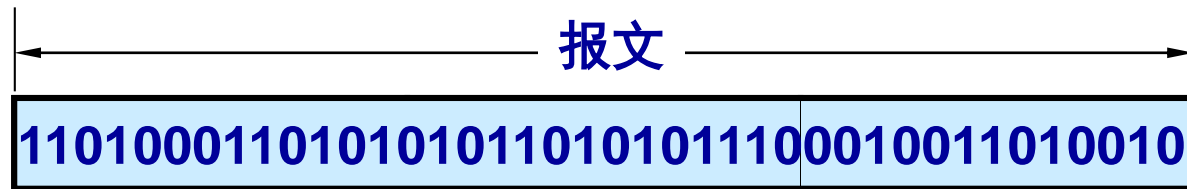


收到的数据

最后还原成原来的报文



- 最后，在接收端把收到的数据恢复成为原来的报文。

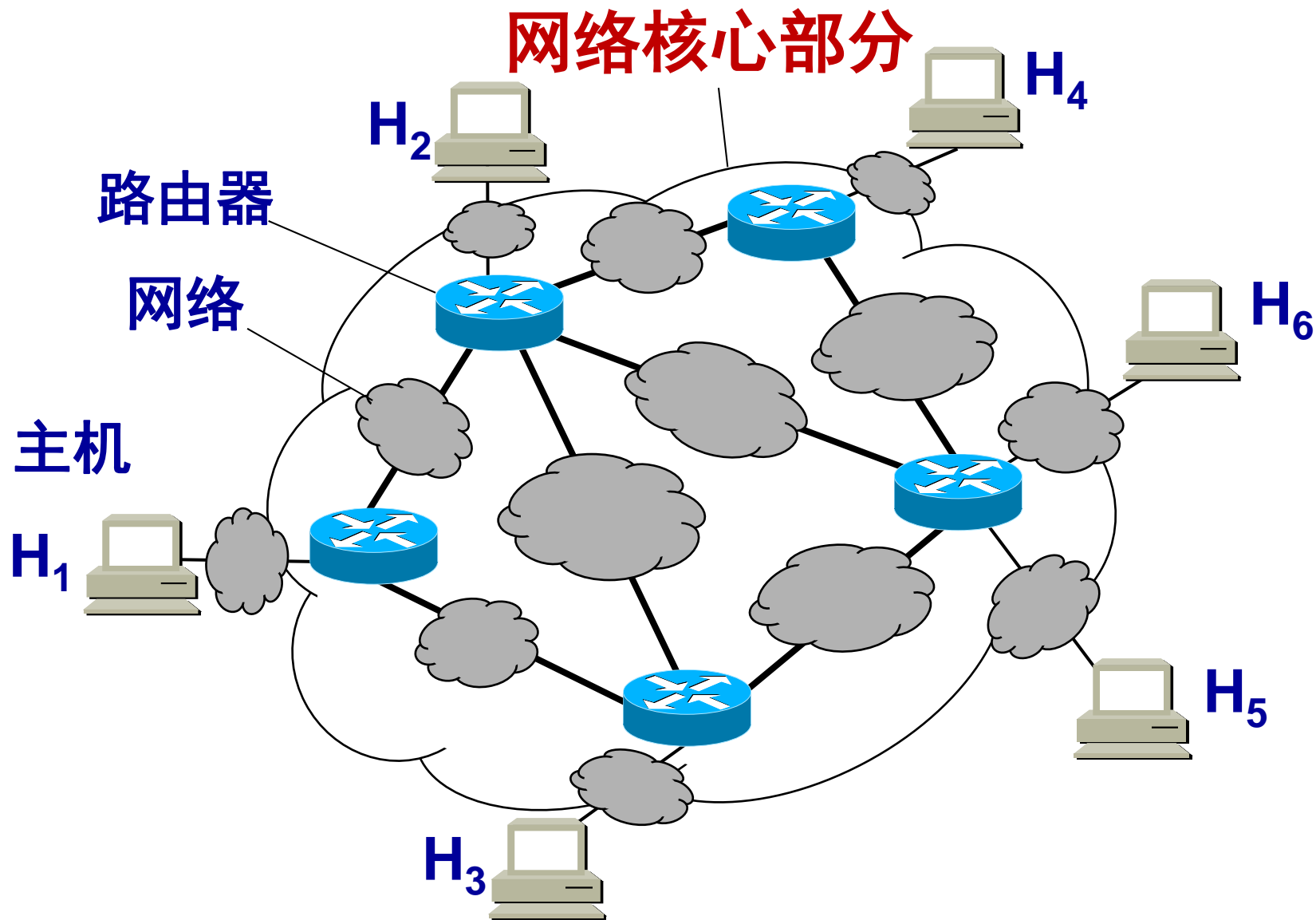


- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。

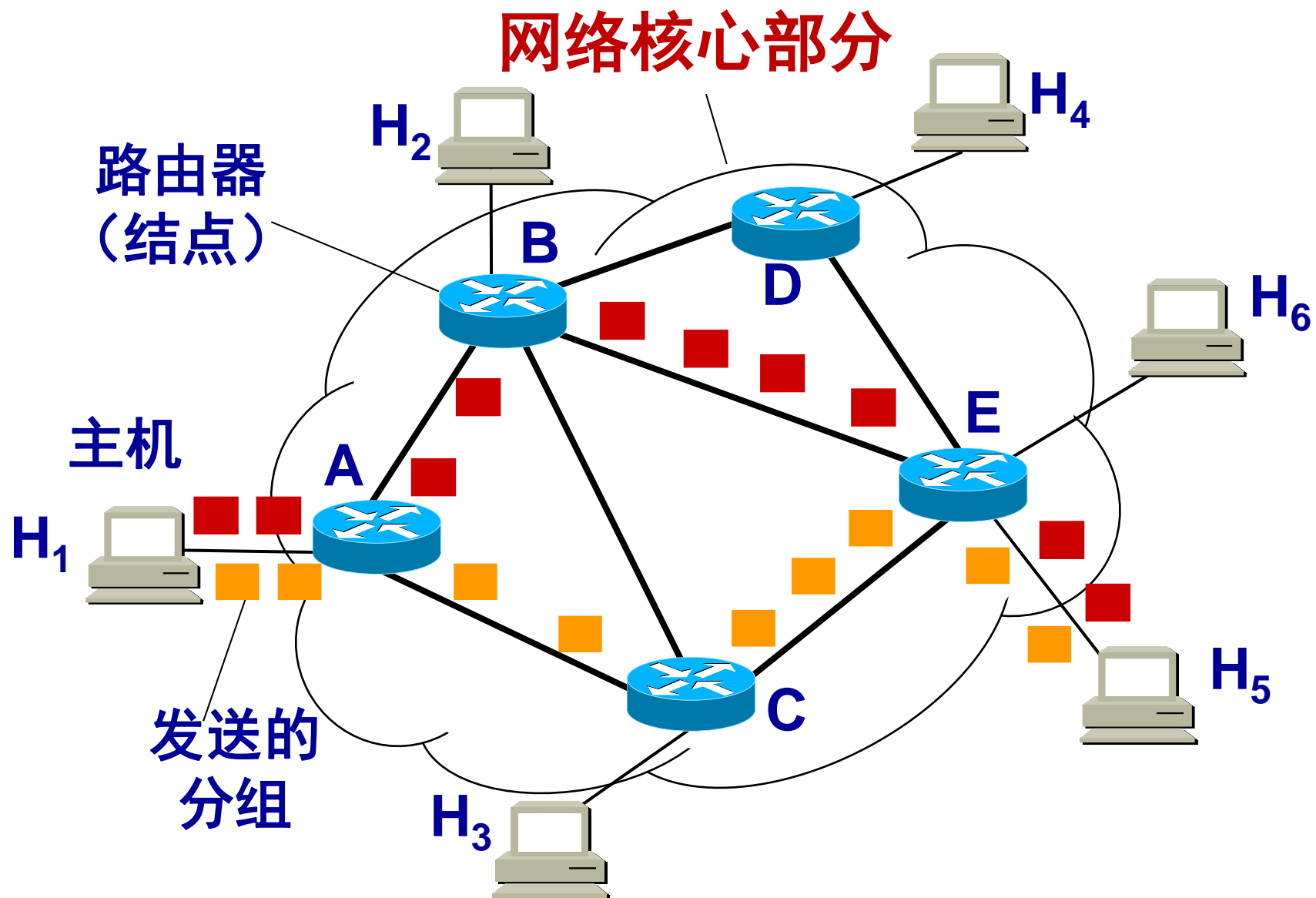
分组首部的重要性



- **每一个**分组的首部都含有**地址**（诸如目的地址和源地址）等控制信息。
- 分组交换网中的结点交换机根据收到的分组首部中的**地址信息**，把分组**转发**到下一个结点交换机。
- 每个分组在互联网中**独立地选择传输路径**。
- 用这样的**存储转发**方式，最后分组就能到达**最终目的地**。

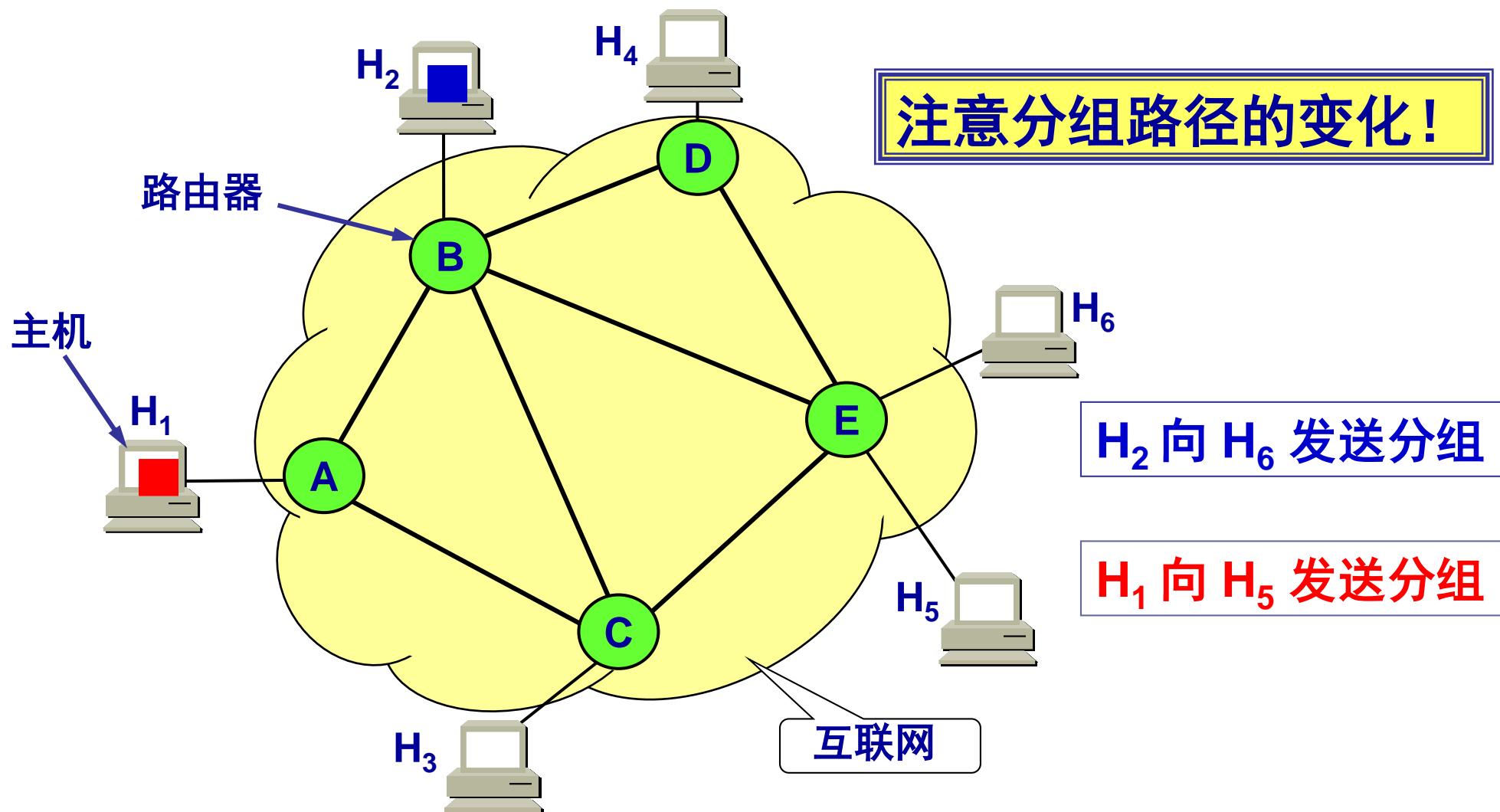


(a) 核心部分的路由器把网络互连起来
分组交换的示意图

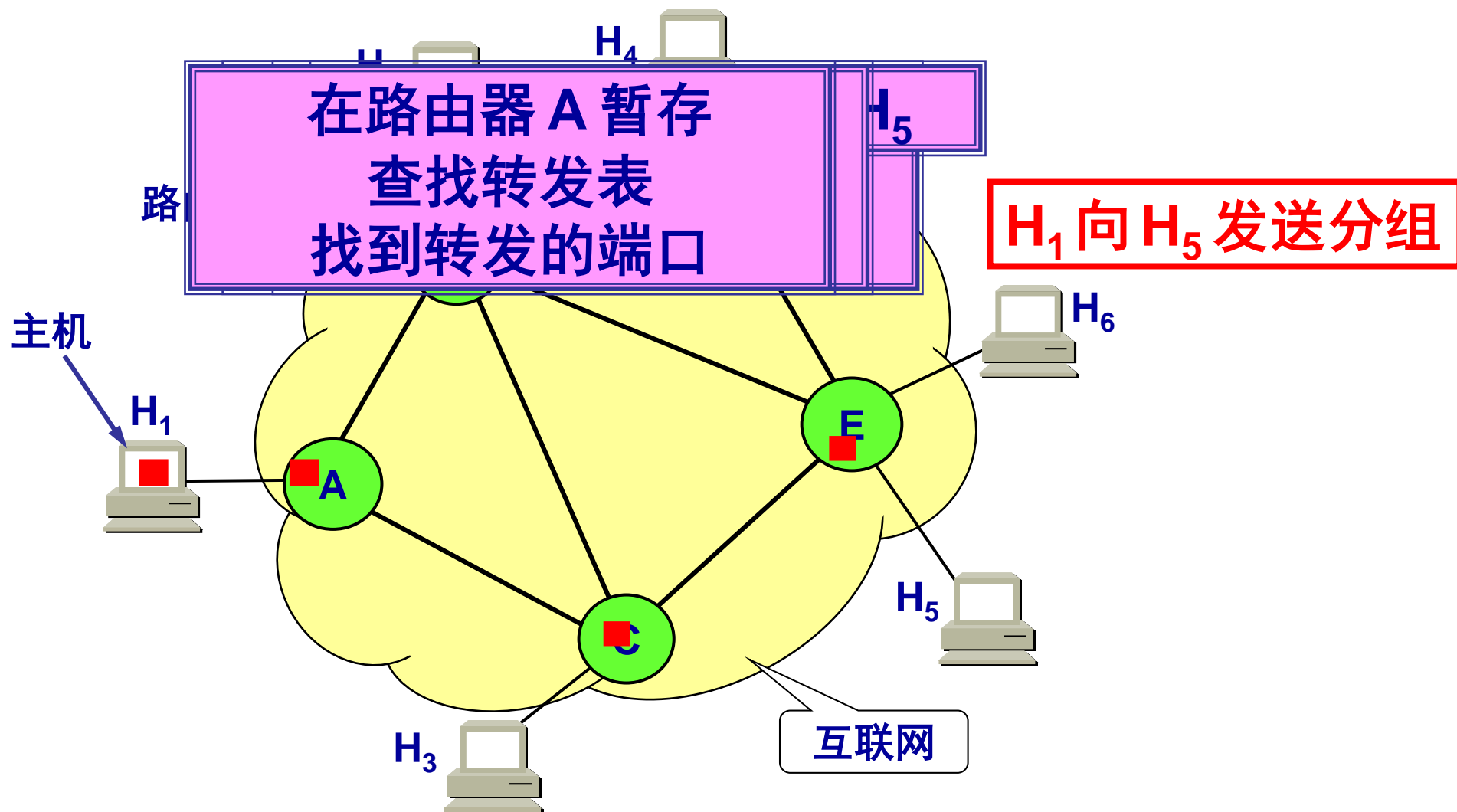
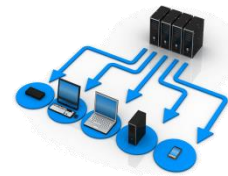


(b) 核心部分中的网络可用一条链路表示
分组交换的示意图

分组交换网的示意图



注意分组的存储转发过程



路由器



- 在路由器中的输入和输出端口之间**没有直接连线**。
- 路由器处理分组的过程是：
 - 把收到的分组先**放入缓存（暂时存储）**；
 - **查找转发表**，找出到某个目的地址应从哪个端口转发；
 - 把分组送到适当的端口**转发**出去。

