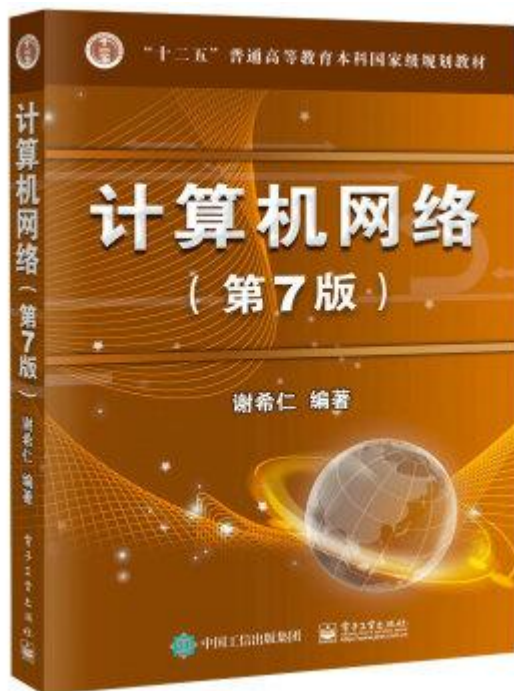


计算机网络



■ 教学用书：计算机网络（第7版） 谢希仁 编著



授课学时：64（1-14周）

考试方式：闭卷

（期末考试占70%，平时成绩占30%）

何庭钦 15084984353

271880026@qq.com

学习目标



- 了解计算机网络技术的起源、发展与现状，理解相关概念、基本原理和基本方法。
- 熟悉计算机网络的体系结构，理解各层的功能、工作原理和相关协议、网络安全相关知识。
- 能够着眼于数据通信中所要解决的问题。
- 验证和掌握计算机网络的安装、配置、调试、开发与应用，提高网络通信实践技能。
- 思考认识计算机网络中的系统论、设计方法学、发展规律、价值评判等问题

第 1 章 概述（一）



第1章 概述



- 1.1 计算机网络在信息时代中的作用
- 1.2 互联网概述
- 1.3 互联网的组成
- 1.4 计算机网络在我国的发展

“清洁网络” (Clean Network)



- 1) Clean carrier
- 2) Clean store
- 3) Clean apps
- 4) Clean cloud
- 5) Clean cable



<http://v.ifeng.com/c/v/b7080cb5-028a-448d-bc8a-ea4c8279c919>

talk is cheap show me the code

1.1 计算机网络在信息时代中的作用



- 21 世纪的一些重要特征是**数字化**、**网络化**和**信息化**，它是一个以**网络为核心**的信息时代。
 - 网络现在已经成为信息社会的命脉和发展知识经济的**重要基础**。
 - 大众熟悉的三大类网络有：
 - **电信网络**：提供电话、电报及传真等服务；
 - **有线电视网络**：向用户传送各种电视节目；
 - **计算机网络**：使用户能在计算机之间传送数据文件；
- 发展最快的并起到核心作用的是计算机网络。

1.1 计算机网络在信息时代中的作用



- 随着技术的发展，网络技术**相互融合**：
 - 电信网络和有线电视网络都逐渐融入了现代计算机网络技术，扩大了原有的服务范围；
 - 计算机网络也能够向用户提供电话通信、视频通信以及传送视频节目的服务。
- 从理论上讲，可以把上述三种网络融合成一种网络就能够提供所有的上述服务，这就是很早以前就提出来的“**三网融合**”。
- 但实现融合并不简单，因为这涉及到各方面的经济利益和行政管辖权的问题。

Internet 发展



- 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。
- 是人类自印刷术发明以来人类在存储和交换信息领域中的最大变革。

Internet 中文译名



■ Internet 的中文译名并不统一。现有的 Internet 译名有两种：

- **因特网**，这个译名是全国科学技术名词审定委员会推荐的，**但却长期未得到推广**；
- **互联网**，这是目前流行最广的、事实上的标准译名。现在我国的各种报刊杂志、政府文件以及电视节目中都毫无例外地使用这个译名。

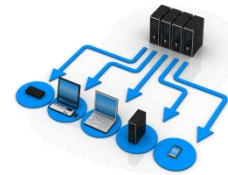
该译名能够体现出 **Internet 最主要的特征**：由数量极大的各种计算机网络互连起来的。

internet 和 Internet 的区别



- 以**小写字母 “i”** 开始的 internet（互连网）是一个通用名词，它泛指由多个计算机网络互连而成的网络。
- 以**大写字母 “I”** 开始的 Internet（互联网或因特网）则是一个专用名词，它指当前全球最大的、开放的、由众多网络相互连接而成的特定计算机网络，它采用 TCP/IP 协议族作为通信的规则，且其前身是美国的 ARPANET。

internet 和 Internet 的区别



任意把几个计算机网络互连起来（不管采用什么协议），并能够相互通信，这样构成的是一个互连网 (internet)，而不是互联网 (Internet)。

互连网与互联网



- 不同的网络。
- **互连网**：指在局部范围互连起来的计算机网络。
- **互联网**：指当今世界上最大的计算机网络。
Internet。

“网”与互联网



- 有时，往往使用更加简洁的方式表示互联网，这就是只用一个“网”字。
- 例如：
 - “上网”就是表示使用某个电子设备连接到互联网，而不是连接到其他的网络上。
 - 网民、网吧、网银（网上银行）、网购（网上购物）等。这里的“网”，一般都不是指电信网或有线电视网，而是指当今世界上最大的计算机网络 Internet ——互联网。

什么是互联网？



- 互联网是由数量极大的各种计算机网络互连起来而形成的网络。
- 可以从两种不同的方面来认识互联网：
 - 互联网应用
 - 互联网工作原理与特点

互联网应用



绝大多数人通过使用互联网而认识了互联网。

- 上网玩游戏
- 看网上视频
- 和朋友在微信上聊天
- 在互联网上搜索和查阅各种信息
- 利用互联网的电子邮件相互通信（包括传送各种照片和视频文件）
- 互联网上购买各种物品
- 在互联网上购买机票或火车票
- 在互联网上预订酒店
- 利用互联网进行转账或买卖股票等交易
-

互联网的两个重要特点



互联网之所以能够向用户提供许多服务，是因为互联网具有**两个重要基本特点**：

■ 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。
- **注意**，互联网具有虚拟的特点，无法准确知道对方是谁，也无法知道对方的位置。

■ 共享 (Sharing)

- 指资源共享。
- 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。

互联网在生活中的地位

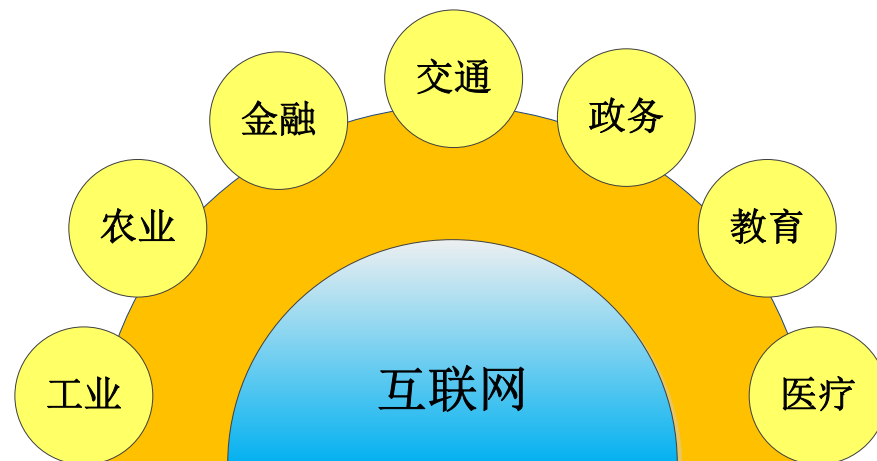


- 现在人们的生活、工作、学习和交往都已离不开互联网。
- 互联网已经成为现代社会最为重要的基础设施。
- 同时，互联网也使人们的生活方式发生了重大的变化。

互联网+



- 指“互联网 + 各个传统行业”。
- 利用信息通信技术以及互联网平台，让互联网与传统行业进行深度融合，创造新的发展生态。
- **特点：**把互联网的创新成果**深度融合**于经济社会各领域之中，从而大大地提升了实体经济的创新力和生产力。



互联网负面影响



- 互联网也给人们带来了一些负面影响，例如：
 - 利用互联网传播计算机病毒
 - 利用互联网窃取国家机密和盗窃银行或储户的钱财
 - 网上欺诈
 - 在网上肆意散布谣言、不良信息和播放不健康的视频节目
 - 青少年弃学而沉溺于网络游戏等

因此，必须加强对互联网的管理。

1.2 互联网概述



- 1.2.1 网络的网络
- 1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段
- 1.2.3 互联网的标准化工作

1.2.1 网络的网络



■ 互联网 (Internet)

- 特指Internet，起源于美国，现已发展成为世界上最大的、覆盖全球的计算机网络。

■ 计算机网络 (简称为网络)

- 由若干结点(node)和连接这些结点的链路(link)组成。

■ 互连网 (internetwork 或 internet)

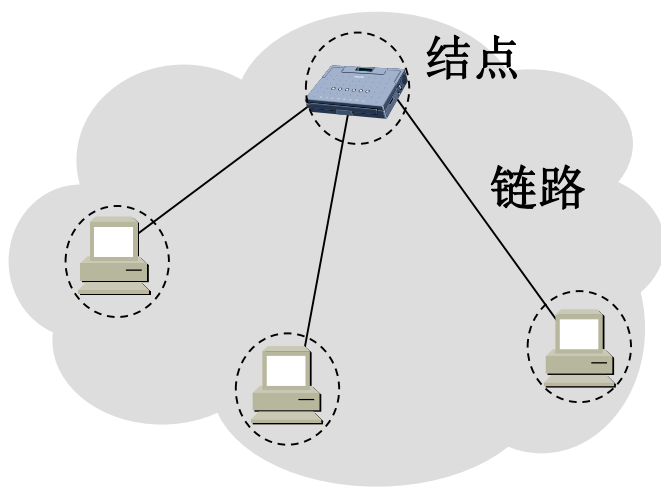
- 可以通过路由器把网络互连起来，这就构成了一个覆盖范围更大的计算机网络，称之为互连网。
- “网络的网络” (network of networks)。

1.2.1 网络的网络

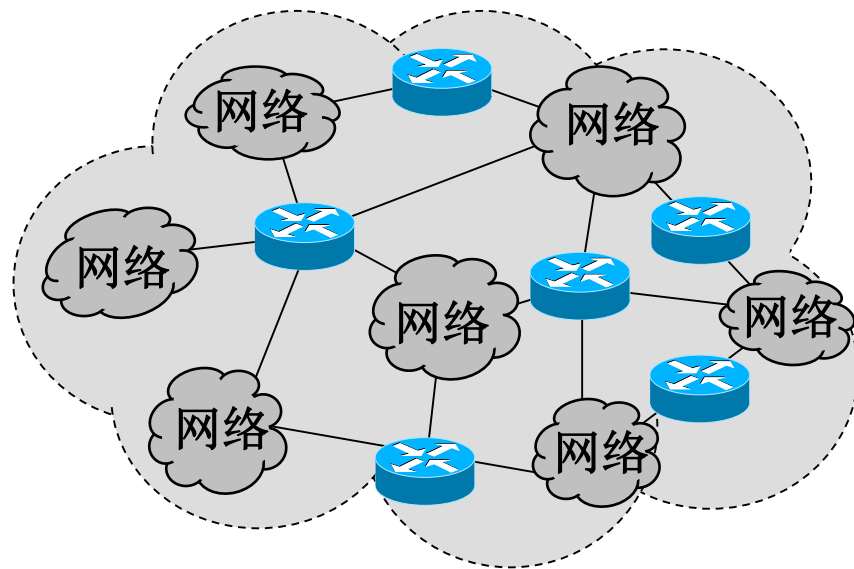


计算机网络（网络）

互连网（网络的网络）



(a)



(b)

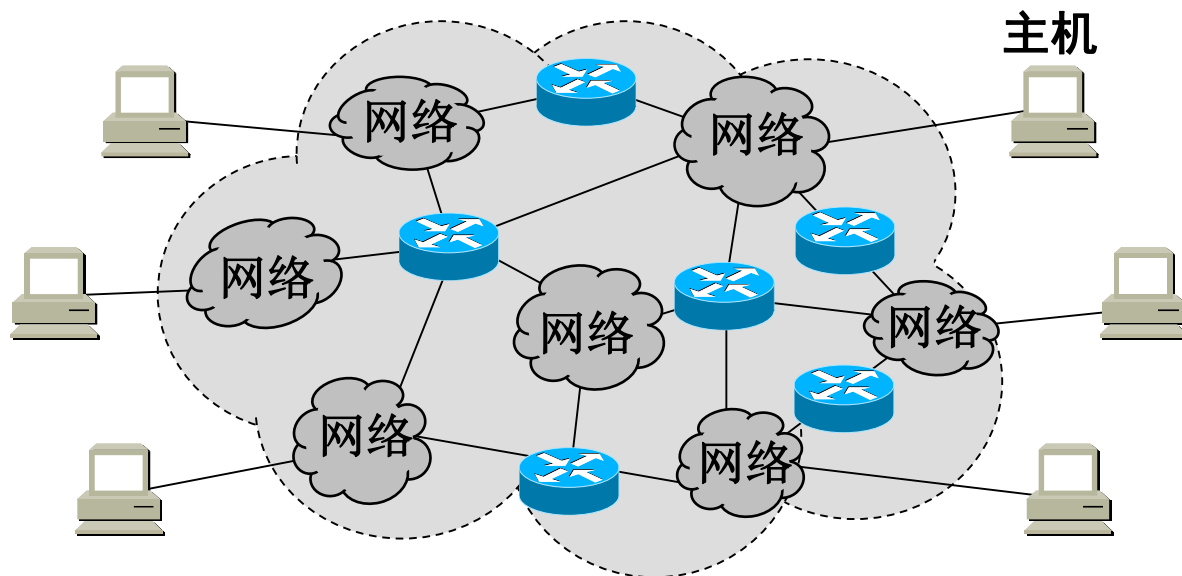
简单的网络 (a) 和 由网络构成的互连网 (b)

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。

1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段

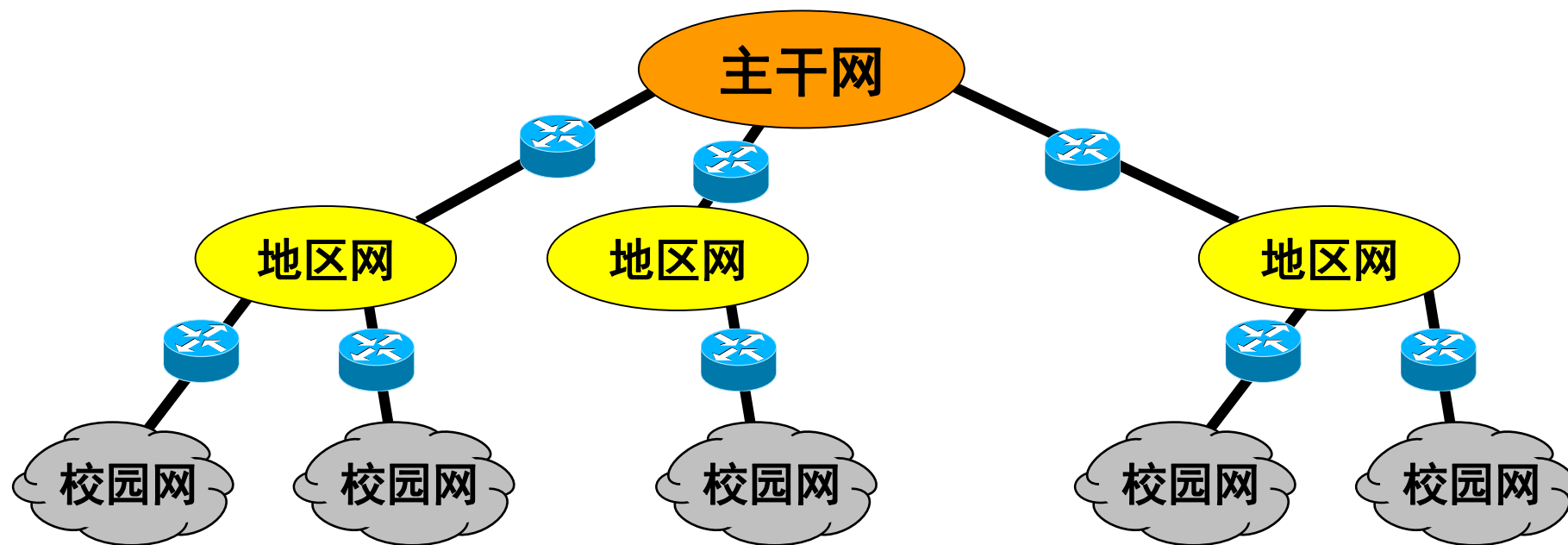


- **第一阶段：**从单个网络 ARPANET 向互联网发展的过程。
- 1983 年，**TCP/IP 协议**成为 ARPANET 上的标准协议，使得所有使用 TCP/IP 协议的计算机都能利用互连网相互通信。
- 人们把 1983 年作为互联网的诞生时间。
- 1990年，ARPANET 正式宣布关闭。

1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段



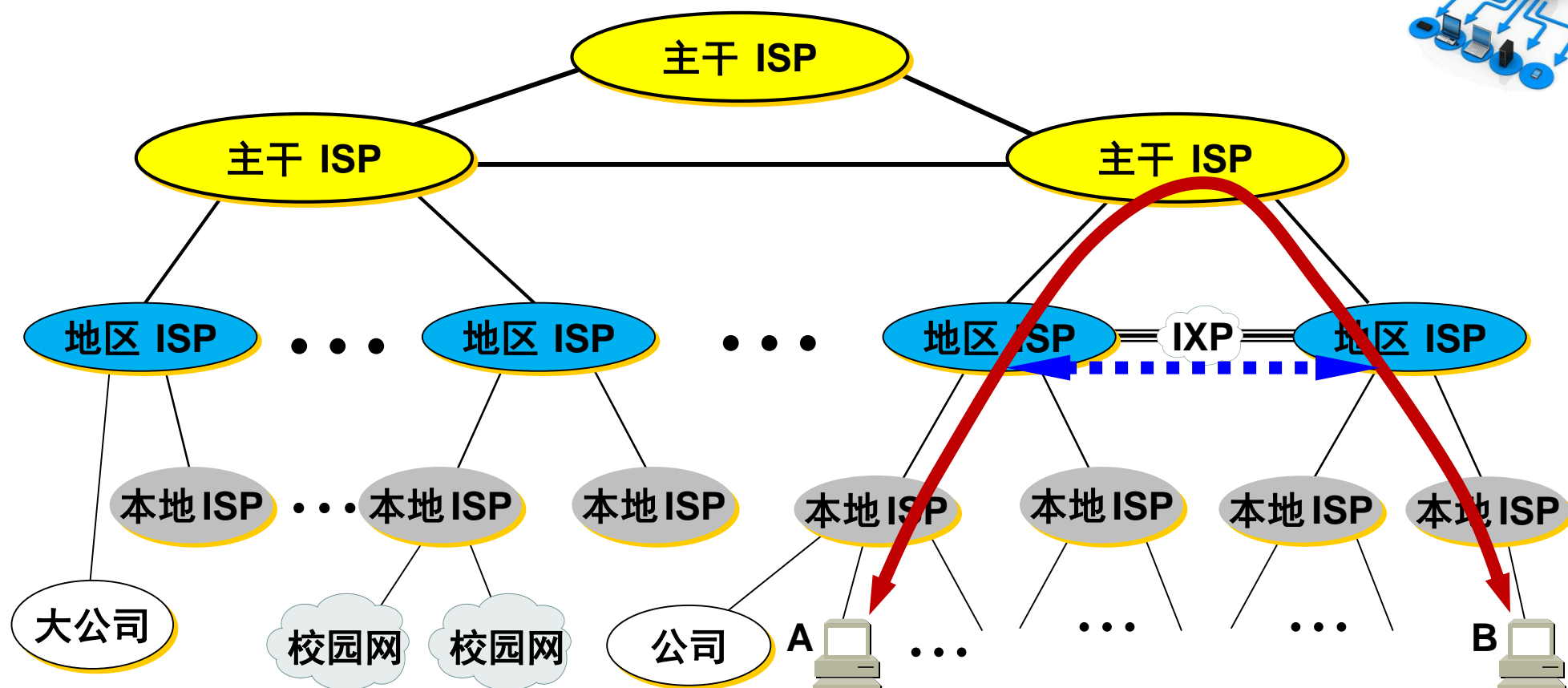
- **第二阶段：**建成了三级结构的互联网。
- 它是一个三级计算机网络，分为主干网、地区网和校园网（或企业网）。



