



计算机网络与通信

第一章 绪论

唐璐

2025-9

一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

1.1 关于我

1.2 教材

1.3 考核方式

1.4 课程目标

1.5 课程内容

1.1 关于我

- 2016年 – 2020年

香港中文大学, 计算机科学与工程, 博士

- 2021年起

厦门大学, 计算机科学与技术系

研究方向：智能计算系统，智算网络

邮箱：tanglu@xmu.edu.cn

主页：<https://grace-tl.github.io/>

任何问题，欢迎随时交流！



唐璐

助理教授

计算机科学与技术系

厦门大学

教材

- ❖ 《深入理解计算机网络》袁华、王昊翔等，清华大学出版社，2024年



- ❖ 《计算机网络（第6版）》，A. S. Tanenbaum, N. Feamster, D. Wetherall，清华大学出版社，2022年



- ❖ 《计算机网络：自顶向下方法》(原书第7版)，库罗斯，机械工业出版社，2018年



参考

❖ 课程组成及信息

- 理论课**56**学时，实验课**28**学时
- **6**次作业（独立），**6**次实验
- **1**个课程项目（组队）
- QQ群：**1013614123**
- 助教：郑志沁、吴培蒙、陈小猛

❖ 评估方法

- 期中（10%）+ 期末（45%）+ 实验（25%）+ 平时（20%）



网络提供的最基本服务：信息传递

❖ 是什么：计算机网络如何工作？

- 掌握计算机网络的基本概念
- 掌握计算机网络的体系结构和参考模型

❖ 为什么：计算机网络为何这样设计？

- 掌握典型网络协议的基本工作原理
- 掌握计算机网络的一些基本设计方法

❖ 怎样做：如何使用计算机网络？

- 通过网络实验，掌握计算机网络协议的基本实现技术
- 为优化计算机网络和协同设计关键应用奠定基础

不是做微信小程序
不是做网站前后端
不是开发绚丽APP
而是如何互联计算机

计算机网络学什么：如何发明网络

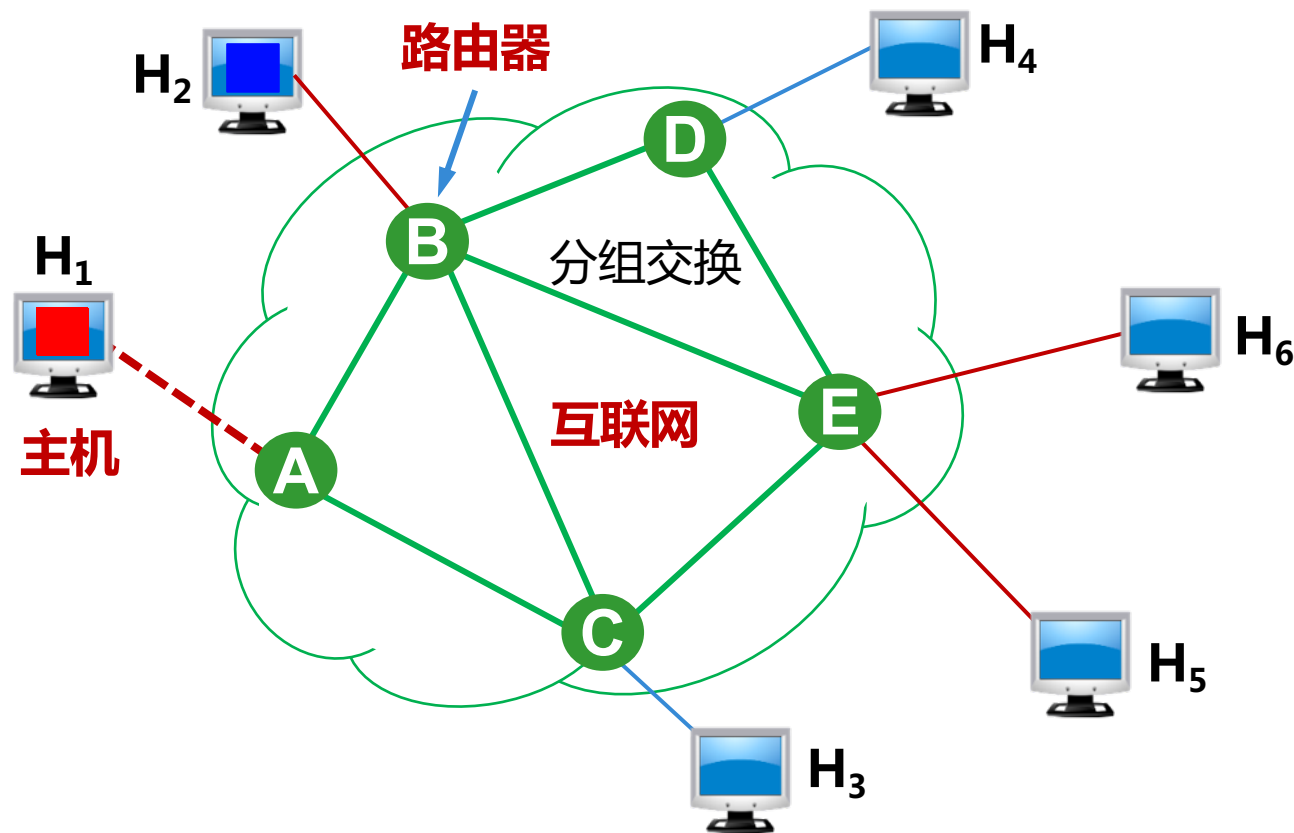
一起发明网络

网络有什么元素？
如何将设备联网？

什么叫好的网络？
规模、效率、安全
成本.....

网络核心功能

网络接入控制
路由器：路由转发
主机：传输控制



互联网：世界上最为复杂的人造系统之一

目录

一

课程概况

二

计算机网络简介

2.1 计算机网络基本概念

2.2 计算机网络类型

2.3 计算机网络应用

2.4 计算机网络组成及通信

2.5 性能指标

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

2.1 计算机网络基本概念

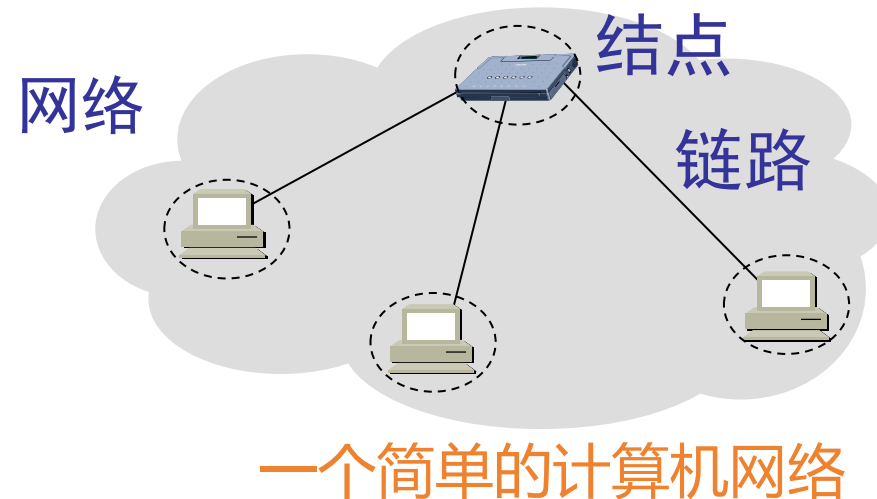
❖ **计算机网络**：一组互相连接的、自治的计算机的集合

- 两台计算机能够交换信息，则它们是**相互连接**的（interconnected）
- 网络由若干**结点**(node)和连接这些结点的**链路**(link)组成
 - ✓ 结点：计算机、集线器、交换机、路由器等
 - ✓ 链路：双绞线、光纤、无线

❖ 最具代表性的计算机网络：Internet

❖ 各式各样的计算机网络：不同的分类口径

- 无线和有线、骨干网和接入网
- 公网和专网、点到点网络和广播网络.....



❖ 按照网络拓扑进行分类

- 总线网、星状网、蜂窝网...

❖ 按照网络覆盖范围进行分类

- 广域网、城域网、局域网、个人区域网

❖ 按照网络的使用者进行分类

- 公用网，专用网

❖ 按照网络的功能和应用场景进行分类

- 接入网、无线网、数据中心网...

❖ 拓扑：信道的分布方式

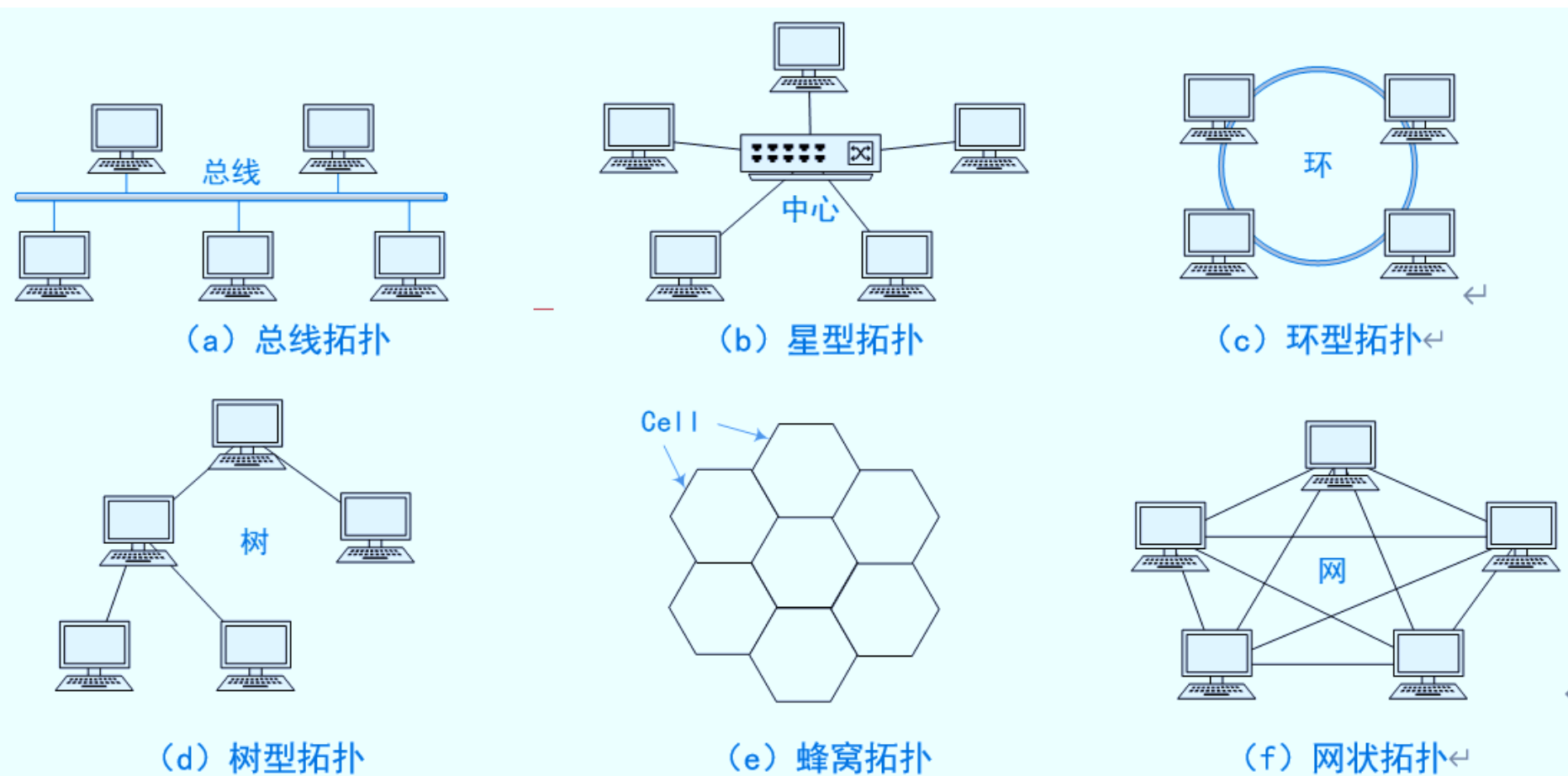


图 1-2 不同形状的网络拓扑

覆盖范围不同的计算机网络

❖ 个域网PAN (Personal Area Network)

- 最小的计算机网络
- 覆盖范围一般在10米半径以内
- 常用来连接外设，如蓝牙耳机等

❖ 局域网LAN (Local Area Network)

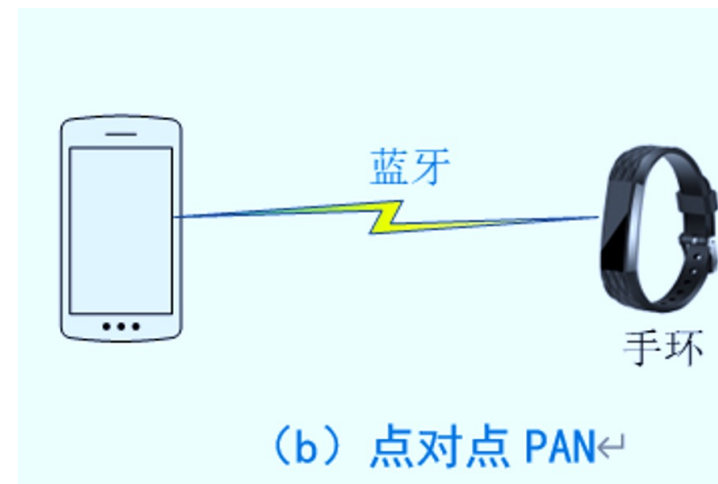
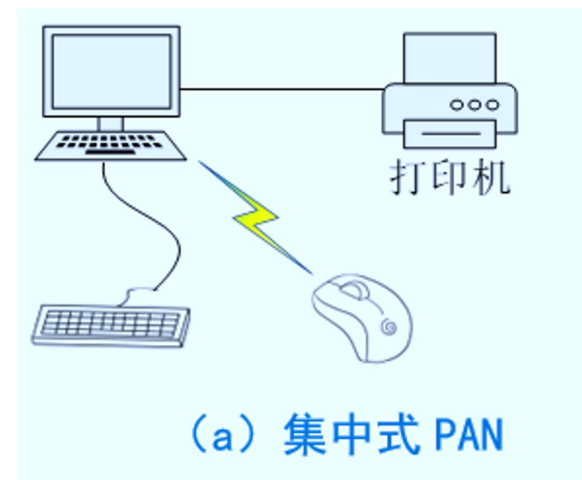
- 局部地区形成的区域网络，如企业网络
- 分布地区范围有限，可大可小，大到一栋建筑、小到办公室内的组网
- 电脑WLAN接入，打印机共享等等

❖ 城域网MAN (Metropolitan Area Network)

- 范围覆盖一个城市的网络

❖ 广域网WAN (Wide Area Network)

- 覆盖很大地理区域，乃至覆盖地区和国家



覆盖范围不同的计算机网络

❖ 个域网PAN (Personal Area Network)

- 最小的计算机网络
- 覆盖范围一般在10米半径以内
- 常用来连接外设，如蓝牙耳机等

❖ 局域网LAN (Local Area Network)

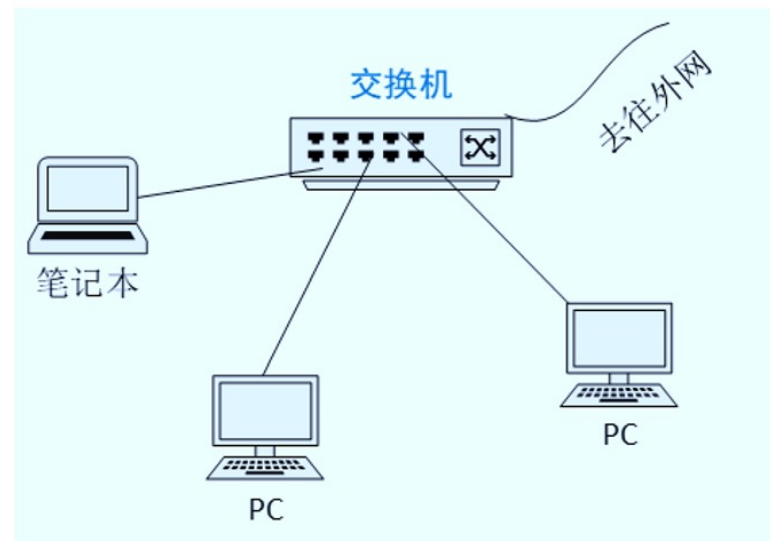
- 局部地区形成的区域网络，如企业网络
- 分布地区范围有限，可大可小，大到一栋建筑、小到办公室内的组网
- 电脑WLAN接入，打印机共享等等

❖ 城域网MAN (Metropolitan Area Network)

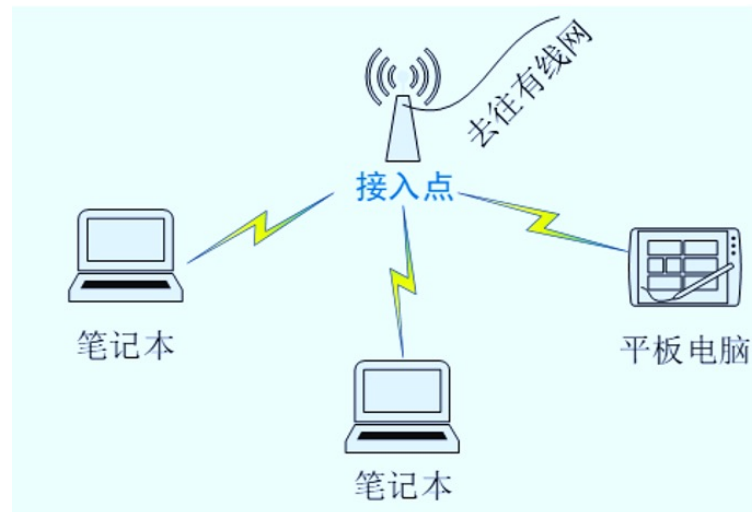
- 范围覆盖一个城市的网络

❖ 广域网WAN (Wide Area Network)

- 覆盖很大地理区域，乃至覆盖地区和国家



(a) 有线局域网



(b) 无线局域网

覆盖范围不同的计算机网络

❖ 个域网PAN (Personal Area Network)

- 最小的计算机网络
- 覆盖范围一般在10米半径以内
- 常用来连接外设，如蓝牙耳机等

❖ 局域网LAN (Local Area Network)

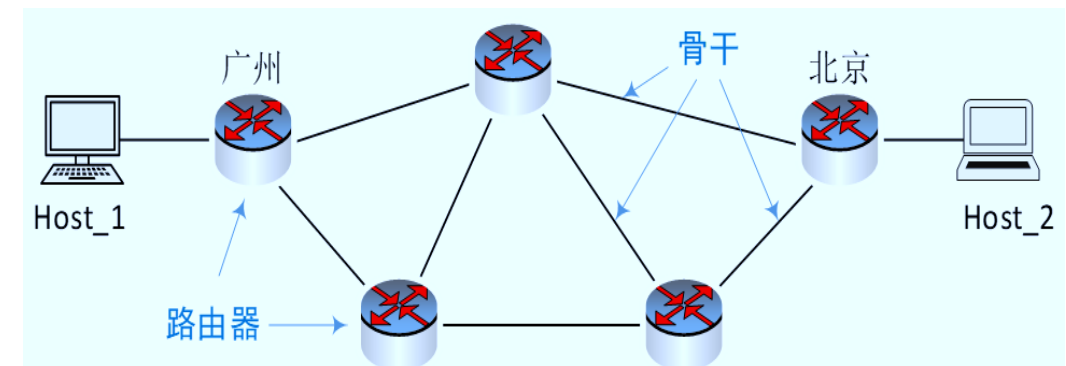
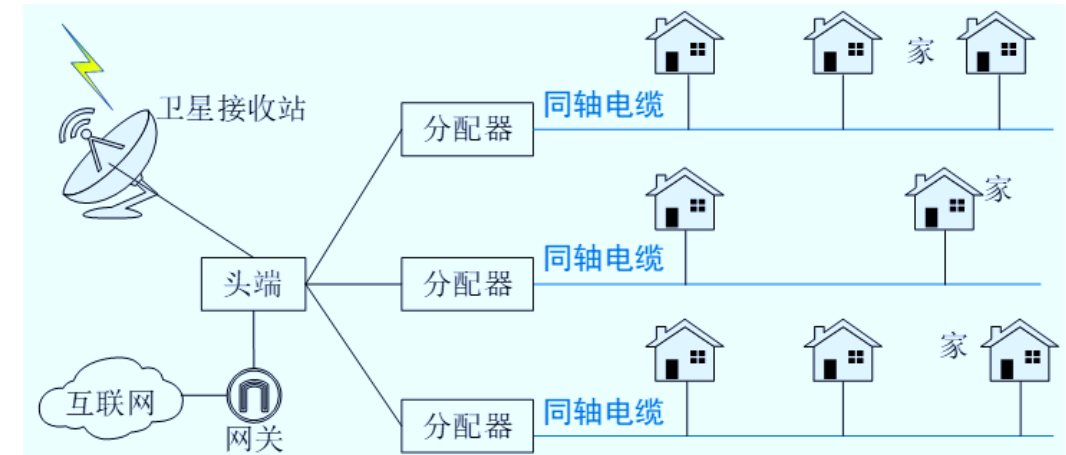
- 局部地区形成的区域网络，如企业网络
- 分布地区范围有限，可大可小，大到一栋建筑、小到办公室内的组网
- 电脑WLAN接入，打印机共享等等

❖ 城域网MAN (Metropolitan Area Network)

- 范围覆盖一个城市的网络

❖ 广域网WAN (Wide Area Network)

- 覆盖很大地理区域，乃至覆盖地区和国家



上天入地的网络和应用



远程医疗



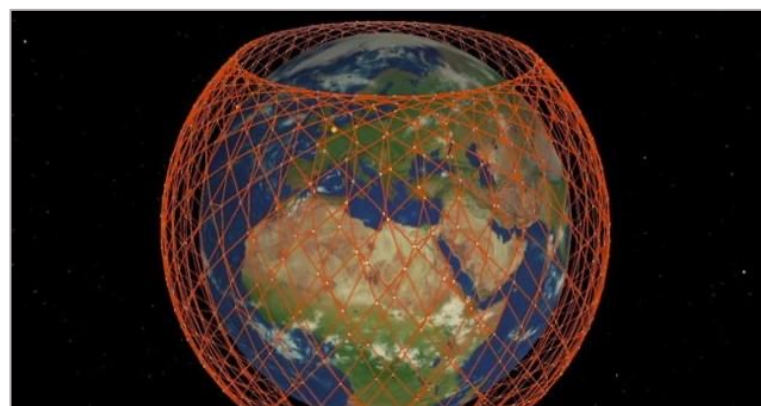
无人码头的远程操控



通信大数据行程卡



矿井下网络监控与通信

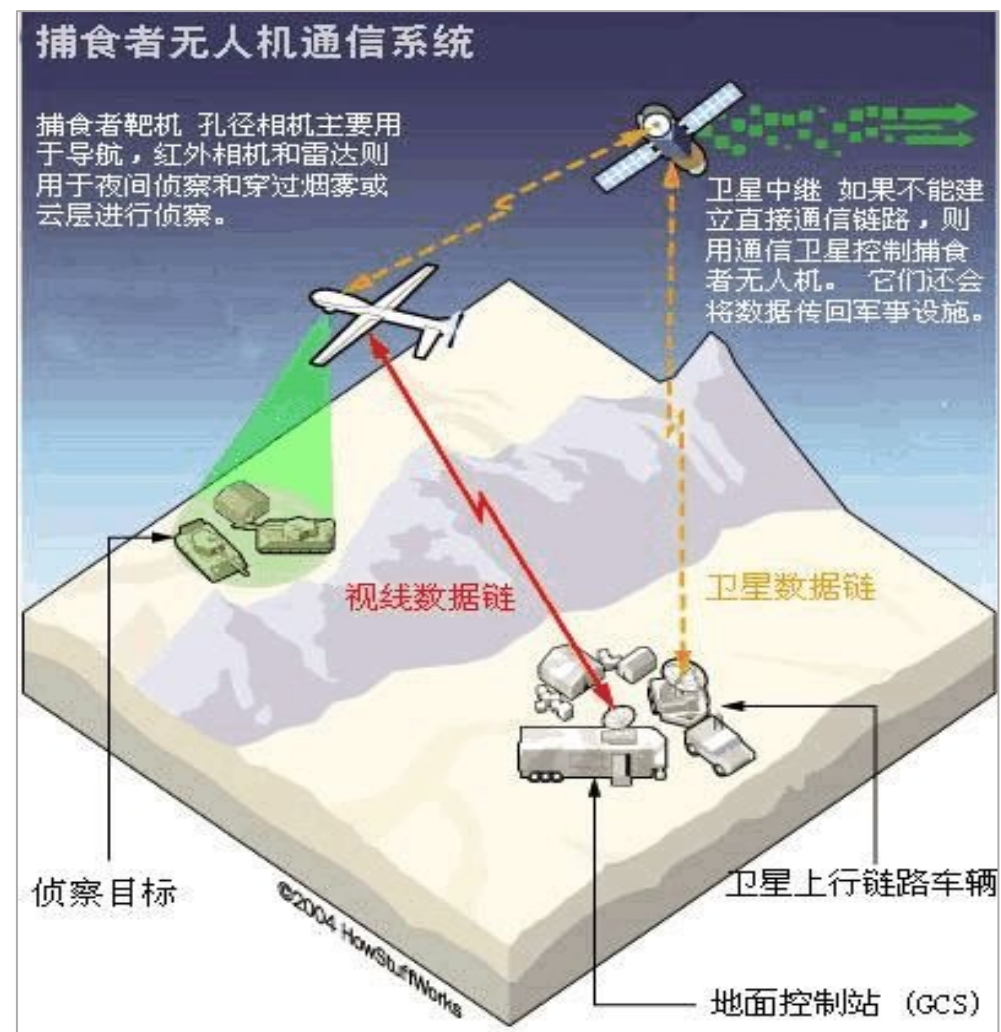


马斯克的星链计划StarLink



大文件分享的
奶牛快传

- 你喜欢“玩”开飞机的游戏吗？
 - 无人机作战：卫星中继
 - 可靠且实时的控制（抗干扰/保密）
 - 现场信息实时反馈（高清视频）
- 还有什么其他无人设备
 - 无人坦克，无人舰船，无人潜艇，卫星.....
 - 水深网络的声呐通信，深空探索的激光通信
 - 不仅仅是通信：无人机的精确制导



互联网成为网络空间的核心

行业互联网



物联网



金融互联网



能源互联网



工业互联网



互联网+ ?

应用支撑技术



云计算



智慧城市



三网融合



大数据



人工智能

计算系统



互联网



(下一代互联网/未来互联网)

底层通信技术



3G/4G/5G



WiFi

超高速光纤



❖当年的“铁公基” / “铁公机”

- 集中建设基础设施
(铁路、公路、机场/基础设施)
- 2008年金融危机，国家四万亿投资中的1.5万亿投入基础设施建设

❖与时俱进的**新基建**

- 2018年，中央经济工作会议重新定义了基础设施建设
- 2019年，“加强新一代**信息基础设施建设**”被列入政府工作报告
- 新基建：**5G基站建设**、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、**大数据中心**、人工智能、**工业互联网**七大领域



- 作为数字经济的发展基石、转型升级的重要支撑
- 稳投资、扩内需、拉动经济增长的重要途径
- 促升级、优结构、提升经济发展质量的重要环节

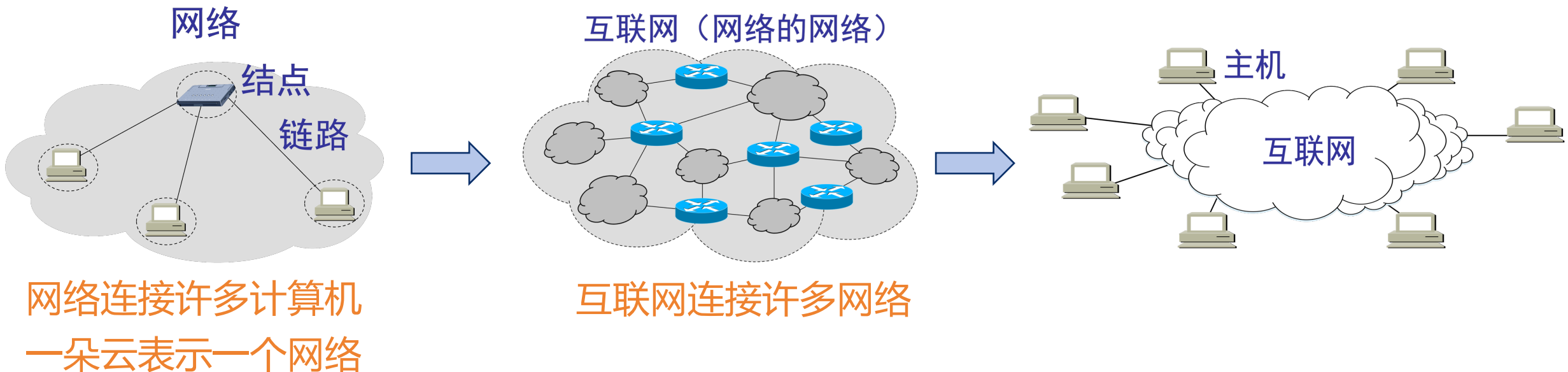
2.4 计算机网络组成及通信-以互联网为例

最著名的网络：**互联网**

❖ **互联网**：网络的网络（network of networks）

❖ **特点**：连通性和共享性

- 连通：上网用户之间都可以交换信息，好像彼此直接连通一样
- 共享：指资源共享，资源可以是信息、软件或硬件



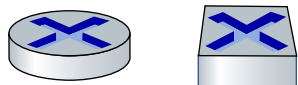
Internet 与 internet

互联网 (Internet)	互连网 (internet)
相似之处	
网络的网络 (这种类型的一个具体实例)	网络的网络 (泛指这种类型)
不同之处	
特指遵循 TCP/IP 标准、利用路由器将各种计算机网络互连起来而形成的、覆盖全球的、特定的互连网	泛指由多个不同类型计算机网络互连而成的网络
使用 TCP/IP	除 TCP/IP 外，还可以使用其他协议
是一个 专用名词	是一个 通用名词



主机 (hosts)

