

# 计算机网络

授课教师：李彤

中国人民大学

信息楼421

Email: tong.li@ruc.edu.cn



# 有关信息

- 主讲老师
  - 李彤 ( tong.li@ruc.edu.cn )
- Office
  - DEKE重点实验室 ( 信息楼421室 )
  - E-mail is the best way to communicate



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

主页  
<http://iir.ruc.edu.cn/~litong/index.html>





# 课程的任务、目的和基本要求



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 了解计算机网络的**基本概念**
- 掌握计算机网络**各层协议**的基本工作原理及其所采用的技术
- 学会计算机网络的一些基本**设计方法**
- 熟悉计算机网络的**具体实现和编程方法**，为以后计算机网络及其应用（如元宇宙、人工智能、区块链、Web 3.0）的学习和研究打下基础



# 主要教学内容和学时分配



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

章节	主要内容	学时(共8)
第一章	计算机网络概述	4
第二章	传输层协议	2
第三章	网络编程	2



《计算机网络（第6版）》，  
Tanenbaum, Feamster,  
Wetherall, 清华大学出版社，  
2022年6月



# 主要参考书



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

《计算机网络（第5版）》，Tanenbaum & Wetherall，清华大学出版社，2012年3月

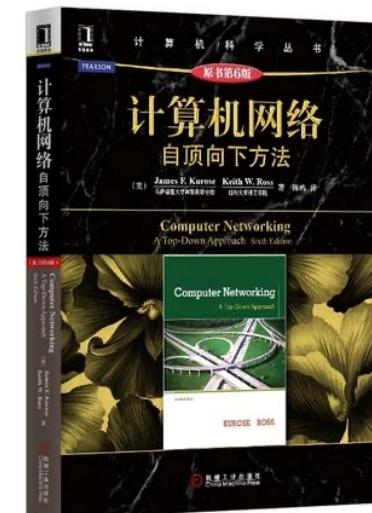
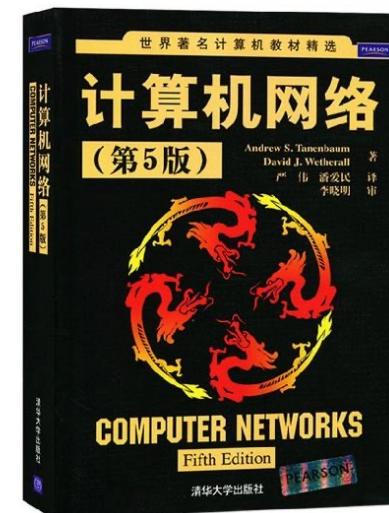
《计算机网络：自顶向下方法》(原书第7版)，库罗斯 罗斯，机械工业出版社，2018年06月

《计算机网络（第7版）》，谢希仁，电子工业出版社，2017年01月

《计算机网络（第3版）》，徐敬东、张建忠，清华大学出版社，2013年6月1日

《计算机网络教程（第6版）》，吴功宣，电子工业出版社，2018年03月

- Andrew S. Tanenbaum, **Computer Networks**, 5<sup>th</sup> edition, Prentice-Hall, 2011
- James F. Kurose and Keith W. Ross, **Computer Networking: A Top-Down Approach**, Addison Wesley, 7<sup>th</sup> edition, 2018



# 第一章 计算机网络概述

授课教师：李彤

中国人民大学



# 本章目标



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1. 了解计算机网络在经济生活中的应用范围及其重要性
2. 了解网络的基本概念，掌握典型交换方式及其优缺点
3. 掌握分层结构和网络协议（核心内容）
4. 掌握网络参考模型（核心内容）
5. 掌握计算机网络主要度量的含义
6. 了解制定网络协议的标准化组织
7. 了解国内外互联网发展史，以史为鉴

小试牛刀：  
茶余饭后讲故事



# 本章内容



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 网络安全与威胁

1.7 标准化组织

1.8 互联网发展史与启示



# 生活中常见的网络



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 电力与交通网络
  - 道路更宽了，交通反而越来越拥堵？
- 生物网络
  - 传染病流行机制？Covid-19等疾病的防控？
- 经济与金融网络
  - 口碑营销？局部金融动荡为何引起全球金融危机？
- 社交网络
  - 每天用手机、电话、微博，哪天没有手机和网络，怎么办？为什么流言蜚语散布非常快？
- 神经网络
  - 深度学习是否具有可解释性？
- 互联网

请思考  
你在生活中接触过哪些网络？



# 网络的基本功能

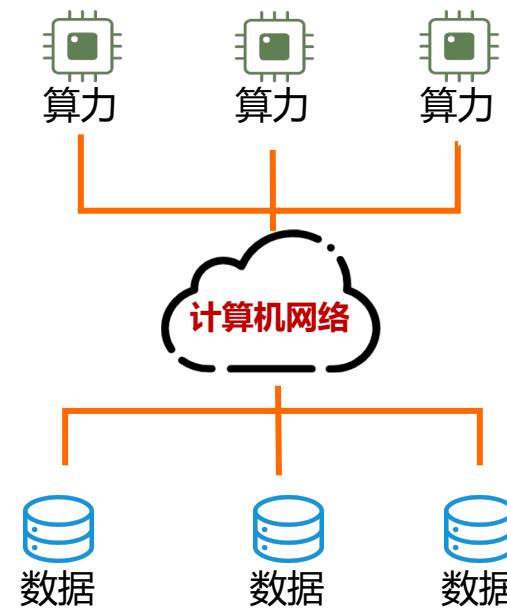


## ➤ 网络提供的最基本服务: 传递资源

- 马车、飞机、高铁、电网、管道
- 电报、电话、互联网



数字世界





# 多种多样的网络服务



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



远程医疗



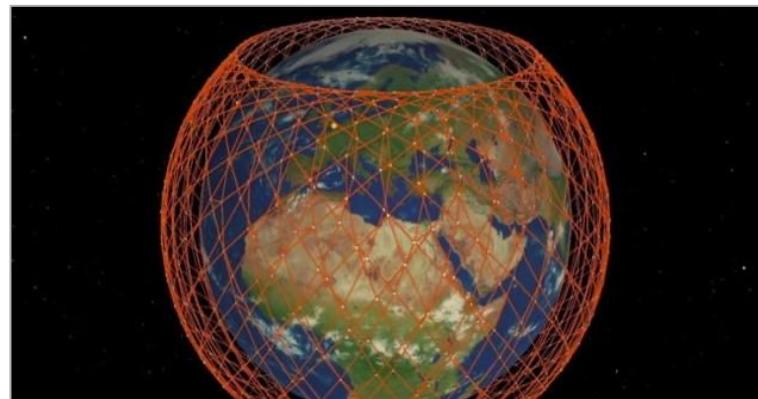
无人码头的远程操控



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

异构网络环境  
有线、无线；距离  
远近；干扰各异

业务需求各异  
时延、带宽、可靠  
性、安全保密……



# 网络改变生活



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 直播：春晚、游戏，还是带货？
- 习总书记在陕西柞水县金米村考察
  - 电商作为新兴业态，既可以推销农副产品、帮助群众脱贫致富，又可以推动乡村振兴，是大有可为的
- 女副县长雪地策马奔腾
  - 新疆伊犁州昭苏县@2020年11月
  - 在抖音上宣传旅游和推销农产品
  - 18场次直播带货，销售97万元农副产品

直播



新时代的“新农业”

直播成为新农活 手机成为新农具 数据成为新资产



# 网络在军事领域的应用



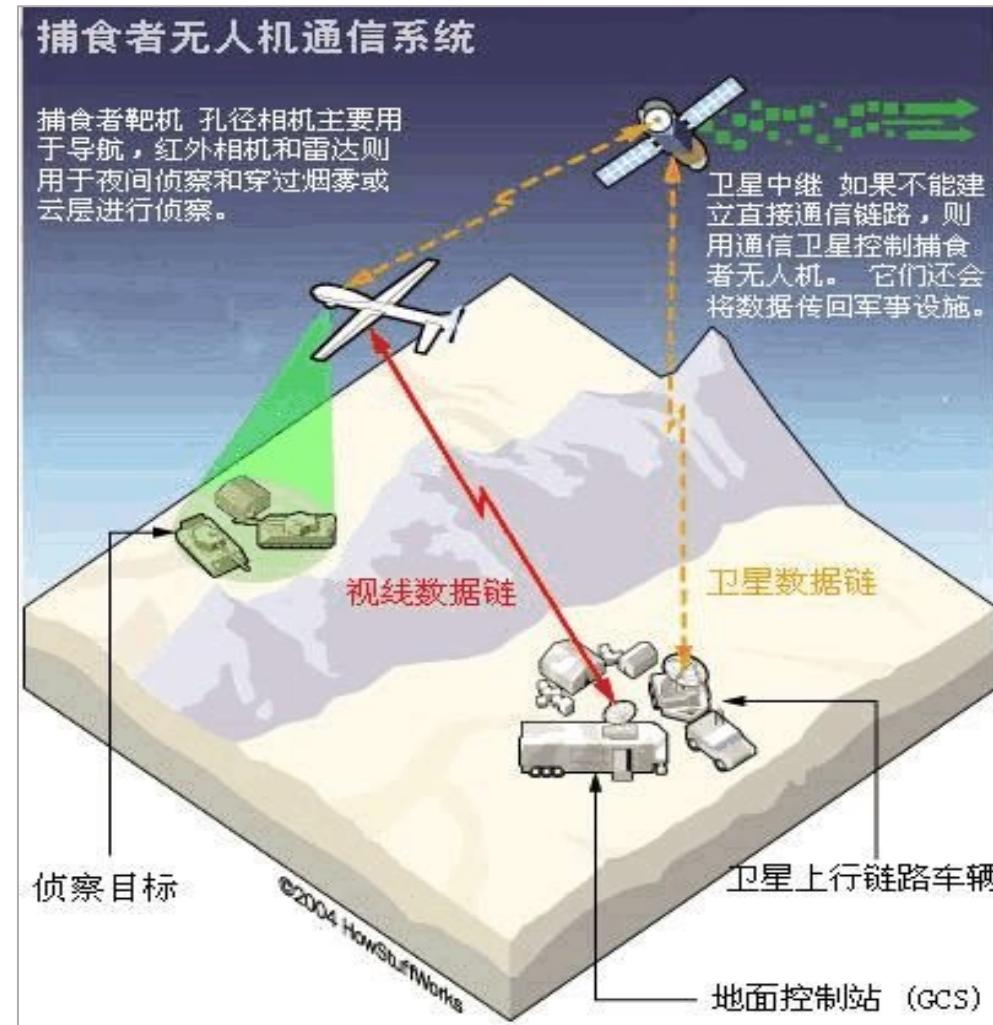
中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 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



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

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





# 全球市值前十名公司的变迁



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



- 苹果、谷歌、微软、亚马逊、腾讯、FB突破5千亿美元
- 阿里、伯克希尔哈撒伟、强生、摩根

祝贺大家：计算机类荣登最热门专业榜首



硅谷在哪里？  
美国西部荒凉的湾区

我辈中人？



# 我国的新基建



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 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→算力网络



- 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



# 本章内容



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 标准化组织

1.7 互联网发展史与启示

- 1. 网络分类与构成
- 2. 网络边缘
- 3. 网络核心



# 网络分类（按地域规模）



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 个域网PAN ( Personal Area Network )

- 能在设备之间进行短距离通信的网络
- 覆盖范围一般在10米半径以内，如蓝牙耳机等



典型个域网设备  
蓝牙耳机

## ➤ 局域网LAN ( Local Area Network )

- 局部地区形成的区域网络，如企业网络
- 电脑WLAN接入，打印机共享等

## ➤ 家庭网络 ( Home Network )

- 家庭中的LAN，如华为“全屋智能”，电力猫

## ➤ 城域网MAN ( Metropolitan Area Network )

- 范围覆盖一个城市的网络，如有线电视网、LTE/5G

## ➤ 广域网WAN ( Wide Area Network )

- 覆盖很大地理区域，乃至覆盖地区和国家



典型局域网设备  
无线路由器



## Internet 与 internet

互联网 ( Internet )	互连网 ( internet )
<b>相似之处</b>	
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 )
<b>不同之处</b>	
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



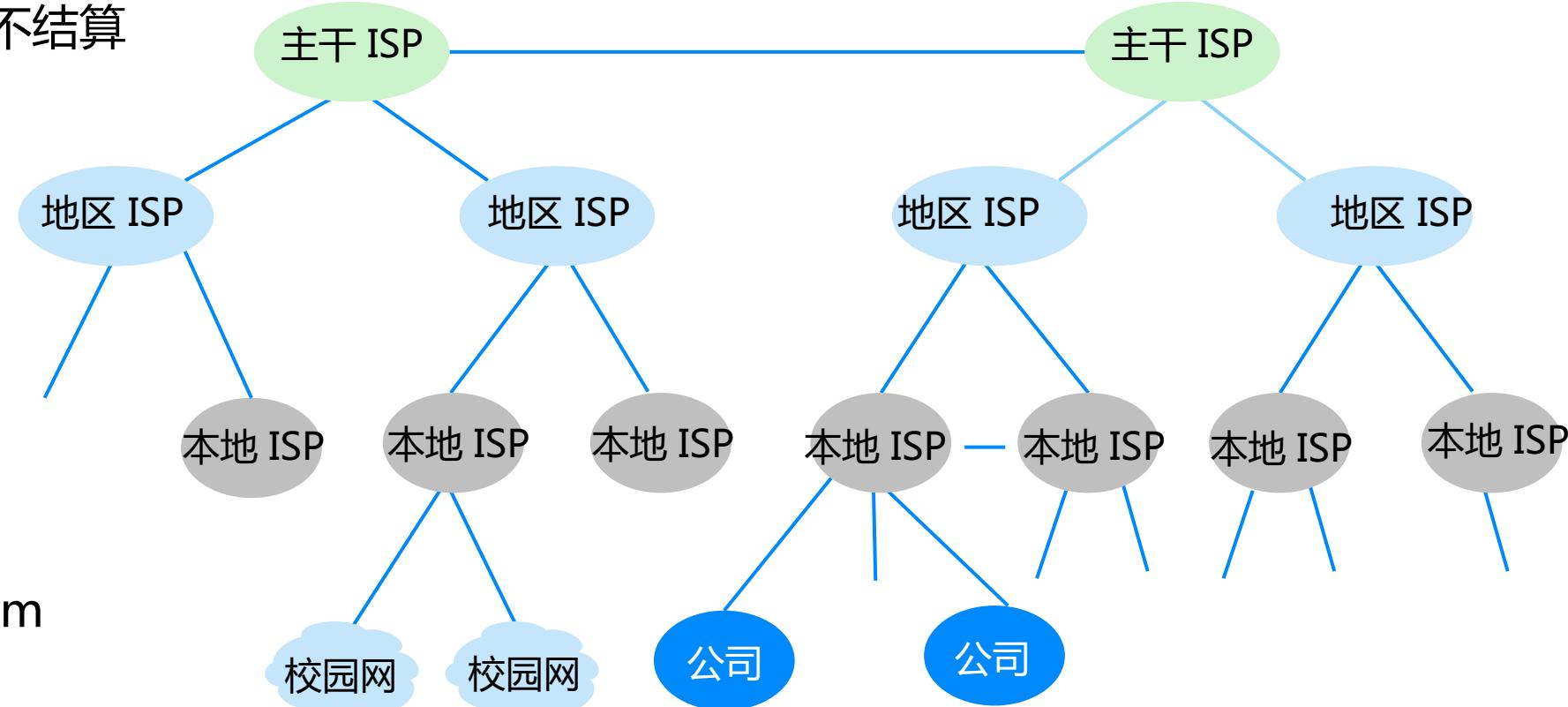
# 互联网的层级结构（上世纪90年代）



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ Tier-1 主干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 地区ISP

- 教育网、中国移动
- 往往需要向更高级别ISP交流量费

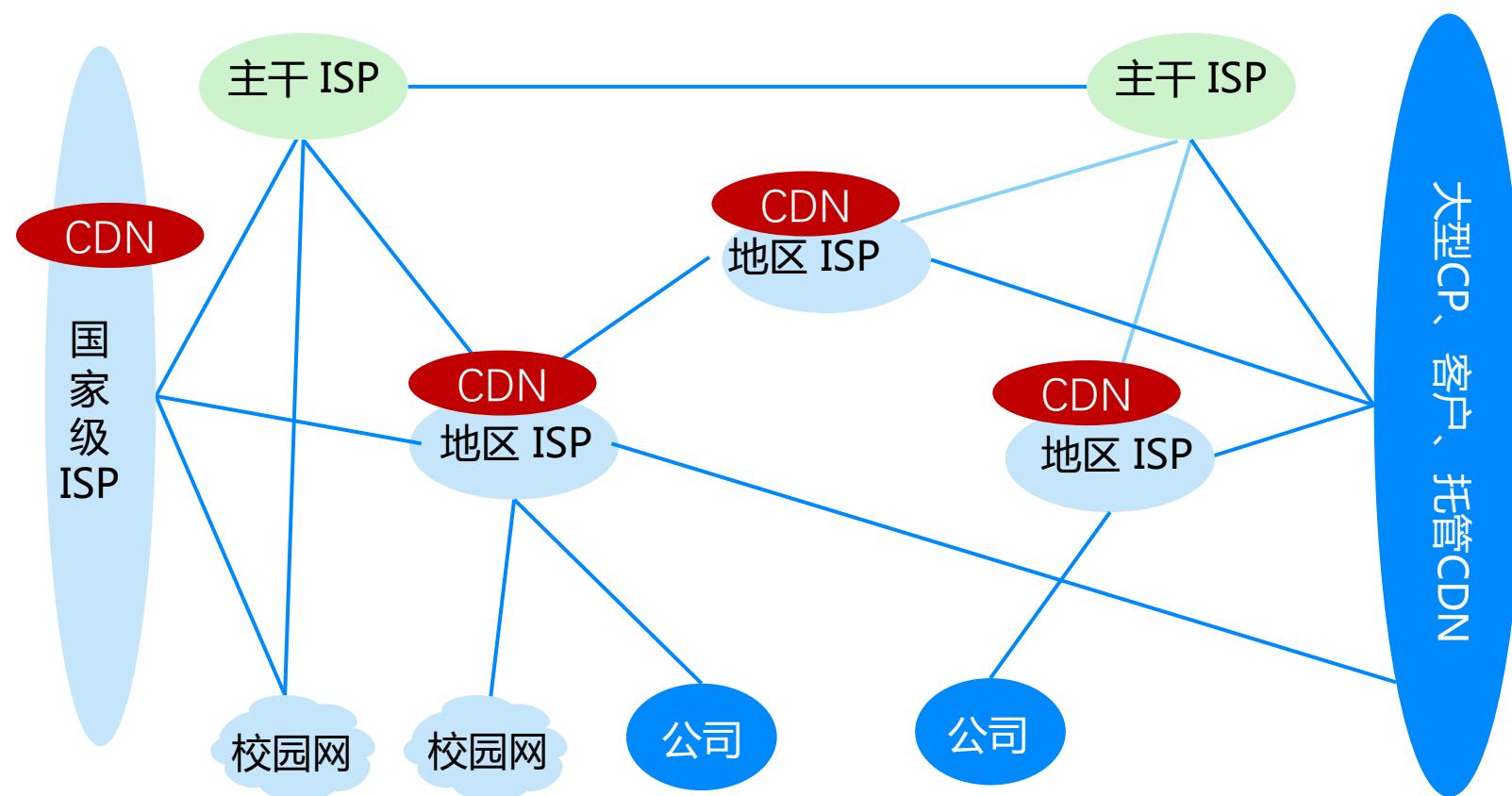
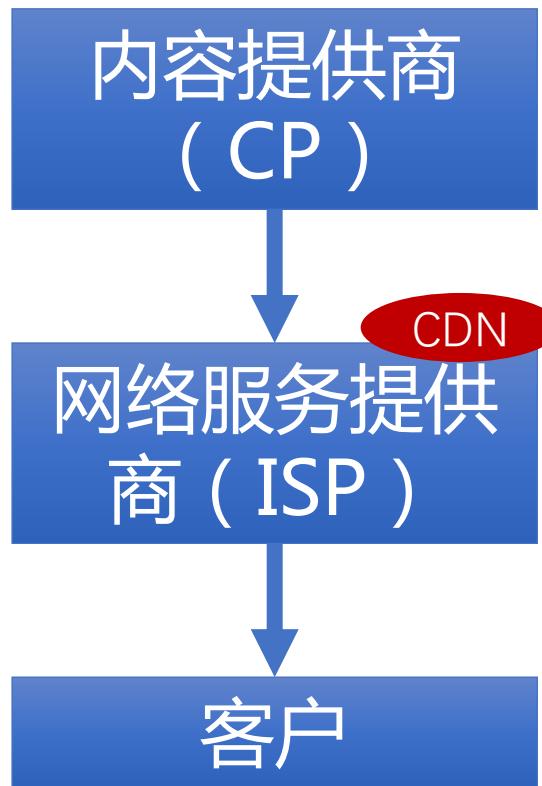
网络服务提供商 (ISP) 及层次化结构  
(实际的更复杂)



# 互联网的层级结构（现在）



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



网络服务提供商 (ISP) 及扁平化结构



# 互联网的构成

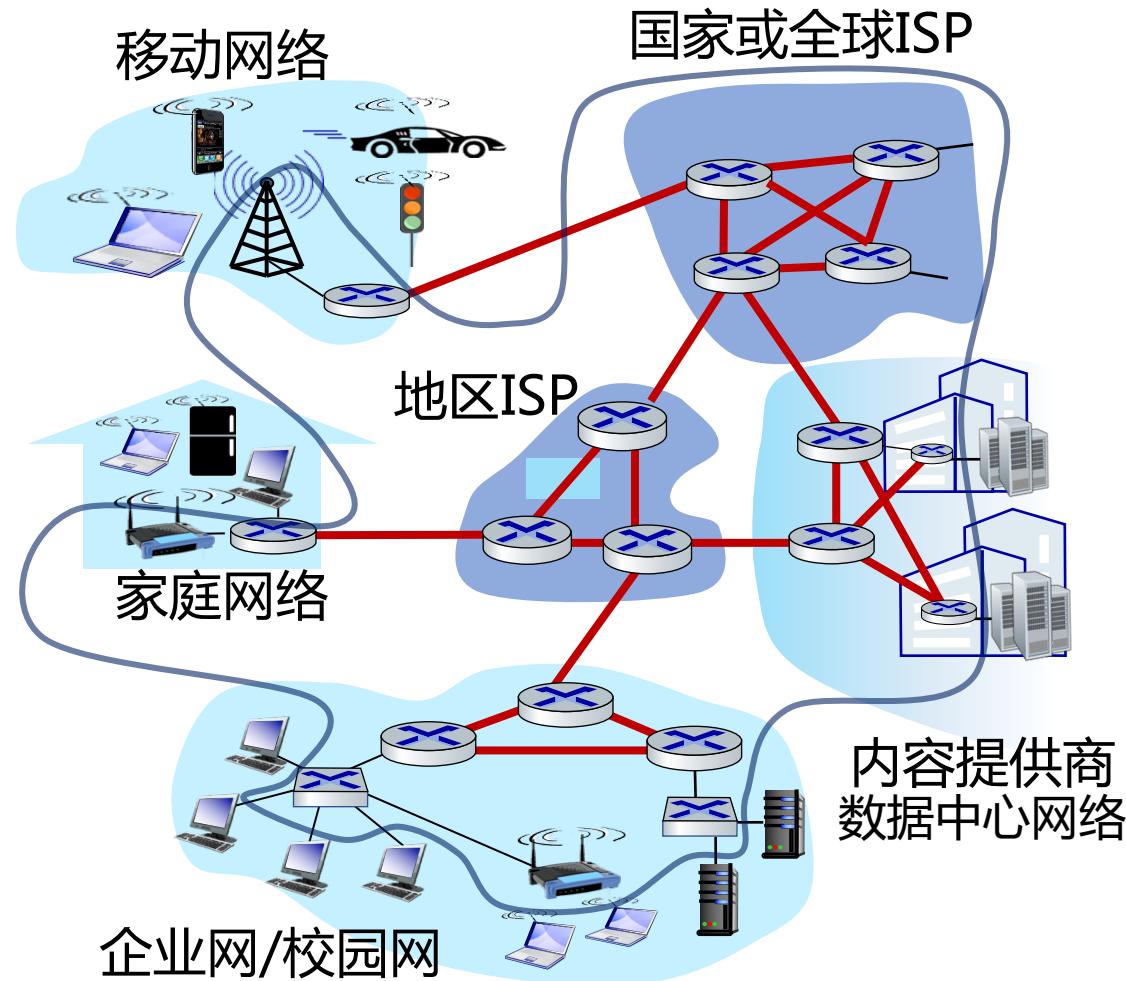


## ➤ 网络边缘

- 端系统：位于互联网边缘与互联网相连的计算机和其他设备
- 端系统由各类主机(host)构成：  
桌面计算机、移动计算机、服务器、其他智能终端设备

## ➤ 网络核心

- 由互聯端系统的分组交换设备和通信链路构成的网状网络
  - 分组交换 ( 路由器、链路层交换机 )
  - 通信链路(光纤、铜缆、无线电、激光链路)



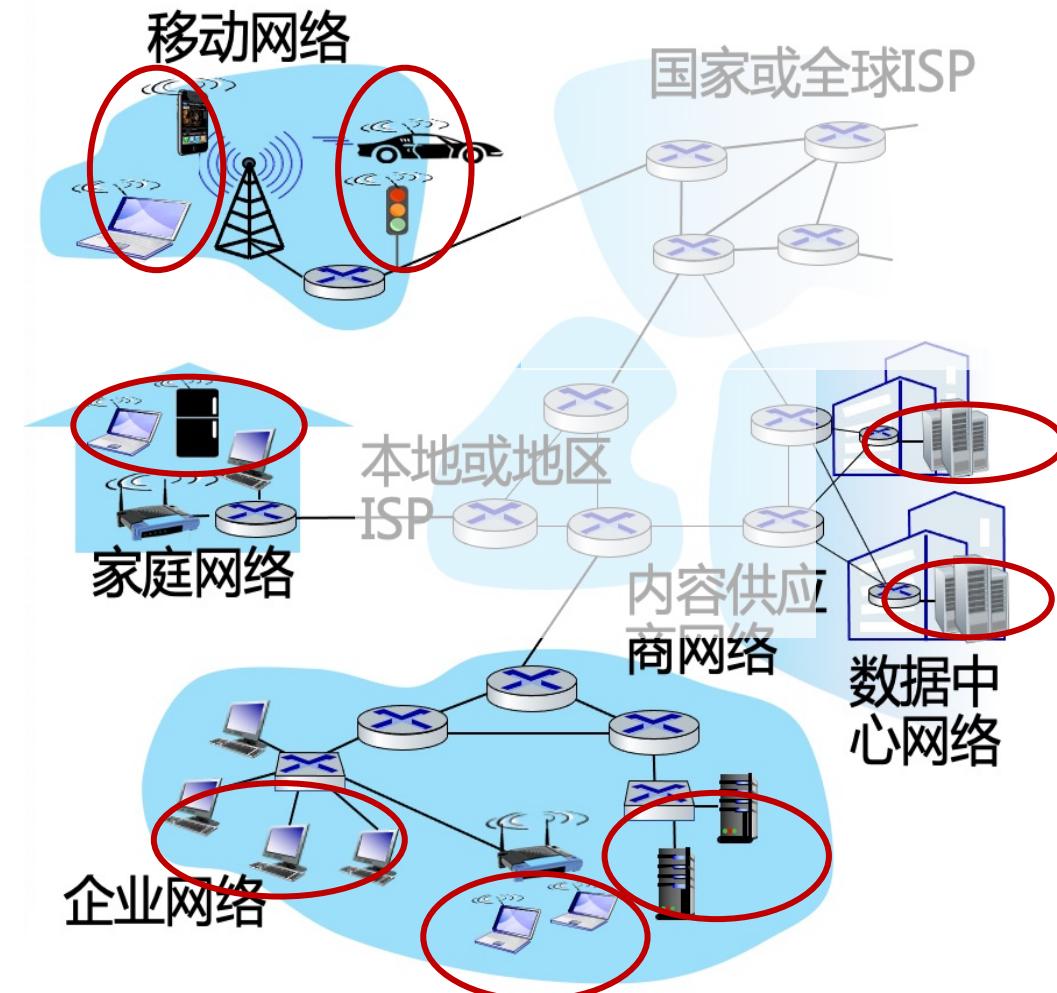


## ➤ 主机Host

- 客户端：便携机、智能手机、平板电脑，智能手环等各类智能终端
- 服务器（服务器通常位于数据中心）

## ➤ 主机的功能

- 容纳（即运行）应用程序
- 产生信息并向接入网发送数据
- 从网络接收数据并提供给应用程序





# 网络边缘设备



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## 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



