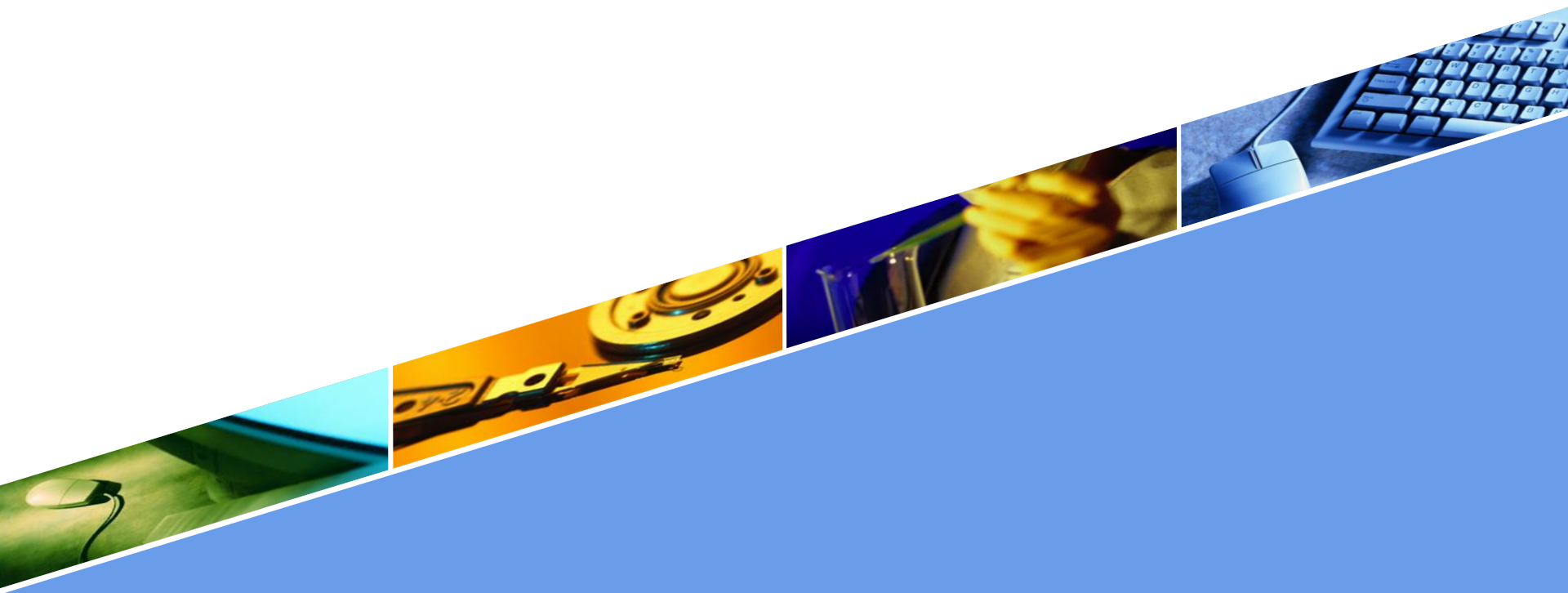


计算机网络概览



主题 1



1

基本概念和网络发展

2

网络交换技术

3

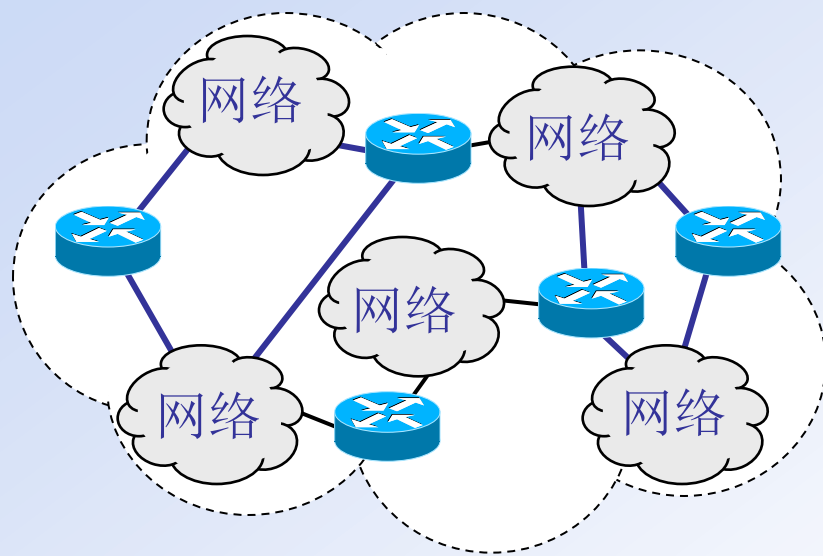
计算机网络体系结构

4

计算机网络的性能

计算机网络的定义

- ❖ 最简单的定义：计算机网络是一些互相连接的、自治的计算机的集合。
- ❖ 因特网(Internet)是“网络的网络”。

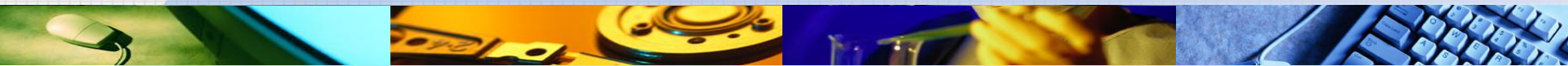


网络在信息时代的作用



- ❖ 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。
- ❖ 信息时代的网络是指“三网”，即电信网络、有线电视网络和计算机网络。
- ❖ 发展最快的并起到核心作用的是计算机网络。

计算机网络发展历史



❖ 场景：昨日重现：回到从前

■ 上古 (1950-60S)

- ① 计算机很贵，主机共用，拥有终端
- ② 终端轮流访问计算机，需要数据通信

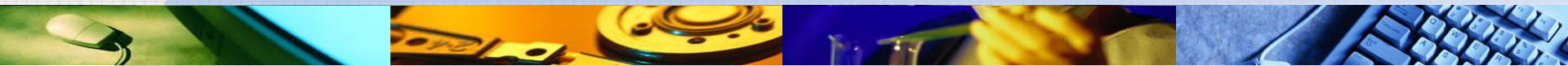
■ 中古 (60-70前期)

- ① 计算机相对便宜
- ② 计算机之间通信，构成局域网

■ 近代 (70年代以后)

- ① 终端“飞入平常百姓家”
- ② 业务应用
- ③ 广域网、甚至全球互连

技术发展轨迹



第一代：远程终端连接
20世纪60年代早期

面向终端的计算机网络：主机是网络的中心和控制者，终端（键盘和显示器）分布在各处并与主机相连，用户通过本地的终端使用远程的主机；只提供终端和主机之间的通信，子网之间无法通信

第二代：计算机网络阶段（局域网）
20世纪60年代中期

多个主机互联，实现计算机和计算机之间的通信。
包括：通信子网、用户资源子网
终端用户可以访问本地主机和通信子网上所有主机的软硬件资源。
电路交换和分组交换

第三代：计算机网络互联阶段
（广域网、Internet）
1970年末

1977年 国际标准化组织(ISO)制订：开放体系互联基本参考模型（OSI/RM），实现不同厂家生产的计算机之间实现互连
TCP/IP协议的诞生

第四代：信息高速公路
（高速，多业务，大数据量）
1990年代后

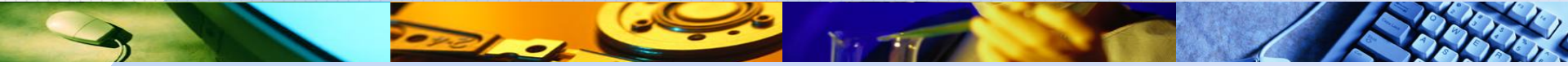
宽带综合业务数字网：信息高速公路
ATM技术、ISDN、千兆以太网
交互性：网上电视点播、电视会议、可视电话、网上购物、网上银行、网络图书馆等
高速、可视化

因特网(Internet)的发展和意义



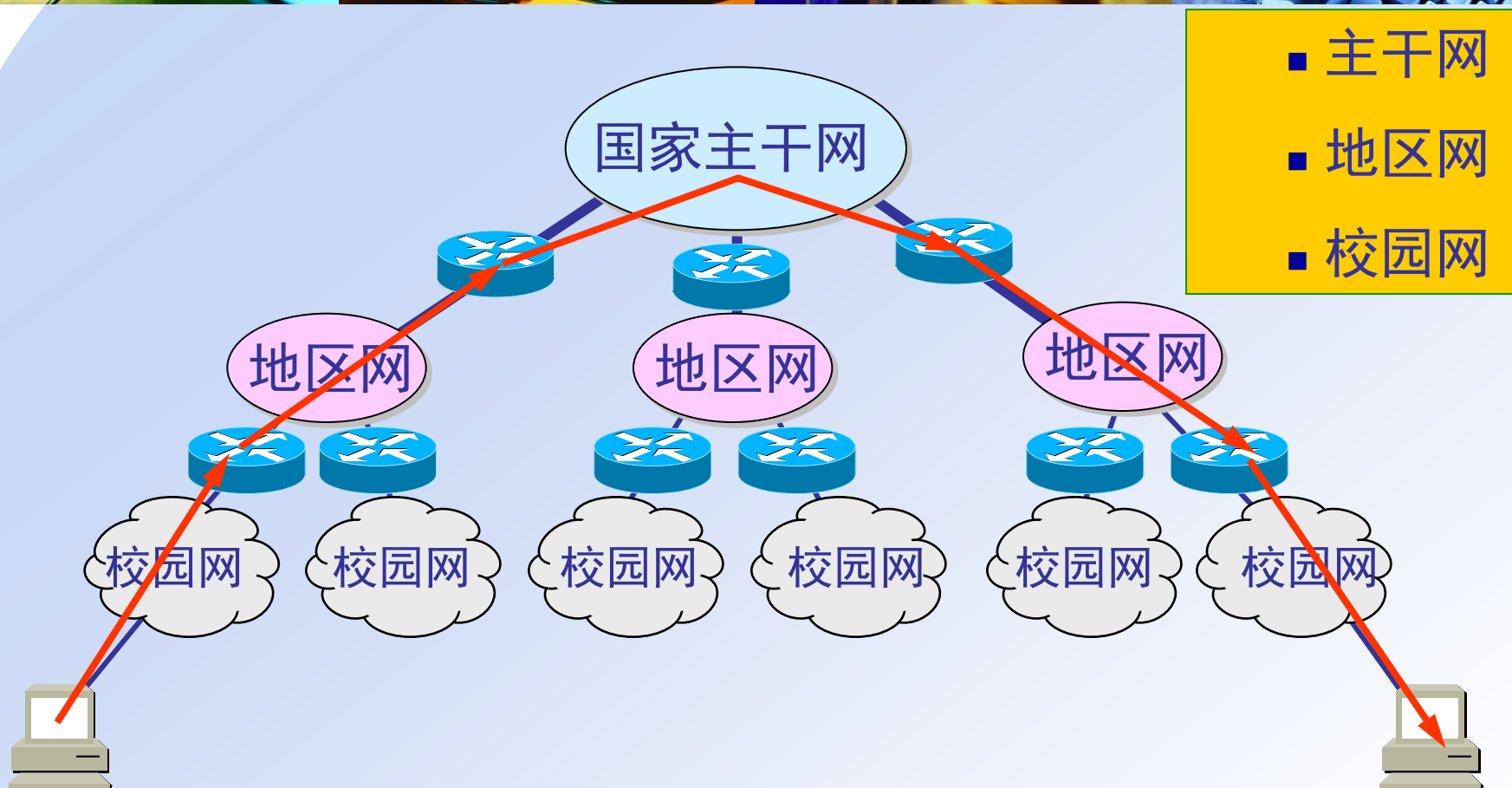
- ❖ 进入 20 世纪 90 年代以后，以因特网为代表的计算机网络得到了飞速的发展。
- ❖ 已从最初的教育科研网络逐步发展成为商业网络。
- ❖ 已成为仅次于全球电话网的世界第二大网络。
- ❖ 因特网是自印刷术以来人类通信方面最大的变革。
- ❖ 现在人们的生活、工作、学习和交往都已离不开因特网。

因特网—演进

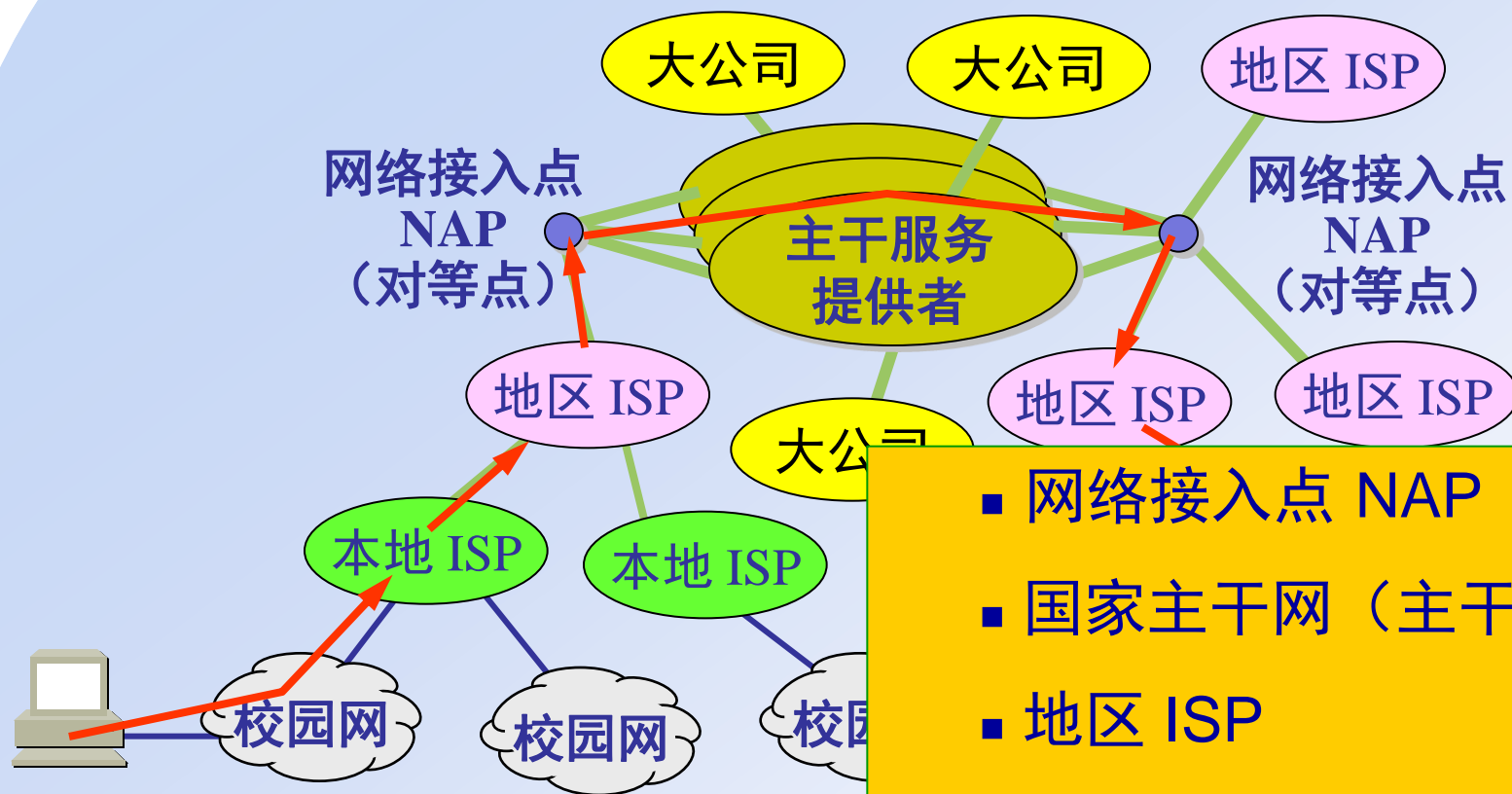


- ❖ 因特网的基础结构大体上经历了三个阶段的演进。
- ❖ 但这三个阶段在时间划分上并非截然分开而是有部分重叠的，这是因为网络的演进是逐渐的而不是突然的。
 - 第一阶段只是单个分组交换网 ARPANET 。
 - 第二阶段是建成了三级计算机网络。
 - 第三阶段是多级结构的因特网。

因特网—三级结构

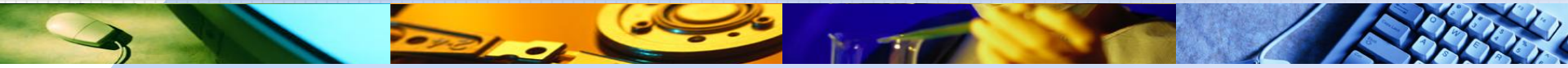


因特网—多级结构



- 网络接入点 NAP
- 国家主干网（主干 ISP）
- 地区 ISP
- 本地 ISP
- 校园网、企业网或 PC 机上网用户

计算机网络在我国的发展



- ❖ 1989年11月，我国第一个公用分组交换网CNPAC建成运行，在此基础上，1993年9月建成新的中国公用分组交换网。
- ❖ 在20世纪80年代后期，公安、银行、军队以及其他一些部门也相继建立了各自的专用计算机广域网。
- ❖ 自20世纪90年代起，我国陆续建造了基于因特网技术的、可以和因特网互连的9个全国范围的公用计算机网络（公网）。

