

计算机网络原理

崔勇

清华大学计算机系



计算机网络
教案社区



自我介绍

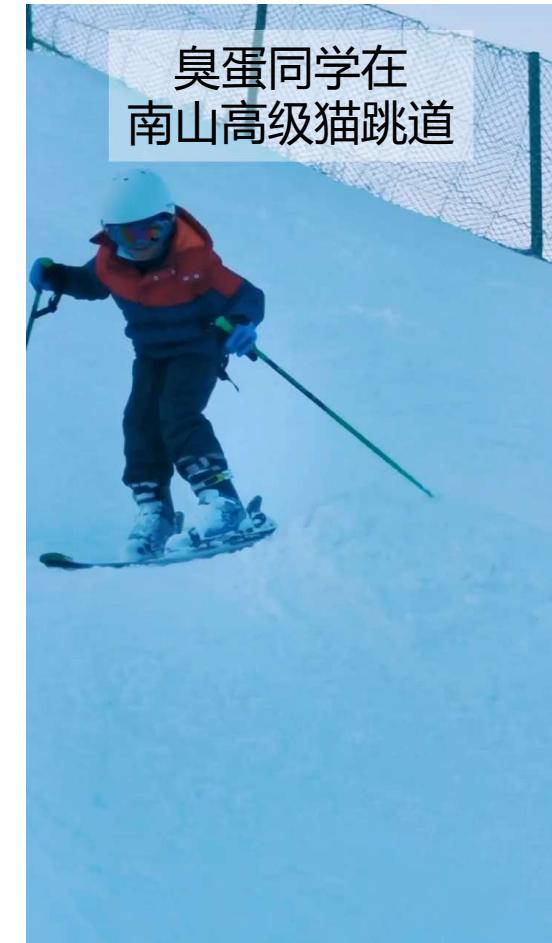
➤ 主要经历

- 贵系5字班，直博，研发路由器，网络所所长
- 新世纪人才、中创软件人才、优青，长江学者

➤ 更主要的经历

- 写4本教材，发4篇教学文章，任CCF导教班主讲教师
- 《移动互联网》获国家级规划教材/校优秀教材特等奖
- “精彩一课”一等奖，教学成果一等奖，教学优秀奖
- 2018年度高校计算机专业优秀教师奖励
- 参与开创“计算机网络教学研讨会”培训2000余教师
- 组建“计算机网络教案社区”互相学习

➤ 很土的爱好：骑自行车、滑冰、游泳、滑雪 ☺





课程基本信息



计算机网络教案社区

➤ 主讲教师

- 春季学期：崔勇 (cuiyong@tsinghua.edu.cn)
- 秋季学期：吴建平，徐明伟

➤ 实验教师：全成斌，郑宁汉

➤ 助教

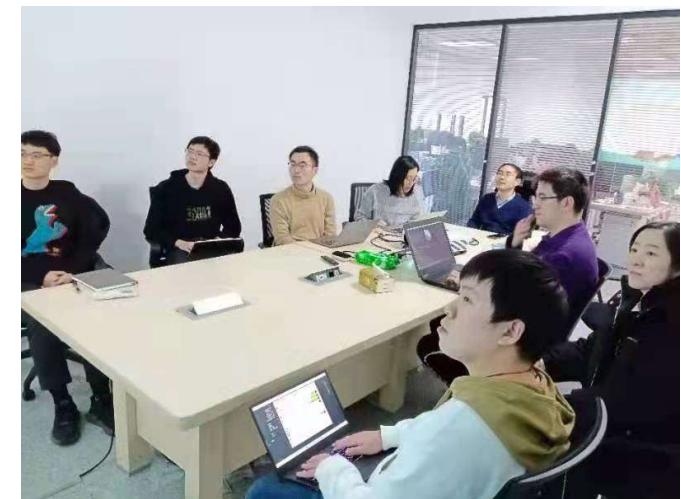
- 博三：张杰，研二：梁聪，博一：潘俊臣
- 研一：马川（主要负责跟堂与收集反馈）

➤ 办公室

- 东主楼9区410，通过邮件或微信联系

➤ 课程主页：网络学堂

优化课程提升教学效果



课程团队研讨和完善授课方案

课程素材来源（共建共享社区等）

1500页+

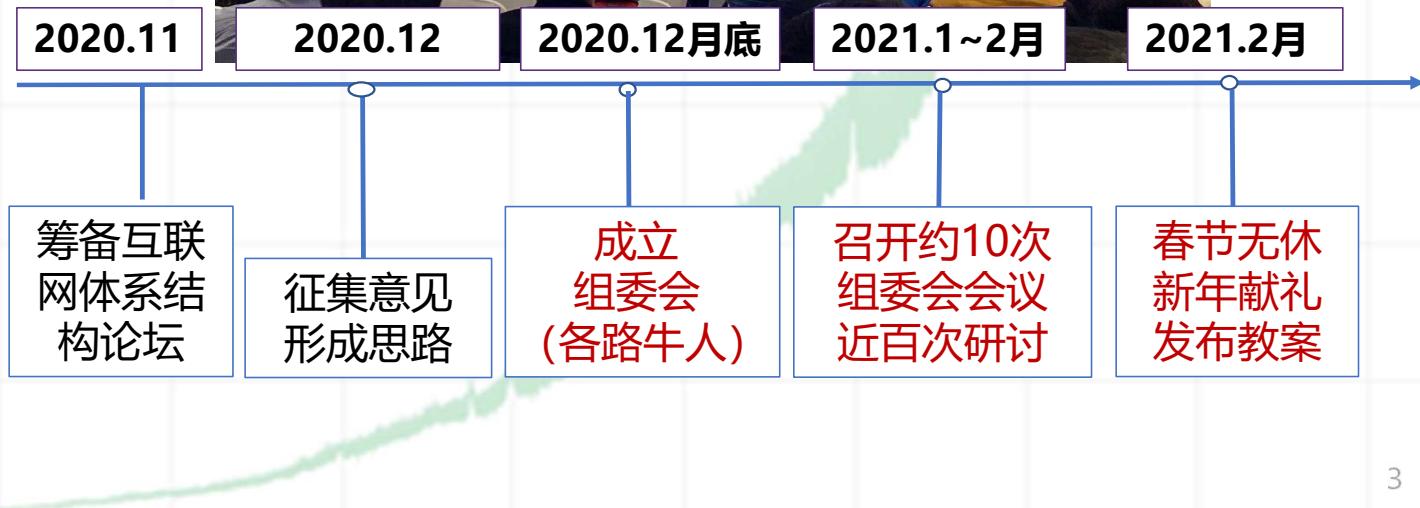
针对各高校教学需求，**完成1500多页PPT**，覆盖了计算机网络教学知识点

15个实验

全国首份完整对外免费发放的计算机网络实验文档，涵盖不同难度共15个实验

2000位

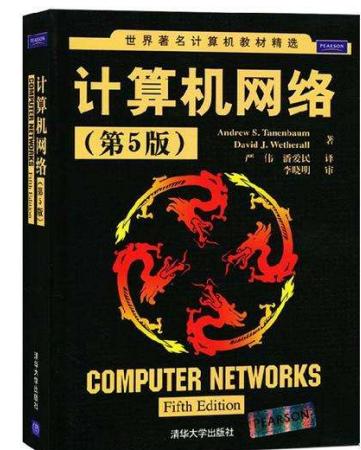
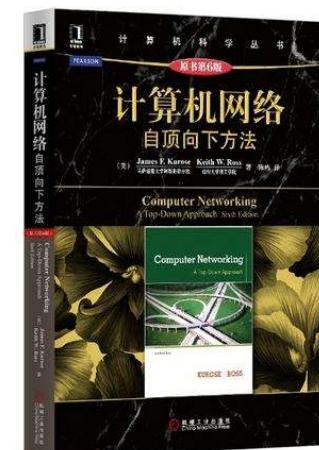
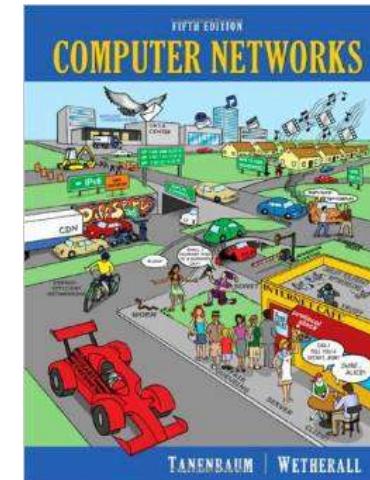
教案目前已经基本覆盖全国高校，目前社区计算机网络一线授课教师约2000人





主要参考书

- Andrew S. Tanenbaum, **Computer Networks**, 5th edition, Prentice-Hall, 2011
- James F. Kurose and Keith W. Ross, **Computer Networking: A Top-Down Approach**, Addison Wesley, 7th edition, 2018
- Douglas E. Comer, **Computer Networks and Internets**, 6th edition, Prentice-Hall, 2015





课程的任务、目的和基本要求

- 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**
- 掌握典型计算机网络（Internet）**各层协议**的
基本**工作原理**及其所采用的技术
- 掌握计算机网络的一些**基本设计方法**
- 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

理解课程目标

做微信小程序 X
做网站前后端 X
开发绚丽APP X
而是如何互联计算机



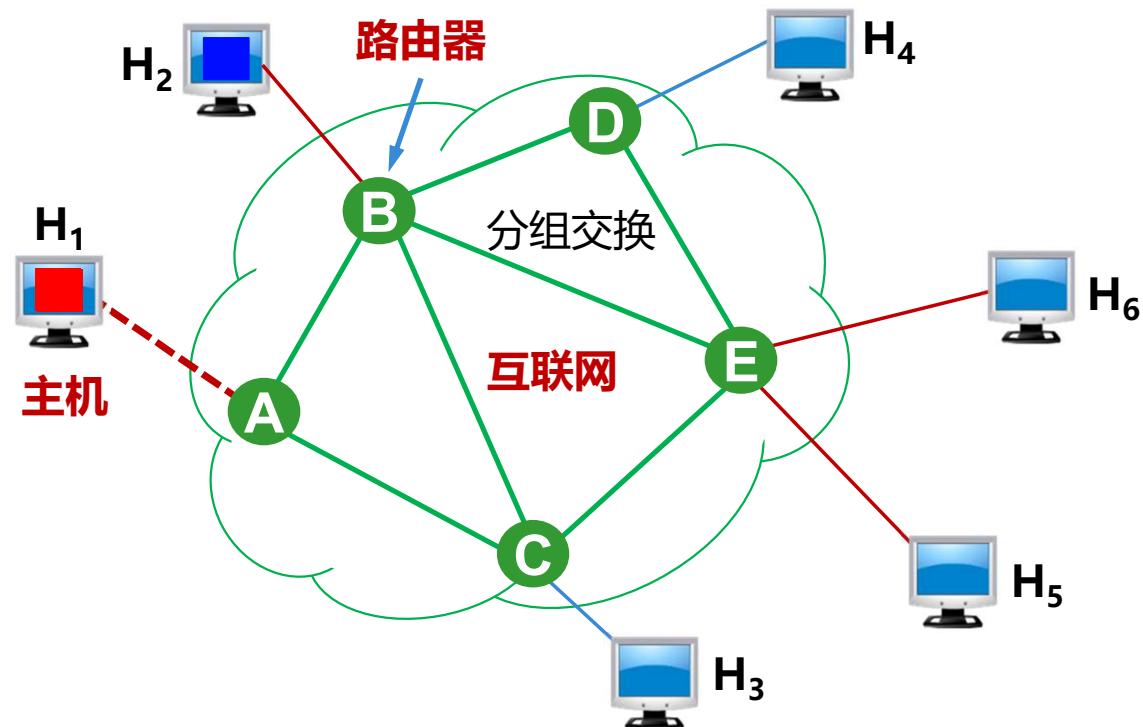
网络学什么 (如何发明网络) ?

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?
未来呢?

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



世界上最复杂的人造系统之一



主要教学内容和学时分配

➤ 第1章	引言	3
➤ 第2章	计算机网络体系结构	3
➤ 第3章	物理层接口及其协议	3
➤ 第4章	数据链路控制及其协议	8
➤ 第5章	局域网与介质访问子层	7
➤ 第6章	网络互联和访问控制	10
➤ 第7章	传输层及可靠传输	6
➤ 第8章	互联网应用	5
➤ 总结复习		3
➤ 共计		48

缤纷的上层应用v.s.硬核的系统原理



互联网的
核心

TCP/IP

TCP/IP的沙漏模型



支撑贵系的后续“网络”课程

课程名称	教师
计算机 网络原理	崔勇
计算机 网络原理	吴建平
计算机 网络原理	徐明伟
计算机 网络	任丰原
计算机网络 专题训练	徐明伟
计算机网络 安全技术	尹霞
密码学与网络 安全	王兴军
网络 安全工程 与实践	段海新
网络空间 安全 导论	李琦

课程名称	教师
计算机 网络管理	王继龙
高级 网络管理	裴丹
网络存储 技术	舒继武
高等 计算机网络	徐恪
计算机网络 体系结构	徐明伟
软件定义 网络	刘斌
高性能 路由器	刘斌
计算机网络 性能评价	任丰原

玩协议玩设备！网络安全、云计算、直播、云游戏、区块链、元宇宙、AI ...



这门课要做些什么？

- 作业 (10%)
 - 包含书面作业和小实验
 - 两周内完成作业，网络学堂提交
- 路由器实验 (40%)
 - 独立开发路由器，合作完成组网
 - 校历第3周开始
- 期末考试 (50%)，闭卷考试
- **选做**：网络创新训练降低考试压力
 - 选做实验最高占30%，**支持回退**
 - 可替代路由器实验

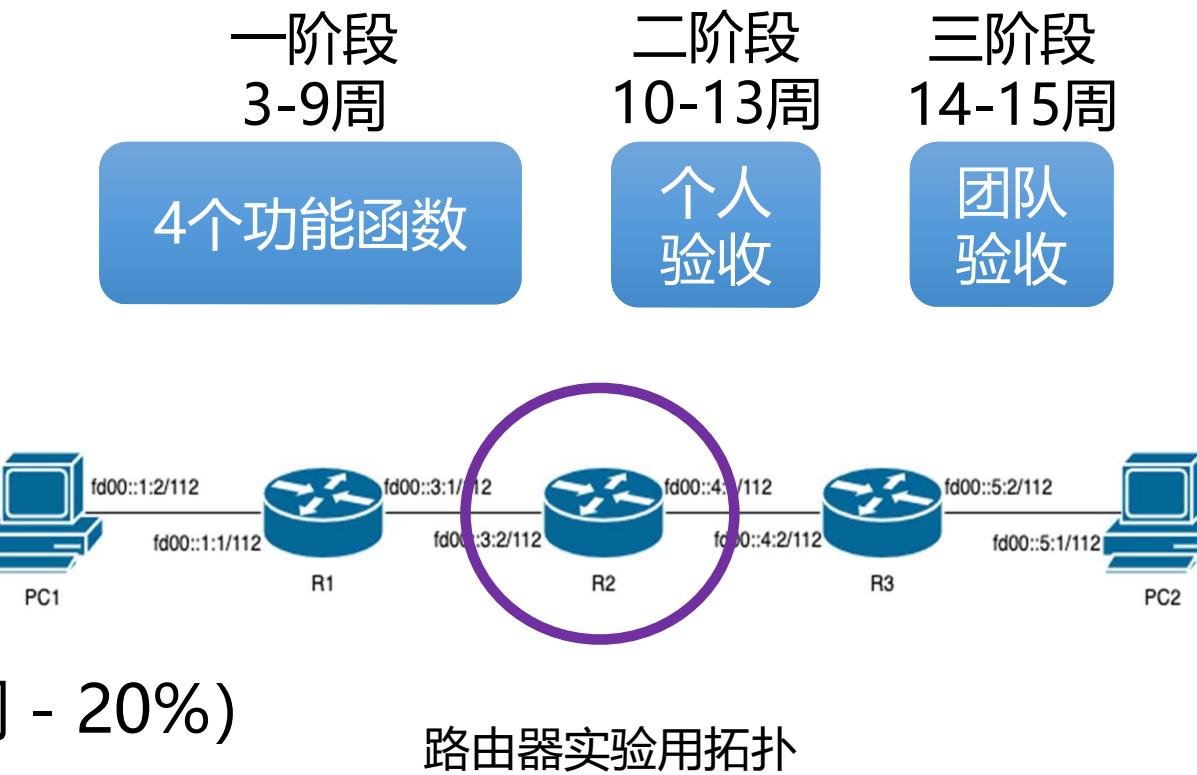


TCP/IP的沙漏模型



路由器实验安排

- 功能函数 (一阶段20%)
 - OJ评测，路由器4个功能
- 个人验收 (二阶段40%)
 - 与标准RIPng协同测试
- 团队验收 (三阶段40%)
 - 三人一组协同测试
- Deadline means deadline
 - 严格按照时间规定完成
 - 逾期按照补交扣分 (每周 - 20%)





