

第二章 计算机网络体系结构

授课教师：崔勇

清华大学



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



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

1. 掌握分层结构和网络协议
2. 掌握网络参考模型
3. 了解制定网络协议的标准化组织
4. 掌握计算机网络主要度量的含义



思考

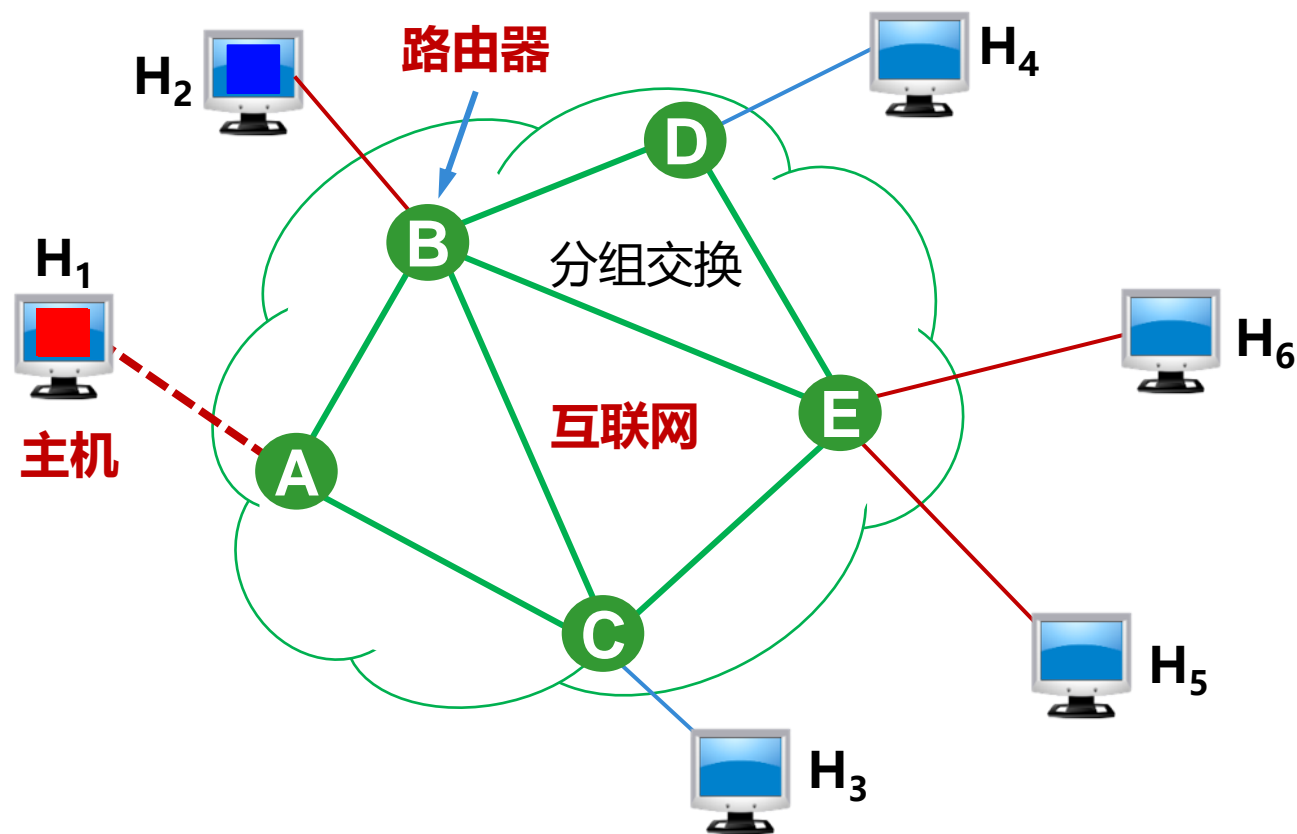


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 计算机网络
 - 异构设备之间要交互
 - 乱七八糟，好复杂啊！
- 有什么可以借鉴的？
 - 人们沟通和交通化简
 - 大型软件系统模块化
- 思路与目标
 - 引入“协议”
 - 拆分网络功能
 - 面向未来