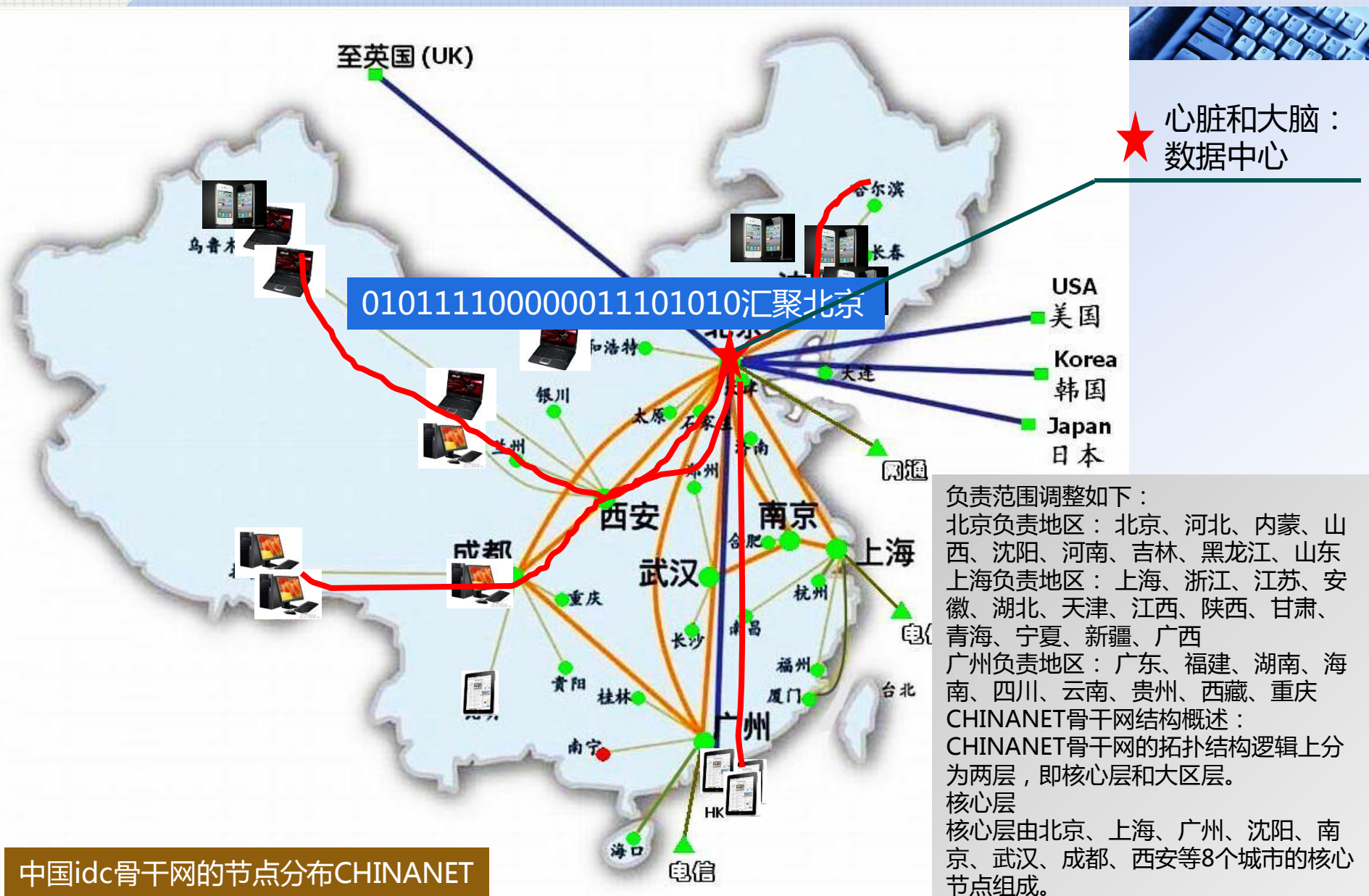
我国陆续建设的全国范围因特网公网



- (1) 中国公用计算机互联网 CHINANET
- (2) 中国教育和科研计算机网 CERNET
- (3) 中国科学技术网 CSTNET
- (4) 中国联通互联网 UNINET
- (5) 中国网通公用互联网 CNCNET
- (6) 中国国际经济贸易互联网 CIETNET
- (7) 中国移动互联网 CMNET
- (8) 中国长城互联网 CGWNET
- (9) 中国卫星集团互联网 CSNET

以上公网由不同ISP运营管理并提供Internet服务，
它们之间互连构成我国Internet公网

CHINANET



计算机网络分类



❖ 从网络的作用范围进行分类

- **广域网 (WAN)、城域网 (MAN)、局域网 (LAN)、个人区域网 (PAN)**

❖ 从网络的使用者进行分类

- **公用网、专用网**

❖ 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AN**

计算机网络的影响



❖ 网络对人类文化的影响

- **国家治理**
- **日常生活**
- **社会经济**
- **国家安全**
- **文化艺术**
-

主题 2



1

基本概念和网络发展

2

网络交换技术

3

计算机网络体系结构

4

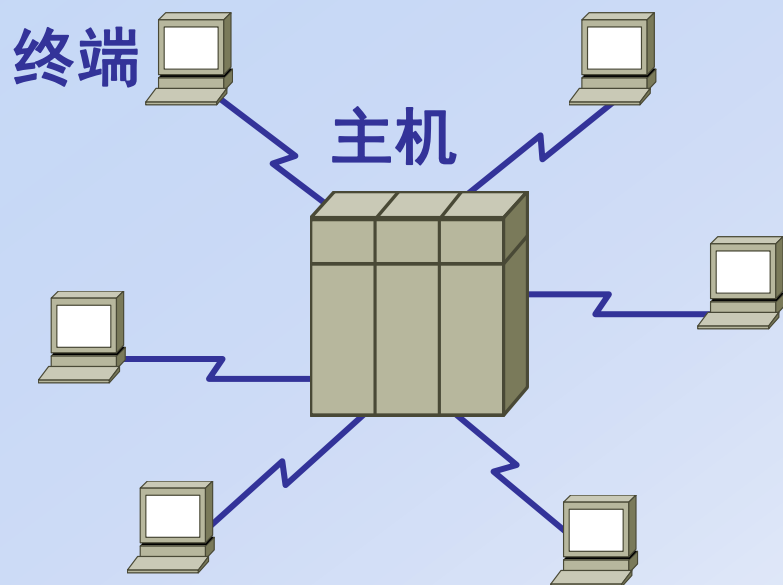
计算机网络的性能

以分组交换为核心的计算机网络

以主机为中心



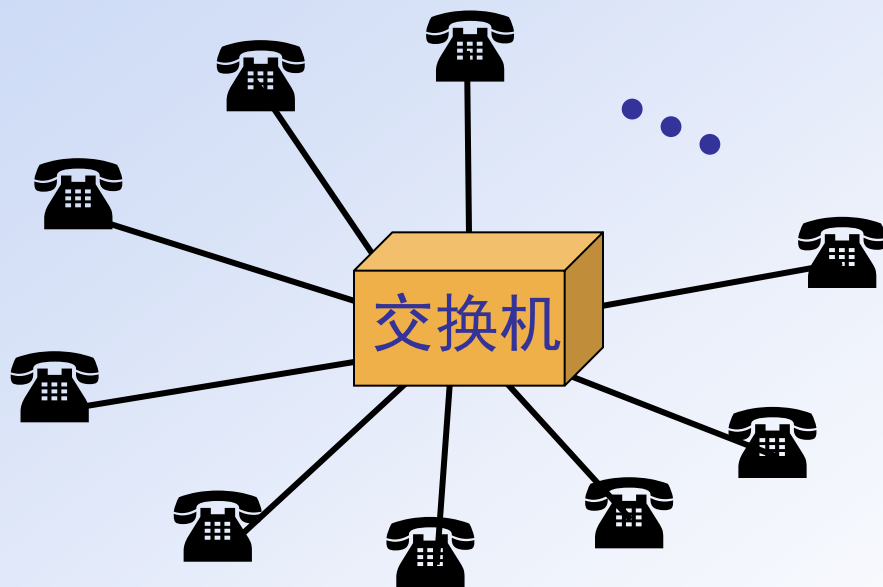
以分组交换网为中心



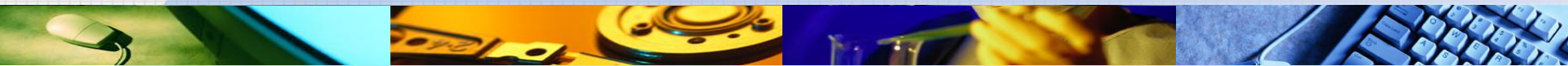
- 早期的面向终端的计算机网络是以单个主机为中心的星形网。各终端通过通信线路共享昂贵的中心主机的硬件和软件资源。
- 分组交换网则是以网络为中心，主机都处在网络的外围。用户通过分组交换网可共享连接在网络上的许多硬件和各种丰富的软件资源。

“交换”的原始含义

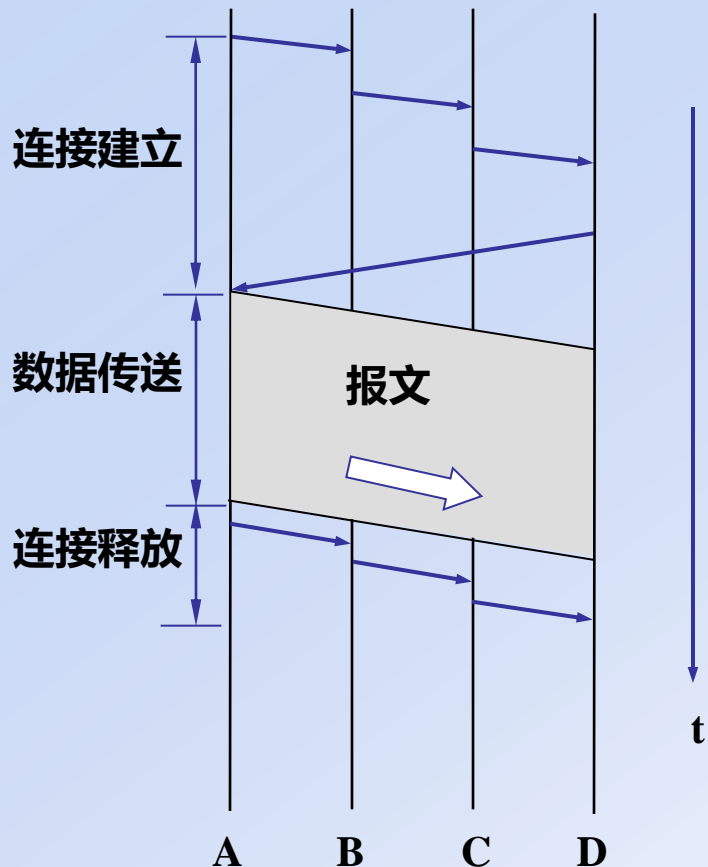
- ❖ “交换” (switching) 源于电话网络，含义就是通过交换机进行转接——把一条电话线转接到另一条电话线，使它们连通起来。
- ❖ 从通信资源的分配角度来看，“交换”就是按照某种方式动态地分配传输线路的资源。



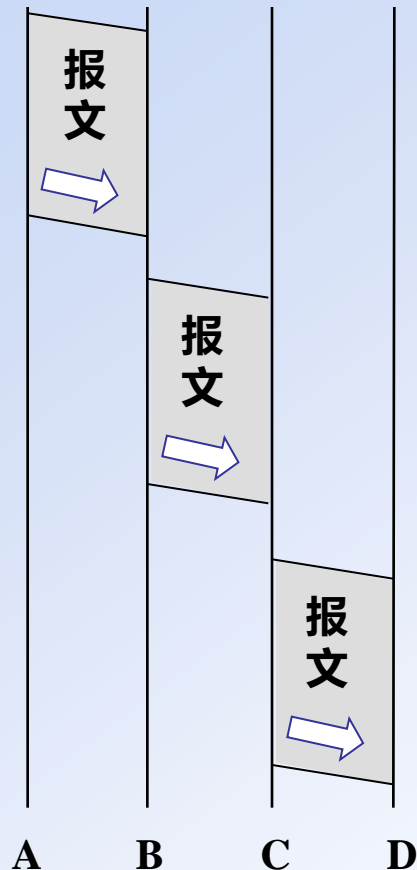
网络的关键技术：三种交换技术



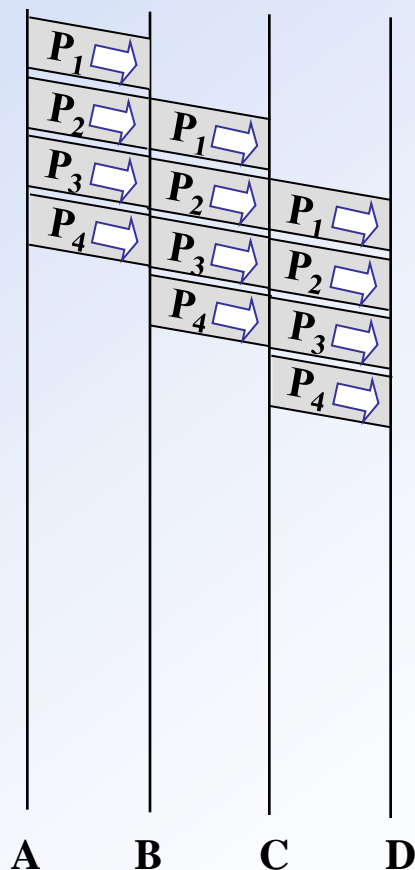
电路交换



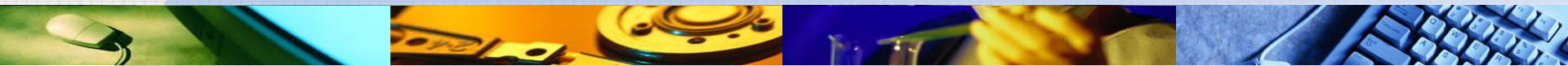
报文交换



分组交换



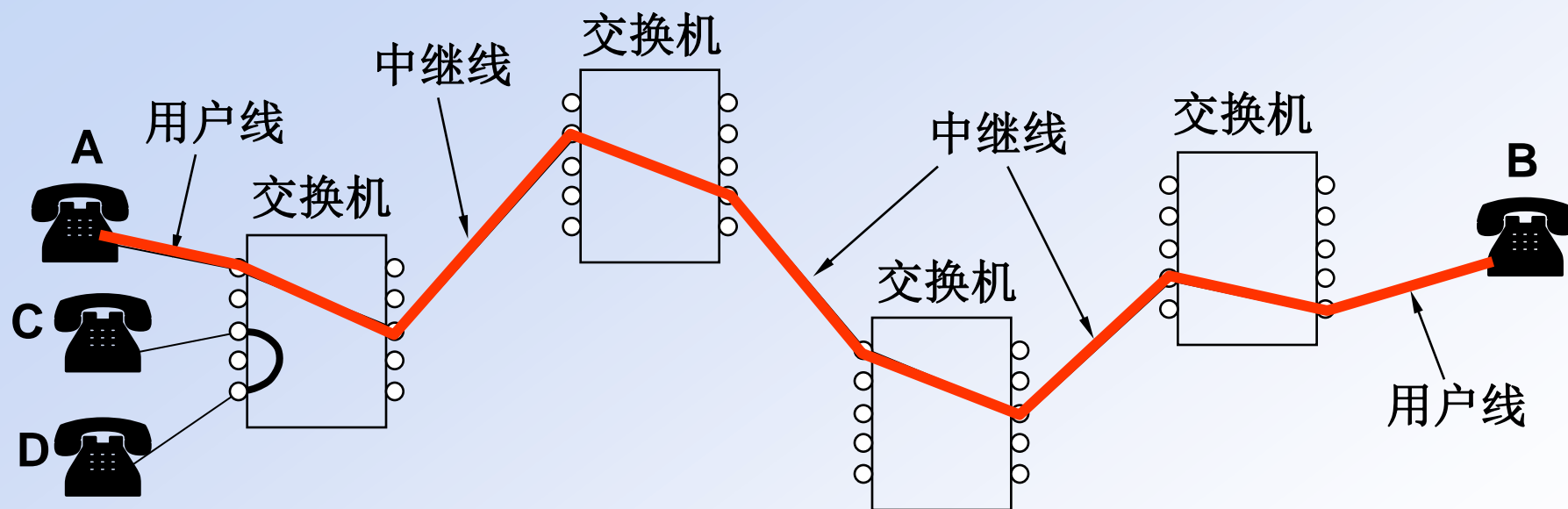
电路交换



- 电路交换是在通信的两个用户之间必须建立起一条固定的电路，并且在通信的整个过程中占用这条电路。电路在通信结束后将被释放。
- 当需要和另一个用户通信时，就要另外建立一条电路进行通信。

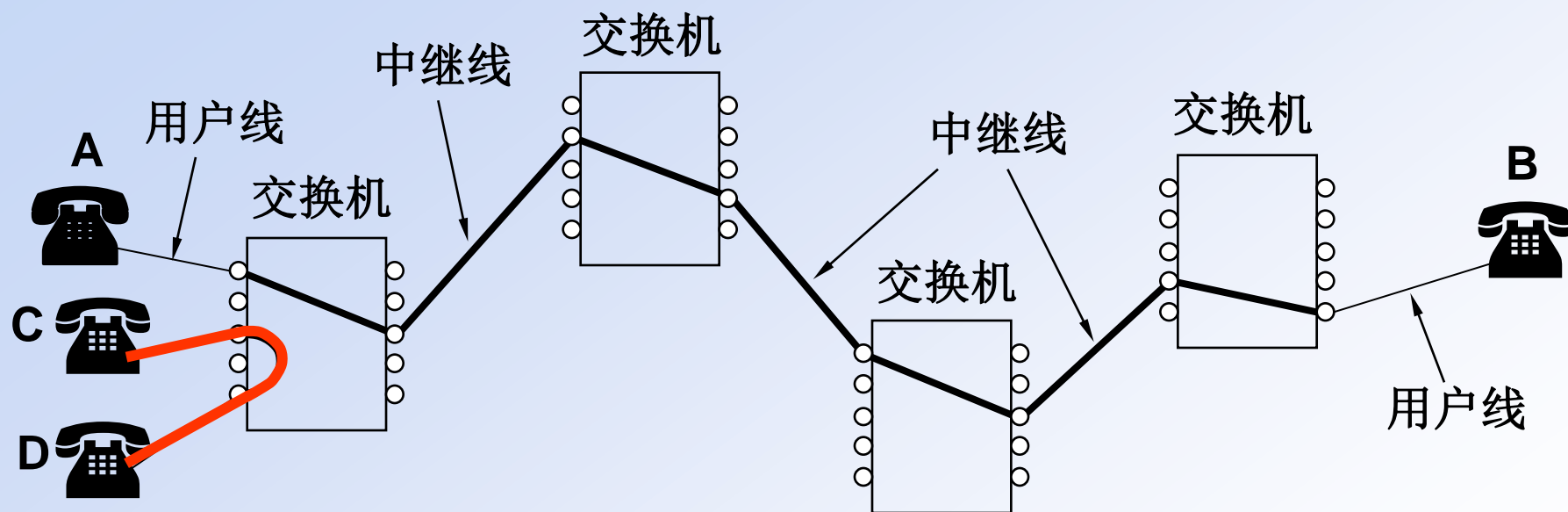
电路交换网示例

- ❖ 电话网络：基于电路交换技术
- ❖ A和B通话经过四个交换机
- ❖ 通话在 A 到 B 的连接上进行



电路交换示例

- ❖ C和D通话只经过一个本地交换机
- ❖ 通话在 C 到 D 的连接上进行



电路交换特点



❖ **转接**——把一条电话线转接到另一条电话线，使它们连通起来——**可靠**。

❖ 从通信资源的分配角度来看，“电路交换”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，独占物理线路。

