

数据通信与网络

第 2 讲



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)。**

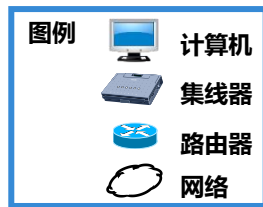
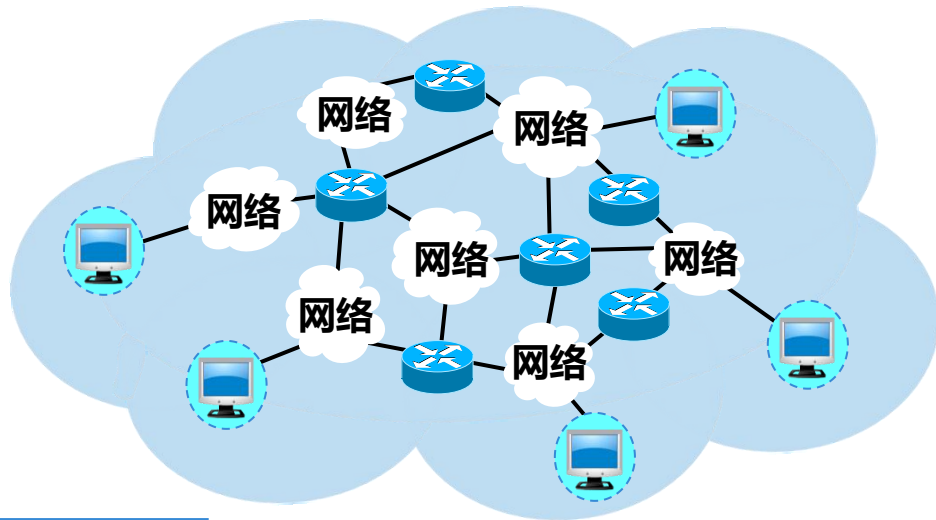
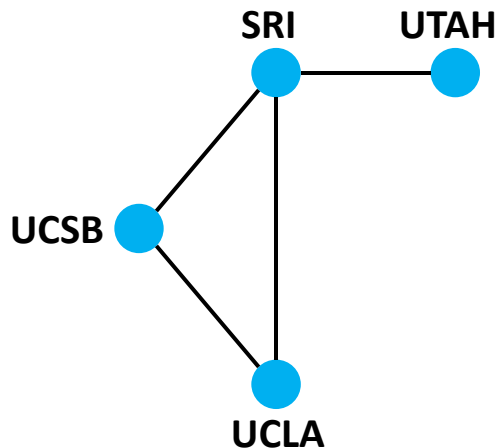