- 在互联网边缘运行网络应用



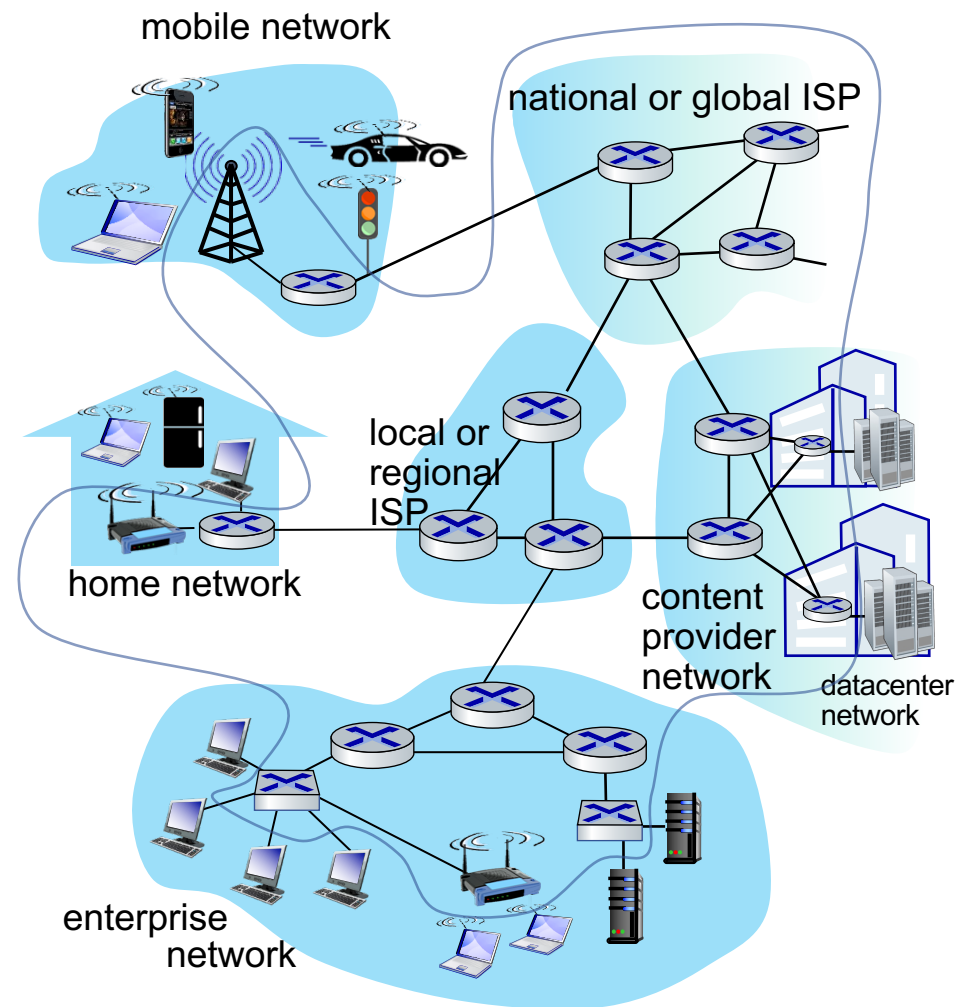
交换设备

- 转发数据包
- 交换机, 路由器



通信链路

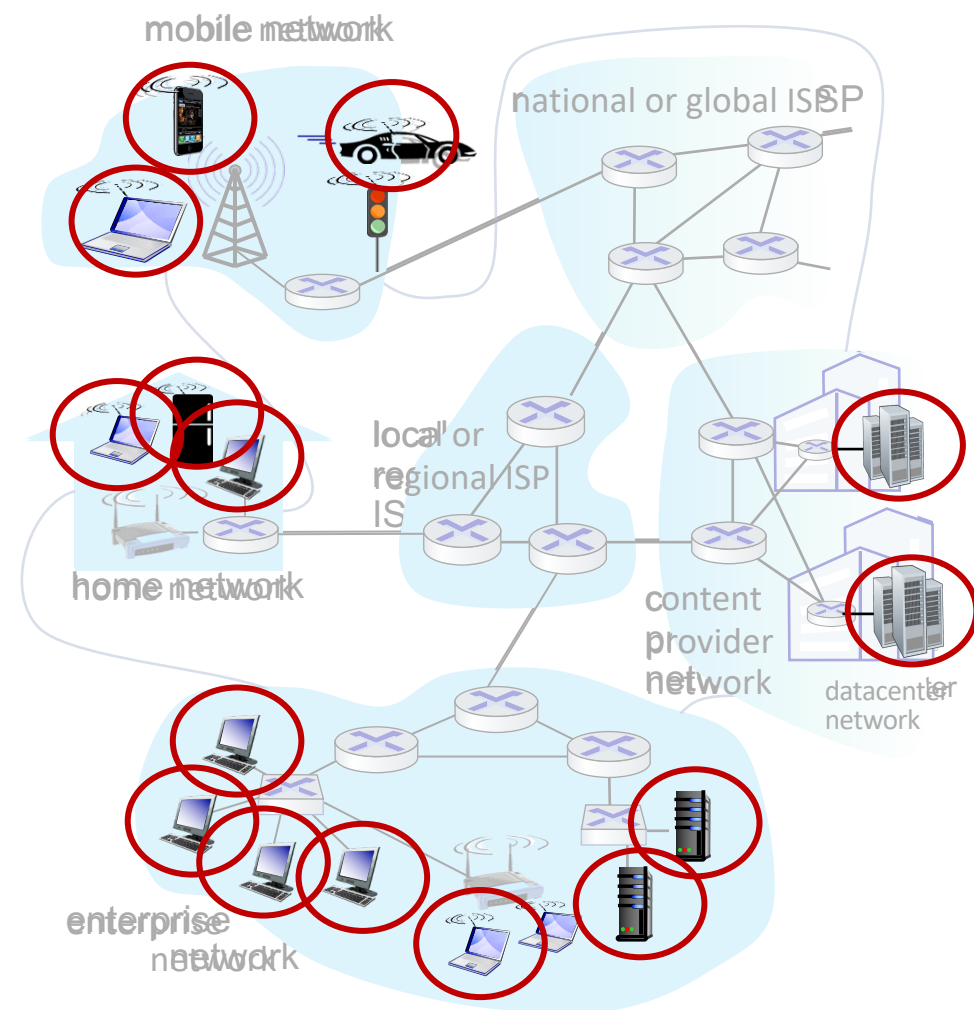
- 光纤, 电缆, 无线电波



互联网示例

根据工作方式的不同，互联网可以划分

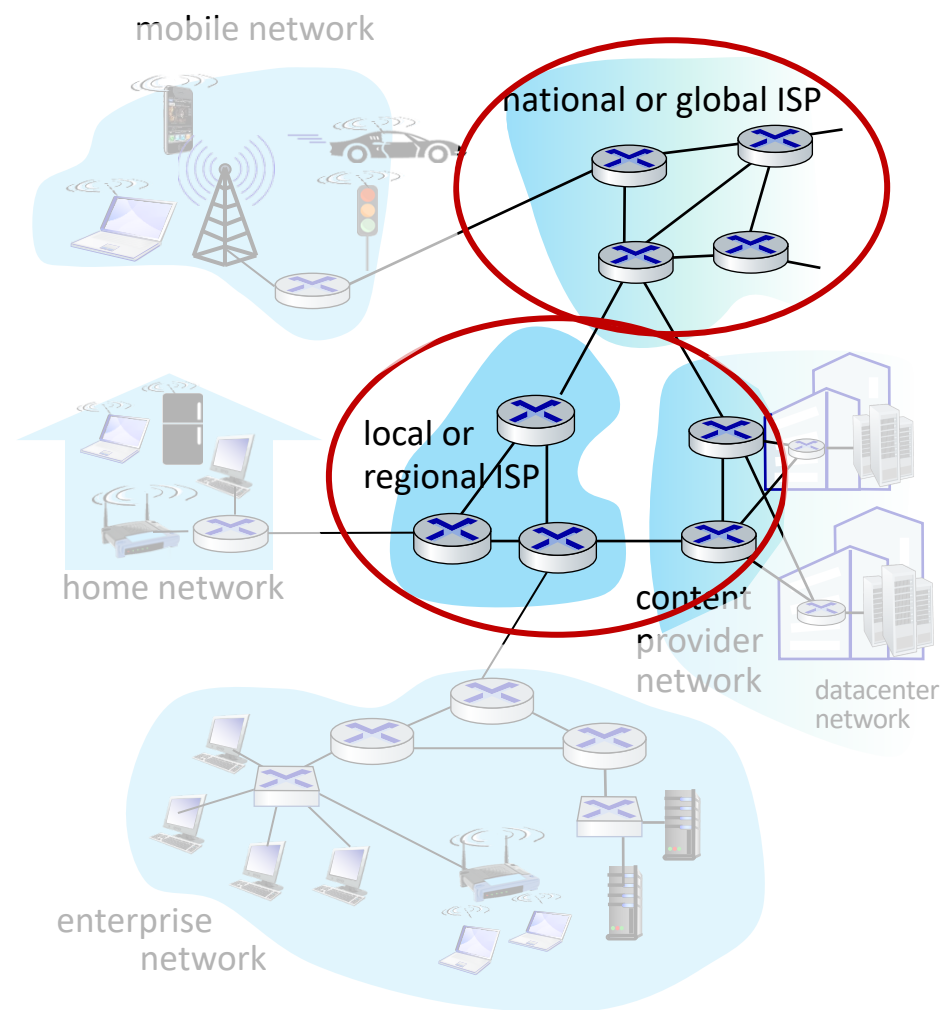
- ❖ **边缘部分**：由所有连接在互联网上的主机组成，用户直接使用，用来进行通信和资源共享



互联网示例

根据工作方式的不同，互联网可以划分

- ❖ **边缘部分**：由所有连接在互联网上的主机组成，用户直接使用，用来进行通信和资源共享
- ❖ **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）



互联网示例

❖ **边缘部分**：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)

各式各样的“主机” (Host)



智能音箱



IP相框



AR 眼镜



起搏器和监护仪



安全摄像头



自行车



智能手环



烤面包机



感应床垫



智能汽车



能源监测器



互联网冰箱

❖ 网络边缘端系统的通信方式分为两大类

- **客户-服务器方式**（C/S 方式）

- 即Client/Server方式
- 特例：浏览器服务器方式（B/S方式）

- **对等方式**（P2P 方式）

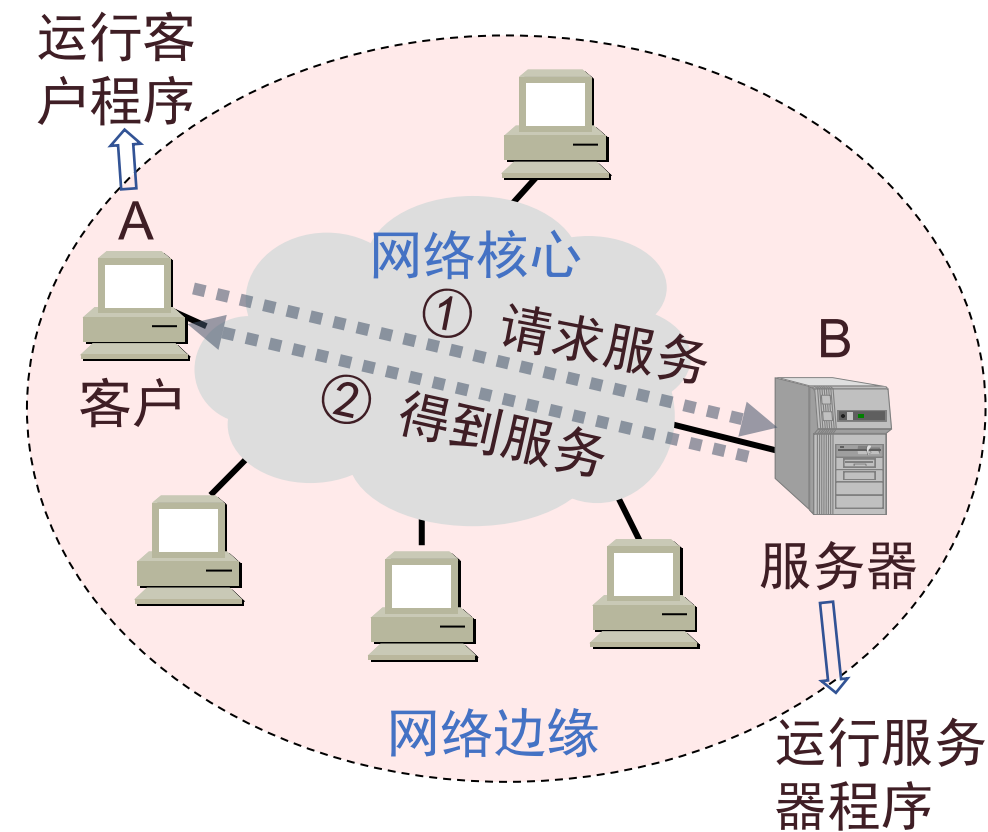
- 即 Peer-to-Peer方式

❖ 计算机之间通信：“主机 A 和主机 B 进行通信”

- 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
- 也即，主机 A 的某个进程和主机 B 上的另一个进程进行通信

通信方式1 – 客户服务器方式 (C/S)

- ❖ **客户服务器方式**描述进程间服务和被服务的关系
- ❖ **客户软件**：服务请求方，被用户调用后运行，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
 - 无需特殊硬件和复杂操作系统
- ❖ **服务器软件**：服务提供方，一种专门用来提供某种服务的程序，可同时处理多个客户请求，启动后即自动调用并持续运行/监听，被动等待并接受客户请求
 - 无需知道客户程序地址
 - 一般需强大的硬件和高级的操作系统支持
- ❖ 典型应用：Web应用，电子邮件，文件服务器

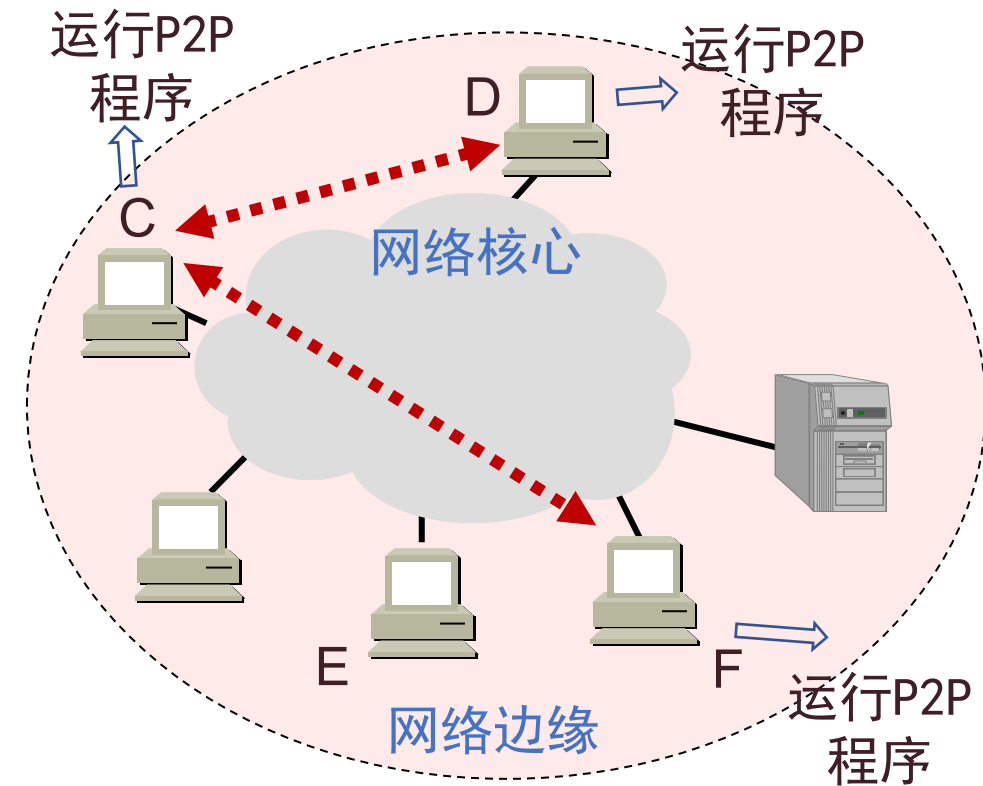


客户 A 向服务器 B 发出请求服务，
服务器 B 向客户 A 提供服务



通信方式2 – 对等连接方式（P2P）

- ❖ **对等连接** (peer-to-peer) 指主机在通信时不区分服务请求方和提供方
 - 只要两个主机都运行了对等连接软件，便可进行平等的、对等连接通信
 - 双方都可下载对方存储在硬盘中的共享文档
 - 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
 - 典型应用：BT下载（BitTorrent），视频点播，VoIP



主机 C 请求 D 的服务时，C 是客户，D 是服务器。若 C 又同时向 F 提供服务，那么 C 又同时起着服务器的作用

思考：C/S与P2P各有什么优缺点？

	C/S	P2P
节点关系	服务与被服务	对等
服务方式	客户端请求服务 服务器响应	各节点既可请求服务也 可对等提供服务
数据管理	服务器集中管理 和存储	分散在各节点自行管理

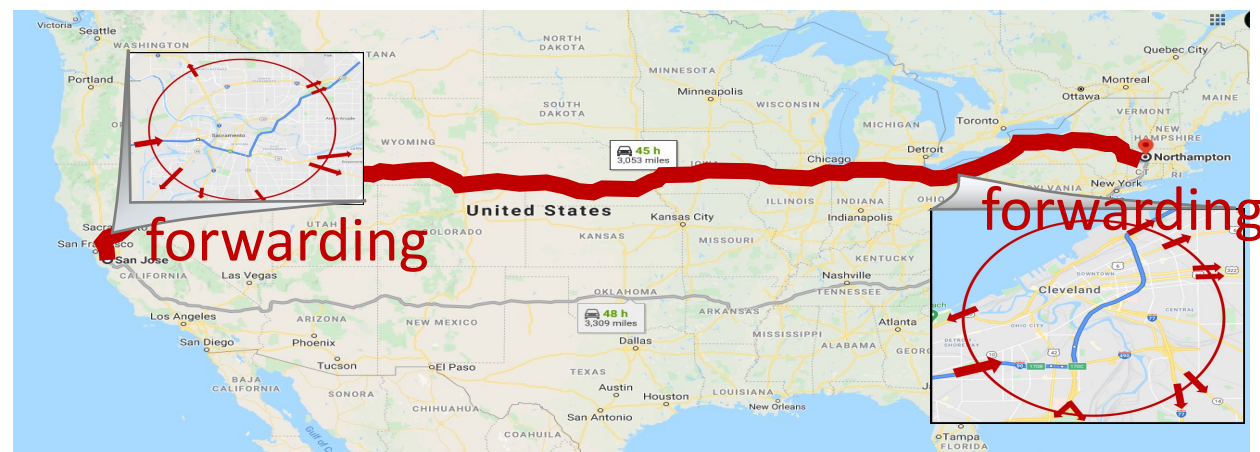
❖ C/S方式

- 易于管理,易维护
- 客户端硬件要求低
- 扩展性差

❖ P2P方式

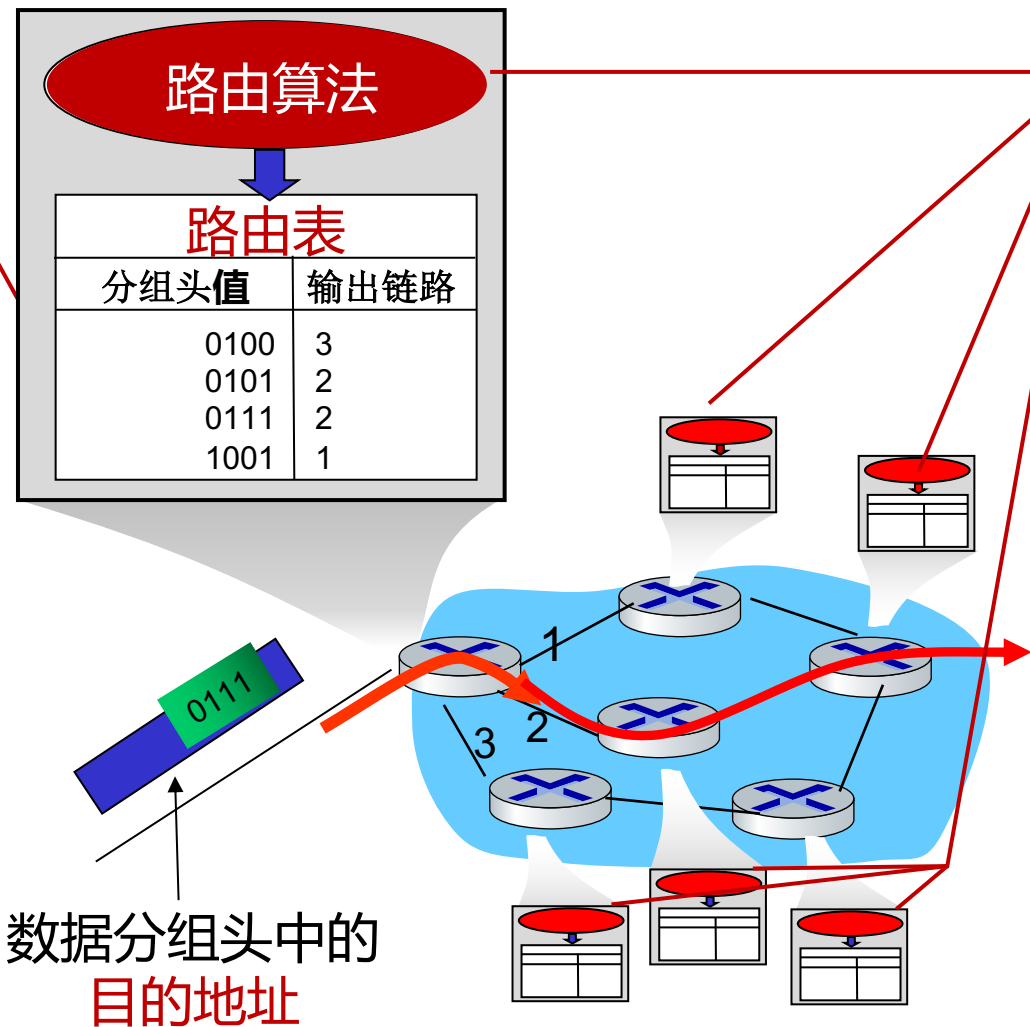
- 扩展性好
- 监控难
- 安全管理复杂

- ❖ **核心部分**：由高速链路连接的**路由器（router）**构成，向网络边缘中的主机提供连通性，使任一主机都能向其他主机通信
- ❖ 网络核心部分最重要的功能：**分组交换(packet switching)**
 - ❖ 路由（Routing）和转发（Forwarding）
 - 路由是全局行为，转发是局部行为



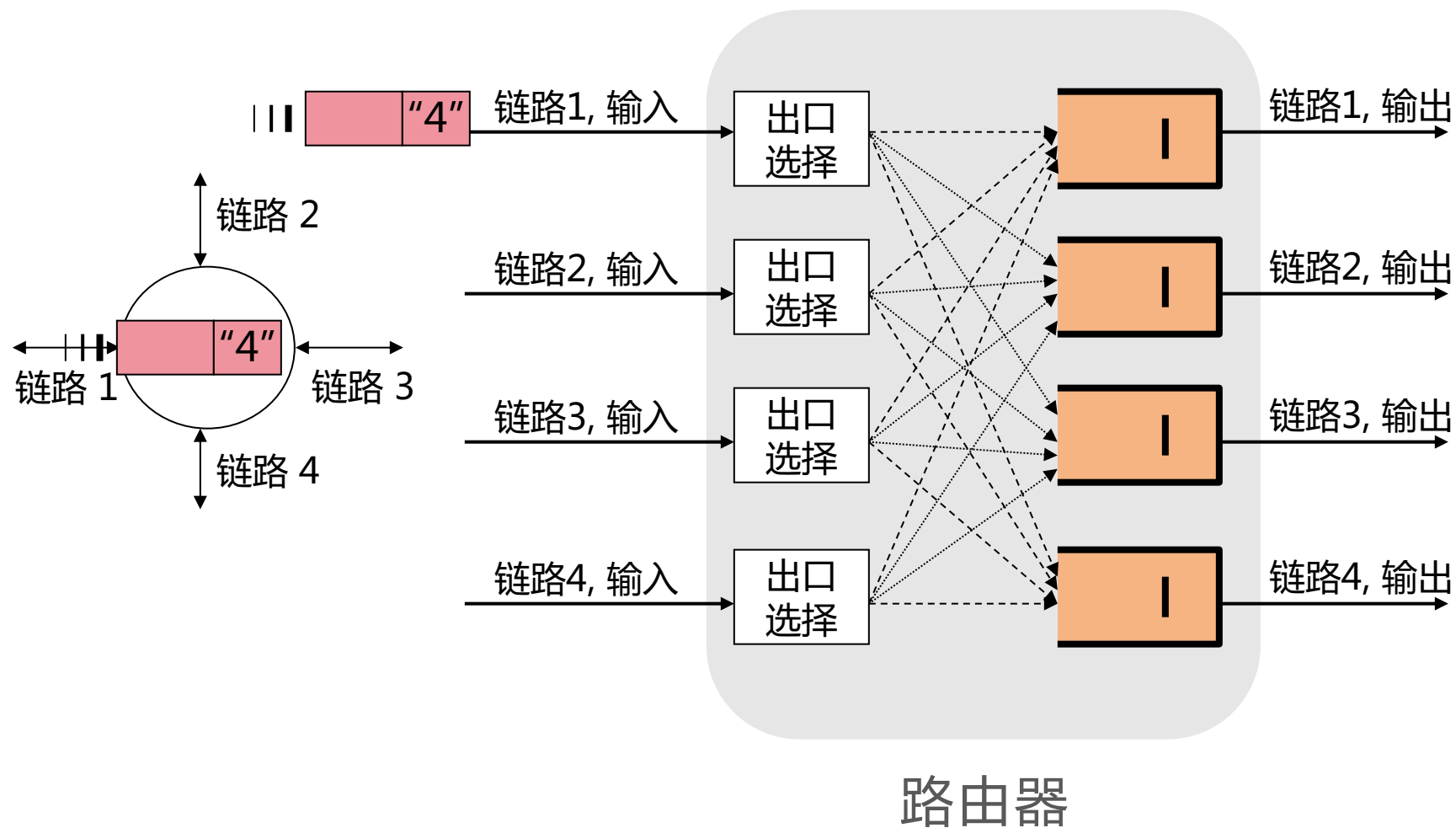
功能2：转发

- **本地操作**：将接收到的分组移动到出接口
- **确定转发接口**：根据目的地址，查找本地路由表，确定“出接口”



功能1：路由

- **全局操作**：确定数据分组从源到目标所使用的路径
- **需要路由协议和路由算法**，产生路由表



数据如何传输并通过网络的？网络交换技术

电路交换

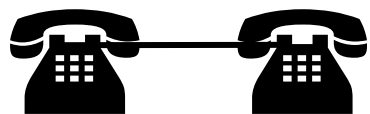
报文交换

分组交换

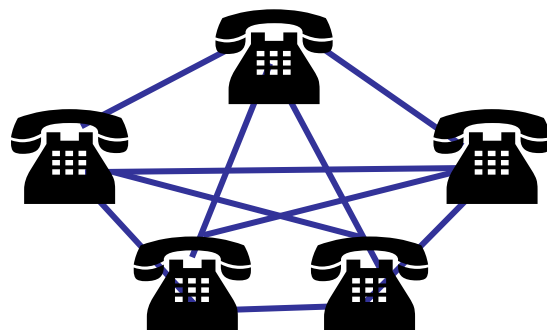
ATM技术

❖ 电路交换技术：面向连接的，如公众电话网（PSTN网）

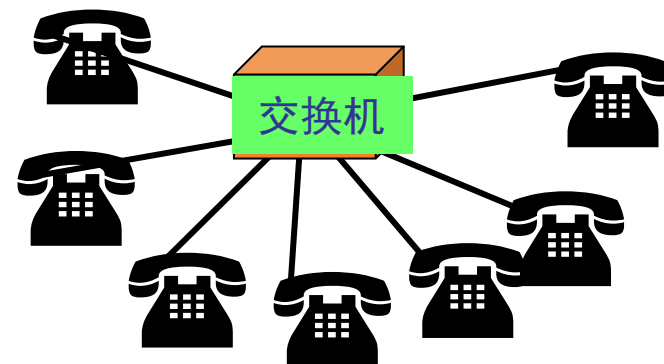
- 电路交换的三个阶段：建立连接、通信、释放连接
- 在通话的全部时间内，通话的两个用户始终占用端到端的通信资源
- 电路交换效率不高，适合于较轻和间接式负载使用租用的线路进行通信
 - 计算机数据具有突发性，电路交换会导致通信线路的利用率很低 (<10%)



两部电话机只需要用一对电线就能够互相连接起来

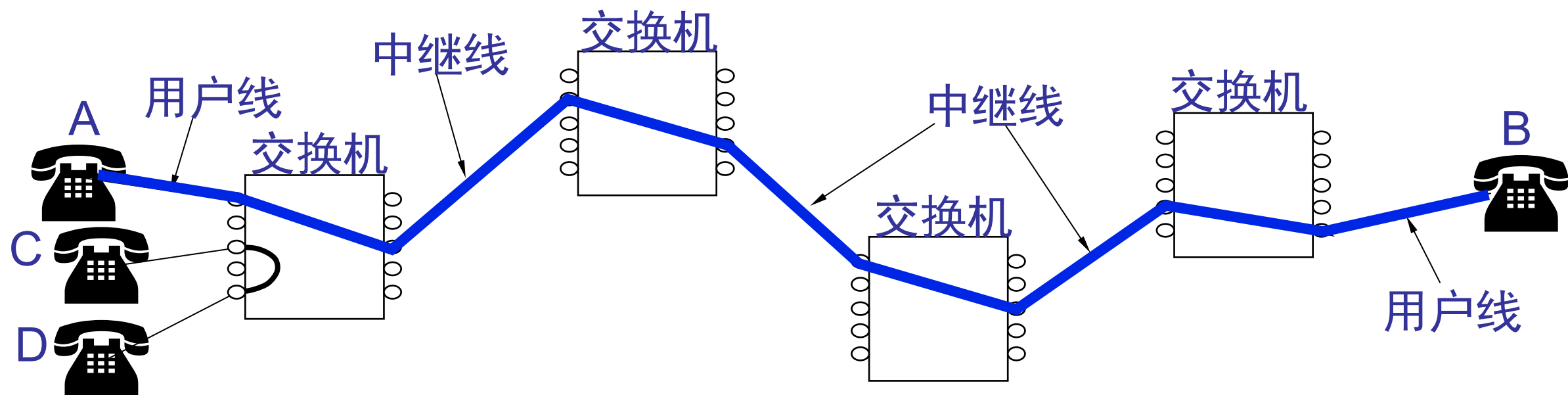


N 部电话机两两相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线

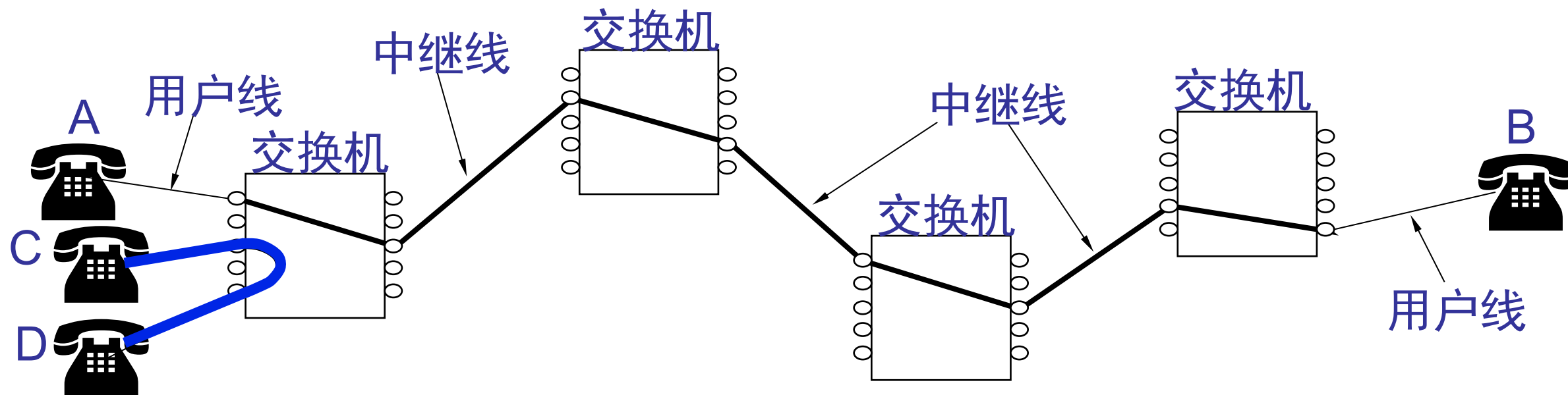


当电话机数量增多时，就要使用交换机来完成全网的交换任务

A 和 B 通话经过四个交换机，通话在 A 到 B 的连接上进行



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



数据如何传输并通过网络的？网络交换技术

电路交换

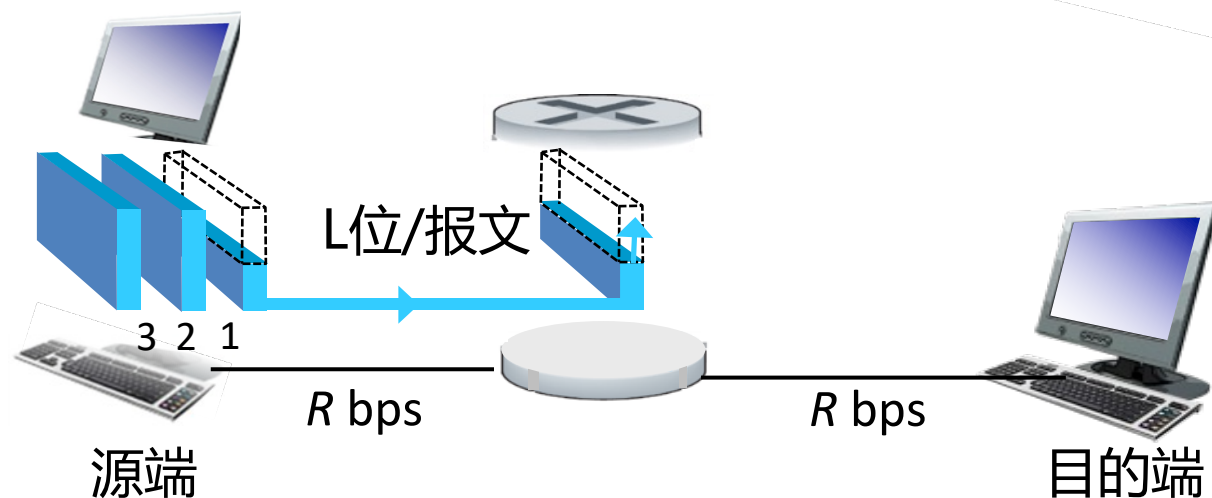
报文交换

分组交换

ATM技术

❖ 报文交换技术：如公用电报网

- 报文被**整个**的发送，从源点传送到目的地采用**存储转发**的方式，**不需预留资源**
- 报文需要排队，不适合于交互式通信，不能满足实时通信的要求
 - **转发延时长**，交换节点须具有足够的缓存空间