选做：网络创新训练简介

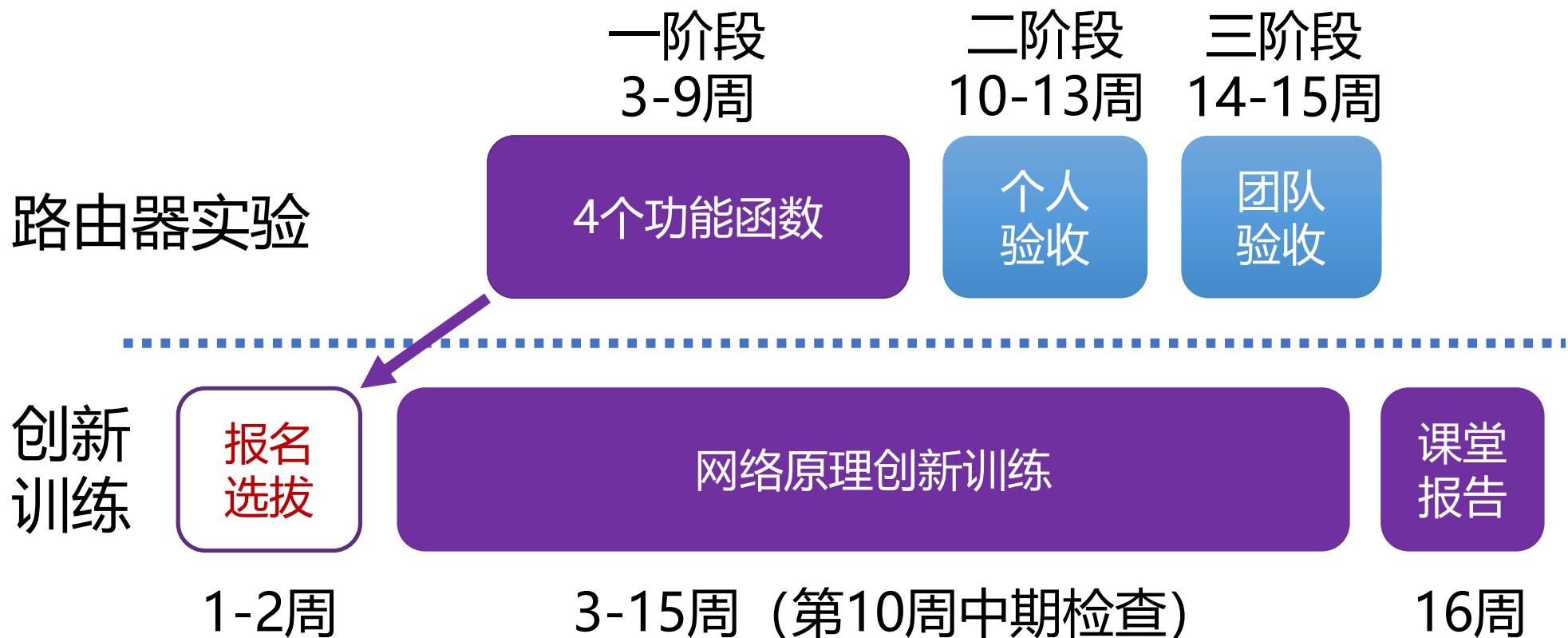
- 学习新型传输协议
 - 运行开源QUIC协议，分析优缺点
- 数据中心网络
 - 研究实现新型调度方案，尝试优化
- 高速数据面编程P4
 - 研究经典论文并复现优化
- 短视频码率调节算法
 - 可参与顶会ACM MM挑战赛
- 综述卫星网络研究进展
- 可申请自选题目

创新训练目标

- **深入领域**: 了解学习网络领域科研方向
- **创新思维**: 发现问题，解决问题，进行展示
- **调研能力**: 挖掘与筛选资料（站在巨人肩膀上）
- **编程能力**: 使用代码将创新的想法付诸实践
- **表达能力**: 深入浅出而准确地介绍创新性工作



实验安排时间线





要求及学习方法

- 1、听课：基础内容，拓展知识面
- 2、**参与**：积极参与课堂讨论
- 3、作业：巩固基础知识
- 4、实验：编程&理解关键算法
- 5、**思考**：知其然知其所以然
- 6、**创新**：让我们一起发明计算机网络
- 7、**前沿**：学术前沿研究成果

为减少工作量，不用预习；但课后要认真复习

子曰：“学而不思则罔，思而不学则殆。”

助教们的话

马川
清华大学计算机系



计算机网络
教案社区



这是门什么样的课？

- 知识为主，动手为辅，覆盖全面的基础课程
- 不是历史课
- 不是数学课



实验（动手）



考试（知识）



这门课难度如何？

➤ 难！

- 实验更难了 (IPv6)
- 考试不容易 (说不定比考研还难)

➤ 也不难！

- 实验分阶段 (时间分布平均)
- 课上有重点 (请积极来上课)
- 作业巩固知识 (请按时交作业)

➤ 小建议

- 作业认真做 (不要迟交、不要抄袭)
- 实验早点做 (不要堆到学期末)
- 考试留足时间复习 (内容不少)





这门课评分如何？

➤ 评分标准

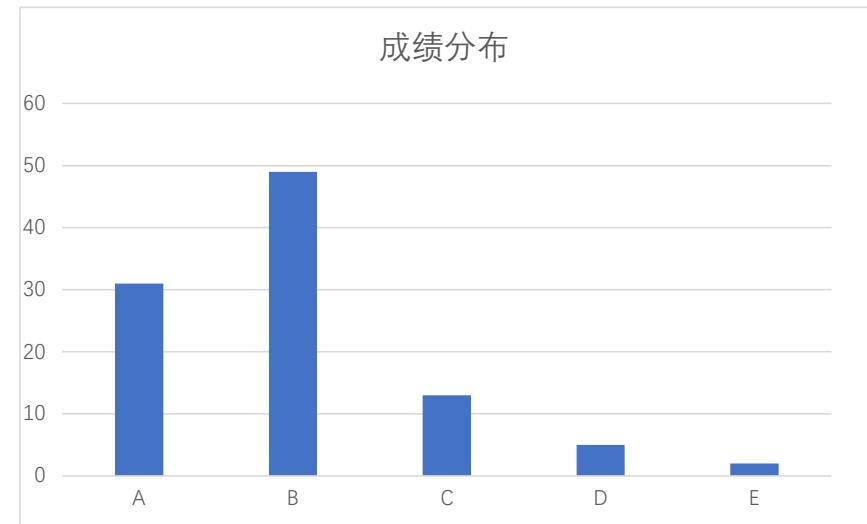
- 作业 10% + 实验 40% + 考试 50%
- 创新训练减少路由器实验与考试占比

➤ 给分好不好？

- 80% 的人得到了 B- 及以上的评价
- 卷子均分 67.9，总成绩均分 82.0
- 基本上考试及格就是 B-

➤ 低分原因分析

- 作业抄袭（问题严重）
- 大实验迟交（扣分比例大）
- 不来听课，考前不复习（有原题）



本学期实验难度有所提升，作业也有变化
请做好规划，完成各种内容



帮我们把课程变得更好

- 我们在积极对课程进行改进
 - 课程内容优化
 - 课程、作业、考试之间的关联度
 - 小实验的调整与优化
 -
- 我们希望听到你们的声音
 - **匿名**向我们提出任何意见和建议
 - 加入我们的**反馈团队**
 - 问卷
 - 意见收集箱
 -



匿名意见收集箱



课程通知方式

- 网络学堂
- 课程群



计算机网络原理-2022春



该二维码 7 天内 (2月28日前) 有效，重新进入将更新

感谢各位同学选修本课程！

欢迎各位同学对我们的工作进行批评指正！



计算机网络
教案社区



劝退篇

➤ 缺点多多，难以两全

- 细枝末节要死记硬背，像历史或化学？

上课讲述 v.s. 编程实验
美妙算法 v.s. 工程技术
创新设计 v.s. 出错处理
时髦技术 v.s. 基本原理

居然还不退？？欢迎勇士！



➤ 清华大学的计算机网络课程

- 《计算机网络》：计算机系任丰原，软院杨铮，信息学院.....
- 电子系：计算机网络技术与实践；自动化系：计算机网络与多媒体
- 电机系：计算机网络技术基础；叉院：计算机网络基础

➤ 天才宝宝三选一：网络原理

- 敬请期待秋季学期超牛资深教授：吴建平院士；徐明伟副院长
- 本课堂（崔勇）：努力尝试问题导向，发明创造，新旧结合，死心眼点名？

第一章 引言

崔 勇

清华大学 计算机系



计算机网络
教案社区

致谢社区成员

清华大学 崔勇

华南理工大学 王昊翔

新乡学院 田亮

郑州工程技术学院 王嫣

安徽工程大学 严楠

西安理工大学 李军怀



本章目标

1. 了解计算机网络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. 了解网络安全与威胁
4. 了解国内外互联网发展史，以史为鉴



网络的基本功能

- 网络提供的最基本服务: 信息传递
 - 信鸽、烽火、信使、卡车、电报、电话、互联网...
 - 类比运输服务: 物体的传递
 - 马车、火车、卡车和飞机
- 不同的信息传递用什么区分?
 - 所提供的服务 (需求)
- 服务用什么区分?
 - 功能、延迟、带宽、丢弃率
 - 端节点数目、服务接口
 - 可靠性、实时/非实时等外特性

在烽火戏诸侯的年代，
可否想到今天的信息传递方式?
发明创造是关键



上天入地的网络和应用



远程医疗



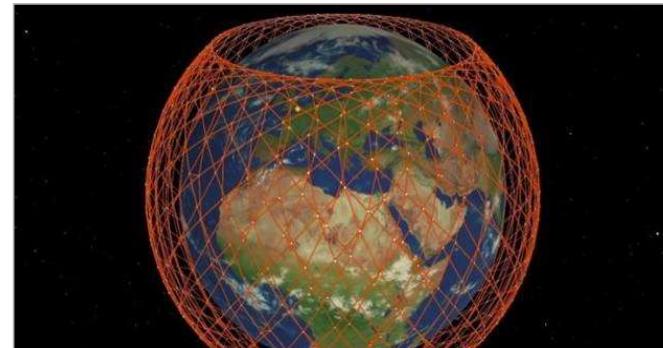
无人码头的远程操控



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

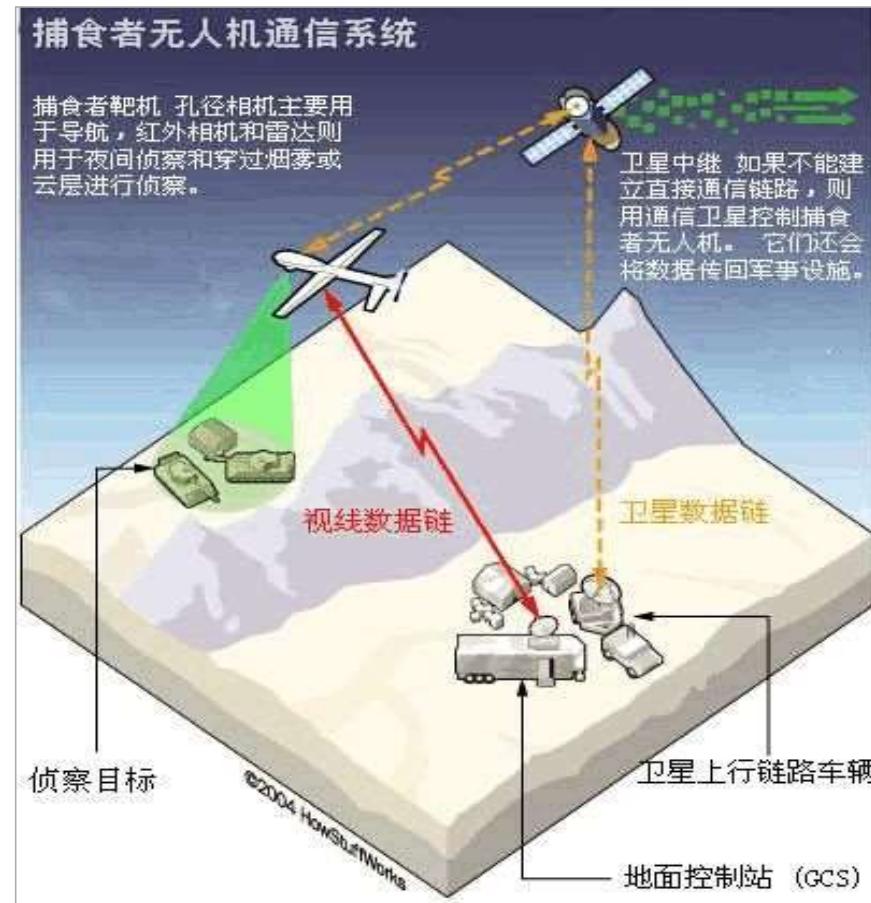


大文件分享的
奶牛快传



网络在军事领域的应用

- 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



底层通信技术





全球市值前十名公司的变迁



计算机网络教案社区



- 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



CISCO
San Francisco



硅谷在哪里?
美国西部荒凉的湾区

我辈中人?



我国的新基建

- 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



本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 网络安全与威胁

1.4 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



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区



网络分类 (按地域规模)

➤ 个域网PAN (Personal Area Network)

- 能在便携式消费电器与通信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
- 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



典型局域网设备
无线路由器

➤ 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



Internet 与 internet

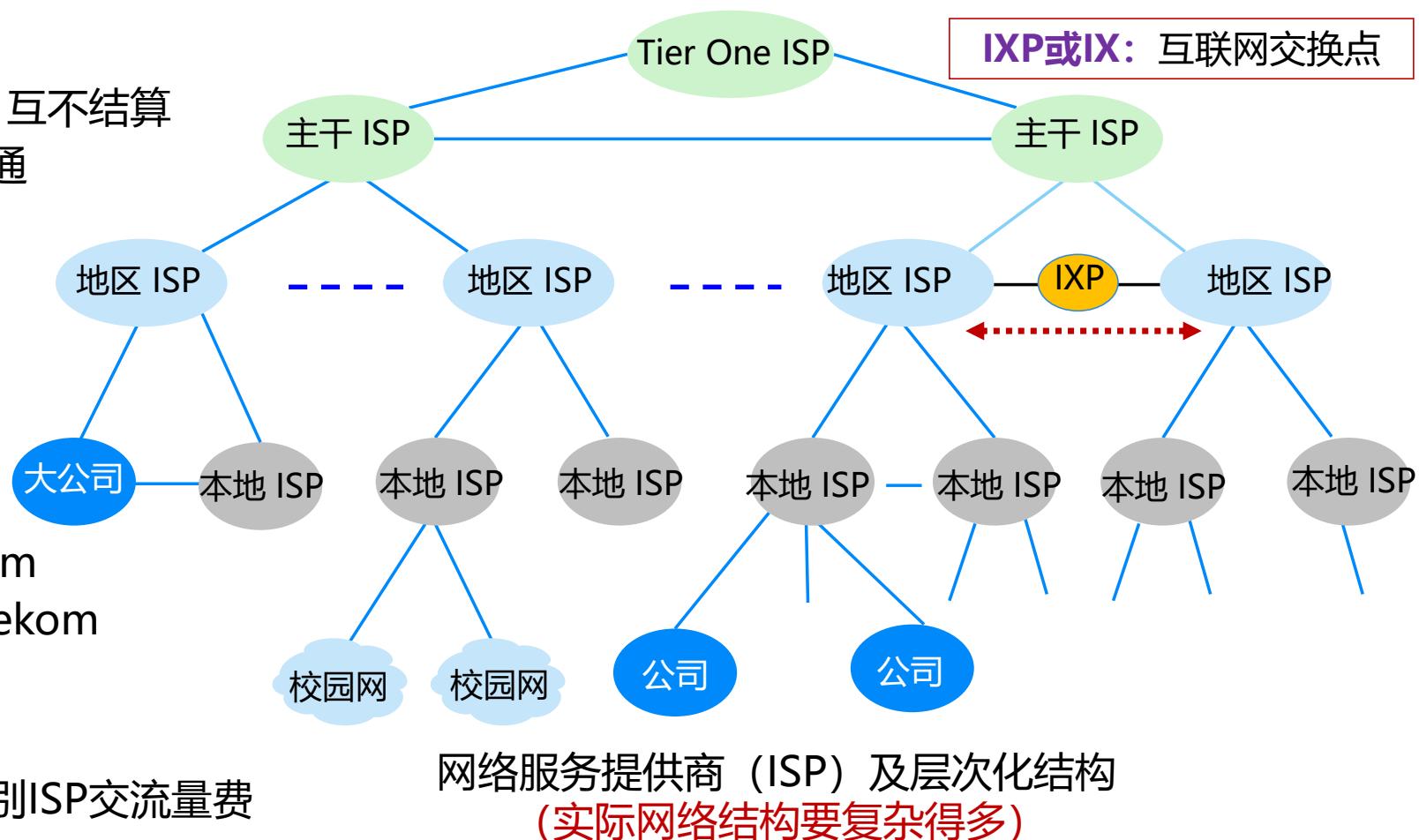
互联网 (Internet)	互连网 (internet)
相似之处	
网络的网络 (这种类型的一个具体实例)	网络的网络 (泛指这种类型)
不同之处	
特指遵循 TCP/IP 标准、利用路由器将各种 计算机网络互连起来而形成的、覆盖全球 的、特定的互连网	泛指由多个不同类型计算机网络互连而成 的网络
使用 TCP/IP	除 TCP/IP 外，还可以使用其他协议
是一个专用名词	是一个通用名词