1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段



- **第三阶段：**逐渐形成了多层次 ISP 结构的互联网。
- 出现了**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。
- 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

到2016年3月，全球已经有226个IXP，分布在172个国家和地区。但互联网的发展在全世界还很不平衡。



互联网交换点 IXP 在全球的分布图（2016年）

互联网的发展情况概况



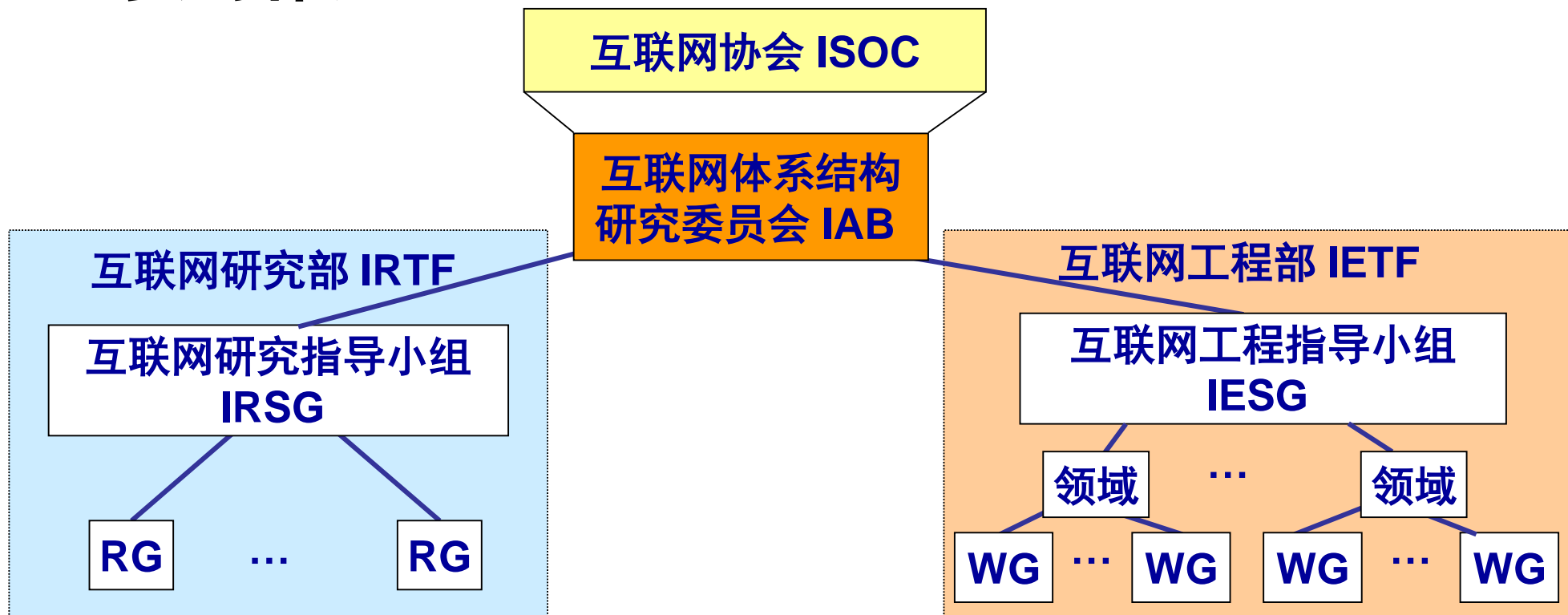
- 从 2017 年至 2019 年互联网用户数的增长情况如图所示。这里的用户是指在家中上网的人。
- 智能手机成为触网神器 全球已有45.4亿联网用户



1.2.3 互联网的标准化工作



互联网的标准化工作对互联网的发展起到了非常重要的作用。



成为互联网正式标准要经过三个阶段



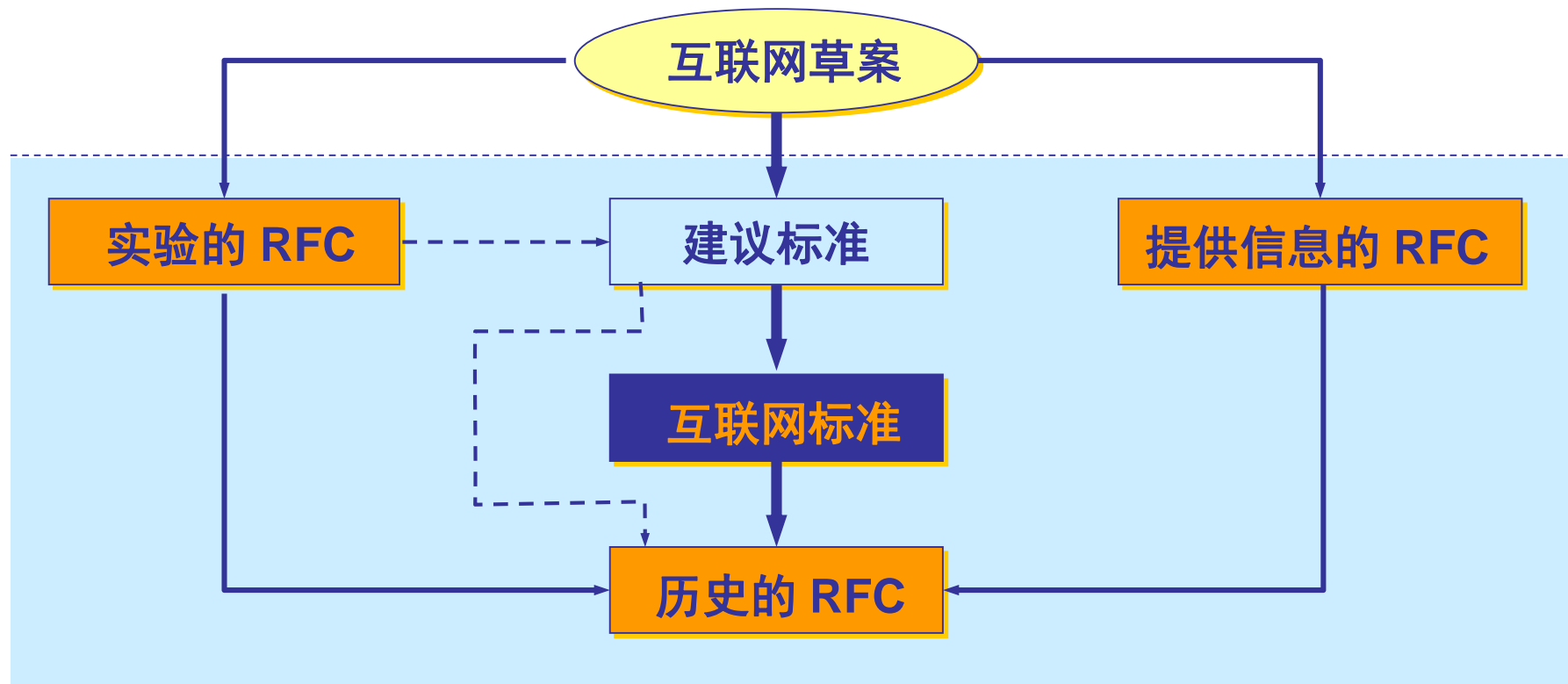
所有互联网标准都以 RFC 的形式在互联网上发表。

- **互联网草案** (Internet Draft) ——有效期只有六个月。在这个阶段还**不是** RFC 文档。
- **建议标准** (Proposed Standard) ——从这个阶段开始就成为 RFC 文档。
- **互联网标准** (Internet Standard) ——达到正式标准后，每个标准就分配到一个编号 STD xxxx。一个标准可以和多个 RFC 文档关联。

各种 RFC 之间的关系



除了建议标准和互联网标准这两种 RFC 文档外，还有三种 RFC 文档，即历史的、实验的和提供信息的 RFC 文档。



1.3 互联网的组成



- 1.3.1 互联网的边缘部分
- 1.3.2 互联网的核心部分

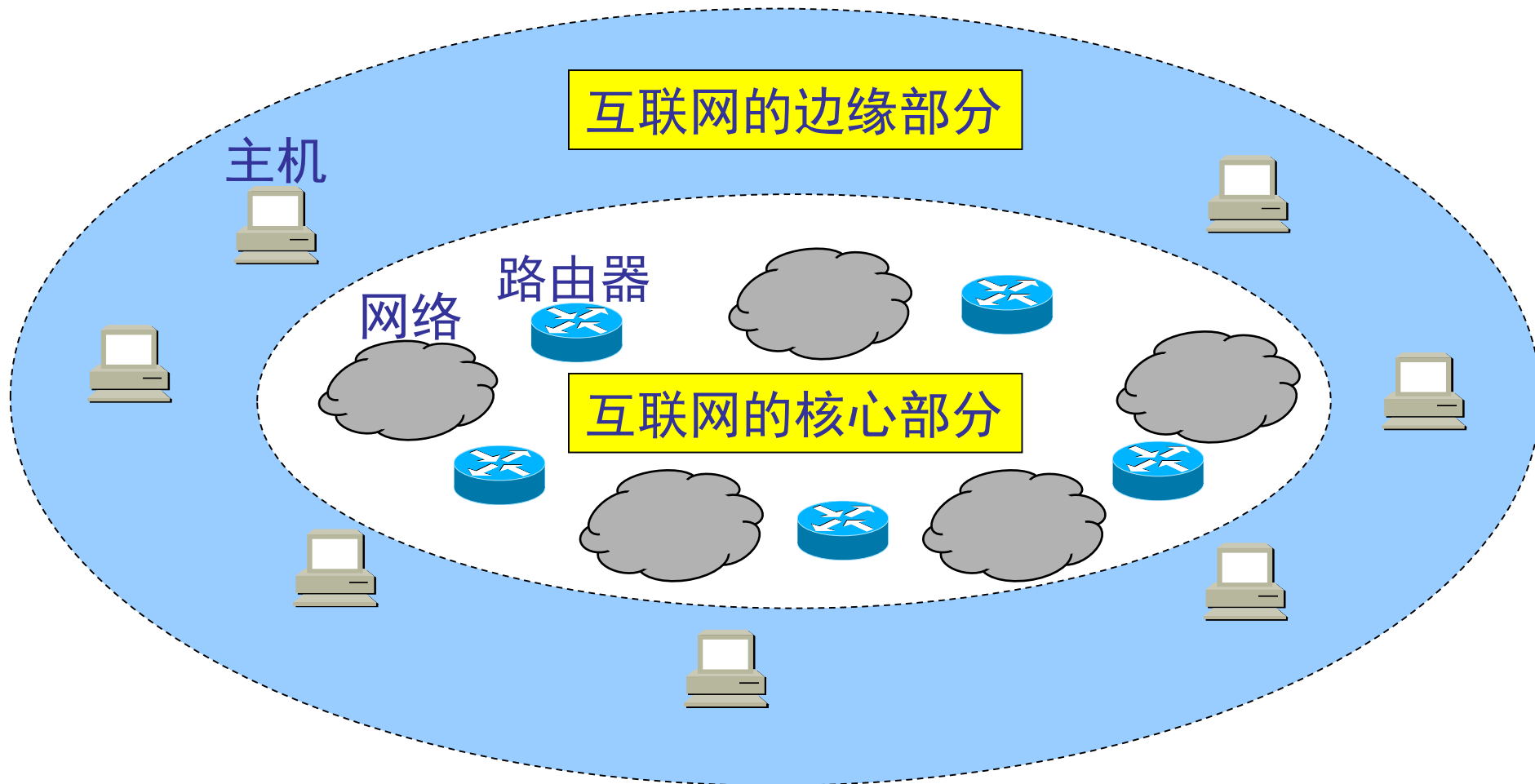
1.3 互联网的组成



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）。

互联网的边缘部分与核心部分



互联网的边缘部分与核心部分

1.3.1 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。这些主机又称为**端系统** (end system)。
- **端系统在功能上可能有很大的差别**
 - 小的端系统可以是一台普通个人电脑，具有上网功能的智能手机，甚至是一个很小的网络摄像头。
 - 大的端系统则可以是一台非常昂贵的大型计算机。
 - 端系统的拥有者可以是个人，也可以是单位（如学校、企业、政府机关等），当然也可以是某个 ISP。

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。

- **对等方式**（P2P 方式）

即 Peer-to-Peer 方式，简称为 P2P 方式。

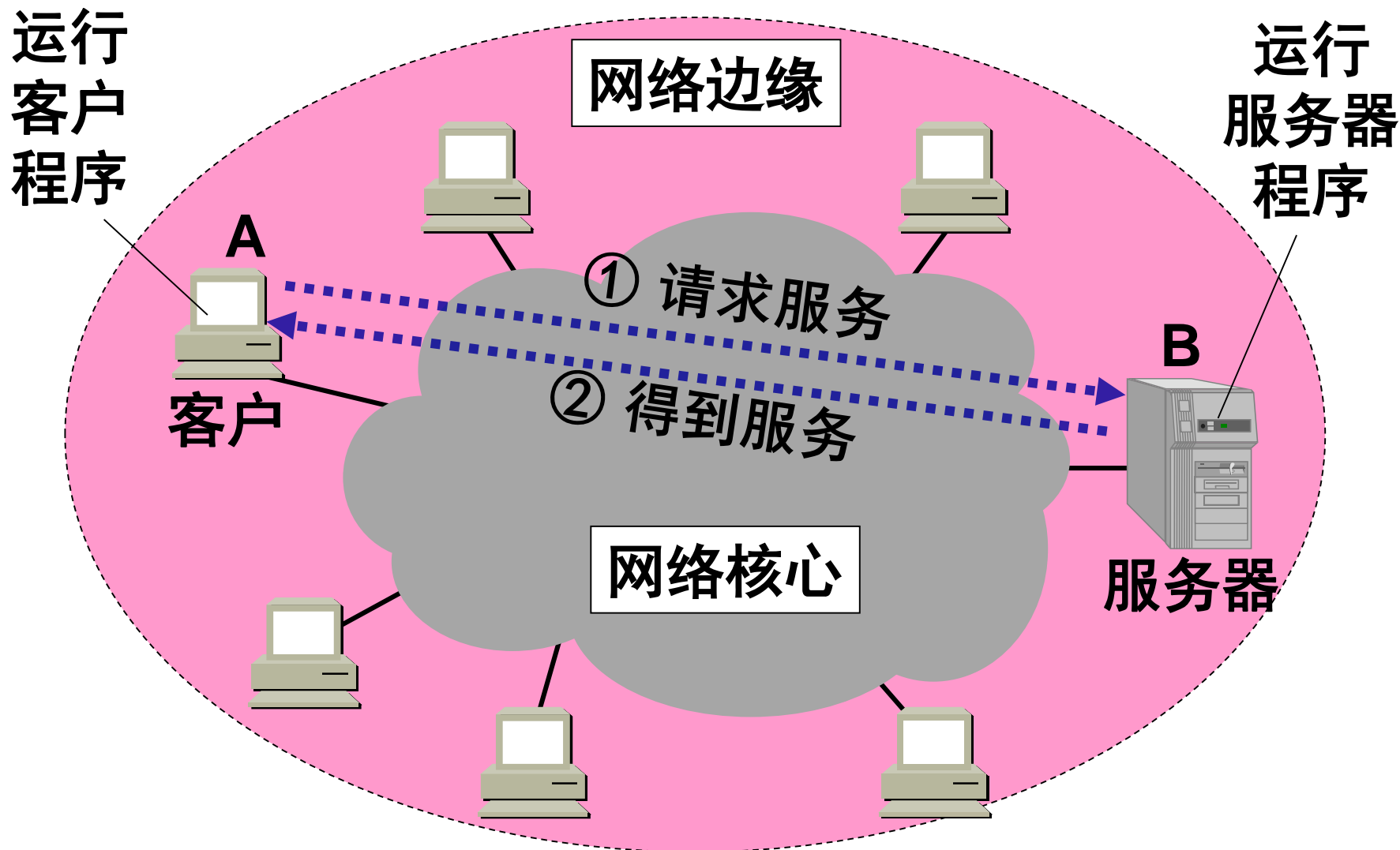
1. 客户-服务器方式



- **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，客户和服务器的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。