单跳数值示例：

$L=100\text{KB}$ ， $R=100\text{ Mbps}$

一跳发送延迟=8毫秒

10跳发送延迟=80毫秒

如何降低报文存储转发的延迟？

数据如何传输并通过网络的？网络交换技术

电路交换

报文交换

分组交换

ATM技术

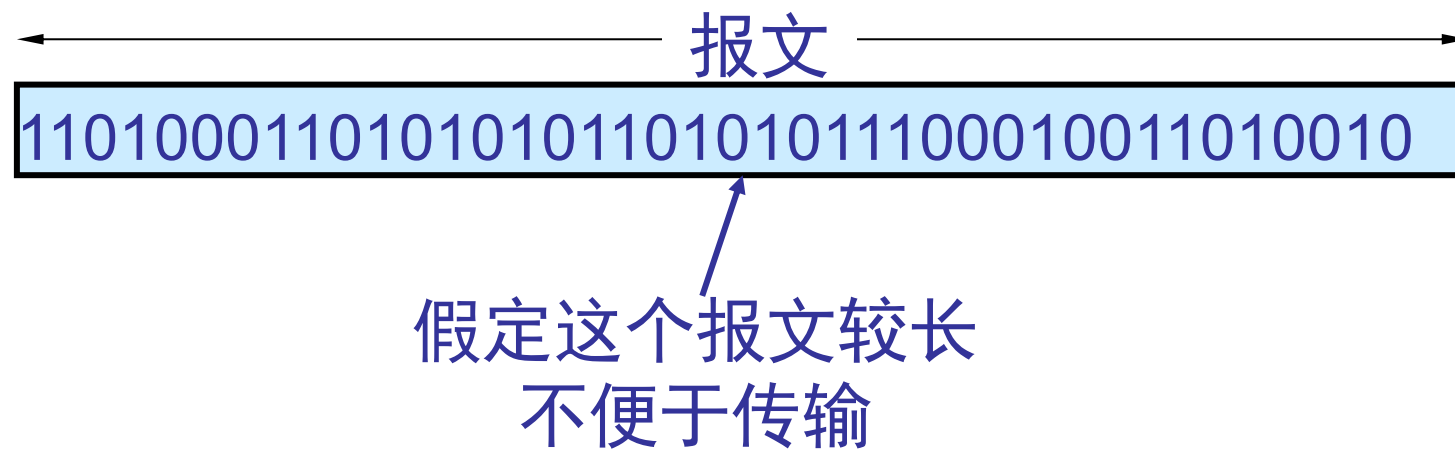
❖ 分组交换技术：互联网

- 与报文交换类似，但报文被分成**分组**传送，并规定了最大长度
- 在数据网中最广泛使用的一种交换技术，适用于交换中等或大量数据的情况

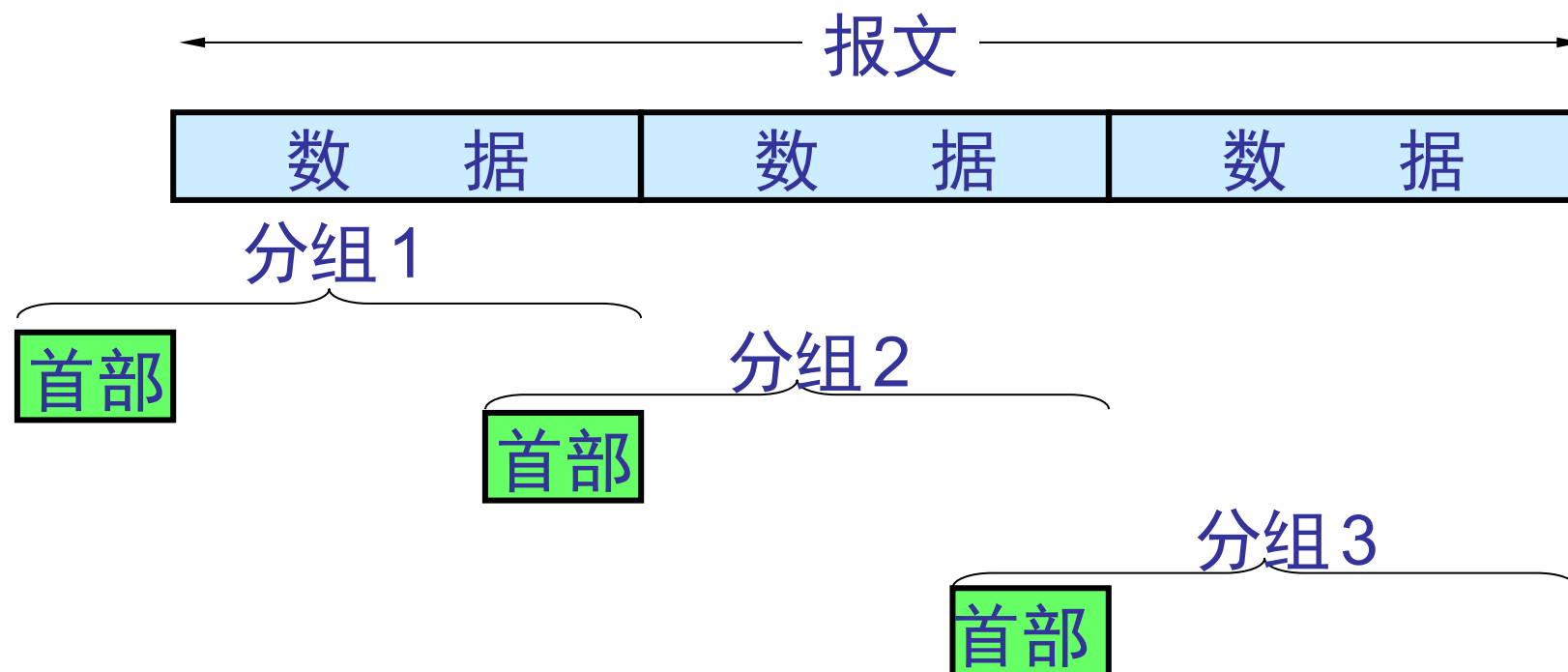
❖ 分组交换过程：

- 发送方：构造分组，发送分组
 - 把较长的报文划分成较短的、固定长度的数据段
- 交换节点：缓存分组，转发分组
- 接收方：接收分组，还原报文

❖ 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

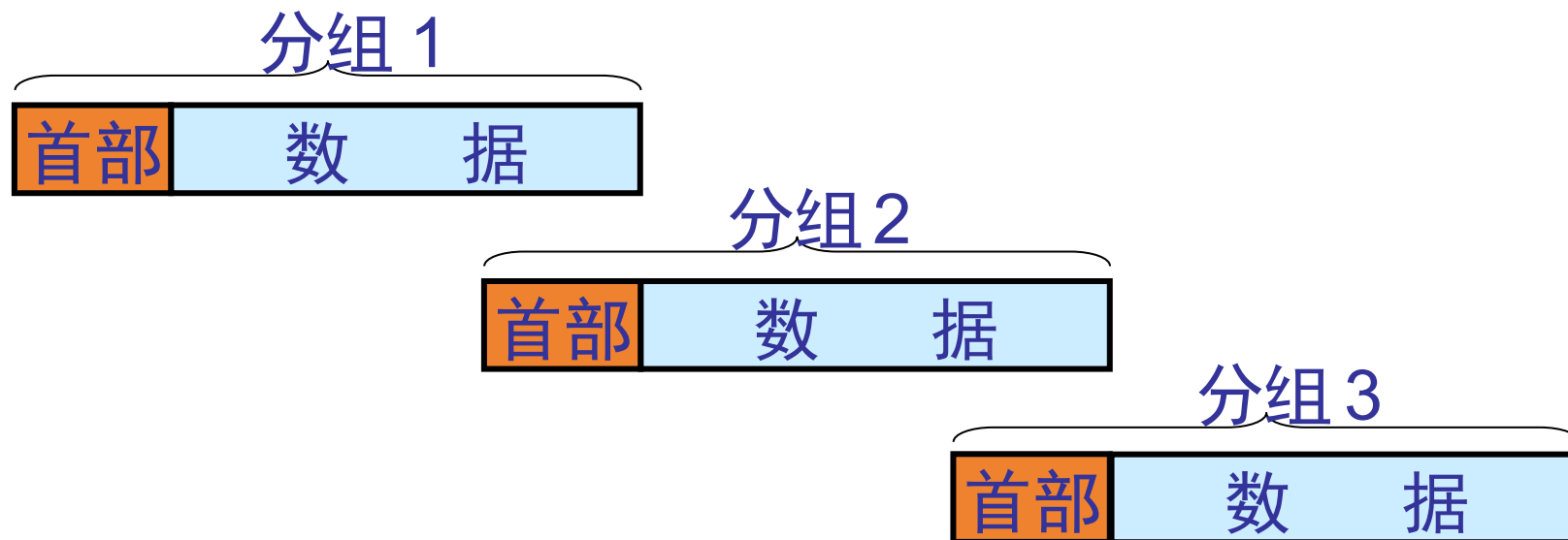


- ❖ 在发送端，先把较长的报文划分成较短的、固定长度的数据段
- ❖ 每一个数据段前面添加上首部构成分组
 - 每一个分组的首部都含有地址等控制信息



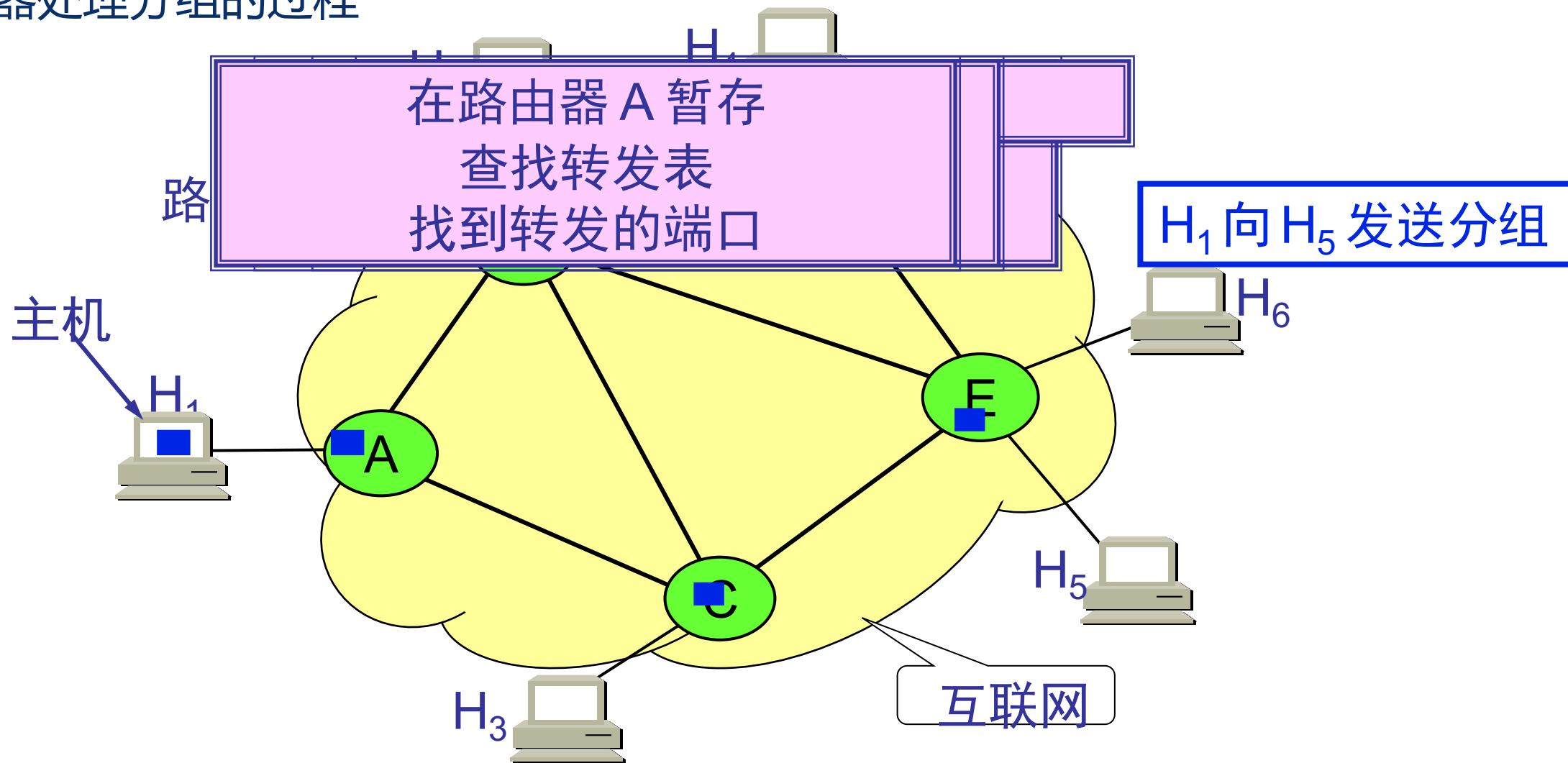
请注意：现在左边是“前面”

- ❖ 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
- ❖ 每一个数据段前面添加上首部构成分组
 - 每一个分组的首部都含有地址等控制信息
- ❖ 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

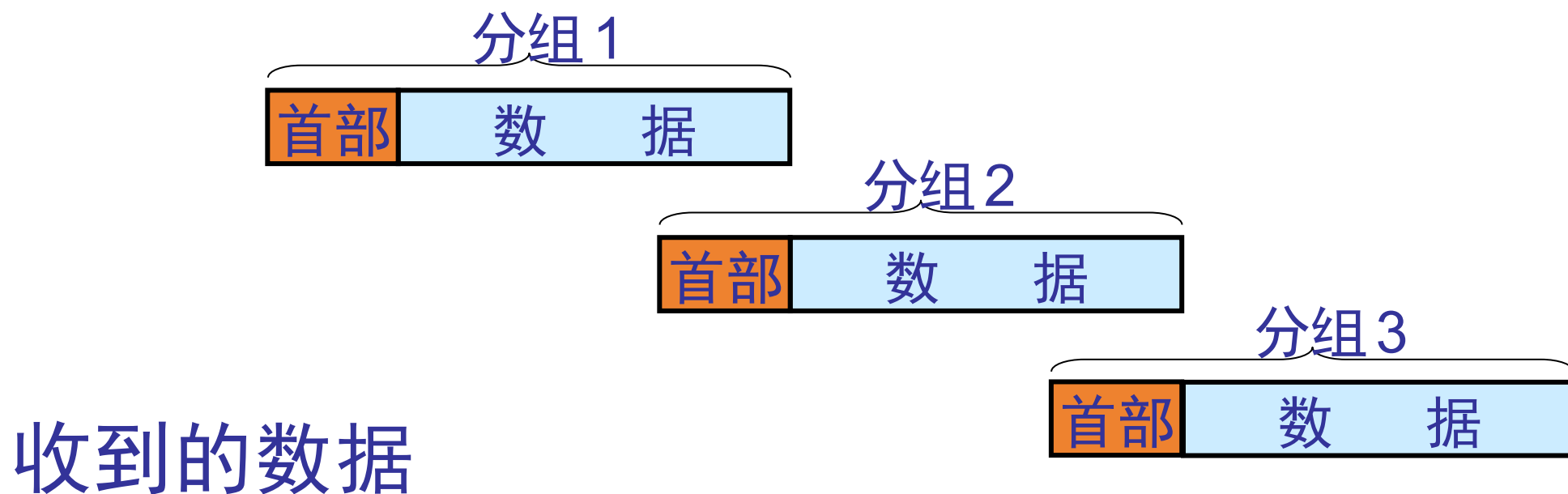


- ❖ 在交换节点，结点交换机根据收到的分组的首部中的地址信息，把分组转发到下一个结点交换机
- ❖ 用这样的存储转发方式，最后分组就能到达最终目的地
- ❖ 路由器处理分组的过程：（在路由器中的输入和输出端口之间没有直接连线）
 1. 把收到的分组先放入缓存（暂时存储）
 2. 查找转发表，找出到某个目的地址应从哪个端口转发
 3. 把分组送到适当的端口转发出去。

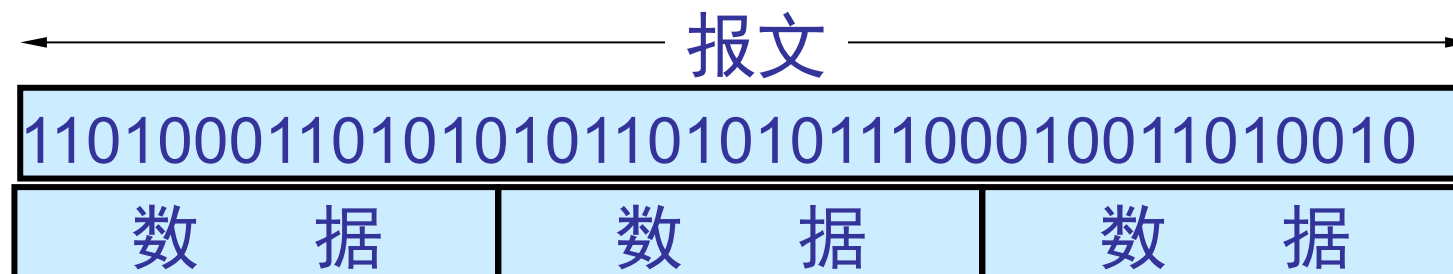
❖ 路由器处理分组的过程



❖ 在接收端，收到分组后剥去首部还原成报文



- ❖ 在接收端，收到分组后剥去首部还原成报文
- ❖ 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



❖ 优势

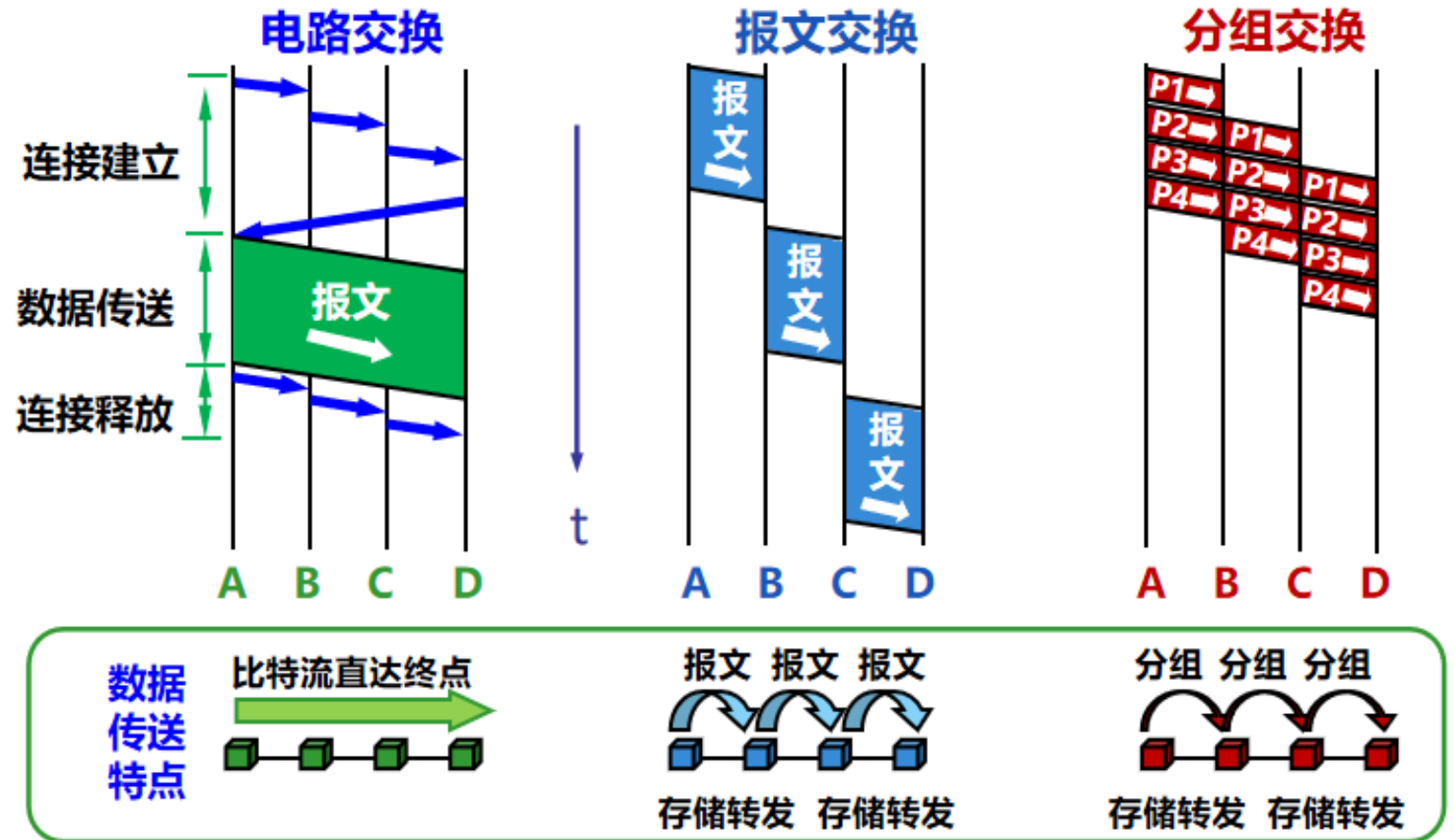
- **高效** 动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用
- **灵活** 以分组为传送单位和查找路由
- **迅速** 不必先建立连接就能向其他主机发送分组
- **可靠** 保证可靠性的网络协议；分布式的路由选择协议使网络有很好的生存性

❖ 劣势

- 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**
- 需要**专门**的管理和控制机制

总结：网络交换技术对比

- ❖ 电路交换需建立连接并预留资源，难灵活复用
- ❖ 报文交换和分组交换较灵活，抗毁性高，传送突发数据时可提高网络利用率
- ❖ 由于分组长度小于报文长度，分组交换比报文交换的时延小，灵活性高



分组交换适合有大量突发数据传输需求的互联网

2.5 网络的性能指标 – 速率

- ❖ **速率**：数据率(data rate)或比特率(bit rate)
 - 单位是 b/s , 或kb/s, Mb/s, Gb/s 等 , 文献中的网络速率一般指额定/标称速率
- ❖ **额定/标称速率**：设备能够达到的最高速率 , 而非实际运行的速率
 - 由于在每一帧被传送的数据量中还包括同步码、纠错码等辅助成份 , 进行数据传输时是达不到标称速率的
- ❖ **有效速率**：在标称速率中扣除辅助成份后 , 即为有效速率 , 是在理想信号条件下传送数据的理论最高速率
- ❖ **包转发率(Packet Per Second , PPS)**：网络设备以包为单位的转发速率
 - 线速转发：交换机端口在满负载下 , 能够达到的最高速度

2.5 网络的性能指标 – 带宽

- ❖ “带宽” (bandwidth)有两种不同的意义
- ❖ 无线网络和传统通信线路中，带宽指信号具有的**频带宽度**
 - 单位是**赫**（或千赫、兆赫、吉赫等）
 - 例如，传统电话信号的标准带宽3.1kHz (0.3~3.4kHz), 也称为通频带
- ❖ 有线网络中，带宽表示数字信道传送数据的能力，即单位时间内从网络的某一点到另外一点所能通过的 **“最高数据率”**
 - 单位是**比特每秒**（千比每秒，兆比每秒，吉比每秒，太比每秒）
 - $1 \text{ b/s (bit/s)} = 10^{-3} \text{ kb/s} = 10^{-6} \text{ Mb/s} = 10^{-9} \text{ Gb/s} = 10^{-12} \text{ Tb/s}$
 - 注意，在计算机领域，衡量内存/数据大小时， $1\text{B} = 2^{-10}\text{KB} = 2^{-20} \text{ MB}$

速率和带宽度量单位一样，区别是什么呢？

❖ 速率：物理概念，描述网络硬件每秒所能承载的最大bit值

- 一段网络链路，根据其物理特性，速率最高能达到10Gbps

❖ 带宽：逻辑概念，描述每秒能接收到bit数

- 对于1Gbps的以太网信道，若使用两条线缆传输信息，则带宽为2Gbps
- 对于1Gbps的以太网信道，若n个用户共用一条线缆，则每个用户的带宽为 $\frac{1}{n}$ Gbps

❖ 速率和带宽谁起决定作用？

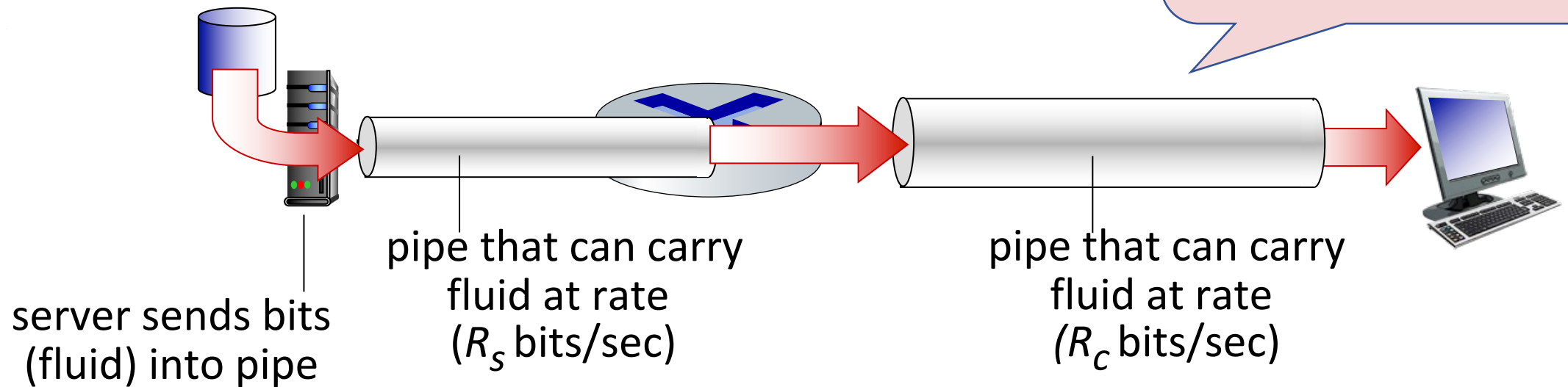
- 若传输数据量非常小（如1bit），传输性能取决于速率
- 若传输数据量很大，则传输性能取决于带宽

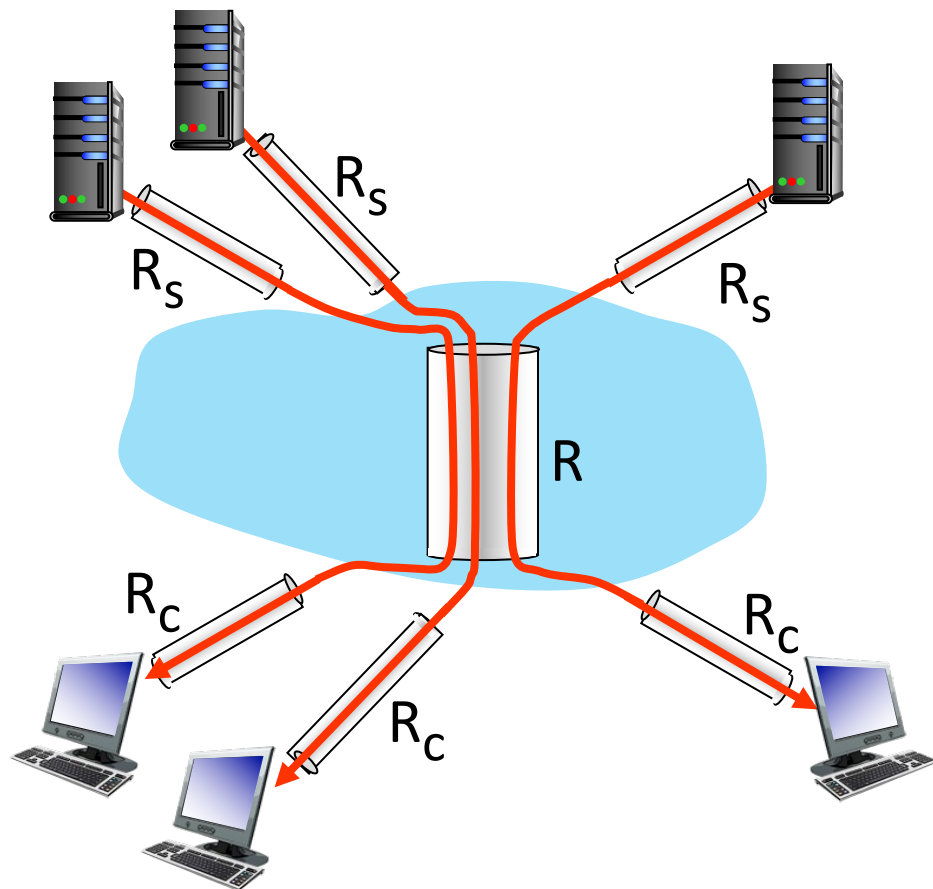
2.5 网络的性能指标 – 吞吐量

❖ **吞吐量 (throughput)** : 单位时间内通过某个网络 (或信道、接口) 的数据量

- 单位为**比特每秒**
- 吞吐量受网络的带宽或网络的额定速率的限制
 - 例如, 100Mbps以太网的典型吞吐量为70Mbps

思考 : $R_s < R_c$ 时, 平均端到端的吞吐量是多少?



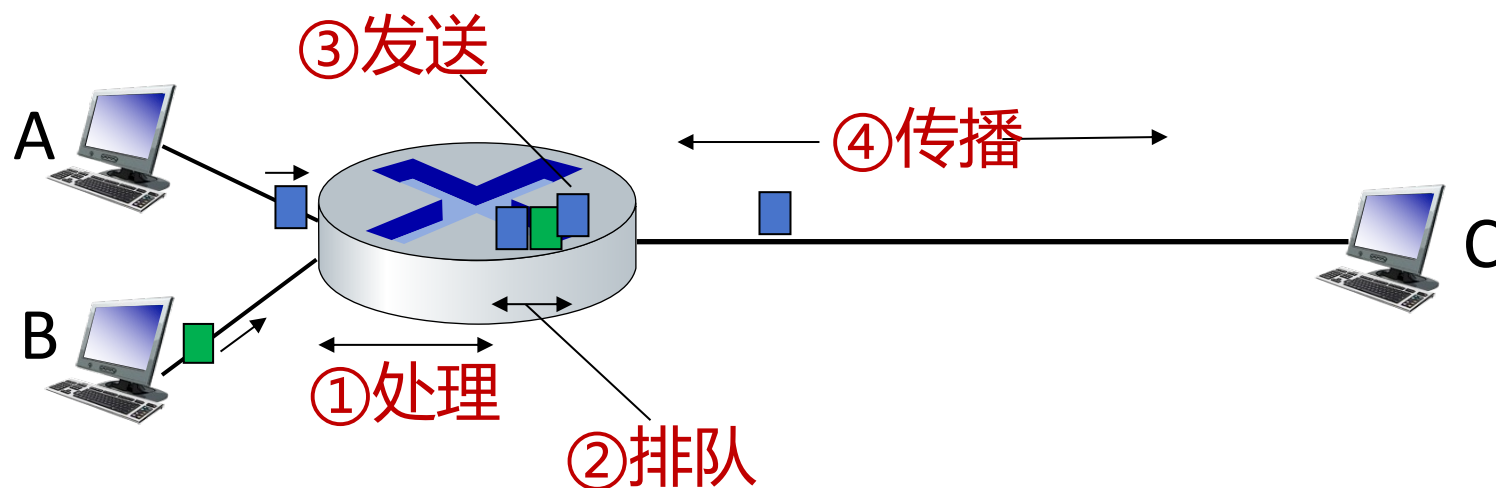


10 connections (fairly) share
backbone bottleneck link R bits/sec

- per-connection end-end throughput:
 $\min(R_c, R_s, R/10)$
- in practice: R_c or R_s is often bottleneck

2.5 网络的性能指标 – 时延

❖ 时延 (delay/latency) : 数据从网络一段传送到另一端所需的时间



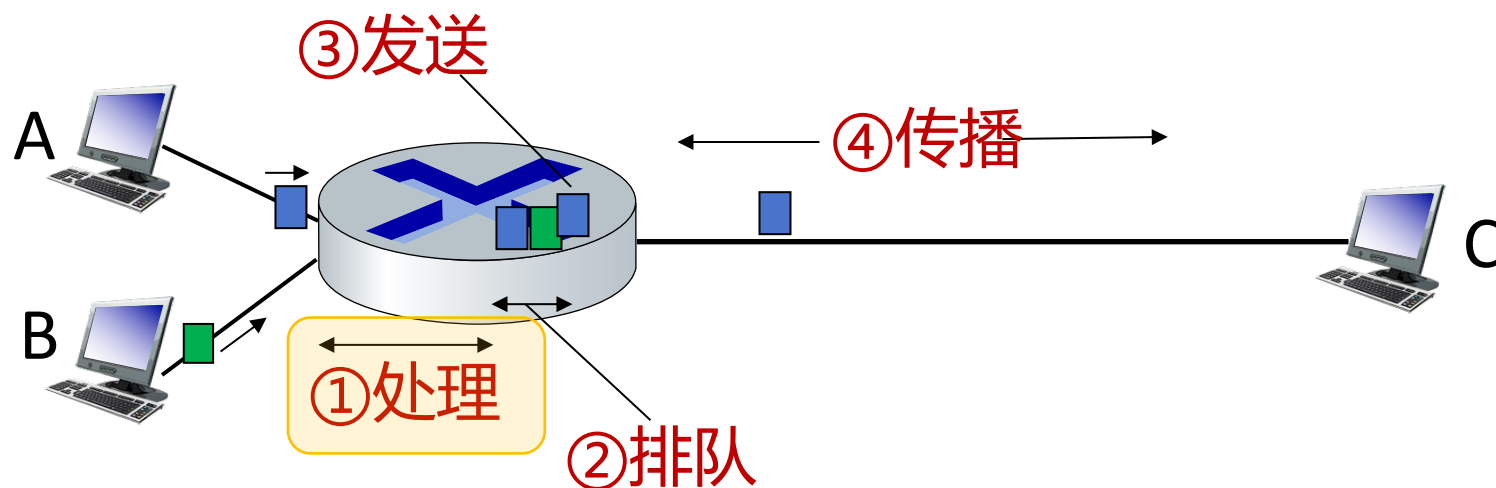
节点总时延为：

$$d_{\text{节点}} = d_{\text{处理}} + d_{\text{排队}} + d_{\text{发送}} + d_{\text{传播}}$$