❖ 电路交换的三个阶段

■ **建立连接→通信→释放连接**

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。
- ❖ 计算机网络中采用分组交换技术

分组交换：分组是基础

- 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。



。

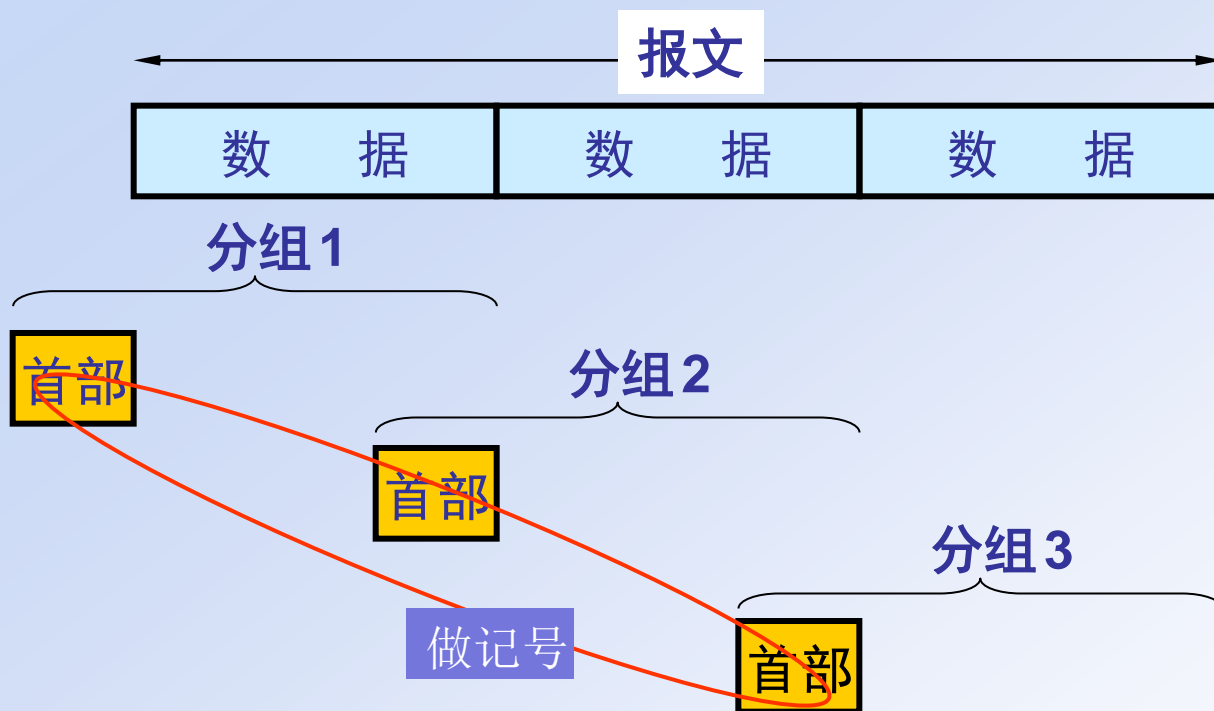
。

。

假定这个报文较长不便于传输

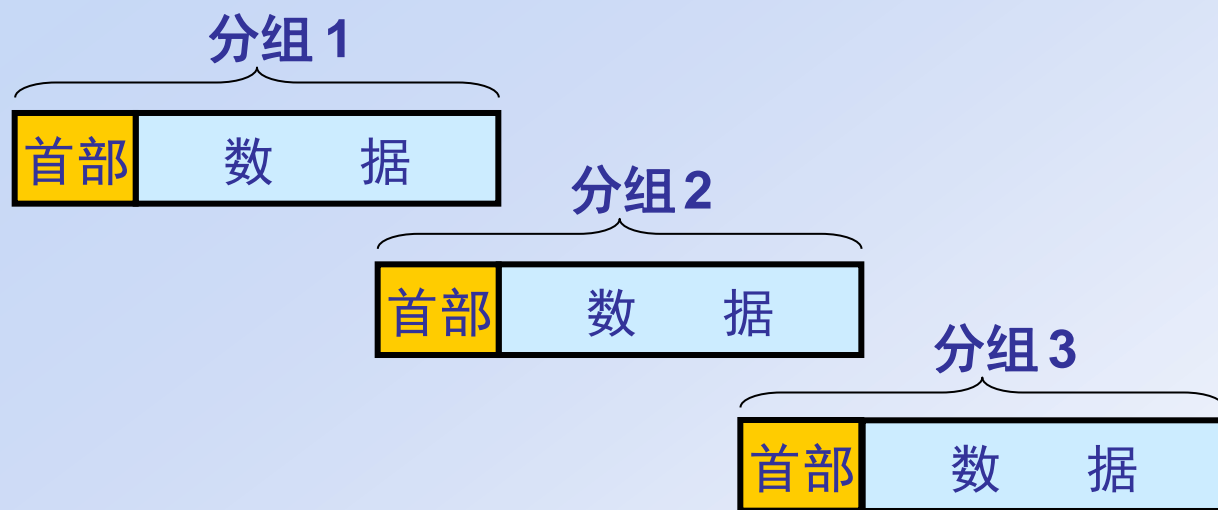
分组交换：添加首部构成分组

- 每一个数据段前面添加上**首部**构成分组。



分组交换：分组作为传输单元

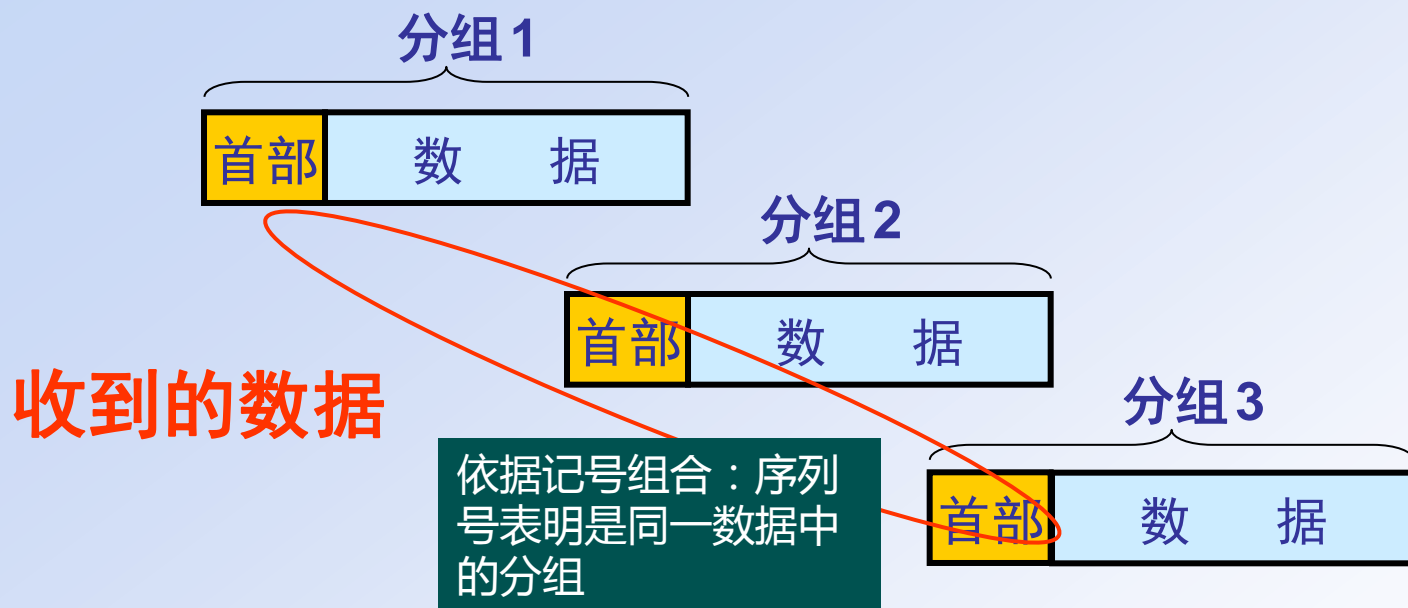
- 分组交换网以“**分组**”作为数据传输单元。
- **依次**把各分组发送到接收端。



- 每一个分组的首部都含有地址、次序等控制信息。
- 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。

分组交换：接收端剥去首部

- 接收端收到分组后剥去首部还原成报文。



分组交换：还原成原来的报文

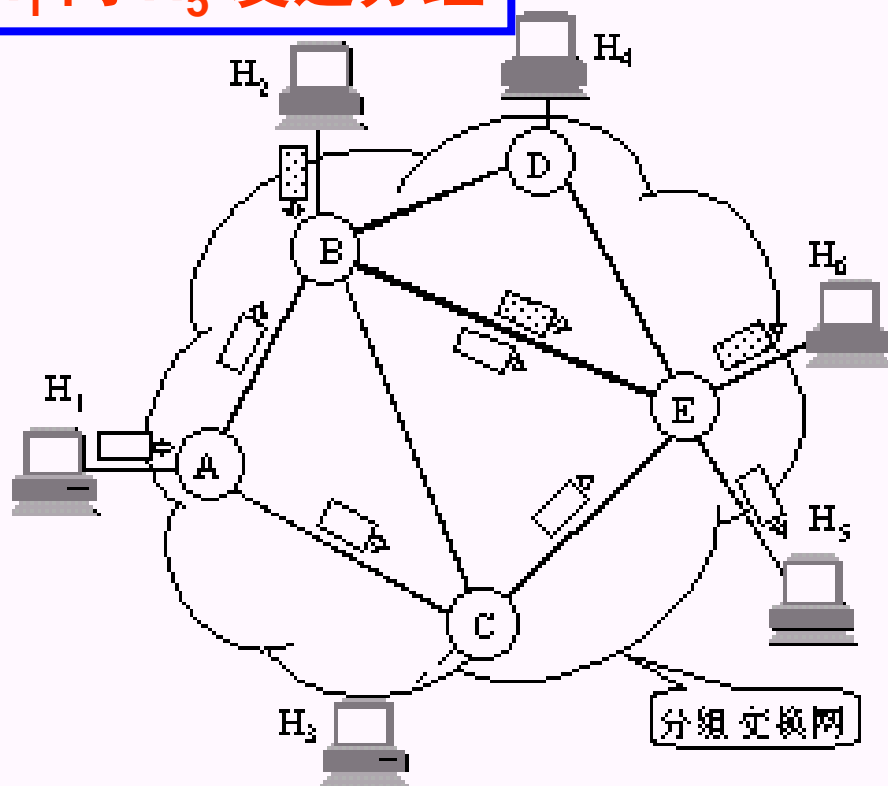
- 最后，在接收端把收到的数据恢复成为原来的报文。



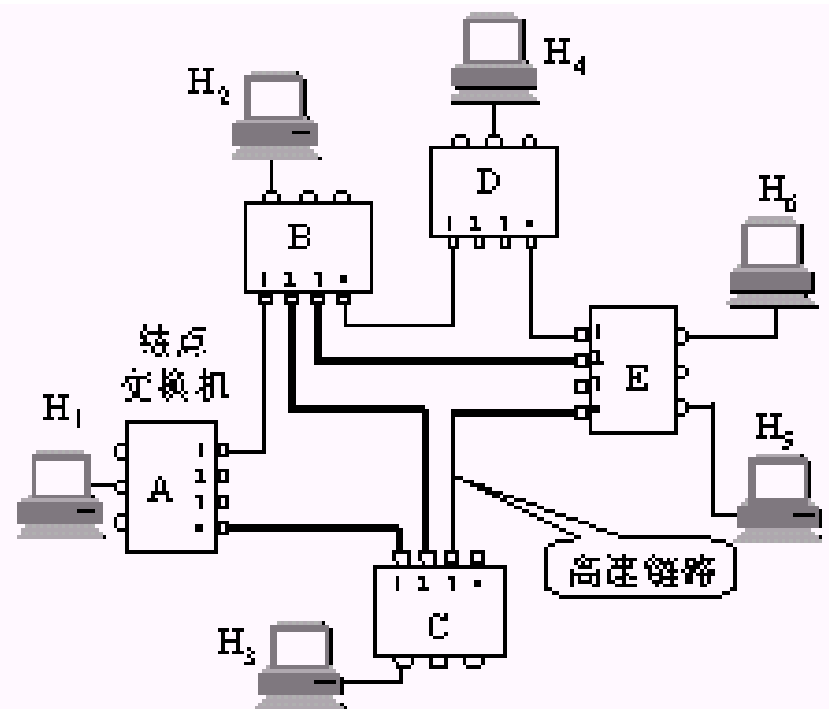
- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。

分组交换示例

H₁ 向 H₅ 发送分组



(a) 分组交换网和主机



(b) 具有两组端口的结点交换机

在结点交换机 A、C、E 暂存查找转发表找到转发的端口，最后到达目的主机 H₅
在结点交换机 A、B、E 暂存查找转发表找到转发的端口，最后到达目的主机 H₅

分组交换：优缺点

优点：

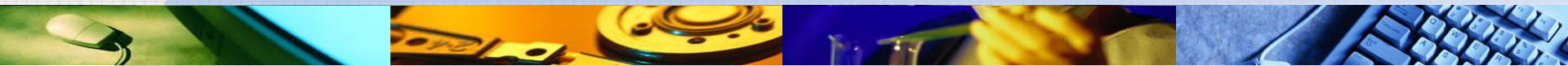
- 高效 动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用。
- 灵活 以分组为传送单位和查找路由。
- 迅速 不必先建立连接就能向其他主机发送分组；充分使用链路的带宽。

缺点：

- 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。

Internet的核心部分就是基于分组交换的网络，其关键设备是路由器

主题 3



1

基本概念和网络发展

2

网络交换技术

3

计算机网络体系结构

4

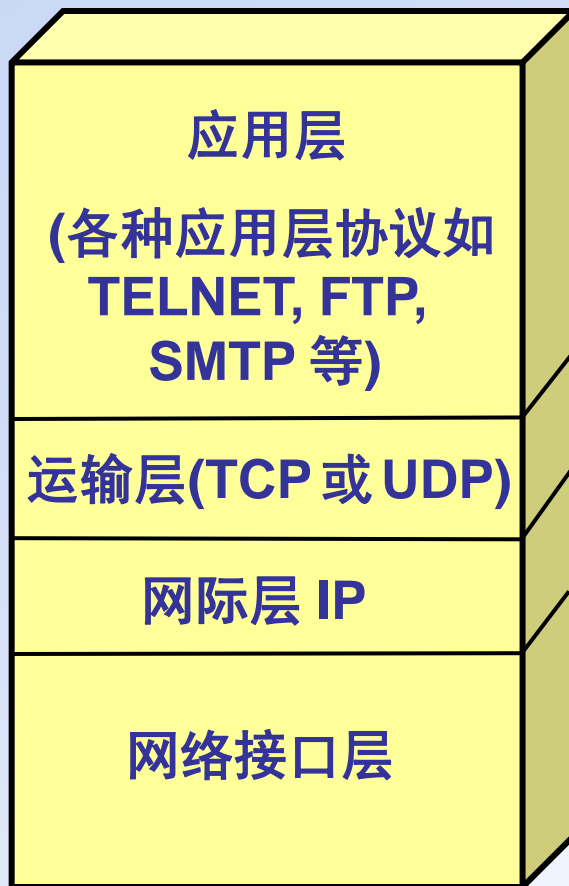
计算机网络的性能

直接看看协议体系：why是它们？

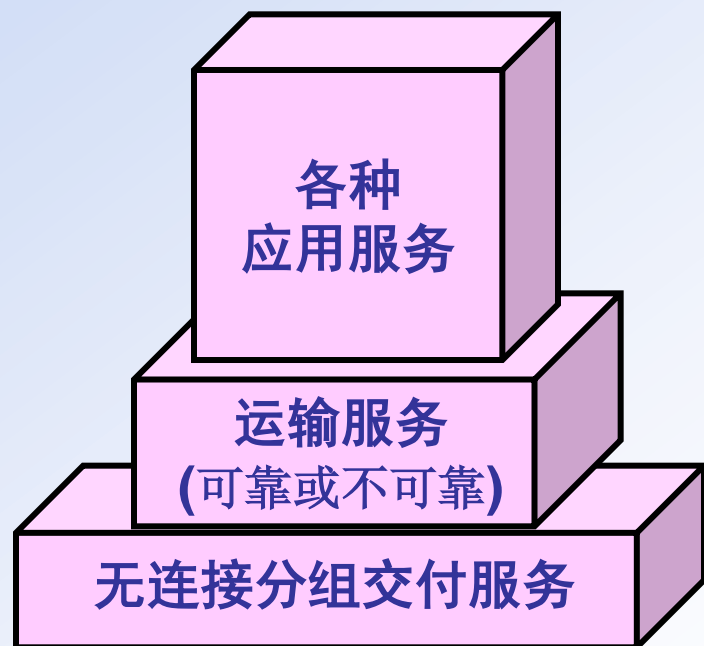
OSI 的体系结构



TCP/IP 的体系结构



TCP/IP 的三个服务层次



协议体系直观分析



- 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。

❖ 分层——西方科学的脊髓

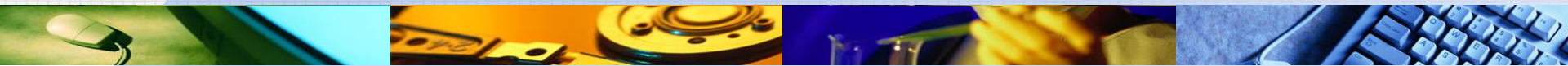
- **化繁为简，化大为小**
- **区分宏观和微观：不同层次的问题**
- **区分“实体”的视角**

