



# 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
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



## 1.1

### 计算机网络 在信息时代 中的作用

#### 1.1.1

#### 计算机网络的定义

#### 1.1.2

#### 计算机网络的特点



## 信息时代：以网络为核心





## 大众熟悉的三大类网络

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**。



## “三网融合”：融入现代计算机网络技术





## Internet: 全球最大、最重要的计算机网络

- 如何称呼 Internet?
- 因特网: 推荐, 但却长期未得到推广。
- 互联网: 目前流行最广, 事实上的标准译名。
- 互联网  $\neq$  互连网。
  - ◆ 互连网: 局部范围互连起来的计算机网络。

思考: 它们说的是哪个网?

上网, 联网, 网民, 网吧, 网银, 网购, 网管, 知网。



# 互联网是什么？

## 应用和服务

- 游戏，视频，社交，电子邮件，购物，网店，
- 网银，无现金支付，数字钱包，数字货币， ...

## 工作原理

- 互连结构，交换技术，
- TCP/IP 体系结构与协议， ...





## 互联网的 2 个重要基本特点

### 连通性 (connectivity)

- 使上网用户之间可以非常便捷、非常经济地交换各种信息
- 好像这些用户终端都彼此直接连通一样。

### 资源共享 (Sharing)

- 实现信息共享、软件共享、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地方便使用。

是 Internet 提供许多服务的基础。



## 互联网在生活中地位



已经融入人们的生活、工作、学习和交往。



已经成为社会最为重要的基础设施之一。



## 互联网+：新的经济形态

- 指“互联网+各个传统行业”。
- 把互联网的创新成果深度融合于经济社会各领域。





## 互联网的负面影响



传播病毒



窃取：数据，钱财等



散布谣言



不良信息



欺诈



网瘾



.....

**需要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

### ● 计算机网络：

- ◆ 由若干**节点**(node)和连接这些节点的**链路**(link)组成。
- ◆ **节点**可以是计算机、集线器、交换机或路由器等。



图1-1 (a) 简单的网络



## 1.2.1 网络的网络

- **互连网 (internetwork 或 internet):**
  - ◆ **多个网络**通过一些**路由器相互连接**起来，构成了一个覆盖范围更大的计算机网络。
  - ◆ **“网络的网络”** (network of networks)。

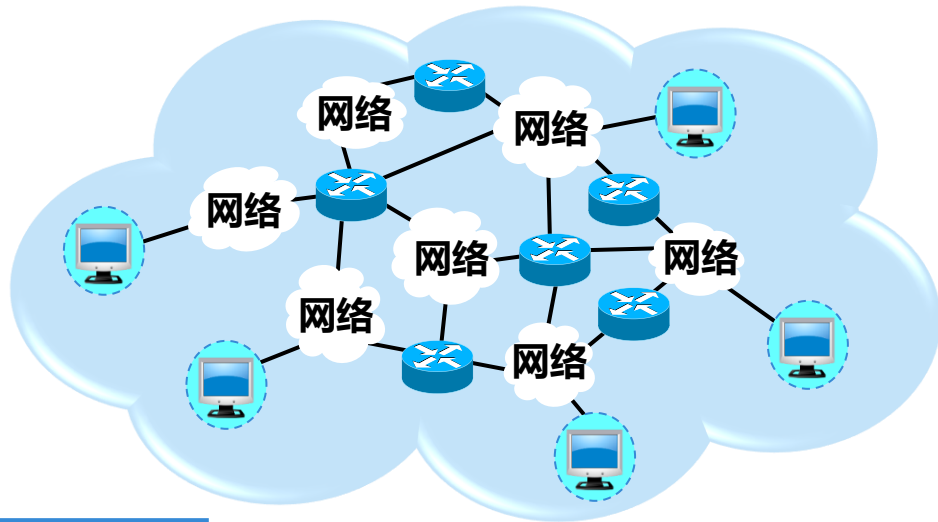
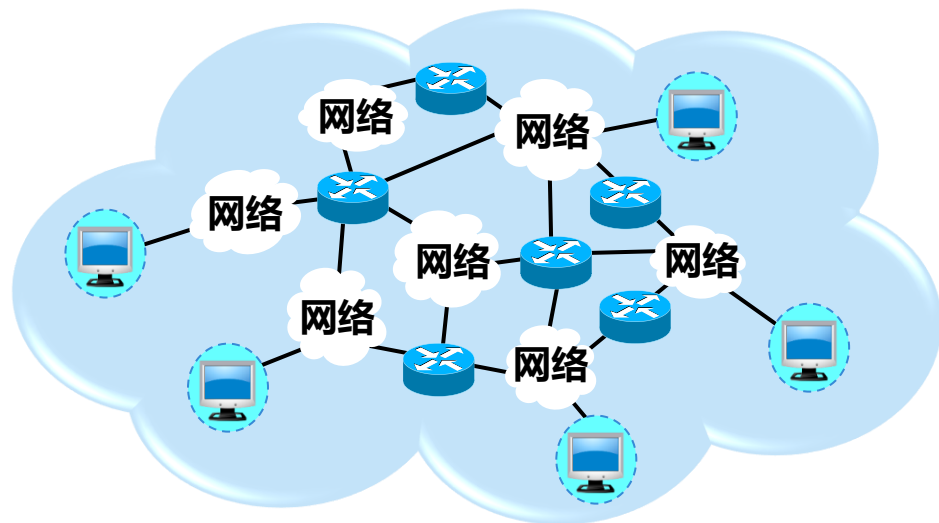


图1-1 (b) 由网络构成的互连网



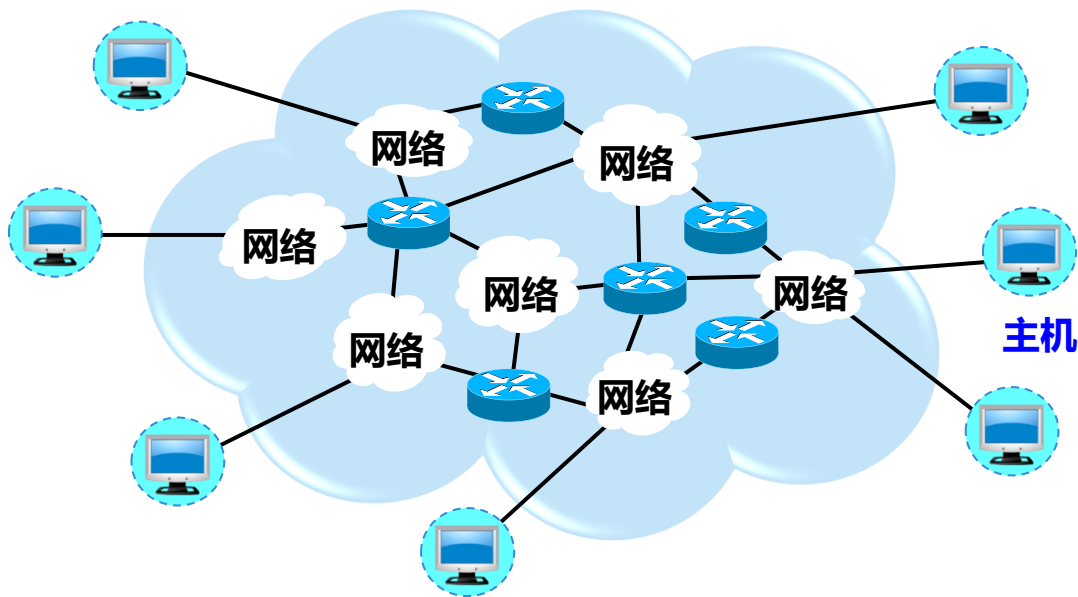
## 用“云”表示网络：主机在“云”里







## 用“云”表示网络：主机在“云”外





## 网络与互连网

- **网络**：把许多计算机连接在一起。
- **互连网**：把许多网络通过一些路由器连接在一起。与网络相连的计算机常称为**主机**。
- **互连网 (internet) ≠ 互联网 (Internet)**



## 1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段

**1969 – 1990**

从单个网络 ARPANET  
向互联网发展。

**1985 – 1993**

建成了三级结构的  
互联网。

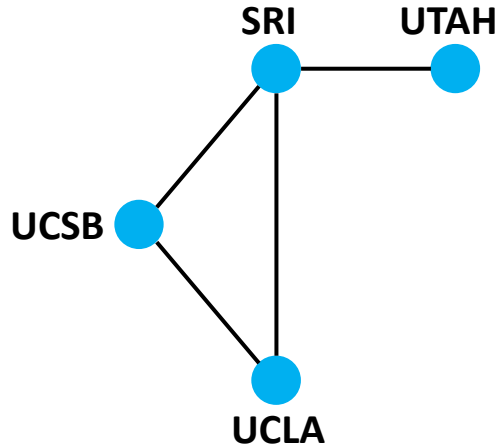
**1993 – 现在**

全球范围的多层次  
ISP 结构的互联网。



## 第一阶段：1969 – 1990

- **ARPANET**：最初只是一个单个的分组交换网，**不是**一个互连网。
- 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。

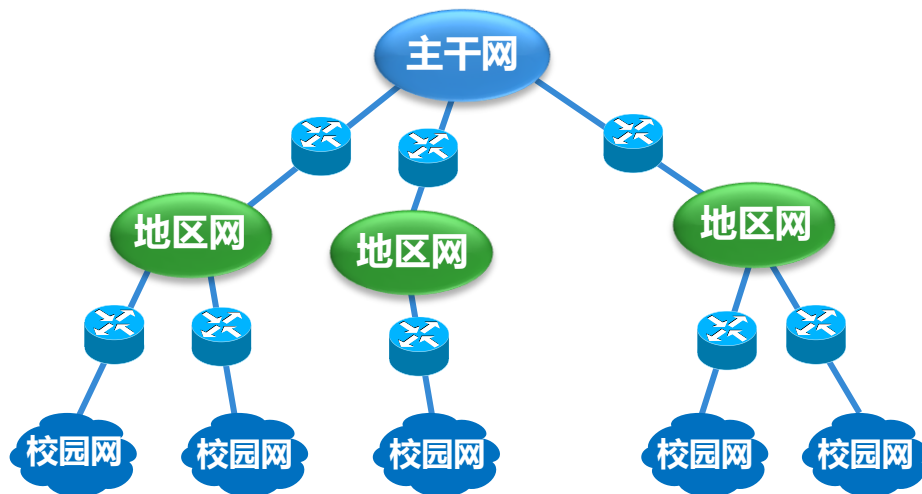


1969 年的 ARPANET



## 第二阶段：1985 – 1993

- 国家科学基金网 NSFNET。
- **三级结构：**主干网、地区网和校园网（或企业网）。
- 覆盖了全美国主要的大学和研究所以，并且成为互联网中的主要组成部分。



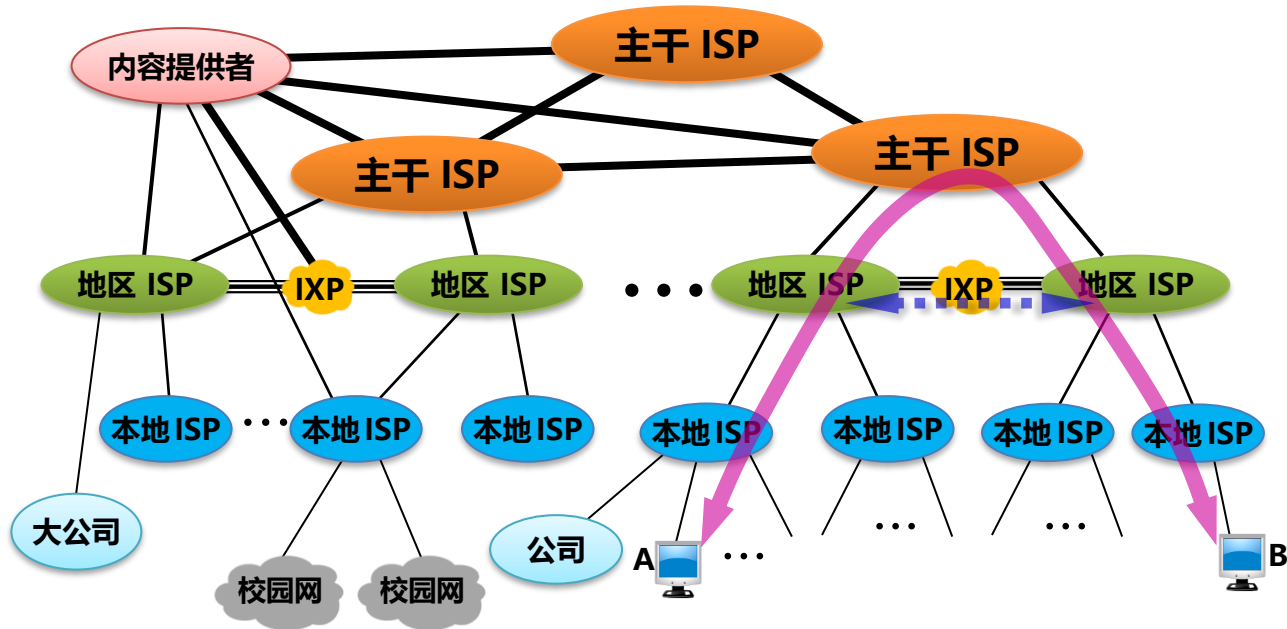


## 第三阶段：1993 – 现在

- 出现了**互联网服务提供者 ISP** (Internet Service Provider):
  - ◆ 提供**接入**到互联网的服务。
  - ◆ 需要收取一定的费用。
- **多层次 ISP 结构:**
  - ◆ 主干 ISP、地区 ISP 和本地 ISP。
  - ◆ 覆盖面积大小和所拥有的 IP 地址数目的不同



## 第三阶段：1993 – 现在



通信举例：主机A → 本地 ISP → 地区 ISP → 主干 ISP → 地区 ISP → 本地 ISP → 主机B



### 第三阶段：1993 – 现在

- **互联网交换点 IXP** (Internet eXchange Point): 允许两个网络直接相连并快速交换分组。
  - ◆ 常采用工作在数据链路层的网络交换机。
  - ◆ 世界上较大的 IXP 的峰值吞吐量都在 Tbit/s 量级。
- **内容提供者** (Content Provider): 在互联网上向所有用户提供视频等内容的公司。 **不向用户提供互联网的转接服务。**

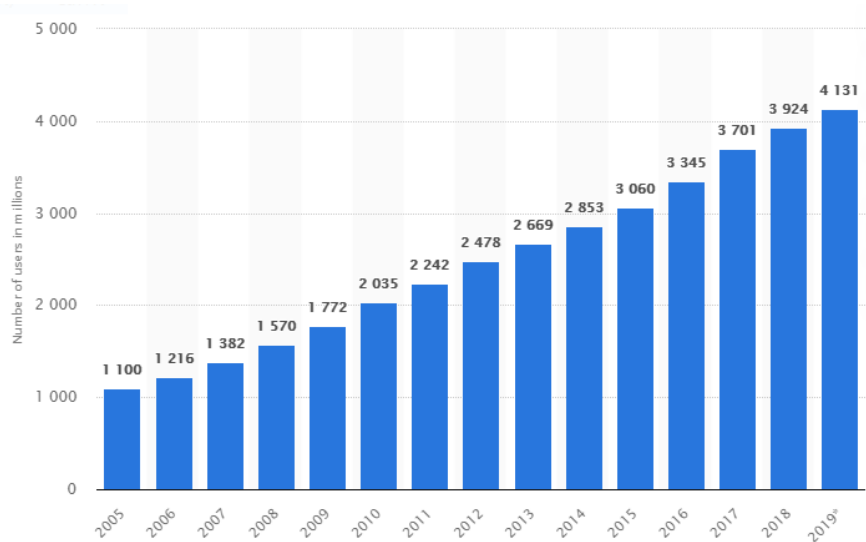




## 20 世纪 90 年代：万维网 WWW 的问世

- **万维网 WWW (World Wide Web):**

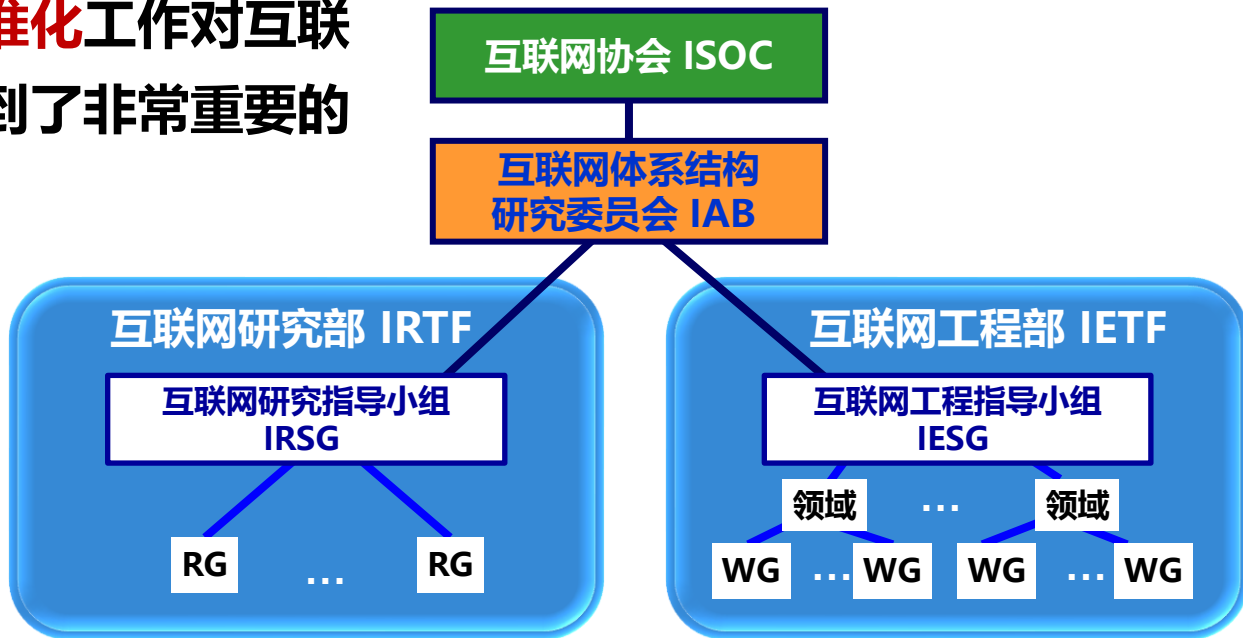
- ◆ 由欧洲原子核研究组织 CERN 开发。
- ◆ 成为互联网指数级增长的主要驱动力。
- ◆ 2019 年 3 月底，互联网的用户数已超过了 43.8 亿。





## 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。



组织架构

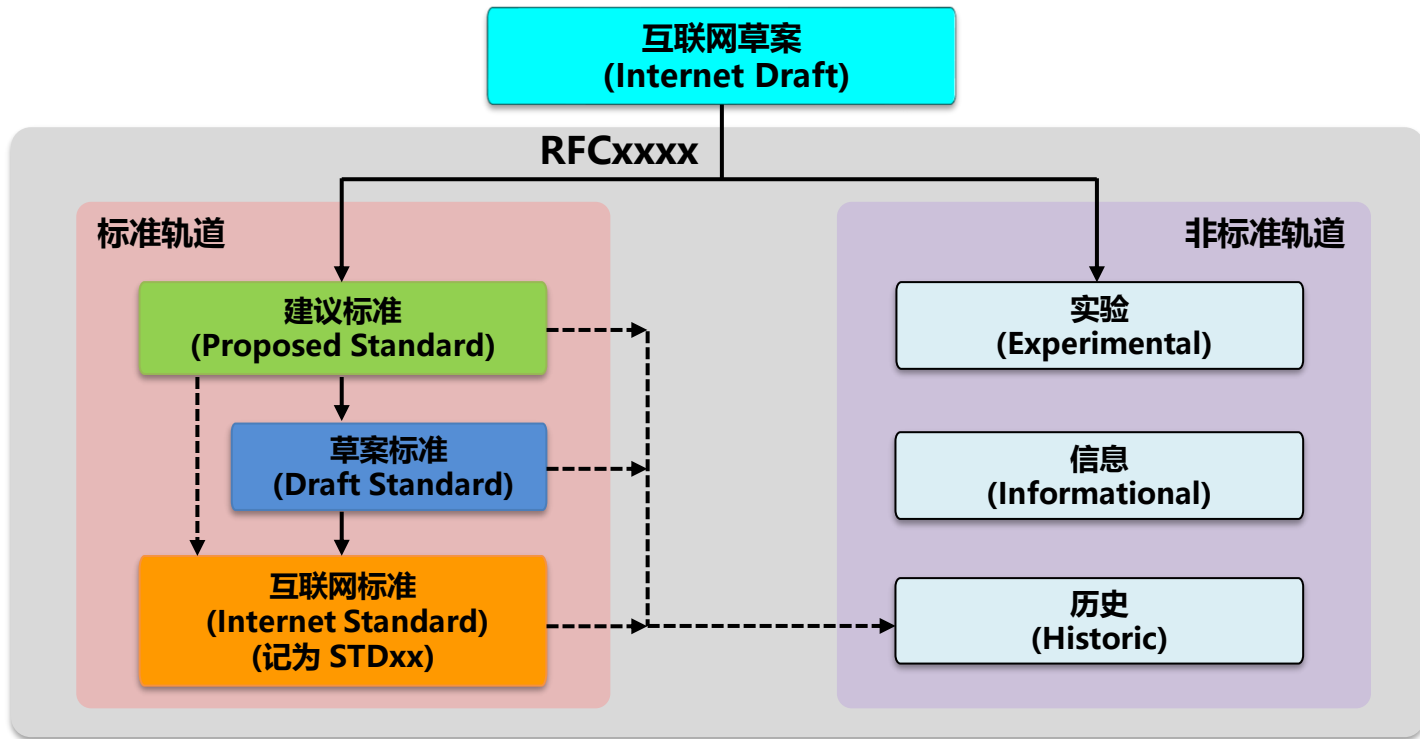


## 标准发表：以 RFC 的形式

- **RFC**: Request For Comments（请求评论）。
- 所有的 RFC 文档都可从互联网上**免费**下载。
- **任何人**都可以用电子邮件随时发表对某个文档的意见或建议。
- **但并非所有的 RFC 文档都是互联网标准**。只有很少部分的 RFC 文档最后才能变成互联网标准。
- RFC 文档**按发表时间的先后**编上序号（即 RFCxxxx，xxxx 是阿拉伯数字）。