图1-1 (b) 由网络构成的互连网



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。

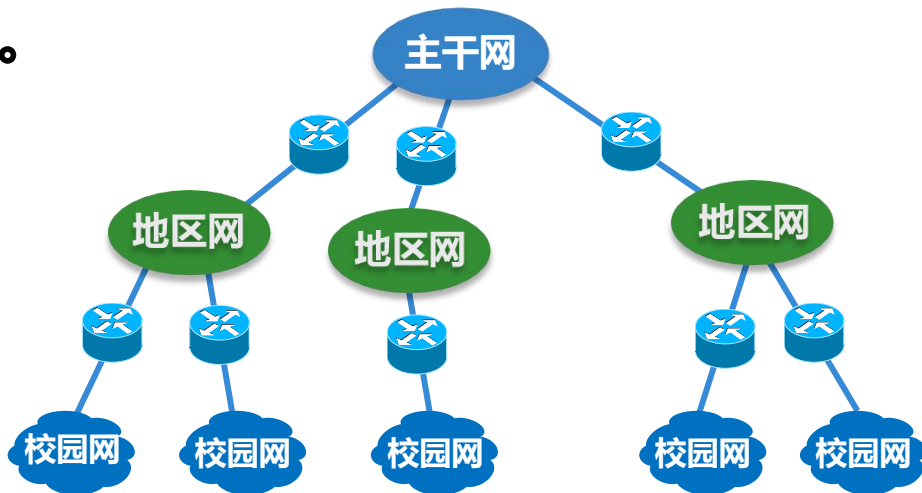


1969 年的 ARPANET



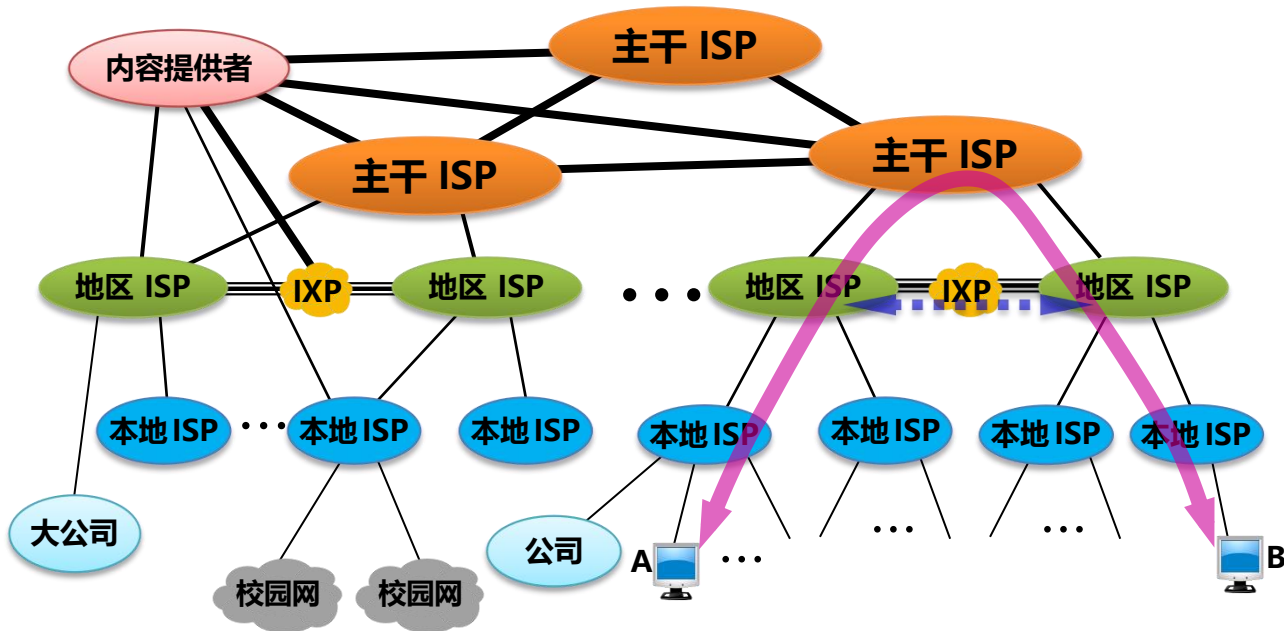
第二阶段：1985 – 1993

- 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 and 研究所，并且成为互联网中的主要组成部分。





第三阶段：1993 – 现在

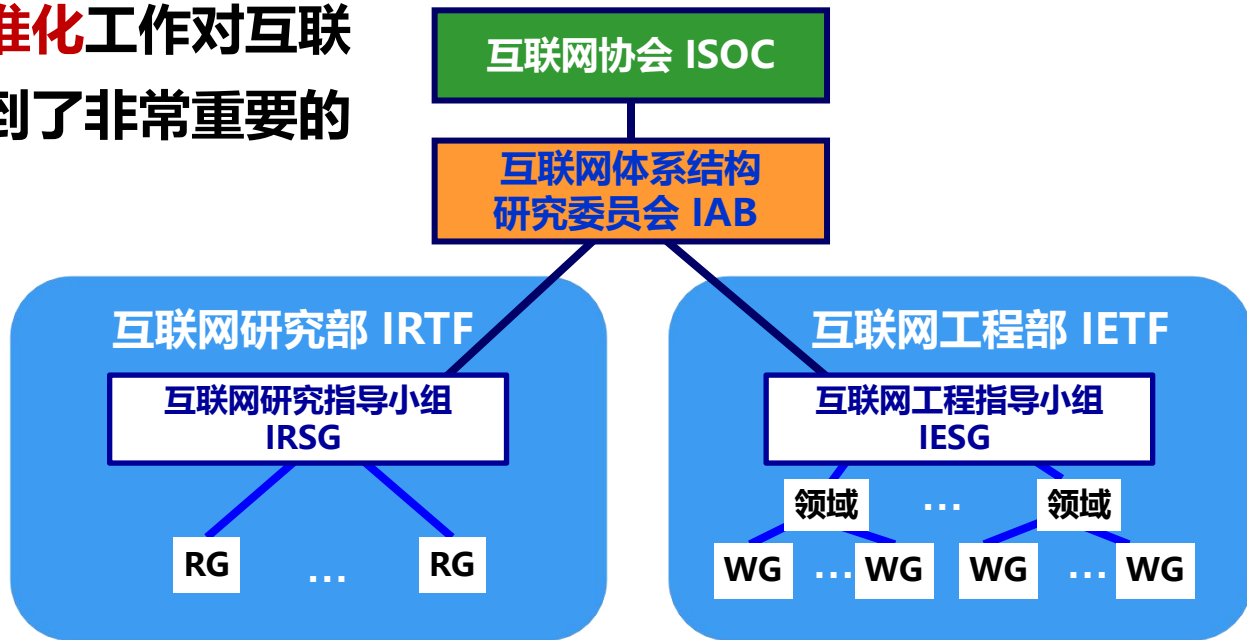


通信举例：主机A → 本地 ISP → 地区 ISP → 主干 ISP → 地区 ISP → 本地 ISP → 主机B



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



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



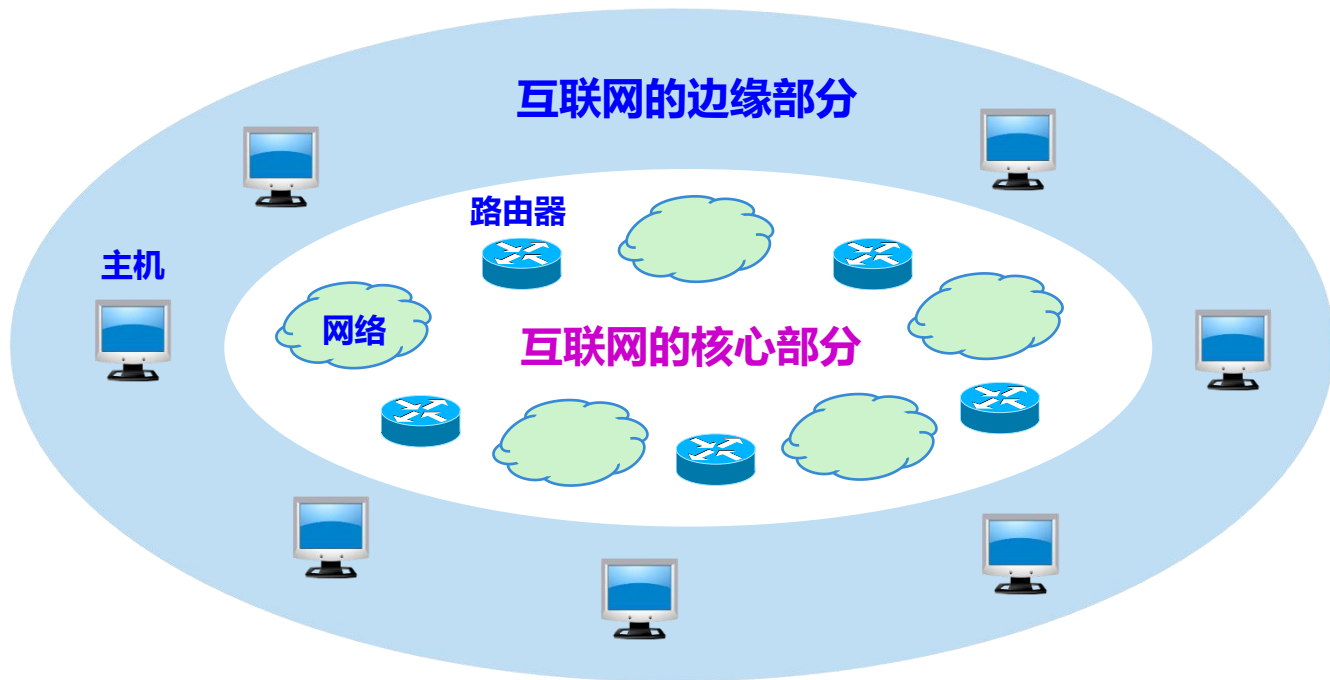
1.3 互联网的组成

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）。