互联网的层级结构

➤ 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交流量费



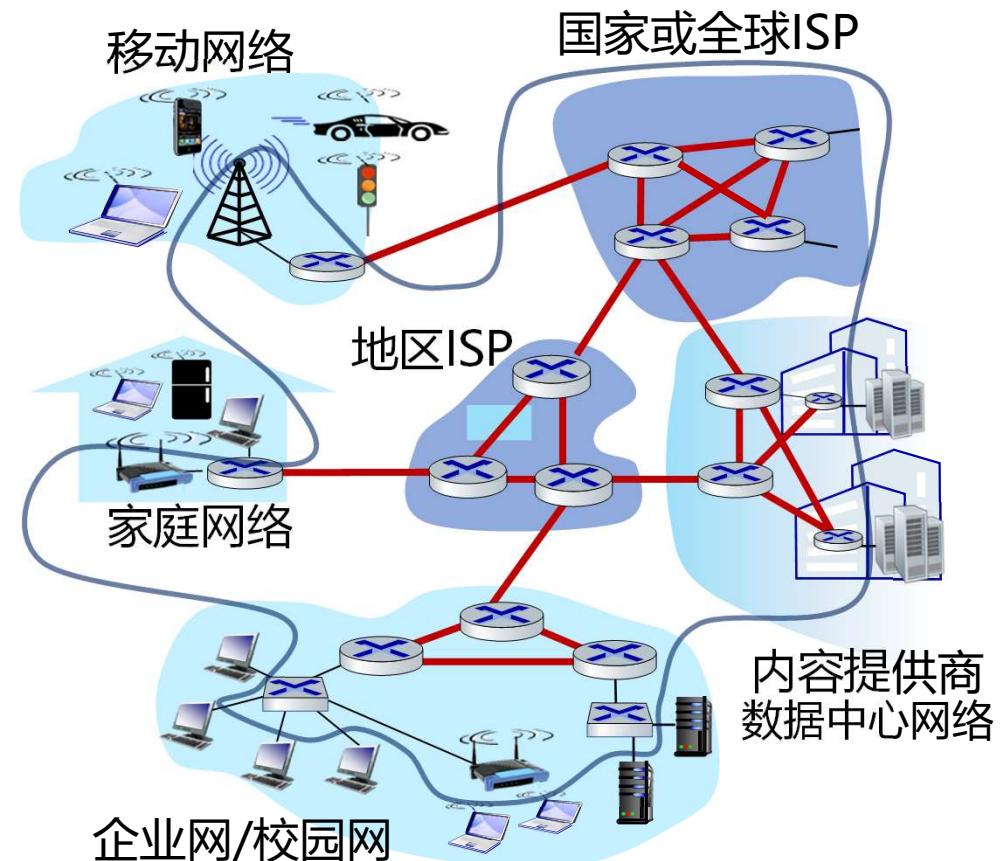
互联网的构成

➤ 网络边缘 (资源子网)

- 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 (通信子网)

- 由互连线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)





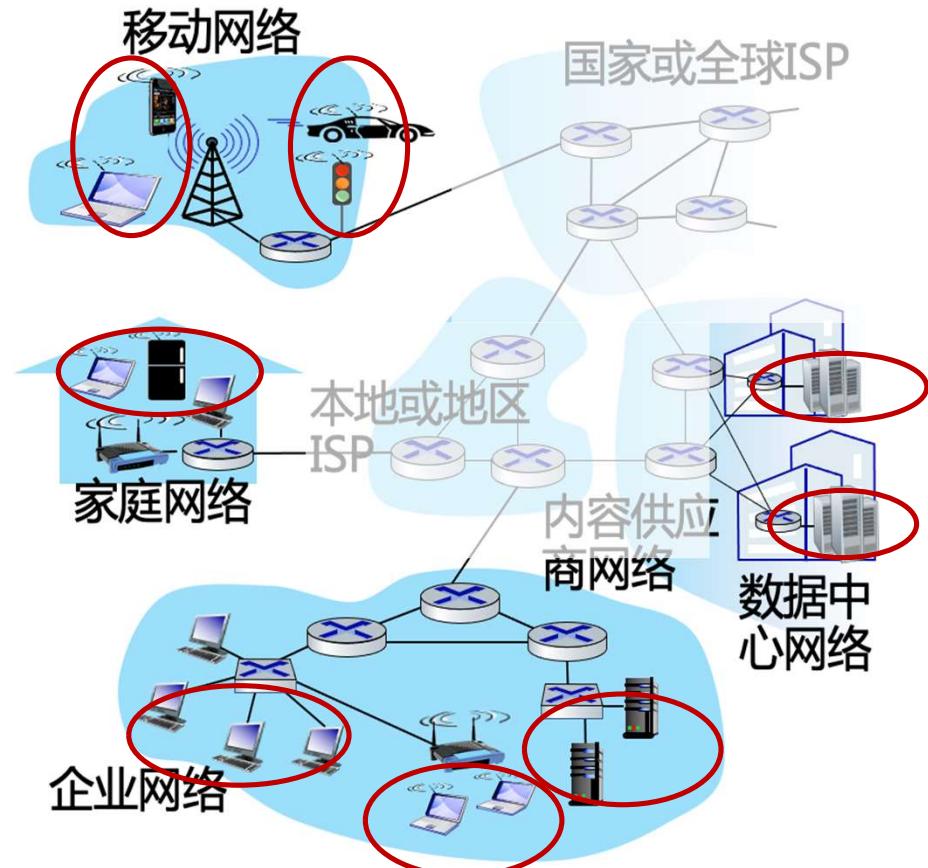
网络边缘

➤ 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

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

各种异构终端如何接入网络?



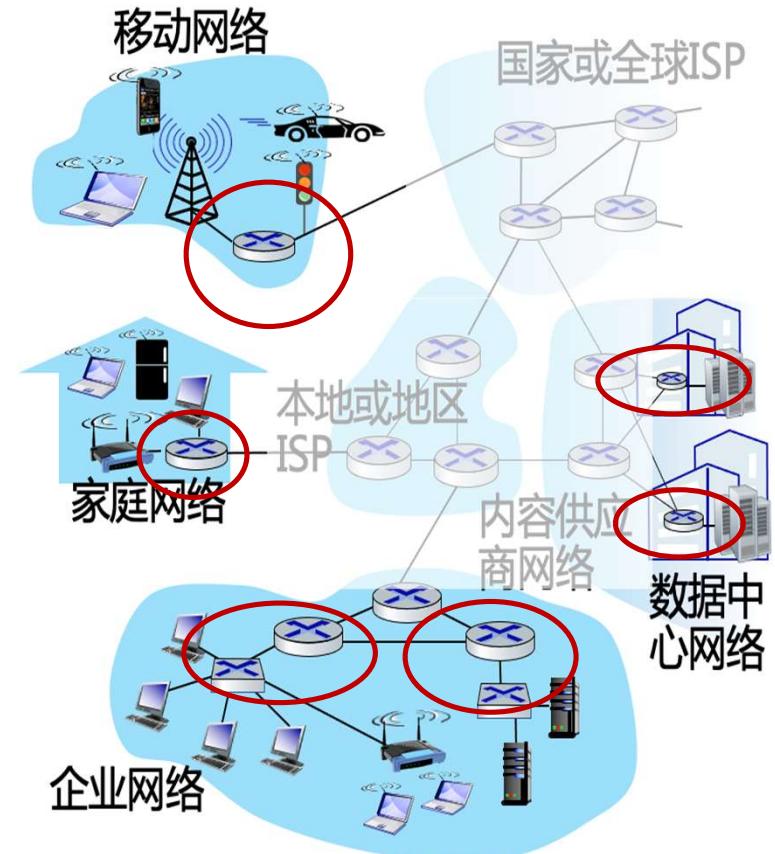
接入网概述

➤ 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？

- **无线网络接入技术**: WiFi、4G/5G，卫星广域覆盖
- **有线网络接入技术**: 光纤到户FTTH，以太网，同轴电缆，双绞线的DSL，古老的拨号上网
- 接入场景: 住宅(家庭)接入网，机构(学校、公司)接入网，移动接入网络(WiFi、4G/5G)





传输单元与媒介

➤ 传输单元：位 (bit)

- 在发射机/接收机之间的物理介质上传播的数据的最小单元
- 用比特表示 (bit)

➤ 物理媒介 (Media)

- 是指发射机和接收机之间的具体链路介质
- **引导型介质**：信号在固体介质中传播，例如铜、光纤、同轴电缆
- **非引导型介质**：信号自由传播，例如无线电（陆地无线电、卫星无线电信道）

存储常用**字节Byte**
K/M/G层级为 2^{10} 进制

传输常用**比特Bit**
K/M/G层级为 10^3 进制

1B=8b (注意大小写)



接入网：无线接入

- 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



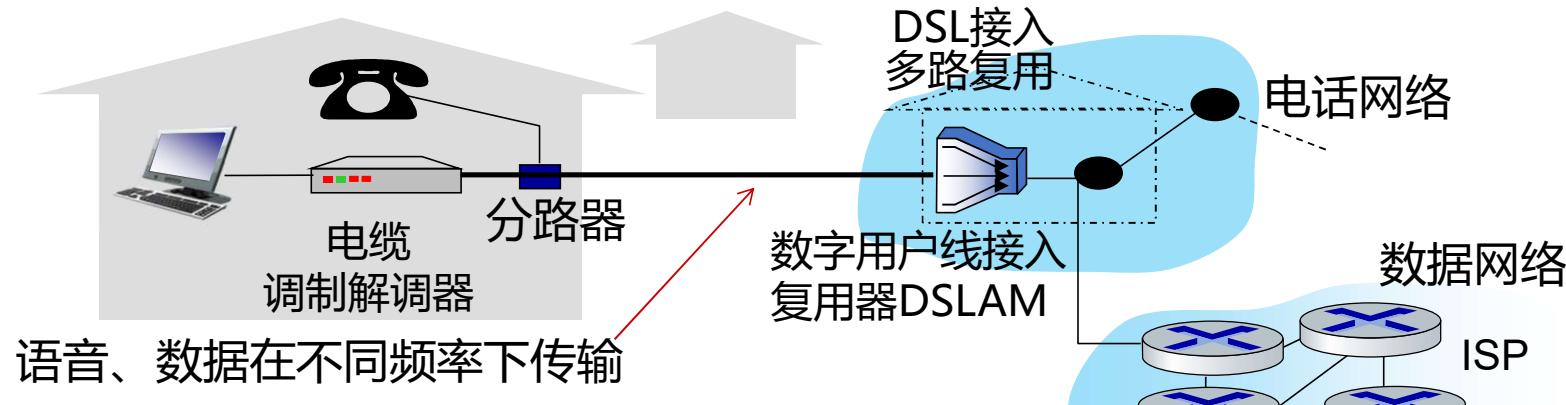
大家家里如何上网?



