



计算机网络



课程安排

- 课程安排（ 1-16 周 ）
 - 讲授 + 实验
 - 16 学时实验
- 考勤、作业、实验： 20%
- 考试： 80%



公邮

- hpnhao@126.com
- hpn123



教材

- 谢希仁，计算机网络（第 6 版），电子工业出版社，2012 年



实验

- 第一部分：路由器和交换机命令
 - 含 7 个实验（找工作）
- 第二部分：NS2 Linux 环境下网络服务质量测量（做科研）
- 第三部分：Wireshark 协议抓包实验
 - 含 10 个实验，根据时间做其中数个（当黑客？）



内容

- 1. 概述
- 2. 物理层
- 3. 数据链路层
- 4. 网络层
- 5. 传输层（也称‘运输层’）
- 6. 应用层
- 7. 无线网络



第 1 章 概述

1.1 计算机网络在信息时代中的作用

1.2 因特网概述

1.2.1 网络的网络

1.2.2 因特网发展的三个阶段

1.2.3 因特网的标准化工作

1.3 因特网的组成

1.3.1 因特网的边缘部分

1.3.2 因特网的核心部分



第 1 章 概述 (续)

1.4 计算机网络在我国的发展

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

1.6 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



第 1 章 概述 (续)

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、服务和访问点

1.7.5 TCP/IP 的体系结构



1.1 计算机网络 在信息时代的作用

- 21 世纪的一些重要特征就是数字化、网络化和信息化，它是一个以网络为核心的信息时代。
- 网络现已成为信息社会的命脉和发展知识经济的重要基础。
- 网络是指“三网”，即电信网络（音频）、有线电视网络（视频）和计算机网络（数据）。
- 发展最快的并起到核心作用的是计算机网络。



因特网 (Internet) 的发展

- 进入 20 世纪 90 年代以后，以因特网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逐步发展成为商业网络。
- 已成为仅次于全球电话网的世界第二大网络。



因特网的意义

- 因特网是自印刷术以来人类通信方面最大的变革。
- 现在人们的生活、工作、学习和交往都已离不开因特网。

计算机网络向用户提供的最重要的功能

- **连通性**——计算机网络使上网用户之间都可以交换信息，好像这些用户的计算机都可以彼此直接连通一样。
- **共享**——即资源共享。可以是**信息共享**（ Web 、 百度 ）、**软件共享**（ 网游、云上的 Spark 、 数据库服务器 ），也可以是**硬件共享**（ AWS 云平台，虚拟桌面，云盘 ）。



1.2 因特网概述

1.2.1 网络的网络

- 起源于美国的因特网现已发展成为世界上最大的国际性计算机互联网
- **网络** (network) 由若干**结点** (node) 和连接这些结点的**链路** (link) 组成。
- 互联网是“**网络的网络**” (network of networks)。(局域网或城域网的网络)
- 连接在因特网上的计算机都称为**主机** (host)。(此 host 可以是笔记本、PC、服务器甚至手机，host 是结点的一部分，另一部分是网络设备，如路由器和交换机)



请注意名词“结点”

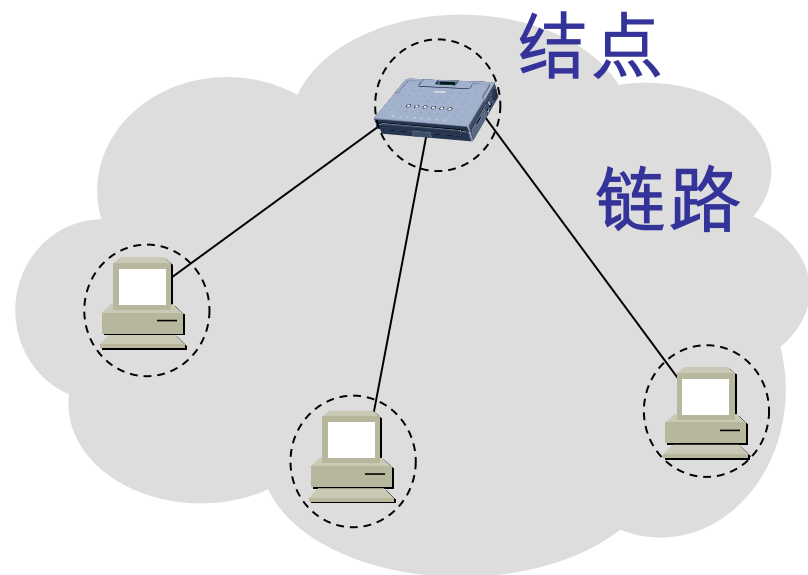
- “结点”的英文名词是 node 。
- 虽然 node 有时也可译为“节点”，但这是指像天线上的驻波的节点，这种节点很像竹竿上的“节”。
- 在网络中的 node 的标准译名是“**结点**”而不是“节点”。
- 但数据结构的**树** (tree) 中的 node 应当译为“节点”。



网络与因特网

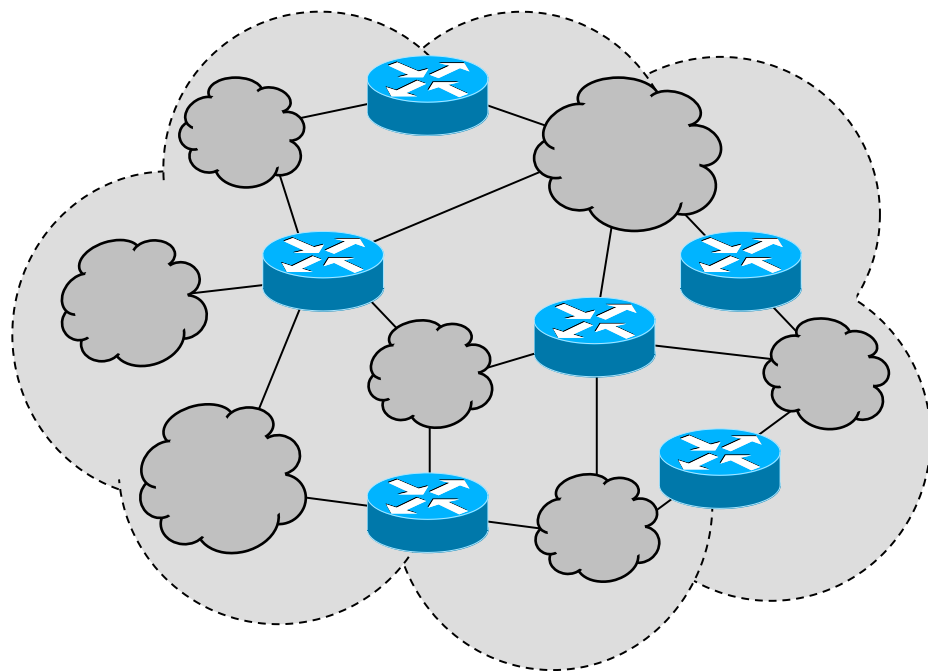
- 网络把许多计算机连接在一起。
- 因特网则把许多网络连接在一起。

网络



(a)
中间可以是 Hub\ 交换机
或无线路由器
可有上联或无上联

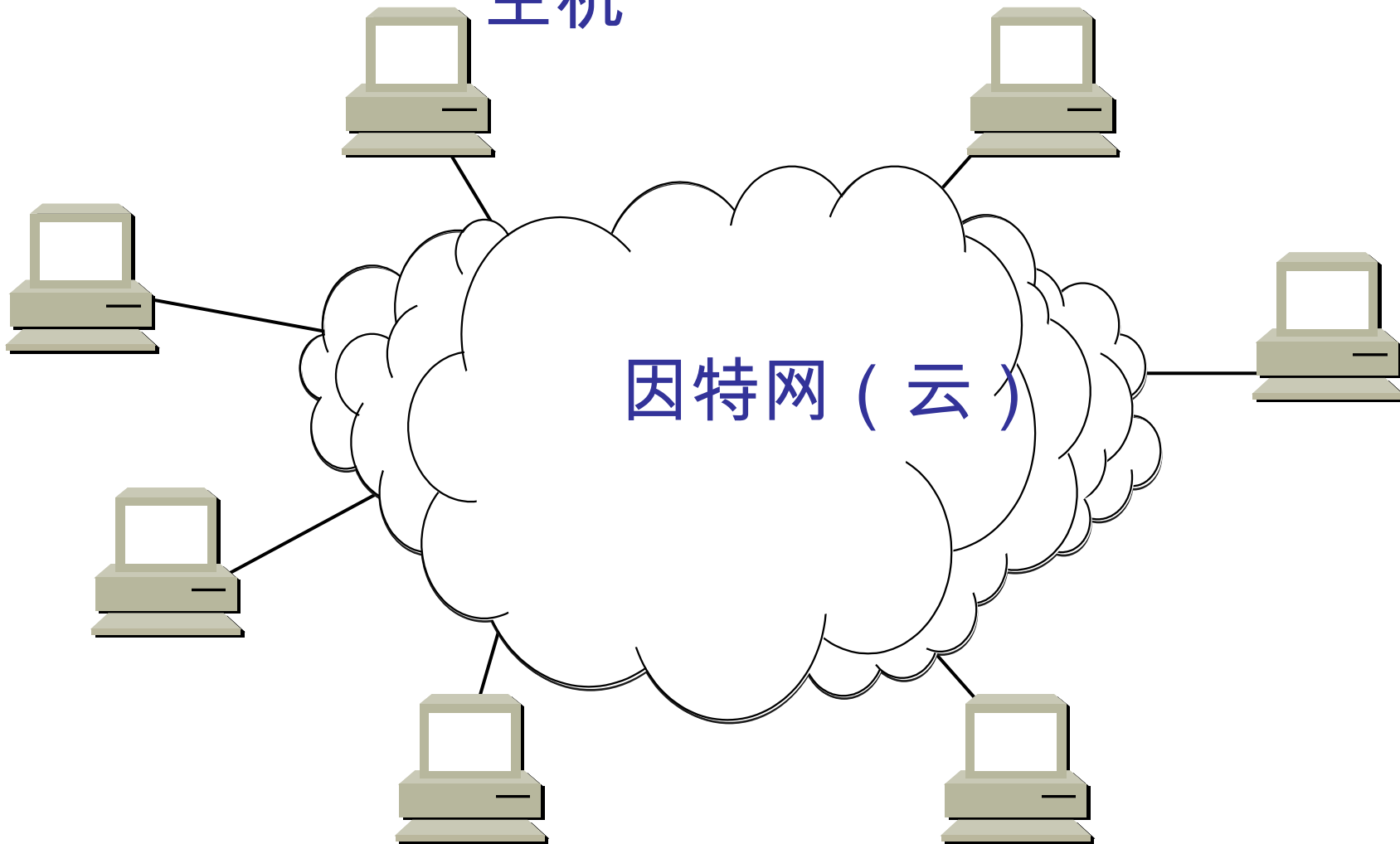
互联网 (网络的网络)



(b)
此图中路由器通常为
大容量高档路由
器

主机

因特网（云）





1.2.2 因特网发展的三个阶段

- 第一阶段是从单个网络 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。
- 人们把 1983 年作为因特网的诞生时间。



Internet 和 internet 的区别

- 以**小写字母 i** 开始的 **internet** (互联网或互连网) 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** (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** 。



三级结构的因特网

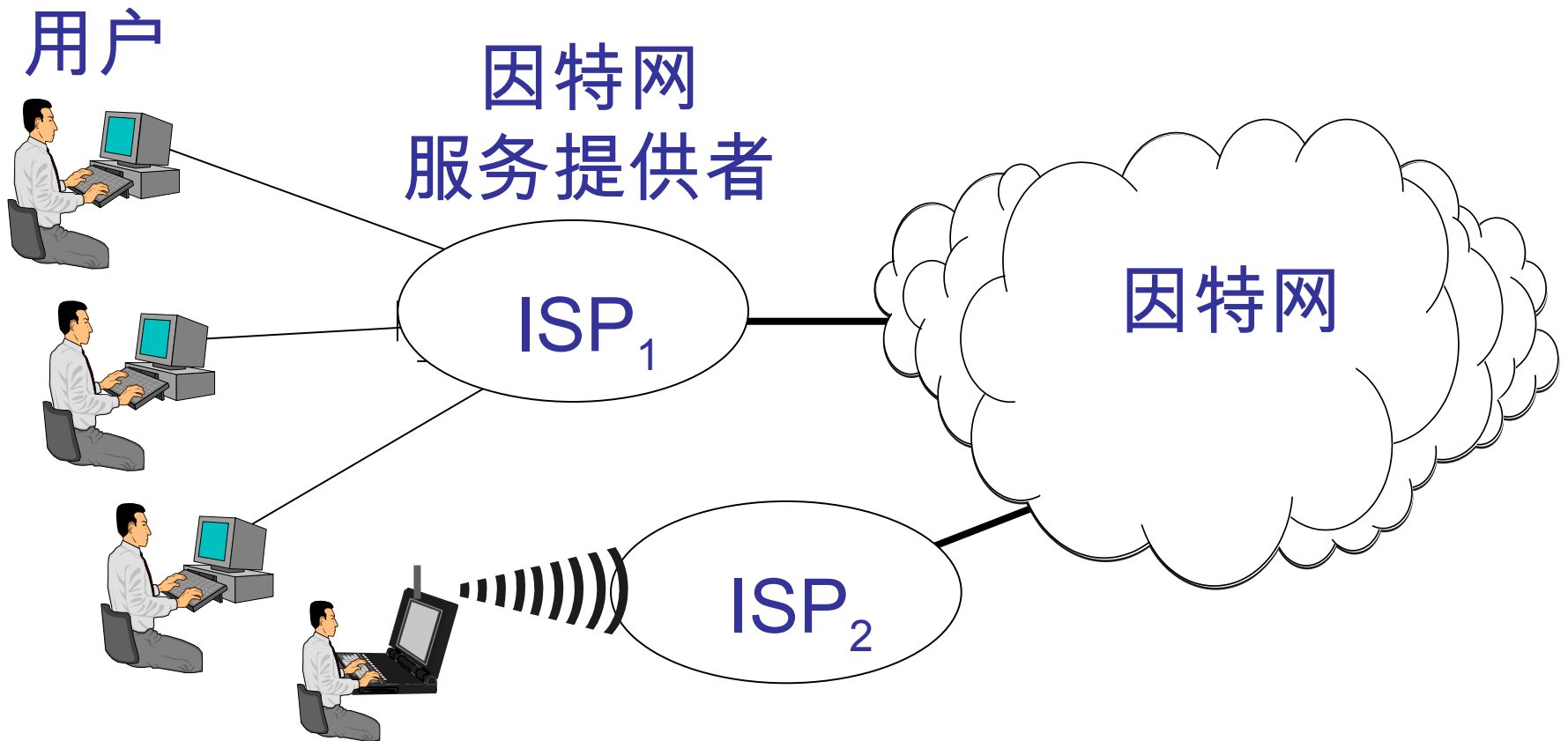
- 第二阶段的特点是建成了三级结构的因特网。
- 三级计算机网络，分为主干网、地区网和校园网（或企业网）。



多层次 ISP 结构的因特网

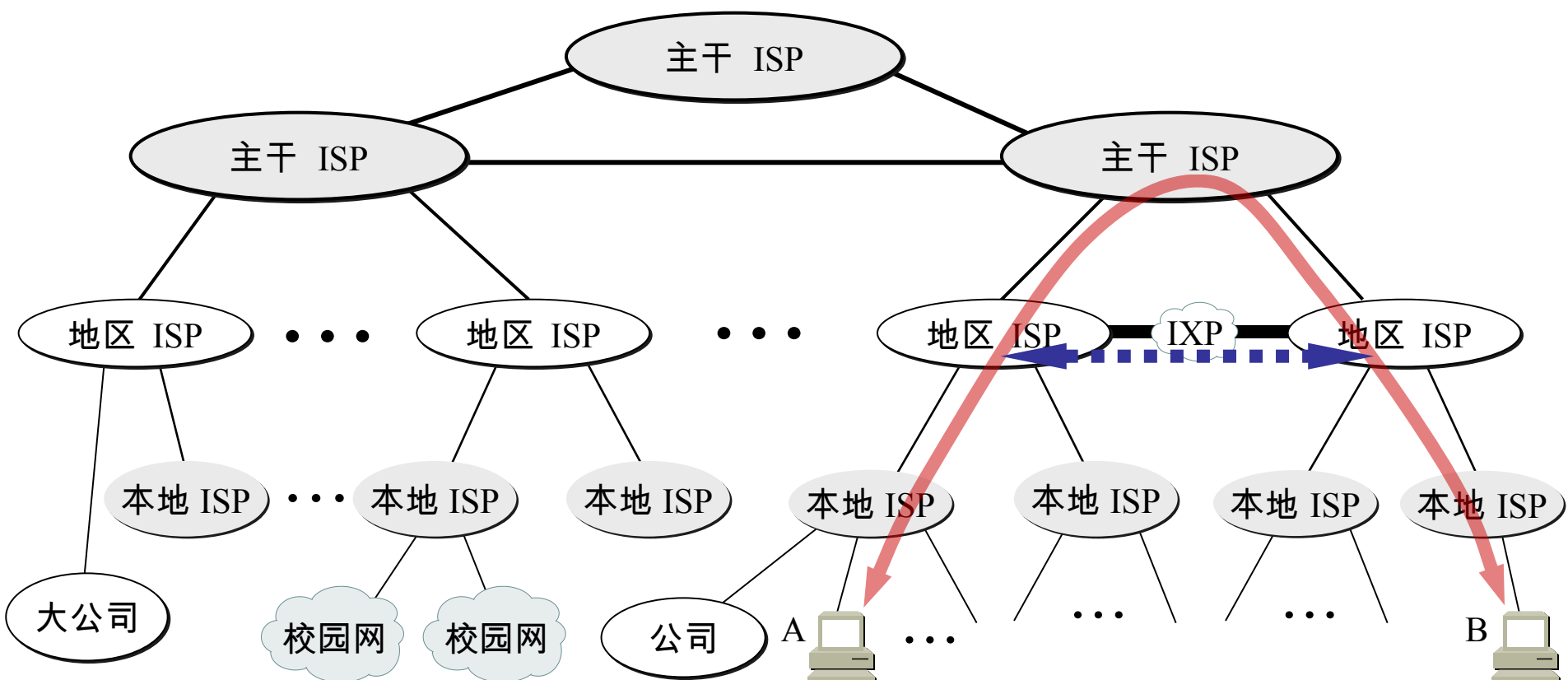
- 第三阶段的特点是逐渐形成了多层次 ISP 结构的因特网。
- 出现了因特网服务提供者 ISP (Internet Service Provider) 。

用户通过 ISP 上网



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 也分成为不同的层次。

下面是具有三层 ISP 结构的因特网的概念示意图



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

到 2012 年 3 月，全球已经有 91 个国家拥有 IXP，
其中拥有 10 个以上 IXP 的国家仅有 9 个，
而仅拥有一个 IXP 的有 48 个国家。