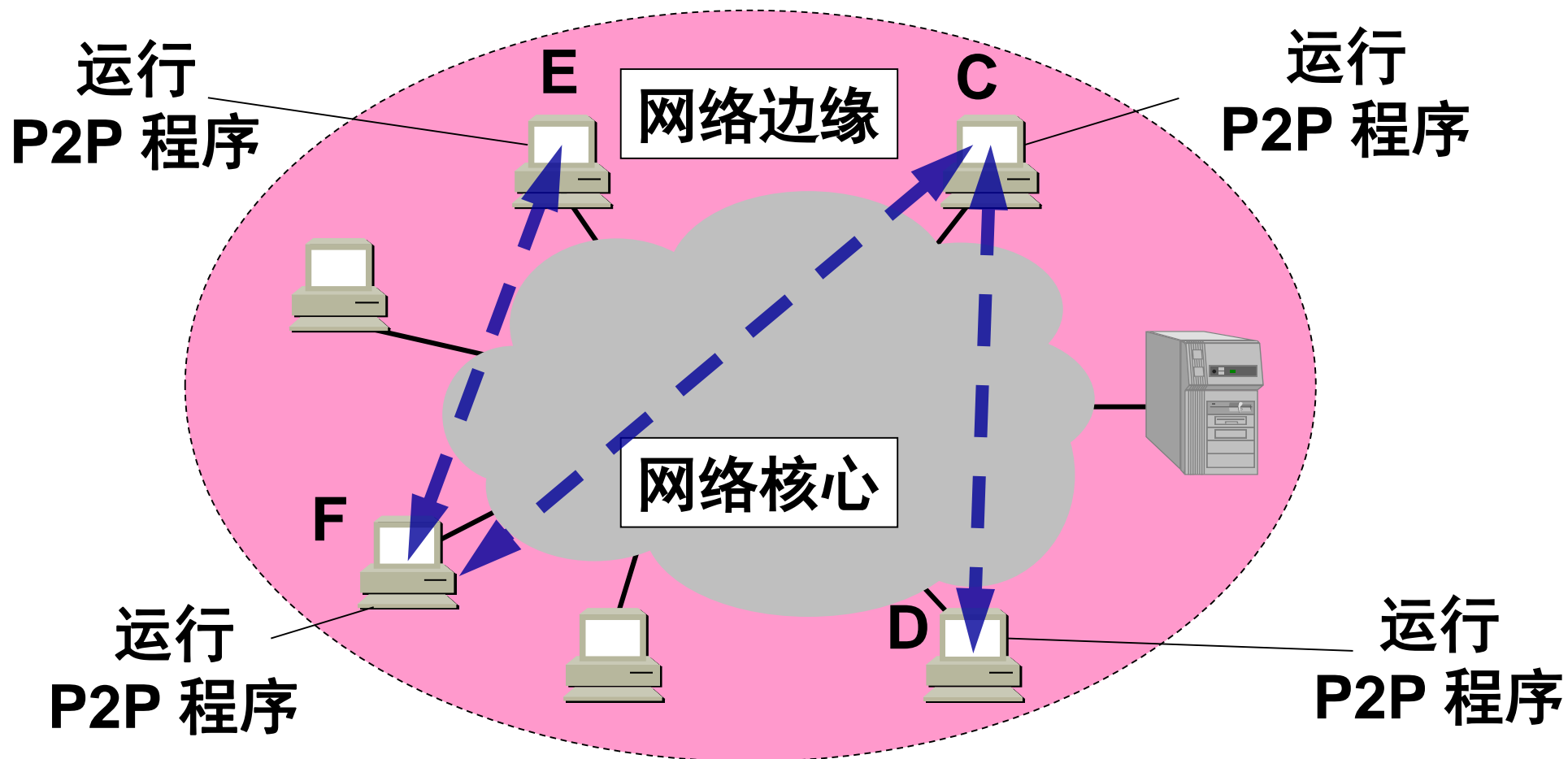
对等连接方式的特点



- 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）

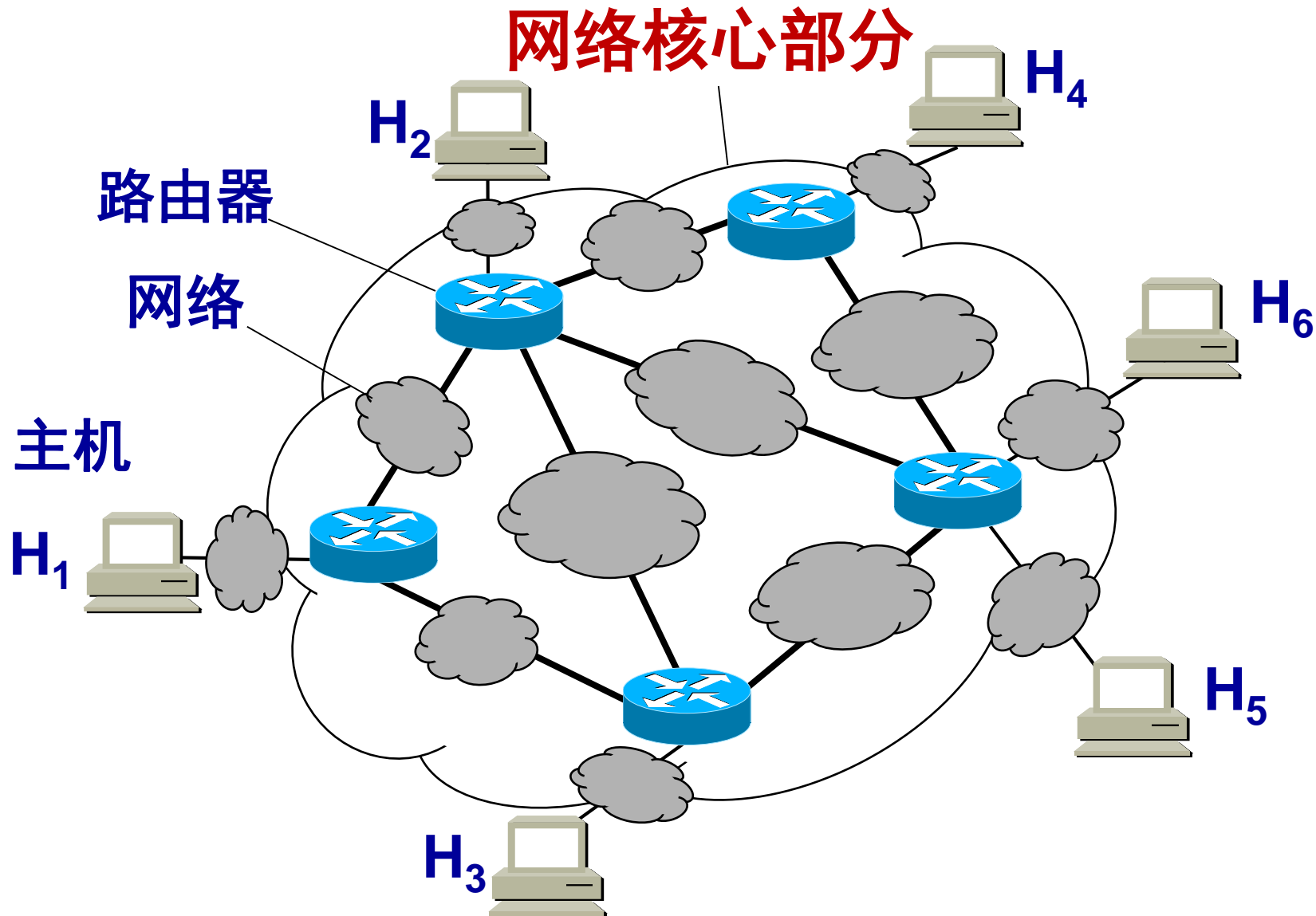


1.3.2 互联网的核心部分

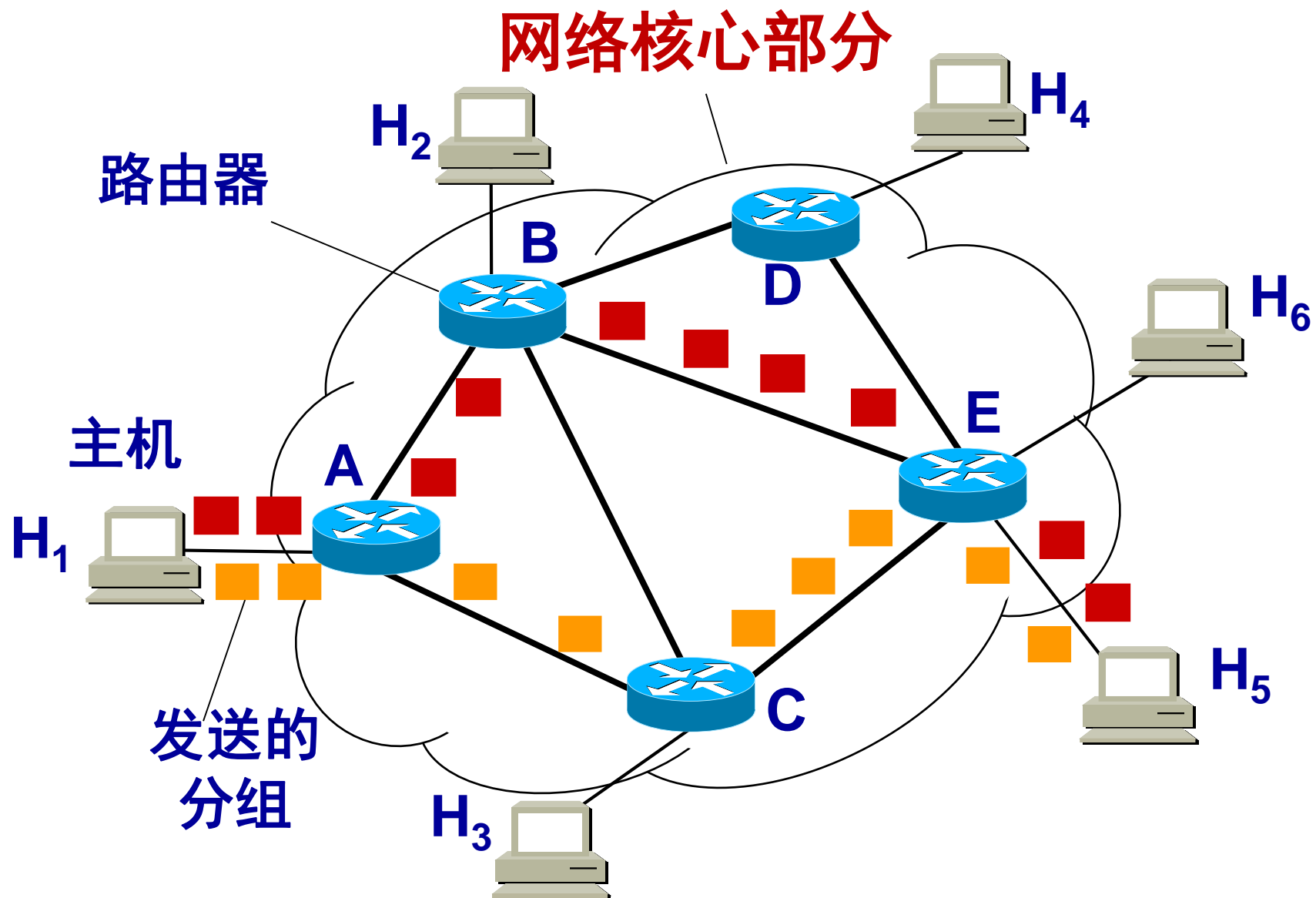


- 互联网的核心部分是由**许多网络**和把它们互连起来的**路由器**组成，而**主机处在互联网的边缘部分**。
- 互联网核心部分中的路由器之间一般都用**高速链路**相连接，而在网络边缘的主机接入到核心部分则通常以相对**较低速率**的链路相连接。
- **主机**的用途是为用户进行信息处理的，并且可以和其他主机通过网络交换信息。**路由器**的用途则是用来转发分组的，即进行分组交换的。

网络核心部分



(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

1.3.2 互联网的核心部分



- 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。
- 为了理解分组交换，首先了解**电路交换和报文交互**的基本概念。

“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。

1. 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。



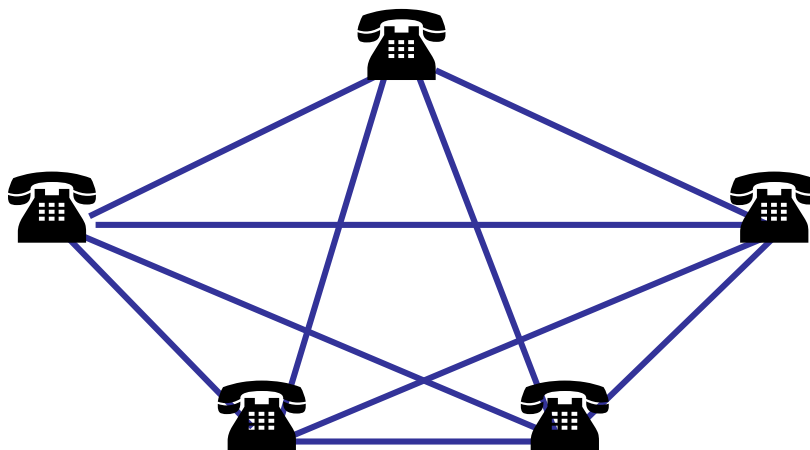
(a) 两部电话直接相连

电话机的不同连接方法

1. 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。



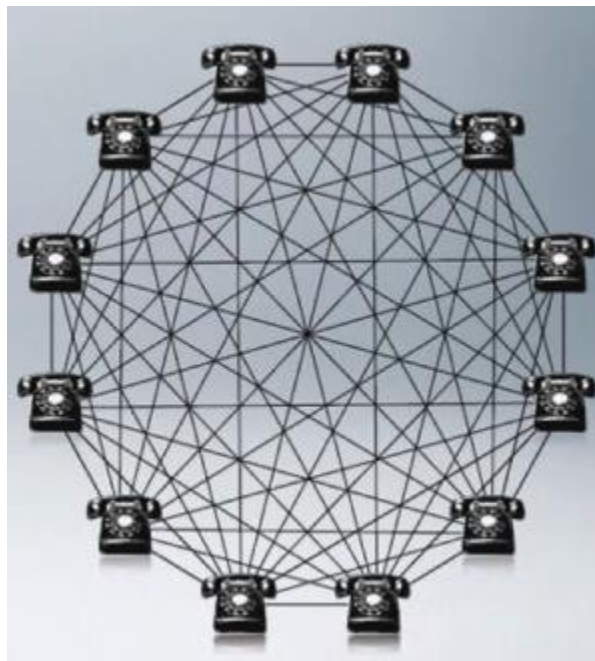
(b) 5 部电话机两两直接相连

电话机的不同连接方法

1. 电路交换的主要特点



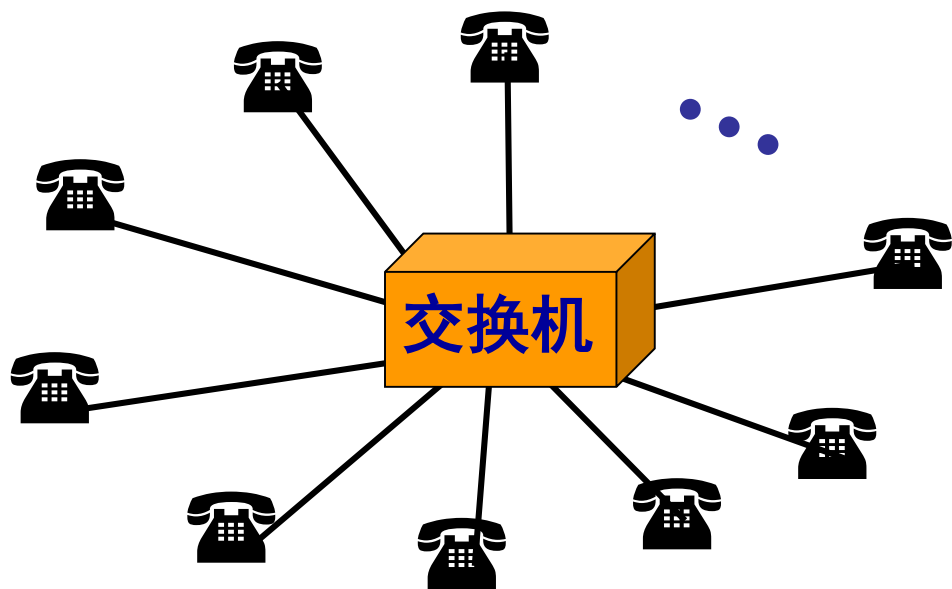
N 部电话机两两直接相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线。这种直接连接方法所需要的电线对的数量与电话机数量的平方（ N^2 ）成正比。



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。



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)**。

(c) 用交换机连接许多部电话
电话机的不同连接方法

电路交换特点

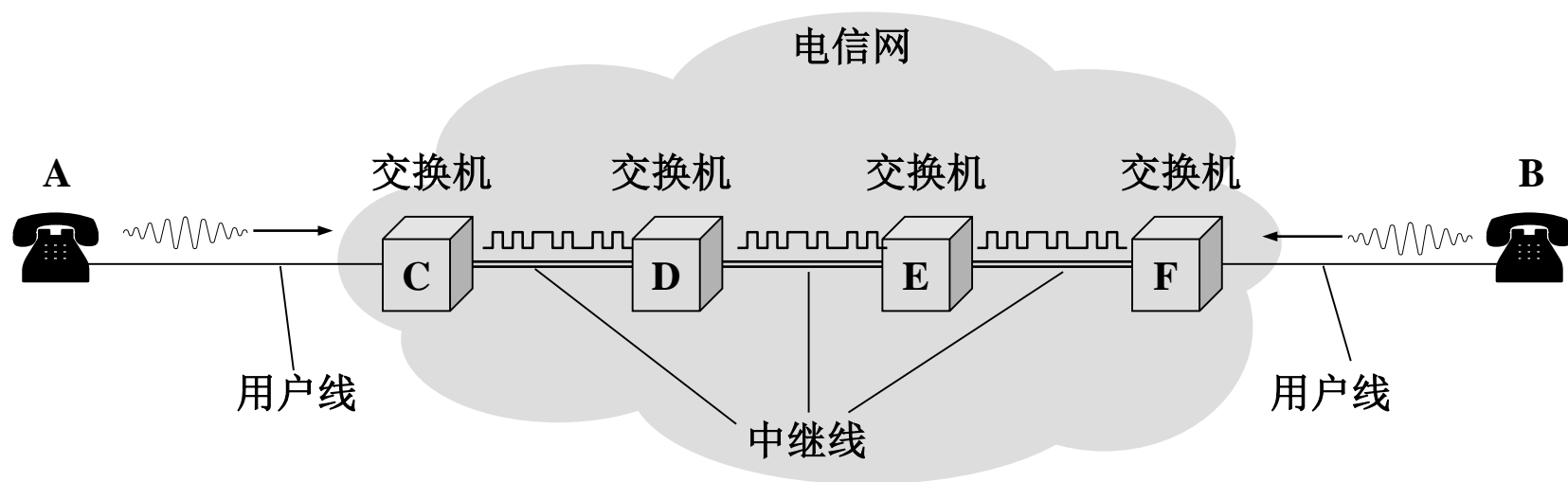


- 电路交换必定是**面向连接**的。
- 电路交换分为三个阶段：
 - **建立连接**：建立一条专用的物理通路，以保证双方通话时所需的通信资源在通信时不会被其他用户占用；
 - **通信**：主叫和被叫双方就能互相通电话；
 - **释放连接**：释放刚才使用的这条专用的物理通路（释放刚才占用的所有通信资源）。