# 标准化过程





## 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



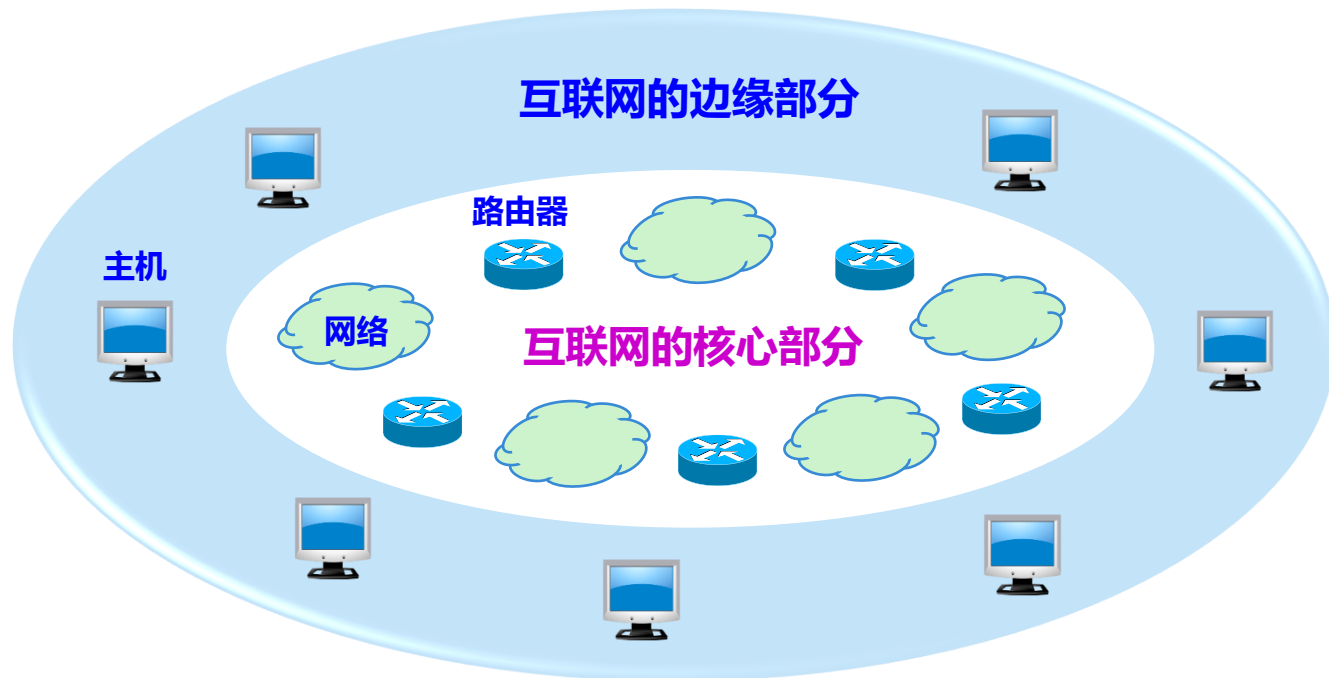
## 1.3 互联网的组成

从互联网的工作方式上看，可以划分为两大块：

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



## 1.3 互联网的组成





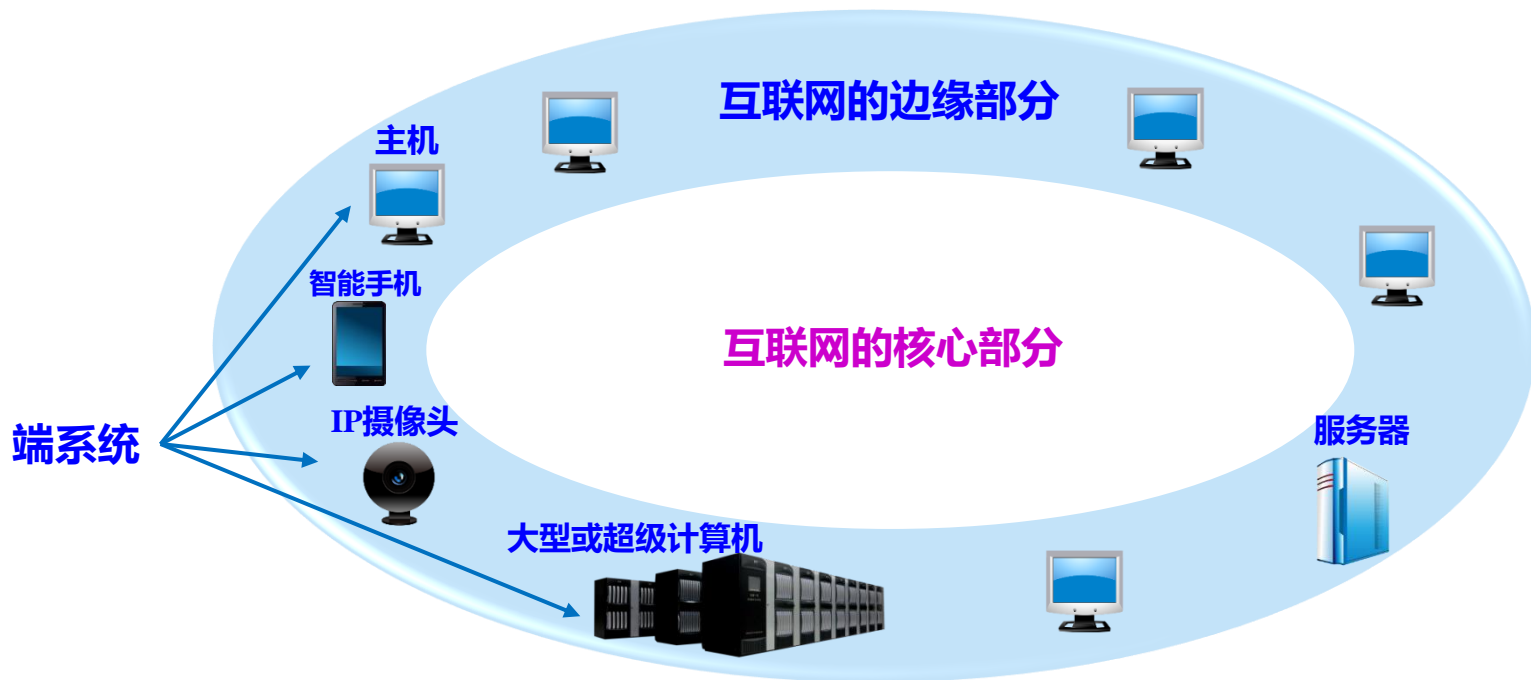
## 1.3.1 互联网的边缘部分

- 处在互联网边缘部分的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差别：**
  - ◆ 小的端系统：普通个人电脑、智能手机、网络摄像头等。
  - ◆ 大的端系统：非常昂贵的大型计算机或服务器。
- 端系统的拥有者：可以是个人、单位、或某个 ISP。





## 1.3.1 互联网的边缘部分





## “计算机之间通信” 的含义

实际上是指：

主机 A 的某个**进程**和主机 B 上的另一个**进程**进行通信。



## 端系统之间的两种通信方式

### 客户/服务器方式

- **Client / Server 方式**
- **简称为 C/S 方式**

### 对等方式

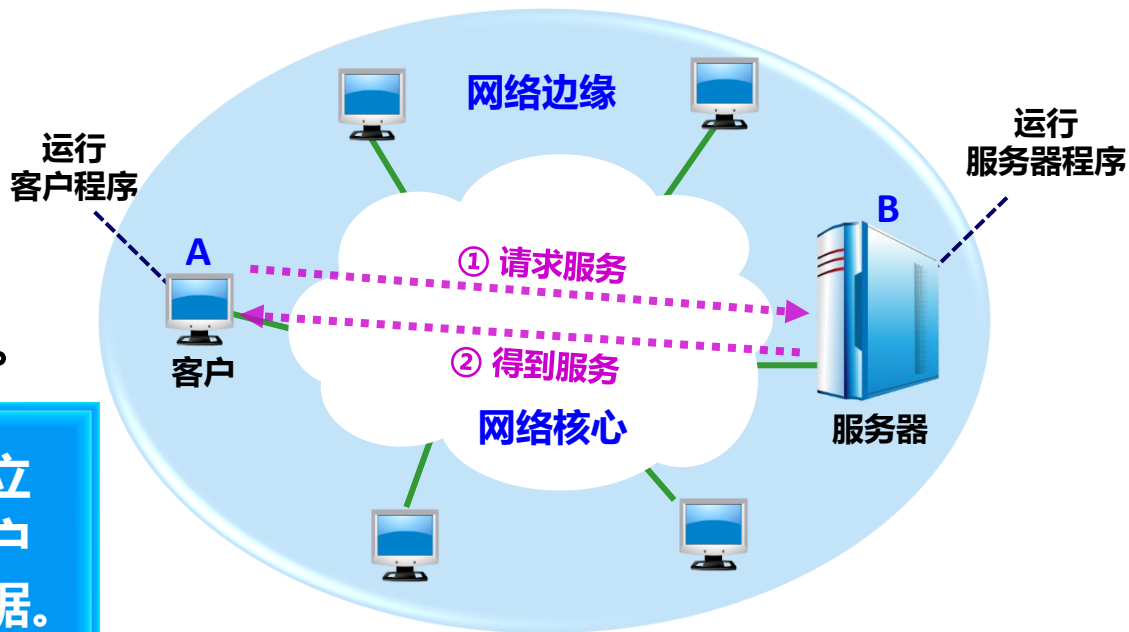
- **Peer to Peer 方式**
- **简称为 P2P 方式**



## 1. 客户-服务器方式 (C/S 方式)

- 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**。

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



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。



## 客户程序和服务器程序主要特点

### ● 客户程序

- ◆ 被用户调用后运行，需主动向远地服务器发起通信（请求服务）。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。

### ● 服务器程序

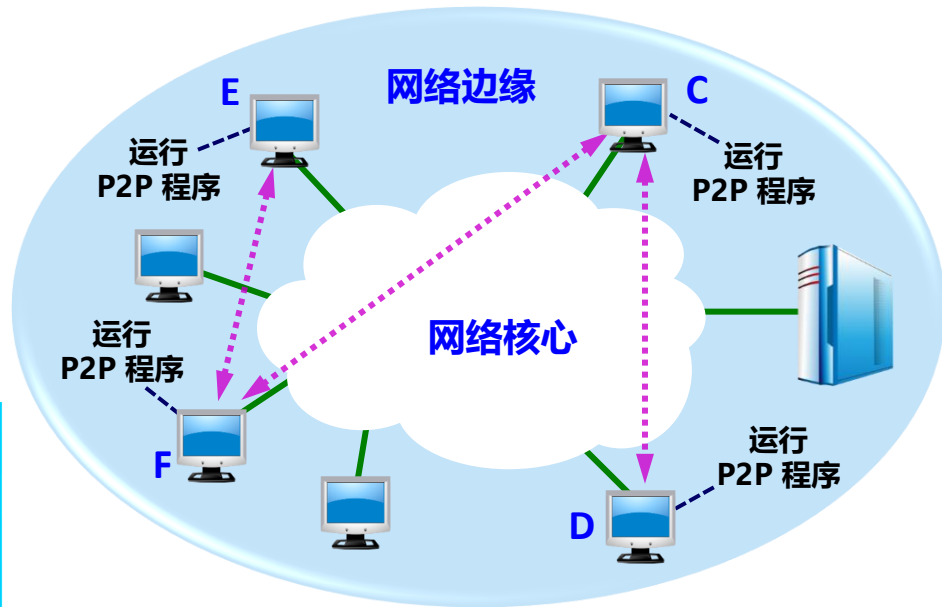
- ◆ 专门用来提供某种服务的程序，可同时处理多个客户请求。
- ◆ 一直不断地运行着，被动地等待并接受来自各地的客户的通信请求。不需要知道客户程序的地址。
- ◆ 一般需要强大的硬件和高级的操作系统支持。



## 2. 对等连接方式 (P2P 方式)

- 两台主机在通信时**不区分**服务请求方和服务提供方。
- 只要都运行了 P2P 软件, 就可以进行**平等的、对等**连接通信。

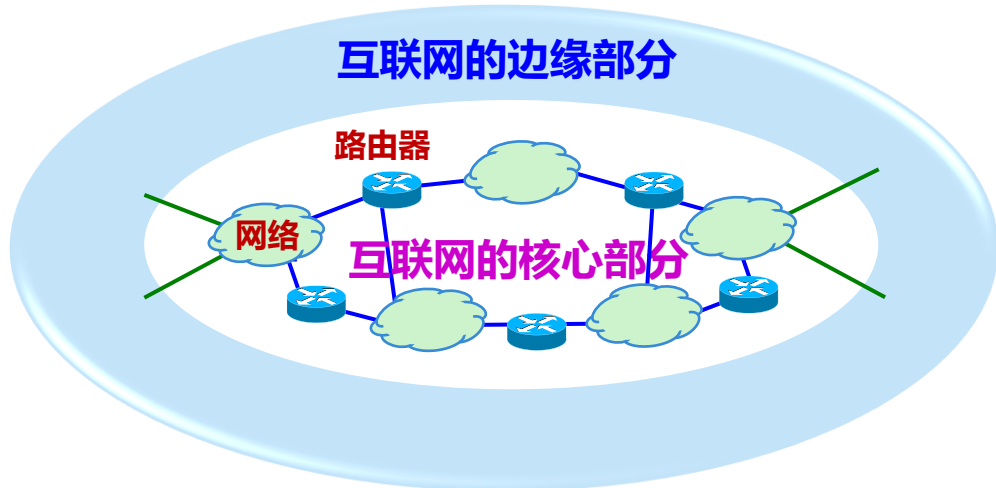
对等连接方式从本质上看仍然是使用客户服务器方式, 只是对等连接中的每一个主机**既是客户又是服务器**。





## 1.3.2 互联网的核心部分

- 是互联网中最复杂的部分。
- 向网络边缘中的主机**提供连通性**，使任何一台主机都能够向其他主机通信。
- 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。



**分组转发**是网络核心部分最重要的功能。



## 1.3.2 互联网的核心部分

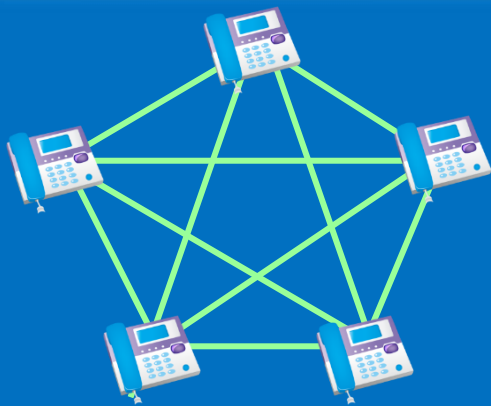
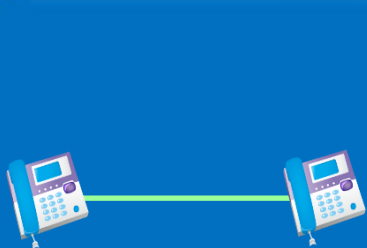
- 典型交换技术包括：
  - ◆ 电路交换
  - ◆ 分组交换
  - ◆ 报文交换 等。
- 互联网的核心部分采用**分组交换技术**。



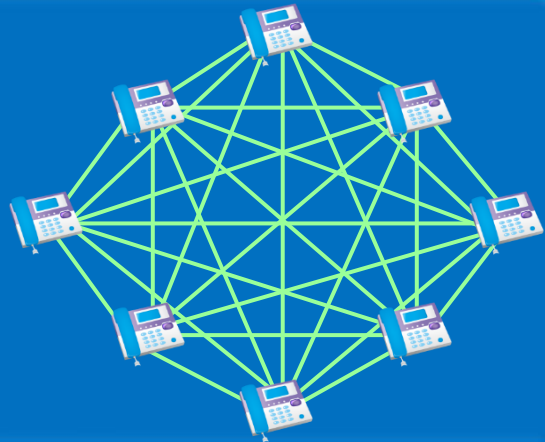


## 1. 电路交换的主要特点

电线对的数量与电话机数量的平方 ( $N^2$ ) 成正比。



5 部电话机两两直接  
相连，需 10 对电线。

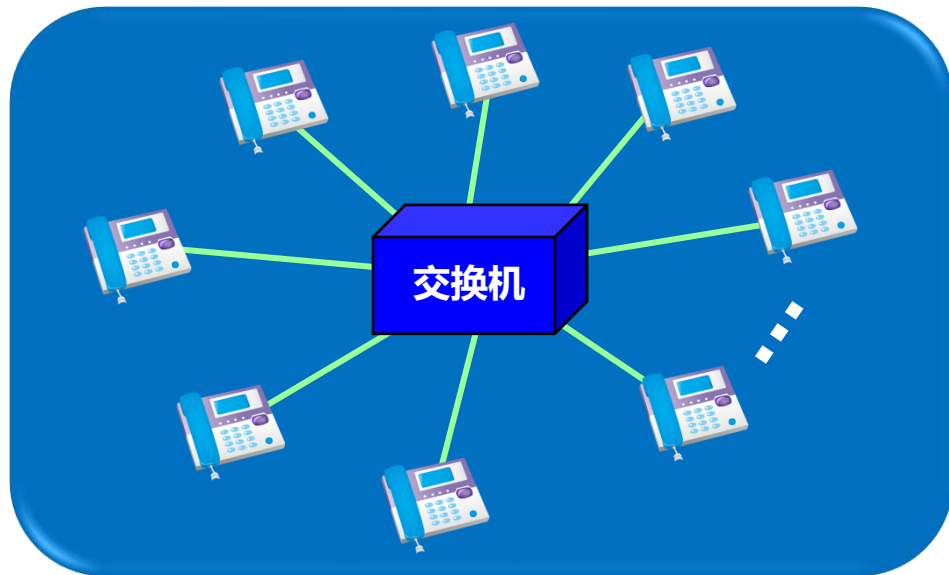


$N$  部电话机两两直接相连，  
需  $N(N-1)/2$  对电线。



## 使用交换机

当电话机的数量增多时，使用**电话交换机**将这些电话连接起来。



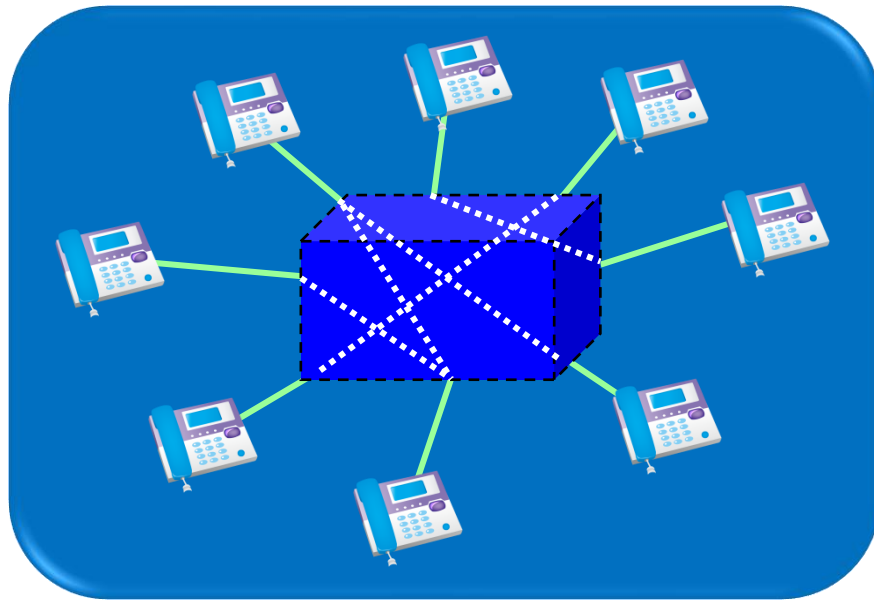
每一部电话都直接连接到交换机上，而交换机使用**交换**的方法，让电话用户彼此之间可以很方便地通信。

这种交换方式就是**电路交换 (circuit switching)**。



## “交换 (switching)” 的含义

- **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，就是按照某种方式**动态地分配传输线路的资源**。





## 电路交换特点

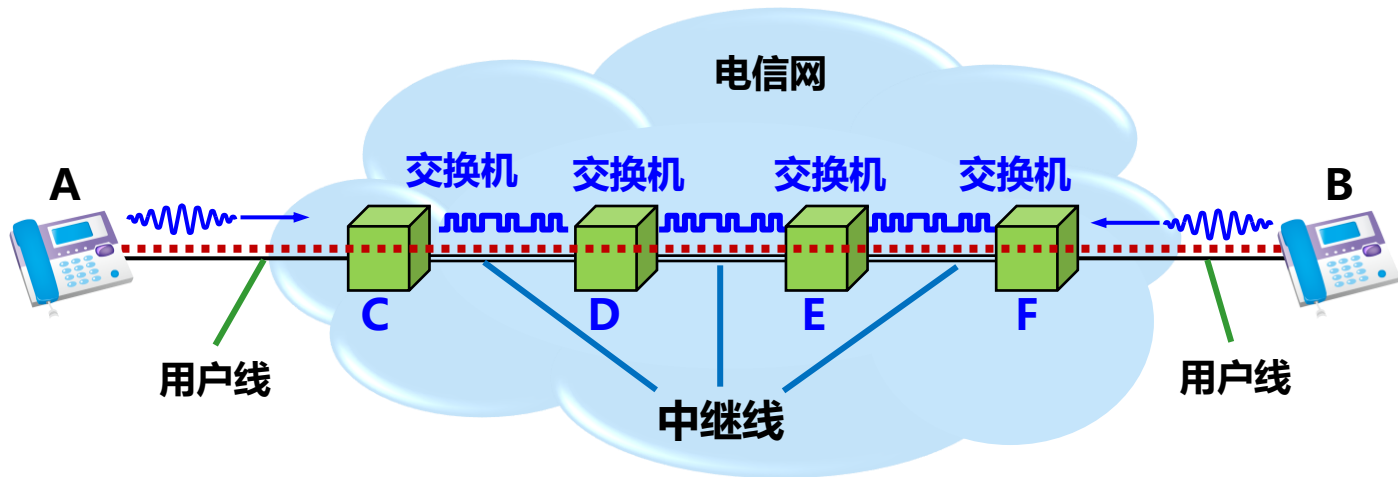
分为三个阶段：

- **建立连接：** 建立一条专用的物理通路（占用通信资源）。
- **通话：** 主叫和被叫双方互相通电话（一直占用通信资源）。
- **释放连接：** 释放刚才使用的专用的物理通路（归还通信资源）。