世界上最为复杂的人造系统之一



本章内容



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

2.1 协议与分层结构

2.2 参考模型

2.3 标准化组织

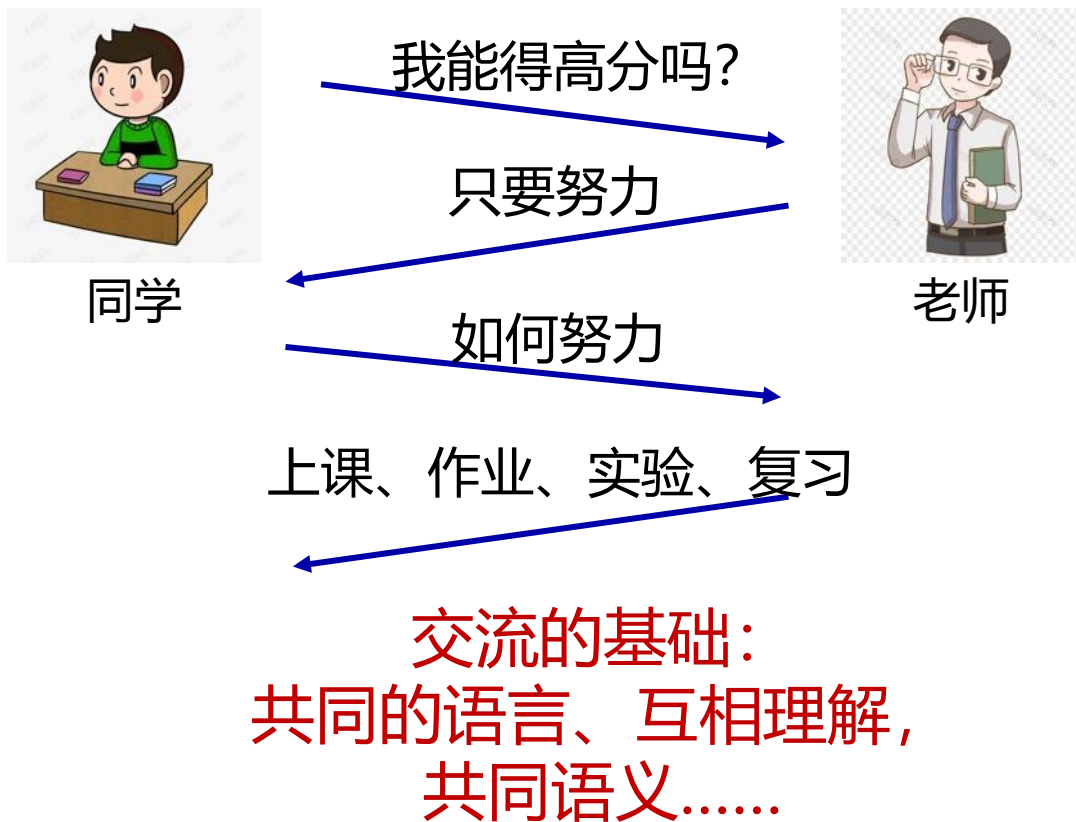
2.4 计算机网络度量单位

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



协议设计目的

人们之间的信息交互



计算机之间的信息交互



time



协议设计目的



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 网络协议

- 为进行网络中的数据交换而建立的规则、标准或约定，即网络协议 (network protocol)
- 通信双方需要共同遵守，互相理解

➤ 协议三要素

- 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



协议分层结构的必要性



清华大学
Tsinghua University



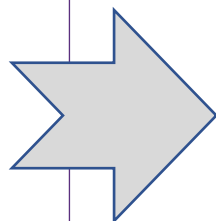
计算机网络教案社区

➤ 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)

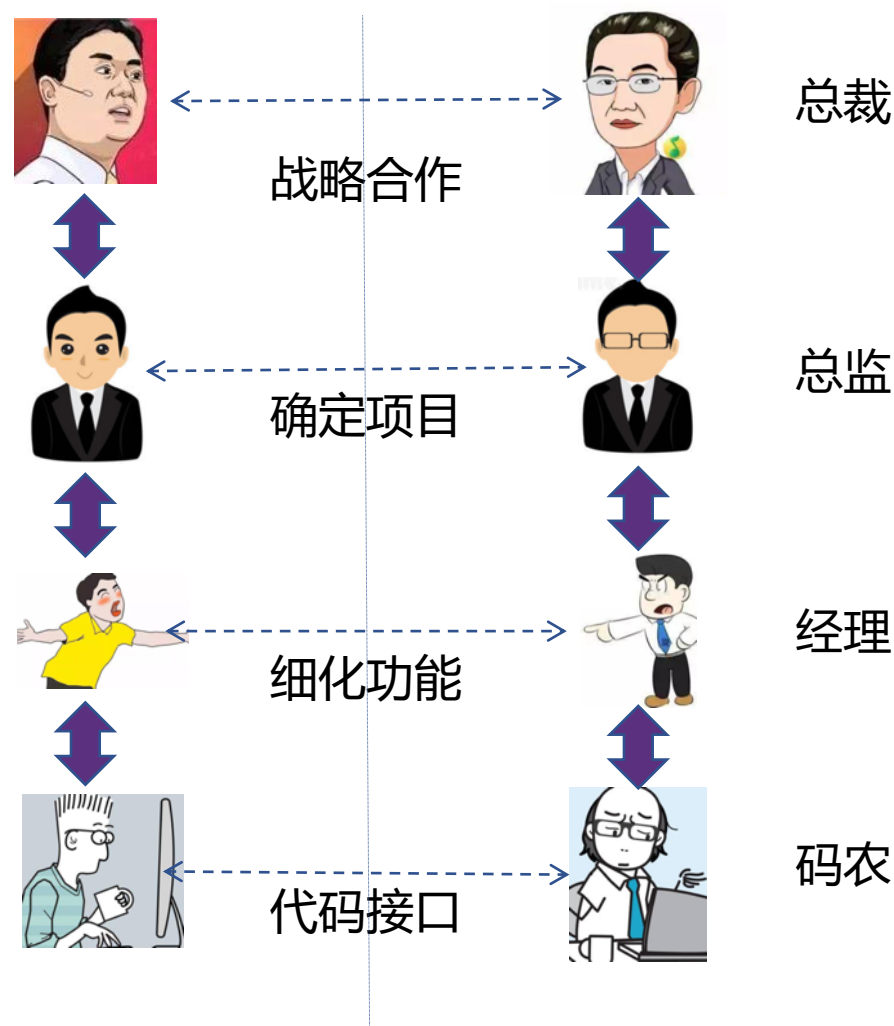
WiFi发展为新版本WiFi6，那么WiFi6是否要对已有直播、微信或支付宝做适配？