❖ 层与层间的关系？

❖ 维系两个通信实体的相应层之间关系的是什么呢？

❖ 计算机网络中的通信实体均可用这七层表征？

分层的优点

- 
- 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。

注 意：

- 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。

人类沟通的规律：分层、服务、协议



语用和语义

编码

语法

建立会话

会话次序

持续通道



语用和语义

语法

会话次序

持续通道



- ① 每层与不同的功用
- ② 层与层之间互相支持
- ③ 对于两个通信实体，相同层的功能一样，它们遵循同样的规律

值得信任的
“鸿雁”
(邮局)

段内传
送精确

物理通道
的能力

定位准确

分段保持

屏蔽具体载体

定位准确

分段保持

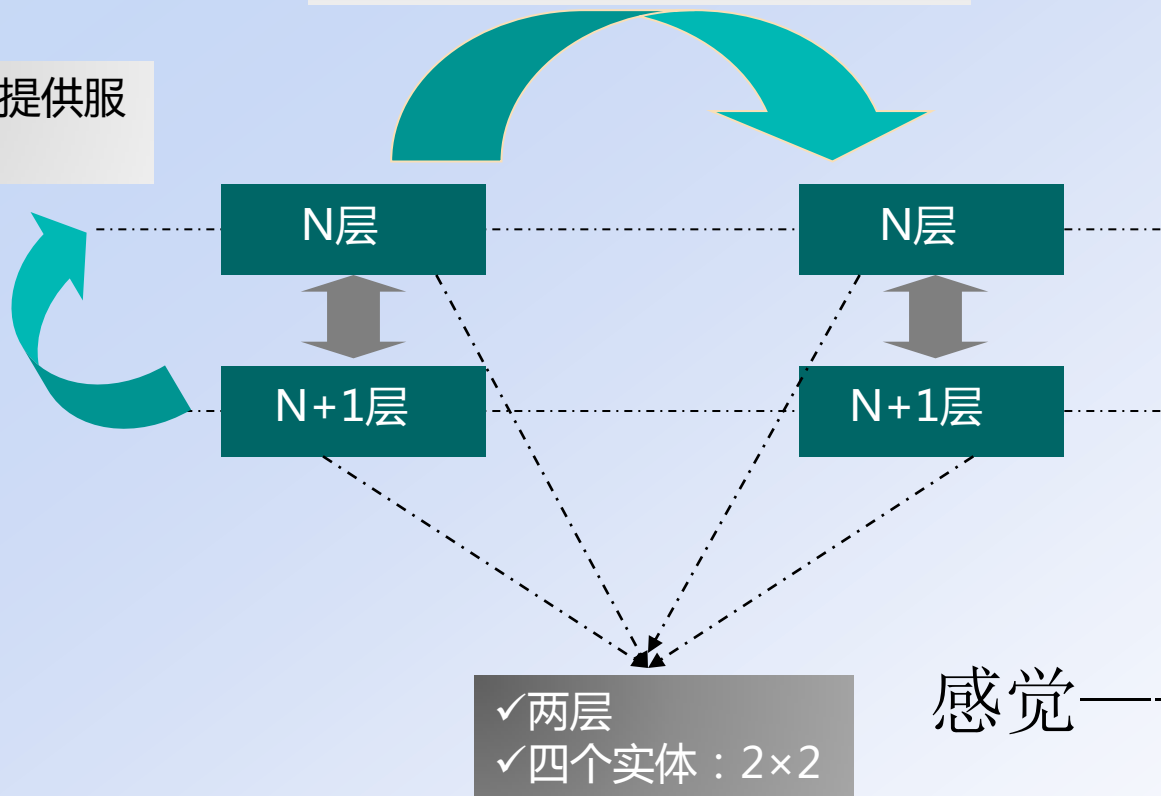
屏蔽具体载体

- ① 同样的语言
- ② 字和词
- ③ 语法
- ④ 语义
- ⑤ 同步 (时间尺度)

模型要素包含：分层—实体—服务—协议

对等实体间需要满足同样的规则，
这就是协议——平等的

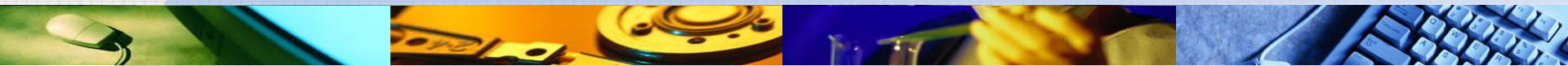
向上一层提供服务



感觉——虚实相生

实体：完成某些独立功能的对象；
服务：向其他实体提供的帮助，以有助于其完成功能；
协议：对等实体间互操作的次序、规则等。

计算机网络？



❖ 计算机网络是复杂系统

- 人多、人的需求多、应用多
- 设备多且异构
- 设备间的交互方式多
- 跨地域
- 冲突不可避免
-
- 需要“化繁为简”的方法，需要协调控制的方法，首先要将计算机网络抽象成易懂的“模型”——信息交换的规律

❖ 协议：两个实体沟通所约定的规则——并不对内容做出要求

❖ 对等实体

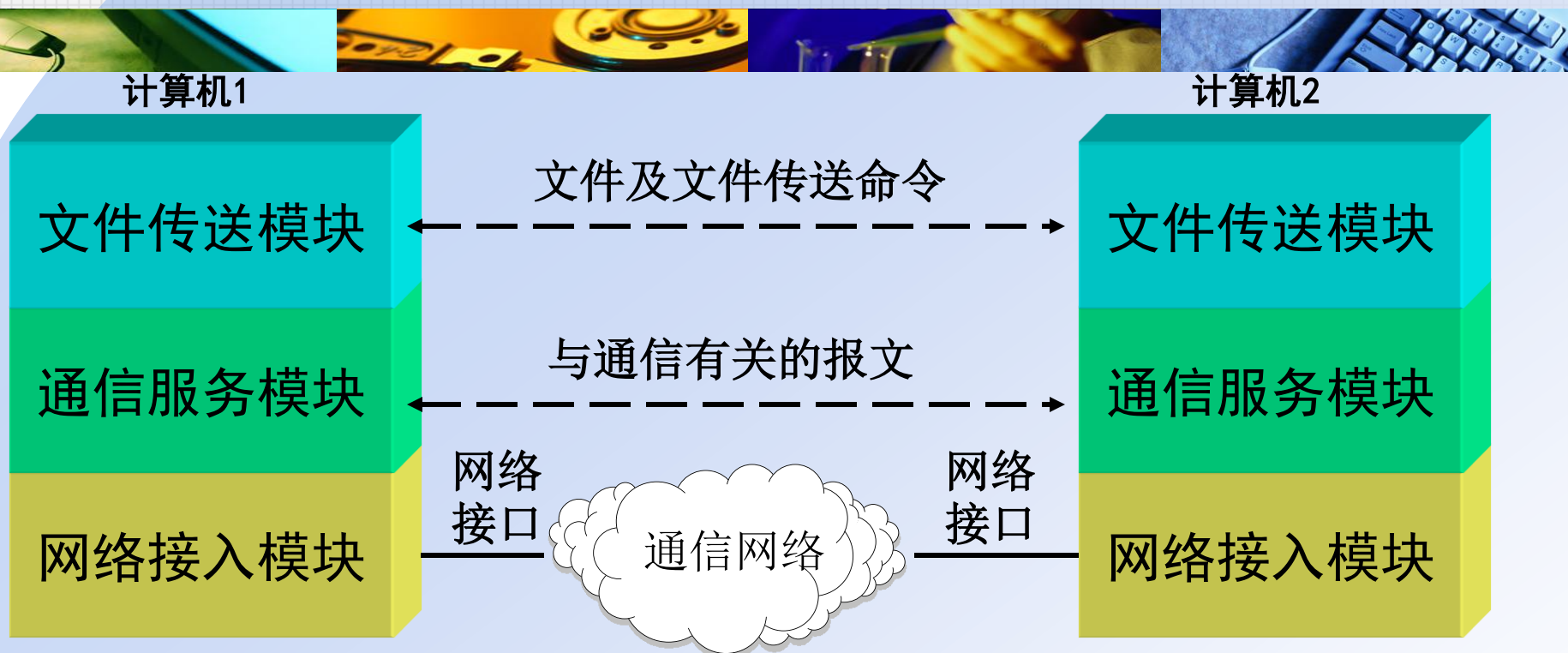
❖ 分层—服务

计算机网络的体系结构



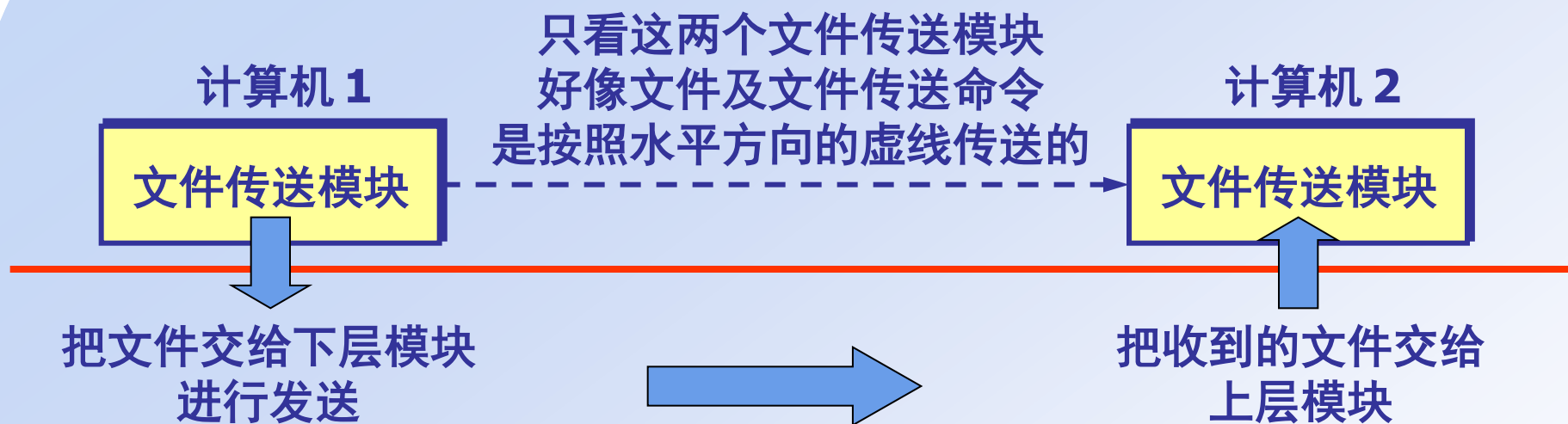
- ❖ 计算机网络的**体系结构** (architecture) 是计算机网络的各层及其协议的集合。
- ❖ 体系结构就是这个计算机网络及其部件所应完成的功能的精确定义。
- ❖ **实现** (implementation) 是遵循这种体系结构的前提下用何种硬件或软件完成这些功能的问题。
- ❖ 体系结构是抽象的，而实现则是具体的，是真正在运行的计算机硬件和软件。

基本概念理解：层次结构

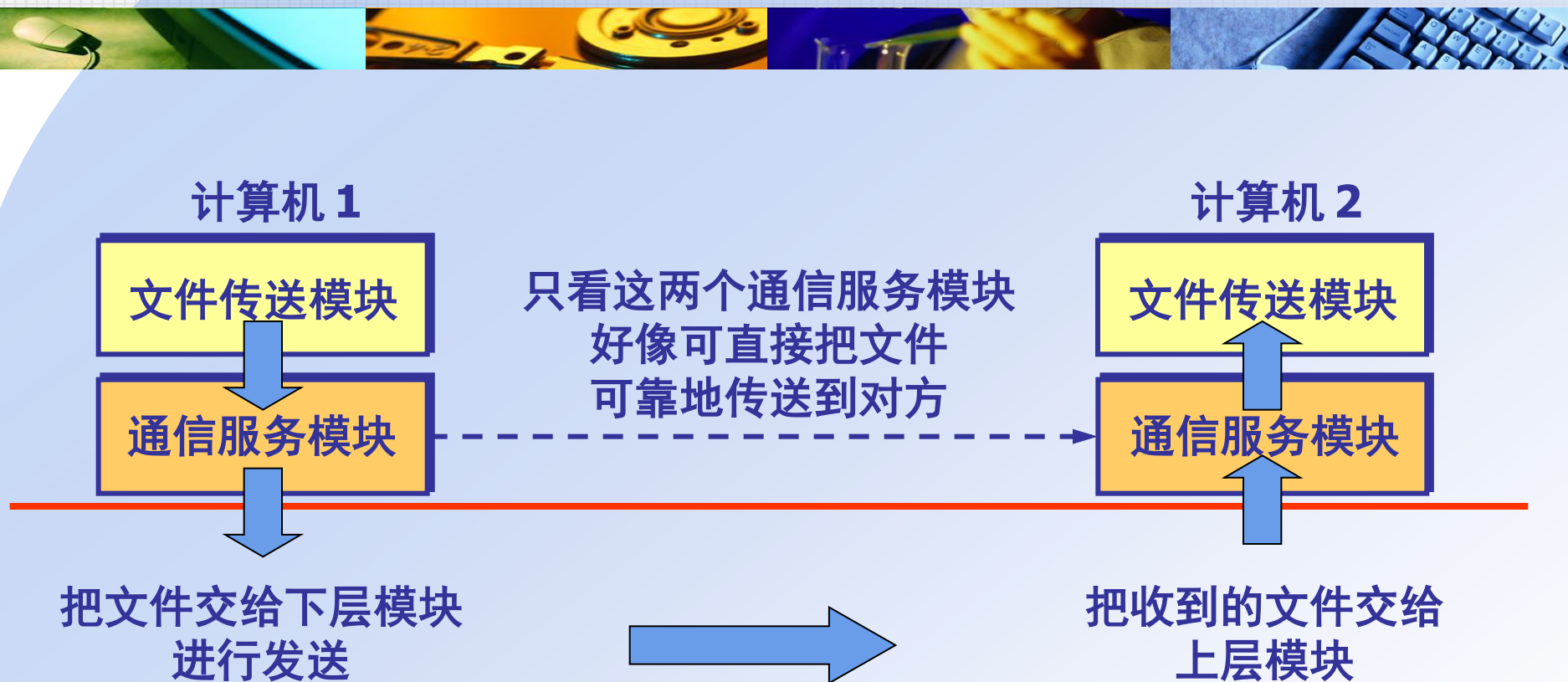


- 计算机 1 向计算机 2 通过网络发送文件。
- 可以将要做的工作进行如下的划分。
- 第一类工作与传送文件直接有关。
 - ❖ 确信对方已做好接收和存储文件的准备。
 - ❖ 双方协调好一致的文件格式。
- 两个计算机将文件传送模块作为最高的一层。剩下的工作由下面的模块负责。