这种必须经过“建立连接（占用通信资源）、通话（一直占用通信资源）、释放连接（归还通信资源）”三个步骤的交换方式称为**电路交换**。



## 电路交换特点：通话的两个用户始终占用端到端的通信资源



计算机数据具有**突发性**，这导致在传送数据时，通信线路的利用率很低，真正用来传送数据的时间往往不到 10%，甚至不到 1%，已被用户占用的通信线路资源在绝大部分时间里都是空闲的。



## 2. 分组交换的主要特点

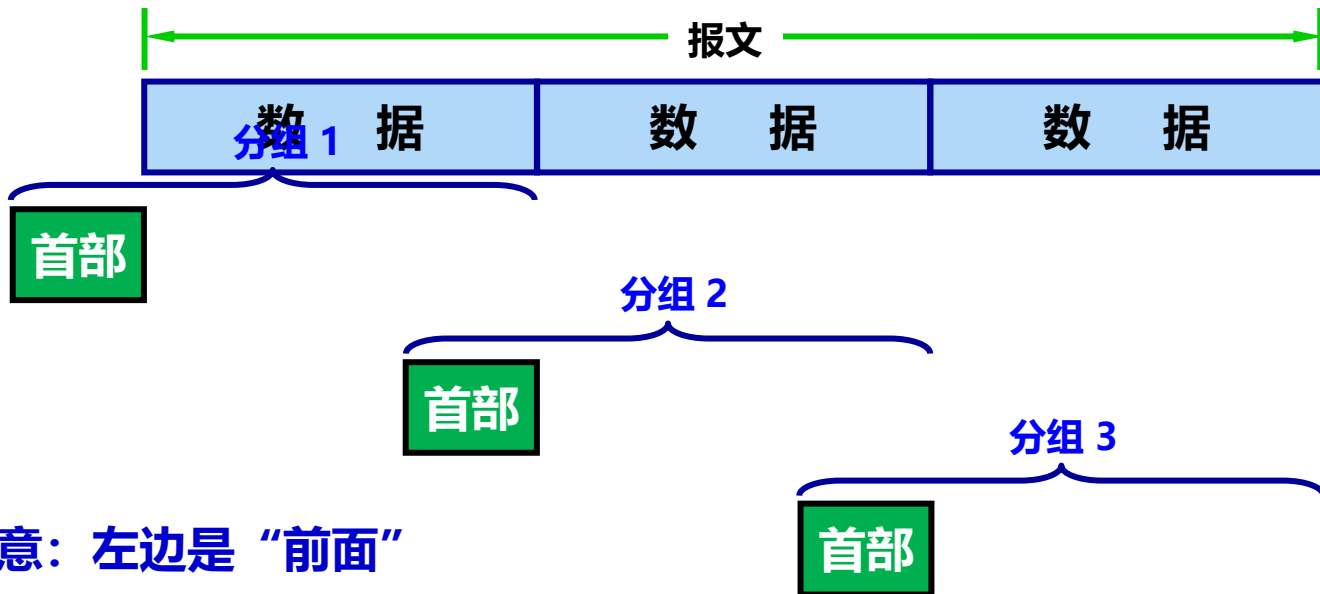
- 采用**存储转发**技术。



在发送端，先把较长的报文划分成更小的等长数据段。



数据段前面添加首部就构成了**分组** (packet)

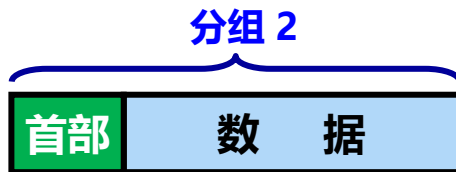


分组又称为“包”，而分组的首部也可称为“包头”。



## 分组交换以“**分组**”作为数据传输单元

- 互联网采用分组交换技术。**分组**是在互联网中传送的数据单元。
- 发送端**依次**把各分组发送到接收端。







## 接收端收到分组后剥去首部，还原成原来的报文

分组 1



分组 2



分组 3



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。



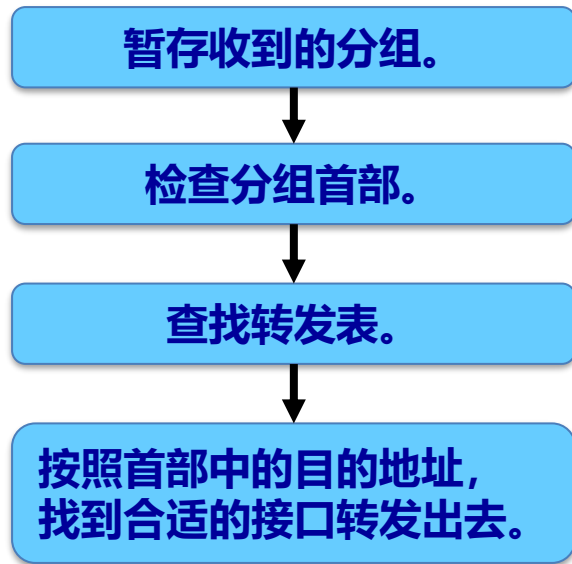
110100011010101011010101110001001101001011

报文

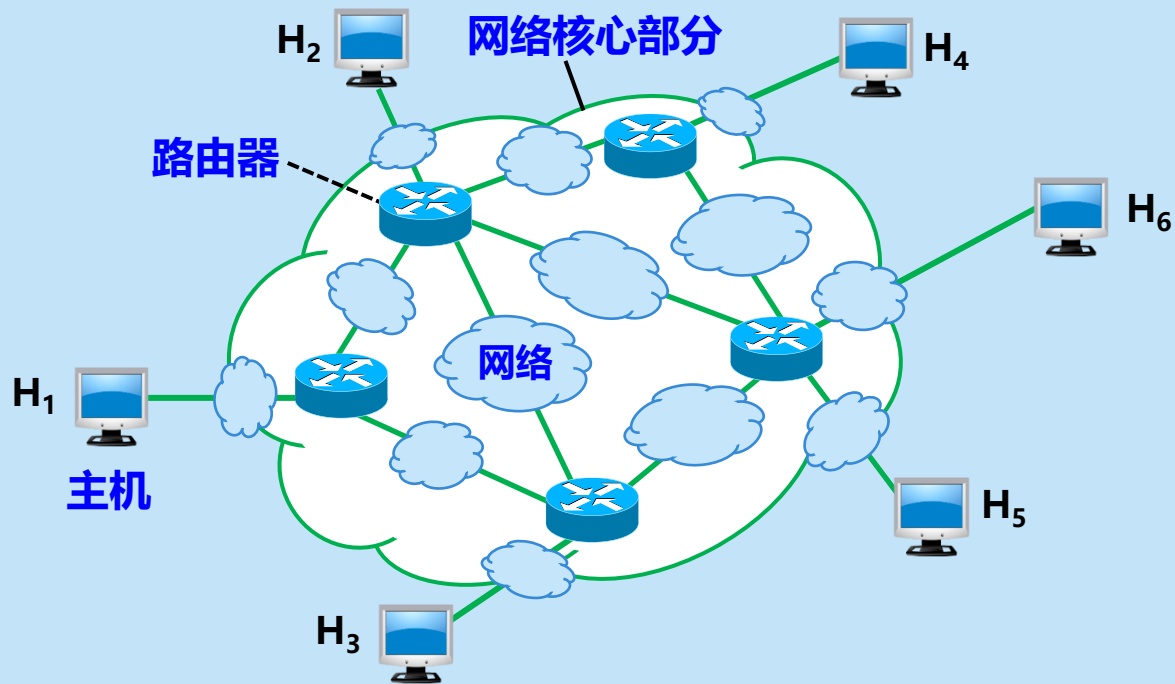


## 分组在互联网中的转发

- 根据**首部**中包含的目的地址、源地址等重要控制信息进行转发。
- 每一个分组在互联网中**独立选择**传输路径。
- 位于网络核心部分的**路由器负责转发分组**，即进行分组交换。
- 路由器要创建和动态维护**转发表**。



路由器处理分组的过程

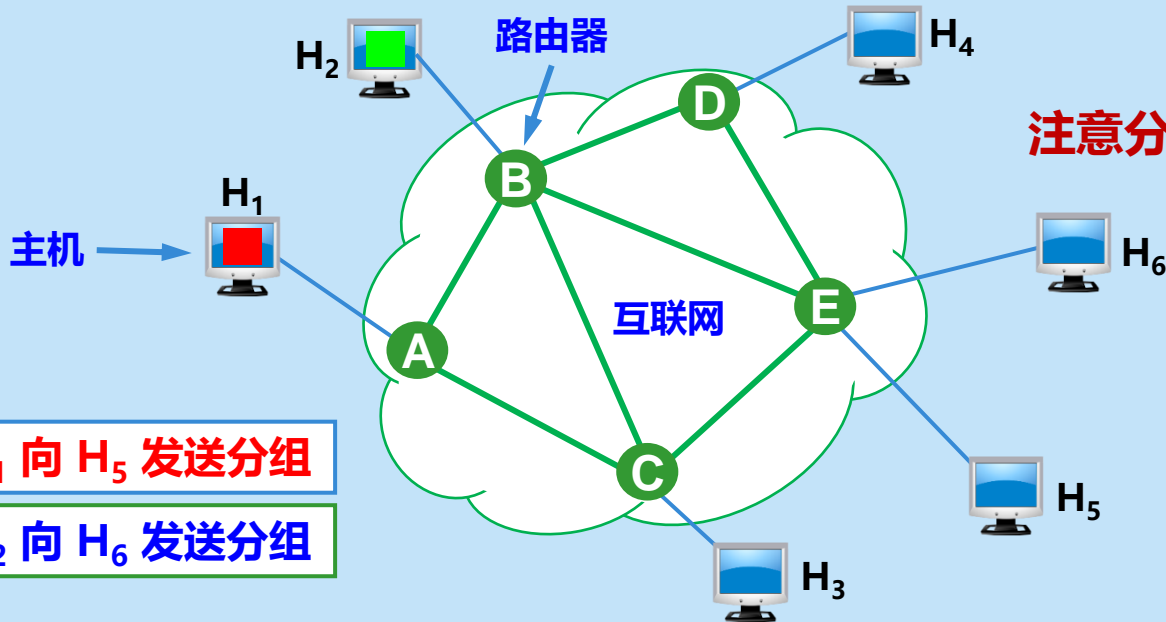


(a) 核心部分的路由器把网络互连起来



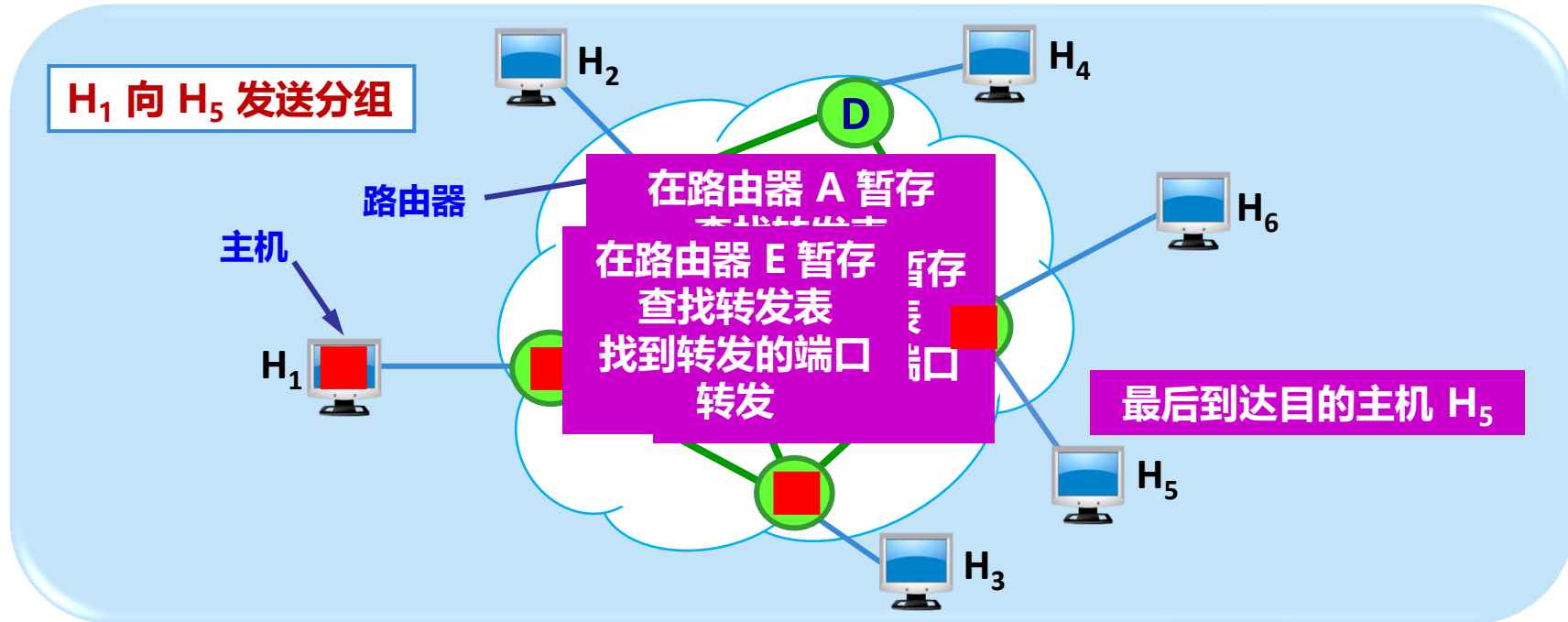


## 每个分组独立选择传输路径





## 分组的存储转发过程





## 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

- **排队延迟：** 分组在各路由器存储转发时需要排队。
- **不保证带宽：** 动态分配。
- **增加开销：** 各分组必须携带控制信息；路由器要暂存分组，维护转发表等。



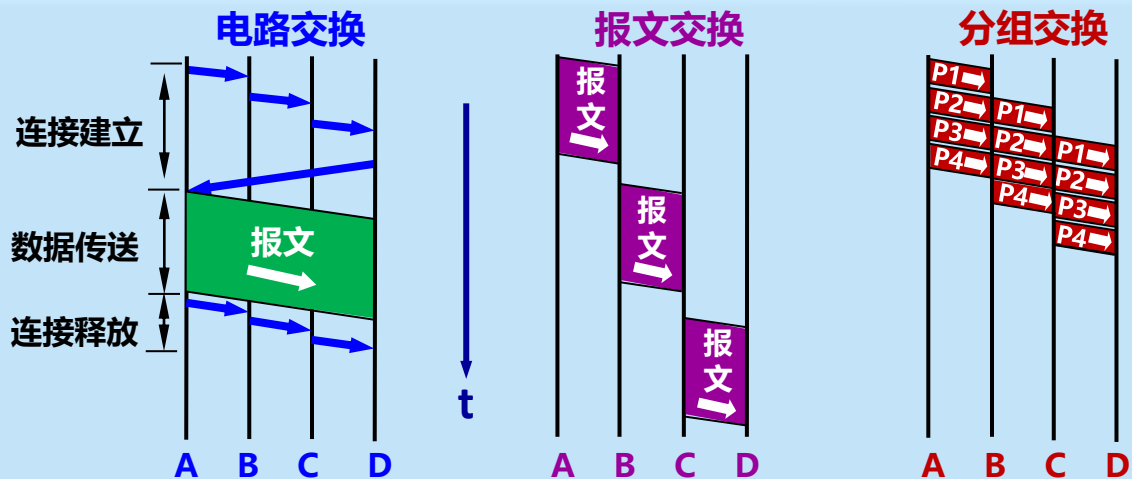


## 报文交换

- 在 20 世纪 40 年代，电报通信就采用了基于存储转发原理的**报文交换** (message switching)。
- 但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。



## 电路交换、报文交换和分组交换的主要区别

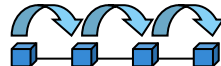


数据  
传送  
特点

比特流直达终点

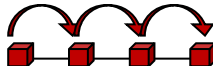


报文 报文 报文



存储转发 存储转发

分组 分组 分组



存储转发 存储转发



## 三种交换方式的比较

- 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。

## 1.5 计算机网络的 类别

1.5.1

计算机网络的定义

1.5.2

几种不同类别的计算机网络



## 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，而这些硬件并非专门用来实现某一特定目的（例如，传送数据或视频信号）。这些可编程的硬件能够用来传送多种不同类型的数据，并能支持广泛的和日益增长的应用。



## 如何理解？

- **“可编程的硬件” 表明：**这种硬件一定包含有**中央处理器 CPU**。
- 计算机网络所连接的硬件包括：
  - ◆ 一般的计算机；
  - ◆ 智能手机、电视 等。
- 计算机网络可以：
  - ◆ 传送数据；
  - ◆ 支持多种应用（包括今后可能出现的各种应用）。



## 1.5.2 几种不同类别的计算机网络

- 计算机网络有多种类别。
- 可以按以下方法分类：
  - ◆ 按照网络的作用范围进行分类；
  - ◆ 按照网络的使用者进行分类；
  - ◆ 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

类别	作用范围或距离
<b>广域网 WAN</b> (Wide Area Network)	通常为几十到几千公里。有时也称为 <b>远程网</b> (long haul network)。是互联网的核心部分。
<b>城域网 MAN</b> (Metropolitan Area Network)	作用范围一般是一个城市，作用距离约为 5~50 公里。
<b>局域网 LAN</b> (Local Area Network)	局限在较小的范围（如 1 公里左右）。通常采用高速通信线路。
<b>个人区域网 PAN</b> (Personal Area Network)	范围很小，大约在 10 米左右。有时也称为 <b>无线个人区域网 WPAN</b> (Wireless PAN)。

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





## 2. 按照网络的使用者进行分类

类别	作用范围或距离
公用网 (public network)	按规定交纳费用的人都可以使用的网络。也可称为 <b>公众网</b> 。
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传送多种业务。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)**
  - ◆ 又称为**本地接入网**或**居民接入网**。
  - ◆ 用于将用户接入互联网。
  - ◆ 实际上就是本地 ISP 所拥有的网络，它既不是互联网的核心部分，也不是互联网的边缘部分。
  - ◆ 是从某个用户端系统到本地 ISP 的**第一个**路由器（也称为边缘路由器）之间的一种网络。
  - ◆ 从覆盖的范围看，很多接入网还是属于局域网。





## 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

**性能指标：**  
从不同的方面来度量  
计算机网络的性能。





## 1. 速率

- 最重要的一个性能指标。
- 指的是**数据的传送速率**，也称为**数据率** (data rate) 或**比特率** (bit rate)。
- **单位**: bit/s, 或 kbit/s、Mbit/s、Gbit/s 等。  
例如  $4 \times 10^{10}$  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。

千 = **K** =  $2^{10}$  = 1024, 兆 = **M** =  $2^{20}$  = 1024 K, 吉 = **G** =  $2^{30}$  = 1024 M  
1 字节 (Byte) = 8 比特 (bit)



## 2. 带宽 (bandwidth)

### 频域

- 某个信号具有的**频带宽度**。
- 单位是**赫**（或千赫、兆赫、吉赫等）。
- 某信道允许通过的信号频带范围称为该**信道的带宽**（或通频带）。

### 时域

- 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**”。
- 单位就是数据率的单位 bit/s。

- ◆ 两者**本质相同**。
- ◆ 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。



### 3. 吞吐量 (throughput)

- 单位时间内通过某个网络（或信道、接口）的**实际数据量**。
- 受网络的带宽或网络的额定速率的限制。
  - ◆ 额定速率是绝对上限值。
  - ◆ 可能会远小于额定速率，甚至下降到零！
- 有时可用**每秒传送的字节数或帧数**来表示。



## 4. 时延 (delay 或 latency)

- 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**。
- 组成：
  - ◆ (1) 发送时延
  - ◆ (2) 传播时延
  - ◆ (3) 处理时延
  - ◆ (4) 排队时延





## (1) 发送时延

- 也称为**传输时延**。
- 是主机或路由器发送数据帧所需要的时间，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。

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



## (2) 传播时延

- 是**电磁波**在信道中传播一定的距离需要花费的时间。

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

- 电磁波传播速率：
  - ◆ 自由空间的传播速率是光速 =  $3.0 \times 10^8$  km/s
  - ◆ 在铜线电缆中的传播速率约 =  $2.3 \times 10^8$  km/s
  - ◆ 在光纤中的传播速率约 =  $2.0 \times 10^8$  km/s



## (2) 传播时延

- **注意：发送时延与传播时延有本质上的不同。**
  - ◆ **发送时延**发生在机器内部的发送器中，与传输信道的长度（或信号传送的距离）没有任何关系。
  - ◆ **传播时延**则发生在机器外部的传输信道媒体上，而与信号的发送速率无关。信号传送的距离越远，传播时延就越大。