国家	IXP 数
美国	85
巴西	19
日本	16
法国	15
德国	14
中国大陆	3



万维网 WWW 的问世

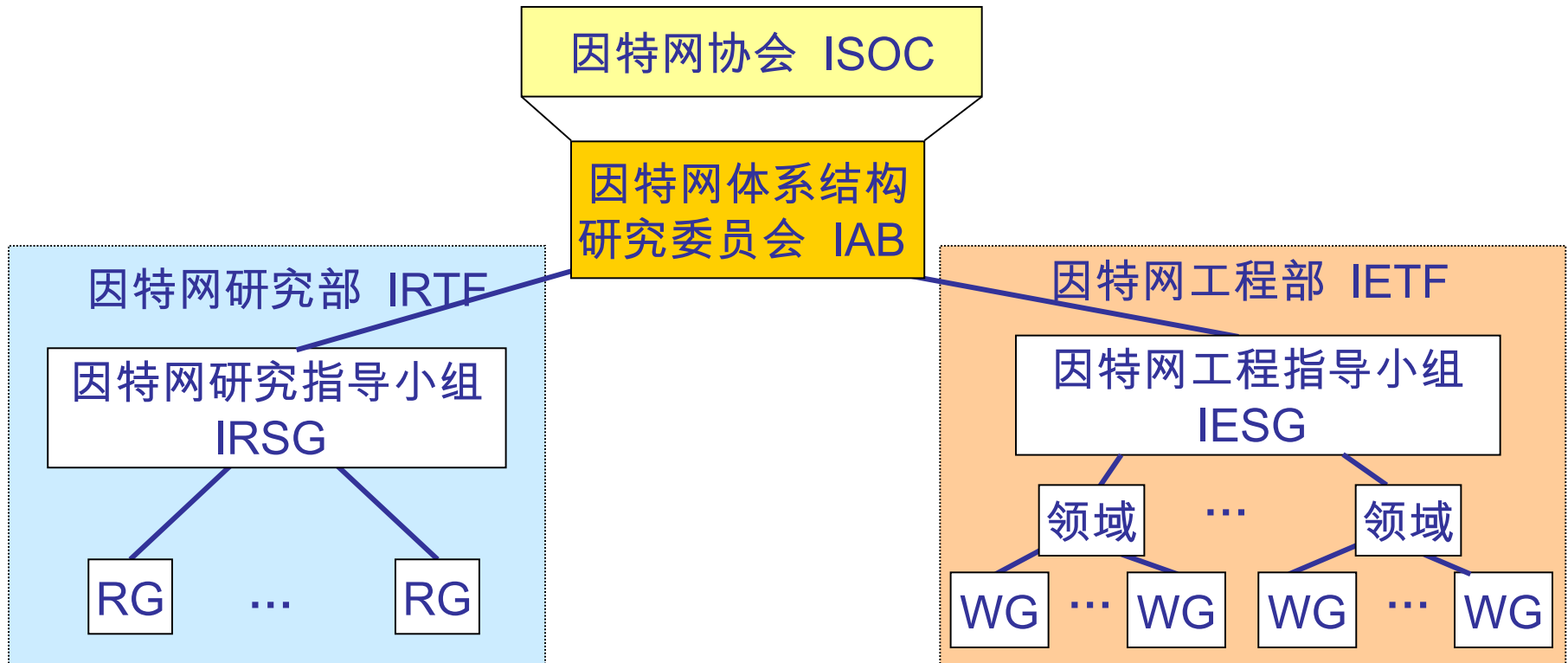
- 因特网已经成为世界上规模最大和增长速率最快的计算机网络，没有人能够准确说出因特网究竟有多大。
- 因特网的迅猛发展始于 20 世纪 90 年代。由欧洲原子核研究组织 CERN 开发的万维网 **WWW** (World Wide Web) 被广泛使用在因特网上，大大方便了广大非网络专业人员对网络的使用，成为因特网的这种指数级增长的主要驱动力。



因特网的发展情况概况 (统计到 2005 年)

	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

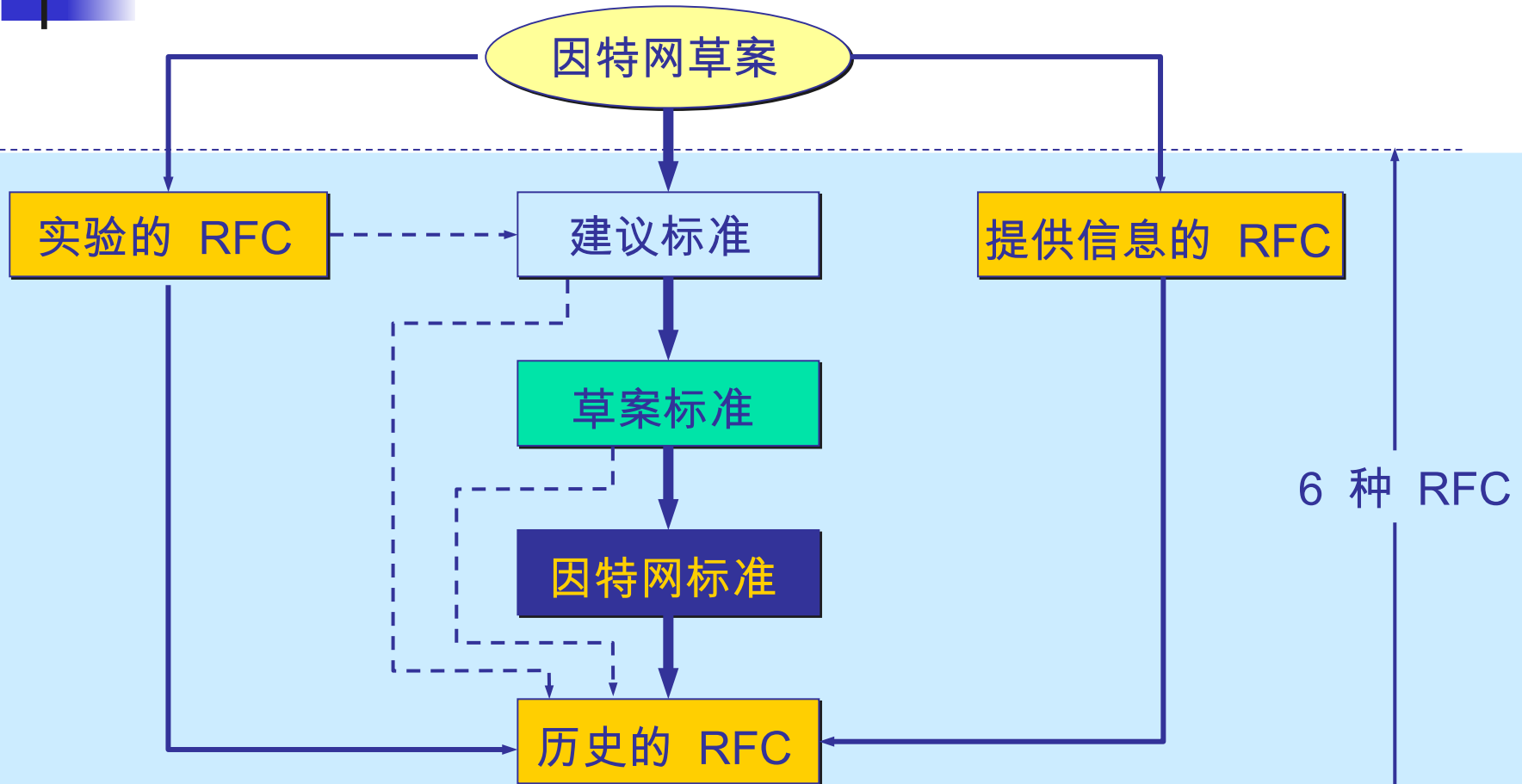
1.2.3 关于因特网的标准化工作



制订因特网的正式标准要经过 以下的四个阶段

- 因特网草案 (Internet Draft) —— 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。
- 草案标准 (Draft Standard)
- 因特网标准 (Internet Standard)

各种 RFC 之间的关系



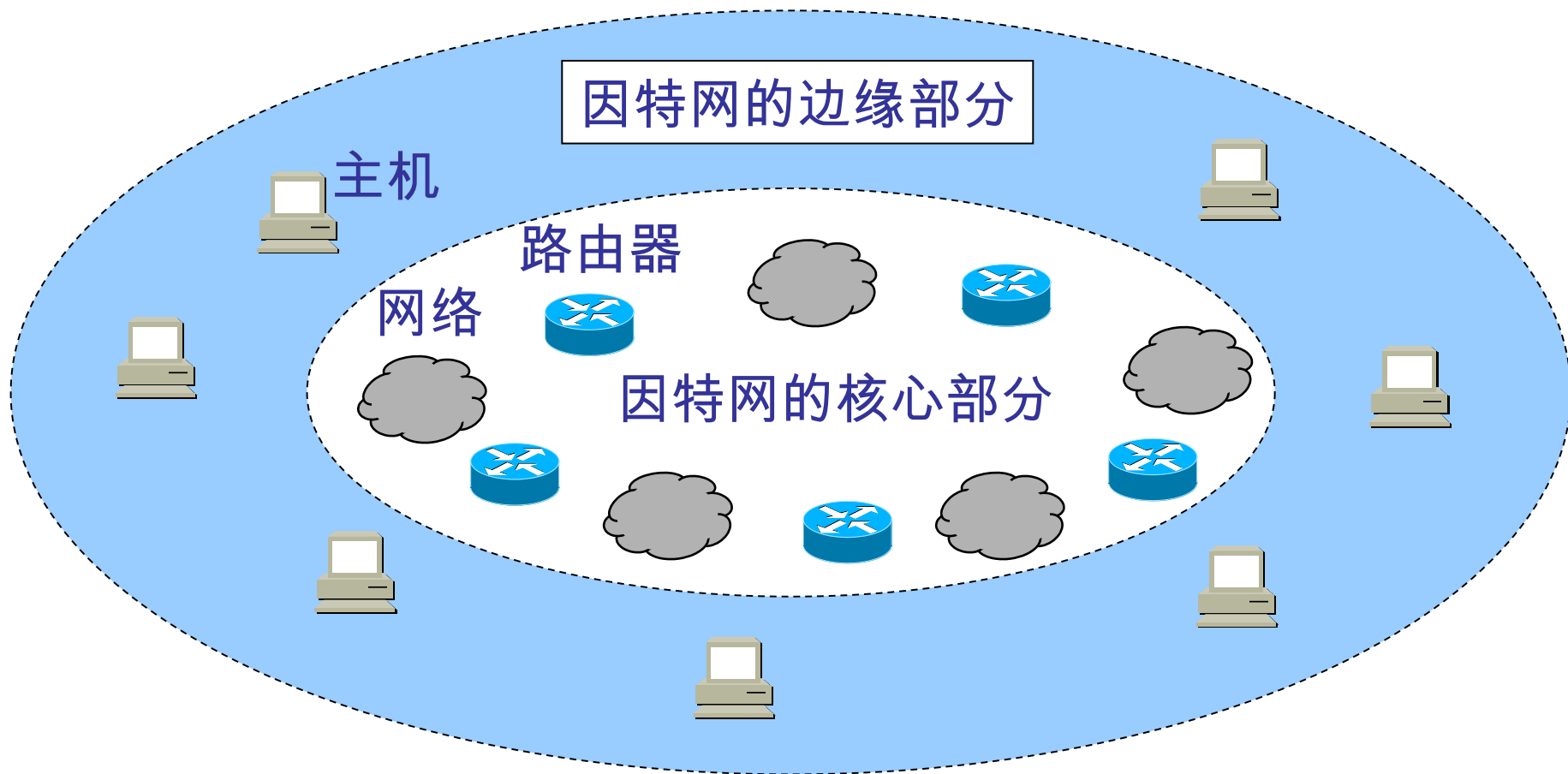


1.3 因特网的组成

从因特网的工作方式上看，可以划分为以下的两大块：

- (1) **边缘部分** 由所有连接在因特网上的主机组成。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 and 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**）。

因特网的边缘部分与核心部分





计算机网络的组成

- 典型的计算机网络通常包括如下四个部分：
 - **用户设备**：向用户提供服务的计算机，比如各种服务器或PC机等，又称端设备
 - **网络设备**：为了实现大量用户的远程通信所必须的中继或互连设备，比如各种集线器、交换机、路由器、网关等，又称网络互连设备
 - **传输介质**：在网络设备和主机设备之间或在网络设备和网络设备之间起连接作用的物理线路，比如双绞线、同轴电缆、光缆等。
 - **网络协议**：是为在用户设备与用户设备之间、用户设备与网络设备之间、或网络设备与网络设备之间通信而做的约定或制定的规则，比如TCP/IP协议族、OSI协议族等。



固话电信网络的组成

- 典型的固话电信网络通常包括如下四个部分：
 - 用户设备：向用户提供服务的设备，比如固定电话机等
 - 网络设备：为了实现大量用户的远程通信所必须的中继或互连设备，比如程控交换机、媒体网关、VoIP 网关等
 - 传输介质：在网络设备和用户设备之间或在网络设备和网络设备之间起连接作用的物理线路，比如电话双绞线、光缆等。
 - 网络协议：是为在用户设备与用户设备之间、用户设备与网络设备之间、或网络设备与网络设备之间通信而做的约定或制定的规则，比如电信网和 ATM 网中的 No.7 信令等。



移动通信网络的组成

- 典型的移动通信网络通常包括如下四个部分：
 - 用户设备：向用户提供服务的设备，比如手机、平板等
 - 网络设备：为了实现大量用户的远程通信所必须的中继或互连设备，比如基站（BS）、移动电话交换控制中心（MSC）等
 - 传输介质：在网络设备和用户设备之间或在网络设备和网络设备之间起连接作用的物理线路，比如光缆、无线电波等。
 - 网络协议：是为在用户设备与用户设备之间、用户设备与网络设备之间、或网络设备与网络设备之间通信而做的约定或制定的规则，比如移动 No.7 信令等。



1.3.1 因特网的边缘部分

- 处在因特网边缘的部分就是连接在因特网上的所有的主机。这些主机又称为端系统(end system)。
- “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”。或简称为“计算机之间通信”



两种通信方式

在网络边缘的端系统中运行的程序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) (重要)

即 Client/Server 方式

- 对等方式 (P2P 方式)

即 Peer-to-Peer 方式

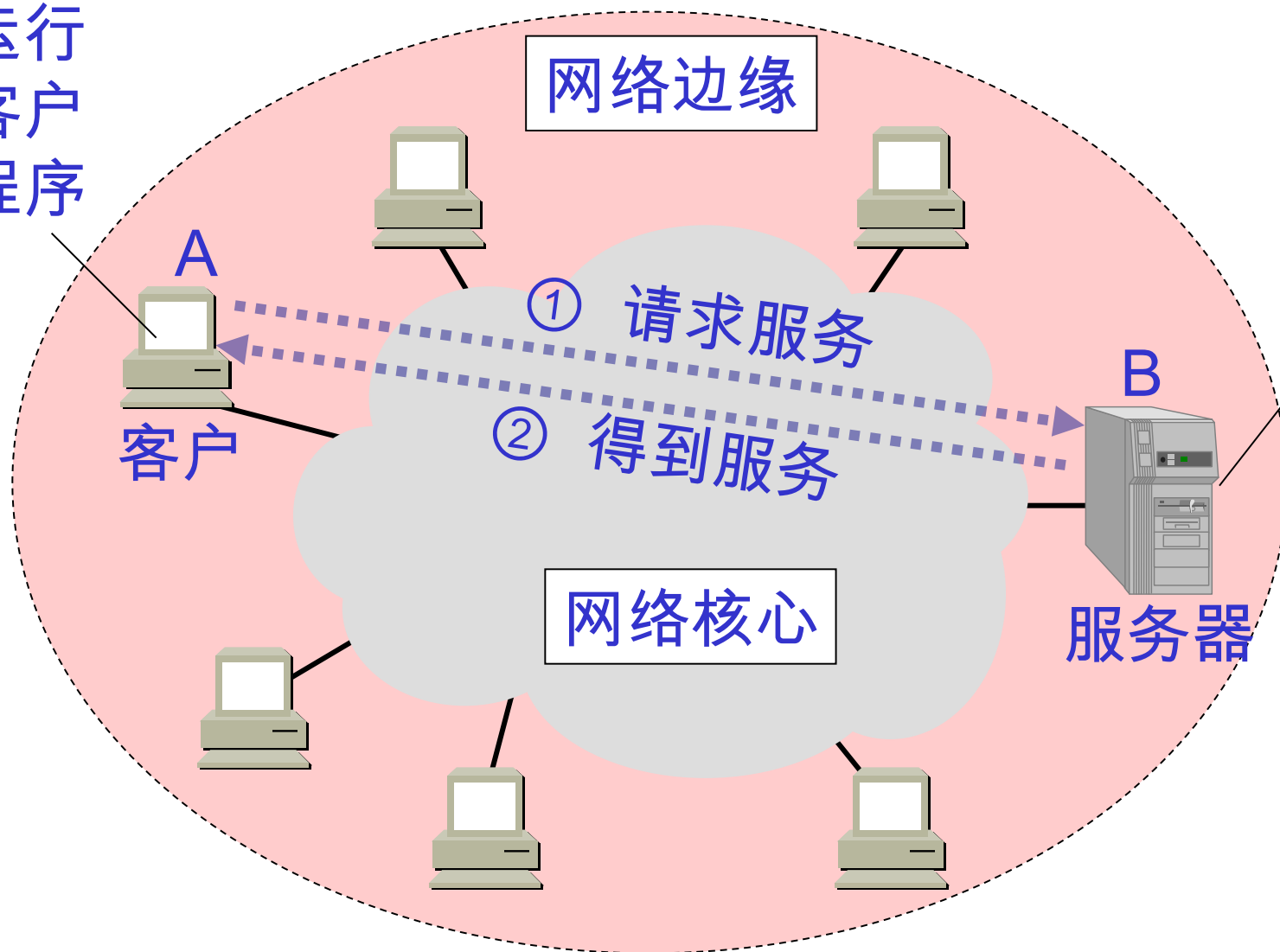


1. 客户服务器方式

- 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。

运行
客户
程序

运行
服务器
程序



客户 A 向服务器 B 发出请求服务，
而服务器 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 (win server 2016)。



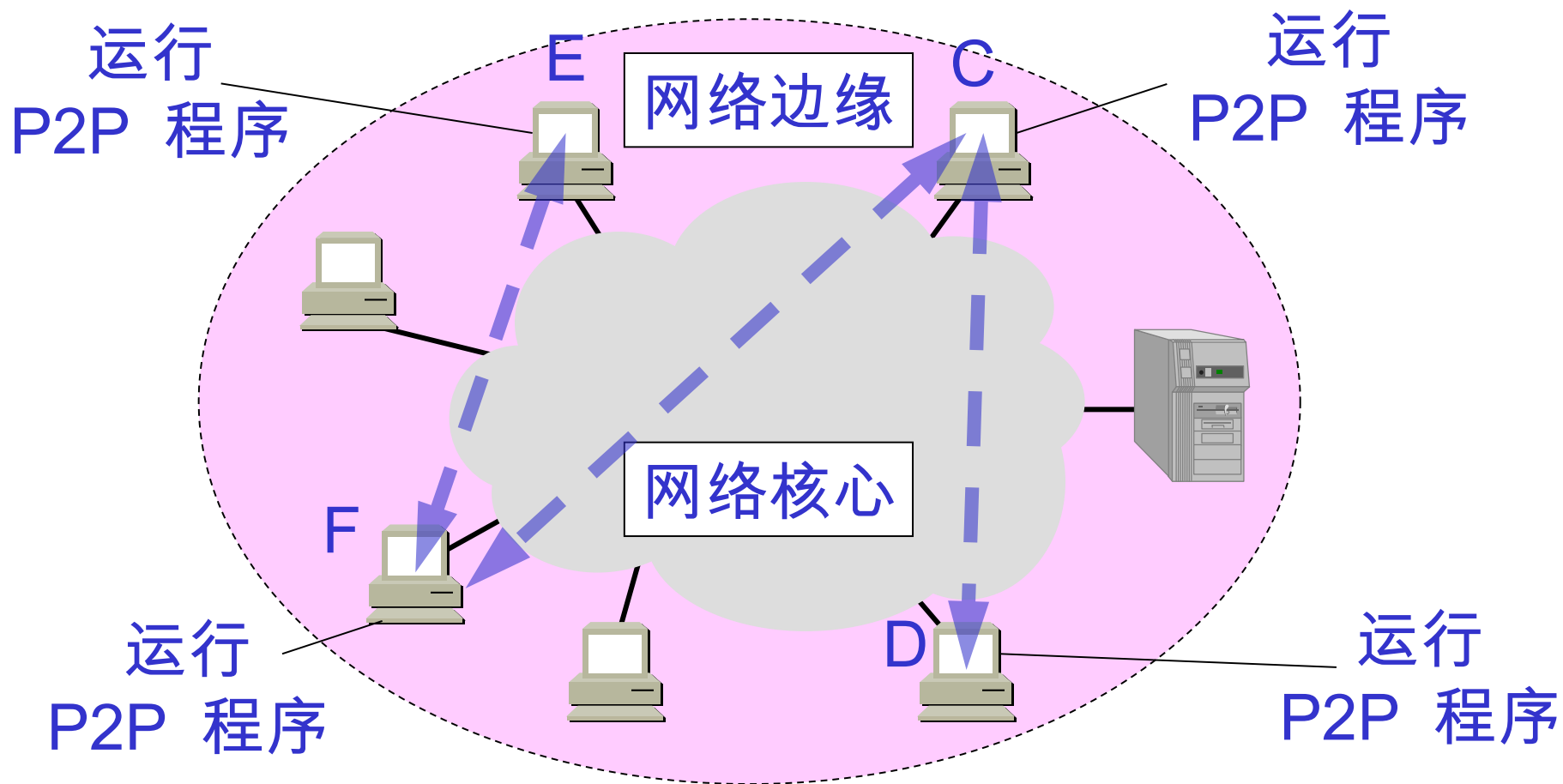
2. 对等连接方式

- **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同时是服务器。
- 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。