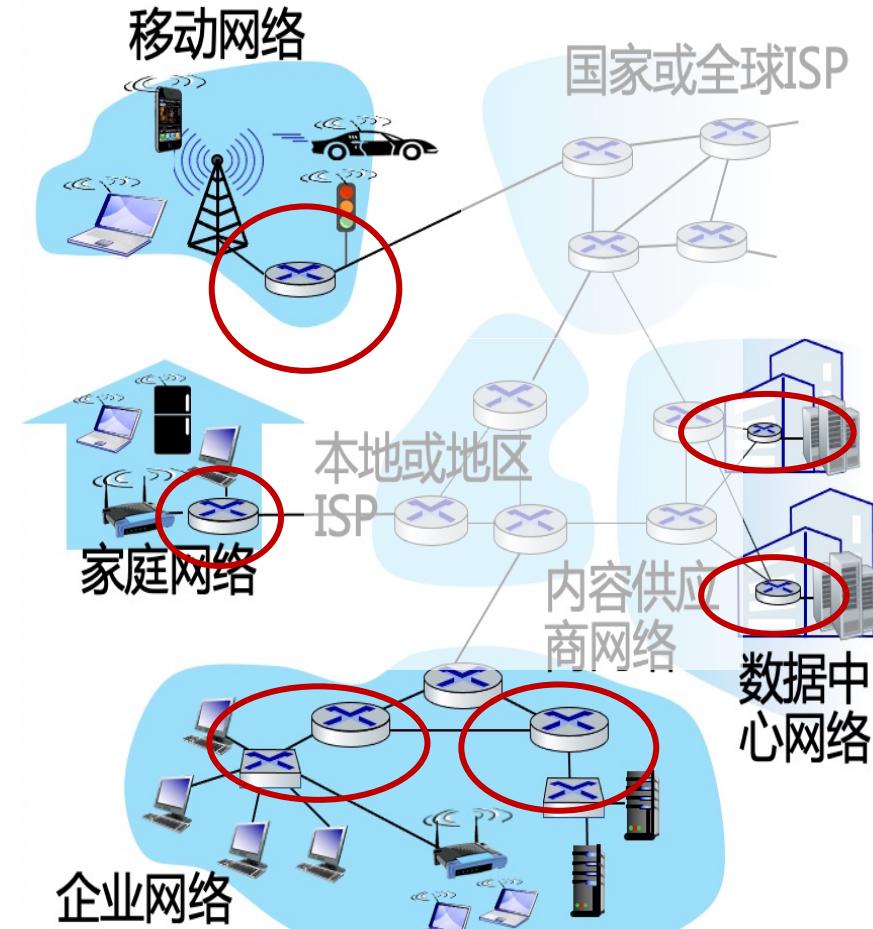
## ➤ 接入网目标

- 接入网的目标是将主机连接到边缘路由器上
- 边缘路由器是端系统Host去往任何其他远程端系统的路径上的第一台路由器

## ➤ 如何将终端系统连接到边缘路由器？

- 有线网络接入技术：光纤，同轴电缆，双绞线，电话线
- 无线网络接入技术：WiFi、4G/5G，卫星广域覆盖

各种异构网络通过边缘路由器接入





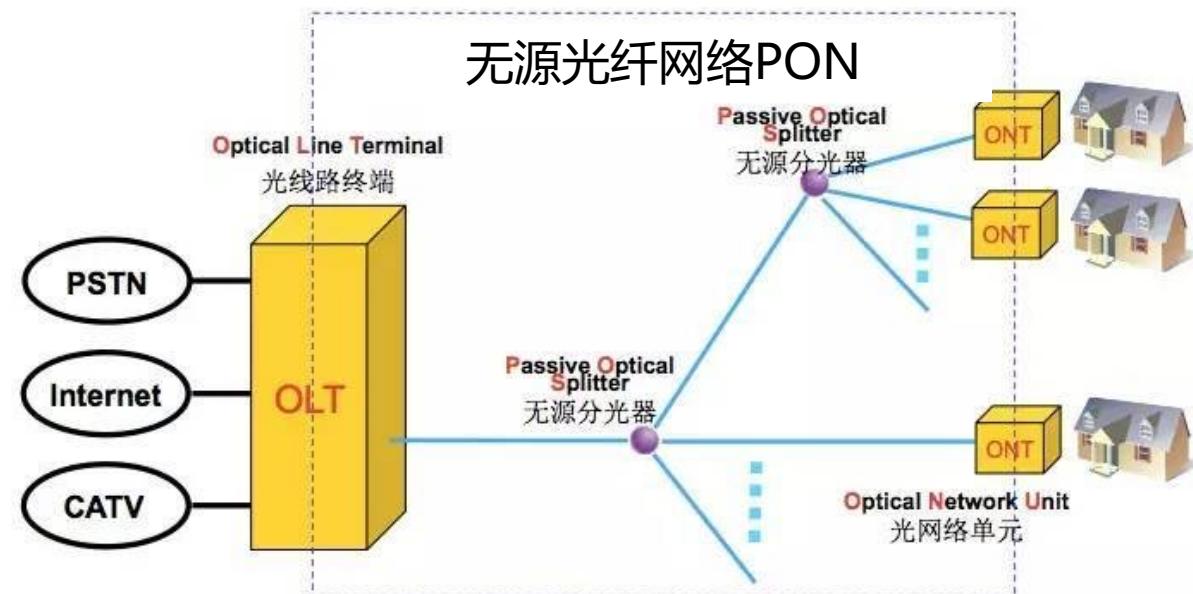
## ➤ 光纤到户FTTH

- FTTH: Fiber To The Home
- 我国及全球先进地区普遍采用的光纤通信的传输方法
- 分为两类：有源光纤网络AON和无源光纤网络PON
- 带宽大、线路稳定

我国FTTH用户  
已接近5亿

## ➤ 无源光纤网络PON

- PON: Passive Optical Network
- OLT : 局端的光线路终端
- ONU光网络单元（如光猫ONT）
- 光猫ONT通过一个或多个无源分光器，连接到局端的光线路终端OLT

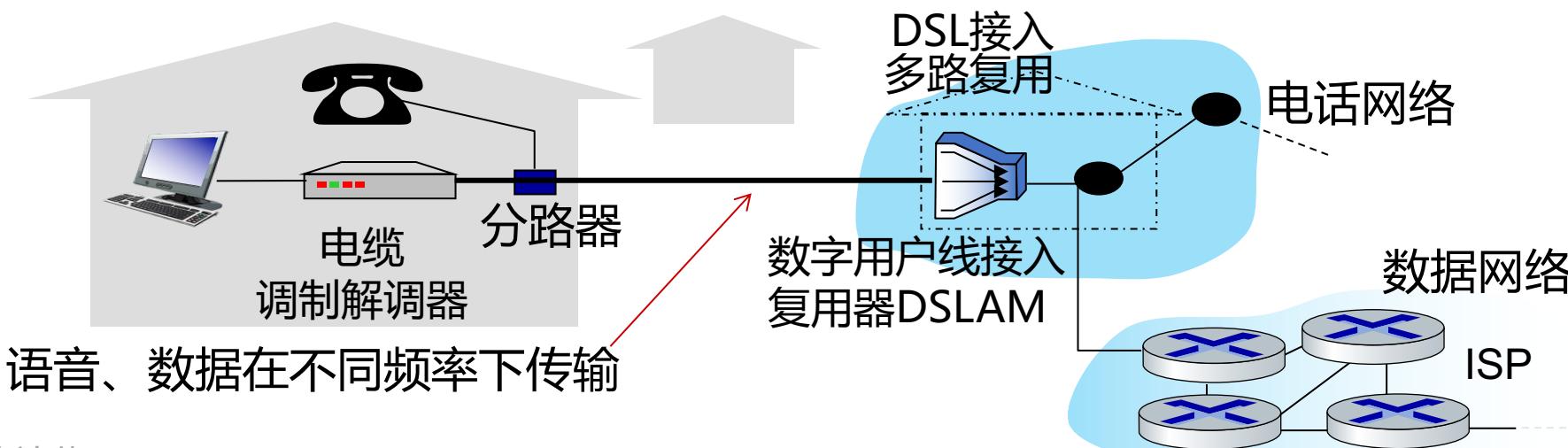




# 接入网：数字用户线DSL



- 数字用户线DSL : Digital Subscriber Line
- 使用电话线连接到数字用户线接入复用器(DSLAM)
  - DSL电话线上，语音和数据可以同时传输
  - 数据进入互联网，语音连接到电话网
- 上下行速率不对称
  - 24-52 Mbps下行速率，3.5-16 Mbps上行速率





# 接入网：同轴电缆



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

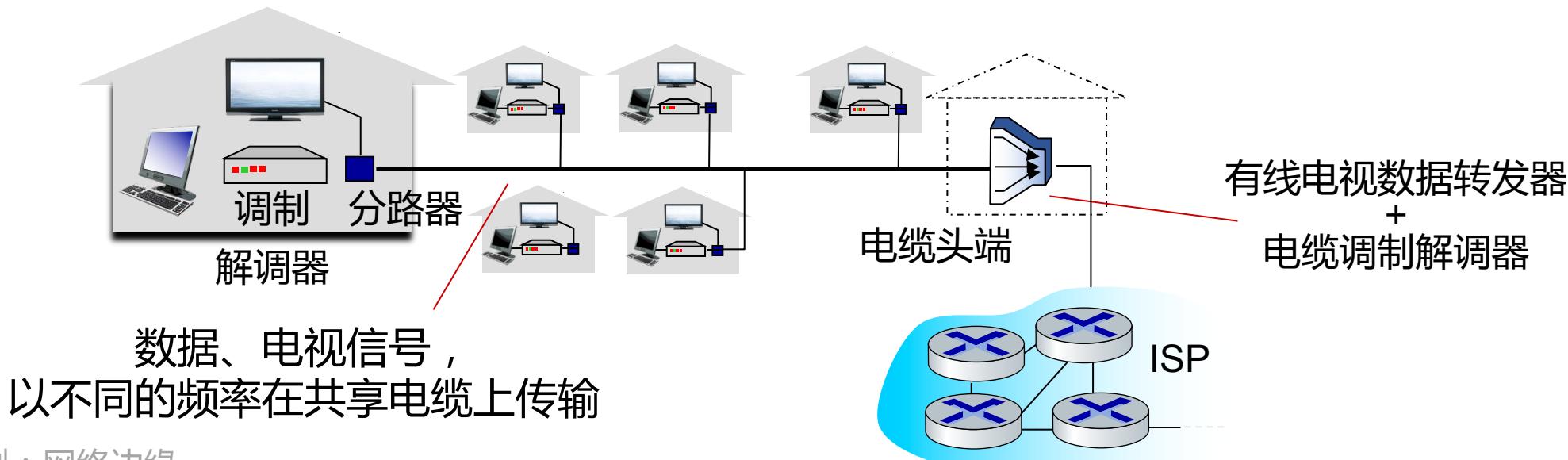
## ➤ 同轴电缆 : Cable

- 家庭利用传统**有线电视信号线** (同轴电缆) 接入头端上网
- 多个家庭共享有线电视的头端
- 不对称：高达40 Mbps–1.2 Gbps下行传输速率，  
30-100 Mbps上行传输速率

## ➤ 混合光纤同轴电缆HFC

- 先用同轴电缆接入光纤节点，再用光纤连接到头端

我国已广泛升级为FTTH，  
美国住宅依然有80%多使用  
DSL和同轴电缆接入(?)

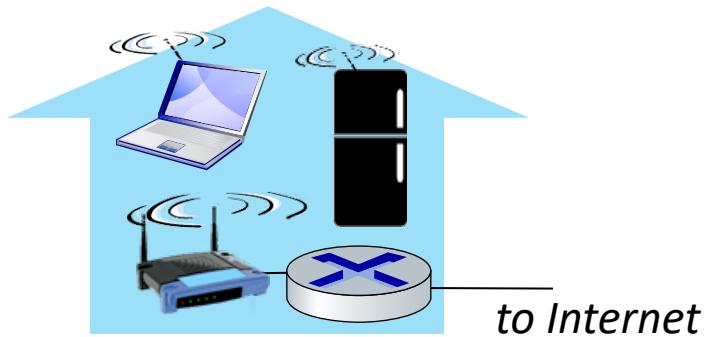




- 无线接入网通过基站(“接入点”)将终端系统连接到路由器上

## 无线局域网 ( WLAN )

- 通常在建筑物内或周围 ( 10 米 )
- 802.11b/g/n ( WiFi ) :  
11、54、450 Mbps 等传输速率
- Wi-Fi 6 最高速率可达 9.6Gbps



## 广域蜂窝接入网

- 由移动蜂窝网络运营商提供 ( 10 公里 )
- 2G/3G/4G/5G 等蜂窝网络
- 0.1 ~ 1000 Mbps 速率





## ➤ 实际的接入网

- 往往采用有线、无线等多种技术的混合
- 甚至WiFi和4G等多种无线技术的混合接入

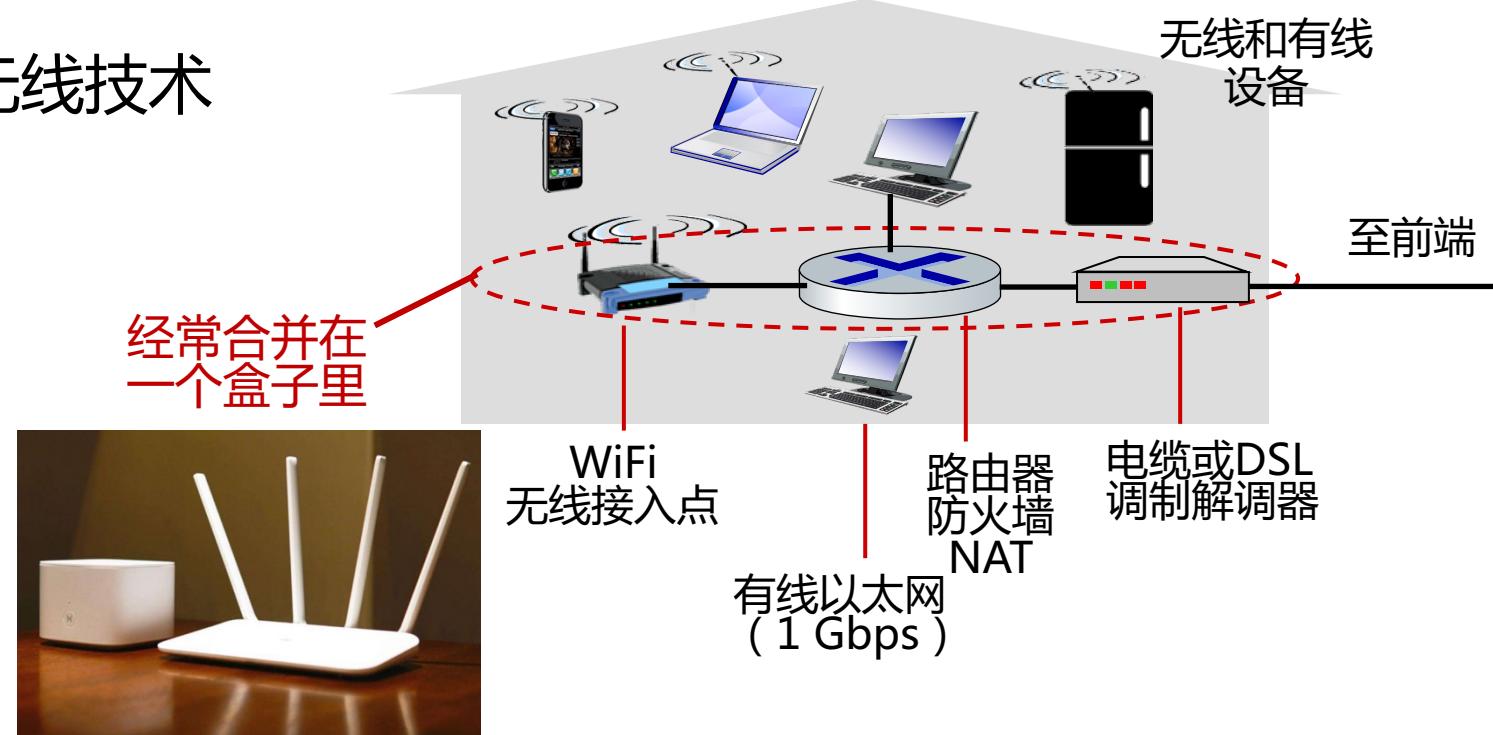
## ➤ 有线以太网接入

- 100Mbps、1Gbps、10Gbps等接入速率

## ➤ 无线WiFi接入

- 11、54、450Mbps等

校园、企业、家庭等网络





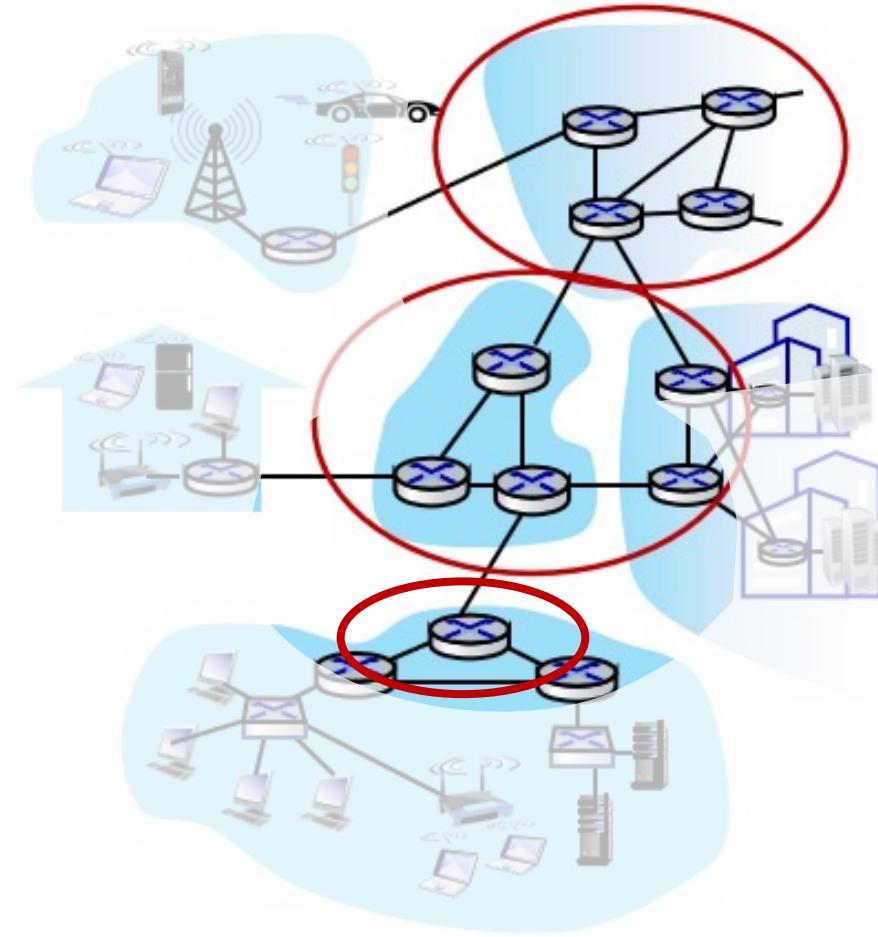
# 网络核心



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 网络核心

- 目标：将海量的端系统互联起来
- 由各类交换机（路由器）和链路，构成的网状网络





# 网络核心的两大功能

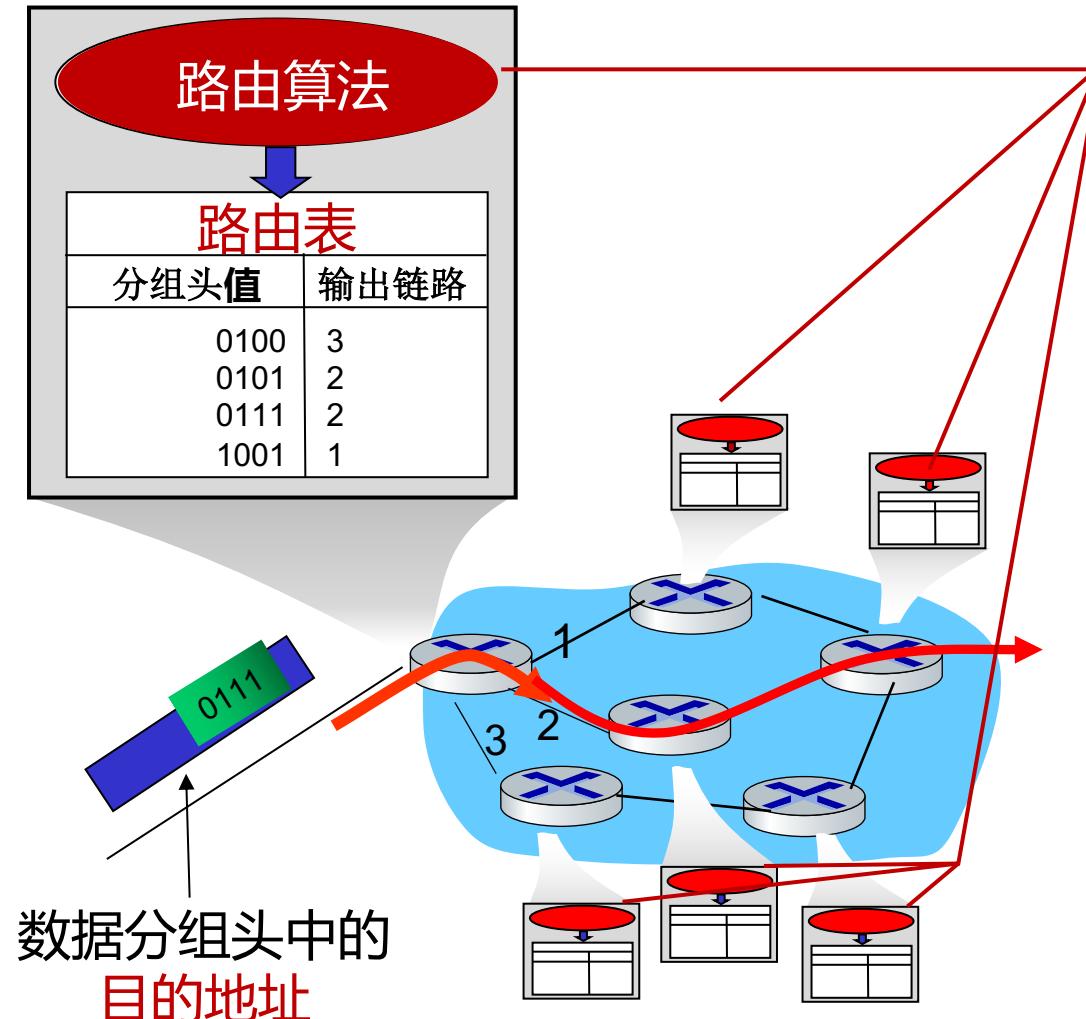


## ➤ 功能1：路由

- **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

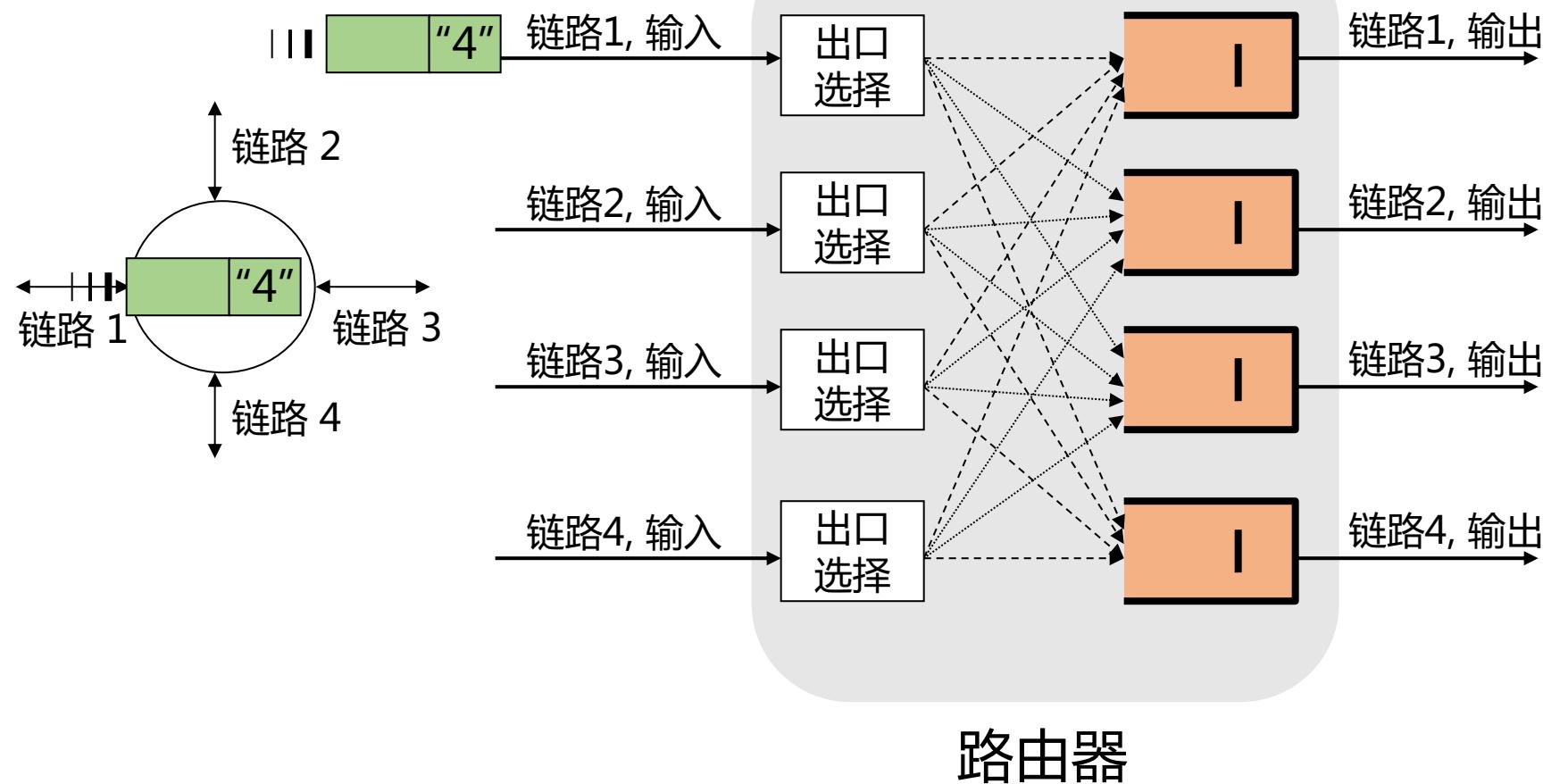
## ➤ 功能2：转发

- **本地操作**：路由器或交换机将接收到的数据分组转发出去（即移动到该设备的某个输出接口）
- 确定转发出去的接口/链路：根据从“入接口”收到分组头中的目的地址，查找本地**路由表**，确定“出接口”