## (3) 处理时延 和 (4) 排队时延

- (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**处理和转发所经历的时延。
- ◆ 排队时延的长短往往取决于网络中当时的通信量。当网络的通信量很大时会发生队列溢出，使分组丢失，这相当于排队时延为无穷大。



## 4. 时延 (delay 或 latency)

**总时延 = 发送时延 + 传播时延 + 处理时延 + 排队时延**

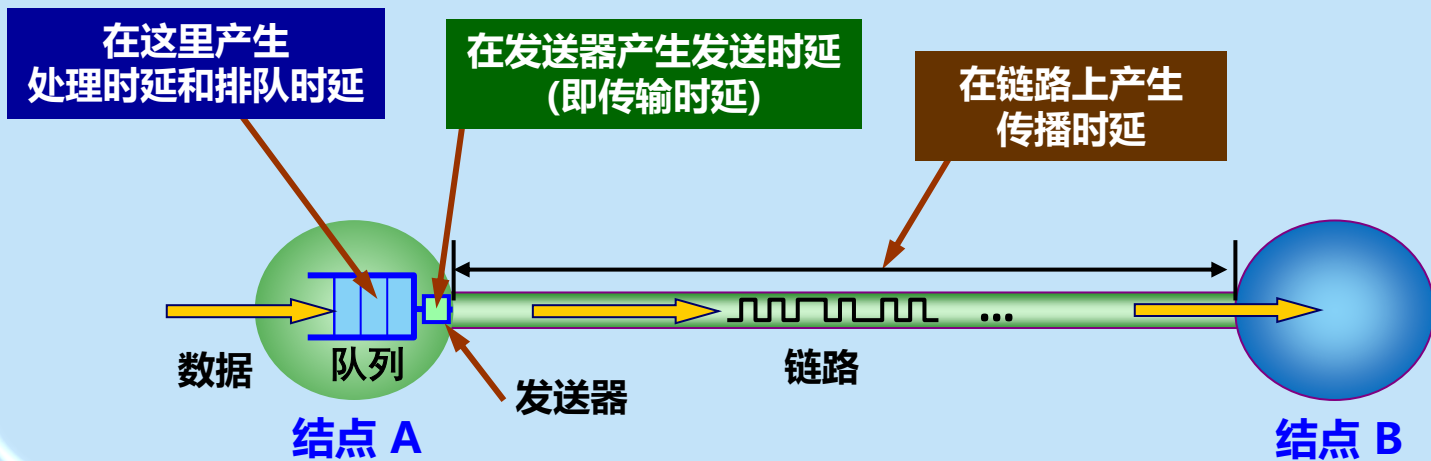
- 一般说来，小时延的网络要**优于**大时延的网络。
- 在某些情况下，一个低速率、小时延的网络很可能要**优于**一个高速率但大时延的网络。

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。



## 四种时延产生的地方

假设从结点 A 向结点 B 发送数据



四种时延产生的地方不一样



## 容易产生的错误概念

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”。

- 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。
- 提高数据的发送速率**只是减小了数据的发送时延**。



## 分析举例



- 结点 A 要将一个数据块通过 1000 km 的光纤链路发送给结点 B。假设忽略处理时延和排队时延。请分别计算下列情况时的总时延，并验证“数据的发送速率越高，其传送的总时延就越小”的说法是否正确。
  - ◆ (1) 数据块大小为 100 MB，信道带宽为 1 Mbit/s
  - ◆ (2) 数据块大小为 100 MB，信道带宽为 100 Mbit/s
  - ◆ (3) 数据块大小为 1 B，信道带宽为 1 Mbit/s
  - ◆ (4) 数据块大小为 1 B，信道带宽为 1 Gbit/s





## 分析举例

● 解:

**传播时延** =  $1000 \text{ km} / 2.0 \times 10^5 \text{ km/s} = 5 \text{ ms}$ 。

(1) **发送时延** =  $100 \times 2^{20} \times 8 \div 10^6 = 838.9 \text{ s}$ ,

**总时延** =  $838.9 + 0.005 \approx 838.9 \text{ s}$ 。

(2) **发送时延** =  $100 \times 2^{20} \times 8 \div 10^8 = 8.389 \text{ s}$

**总时延** =  $8.389 + 0.005 = 8.394 \text{ s}$ 。缩小到 (1) 的近 1/100。

(3) **发送时延** =  $1 \times 8 \div 10^6 = 8 \times 10^{-6} \text{ s} = 8 \text{ } \mu\text{s}$ ,

**总时延** =  $0.008 + 5 = 5.008 \text{ ms}$ 。

(4) **发送时延** =  $1 \times 8 \div 10^9 = 8 \times 10^{-9} \text{ s} = 0.008 \text{ } \mu\text{s}$

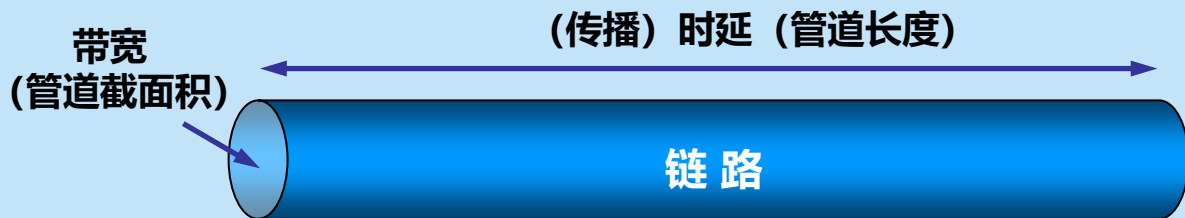
**总时延** =  $0.000008 + 5 = 5.000008 \text{ ms}$ 。与 (3) 相比没有明显减小。

不能笼统地认为：“数据的发送速率越高，其传送的总时延就越小”。



## 5. 时延带宽积

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



链路像一条空心管道

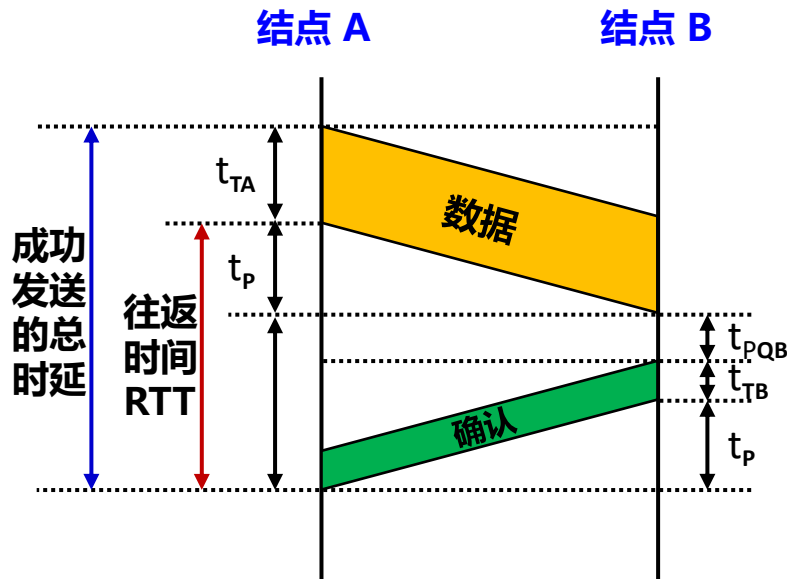
链路的**时延带宽积**又称为以比特为单位的**链路长度**。  
管道中的比特数表示从发送端发出**但尚未**到达接收端的比特数。  
只有在代表链路的管道都充满比特时，链路才得到了充分利用。



## 6. 往返时间 RTT (Round-Trip Time)

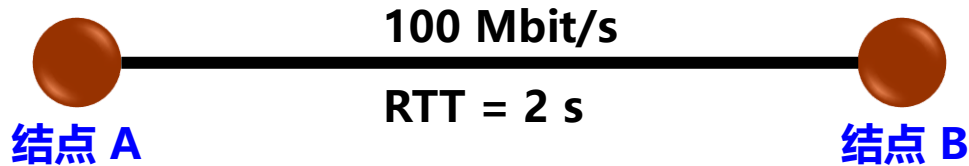
- 表示从发送方**发送完数据**，到发送方**收到来自接收方的确认**总共经历的时间。

往返时间 RTT = 结点 A 到 B 的传播时延  $t_p$   
+ 结点 B 处理和排队时延  $t_{PQB}$   
+ 结点 B 发送时延  $t_{TB}$   
+ 结点 B 到 A 的传播时延  $t_p$   
= 2 x 传播时延  $t_p$   
+ 结点 B 处理和排队时延  $t_{PQB}$   
+ 结点 B 发送时延  $t_{TB}$





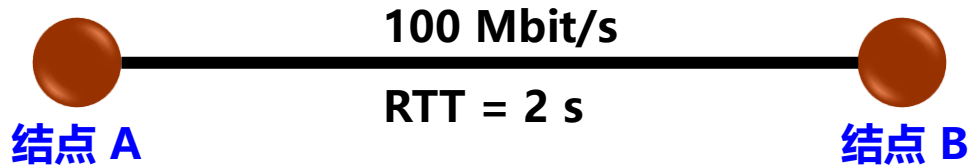
## 分析举例



- 结点 A 要将一个 100 MB 数据以 100 Mbit/s 的速率发送给结点 B, B 正确收完该数据后, 就立即向 A 发送确认。假定 A 只有在收到 B 的确认信息后, 才能继续向 B 发送数据, 且确认信息很短。计算 A 向 B 发送数据的有效数据率。



## 分析举例



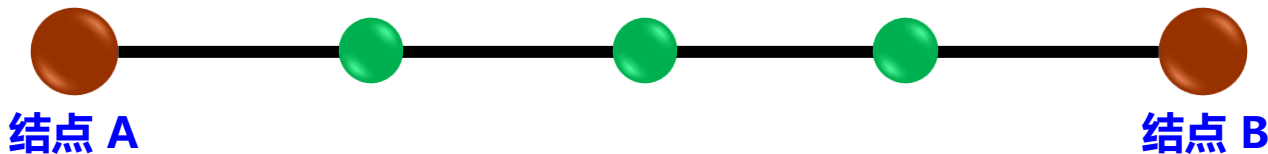
● 解:

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

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



## 6. 往返时间 RTT (Round-Trip Time)



- 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，此时，RTT 是很重要的一个性能指标。



## 7. 利用率

### 信道利用率

- 某信道有百分之几的时间是被利用的（即有数据通过）。
- 完全空闲的信道的利用率是零。

### 网络利用率

- 全网络的信道利用率的加权平均值。

**问题：信道利用率越高越好吗？**



## 时延与网络利用率的关系

- 根据排队论，当某信道的利用率增大时，时延会迅速增加。

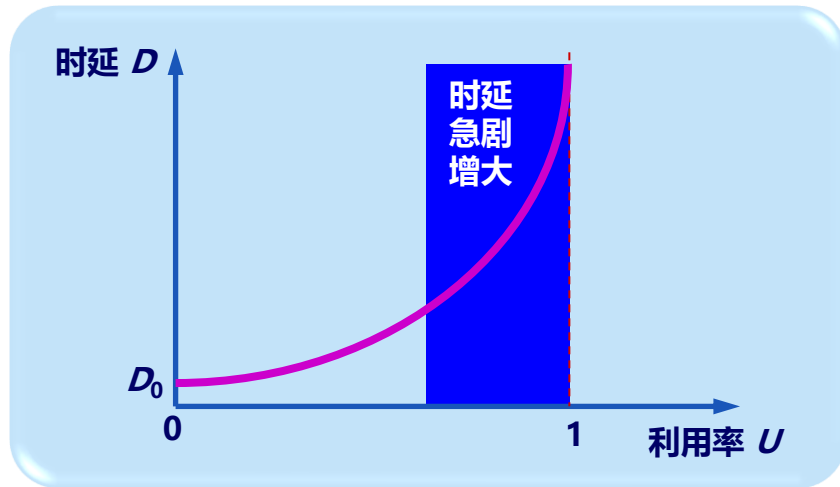
$$D = \frac{D_0}{1 - U}$$

其中：

$D_0$ ：网络空闲时的时延。

$D$ ：网络在当前的时延。

$U$ ：网络当前的利用率，数值在 0 到 1 之间。



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



这些非性能特征与性能指标有很大的关系。

## 1.7

### 计算机网络 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的形成

**计算机网络是一个非常复杂的系统。**

**两台计算机要互相传送文件需解决很多问题**

- (1) 必须有一条传送数据的通路。
- (2) 发起方必须激活通路。
- (3) 要告诉网络如何识别接收方。
- (4) 发起方要清楚对方是否已开机，且与网络连接正常。
- (5) 发起方要清楚对方是否准备好接收和存储文件。
- (6) 若文件格式不兼容，要完成格式的转换。
- (7) 要处理各种差错和意外事故，保证收到正确的文件。



**计算机 A**



**计算机 B**



## 提出了不同体系结构

- 最初的 **ARPANET** 设计时提出了**分层**的设计方法。
- **分层**：将庞大而复杂的问题，转化为若干较小的局部问题。
- 1974 年，IBM 按照分层的方法制定并提出了**系统网络体系结构 SNA** (System Network Architecture) 。
- 此后，其他一些公司也相继推出了具有不同名称的体系结构。

但由于网络体系结构的不同，不同公司的设备很难互相连通。



## 国际标准：开放系统互连参考模型 OSI/RM

- ISO (国际标准化组织) 提出的 **OSI/RM** (Open Systems Interconnection Reference Model) 是使各种计算机在世界范围内互连成网的**标准框架**。
- OSI/RM 是个**抽象的概念**。
- 1983年，形成了著名的 ISO 7498 国际标准，即**七层协议的体系结构**。

OSI 试图达到一种**理想境界**：全球计算机网络都遵循这个统一标准，因而全球的计算机将能够很方便地进行互连和交换数据。



## 但 ISO/OSI 失败了

- 基于 TCP/IP 的互联网已抢先在全球相当大的范围成功地运行了。
- 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**，使得按 OSI 标准生产的设备无法及时进入市场；
- OSI 的层次**划分也不太合理**，有些功能在多个层次中重复出现。



## 存在两种国际标准

**法律上的 (de jure) 国际标准 OSI**

- 但并没有得到市场的认可。

**事实上的 (de facto) 国际标准 TCP/IP**

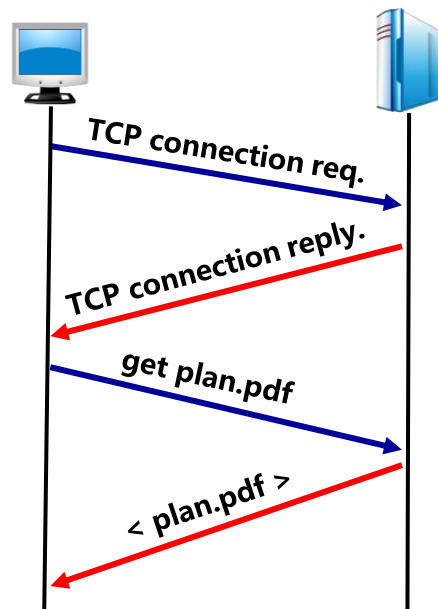
- 获得了最广泛的应用。



## 1.7.2 协议与划分层次

- **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。
- **三个组成要素**:
  - ◆ **语法**: 数据与控制信息的结构或格式。
  - ◆ **语义**: 需要发出何种控制信息, 完成何种动作以及做出何种响应。
  - ◆ **同步**: 事件实现顺序的详细说明。

网络协议是计算机网络的不可缺少的组成部分。







## 协议的两种形式

文字描述：便于人来阅读和理解。

程序代码：让计算机能够理解。

不论什么形式，都必须能够对网络上信息交换过程做出**精确的解释**。



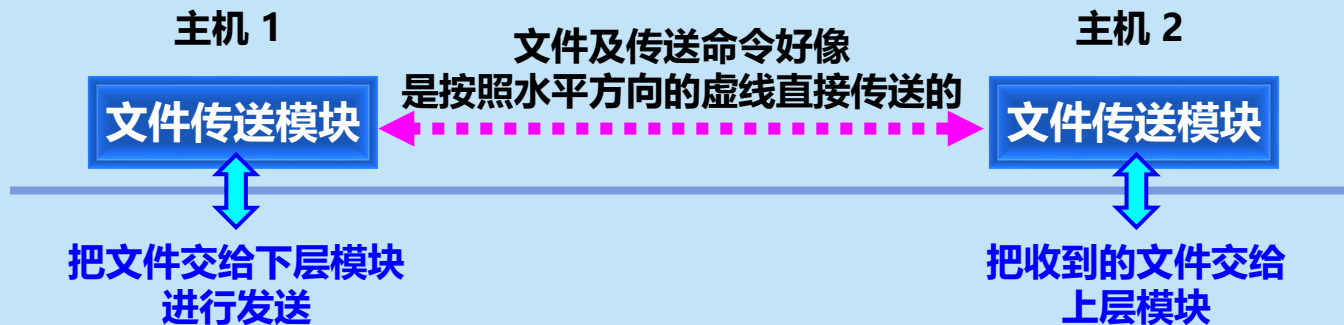
## 层次式协议结构

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



## 划分层次的概念举例：两台主机通过网络传送文件

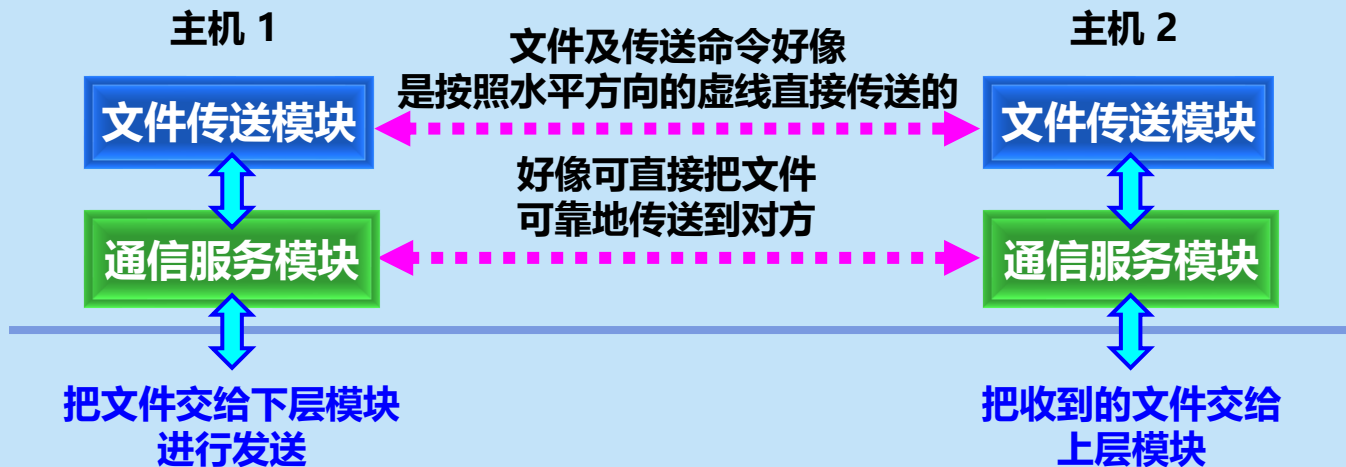
### 1, 将文件传送模块作为最高的一层





## 划分层次的概念举例：两台主机通过网络传送文件

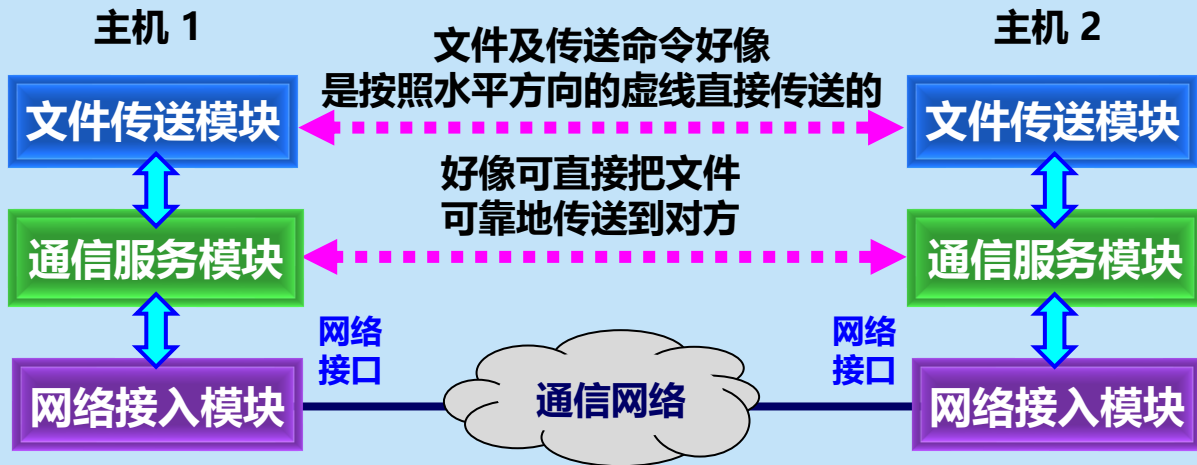
### 2, 再设计一个通信服务模块层





## 划分层次的概念举例：两台主机通过网络传送文件

### 3, 再设计一个网络接入模块层



网络接入模块负责做与网络接口细节有关的工作，并向上层提供接入和通信服务。



## 分层的优点与缺点



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。

有些功能会重复出现，  
因而产生了额外开销。

**注意：每一层的功能应非常明确。**

层数太少，就会使每一层的协议太复杂。

层数太多，又会在描述和综合各层功能的系统工程任务时遇到较多的困难。



## 各层完成的主要功能

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



## 计算机网络的体系结构

- **网络的体系结构** (Network Architecture) 是计算机网络的各层及其协议的**集合**，就是这个计算机网络及其构件所应完成的**功能的精确定义**（不涉及实现）。
- **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。





## 1.7.3 具有五层协议的体系结构

OSI 的七层协议体系结构



(a)

TCP/IP 的四层协议体系结构



(b)

五层协议的体系结构



(c)