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



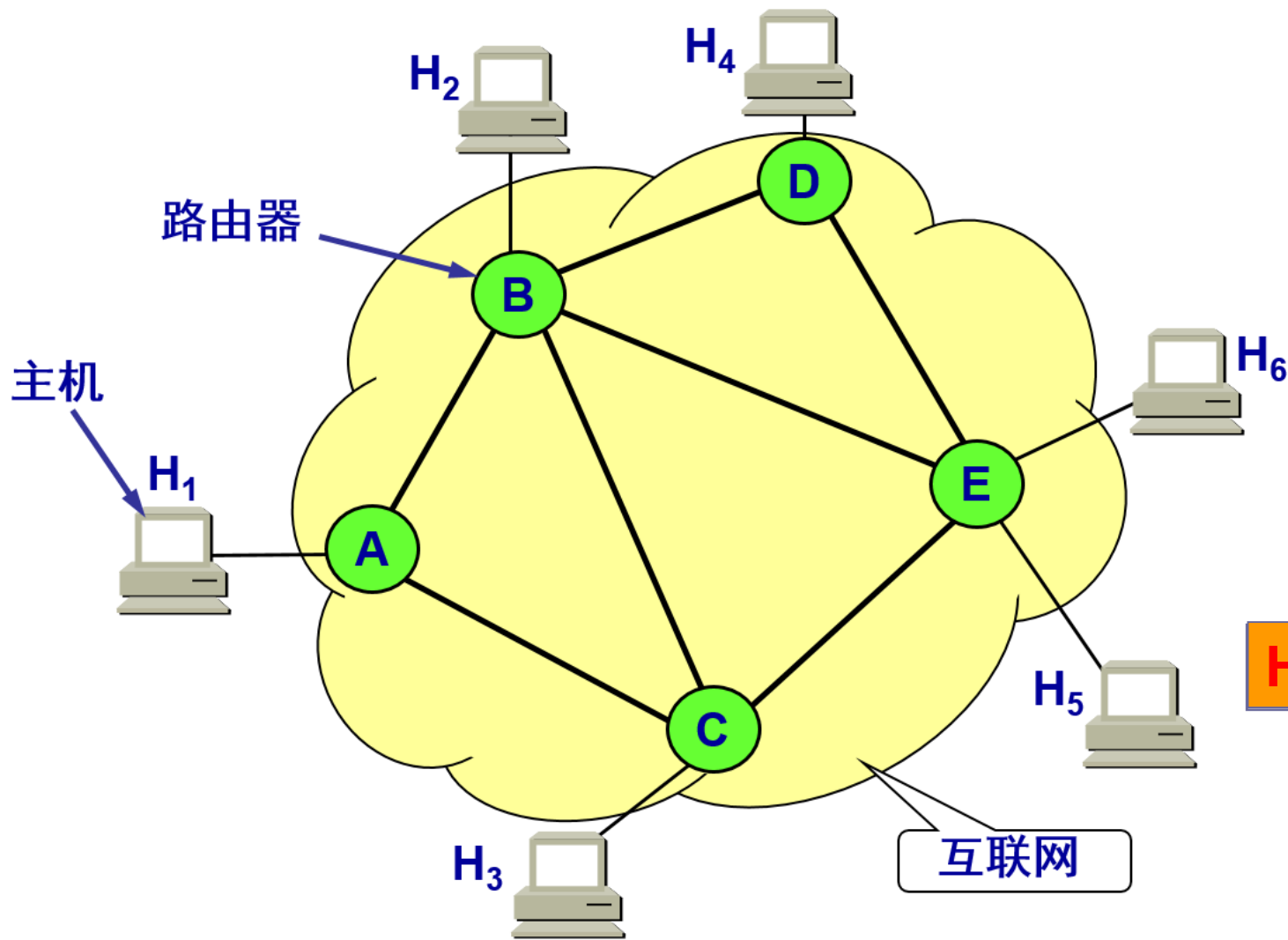
电路交换的用户始终占用端到端的通信资源

电路交换缺点

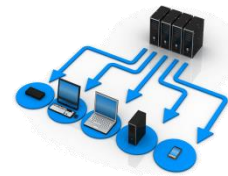


- 计算机数据具有突发性。
- 这导致在传送计算机数据时，通信线路的利用率很低（用来传送数据的时间往往不到10%甚至1%）。

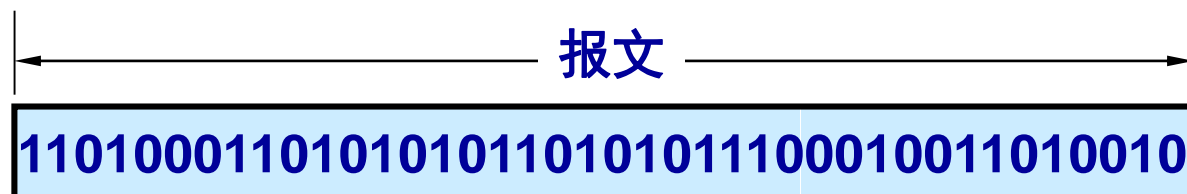
2. 报文交换举例



3. 分组交换的主要特点

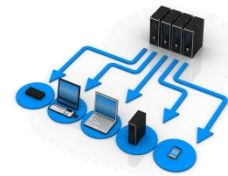


- 分组交换则采用**存储转发**技术。
- 在发送端，先把较长的报文**划分成较短的、固定长度的数据段**。

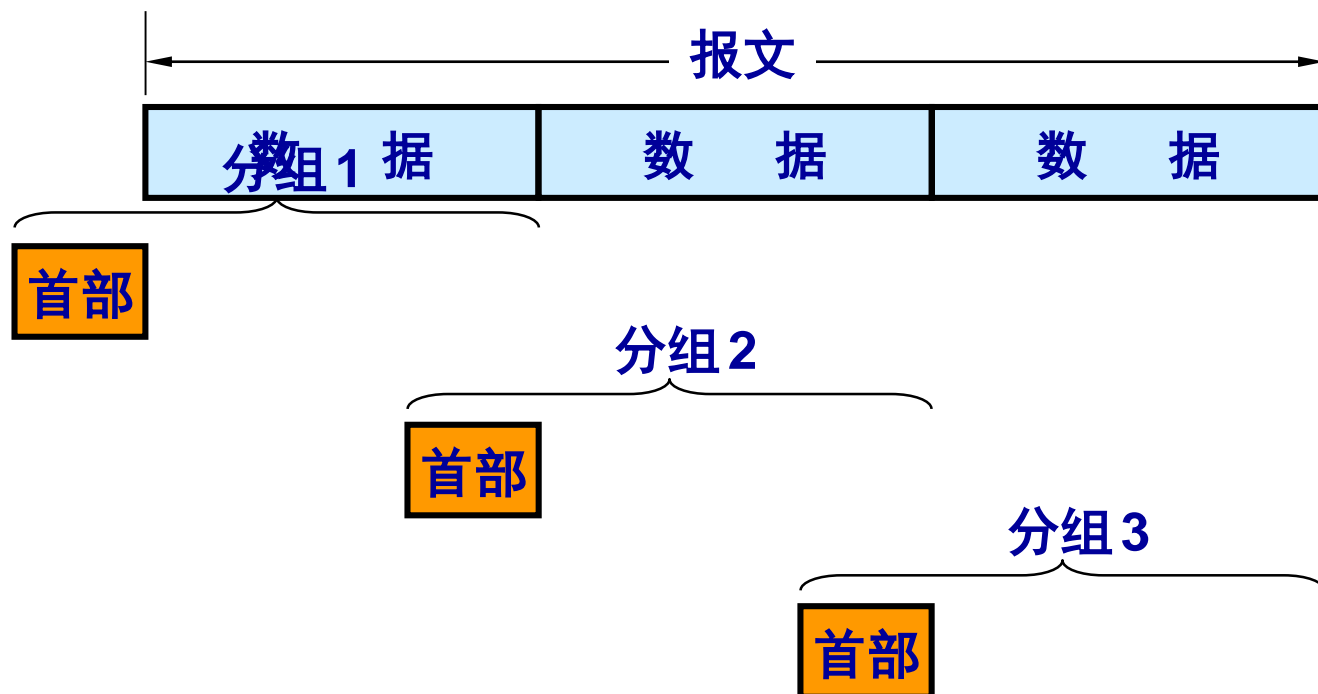


假定这个报文较长
不便于传输

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)**。

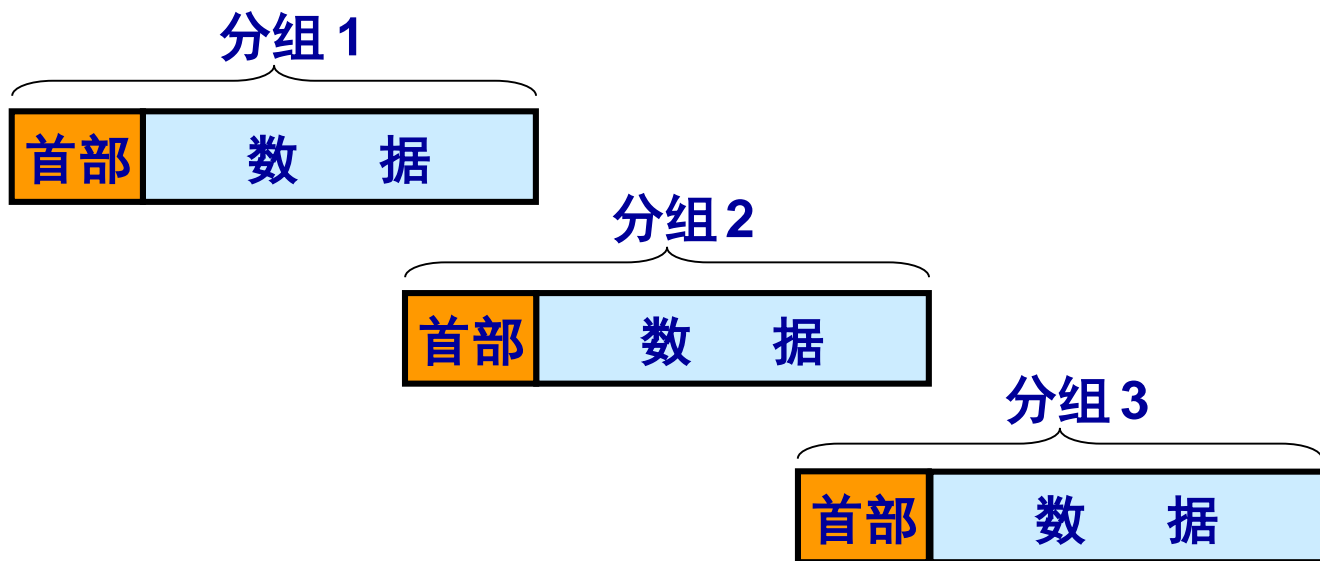


请注意：现在左边是“前面”

分组交换的传输单元



- 分组交换网以“**分组**”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

分组首部的重要性

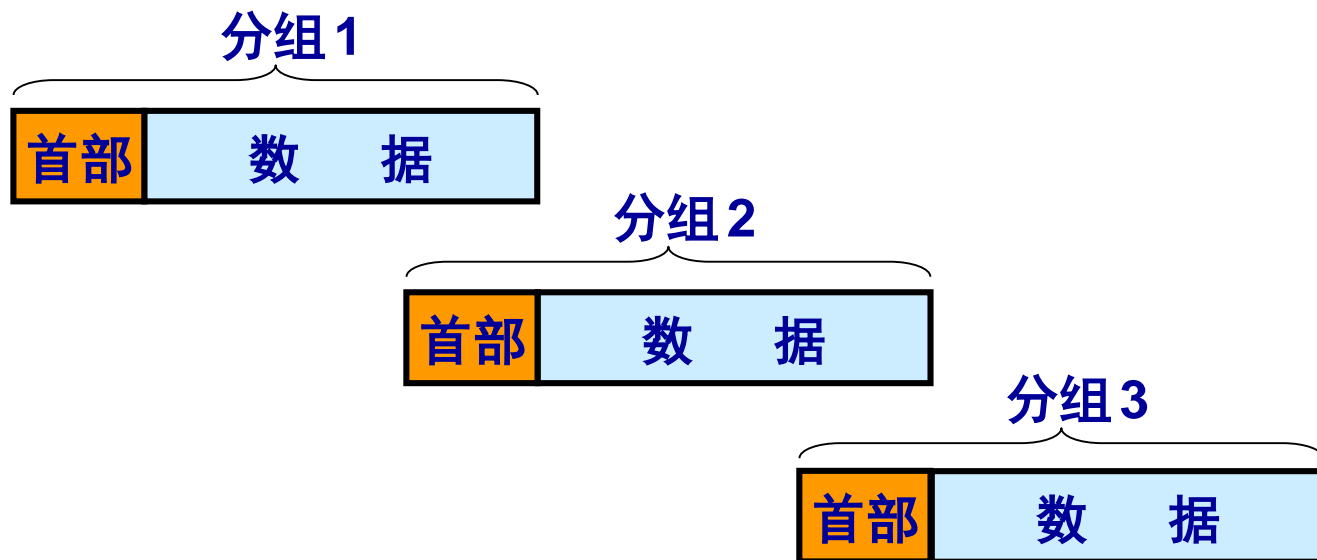


- **每一个**分组的首部都含有**地址**（诸如目的地址和源地址）等控制信息。
- 分组交换网中的结点交换机根据收到的分组首部中的**地址信息**，把分组**转发**到下一个结点交换机。
- 每个分组在互联网中**独立地选择传输路径**。
- 用这样的**存储转发**方式，最后分组就能到达**最终目的地**。

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。

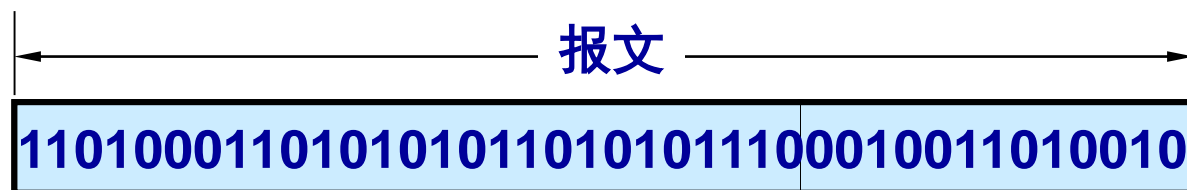


收到的数据

最后还原成原来的报文

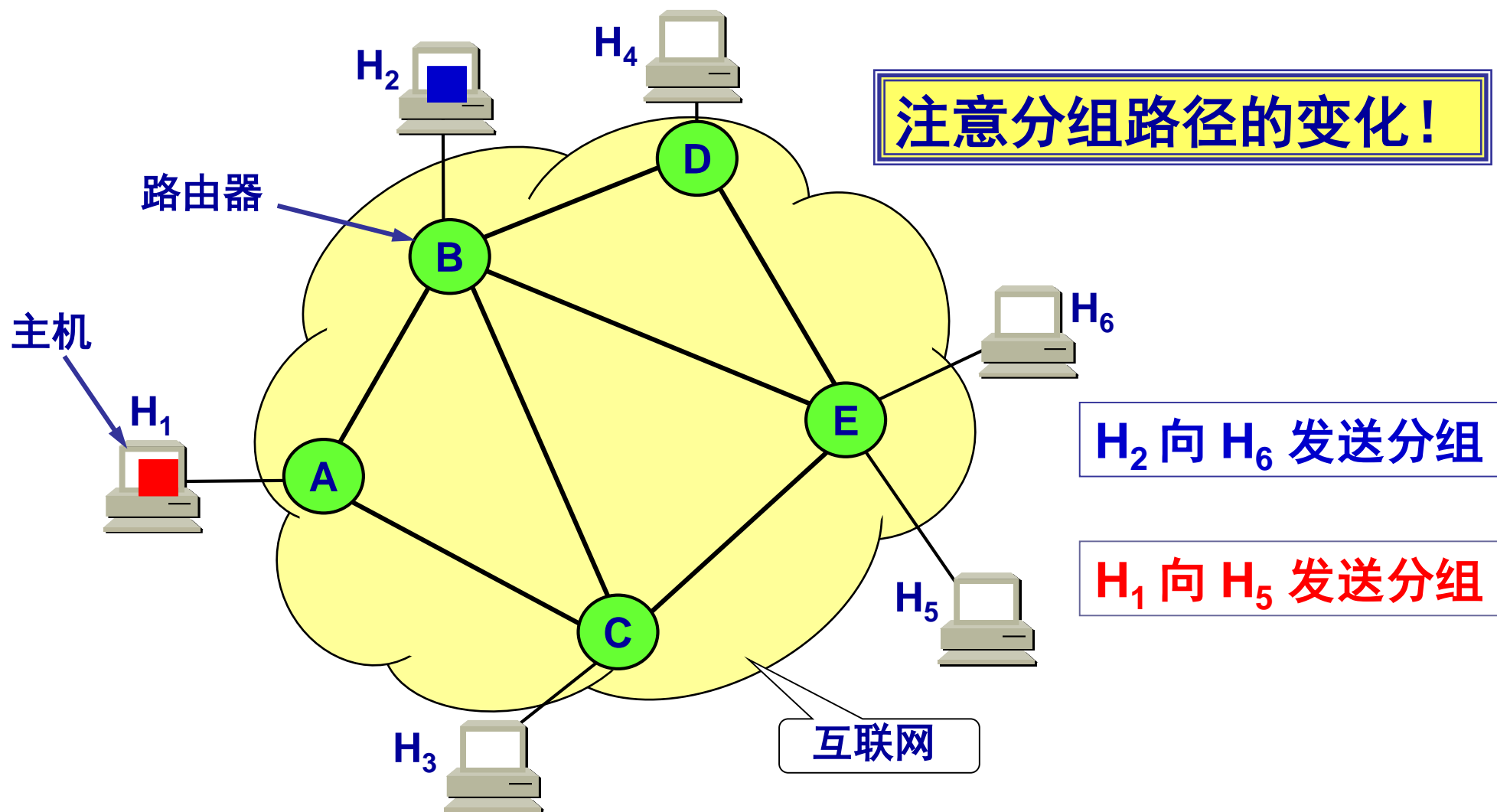


- 最后，在接收端把收到的数据恢复成为原来的报文。

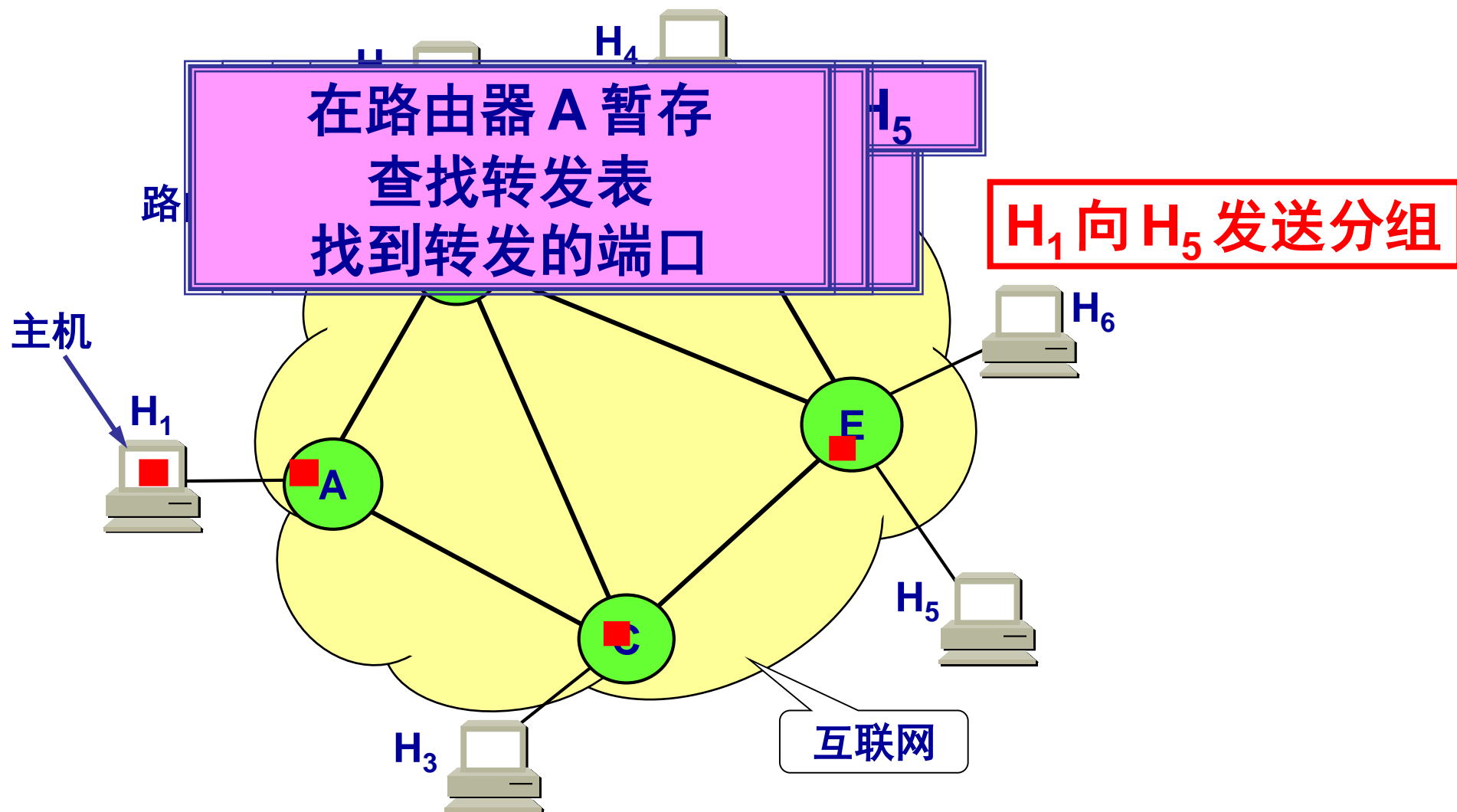


- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。

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。

主机和路由器的作用不同



- 主机是为用户进行信息处理的，并向网络发送分组，从网络接收分组。
- 路由器对分组进行存储转发，最后把分组交付目的主机。

分组交换的优点



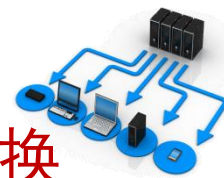
优点	所采用的手段
高效	在分组传输的过程中 动态分配 传输带宽，对通信链路是逐段占用。
灵活	为每一个分组 独立 地选择最合适的转发路由。
迅速	以分组作为传送单位，可以 不先建立连接 就能向其他主机发送分组。
可靠	保证可靠性的网络协议；分布式多路由的分组交换网，使网络有很好的生存性。