分组交换的优点



优点	所采用的手段
高效	在分组传输的过程中 动态分配 传输带宽，对通信链路是逐段占用。
灵活	为每一个分组 独立 地选择最合适的转发路由。
迅速	以分组作为传送单位，可以 不先建立连接 就能向其他主机发送分组。
可靠	保证可靠性的网络协议；分布式多路由的分组交换网，使网络有很好的生存性。

分组交换带来的问题



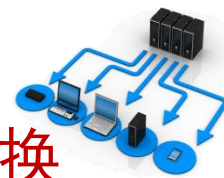
- 分组在各结点存储转发时需要**排队**，这就会造成一定的**时延**。
- 分组必须携带的首部（里面有必不可少的控制信息）也造成了一定的**开销**。

存储转发原理并非完全新的概念

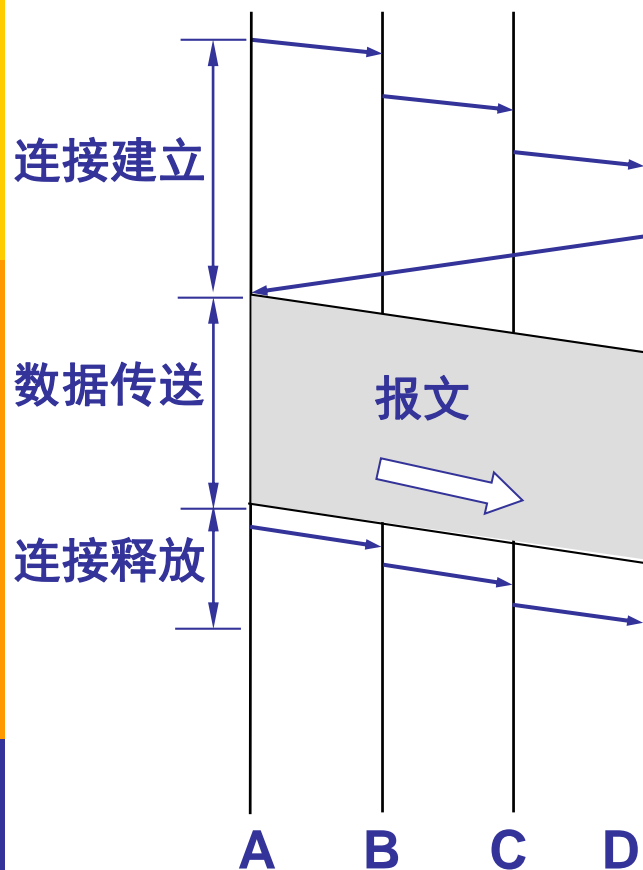


- 在 20 世纪 40 年代，电报通信也采用了基于存储转发原理的**报文交换** (message switching)。
- 报文交换的时延较长，从几分钟到几小时不等。现在报文交换已经很少有人使用了。

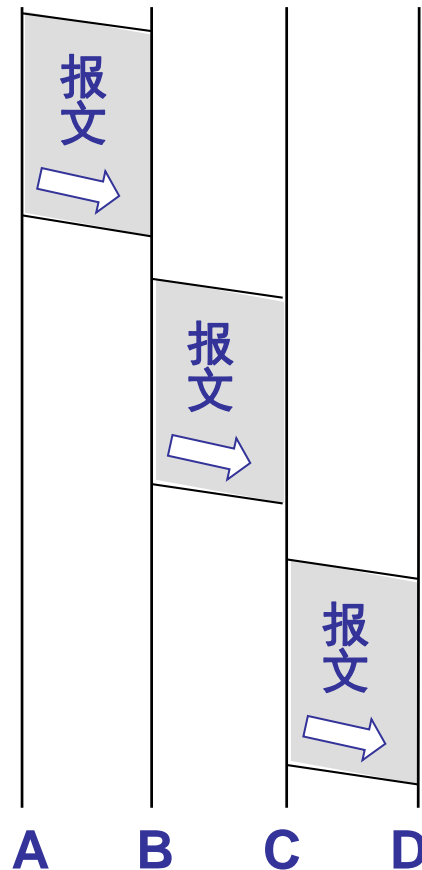
三种交换的比较



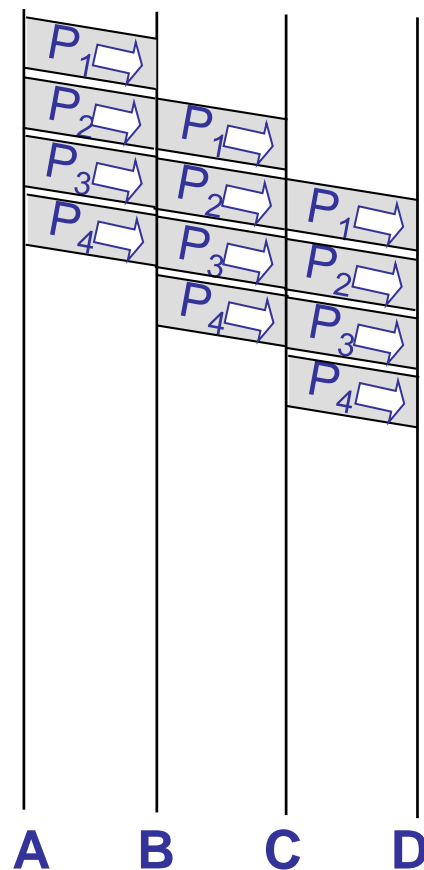
电路交换



报文交换

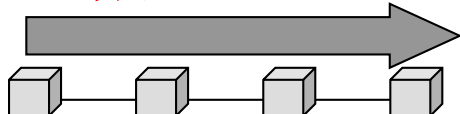


分组交换

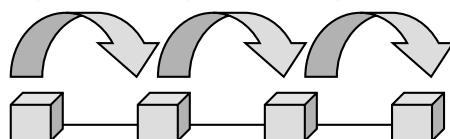


数据
传送
特点

比特流直达终点

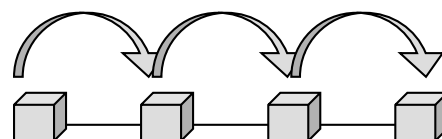


报文 报文 报文



存储
转发 存储
转发

分组 分组 分组



存储
转发 存储
转发

三种交换的比较



- 若要连续传送大量的数据，且其传送时间远大于连接建立时间，则电路交换的传输速率较快。
- 报文交换和分组交换不需要预先分配传输带宽，在传送突发数据时可提高整个网络的信道利用率。
- 由于一个分组的长度往往远小于整个报文的长度，因此分组交换比报文交换的时延小，同时也具有更好的灵活性。

核心部分VS.边缘部分



- 互联网的核心部分是由**许多网络**和把它们互连起来的**路由器**组成，而**主机处在互联网的边缘部分**。
- 互联网核心部分中的路由器之间一般都用**高速链路**相连接，而在网络边缘的主机接入到核心部分则通常以相对**较低速率**的链路相连接。
- **主机**的用途是为**用户进行信息处理的**，并且可以和其他主机通过网络交换信息。**路由器**的用途则是**用来转发分组的**，即进行分组交换的。

1.1.3 互联网时代



- 自从 20 世纪 90 年代以后，以 Internet 为代表的计算机网络得到了飞速的发展。
- 已从最初的教育科研网络（免费）逐步发展成为商业网络（有偿使用）。
- 已成为**全球最大的和最重要的**计算机网络。
- 互联网的基础结构大体上经历了三个阶段的演进。



谷歌浏览器



PPTV



360云盘



铁路12306



高德地图



当当

Google



中国银行
BANK OF CHINA

互联网发展的第一阶段



- **这个阶段是：从单个网络向互连网络发展。**
- **第一个分组交换网 ARPANET 最初只是一个单个的分组交换网。**
 - **ARPA: 美国高级研究计划署 (Advanced Research Project Agency)**
 - **In the late 1950s (at the height of the Cold War), the DoD wanted a command-and-control network that could survive a nuclear war.**
 - **1967年, 拉里·罗伯茨到任ARPA, 提交研究报告《资源共享的计算机网络》并着手筹建, 被称为 “ARPANET之父”**

互联网发展的第一阶段



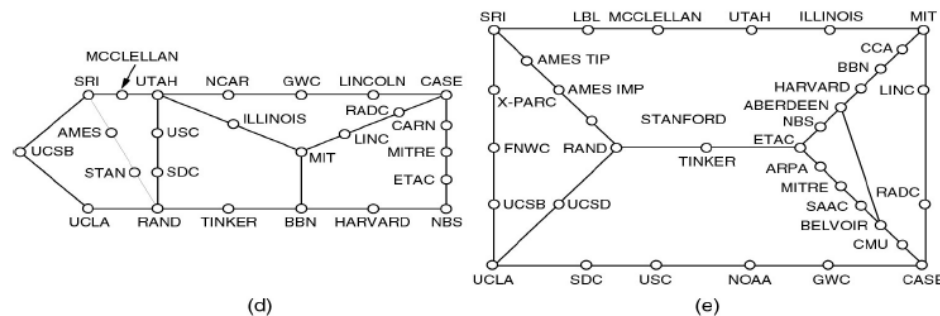
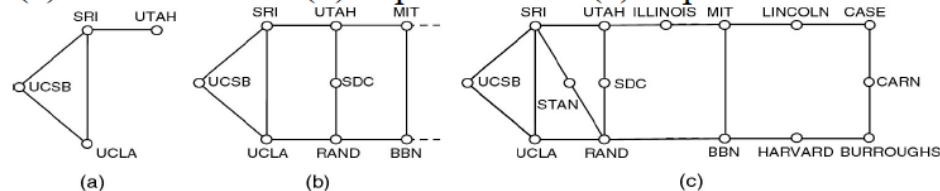
■ 这个阶段是：从单个网络向互连网络发展。

■ ARPANET

- In December 1969, an experimental network went on the air with four nodes: at UCLA, UCSB, SRI, and the University of Utah.

Growth of the ARPANET: (a) December 1969. (b) July 1970.

(c) March 1971. (d) April 1972. (e) September 1972.



互联网发展的第一阶段



- **这个阶段是：从单个网络向互连网络发展。**
- **第一个分组交换网 ARPANET 最初只是一个单个的分组交换网。**
- **由于网络节点增多，ARPA 研究多种网络互连的技术。**
- **1983 年，TCP/IP 协议成为 ARPANET 上的标准协议，使得所有使用 TCP/IP 协议的计算机都能利用互连网相互通信。**
- **人们把 1983 年作为互联网的诞生时间。**
- **1990年，ARPANET 正式宣布关闭。**

互联网发展的第一阶段



- **这个阶段是：从单个网络向互连网络发展。**
- **ARPANET**
- **TCP/IP 协议**
 - In 1974, the TCP/IP model (and its protocols) was invented.
 - Vint Cerf
 - ACM President
 - One of the "Fathers of the Internet,"
 - Co-designer of the TCP/IP protocols and the architecture of the Internet.



互联网发展的第二阶段

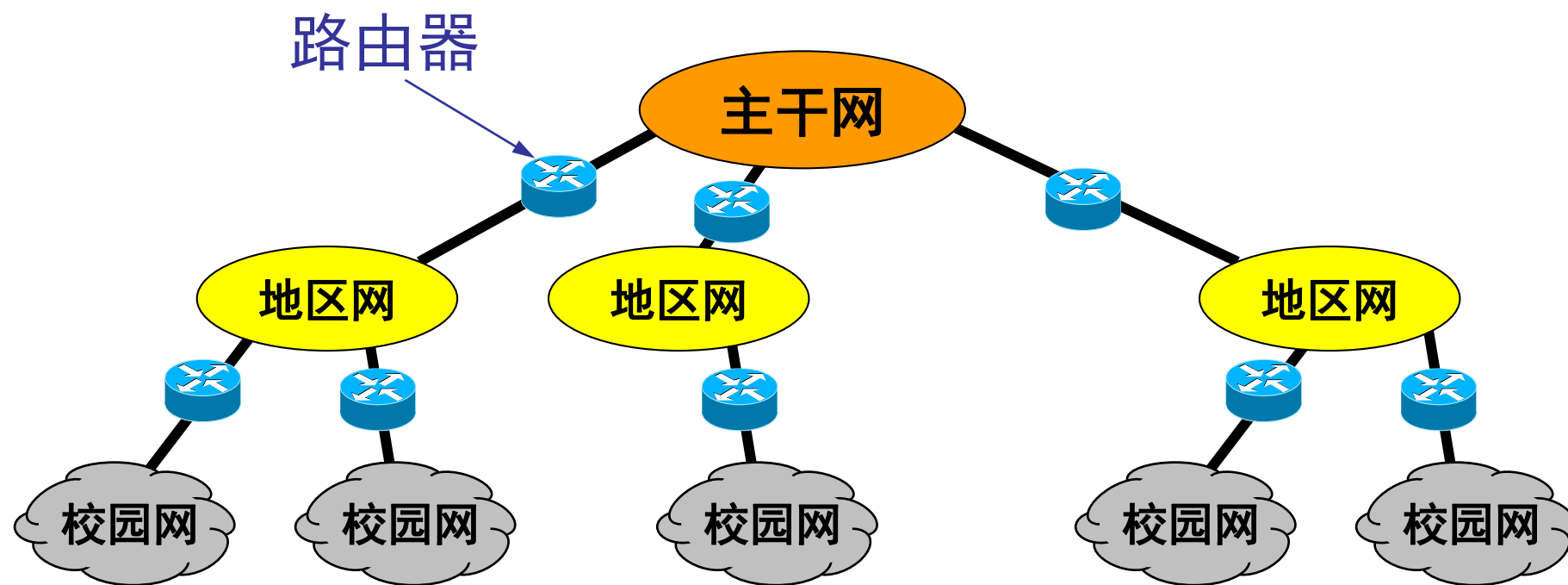


- **第二阶段：**建成了三级结构的互联网。
- 1986年，NSF建立了国家科学基金网 NSFNET，它是一个三级计算机网络，分为：
 - 主干网（87年是56Kb/s）
 - 地区网
 - 校园网
- 1991 年，美国政府决定将因特网的主干网转交给私人公司来经营，并开始对接入因特网的单位收费。
- 1993 年因特网主干网的速率提高到 45 Mb/s（T3 速率）。