# 路由器转发模型



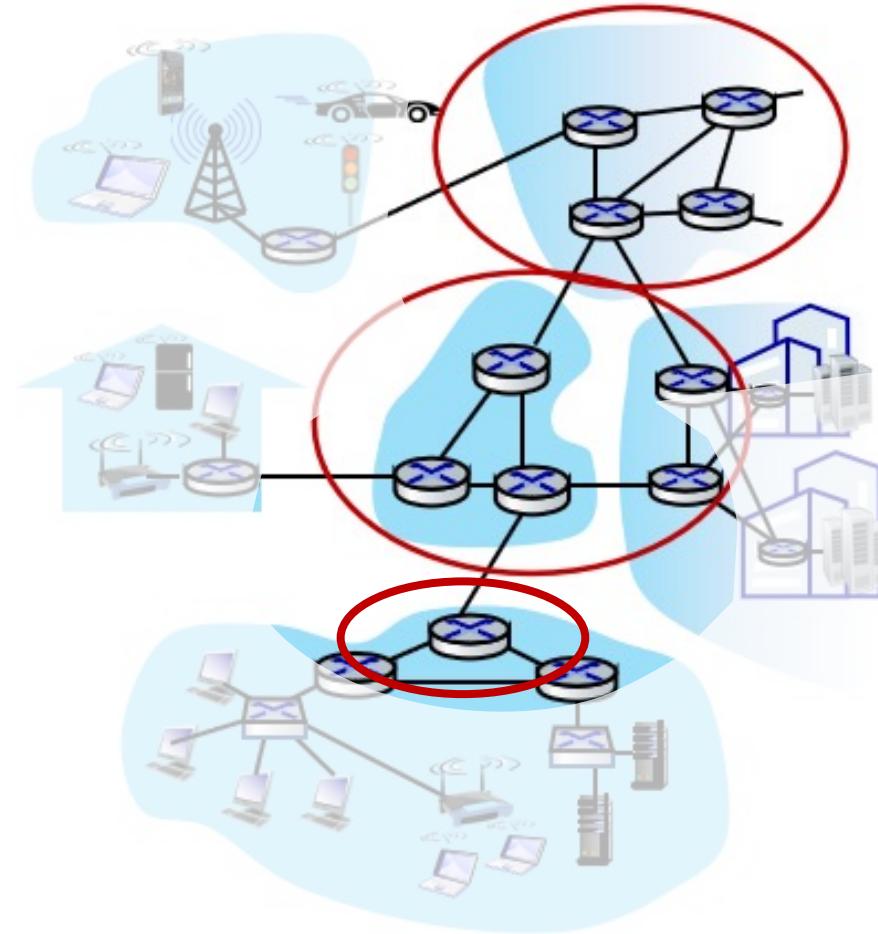


# 网络核心



➤ 最根本的问题：数据是如何传输并通过网络的？

- 电路交换：为每个通信连接指定电路，如同电话网络
- 分组交换：数据划分成分离的“数据块”，通过网络传送



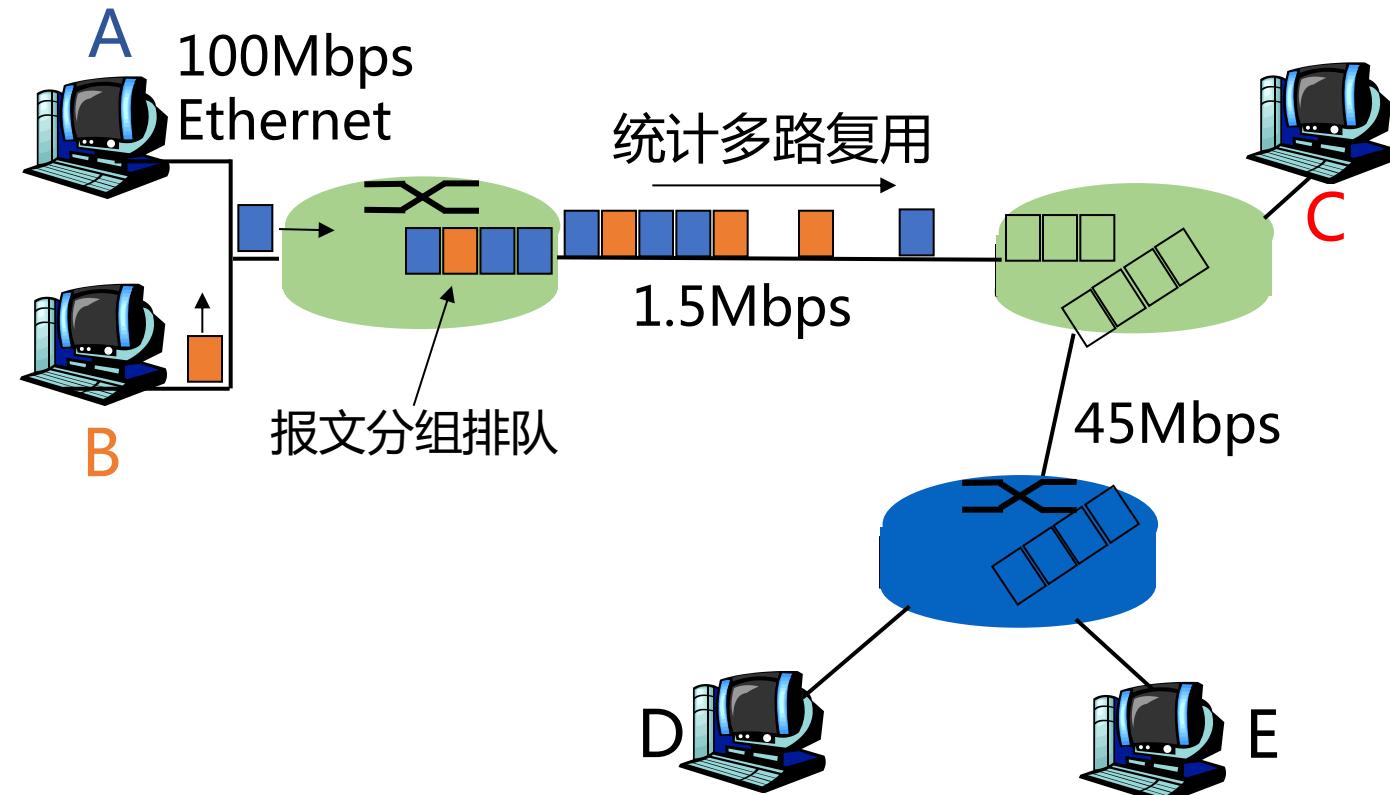


# 分组交换



- 分组交换 ( packet switching )
- 每个端到端的数据流被划分成分组 (packet)
  - 用户 A、B 的分组可共享网络资源
  - 每个分组使用全部的链路带宽
  - 资源在必要时才使用，区别于电路交换的固定预分配
- 资源竞争
  - 资源可能供不应求
  - 处理拥塞：分组排队，等待链路资源
  - 在路由器上**存储转发**，分组一次移动一个步跳

主机A和B的报文分组按需共享带宽，称为统计多路复用 ( statistical multiplexing )



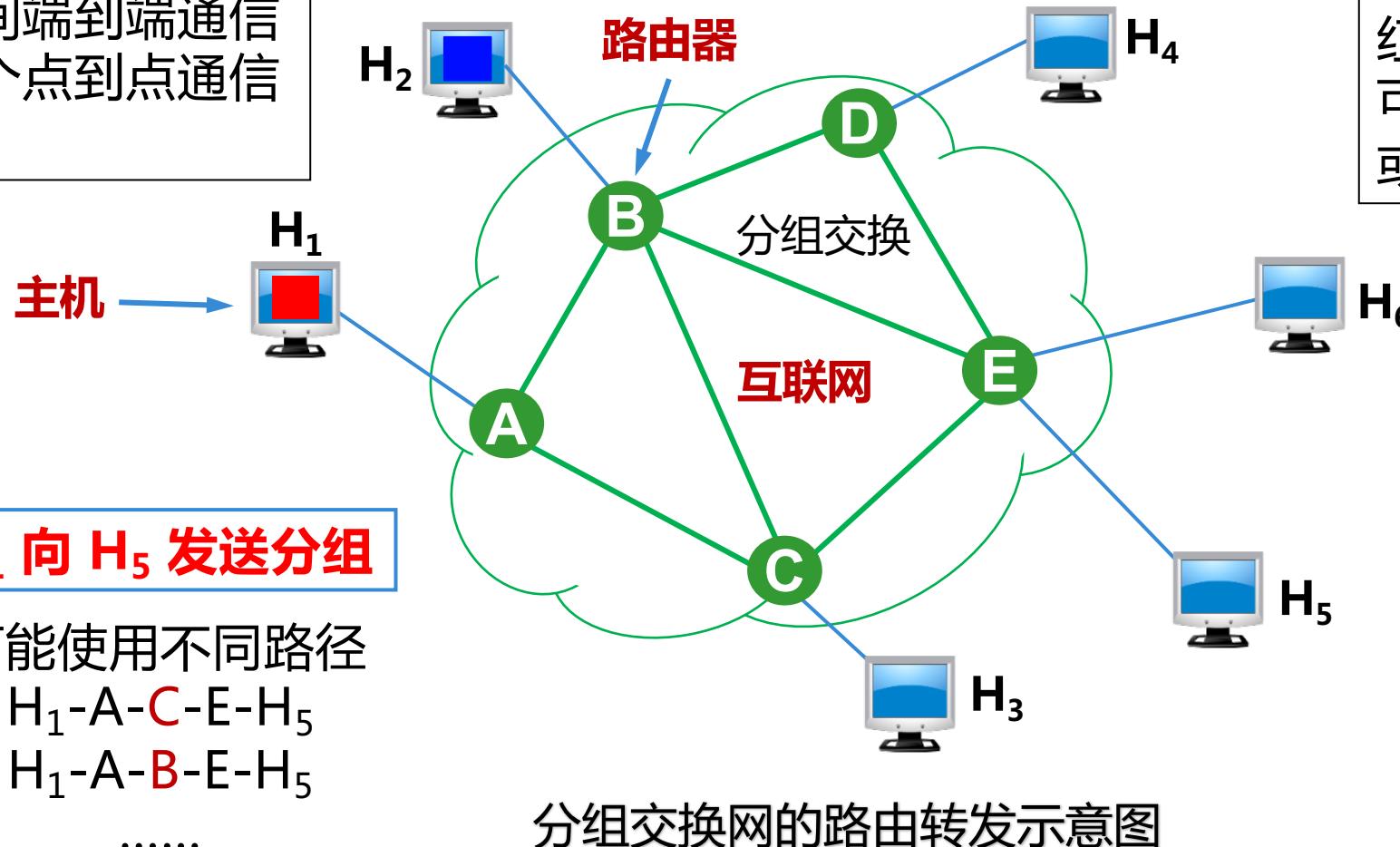


# 分组交换示例



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

主机之间端到端通信  
可由多个点到点通信  
构成



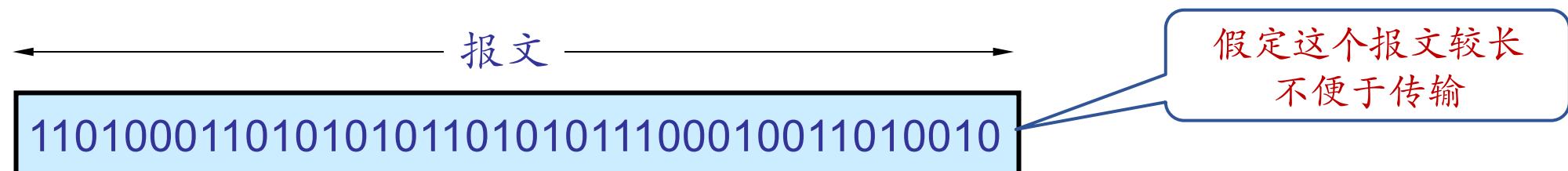


# 分组交换——原理

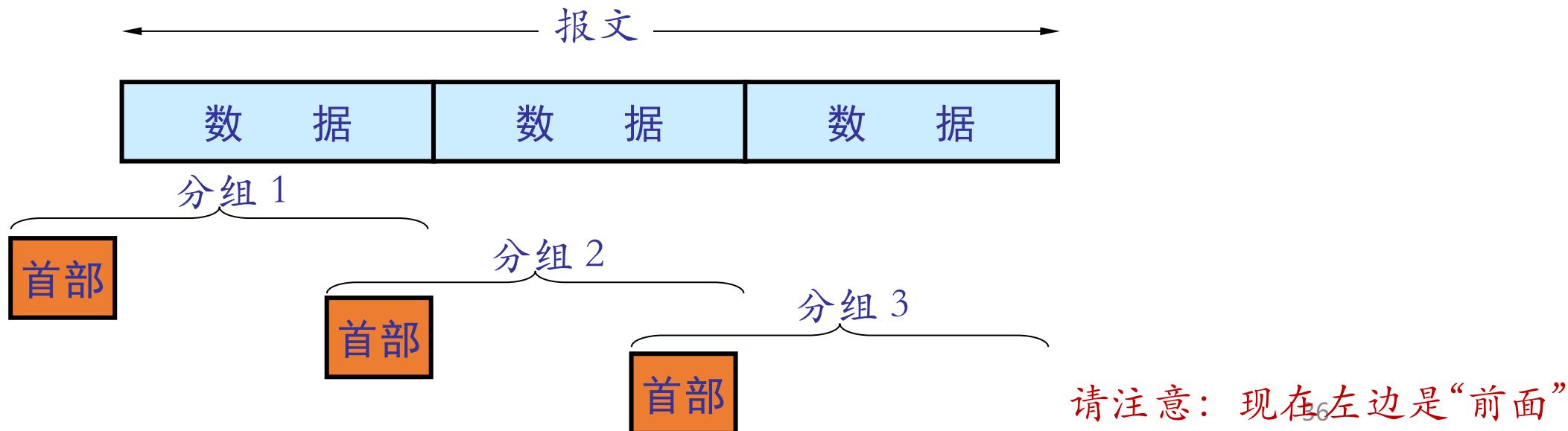


中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 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

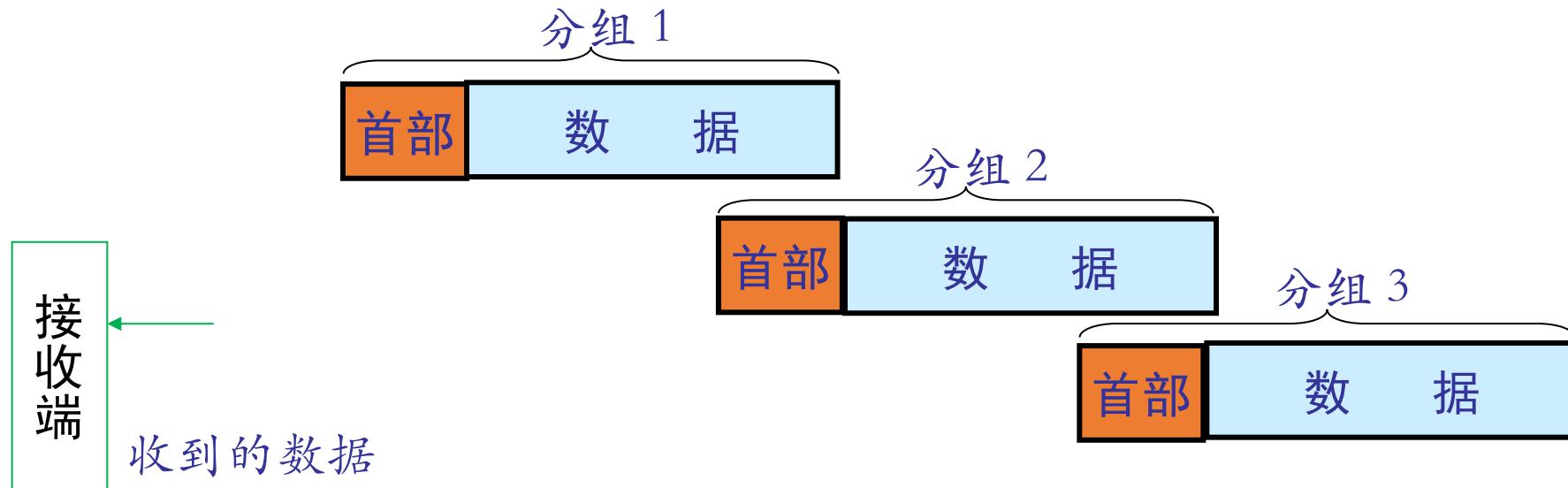




# 分组交换——原理（2）



- 分组交换网以“分组”作为数据传输单元
- 依次把各分组发送到接收端（假定接收端在左边）



- 接收端收到分组后剥去头部还原成报文



## ➤ 分组首部的重要性

- 接收端没有首部信息无法正确组装接收的数据
- 分组交换网中的结点交换机，根据收到的分组首部中的地址信息，把分组转发到下一个结点交换机





# 分组交换的挑战 : Best-effort



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 在突发性数据传输过程中表现优异
  - 资源共享、无须事先建立连接
- 过度拥塞：将导致分组延迟和丢失
  - 需要协议来保障可靠的数据传输，拥塞控制
- 问题：如何在分组交换网中提供有服务质量保证（QoS）的性能？
  - 为音频/视频应用提供带宽保障
  - 仍然是一个需要解决的问题

## Research Interests

I worked on **networked systems**. My research interest is the Next-Generation Internet Architecture, including high performance datacenter networks, deterministic low-latency wide-area networks and minimalist wireless networks. Currently, my research mainly focuses on:

- Applying the state-of-the-art **big data** and **machine learning** technologies to improve performance of networked systems (computing power network (CPN), cross-domain data management, data field, AIOPS, etc.).
- Re-architecting QUIC/TCP for real-time audio/video transmission for a better user experience.



# 本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 标准化组织

1.7 互联网发展史与启示

- 1. 协议设计目的
- 2. 协议分层结构
- 3. 服务原语
- 4. 服务与协议的关系





# 为什么需要协议？



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## 人们之间的信息交互



有同学提问吗 ?  
我有问题  
请说  
为什么需要协议 ?



time

交流的基础：  
共同的语言、互相理解，  
共同语义.....

## 计算机之间的信息交互



连接请求



连接响应

获取文件

发送文件

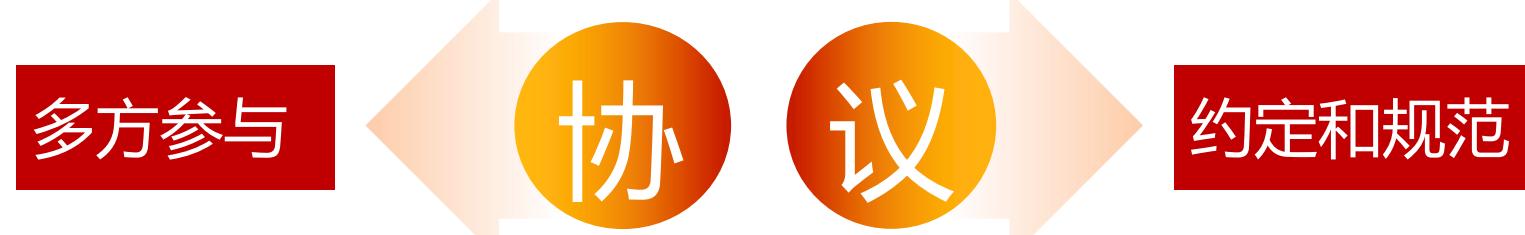
如何能实现互相理解 ?



# 什么是协议？



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



## 网络协议：

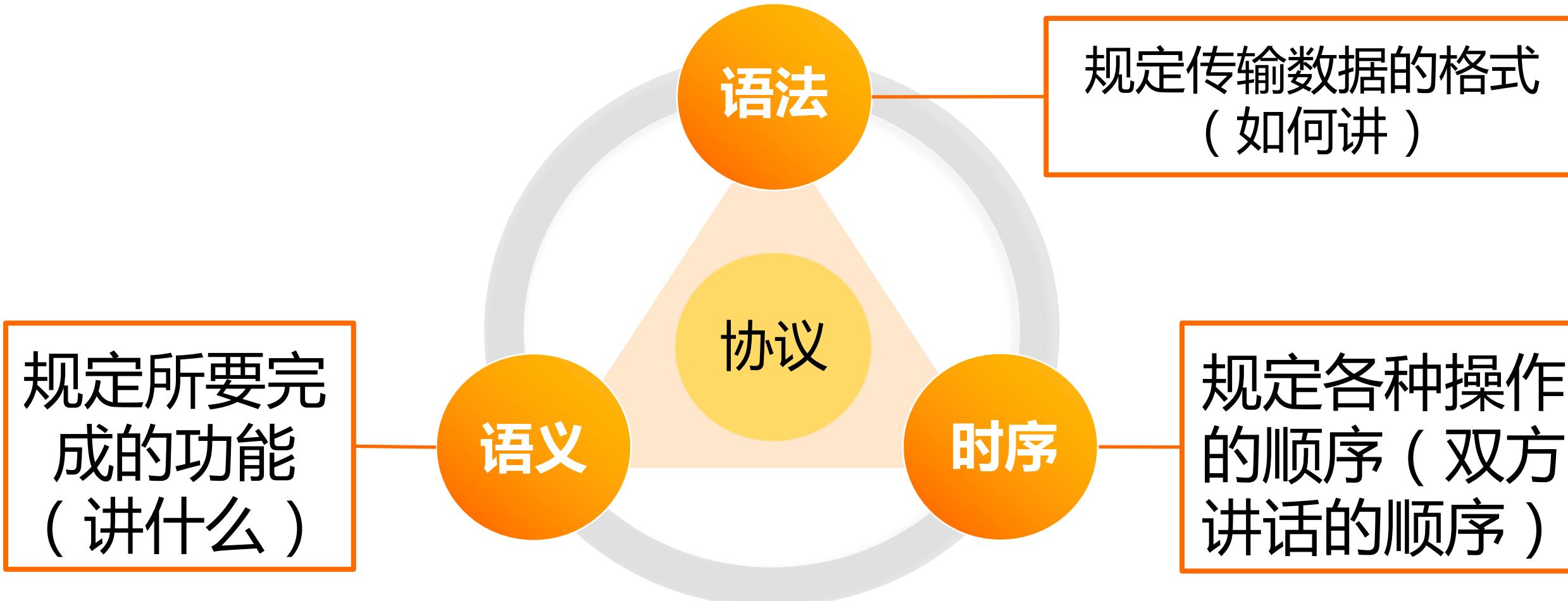
- 为**多方参与**的网络中的信息传递而建立的**约定和规范**，即网络协议(network protocol)
- 通信多方需要共同遵守，互相理解



# 协议三要素



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA





# HTTP (超文本传输协议)



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

HTTP : HyperText Transfer Protocol



客户端

HTTP请求

HTTP响应



服务端

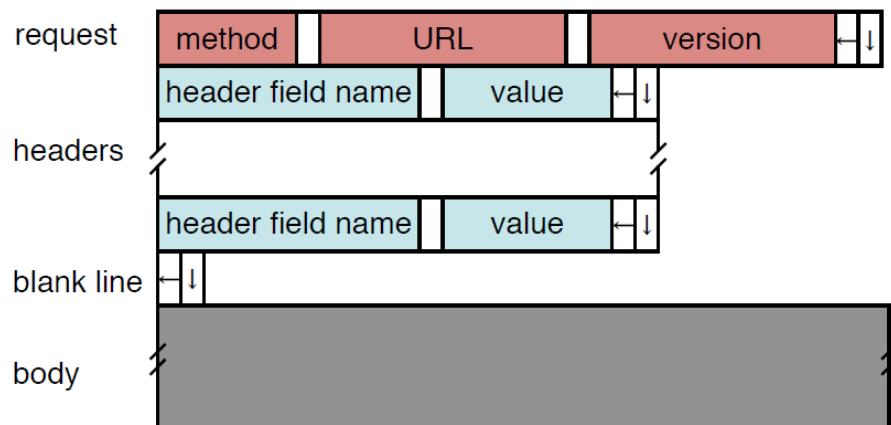


# HTTP协议的语法



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 语法：规定传输数据的格式（如何讲）



HTTP 请求格式

五大类 HTTP 状态码		
	具体含义	常见的状态码
1xx	提示信息，表示目前是协议处理的中间状态，还需要后续的操作；	
2xx	成功，报文已经收到并被正确处理；	200、204、206
3xx	重定向，资源位置发生变动，需要客户端重新发送请求；	301、302、304
4xx	客户端错误，请求报文有误，服务器无法处理；	400、403、404
5xx	服务器错误，服务器在处理请求时内部发生了错误。	500、501、502、503

图片来源：图解网络小林coding



# 404

Uh oh! Looks like something broke.

[Take Me Away](#)

or [Report This](#)

# 502

Bad Gateway



# HTTP协议的语义



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

➤ 语义：规定所要完成的功能（讲什么）

我要访问  
这个网站！

请求	GET /index.html HTTP/1.1 Host: www.ruc.edu.cn
响应	返回index.html的页面资源



客户端

GET请求

响应

没问题！



服务端

我要留言！



客户端

POST请求

响应

没问题！



服务端

留言成功！





# HTTP协议的时序



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

➤ 时序：规定各种操作的顺序（双方讲话的顺序）

Copyright © 2005-2022 RUC.EDU.CN  
地址：北京市海淀区中关村大街59号 邮编：100872 京公网安备110402430004号 京ICP备05066828号-1  
信息公开 | 网站地图 | 联系我们 | 隐私版权 | International Version  
Site designed by MONOKEROS & powered by Sina App Engine

16个请求 | 已传输 77.5 kB | 236 kB 项资源 | 完成用时: 1.16 秒

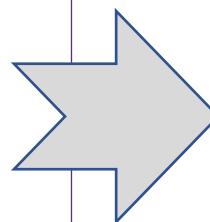
29 个请求 | 已传输 1.6 MB | 1.8 MB 项资源 | 完成用时: 4.72 秒 | DOMContentLoaded: 855 毫秒 | 加载时间: 2.06 秒



# 协议为什么要分层？



- 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
  - ...



开发个游戏直播软件，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？



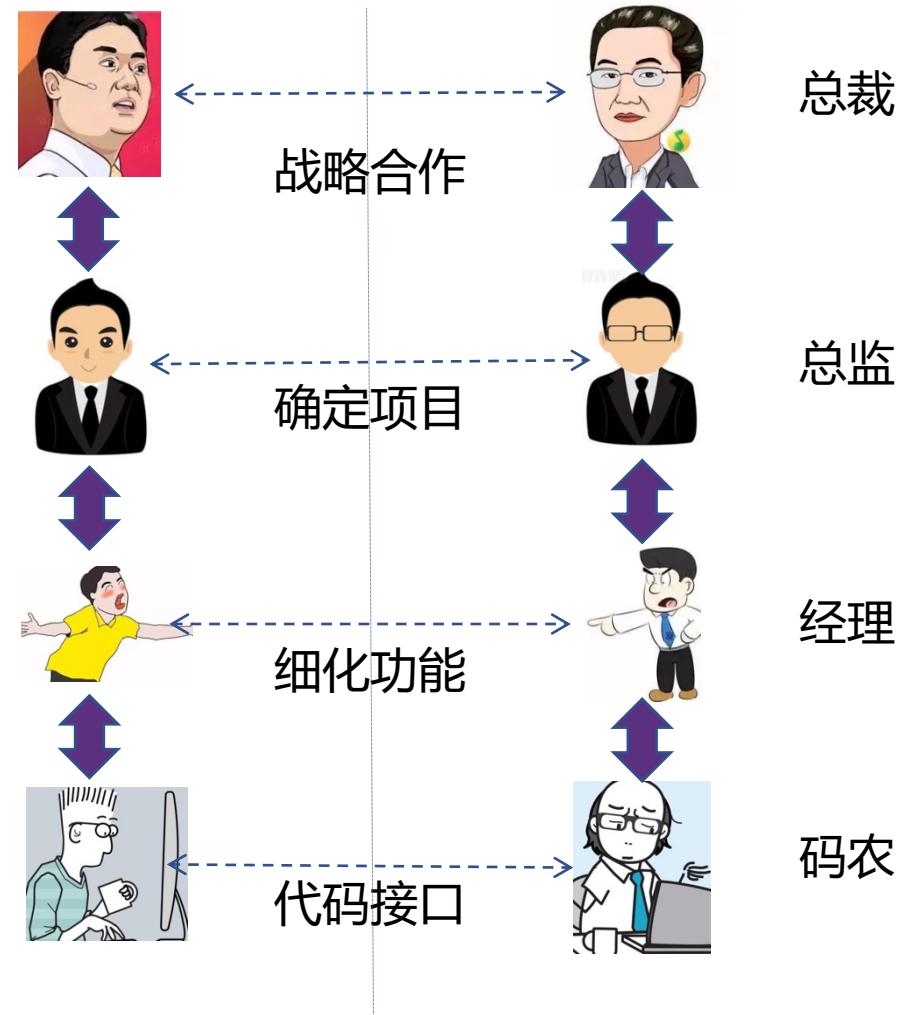
# 分层结构示例



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## 互联网大厂X讯与X东的合作

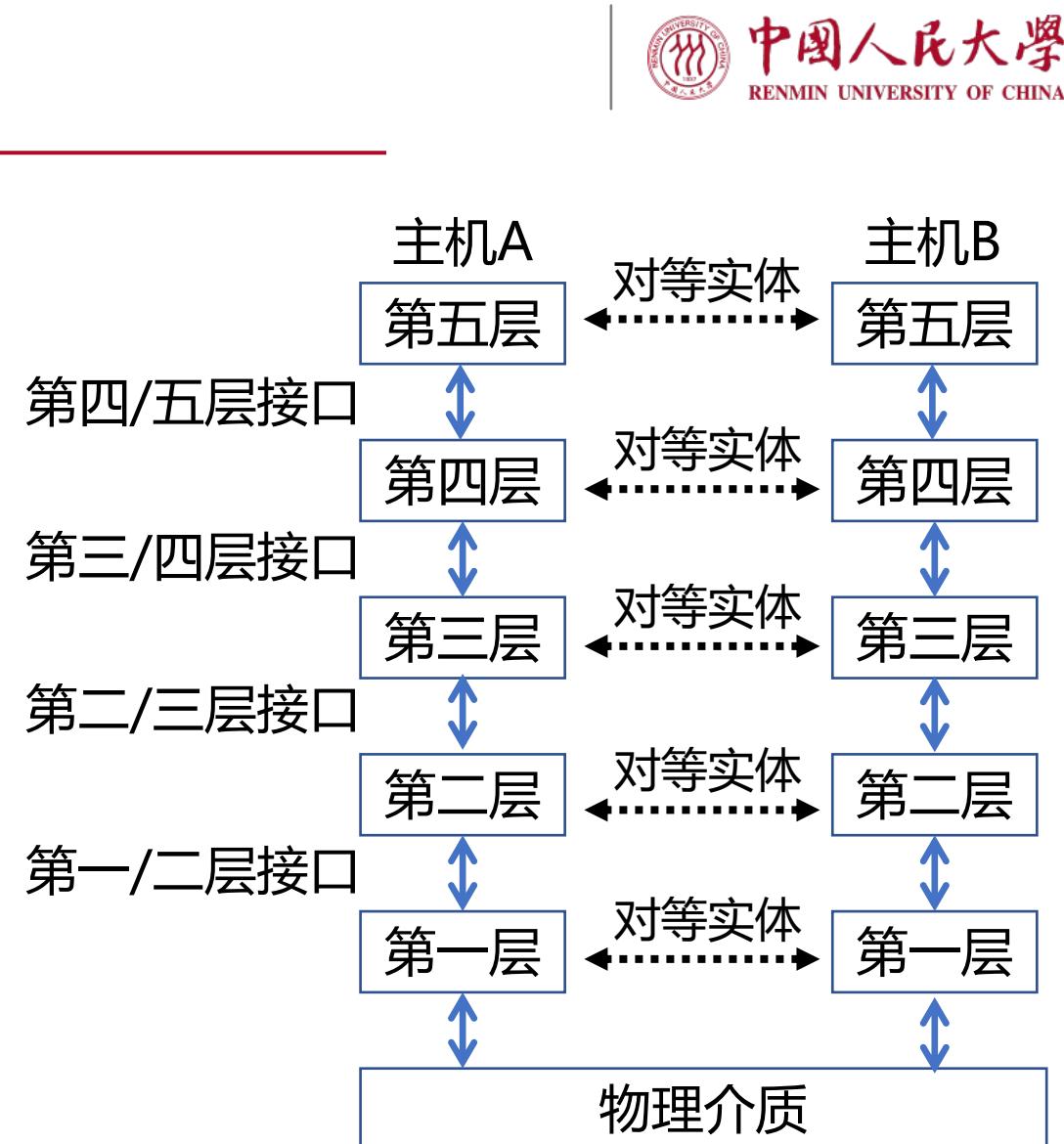
- 层级组织（分层）
  - 总裁-总监-经理-码农
- 内部独立（模块）
  - 我用Python; 我用GO
  - 铁打的项目，流水的码农
- 沟通协作（标准）
  - 合作协议、项目文档、接口定义
  - 日报、周报、月报