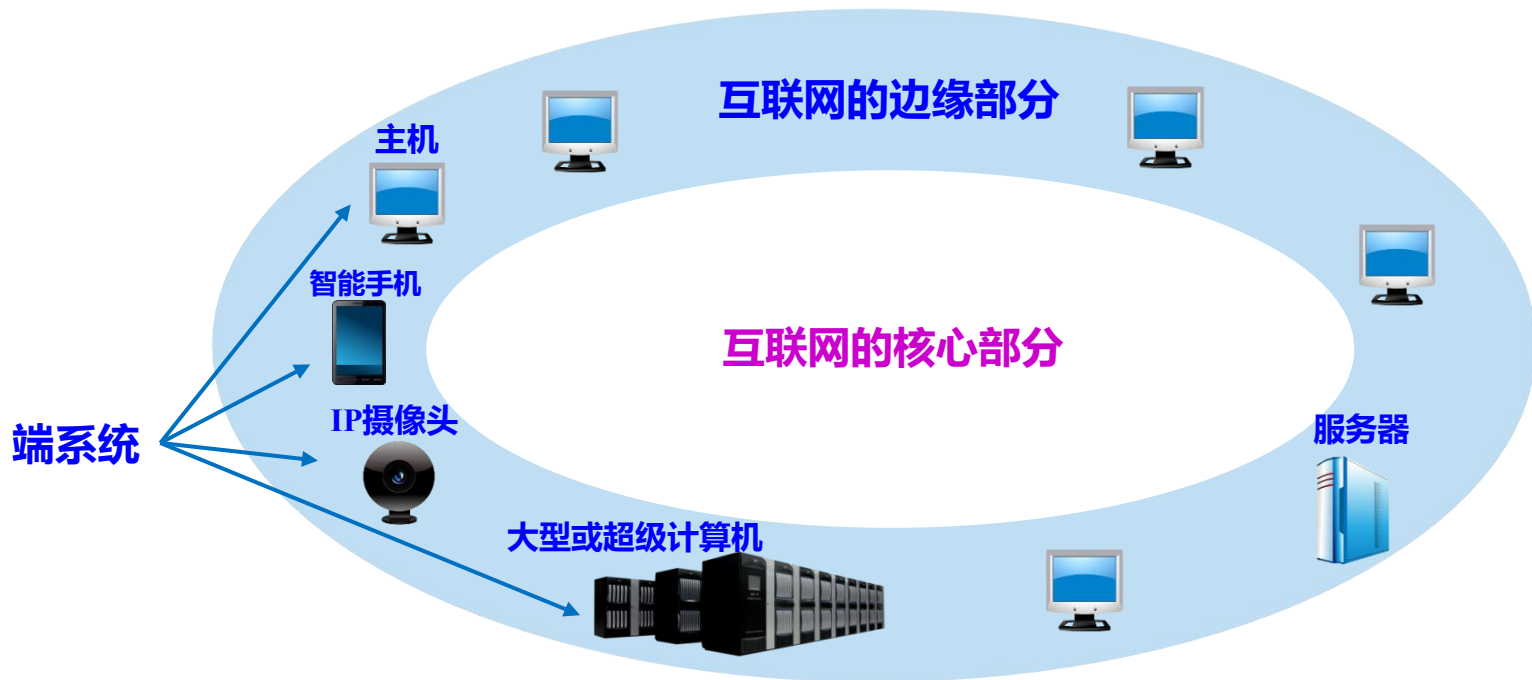


1.3 互联网的组成





1.3.1 互联网的边缘部分





“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。

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

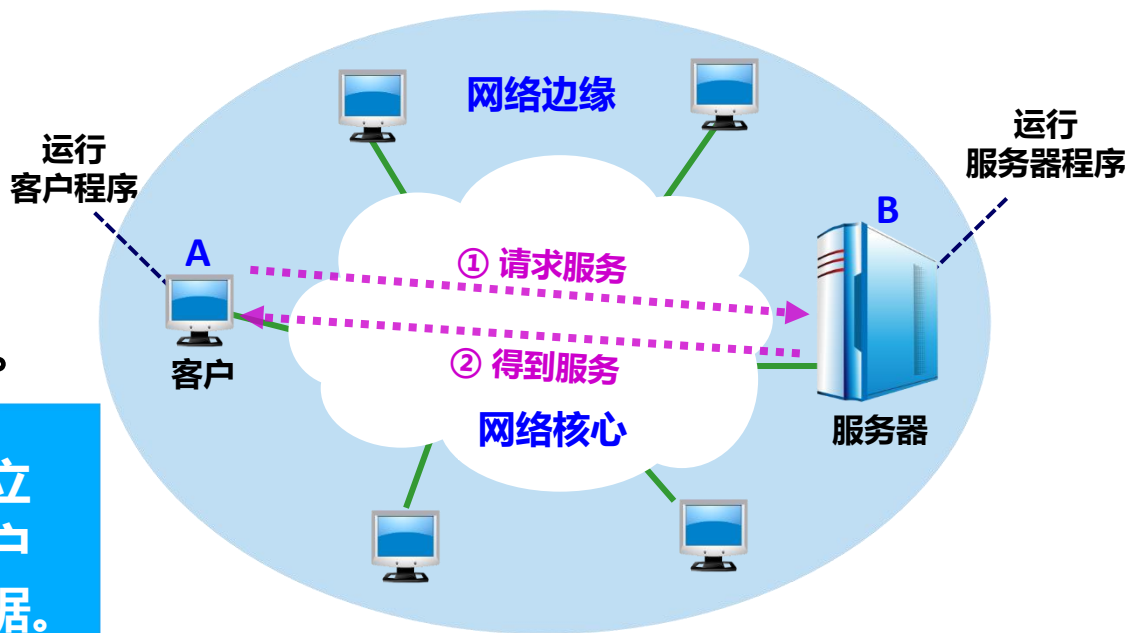
端系统之间的两种通信方式



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。



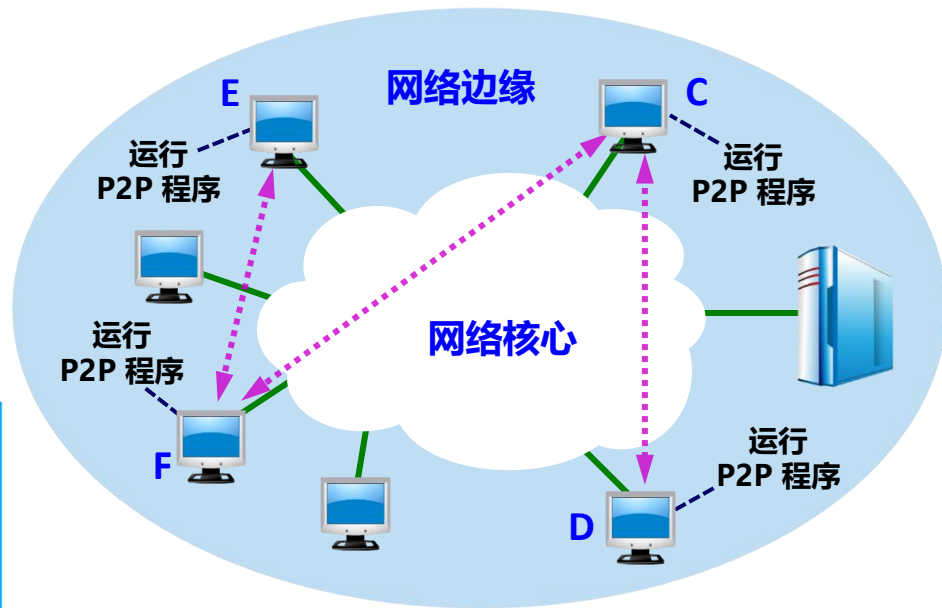
客户 A 向服务器 B 发出请求服务，
服务器 B 向客户 A 提供服务。



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**。

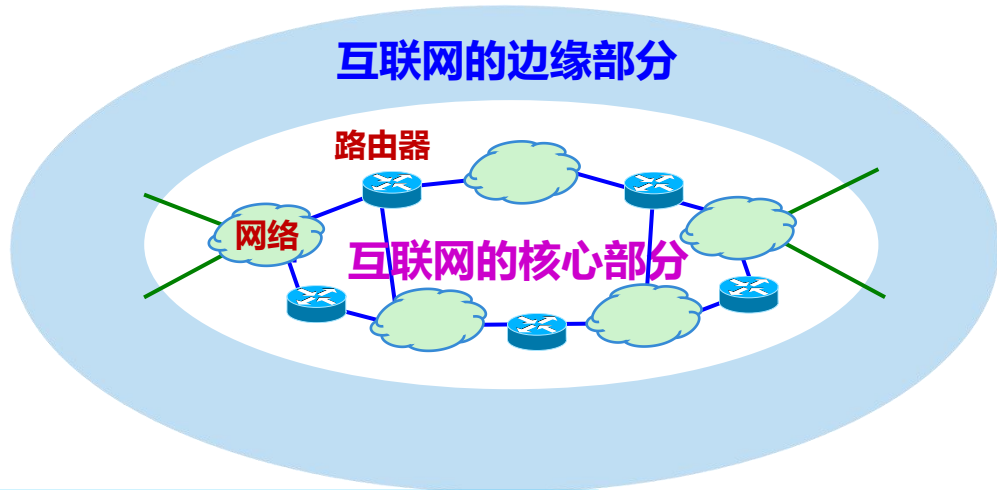


分布式、高可用



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。



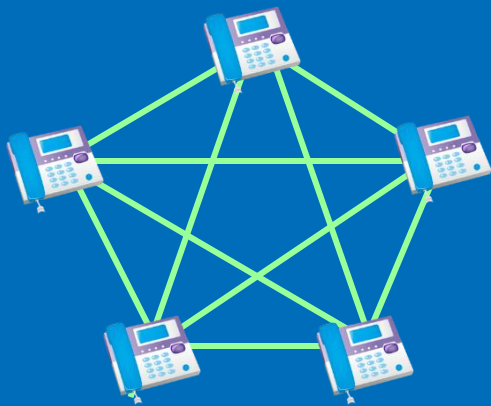
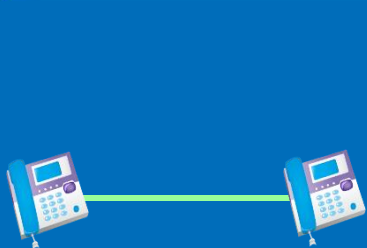
1.3.2 互联网的核心部分