互联网发展的第二阶段



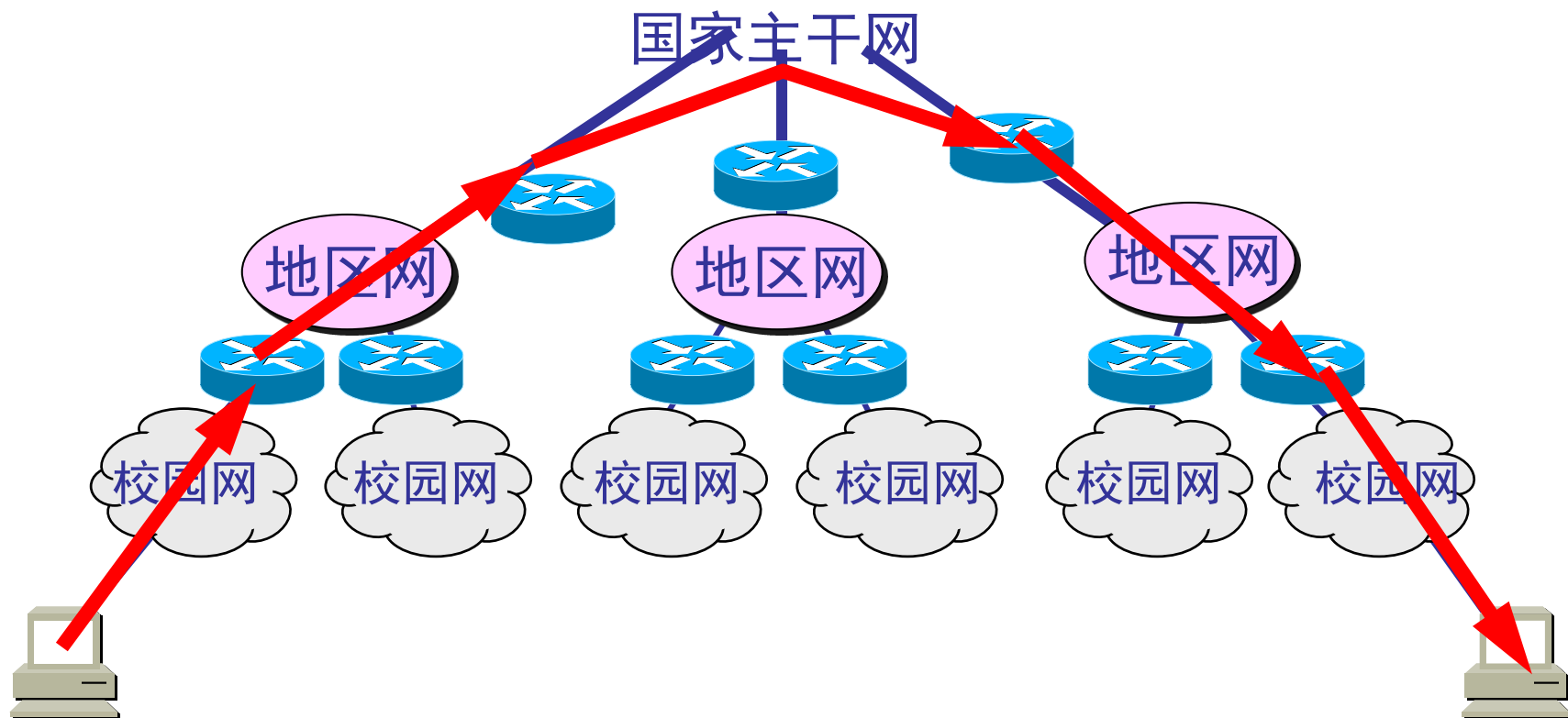
- 各网络之间需要使用路由器来连接。



互联网发展的第二阶段



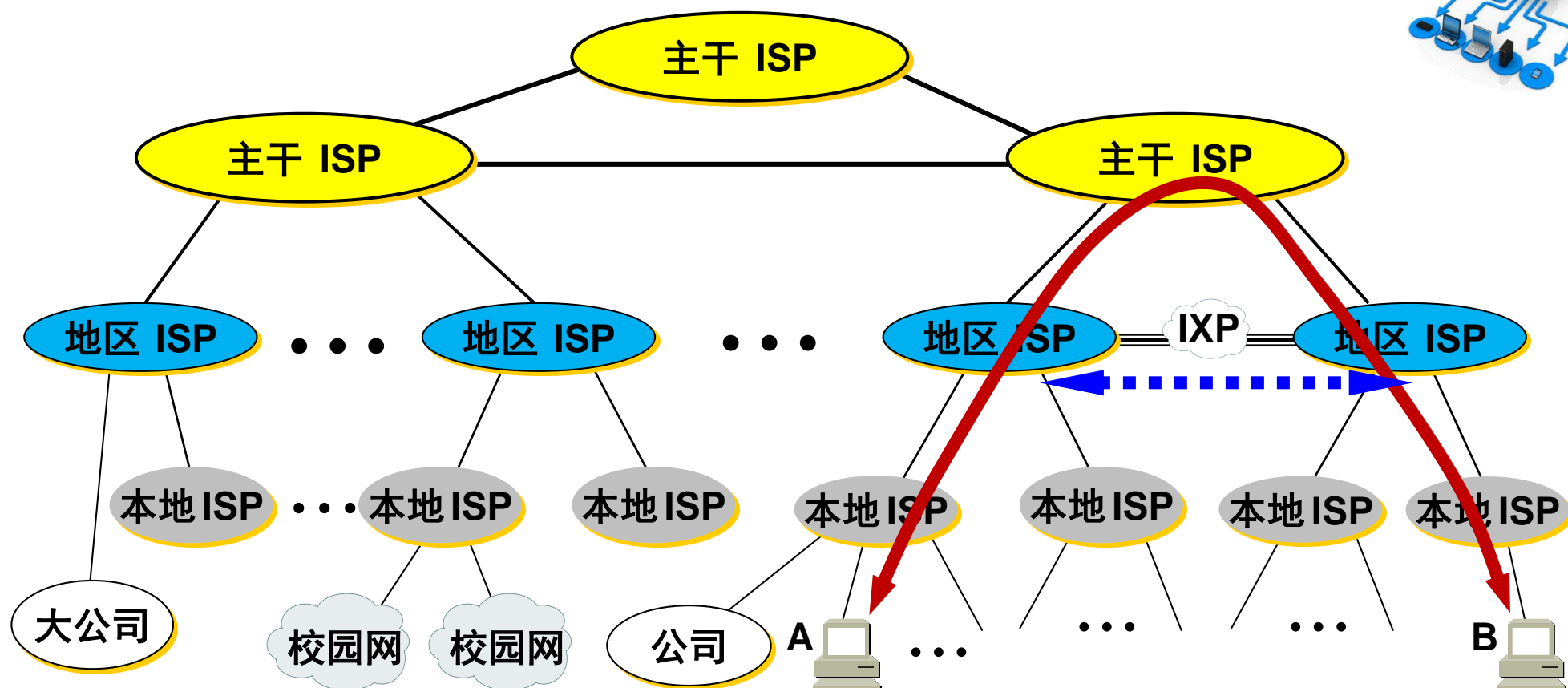
- 主机到主机的通信可能要经过多种网络。



互联网发展的第三阶段



- **第三阶段：**逐渐形成了多层次 ISP 结构的互联网。
- 从1993年开始，由美国政府资助的 NSFNET逐渐被若干个商用的 ISP 网络所代替（主干服务提供者）。
- **互联网服务提供者 ISP** (Internet Service Provider)。
- 任何机构和个人只要向某个 ISP 交纳规定的费用，就可从该 ISP 获取所需 **IP 地址**的使用权，并可通过该 ISP 接入到互联网。
- 从 1994 年到现在，互联网逐渐演变成多级结构网络。
- 根据提供服务的覆盖面积大小以及所拥有的 IP 地址数目的不同，ISP 也分成为**不同层次的 ISP**：**主干 ISP**、**地区 ISP** 和 **本地 ISP**。



主机A → 本地 ISP → 地区 ISP → 主干 ISP → 地区 ISP → 本地 ISP → 主机B

基于 ISP 的多层结构的互联网的概念示意图

IXP (Internet eXchange Point) 互联网交换点

万维网 WWW 的问世

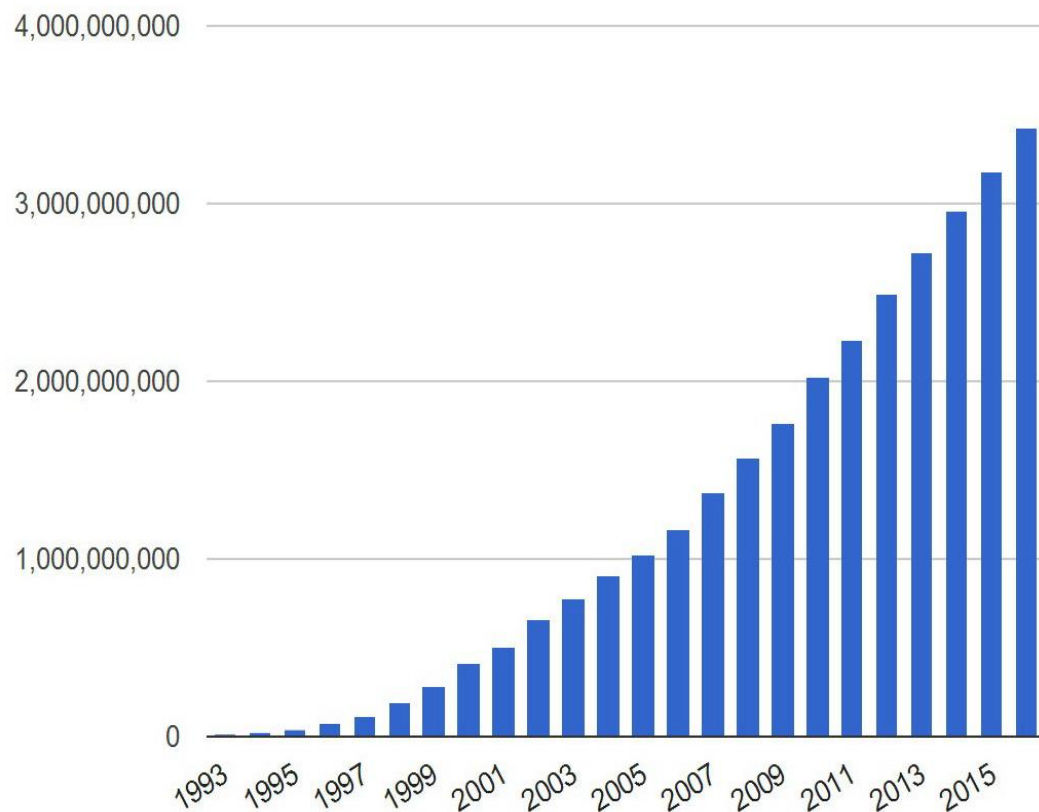


- 互联网已经成为世界上规模最大和增长速率最快的计算机网络，没有人能够准确说出互联网究竟有多大。
- 互联网的迅猛发展始于 20 世纪 90 年代。由欧洲原子核研究组织 CERN 开发的**万维网 WWW** (World Wide Web) 被广泛使用在互联网上，大大方便了广大非网络专业人员对网络的使用，成为互联网的这种指数级增长的主要驱动力。

互联网的发展情况概况



- 从 1993 年至 2016 年互联网用户数的增长情况如图所示。这里的用户是指在家中上网的人。
- 可以看出，在 2005 年互联网的用户数超过了 10 亿，在 2010 年超过了 20 亿，而在 2014 年已接近了 30 亿。



1993 年至 2016 年互联网用户的增长情况

互联网的发展情况概况



互联网的发展概况（统计到 2005 年）

年份	网络数	主机数	用户数	管理机构数
1980	10	10^2	10^2	10^0
1990	10^3	10^5	10^6	10^1
2000	10^5	10^7	10^8	10^2
2005	10^6	10^8	10^9	10^3

我国互联网的发展（1）



- 1989年9月，国家计委向世界银行贷款建设中关村地区教育与科研示范网络（NCFC, The National Computing and Networking Facility of China中国国家计算与网络设施），1992年NCFC工程全部完成。（后改名中国科技网CSTNet）
- 94年4月，中关村地区科学院、北大、清华建立了第一个中关村地区的中国国家计算与网络设施(The National Computing and Networking Facility of China, NCFC网络)，全功能进入国际互联网，我们国家和互联网机构签订协议，定了我国的顶级域名.cn。

我国互联网的发展（2）



- 95 年国内互联网开始由清华、北大和科学院走向社会，出现四大互联网，都已经开始了运行，有的还没有正式命名。
 - 邮电部的中国互联网(ChinaNET)
 - 中国科学院的中国科技网(CSTNET)
 - 教育部的中国教育和科研网(CERNET)
 - 电子部的金桥网(ChinaGBN)
- 1997年4月，四大网络互相联通，全国各地的用户可以通过不同的方式加入四大网络而进入互联网。

我国互联网的发展（3）



- 到了96 年的2 月份就出台了我国第一个关于国际联网管理的暂行条例（国务院令）。此后进入**快速有序发展阶段**，此时国家整体管理思路已经形成。
- 2000年以后，**健康正常发展时期**。国家出台多项管理法规（30多部）各相关职能部门形成自身的管理队伍和机构对互联网进行有序管理。

我国互联网的发展（4）



- 中国互联网络信息中心（CNNIC）近日发布第45次《中国互联网络发展状况统计报告》。
- 截至2017年12月，我国网民规模达7.72亿，全年共计新增网民4074万人。互联网普及率为55.8%，较2016年底提升2.6个百分点。
- 截至2019年6月，我国网民规模达8.54亿，较2018年底增长2598万，互联网普及率达61.2%，较2018年底提升1.6个百分点；我国手机网民规模达8.47亿，较2018年底增长2984万，网民使用手机上网的比例达99.1%，较2018年底提升0.5个百分点。

第1章 概述



■ 1.1 计算机网络与互联网

■ 1.1.1 互联网的边缘部分

■ 1.1.2 互联网的核心部分

■ 1.1.3 互联网时代

■ 1.2 计算机网络的分类

■ 1.3 计算机网络的性能

■ 1.4 计算机网络的体系结构（协议分层）

1.5 计算机网络的类别



- 计算机网络有多种类别。典型包括：
 - 1. 按照网络的作用范围进行分类
 - 2. 按照网络的使用者进行分类
 - 3. 用来把用户接入到互联网的网络

按照网络的作用范围进行分类



- **广域网 WAN** (Wide Area Network): 作用范围通常为几十到几千公里（跨越国家），是互联网的核心部分。
- **城域网 MAN** (Metropolitan Area Network): 作用距离约为 5 ~ 50 公里（几个街区甚至整个城市）。
- **局域网 LAN** (Local Area Network): 局限在较小的范围（如 1 公里左右），校园网或企业网。
- **个人区域网 PAN** (Personal Area Network): 范围很小，大约在 10 米左右，通过无线技术连接。

若中央处理机之间的距离非常近（如仅1米的数量级甚至更小些），则一般就称之为**多处理机系统**，而不称它为计算机网络。

按照网络的使用者进行分类



■ 公用网 (public network)

- 电信公司建造的大型网络。按规定交纳费用的人都可以使用的网络。因此也可称为公众网。

■ 专用网 (private network)

- 某个单位为特殊业务工作的需要而建造的网络，例如军队、铁路、银行、电力等系统。

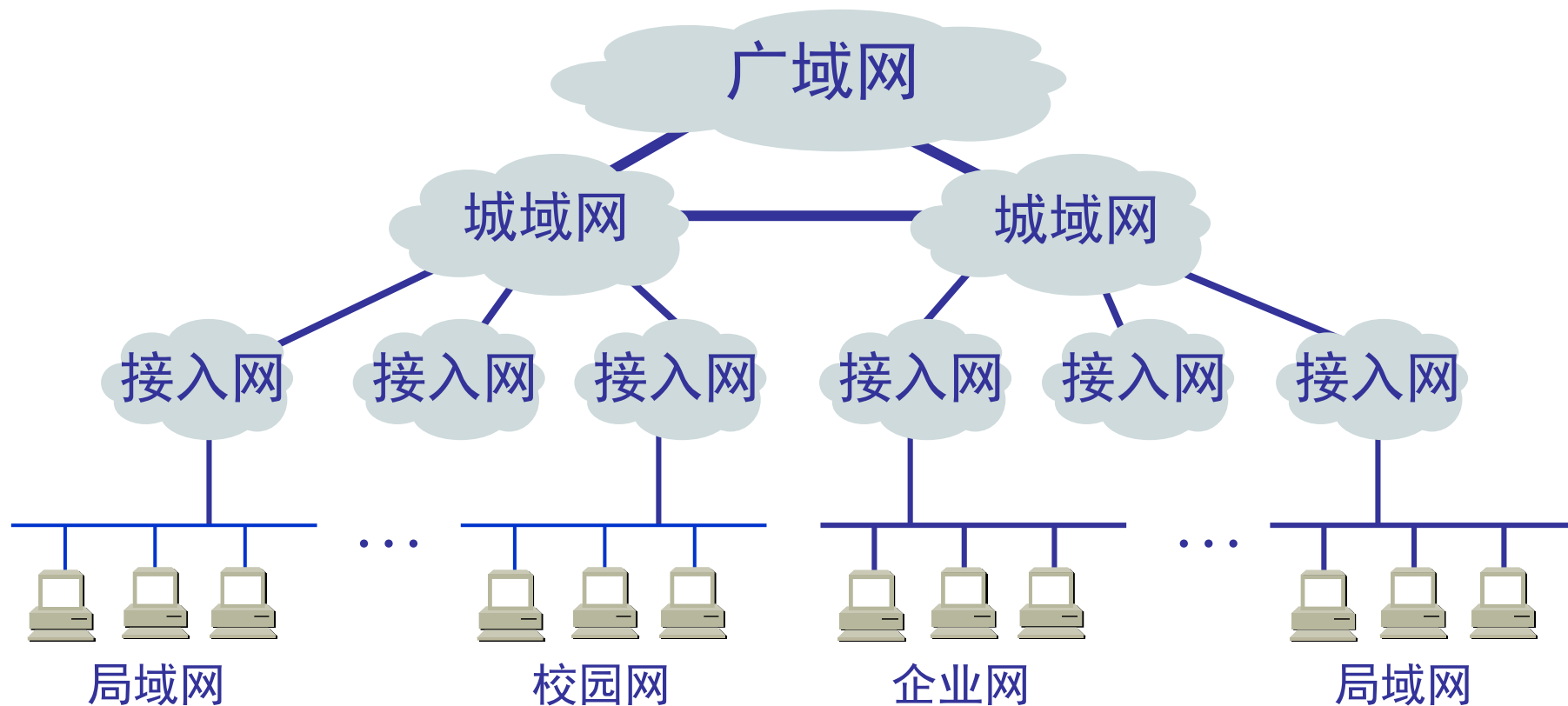
公用网和专用网都可以提供多种服务。如传送的是计算机数据，则分别是公用计算机网络和专用计算机网络。

用来把用户接入到互联网的网络



- **接入网 AN (Access Network)**, 它又称为本地接入网或居民接入网。
- 接入网是一类比较特殊的计算机网络, 用于将用户接入互联网。只是起到让用户能够与互联网连接的“桥梁”作用。
- 使用不同接入网技术, 如电话线拨号、宽带
- 接入网本身既不属于互联网的核心部分, 也不属于互联网的边缘部分。
- 接入网是从某个用户端系统到互联网中的第一个路由器 (也称为边缘路由器) 之间的一种网络。
- 从覆盖的范围看, 很多接入网还是属于局域网。

广域网、城域网、接入网以及局域网的关系



1.3 计算机网络的性能



- 1.3.1 计算机网络的性能指标
- 1.3.2 计算机网络的非性能特征
(nonperformance characteristics)