基本概念理解：层次结构

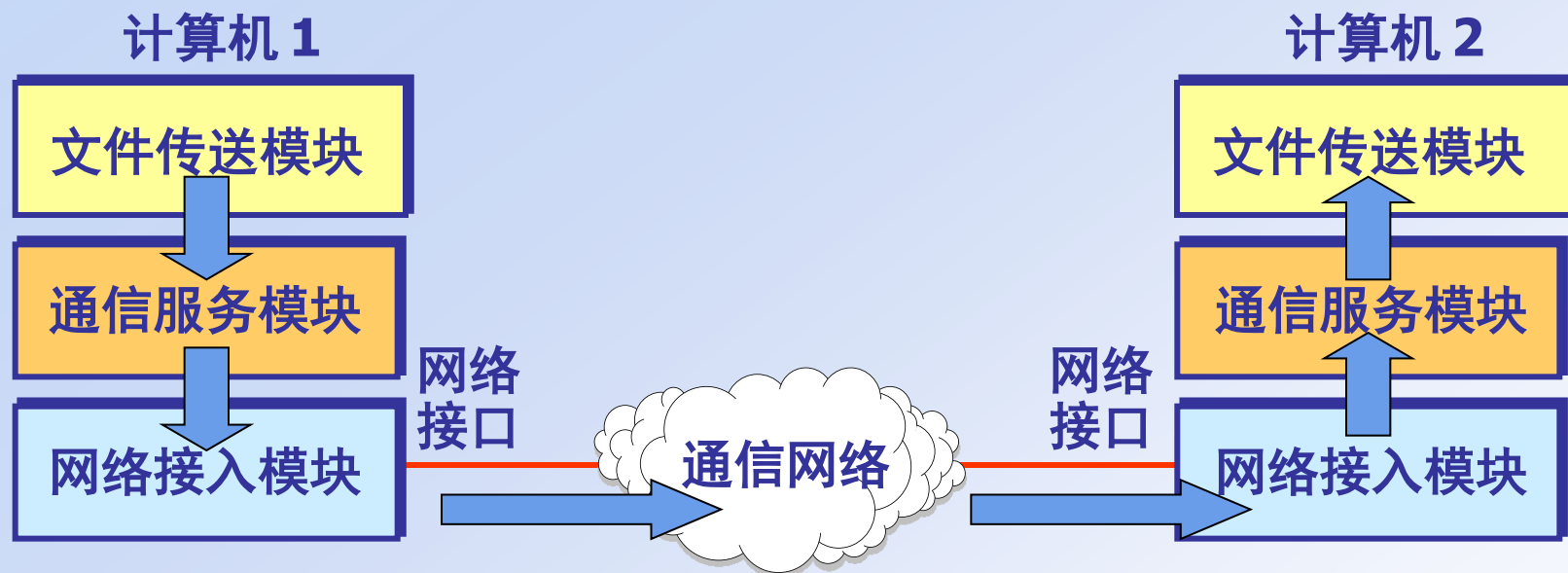


基本概念理解：层次结构



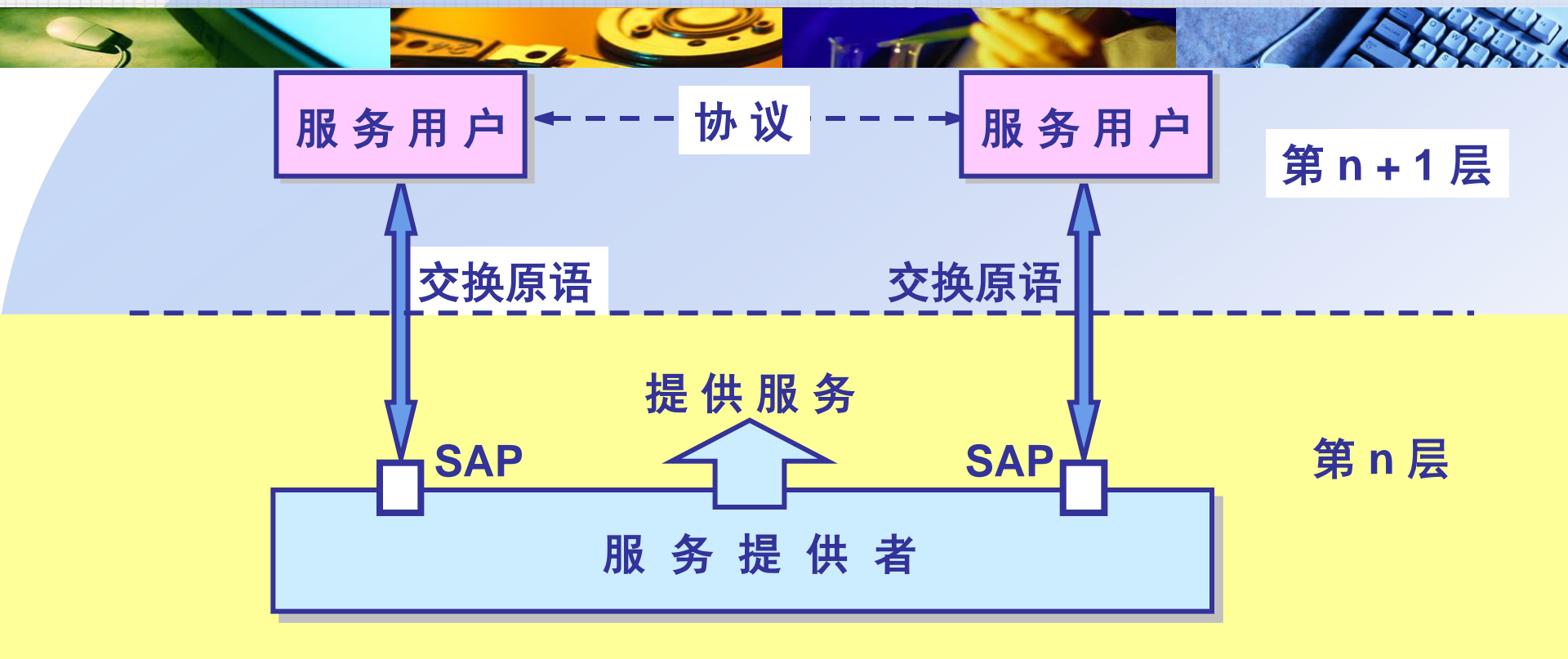
通信服务模块用来保证文件和文件传送命令可靠地在两个系统之间交换。

基本概念理解：层次结构



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。

层次模式的核心：实体、协议和服务



这里有两个信息在流动：

纵向信息：真实的物理传输，层与层之间是透明的；纵向信息流是物理的。

横向信息：逻辑的信息在流动，而横向信息流则是逻辑的。

基本概念理解：实体



- **实体**(entity):协议的实现要落实到一个个具体的硬件和软件模块，在网络中将实现特定功能的模块称为实体。
- 协议是控制两个**对等实体**（同一层中实现同一协议的两个实体）进行通信的规则的组合。
- 除了最底层的对等实体外，其它的对等实体间的通信并不是直接进行的。
- 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。

基本概念理解：协议

语法

语法即用户数据与控制信息的结构与格式，它是规定将若干协议元素和数据组合在一起，表示一个更完整的内容所应遵循的格式，也可以说它是对数据结构形式的一种规定。

语义

语义是指对构成的协议元素含义的解释，即需要发出何种控制信息，以及完成的动作与作出的响应。

时序

时序是对事件实现顺序的详细说明。

基本概念理解：协议设计



- 协议必须将**各种**不利的条件事先都估计到，而不能假定一切情况都是很理想和很顺利的。
- 必须非常仔细地检查所设计协议能否应付所有的不利情况。
 - 应当注意：事实上难免有**极个别的**不利情况在设计协议时并没有预计到。在出现这种情况时，协议就会失败。

基本概念理解：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。
- 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。指网中低层实体向高层实体提供功能性的支持。
- 对等层实体通过协议进行通信，完成一定的功能，从而为上层实体提供相应的服务；
- 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)。

基本概念理解：服务原语

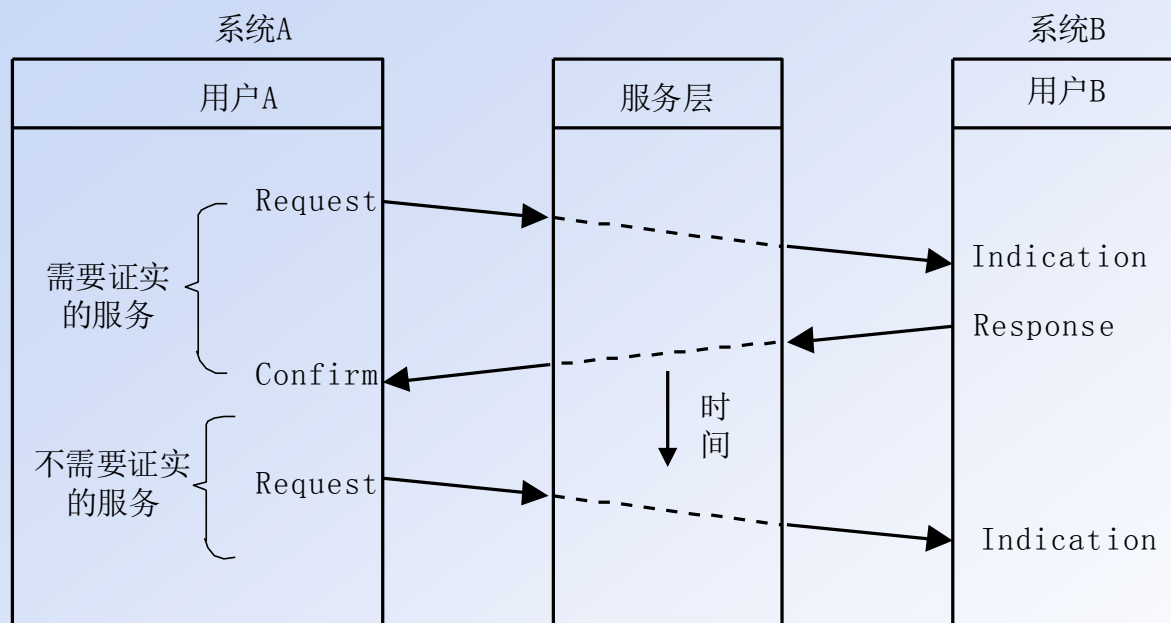
- ❖ 服务原语（Service Primitive）是指服务用户与服务提供者之间进行交互时所要交换的一些必要信息。OSI/RM规定了四种服务原语类型，如表3-2所示

表 3-2 四种服务原语及其意义

服务原语类型	意 义
请求（Request）	一个实体希望得到某种服务
指示（Indication）	把关于某一事件的信息告诉某一实体
响应（Response）	一个实体愿意响应某一事件
证实（Confirm）	把一个实体的服务请求加以确认并告诉它

基本概念理解：服务原语

- ❖ 从使用服务原语的角度考虑，可将服务分为需要证实的服务和不需要证实的服务两大类，前者每次服务要使用全部四种服务原语，而后者只使用两种服务原语



基本概念理解：服务的连接特性



■ 面向连接服务(connection-oriented)

✓ 面向连接服务具有连接建立、数据传输和连接释放这三个阶段。

可靠、有记忆

✓ 面向连接服务在网络层中又称为虚电路服务。

■ 无连接服务(connectionless)

✓ 两个实体之间的通信不需要先建立好连接。

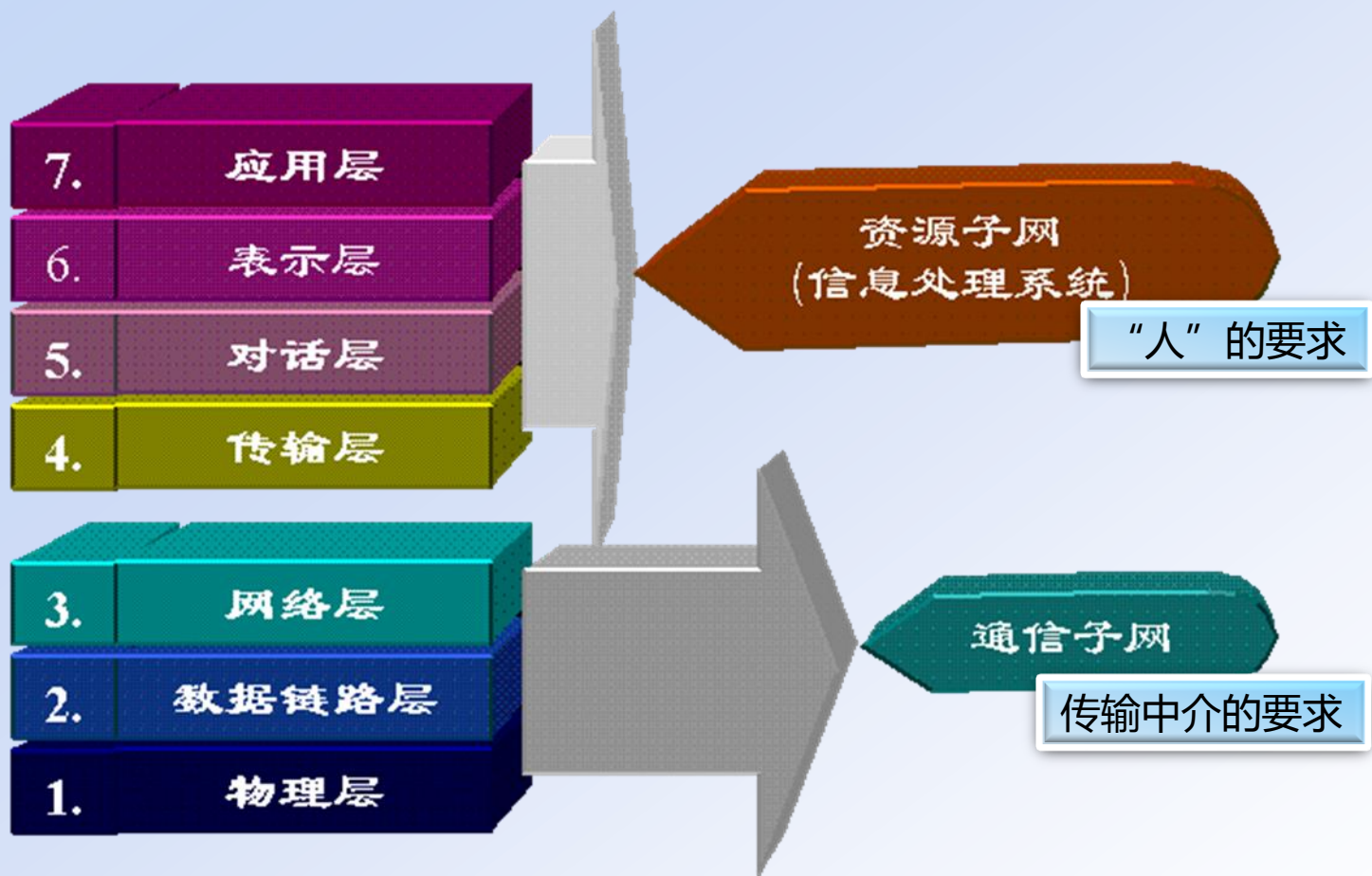
✓ 是一种不可靠的服务。这种服务常被描述为“尽最大努力交付”或“尽力而为”。

两种体系



- 法律上的国际标准 OSI，并没有得到市场的认可。
 - 用于学术研究
 - 在OSI中采用了三级抽象：参考模型（即体系结构）、服务定义和协议规范（即协议规格说明），自上而下逐步求精
- 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(*de facto*)的国际标准。
 - ✓ 市场承认是最关键的