- **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。**

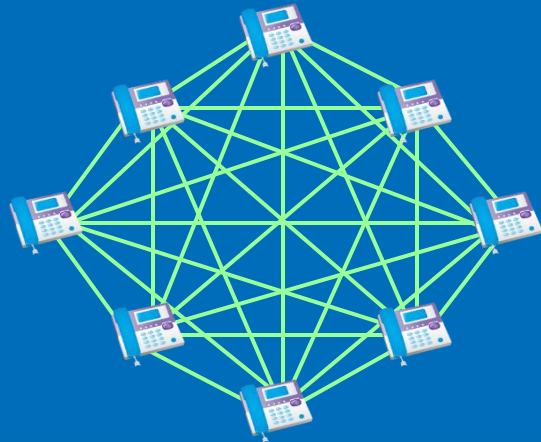


1. 电路交换的主要特点

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。

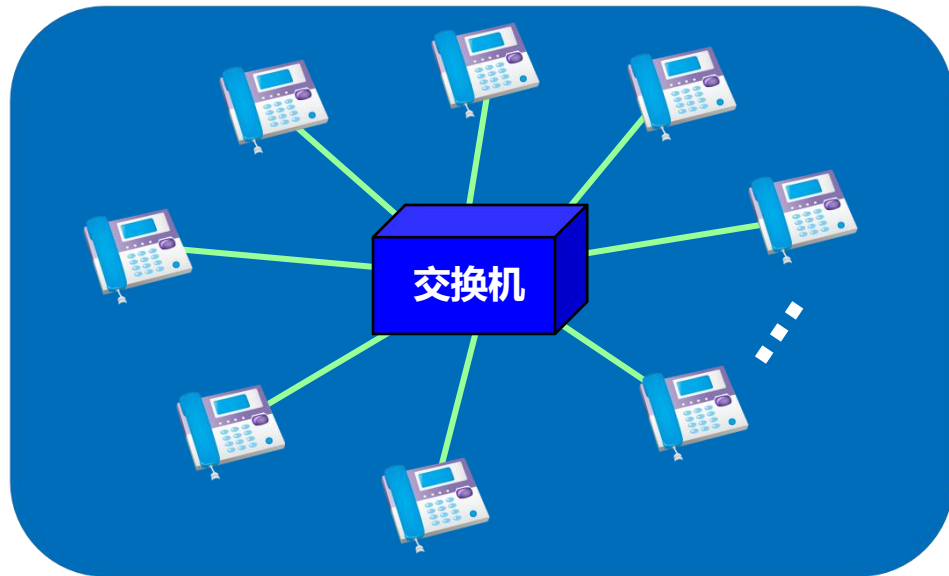


N 部电话机两两直接相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线。



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。



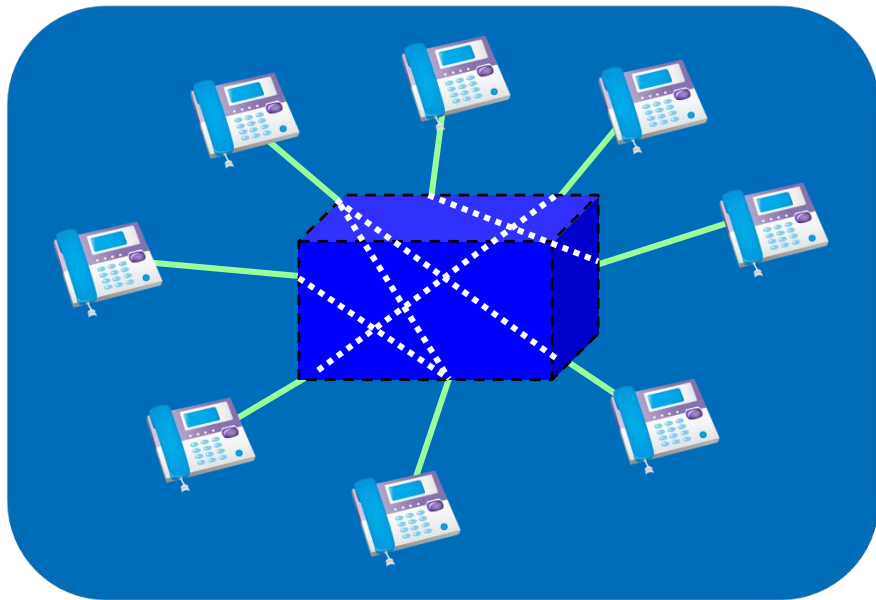
每一部电话都直接连接到交换机上，而交换机使用**交换**的方法，让电话用户彼此之间可以很方便地通信。