注意：在总时延中，究竟是哪一种时延占主导地位，必须具体分析

2.5 网络的性能指标 – 时延

❖ **时延 (delay/latency)** : 数据从网络一段传送到另一端所需的时间

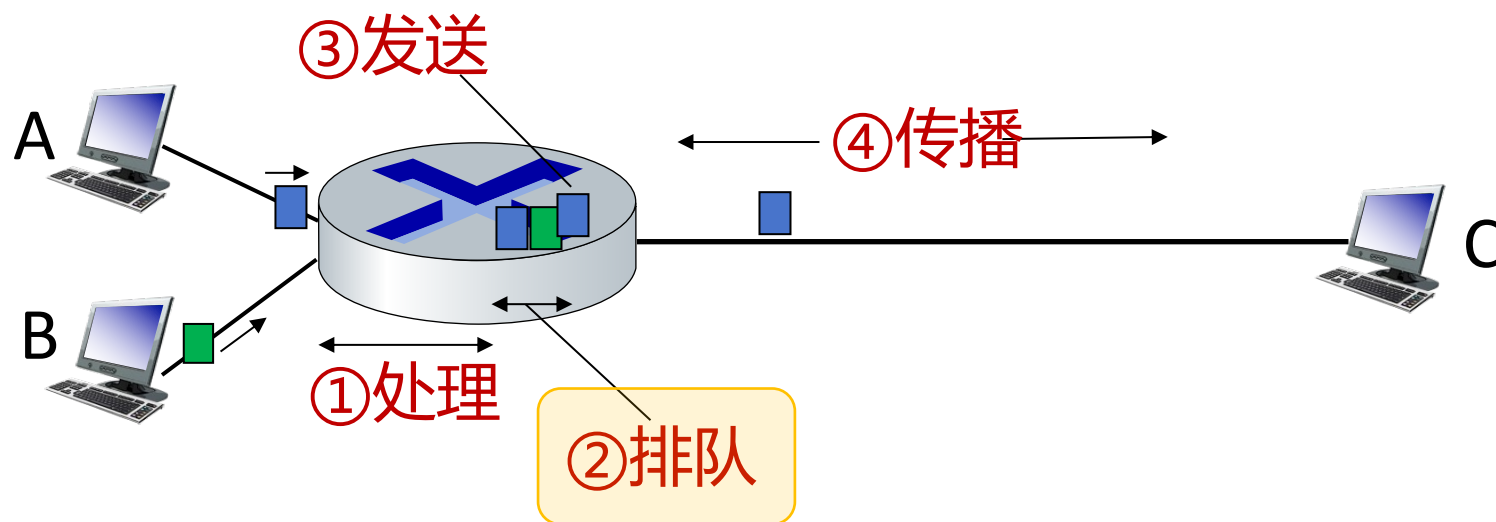


❖ **处理时延** : 交换结点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间，如

- 分组首部解析，差错检验，查找转发表等
- < 毫秒级

2.5 网络的性能指标 – 时延

❖ 时延 (delay/latency) : 数据从网络一段传送到另一端所需的时间



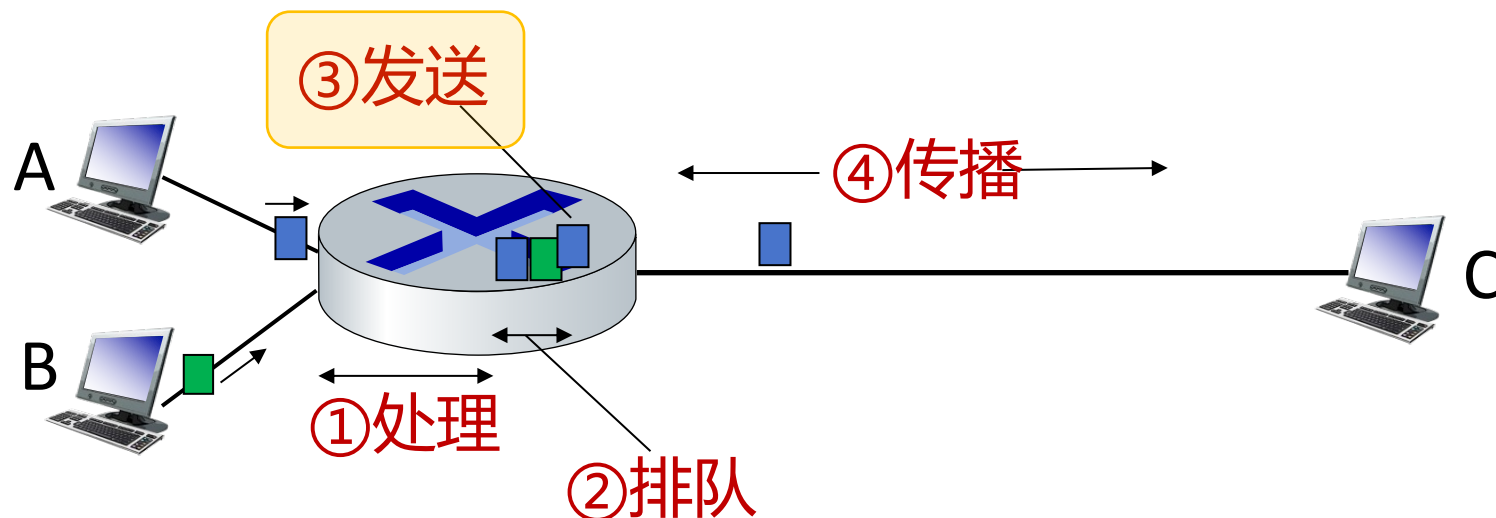
❖ 排队时延 : 结点缓存队列中分组排队所经历的时延

❖ 排队时延的长短往往取决于网络中当时的通信量

❖ 通信量大，队列溢出时，则会产生丢包

2.5 网络的性能指标 – 时延

❖ **时延 (delay/latency)** : 数据从网络一段传送到另一端所需的时间



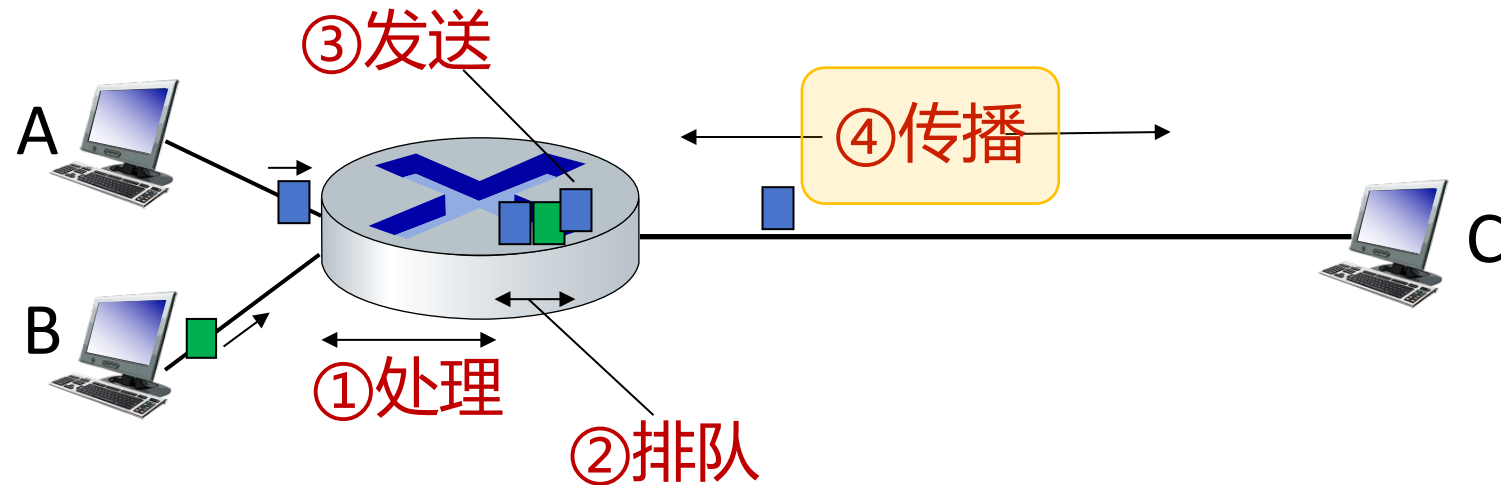
❖ **发送时延** : 发送数据时，数据块从结点进入到传输媒体所需要的时间

- 从发送数据帧的第一个比特起，到该帧最后一个比特发送完毕所需的时间

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

2.5 网络的性能指标 – 时延

❖ **时延 (delay/latency)** : 数据从网络一段传送到另一端所需的时间

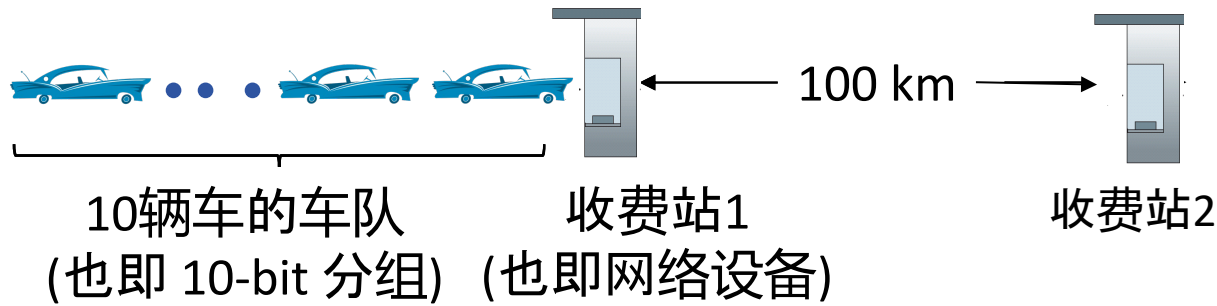


❖ **传播时延** : 电磁波在信道中需要传播一定的距离而花费的时间

(km/s)	传播速率	1000km时延
自由空间	3×10^5	~3.3ms
铜线电缆	2.3×10^5	~4.3ms
光纤	2×10^5	~5ms

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

举例：发送时延和传播时延



- ✓ 一辆车：1 bit
- ✓ 一个车队：一个分组
- ✓ 每辆车过收费站需6s：发送速率为1/6 bit/s
- ✓ 车速100km/h：传播速度为100km/h

Q1：整个车队的发车时间是多少？
(分组的发送时延是多少？)

60秒

Q2：从第一辆车到收费站1起，到最后
一辆车到收费站2止，经过多少时间？
(分组从节点1到节点2的时延是多少？)

61分钟

❖ 高速网络链路：提高的仅是数据的发送速率，提高链路带宽减小了数据的发送时延

❖ 以下说法是**错误**的：

“在高速链路（或高带宽链路）上，
比特会传送得更快些”

时延直接影响着用户体验

❖ 时延抖动 (Jitter) : 变化的时延称

- 时延抖动起源于网络中的队列或缓冲，抖动难以精确预测
- 在语音、视频多媒体业务中，抖动往往会严重影响用户的体验

❖ 延迟丢包：在多媒体应用中，由于数据包延迟到达，在接收端需要丢弃失去使用价值的包

```
C:\Users\DELL>ping www.baidu.com
```

```
正在 Ping www.a.shifen.com [110.242.68.4] 具有 32 字节的数据:  
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=109ms TTL=51  
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=23ms TTL=51  
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=23ms TTL=51  
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=143ms TTL=51
```

```
110.242.68.4 的 Ping 统计信息:  
数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),  
往返行程的估计时间(以毫秒为单位):  
最短 = 23ms, 最长 = 143ms, 平均 = 74ms
```

时延抖动

2.5 网络的性能指标 – 时延带宽积

- ❖ **时延带宽积**：传播时延 $\times$ 带宽，又称为以比特为单位的链路长度，也是从发送端发出但未到达接收端的比特数量
- ❖ 链路的充分利用如何体现？代表链路的管道都充满比特时



举例

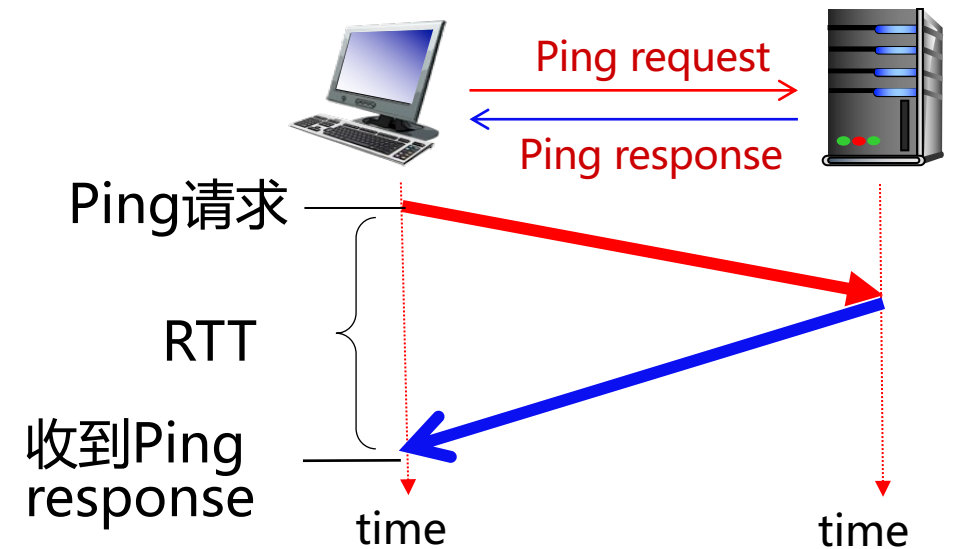
传播时延为20ms，
带宽为10Mb/s，则：
时延带宽积
 $= 20/1000 \times 10 \times 10^6$
 $= 2 \times 10^5 \text{ bit}$

2.5 网络的性能指标 – 往返时间RTT

❖ **往返时间RTT (Round-Trip Time)** : 从发送方发送数据开始 , 到发送方收到来自接受方的确认 , 总共经历的时间

- 可用于判断网络的通断性、测试网络时延、计算数据包丢失率等

```
$ ping www.baidu.com
PING www.a.shifen.com (183.2.172.42): 56 data bytes
64 bytes from 183.2.172.42: icmp_seq=0 ttl=53 time=18.791 ms
64 bytes from 183.2.172.42: icmp_seq=1 ttl=53 time=27.474 ms
64 bytes from 183.2.172.42: icmp_seq=2 ttl=53 time=23.464 ms
64 bytes from 183.2.172.42: icmp_seq=3 ttl=53 time=35.304 ms
64 bytes from 183.2.172.42: icmp_seq=4 ttl=53 time=20.351 ms
^C
--- www.a.shifen.com ping statistics ---
5 packets transmitted, 5 packets received, 0.0% packet loss
round-trip min/avg/max/stddev = 18.791/25.077/35.304/5.912 ms
```



使用ping命令获取往返时延RTT

2.6 网络的性能指标 – 利用率

❖ **信道利用率**：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**：全网络信道利用率的加权平均值

❖ 信道利用率越高越好么？ 不是

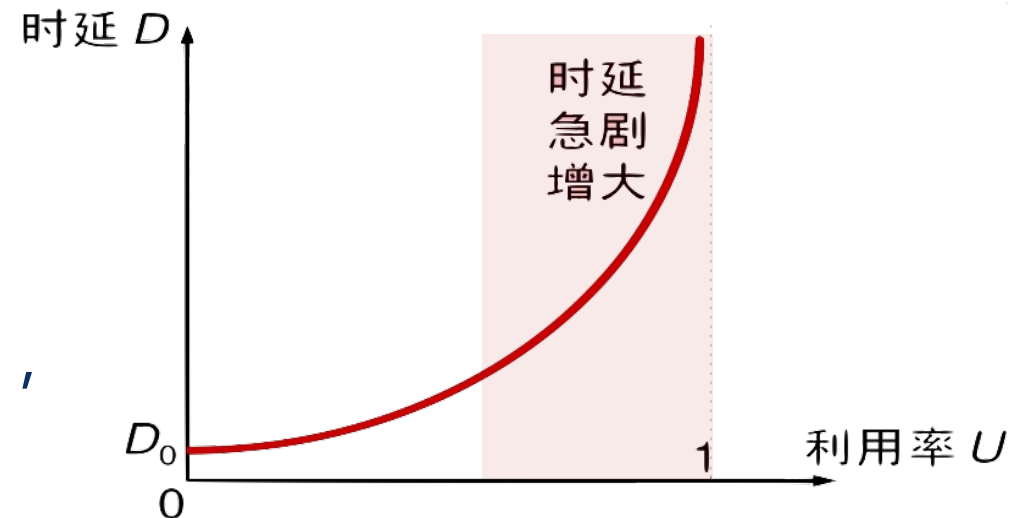
❖ 根据排队论的理论，当某信道的利用率增大时，该信道引起的时延也就迅速增加



$U \sim 0$



$U \rightarrow 1$



D_0 ：网络空闲时的时延

D ：网络当前的时延

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

一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

3.1 互联网的发展历史

3.2 计算机网络在中国的发展

四

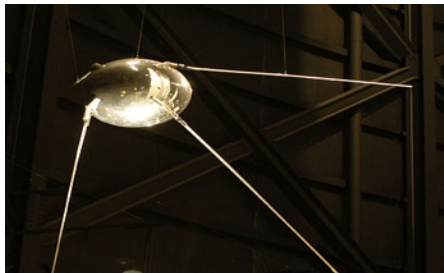
计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

3.1 互联网的发展 – 起源

- ❖ 20世纪60年代美苏冷战，美国ARPA提出要研制一种生存性很强的网络，即使核战争爆发也能生存下来
- ❖ 传统电路交换的电话网络容错差
 - 通信电路任一交换机或链路被炸，则通信中断
 - 冗余少，一旦关键节点遭破坏，则形成孤岛

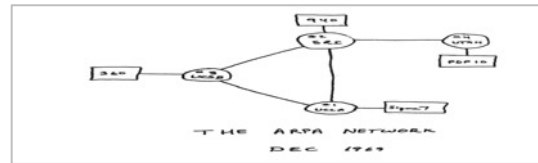


斯普特尼克1号



国防高级研究计划局

四个节点
UCLA/SRI/UCSB/Utah

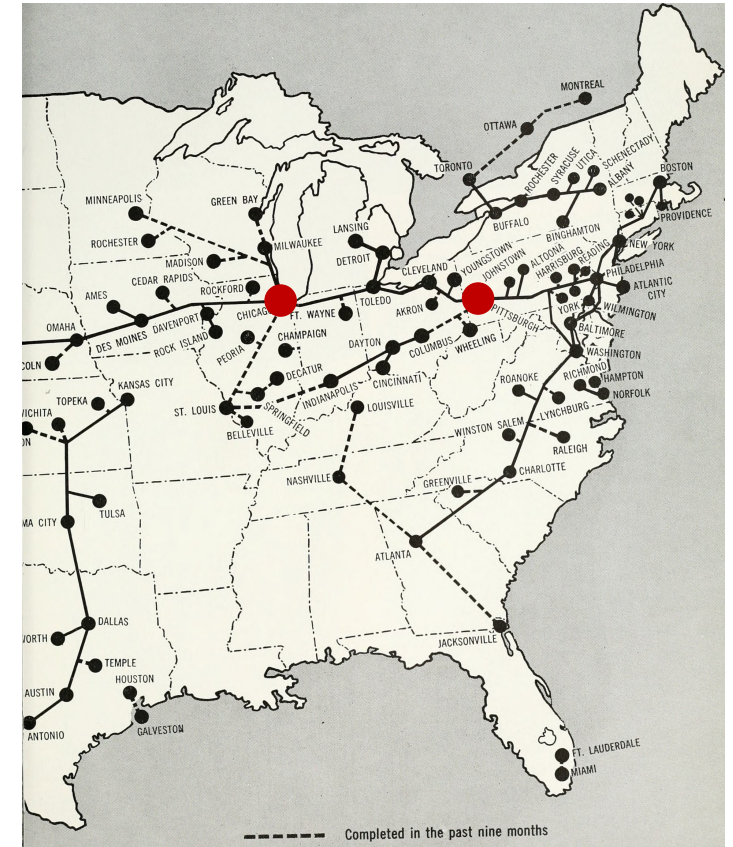


ARPANET诞生

1957年10月
苏联发射成功
第一颗人造卫星

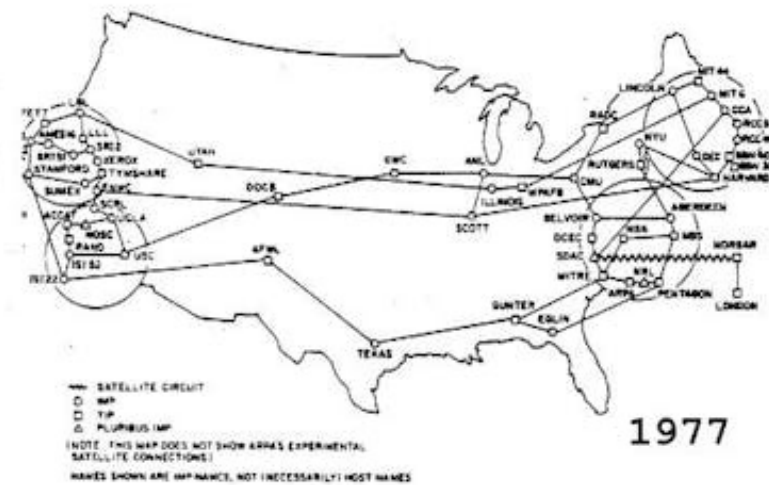
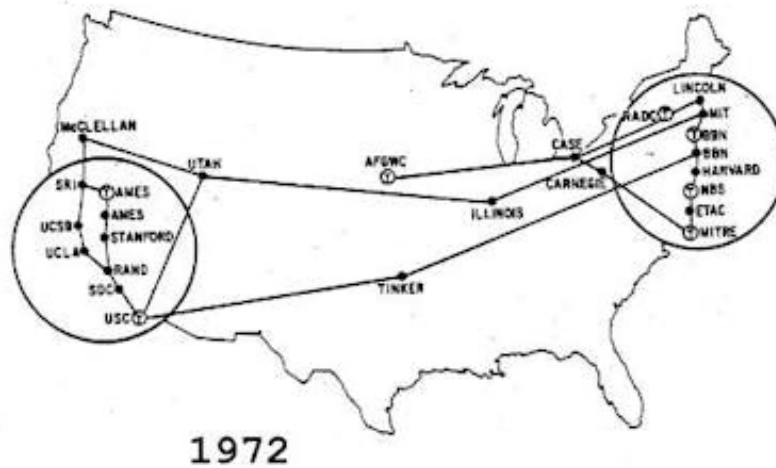
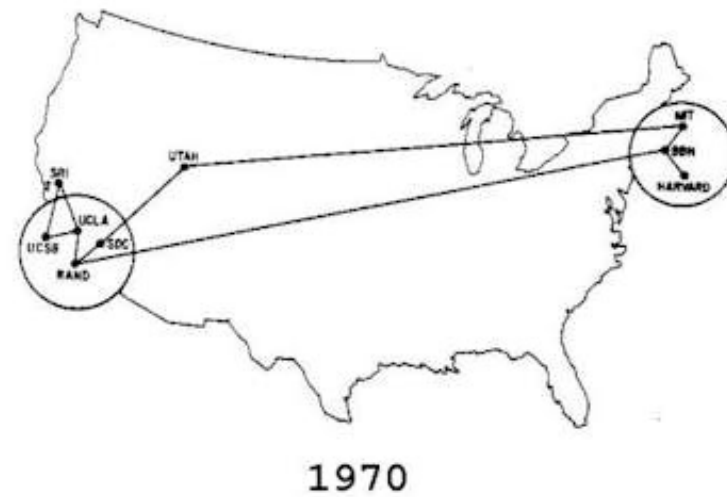
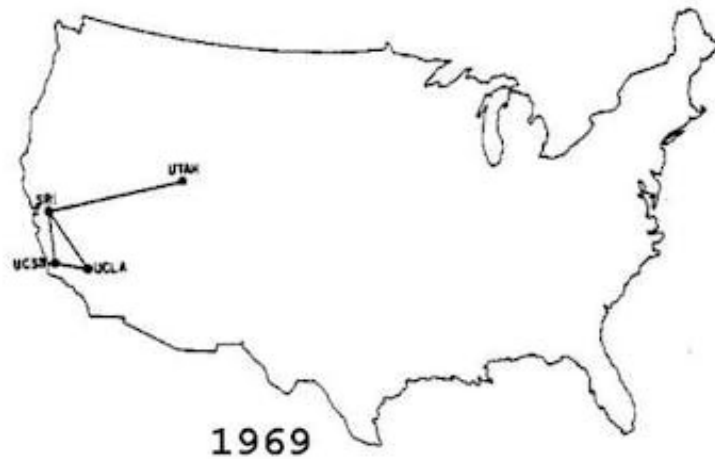
1958年2月
美国成立国防高级研
究计划局 (ARPA)

1969年8月
ARPANET诞生
创新采用分组交换技术



1922年美国贝尔交换网

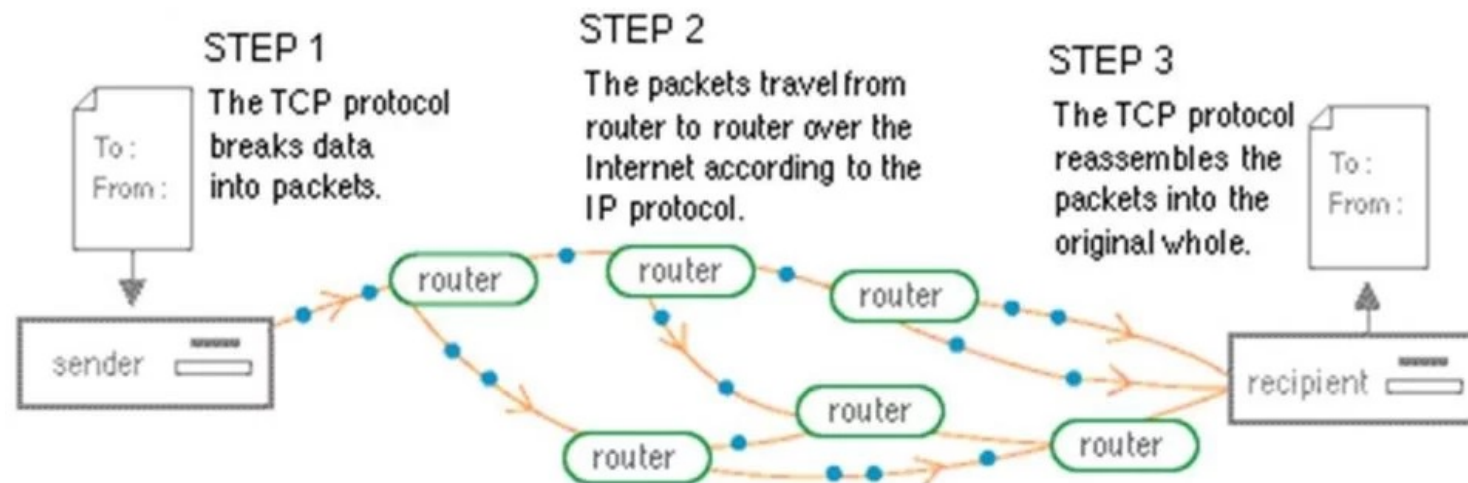
3.1 互联网的发展 – 起源



ARPANet节点变化

3.1 互联网的发展 – 第一阶段

- ❖ **第一阶段**：从单个网络 ARPANET 向互联网发展
- ❖ 美国国防部主导，对军队及与其有合作的大学开放
 - 20世纪70年代：作为研究项目启动，带宽56kbps，连接计算机不超过100台
 - 1980~1983：ARPANET和Military Network分开
 - **1983 年互联网诞生**: TCP/IP 协议成为 ARPANET 的标准协议
 - 所有使用TCP/IP协议的计算机都能利用互联网通信



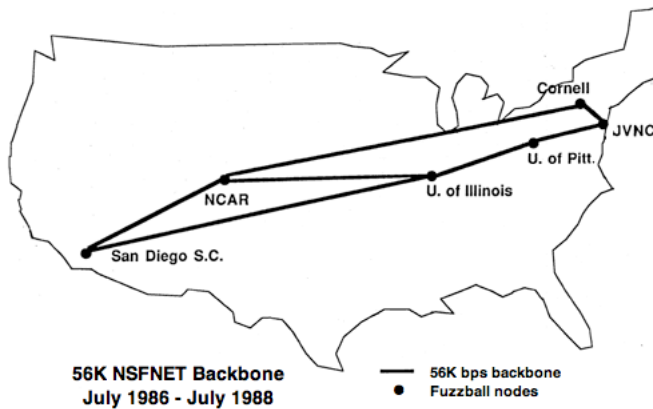
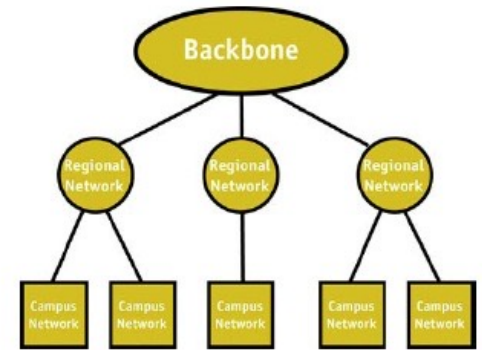
TCP/IP 协议工作原理示意图

3.1 互联网的发展 – 第二阶段

❖ **第二阶段：建成了三级结构的互联网**

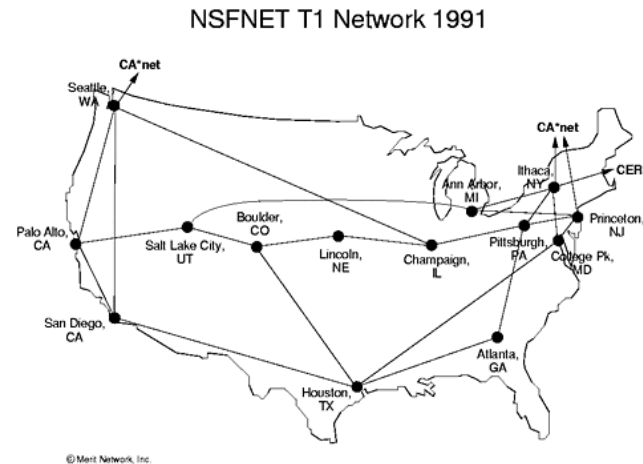
❖ 美国国家科学基金会（NSF）主导，对所有大学的研究组开放

- 三级计算机网络，分为主干网、地区网和校园网（或企业网）
- 1994：NSF骨干网解体，出现多个商用骨干网



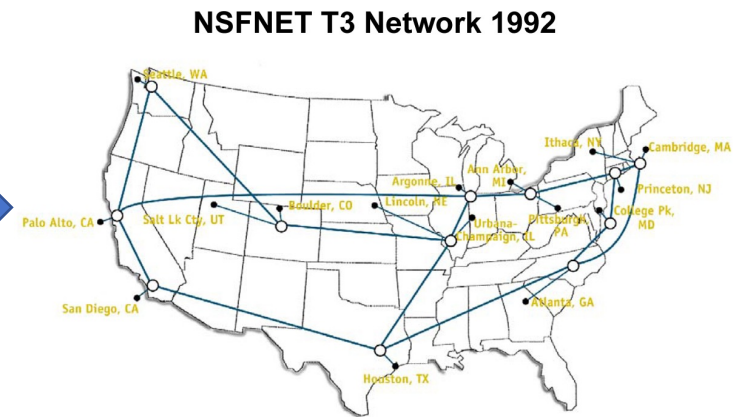
1986~1988

NSFNET作为骨干网连接6个超级计算机中心，带宽56Kbps



1987~1990

连接地区网络，带宽1.5Mbps，计算机数量超过10万台

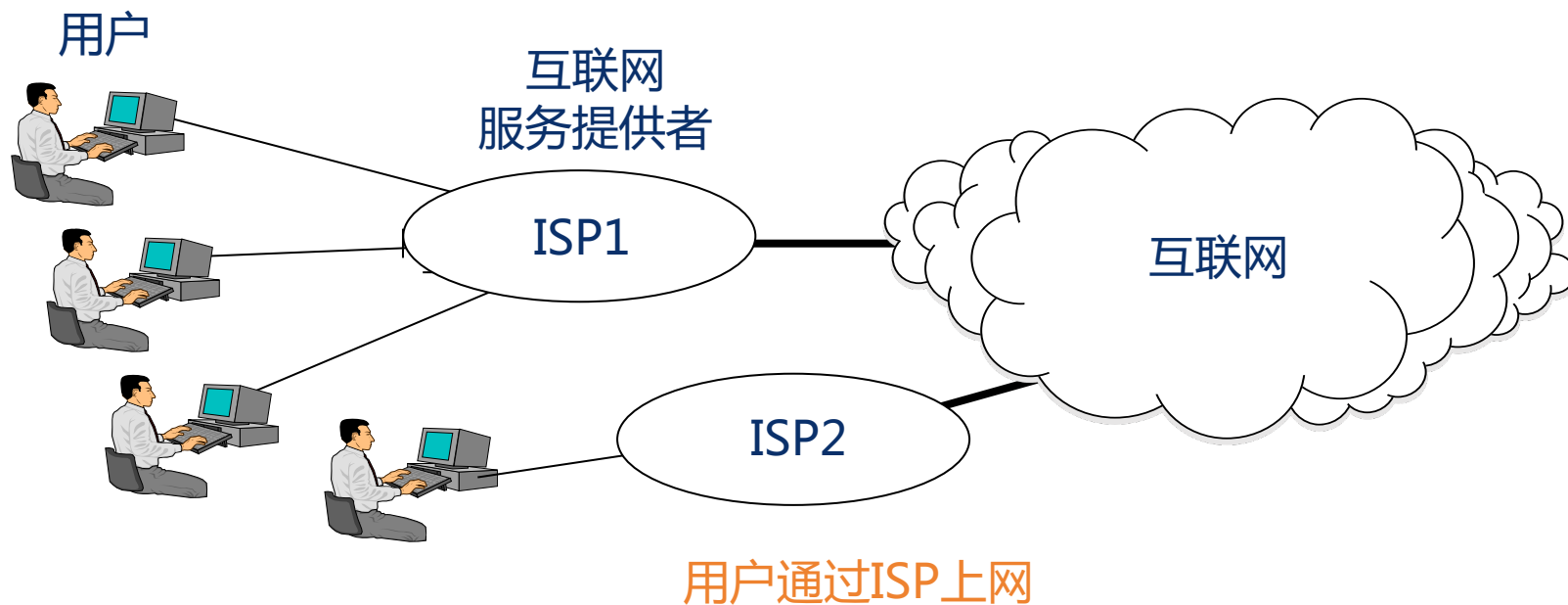


1990~1992

带宽发展到45Mbps，连接16个地区网络

3.1 互联网的发展 – 第三阶段

- ❖ **第三阶段**：逐渐形成了多层次 ISP 结构的互联网
- ❖ 商业公司主导，提供商业性的IP服务
 - 出现了互联网服务提供者 ISP (Internet Service Provider)
 - 根据覆盖面积大小及所拥有的IP地址数目的不同，ISP 也分为不同层次
 - 互联网交换点IXP (Internet eXchange Point) 应运而生