1.3.1 计算机网络的性能指标



- 计算机网络的性能一般是指它的几个重要的性能指标，主要包括：
 1. 速率
 2. 带宽
 3. 吞吐率
 4. 时延
 5. 时延带宽积
 6. 往返时间 RTT
 7. 利用率

1. 速率



- 速率，**数据的传送速率**，是计算机网络中最重要的一性能指标，指的是连接在计算机网络上的主机在数字信道上传送数据位数的速率，也称为**数据率** (data rate)或**比特率** (bit rate)。
- 比特 (bit) 是计算机中数据量的单位，也是信息论中使用的信息量的单位。
- 比特 (bit) 来源于 binary digit，意思是一个“二进制数字”，因此一个比特就是二进制数字中的一个 1 或 0。
- 速率的**单位**是 bit/s，或 kbit/s、Mbit/s、Gbit/s 等。例如 4×10^{10} bit/s 的数据率就记为 40 Gbit/s。
- **速率往往是指额定速率或标称速率，非实际运行速率。**

2. 带宽



两种不同意义：

- “带宽” (bandwidth) 本来是指信号具有的频带宽度，其单位是赫（或千赫、兆赫、吉赫等）。
 - 一个特定的信号常由不同的频率成分组成。
 - 信号的带宽指信号各种不同频率成份所占据的频率范围。
 - 例如：电话信号的标准带宽为3.1kHz，频率范围从300Hz到3.4kHz。
- 在计算机网络中，带宽用来表示网络中某**通道传送数据的能力**。表示在单位时间内网络中的某信道所能通过的“**最高数据率**”。单位是 bit/s，即“比特每秒”。

常用的带宽单位



■ 更常用的带宽单位是

- 千比特每秒，即 kb/s (10^3 b/s)
- 兆比特每秒，即 Mb/s (10^6 b/s)
- 吉比特每秒，即 Gb/s (10^9 b/s)
- 太比特每秒，即 Tb/s (10^{12} b/s)

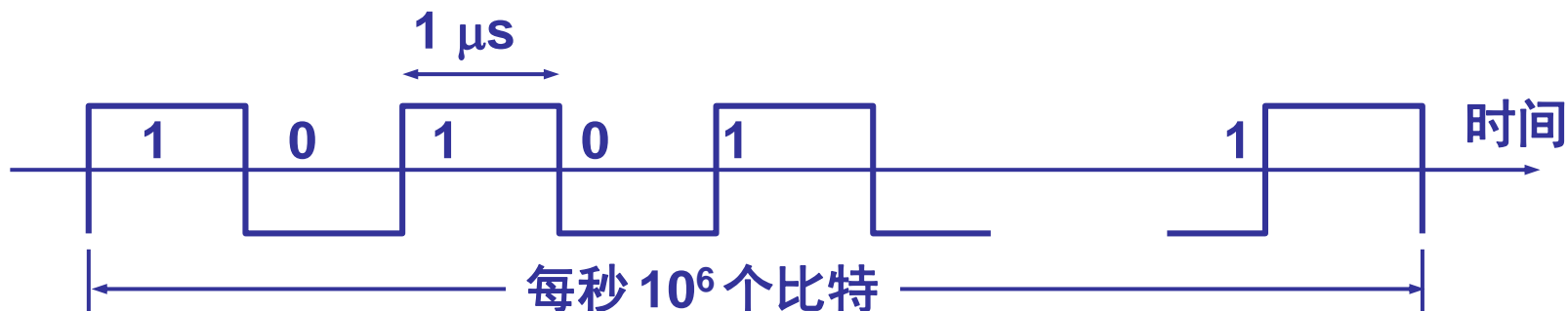
- 请注意：在计算机界， $K = 2^{10} = 1024$
 $M = 2^{20}$, $G = 2^{30}$, $T = 2^{40}$ 。

数字信号流随时间的变化

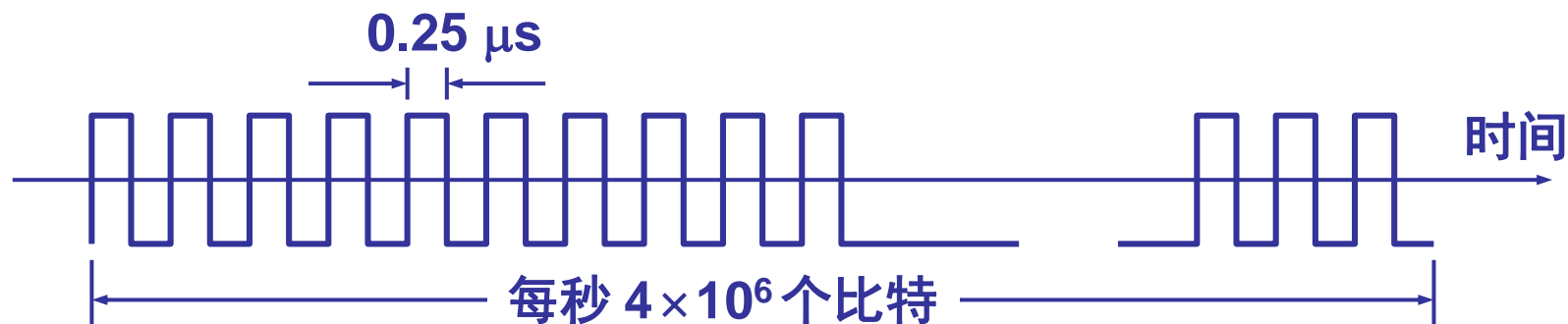


- 在**时间轴**上信号的宽度随带宽的增大而变窄。

带宽为
1 Mbit/s



带宽为
4 Mbit/s



3. 吞吐量



- 吞吐量 (throughput) 表示在**单位时间内**通过某个网络（或信道、接口）的数据量。
- 吞吐量更经常地用于对现实世界中的网络的一种测量，以便知道**实际上到底有多少数据量能够通过网络**。
 - 1Gbit/s的以太网，实际吞吐量可能只有100Mbit/s
- 吞吐量受网络的带宽或网络的额定速率的限制。

4. 时延 (delay 或 latency)

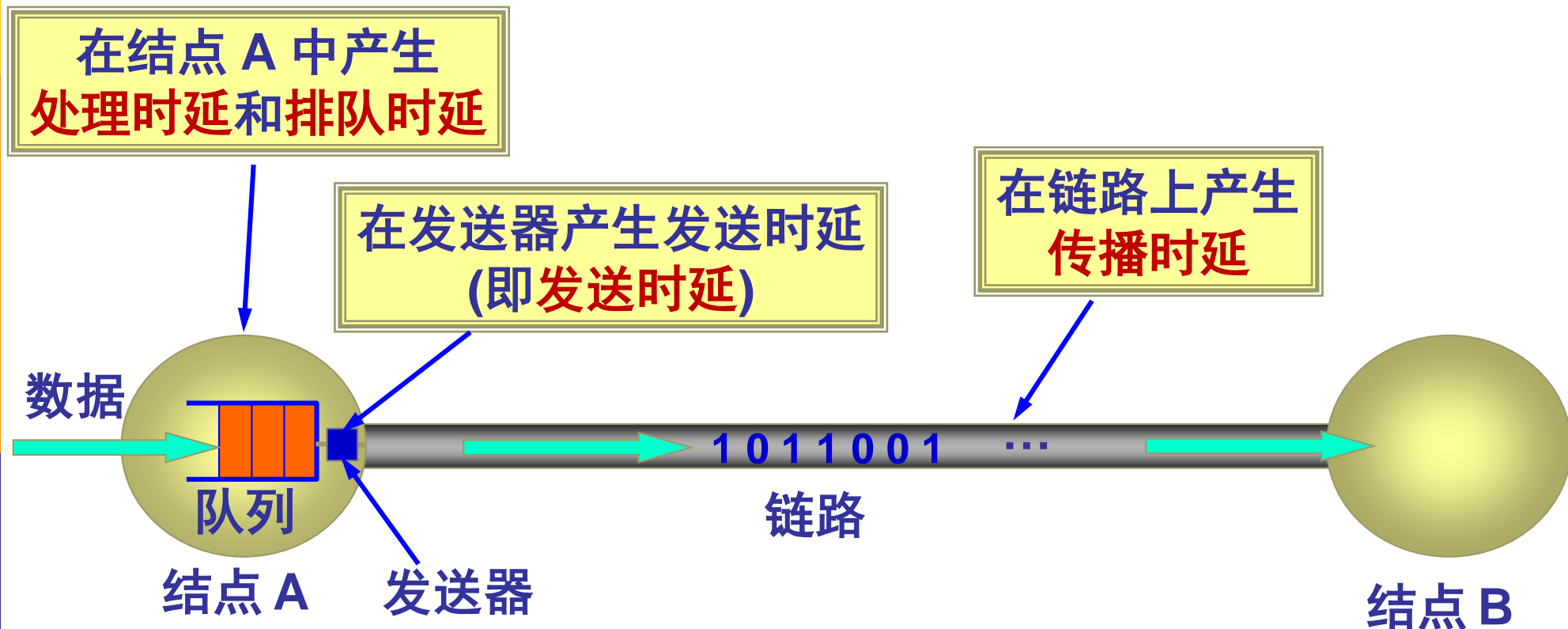


- 时延 (delay 或 latency) 是指数据（一个报文或分组，甚至比特）从网络（或链路）的一端传送到另一端所需的时间。
- 有时也称为**延迟**或**迟延**。
- 网络中的时延由以下几个不同的部分组成：
 - (1) 发送时延
 - (2) 传播时延
 - (3) 处理时延
 - (4) 排队时延

四种时延所产生的地方



假设从结点 A 向结点 B 发送数据



几种时延产生的地方不一样

4. 时延 (delay 或 latency)



■ (1) 发送时延 (transmission delay)

- 也称为**传输时延**。
- 发送数据时，数据帧从结点进入到传输媒体所需要的时间。
- 也就是从发送数据帧的第一个比特算起，到该帧的最后一个比特发送完毕所需的时间。

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据帧长度 (bit)}}{\text{发送速率 (bit/s)}}$$

4. 时延 (delay 或 latency)



■ (2) 传播时延 (propagation delay)

- 电磁波在信道中需要传播一定的距离而花费的时间。
- 发送时延与传播时延有本质上的不同。
- 信号发送速率和信号在信道上的传播速率是完全不同的概念。

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度 (米)}}{\text{信号在信道上的传播速率 (米/秒)}}$$

电磁波在自由空间的传播速率是光速
 $3 \times 10^8 \text{ km/s}$

4. 时延 (delay 或 latency)



■ (3) 处理时延

- 主机或路由器在收到分组时，为处理分组（例如分析首部、提取数据、差错检验或查找路由）所花费的时间。

■ (4) 排队时延

- 分组在路由器**输入、输出队列中排队等待处理**所经历的时延。
- **排队时延的长短往往取决于网络中当时的通信量。**
- **队列溢出时，相当于排队时延无限大。**

4. 时延 (delay 或 latency)



- 数据在网络中经历的总时延就是发送时延、传播时延、处理时延和排队时延之和。

$$\begin{aligned} \text{总时延} = & \text{发送时延} \\ & + \text{传播时延} \\ & + \text{处理时延} \\ & + \text{排队时延} \end{aligned}$$

必须指出，在总时延中，究竟是哪一种时延占主导地位，必须具体分析。

例子



- 有一个长度为100MB的数据块（B是字节，1字节=8比特），在带宽为1Mbit/s的信道上连续发送，其**发送时延**是

$$100 \times 2^{20} \times 8 \text{ (bit)} \div 10^6 = 838.9 \text{ s.}$$

- 用光纤传送到1000km远的计算机，光纤传播速率约为 $2 \times 10^5 \text{ km/s}$,**传播时延**约为5ms。
- 总时延=838.9+0.005 s

容易产生的错误概念



- 对于高速网络链路，我们提高的仅仅是数据的**发送速率**而不是比特在链路上的**传播速率**。
- 提高链路带宽减小了数据的发送时延。

以下说法是**错误**的：

“在高速链路（或高带宽链路）上，比特会传送得更快些”。

5. 时延带宽积



- 链路的时延带宽积又称为**以比特为单位的链路长度**。

$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延} \times \text{带宽}$$



链路像一条空心管道

只有在代表链路的管道都充满比特时，
链路才得到了充分利用。

6. 往返时间 RTT(Round-Trip Time)



- 互联网上的信息不仅仅单方向传输，而是双向交互的。因此，有时很需要知道双向交互一次所需的时间。
- **往返时间**表示从发送方发送数据开始，到发送方收到来自接收方的确认，总共经历的时间。
- 在互联网中，往返时间还包括**各中间结点**的处理时延、排队时延以及转发数据时的发送时延。
- 当使用卫星通信时，往返时间 RTT 相对较长，是很重要的一个性能指标。

例子



- A向B发送数据，数据长度是100MB，发送速率是100Mbit/s，

$$\text{发送时间} = \frac{\text{数据长度}}{\text{发送速率}} = \frac{100 \times 2^{20} \times 8}{100 \times 10^6} \approx 8.39 \text{ s}$$

- B收到100MB数据后，立即向A发送确认，A只有在收到B的确认信息后，才能继续发送数据。
- 如果 $RTT=2 \text{ s}$

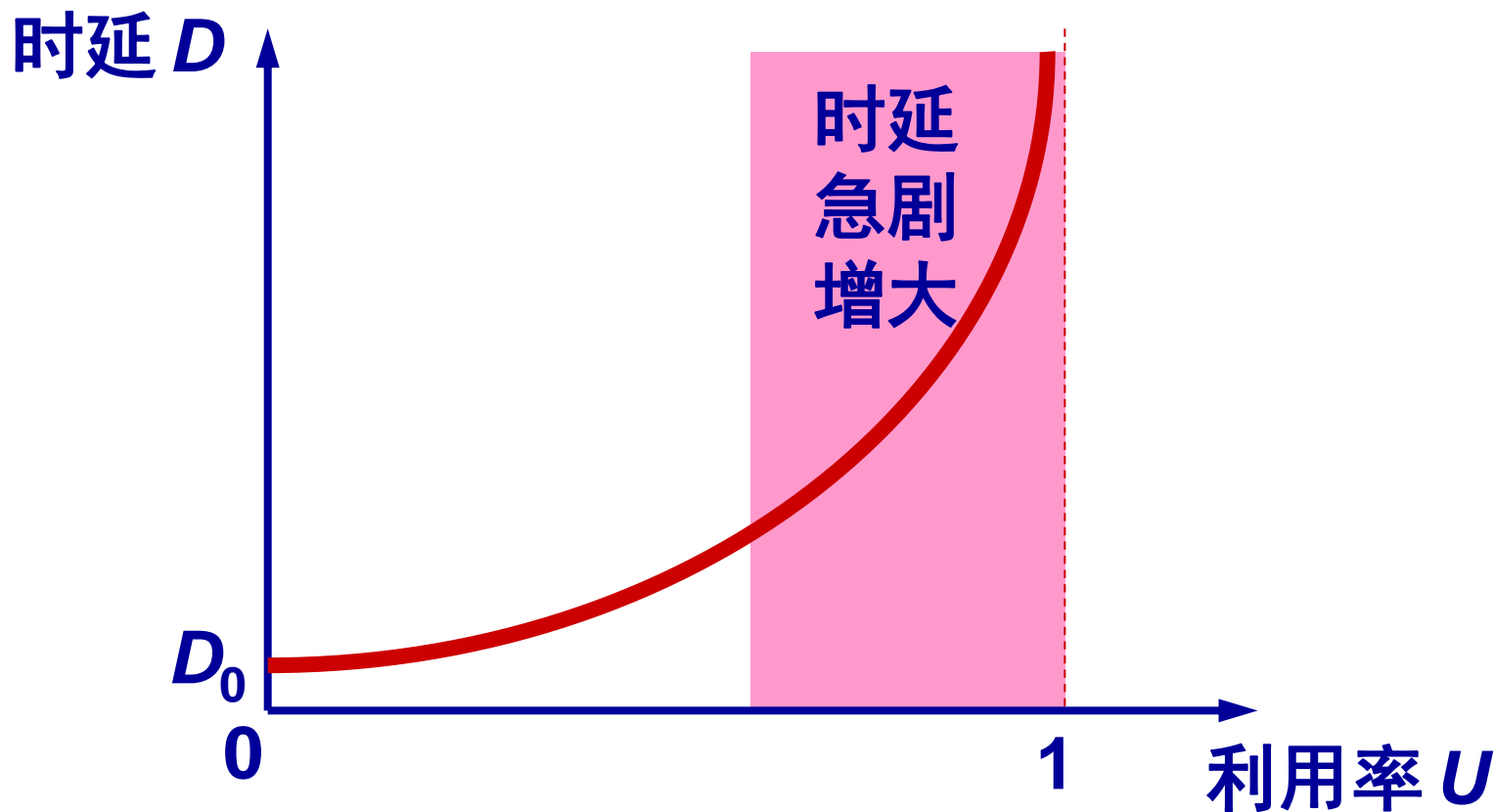
$$\text{有效数据率} = \frac{\text{数据长度}}{\text{发送时间} + RTT} = \frac{100 \times 2^{20} \times 8}{8.39 + 2} \approx 80.7 \text{ Mbit/s}$$