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

国外大量使用DSL ☺





接入网：同轴电缆

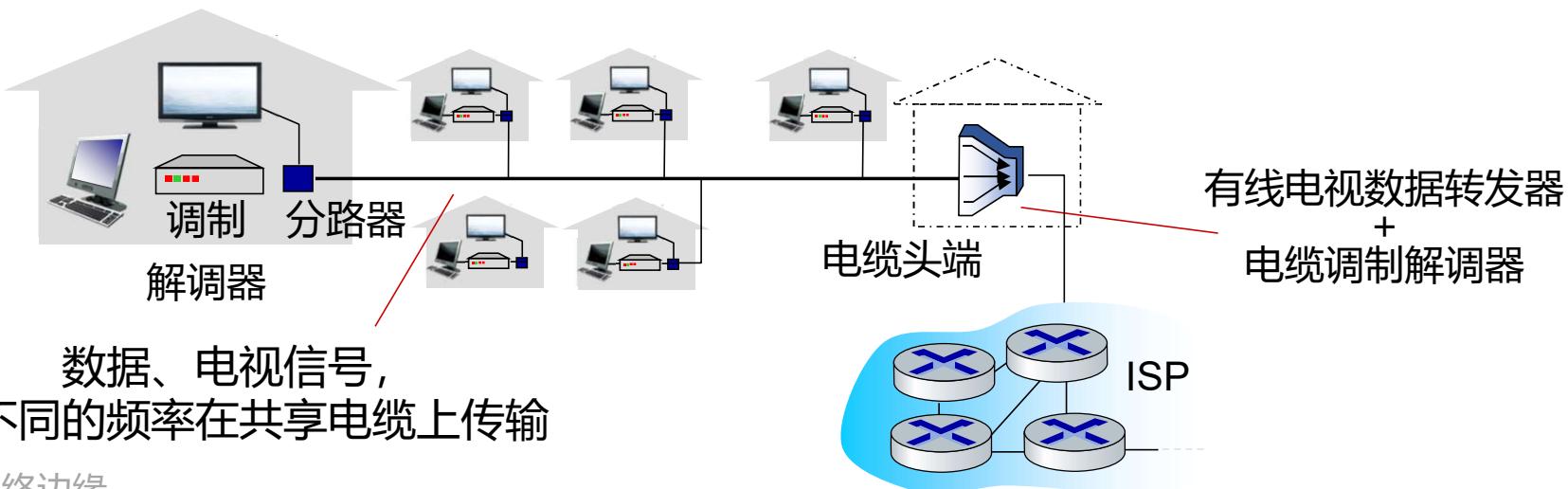
➤ 同轴电缆：Cable

- 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

美国住宅有80%多使用
DSL或同轴电缆接入 ☺

➤ 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





接入网：光纤到户FTTH

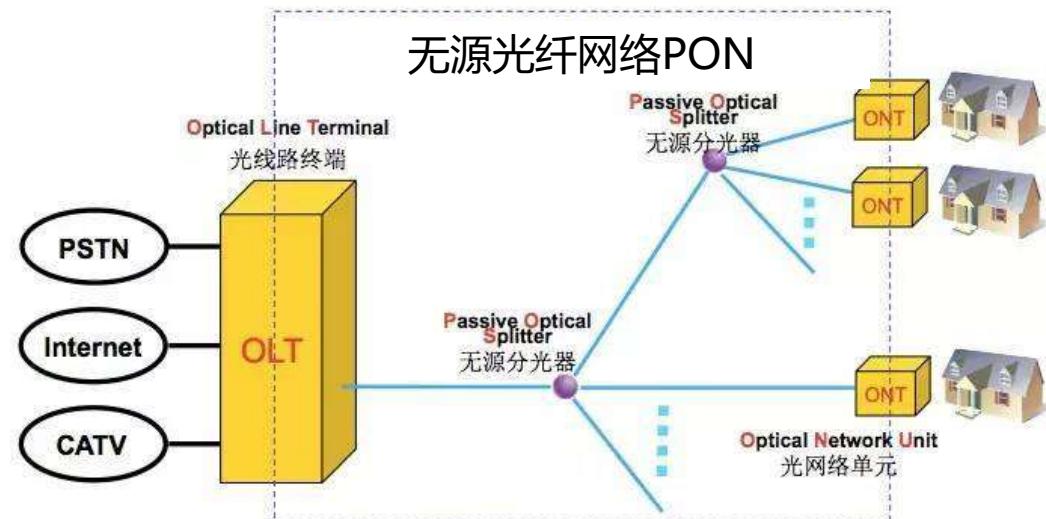
➤ 光纤到户FTTH

- 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：企业和家庭网络

➤ 实际的接入网

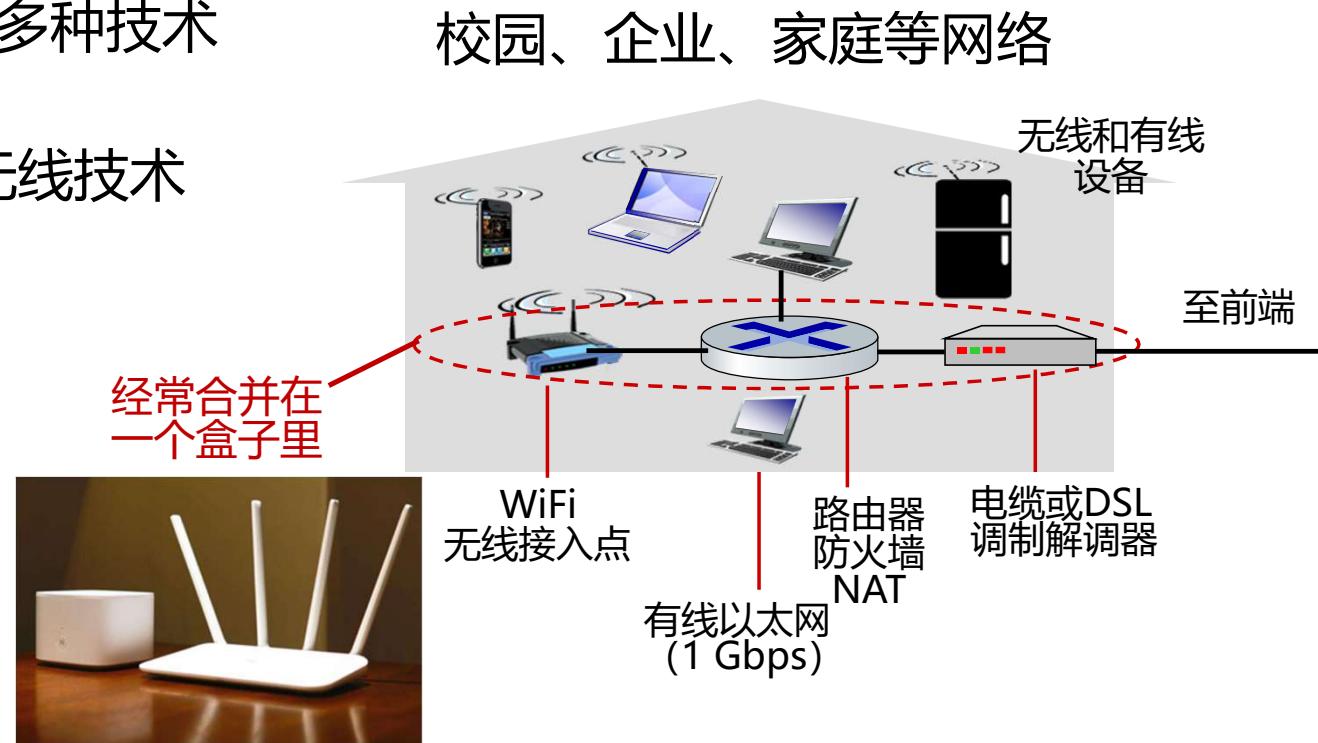
- 往往采用有线、无线等多种技术的混合
- 甚至WiFi和4G等多种无线技术的混合接入

➤ 有线以太网接入

- 100Mbps、1Gbps、10Gbps等接入速率

➤ 无线WiFi接入

- 11、54、450Mbps等





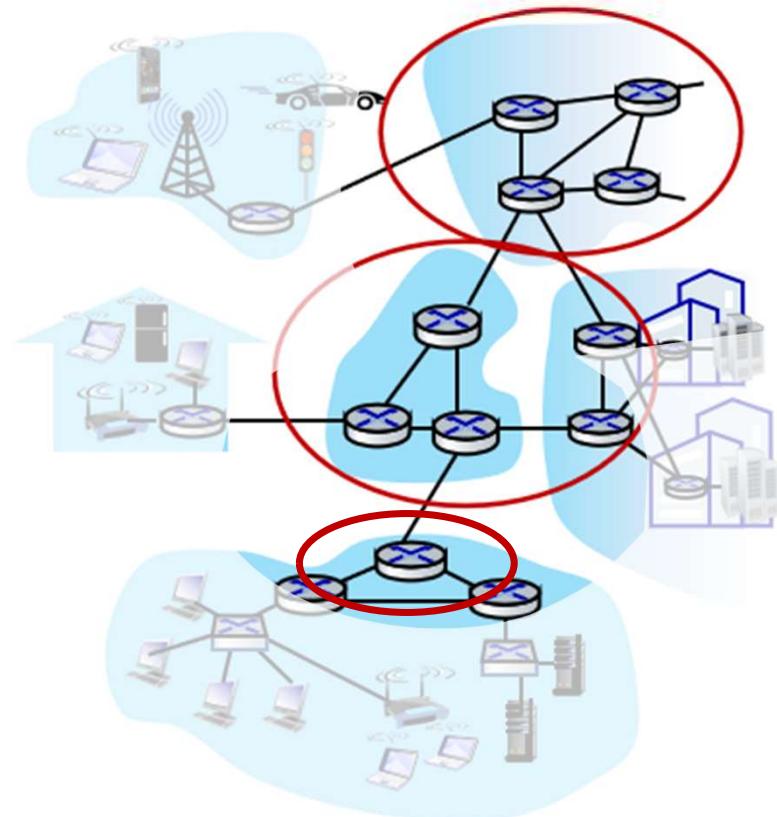
网络核心

➤ 网络核心（通信子网）

- 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

➤ 分组交换（也称包交换）

- 主机将数据分成分组，发送到网络
- 网络将数据分组从一个路由器转发到下一个路由器，通过从源到目标的路径上的链路，**逐跳传输**抵达目的地





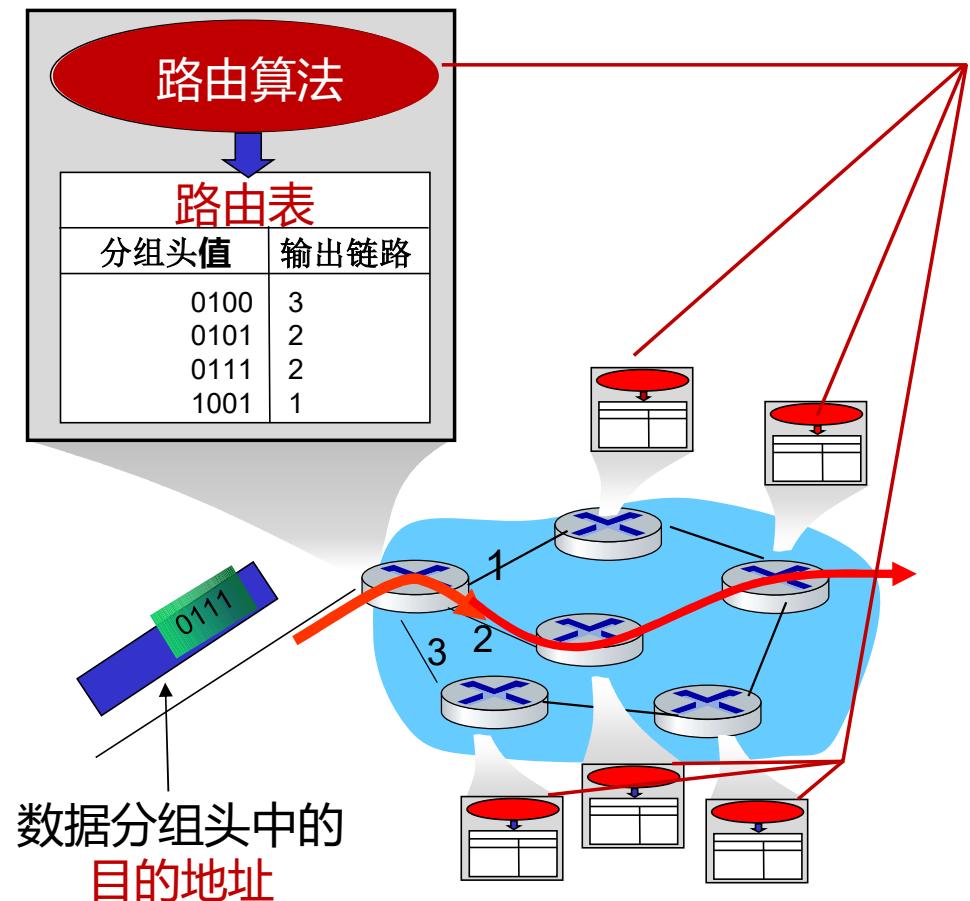
网络核心的两大功能

➤ 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

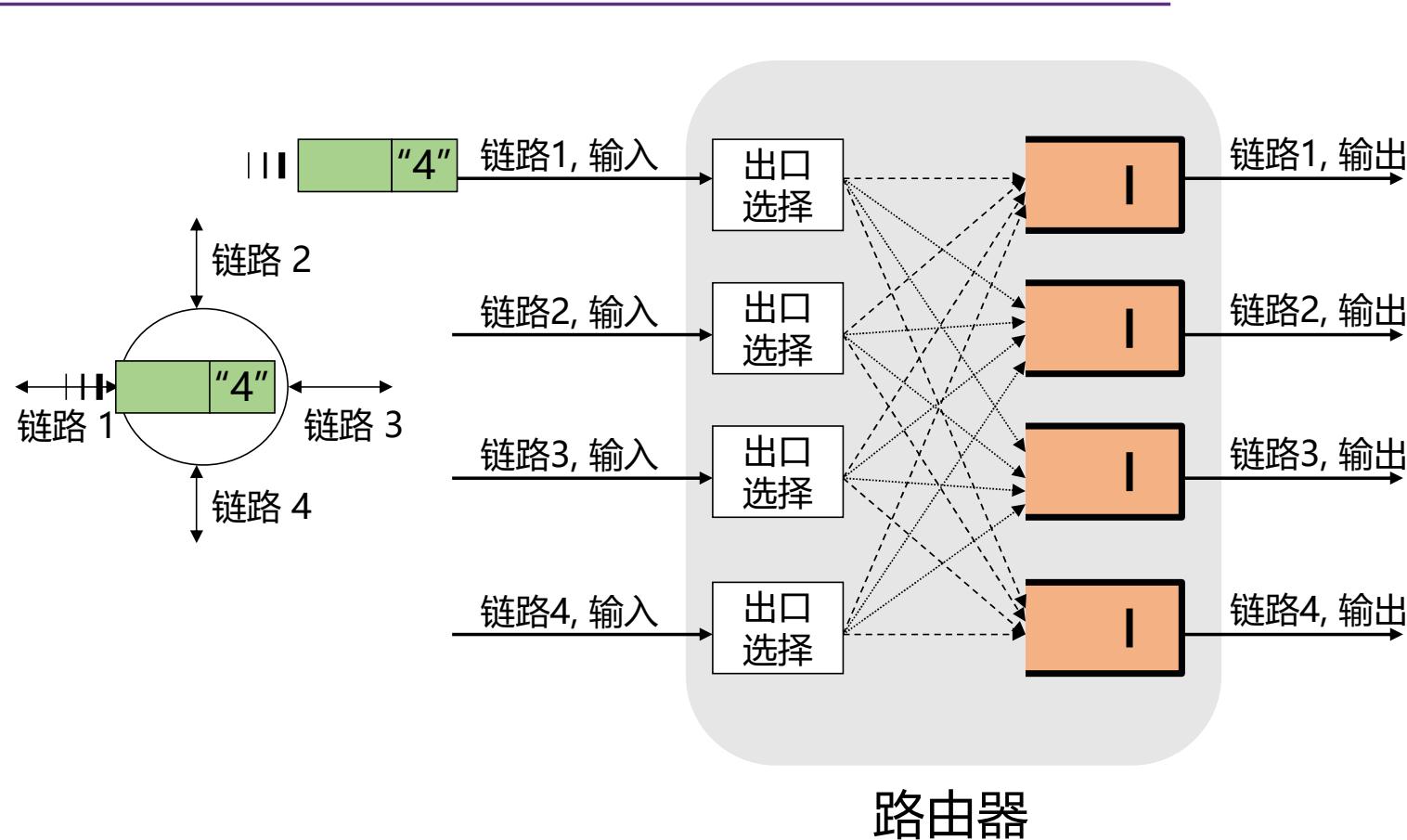
➤ 功能2：转发

- 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

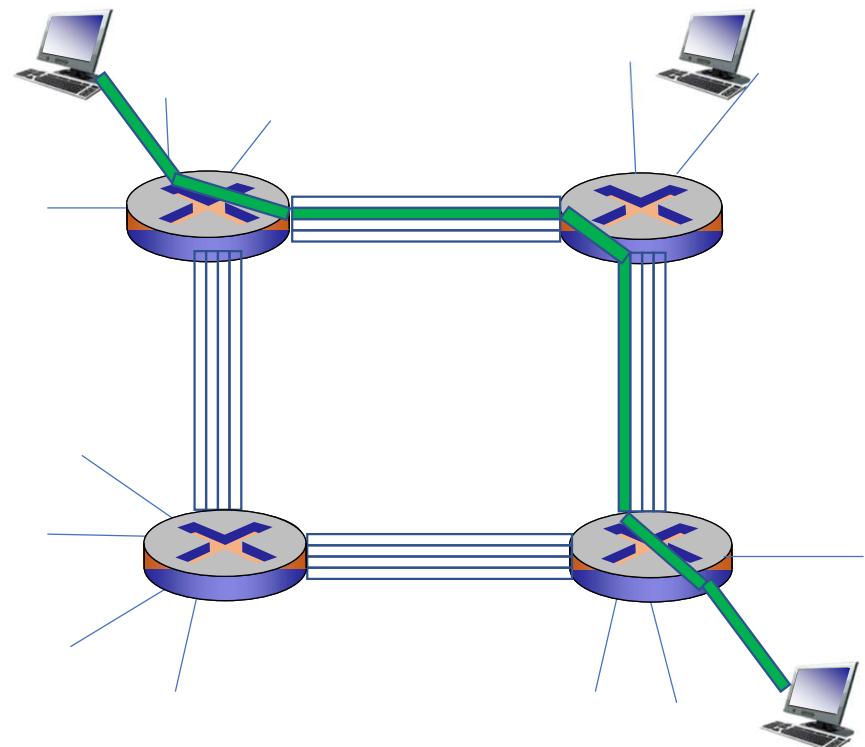




电路交换

➤ 电路交换的主要特点

- 电路交换通常采用面向连接方式
- 先呼叫建立连接，实现端到端的资源预留
- 预留的资源包括：链路带宽资源、交换机的交换能力
- 电路交换连接建立后，物理通路被通信双方独占，资源专用，即使空闲也不与其他连接共享
- 由于建立连接并预留资源，因此传输性能好；但如果传输中发生设备故障，则传输被中断