## 各层的主要功能



- **任务**：通过应用进程间的交互来完成特定网络应用。
- **协议**：定义的是**应用进程**间通信和交互的规则。
- 把应用层交互的数据单元称为**报文**(message)。
- 例如：DNS, HTTP, SMTP



## 各层的主要功能



- **任务：**负责向两台主机中**进程**之间的通信提供通用的数据传输服务。
- 具有复用和分用的功能。
- 主要使用**两种协议：**
  - ◆ 传输控制协议 TCP
  - ◆ 用户数据报协议 UDP 。



## 各层的主要功能



- TCP (Transmission Control Protocol):
  - ◆ 提供**面向连接的**、**可靠**的数据传输服务。
  - ◆ 数据传输的单位是**报文段** (segment)。
- UDP (User Datagram Protocol):
  - ◆ 提供无连接的**尽最大努力** (best-effort) 的数据传输服务 (**不保证数据传输的可靠性**) 。
  - ◆ 数据传输的单位是**用户数据报**。



## 各层的主要功能



- 为分组交换网上的不同**主机**提供通信服务。
- 两个具体**任务**:
  - ◆ **路由选择**: 通过一定的算法, 在互联网中的每一个路由器上, **生成**一个用来转发分组的**转发表**。
  - ◆ **转发**: 每一个路由器在接收到一个分组时, 要依据转发表中指定的路径把分组**转发**到下一个路由器。



## 各层的主要功能



- 互联网使用的网络层协议是**无连接的网际协议 IP** (Internet Protocol) 和许多种路由选择协议, 因此互联网的网络层也叫做**网际层**或**IP 层**。
- IP 协议分组也叫做 **IP 数据报**, 或简称为**数据报**。



## 各层的主要功能



- 常简称为**链路层**。
- **任务**：实现两个**相邻节点**之间的**可靠通信**。
- 在两个相邻节点间的链路上传送**帧**（frame）。
- 如发现有差错，就简单地**丢弃**出错帧。
- 如果需要改正出现的差错，就要采用**可靠传输协议**来**纠正**出现的差错。这种方法会使数据链路层协议复杂。



## 各层的主要功能

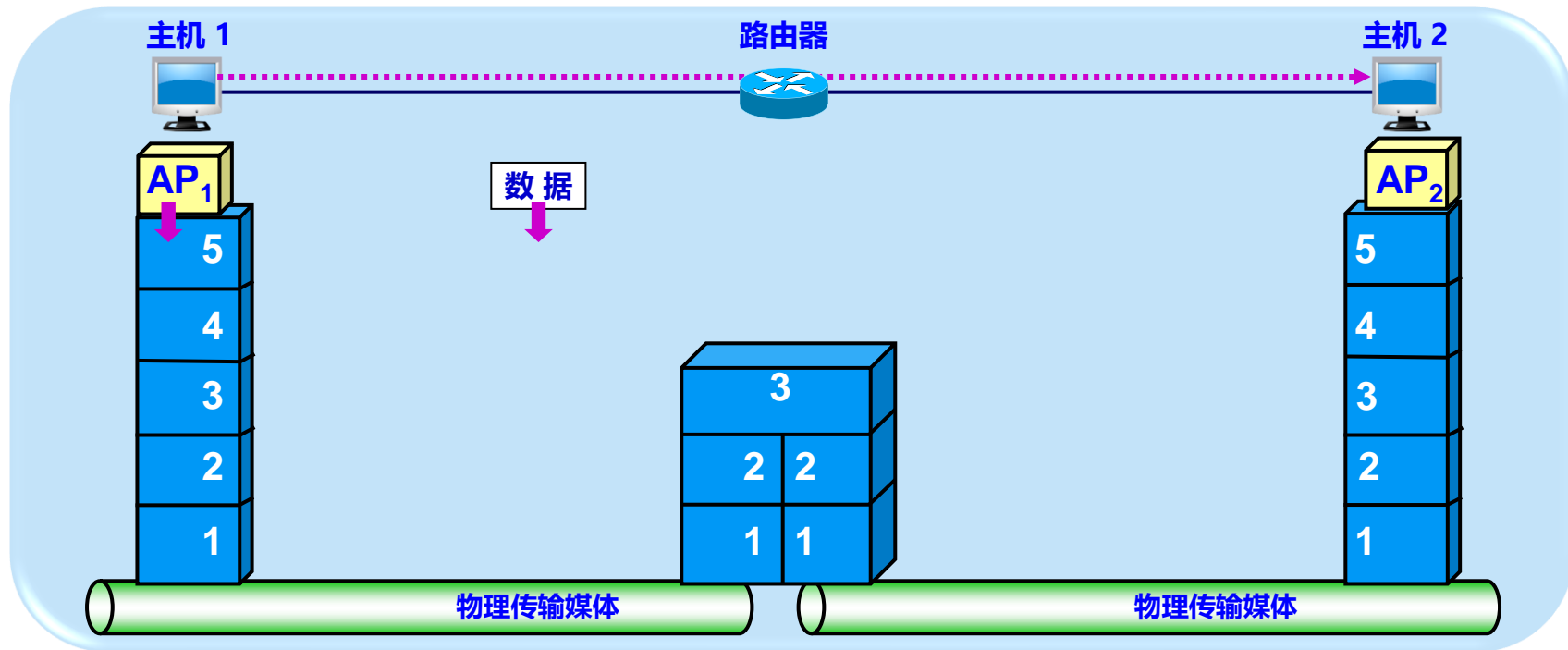


- **任务：**实现**比特**（0 或 1）的传输。
- 确定连接电缆的**插头**应当有多少根**引脚**，以及各引脚应如何**连接**。
- **注意：**传递信息所利用的一些**物理媒体**，如双绞线、同轴电缆、光缆、无线信道等，并**不在物理层协议之内**，而是在物理层协议的下面。