# 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，每一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

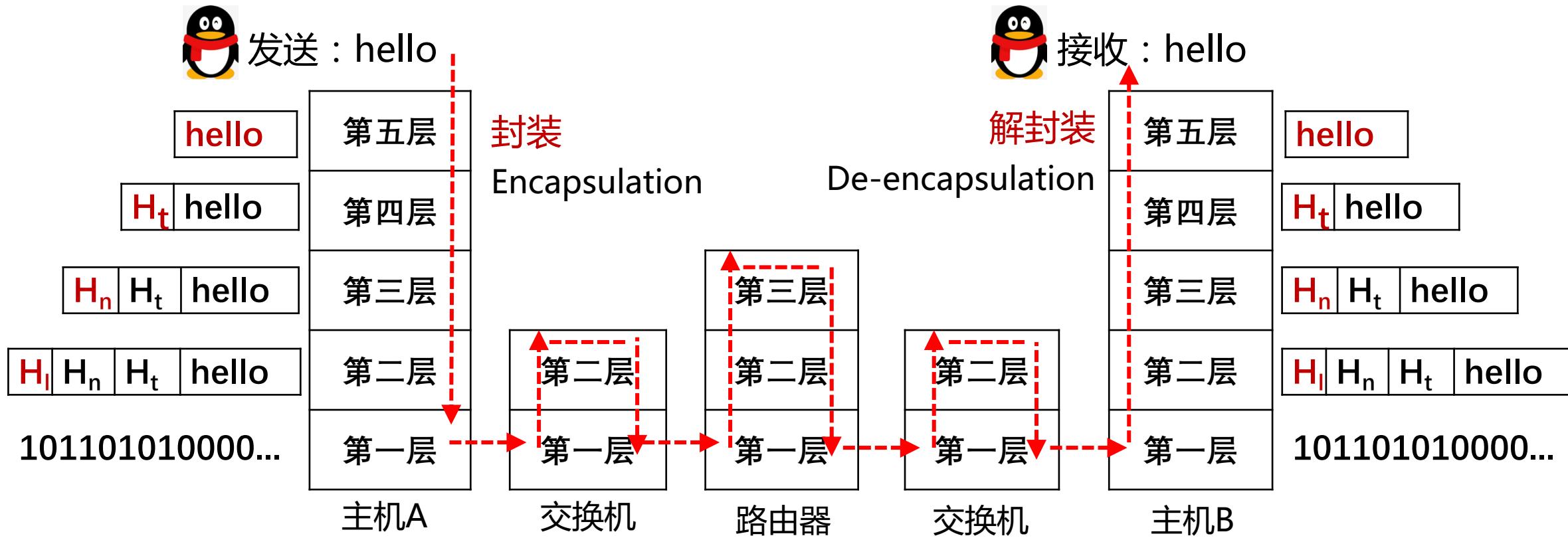




# 协议分层结构



- 发送端：层层封装；接收端：层层解封装
- 不同层对应协议数据单元（PDU Protocol Data Unit）





- 每一层可向上层提供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



## ➤ 无连接：按照邮政系统模型建立的（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



## ➤ 面向连接服务(connection-oriented)

- 每个“请求”或“响应”后，都在对方产生一个“指示”或“确认”动作
- 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

## ➤ 无连接服务(connectionless)

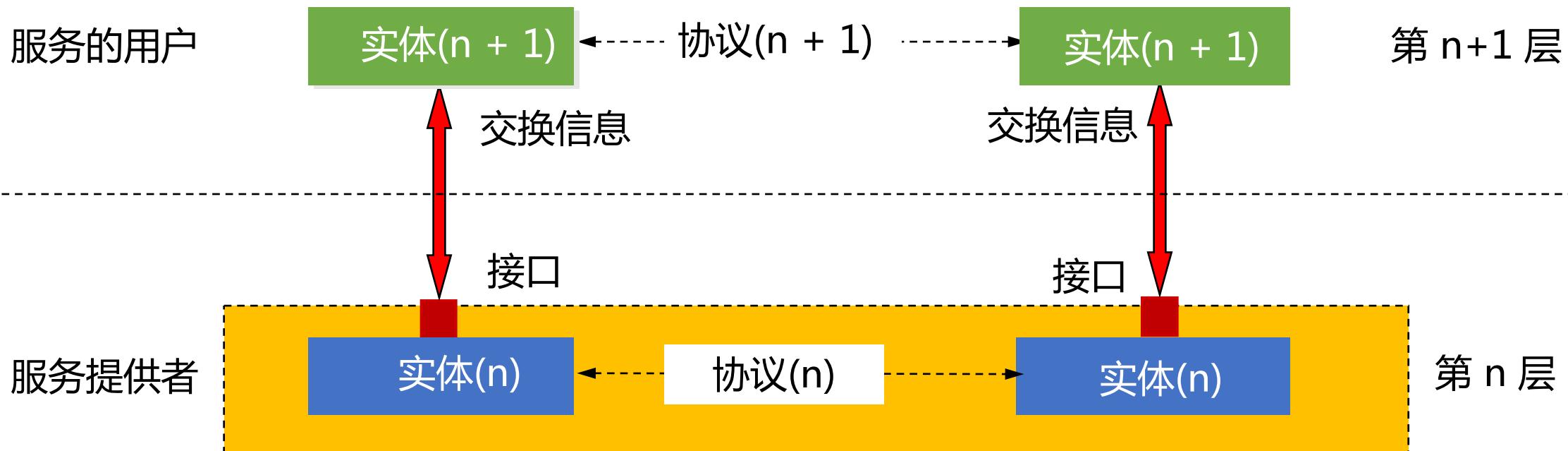
- 两个实体之间的通信不需要先建立好连接，无需应答
- 是一种不可靠的服务，这种服务常被描述为“尽力交付”(best effort delivery)或“尽力而为”



# 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
- 上层实体通过接口使用下层实体的服务





# 目 录



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## 1.1 初识互联网

## 1.2 网络实例

## 1.3 协议与分层结构

## 1.4 参考模型

## 1.5 计算机网络度量单位

## 1.6 标准化组织

## 1.7 互联网发展史与启示

1. OSI参考模型
2. TCP/IP参考模型
3. OSI模型TCP/IP模型对比
4. 课程内容的分层组织
5. 模型与网络实例



- OSI 7 层模型
  - OSI : Open Systems Interconnection
  - Day, Zimmermann, 1983
- 物理层 ( Physical Layer )
  - 定义如何在信道上传输0、1 : Bits on the wire
  - 机械接口 ( Mechanical ) : 网线接口大小形状、线缆排列等
  - 电子信号 ( Electronic ) : 电压、电流等
  - 时序接口 ( Timing ) : 采样频率、波特率、比特率等
  - 介质 ( Medium ) : 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



- 数据链路层 (Data Link Layer)
  - 实现相邻 ( Neighboring ) 网络实体间的数据传输
  - 成帧 ( Framing ) : 从物理层的比特流中提取出完整的帧
  - 错误检测与纠正 : 为提供可靠数据通信提供可能
  - 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
  - 流量控制 , 避免 “淹没” ( overwhelming ) : 当快速的发送端遇上慢速的接收端 , 接收端缓存溢出
  - 共享信道上的访问控制 ( MAC ) : 同一个信道 , 同时传输信号。如同 : 同一间教室内 , 多人同时发言 , 需要纪律来控制
  - ...

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



## ➤ 网络层 (Network Layer)

- 将数据包跨越网络从源设备发送到目的设备 ( host to host )
- 路由 ( Routing ) : 在网络中选取从源端到目的端转发路径 , 常常会根据网络可达性动态选取最佳路径 , 也可以使用静态路由
- 路由协议 : 路由器之间交互路由信息所遵循的协议规范 , 使得单个路由器能够获取网络的可达性等信息
- 服务质量 ( QoS ) 控制 : 处理网络拥塞、负载均衡、准入控制、保障延迟
- 异构网络互联 : 在异构编址和异构网络中路由寻址和转发

思考 : 为何在唯一的MAC地址之外 , 还需要唯一的IP地址 ?

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



## ➤ 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：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：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



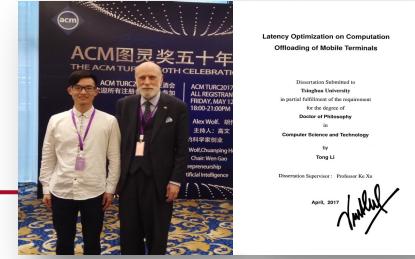
- 会话层 (Session Layer)
  - 利用传输层提供的服务，在应用程序之间建立和维持会话，并能使会话获得同步
- 表示层 (Presentation Layer)
  - 关注所传递信息的语法和语义，管理数据的表示方法，传输的数据结构
- 应用层 (Application Layer)
  - 通过应用层协议，提供应用程序便捷的网络服务调用

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

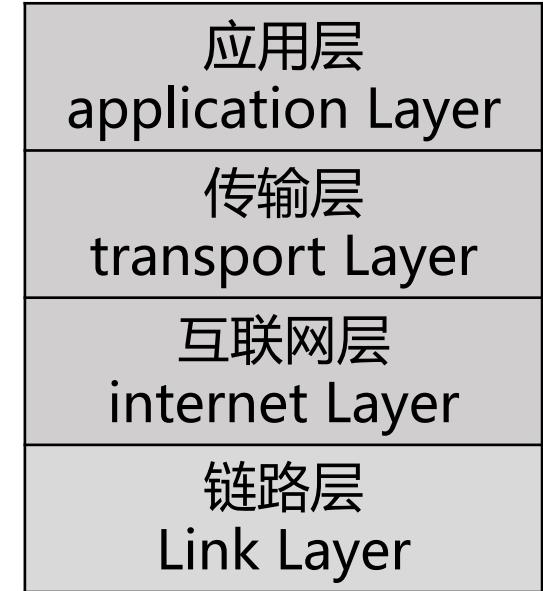


# TCP/IP参考模型

- 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
- 链路层 ( Link Layer )
  - 描述了为满足无连接的互联网络层需求，链路必须具备的功能
- 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...



ARPNET  
最终采用TCP和IP  
为主要协议



- 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



- TCP/IP参考模型：核心简单，边缘复杂
  - 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



# OSI模型与TCP/IP模型比较



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 7层模型与4层模型

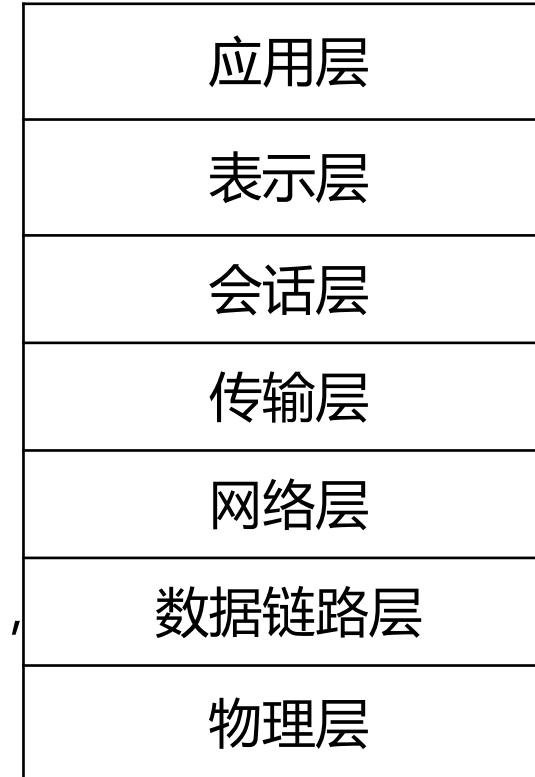
- TCP/IP模型的链路层定义主机与传输线路之间的接口，描述了链路为无连接的互联网层必须提供的基本功能
- TCP/IP模型的互联网层、传输层与OSI模型的网络层、传输层大致对应
- TCP/IP模型的应用层包含了OSI模型的表示层与会话层

## ➤ 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）



OSI 7层模型



TCP/IP 4层模型



## OSI的失败：糟糕的时机、技术、实现、政策

### OSI模型的不足

- 从未真正被实现
  - TCP/IP已成为事实标准，OSI缺少厂家支持
- 技术实现糟糕
  - 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
  - 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模型的不足

- 核心概念未能体现
  - 未明确区分服务、接口和协议等核心概念
- 不具备通用性
  - 不适于描述TCP/IP之外的其它协议栈
- 混用接口与分层的设计
  - 链路层和物理层没有真正意义上的分层
- 模型欠缺完整性
  - 未包含物理层与数据链路层
  - 物理层与数据链路层是至关重要的部分



# 本教程内容的分层组织



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



OSI 7层模型



TCP/IP 4层模型



本教程的分层组织

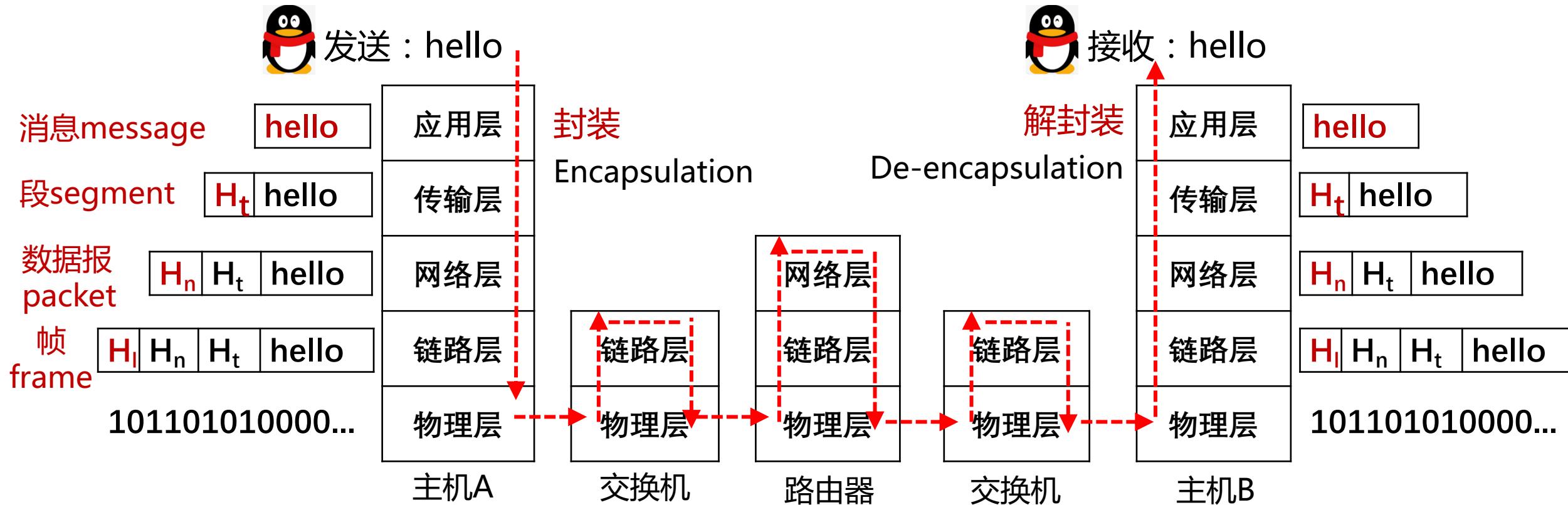
- 突出核心概念
- 区分接口与分层
- 体现完整性
- 体现通用性
- 简化分层，易于教学



# 分层模型与网络实例



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



- 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
- 不同层对应协议数据单元 ( PDU Protocol Data Unit )

# 数据链路层 要点概述



# 数据链路层在协议栈中的位置



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 向下：利用物理层提供的位流服务
- 向上：向网络层提供**明确的** (well-defined) 服务接口



参考协议栈



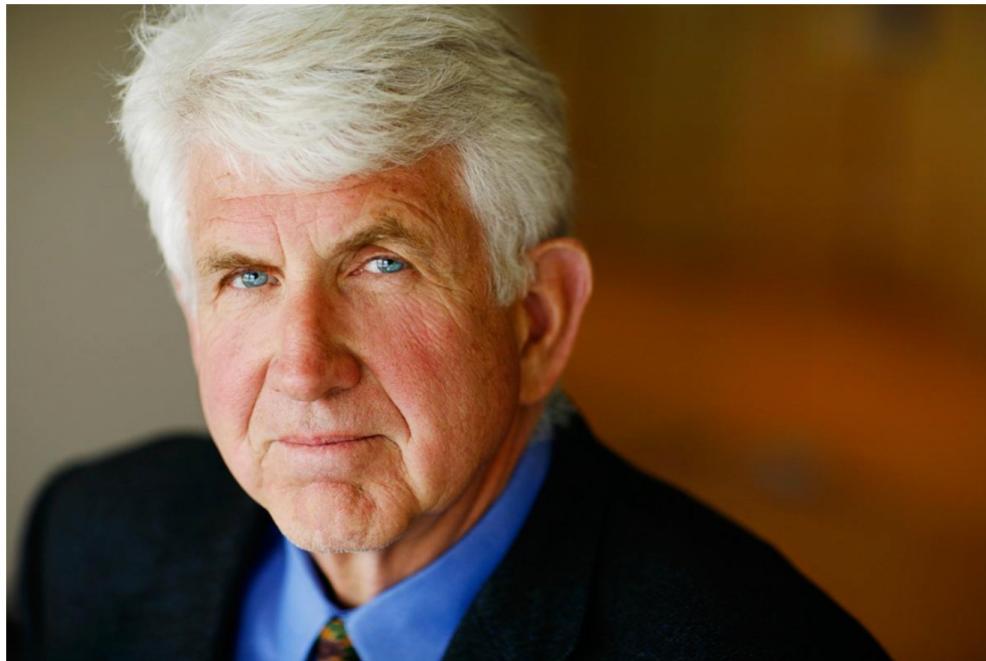
# 以太网的前世今生



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

以太网之父Bob Metcalfe荣获图灵奖，其同名定律成为互联网经济基石

智源社区 智源社区 2023-03-22 18:47 发表于北京

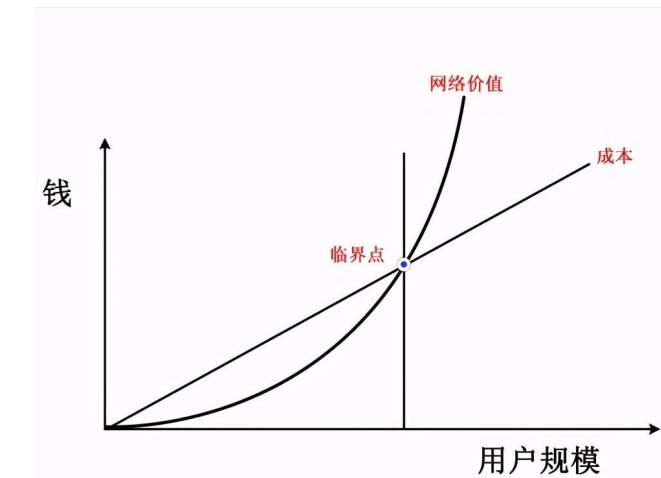
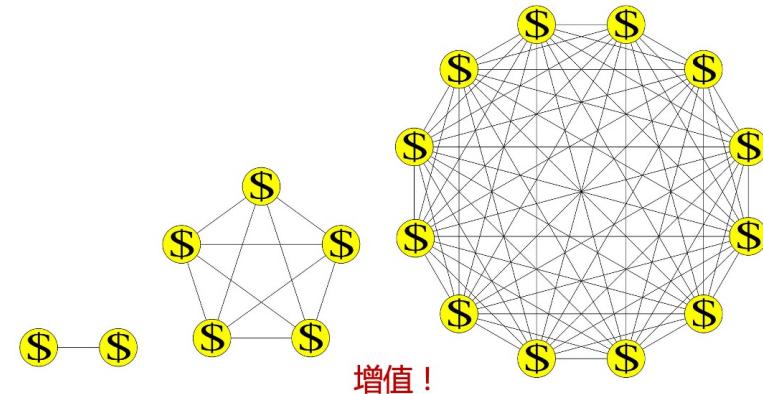


就在刚刚，现年76岁的以太网发明者、3Com公司创始人鲍勃·梅特卡夫（Bob Metcalfe）荣获图灵奖。

鲍勃·梅特卡夫（Bob Metcalfe）于1946年出生在美国纽约，是一位享誉全球的计算机科学家、工程师和企业家。他在计算机和通信领域作出了杰出的贡献，尤其是以太网（Ethernet）的发明成为了他最为人称道的成就。

## ➤ 梅特卡夫定律

- 一个系统的价值与组成该系统的网络节点数的平方成正比





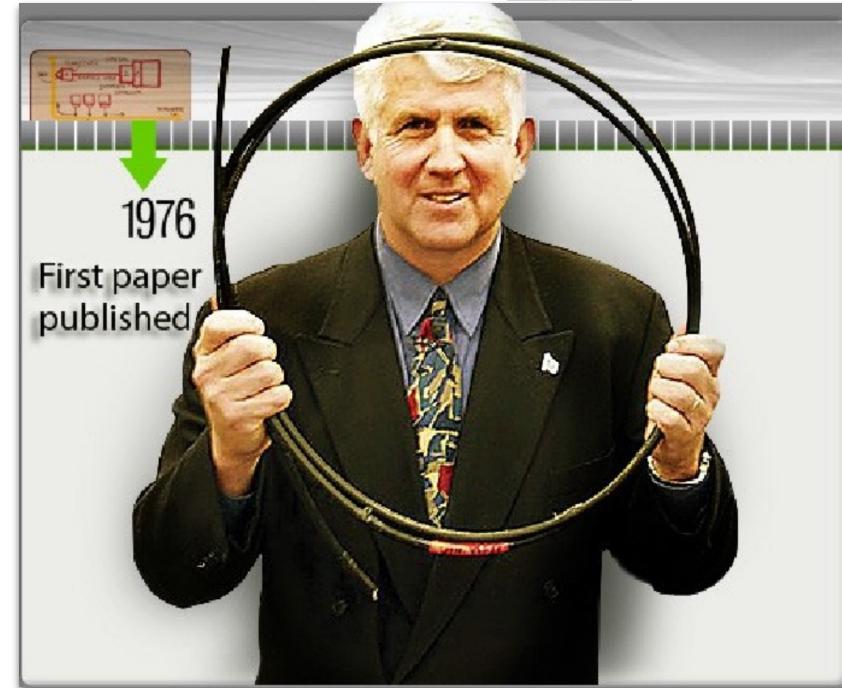
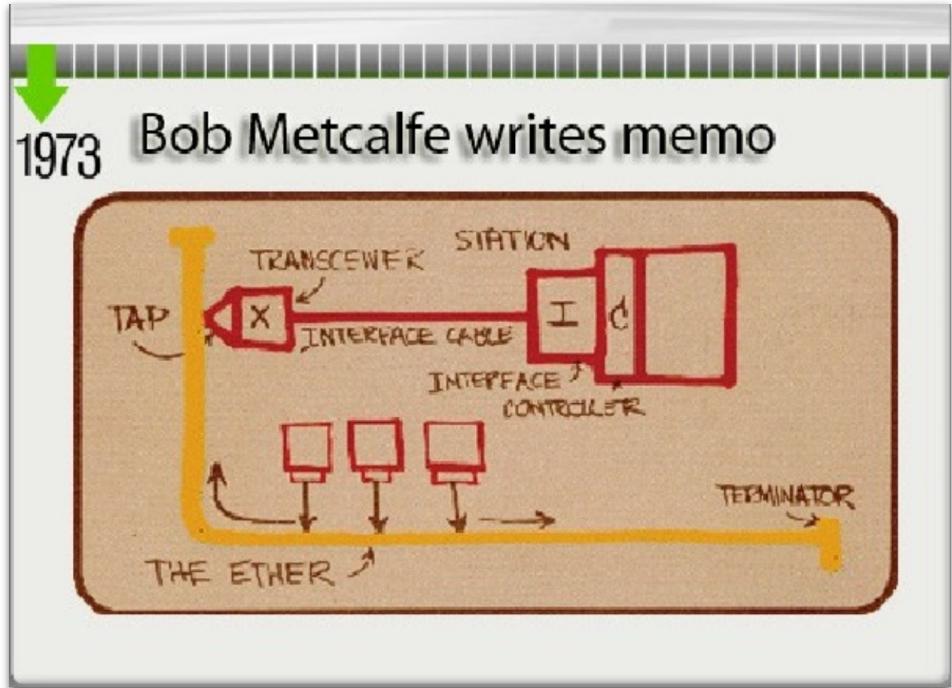
# 以太网的前世今生

➤ 夏威夷大学Norman Abramson及他的同事设计

➤ ALOHANet：连接檀香山和其它岛屿

➤ 两个版本

- 纯ALOHA协议  
(Pure ALOHA)
- 分隙ALOHA协议  
(Slotted ALOHA)



➤ Bob Metcalfe设计的在同轴电缆上实现3Mbps以太网连接方案的备忘录

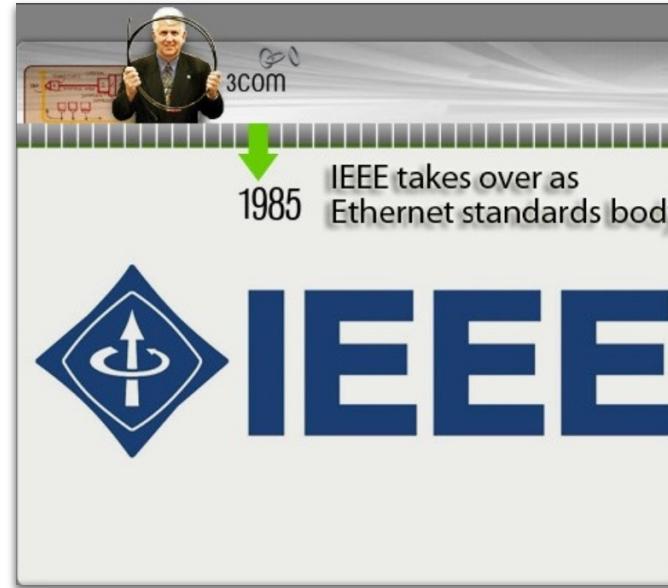
➤ Metcalfe和David Boggs发表了题为《以太网：本地计算机网络的分布式包交换方式》的论文



# 以太网的前世今生



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



➤ Metcalfe离开施乐创办3Com。第二年，他又发表了**10Mbps**以太网的标准，也就是DIX标准

➤ IEEE成为以太网的官方标准化组织。开放的标准帮助以太网成了占绝对支配地位的LAN技术

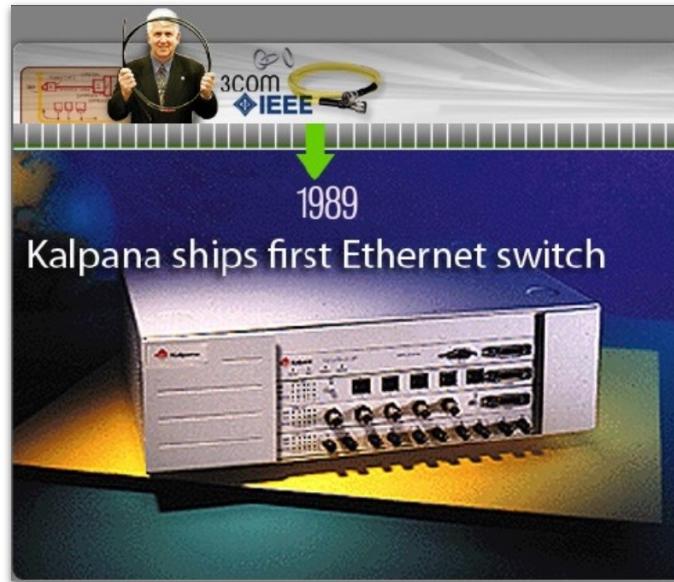
➤ IEEE发表了**10Base5**以太网标准，也称粗以太网



# 以太网的前世今生



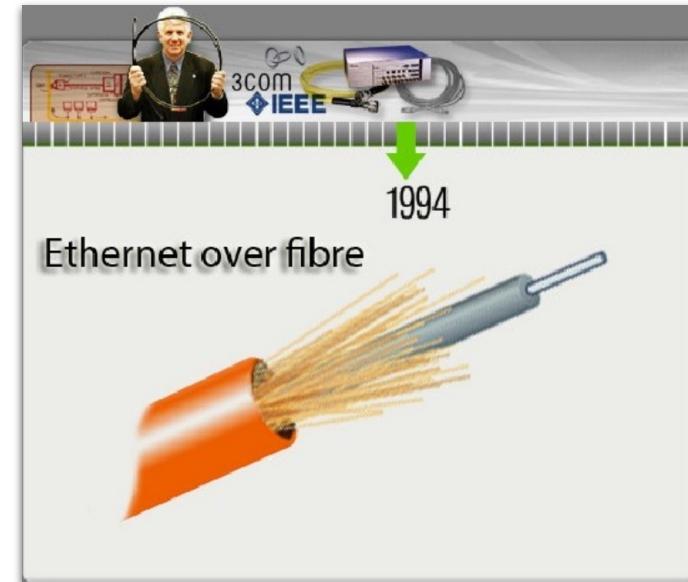
中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