电路交换

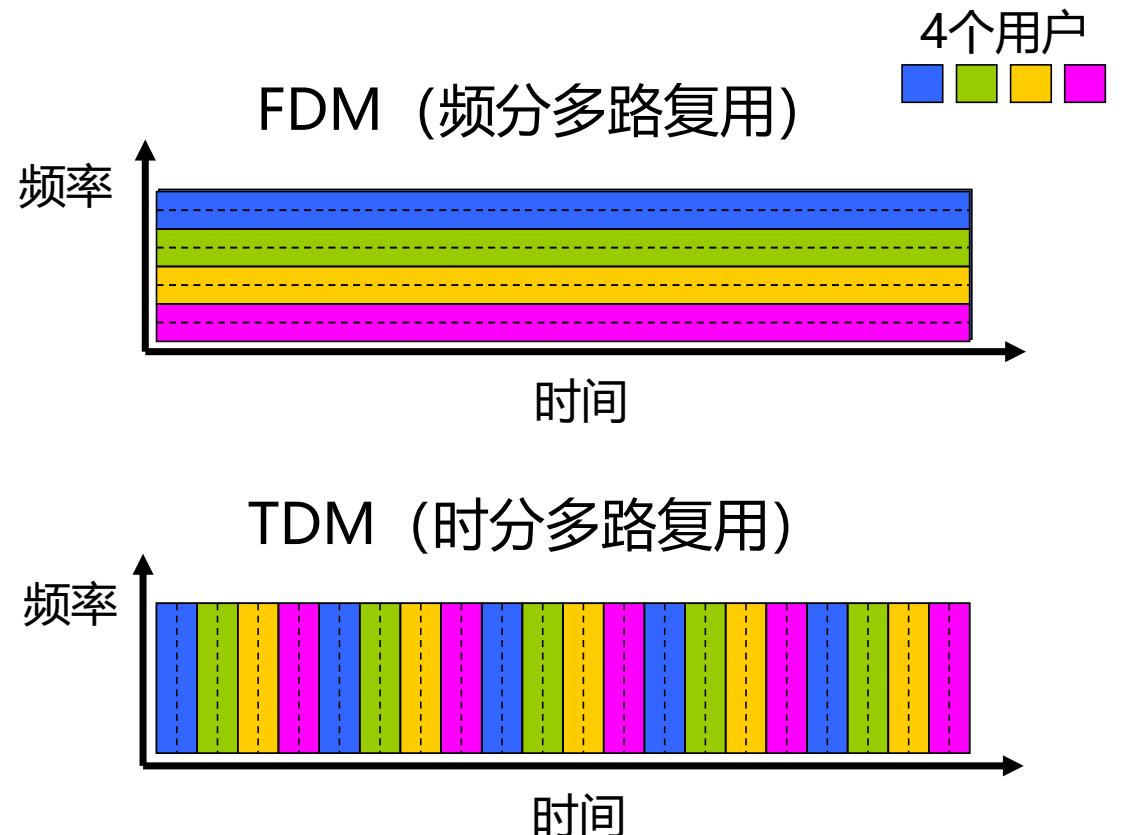
➤ 电路交换的多路复用

- 频分多路复用FDM, 时分多路复用TDM.....
- 在每一路上实现具有和专用链路类似的性能
- 该路资源专用, 即使空闲也不与其他连接共享

缺点

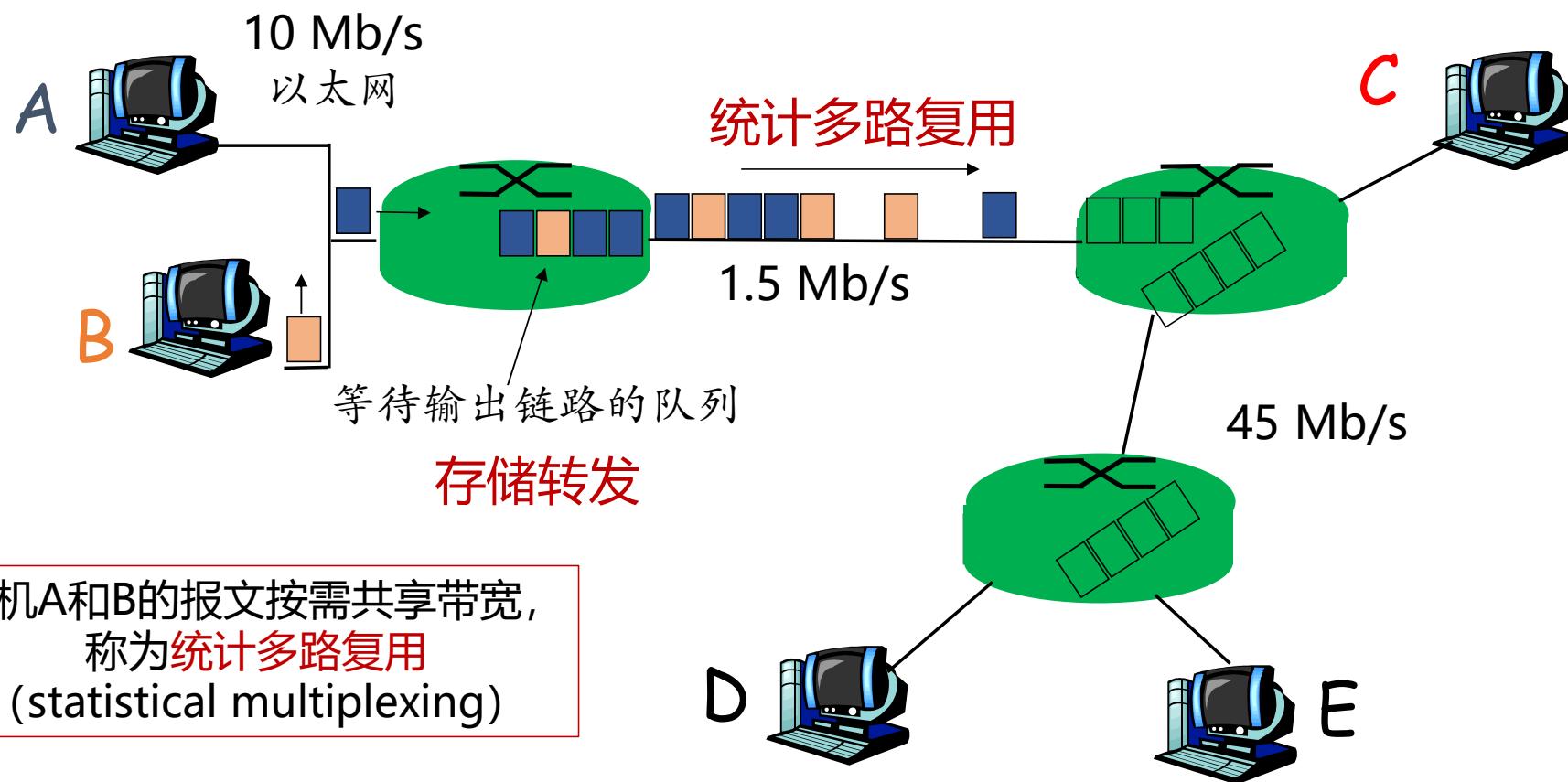
无法应对互联网中广泛存在的
“突发” (Burst) 流量

如何发明更灵活的多路复用?





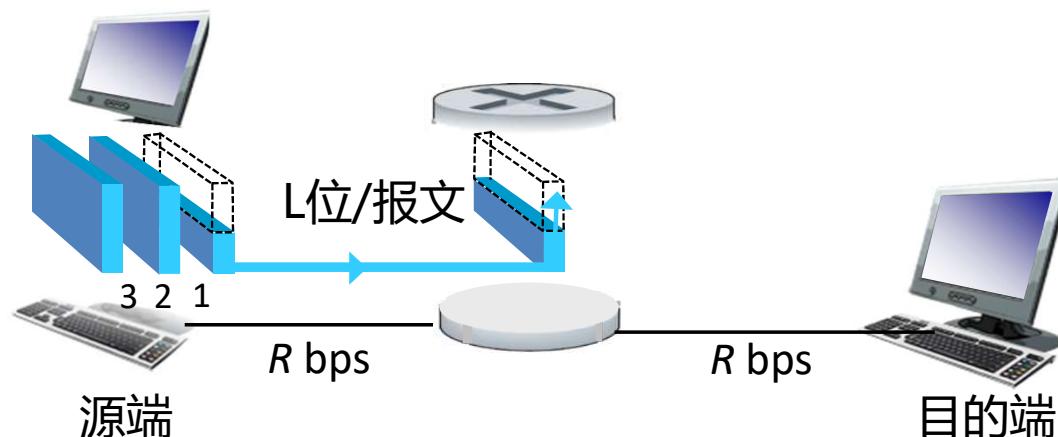
统计多路复用





报文交换

- 使用报文而非数据流
 - 路由器存储与转发报文，**不需预留资源**
- 存储转发带来报文的**传输延迟**
 - 路由器接收完整的数据报文后，才能开始向下一跳发送
 - 将L位数据报文，以R bps的速率，发送到链路中： 需要 L/R 秒



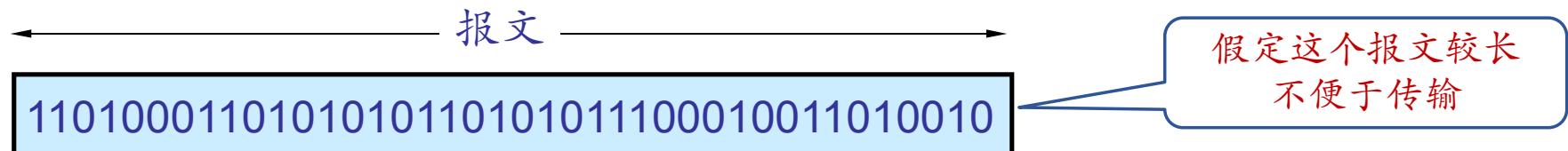
单跳数值示例：
 $L=100KB$, $R=100 Mbps$
一跳发送延迟=8毫秒
10跳发送延迟=80毫秒