OSI体系结构：七层模型

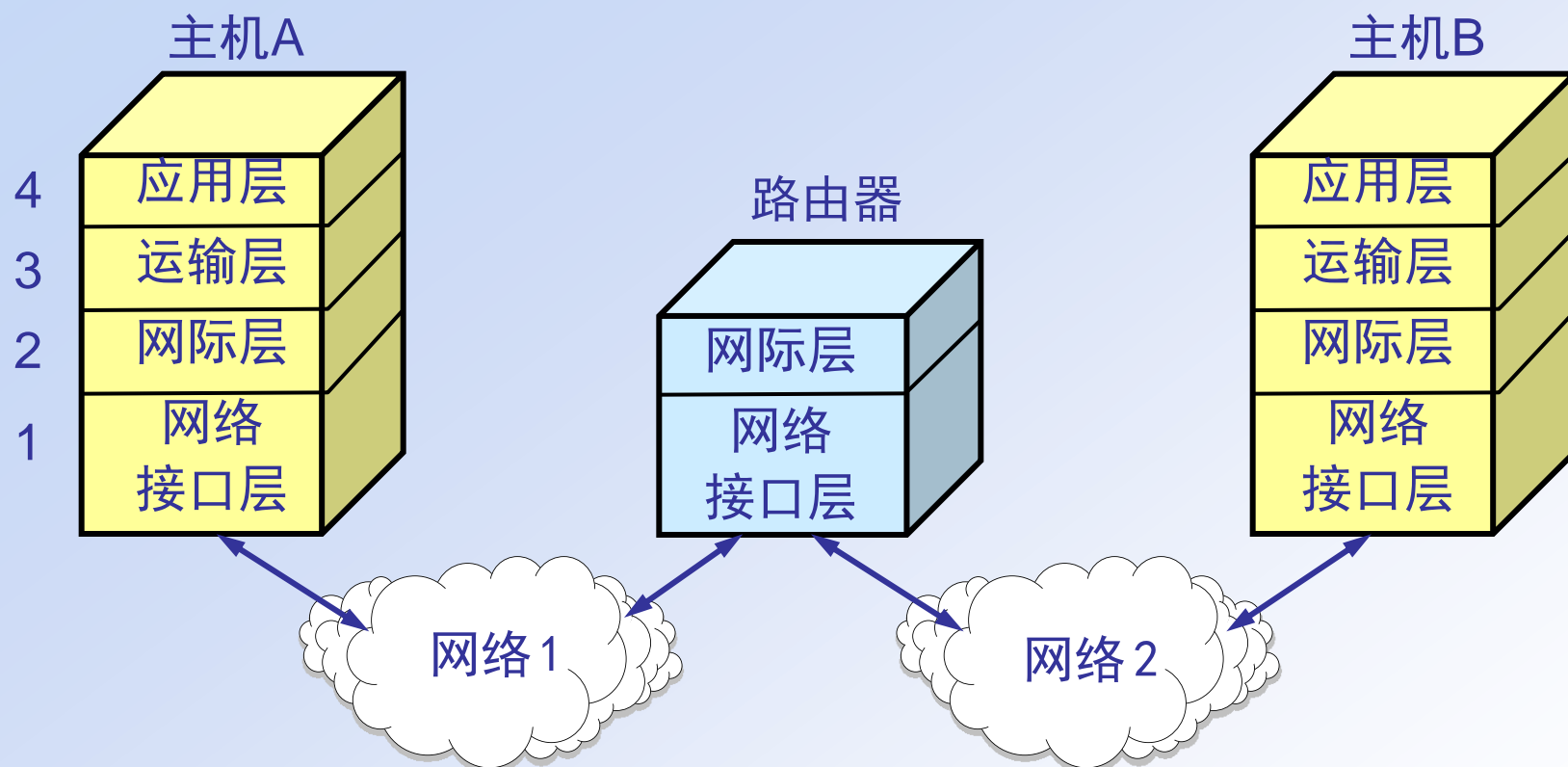


ISO七层协议：各层功能（借鉴人类沟通原理）



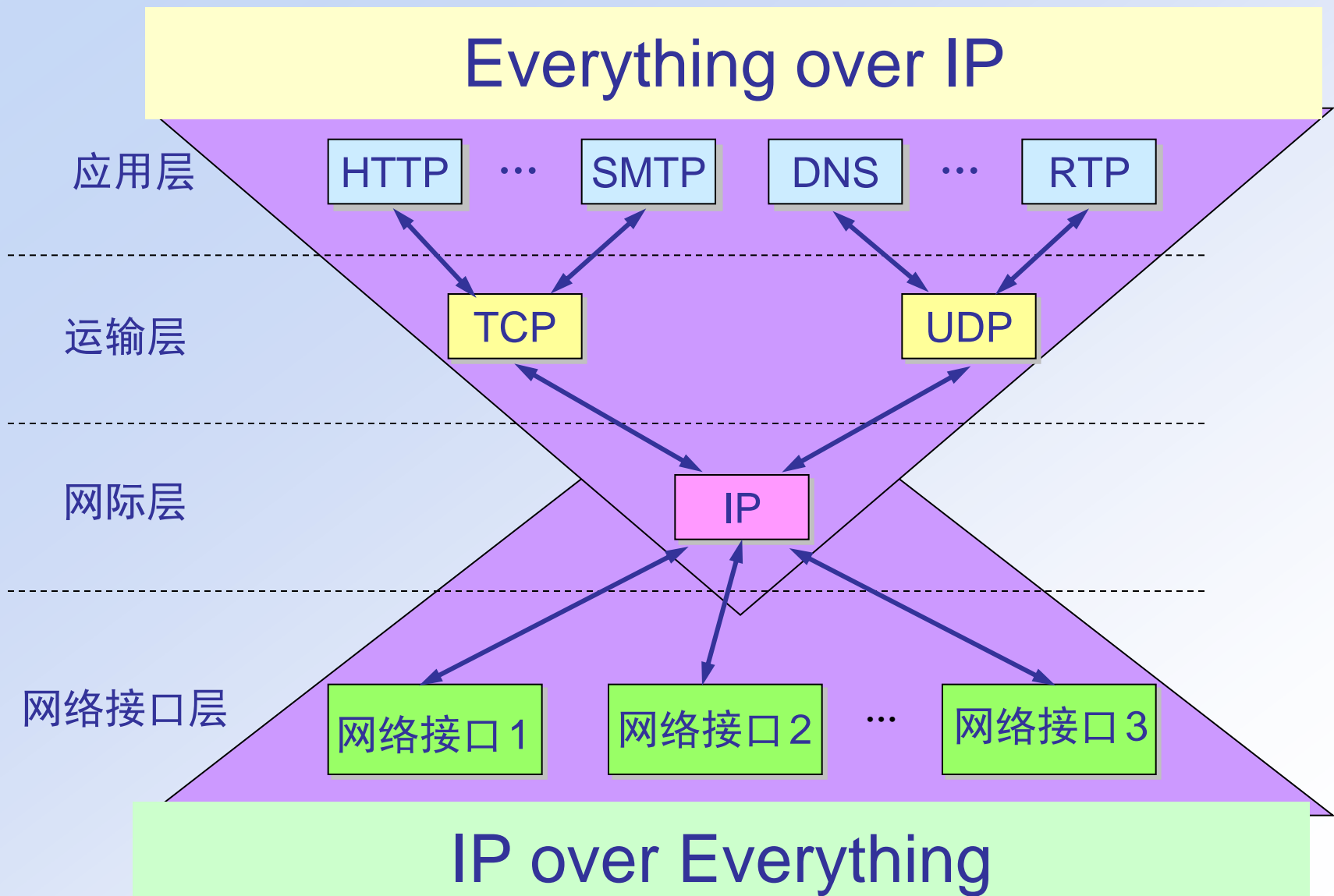
	层号	名 称	英文名称	主要功能简介
语义	7	应用层	Application Layer	作为与用户应用进程的接口，负责用户信息的语义表示，并在两个通信者之间进行语义匹配，它不仅要提供应用进程所需要的信息交换和远地操作，而且还要作为互相作用的应用进程的用户代理来完成一些为进行语义上有意义的信息交换所必须的功能
语法	6	表示层	Presentation Layer	对源站点内部的数据结构进行编码，形成适合于传输的比特流，到了目的站再进行解码，转换成用户所要求的格式并保持数据的意义不变。主要用于数据格式转换
会话	5	会话层	Session Layer	提供一个面向用户的连接服务，它给合作的会话用户之间的对话和活动提供组织和同步所必须的手段，以便对数据的传送提供控制和管理。主要用于会话的管理和数据传输的同步
持续通道	4	传输层	Transport Layer	从端到端经网络透明地传送报文，完成端到端通信链路的建立、维护和管理
定位	3	网络层	Network Layer	分组传送、路由选择和流量控制，主要用于实现端到端通信系统中中间节点的路由选择
分段	2	数据链路层	Data Link Layer	通过一些数据链路层协议和链路控制规程，在不太可靠的物理链路上实现可靠的数据传输
屏蔽载体	1	物理层	Physical Layer	实现相邻计算机节点之间比特数据流的透明传送，尽可能屏蔽掉具体传输介质和物理设备的差异

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。

沙漏计时器形状的TCP/IP协议族

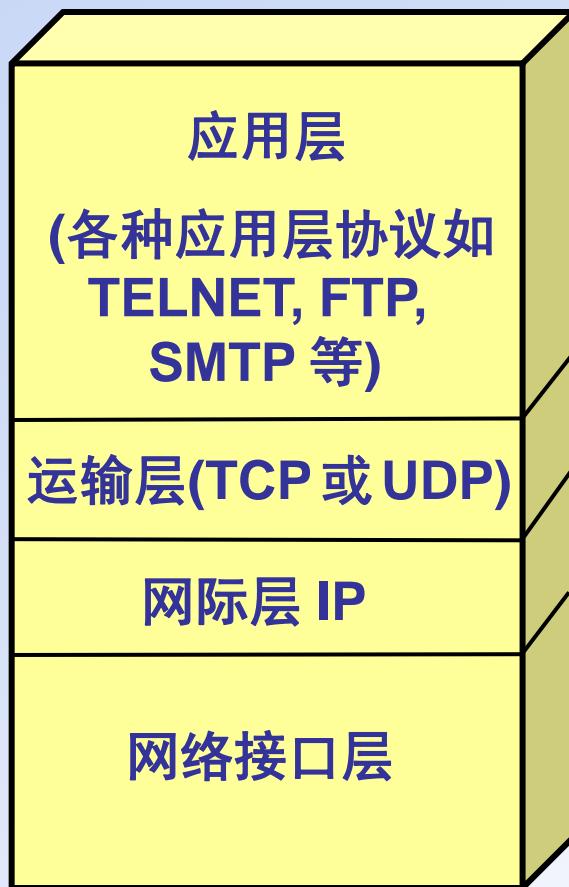


两种体系一比较

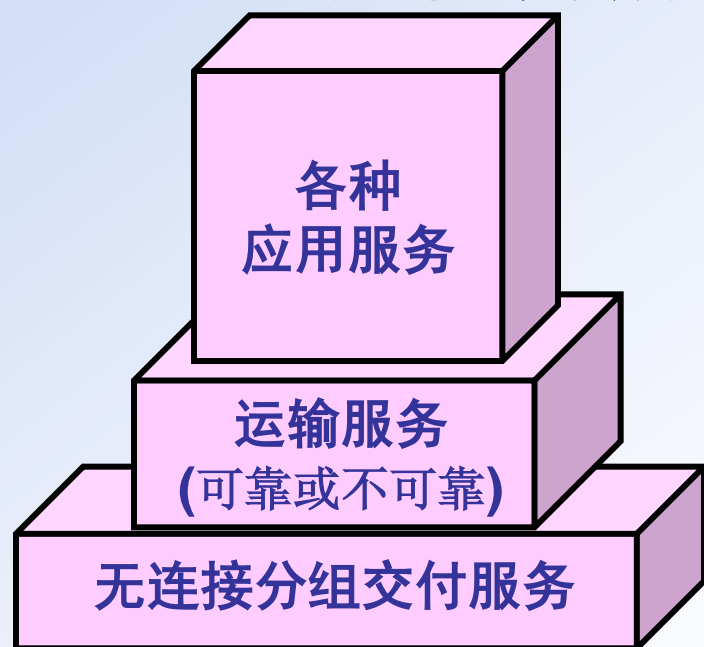
OSI 的体系结构



TCP/IP 的体系结构



TCP/IP 的三个服务层次



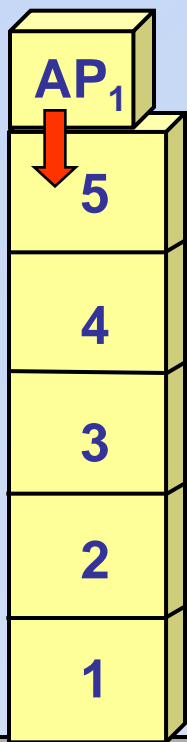
两种体系一比较



- OSI的七层协议体系结构既复杂又不实用，但其概念清楚，体系价格低廉，理论较完整。表示层和会话层作用不大
- TCP/IP的协议现在得到了全世界的承认，但它实际上并没有一个完整的体系结构。TCP/IP是一个四层的体系结构，它包含应用层、运输层、网际层和网络接口层。
- 但从实质上讲，TCP/IP只有三层，即应用层、运输层和网际层，因为最下面的网络接口层并没有什么具体内容。

五层协议体系结构—数据传输过程示例

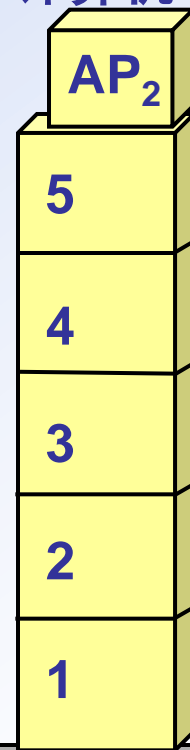
计算机 1



应用进程数据先传送到应用层

加上应用层首部，成为应用层的数据单元

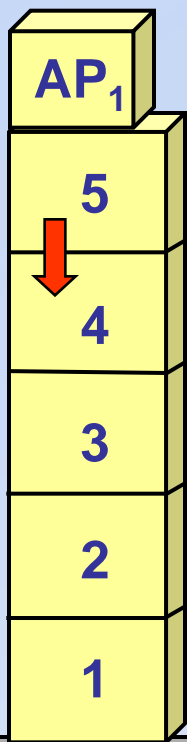
计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例

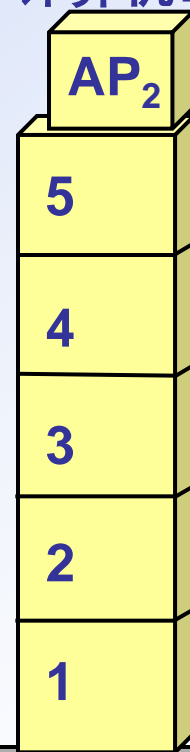


计算机 1



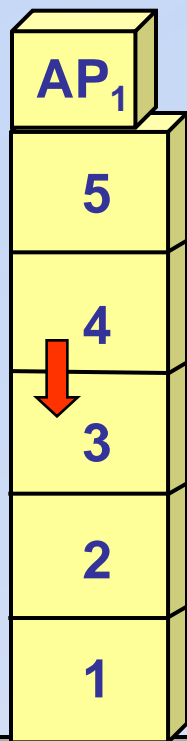
应用层数据单元再传送到运输层
加上运输层首部，成为运输层报文

计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例

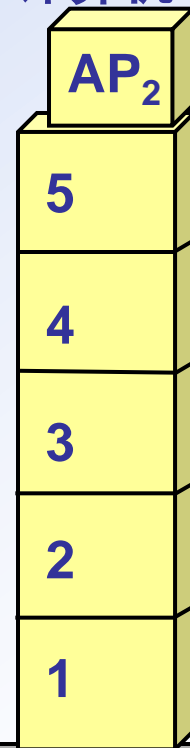
计算机 1



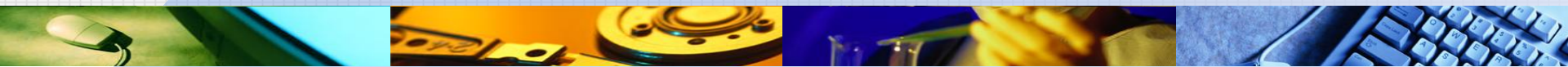
运输层报文再传送到网络层

加上网络层首部，成为 IP 数据报（或分组）

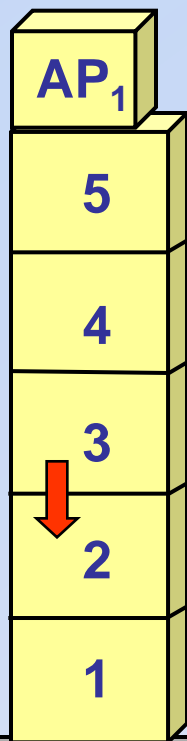
计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例



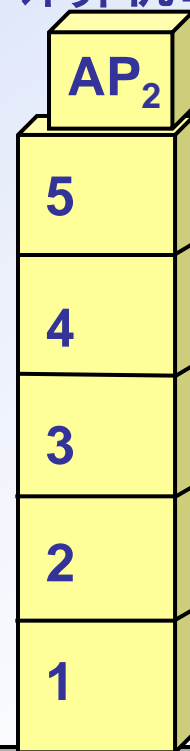
计算机 1



IP 数据报再传送到数据链路层

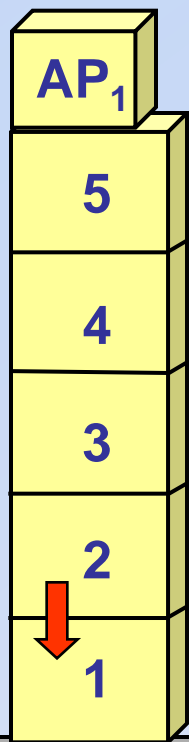
加上链路层首部和尾部，成为数据链路层帧

计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例

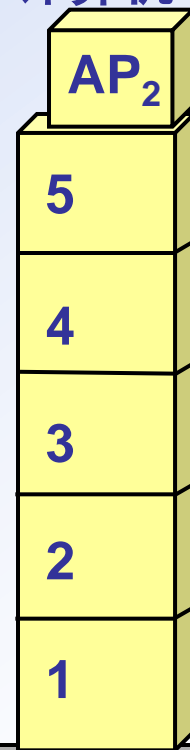
计算机 1



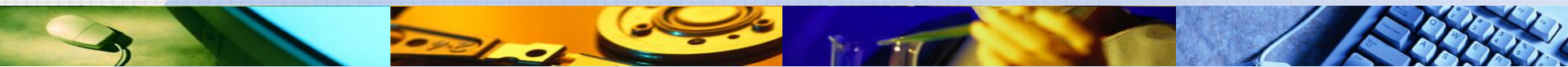
数据链路层帧再传送到物理层

最下面的物理层把比特流传送到物理媒体

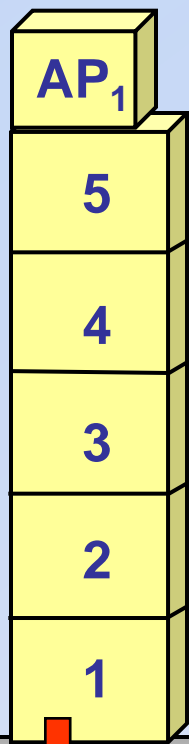
计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例



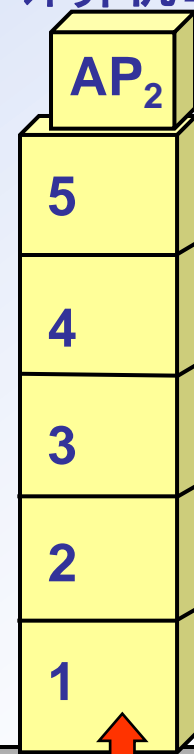
计算机 1



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

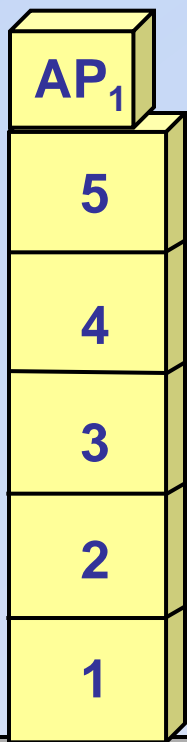
物理传输媒体

计算机 2

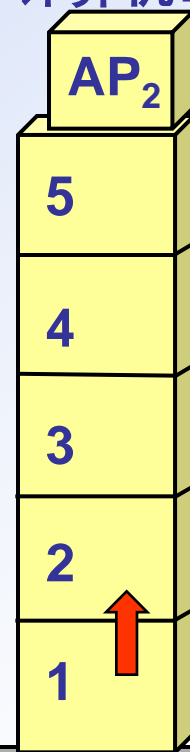


五层协议体系结构—数据传输过程示例

计算机 1



计算机 2

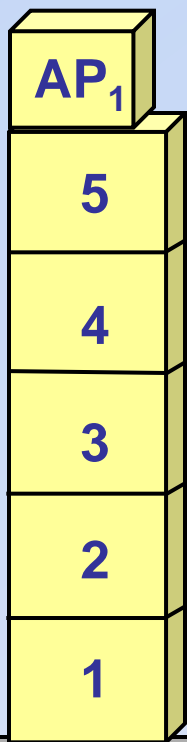


物理层接收到比特流，上交给数据链路层

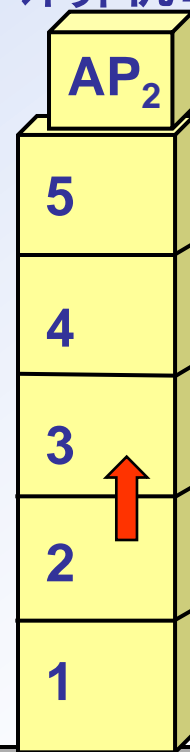


五层协议体系结构—数据传输过程示例

计算机 1



计算机 2



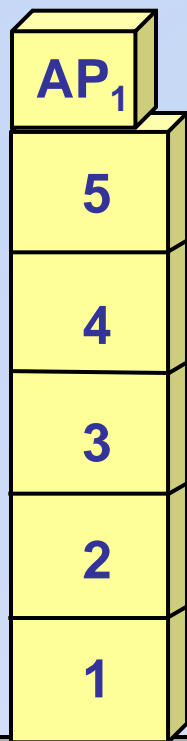
数据链路层剥去帧首部和帧尾部
取出数据部分，上交给网络层



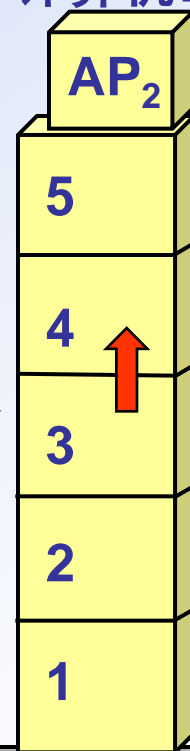
五层协议体系结构—数据传输过程示例



计算机 1



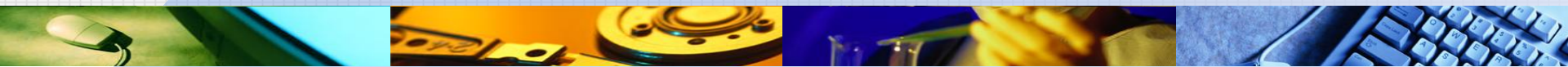
计算机 2



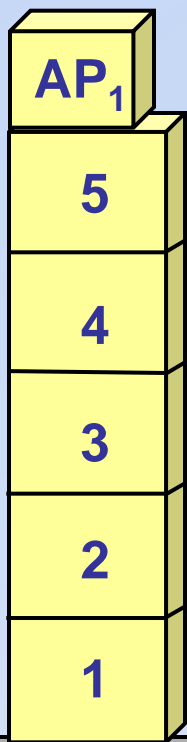
网络层剥去首部，取出数据部分
上交给运输层



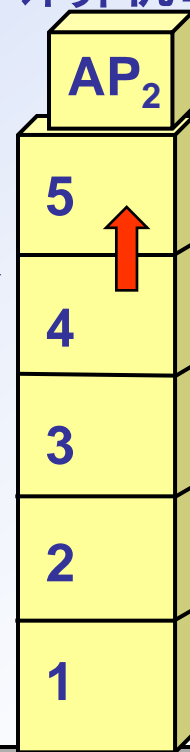
五层协议体系结构—数据传输过程示例



计算机 1



计算机 2



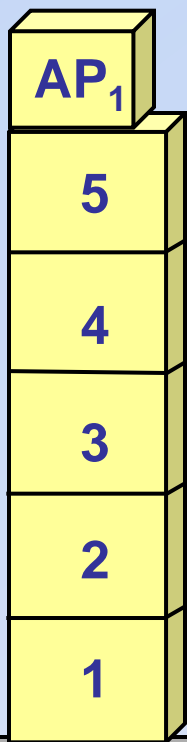
运输层剥去首部，取出数据部分
上交给应用层



五层协议体系结构—数据传输过程示例

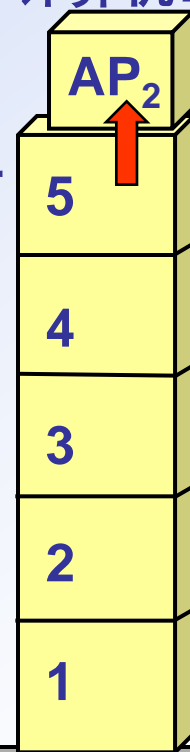


计算机 1



应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

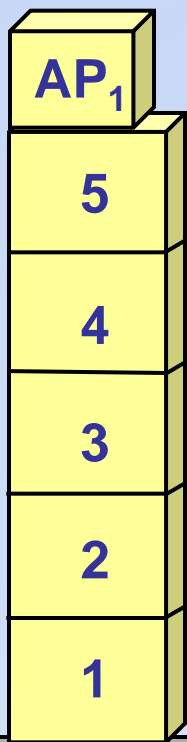
计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例