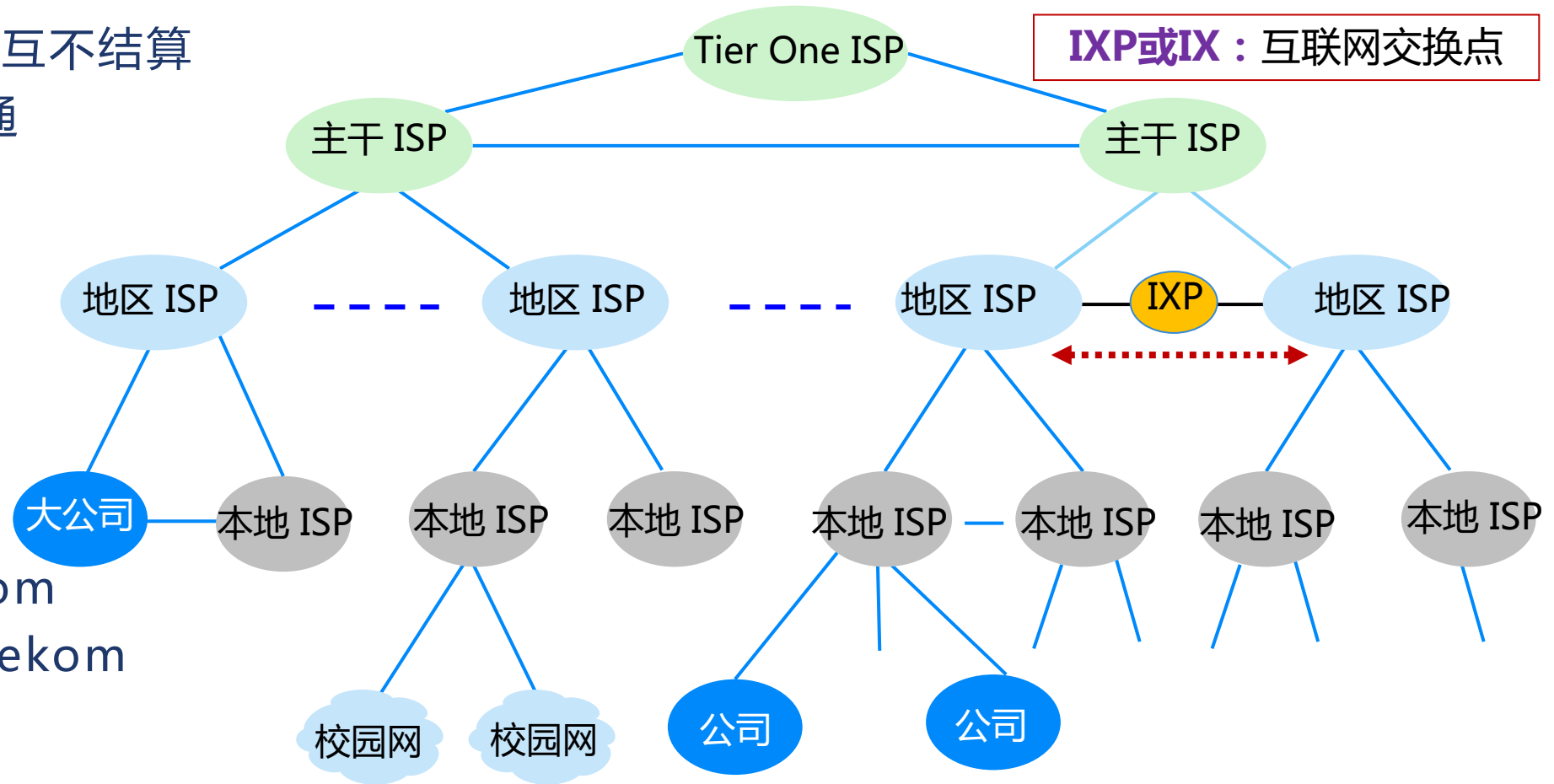
3.1 互联网的发展 – 第三阶段

• Tier-1 ISP

- 全球最高级别ISP，互不结算
- 中国电信、中国联通
- 美国AT&T
- 美国Verizon
- 美国Sprint
- 日本NTT
- 日本KDDI
- 新加坡SingTel
- 英国British Telecom
- 德国Deutsche Telekom

• Tier-2 ISP

- 教育网、中国移动
- 往往需要向更高级别ISP流量费



网络服务提供商 (ISP) 及层次化结构
(实际网络结构要复杂得多)

❖ 诞生阶段的启发

- 有战略背景和传统技术无法解决的**重大需求**
- 分组交换的**理论突破**和**原型系统实验**并举
- 有政府的不断支持：从1969开创至今

❖ 成长壮大阶段

- **简单实用**的技术路线TCP/IP诞生和发展
- 教育和科研的示范网络为**起点**：
具有实验物理学的研究特点
 - ARPAnet、NSFNET、ANS、vBNS
- **联合协作的开放式研究**：IETF/RFC
- 在不断试错中快速成长壮大

互联网诞生的两种说法

- 1、1969年ARPANET诞生
- 2、1983年ARPANET采用TCP/IP



2019年网络领域顶级会议**SIGCOMM**
在京举行并庆祝互联网诞生50周年

互联网的新发展与启示

- 1993年Mosaic浏览器诞生，开启了互联网广泛商用之路
- 94年万维网联盟W3C成立
- 互联网进入高速发展期：雅虎、AOL、谷歌、亚马逊、EBay、Netflix、腾讯，阿里，百度，京东
- 95年NSFnet退役，转商业，网景上市，达29亿美元
- Netscape/微软IE世纪之争
- 2000年，互联网泡沫破灭，进入低调发展阶段
- Myspace、Skype、Safari，Facebook，Twitter，youtube，土豆，youku
- 2007年，3G+iPhone，谷歌收购安卓，即将进入移动互联
- 各种应用：Uber，airbnb，滴滴，抖音，头条，美团，拼多多...
- 云为基础的互联网平台
- 新技术爆发：高速网络，云，SDN，大数据/AI，VR/AR
- 2010年，4G LTE部署
- IoT
- 车联网
- 5G+进入各行业

Web 1.0 (1993-1999)

浏览器、门户、电子商务

ISDN上网，~64Kbps

Web 2.0 (2000-2007)

博客、社交媒体、视频

DSL/LAN，~10Mbps

移动互联 (~2018)

导航，网购，互联网+

WIFI+4G+，~100Mbps

智能互联 (~)

万物互联

5G+，一体化网络

数据以下载为主，下行带宽要求高

直播应用用户开始产生数据，开始对上行带宽提出更高要求

商业需求是核心驱动力，技术创新提供重要基础

- 有远见的企业参与并不断投入：MCI、IBM、Qwest, CISCO.....
- 有线=>无线=>广覆盖：便捷程度决定了用户使用方式和在线时间
- 网络性能决定了应用体验，成了互联网应用发展的必要条件
- 网络带宽决定了应用能传什么：
文本=>图片（静图->动图）=>音频=>视频（低清->高清，短视频->直播）
- 网络性能提升、延迟降低：快速响应？可靠性？计算、存储、传输的互换？

Web 1.0 (1993-1999)

浏览器、门户、电子商务

ISDN上网，~64Kbps

Web 2.0 (2000-2007)

博客、社交媒体、视频

DSL/LAN，~10Mbps

移动互联 (~2018)

导航，网购，互联网+

WIFI+4G+，~100Mbps

智能互联 (~)

万物互联

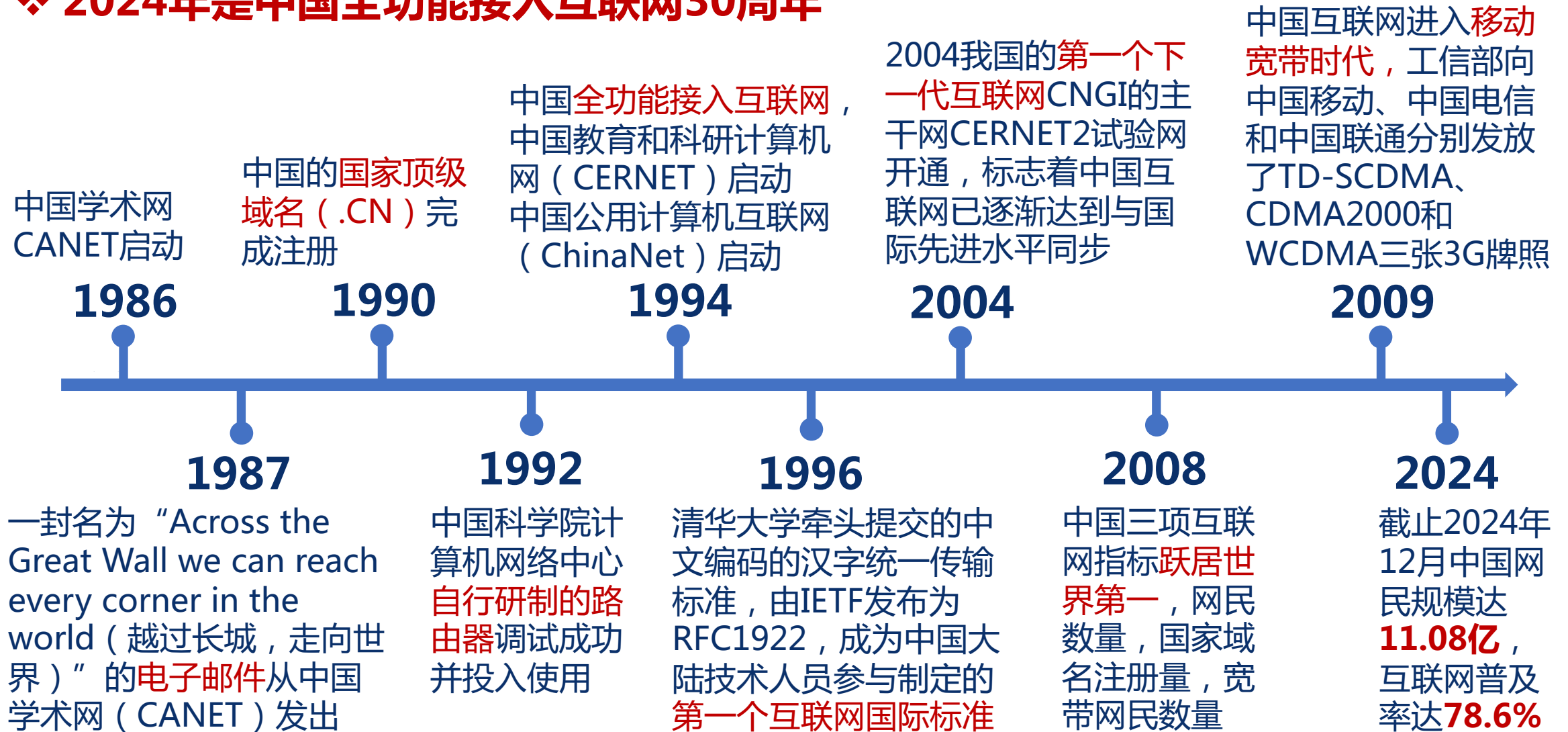
5G+，一体化网络

数据以下载为主，下行带宽要求高

直播应用用户开始产生数据，开始对上行带宽提出更高要求

3.2 计算机网络在中国的发展

❖ 2024年是中国全功能接入互联网30周年



3.2 计算机网络在中国的发展

❖ 2024年是中国全功能接入国际互联网20周年

中国学术网
CANET启动

1986

中国的国家顶级
域名 (.CN) 完
成注册

1990

1987

一封名为 "Across the Great Wall we can reach every corner in the world (越过长城, 走向世界)" 的电子邮件从中国学术网 (CANET) 发出

中
算
自
由
并

Rece
Rece
Date
From
To:
CC:
Subj
Stat
Cont
Line
"Ueb
"Acr
Dies
in d
This
inte
Beij
U
-Inf
Prof
Mich
Stef
Mich
Gerh
Hans



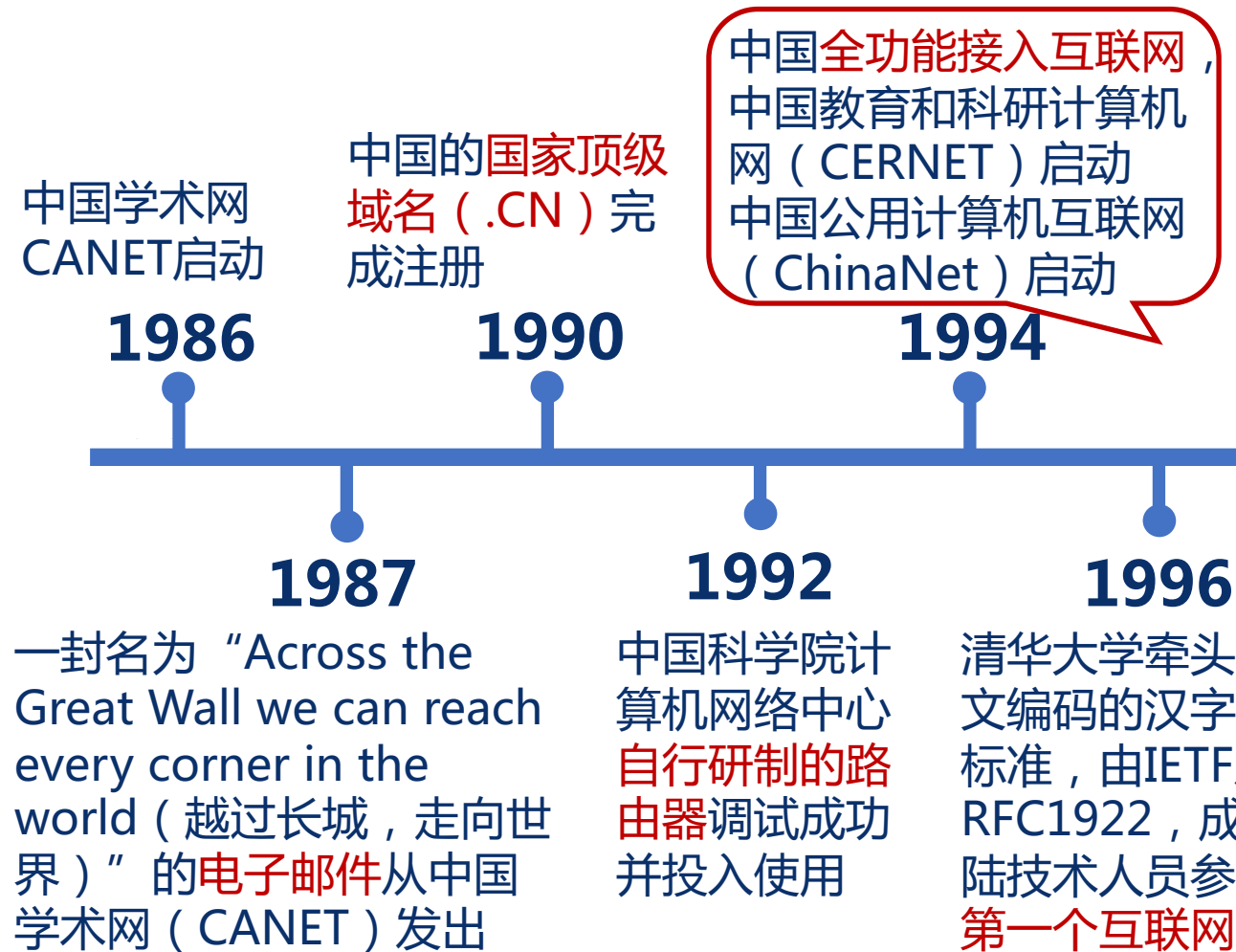
动

普及

达18.6%

3.2 计算机网络在中国的发展

❖ 2024年是中国全功能接入互联网30周年



2004我国的第一个下一代互联网CNKI的主机
中国互联网进入移动宽带时代, 工信部向中国移动、中国联通、中国电信发放了3G牌照



名注册量, 宽带网民数量

互联网普及率达**78.6%**

参考: <https://www.inetevents.cn/>, 中国互联网网络基础技术起源及发展大事记

3.2 计算机网络在中国的发展

从成为互联网**第77位成员国**，经过三十多年的发展，我国网络规模发生了翻天覆地的变化



3.2 计算机网络在中国的发展



从成为互联网**第77位成员国**，经过三十多年的发展，我国网络规模发生了翻天覆地的变化

- **五大网络**：CHINANET电信，UNINET联通，CMNET移动，CERNET教育网，CSTNET科技网
- 我国国际出口带宽超过11Tbps
- 4G基站711万个，**全球第一**
- 2025年6月，5G基站达455万个，**占全球6成**
- IPv4地址3.8亿个；IPv6地址50903块/32，**居世界第二**
- .CN域名数2085万个，**全球第一**
- 应用APP在架数量达到359万款

▪ 更多互联网历史，参考阅读论文：

[1] Leiner, B. M., Cerf, V. G., Clark, D. D., Kahn, R. E., Kleinrock, L., Lynch, D. C., ... & Wolff, S. A brief history of the Internet. *ACM SIGCOMM CCR*, 2009.

▪ 更多中国互联网发展历史，参考阅读：

[1] 中国互联网网络基础技术起源及发展大事记, <https://www.inetevents.cn/>

[2] 这三十年，我国抓住信息时代历史机遇——中国全功能接入国际互联网30周年述评，2024年，
https://www.cac.gov.cn/2024-04/20/c_1715291120716362.htm

[3] 网络扶贫行动计划，2020年，

http://www.scio.gov.cn/xwfb/gwyxwbgsxwfbh/wqfbh_2284/2020n_4408/2020n11y06r/wjxgzc_5503/202207/t20220716_228601.html

一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

4.1 协议分层结构

4.2 互联网体系结构设计目标和原则

4.3 OSI参考模型

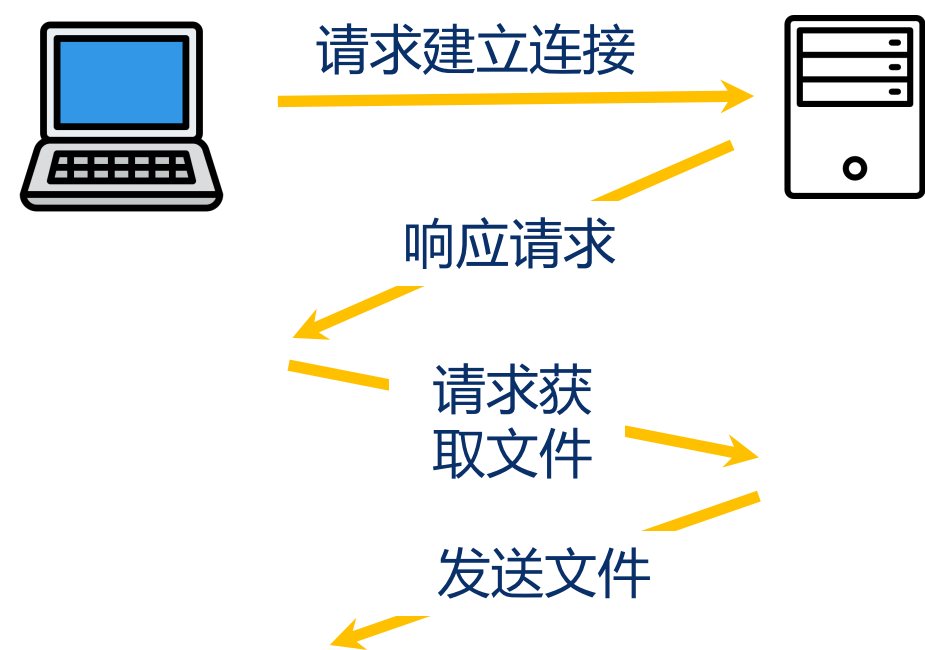
4.4 TCP/IP参考模型

4.5 本课程内容的分层组织

4.1 协议分层结构



信息交互的基础：共同的语言、互相理解，共同语义.....



如何实现计算机之间的信息交互?

依靠协议

❖ **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

- 这些规则明确规定了所交换的数据的格式以及有关的同步问题
- 通信双方要共同遵守, 互相理解

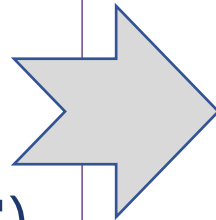
❖ 网络协议由三个要素组成

- **语法** : 规定传输数据的格式 (如何讲)
- **语义** : 规定所要完成的功能 (讲什么)
- **时序** : 规定各种操作的顺序 (双方讲话的顺序)

网络协议异常复杂
通信双方要说的事情多种多样, 需要应对的情况很多

网络协议分层的必要性

- 计算机网络的复杂与异构
 - 介质：光纤、铜缆、空气...
 - 接入：有线、WLAN、移动数据网络、蓝牙...
 - 应用：无人驾驶、万物互联、短视频、邮件...
- 高速更新迭代
 - 大哥大1G（模拟）、2G(数字)、3G、4G、5G
 - IEEE802.3：2020年推出4个版本
 - ...



开发游戏直播软件，是否需要针对3G/4G/5G还是WiFi单独开发？

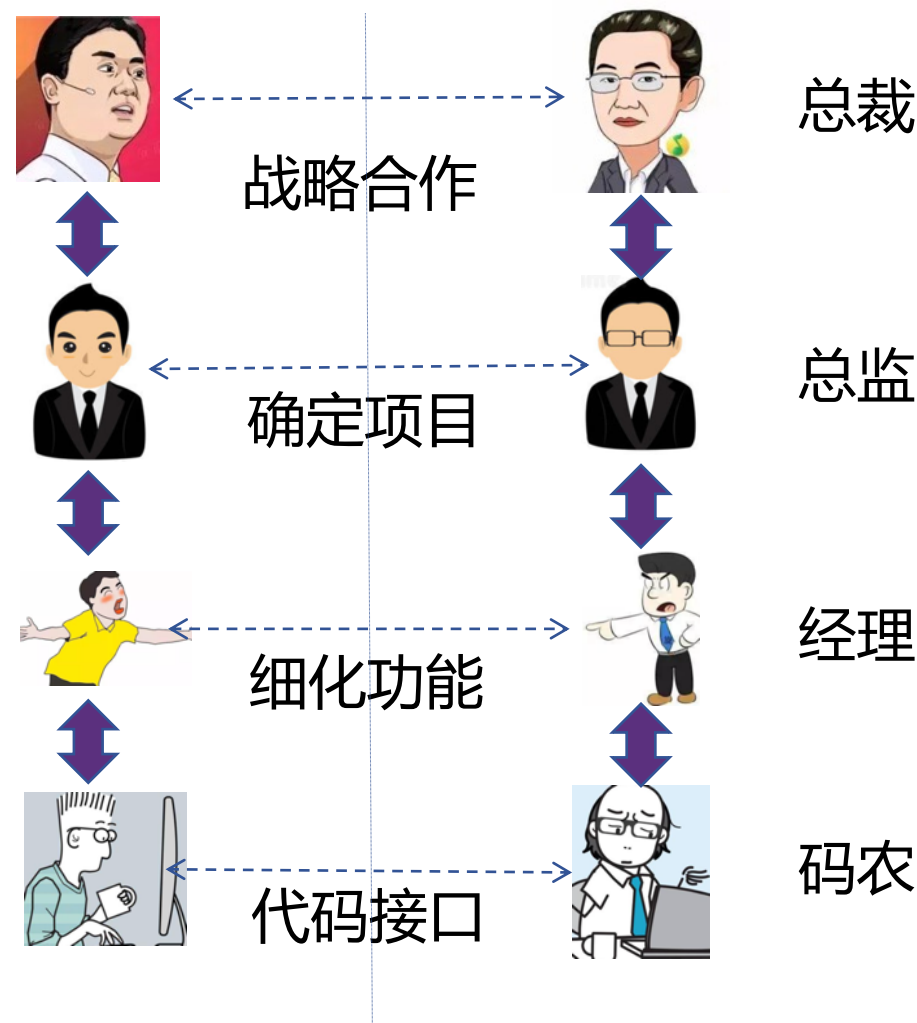
➤ 分层结构
➤ 统一标准
➤ 模块独立

- 明晰简化，便于分析学习
- 各层独立，加速技术演进
- 统一接口，确保技术互通（interoperable）

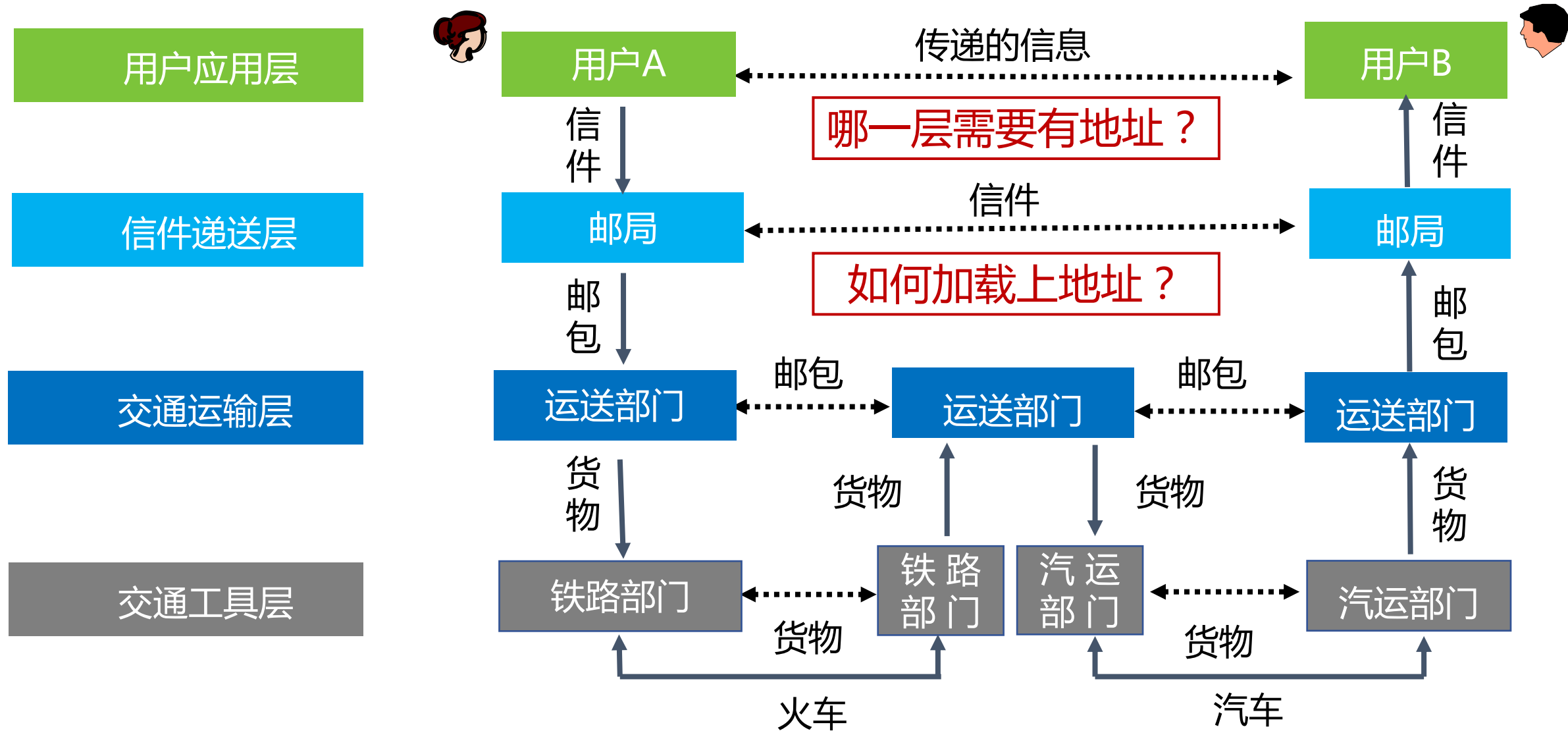
WiFi发展为新版本WiFi6，那么WiFi6是否要对已有直播、微信或支付宝做适配？

互联网大厂X讯与X东的合作

- 层级组织（**分层**）
 - 总裁-总监-经理-码农
- 内部独立（**模块**）
 - 我用Python; 我用GO
 - 铁打的项目，流水的码农
- 沟通协作（**标准**）
 - 合作协议、项目文档、接口定义
 - 日报、周报、月报



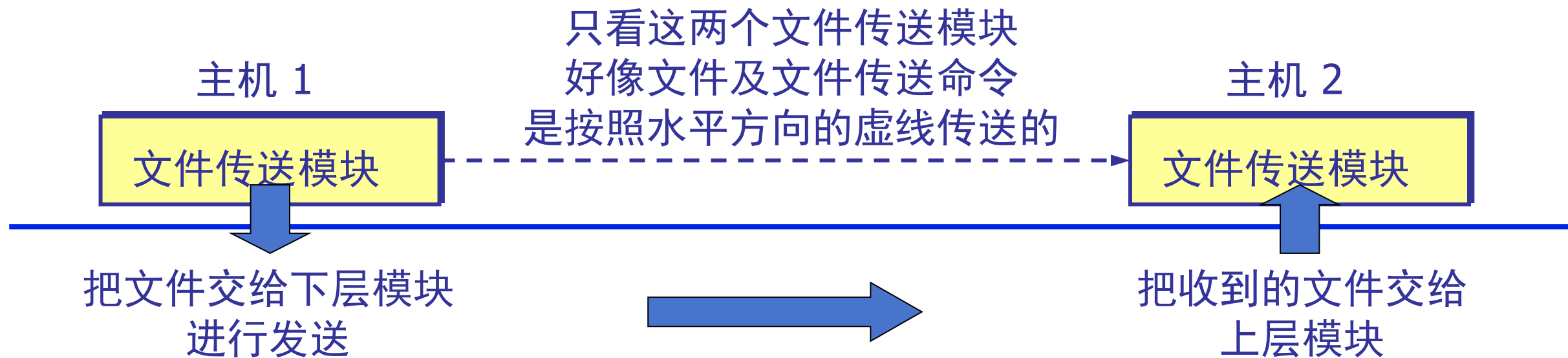
分层结构示例二



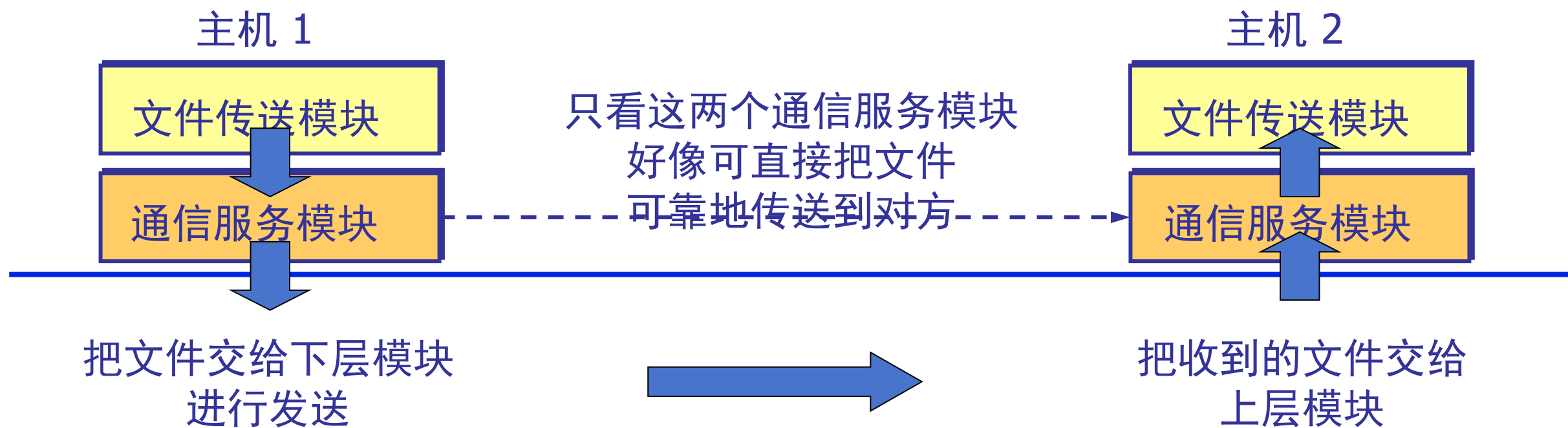
❖ **举例**：主机1向主机2通过网络发送文件，可以将要做的工作做如下划分

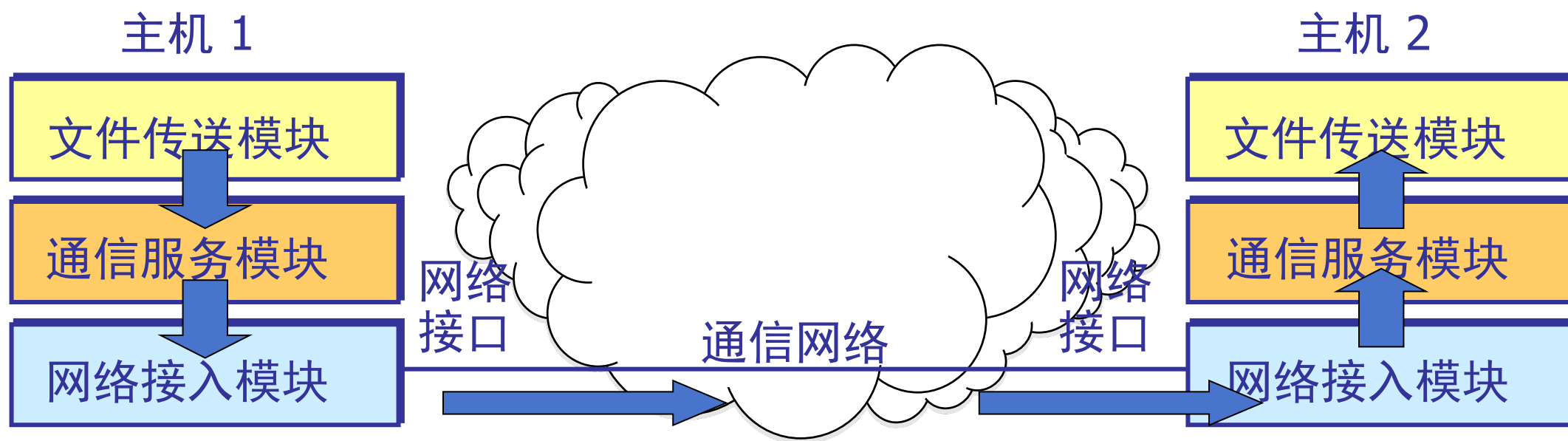
- 第一类工作：与传送文件直接相关
 - ✓ 确信对方已做好接收和存储文件的准备
 - ✓ 双方协调好一致的文件格式
- 第二类工作：通信服务
- 第三类工作：网络接入