如何降低报文存储转发的延迟？

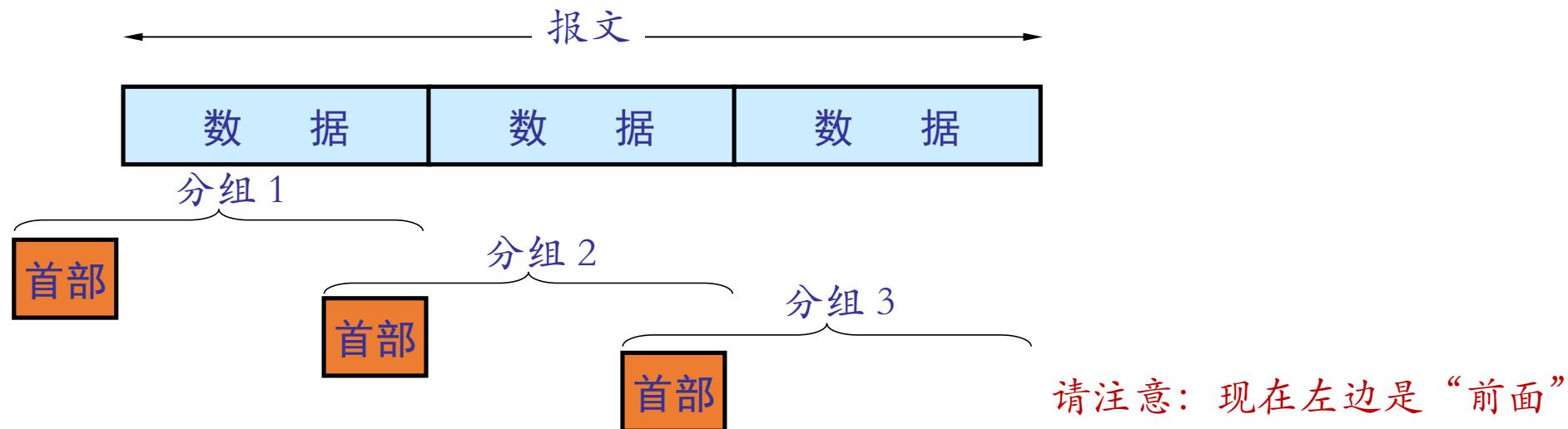


分组交换

- 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

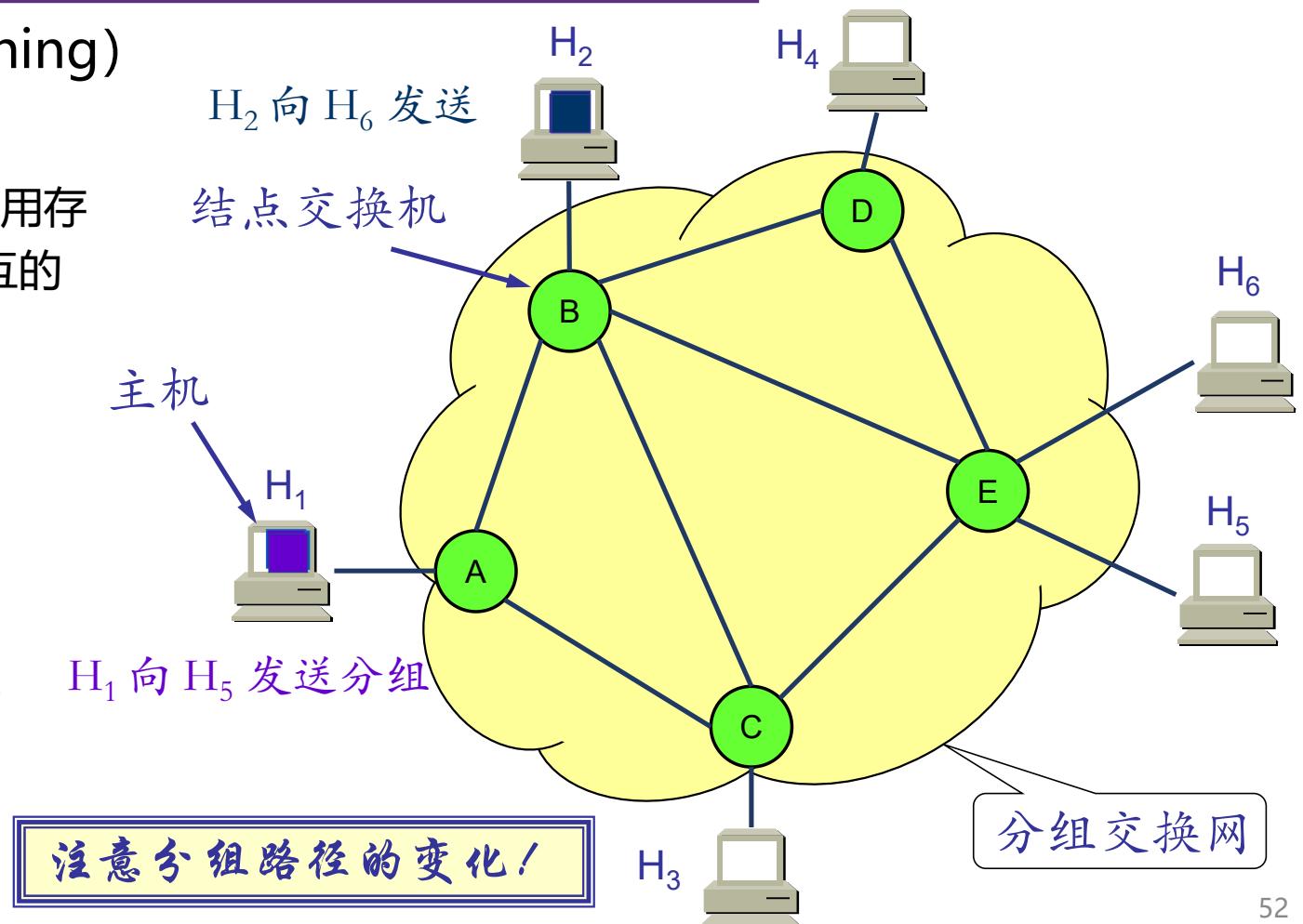




分组交换网的端到端传输

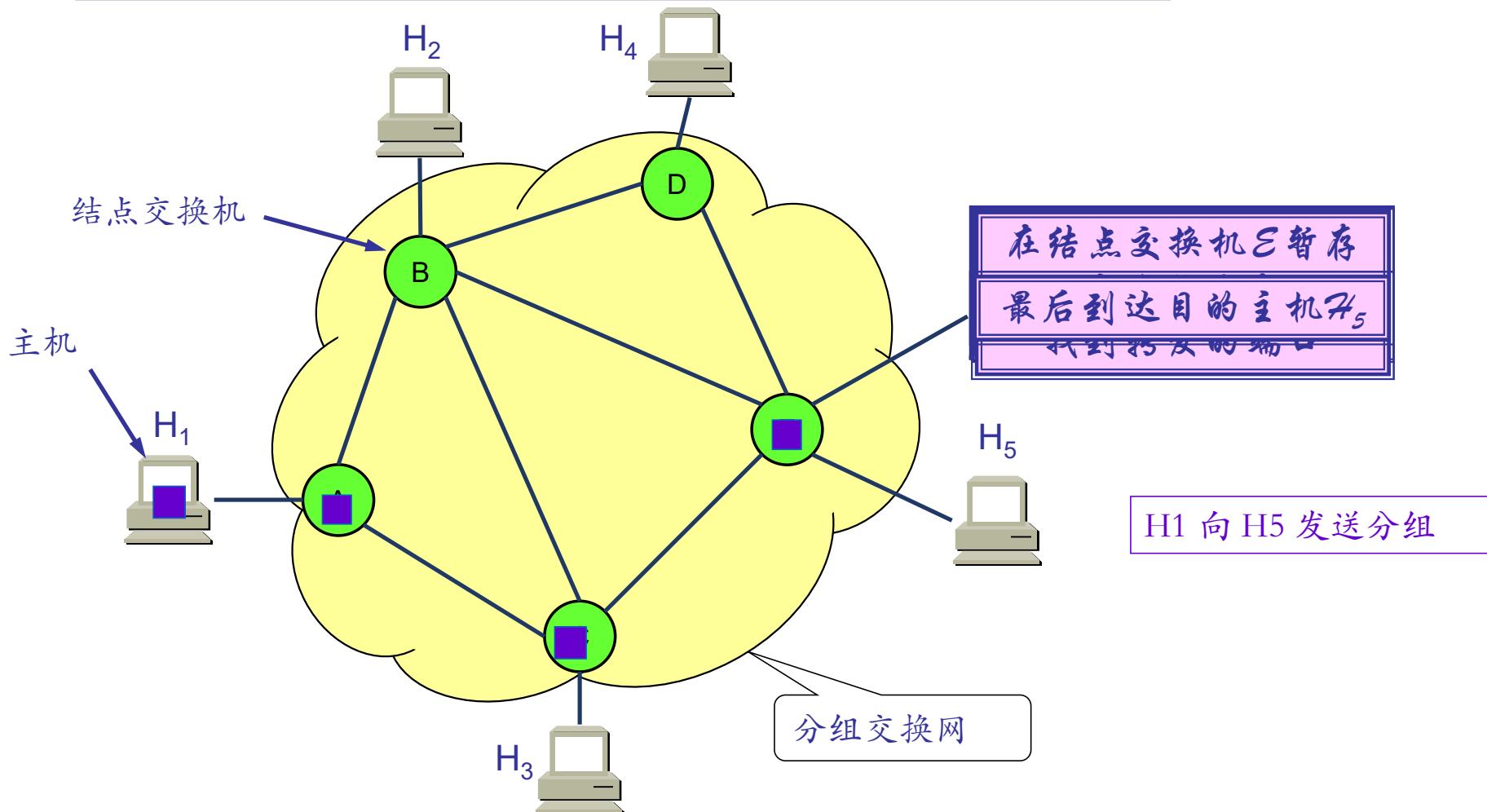
分组交换 (packet switching)

- 将大报文拆分成多个小分组
- 通信双方以分组为单位、使用存储-转发机制，实现数据交互的通信方式
- 以分组作为数据传输单元
- 每个分组的首部都含有地址（目的地址和源地址）等控制信息
- 每个分组在互联网中独立地选择传输路径
- 支持灵活的统计多路复用



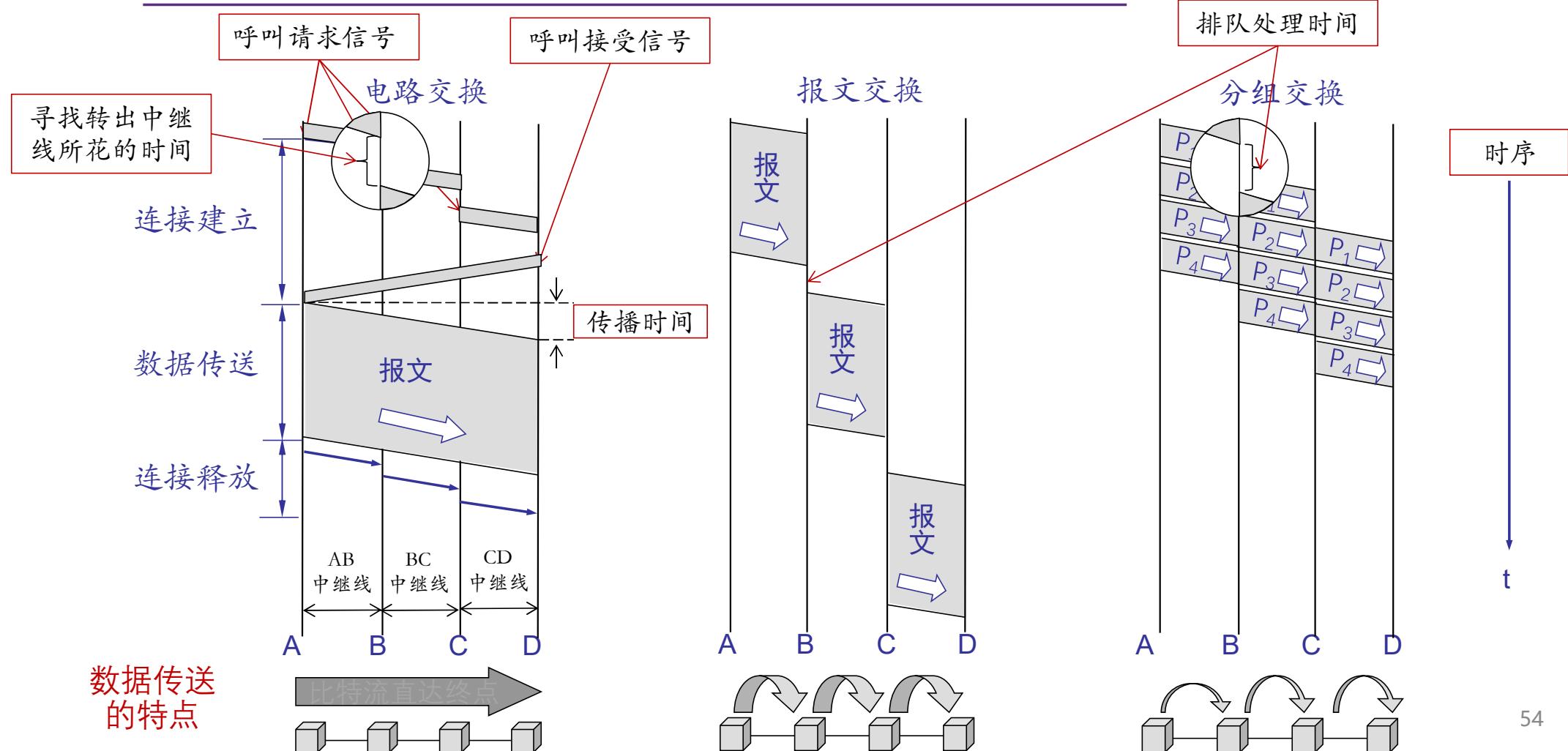


分组的存储转发过程





三种交换对比

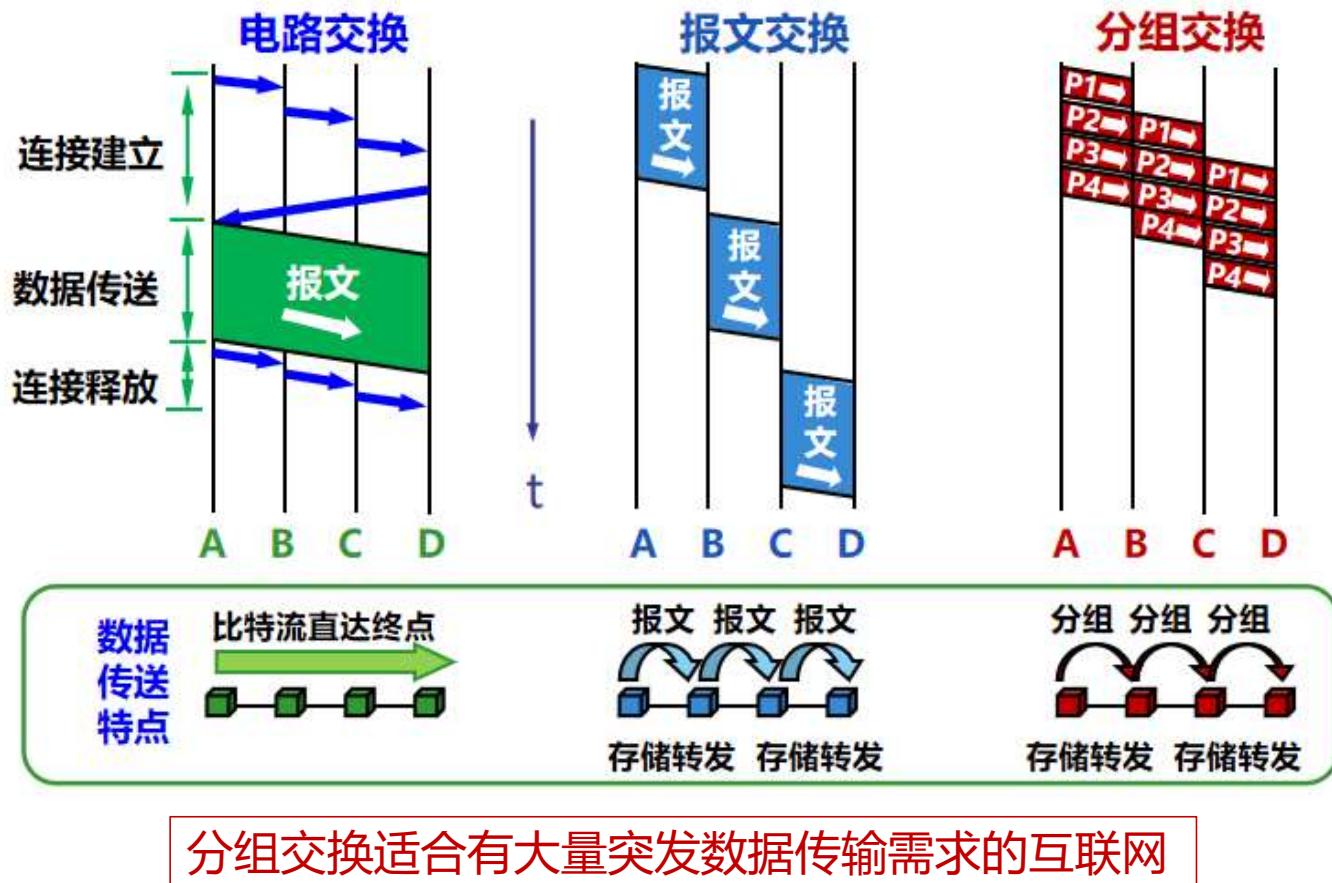




典型交换方式的比较

➤ 三种交换的比较

- 电路交换需要建立连接并预留资源，难以实现灵活复用
- 报文交换和分组交换较灵活，抗毁性高，在传送**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**，也具有更好的**灵活性**





分组交换的优势

➤ 分组交换使得更多用户可“同时”使用网络！

➤ 场景示例

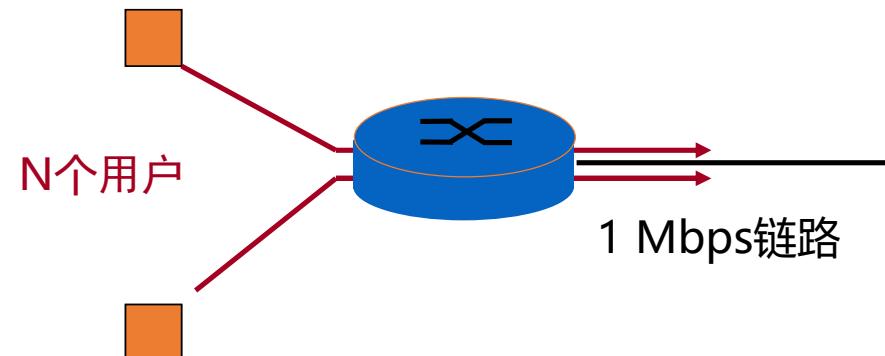
- 假设一条 1Mb/s 链路
- 每个用户激活时间为 10%
- 激活时，数据带宽为 100Gb/s

➤ 电路交换

- 可容纳10个用户

➤ 分组交换

- 对35个用户来说，10个及以上用户同时激活的概率小于0.04%





分组交换的优势 (2)

- 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

分组交换是不是“大满贯冠军？”

- 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电路交换的性能?
 - 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



例题：电路交换

- 从 A 到 D 传送 20MB 的文件。从 A 到 D 经过 3 段链路，每段链路的传播时延为 0.1s，比特率为 10Mbps。设在电路交换时电路的建立时间为 5s。不考虑其他延迟和开销，求问从 A 开始发送到 D 接收完毕需要时间？

文件大小：

$$20\text{MB} = 20 * 2^{20} \text{B} = 20 * 2^{23} \text{b}$$

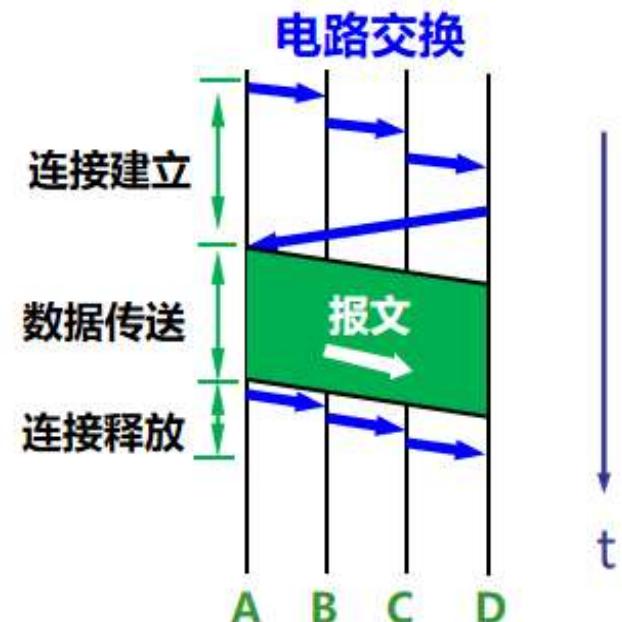
整个文件的传输时延（发送时延）：

$$20 * 2^{23} / 10\text{Mbps} \approx 16.78\text{s}$$

整体的传播时延为：

$$0.1\text{s} * 3 = 0.3\text{s}$$

$$\text{总时间为: } 16.78\text{s} + 0.3\text{s} + 5\text{s} = 22.08\text{s}$$





例题：分组交换

- 从 A 到 D 传送 20MB 的文件。从 A 到 D 经过 3 段链路，每段链路的传播时延为 0.1s，比特率为 10Mbps。在分组交换中每个分组可携带的数据最大为 1KB，每个分组的分组头为 60B。不考虑其他延迟和开销。
求从 A 开始发送到 D 接收完毕需要的时间？

分组数量： $20\text{MB} / 1\text{KB} = 20 * 1024$

每个分组的大小： $1\text{KB} + 60\text{B} = 1084\text{B} = 8,672\text{b}$

所有分组的发送时延（即传输时延）：

$$20 * 1024 * 8,672\text{b} / 10\text{Mbps} \approx 17.76\text{s}$$

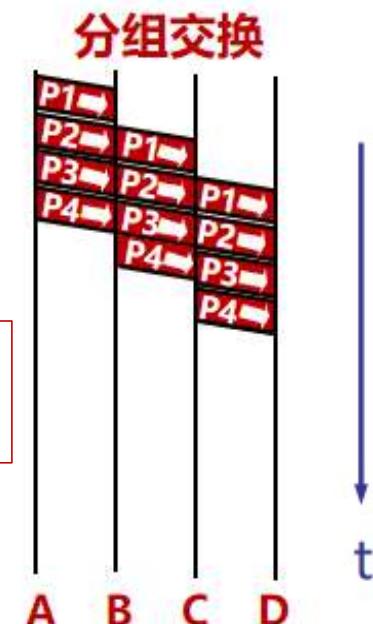
整体的传播时延为： $0.1\text{s} * 3 = 0.3\text{s}$