7. 利用率



- 分为**信道利用率**和**网络利用率**。
- **信道利用率**指出某信道有百分之几的时间是被利用的（有数据通过）。完全空闲的信道的利用率是零。
- **网络利用率**则是全网络的信道利用率的加权平均值。
- 信道利用率并非越高越好。当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加。

时延与网络利用率的关系



当信道的利用率增大时，该信道引起的时延迅速增加。

时延与网络利用率的关系



- 根据排队论的理论，当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加。
- 若令 D_0 表示网络空闲时的时延， D 表示网络当前的时延，则在适当的假定条件下，可以用下面的简单公式表示 D 和 D_0 之间的关系：

$$D = \frac{D_0}{1 - U}$$

其中： U 是网络的利用率，数值在 0 到 1 之间。

1.3.2 计算机网络的非性能特征



- 一些非性能特征也很重要。它们与前面介绍的性能指标有很大的关系。主要包括：
 - 费用 (cost)
 - 质量 (quality of service (QoS))
 - 标准化
 - 可靠性 (reliability)
 - 可扩展性 (scalability) 和可升级性 (upgradability)
 - 易于管理和维护

第1章 概述



- 1.1 计算机网络与互联网
 - 1.1.1 互联网的边缘部分
 - 1.1.2 互联网的核心部分
 - 1.1.3 互联网时代
- 1.2 计算机网络的分类
- 1.3 计算机网络的性能
- 1.4 计算机网络的体系结构

1.4 计算机网络的体系结构



- 1.4.1 计算机网络体系结构的形成
- 1.4.2 协议与划分层次
- 1.4.3 具有五层协议的体系结构
- 1.4.4 实体、协议、服务和服务访问点
- 1.4.5 TCP/IP 的体系结构

1.4.1 计算机网络体系结构的形成



- 计算机网络是个非常复杂的系统。
- 相互通信的两个计算机系统必须**高度协调工作**才行，而这种“协调”是相当复杂的。
- “**分层**”可将庞大而复杂的问题，转化为若干较小的局部问题，而这些较小的局部问题就比较易于研究和处理。

1.4.1 计算机网络体系结构的形成



- 1974 年，美国的 IBM 公司宣布了**系统网络体系结构SNA** (System Network Architecture)。这个著名的网络标准就是按照分层的方法制定的。
- 不久后，其他一些公司也相继推出自己公司的具有不同名称的体系结构。
- **由于网络体系结构的不同，不同公司的设备很难互相连通。**

开放系统互连参考模型 OSI/RM



- 为了使不同体系结构的计算机网络都能互连，国际标准化组织 ISO 于 1977 年成立了专门机构研究该问题。
- 他们提出了一个试图使各种计算机在世界范围内互连成网的标准框架，即著名的**开放系统互连基本参考模型 OSI/RM** (Open Systems Interconnection Reference Model)，简称为 OSI。

只要遵循 OSI 标准，一个系统就可以和位于世界上任何地方的、也遵循这同一标准的其他任何系统进行通信。

开放系统互连参考模型 OSI/RM



- 但是基于TCP/IP的互联网已抢先在全球大范围内成功运行了
- OSI 只获得了一些理论研究的成果，在市场化方面却失败了。原因包括：
 - OSI 的专家们在完成 OSI 标准时没有商业驱动力；
 - OSI 的协议实现起来过分复杂，且运行效率很低；
 - OSI 标准的制定周期太长，因而使得按 OSI 标准生产的设备无法及时进入市场；
 - OSI 的层次划分也不太合理，有些功能在多个层次中重复出现。

两种国际标准



- 法律上的 (*de jure*) 国际标准 OSI 并没有得到市场的认可。
- 非国际标准 TCP/IP 却获得了最广泛的应用。
TCP/IP 常被称为**事实上的 (*de facto*) 国际标准**。

1.4.2 协议与划分层次



- 计算机网络中的数据交换**必须遵守事先约定好的规则。**
- 这些规则明确规定了所交换的**数据的格式**以及有关的**同步问题**（同步含有时序的意思）。
- **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。

网络协议的三个组成要素



- **语法：**数据与控制信息的结构或格式。
- **语义：**需要发出何种控制信息，完成何种动作以及做出何种响应。
- **同步：**事件实现顺序的详细说明。

网络协议是计算机网络的不可缺少的组成部分

协议的两种形式



- 一种是使用便于人来阅读和理解的**文字描述**。
- 另一种是使用让计算机能够理解的**程序代码**。
- 这两种不同形式的协议都必须能够对网络上信息交换过程**做出精确的解释**。

层次式协议结构



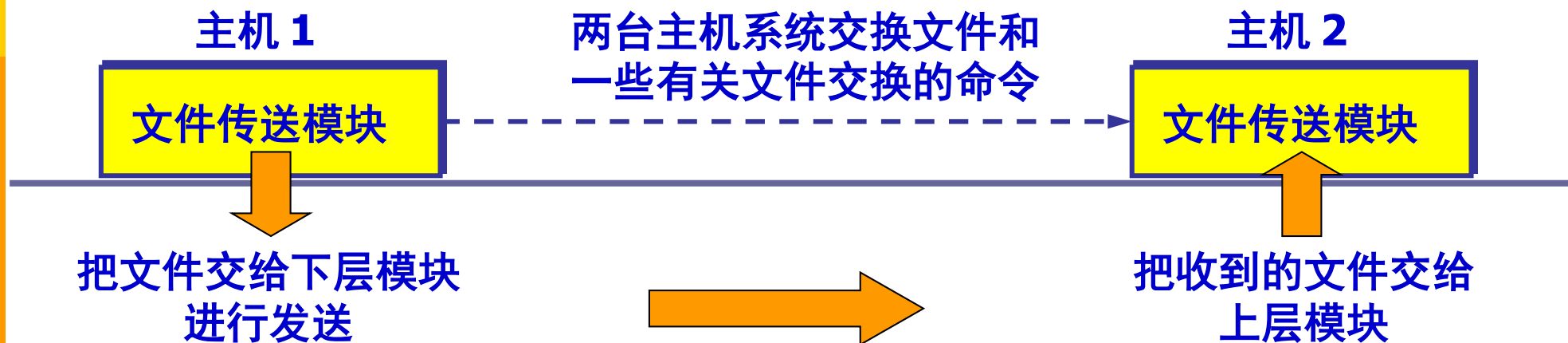
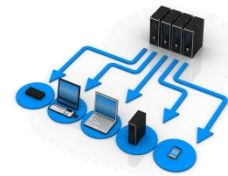
- ARPANET 的研制经验表明，对于非常复杂的计算机网络协议，其结构应该是层次式的。

划分层次的概念举例

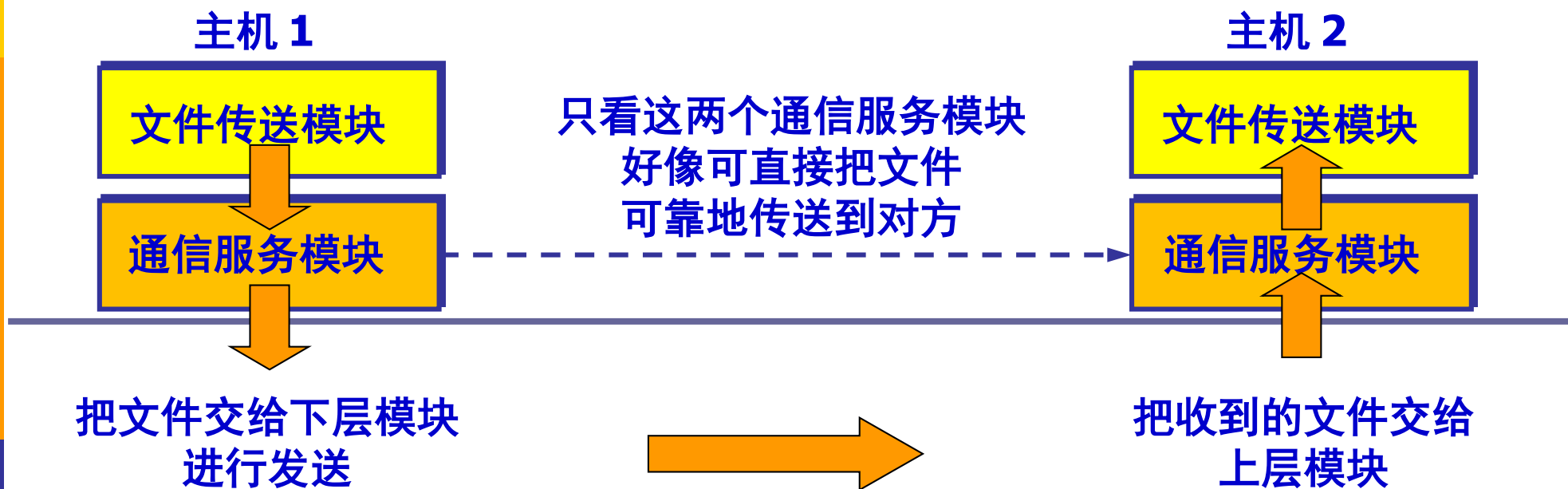


- 主机 1 向主机 2 通过网络发送文件。
- 可以将要做的工作进行如下的划分：
 - **第一类**工作：与传送文件直接有关。
 - 确信对方已做好接收和存储文件的准备。
 - 双方已协调好一致的文件格式。
 - 两个主机将**文件传送模块**作为最高的一层，剩下的工作由下面的模块负责。

两个主机交换文件



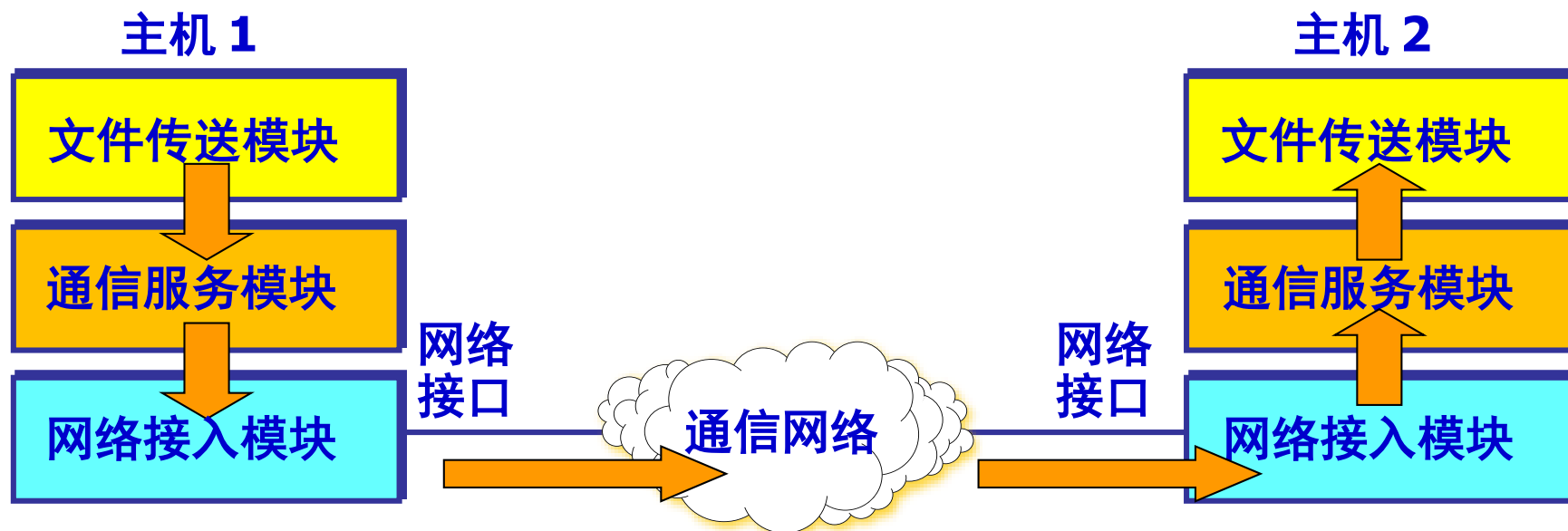
再设计一个通信服务模块



通信服务模块用来保证文件和文件传送命令可靠地在两个系统之间交换。

例：上面的文件传送模块可以换成电子邮件模块

再设计一个网络接入模块



网络接入模块负责做与网络接口细节有关的工作，使上面的通信服务模块能完成可靠通信的任务。

例如：规定传输的帧格式，帧的最大长度等。

分层的好处与缺点



好处

- 各层之间是独立的。
- 灵活性好。
- 结构上可分割开。
- 易于实现和维护。
- 能促进标准化工作。

缺点

- 降低效率
- 有些功能会在不同的层次中重复出现，因而产生了额外开销。

层数多少要适当



- 层数太少，就会使每一层的协议太复杂。
- 层数太多，又会在描述和综合各层功能的系统工程任务时遇到较多的困难。

各层完成的主要功能



- ① **差错控制**：使相应层次对等方的通信更加可靠。
- ② **流量控制**：发送端的发送速率必须使接收端来得及接收，不要太快。
- ③ **分段和重装**：发送端将要发送的数据块划分为更小的单位，在接收端将其还原。
- ④ **复用和分用**：发送端几个高层会话复用一条低层的连接，在接收端再进行分用。
- ⑤ **连接建立和释放**：交换数据前先建立一条逻辑连接，数据传送结束后释放连接。

计算机网络的体系结构



- **计算机网络的体系结构 (architecture)** 是计算机网络的各层及其协议的集合。
- 体系结构就是这个计算机网络及其部件**所应完成的功能的精确定义**。
- **实现 (implementation)** 是遵循这种体系结构的前提下用何种**硬件或软件**完成这些功能的问题。
- 体系结构是抽象的，而实现则是具体的，是真正正在运行的计算机硬件和软件。

1.7.3 具有五层协议的体系结构



- OSI 的七层协议体系结构的概念清楚，理论也较完整，但它既复杂又不实用。
- TCP/IP 是四层体系结构：应用层、运输层、网际层和网络接口层。
- 但最下面的网络接口层并没有具体内容。
- 因此往往采取折中的办法，即综合 OSI 和 TCP/IP 的优点，采用一种只有五层协议的体系结构。

1.7.3 具有五层协议的体系结构

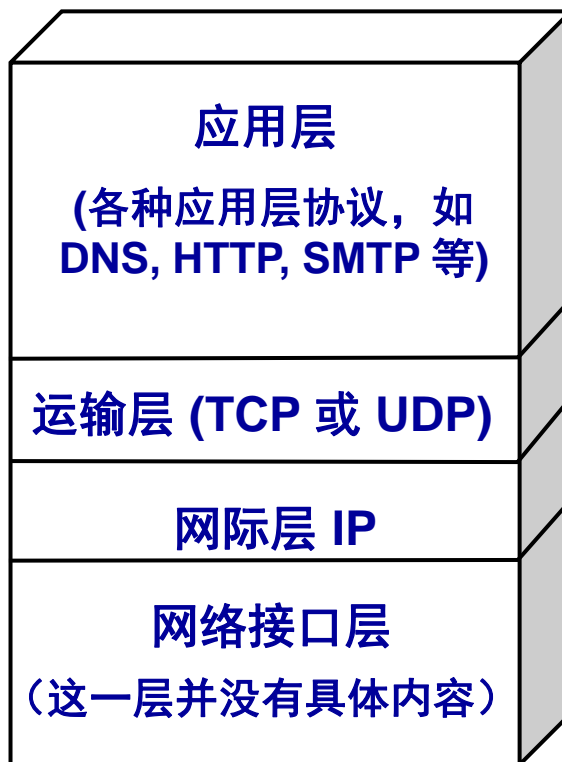


OSI 的体系结构



(a)

TCP/IP 的体系结构



(b)

五层协议的体系结构



(c)

(a) OSI 的七层协议; (b) TCP/IP 的四层协议; (c) 五层协议
计算机网络体系结构

五层协议的体系结构



■ 应用层 (application layer)

- 通过应用**进程间的交互**来完成特定网络应用
- 如 域名系统DNS，万维网HTTP协议，电子邮件SMTP协议

■ 运输层 (transport layer)

- 向两台主机中进程之间的通信提供通用的**数据传输**服务
- 传输控制协议TCP、用户数据报协议UDP

■ 网络层 (network layer)

- 为分组交换网上的不同主机提供通信服务；选择合适的路由
- 网际协议IP和路由选择协议

■ 数据链路层 (data link layer)

- 两个相邻节点之间传送数据

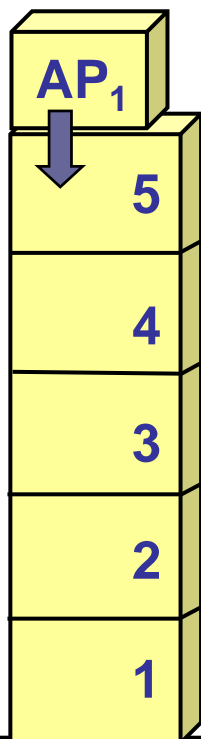
■ 物理层 (physical layer)