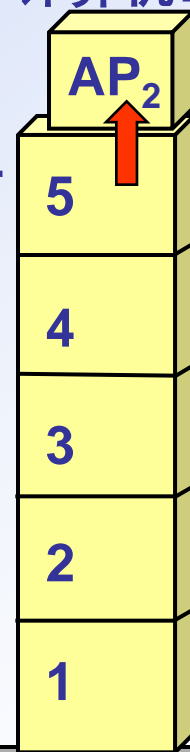


计算机 1

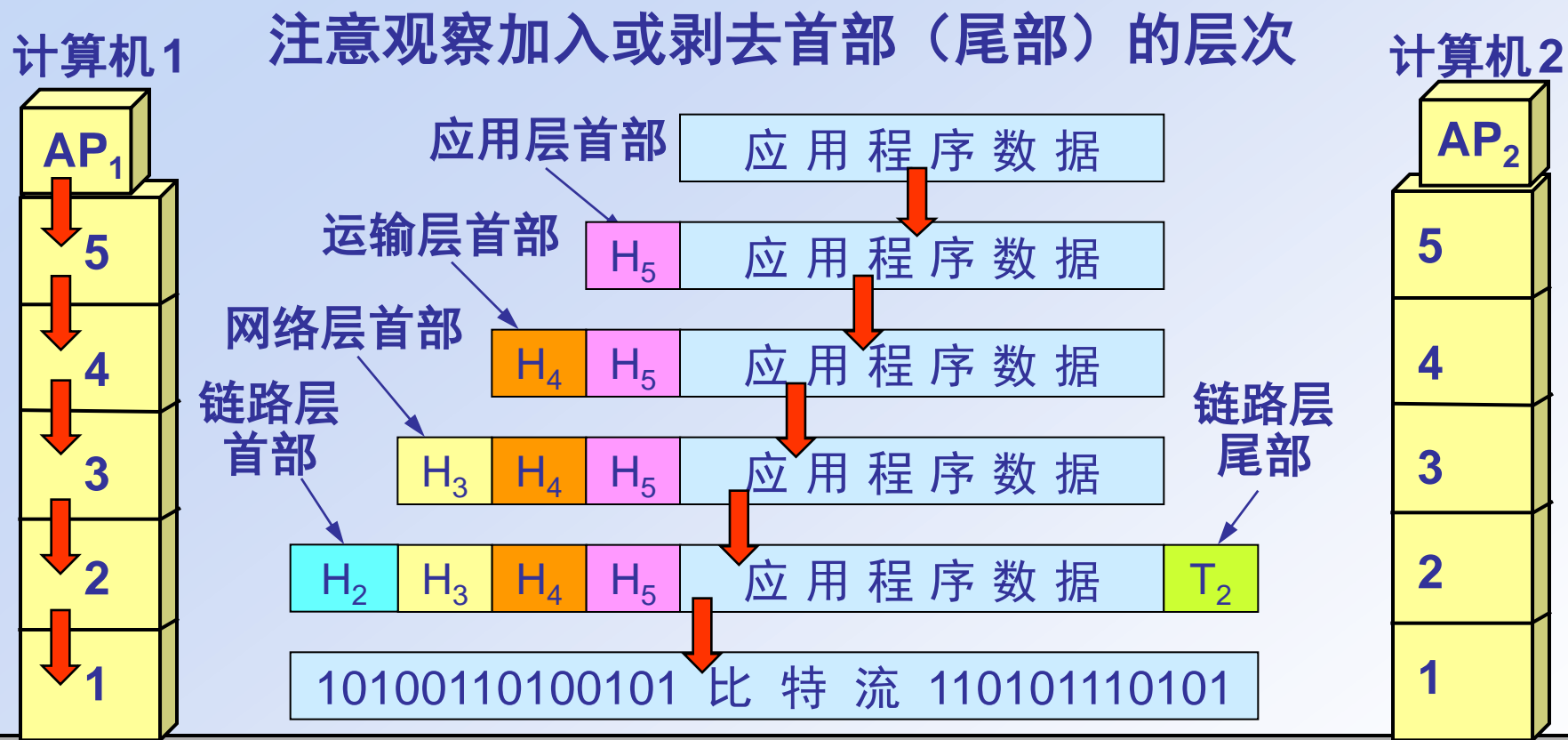


应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

计算机 2

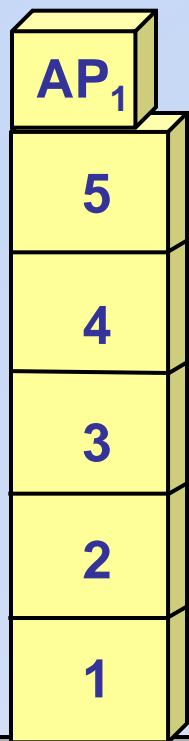


五层协议体系结构—数据传输过程示例

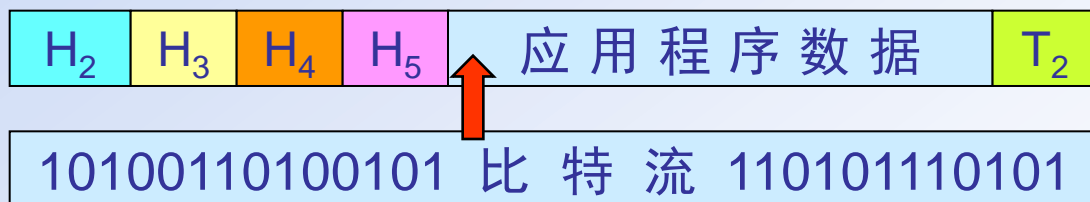


五层协议体系结构—数据传输过程示例

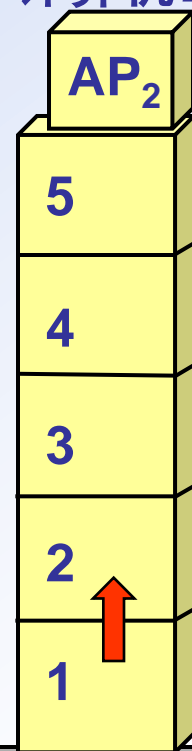
计算机 1



计算机 2 的物理层收到比特流后
交给数据链路层

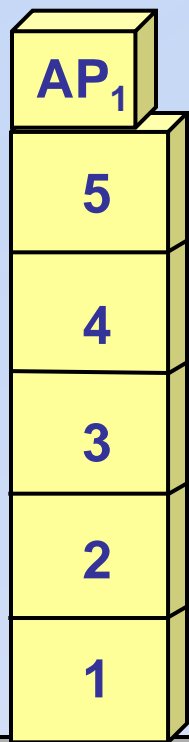


计算机 2

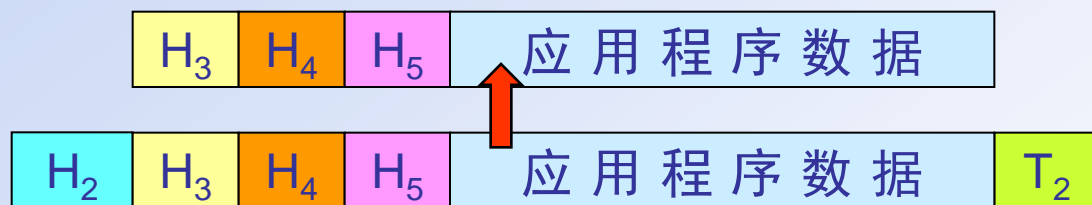


五层协议体系结构—数据传输过程示例

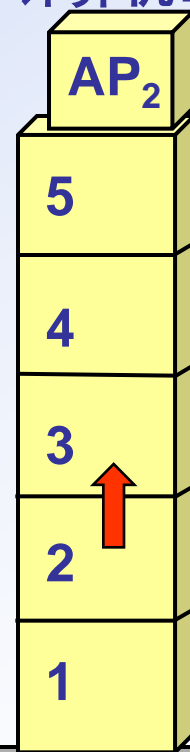
计算机 1



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

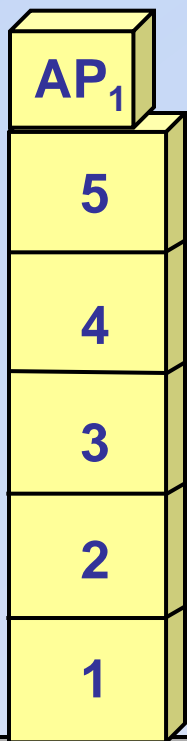


计算机 2

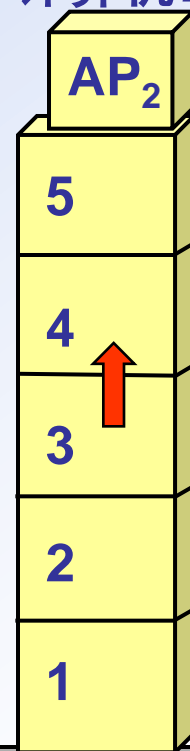


五层协议体系结构—数据传输过程示例

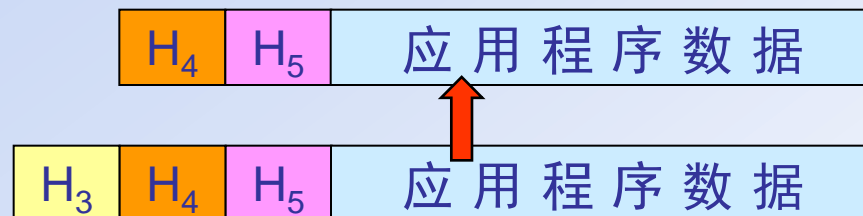
计算机 1



计算机 2

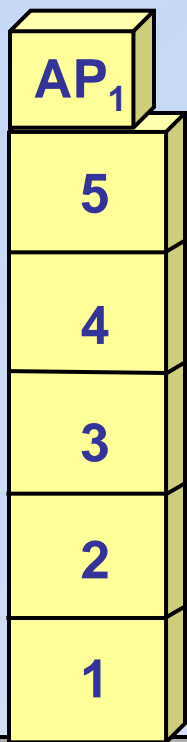


网络层剥去分组首部后
把分组的数据部分交给运输层

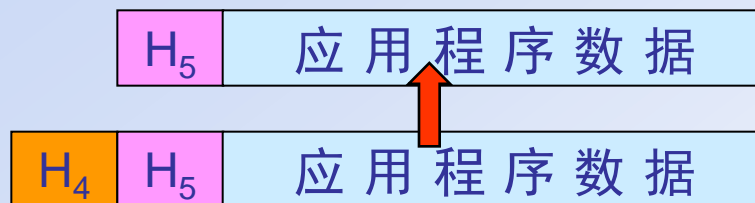


五层协议体系结构—数据传输过程示例

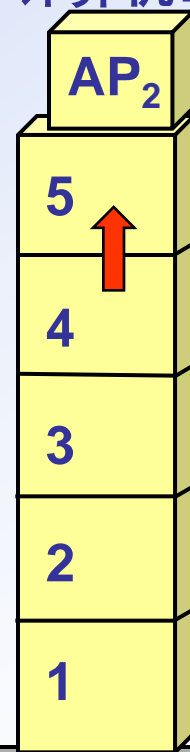
计算机 1



运输层剥去报文首部后
把报文的数据部分交给应用层

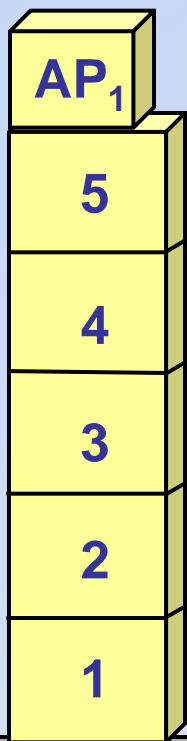


计算机 2



五层协议体系结构—数据传输过程示例

计算机 1



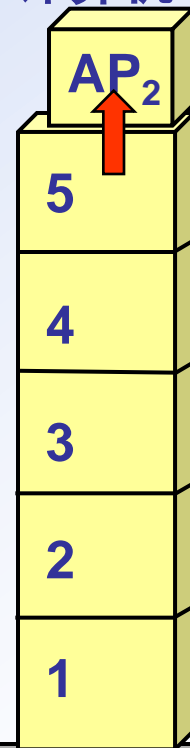
应用程序数据

H_5

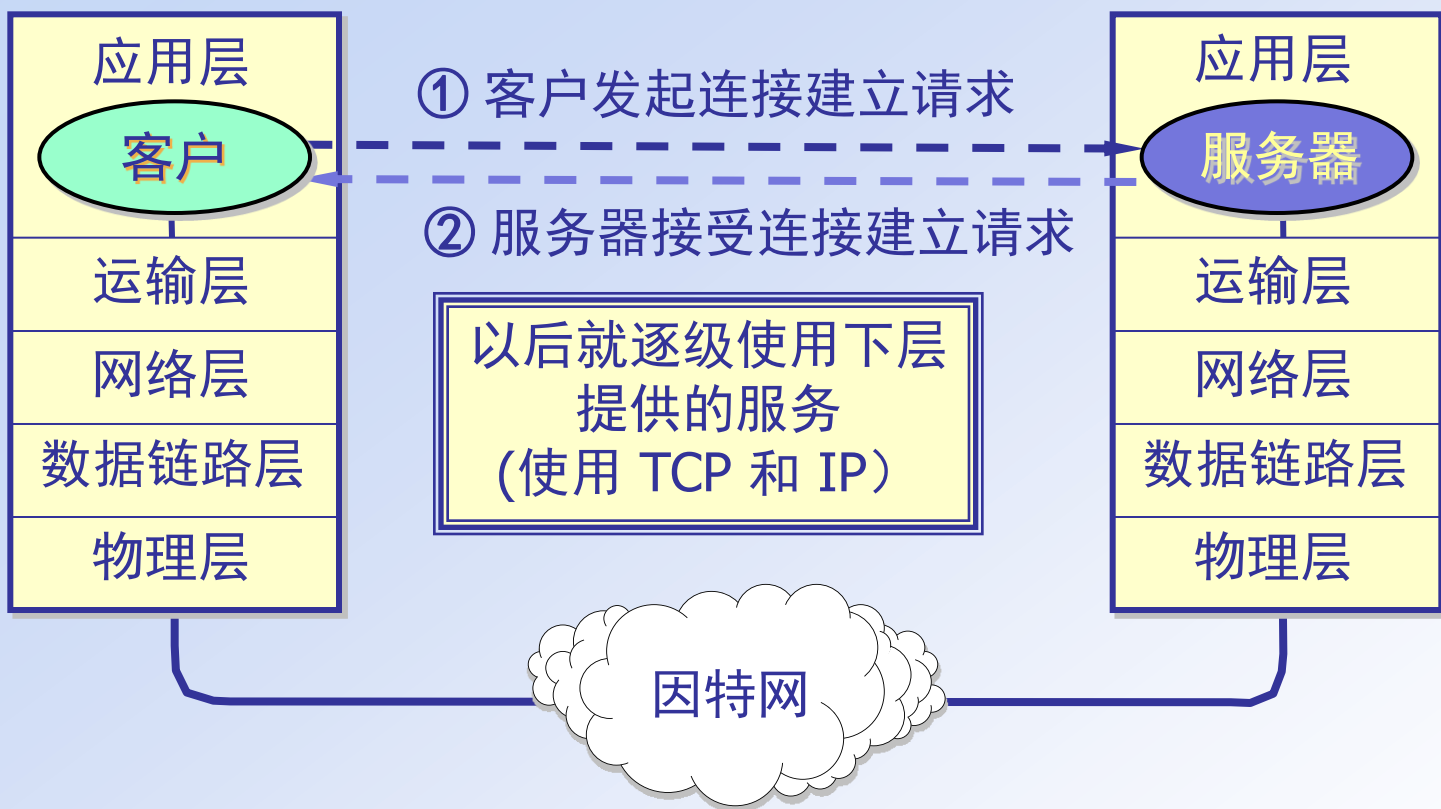
应用程序数据

应用层剥去应用层首部后
把应用程序数据交给应用进程

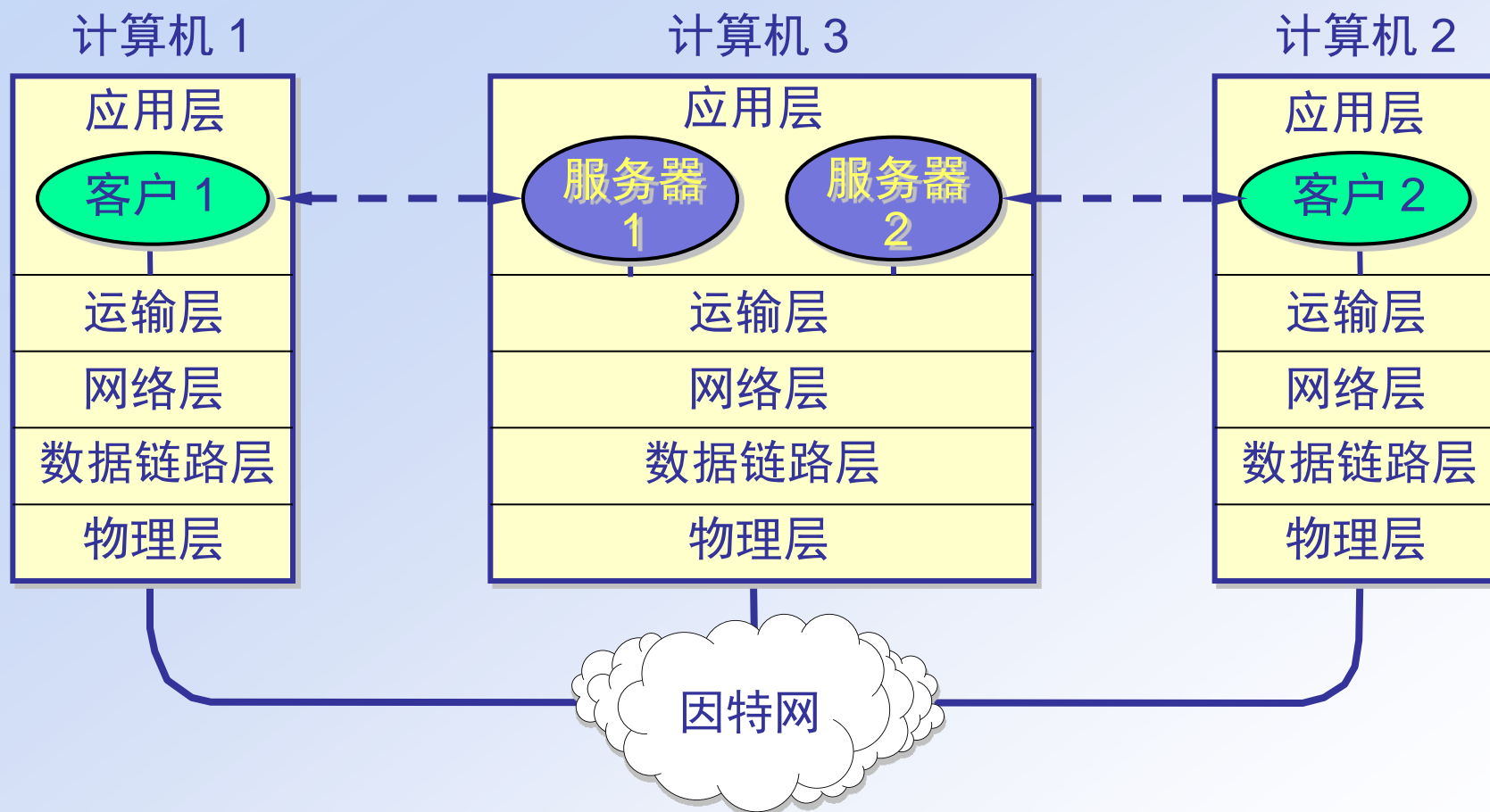
计算机 2



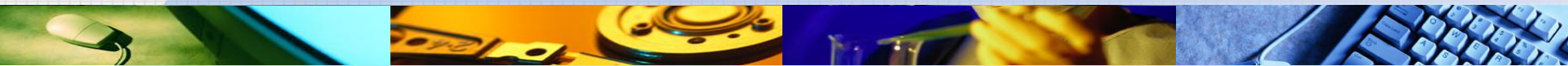
客户进程和服务进程 使用 TCP/IP 协议进行通信



同时运行多个服务器进程



主题 4



1

基本概念和网络发展

2

网络交换技术

3

计算机网络体系结构

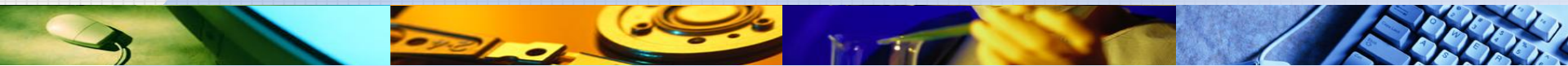
4

计算机网络的性能

计算机网络的性能指标—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，或 kb/s，Mb/s，Gb/s 等

主要性能指标—带宽



- “带宽”（Bandwith）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。

- 常用的带宽单位是