分层结构示例三





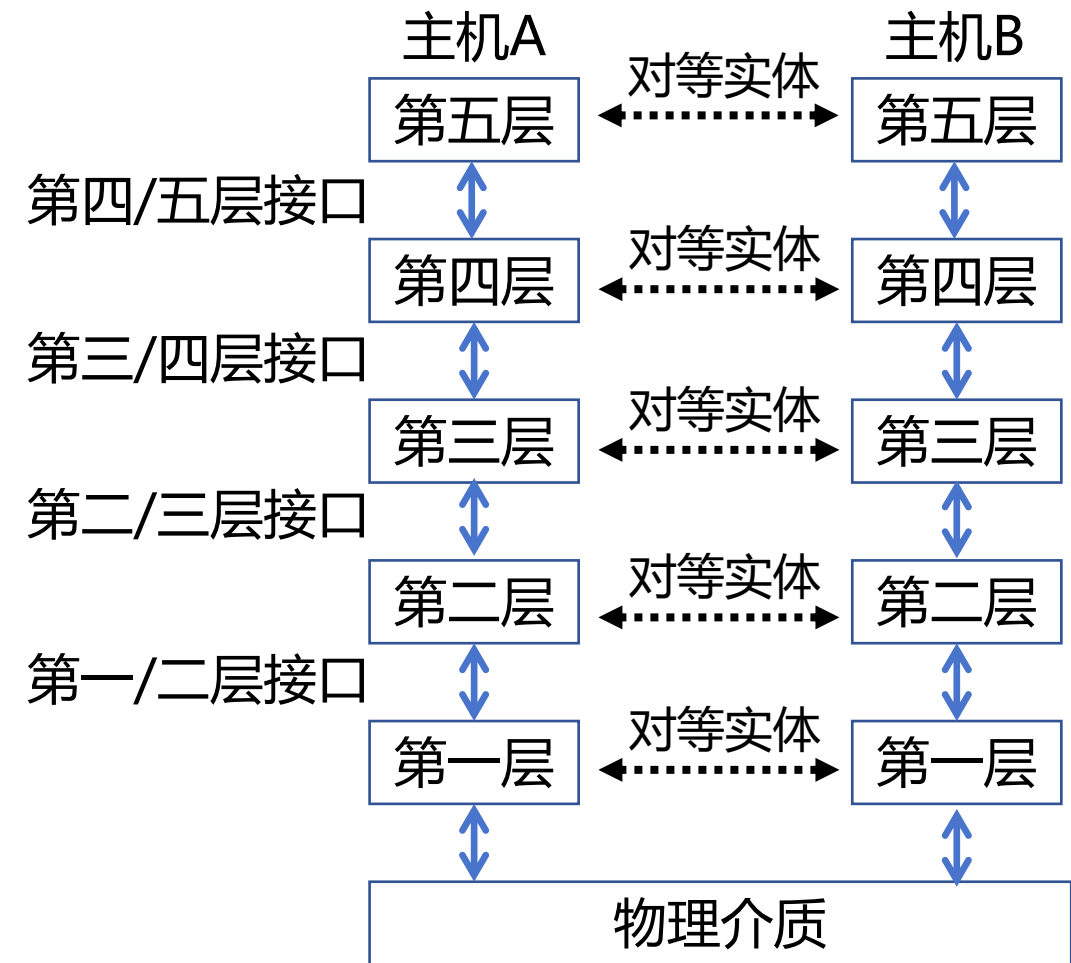
网络接入模块负责做与网络接口细节有关的工作
例如，规定传输的帧格式，帧的最大长度等。

❖ “**分层**” 的好处

- ✓ 各层之间是独立的
- ✓ 灵活性好
- ✓ 结构上可分割开
- ✓ 易于实现和维护
- ✓ 能促进标准化工作（差错控制、流量控制、分段和重装、复用和分用、连接建立和释放）

协议分层结构

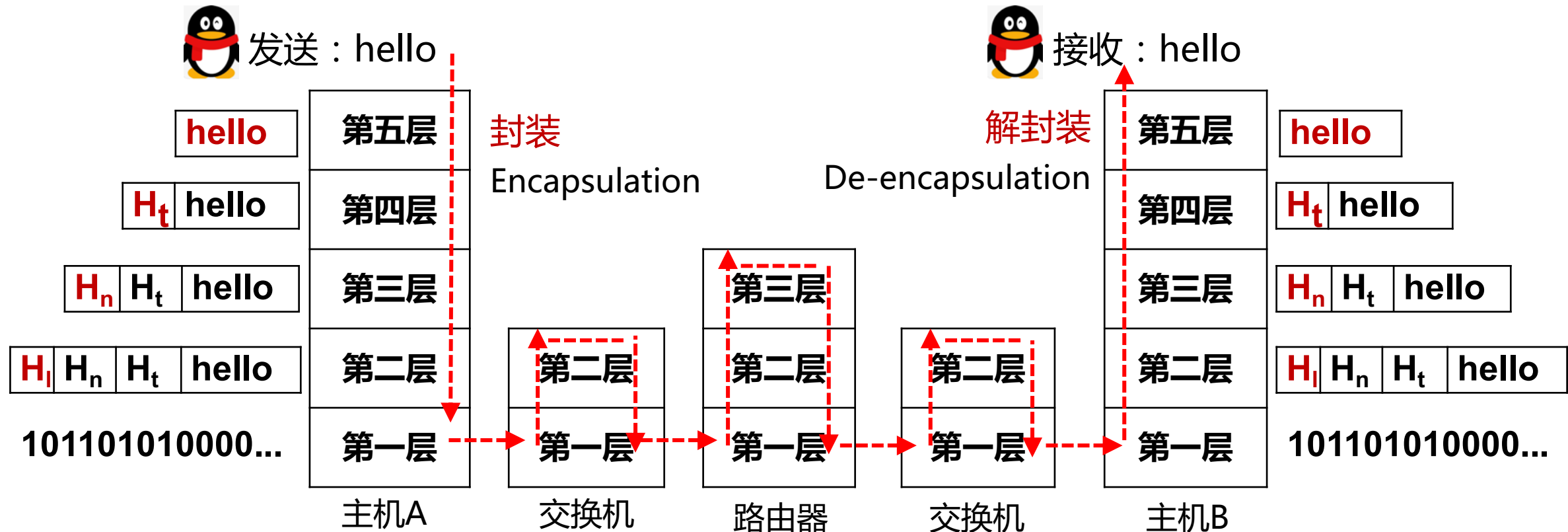
- ❖ **层次栈**：为降低网络设计的复杂性，网络使用层次结构的协议栈，每层都使用其下一层所提供的服务，并为上层提供自己的服务
- ❖ **对等实体**：不同机器上构成相应层次的实体成为对等实体
- ❖ **接口**：在每一对相邻层次之间的是接口；接口定义了下层向上层提供哪些**服务原语**
- ❖ **网络体系结构**：**层和协议的集合**为网络体系结构，一个特定的系统所使用的一组协议，即每层的协议，称为协议栈



协议分层 – 网络通信实例

❖ 发送端：层层封装；接收端：层层解封装

❖ 不同层对应不同协议数据单元PDU（Protocol Data Unit）（含头部）



❖ 两种不同类型的服务：面向连接和无连接

- **面向连接**：按照电话系统模型建立的（一个常见的例子）

- [○ 拨姑姑家的电话号码
- [○ 她家的电话铃响了
- [○ 她拿起电话
- [○ 你听到响铃停止
- [○ 你邀请她来喝茶
- [○ 她听到了你的邀请
- [○ 她说她很高兴来
- [○ 你听到她接受邀请
- [○ 你挂断电话
- [○ 她听到了，也挂断电话

面向连接的服务

- 每个“请求”或“响应”后，都在对方产生一个“指示”或“确认”动作
- 通过建连实现**资源预留**，**可靠性高**
- 例如：**TCP**
- 场景：文件传输、网页浏览、电子邮件

❖ 两种不同类型的服务：面向连接和无连接

■ 无连接：按照电话系统模型建立的（一个常见的例子）

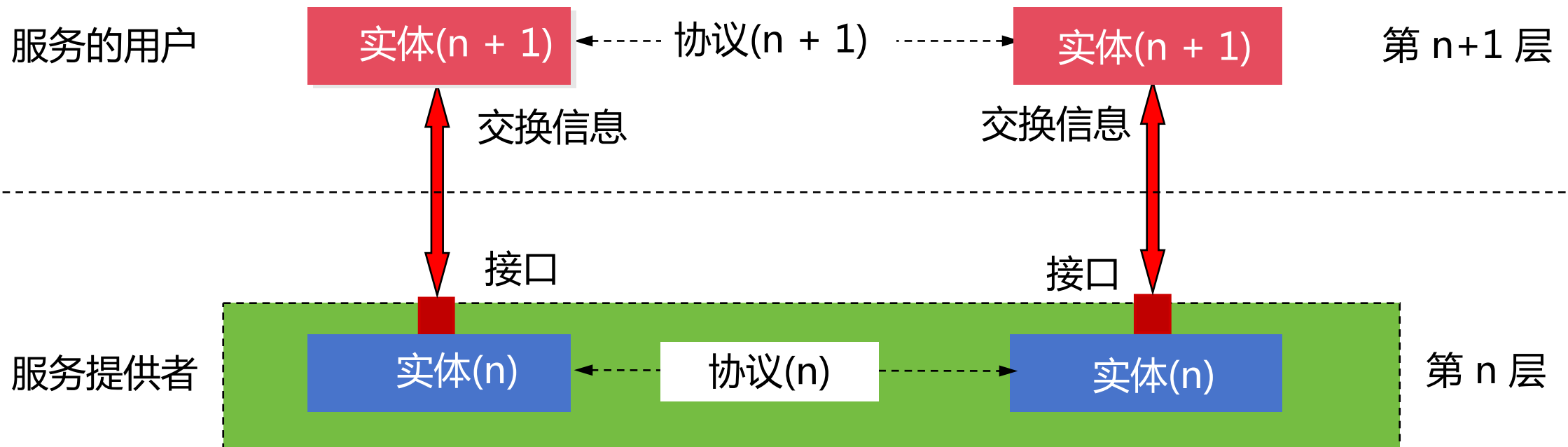
- 有快递要发给朋友
- 快递员上门取件
- 快递进入区域集散中心
- 区域集散中心通过运输系统发到目的地
- 区域集散中心分发给目的地快递员
- 快递员按照地址派送

无连接的服务

- 邮件携带了完整的目标地址，传输过程不需要应答
- 效率较高（无需建连）；可靠性较低（数据包可能丢失、乱序等）
- 例如：UDP
- 场景：实时音视频，在线游戏

服务与协议的关系

- ❖ 协议是“水平”的，服务是“垂直”的
- ❖ 实体使用协议来实现其定义的服务
 - 协议是控制两个对等实体进行通信的规则集合
- ❖ 上层实体通过接口使用下层实体的服务



4.2 互联网体系结构设计目标和原则

面对以下设计需求，如何设计互联网？

- ❖ 不是为任何特殊应用而设计的网络
 - 只传递数据包，像明信片一样
- ❖ 可以运行在任何通信技术之上
- ❖ 允许在网络边缘创新
 - 不为增加任何新的应用和服务而改变网络
- ❖ 必须足够可扩展
 - 1-10 million since 1983
- ❖ 为新协议、新技术和新应用开放



文顿·瑟夫博士是TCP/IP协议和互联网架构的联合设计者之一

思考：拆分网络功能

❖网络数据的基本传输

- 什么是最佳的交换技术？

❖不同媒介的最简传输

- 如何适应不同的传输媒介？

❖从1比特到多比特传输

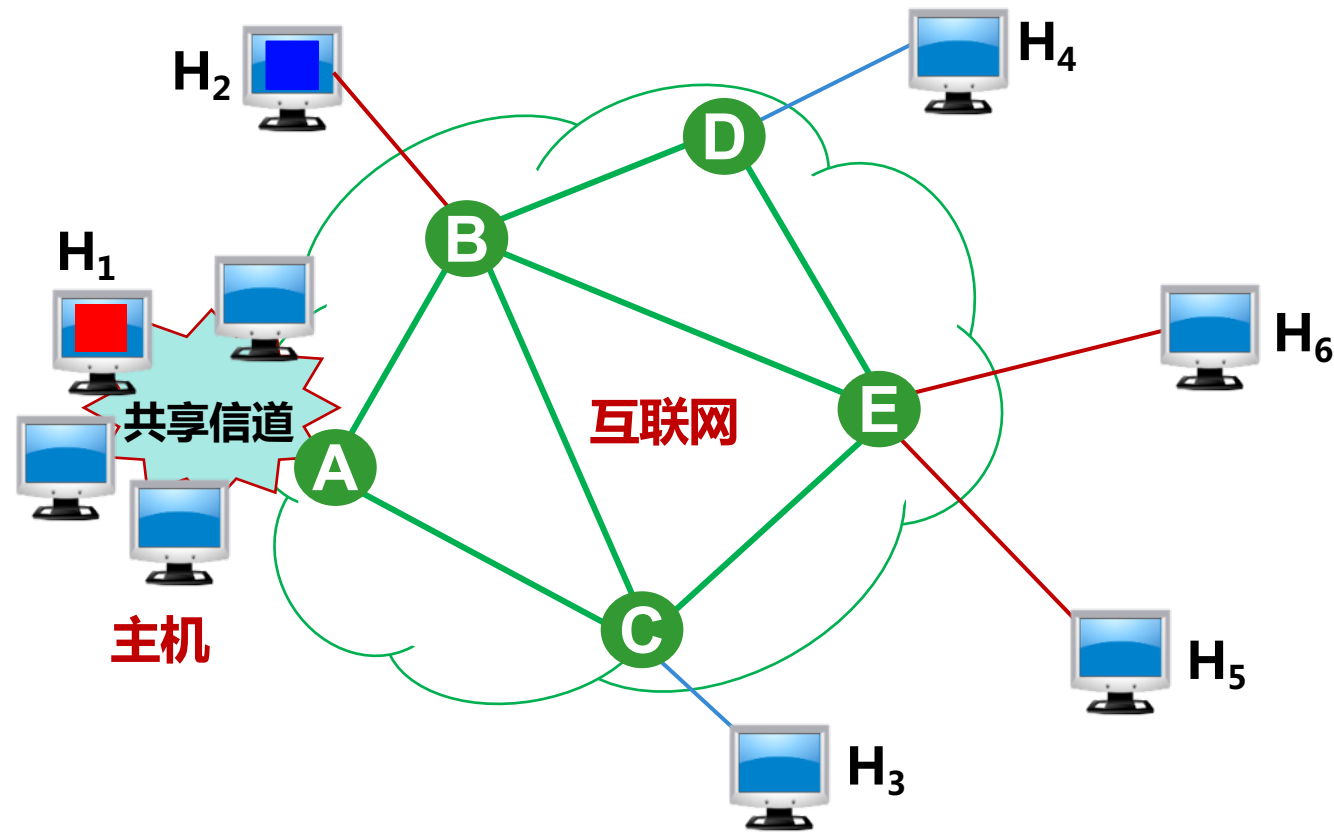
- 如何判定正确性？ -> 成帧
- 共享介质下谁发给谁？ -> 设备标识

❖如何寻找目标设备

- 设备编址：静态 or 动态分配？
- 路由：每一跳应该发送给谁？

❖更复杂的网络功能

- 可靠传输、拥塞控制等功能在哪实现？



思考：如何实现可靠数据传输？

❖ 逐跳校验？

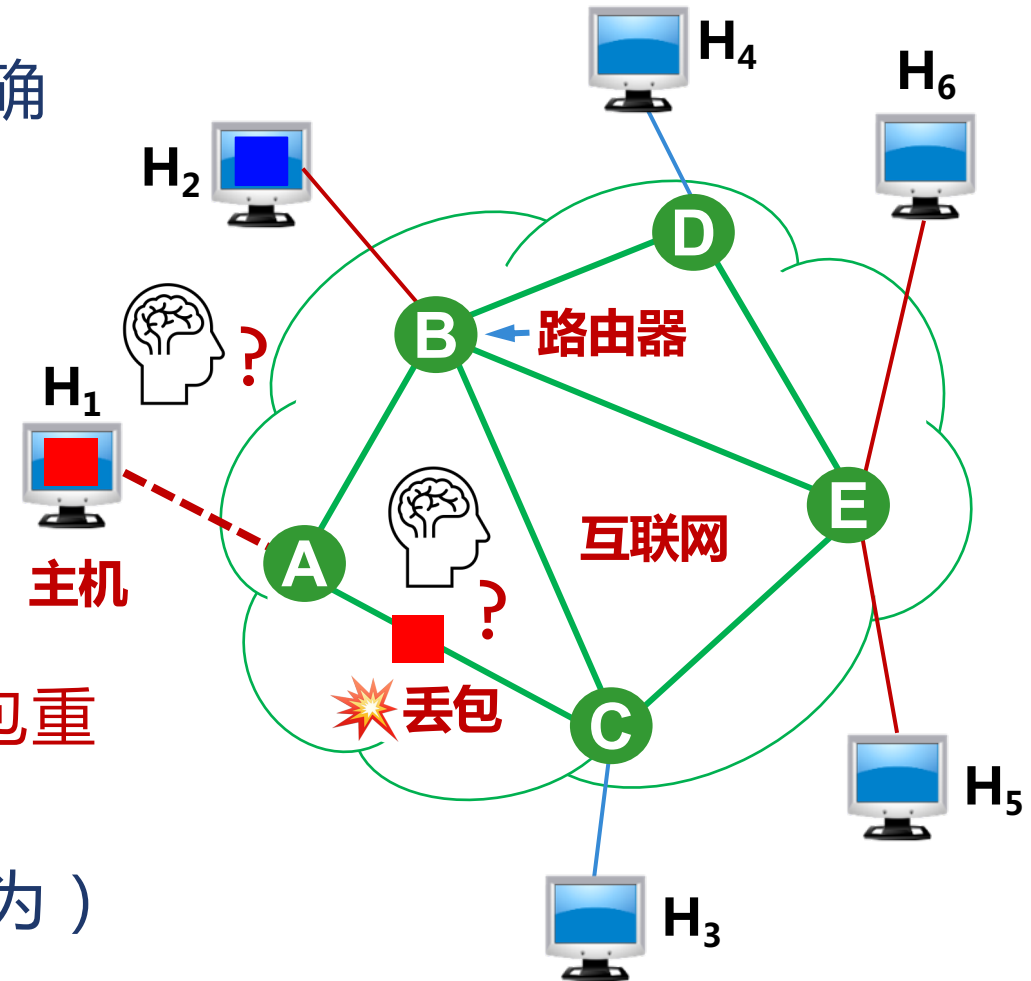
- 使用检错码/纠错码确保每一跳传输数据正确
- 开销？能否替代端到端检查？
- 网络设备复杂度提升？

❖ 端到端检查？

- 检查什么？丢包、乱序、比特差错……

❖ 设计取舍

- TCP：实现端到端差错检测、重排序与丢包重传……
- 简化中间设备（路由器/交换机仅需尽力而为）
- 避免冗余检测（逐跳可靠 ≠ 端到端可靠）



思考：如何实现网络效率与公平？

❖效率与公平

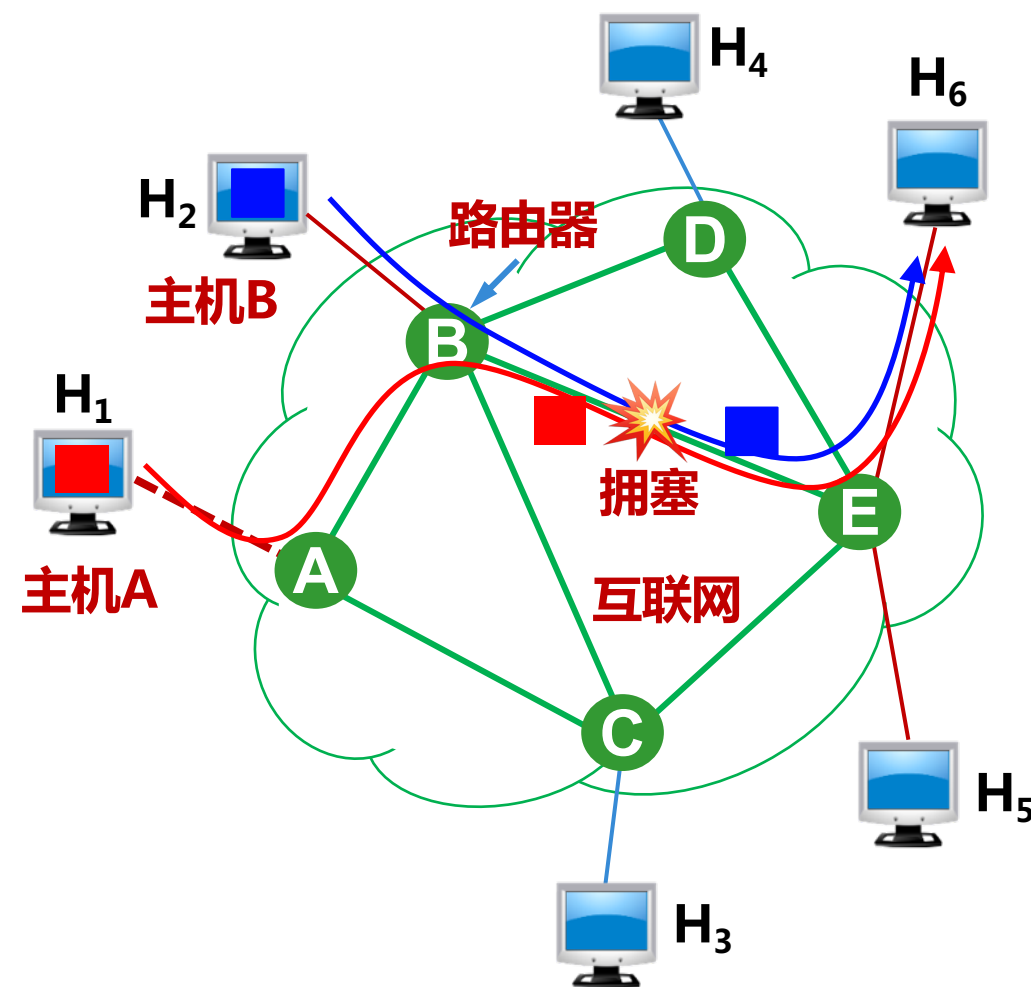
- 网络效率最大化：如何充分利用网络带宽？
- 资源公平分配：各数据流获得均衡带宽？

❖网络为什么会拥塞？

- 带宽如高速公路，车流突增导致集体降速
- 核心矛盾：资源有限 vs 需求无限

❖互联网体系结构如何实现效率与公平

- 端到端的TCP，在端系统上解决上述问题
- 保证了网络的可扩展性



典型应用场景分析

❖ 文件传输：

- 核心需求：数据完整 -> 可靠传输
- 容错：必须实现零丢包、零差错

❖ 在线游戏/视频会议

- 核心需求：实时交互 -> 低延迟传输
- 容错：允许少量数据丢失

典型协议举例

❖ TCP

- 可靠性：确认+重传+顺序保障
- 拥塞控制：动态调整发送速率

❖ UDP

- 可靠性：尽力交付
- 拥塞控制：无内置机制
- 优点：低时延、低开销

网络协议的设计需要适应
不同应用的差异化传输需求

❖ 网络核心集中化功能的隐患

- 复杂性高、单点性能瓶颈、单点故障风险、灵活性缺失、安全脆弱性.....

❖ 端到端原则 (End-to-End) 的核心思想

- **功能最小化**：网络核心仅提供通用传输（**IP尽力而为**），复杂功能（可靠传输、加密等）由终端实现
- **去中心化**：避免中间节点参与业务逻辑，保持网络透明和轻量化

❖ 经典案例

-  TCP/IP
 - IP无连接不可靠，承载了TCP/UDP等上层协议
 - TCP重传/拥塞控制由终端实现可靠传输
-  HTTPS：端到端加密（TLS），中间节点不解密数据

❖ 分层次的体系结构是网络设计中的关键抽象之一

- 分几层合适？
 - 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
- 如何定义每一层功能？
- 如何定义层与层之间的接口？

❖ 三个重要参考模型

- ❖ 法律上的(de jure)国际标准: OSI参考模型（七层）
- ❖ 事实上的(de facto) 国际标准：TCP/IP参考模型（四层）
- ❖ 教学用的标准：五层模型

4.3 OSI参考模型

❖ 开放系统互连基本参考模型OSI/RM

- Open Systems Interconnection Reference Model
- Day, Zimmermann, 1983

❖ 物理层 (Physical Layer)

- 定义如何在信道上传输0、1 : Bits on the wire
- 机械特性：网线接口形状、尺寸、引脚数目和排列等
- 电气特性：电压范围等
- 功能特性：电平意义，电子信号如何表示0和1
- 过程特性：事件时序
- 介质：各种线缆，无线频谱等
-

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

4.3 OSI参考模型

❖ 数据链路层 (Data Link Layer)

- 实现相邻节点间的数据传输
- 封装成帧：从物理层的比特流中提取完整的帧
- 透明传输：传输内容对帧定界透明
- 差错检验：检测和纠正比特传输错误
- 共享信道访问控制：同一信道同时传输信号，如同一间教室内，多人同时发言，需要纪律来控制
- 物理地址 (MAC address)：48位，理论上唯一网络标识，烧录在网卡，不便更改
-

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

4.3 OSI参考模型

❖ 网络层 (Network Layer)

- 负责为分组交换网上的不同主机提供通信服务
 - 主机到主机 (host to host)
 - 将数据包跨越网络从源设备发送到目的设备
- 路由 (Routing) : 选取从源端到目的端转发路径
 - 路由协议 : 路由器之间交互路由信息的协议规范
- 服务质量 (QoS) 控制 : 拥塞控制 , 负载均衡等
- 异构网络互联 : 在异构编址和异构网络中路由寻址和转发
-

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

4.3 OSI参考模型

❖ 传输层（Transport Layer）

- 将数据从源端口发送到目的端口（**进程到进程**）
- 网络层定位到一台主机（host），传输层的作用域具体到主机上的某一个进程
- 网络层的控制主要面向运营商，传输层为**终端用户**提供端到端的数据传输控制
- 两类模式：可靠的传输模式，或不可靠传输模式
 - **可靠传输TCP**：可靠的端到端数据传输，适合于对通信质量有要求的应用场景，如文件传输等
 - **不可靠传输UDP**：更快捷、更轻量的端到端数据传输，适合于对通信质量要求不高，对通信响应速度要求高的应用场景，如语音对话、视频会议等

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

4.3 OSI参考模型

❖ 会话层 (Session Layer)

- 利用传输层提供的服务，在应用程序之间建立和维持会话，并能使会话获得同步

❖ 表示层 (Presentation Layer)

- 关注所传递信息的语义和语法，管理数据的表示方法、传输数据的数据结构

❖ 应用层 (Application Layer)

- 通过应用层协议，提供应用程序便捷的网络服务调用

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

4.4 TCP/IP参考模型

❖TCP/IP参考模型：ARPANET所采用

- 以其中最主要的两个协议TCP/IP命名
- Vint Cerf和Bob Kahn于1974年提出

ARPANET
最终采用TCP和IP
为主要协议

❖网络接口层（host-to-network Layer）

- 描述了链路必须具备的功能，实现各种网络的接入

❖互联网层（Internet Layer）

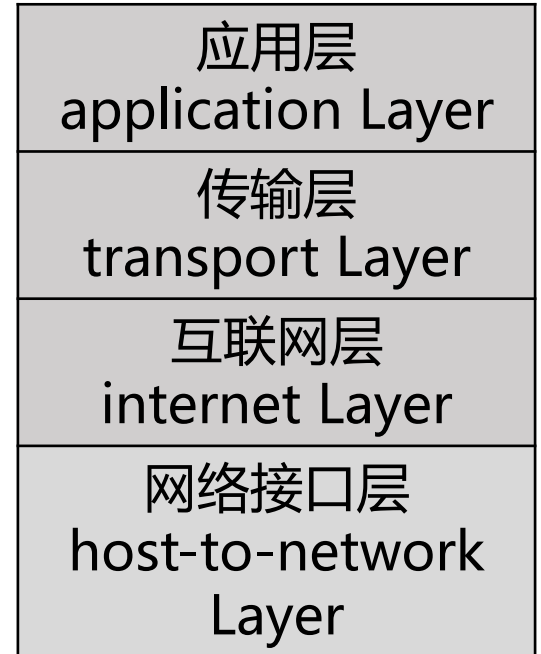
- 允许主机将数据包注入网络，让这些数据包独立的传输至目的地，并定义了数据包格式和协议（IPv4协议和IPv6协议）

❖传输层（Transport Layer）

- 允许源主机与目标主机上的对等实体，进行端到端的数据传输：TCP，UDP

❖应用层（Application Layer）

- 传输层之上的所有高层协议：DNS、HTTP、FTP、SMTP...