- 传输数据单位为比特，要考虑多大的电压代表1或0
- 不包含物理媒介

主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1

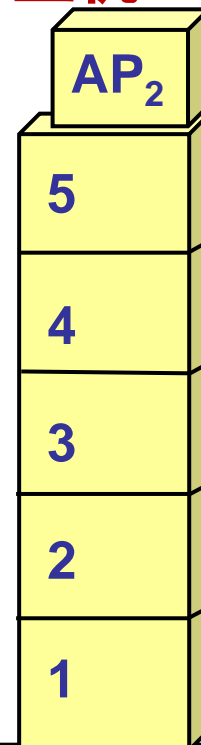


应用进程数据先传送到应用层

加上应用层首部，成为 **应用层 PDU**

PDU (Protocol Data Unit): 协议数据单元。
OSI 参考模型把**对等层次**之间传送的数据单位称为该层的协议数据单元 PDU。

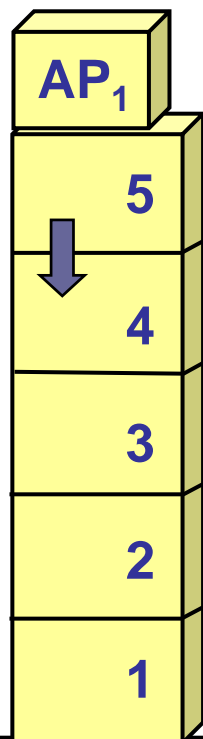
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



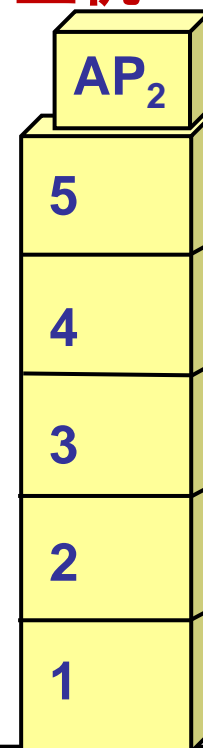
主机 1



应用层 PDU 再传送到运输层

加上运输层首部，成为运输层报文

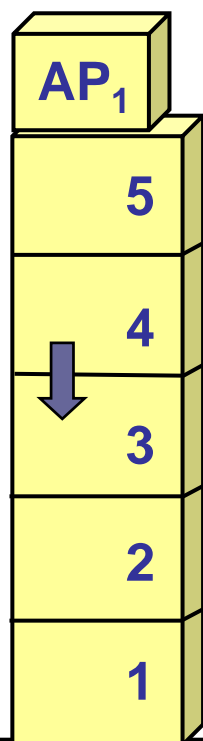
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



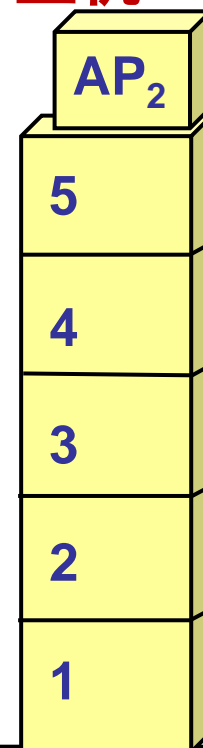
主机 1



运输层报文再传送到网络层

加上网络层首部，成为 IP 数据报（或分组）

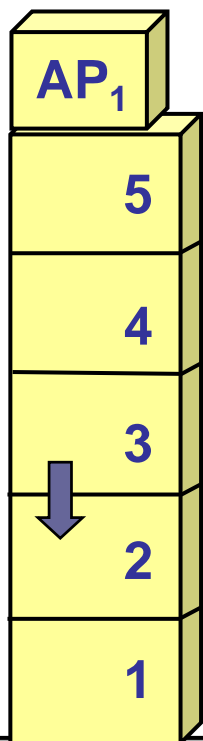
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



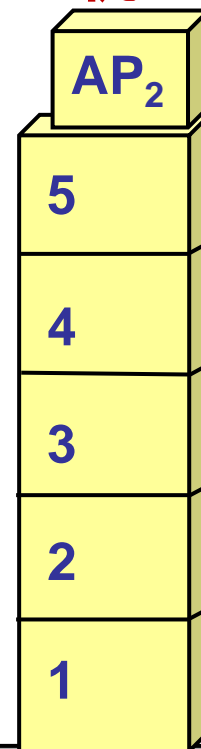
主机 1



IP 数据报再传送到数据链路层

加上链路层首部和尾部，成为数据链路层帧

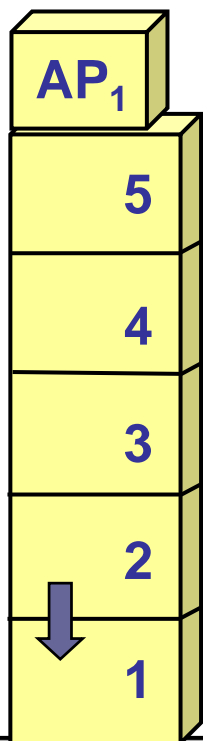
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



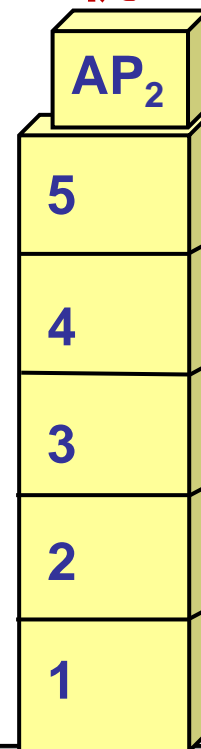
主机 1



数据链路层帧再传送到物理层

最下面的物理层把比特流传送到物理媒体

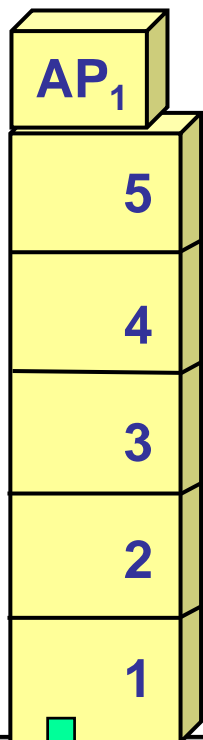
主机 2



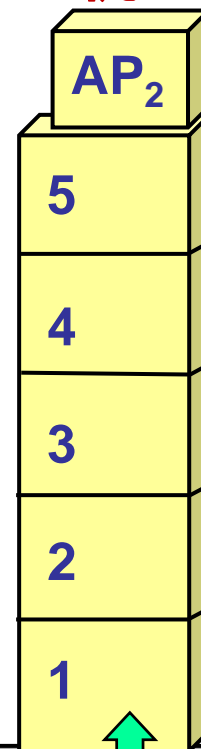
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2



电信号（或光信号）在物理媒体中传播
从发送端物理层传送到接收端物理层

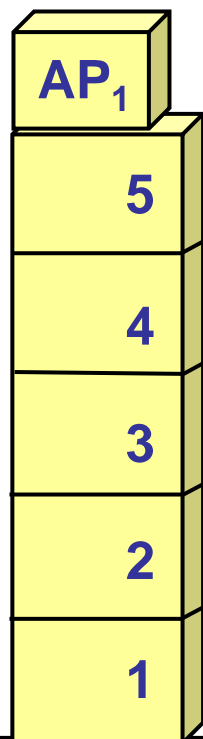


物理传输媒体

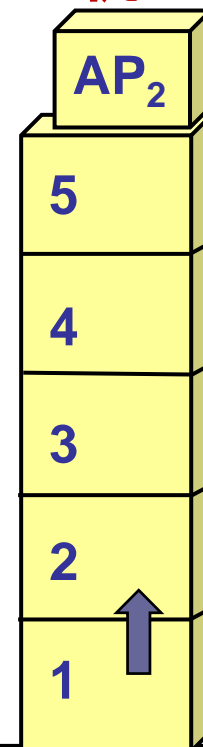
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

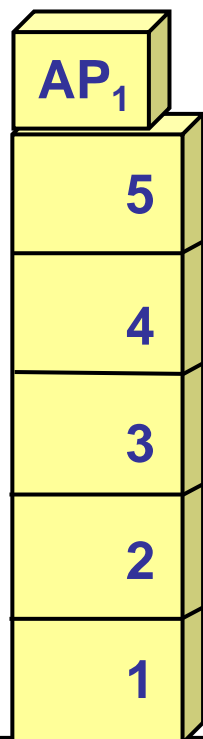


物理层接收到比特流，上交给数据链路层

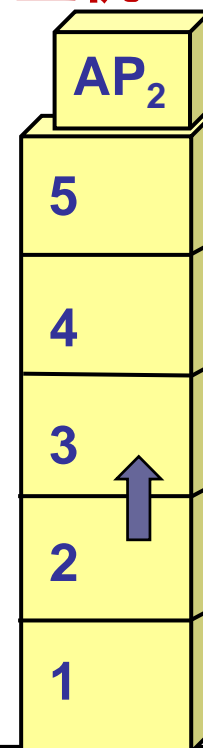
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

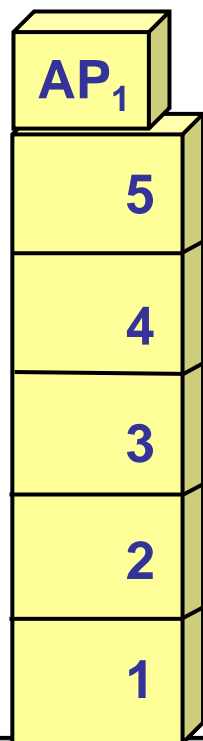


数据链路层剥去帧首部和帧尾部
取出数据部分，上交给网络层

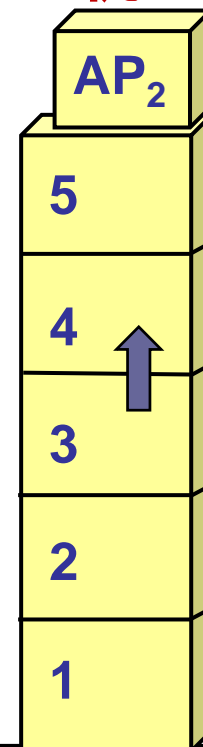
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

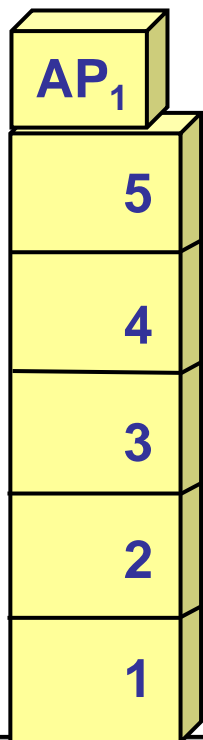


网络层剥去首部，取出数据部分
上交给运输层

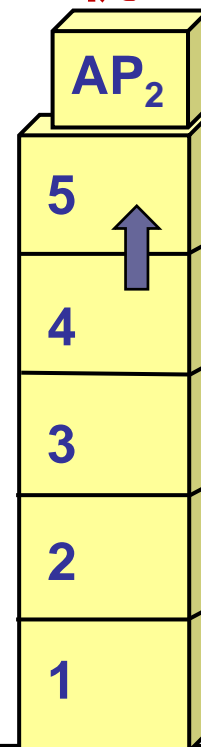
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

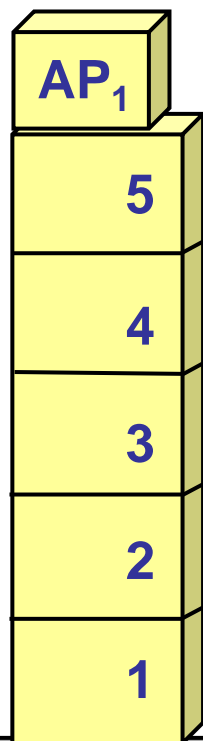


运输层剥去首部，取出数据部分
上交给应用层

主机 1 向主机 2 发送数据

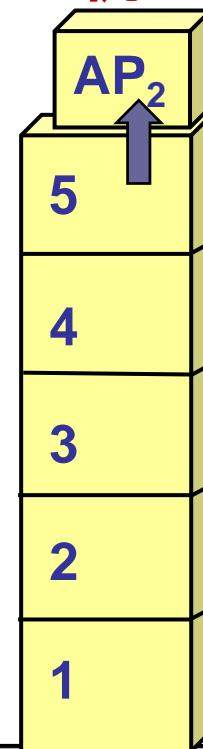


主机 1



应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

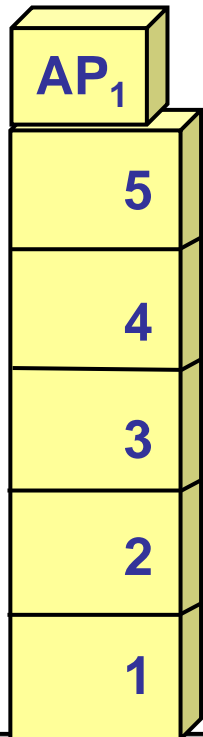
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

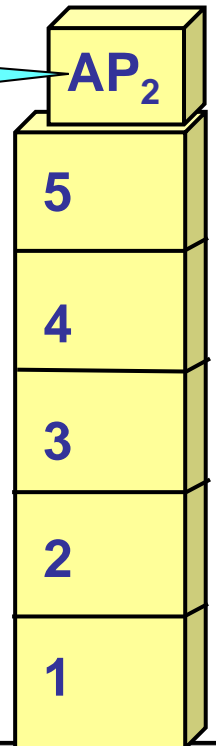


主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2

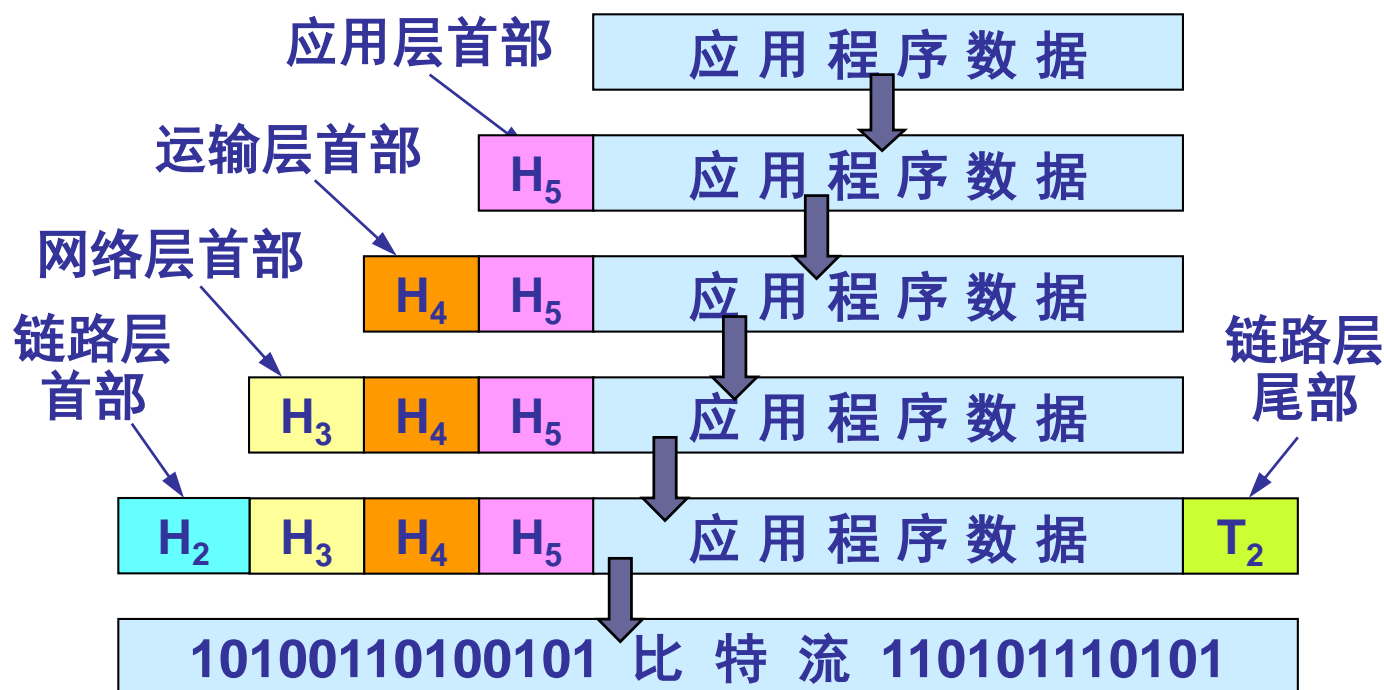
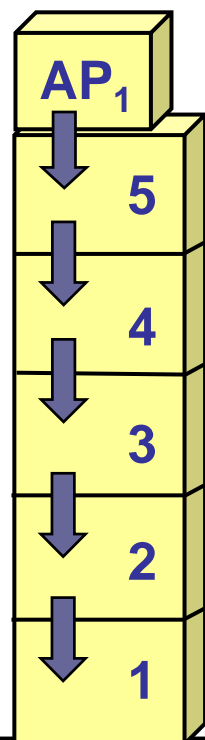