分组交换带来的问题

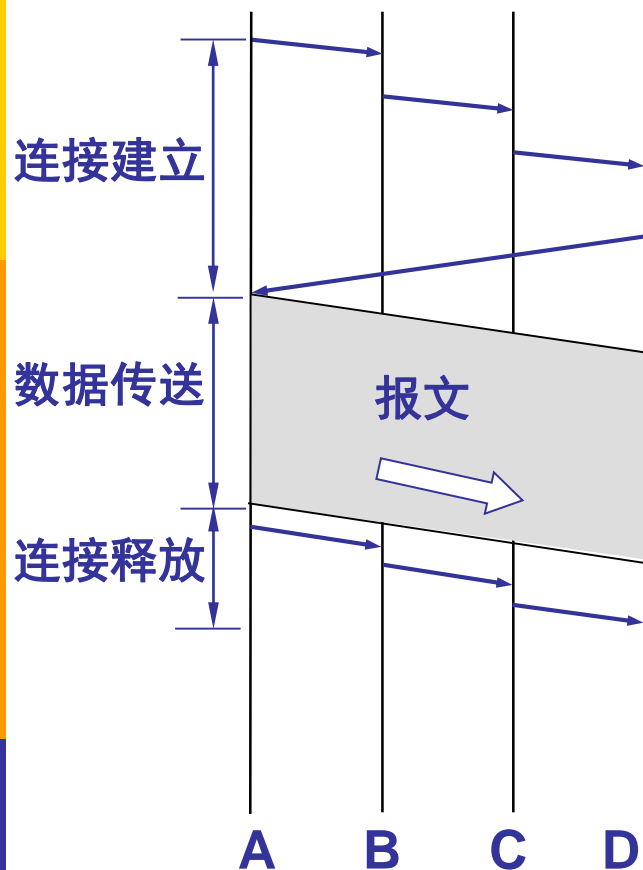


- 分组在各结点存储转发时需要**排队**，这就会造成一定的**时延**。
- 分组必须携带的首部（里面有必不可少的控制信息）也造成了一定的**开销**。

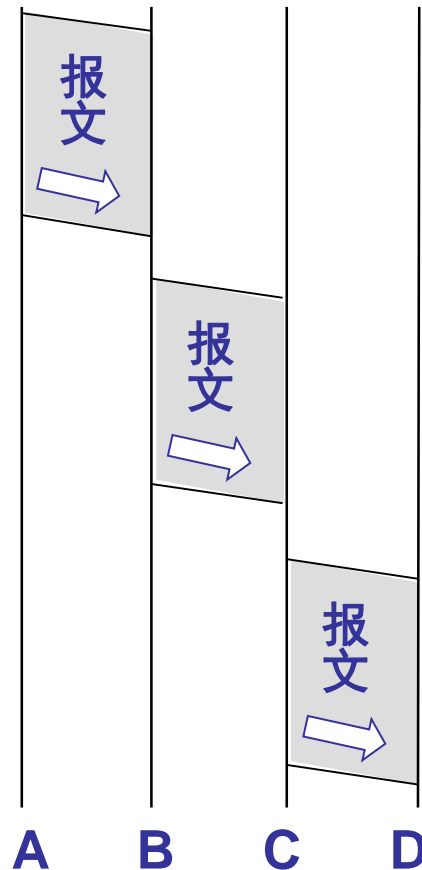
三种交换的比较



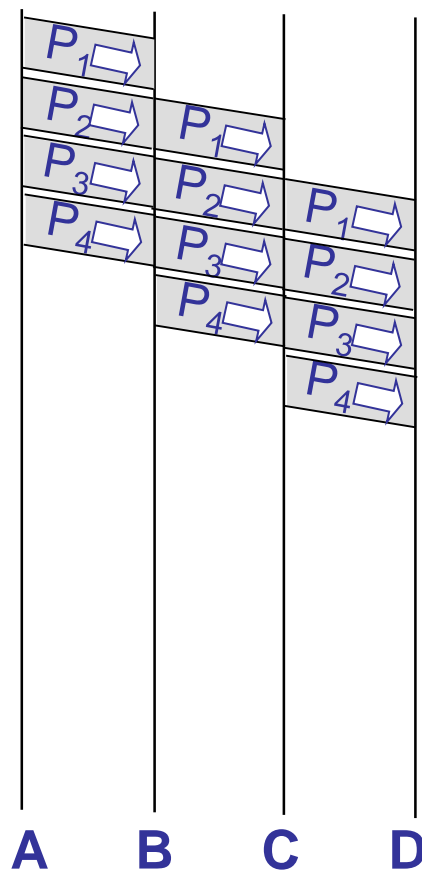
电路交换



报文交换

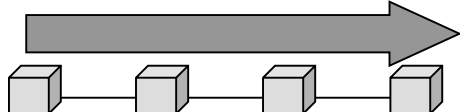


分组交换

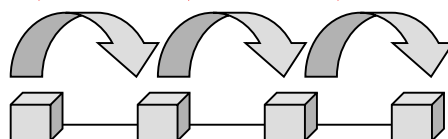


数据
传送
特点

比特流直达终点

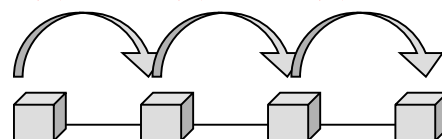


报文 报文 报文



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。

1.4 计算机网络在我国的发展



- 1980 年，铁道部开始进行计算机联网实验。
- 1989 年11 月，我国第一个公用分组交换网 CNPAC 建成运行。
- 1994 年 4 月 20 日，我国用 64 kbit/s 专线正式连入互联网，我国被国际上正式承认为接入互联网的国家。
- 1994 年 5 月，中国科学院高能物理研究所设立了我国的第一个万维网服务器。
- 1994 年 9 月中国公用计算机互联网 CHINANET 正式启动。

1.4 计算机网络在我国的发展



- 到目前为止，我国陆续建造了基于互联网技术的并能够和互联网互连的多个全国范围的公用计算机网络，其中规模最大的就是下面这五个：
 - (1) 中国电信互联网 CHINANET（也就是原来的中国公用计算机互联网）
 - (2) 中国联通互联网 UNINET
 - (3) 中国移动互联网 CMNET
 - (4) 中国教育和科研计算机网 CERNET
 - (5) 中国科学技术网 CSTNET

1.4 计算机网络在我国的发展



- 中国教育和科研计算机网 CERNET (China Education and Research NETwork) 始建于 1994 年，是我国第一个 IPv4 互联网主干网。
- 2004 年 2 月，我国的第一个下一代互联网 CNGI 的主干网 CERNET2 试验网正式开通，并提供服务。
- 中国互联网络信息中心 CNNIC (ChiNa Network Information Center) 每年两次公布我国互联网的发展情况。 <http://www.cnnic.net.cn/>
- 中国互联网发展45次报告

第 1 章 概述（二）



第1章 概述



- 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

1.5 计算机网络的类别



- 1.5.1 计算机网络的定义
- 1.5.2 几种不同类别的网络

1.5.1 计算机网络的定义



- 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网络。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。

1.5.1 计算机网络的定义



■ 根据这个定义：

- (1) 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。
- (2) 计算机网络并非专门用来传送数据，而是能够支持很多种的应用（包括今后可能出现的各种应用）。

请注意，上述的“可编程的硬件”表明这种硬件一定包含有中央处理机 (CPU)。

1.5.2 几种不同类别的网络



- 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

1. 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。
- **城域网 MAN** (Metropolitan Area Network): 作用距离约为 5 ~ 50 公里。
- **局域网 LAN** (Local Area Network) : 局限在较小的范围（如 1 公里左右）。
- **个人区域网 PAN** (Personal Area Network) : 范围很小，大约在 10 米左右。

2. 按照网络的使用者进行分类



■ 公用网 (public network)

- 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)

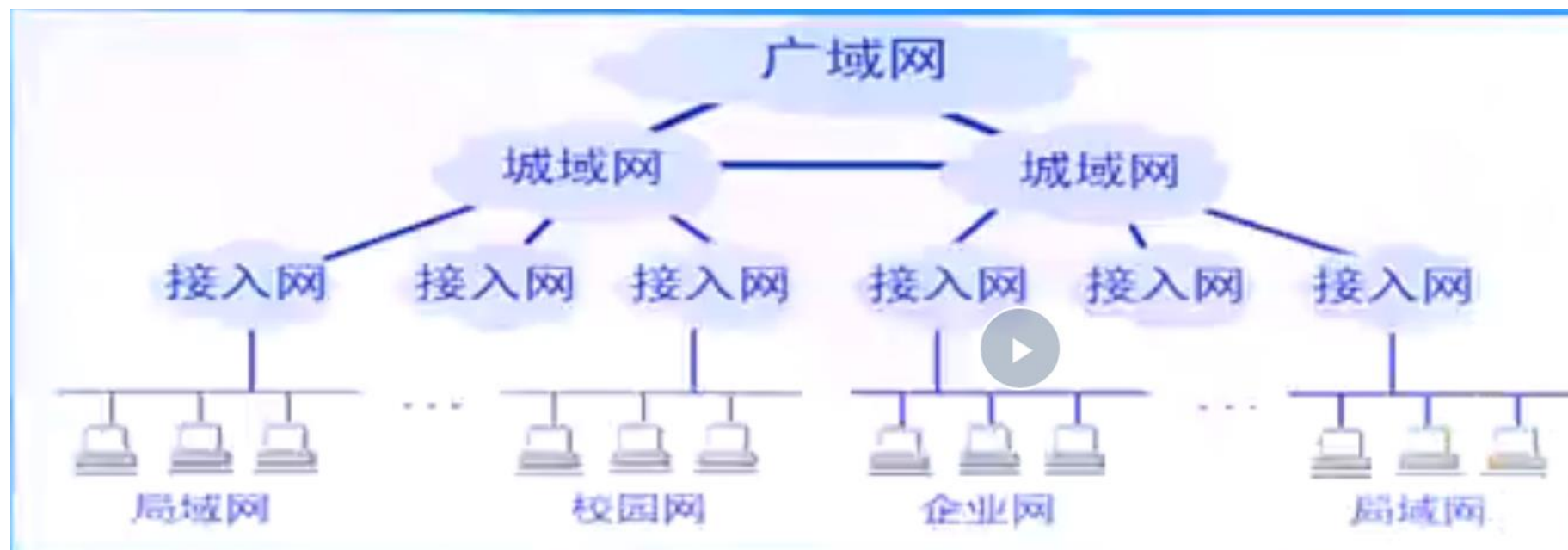
- 为特殊业务工作的需要而建造的网络。

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。

3. 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。
- 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。**



1.6 计算机网络的性能



- 1.6.1 计算机网络的性能指标
- 1.6.2 计算机网络的非性能特征

1.6.1 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：
 - 速率
 - 带宽
 - 吞吐率
 - 时延
 - 时延带宽积
 - 往返时间 RTT
 - 利用率

1. 速率



- 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。
- 速率是计算机网络中最重要的一个性能指标，指的是**数据的传送速率**，它也称为**数据率** (data rate)或**比特率** (bit rate)。
- 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）。
- 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”。

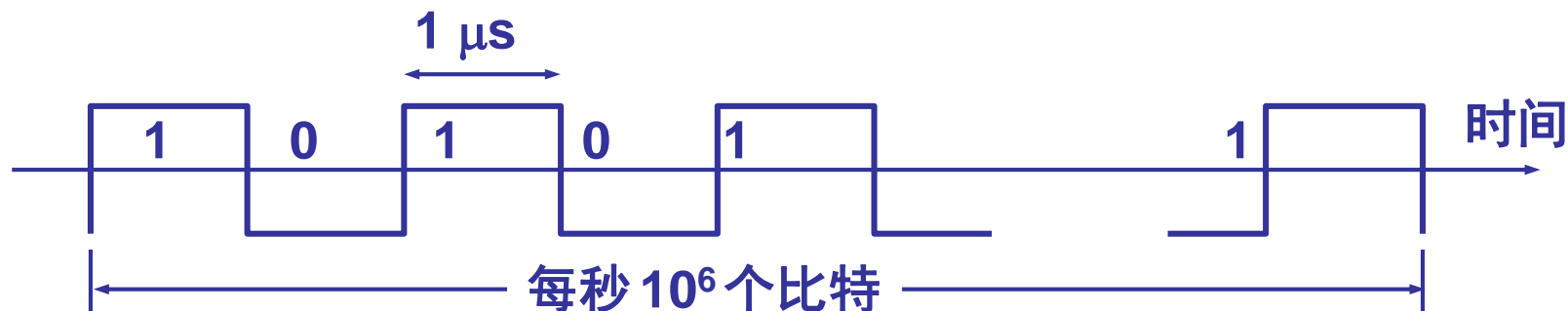
在“带宽”的上述两种表述中，前者为**频域**称谓，而后者为**时域**称谓，其本质是相同的。也就是说，一条通信链路的“带宽”越宽，其所能传输的“最高数据率”也越高。

数字信号流随时间的变化

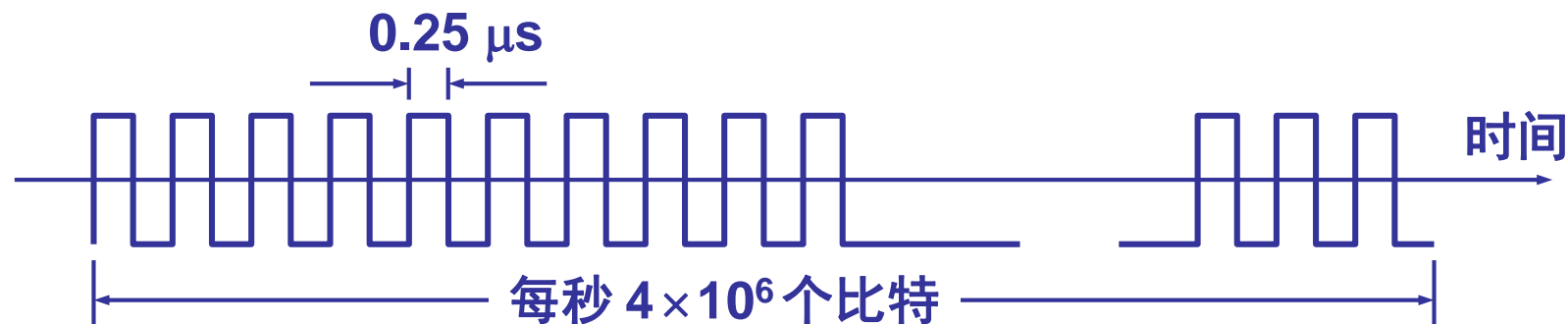


- 在**时间轴**上信号的宽度随带宽的增大而变窄。

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**。
- 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

4. 时延 (delay 或 latency)



■ (1) 发送时延

- 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

- 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。

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

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。**

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。

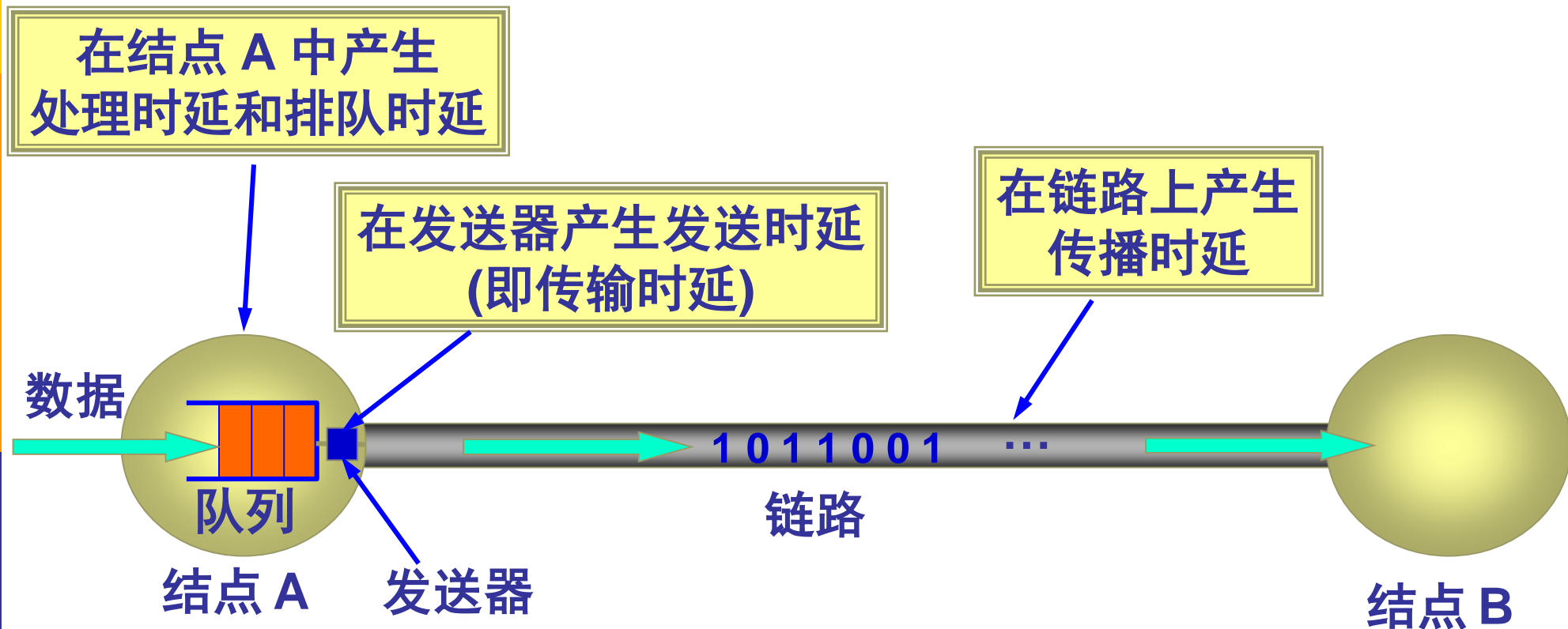
$$\begin{aligned} \text{总时延} = & \text{发送时延} \\ & + \text{传播时延} \\ & + \text{处理时延} \\ & + \text{排队时延} \end{aligned}$$