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

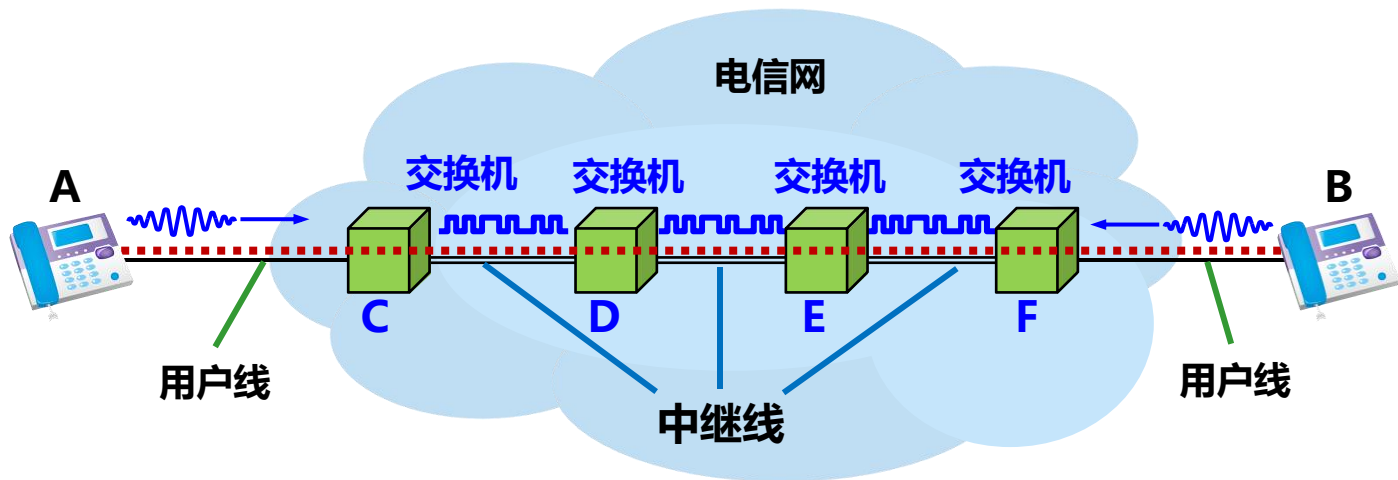
分为三个阶段：

- **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

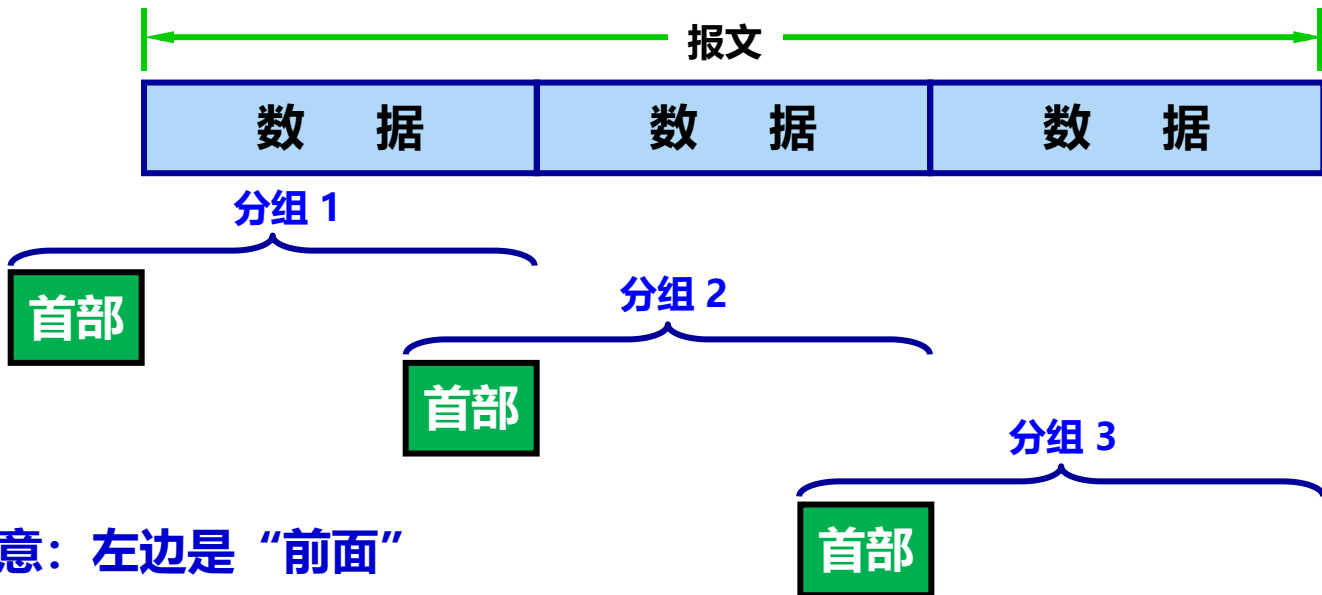
- 采用**存储转发**技术。



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)