主机 1 向主机 2 发送数据

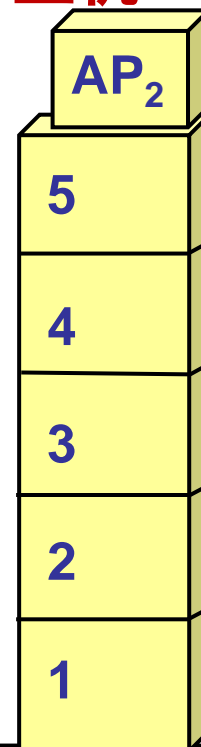


注意观察加入或剥去首部（尾部）的层次

主机 1



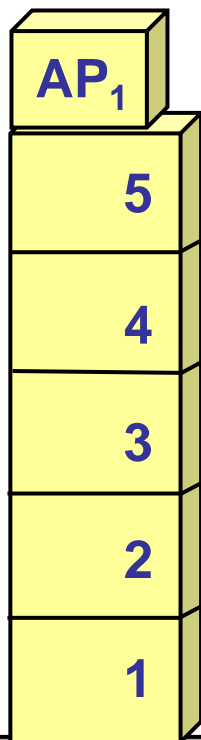
主机 2



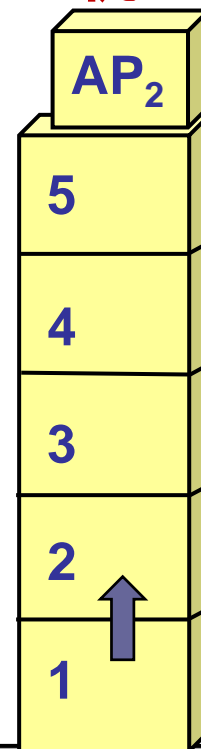
主机 1 向主机 2 发送数据



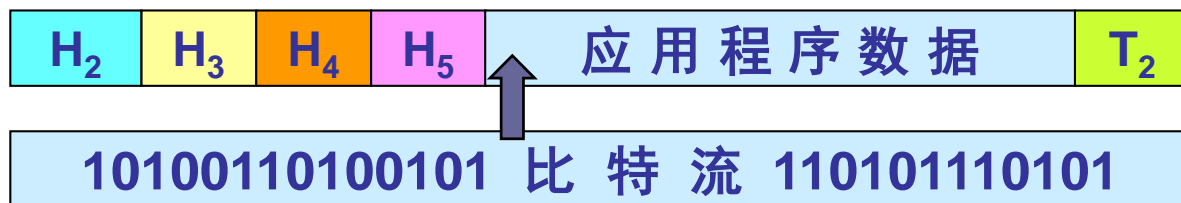
主机 1



主机 2



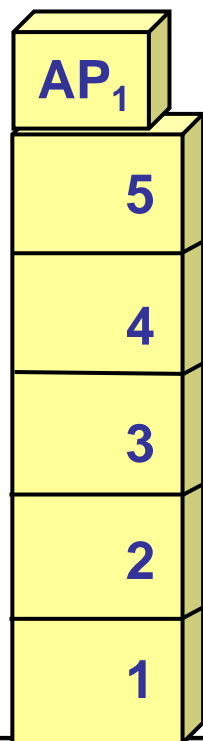
主机 2 的物理层收到比特流后
交给数据链路层



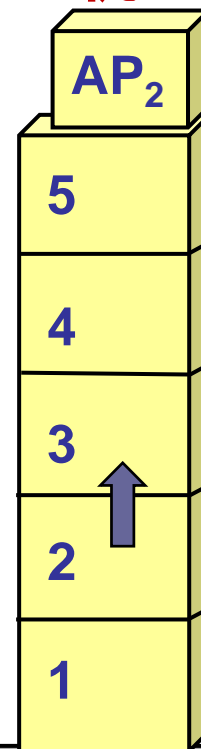
主机 1 向主机 2 发送数据



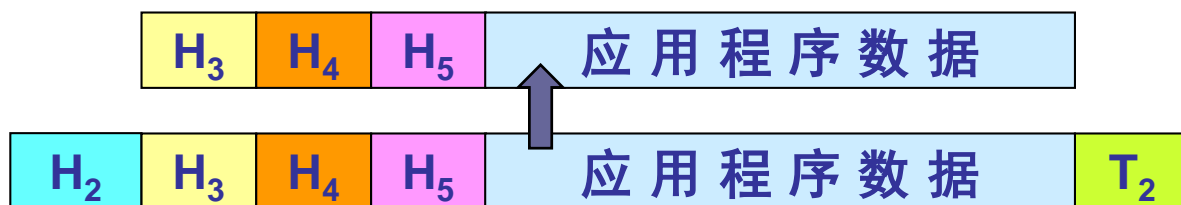
主机 1



主机 2



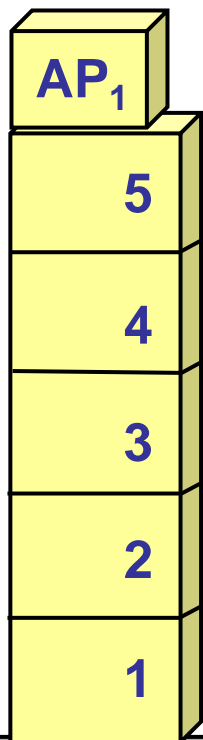
数据链路层剥去帧首部和帧尾部后
把帧的数据部分交给网络层



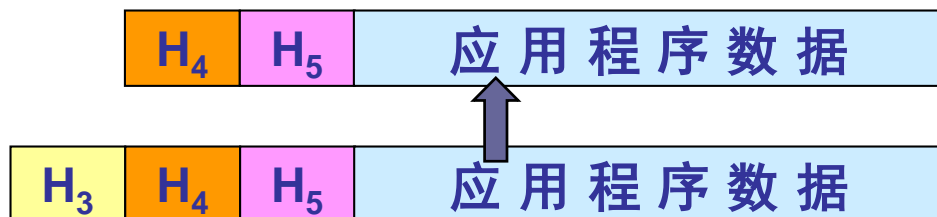
主机 1 向主机 2 发送数据



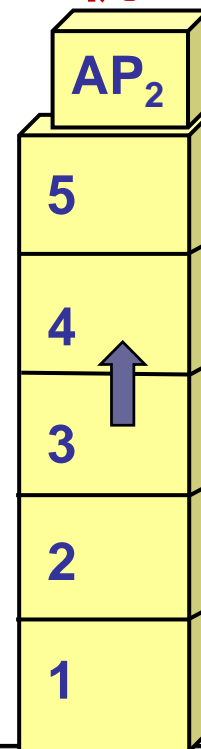
主机 1



网络层剥去分组首部后
把分组的数据部分交给运输层



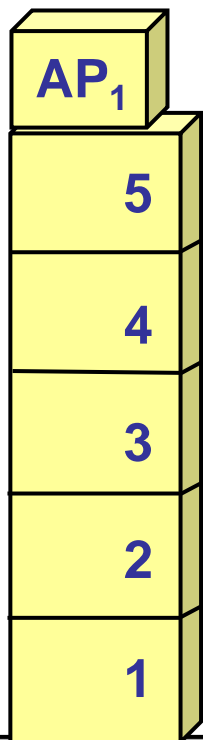
主机 2



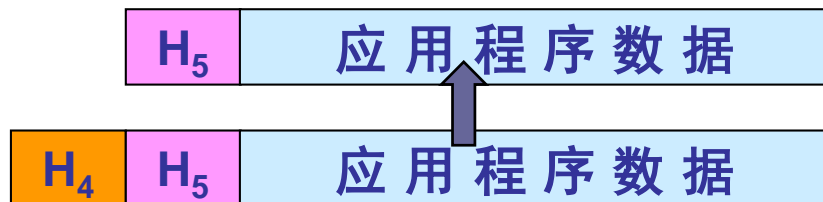
主机 1 向主机 2 发送数据



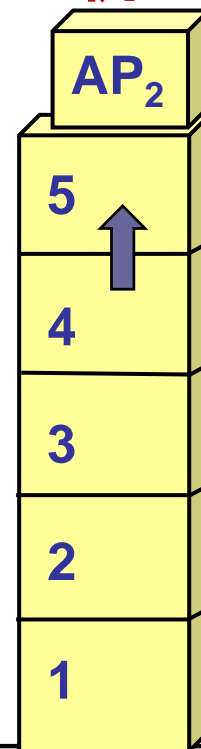
主机 1



运输层剥去报文首部后
把报文的数据部分交给应用层



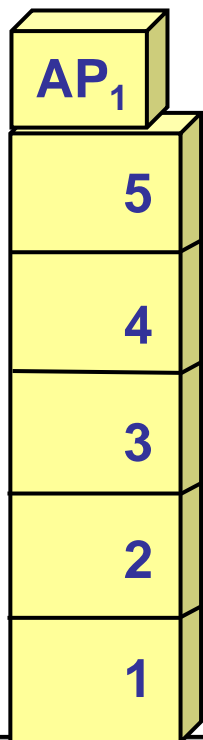
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1

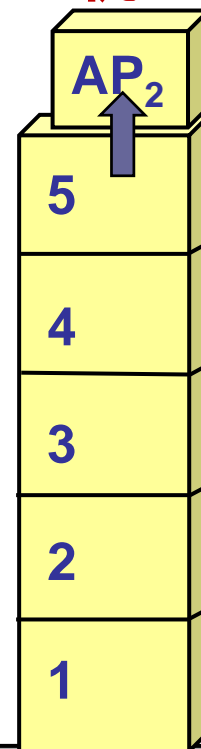


应用程序数据

H_5 应用程序数据

应用层剥去应用层 PDU 首部后
把应用程序数据交给应用进程

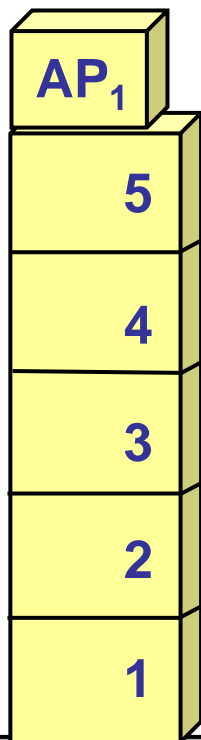
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

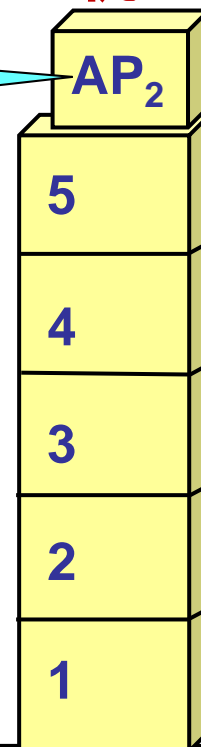


主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



- OSI 参考模型把对等层次之间传送的数据单位称为该层的**协议数据单元 PDU** (Protocol Data Unit)。这个名词现已被许多非 OSI 标准采用。
- 任何两个同样的层次把数据（即数据单元加上控制信息）通过水平虚线直接传递给对方。这就是所谓的“**对等层**” (peer layers)之间的通信。
- **各层协议**实际上就是在各个对等层之间传递数据时的各项规定。

1.7.4 实体、协议、服务和访问点



- **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**进行通信的规则的组合。
 - 语法规则定义了信息的格式，语义规则定义了发送者或接收者所要完成的操作
- 在协议的控制下，两个对等实体间的通信使得本层能够**向上一层提供服务**。
- 要实现本层协议，还需要**使用下层所提供的服务**。

协议和服务在概念上是不一样的



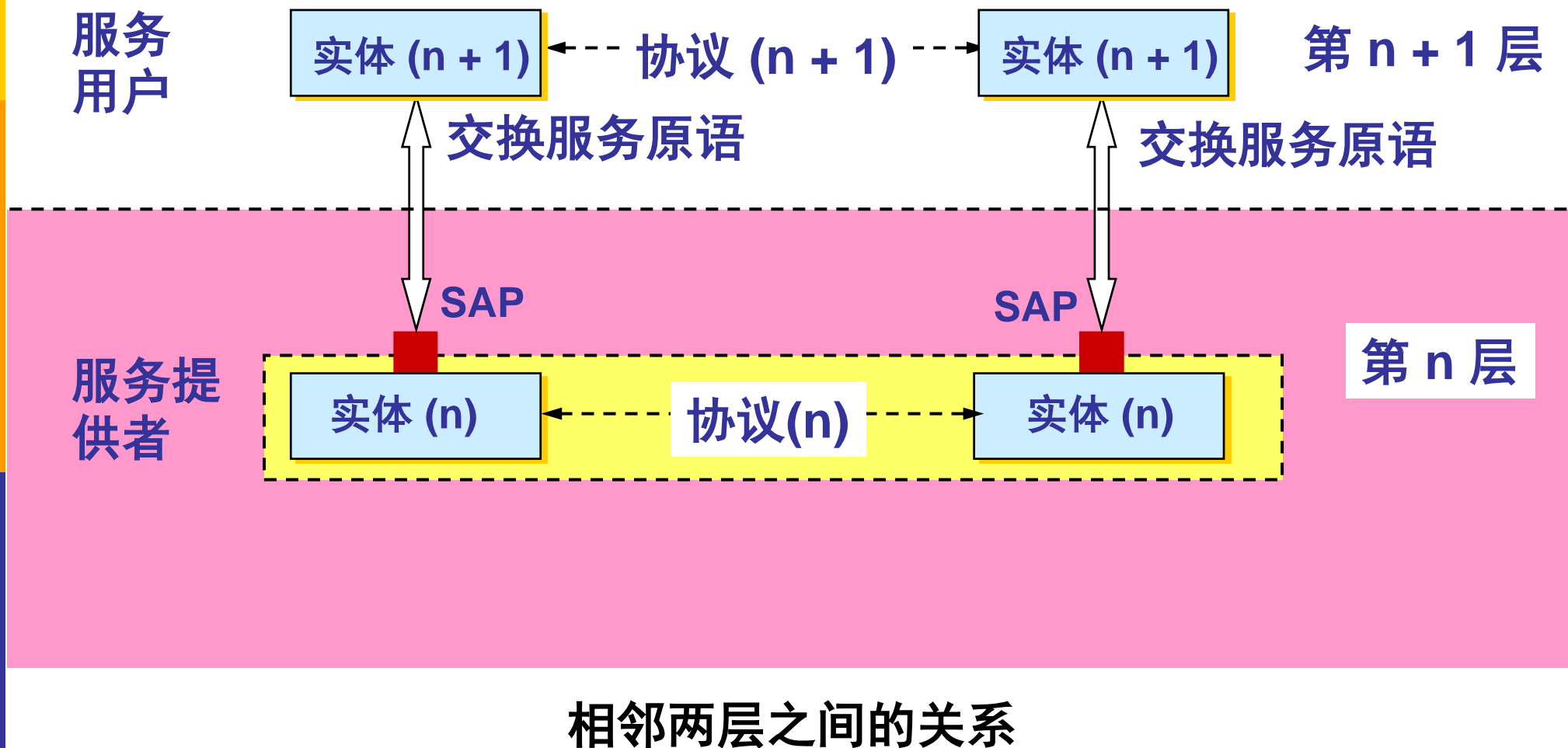
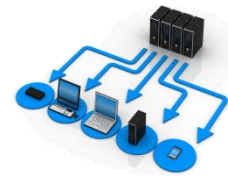
- 协议的实现保证了能够向上一层提供服务。
- 本层的服务用户**只能看见服务**而无法看见下面的协议。即下面的协议对上面的服务用户是**透明**的。
- **协议**是“**水平的**”，即协议是控制对等实体之间通信的规则。
- **服务**是“**垂直的**”，即服务是由下层向上层通过层间接口提供的。
- 上层使用下层提供的服务必须通过**服务原语**。

服务访问点



- 同一系统相邻两层的实体进行交互的地方，称为**服务访问点 SAP** (Service Access Point)。
- 服务访问点SAP是一个抽象的概念，它实际上就是一个逻辑接口。
- OSI把层与层之间交换的数据的单位称为**服务数据单元 SDU** (Service Data Unit)。
- SDU 可以与 PDU 不一样，例如，可以是多个 SDU 合成为一个 PDU，也可以是一个 SDU 划分为几个 PDU。

1.7.4 实体、协议、服务和访问点



协议很复杂



- 协议必须把所有**不利的条件**事先都估计到，而**不能假定**一切都是正常的和非常理想的。
- 看一个计算机网络协议是否正确，不能光看在正常情况下是否正确，还必须非常仔细地检查这个协议**能否应付各种异常情况**。

【例1-1】著名的协议举例



- 占据东、西两个山顶的蓝军 1 和蓝军 2 与驻扎在山谷的白军作战。其力量对比是：单独的蓝军1或蓝军2打不过白军，但蓝军 1 和蓝军 2 协同作战则可战胜白军。现蓝军 1 拟于次日正午向白军发起攻击。于是用计算机发送电文给蓝军 2。但通信线路很不好，电文出错或丢失的可能性较大（没有电话可使用）。因此要求收到电文的友军必须送回一个确认电文。但此确认电文也可能出错或丢失。**试问能否设计出一种协议使得蓝军 1 和蓝军 2 能够实现协同作战，因而一定（即 100 %而不是 99.999...%）取得胜利？**