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。

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

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



- 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。

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

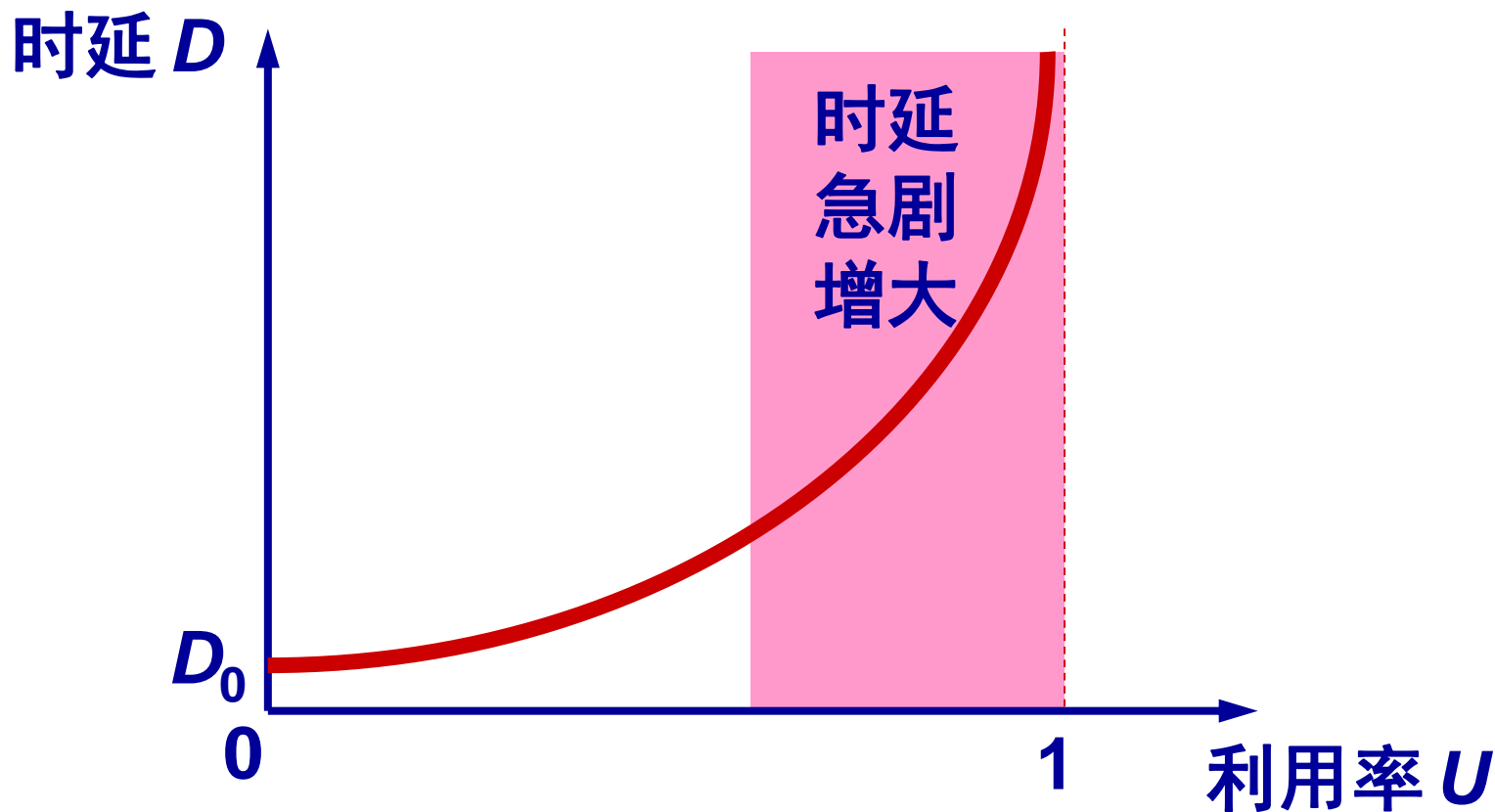


- 根据排队论的理论，当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加。
- 若令 D_0 表示网络空闲时的时延， D 表示网络当前的时延，则在适当的假定条件下，可以用下面的简单公式表示 D 和 D_0 之间的关系：

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

其中： U 是网络的利用率，数值在 0 到 1 之间。

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。

1.6.2 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
 - 质量
 - 标准化
 - 可靠性
 - 可扩展性和可升级性
 - 易于管理和维护

1.7 计算机网络的体系结构



- 1.7.1 计算机网络体系结构的形成
- 1.7.2 协议与划分层次
- 1.7.3 具有五层协议的体系结构
- 1.7.4 实体、协议、服务和服务访问点
- 1.7.5 TCP/IP 的体系结构

1.7.1 计算机网络体系结构



- 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。

1.7.2 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。

由此可见，网络协议是计算机网络的不可缺少的重要组成部分。

层次式协议结构



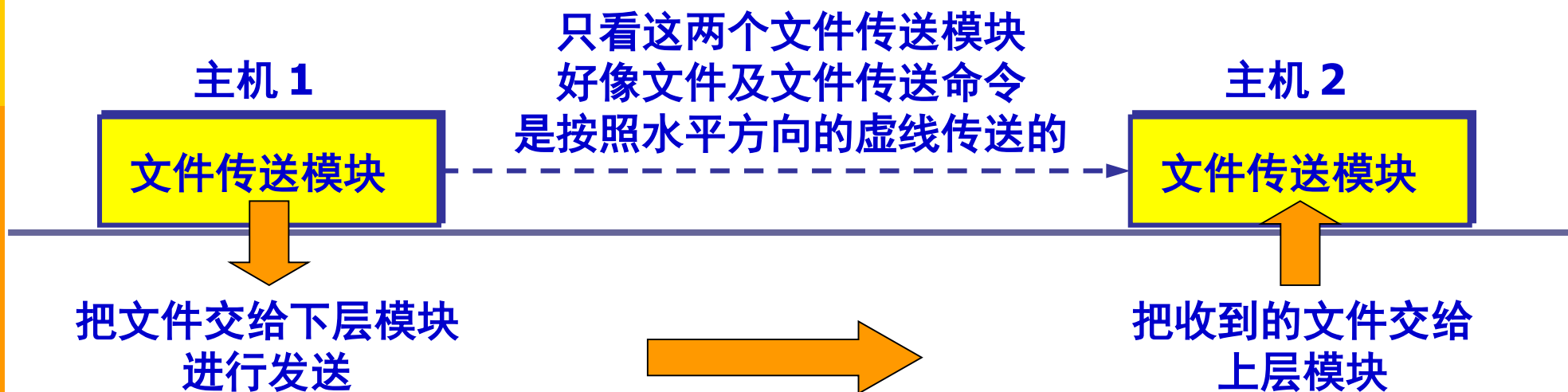
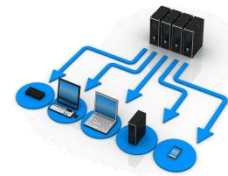
- ARPANET 的研发经验表明，对于非常复杂的计算机网络协议，其**结构应该是层次式的**。

划分层次的概念举例

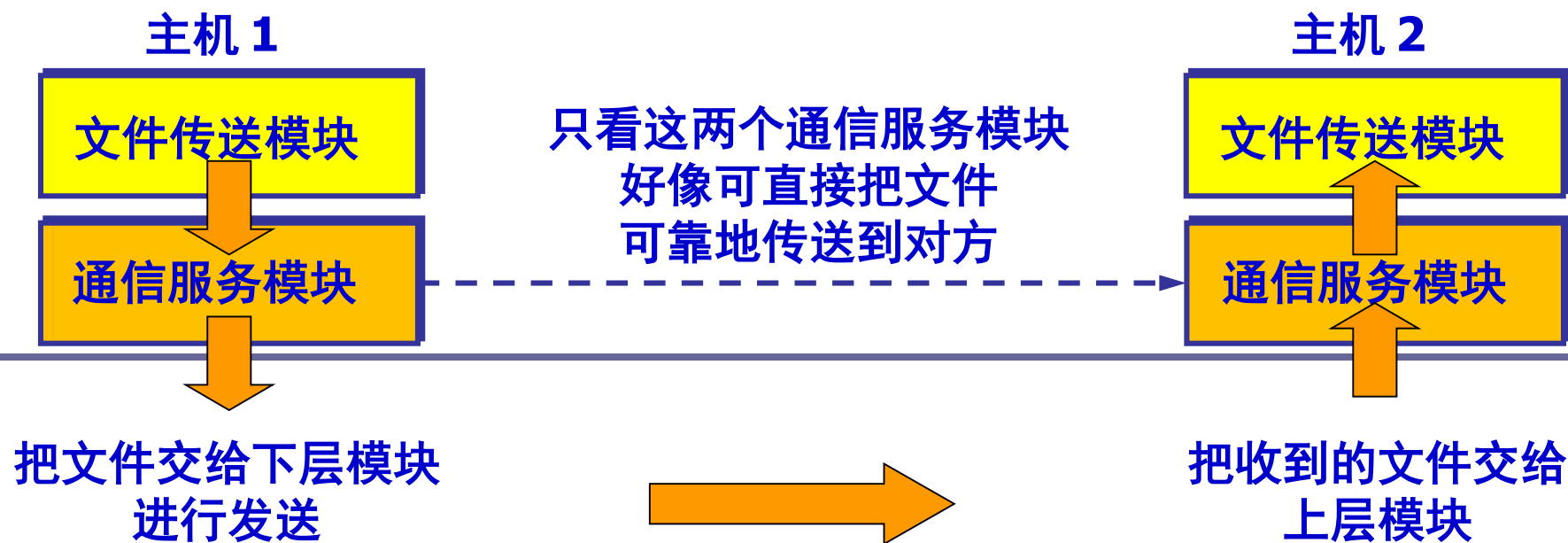


- 主机 1 向主机 2 通过网络发送文件。
- 可以将要做的工作进行如下的划分：
 - 第一类工作与传送文件直接有关。
 - 确信对方已做好接收和存储文件的准备。
 - 双方已协调好一致的文件格式。
 - 两个主机将**文件传送模块**作为最高的一层，剩下的工作由下面的模块负责。

两个主机交换文件



再设计一个通信服务模块



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，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。

计算机网络的体系结构

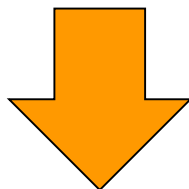


- **计算机网络的体系结构 (architecture)** 是计算机网络的各层及其协议的集合。
- 体系结构就是这个计算机网络及其部件**所应完成的功能的精确定义。**

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 (七层结构)。
- 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 (四层结构)。



- 谢希仁 给出了(五层结构)。

1.7.3 具有五层协议的体系结构

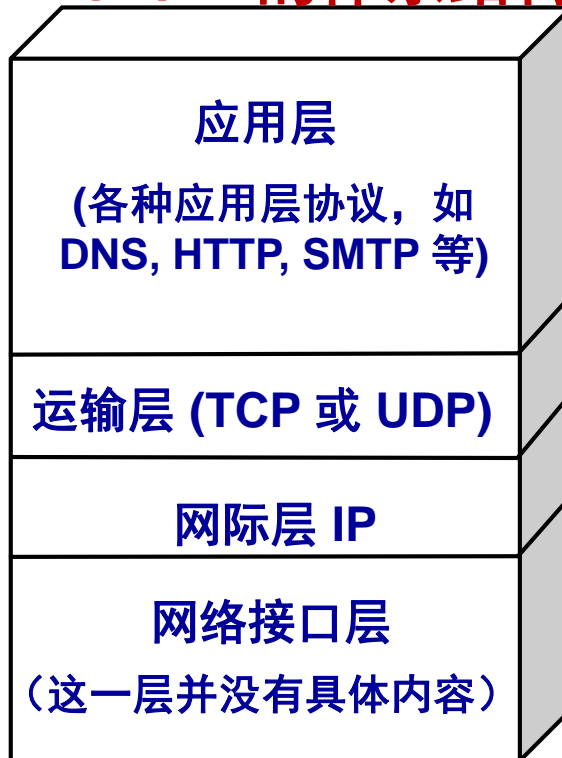


OSI 的体系结构



(a)

TCP/IP 的体系结构



(b)

五层协议的体系结构



(c)

计算机网络体系结构:

(a) OSI 的七层协议; (b) TCP/IP 的四层协议; (c) 五层协议

五层协议的体系结构

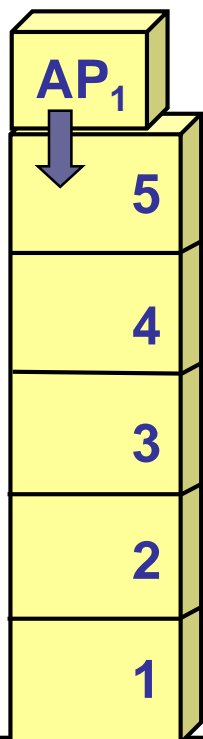


- 应用层 (application layer)
- 运输层 (transport layer)
- 网络层 (network layer)
- 数据链路层 (data link layer)
- 物理层 (physical layer)

主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1

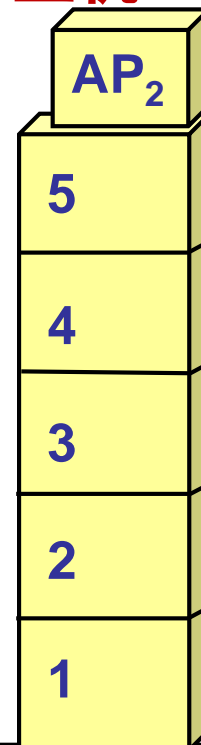


应用进程数据先传送到应用层

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。

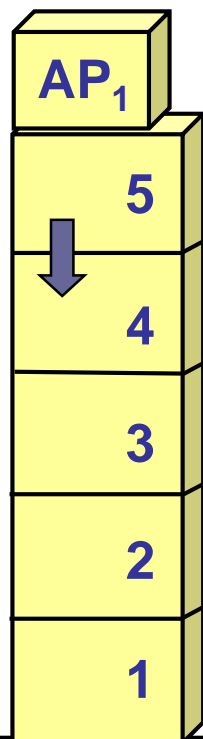
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



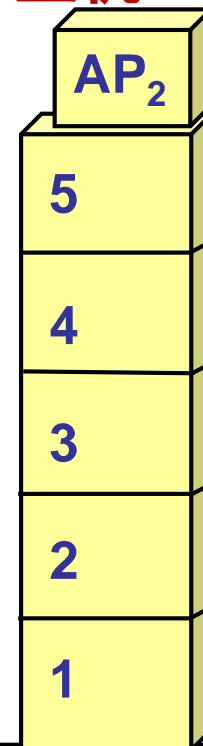
主机 1



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

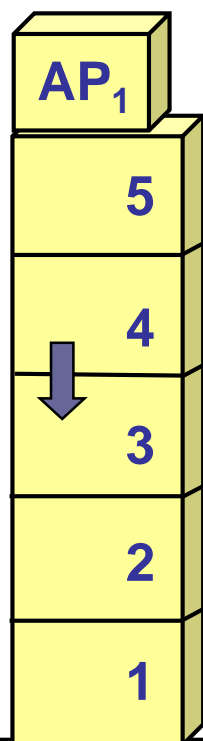
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



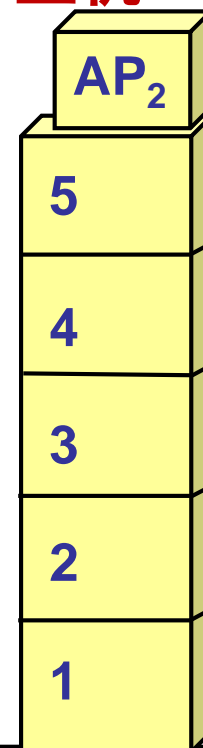
主机 1



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）

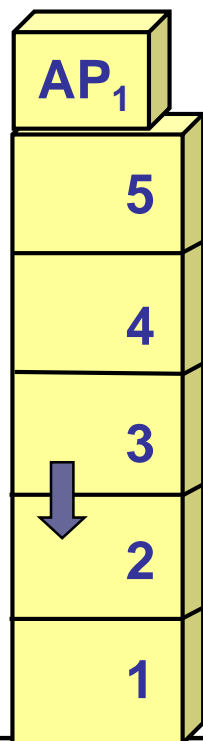
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



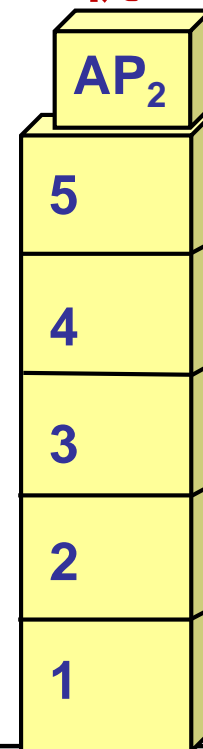
主机 1



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

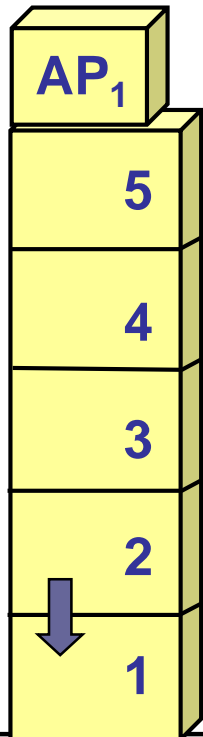
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据