1989  
Kalpana ships first Ethernet switch



1991 Twisted pair to the rescue



1994 Ethernet over fibre

➤ Kalpana推出了第一台以太网交换机，最终取代了网桥和集线器

➤ IEEE批准了Cat-3双绞线10Base-T以太网，很快成为LAN部署的标准配置

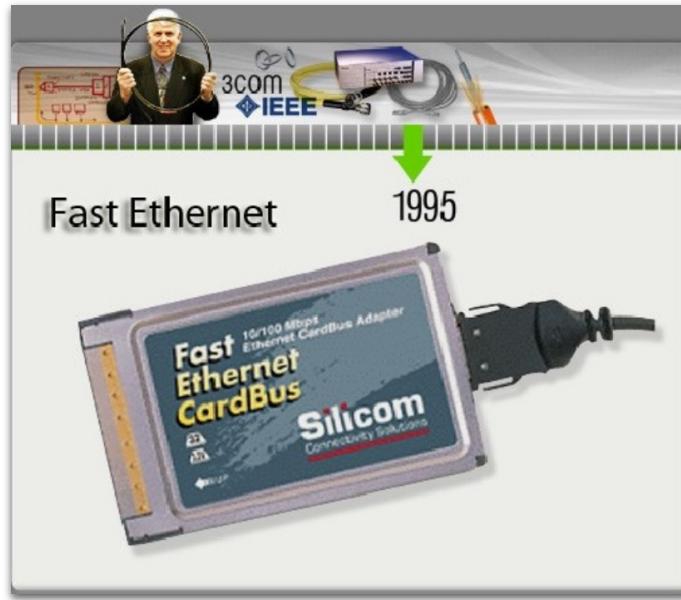
➤ IEEE批准10BaseF标准，即数据中心所用的光纤以太网标准



# 以太网的前世今生



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



➤ IEEE批准了**100Mbps**以太网标准。后被称为**快速以太网**( Fast Ethernet )

➤ 千兆以太网标准**1000Base-T**获得通过

➤ 2001年，**万兆以太网**的标准前产品开始问世，正式标准在2002年获得通过

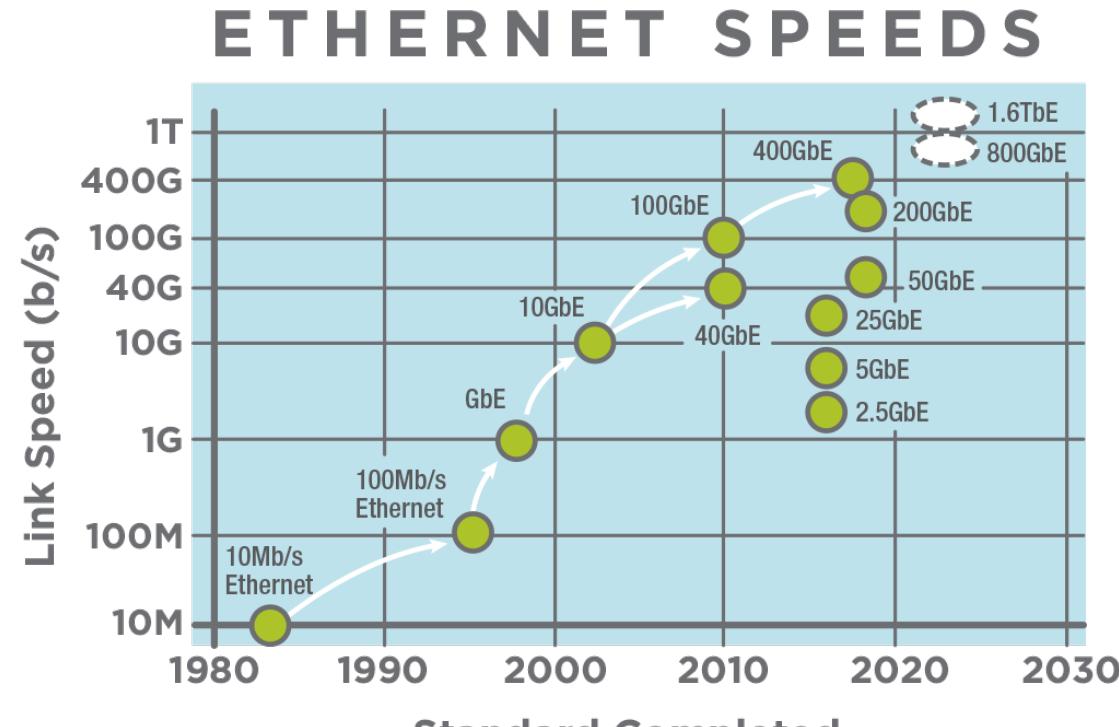


# 以太网的前世今生



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 40G/100G 以太网标准在2010年中制定完成，当前使用附加标准IEEE 802.3ba用以说明
- 2014年，成立200 Gb/s和400 Gb/s以太网标准工作组IEEE P802.3bs



Ethernet Speed      Possible Future Speed

NEXT  
ETHERNET  
ERA  
e  
ethernet alliance

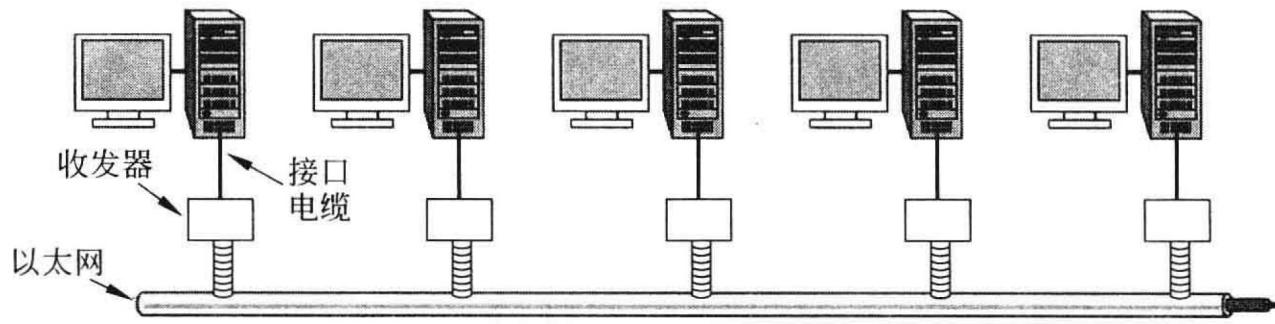
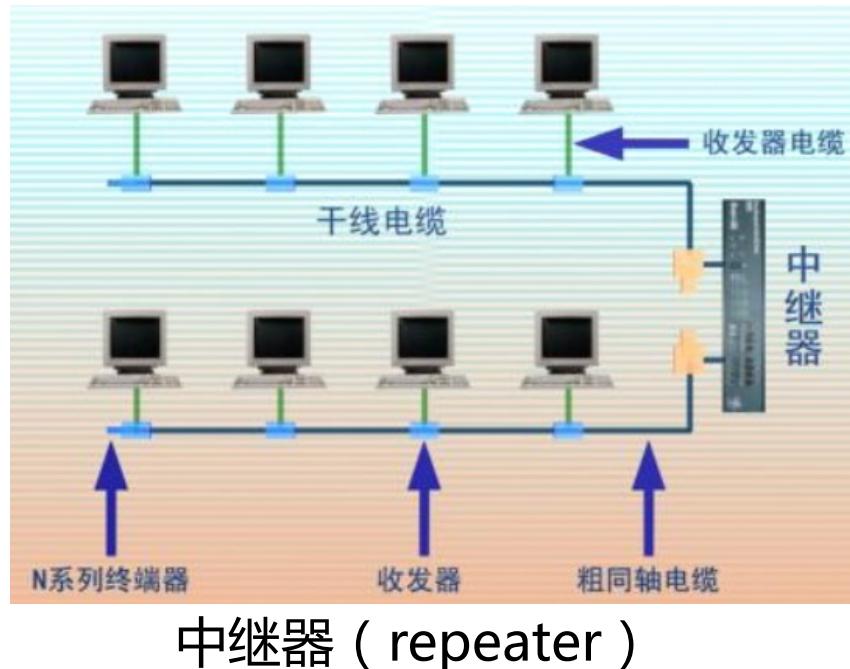


# 经典以太网 - 经典以太网的物理层



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 最高速率 **10Mbps**
- 使用 **曼彻斯特编码**
- 使用 **同轴电缆和中继器连接**



粗以太网 ( thick Ethernet )



BNC T型  
连接器



连接至以  
太网卡

细以太网 ( thin Ethernet )

任意两个收发器之间距离**不得超过2.5km**  
且任意两个收发器之间经过的中继器不能超过4个  
以保证MAC协议正常工作

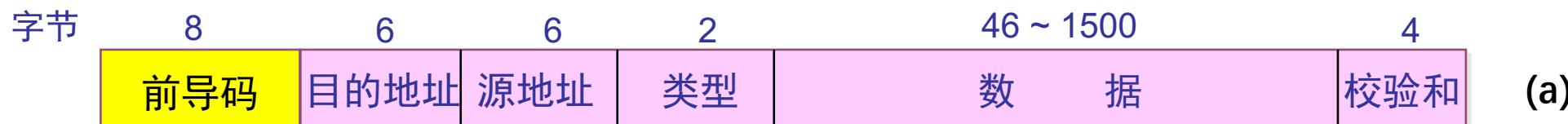
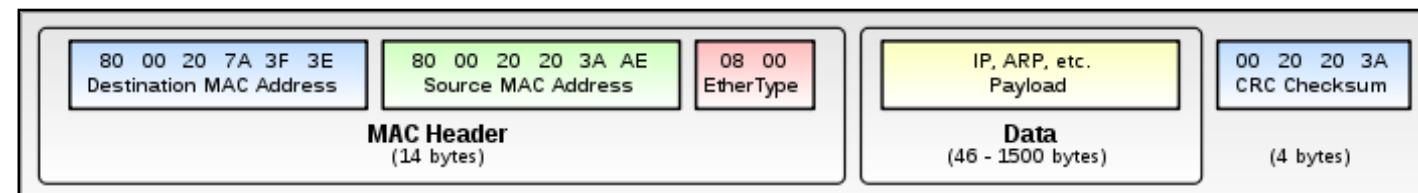


# 经典以太网 - MAC子层协议



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 主机运行CSMA/CD协议
- 常用的以太网MAC帧格式有两种标准：
  - DIX Ethernet V2 标准（最常用的）
  - IEEE 的 802.3 标准



MAC帧格式  
(a) DIX Ethernet V2    (b) IEEE 802.3



# 经典以太网 - MAC子层协议



- 硬件地址又称为物理地址，或 MAC 地址
- MAC帧中的源地址和目的地址长度均为6字节

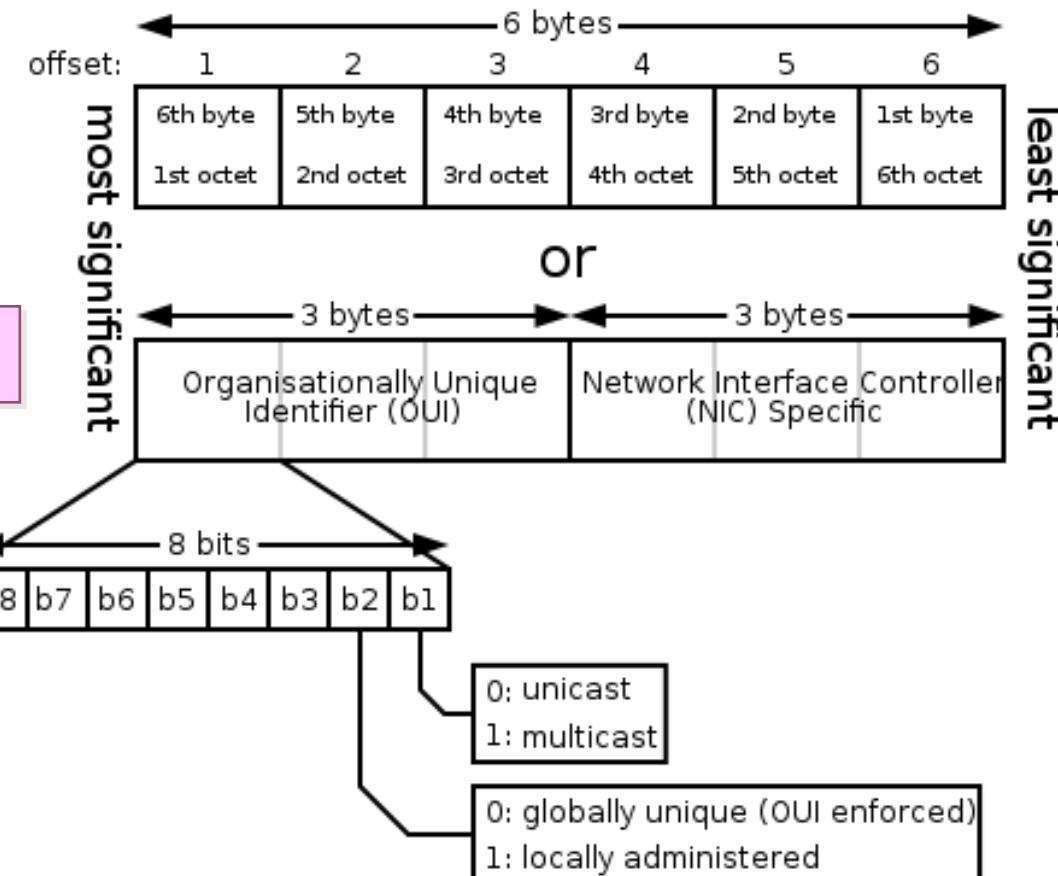


## MAC地址举例

单播 ( unicast ) : 5C-26-0A-7E-4E-4C

广播 ( broadcast ) : FF-FF-FF-FF-FF-FF

组播 ( multicast ) : 01-00-5E-00-00-00





# 经典以太网 - MAC子层协议



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- OUI(Organizationally Unique Identifier) <https://www.wireshark.org/tools/oui-lookup.html>
  - IEEE Registration Authority是负责注册和管理组织唯一标识符（OUI）的管理机构
- 在Windows上使用ipconfig /all命令查看MAC地址

```
Administrator: 命令提示符
C:\>ipconfig /all
Windows IP Configuration

Host Name . . . . . : DESKTOP-HOME
Primary Dns Suffix . . . . . :
Node Type . . . . . : Hybrid
IP Routing Enabled. . . . . : No
WINS Proxy Enabled. . . . . : No

Ethernet adapter 以太网:

Connection-specific DNS Suffix . . . . . : Intel(R) Ethernet Connection (2) I218-V
Description . . . . . : Intel(R) Ethernet Connection (2) I218-V
Physical Address. . . . . : 1C-87-2C-72-86-BC
DHC Enabled. . . . . : Yes
Autoconfiguration Enabled . . . . . : Yes
Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::80b7:4e6a:7e36:9220%16(Preferred)
IPv4 Address. . . . . : 10.0.0.21(Preferred)
Subnet Mask . . . . . : 255.255.255.0
Lease Obtained. . . . . : 2021年2月11日 13:33:27
Lease Expires . . . . . : 2021年2月16日 10:27:57
Default Gateway . . . . . : 10.0.0.1
DHCP Server . . . . . : 10.0.0.1
DHCPv6 IAID . . . . . : 52201260
DHCPv6 Client DUID. . . . . : 00-01-00-01-1D-DA-2A-02-1C-87-2C-72-86-BC
DNS Servers . . . . . : 10.0.0.1
NetBIOS over Tcpip: . . . . . : Enabled
```





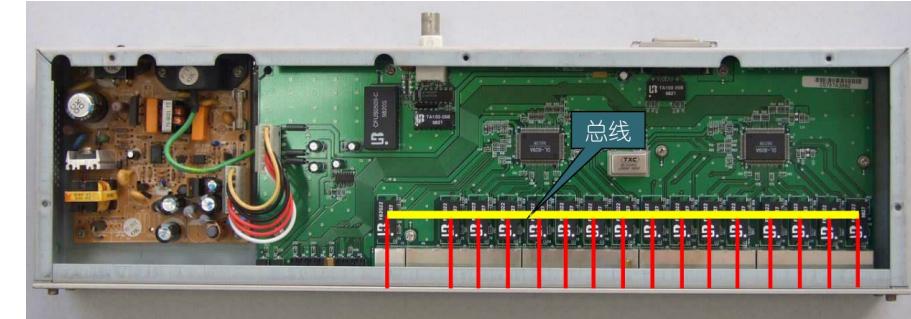
# 交换式以太网



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 使用集线器（HUB）组建以太网

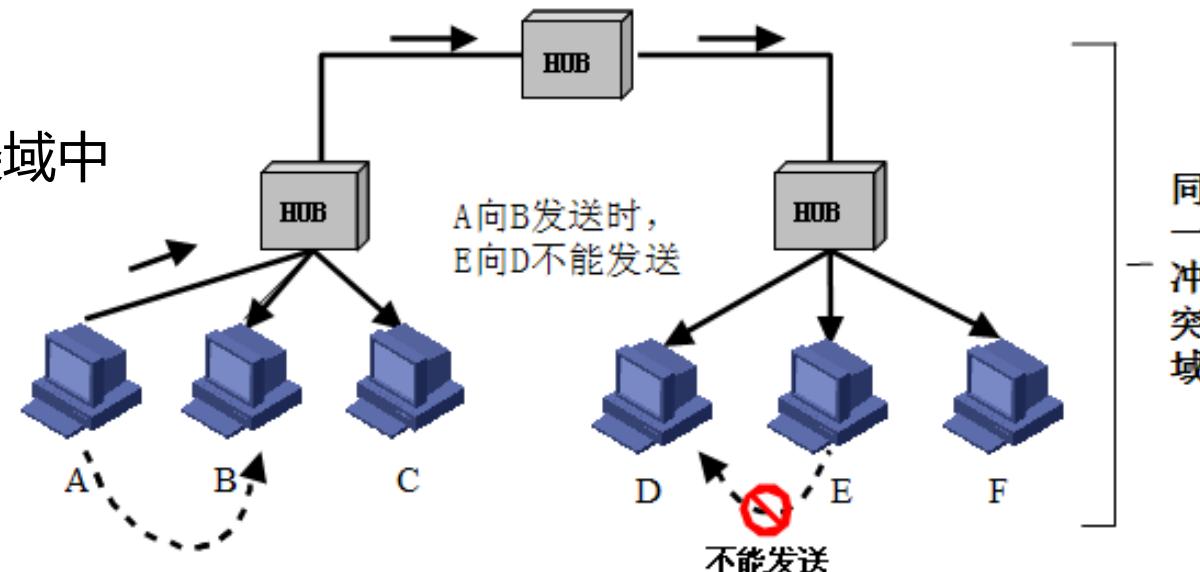
- Hub所有端口内部都是连通的
- 使同一根总线
- 和中继器Repeater一样，也是物理层设备



## ➤ 使用Hub扩展以太网

- 集线器不能增加容量
- 用集线器组成更大的局域网都在一个冲突域中
- Hub级连：限制了网络的可扩展性

Switched Ethernet  
to the rescue!





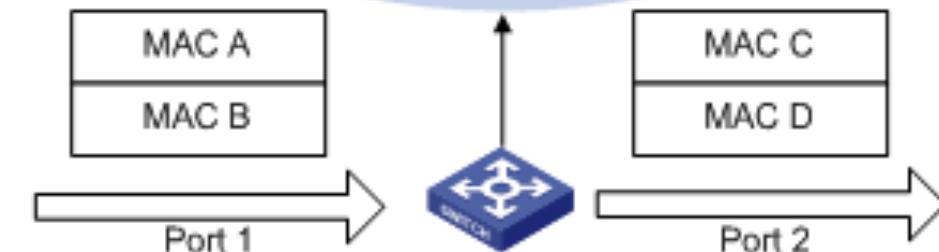
# 交换式以太网



- 交换式以太网的核心是**交换机 ( Switch )**
- 工作在数据链路层，检查MAC 帧的**目的地址**对收到的帧进行转发
- 交换机通过高速背板把帧传送到目标端口



MAC address	Port
MAC A	1
MAC B	1
MAC C	2
MAC D	2





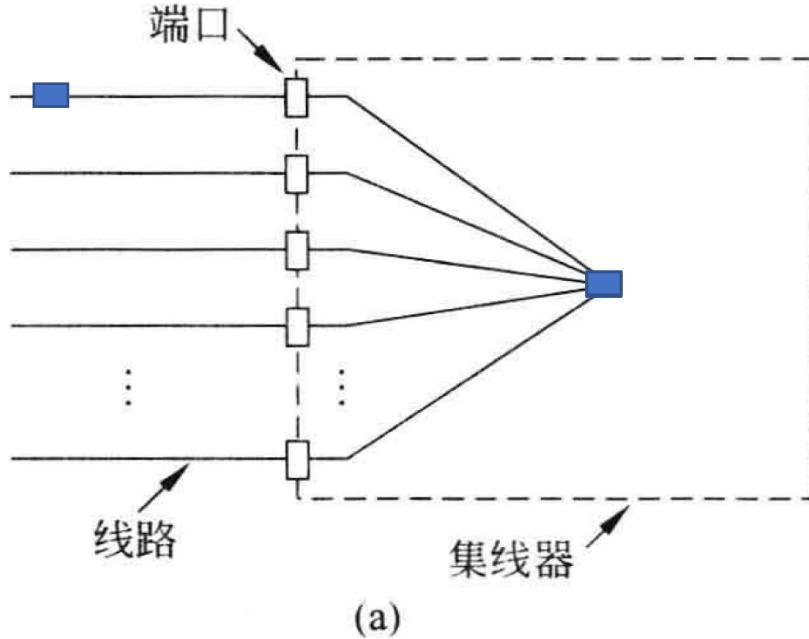
# 交换式以太网



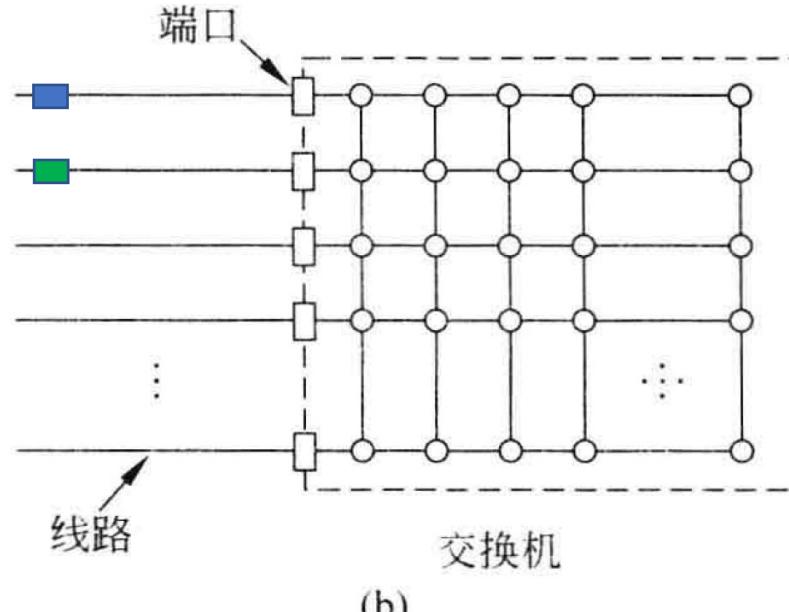
中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## Hub vs Switch

**WINNER**



(a)



(b)

- 内部连接所有线缆，逻辑上等同于**单根总线**的经典以太网
- 所有站都位于**同一个冲突域**，必须使用CSMA/CD协议

- 内部通过**高速背板**连接所有端口
- 每个端口都有独立的冲突域，在**全双工**模式下端口可以同时收发，则不需要CSMA/CD
- 可以实现**并行**传输