1.3.2 因特网的核心部分

- 网络核心部分是因特网中最复杂的部分。
- 网络中的核心部分要向网络边缘中的大量主机**提供连通性**，使边缘部分中的任何一个主机都能够向其他主机通信（即传送或接收各种形式的数据）。
- 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。



路由器的重要任务

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 VS 电路交换

中国电信大数据分析与挖掘

• 信令数据介绍 CS域

- 语音主叫
- 语音被叫
- 短信发送
- 短信接收
- 位置更新
- 开机
- 关机
- 位置切换

• 信令数据介绍 PS域

- 彩信发送
- 彩信接收
- WAP连接
- WAP使用
- WAP断开
- 3G上网
- 4G上网



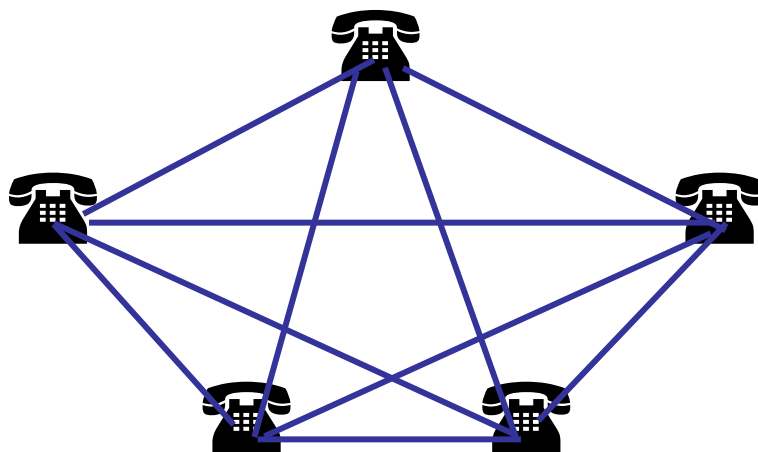
1. 电路交换的主要特点

- 两部电话机只需要用一对电线就能够互相连接起来。



更多的电话机互相连通

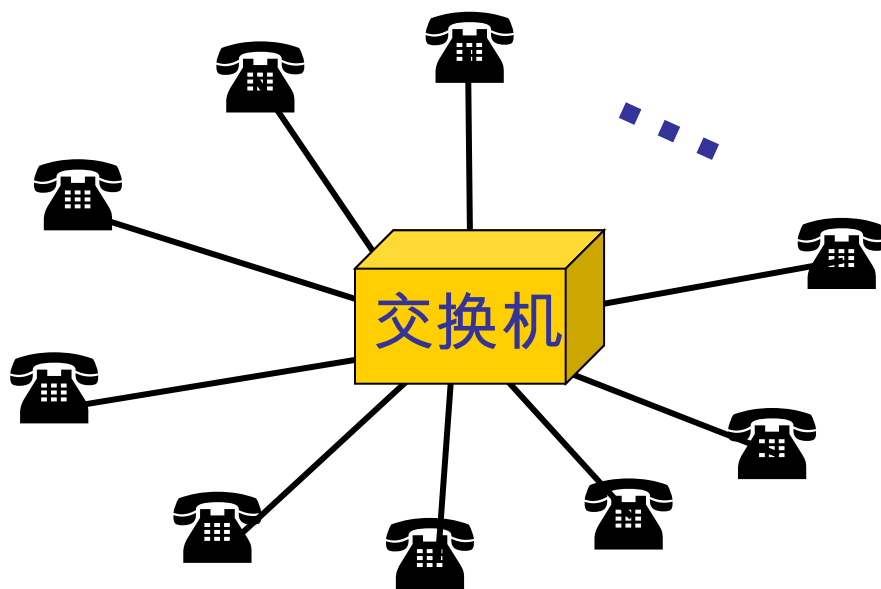
- 5 部电话机两两相连，需 10 对电线。



- N 部电话机两两相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线。
- 当电话机的数量很大时，这种连接方法需要的电线对的数量与电话机数的平方成正比。

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。





“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。

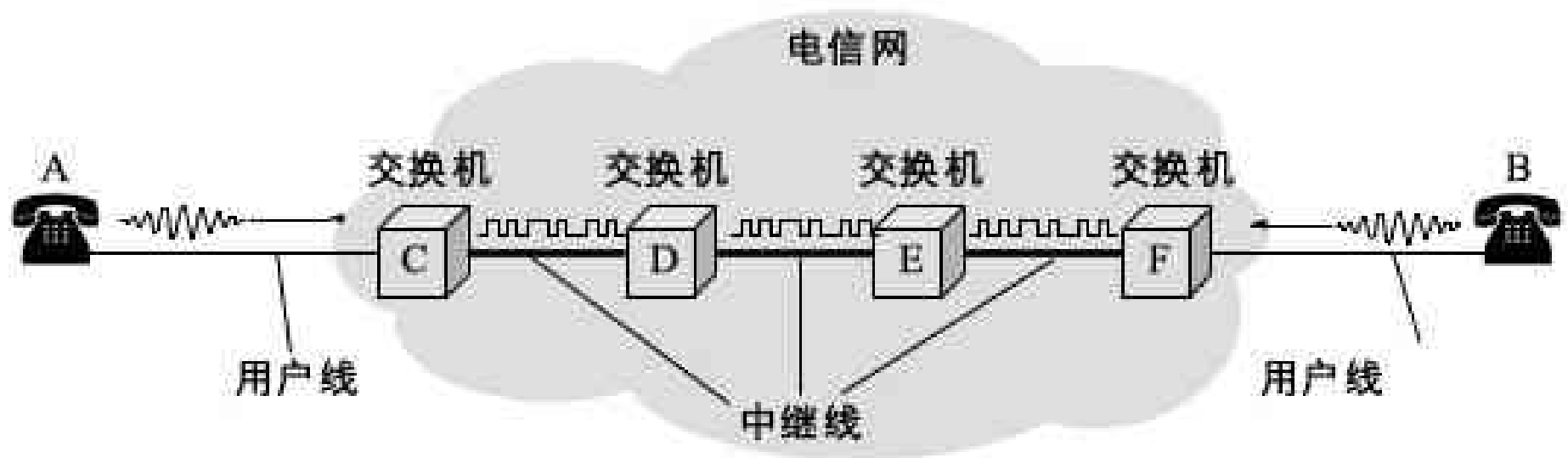


电路交换的特点

- 电路交换必定是面向连接的。
- 电路交换的三个阶段：
 - 建立连接
 - 通信
 - 释放连接
 - （分组交换不一定面向连接，没有占线的问题，可以同时连接到比如 12306 订票网站，但网络忙，利用率高，时延可能大；分组交换像汽车交通，电路交换像地铁，分组交换有选路的问题，电路交换一旦建立了连接就没有选路的问题）

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





电路交换传送计算机数据效率低

- 计算机数据具有突发性。
- 这导致通信线路的利用率很低。
- (持续繁忙的客流需要地铁 (突发性弱需要电路交换) , 一般流量的交通公车或汽车就够了 (突发性强需要分组交换))



2. 分组交换的主要特点

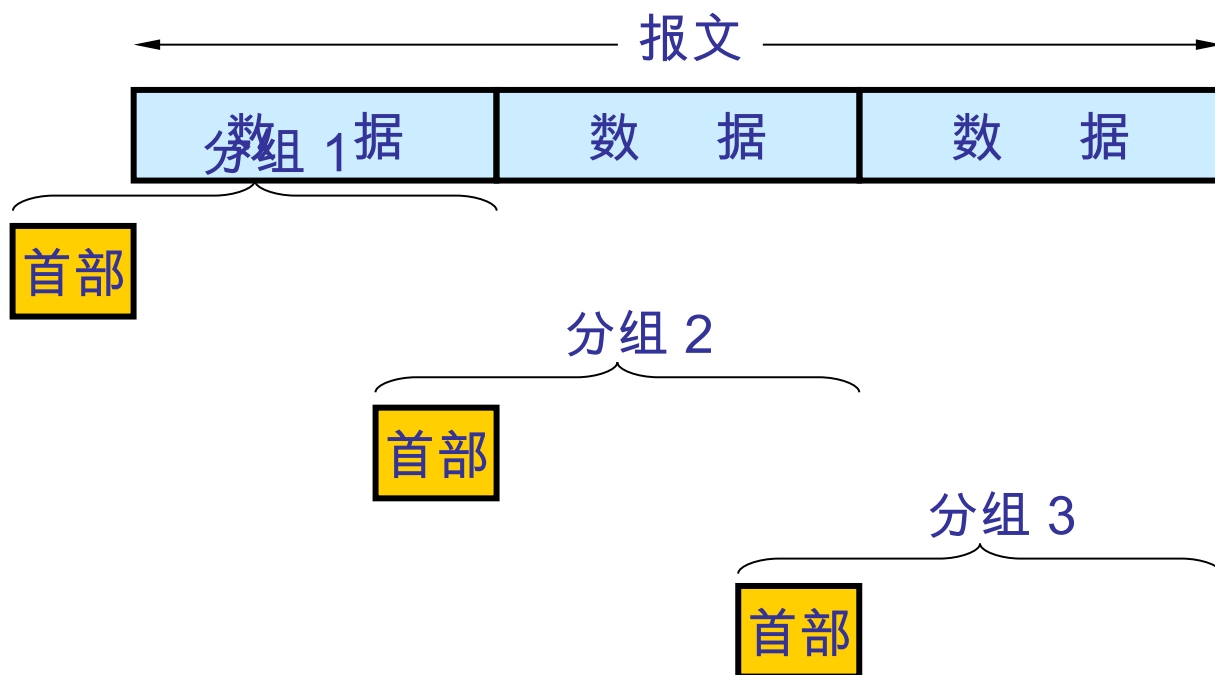
- 在发送端，先把较长的报文划分成较短的、固定长度的数据段。



假定这个报文较长
不便于传输

添加首部构成分组

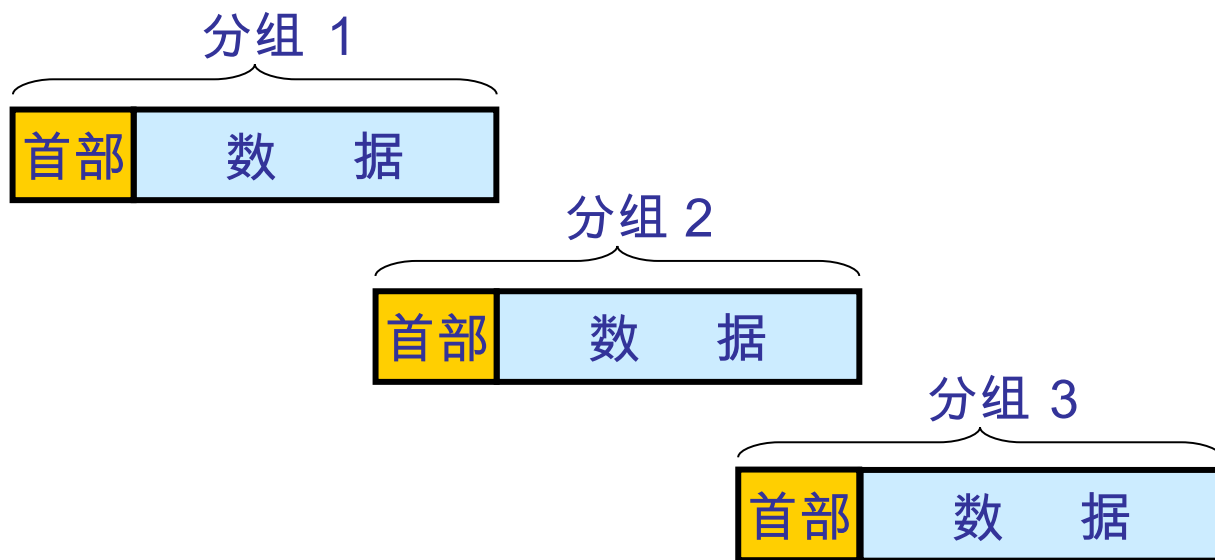
- 每一个数据段前面添加上首部构成分组。



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）。



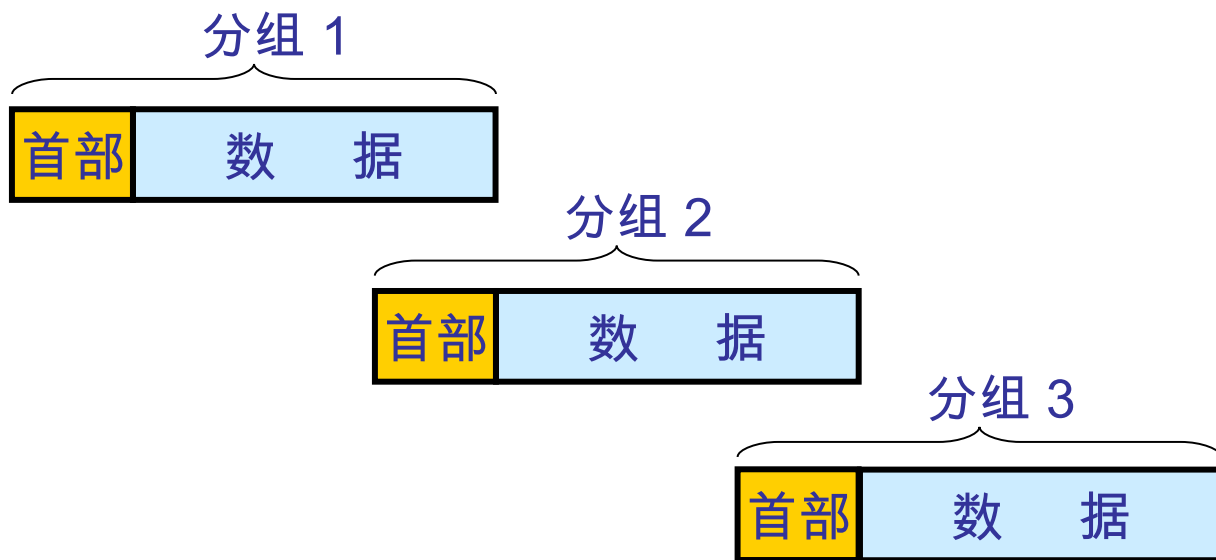


分组首部的重要性

- 每一个分组的首部都含有地址等控制信息。
- 分组交换网中的结点交换机根据收到的分组的首部中的地址信息，把分组转发到下一个结点交换机。
- 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。



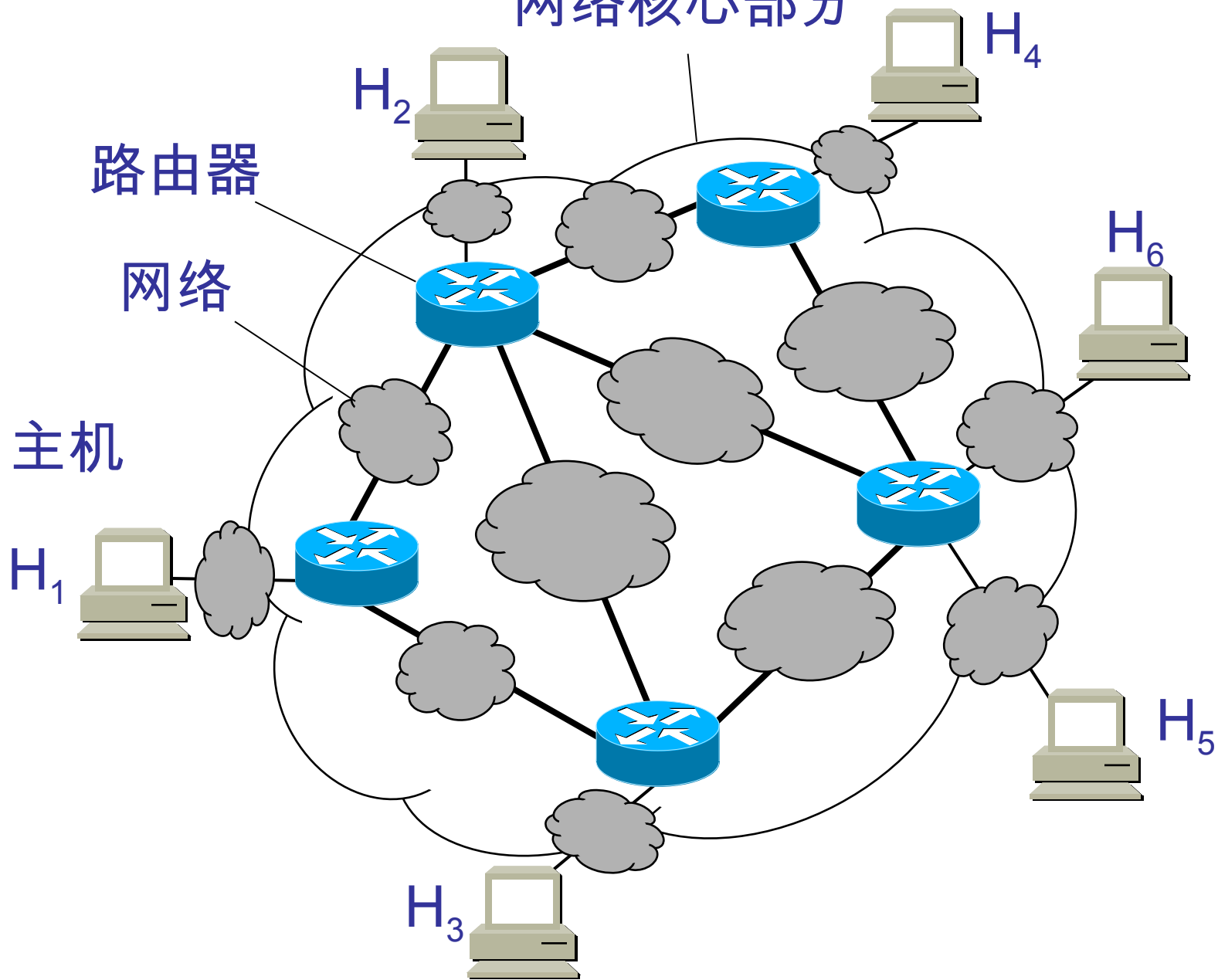
- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。



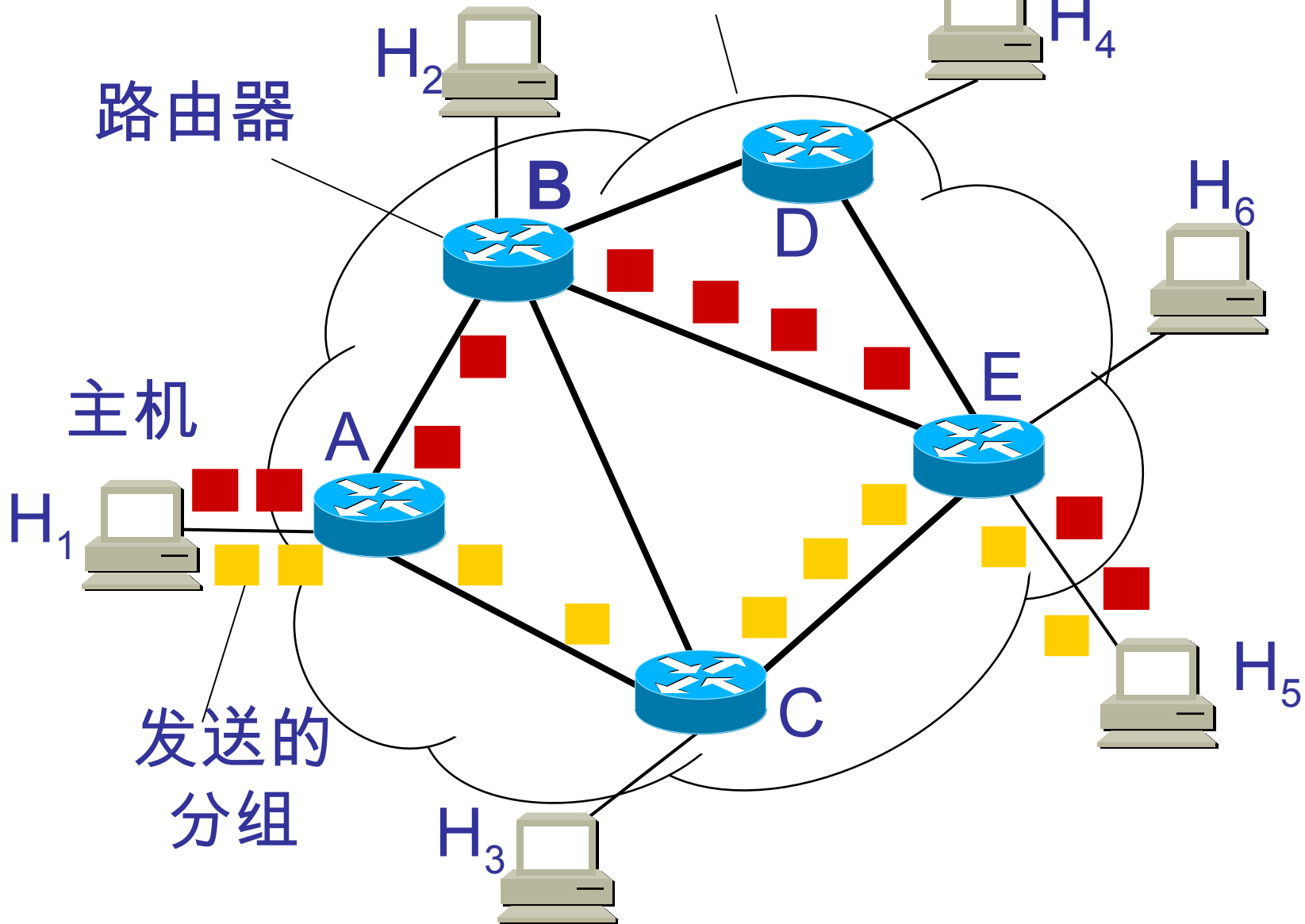
因特网的核心部分

- 因特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**因特网的边缘部分**。
- 在因特网核心部分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。