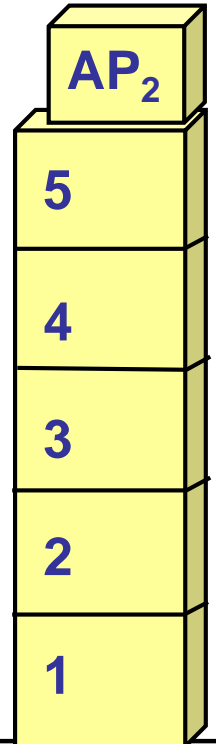
主机 1



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

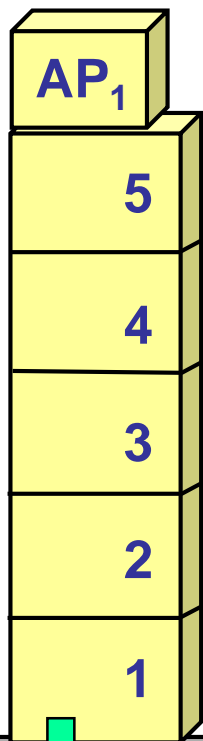
主机 2



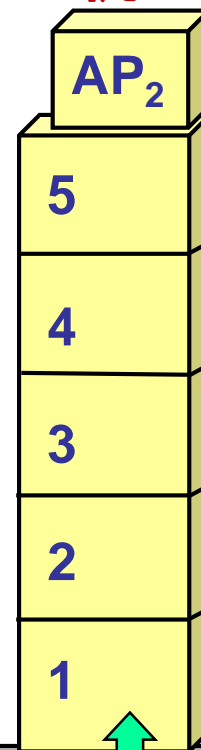
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2



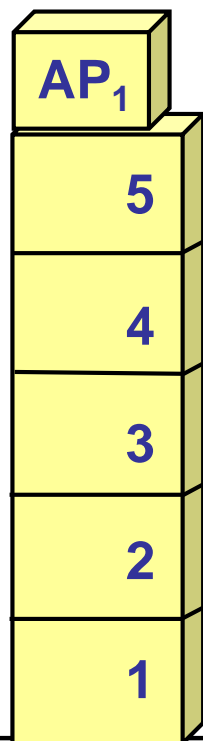
电信号（或光信号）在物理媒体中传播
从发送端物理层传送到接收端物理层



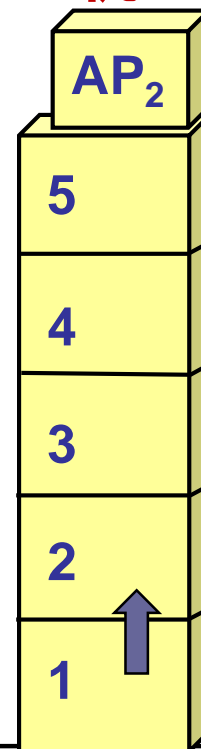
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

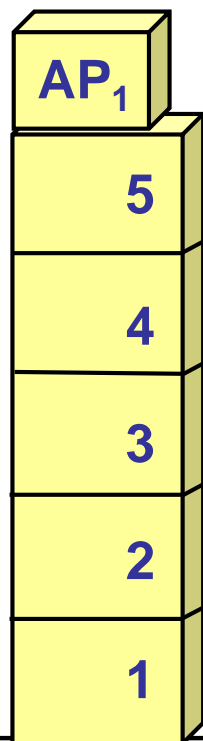


物理层接收到比特流，上交给数据链路层

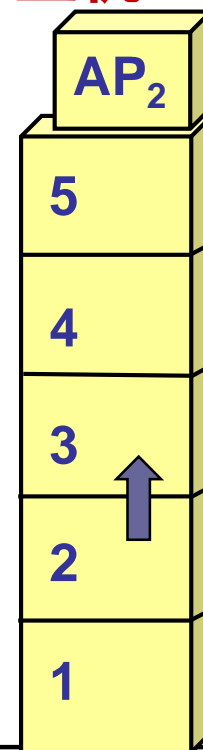
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

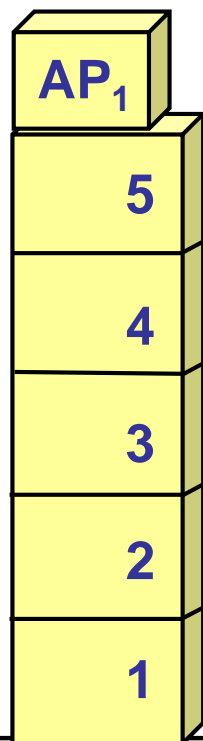


数据链路层剥去帧首部和帧尾部
取出数据部分，上交给网络层

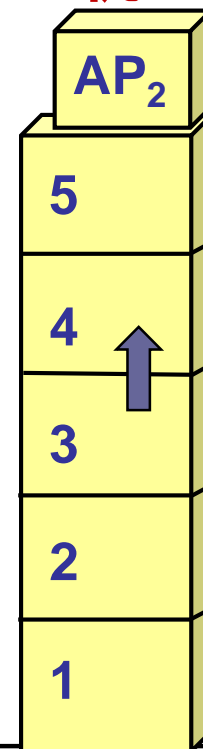
主机 1 向主机 2 发送数据



主机 1



主机 2

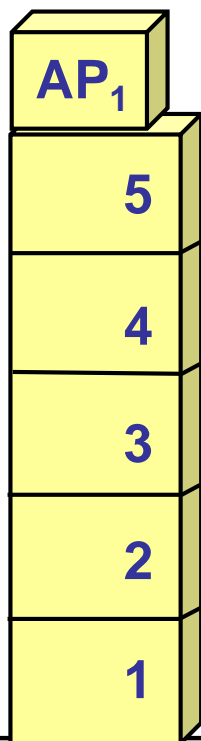


网络层剥去首部，取出数据部分
上交给运输层

主机 1 向主机 2 发送数据

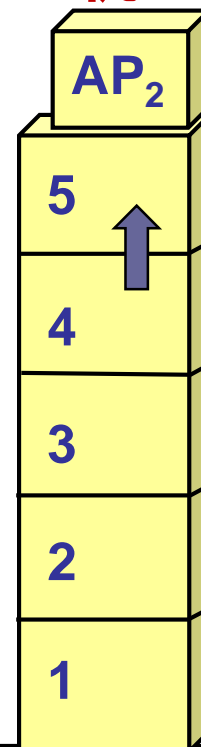


主机 1



运输层剥去首部，取出数据部分
上交给应用层

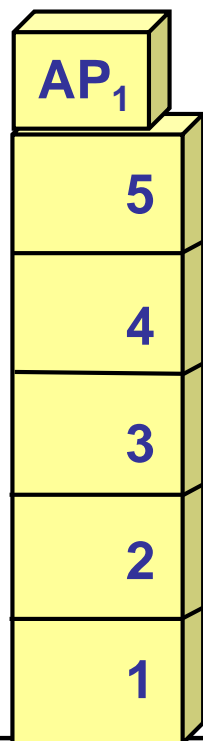
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

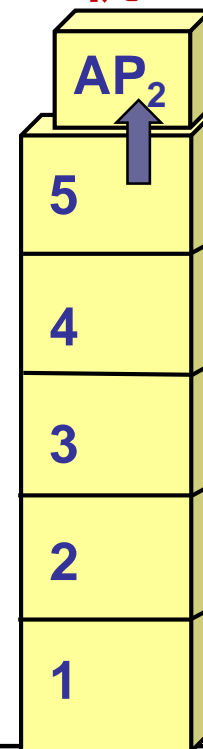


主机 1



应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

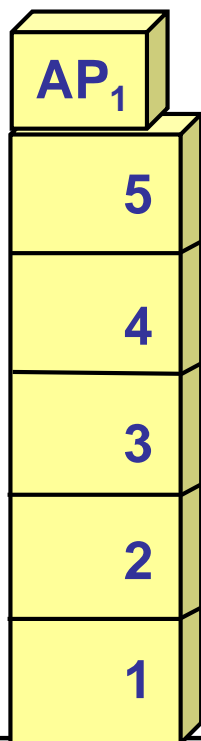
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

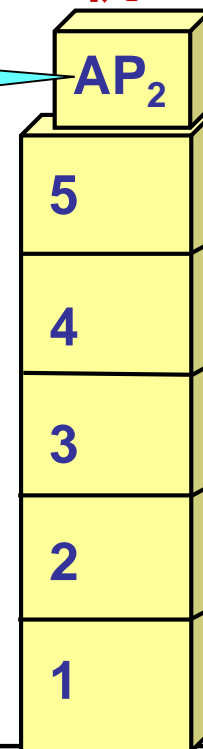


主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2

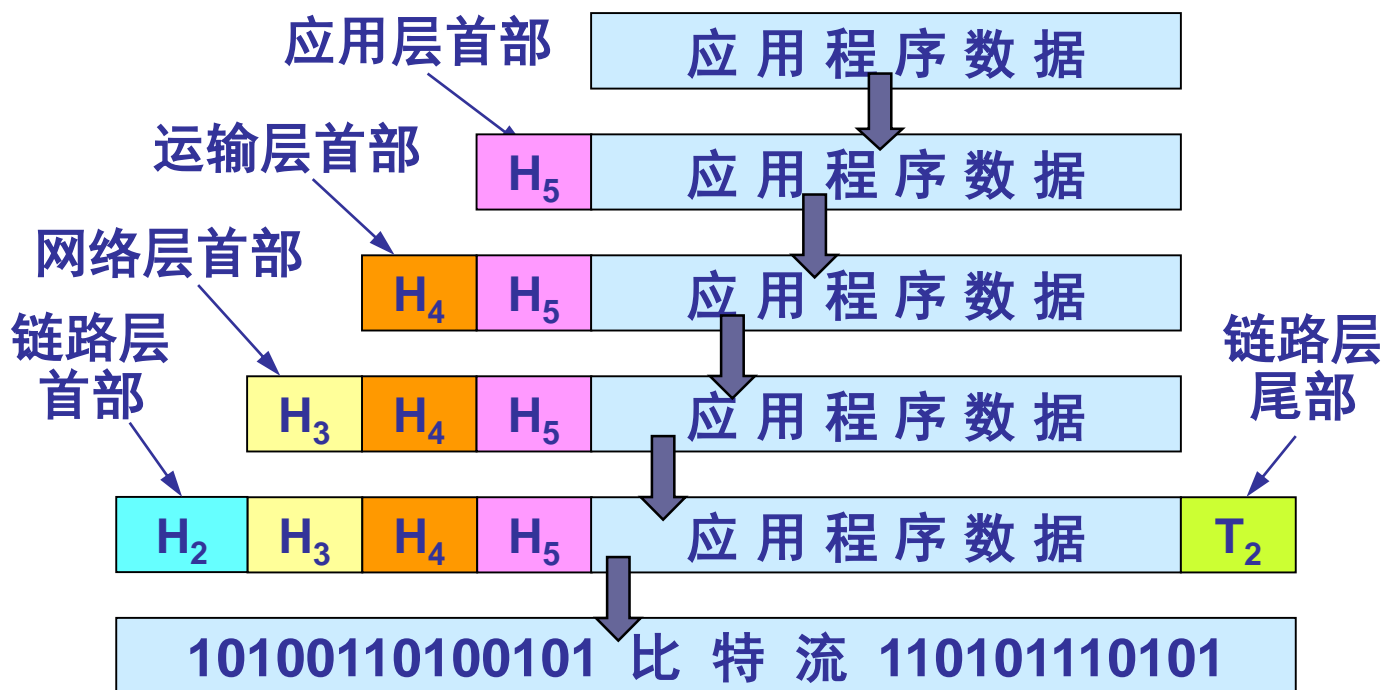
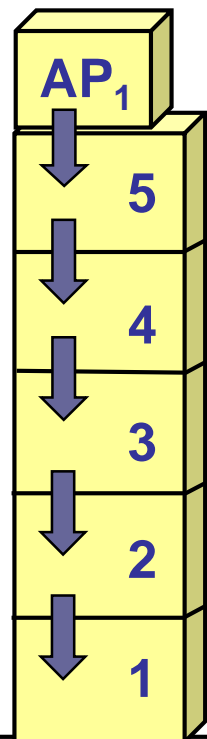


主机 1 向主机 2 发送数据

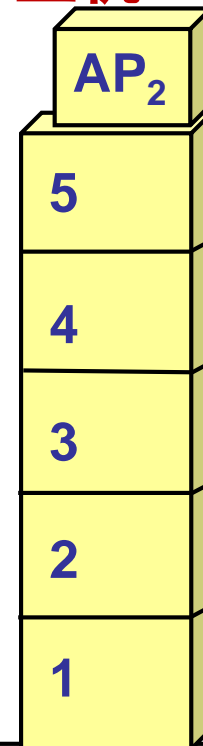


注意观察加入或剥去首部（尾部）的层次

主机 1



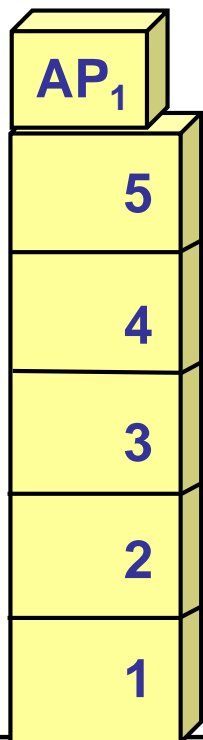
主机 2



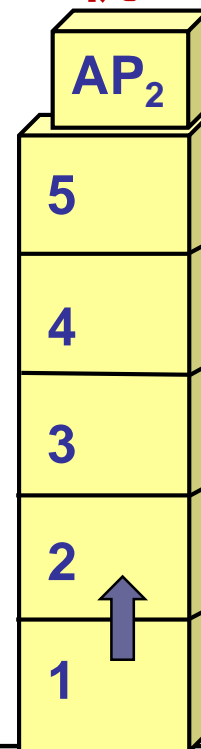
主机 1 向主机 2 发送数据



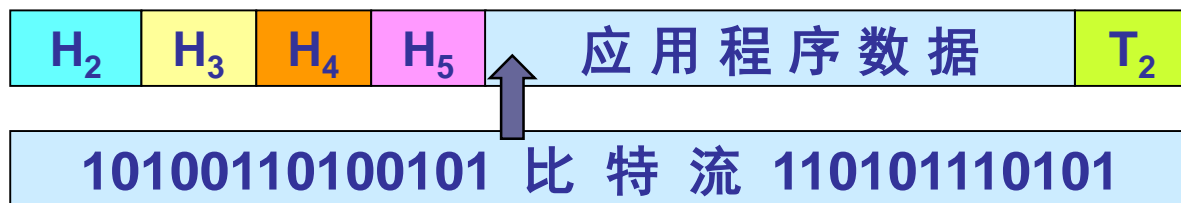
主机 1



主机 2



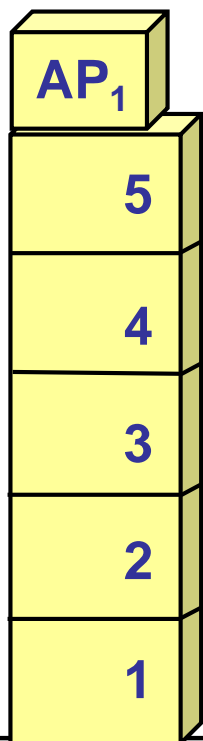
主机 2 的物理层收到比特流后
交给数据链路层



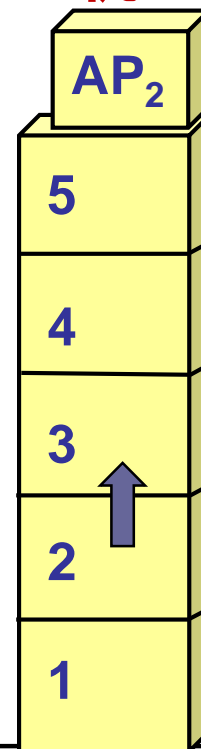
主机 1 向主机 2 发送数据



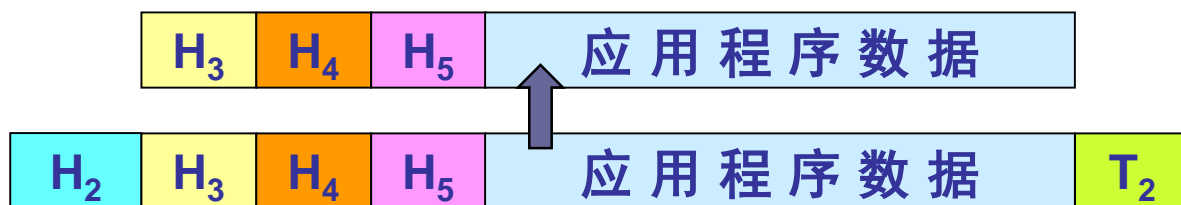
主机 1



主机 2



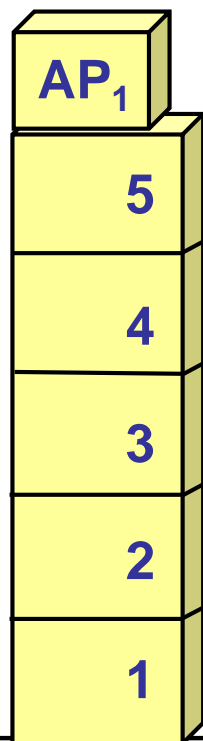
数据链路层剥去帧首部和帧尾部后
把帧的数据部分交给网络层



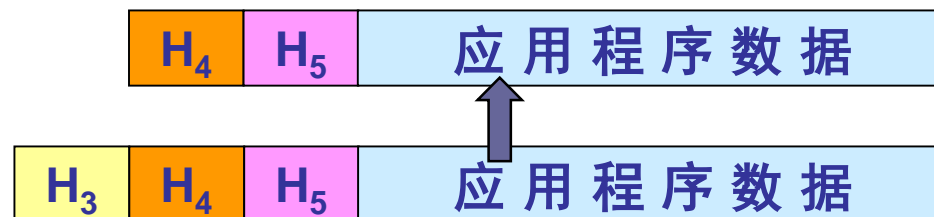
主机 1 向主机 2 发送数据



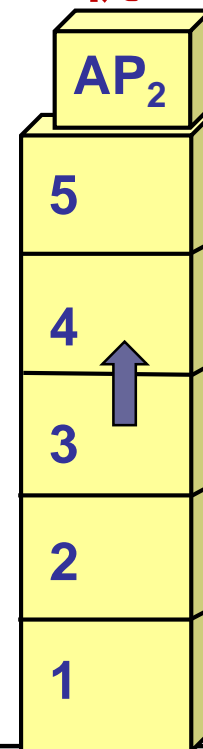
主机 1



网络层剥去分组首部后
把分组的数据部分交给运输层



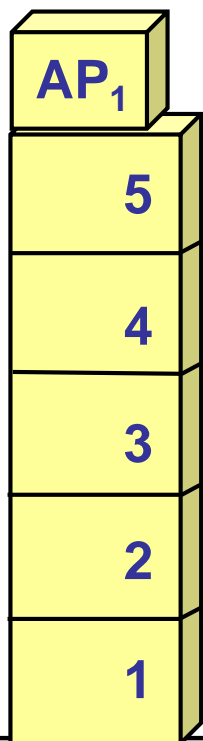
主机 2



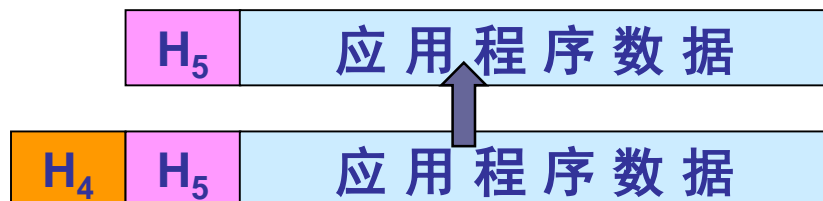
主机 1 向主机 2 发送数据



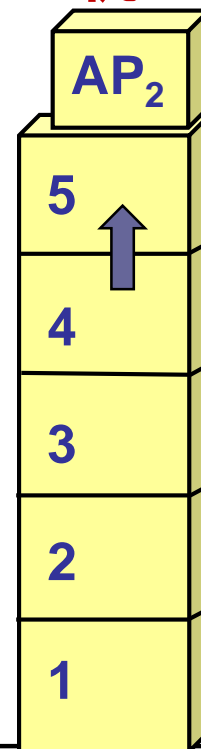
主机 1



运输层剥去报文首部后
把报文的数据部分交给应用层



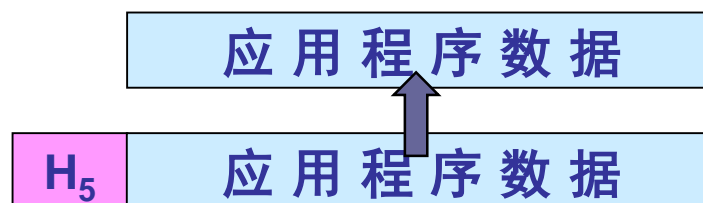
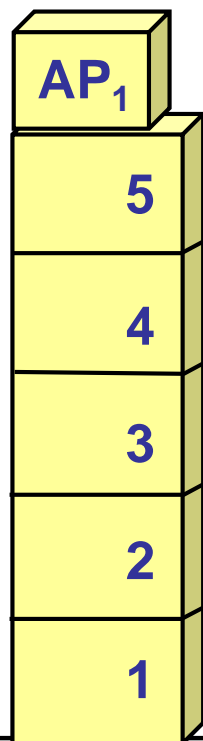
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