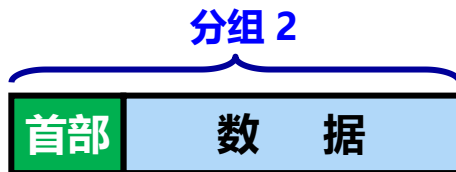


分组又称为“包”，而分组的首部也可称为“包头”。



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**。

暂存收到的分组。



检查分组首部。

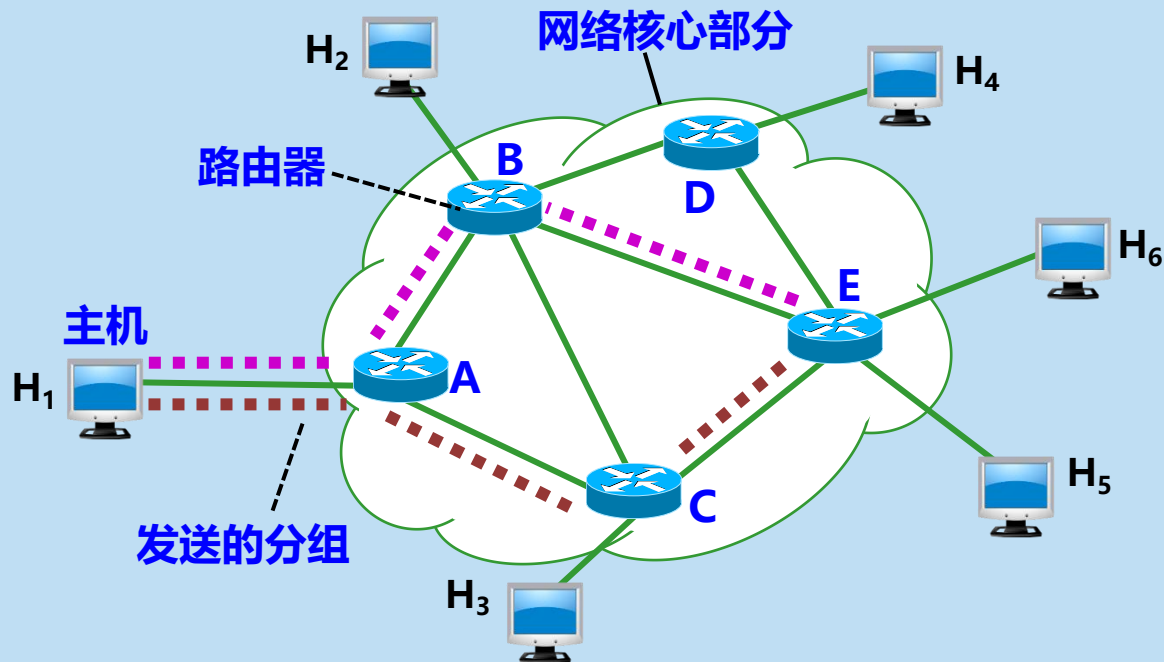


查找转发表。



按照首部中的目的地址，
找到合适的接口转发出去。

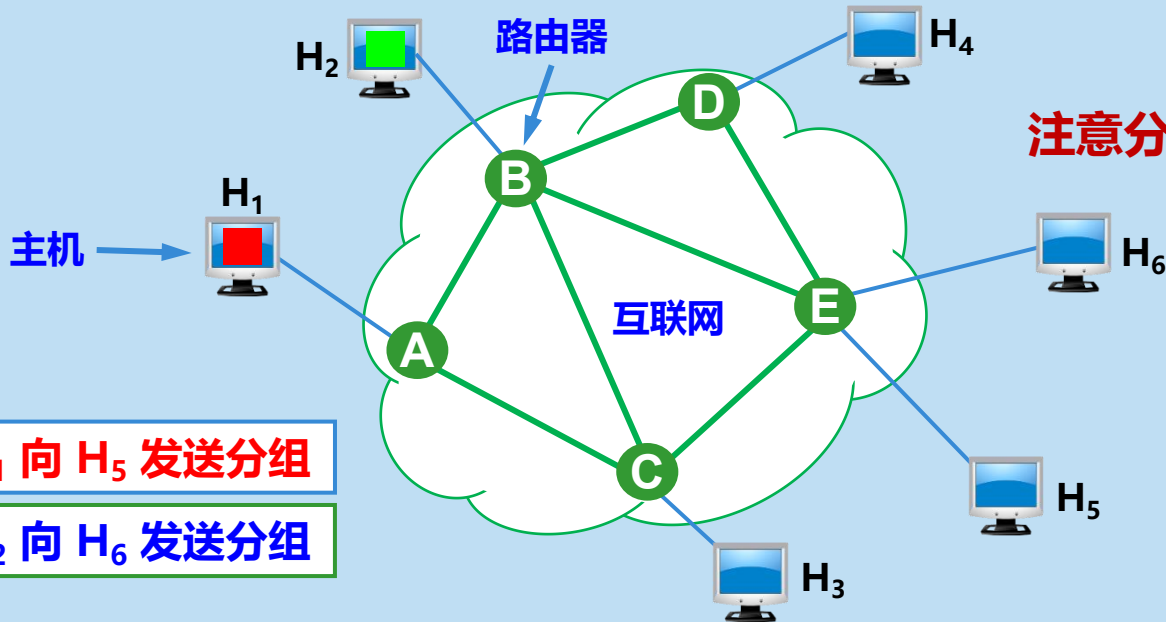
路由器处理分组的过程



(b) 核心部分中的网络可用一条链路表示

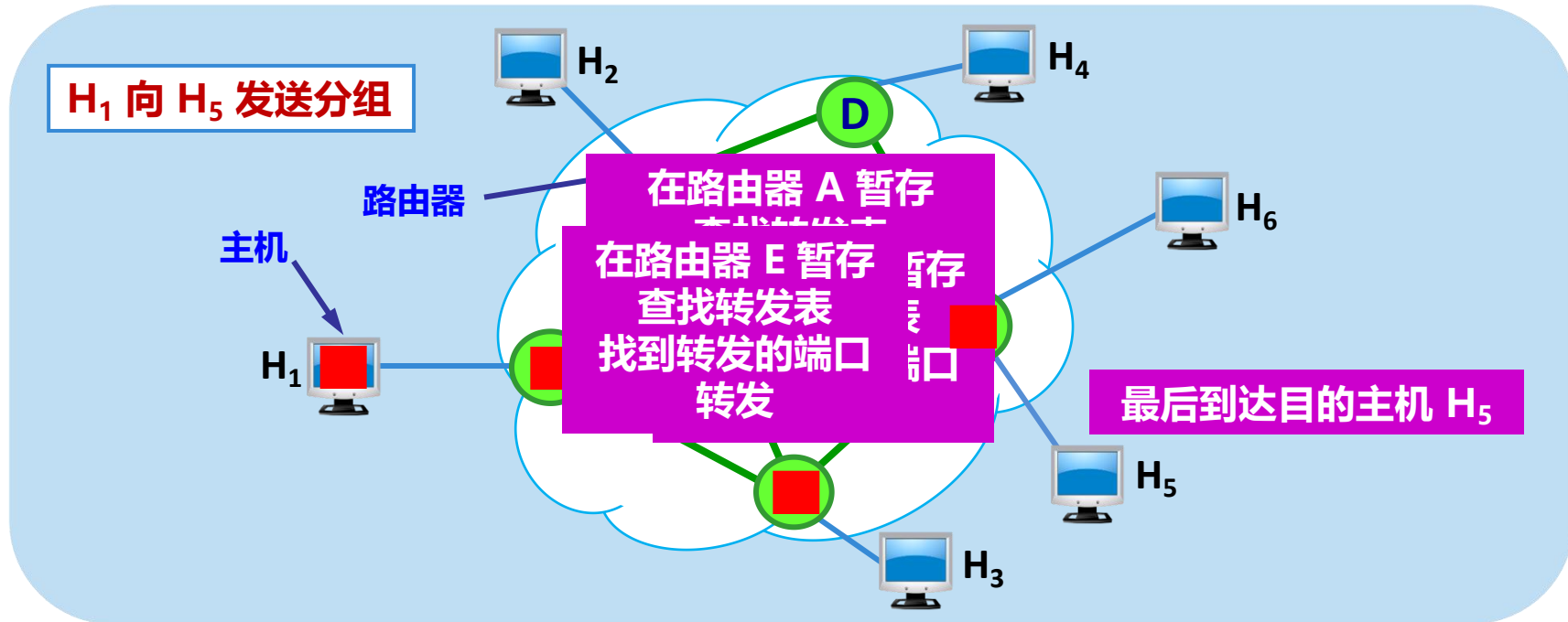


每个分组独立选择传输路径





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。

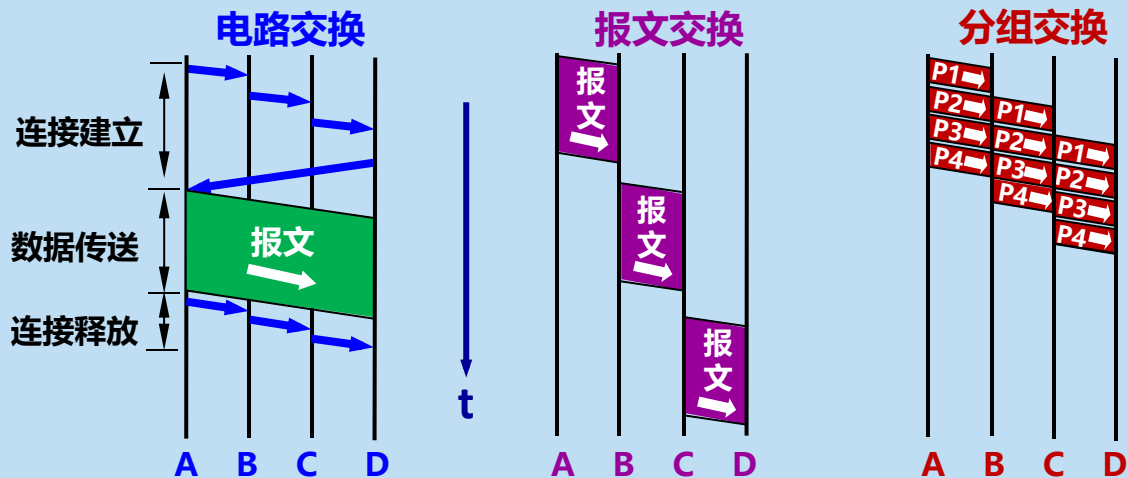


报文交换

- 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

The diagram shows a direct path of a bit stream from source to destination, represented by a green arrow pointing from left to right.

报文 报文 报文
存储转发 存储转发

The diagram shows three messages being stored at intermediate nodes (B and C) before being forwarded to the next node. This process is labeled '存储转发' (Store and Forward).

分组 分组 分组
存储转发 存储转发

The diagram shows three packets being stored at intermediate nodes (B and C) before being forwarded to the next node. This process is labeled '存储转发' (Store and Forward).