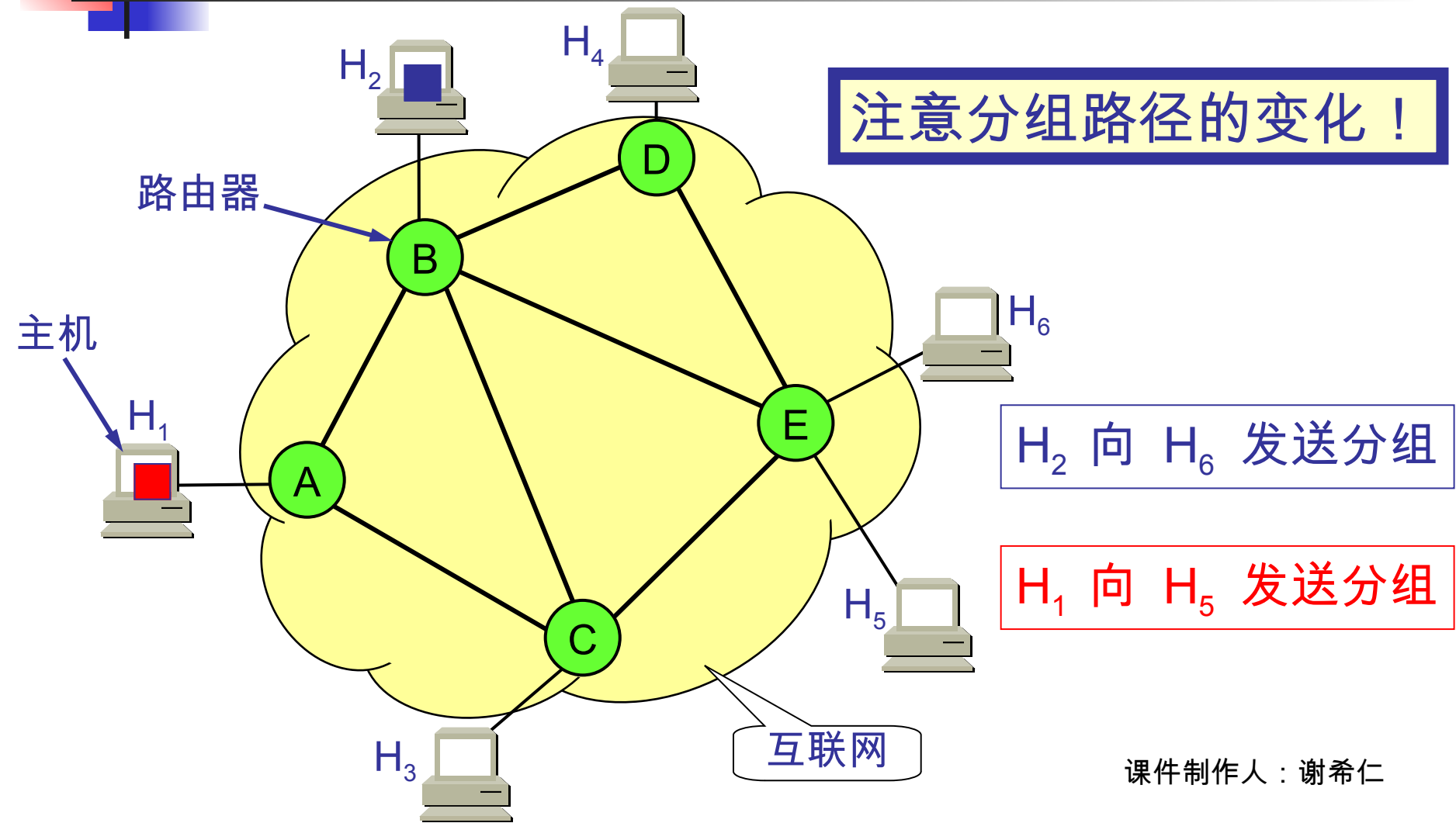
网络核心部分



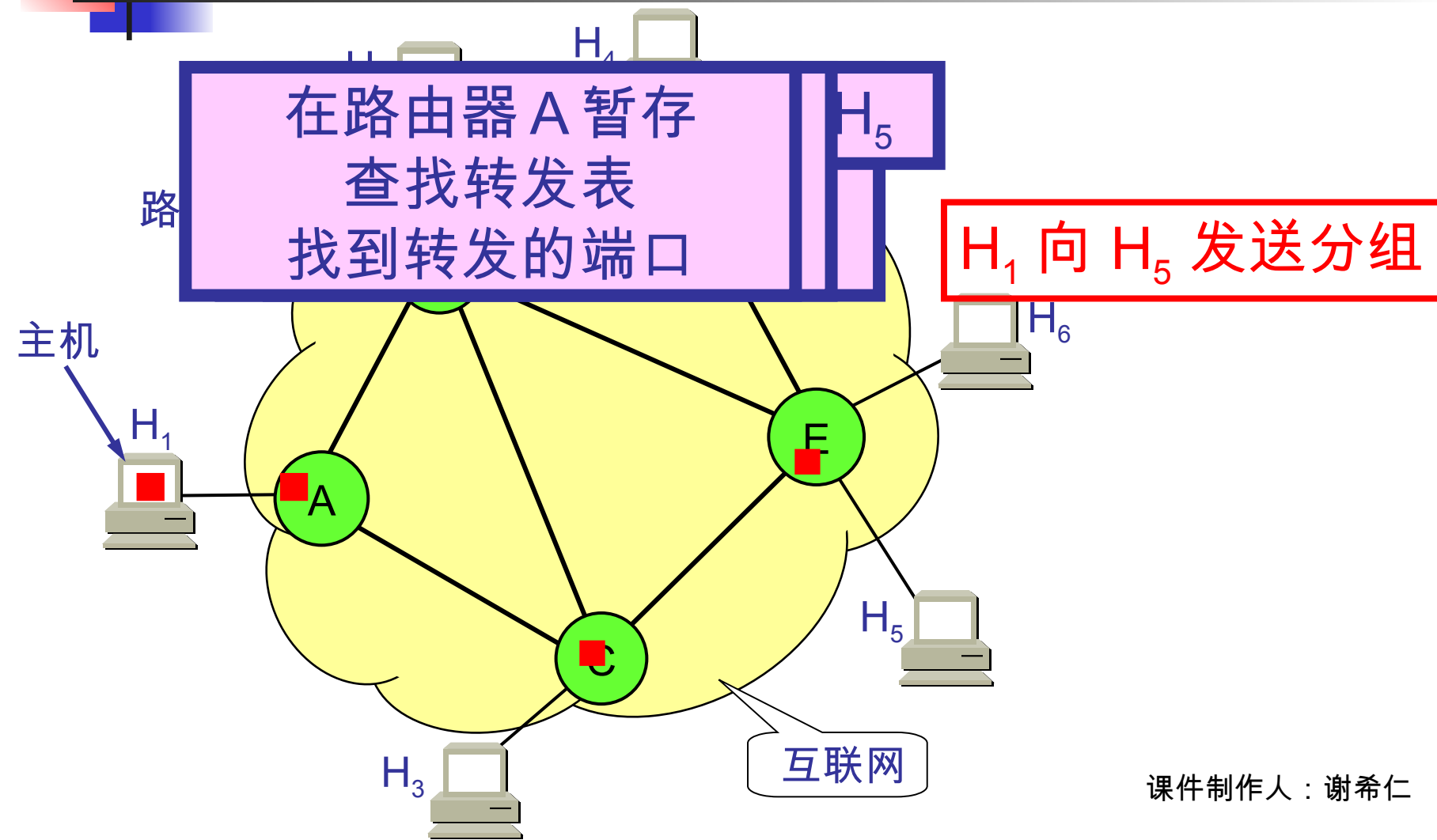
网络核心部分



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。



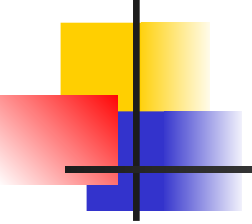
分组交换的优点

- **高效** 动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用。
- **灵活** 以分组为传送单位和查找路由。
- **迅速** 不必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；分布式的路由选择协议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**。

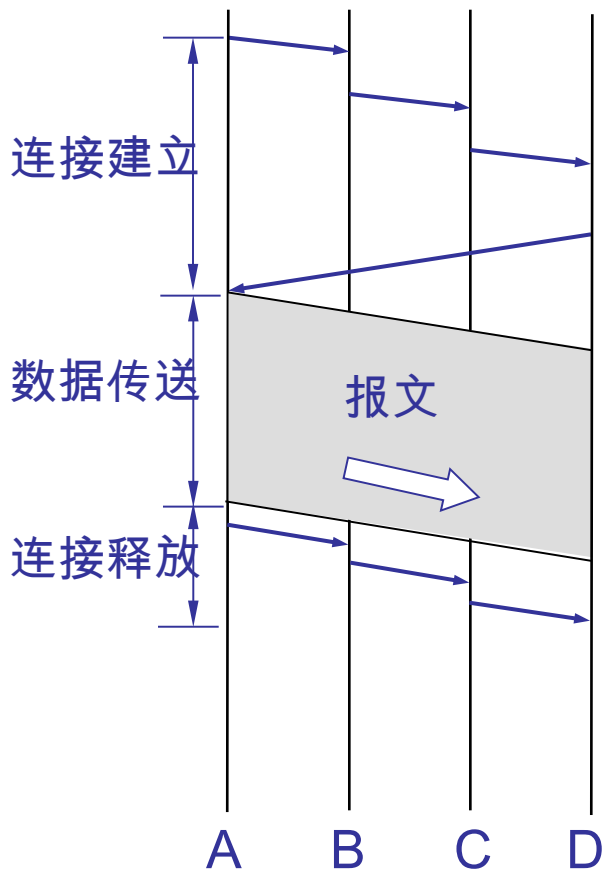


存储转发原理 并非完全新的概念

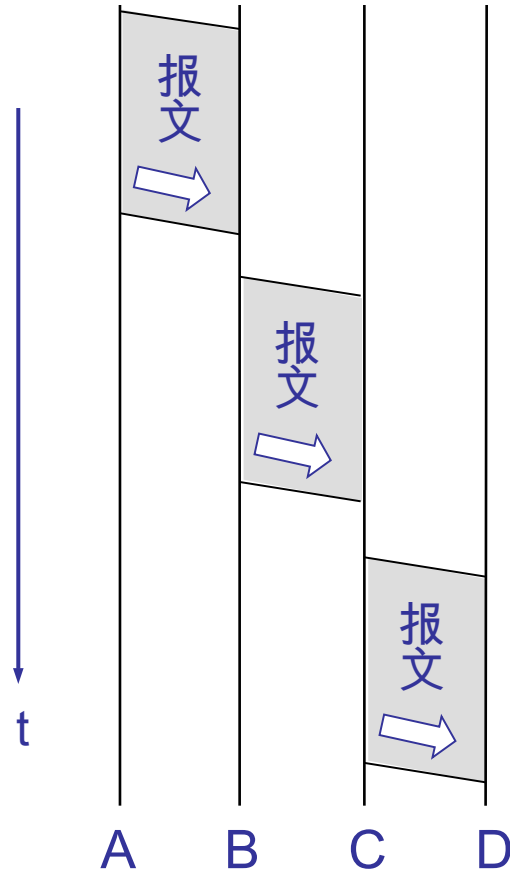
- 在 20 世纪 40 年代，电报通信也采用了基于存储转发原理的**报文交换** (message switching)。
- 报文交换的时延较长，从几分钟到几小时不等。现在报文交换已经很少有人使用了。

三种交换的比较

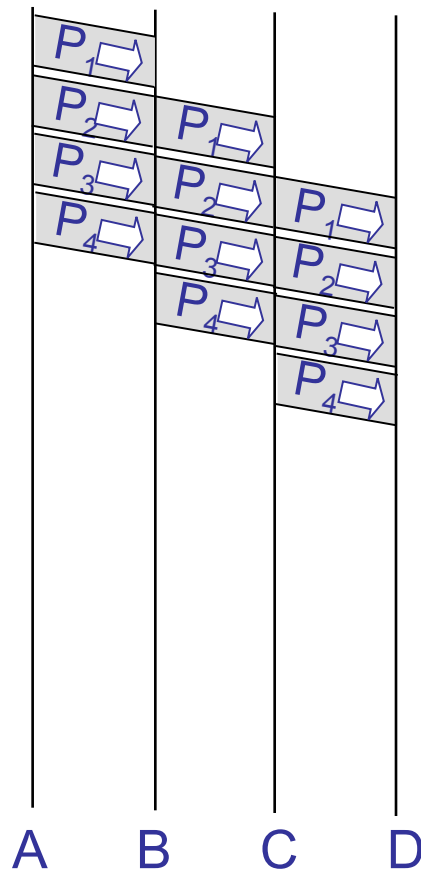
电路交换



报文交换

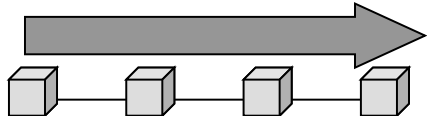


分组交换

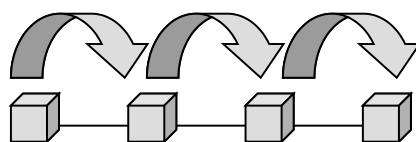


数据传送
的特点

比特流直达终点

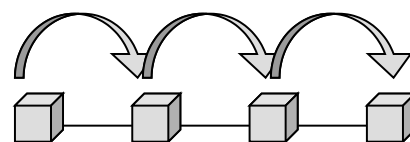


报文 报文 报文



存储
转发 存储
转发

分组 分组 分组



存储
转发 存储
转发



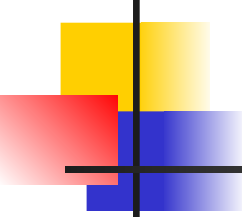
计算机网络的产生背景

- 是 20 世纪 60 年代美苏冷战时期的产物。
- 60 年代初，美国国防部领导的远景研究规划局 ARPA (Advanced Research Project Agency) 提出要研制一种生存性 (survivability) 很强的网络。
- 传统的电路交换 (circuit switching) 的电信网有一个缺点：正在通信的电路中有一个交换机或有一条链路被炸毁，则整个通信电路就要中断。
- 如要改用其他迂回电路，必须重新拨号建立连接。这将要延误一些时间。



新型网络的基本特点

- 网络用于计算机之间的数据传送，而不是为了打电话。
- 网络能够连接不同类型的计算机，不局限于单一类型的计算机。
- 所有的网络结点都同等重要，因而大大提高网络的生存性。
- 计算机在进行通信时，必须有冗余的路由。
- 网络的结构应当尽可能地简单，同时还能够非常可靠地传送数据。

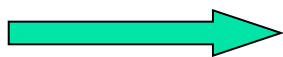


ARPANET 的成功使 计算机网络的概念发生根本变化

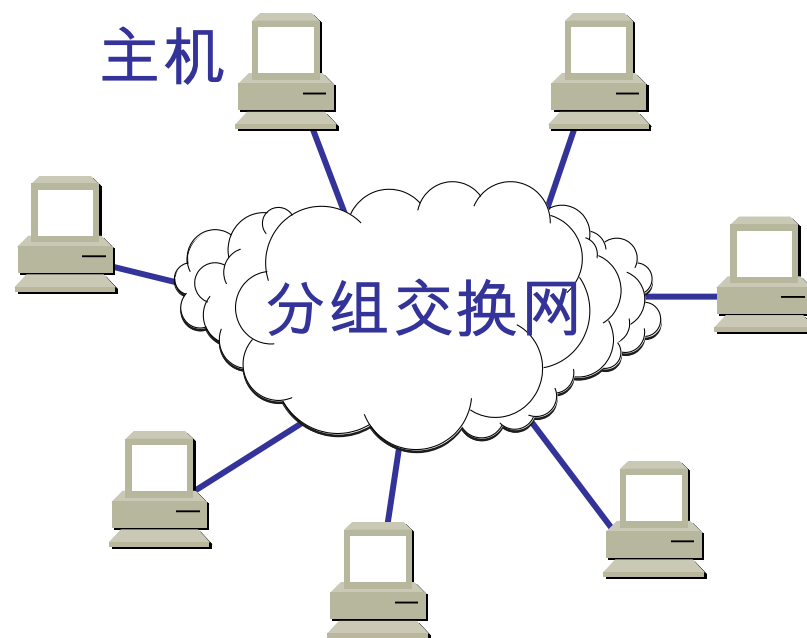
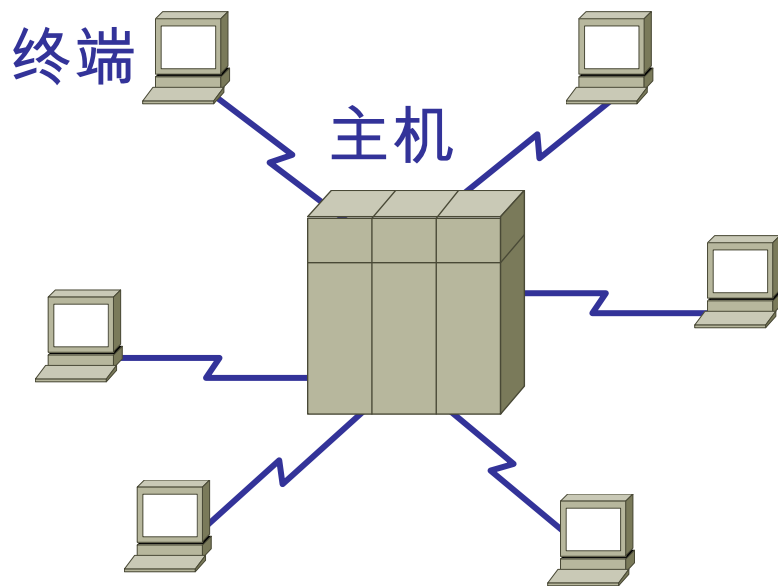
- 早期的面向终端的计算机网络是以**单个主机为中心**的星形网
 - 各终端通过通信线路共享昂贵的中心主机的硬件和软件资源。
- 分组交换网则是以**网络为中心**，主机都处在网络的外围。
 - 用户通过分组交换网可共享连接在网络上的许多硬件和各种丰富的软件资源。

从主机为中心到以网络为中心

以主机为中心



以分组交换网为中心





1.4 计算机网络在我国的发展

- 铁道部在 1980 年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 kb/s 专线正式连入因特网。
- 中国教育和科研计算机网 CERNET (China Education and Research NETwork)，简称为中国教育网，是由国家投资建设，教育部负责管理，清华大学等高等学校承担建设和管理运行的全国性学术计算机互联网络。
- 中国互联网络信息中心 CNNIC (Network Information Center of China) 每年两次公布的我国因特网的发展情况。



1.5 计算机网络的分类

- 1.5.1 计算机网络的不同定义
 - 最简单的定义：计算机网络是一些互相连接的、**自治**的计算机（不是傻终端）的集合。
 - 因特网 (Internet) 是“网络的网络”。



1.5.2 几种不同类别的网络

1. 从网络的作用范围进行分类

- 广域网 **WAN** (Wide Area Network)
- 局域网 **LAN** (Local Area Network)
- 城域网 **MAN** (Metropolitan Area Network)
- 个人区域网 **PAN** (Personal Area Network)