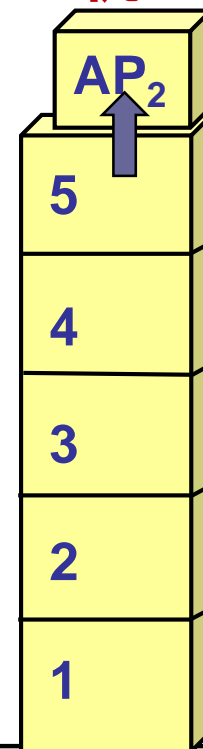


主机 1



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

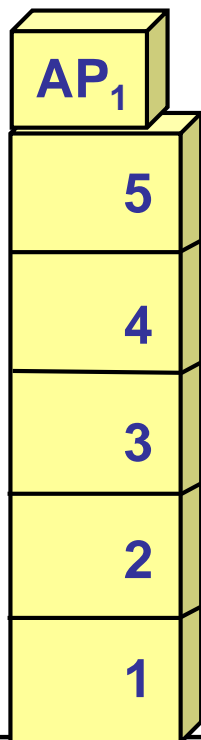
主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

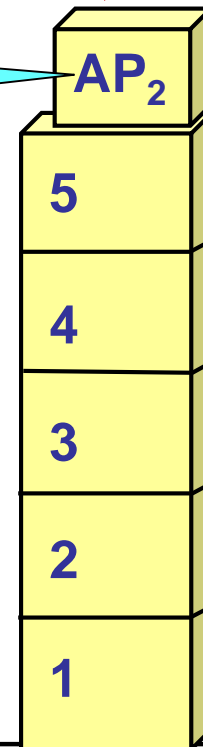


主机 1



我收到了 AP₁ 发来的
应用程序数据！

主机 2



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。
- 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



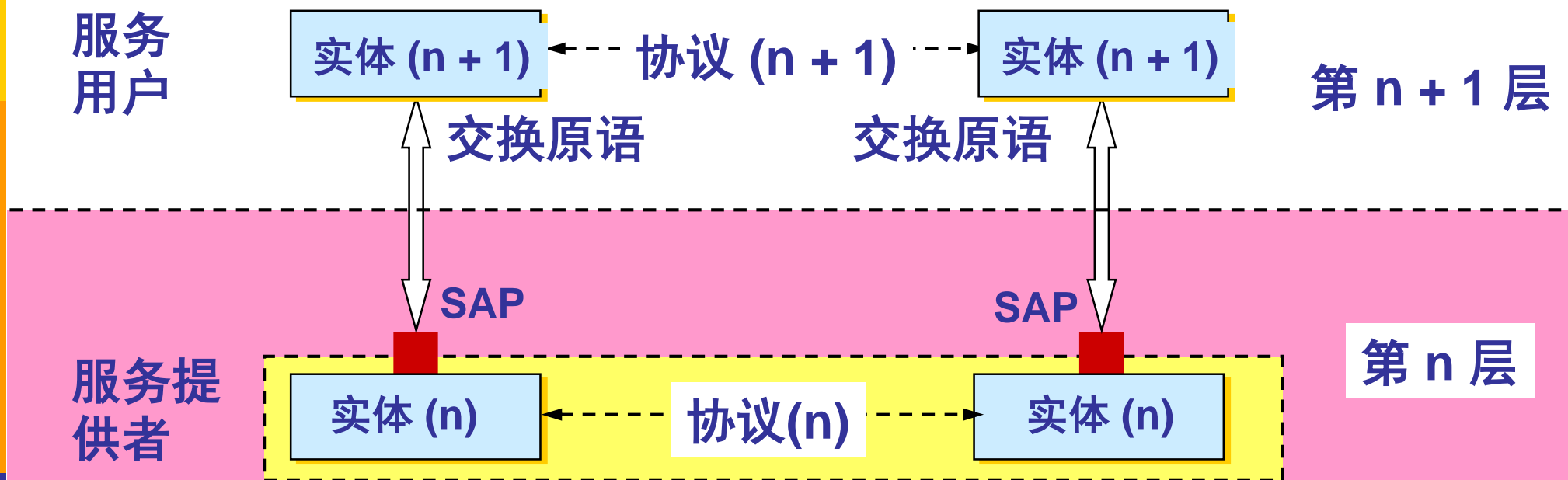
- 协议的实现保证了能够向上一层提供服务。
- 本层的服务用户**只能看见服务**而无法看见下面的协议。即下面的协议对上面的服务用户是**透明**的。
- 协议是“**水平的**”，即协议是控制对等实体之间通信的规则。
- 服务是“**垂直的**”，即服务是由下层向上层通过层间接口提供的。
- 上层使用**服务原语**获得下层所提供的服务。

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



相邻两层之间的关系

【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？**



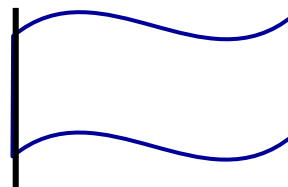
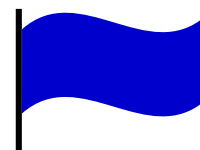
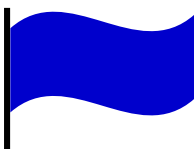
明日正午进攻，如何？

同意

收到“同意”

这样的协议无法实现！

收到：收到“同意”



结论

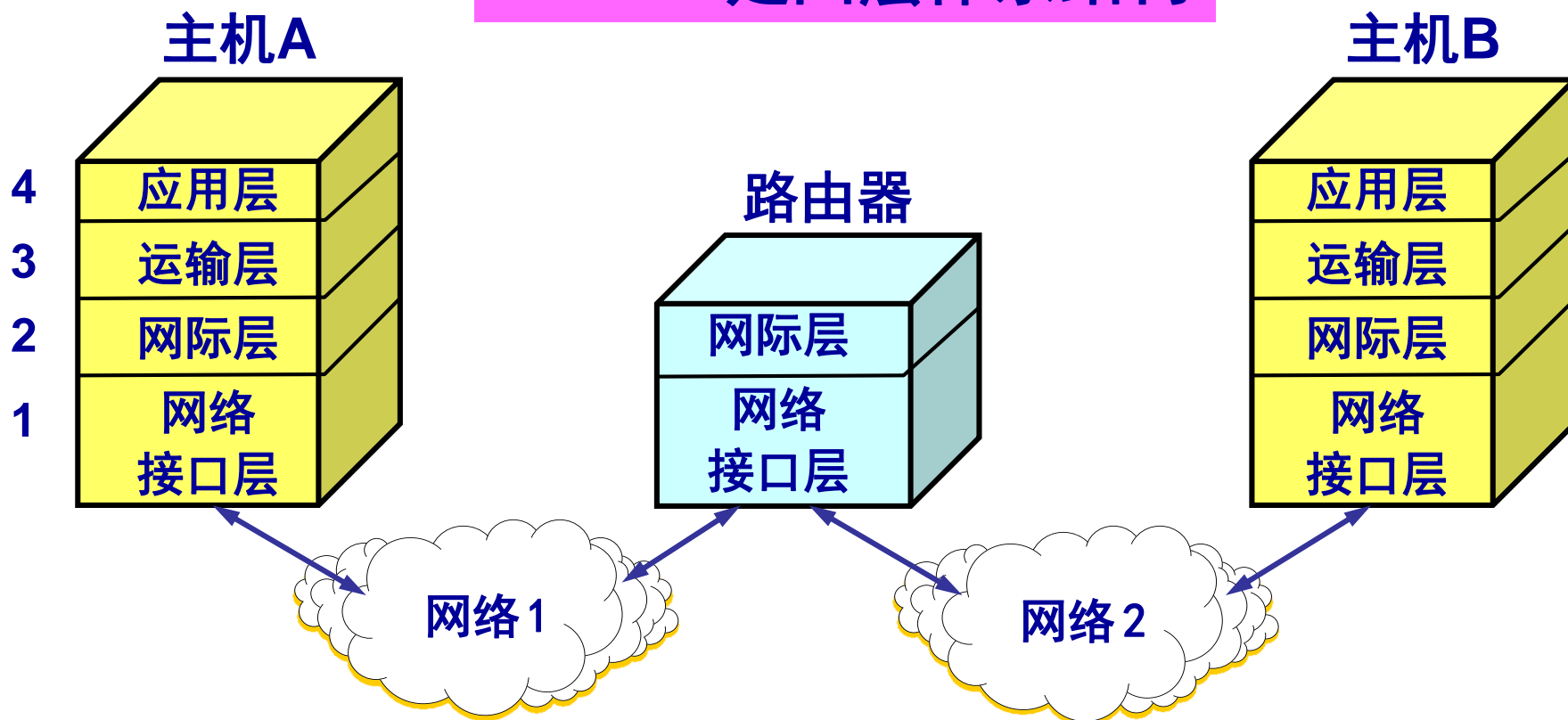


- 这样无限循环下去，两边的蓝军都始终无法确定自己最后发出的电文对方是否已经收到。
- 没有一种协议能够使蓝军 100% 获胜。
- 这个例子告诉我们，看似非常简单的协议，设计起来要考虑的问题还是比较多的。

1.7.5 TCP/IP 的体系结构



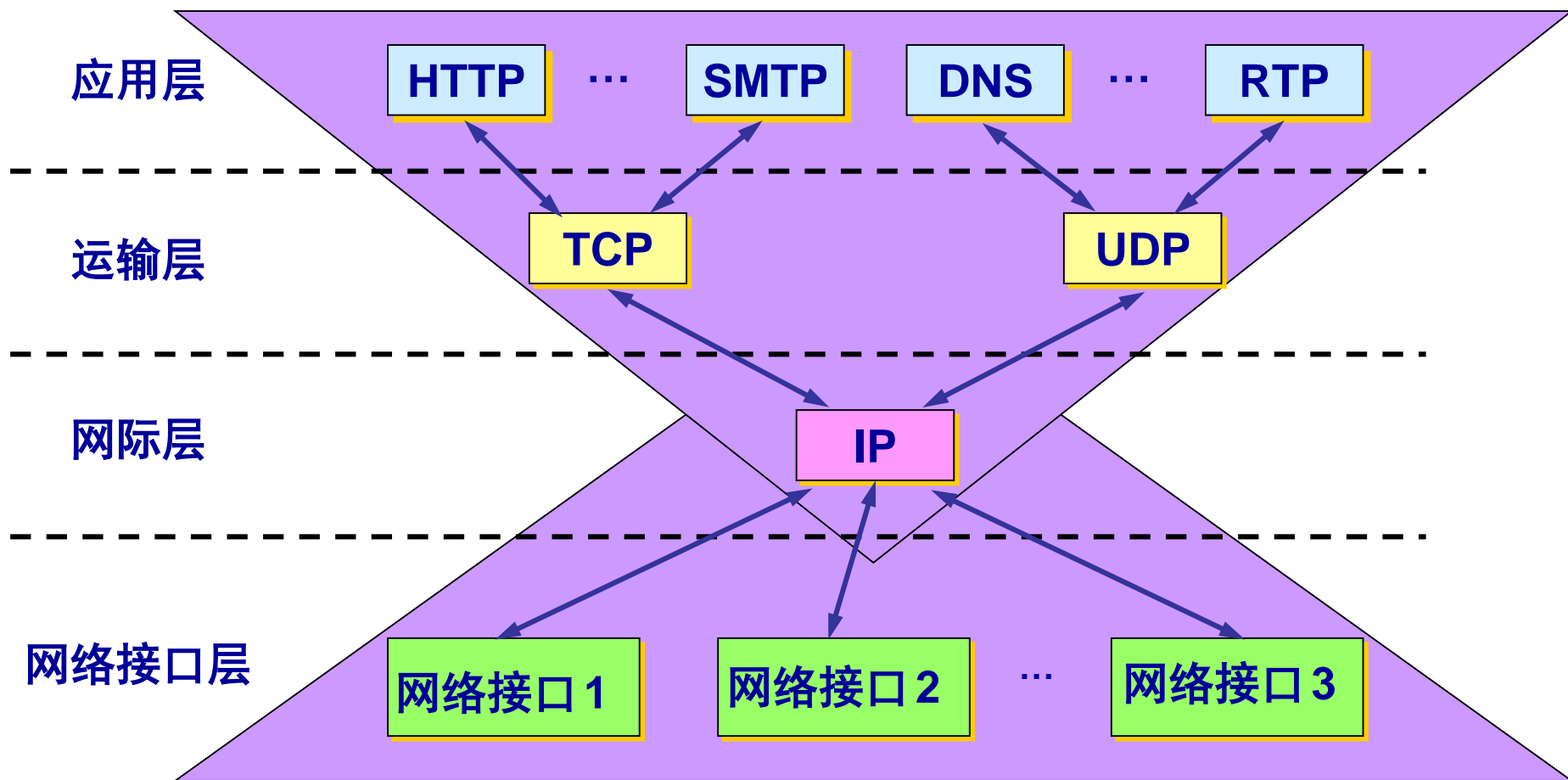
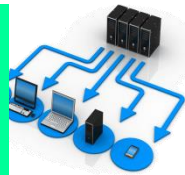
TCP/IP 是四层体系结构



**路由器在转发分组时最高只用到网际层
而没有使用运输层和应用层。**

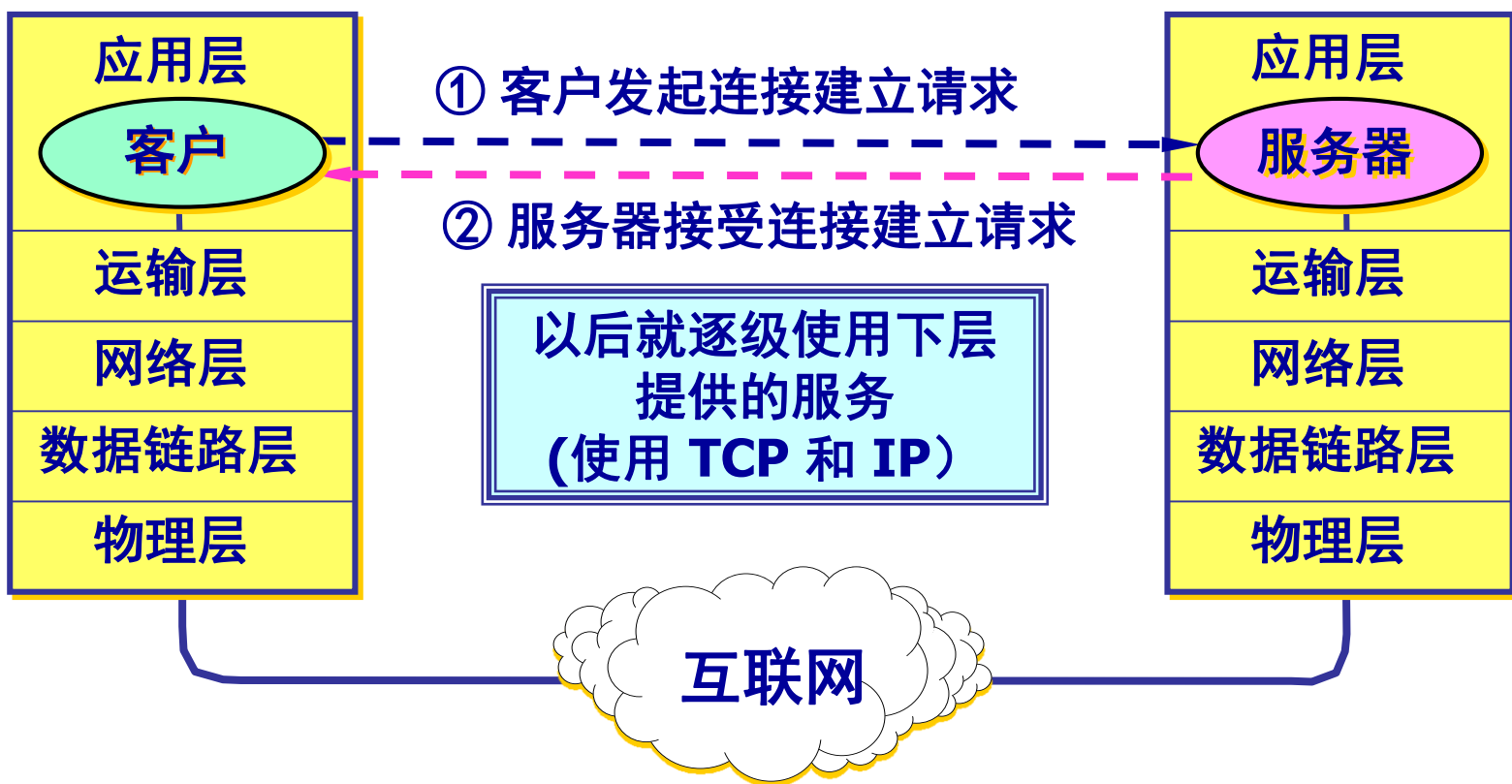
IP over Everything

IP可应用到各式各样的网络上



沙漏计时器形状的 TCP/IP 协议族

【例1-2】客户进程和服务进程 使用 TCP/IP 协议栈进行通信



在应用层的客户进程和服务进程交互