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。

“可编程的硬件” 表明：这种硬件一定包含有**中央处理器 CPU**。



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

比特

计算机中**数据量的单位**，也是信息论中信息量的单位。一个比特就是二进制数字中的一个1或0。

常用数据量单位

$$8 \text{ bit} = 1 \text{ Byte}$$

$$KB = 2^{10} B$$

$$MB = K \cdot KB = 2^{10} \cdot 2^{10} B = 2^{20} B$$

$$GB = K \cdot MB = 2^{10} \cdot 2^{20} B = 2^{30} B$$

$$TB = K \cdot GB = 2^{10} \cdot 2^{30} B = 2^{40} B$$

速率

连接在计算机网络上的主机在数字信道上传送比特的速率，也称为**比特率**或**数据率**。

常用数据率单位

$$\text{bit/s (b/s, bps)}$$

$$kb/s = 10^3 \text{ b/s (bps)}$$

$$Mb/s = k \cdot kb/s = 10^3 \cdot 10^3 \text{ b/s} = 10^6 \text{ b/s (bps)}$$

$$Gb/s = k \cdot Mb/s = 10^3 \cdot 10^6 \text{ b/s} = 10^9 \text{ b/s (bps)}$$

$$Tb/s = k \cdot Gb/s = 10^3 \cdot 10^9 \text{ b/s} = 10^{12} \text{ b/s (bps)}$$

例1：有一个待发送的数据块，大小为100 MB，网卡的发送速率为100 Mbps，则网卡发送完该数据块需要多长时间？

$$\begin{aligned} \frac{\cancel{100} \text{ MB}}{\cancel{100} \text{ Mb/s}} &= \frac{\text{MB}}{\text{Mb/s}} \stackrel{\text{严格来说, 不能直接约掉}}{=} \frac{2^{20} B}{10^6 \text{ b/s}} = \frac{2^{20} \cdot \cancel{8b}}{10^6 \cancel{\text{b/s}}} = 8.388608 \text{ s} \\ &\stackrel{\text{平时估算, 可以直接约掉}}{\approx} \frac{B}{\text{b/s}} = \frac{8b}{\text{b/s}} = 8 \text{ s} \end{aligned}$$



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）（Hz、kHz、MHz、GHz）。
- 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

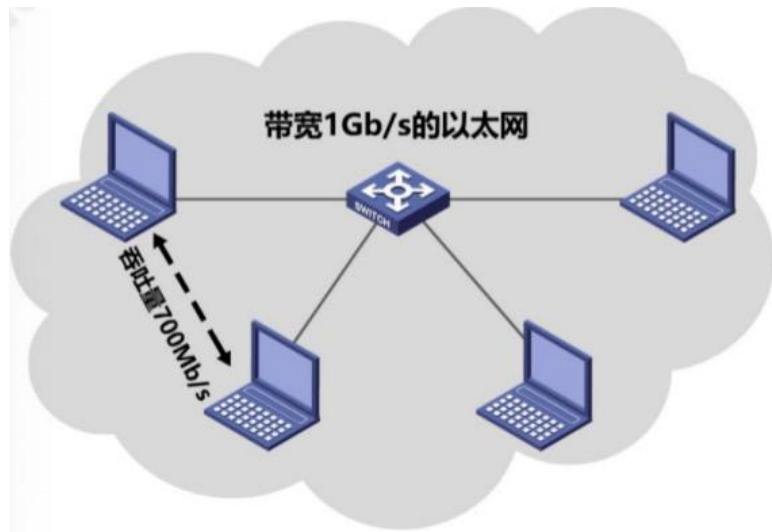
- 网络中某通道传送数据的能力，表示在单位时间内网络中的某信道所能通过的“**最高数据率**”。
- 单位就是数据率的单位 bit/s、Mb/s、Gb/s。

- ◆ 两者**关系密切**。
- ◆ 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**。
- 有时可用**每秒传送的字节数**或**帧数**来表示。

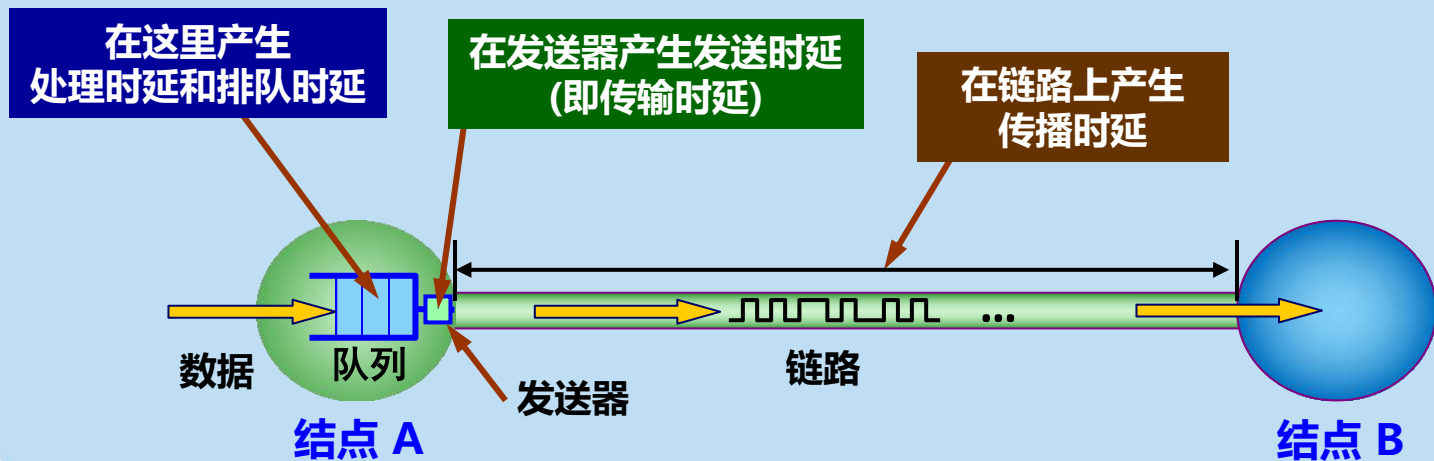




4. 时延 (delay 或 latency)

- 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**。

假设从结点 A 向结点 B 发送数据

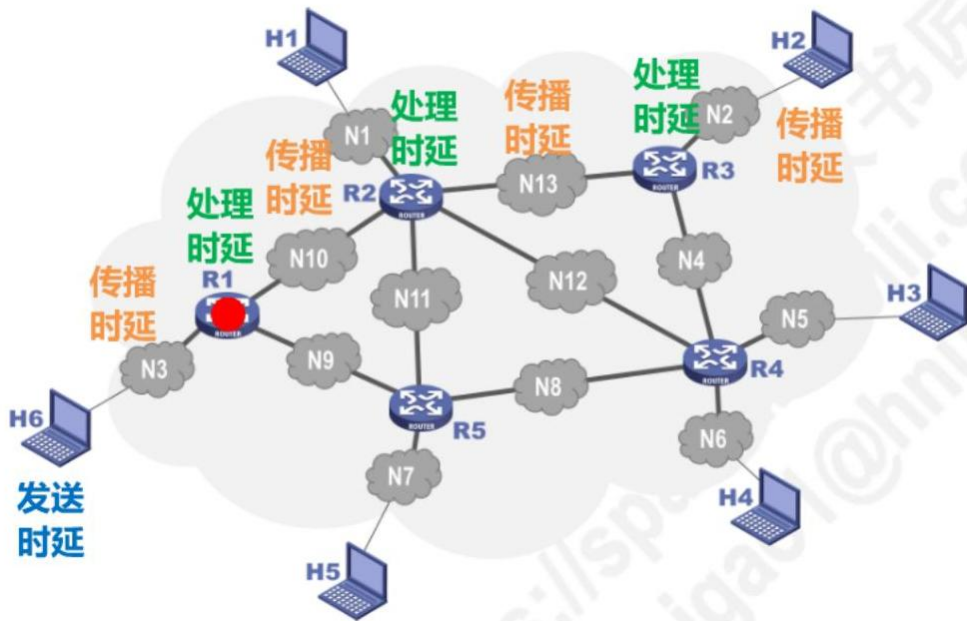


四种时延产生的地方不一样



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**。





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**。

自由空间 = 3.0×10^5 km/s

铜线 = 2.3×10^5 km/s

光纤 = 2.0×10^5 km/s



(1) 发送时延



网卡的发送速率

1Gb/s

100Mb/s

1Gb/s

信道带宽

1Gb/s

1Gb/s

100Mb/s

接口速率

1Gb/s

1Gb/s

1Gb/s

发送速率

1Gb/s

100Mb/s

100Mb/s

发送
时延

发送时延 =

分组长度 (bit)