计算机网络的分类

- LAN（局域网）的主要特征包括（园区网、企业网，不含跨国企业网（Intranet/Extranet））：
 - 覆盖范围一般在10公里以内；
 - 数据传输速度较快；
 - 网络传输错误相对较少；
 - 成本较低
- MAN（城域网）的主要特征包括（方正宽带、宽带通，小区互联）：
 - 覆盖范围一般在数百公里以内；
 - 数据传输速度较快；
 - 成本较高。



计算机网络的分类

- WAN（广域网）的主要特征包括（Internet/Intranet/Extranet）：
 - 覆盖**广大的地理区域**，甚至可以跨越省和国家，连接全球；
 - 通常用于连接不同地区的 LAN 和 MAN；
 - （**WAN 接入网**）其数据传输速率一般比 LAN 或 MAN 的数据传输速率要慢；
 - （WAN 接入网）容易出错，如噪音错误、短路、电线断开等；



WPAN

- 无线个域网 (WPAN , Wireless Personal Area Network) 是一种采用无线连接的个人局域网。
- WPAN 的工作范围一般是在 10 米以内 .
- 支持无线个人局域网的技术包括 (chap7) :
 - 蓝牙、
 - ZigBee 、
 - 超宽带 (UWB) 、
 - 60GHz 、
 - IrDA (红外数据组织 , Infrared Data Association)
 - HomeRF 等



WPAN

- 2002 年，IEEE 802.15 工作组成立，专门从事 WPAN(Wireless Personal Area Network) 标准化工作。
- 它的任务是开发一套适用于短程无线通信的标准 (10m 左右)



2. 不同使用者的网络

- 从网络的使用者进行分类
 - 公用网 (public network)
 - Internet , 费用低 ,
 - 安全性需要增强
 - 专用网 (private network)
 - 早期电子商务的 EDI (电子数据交换) 使用 VAN (Value-Added Network , 增值网) 实现 , 费用很高
 - 安全性高
 - Intranet



3. 用来把用户 接入到因特网的网络

- **接入网** AN (Access Network) ，它又称为本地接入网或居民接入网。
 - 由 ISP 提供的接入网只是起到让用户能够与因特网连接的“桥梁”作用。
 - 比如 ADSL 、 PON 、 WiFi 等
- 与接入网对应的是骨干网。比如 SDH 、 WDM 等。
- chap2



1.6 计算机网络的性能

1.6.1 计算机网络的性能指标

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。
- 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。
- **速率即数据率** (data rate) 或 **比特率** (bit rate) 是计算机网络中最重要的一個性能指标。速率的单位是 b/s(bps)，或 kb/s, Mb/s, Gb/s 等
- 速率往往是指**额定速率**或**标称速率**。



2. 带宽

- “**带宽**” (bandwidth) 本来是指信号具有的频带宽度，单位是赫（或千赫、兆赫、吉赫等）。
- 现在“带宽”是数字信道所能传送的“**最高数据率**”的同义语，单位是“比特每秒”，或 b/s (bit/s)。



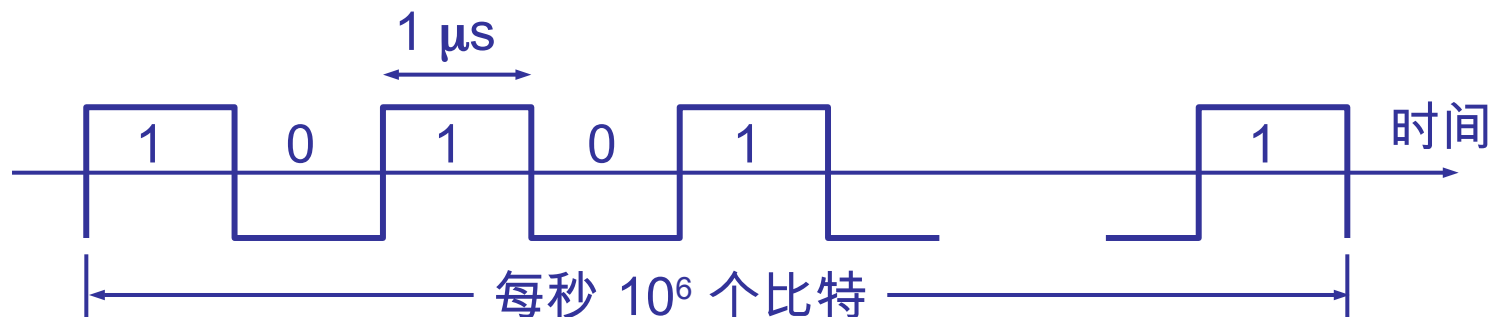
常用的带宽单位

- 更常用的带宽单位是（网络界）
 - 千比每秒，即 kb/s (10^3 b/s)
 - 兆比每秒，即 Mb/s (10^6 b/s)
 - 吉比每秒，即 Gb/s (10^9 b/s)
 - 太比每秒，即 Tb/s (10^{12} b/s)
- 请注意：在计算机界（存储）， $K = 2^{10}$
 $= 1024$ $M = 2^{20}$, $G = 2^{30}$, $T = 2^{40}$ 。

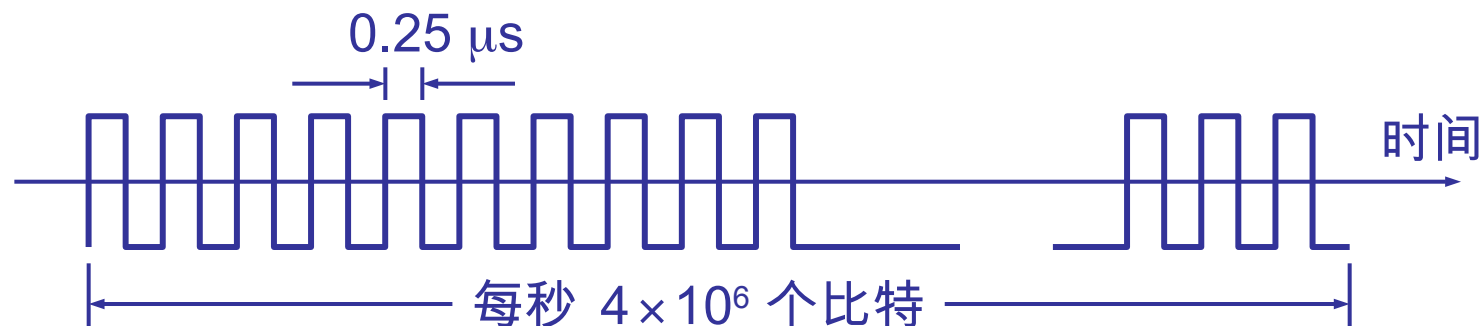
数字信号流随时间的变化

- 在时间轴上信号的宽度随带宽的增大而变窄。

带宽为
1 Mb/s



带宽为
4 Mb/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。
- 单位：Mb/s, MB/s，帧/s，包/s
- 比如：实际速率 70Mb/s



4. 时延 (delay 或 latency)

- **发送时延** 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。

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



发送时延

■ 已知：

- 数据长度为 10^7bit ,
- 数据发送速率为 100kb/s

■ 求发送时延：

- $t_s = 10^7 / 10^5 = 100\text{s}$



时延 (delay 或 latency)

- **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。
- 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。

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



传播时延

■ 已知：

- 收发两端之间的传输距离为 1000km ，
- 信号在媒体上的传播速率为 $2 \times 10^8 \text{m/s}$ （光速是 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）

■ 求：传播时延

- 传播时延 $t_p = 10^6 / (2 \times 10^8) = 0.005 \text{s} = 5 \text{ms}$



时延 (delay 或 latency)

- **处理时延** 交换结点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间 (**查转发表的时间**) 。
- **排队时延** 结点缓存队列中分组**排队**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**。



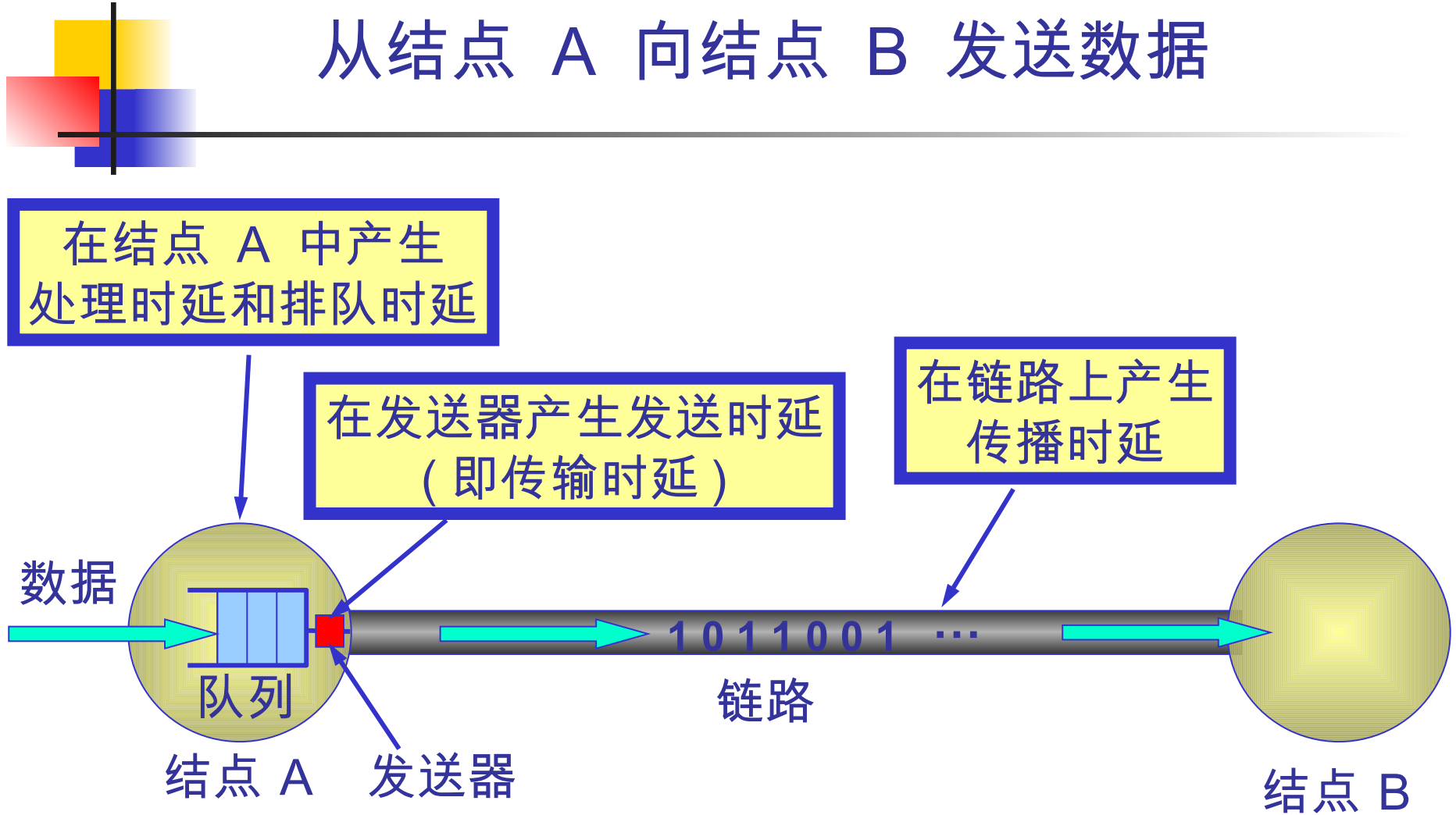
时延 (delay 或 latency)

- 数据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：

总时延 = 发送时延 + 传播时延 + 处理时延 + 排队时延

四种时延所产生的地方

从结点 A 向结点 B 发送数据





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。

5. 时延带宽积

时延带宽积

(传播) 时延

带宽



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

- 链路的时延带宽积又称为以**比特**为单位的链路长度（表示链路充满比特时的情况，即链路最多能传输的比特数）。



6. 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。

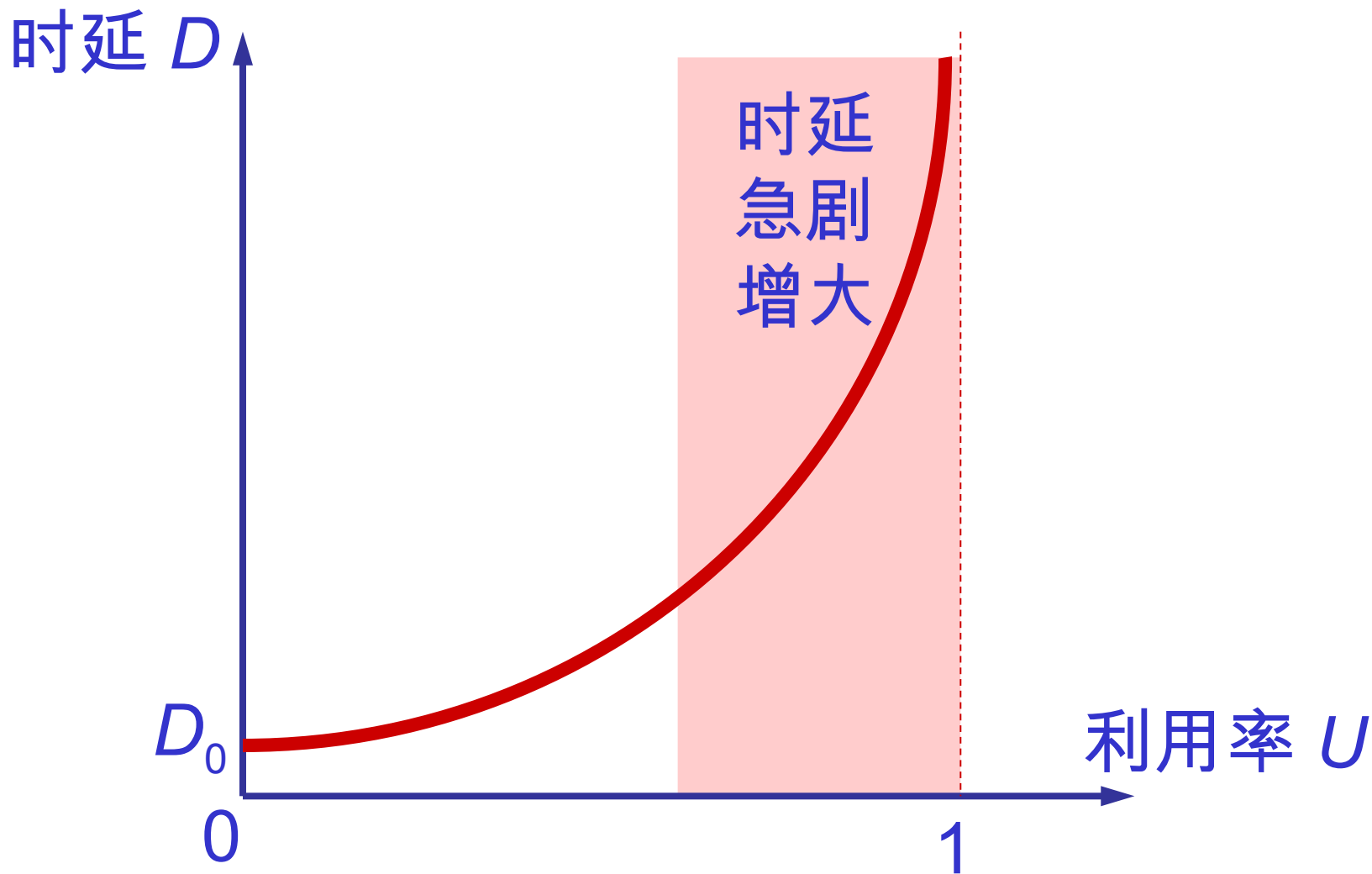


时延与网络利用率的关系

- 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：

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

U 是网络的利用率，数值在 0 到 1 之间。



同时连接到比如 12306 订票网站的客户端很多时，利用率高，时延长



例题

- 假定网络利用率达到了 90%。试估计一下现在的网络时延是它的最小值的多少倍？
- 解：设网络利用率为 U ，网络时延为 D ，网络时延最小值为 D_0
- $U=90\%; D=D_0/(1-U) \rightarrow D/D_0=10$
- 现在的网络时延是最小值的 10 倍



1.6.2 计算机网络的非性能特征

- 费用（流量套餐，1G 5 块）
- 质量
- 标准化
- 可靠性（时常中断，不稳定）
- 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

- 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。



关于开放系统互连参考模型

OSI/RM

- 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。
- 在**市场化方面** OSI 却失败了。
 - 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 的层次划分并也不太合理，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。
- 是非国际标准 TCP/IP 现在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。



1.7.2 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**（**分组的格式、帧的格式、地址的格式等**）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**（**点头、摇头**）、标准或约定。



网络协议的组成要素

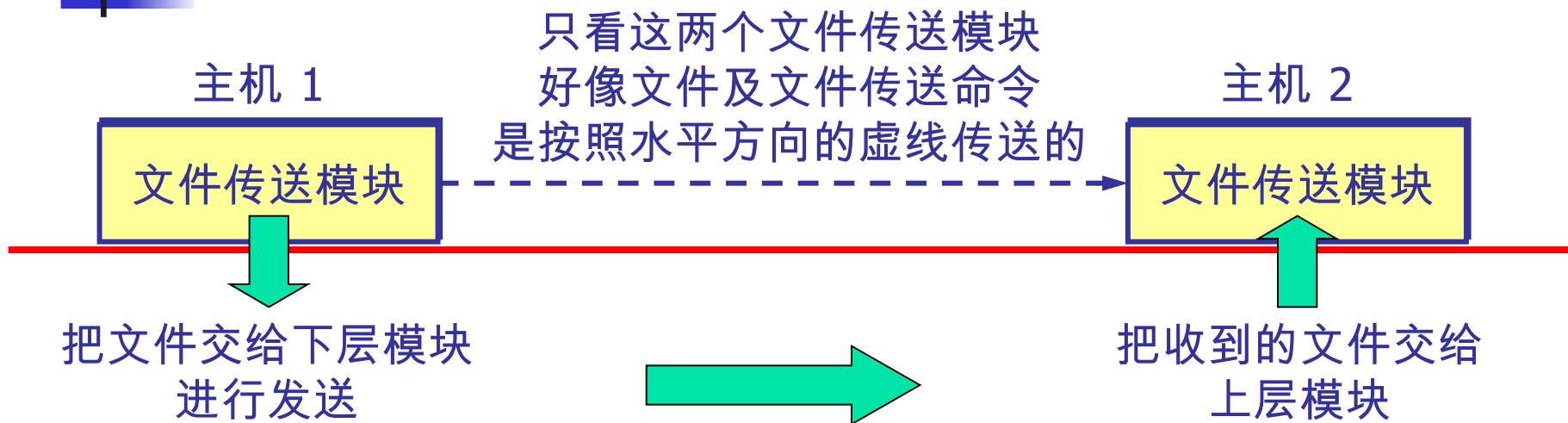
- **语法** 数据与控制信息的**结构或格式**。
- **语义** 需要发出何种**控制信息**，完成何种动作（重发、丢包、确认）以及做出何种响应。
- **同步** 事件实现顺序的详细说明（何时重发、何时丢包、何时确认）。