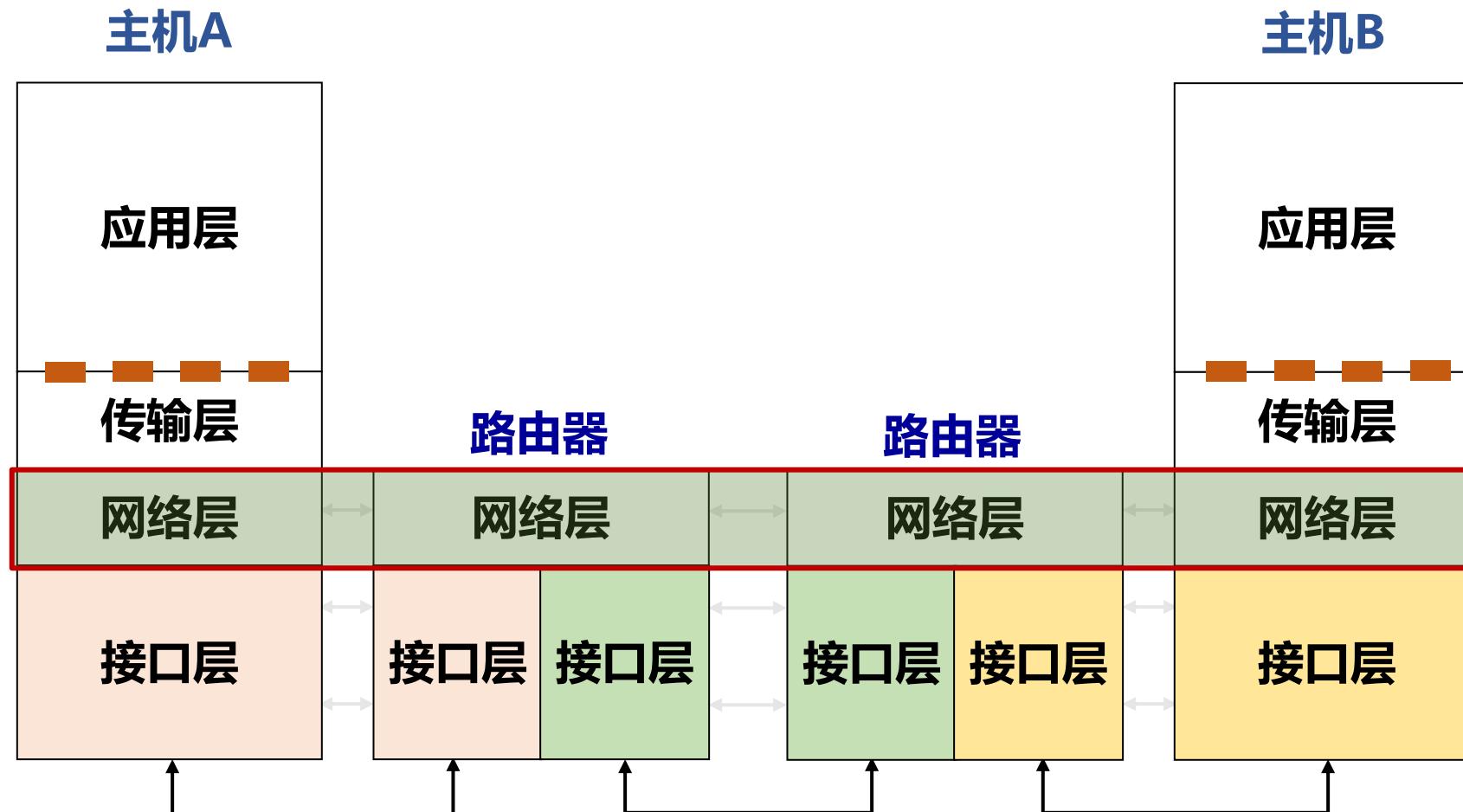
# 网络层 要点概述



# 网络层服务概述

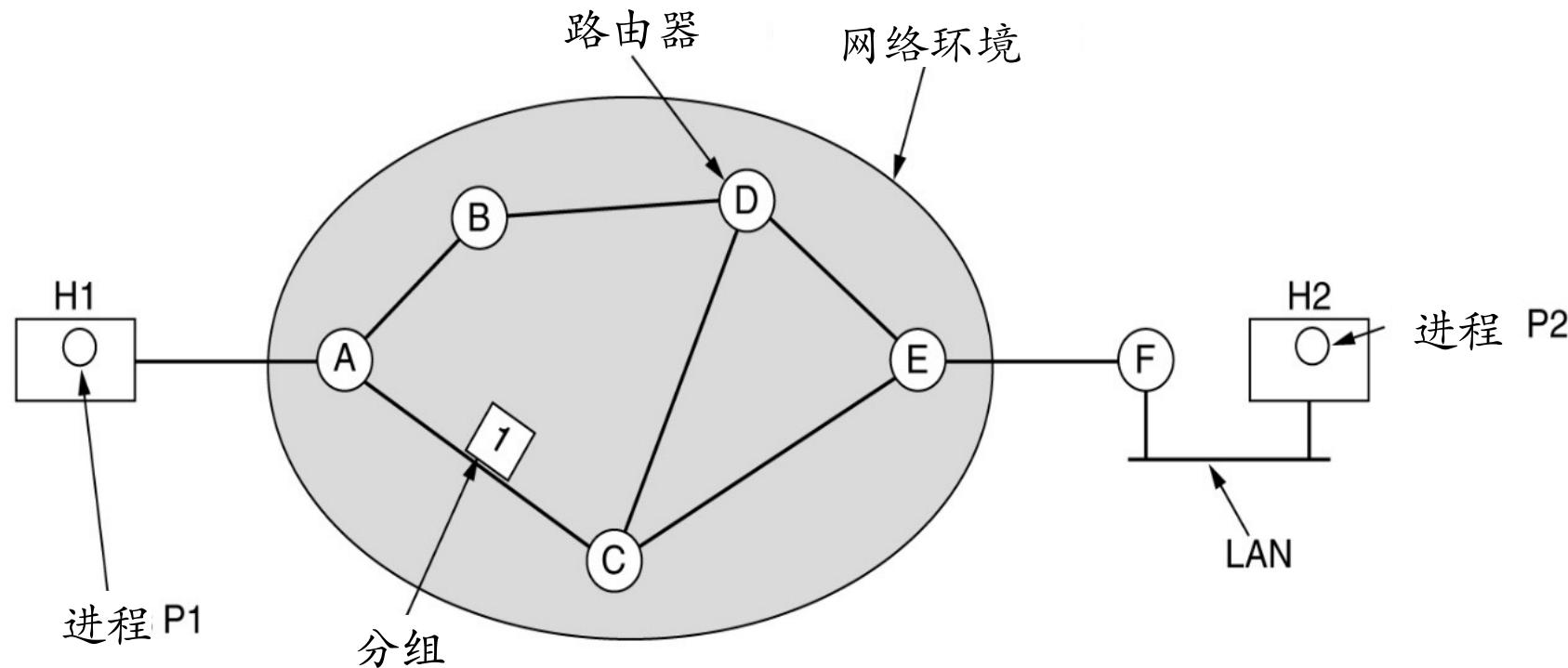


中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



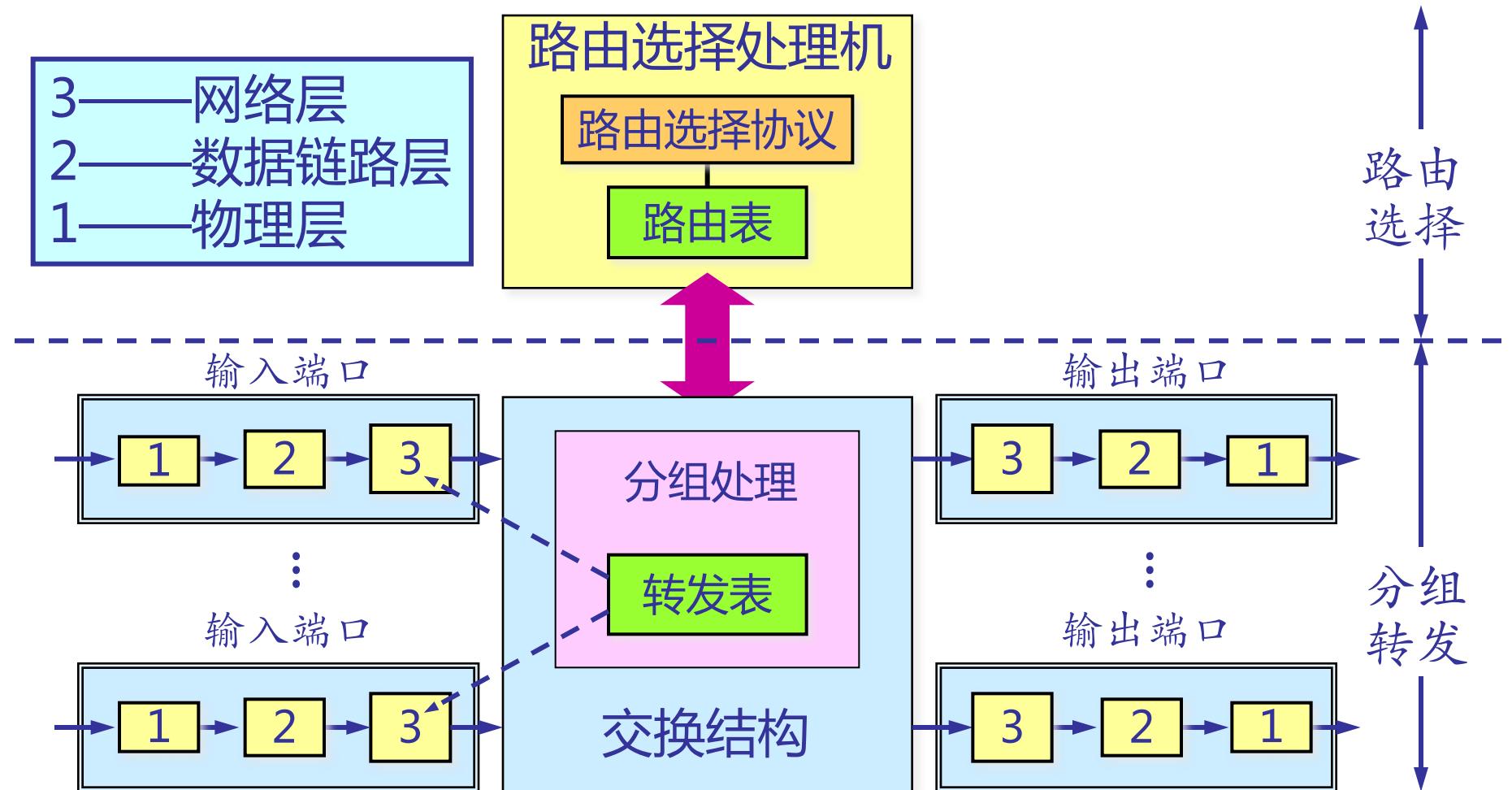


# 网络层基础概念





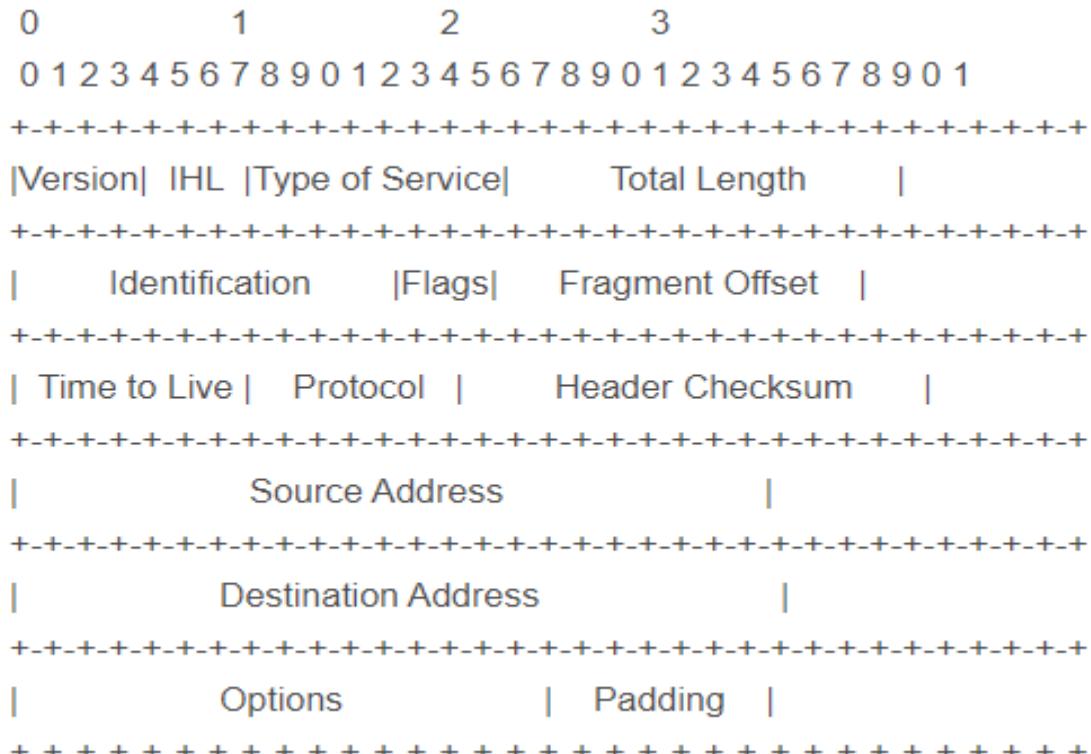
# 典型的路由器的结构





- IPv4协议，网际协议版本4，一种无连接的协议，是互联网的核心，也是使用最广泛的网际协议版本，其后继版本为IPv6

- Internet协议执行两个基本功能
  - 寻址(addressing)
  - 分片(fragmentation)



RFC 791



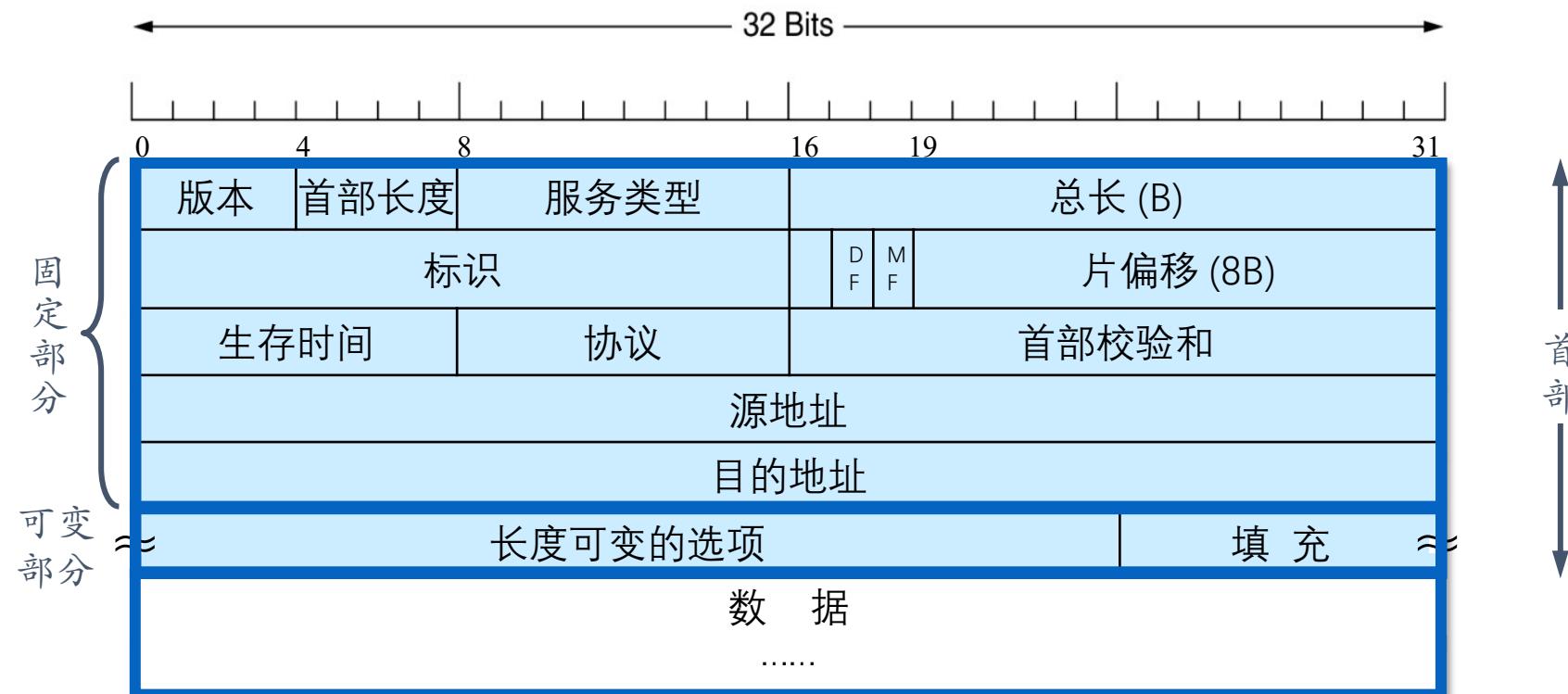
# IPv4分组格式 (1)



➤ IP分组由**首部**和**数据**两部分组成



- 首部的前一部分是固定长度，共 20 字节，是所有 IP分组必须具有的
- 在首部的固定部分的后面是一些可选字段，其长度是可变的

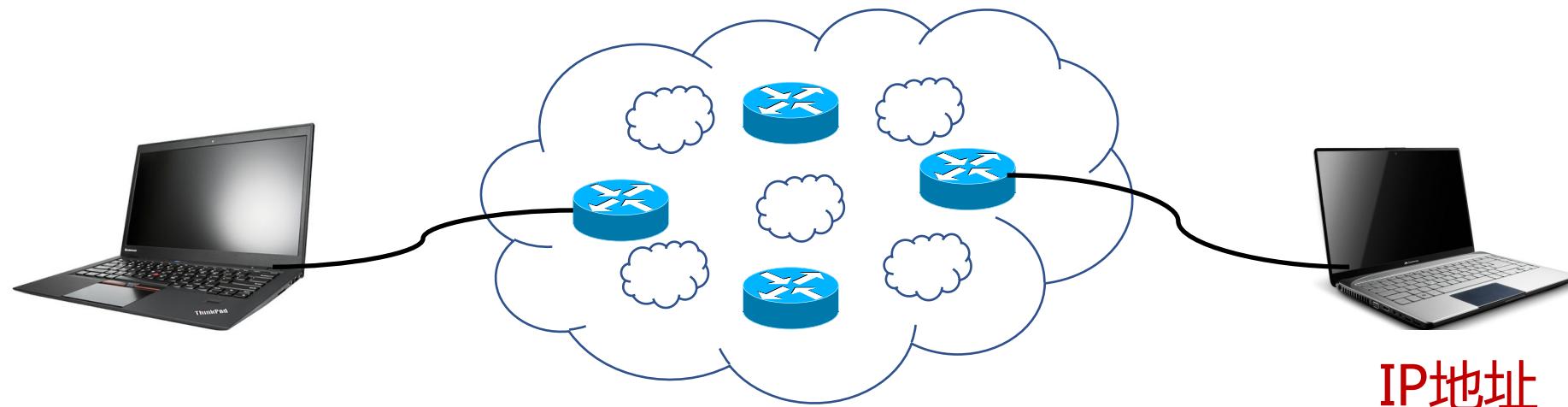
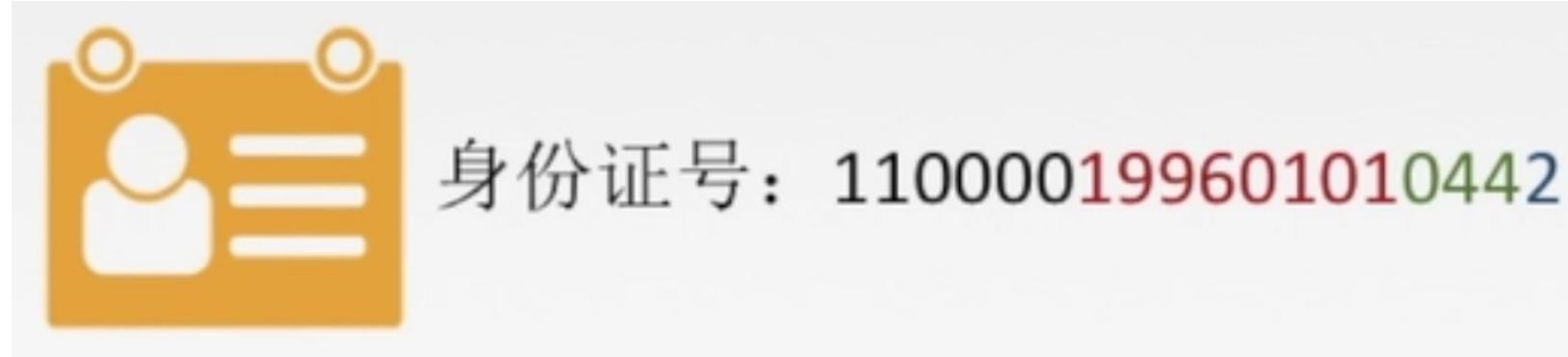




# IP地址

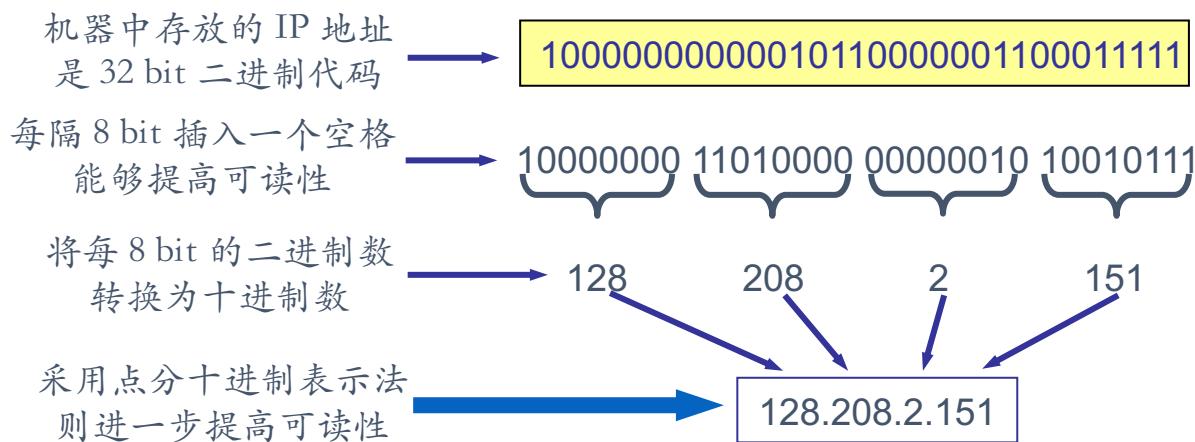


中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA





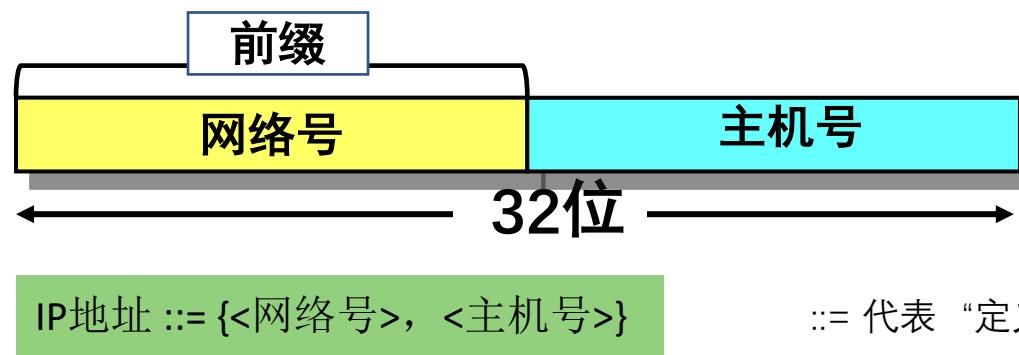
- IP地址，网络上的每一台主机（或路由器）的每一个接口都会分配一个全球唯一的32位（4字节）的标识符
- IP地址的书写采用点分十进制记法，其中每一段取值范围为0到255





- IP地址与身份证号类似，分为多个字段。具体地，由两个字段组成
- 网络号相同的这块连续IP地址空间称为地址的**前缀**，或**网络前缀**
- 按照惯例，网络地址是前缀后跟一个斜杠，斜杠后是网络号长度
  - 128.208.0.0/16

思考：  
如果不分段，有什么问题？





# IP的编址的三种方法



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 分类的 IP 地址

已废弃，不再使用

- 这是最基本的编址方法，在 1981 年就通过了相应的标准协议

## ➤ 子网的划分

- 这是对最基本的编址方法的改进，其标准[RFC 950]在 1985 年通过

## ➤ 无类域间路由CIDR (Classless Inter-Domain Routing)

- 这是比较新的无类编址方法。1993 年提出后很快就得到推广应用



number in the phone number?" But at the time, it did not seem necessary.

To handle these problems, subnets were introduced to flexibly assign blocks of addresses within an organization. Later, CIDR was added to reduce the size of the global routing table. Today, the bits that indicate whether an IP address belongs to class A, B, or C network are no longer used, though references to these classes in the literature are still common.

To see how dropping the classes made forwarding more complicated, consider how simple it was in the old classful system. When a packet arrived at a router, a copy of the IP address was shifted right 28 bits to yield a 4-bit class number. A 16-way branch then sorted packets into A, B, C (and D and E) classes, with eight of the cases for class A, four of the cases for class B, and two of the cases for class C. The code for each class then masked off the 8-, 16-, or 24-bit network



码农智商要充值

是的就是早就没有意义了的东西 不知道为什么各种教科书还在当个正事儿似的讲讲讲 真的是够了.

2021-05-30

11



靓核

各种考试还喜欢考

2021-06-16

2



war sword

就是，看到ppt当重点来讲我就贼无语😊

2022-02-05

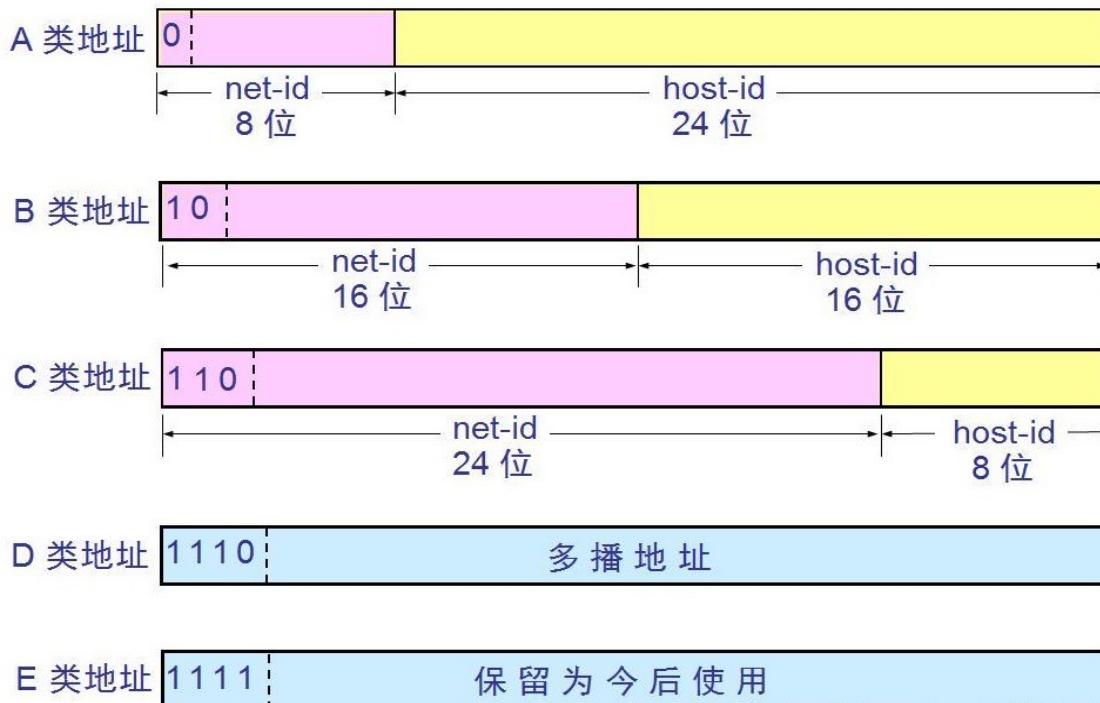
赞



# 编址方式一：分类的IP地址



- IP地址共分为A、B、C、D、E五类，A类、B类、C类为单播地址
- IP地址的书写采用点分十进制记法，其中每一段取值范围为0到255



请判断下列地址的类型

10.2.1.1	A类
128.63.2.100	B类
201.222.5.64	C类
256.241.201.10	不存在，超出范围



地址	用途
全0网络地址	只在系统启动时有效，用于启动时临时通信，又叫主机地址
网络127.0.0.0	指本地节点(一般为127.0.0.1)，用于测试网卡及TCP/IP软件，这样浪费了1700万个地址
全0主机地址	用于指定网络本身，称之为网络地址或者网络号
全1主机地址	用于广播，也称定向广播，需要指定目标网络
0.0.0.0	指任意地址
255.255.255.255	用于本地广播，也称有限/受限广播，无须知道本地网络地址



# 私有IP地址



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

地址类别	地址范围	网段个数
A类	10.0.0.0~10.255.255.255	1
B类	172.16.0.0~172.31.255.255	16
C类	192.168.0.0~192.168.255.255	256



# 分类的IP地址的问题



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

➤ 缺少内部地址灵活性 → 子网的划分



A类地址



B类地址



C类地址

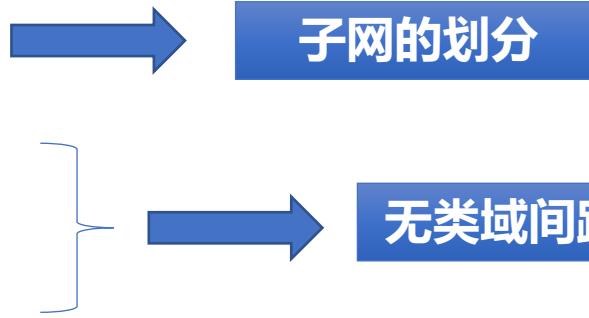




# 分类的IP地址的问题



- 缺少内部地址灵活性
- 地址空间的低效使用
- 路由表的爆炸增长



关于子网划分和CIDR的技术原理，留作课后学习

子网的划分

无类域间路由CIDR

假如你的公司有 5000 台设备需要接入网络

IP 地址类别	在 IP 地址中的占比	网络号数	主机号数	用于
A 类地址	1/2	8	24	为需要上千万台主机连入网络的大型组织提供单播地址，最多提供 16,277,214 个地址
B 类地址	1/4	16	16	为需要上千台主机连入网络的中型组织提供单播地址，最多提供 65,534 个地址
C 类地址	1/8	24	8	为需要上百台主机连入网络的小型组织提供单播地址，最多提供 254 个地址
D 类地址	1/16	-	-	多播地址
E 类地址	1/16	-	-	为实验保留



# IPv4地址如何获取



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 公有IP地址要求全球唯一

- ICANN ( Internet Corporation for Assigned Names and Numbers )  
即互联网名字与编号分配机构向ISP分配，ISP再向所属机构或组织逐级分配

## ➤ 静态设定

- 申请固定IP地址，手工设定，如路由器、服务器

## ➤ 动态获取

- 使用DHCP协议或其他动态配置协议

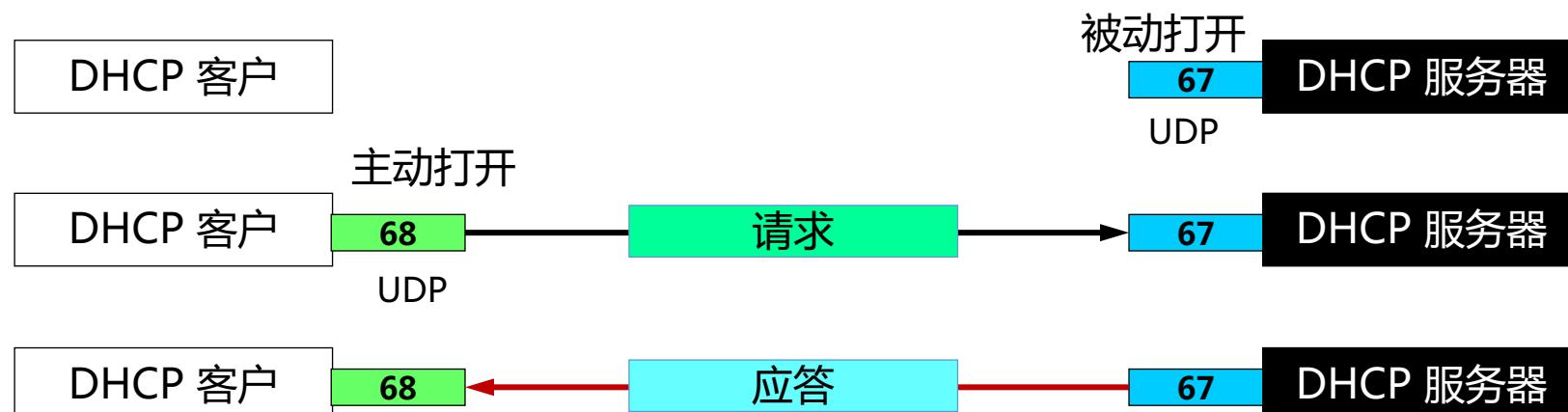


# DHCP动态主机配置协议



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- DHCP : 动态主机配置协议 ( Dynamic Host Configuration Protocol )
  - 当主机加入IP网络，允许主机从DHCP服务器动态获取IP地址
  - 可以有效利用IP地址，方便移动主机的地址获取
- 工作模式：客服/服务器模式 ( C/S )
  - 基于 UDP 工作，服务器运行在 67 号端口，客户端运行在 68 号端口