发送速率 (bit/s)

网络
时延传播
时延

传播时延 =

信道长度 (米)

信号在信道上的传播速率 (米/秒)

处理
时延自由空间 = 3.0×10^8 km/s铜线 = 2.3×10^8 km/s光纤 = 2.0×10^8 km/s



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 = $1 \times 8 \div 10^6 = 8 \times 10^{-6} \text{ s} = 8 \mu\text{s}$,

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

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

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

时延带宽积

=

传播时延

×

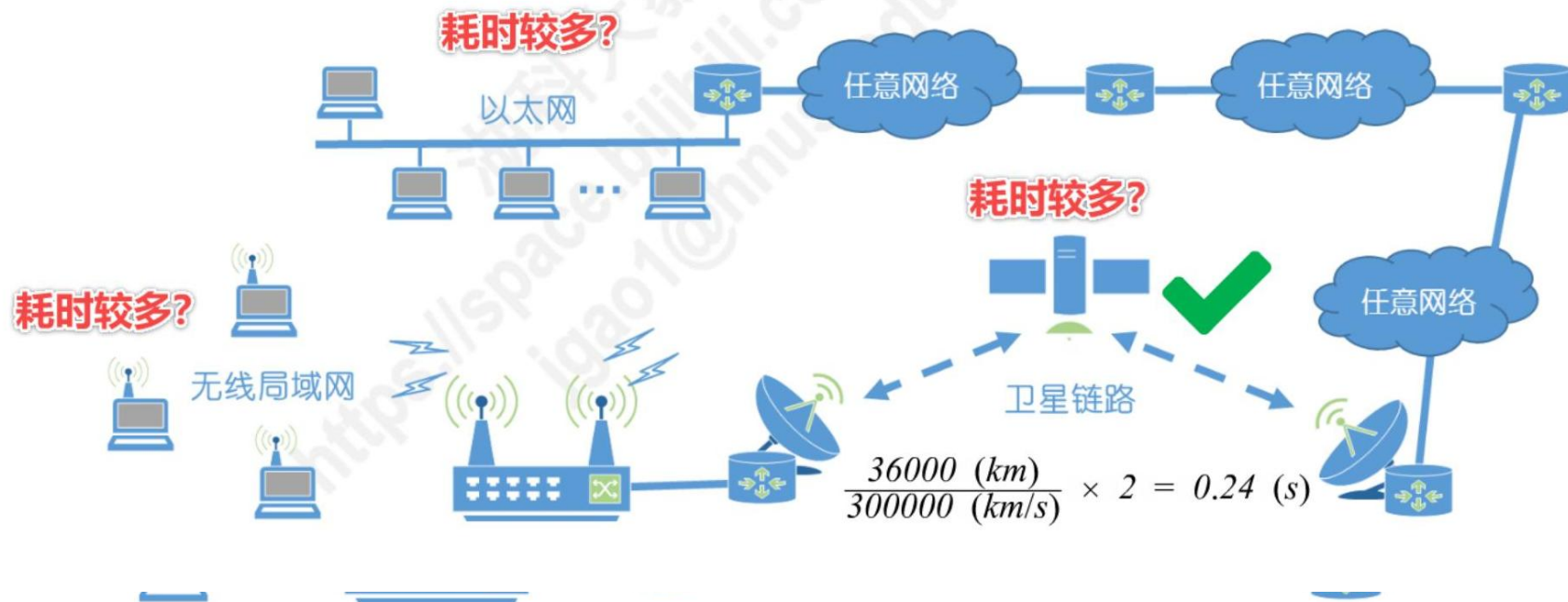
带宽



链路的**时延带宽积**又称为以**比特**为单位的**链路长度**。

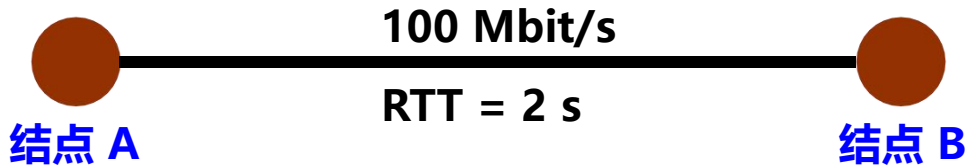


6. 往返时间 RTT (Round-Trip Time)





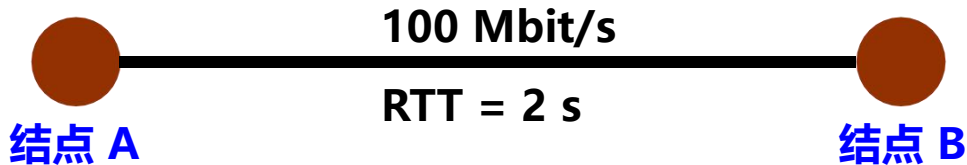
分析举例



- 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:

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

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



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。

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

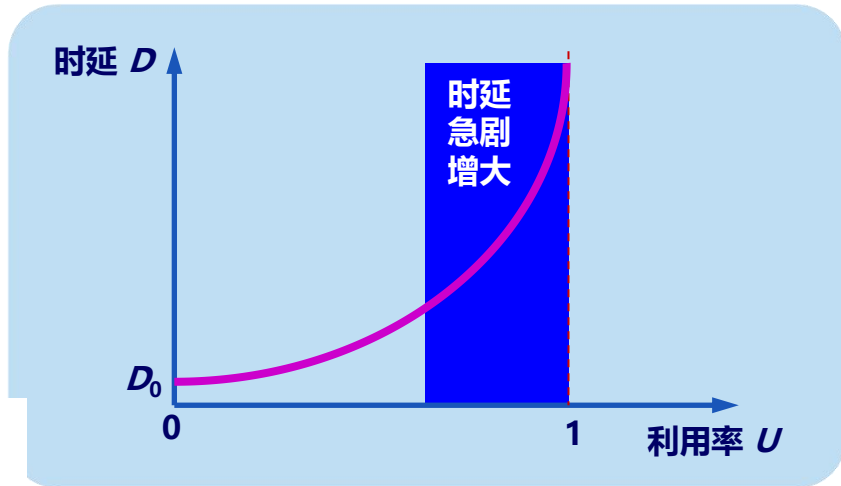
其中：

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。

- ☐ 当网络的利用率达到50%时，时延就要加倍；
- ☐ 当网络的利用率超过50%时，时延急剧增大；
- ☐ 当网络的利用率接近100%时，时延就趋于无穷大；
- ☐ 因此，一些拥有较大主干网的ISP通常会控制它们的信道利用率不超过50%。如果超过了，就要准备扩容，增大线路的带宽。



当信道的利用率增大时，
该信道引起的时延迅速增加。



本讲小结

- ✓ 网络的交换方式：分组交换、电路交换、报文交换
- ✓ 网络时延的构成：发送、传播、处理、排队
- ✓ 各种网络时延的计算