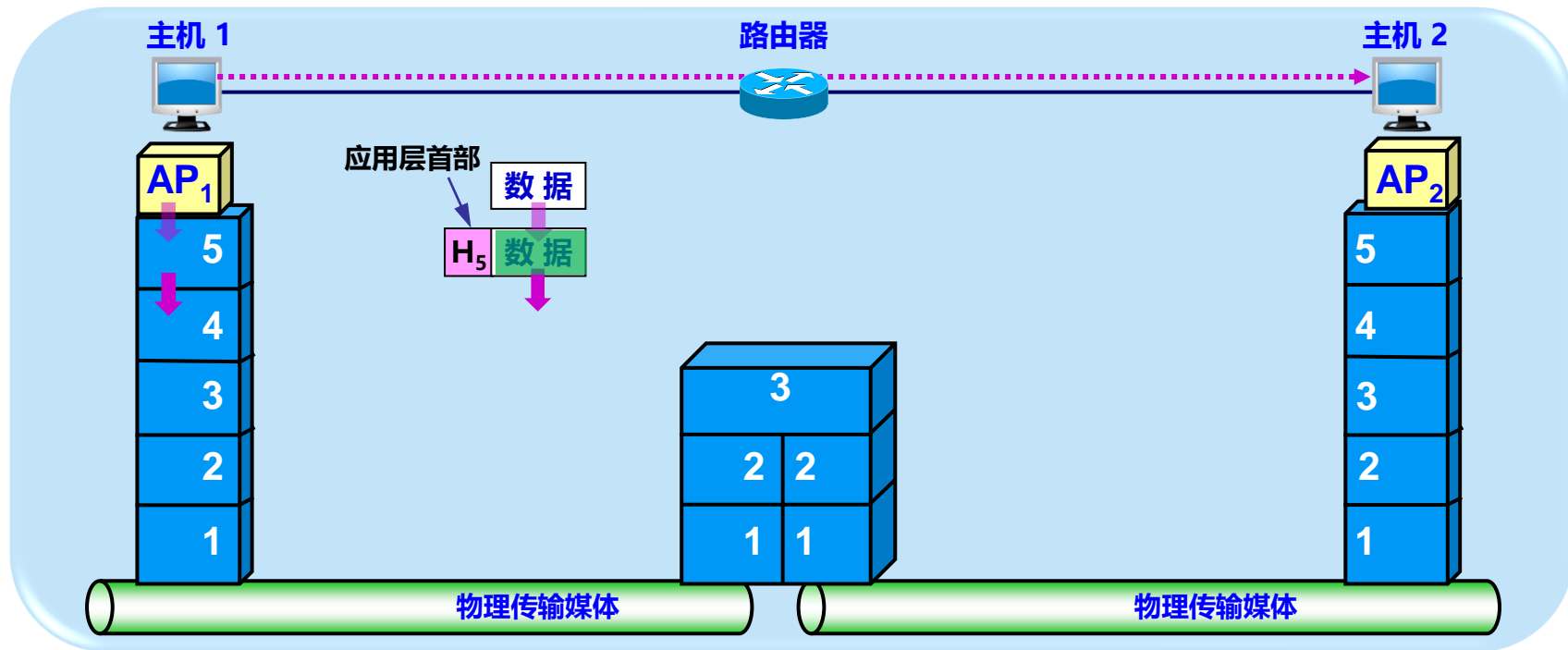


## 数据在各层之间的传递过程



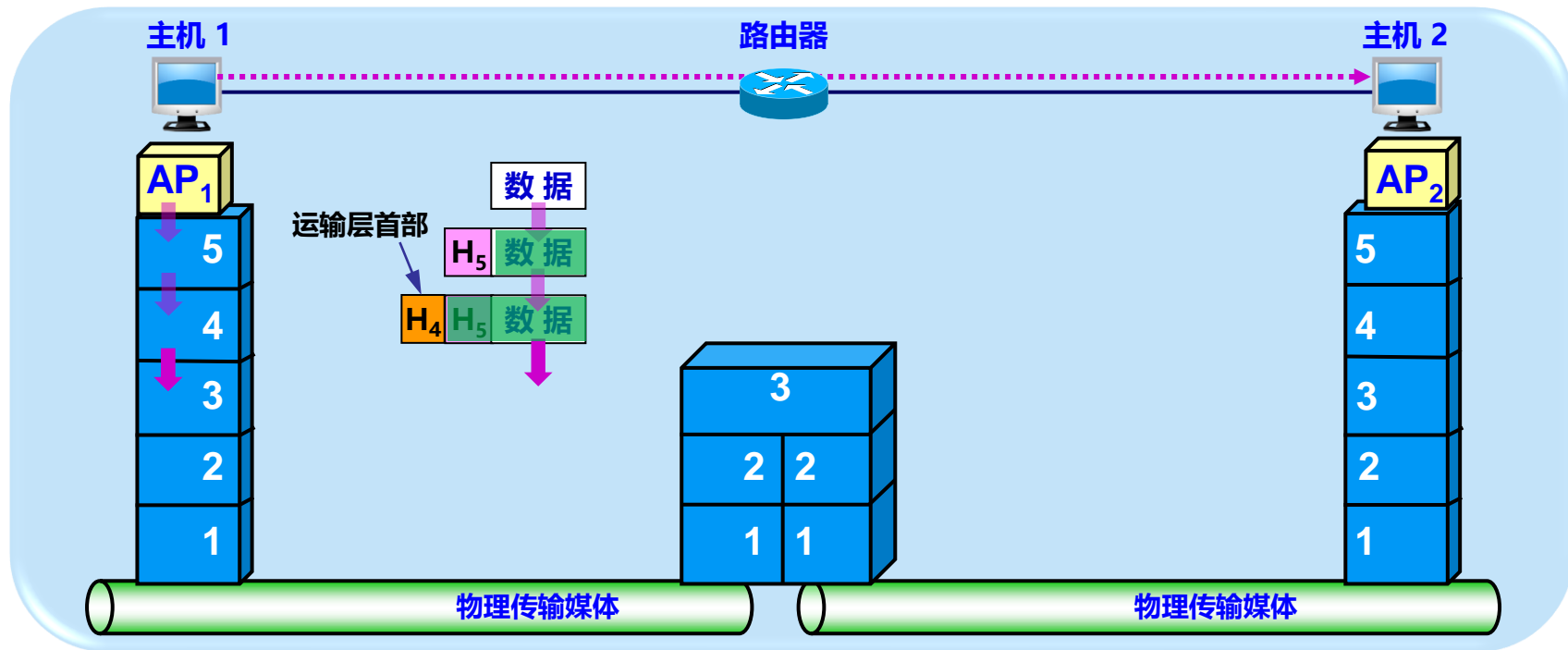


## 数据在各层之间的传递过程



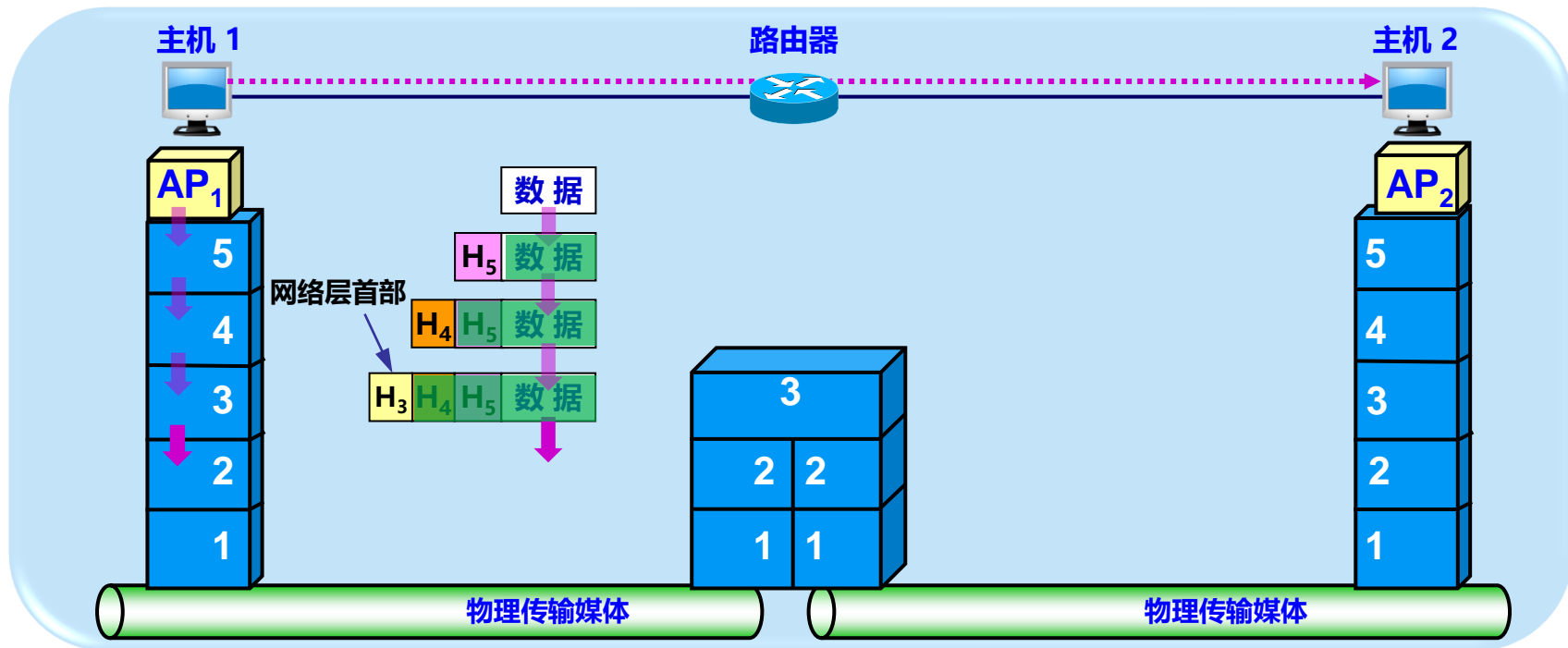


## 数据在各层之间的传递过程



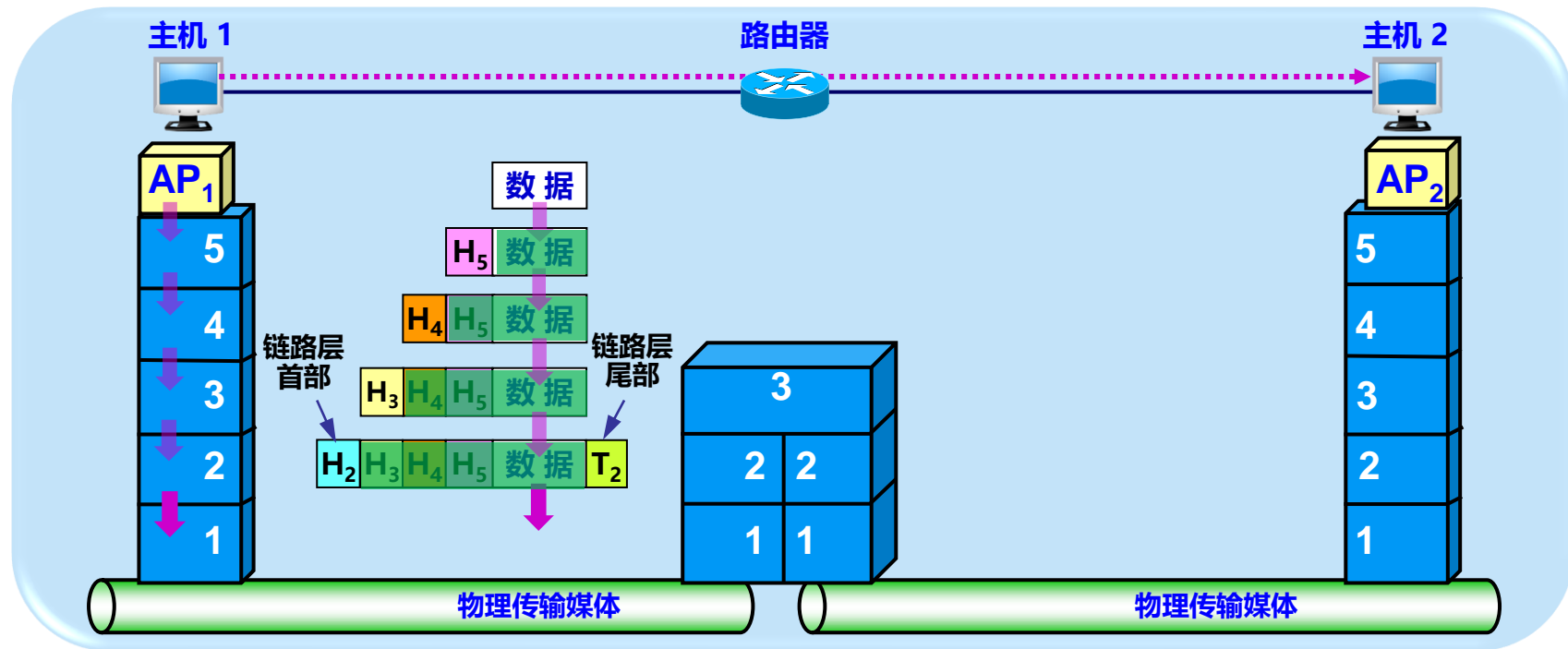


## 数据在各层之间的传递过程



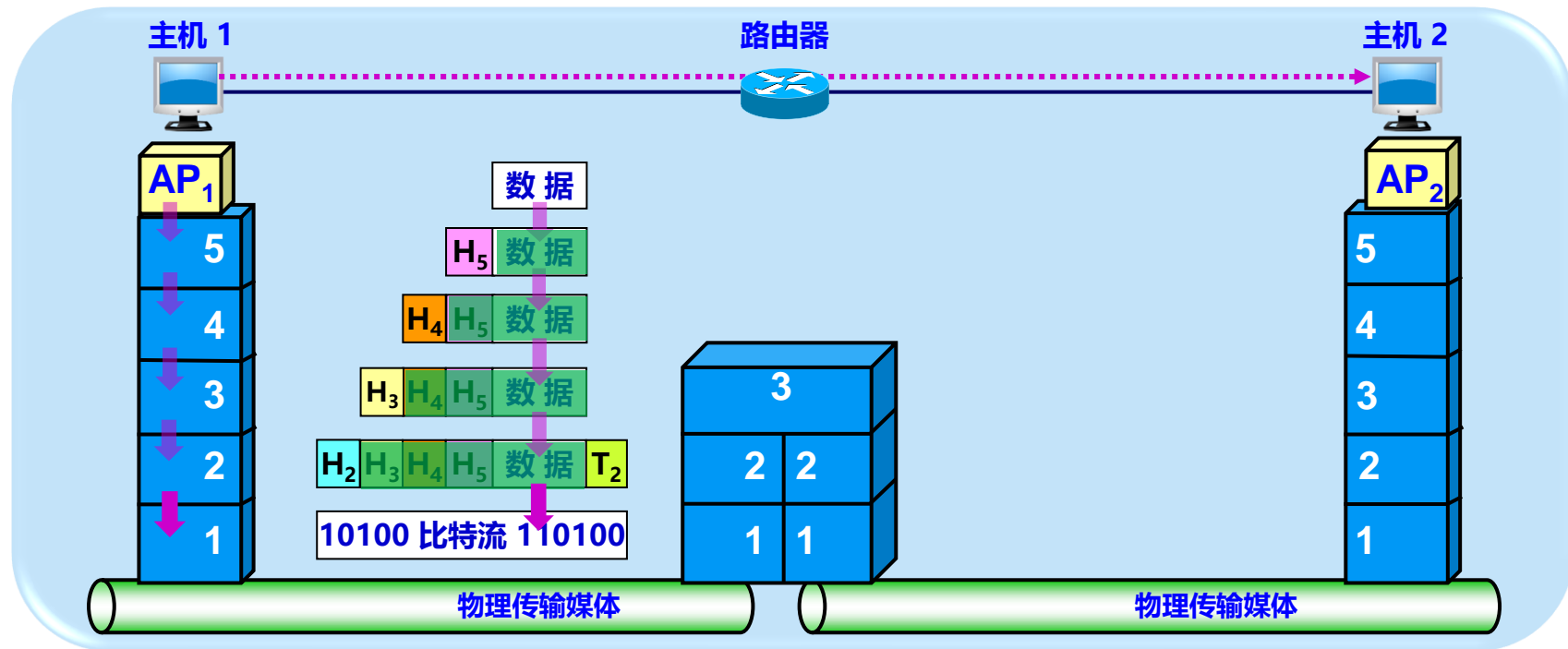


## 数据在各层之间的传递过程



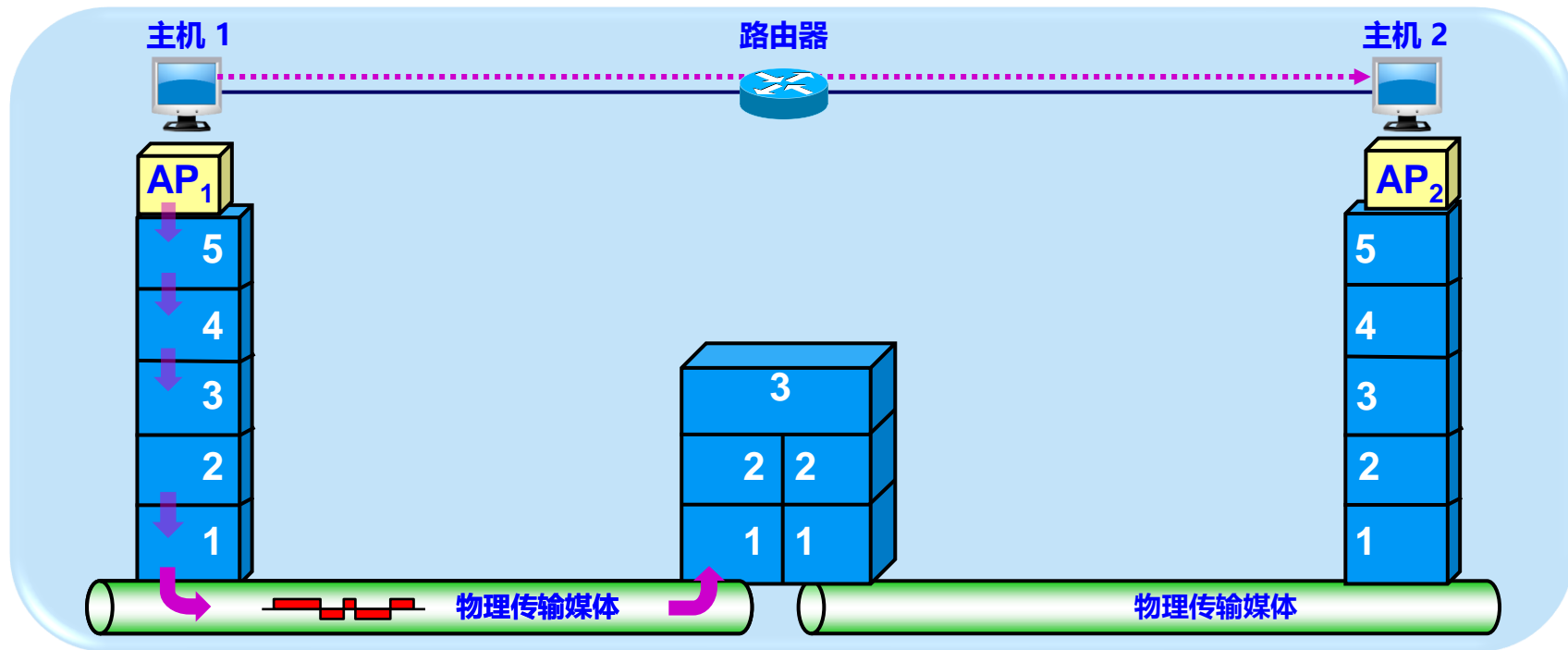


## 数据在各层之间的传递过程



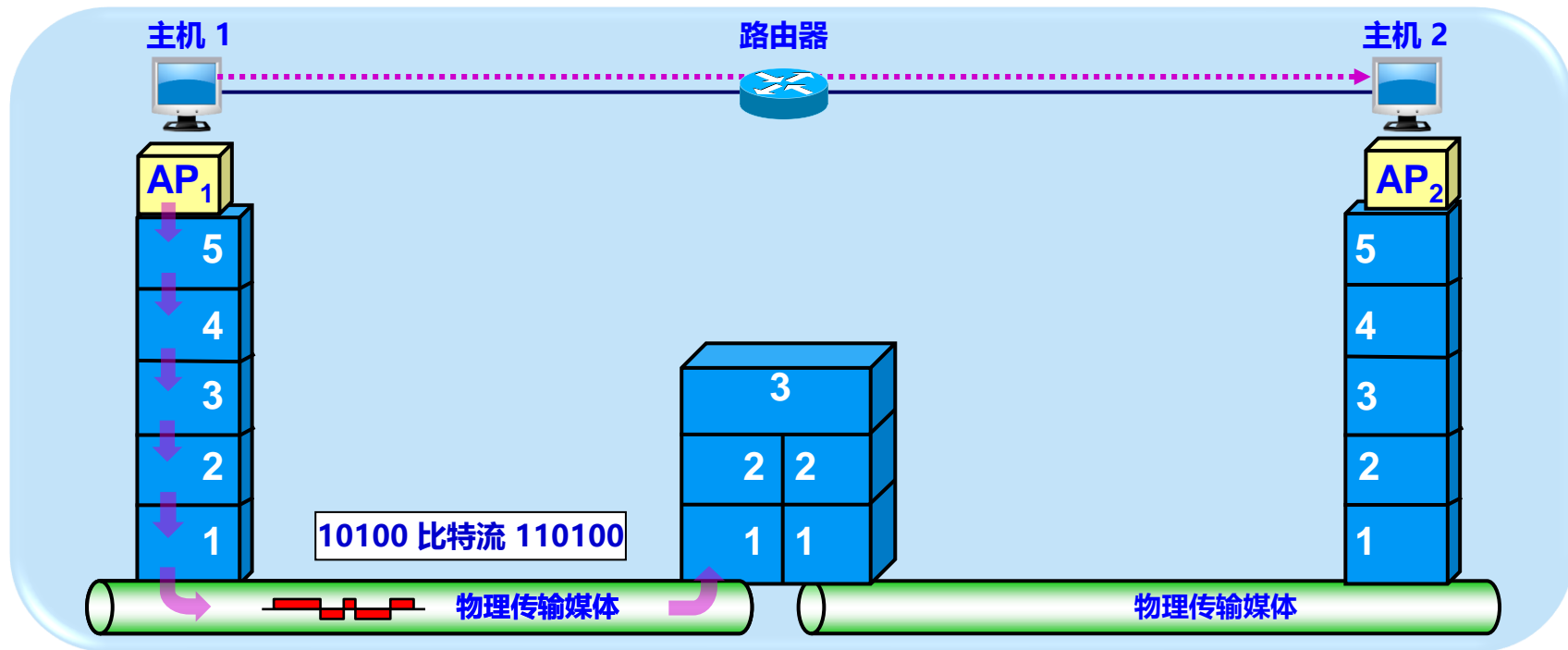


## 数据在各层之间的传递过程





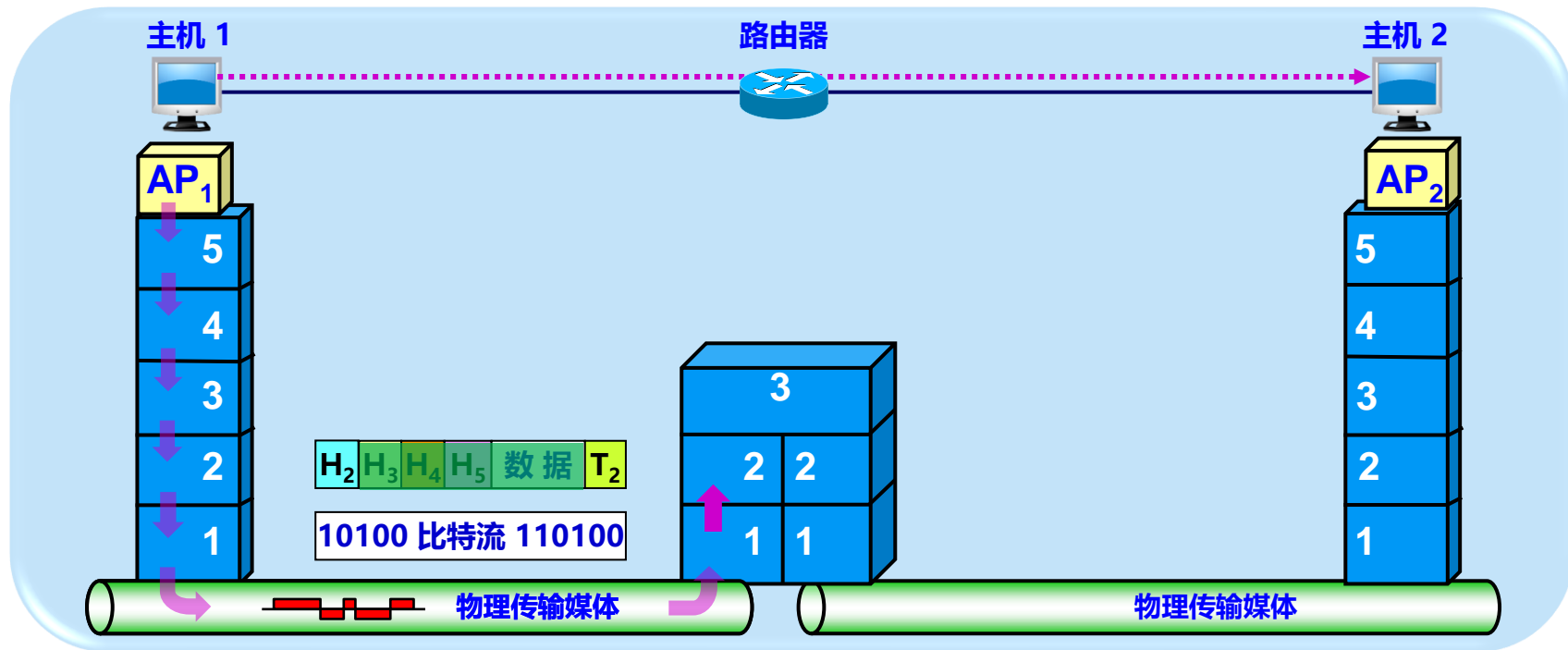
## 数据在各层之间的传递过程





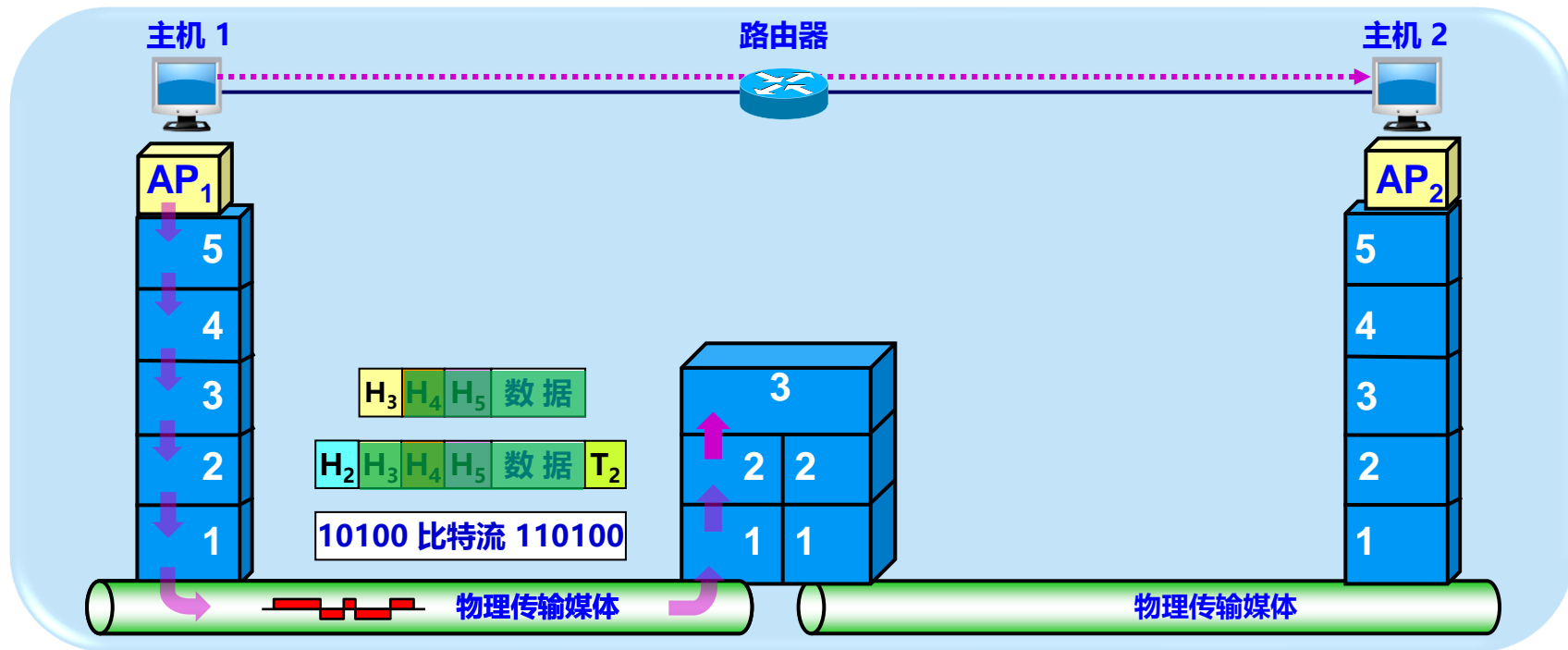


## 数据在各层之间的传递过程



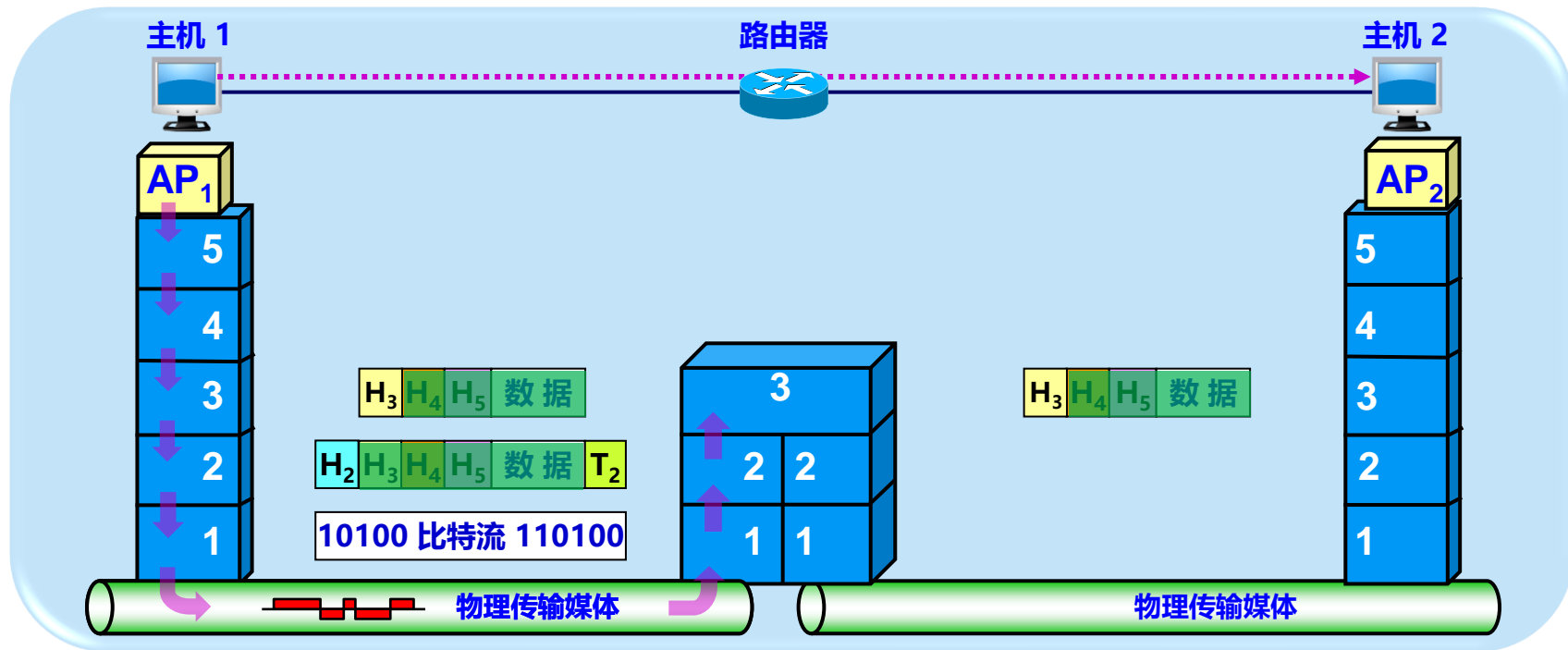


## 数据在各层之间的传递过程



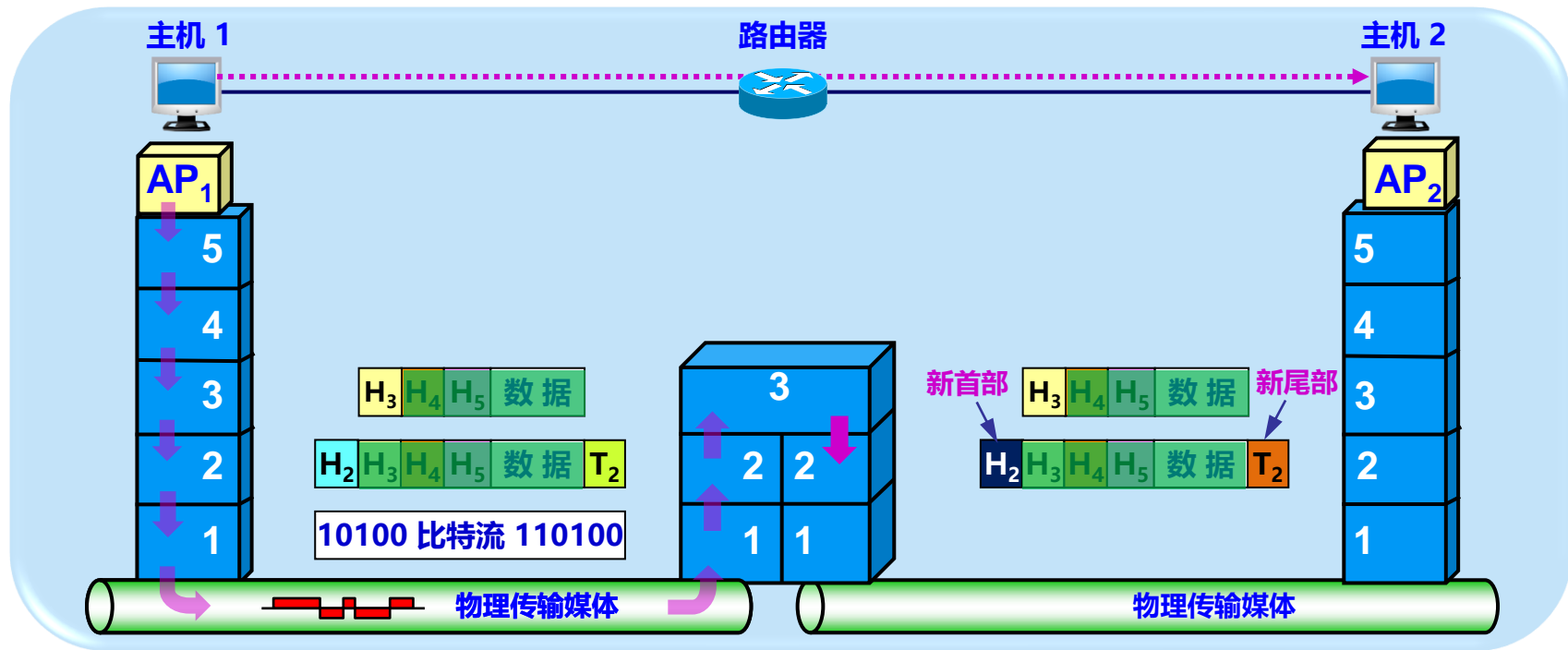


## 数据在各层之间的传递过程



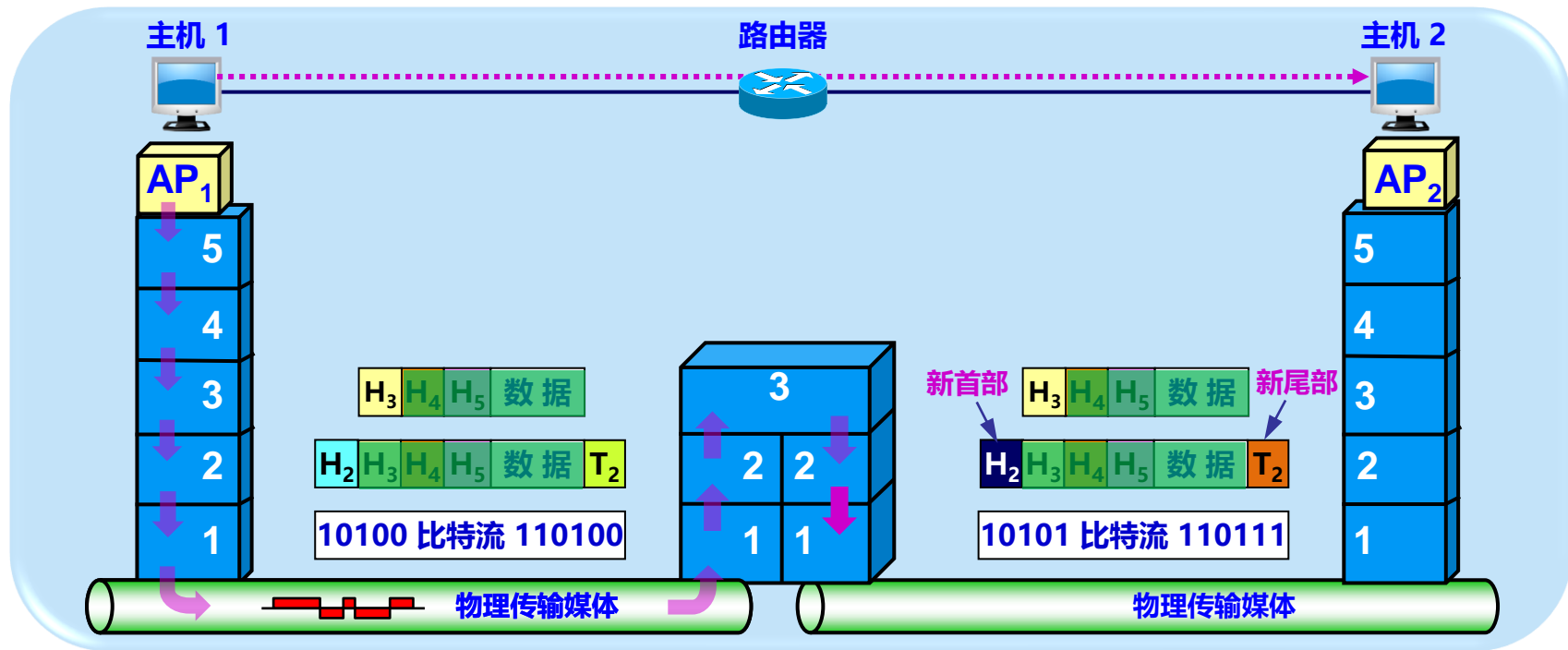


## 数据在各层之间的传递过程



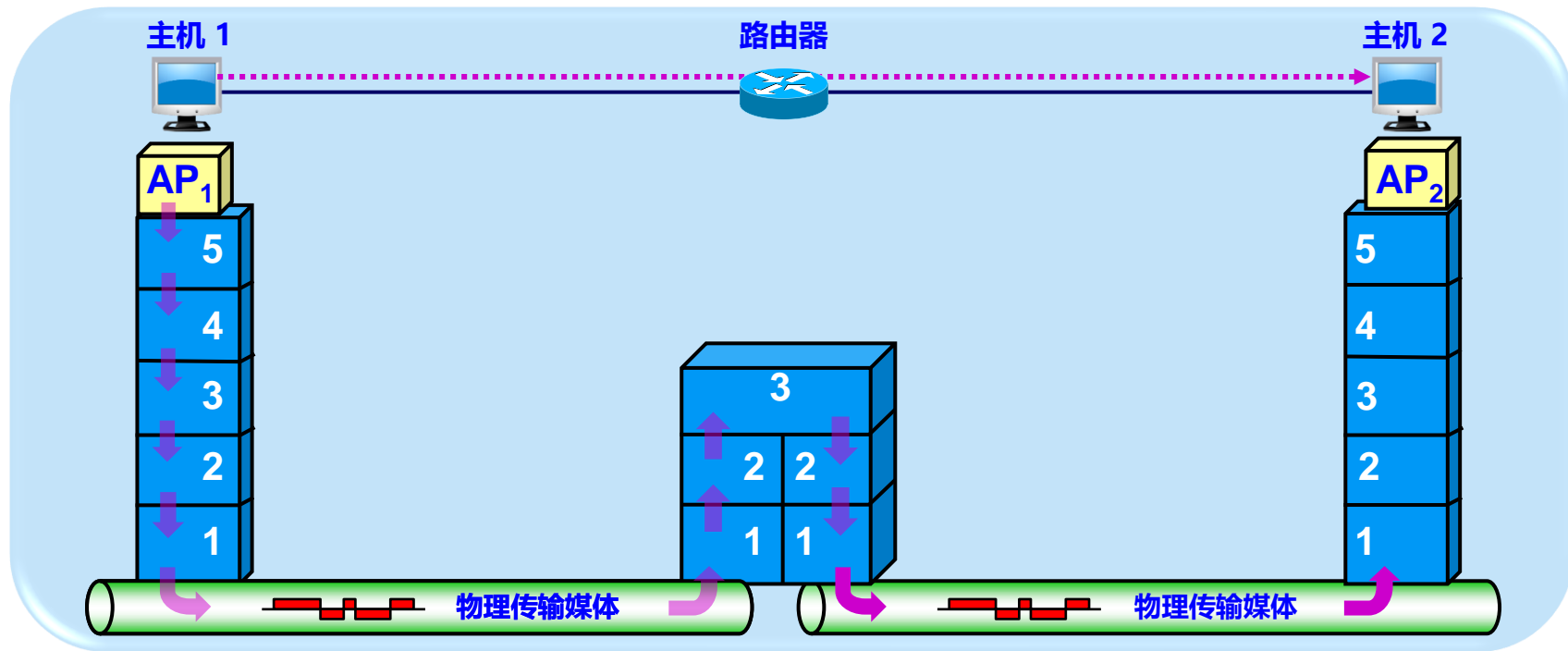


## 数据在各层之间的传递过程



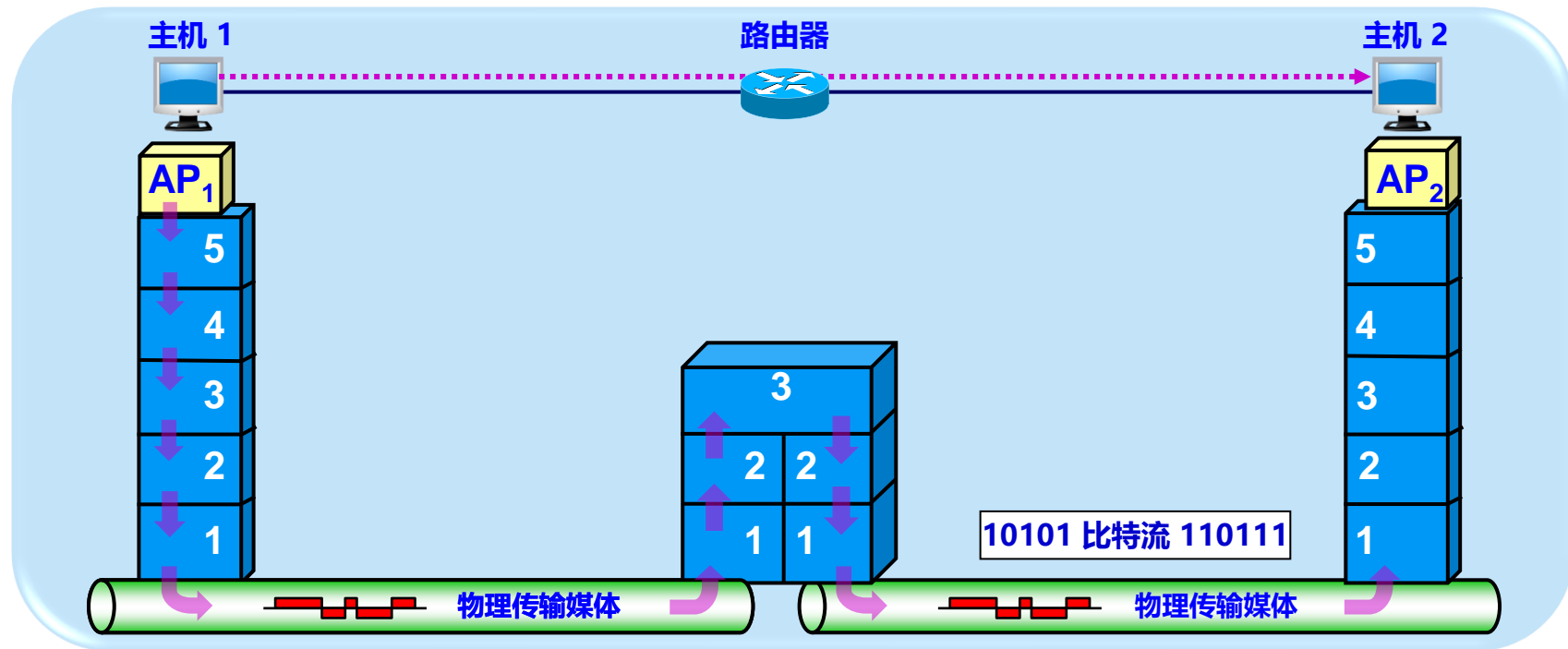