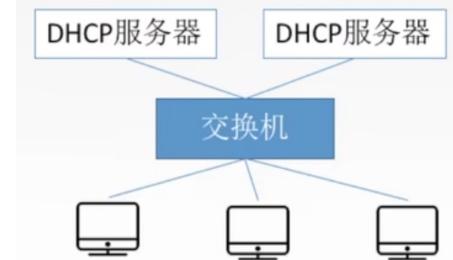
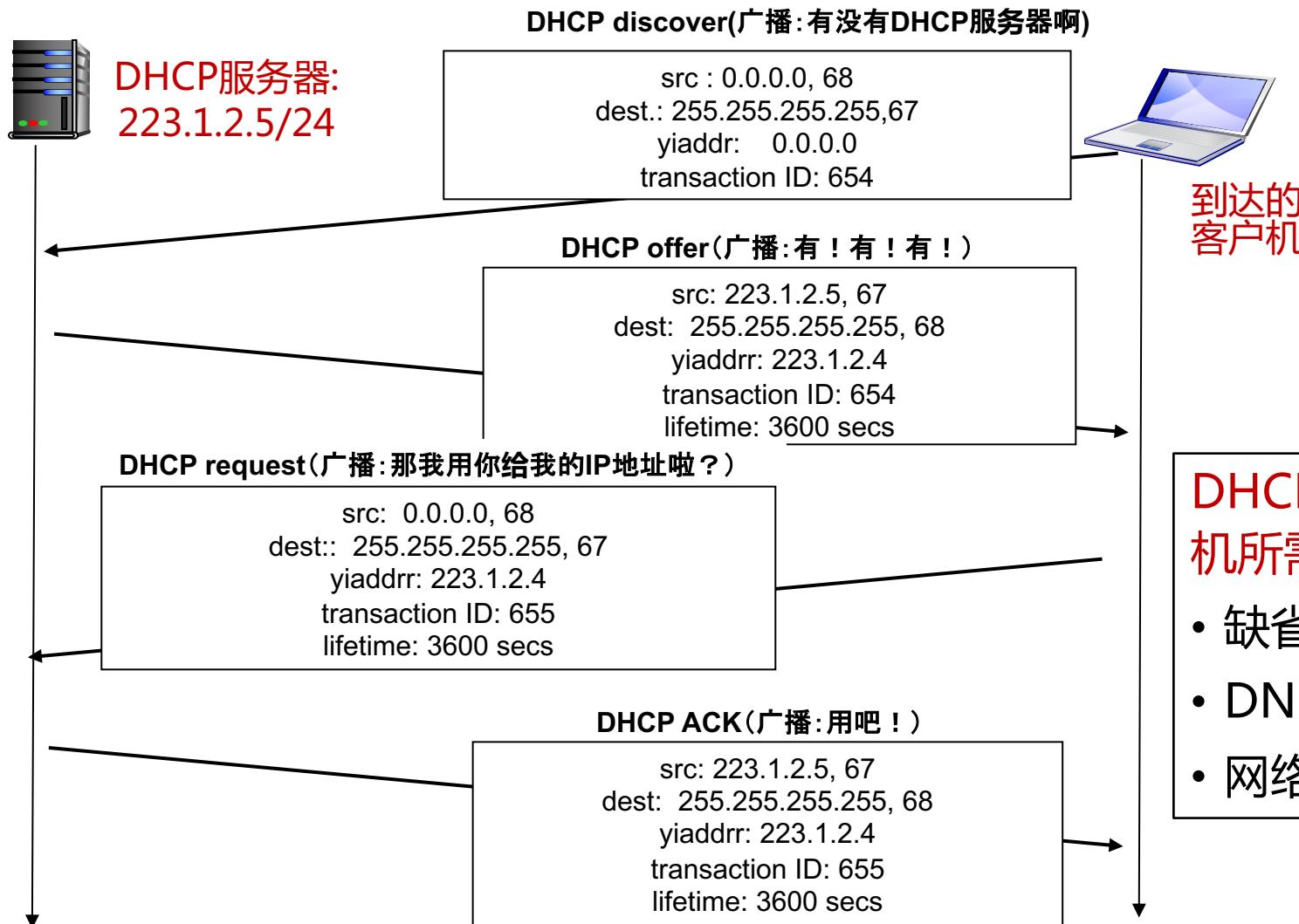




# DHCP 工作过程



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA





# ARP地址解析协议 (Address Resolution Protocol)

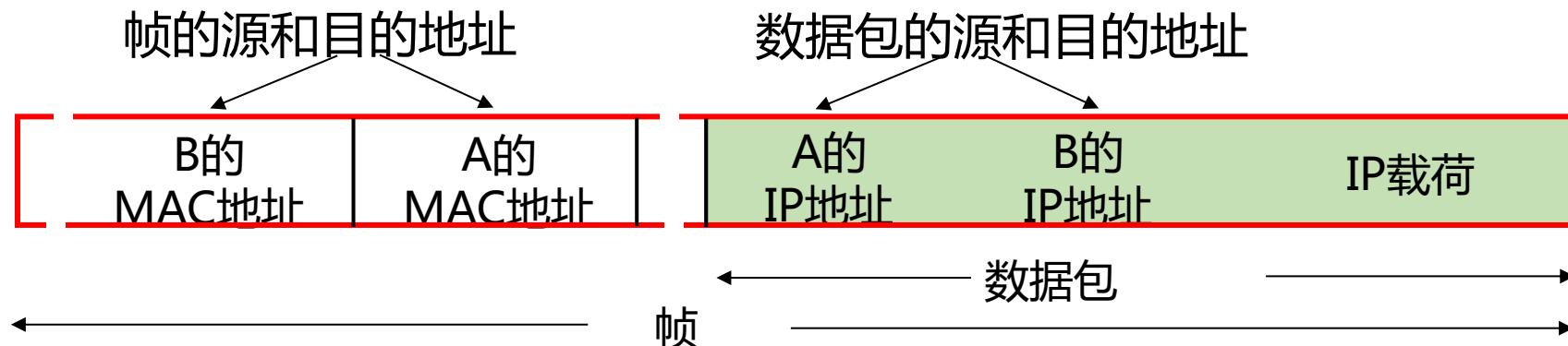
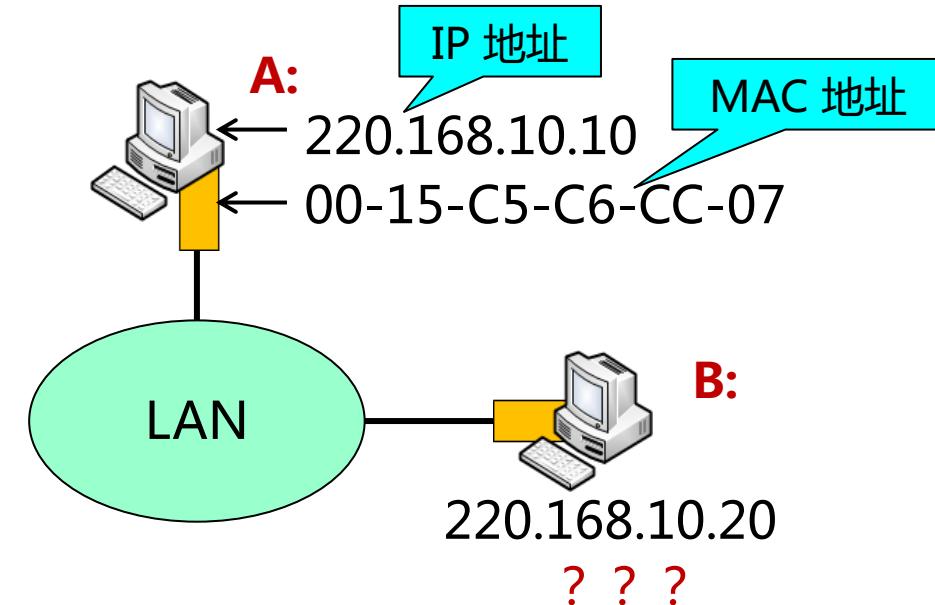


中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ IP数据包转发：从主机A到主机B

- 检查目的IP地址的网络号部分
- 确定主机B与主机A属相同IP网络
- 将IP数据包封装到链路层帧中，直接发送给主机B

问题：给定B的IP地址，如何获取B的MAC地址？



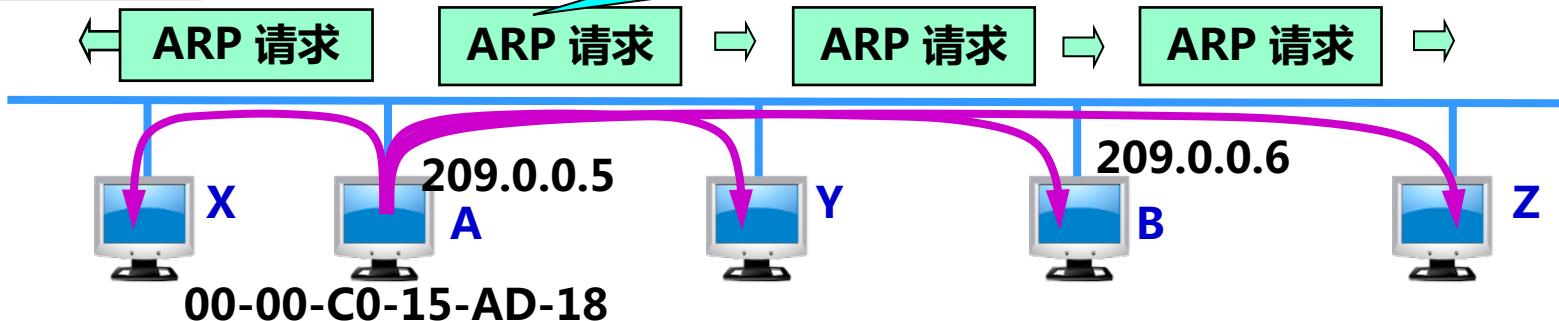


# ARP协议工作过程



主机 A 广播发送  
ARP 请求分组

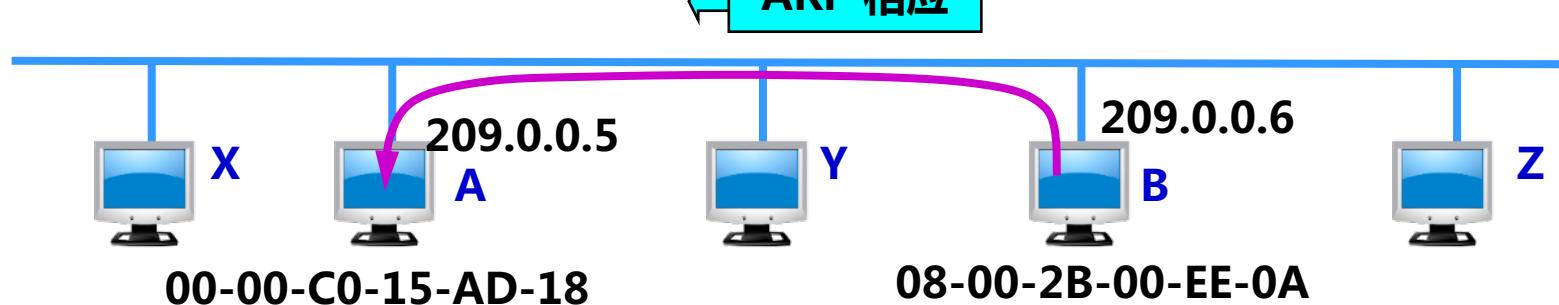
我是 209.0.0.5，硬件地址是 00-00-C0-15-AD-18，我想知道主机 209.0.0.6 的硬件地址



主机B向A单播发送  
ARP 响应分组

我是 209.0.0.6，硬件地址是  
08-00-2B-00-EE-0A

ARP 相应

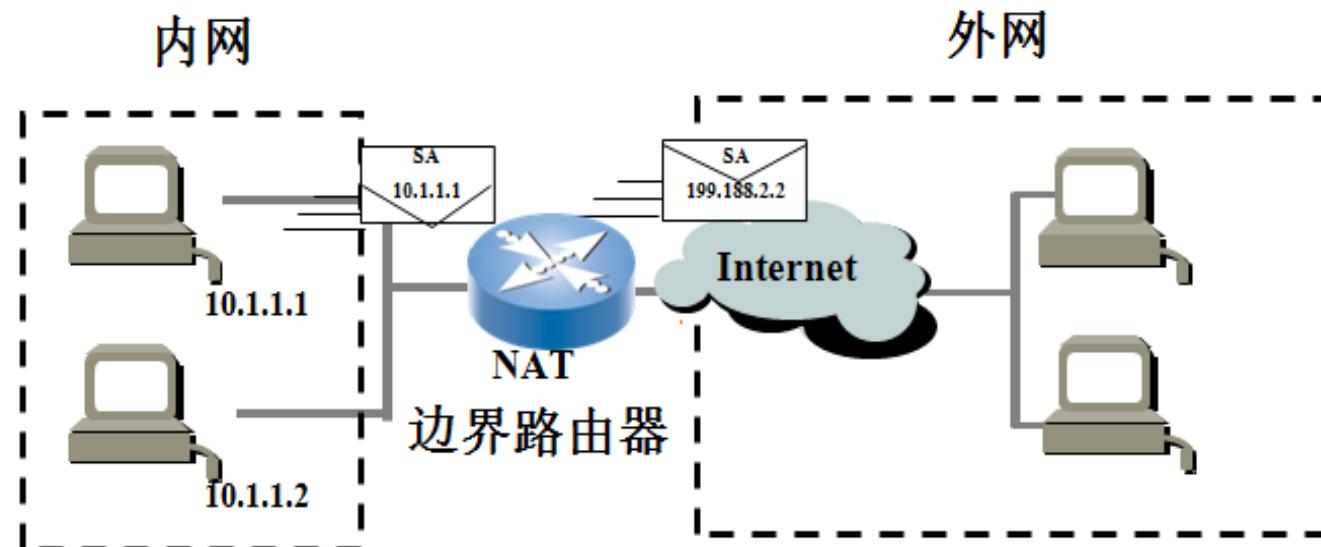




# NAT网络地址转换协议

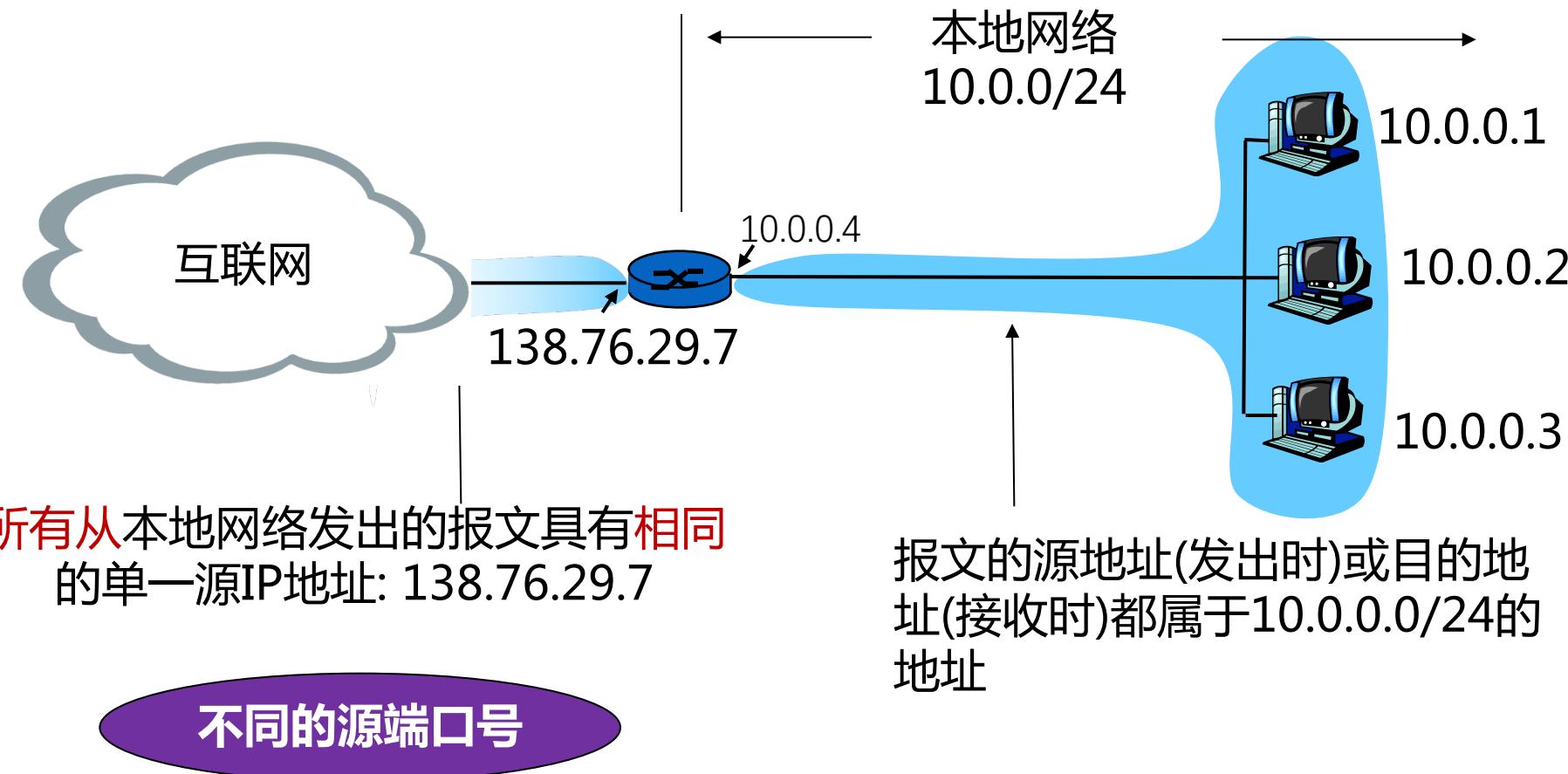


- 网络地址转换(NAT, Network Address Translation)用于解决IPv4地址不足的问题，是一种将私有(保留)地址转化为公有IP地址的转换技术
- 私有IP地址：
  - 10.0.0.0~10.255.255.255/8 (16,777,214,  $2^{24}-2$ )
  - 172.16.0.0~172.31.255.255/12 (1,048,574,  $2^{20}-2$ )
  - 192.168.0.0~192.168.255.255/16 (65,534,  $2^{16}-2$ )





# NAT工作机制





## ➤ ICMP: 互联网控制报文协议(Internet Control Message Protocol)

- ICMP 允许主机或路由器报告差错情况和提供有关异常情况的报告
- 由主机和路由器用于网络层信息的通信
- ICMP 报文携带在IP 数据报中： IP上层协议号为1

## ➤ ICMP报文类型

- **ICMP 差错报告报文**
  - 终点不可达：不可达主机、不可达网络，无效端口、协议
- **ICMP 询问报文**
  - 回送请求/回答 (ping使用)



## ➤ PING (Packet InterNet Groper)

- PING 用来测试两个主机之间的连通性
- PING 使用了 ICMP 回送请求与回送回答报文

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

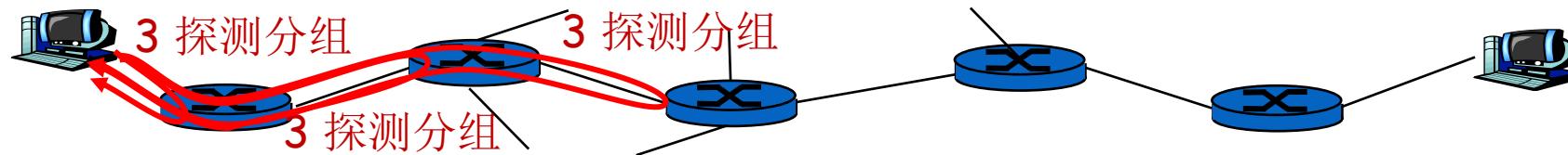
正在 Ping www.a.shifen.com [110.242.68.4] 具有 32 字节的数据:
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=32ms TTL=53
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=29ms TTL=53
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=29ms TTL=53
来自 110.242.68.4 的回复: 字节=32 时间=31ms TTL=53

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 = 29ms, 最长 = 32ms, 平均 = 30ms
```

思考：  
如何利用Ping命令  
返回的TTL值(报文  
剩余跳数), 来判  
断对方主机操作系  
统的类型？



➤ 如何知道整个路径上路由器的地址？ 使用TraceRT命令



- 源向目的地发送一系列UDP段(不可能的端口号)
- 第一个 TTL =1
  - 第二个 TTL=2, 等
- 当第n个数据报到达第n个路由器:
- 路由器丢弃数据报
  - 并向源发送一个ICMP报文 (类型 11, 编码0)
  - 报文的源IP地址就是该路由器的IP地址



# Traceroute和ICMP



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

C:\>tracert [www.taobao.com](http://www.taobao.com)

通过最多 30 个跃点跟踪  
到 www.taobao.com.danuoyi.tbcache.com  
[27.211.197.171] 的路由:

```
1  3 ms   2 ms   4 ms  192.168.3.1
2  3 ms   6 ms   3 ms  SMBSHARE [192.168.1.1]
3  6 ms   9 ms   5 ms  27.215.136.1
4  6 ms   11 ms  7 ms  61.162.199.89
5  7 ms   18 ms  21 ms  61.162.199.9
6  23 ms  29 ms  22 ms  61.156.223.69
7  28 ms  31 ms  20 ms  112.230.160.54
8  19 ms  27 ms  36 ms  60.208.64.230
9  15 ms  15 ms  16 ms  119.164.254.86
10 19 ms  13 ms  13 ms  27.211.197.171
```

跟踪完成。



# 本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 标准化组织

1.7 互联网发展史与启示

- 比特率
- 时延带宽积
- 带宽
- 吞吐量
- 包转发率
- 丢包率
- 时延
- 利用率
- 往返时间 RTT
- 时延抖动



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA



## ➤ 比特率(bit rate)

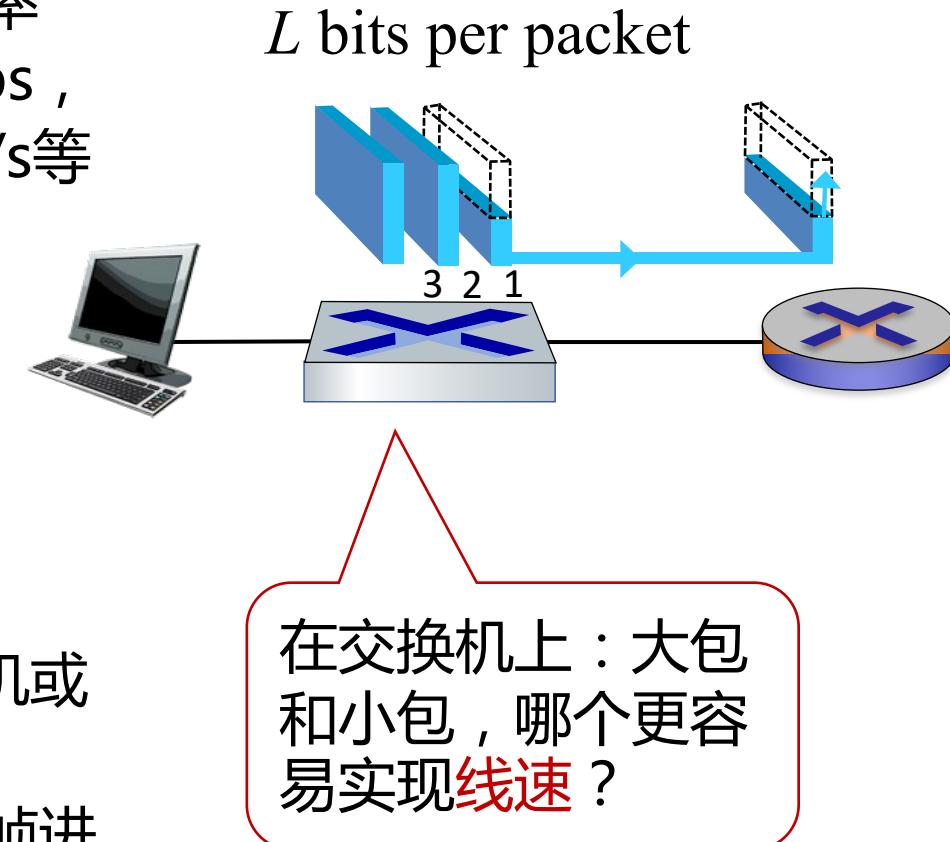
- 主机在数字信道上传送数据的速率，也称数据率
- 比特率的单位是b/s(比特每秒)，也可以写为bps，(bit per second)，或 kbit/s、Mbit/s、Gbit/s等

## ➤ 带宽

- 网络中某通道传送数据的能力，即单位时间内网络中的某信道所能通过的“**最高数据率**”
- 单位是 bit/s，即 “比特每秒”

## ➤ 包转发率(PPS)

- 全称是Packet Per Second(包/秒)，表示交换机或路由器等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的情况下，对帧进行转发时能够达到该端口线路的最高速度





## ➤ 时延(Delay)

**通用方法：将一个大问题分成多个小问题**

- 时延 (delay 或 latency) 是指数据（一个报文或分组）从网络（或链路）的一端传送到另一端所需的时间，也称为延迟
- **传输时延(transmission delay)**：数据从结点进入到传输媒体所需要的时间，传输时延又称为发送时延
- **传播时延(propagation delay)**：电磁波在信道中需要传播一定距离而花费的时间
- **处理时延(processing delay)**：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
- **排队时延(queueing delay)**：分组在路由器输入输出队列中排队等待处理所经历的时延



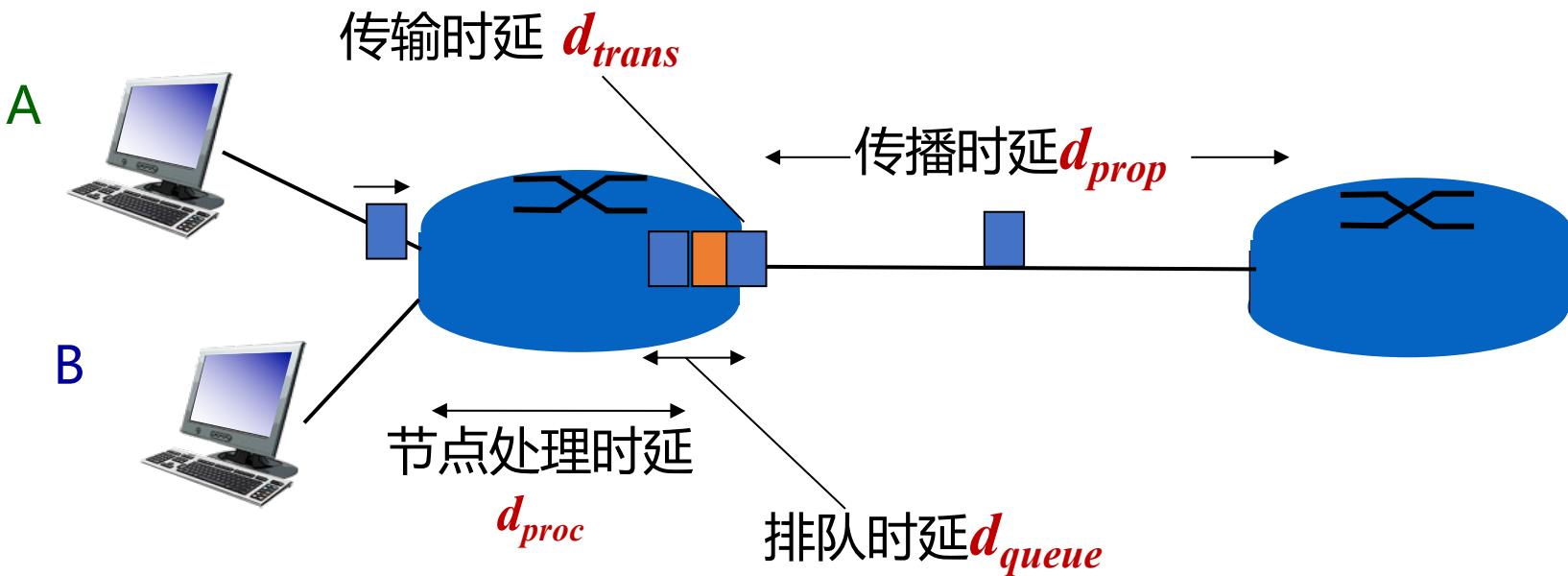
## ➤ 四种时延产生的地方

传输时延

$$d_{trans} = \frac{Length \text{ (bit)}}{R \text{ ( bit/s )}}$$

传播时延

$$d_{prop} = \frac{Distance \text{ (m)}}{c \text{ ( m/s )}}$$



$$d_{total} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

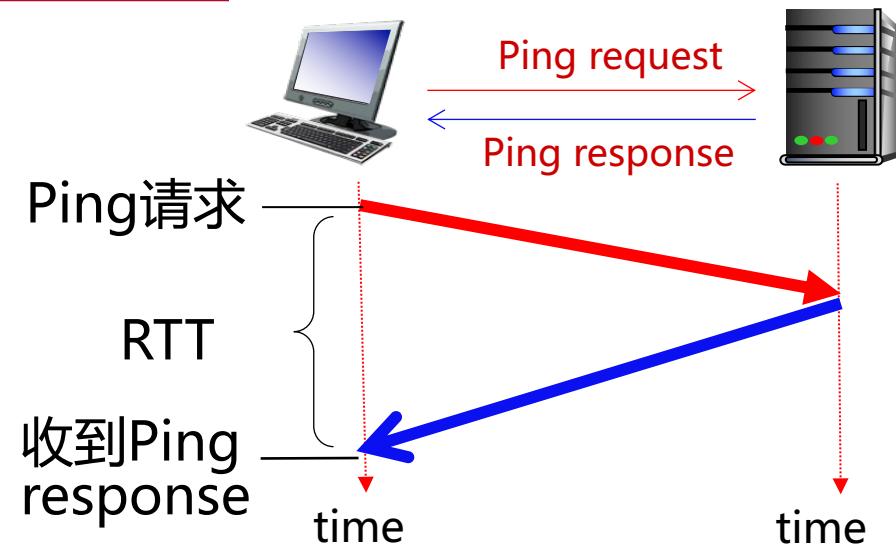


# 计算机网络度量单位



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 往返时延RTT(Round-Trip Time)
  - 从发送方发送数据开始，到发送方收到来自接收方的确认，经历的**总时间**
  - 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



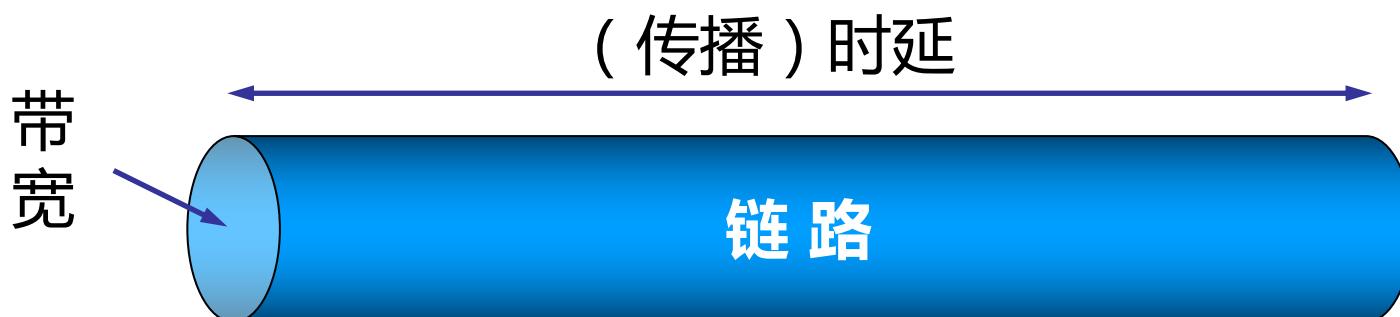
使用ping命令获取  
往返时延RTT