储存转发带来的时延为：

$$(3-1) * 8672\text{b} / 10\text{Mbps} \approx 0.002\text{s}$$

$$\text{总时间为：} 17.76\text{s} + 0.3\text{s} + 0.002\text{s} = 20.762\text{s}$$

储存转发引入
的时延非常小





分组交换——小结

- 高效：动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用
- 灵活：以分组为传送单位和查找路由
- 迅速
 - 不必先建立连接就能向其他主机发送分组；充分使用链路的带宽
- 可靠
 - 完善的网络协议；自适应的路由选择协议使网络有很好的生存性
- 缺点
 - 分组在各结点存储转发时需要排队，这就会造成一定的时延
 - 分组必须携带的首部（里面有必不可少的控制信息）也造成了一定的开销
 - 服务质量QoS控制是个大问题！



小结：网络实例

➤ 网络的分类

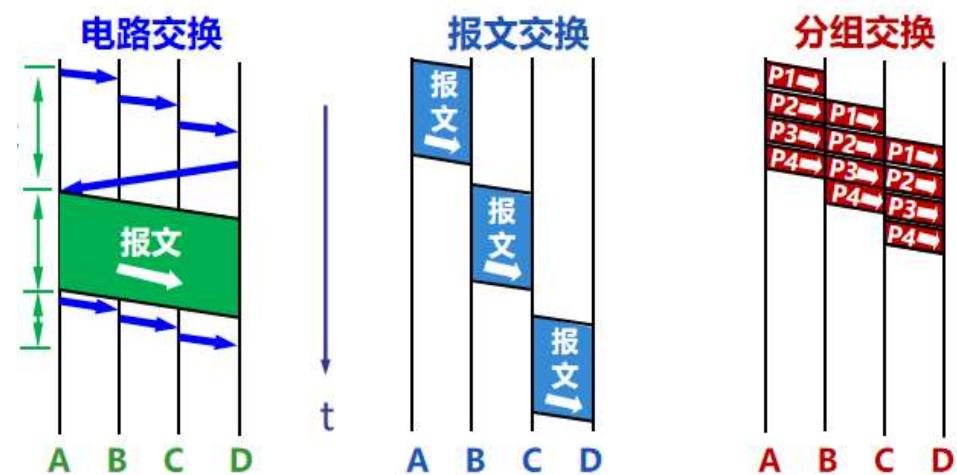
- 个域网PAN
- 局域网LAN
- 城域网MAN
- 广域网WAN

➤ 网络的构成

- 网络边缘
- 网络核心
- 如何连接：接入网

➤ 如何传输：交换方式

- 电路交换：面向连接，预留资源
- 报文交换：无连接，报文大
- 分组交换：无连接，分组小
- 会计算**延迟**





本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 网络安全与威胁

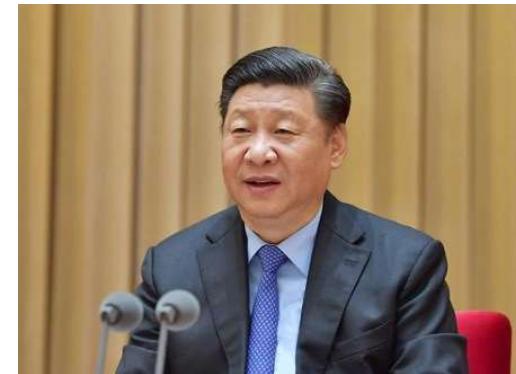
1.4 互联网发展史与启示

- 1. 网络安全问题的由来
- 2. 病毒、蠕虫与恶意软件
- 3. 拒绝服务攻击
- 4. 密码泄露与撞库攻击
- 5. 数据包嗅探与IP欺骗
- 6. 隐私保护
- 7. 安全防御与法规



网络安全与威胁

- 互联网最初设计时没有考虑到安全性
 - 最初的设想：“一组相互信任的用户连接到一个透明的网络”
- 网络空间 (Cyberspace)
 - 已发展成为继陆、海、空、天之后
第五大战略空间！
- 我们现在需要考虑
 - 坏人如何攻击计算机网络
 - 如何防御网络攻击
 - 如何设计对攻击免疫的体系结构



没有网络安全，就没有国家安全
——习近平总书记在网信工作会议讲话



你见过点三支香的熊猫么？

- **恶意软件：**指任何有损用户利益的软件，做各种不正当的事情，例如删除篡改我们的文件，安装间谍软件来收集我们的隐私信息等
- **自我复制：**一旦恶意软件感染了一台主机，就会从那台主机寻求进入更多的主机，影响与受感染设备通信的其他设备





恶意软件

➤ 病毒 (Virus)

- 需要某种形式的用户交互来不断传播的恶意软件
- 如含可执行代码的email附件（打开后会给通信录所有再次用户发送）

➤ 蠕虫 (Worm)

- 一种无须用户明显交互即可运行和传播的独立程序
- 通过不断扫描网络中存在漏洞的计算机，进行传播

➤ 恶意软件

- 哪里来的恶意软件？如何提升影响力？

“蠕虫式”的勒索病毒WannaCry覆盖地区



以上视频选自B站



1. 这个勒索病毒会攻击哪些系统?

答：该病毒利用Windows操作系统MS17-010漏洞在全球范围大爆发，感染了大量的计算机，几乎所有的Windows系统如果没有打补丁，都会被攻击

2. 被这个勒索病毒感染后的症状是什么？

答：被该勒索软件入侵后，用户主机系统内的照片、图片、文档、音频、视频等几乎所有类型的文件都将被加密，加密文件的后缀名被统一修改为.WNCRY，并会在桌面弹出勒索对话框，要求受害者支付价值数百美元的比特币到攻击者的比特币钱包，且赎金金额还会随着时间的推移而增加

3. “永恒之蓝”和“勒索病毒”是什么关系？

答：此次的勒索病毒WannaCry分为蠕虫病毒和勒索病毒两部分，前者利用NSA泄露的危险漏洞“EternalBlue永恒之蓝”进行传播和释放，后者用于攻击用户和加密文件



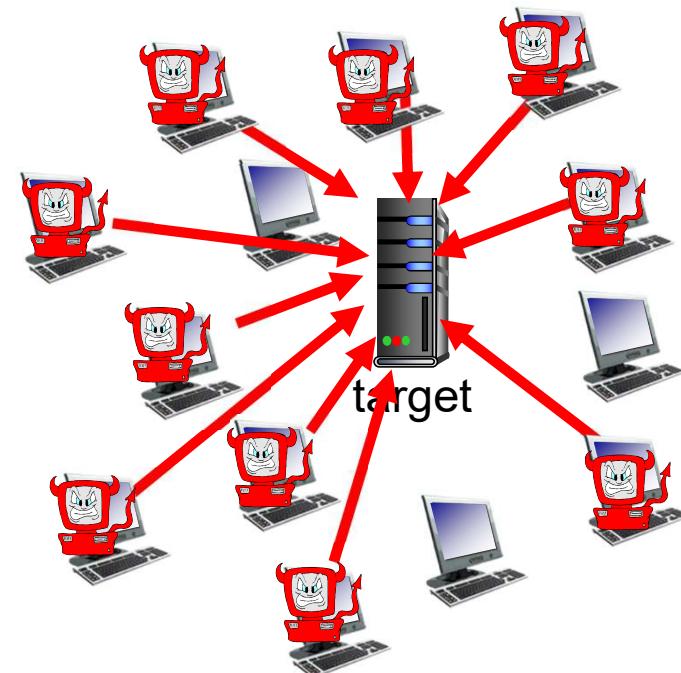
拒绝服务攻击(Denial-of-Service (DoS) attack)

“崔老师，计算机网络是怎么工作的？”

➤ 拒绝服务攻击

- 攻击者通过制造大量虚假流量占用资源
- 使合法流量无法使用资源(服务、带宽)

1. 选择攻击目标
2. 入侵到发起虚假流量的大量主机 (产生僵尸主机或**僵尸网络botnet**)
3. 从被入侵的僵尸主机向目标发送大量数据包，导致目标主机无法应对





亚马逊又双叒叕宕机了！

亚马逊云服务AWS宕机
大半个互联网都快挂了



Roku Support @RokuSupport We are working to resolve the widespread AWS outage and get things up and running.

Adobe Spark @AdobeSpark An Amazon AWS outage is currently impacting Adobe Spark and other services. We are monitoring the situation closely and will update you as soon as we have more information.

iRobot @iRobot Hello. We are currently unable to remove the A line service alert from our website and app because of the widespread Amazon AWS outage. No trains are no longer running local in Brooklyn. We will continue to post updates here as we have them.

NYCT Subway. Wear a Mask. @NYCTSubway 8:56 AM · Nov 25, 2020

37 27 people are Tweeting about this

- **僵尸网络 (Botnet)** : 采用一种或多种传播手段，将大量主机感染bot程序（僵尸程序）病毒，从而在控制者和被感染主机之间所形成的一个可一对多控制的网络
- 分布式DoS攻击的发起者，往往通过僵尸网络发起攻击，从而躲避追查



你的密码是怎么泄露的？

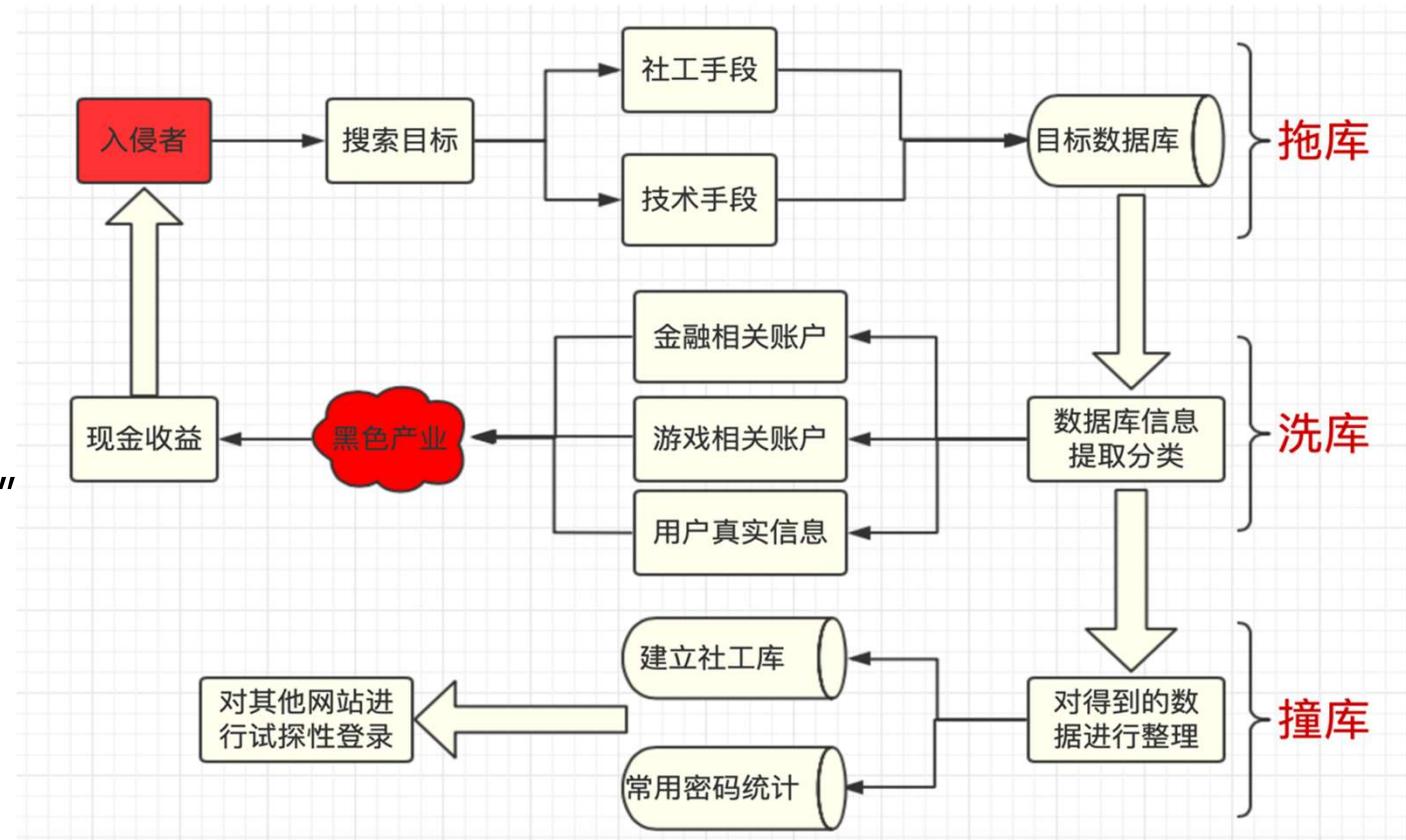
- 你的密码足够复杂吗？
- 在不同网站上一样么？

- 拖库：盗走用户资料
- 洗库：黑产用户数据变现
- 撞库：在其他网站 “撞大运”



抖音千万级账号遭撞库攻击

犯罪嫌疑人已被海淀警方刑事拘留

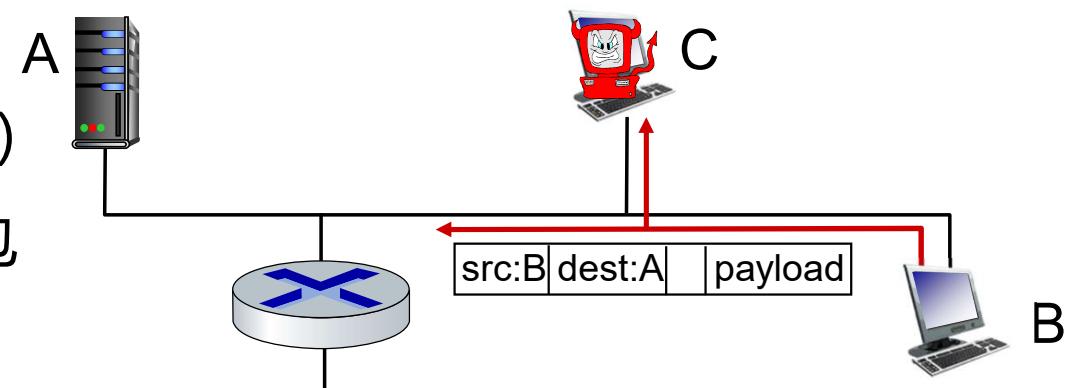




数据可靠性

➤ 数据包嗅探 (packet sniffing)

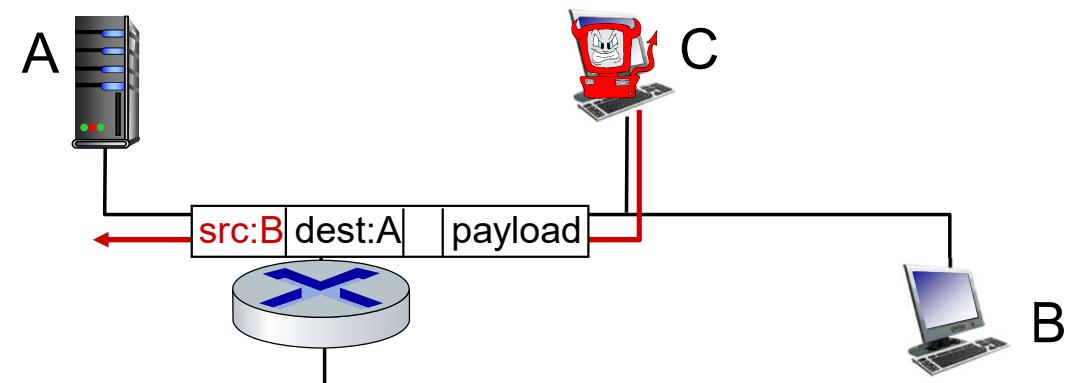
- 广播传输 (共享式以太网、无线网)
- 混杂网络接口读取/记录所有数据包



➤ IP欺骗 (IP spoofing)

- 攻击者产生的IP数据包为伪造的源IP地址，以便冒充其他系统或发件人的身份

包拦截 v.s. 伪造身份





“棱镜门”：美国政府窥探着全世界

➤ 后门程序

- 指那些绕过安全性控制而获取对程序或系统访问权的程序方法

➤ 网络监听

- 监视网络状态、数据流程，截获网络上所传输的信息

事件引发全球哗然！





如何防御

- **身份验证**: 证明你就是你!
- **完整性检查**: 数字签名检测/防止篡改
- **保密**: 加密技术
- **访问限制**: 受密码保护的VPN
- **防火墙**: 接入网络和核心网络中的专用“安全卫士”