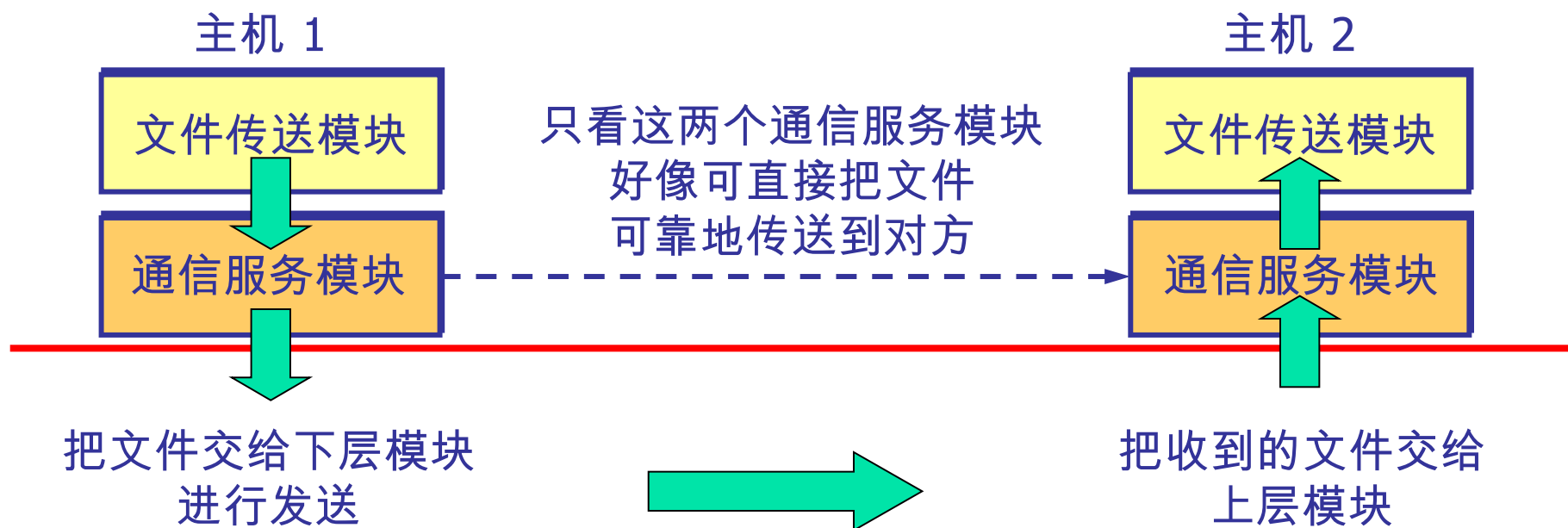
划分层次的概念举例

- 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。

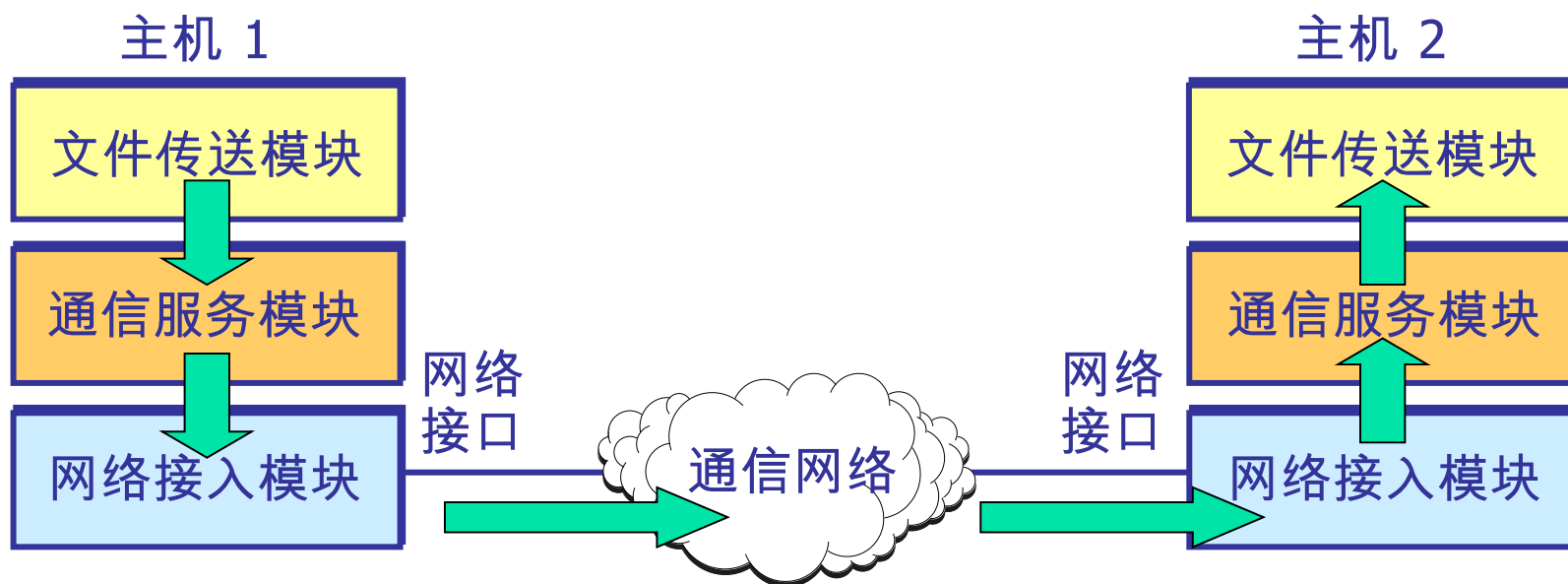
两个主机交换文件



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

- 各层之间是独立的。
- 灵活性好（可替换某一层的实现）。
- 结构上可分割开。
- 易于实现和维护。
- 能促进标准化工作。



层数多少要适当

- 若层数太少，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**。
- **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。

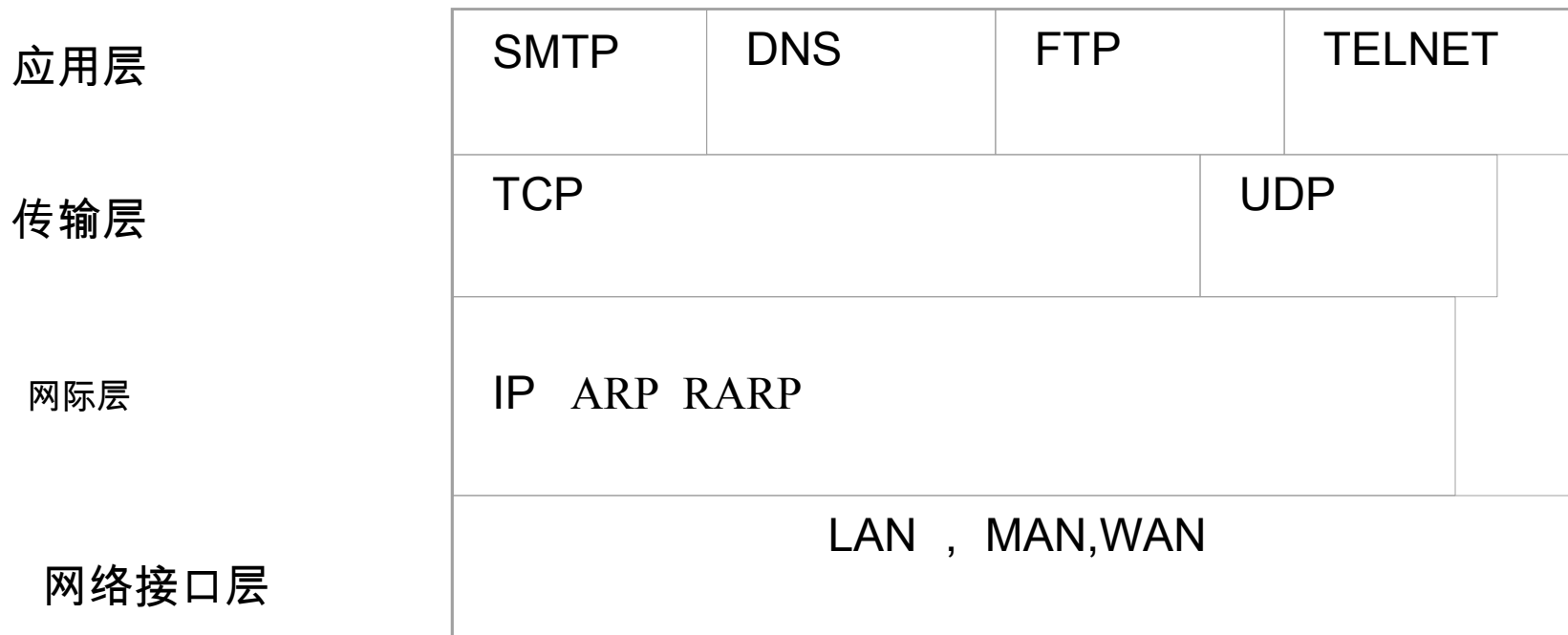


1.7.3 具有五层协议的体系结构

- TCP/IP 是四层的体系结构：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。



计算机网络的体系结构



TCP/IP 协议族的层次结构



计算机网络的体系结构

OSI

TCP/IP

应用层		应用层
表示层		无对应层
会话层		
传输层		传输层
网络层		网际层
数据链路层		网络接口层
物理层		

OSI 与 TCP/IP 参考模型比较



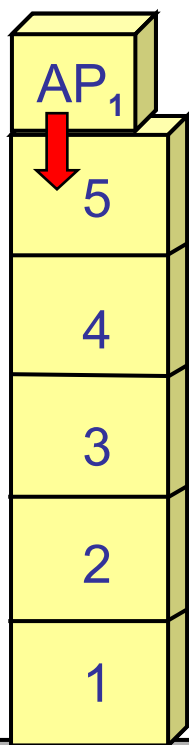
五层协议的体系结构



- 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

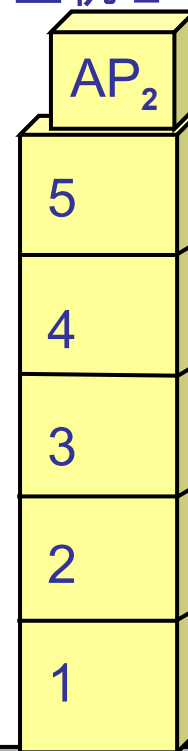
主机 1



应用进程数据先传送到应用层

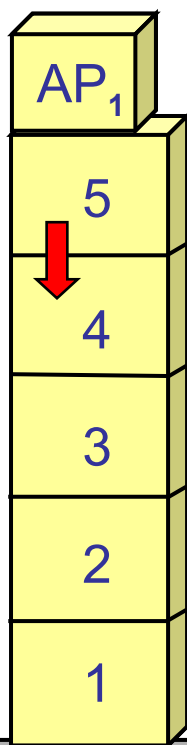
加上应用层首部，成为应用层 PDU

主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

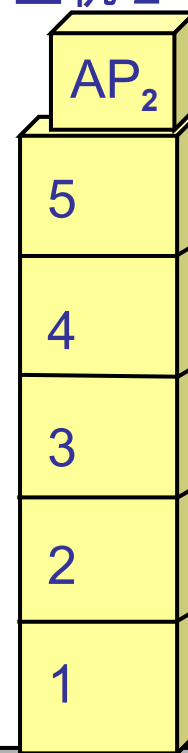
主机 1



应用层 PDU 再传送到运输层

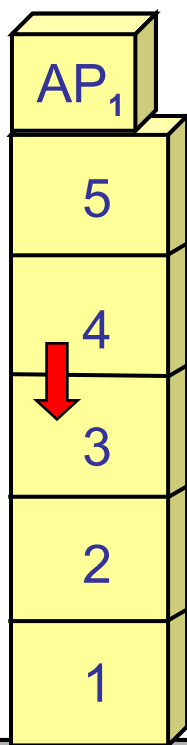
加上运输层首部，成为运输层报文

主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

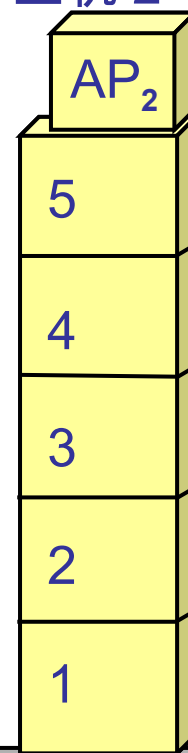
主机 1



运输层报文再传送到网络层

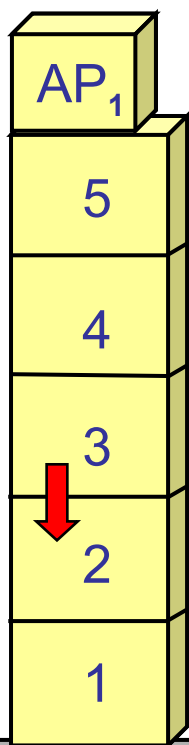
加上网络层首部，成为 IP 数据报（或分组）

主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

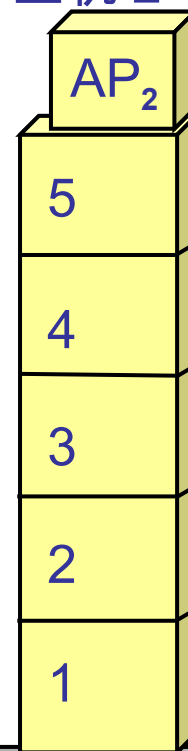
主机 1



IP 数据报再传送到数据链路层

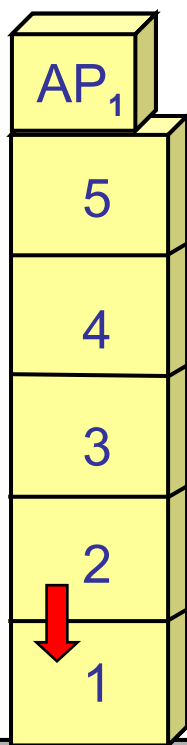
加上链路层首部和尾部，成为数据链路层帧

主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

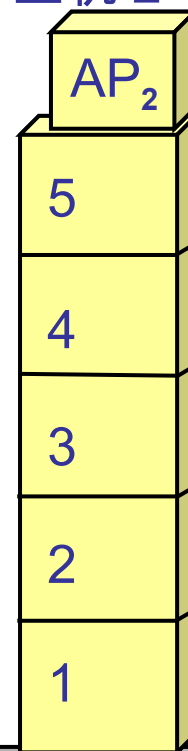
主机 1



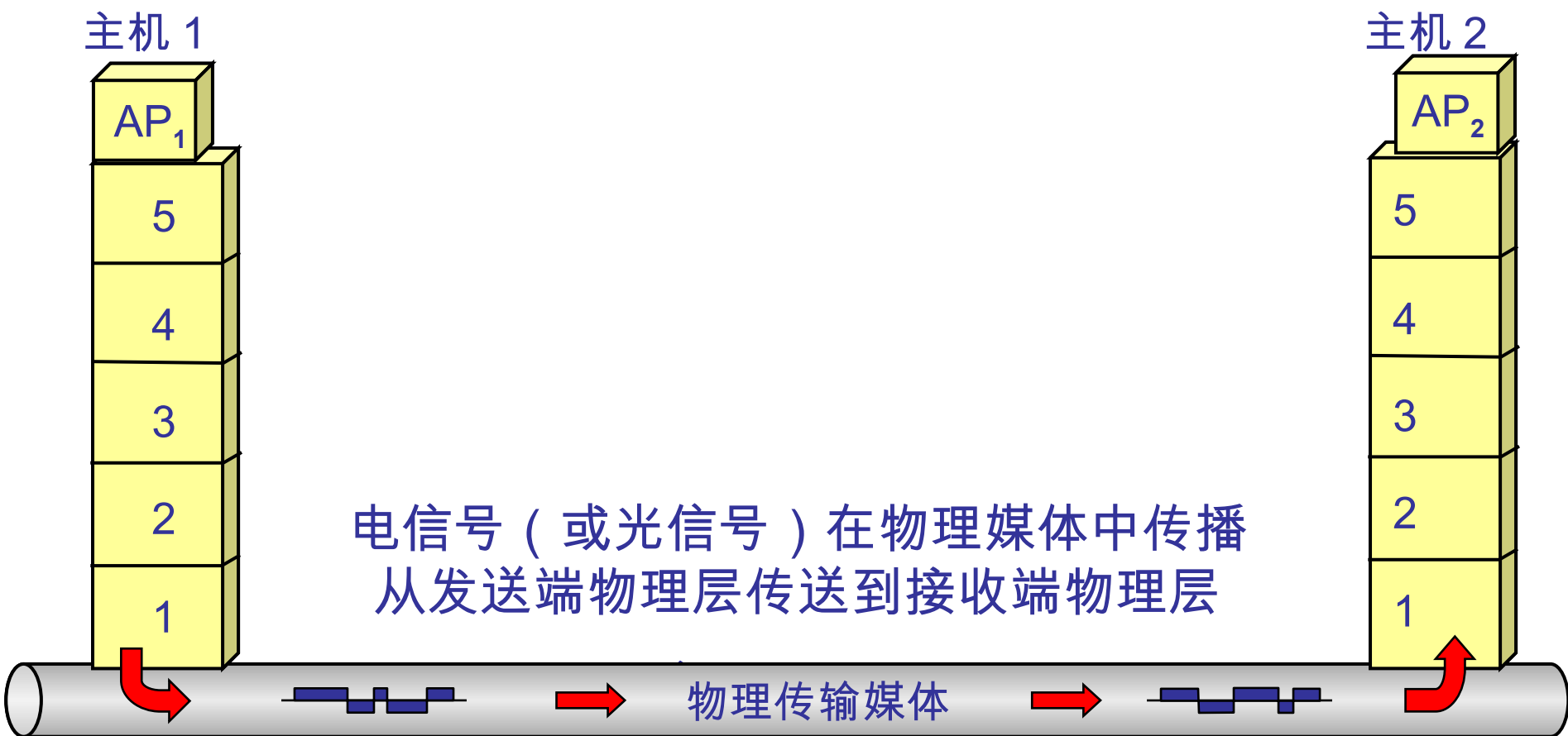
数据链路层帧再传送到物理层

最下面的物理层把比特流传送到物理媒体

主机 2

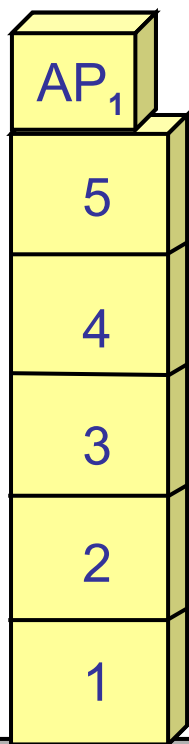


主机 1 向主机 2 发送数据

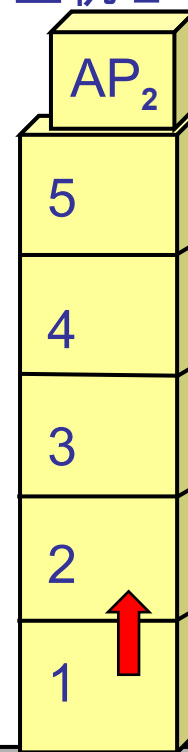


主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



主机 2

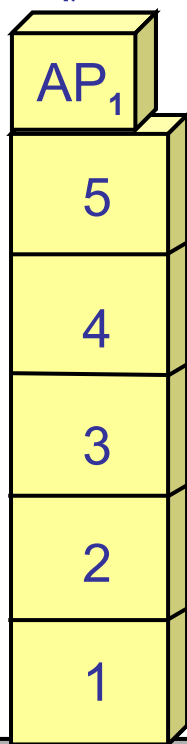


物理层接收到比特流，上交给数据链路层

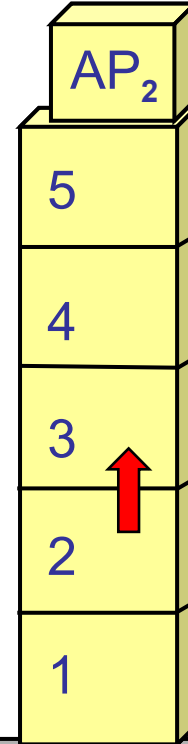


主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



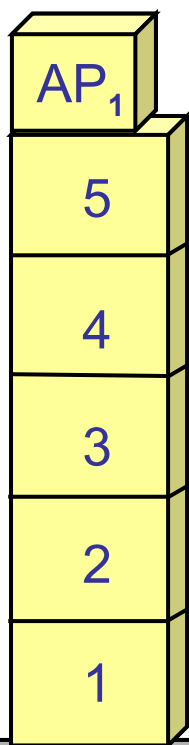
主机 2



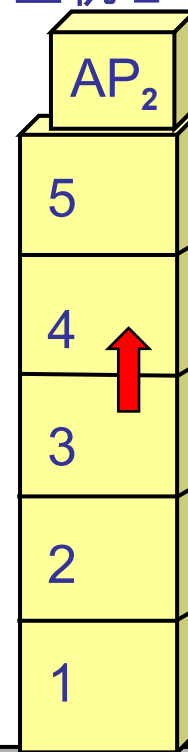
数据链路层剥去帧首部和帧尾部
取出数据部分，上交给网络层

主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



主机 2

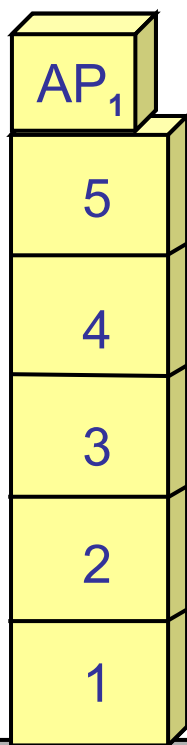


网络层剥去首部，取出数据部分
上交给运输层

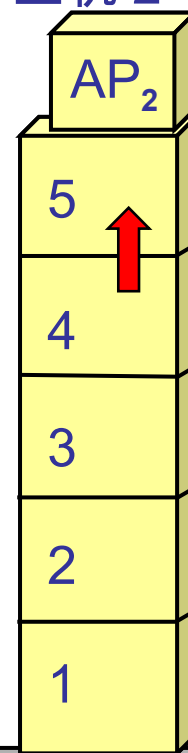


主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



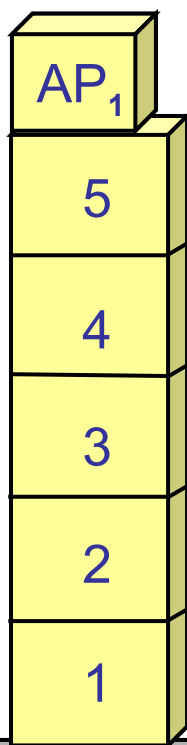
主机 2



运输层剥去首部，取出数据部分
上交给应用层

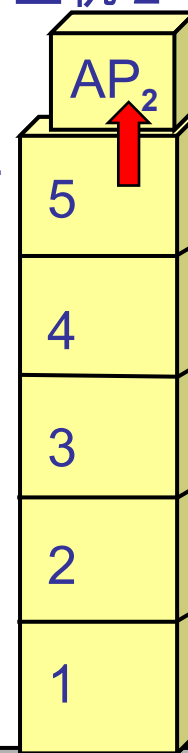
主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