- 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)

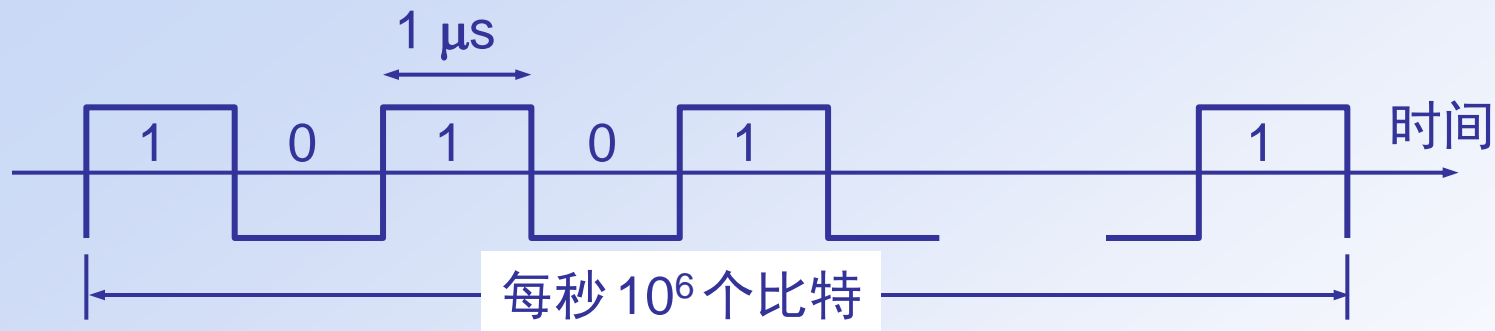
- 注意：在计算机界， $K = 2^{10} = 1024$

$$M = 2^{20}, G = 2^{30}, T = 2^{40}。$$

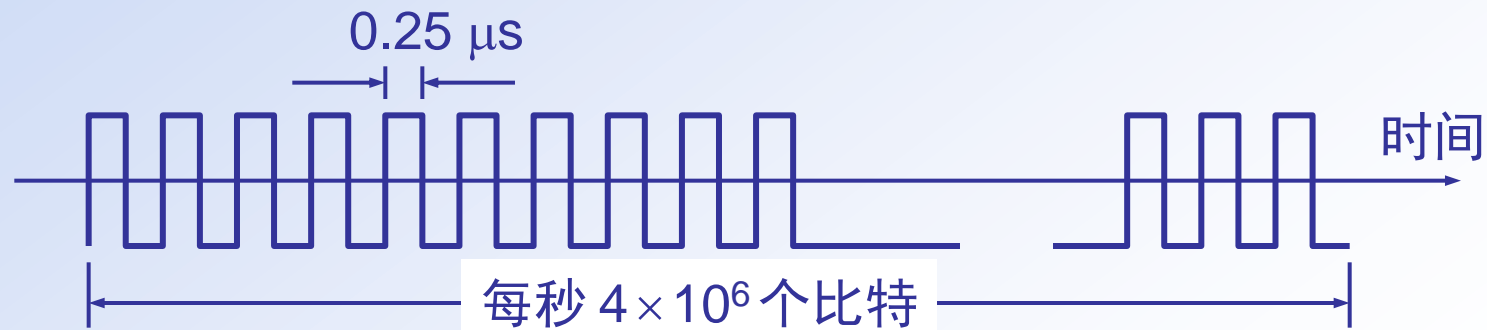
数字信号流随时间的变化

❖ 在时间轴上信号的宽度随带宽的增大而变窄。

带宽为
1 Mb/s



带宽为
4 Mb/s



计算机网络的性能指标—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。

主要性能指标—时延

时延(delay 或 latency):

- 发送时延: 发送数据时, 数据块从结点进入到传输媒体所需要的时间。
- 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。
- 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。
- 排队时延: 结点缓存队列中分组排队所经历的时延。

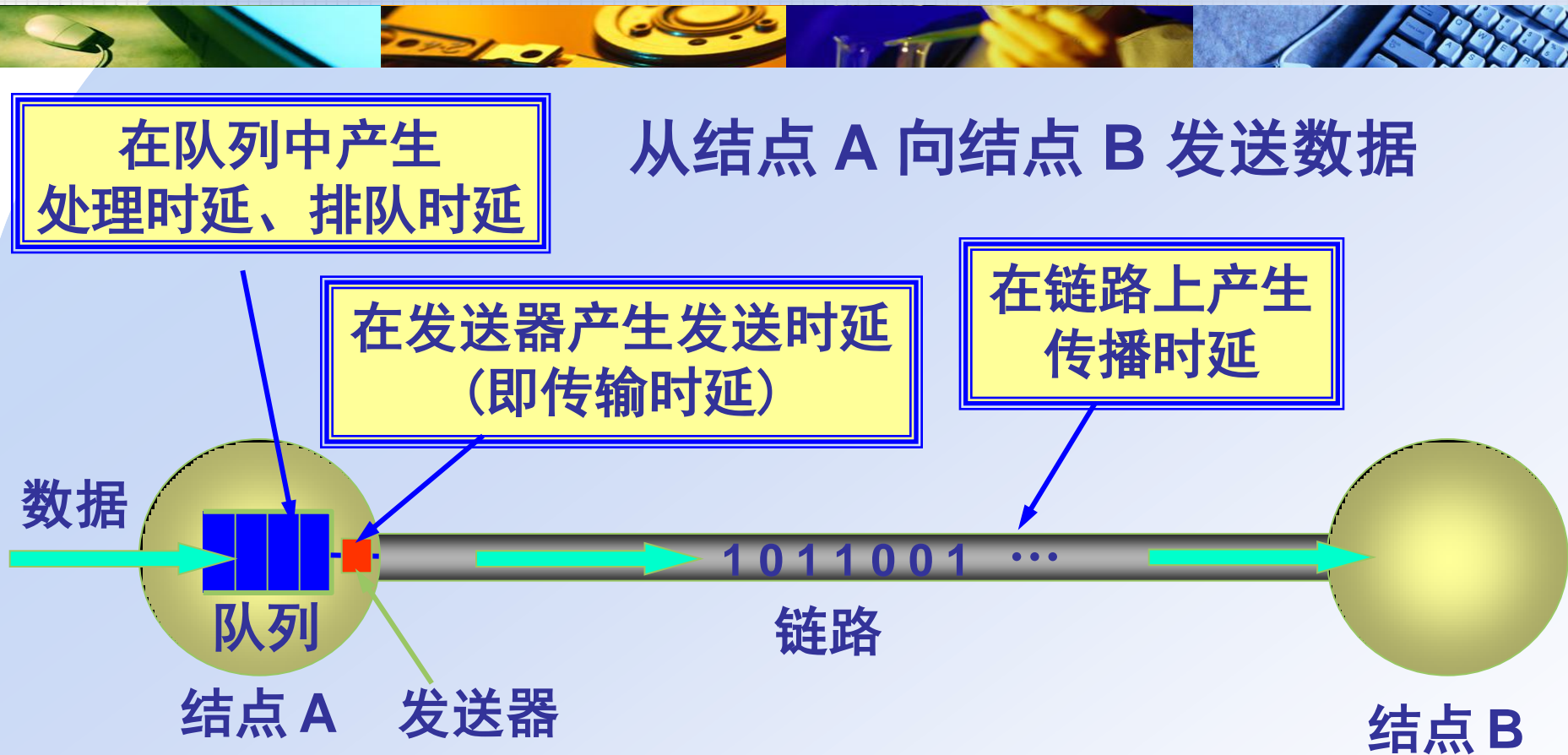
注意:

传输速率和
传播速率的
区别

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据块长度 (比特)}}{\text{信道带宽 (比特/秒)}}$$

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

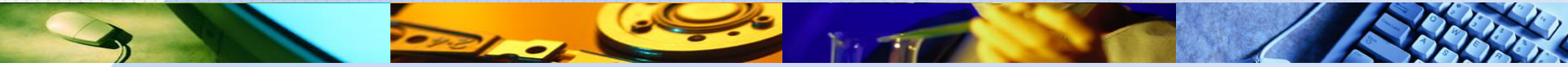
四种时延产生的地方



数据经历的总时延就是发送时延、传播时延和处理时延之和：

总时延 = 发送时延 + 传播时延 + 处理时延 + 排队时延

时延带宽积



时延带宽积

(传播) 时延

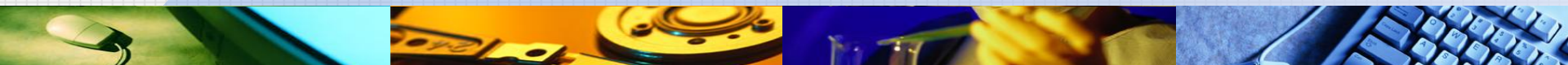
带宽



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

- ❖ 链路的时延带宽积又称为以比特为单位的链路长度。
- ❖ 只有代表链路的管道充满比特时，链路才得到充分利用。

利用率



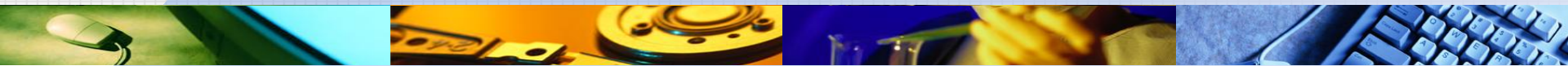
- ❖ **信道利用率**指出某信道有百分之几的时间是被利用的（有数据通过）。完全空闲的信道的利用率是零。
- ❖ **网络利用率**则是全网络的信道利用率的加权平均值。
- ❖ 信道利用率并非越高越好。

时延与网络利用率的关系

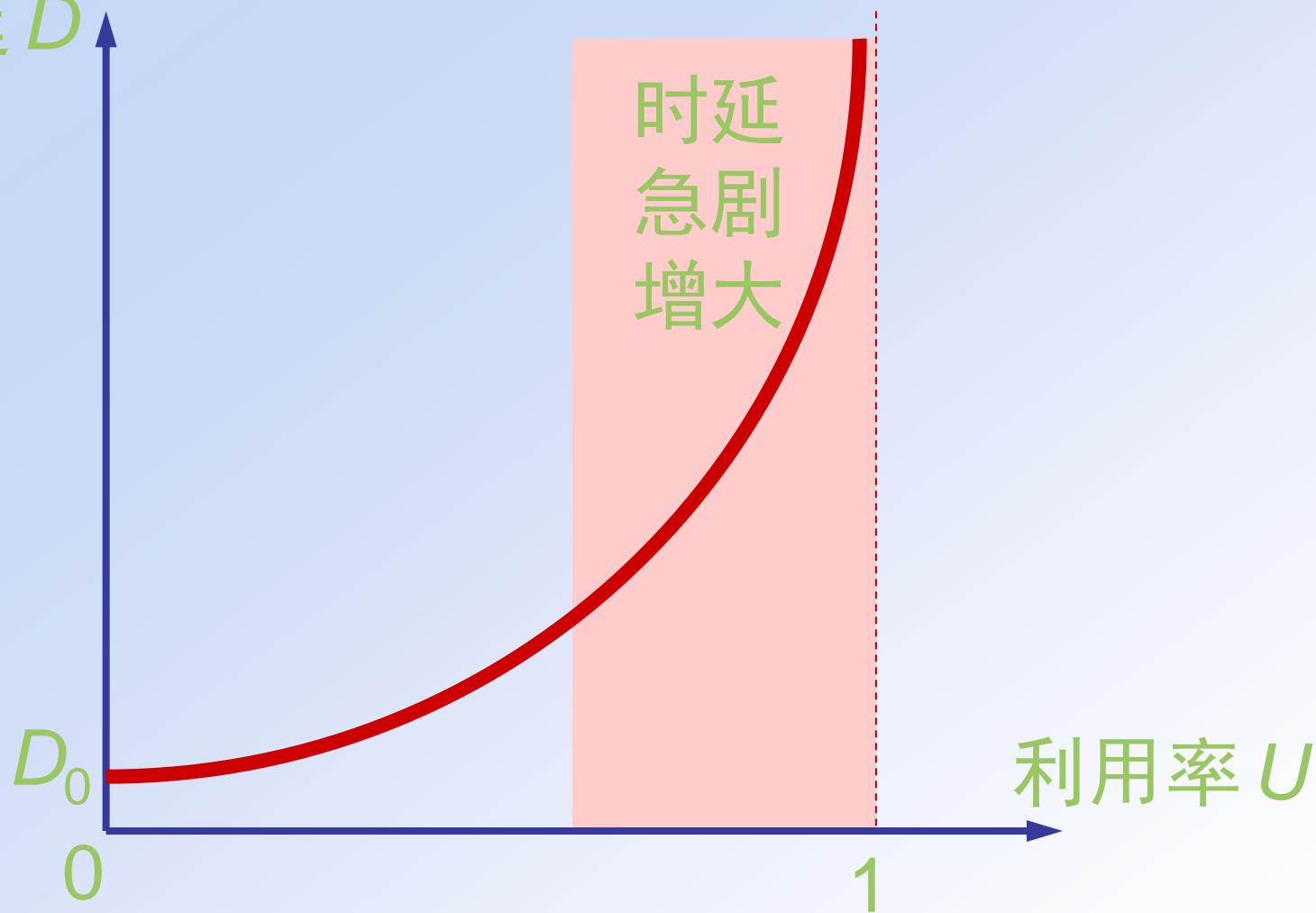
- ❖ 根据排队论的理论，当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加。
- ❖ 若令 D_0 表示网络空闲时的时延， D 表示网络当前的时延，则在适当的假定条件下，可以用下面的简单公式表示 D 和 D_0 之间的关系：

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

U 是网络的利用率，数值在 0 到 1 之间。



时延 D



计算机网络的非性能特征



- ❖ 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