我们国家网络安全的法规

- 《中华人民共和国网络安全法》
 - 由全国人民代表大会常务委员会于2016年11月7日发布
- 《互联网信息服务管理办法》
 - 2000年9月25日公布施行
 - 2021年1月8日，国家网信办就《互联网信息服务管理办法（修订草案征求意见稿）》公开征求意见，意见反馈截止日期为2021年2月7日

做一名让人肃然起敬的红客（Honker）
而不是一个恶意破坏的黑客（Cracker）



小结：网络安全

- 网络安全的本质来源
 - 互联网最初设计时没有考虑到安全性 + 利益问题
- 安全问题与攻击方式
 - 病毒、蠕虫与恶意软件
 - 窃取密码或数据
 - 拒绝服务攻击
 - 伪造身份
- 防御方式
 - 技术手段：完整性检查、数据加密、防火墙、身份验证
 - 法律法规



本章内容

1.1 初识互联网

1.2 网络实例

1.3 网络安全与威胁

1.4 互联网发展史与启示

- 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



清华大学
Tsinghua University

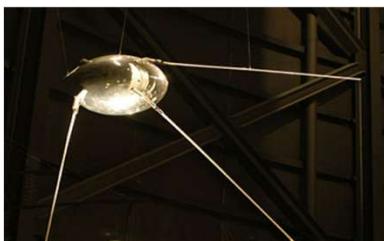


计算机网络教案社区



互联网早期发展与启示

美苏争霸
在核打击下能够通信的是什么？

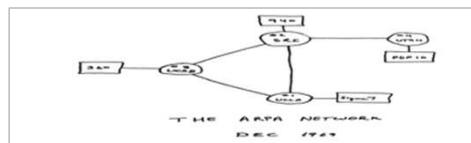


斯普特尼克1号



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
 - Internet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)

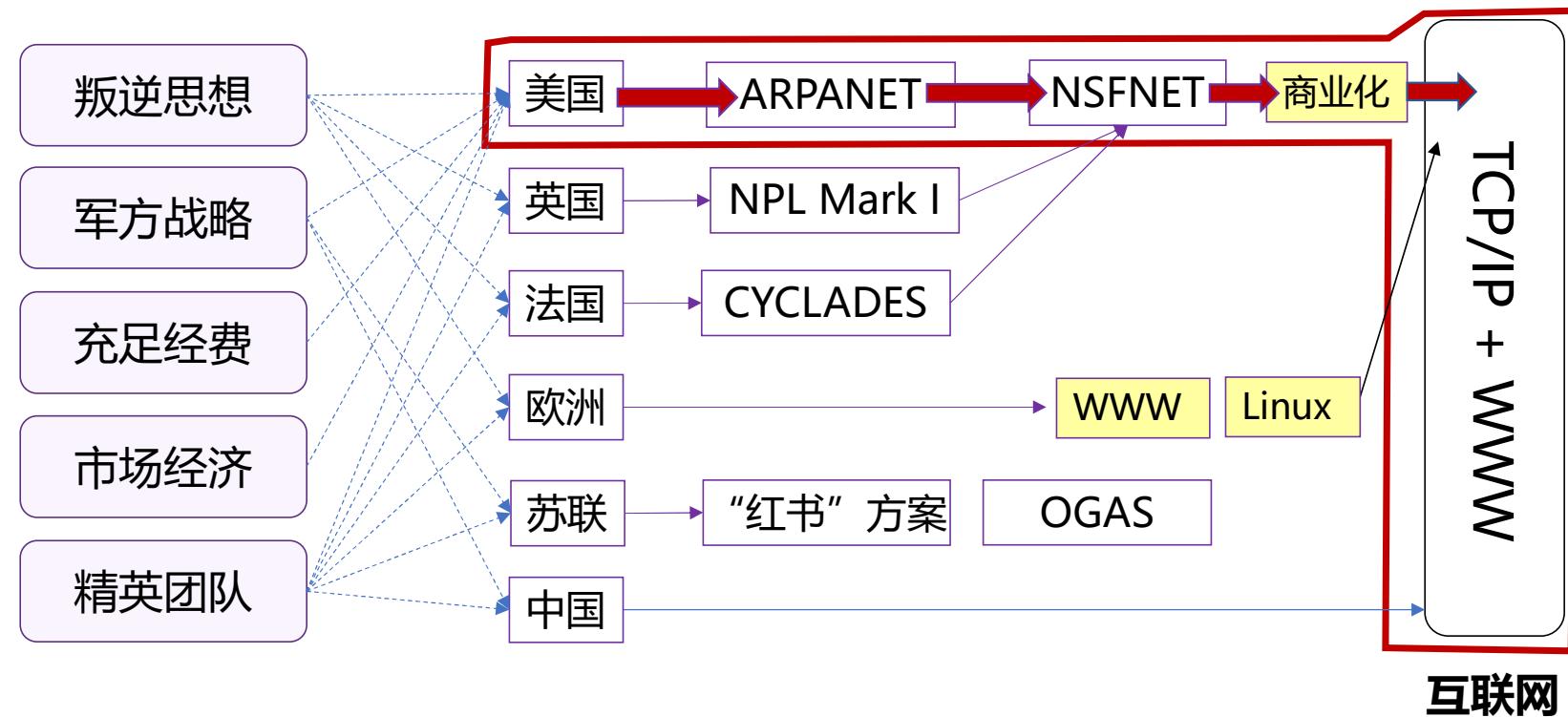
1969年8月
ARPANET诞生，**创新地**
采用了分组交换技术

1983年
ARPANET采用
TCP/IP

1990年
ARPANET退役
移交基金委NSF



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



互联网早期发展与启示

- 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





互联网的新发展与启示

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



我国的互联网发展情况

➤ 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）
- 2020年底，5G基站达70万个，占全球比重近7成
- 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

☺很幸运☺
能看懂中文

网民约10亿人，普及率70%



“健康码”助9亿人出行





我国的互联网发展情况

- 中国下一代互联网示范工程CNGI
 - CNGI: China's Next Generation Internet
 - 在国际上首次提出并研制成功大型纯**IPv6**互联网主干网CNGI-CERNET2
- “宽带中国”的国家战略
 - 三个阶段：全面提速（2013年）、推广普及（2014-2015）、优化升级（2016-2020）
 - 技术变革：拨号上网->双绞线上网->光纤入户
- 工信部颁发移动通信牌照
 - 2009年，三大运营商（中国移动、中国电信、中国联通）获3G牌照（移动负责TD-SCDMA）
 - 2013年，三大运营商获4G牌照（TD-LTE）
 - 2019年，三大运营商和中国广电获5G商用牌照



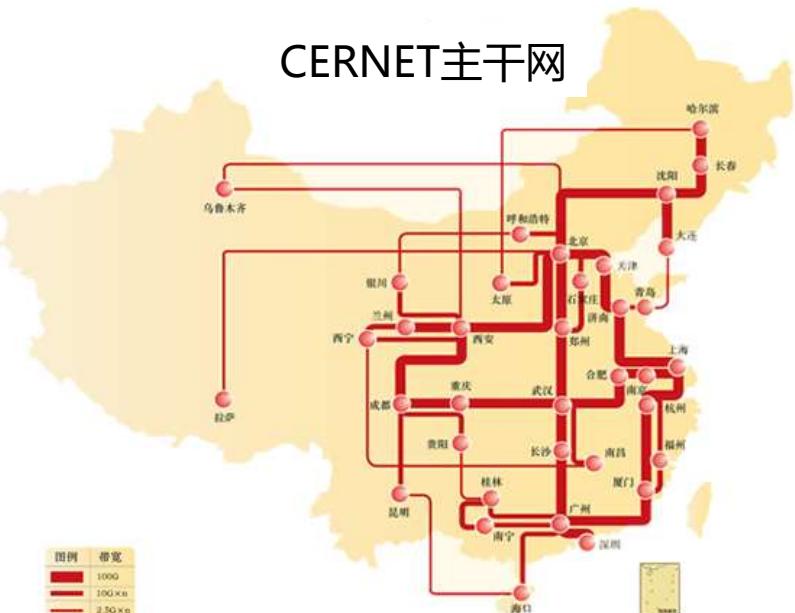
下一代是什么？

- 下一代网络NGN
Next-generation Network
- 下一代互联网NGI
Next-generation Internet
- 谁是真正的基础？谁是谁的应用？



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

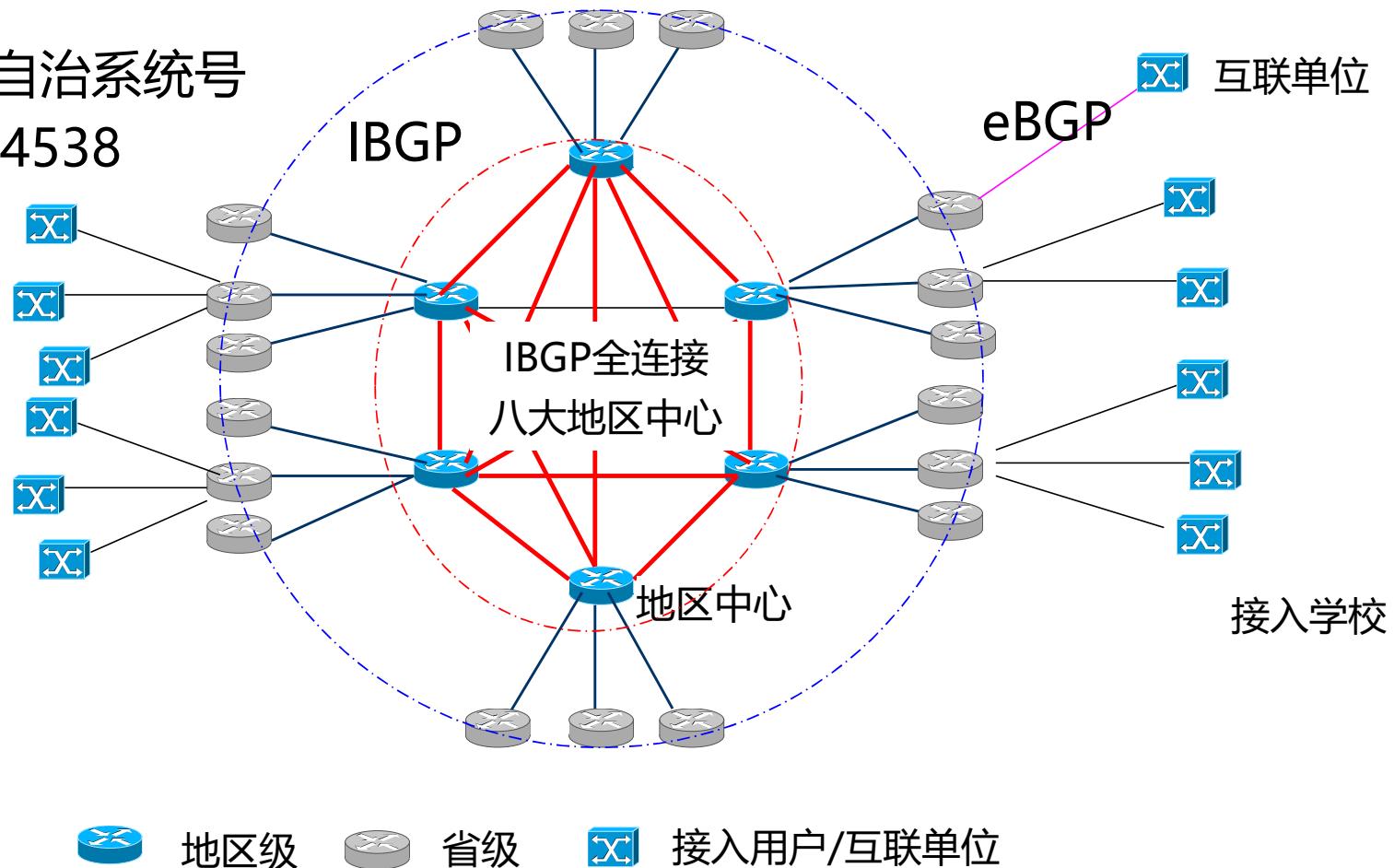


吴建平 中国工程院院士
CERNET专家委主任
英国皇家工程院院士
入选全球“互联网名人堂”
89年从加拿大访学归来



CERNET网络结构

全球唯一自治系统号
AS: 4538





网络设备商华为

➤ 华为现状

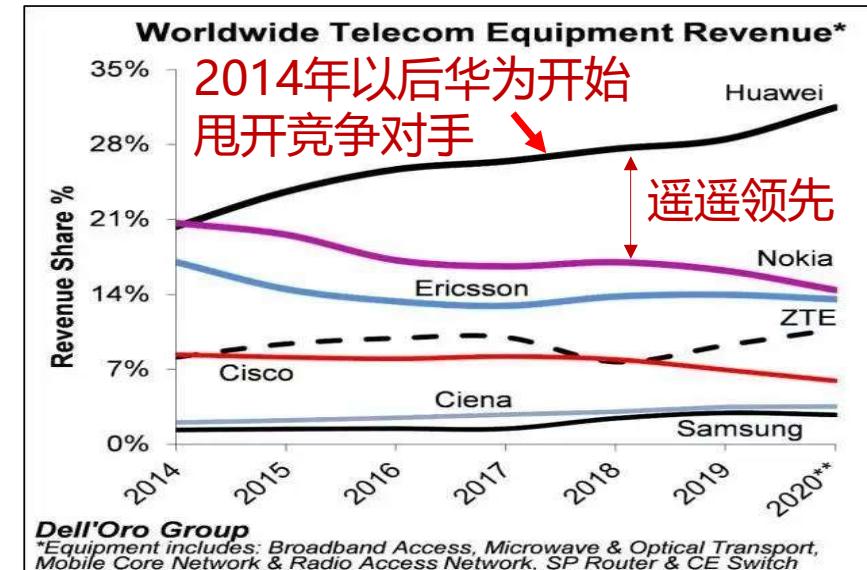
- 1987年成立，全球20万人，多个产品线全球第一：
宽带接入、光传输、移动接入网、移动核心网

➤ 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





信息领域三大定律

摩尔定律

CPU性能18个月翻番，10年100倍

所有电子系统（包括电子通信系统，计算机）都适用

吉尔德定律

未来25年，主干网带宽每6个月增长一倍

光纤定律：骨干网带宽9个月翻番，10年10000倍

梅特卡夫定律

网络价值随用户数平方成正比

未联网设备增加N倍，价值增加N倍，而联网时价值增加 N^2 倍

通信网络的发展大大快于集成电路与计算机系统的发展



第一次作业

➤ 书面作业

- 《Computer Networks - 5th Edition》： 2.38, 2.39
- 调研2000年.com破灭和朗讯的倒下，写200字感悟
- 调研华为的成长经历和各方评价，写200字感悟
- 调研“棱镜门”事件，写200字感悟

➤ 截止时间：两周后

- 详见网络学堂通知



致谢社区贡献者



计算机网络教案社区



崔勇

清华大学

- 1、初识互联网
- 2、网络实例
- 3、发展史



王嫣

郑州工程技术学院

- 2、网络实例



严楠

安徽工程大学

- 3、网络协议



王昊翔

华南理工大学

- 4、参考模型



李军怀

西安理工大学

- 5、标准组织
- 6、度量单位



田亮

新乡学院

- 7、安全与威胁

《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5版）》，Tanenbaum & Wetherall，清华大学出版社，2012年3月

《计算机网络（第7版）》，谢希仁，电子工业出版社，2017年01月

《计算机网络教程（第6版）》，吴功宜，电子工业出版社，2018年03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



总结

- 介绍课程整体情况
- 了解计算机网络的应用范围及其重要性
- 了解网络基本概念，**掌握典型交换方式及其优缺点**
- 了解网络安全与威胁
- 了解国内外互联网发展史，以史为鉴
- **掌握分层结构和网络协议（核心内容）**
- **掌握网络参考模型（核心内容）**
- 了解制定网络协议的标准化组织
- **掌握计算机网络主要度量的含义**

小试牛刀：

茶余饭后讲故事

期待下周再见！