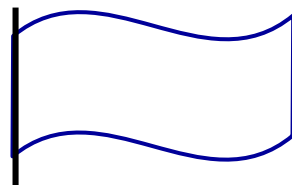
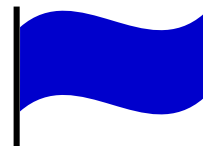
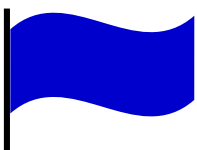
明日正午进攻，如何？

同意

收到“同意”

这样的协议无法实现！

收到：收到“同意”

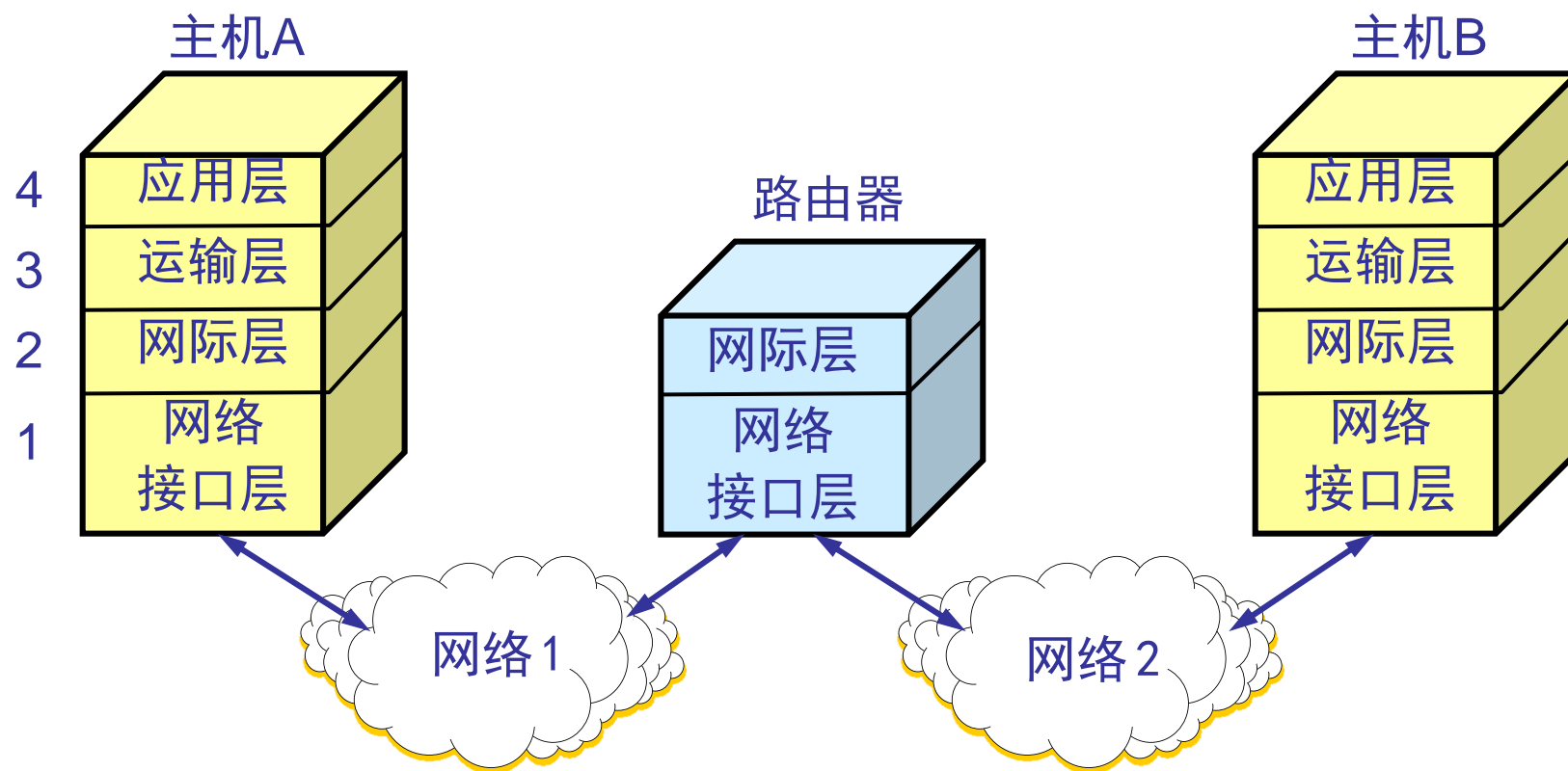


结论



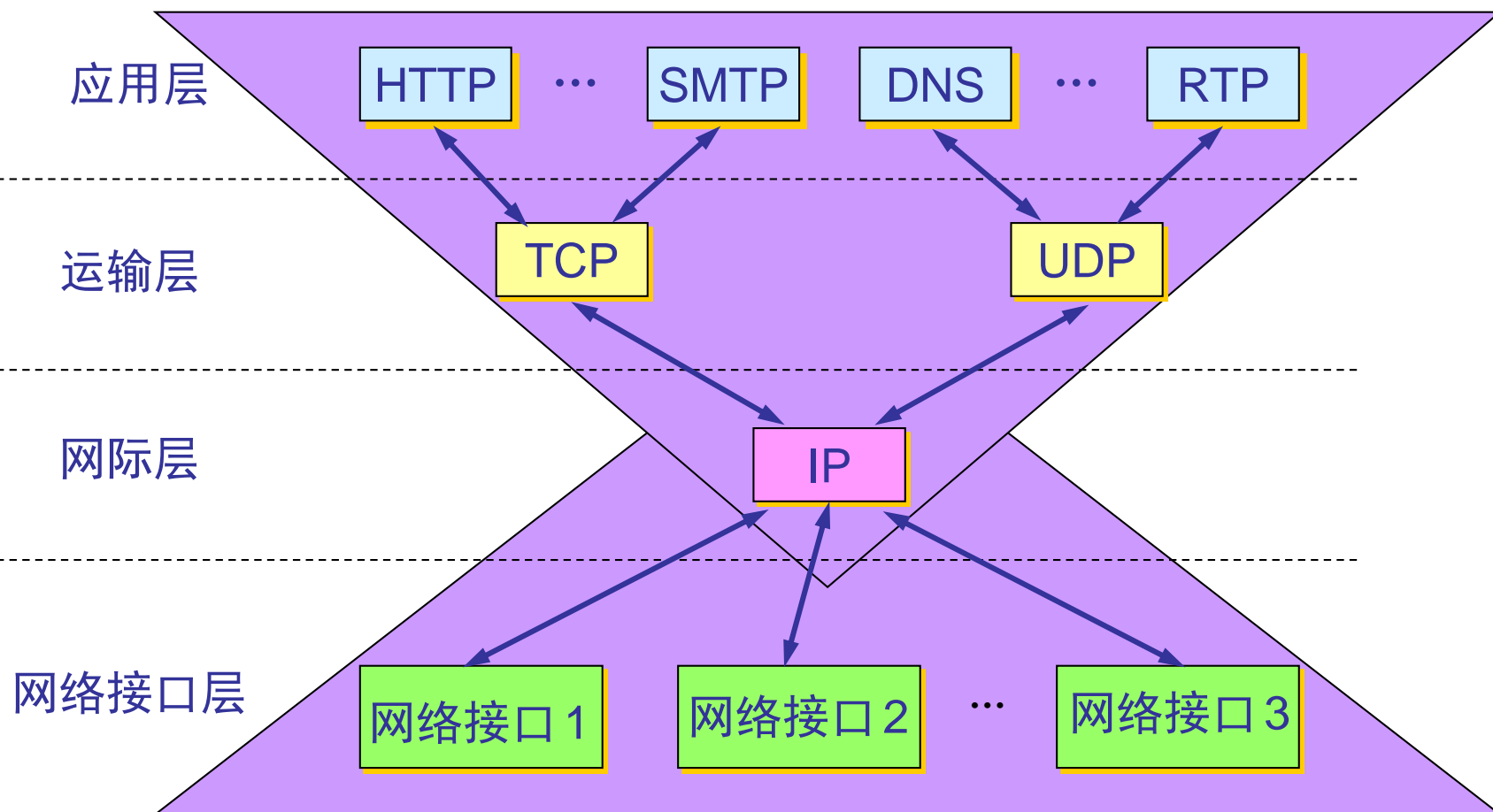
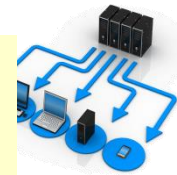
- 这样无限循环下去，两边的蓝军都始终无法确定自己最后发出的电文对方是否已经收到。
- 没有一种协议能够使蓝军 100% 获胜。
- 这个例子告诉我们，看似非常简单的协议，设计起来要考虑的问题还是比较多的。

TCP/IP 的四层体系结构

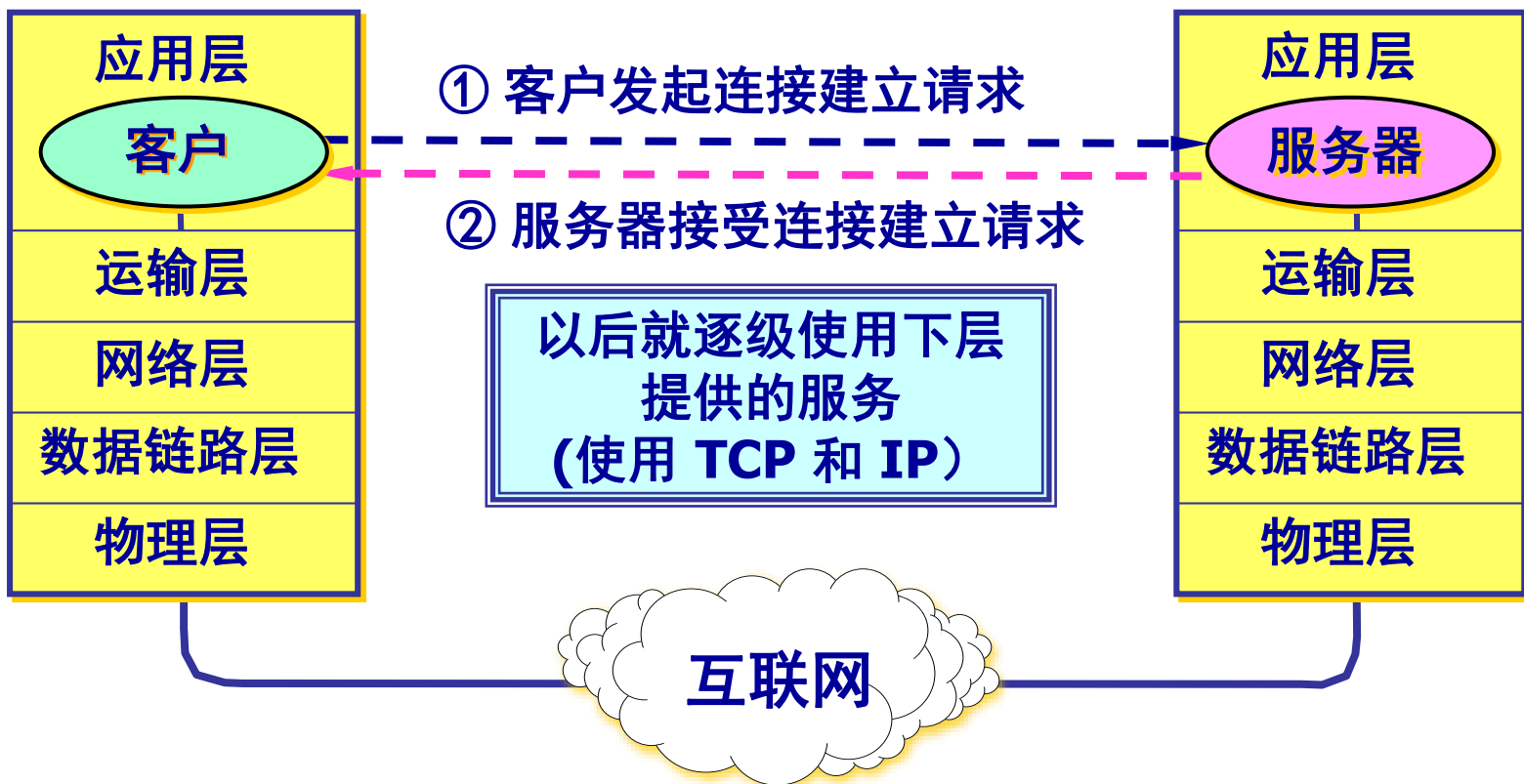


IP over Everything

IP可应用到各式各样的网络上

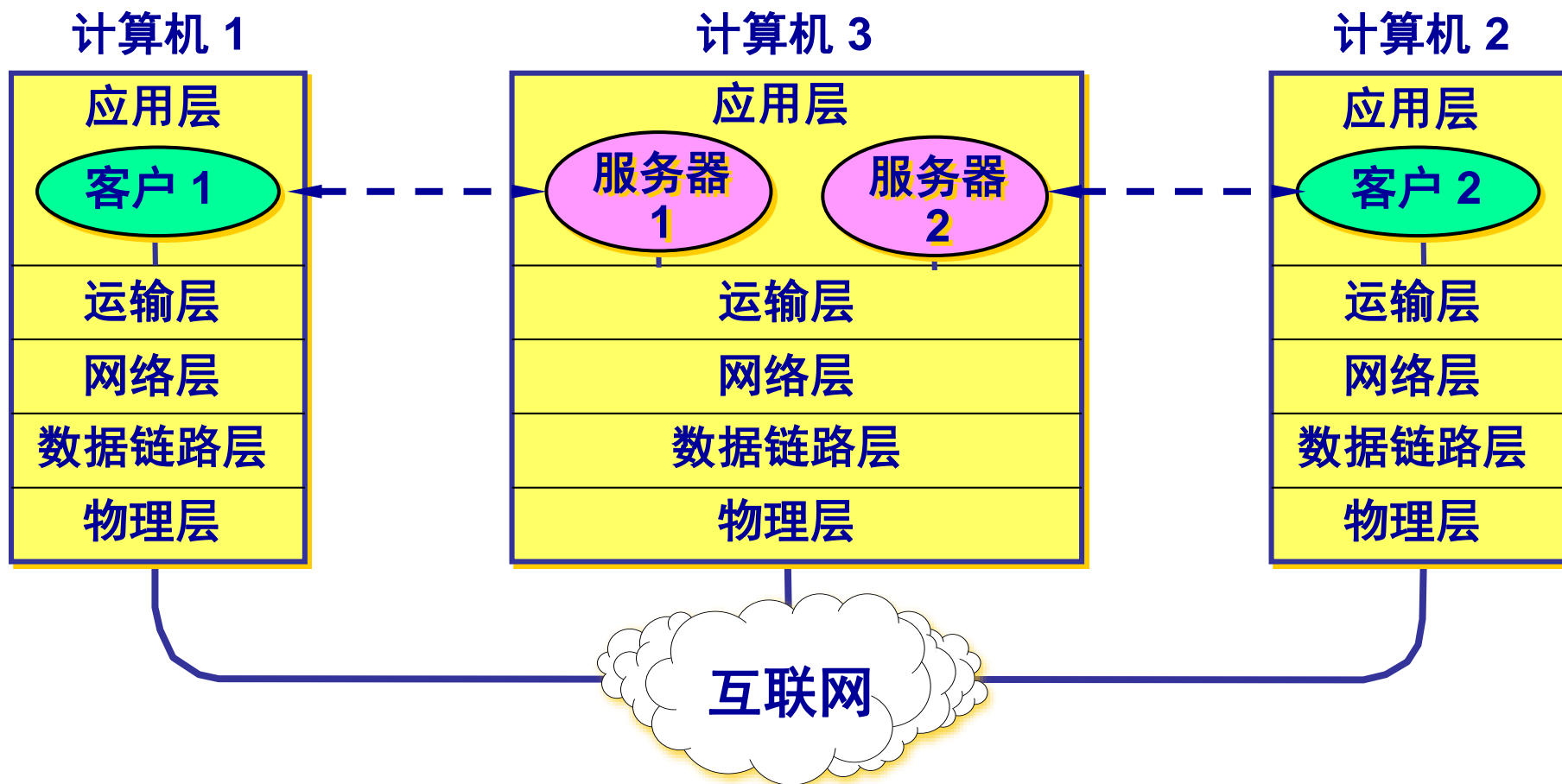


【例1-2】客户-服务器工作方式



在应用层的客户进程和服务器进程的交互

功能较强的计算机 可同时运行多个服务器进程



计算机 3 的两个服务器进程分别向 1 和 2 的客户进程提供服务

总结



- 计算机网络的概念
- 互联网的组成
- 分组交换技术
- 计算机网络常用的性能指标
- 网络协议的概念
- 五层协议的体系结构