## 数据在各层之间的传递过程



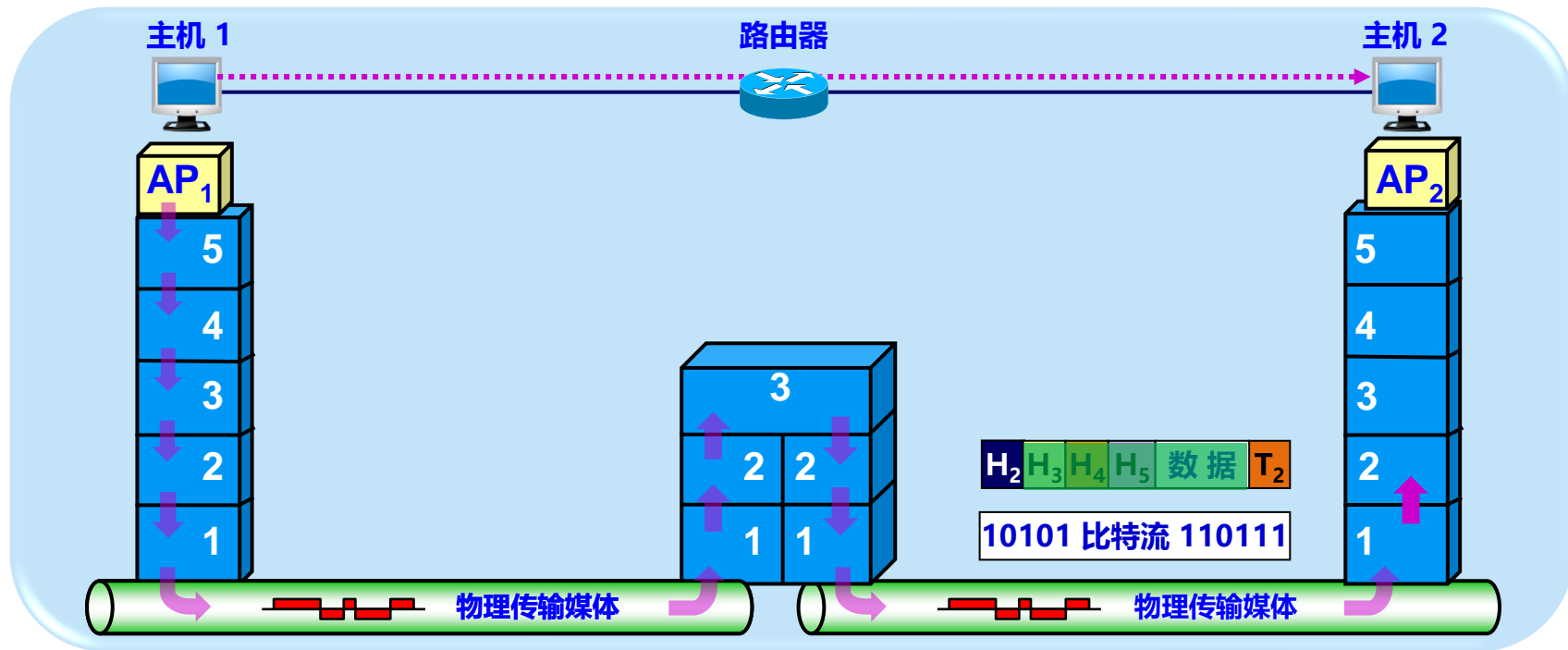


## 数据在各层之间的传递过程





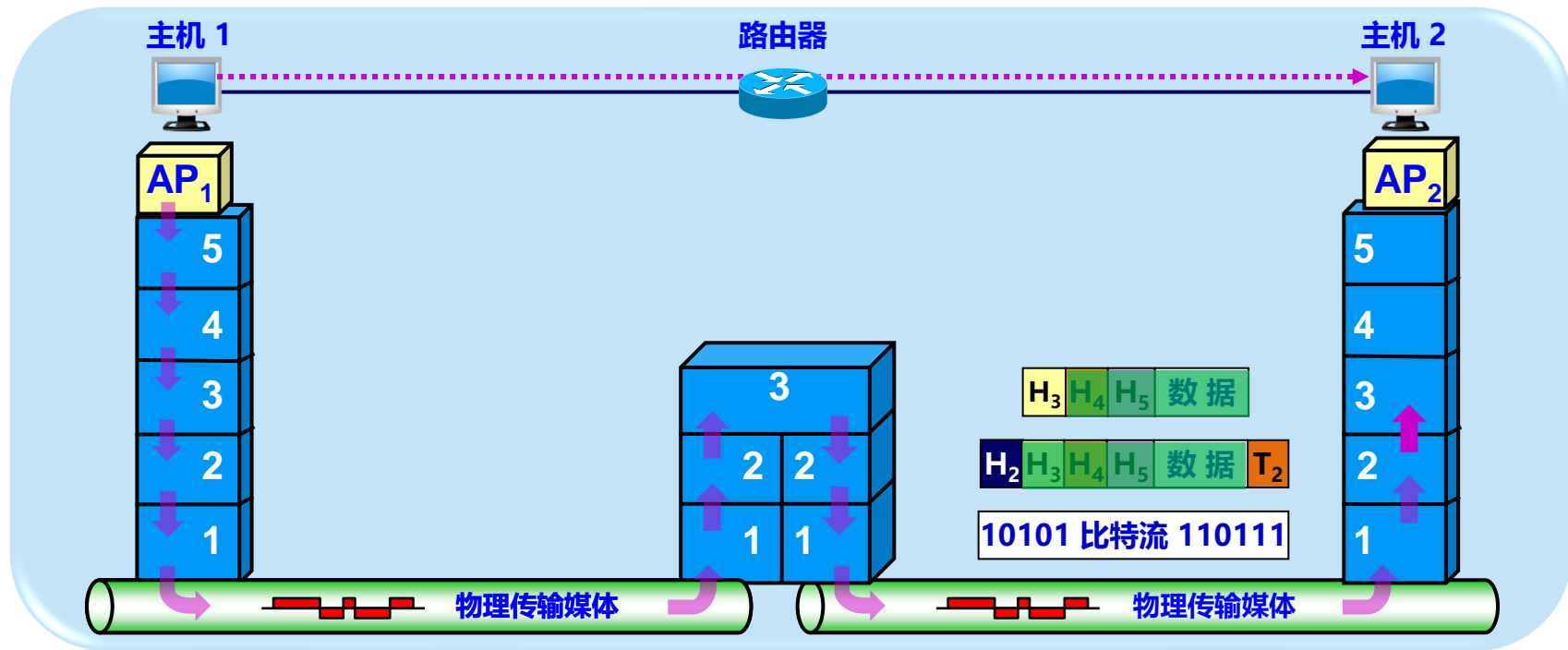
## 数据在各层之间的传递过程





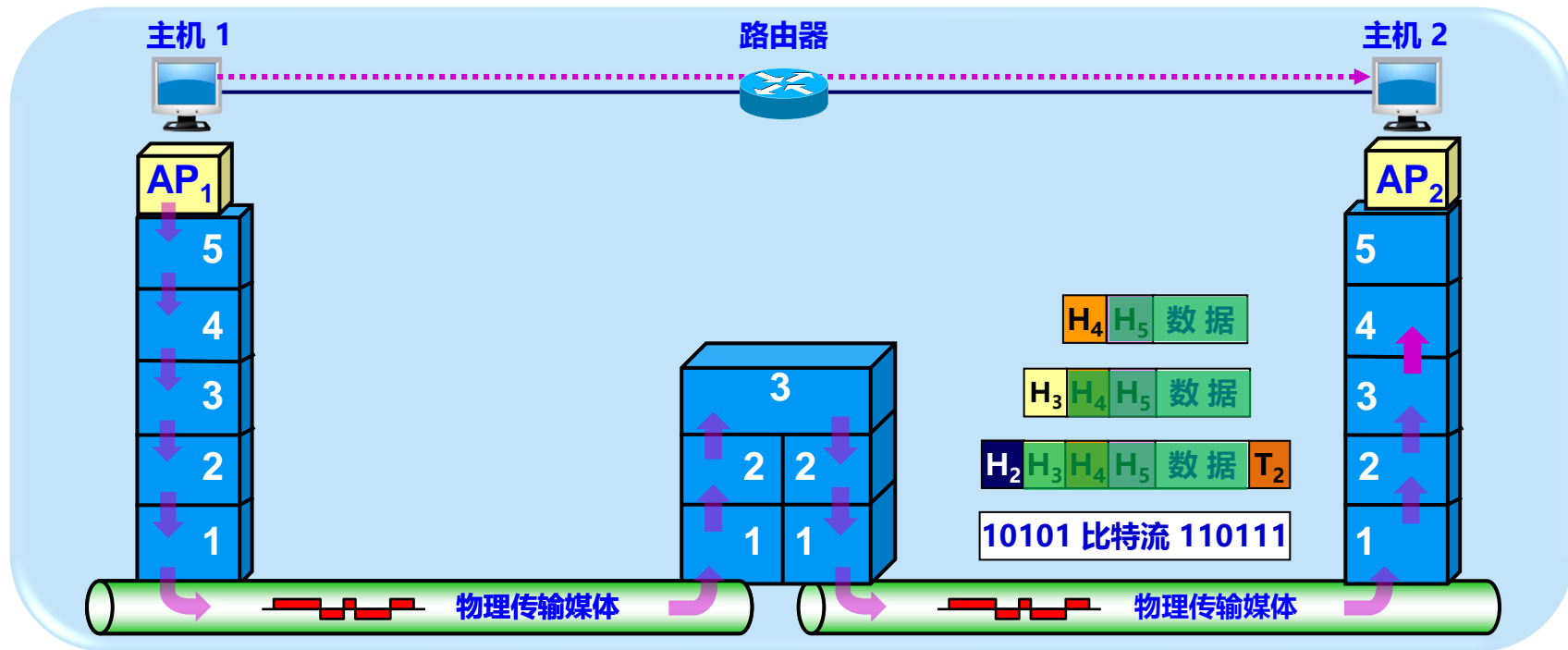


## 数据在各层之间的传递过程



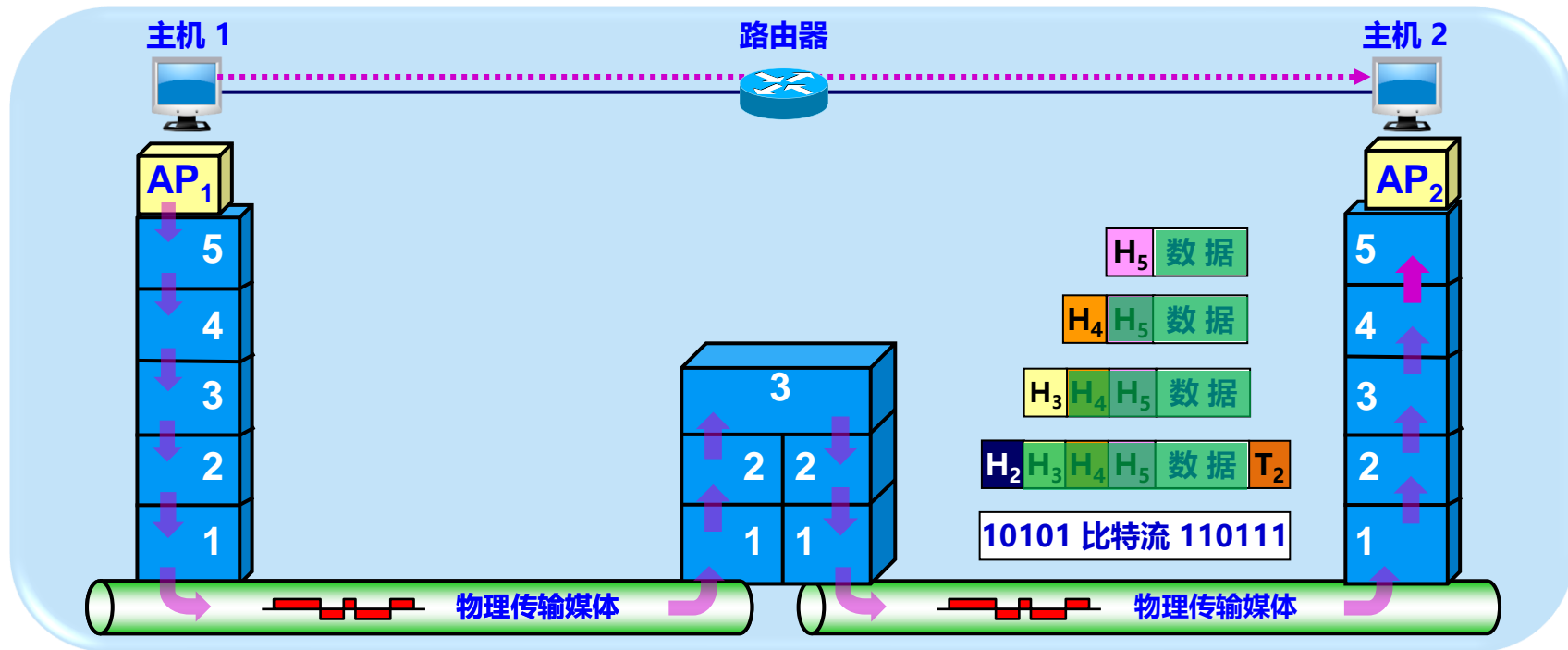


## 数据在各层之间的传递过程



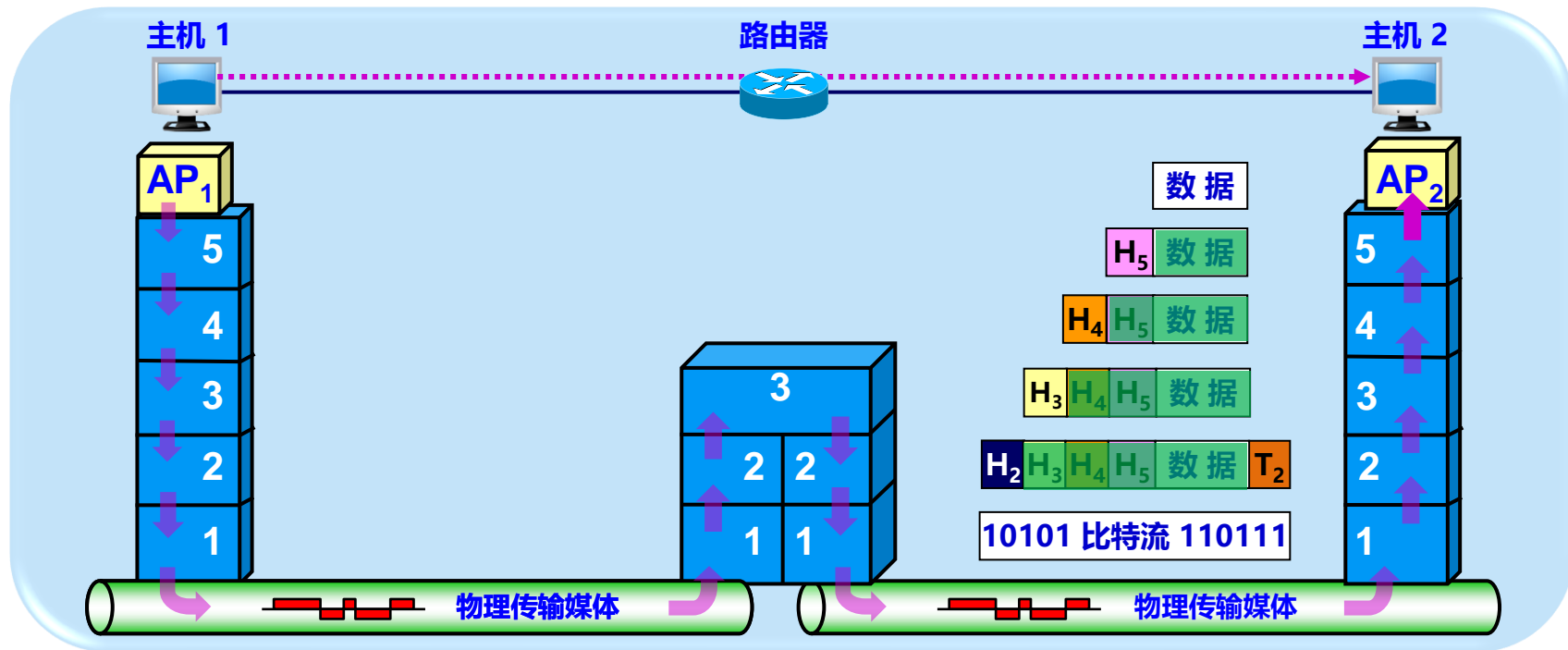


## 数据在各层之间的传递过程



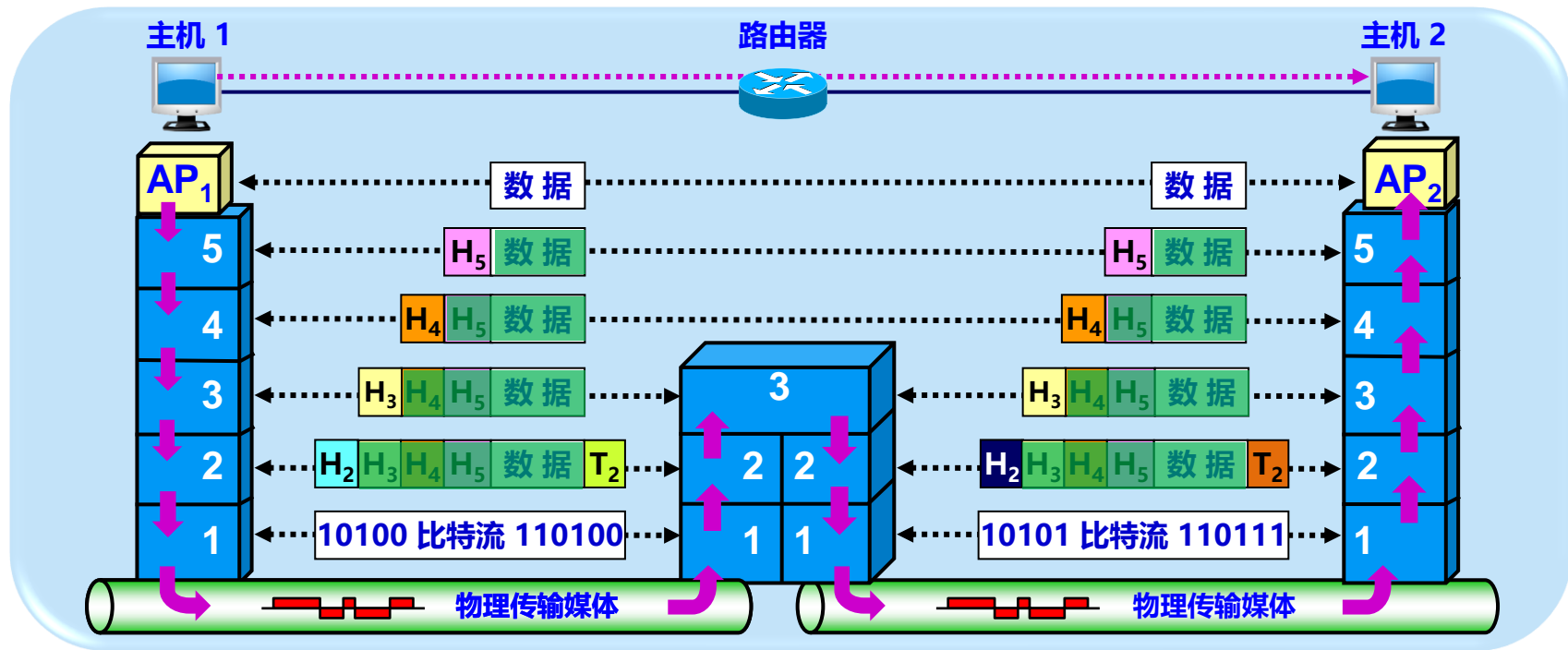


## 数据在各层之间的传递过程





## 数据在各层之间的传递过程





## 对等层与协议数据单元

- 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** (Protocol Data Unit)。
- 任何两个同样的层次把 PDU （即数据单元加上控制信息）通过水平虚线直接传递给对方。这就是所谓的 **“对等层”** 之间的通信。

各层协议实际上就是在各个**对等层**之间传递数据时的各项规定。



## 1.7.4 实体、协议、服务和访问点

- **实体 (entity)** : 表示任何可发送或接收信息的硬件或软件进程。
- **协议**: 控制**两个对等实体**进行通信的规则集合。
- 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**。



## 注意：协议和服务在概念上是**不一样**的

### 协议

其实现保证了能够向上一层提供服务。

对上面的服务用户是透明的。

是“水平的”

### 服务

上层使用服务原语获得下层所提供的服务。

上面的服务用户只能看见服务，无法看见下面的协议。