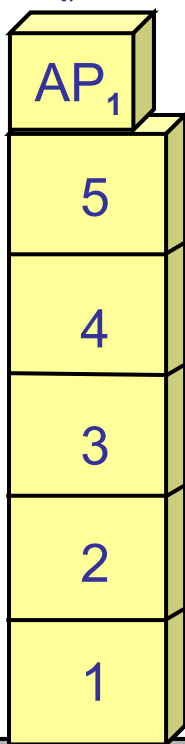
应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

主机 2



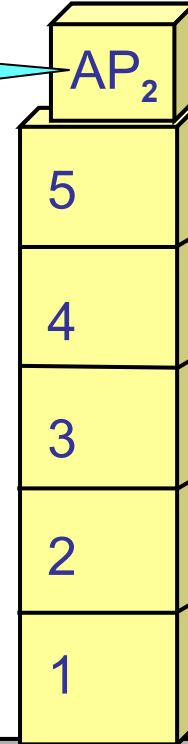
主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2

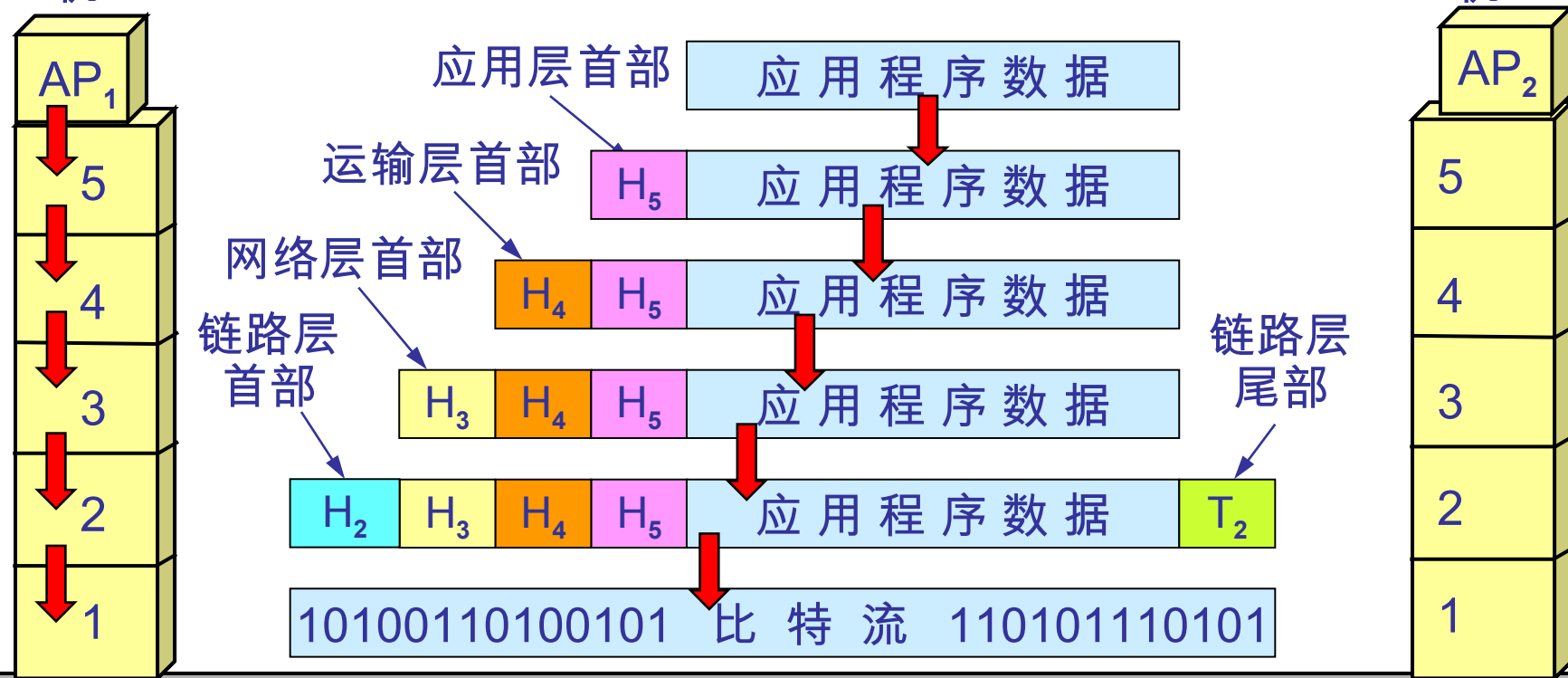


主机 1 向主机 2 发送数据

注意观察加入或剥去首部（尾部）的层次

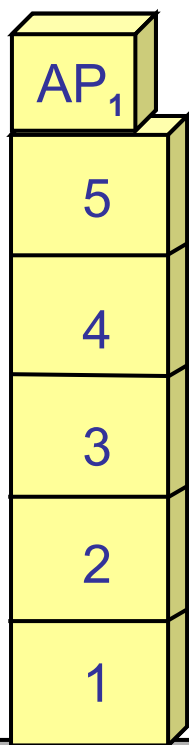
主机 1

主机 2

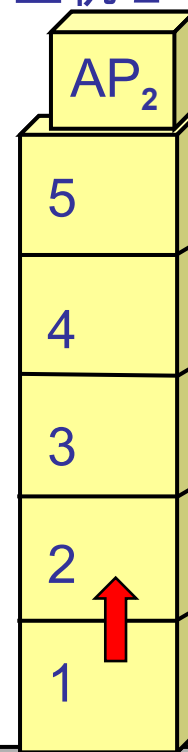


主机 1 向主机 2 发送数据

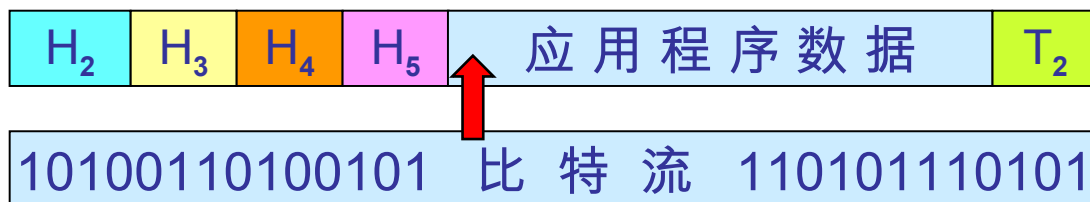
主机 1



主机 2

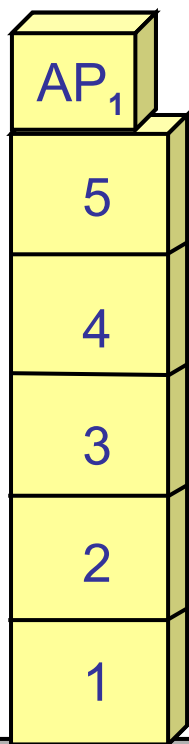


计算机 2 的物理层收到比特流后
交给数据链路层

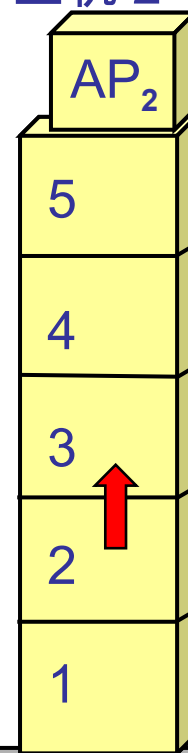


主机 1 向主机 2 发送数据

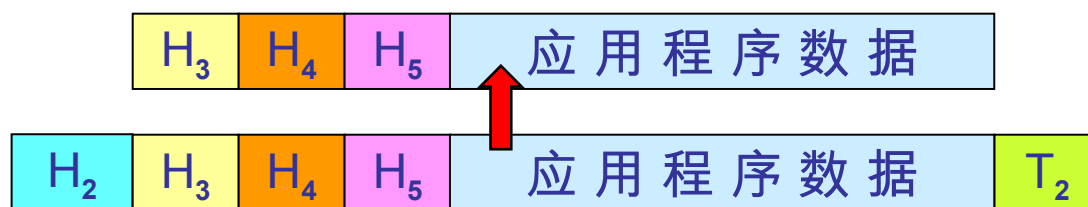
主机 1



主机 2

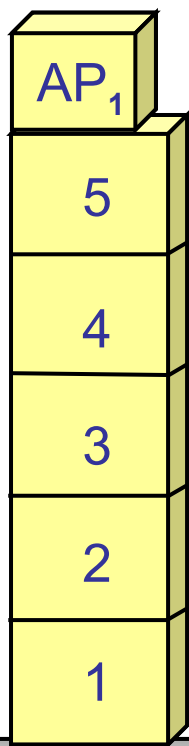


数据链路层剥去帧首部和帧尾部后
把帧的数据部分交给网络层

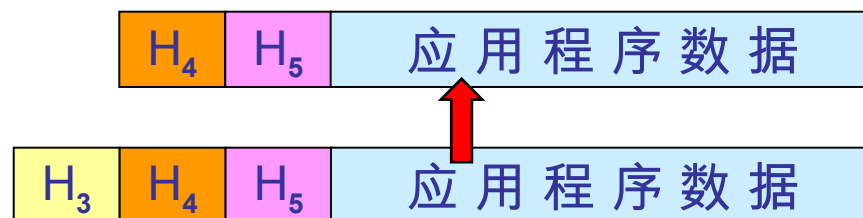


主机 1 向主机 2 发送数据

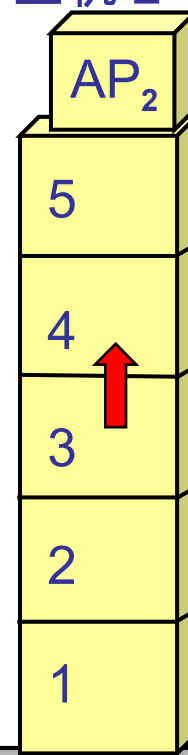
主机 1



网络层剥去分组首部后
把分组的数据部分交给运输层

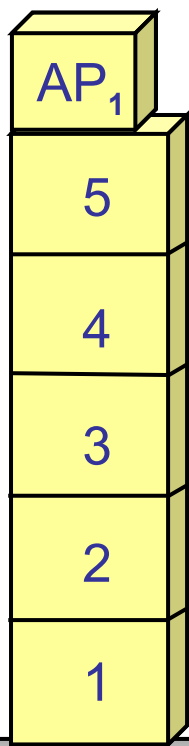


主机 2

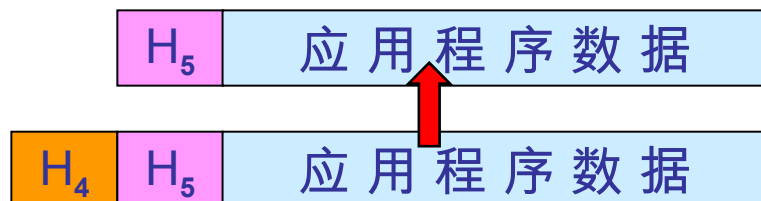


主机 1 向主机 2 发送数据

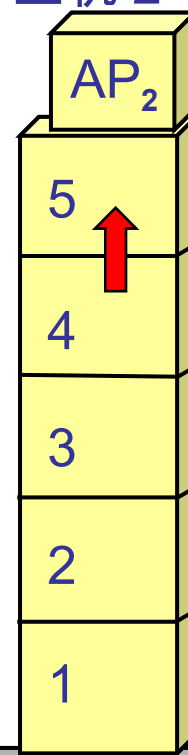
主机 1



运输层剥去报文首部后
把报文的数据部分交给应用层

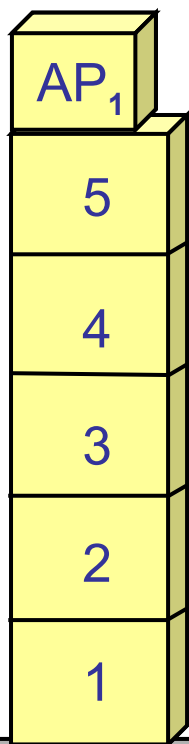


主机 2



主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



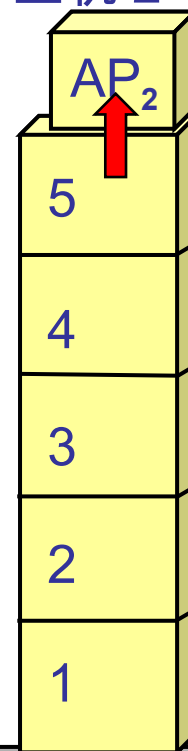
应用程序数据

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



AP_2

5

4

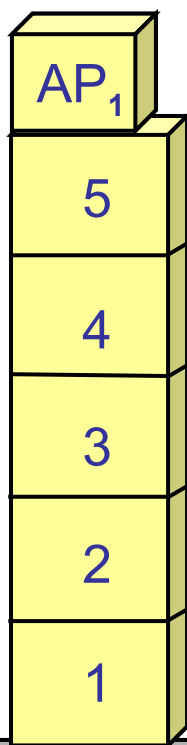
3

2

1

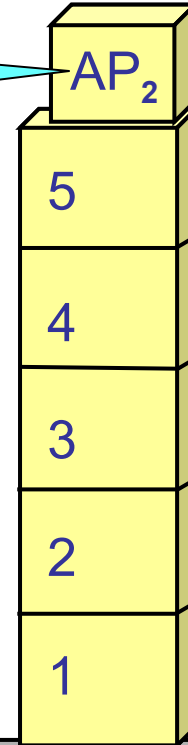
主机 1 向主机 2 发送数据

主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2



1.7.4 实体、协议、服务和 服务访问点

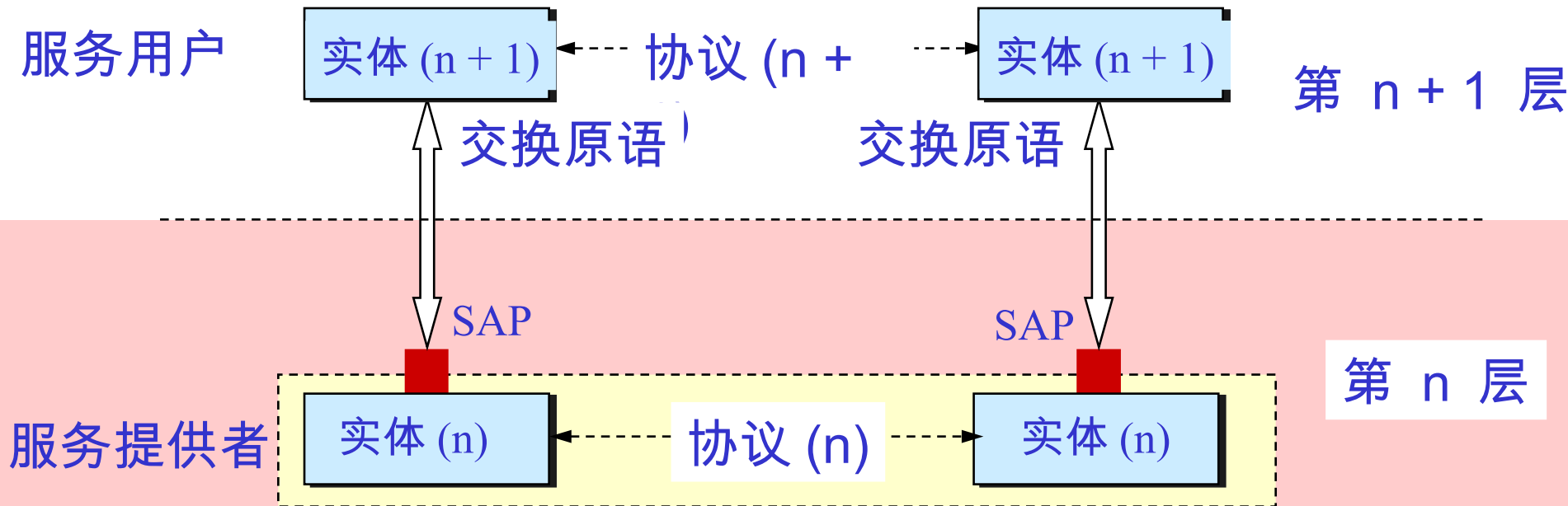
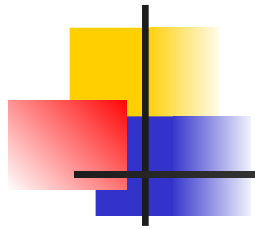
- **实体** (entity) 表示任何可发送或接收信息的硬件或软件进程。
- 协议是控制**两个对等实体**进行通信的规则的组合。
- 在协议的控制下，两个对等实体间的通信使得本层能够**向上一层提供服务**。
- 要实现本层协议，还需要使用**下层**所提供的服务。



实体、协议、服务 和服务访问点（续）

- 本层的服务用户只能看见服务而无法看见下面的协议。
- 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。
- 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)。

实体、协议、服务 和服务访问点 (续)





“接口”的含义

- 1. 界面。属于软件。比如 GUI (Graphics User Interface) 图形用户接口
- 2. 硬件。卡与外部世界的交界、连接之处。比如网络接口卡 (Network Interface)、路由器的接口。
- 3. 软件。服务提供方暴露出来的函数或方法，供服务用户调用。比如服务的接口。



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，而且还必须非常仔细地检查这个协议能否应付各种异常情况。

著名的协议举例

【例 1-1】

- 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

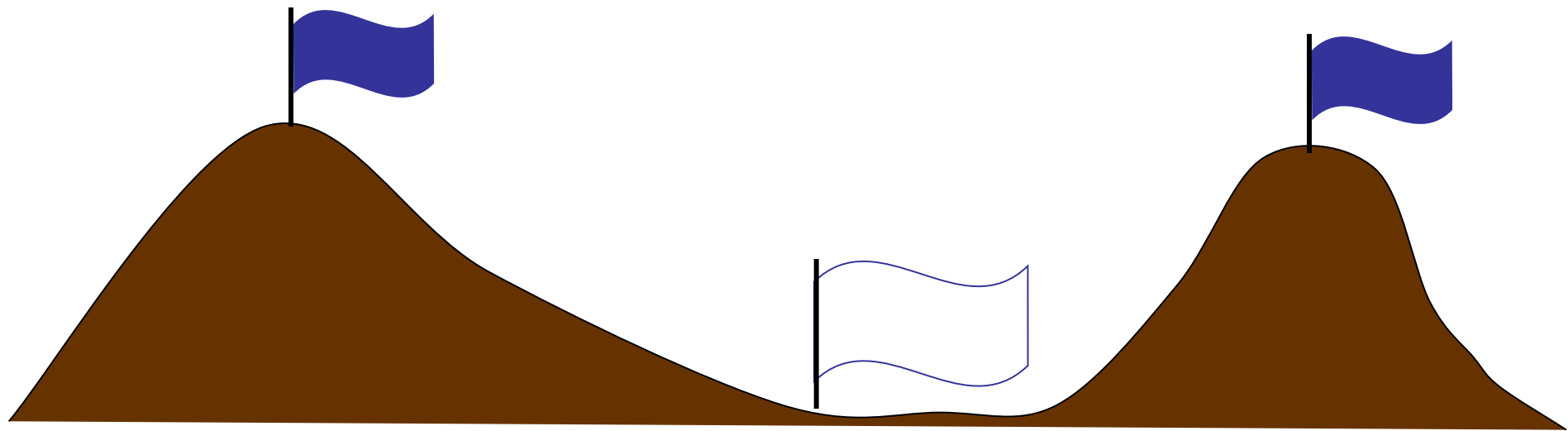
收到“同意”

这样的协议无法实现！

收到：收到“同意”

...