```
Last login: Tue Feb 21 21:22:06 on console
[litong@192 ~ % ping www.ruc.edu.cn
PING ruc.cache.saaswaf.com (58.205.213.52): 56 data bytes
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=0 ttl=50 time=48.479 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=1 ttl=50 time=48.000 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=2 ttl=50 time=51.086 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=3 ttl=50 time=47.786 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=4 ttl=50 time=51.165 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=5 ttl=50 time=48.072 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=6 ttl=50 time=50.923 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=7 ttl=50 time=48.143 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=8 ttl=50 time=51.026 ms
64 bytes from 58.205.213.52: icmp_seq=9 ttl=50 time=47.720 ms
^C
--- ruc.cache.saaswaf.com ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 packets received, 0.0% packet loss
round-trip min/avg/max/stddev = 47.720/49.240/51.165/1.491 ms
litong@192 ~ %
```



## ➤ 时延带宽积

- **时延带宽积 = 传播时延 × 带宽**，即按**比特计数**的链路长度
- 若发送端连续发送数据，则在发送的第一个bit即将达到终点时，发送端就已经发送了**时延带宽积**个bit，而这些bit都在链路上向前移动



链路像一条空心管道

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

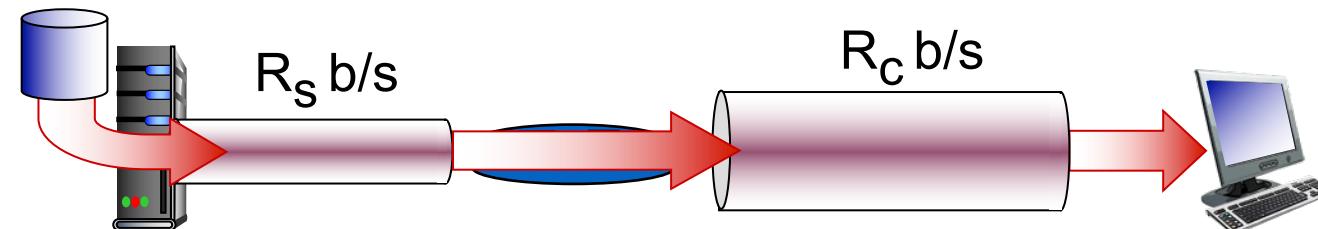
举例

传播时延为20ms，  
带宽为10Mb/s，则：  
**时延带宽积**

$$\begin{aligned} &= 20/1000 \times 10 \times 10^6 \\ &= 2 \times 10^5 \text{ bit} \end{aligned}$$



- 吞吐量 (throughput)
  - 单位时间内通过某个网络(或信道、接口)的数据量，单位是 b/s
- 有效吞吐量(goodput)
  - 单位时间内，目的地正确接收到的有用信息的数目（以 bit 为单位）
- 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
  - 网络利用率则是全网络的信道利用率的加权平均值
- 丢包率
  - 所丢失数据包的数量占所发送数据包的比率





## ➤ 时延抖动

- 变化的时延称为抖动 ( Jitter )
- 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，抖动往往会影响用户的体验

## ➤ 延迟丢包 ( delay-induced )

- 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



# 本章内容



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 标准化组织

1.7 互联网发展史与启示

- 1. 国际标准组织
- 2. Internet标准化组织
- 3. 我国相关标准组织
- 4. 开源社区



## ➤ 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





# 国际标准组织



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 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
- 万维网联盟 ( W3C )
  - 万维网联盟 ( World Wide Web Consortium，简称W3C ) 是制定网络标准的非营利性组织
  - 主要包含三部分的标准：结构，表现，行为。例如XML， XHTML，CSS，Dom, ECMAScript





# Internet标准化组织



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ IETF: 互联网工程任务组

- IETF (Internet Engineering Task Force) 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 ( Working Group ) 承担

RFC 793 - Transmission Control Protocol ( TCP )  
RFC 791 - Internet Protocol ( IP )



## ➤ IRTF: Internet研究任务组

- IRTF (Internet Research Task Force) 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



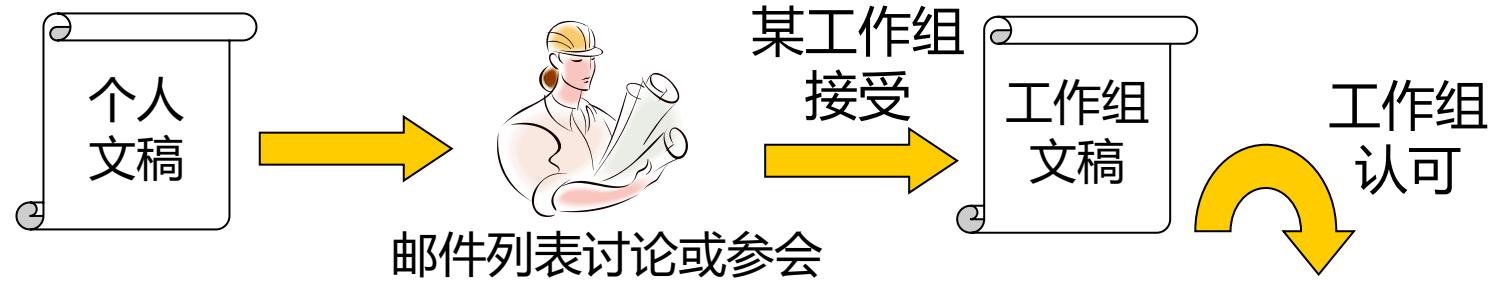
## ➤ RFC标准产生过程

- 从个人提交个人文稿，到接受为工作组文稿，再通过各层Last Call等审核，最终才能成为RFC

- 上述过程往往至少要2~3年

## ➤ 各国RFC贡献情况

- 全球有约9000个RFC
- 美国给6600个RFC做过贡献
- 英、德、加、法、芬等强国
- 我国贡献数上升到第7位，  
给近500个RFC做了贡献
- 美国近3000人有RFC署名，  
我国仅不到200人有RFC



IETF的核心权利机构

互联网工程指导小组IESG  
由IETF各领域主席构成

互联网大国而非强国

我国参与RFC的人数少，  
主导的RFC数量有限

# Optimizing ACK mechanism for QUIC

draft-li-quic-optimizing-ack-in-wlan-05

Status IESG evaluation record IESG writeups Email expansions History

Versions:

00 01 02 03 04 05



Document	Type	Active Internet-Draft (individual)	Internet Engineering Task Force (IETF)	J. Iyengar, Ed.
	Authors	Tong Li, Kai Zheng, Rahul Jadhav, Jiao Kang	Request for Comments: 9000	Fastly
	Last updated	2022-11-07	Category: Standards Track	M. Thomson, Ed.
	RFC stream	(None)	ISSN: 2070-1721	Mozilla
	Formats	<a href="#">txt</a> <a href="#">html</a> <a href="#">xml</a> <a href="#">htmlized</a> <a href="#">pdf</a> <a href="#">bibtex</a>	QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport	May 2021
Stream	Stream state	(No stream defined)		
	Consensus boilerplate	Unknown	Abstract	
	RFC Editor Note	(None)		
IESG	I-ESG state	I-D Exists		
	Telechat date	(None)		
	Responsible AD	(None)		
	Send notices to	(None)		

[Email authors](#) [IPR](#) [References](#) [Referenced by](#) [Nits](#) [Search lists](#)

QUIC  
Internet-Draft  
Intended status: Experimental  
Expires: 12 May 2023

T. Li  
Renmin University of China  
K. Zheng  
R.A. Jadhav  
J. Kang  
Huawei  
8 November 2022

Optimizing ACK mechanism for QUIC  
draft-li-quic-optimizing-ack-in-wlan-05

## Abstract

The dependence on frequent acknowledgments (ACKs) is an artifact of current transport protocol designs rather than a fundamental requirement. This document analyzes the problems caused by contentions and collisions on wireless medium between data packets and ACKs in WLAN and it proposes an ACK mechanism that minimizes the intensity of ACK Frame in QUIC, improving the performance of

This document defines the core of the QUIC transport protocol. QUIC provides applications with flow-controlled streams for structured communication, low-latency connection establishment, and network path migration. QUIC includes security measures that ensure confidentiality, integrity, and availability in a range of deployment circumstances. Accompanying documents describe the integration of TLS for key negotiation, loss detection, and an exemplary congestion control algorithm.

## Status of This Memo

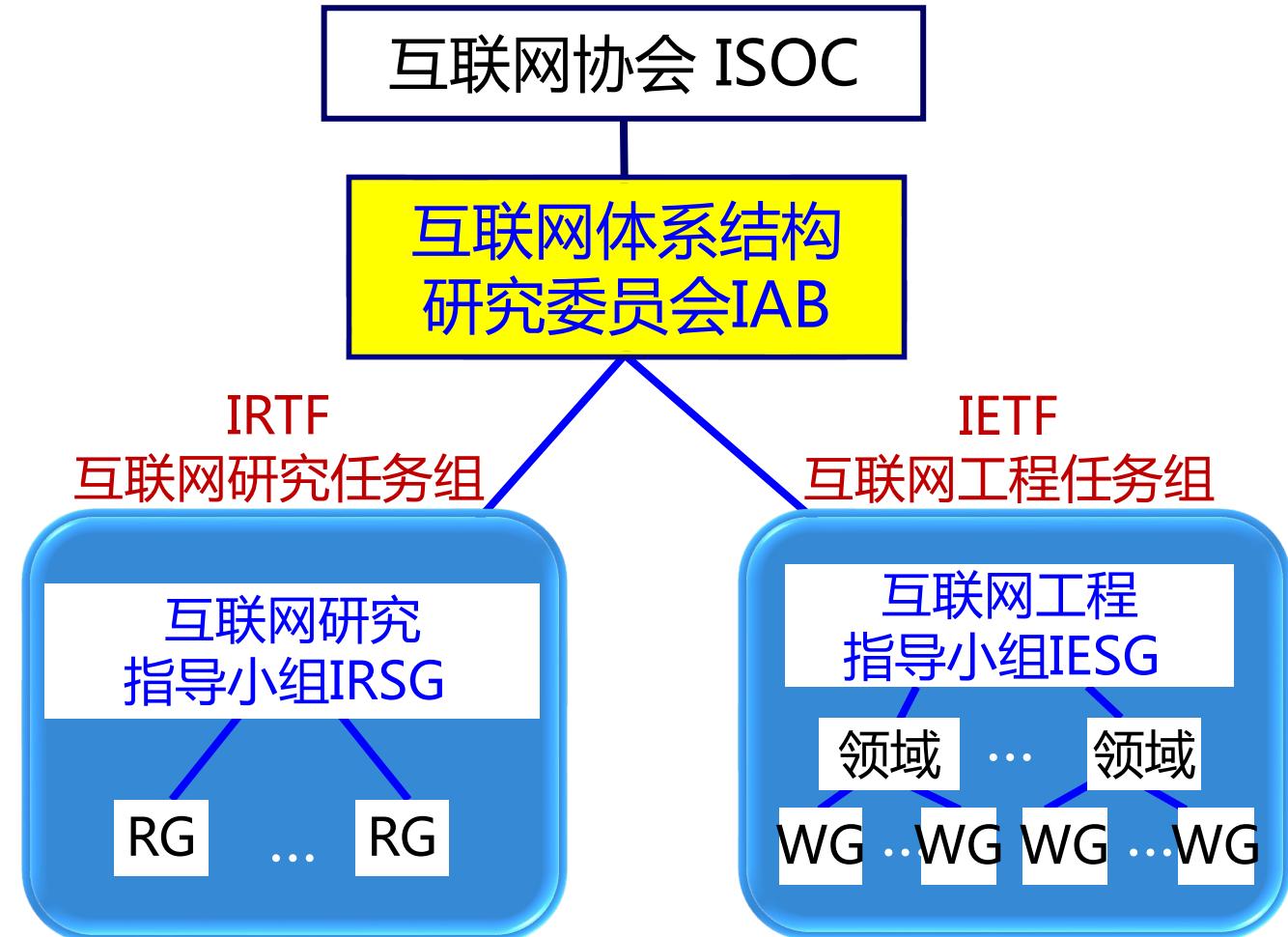
This is an Internet Standards Track document.

This document is a product of the Internet Engineering Task Force (IETF). It represents the consensus of the IETF community. It has received public review and has been approved for publication by the Internet Engineering Steering Group (IESG). Further information on Internet Standards is available in Section 2 of RFC 7841.

Information about the current status of this document, any errata, and how to provide feedback on it may be obtained at <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9000>.



- 互联网协会ISOC
  - Internet Society , 简称ISOC
  - 由国际互联网协会为IETF等提供法律支撑
- 互联网体系结构委员会IAB
  - IAB: Internet Architecture Board
  - IAB是国际互联网标准化组织IETF的顶层架构委员会，由13个个人成员组成
  - 负责TCP/IP协议簇开发研究方向的指导
  - 成立于1983年



<https://www.iab.org>



# 中国的相关标准组织与联盟



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 中国通信标准化协会CCSA

- CCSA (China Communications Standards Association)
- 2002年12月18日成立
- 10余个技术委员会TC，根据技术需求成立和解散



TC1 : 互联网与应用	TC8 : 网络与信息安全
TC3 : 网络与业务能力	TC9 : 电磁环境与安全防护
TC4 : 通信电源与通信局站工作环境	TC10 : 物联网
TC5 : 无线通信	TC11 : 移动互联网应用和终端
TC6 : 传送网与接入网	TC12 : 航天通信技术
TC7 : 网络管理与运营支撑	

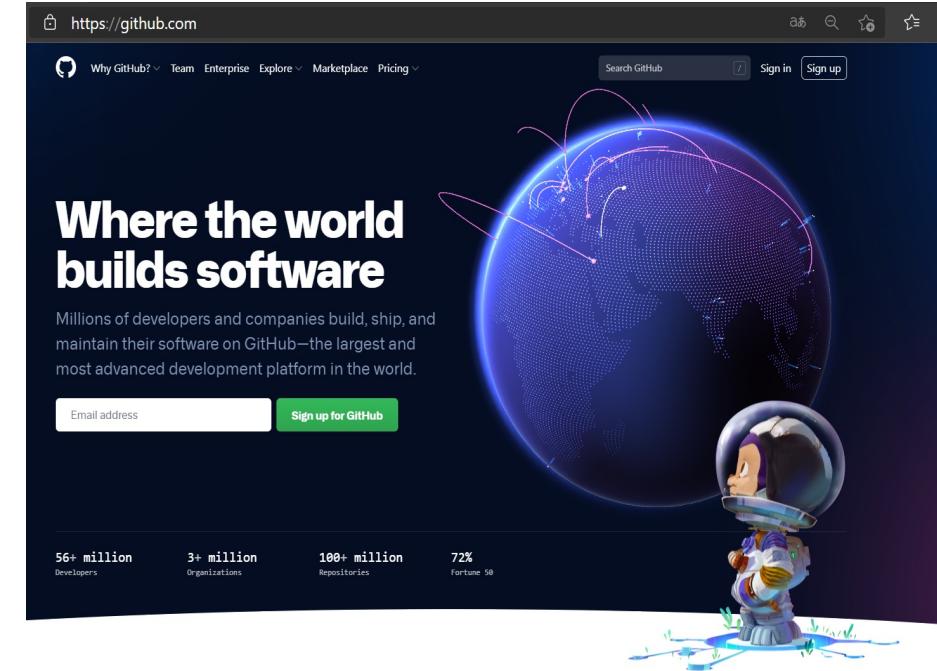


## ➤ 开源社区 (Open Source Community)

- 又称开放源代码社区，公布软件源代码的网络平台，同时也为网络成员提供一个自由学习交流的空间
- 根据相应的开源软件许可证协议

## ➤ GitHub

- 面向开源及私有软件项目的托管网络平台  
<https://github.com>
- <https://git.ruc.edu.cn/>
- **Google QUIC协议项目**
- **Google WebRTC项目**



通过开源使得该技术广泛使用，  
进而推动标准建设



# 本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 协议与分层结构

1.4 参考模型

1.5 计算机网络度量单位

1.6 标准化组织

1.7 互联网发展史与启示

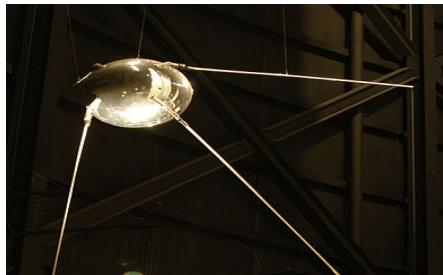


中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1. 互联网早期发展与启示
2. 互联网的新发展与启示
3. 我国的互联网发展情况
4. 中国教育和科研计算机网CERNET
5. 华为的成长与启示



## 美苏争霸 在核打击下能够通信的是什么？

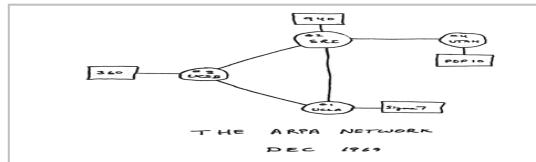


斯普特尼克1号



国防高级研究计划局

四个节点  
UCLA/SRI/UCSB/Utah



ARPANET诞生

- 1972年底：24个站点
  - 美国国防部DARPA、基金委NSF以及UCLA、UCSB等高校
- 80年代中期
  - ARPANET横跨北美、欧洲和澳大利亚，成为全球性网络
- 国防系统的实验，如何扩大研究范畴吸引更多研究者？

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，创新地  
采用了分组交换技术

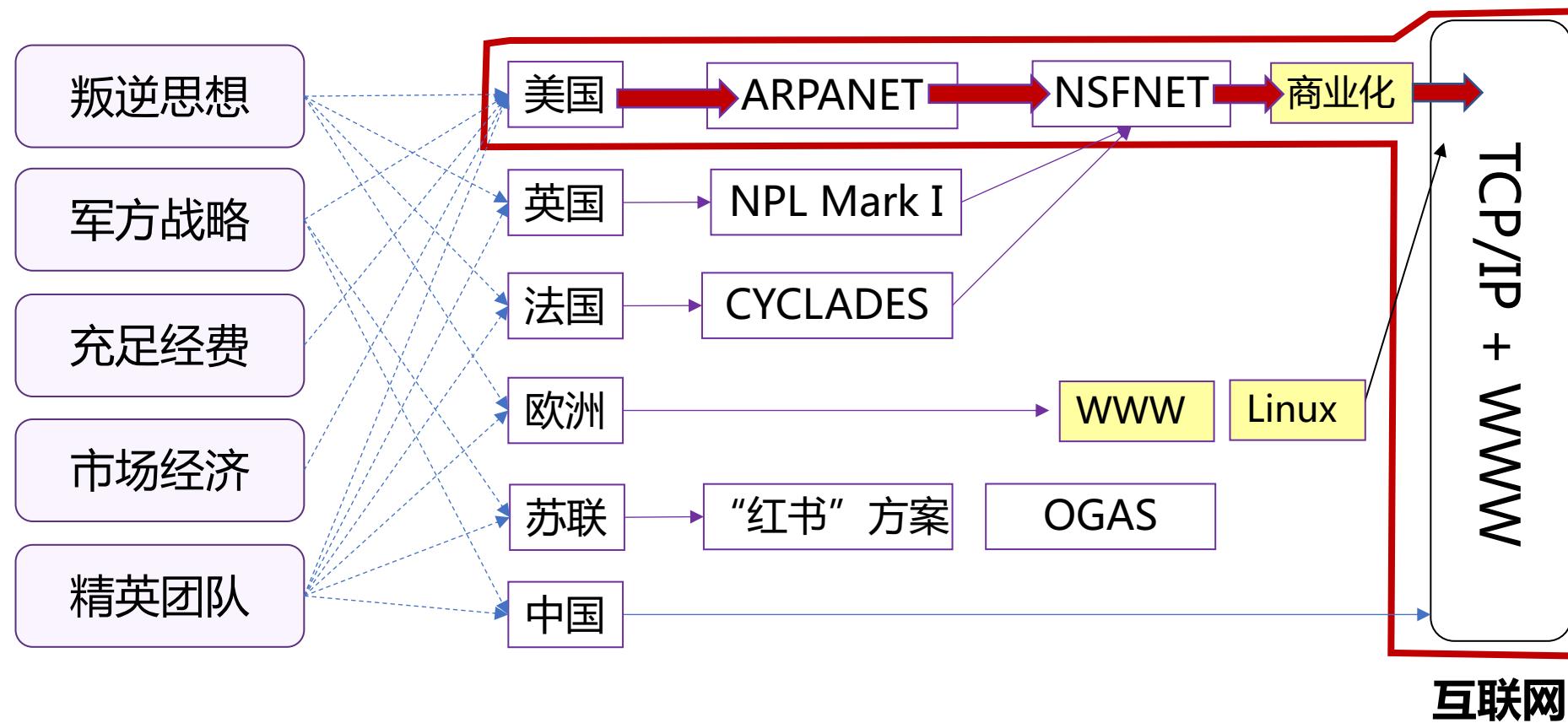
1983年  
ARPANET采用  
TCP/IP

1990年  
ARPANET退役  
移交基金委NSF

标志着互联网诞生



# 互联网早期发展与启示



多个网络项目，美国发起的ARPNET最终胜出，成为今天的互联网



## ➤ 诞生阶段的条件

- 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

## ➤ 成长壮大的因素

- 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



互联网诞生50周年之际，清华大学于2019年在北京承办网络领域顶会  
ACM Sigcomm



# 互联网应用的新发展



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

- 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



## 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）
- 时延也成为网络的关键能力，低时延网络的普及使能更多快速响应的应用





# 我国的互联网发展情况



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 起步阶段

- 1987年，建成第一个电子邮件节点，从北京向德国发送第一封邮件成功（越过长城，走向世界）
- 1994年，我国通过64K专线接入互联网，全功能连接

## ➤ 我国网络发展规模

- 五大网络：CHINANET电信，UNINET联通，CMNET移动，CERNET教育网，CSTNET科技网
- 2019年底，我国国际出口带宽超过8.8T
- 4G基站551万个（全球4G基站总数不超过900万）
- 2022年底，5G基站达210万个，占全球60%以上
- IPv4地址3.8亿个；IPv6地址50903块/32，居世界第二
- .CN域名数2304万个，全球第一
- 应用APP在架数量达到359万款

网民约10亿人，普及率70%



手机网民达9亿人





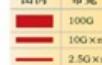
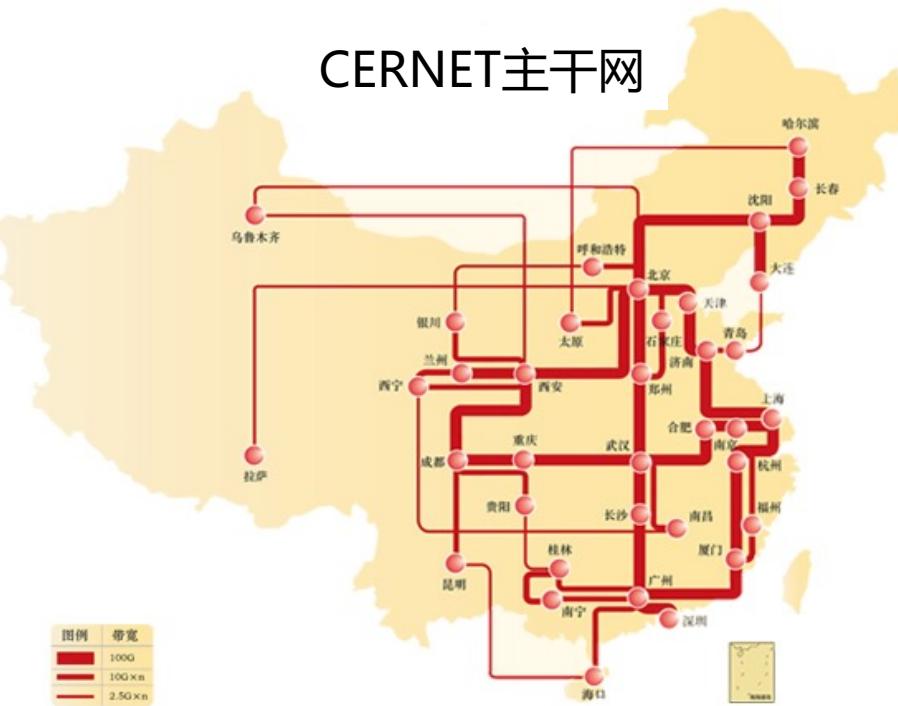
# 中国教育和科研计算机网CERNET

- 始建于1994年的全球最大学术互联网，教育部管理，清华大学等高校承担建设和运行
- 2000个教育科研单位，2000万人，全国41个主节点院校
- 国家网络中心：清华大学
- 地区网络中心：北京大学 上海交通大学 西安交通大学 东南大学 华南理工大学 东北大学 北京邮电大学 华中科技大学 电子科技大学
- 华北主节点：天津大学 河北师范大学 太原理工大学 内蒙古大学
- 东北主节点：大连理工大学 吉林大学 哈尔滨工业大学
- 华东(南)地区主节点：浙江大学 福州大学 南昌大学 厦门大学
- 华东(北)地区主节点：山东大学 中国科学技术大学 中国海洋大学
- 华中地区主节点：中南大学 郑州大学
- 华南地区主节点：广西大学 广西师范大学 海南师范大学 深圳大学
- 西南地区主节点：重庆大学 贵州大学 云南大学 西藏大学
- 西北地区主节点：兰州大学 青海师范大学 宁夏大学 新疆大学



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

CERNET主干网



吴建平 中国工程院院士  
CERNET专家委主任  
英国皇家工程院院士  
入选全球“互联网名人堂”  
89年从加拿大访学归来



# 网络设备商华为



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

## ➤ 华为现状

- 1987年成立，全球20万人，多个产品线全球第一：  
宽带接入、光传输、移动接入网、移动核心网

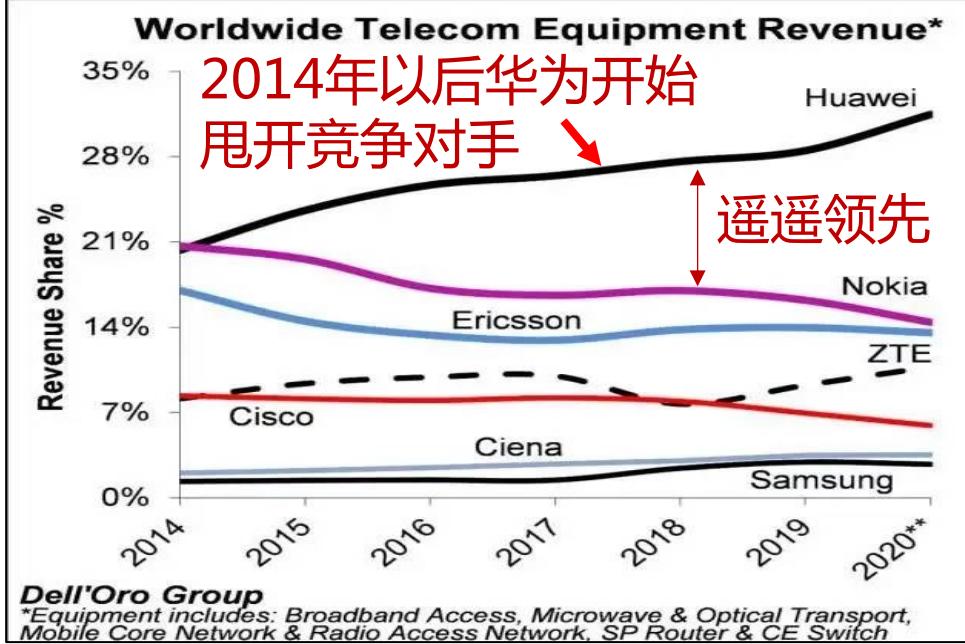
## ➤ 居安思危

- 2000年全国电子百强首位，任正非：华为的冬天  
(2000年互联网泡沫来临，设备商巨头朗讯倒下)
- 长期坚持超大研发投入，从幕后走到前台
- 长期受美国打压，难进全球最大市场美国
- 美国科技封锁，自研芯片等备胎转正，焉知非福？

## ➤ 技术领先、标准引领，秉持开放共赢

- 学术：活跃于Sigcomm等顶级学术会议
- 专利：专利申请全球第一，从数量到质量
- 标准：3GPP、ITU-T、IETF等标准主要贡献者

不仅仅是  
200万年薪的  
“天才少年”



任正非

随着逐步逼近香农定理、摩尔定律的极限，面对大流量、低延时的理论还未创造出来





# 本章总结



中國人民大學  
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

1. 计算机网络的应用范围及其重要性
2. 网络典型交换方式及其优缺点
3. 分层结构和网络协议
4. 网络参考模型
5. 计算机网络主要度量
6. 制定网络协议的标准化组织
7. 国内外互联网发展史