是“垂直的”



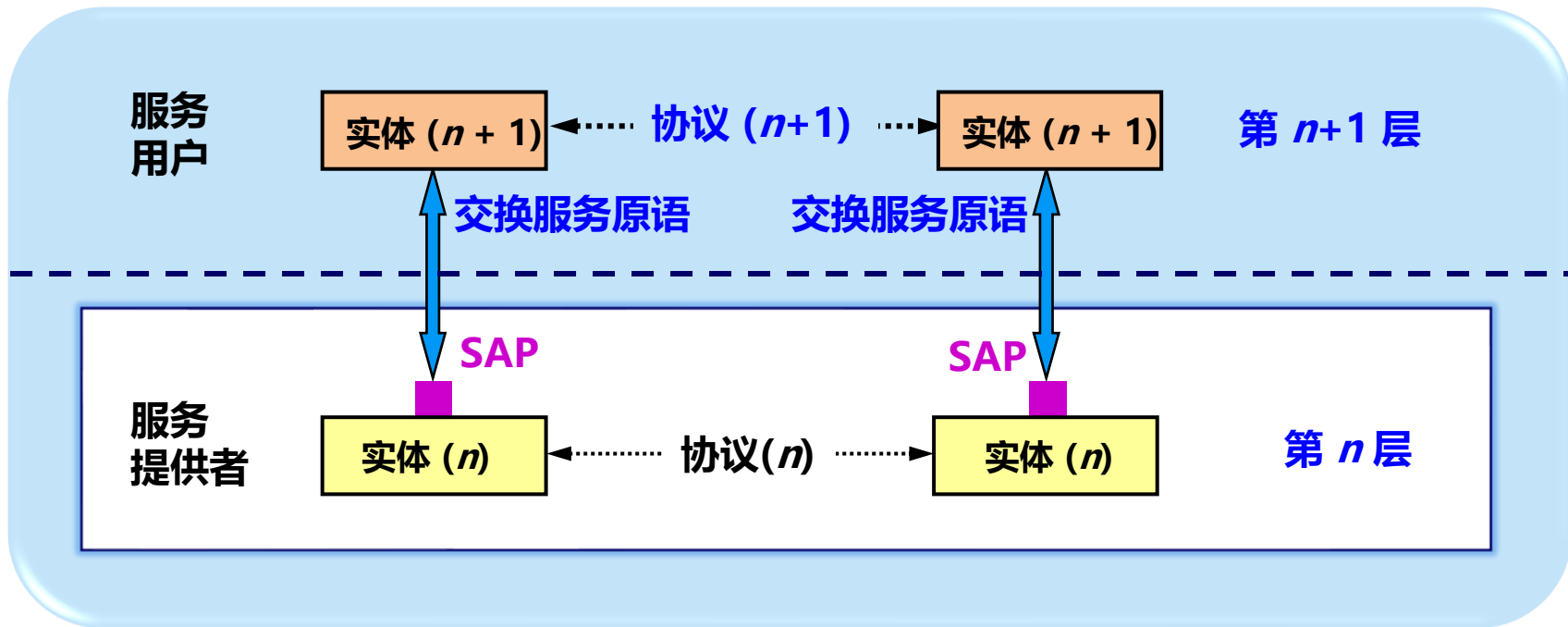


## 服务访问点 SAP

- 在同一系统中相邻两层的实体进行交互（即交换信息）的地方，通常称为**服务访问点 SAP** (Service Access Point)。
- 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。



## 相邻两层之间的关系





## 协议很复杂，要应付所有异常情况

明日正午进攻，同意？

你确认“同意”？

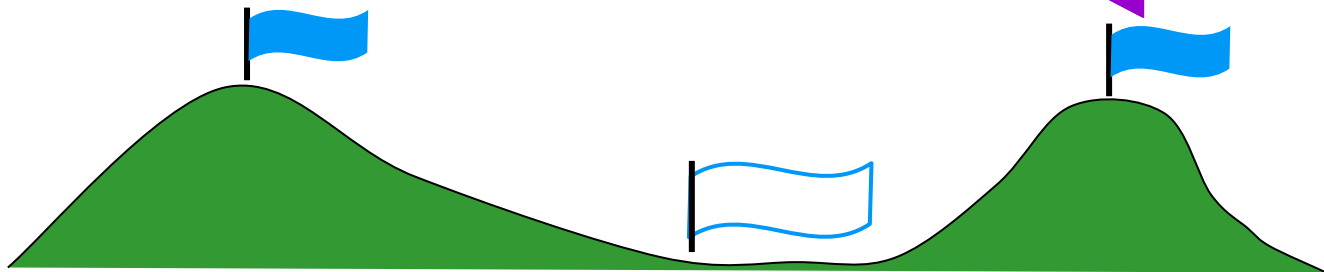
你真的确认“同意”？

这样的协议无法实现！  
没有一种协议能够使蓝军  
100% 获胜。

同意

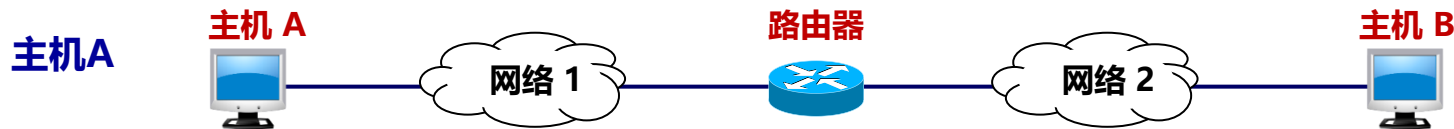
我确认“同意”

我真的确认“同意”

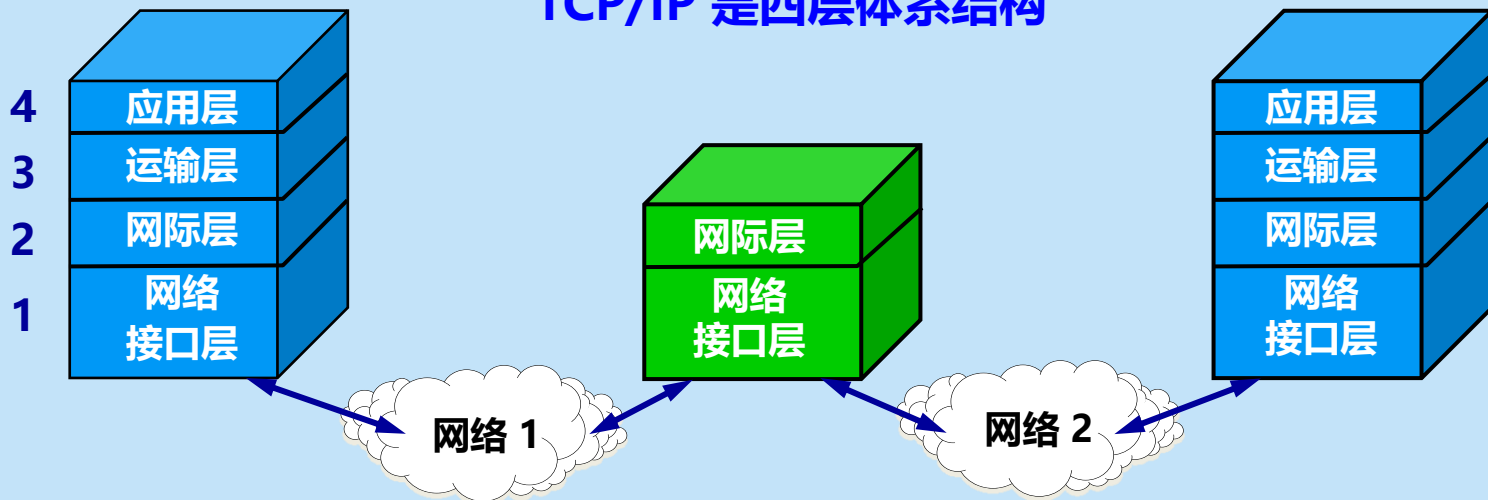




## 1.7.5 TCP/IP 的体系结构



TCP/IP 是四层体系结构

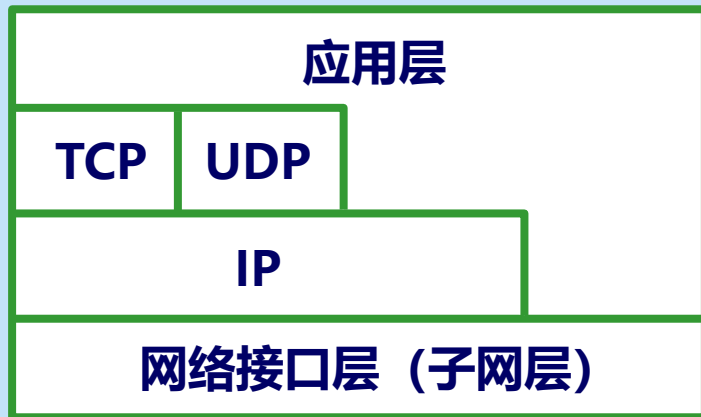


路由器在转发分组时**最高**只用到**网际层**，没有使用运输层和应用层。



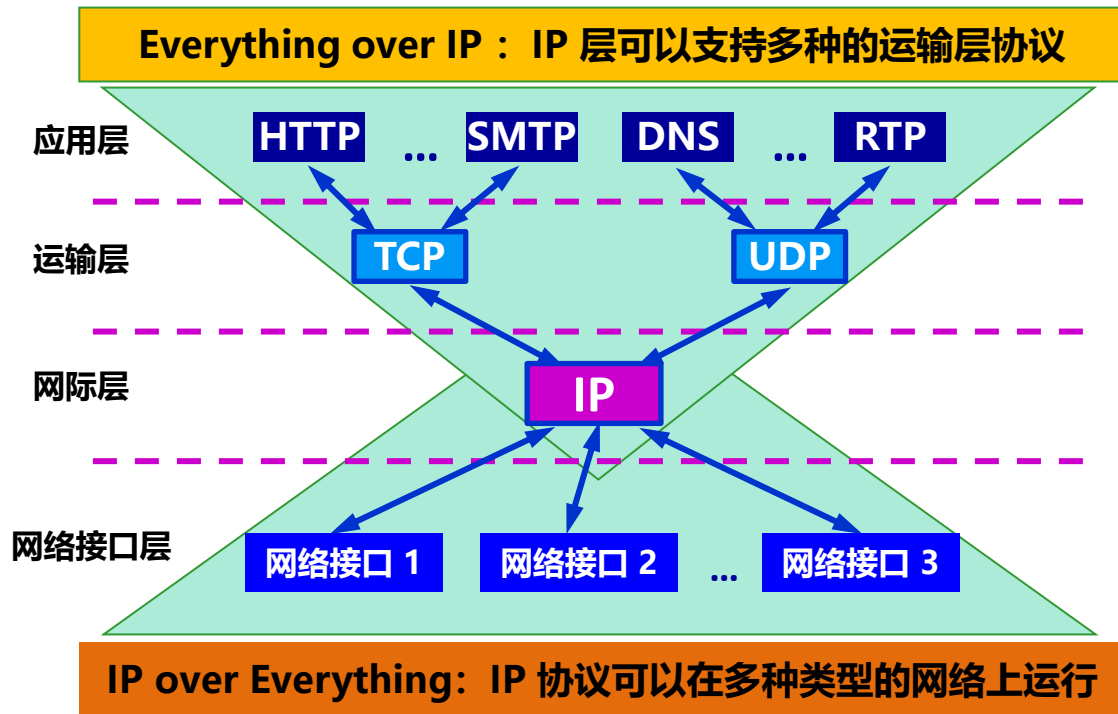
## TCP/IP 体系结构的另一种表示方法

- 现在互联网使用的 TCP/IP 体系结构已经发生了演变，即某些应用程序可以直接使用 IP 层，或甚至直接使用最下面的网络接口层。





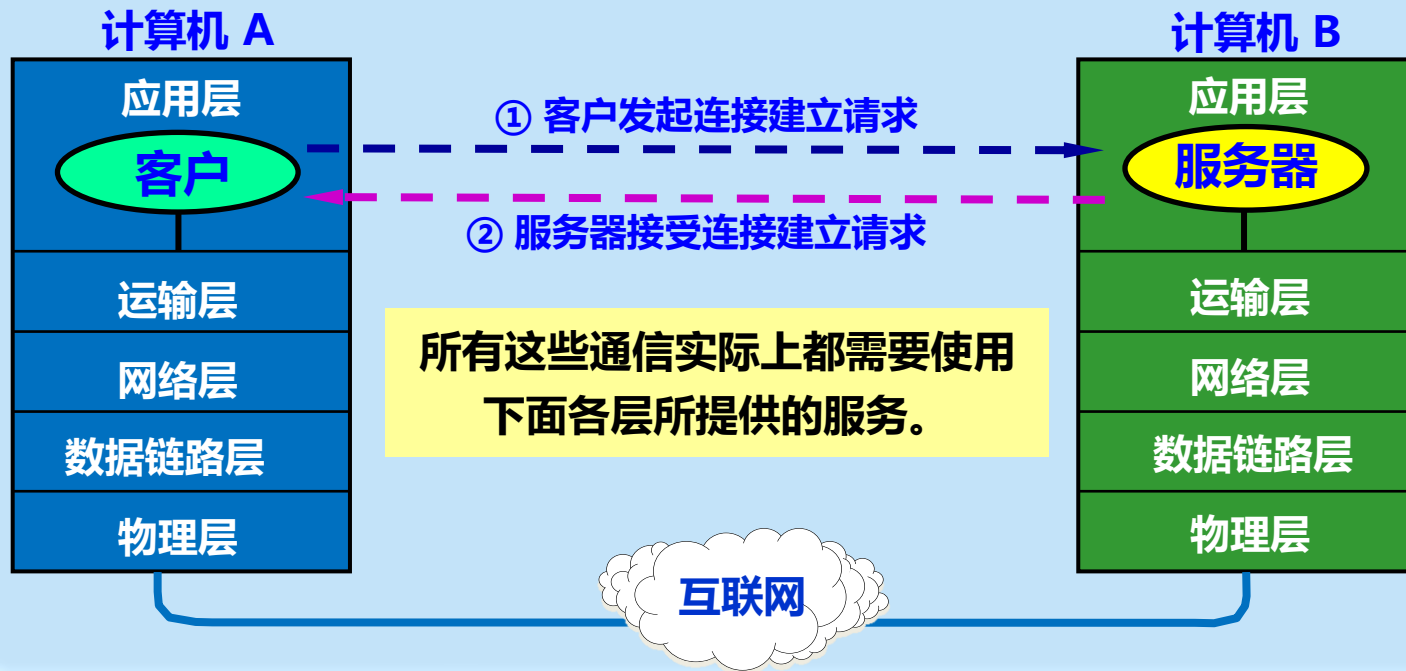
## 沙漏计时器形状的 TCP/IP 协议族



设计理念：网络核心部分越简单越好。



## 互联网中客户-服务器工作方式





## 同时运行多个服务器进程同时为多个客户进程提供服务