...

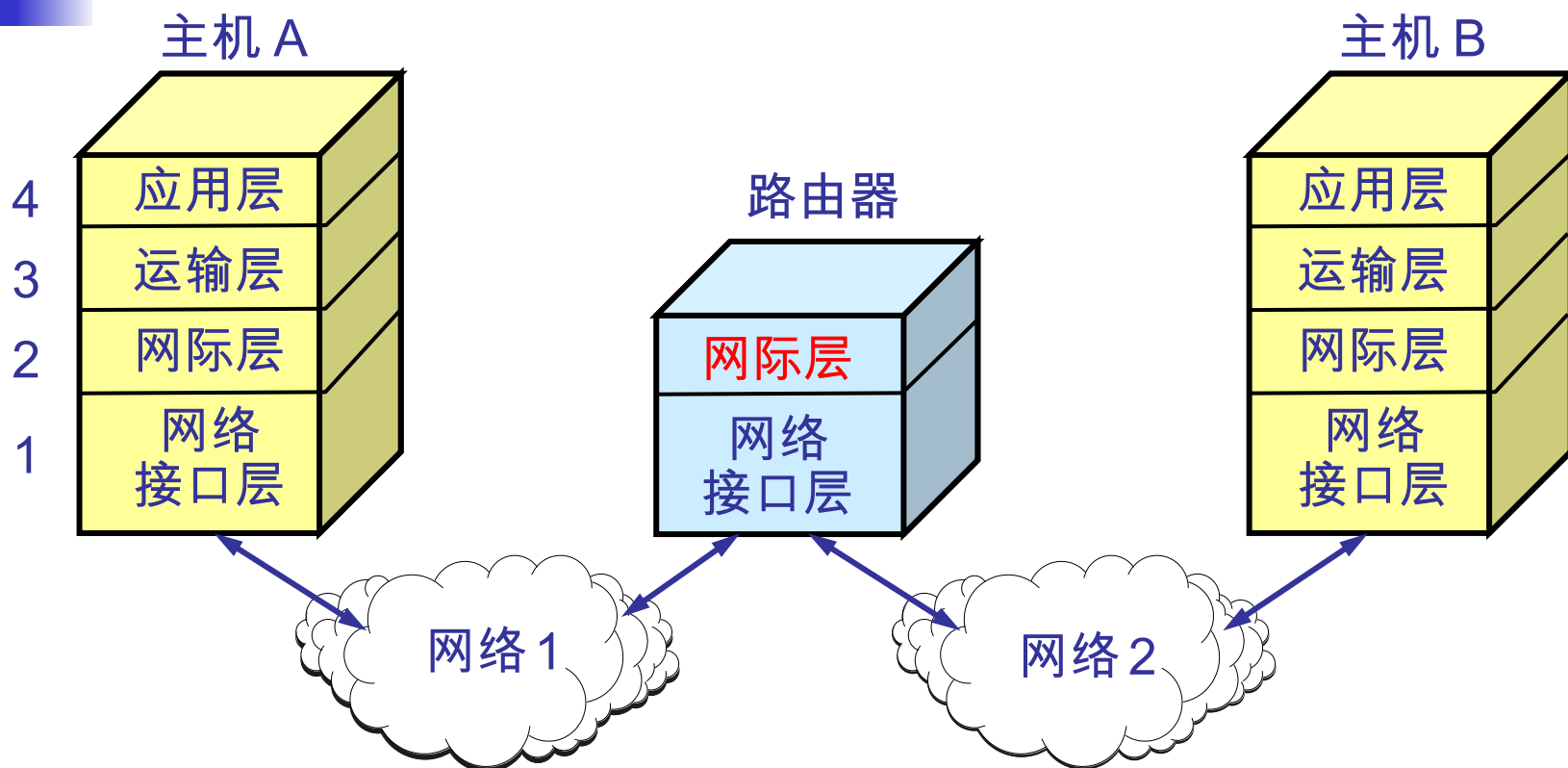




结论

- 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。
- 没有一种协议能够蓝军能 100% 获胜。

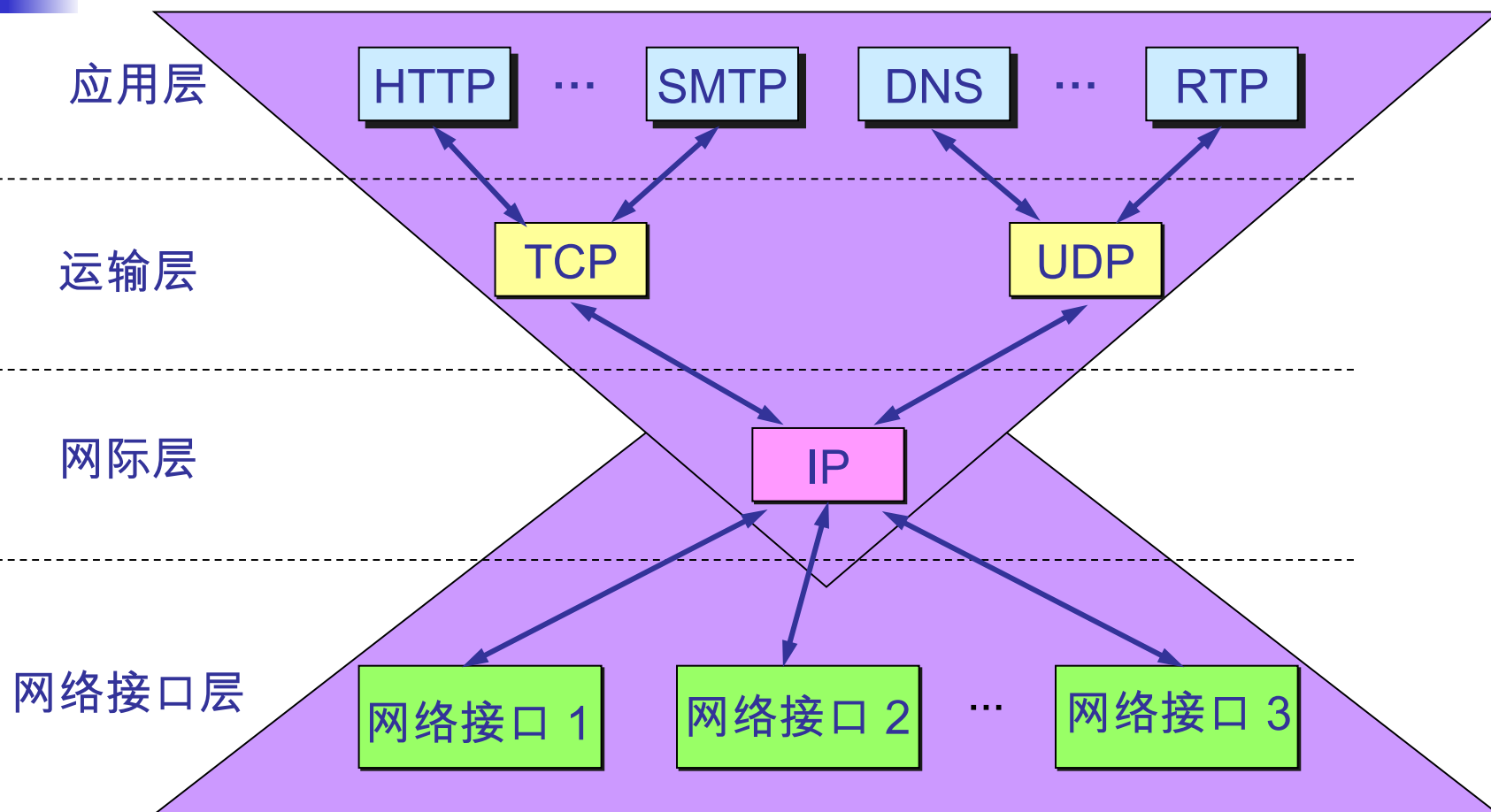
1.7.5 TCP/IP 的体系结构



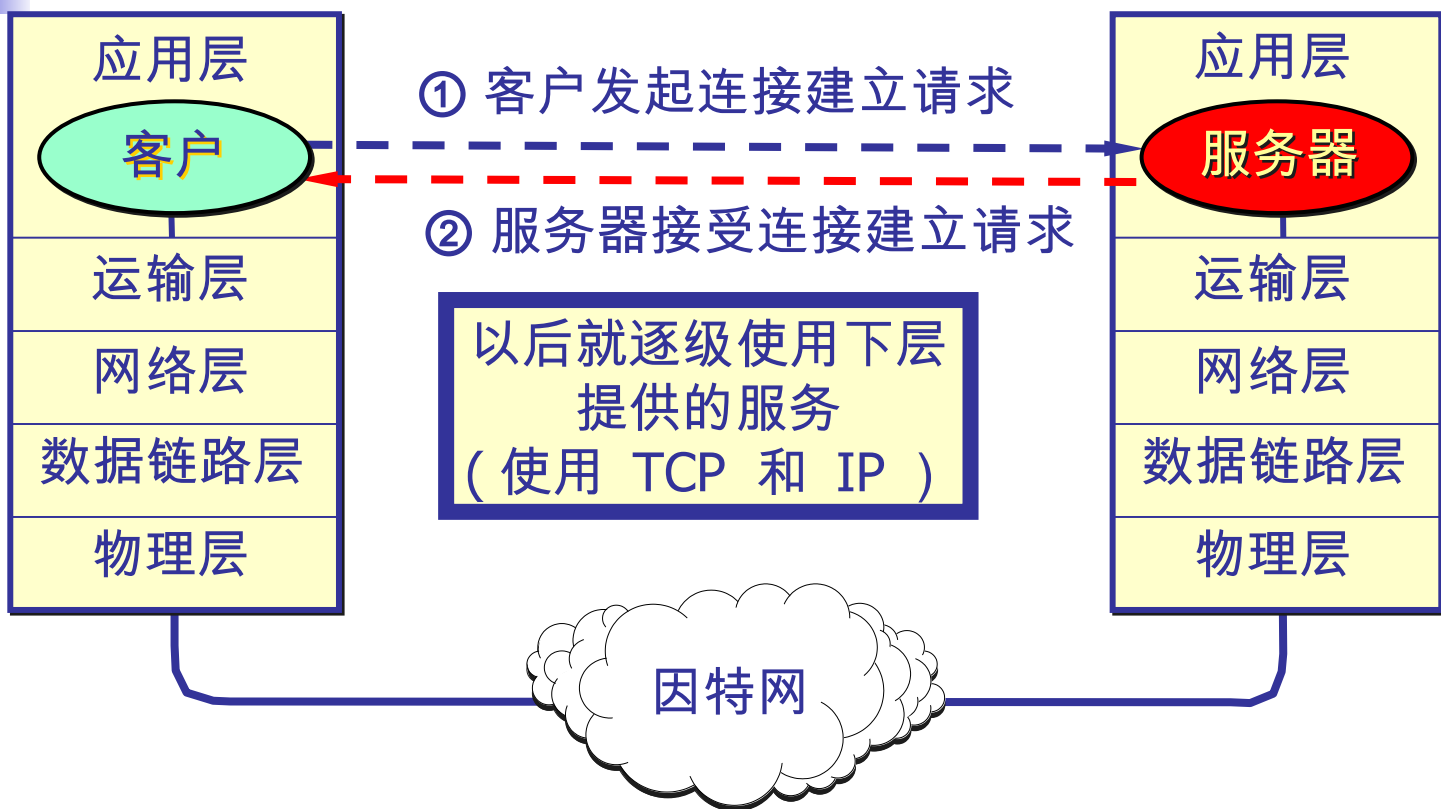
路由器在转发分组时最高只用到网络层
而没有使用运输层和应用层。

IP over Everything

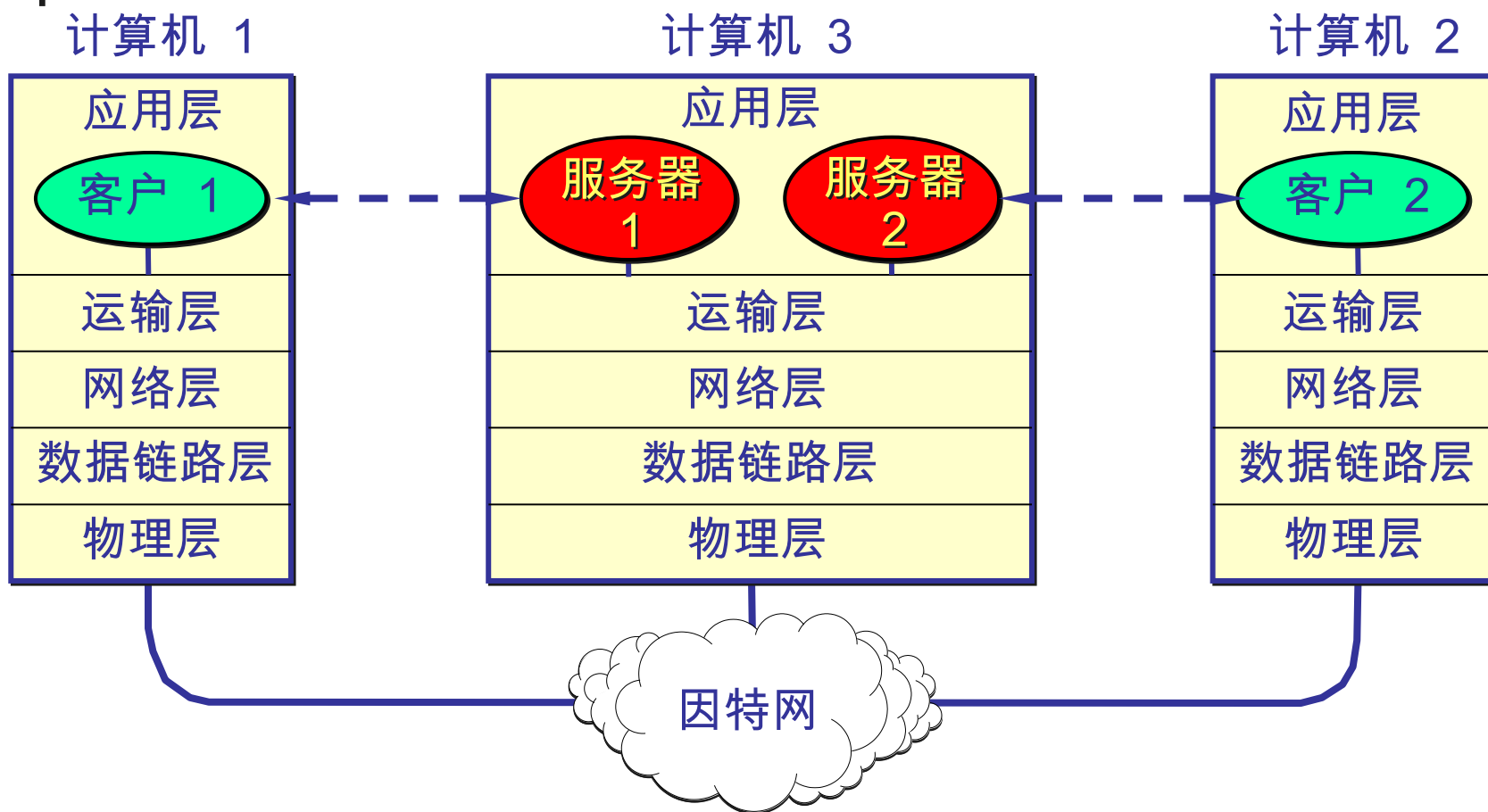
IP 可应用到各式各样的网络上



【例 1-2】客户进程和服务进程 使用 TCP/IP 协议进行通信



功能较强的计算机 可同时运行多个服务器进程





作业

- P36

- 1-10

- 1-15

- 1-17

- 1-18

- 1-19



作业解答

■ 试在下列条件下比较电路交换和分组交换。要传送的报文共 x (bit)。从源点到终点共经过 k 段链路，每段链路的传播时延为 d (s)，数据率为 b (b/s)。在电路交换时电路的建立时间为 s (s)。在分组交换时分组长度为 p (bit)，且各结点的排队等待时间可忽略不计。问在怎样的条件下，分组交换的时延比电路交换的要小？（提示：画一下草图观察 k 段链路共有几个结点。）

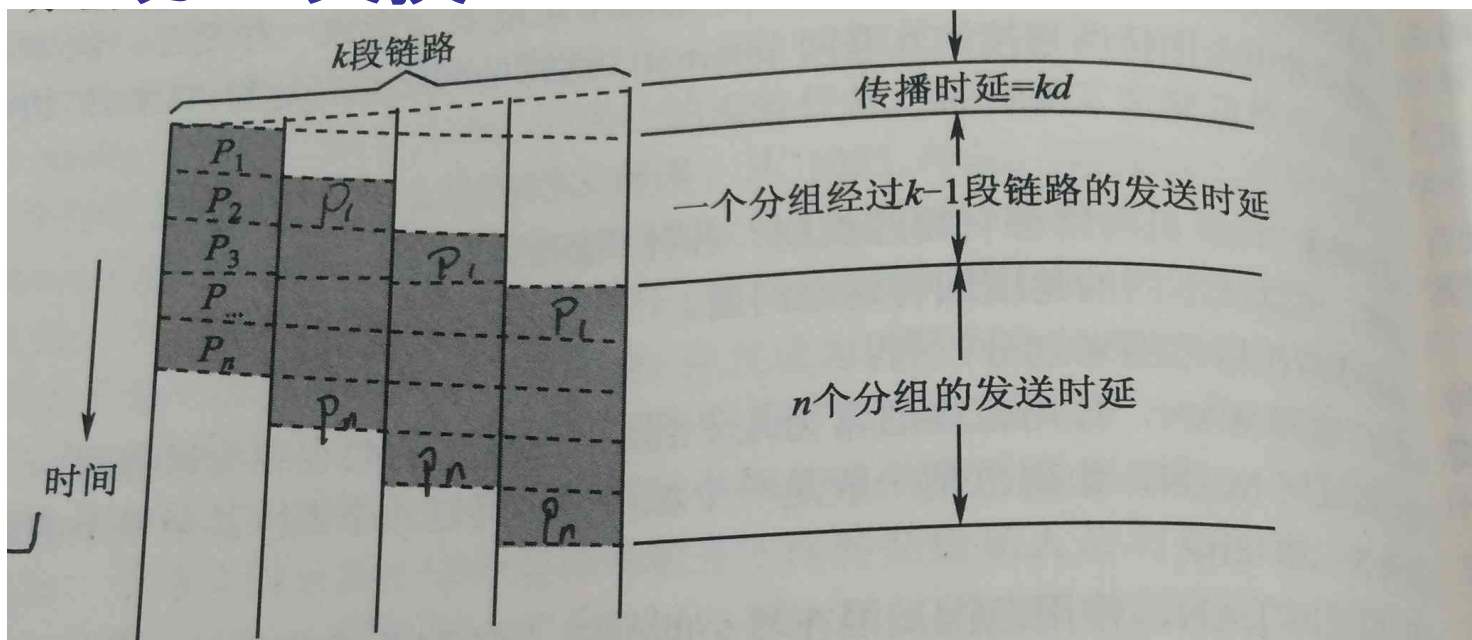


作业解答

- 1. 电路交换
 - (1) 传播时延 (k 段, 每段 d 秒) : kd
 - (2) 发送时延 (总共 x 比特, 发送速率 b): x/b
 - (3) 建立连接时间 : s
 - 总时延 : $t_1 = s + kd + x/b$

作业解答

2. 分组交换



- (1) 传播时延 : kd
- (2) n 个分组的发送时延 : x/b
- (3) 一个分组经过 $k-1$ 段链路的发送时延 : $(k-1)p/b$



- 分组交换的总时延：

- $t_2 = kd + x/b + (k-1)p/b$

- 3. 比较：

- $t_1 = s + kd + x/b$

- $t_2 = kd + x/b + (k-1)p/b$

- 所以当 $(k-1)p/b < s$ 时，分组交换时延小。

进一步的讨论

- n 个分组的发送时延是否是： x/b ？

- 分组的数目 n ：

$$n = \left\lceil \frac{x}{p} \right\rceil$$

- 发送 n 个分组的时延：

$$\left\lceil \frac{x}{p} \right\rceil \cdot \frac{p}{b}$$

- 当 $x \gg p$ 时，

$$\left\lceil \frac{x}{p} \right\rceil \approx \frac{x}{p}$$

- 当 $(k-1)p/b < s$ 且 $x \gg p$ 时，分组交换时延小