- 先有TCP/IP协议栈，然后有TCP/IP参考模型
- 参考模型只是用来描述协议栈的

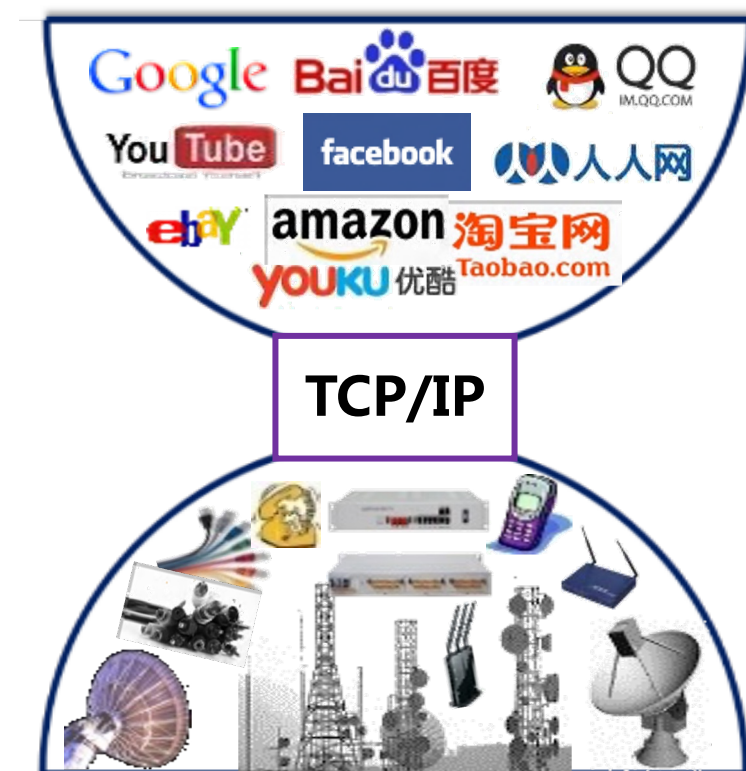
4.4 TCP/IP参考模型

❖ TCP/IP参考模型

- 摒弃电话系统中“笨终端&聪明网络”的设计思路
 - **端对端原则**：采用**聪明终端&简单网络**，由**端系统**负责丢失恢复等，简单的网络大大提升了可扩展性
- 实现了建立在简单的、不可靠部件上的可靠系统

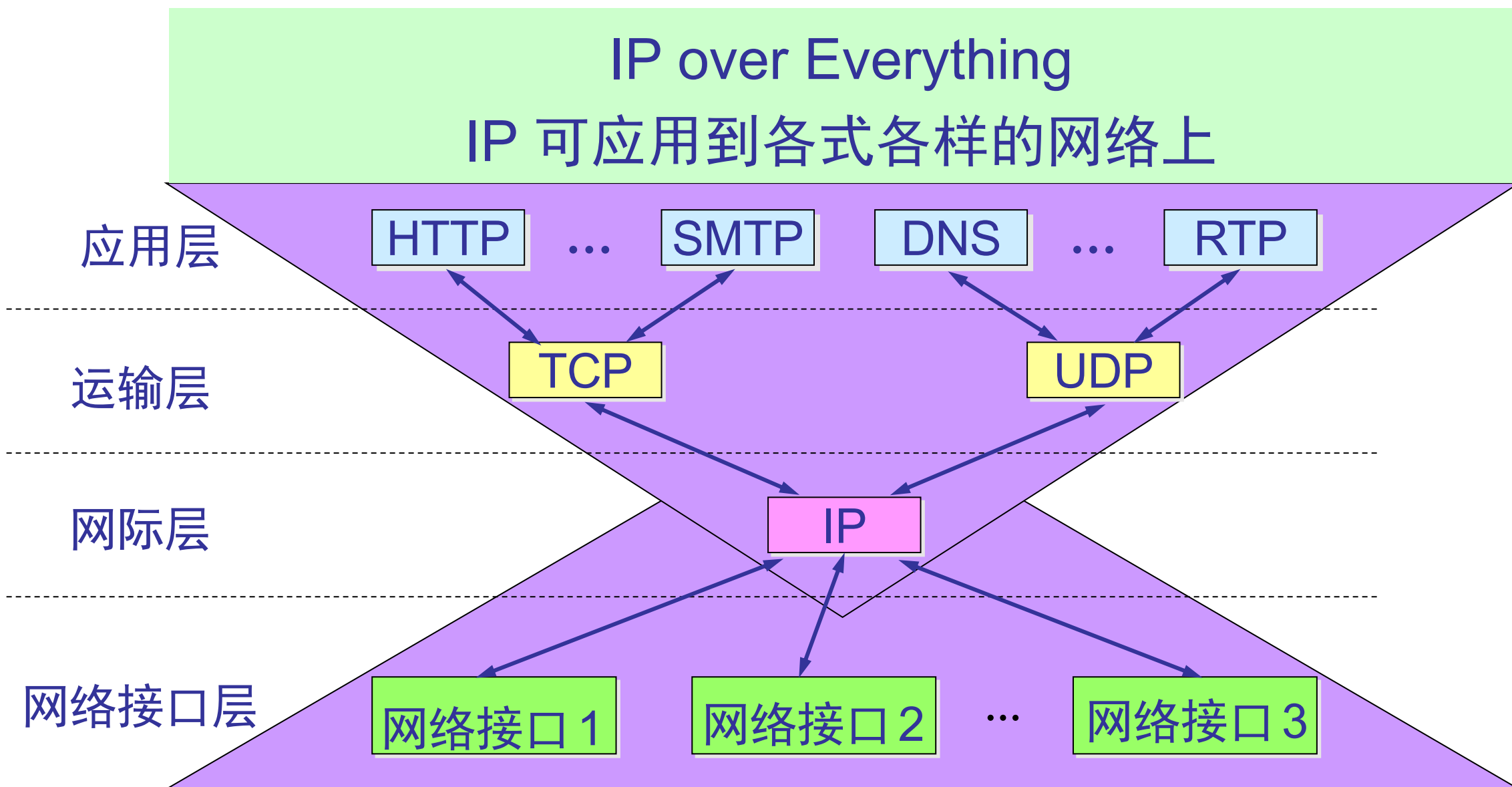
❖ IP分组交换的特点

- 可在各种底层物理网络上运行（**IP over everything**）
- 可支持各类上层应用（**Everything over IP**）
- 每个IP分组携带各自的目的地址，网络核心功能简单（通过路由表转发分组），适应爆炸性增长



TCP/IP的沙漏模型

沙漏计时器形状的TCP/IP协议族



OSI模型与TCP/IP模型比较

❖ 7层模型与4层模型

- TCP/IP模型的网络接口层定义主机与传输线路之间的接口，描述了链路为无连接的互联网层必须提供的基本功能
- TCP/IP模型的互联网层、传输层与OSI模型的网络层、传输层大致对应
- TCP/IP模型的应用层包含OSI模型的表示层与会话层

❖ 基本设计思想：通用性与实用性

- OSI：先有模型后设计协议，不局限于特定协议，明确了服务、协议、接口等概念，更具通用性
- TCP/IP模型：仅仅是对已有协议的描述

❖ 无连接与面向连接

- OSI模型**网络层**能够支持无连接和面向连接通信
- TCP/IP模型的**网络层**仅支持无连接通信（IP）

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

OSI 7层模型

应用层 Application Layer
传输层 Transport Layer
互联网层 Internet Layer
网络接口层 Host-to-network Layer

TCP/IP 4层模型

OSI失败原因：糟糕的时机，糟糕的设计，糟糕的实现，糟糕的政策

OSI模型不足

- ❖ **从未真正被实现**
 - TCP/IP为事实标准，OSI缺少厂家支持
- ❖ **技术实现糟糕，过于复杂**
 - OSI分层欠缺技术考虑：会话层、表示层很少内容；数据链路层、网络层内容繁杂
 - 模型和协议过于复杂，难以实现
 - 分层间功能重复：差错控制、流量控制等在不同层反复出现
- ❖ **非技术因素**
 - TCP/IP实现为UNIX一部分，免费
 - OSI被认为是政府和机构的强加标准

TCP/IP模型不足

- ❖ **核心概念未能体现**
 - 未明确区分服务、接口和协议等概念
- ❖ **不具备通用**
 - 不适合描述TCP/IP外的任何其它协议
- ❖ **混用接口与分层设计**
 - 链路层和物理层一起被定义为网络接口层，而非真正意思上的分层
- ❖ **模型欠缺完整性**
 - 未包含物理层和链路层
 - 物理层与数据链路层是至关重要的部分

4.5 本课程内容的分层组织

应用层 Application Layer
表示层 Presentation Layer
会话层 Session Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

OSI 的体系结构

应用层 Application Layer
传输层 Transport Layer
互联网层 Internet Layer
网络接口层 Host-to-network Layer

TCP/IP 的体系结构



应用层 Application Layer
传输层 Transport Layer
互联网层 Internet Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

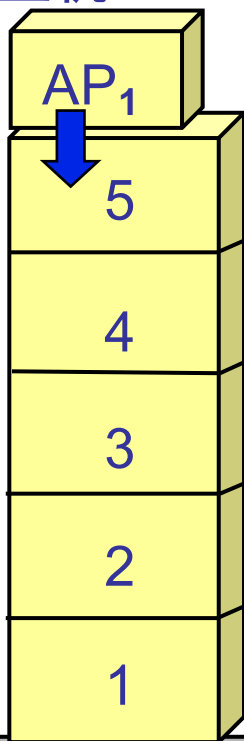
五层协议的体系结构

综合 OSI 和 TCP/IP 优点，采用五层协议的体系结构进行教学

- 突出核心概念
- 区分接口与分层
- 体现完整性
- 体现通用性
- 简化分层
- 易于教学

主机1向主机2发送数据

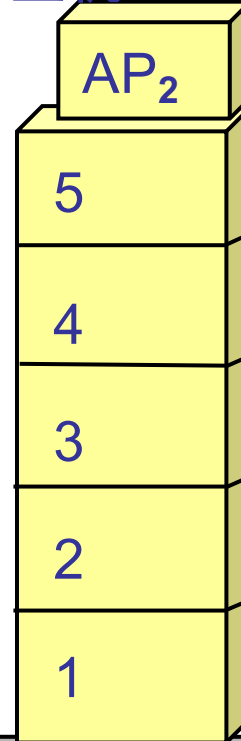
主机 1



应用进程数据先传送到应用层

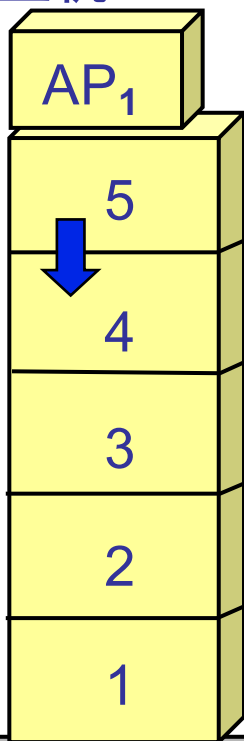
加上应用层首部，成为应用层 PDU

主机 2



主机1向主机2发送数据

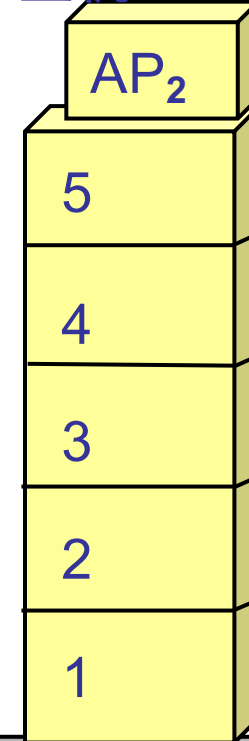
主机 1



应用层 PDU 再传送到运输层

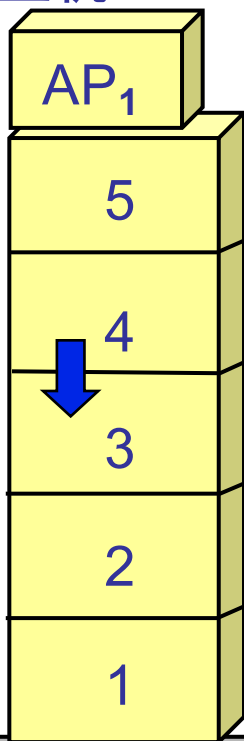
加上运输层首部，成为运输层报文

主机 2



主机1向主机2发送数据

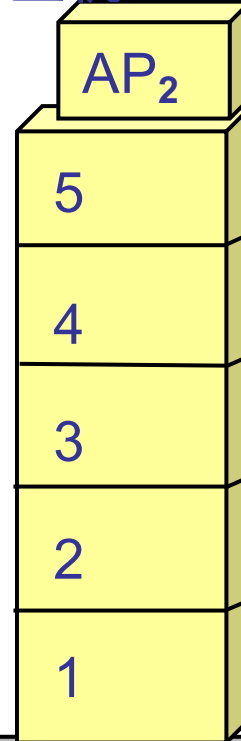
主机 1



运输层报文再传送到网络层

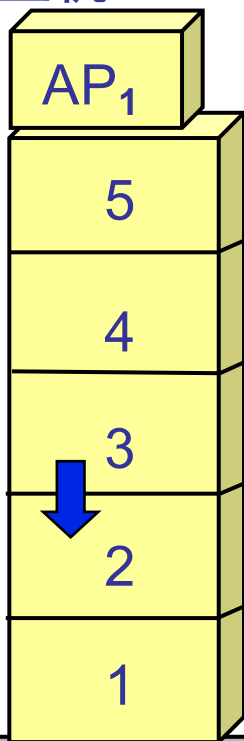
加上网络层首部，成为 IP 数据报（或分组）

主机 2



主机1向主机2发送数据

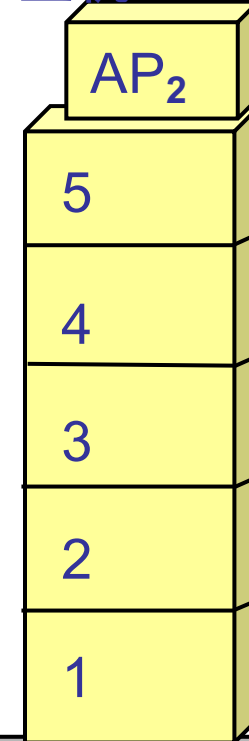
主机 1



IP 数据报再传送到数据链路层

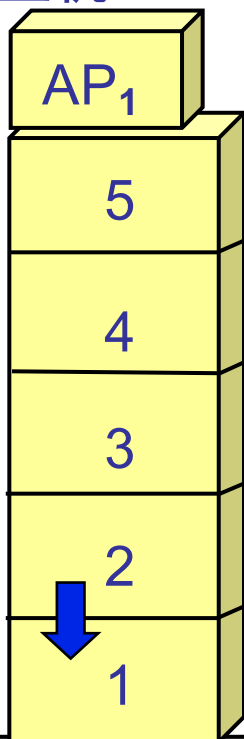
加上链路层首部和尾部，成为数据链路层帧

主机 2



主机1向主机2发送数据

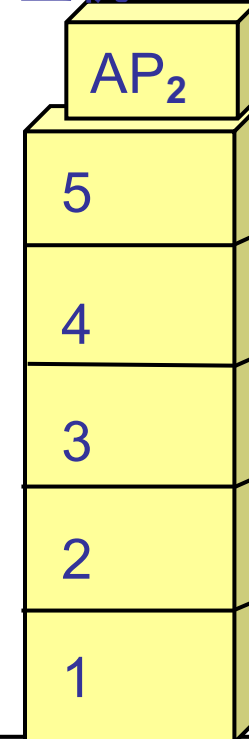
主机 1



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

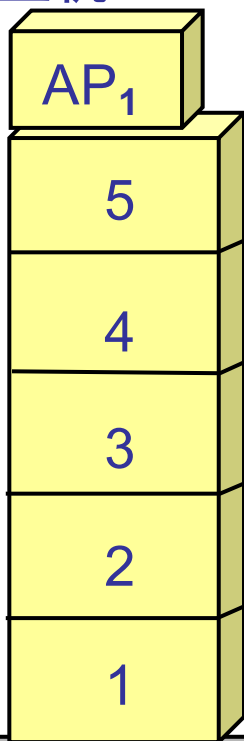


主机1向主机2发送数据



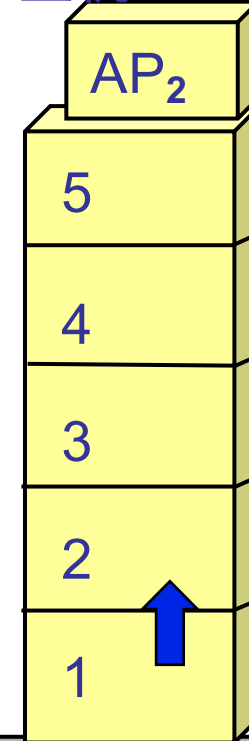
主机1向主机2发送数据

主机 1



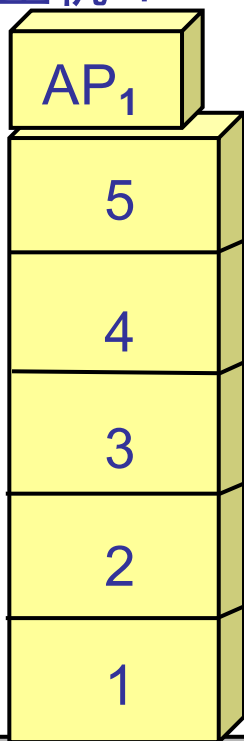
物理层接收到比特流，上交给数据链路层

主机 2

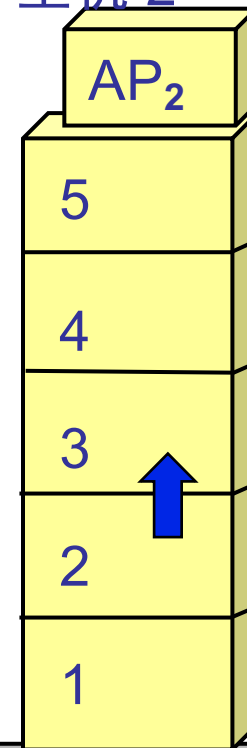


主机1向主机2发送数据

主机 1



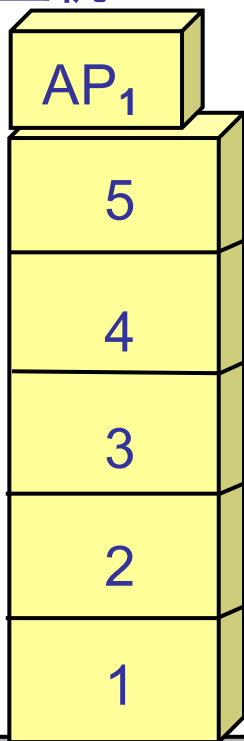
主机 2



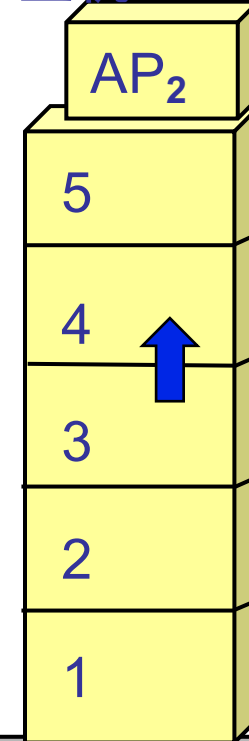
数据链路层剥去帧首部和帧尾部
取出数据部分，上交给网络层

主机1向主机2发送数据

主机 1



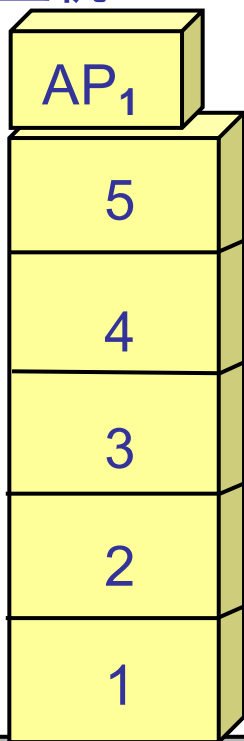
主机 2



网络层剥去首部，取出数据部分
上交给运输层

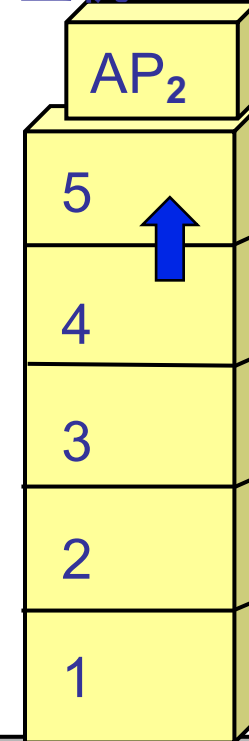
主机1向主机2发送数据

主机 1



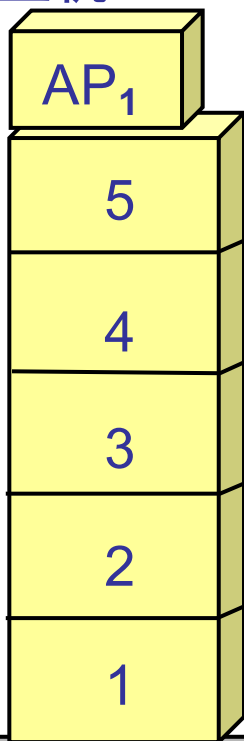
运输层剥去首部，取出数据部分
上交给应用层

主机 2



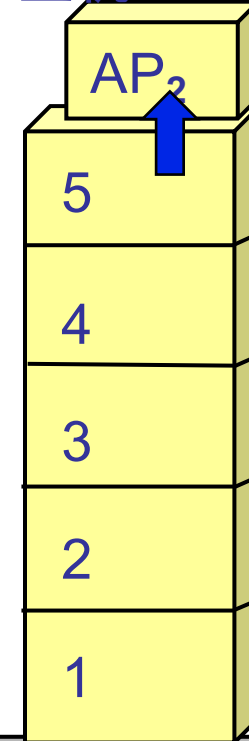
主机1向主机2发送数据

主机 1



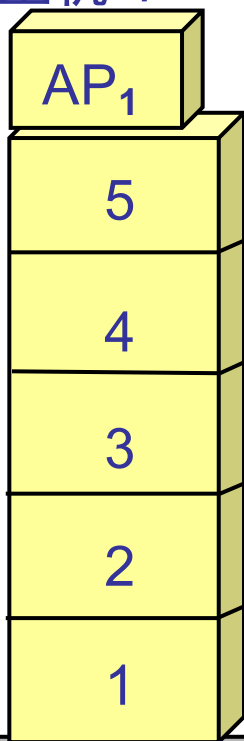
应用层剥去首部，取出应用程序数据
上交给应用进程

主机 2



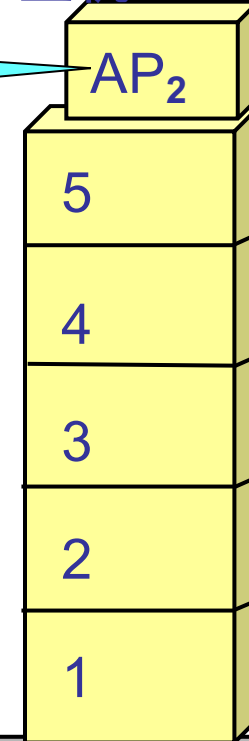
主机1向主机2发送数据

主机 1



我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

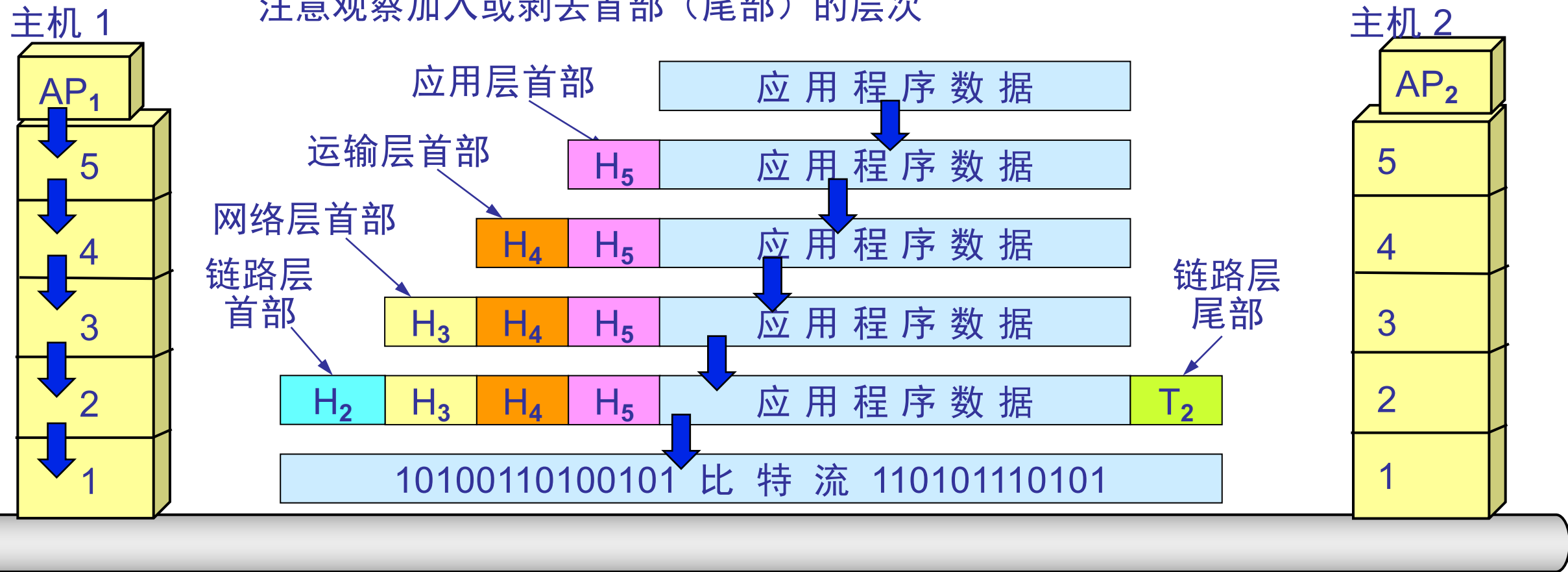
主机 2



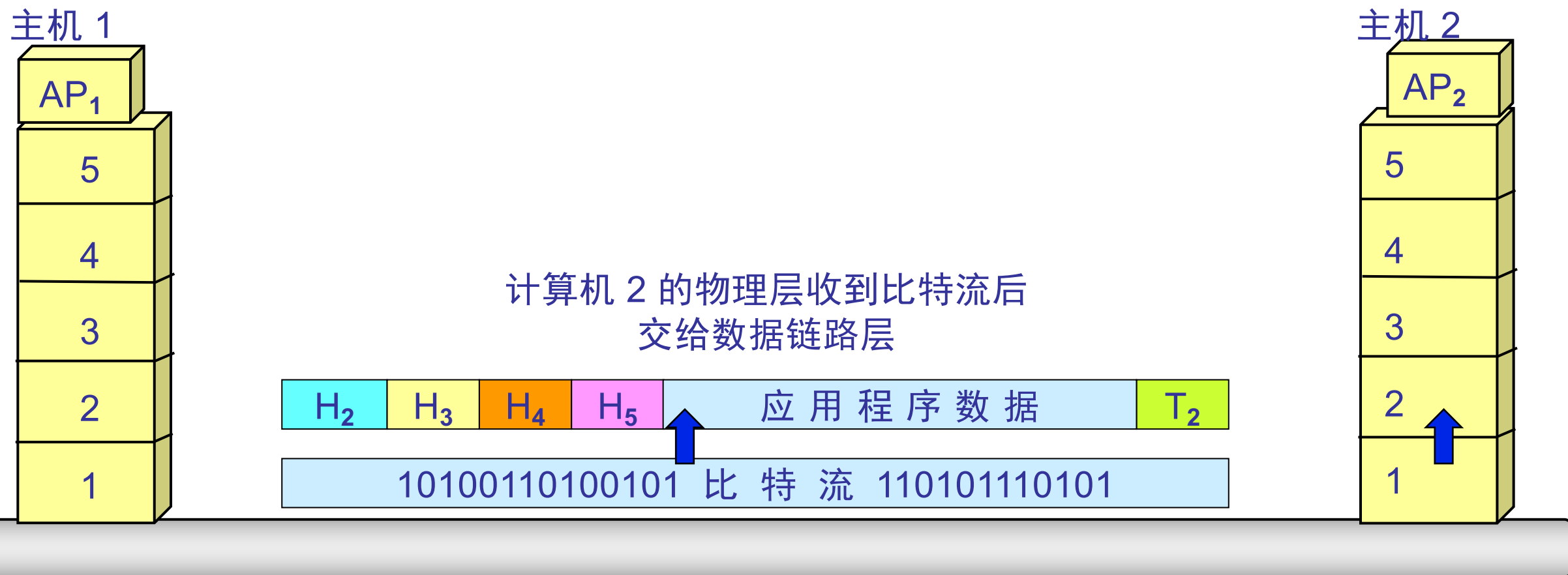
五层模型应用举例一

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

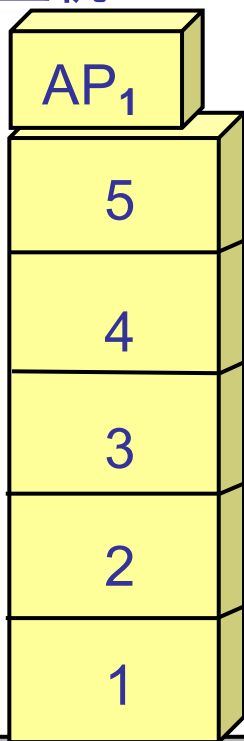


主机1向主机2发送数据

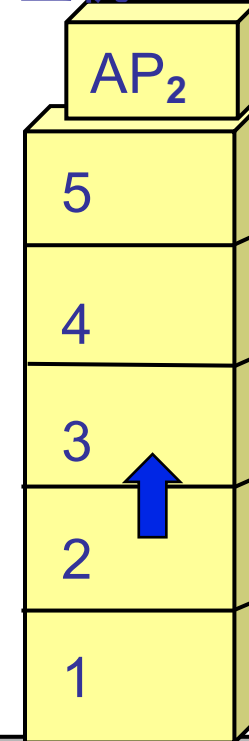


主机1向主机2发送数据

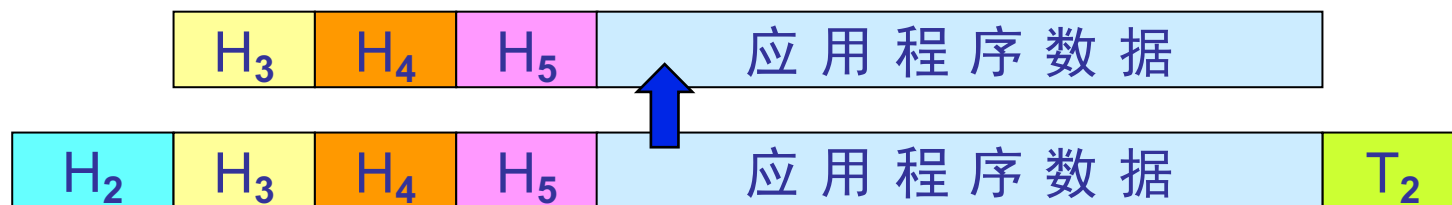
主机 1



主机 2

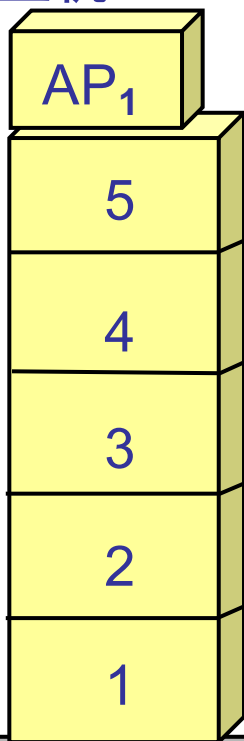


数据链路层剥去帧首部和帧尾部后
把帧的数据部分交给网络层

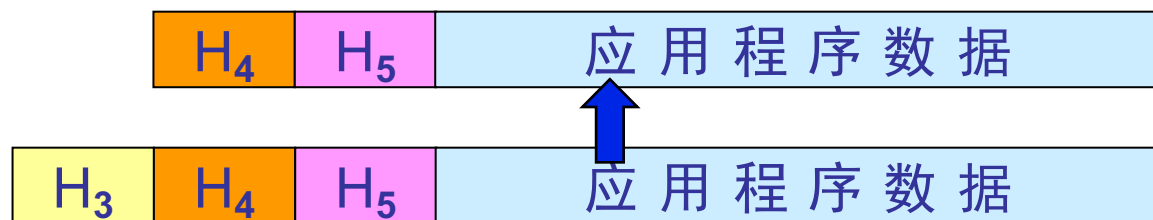


主机1向主机2发送数据

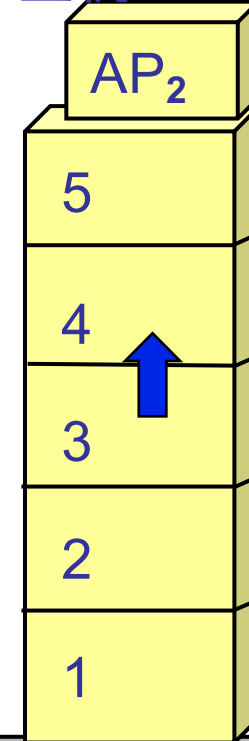
主机 1



网络层剥去分组首部后
把分组的数据部分交给运输层

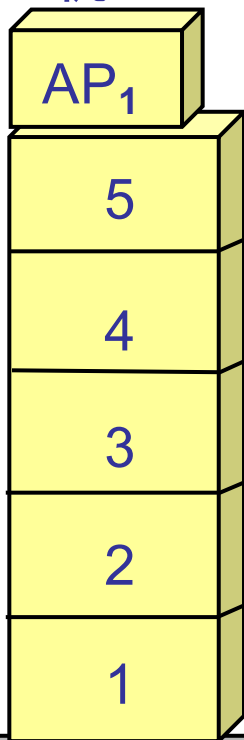


主机 2

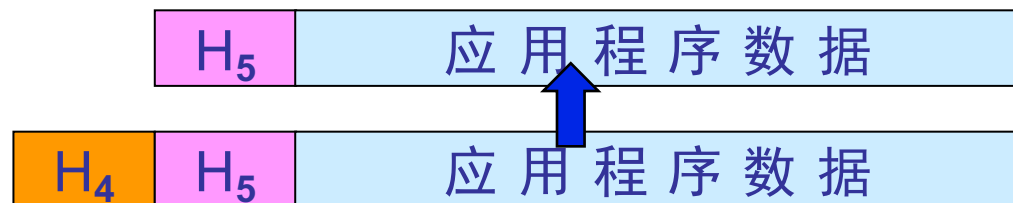


主机1向主机2发送数据

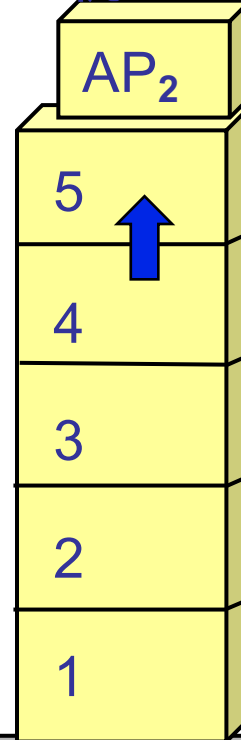
主机 1



运输层剥去报文首部后
把报文的数据部分交给应用层

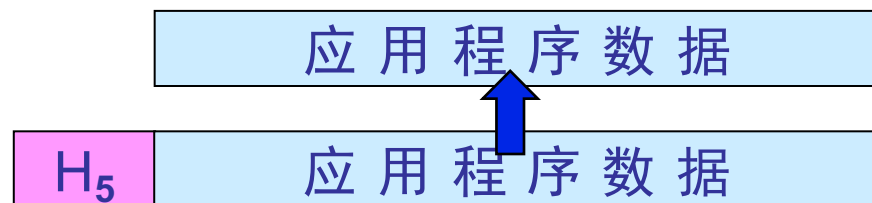
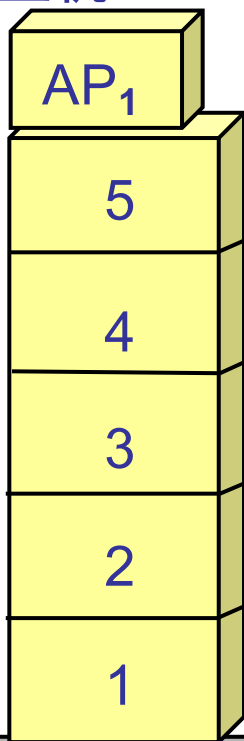


主机 2



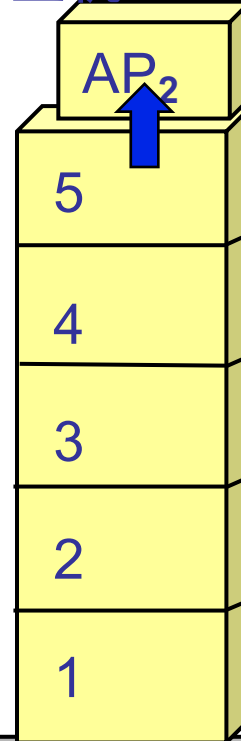
主机1向主机2发送数据

主机 1



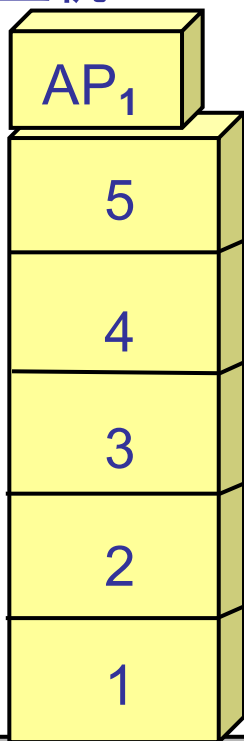
应用层剥去应用层 PDU 首部后
把应用程序数据交给应用进程

主机 2



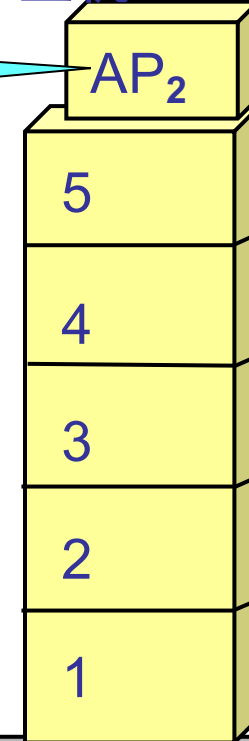
主机1向主机2发送数据

主机 1

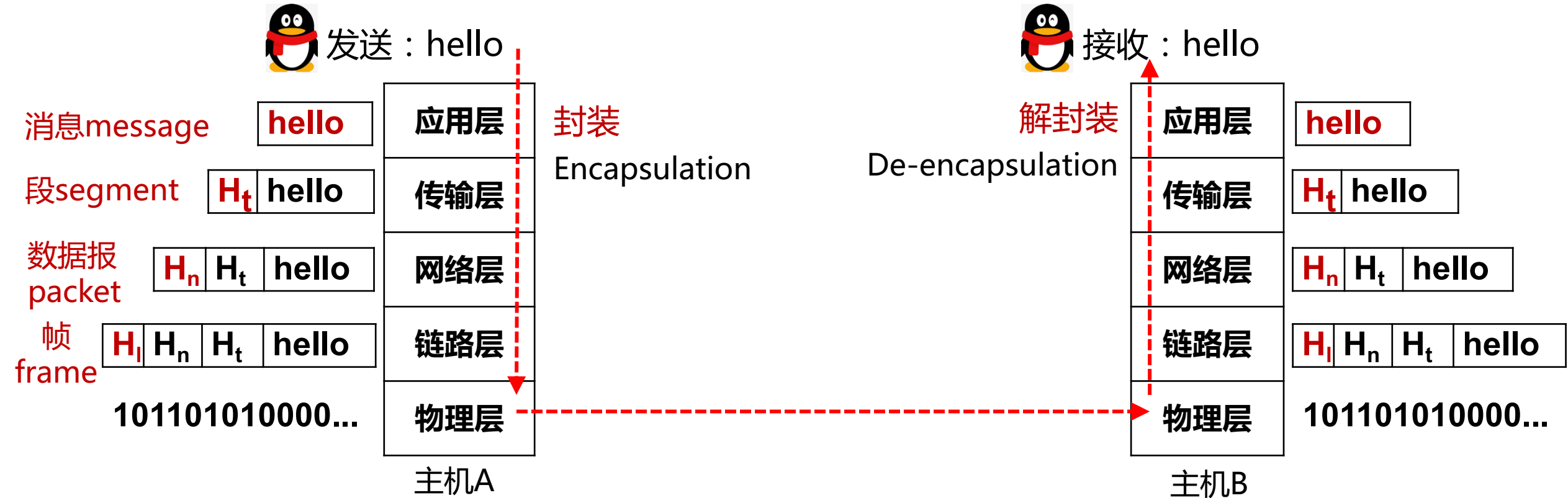


我收到了 AP_1 发来的
应用程序数据！

主机 2

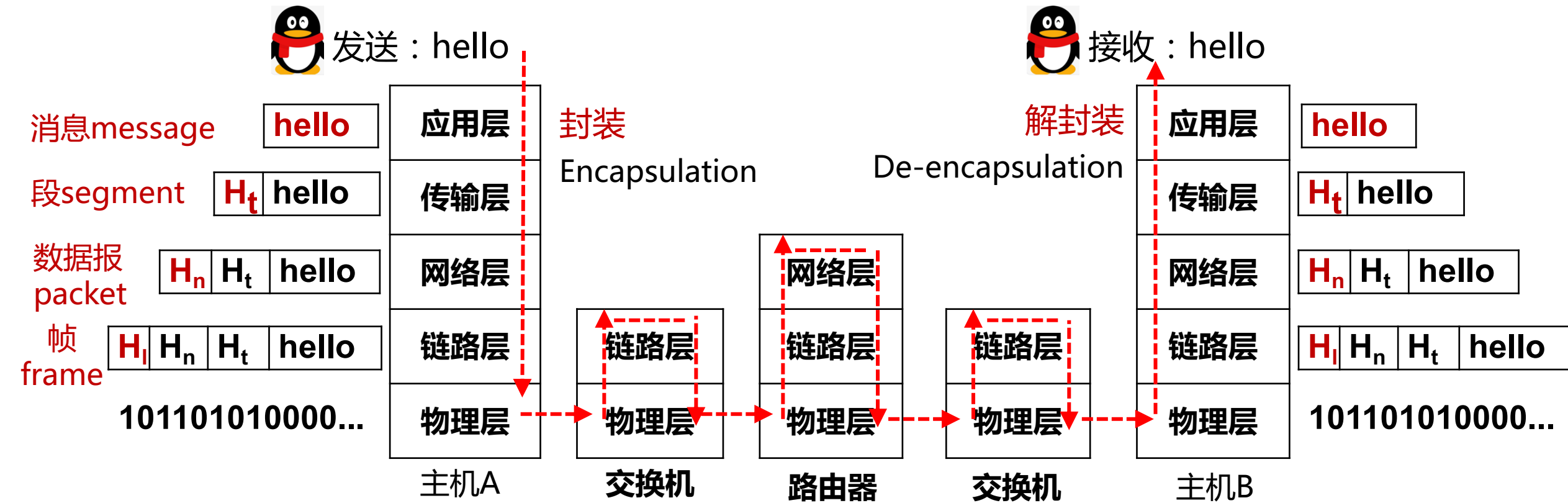


五层模型应用举例二



- 端到端通信实例：主机A上的QQ，发送消息；主机B上的QQ，接收消息
- 发送端层层封装，接收端层层解封装
- 不同层对应的协议数据单元（PDU Protocol Data Unit）名称不同

五层模型应用举例二



- 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
- 交换机最高只到链路层

一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化

为什么需要标准化？

❖终端厂商

- 华为、小米、oppo、苹果、联想、浪潮

❖设备厂商

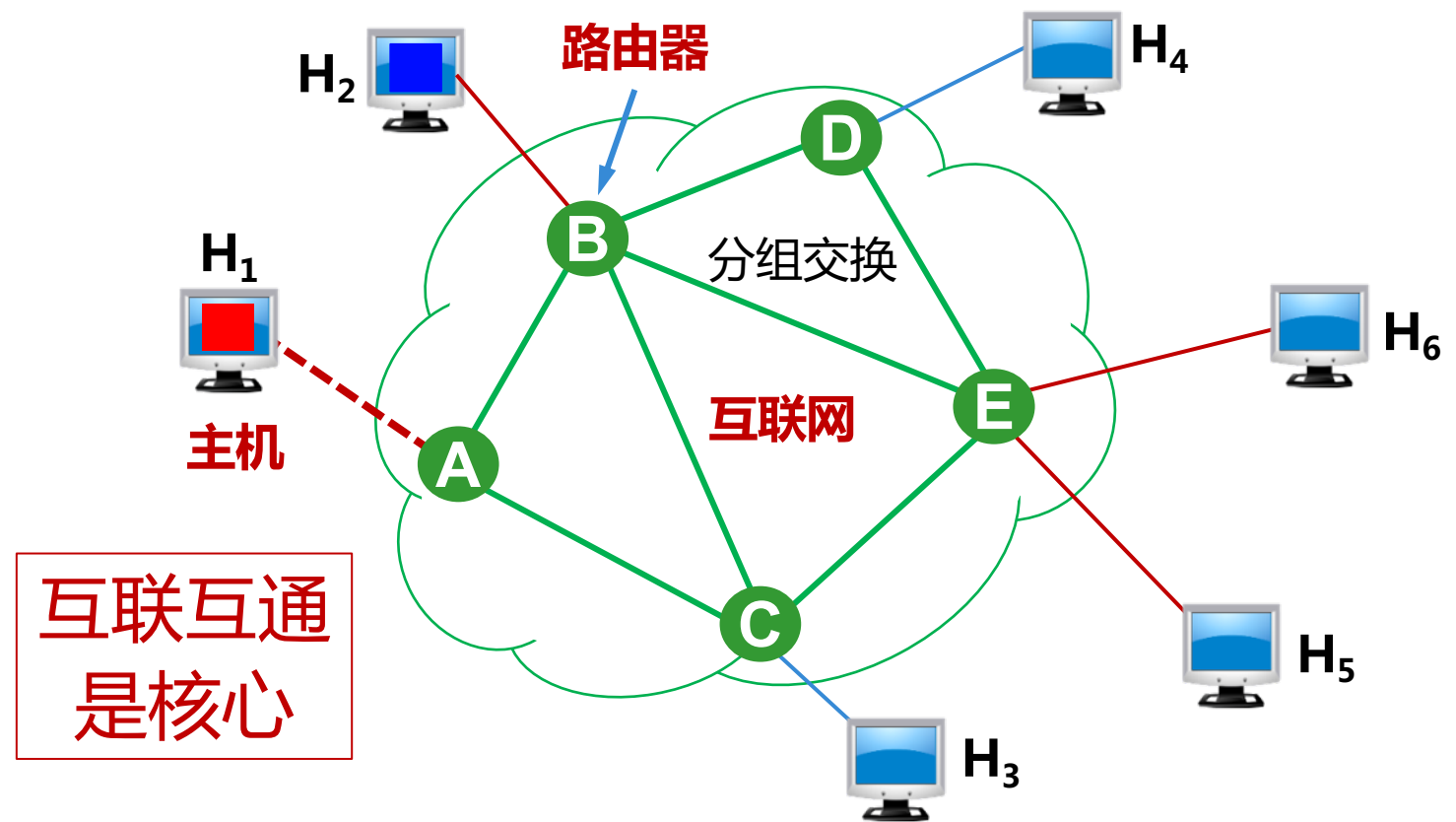
- 华为、中兴、思科、Juniper、TP-Link

❖网络运营商

- 3大T
- 集采的诉求？

❖互联网公司

- 多种浏览器、多种服务



❖ 国际标准化组织 (ISO)

- ISO (International Organization for Standardization)是一个国际化组织，它包括了许多国家的标准团体
- 国际标准ISO 7498：OSI 七层参考模型



❖ 国际电信联盟 (ITU)

- ITU (International Telecommunications Union)前身是国际电报电话咨询委员会 (CCITT)
- ITU是一家联合国机构，共分为三个部门：ITU-R负责无线电通信，ITU-D是发展部门，ITU-T负责电信
- ITU制定了许多网络和电话通信方面的标准
- ITU常采用政府代表团形式参会，工信部组织我国代表团参加
- 国际电工委员会 (IEC)



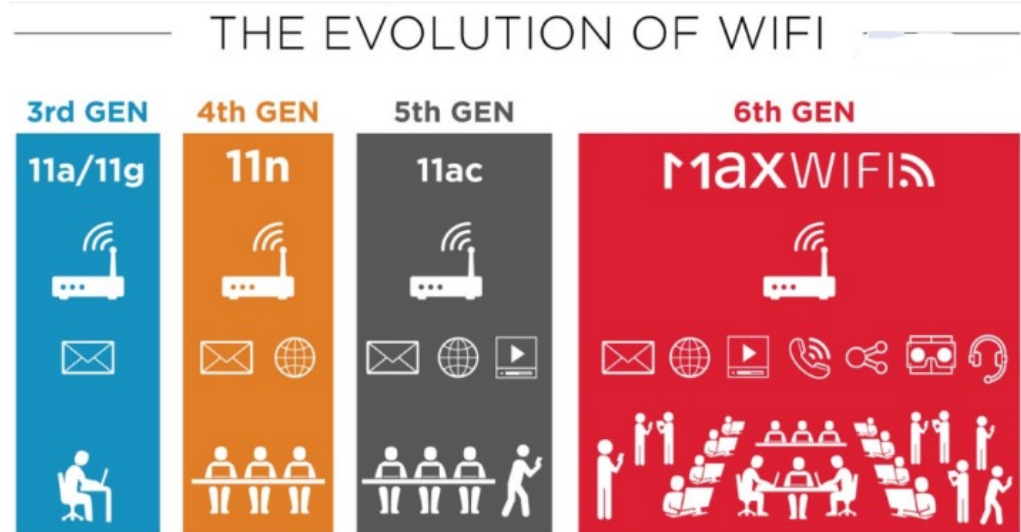
❖ 国际电气和电子工程师协会 (IEEE)

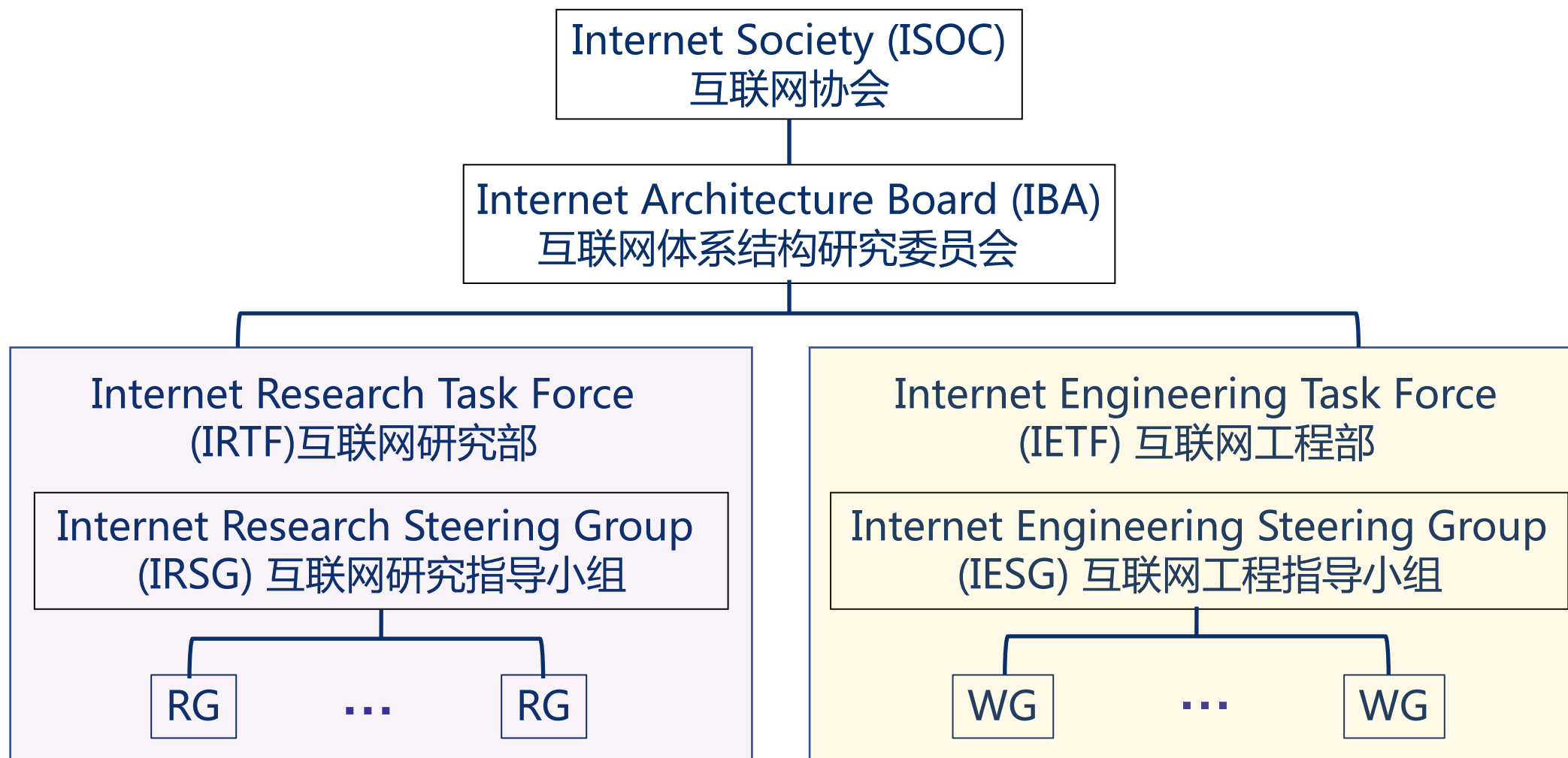
- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 是世界上最大的专业技术团体
- IEEE在通信领域最著名的研究成果之一是802局域网标准，如IEEE 802.3、IEEE802.11



❖ WIFI联盟

- WiFi联盟 (WiFi Alliance，简称WFA)，是一个商业联盟，拥有 WiFi的商标
- 成立于1999年，主要推行WiFi产品的**兼容认证**，发展IEEE802.11标准的无线局域网技术





互联网的标准组织结构

➤ IETF: 互联网工程任务组

- IETF 是国际民间机构
- IETF是制定互联网标准的核心组织，如TCP、IP、HTTP等均由IETF制定
- IETF分为互联网、路由、传输、安全、应用、运行管理等领域（Area），具体由其超过100个工作组WG（WorkingGroup）承担

RFC 793 - Transmission Control Protocol (TCP)

RFC 791 - Internet Protocol (IP)



➤ IRTF: Internet研究任务组

- IRTF 下设多个专门任务组，针对特定协议、应用、体系结构等进行研究
- IRTF 一般只出研究报告，但不制定协议标准

❖如何进入/参加 “互联网的殿堂” ——**IETF**

- Internet标准以**RFC** (Request For Comments , 请求评注) 文档的形式公开 , 任何人都可免费获得这些RFC文档 , 例如 RFC2068为HTTP协议
- IETF的各种规章制度 (乃至RFC产生规则) , 全部以RFC发布
- 每年3次会 , 但所有决策须在邮件列表确认 , 因此可仅远程参与
- IETF由愿为互联网发展做出贡献的专家自发参与和管理(无薪)
- 没有会员制 , 每个人都可以是IETFer , 在邮件列表参与即可

不自称为标准的
事实标准**RFC**

IETF名言 (David Clark)

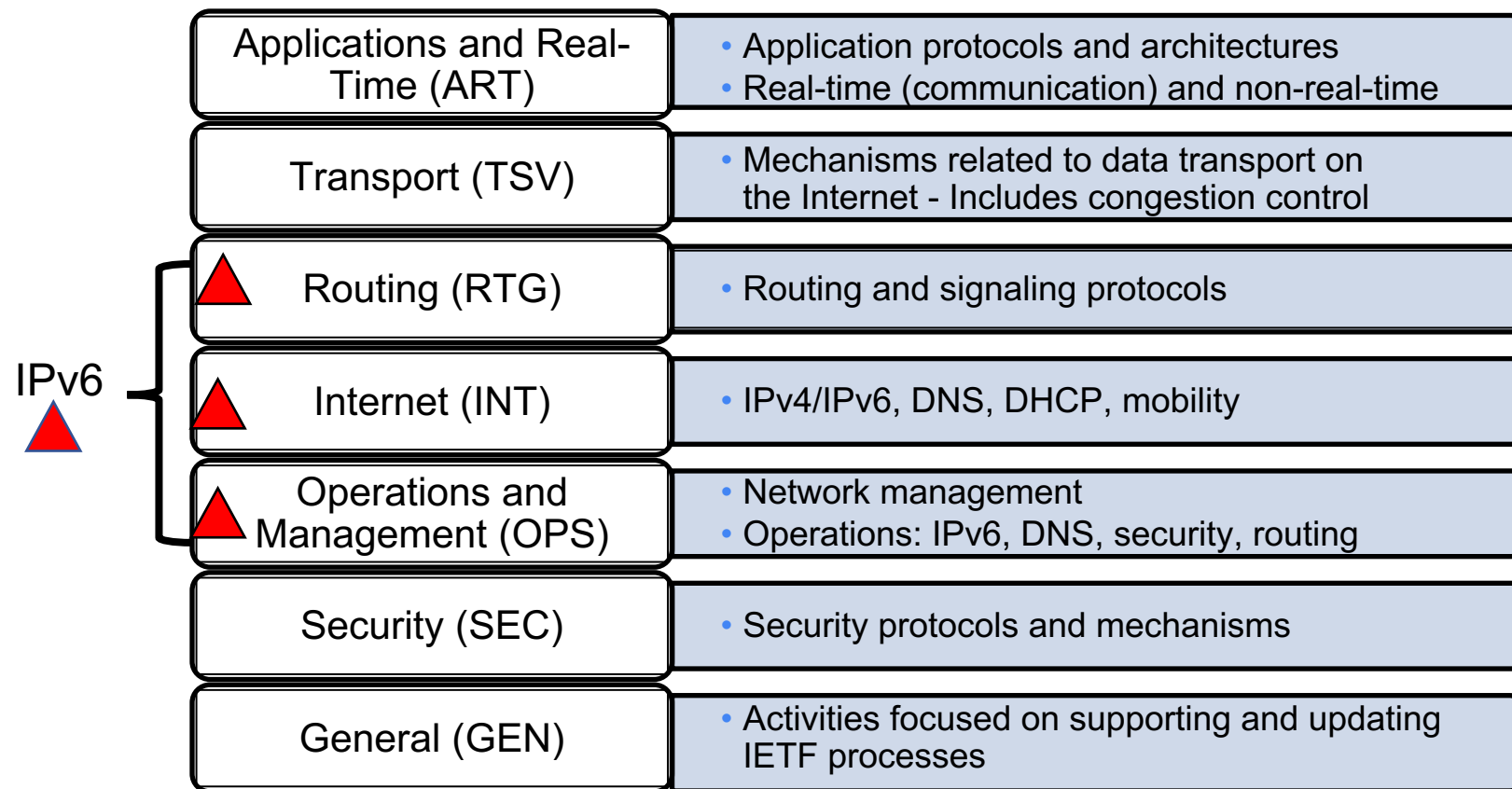
我们拒绝国王、总统和投票 , 简单多数和可运行的代码就是我们信仰

We reject: kings, presidents, and voting.

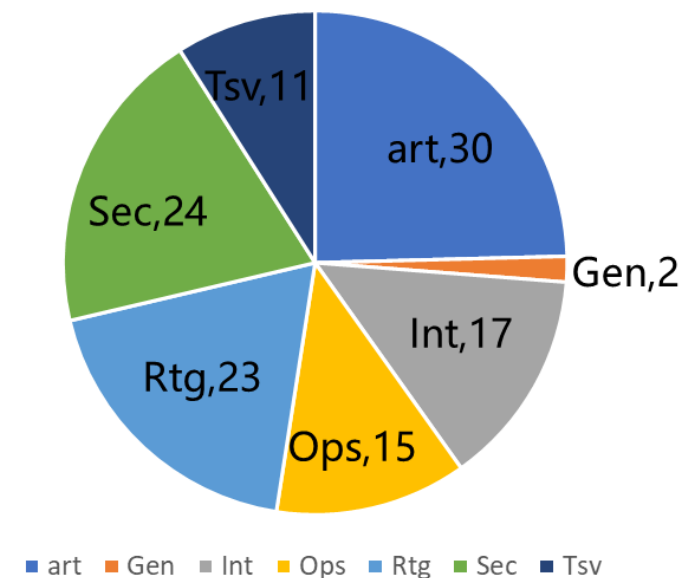
We believe in: rough consensus and running code



David Clark @ MIT



各Areas活跃的WG数量



7各研究领域 (Area) , 有122个工作组 (WG)

设备商



互联网ICP



网络运营商/ISP

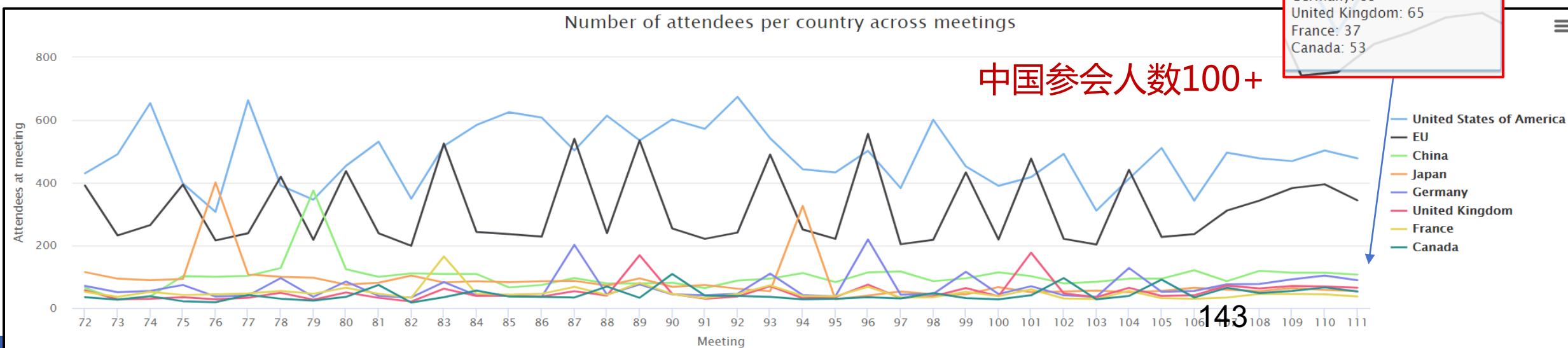
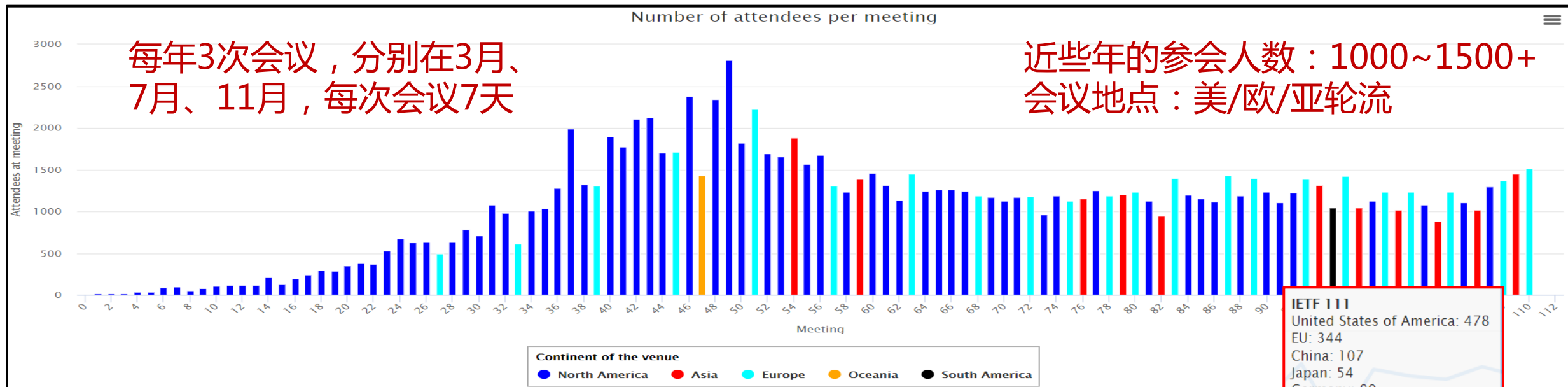


研究机构



参会人数中，设备商思科/华为、互联网服务商谷歌参会人数最多

美、欧、亚三足鼎立，美国最强



110次会议（线上）

	单位	CN		单位	全球
设备商	华为	37		华为	73
	中兴	6		CISCO	62
	思科	1		JUNIPER	33
互联网服务商	阿里	1		google	36
	腾讯	2		facebook	6
电信运营商	中国移动	12		apple	10
	中国电信	11		阿里	2
	中国联通	4		腾讯	6
	CAICT	7			
研究机构	CNNIC	4			
	国内高校	15			
	清华/同济/川大/厦大/武大				
	个人				
		112			

106次会议（新加坡）（2019.11）

	单位	CN		单位	全球
	华为	36		华为	72
	中兴	5		CISCO	57
	H3C	10		JUNIPER	26
	思科	1		中兴	10
	阿里	1		google	36
	中国移动	3		facebook	9
	中国电信	3		apple	11
	中国联通	1		阿里	2
	CAICT	9		腾讯	2
	CNNIC	3		ATT	4
	清华大学	9		DT	7
	声学所	3			
	无组织	32			
		112			1008

我国主要参会情况（近两次现场会议与在线会议）

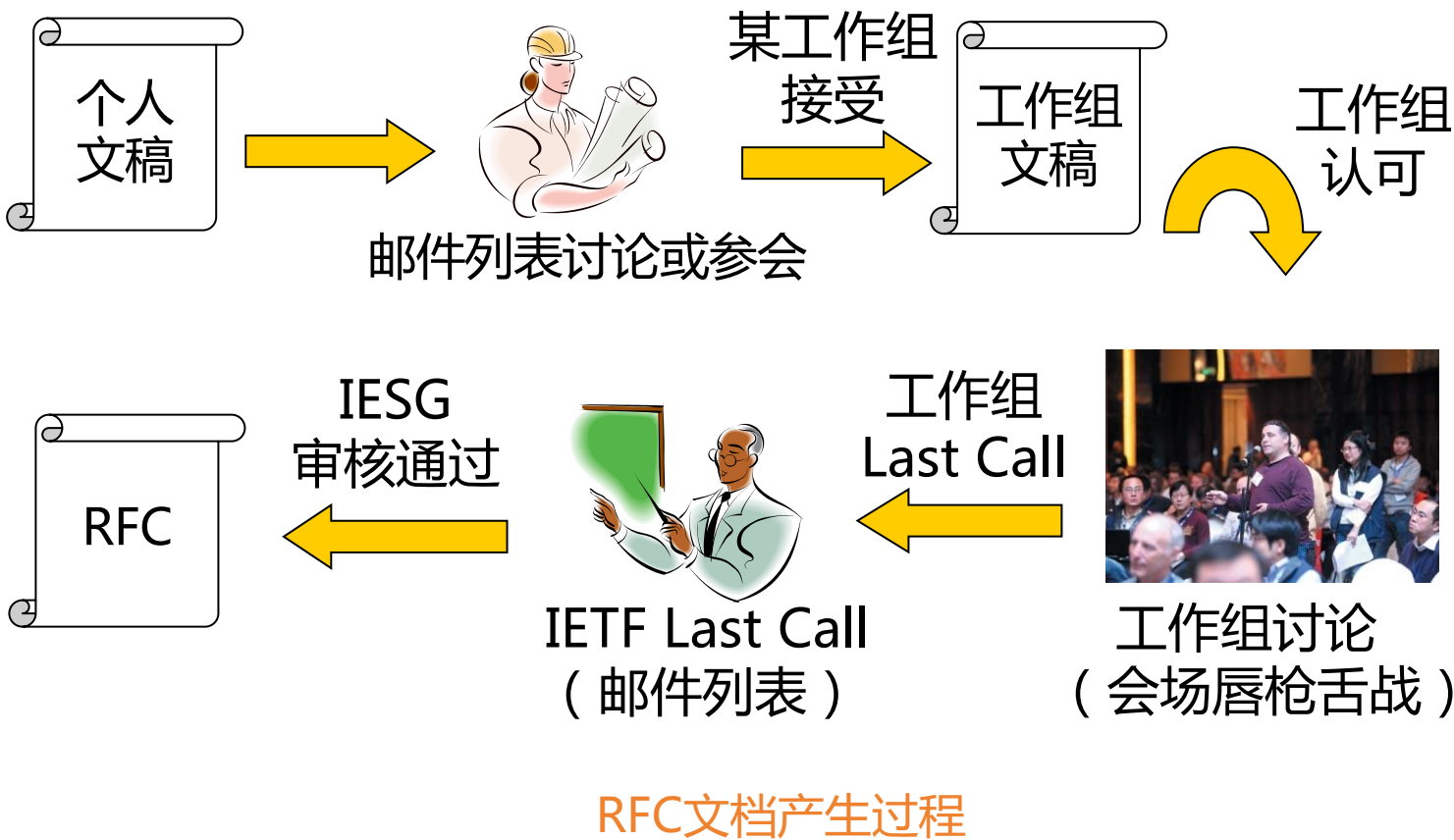
互联网的标准化组织

❖ RFC产生过程

- 往往至少要2~3年

❖ 我国是互联网大国而非强国

	中国	美国
RFC 数量	324 (4.06%)	6362 (79.77%)
作者 数量	208 (3.36%)	3408 (56.64%)



一

课程概况

二

计算机网络简介

三

计算机网络发展史

四

计算机网络体系结构

五

计算机网络标准化