分层结构示例

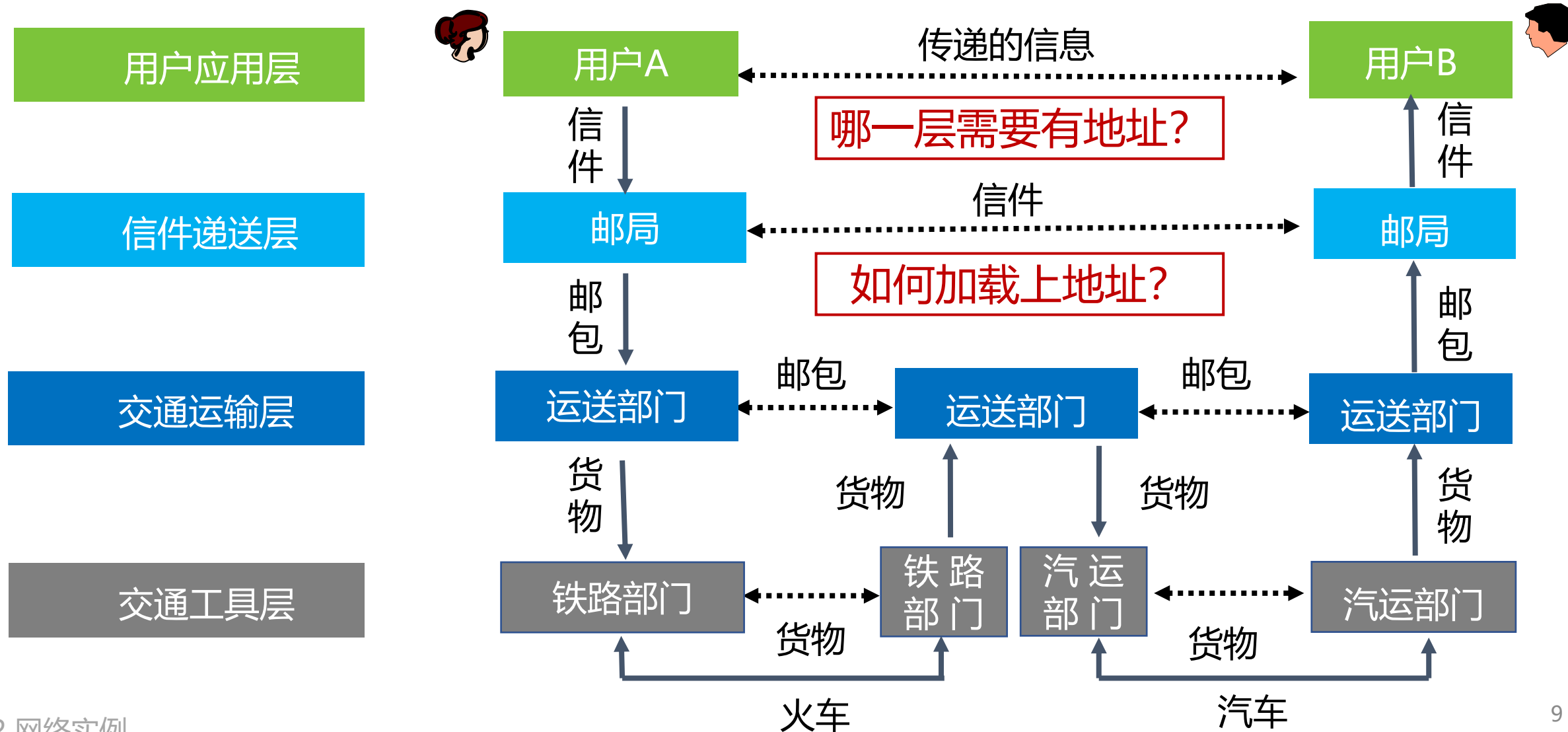
互联网大厂X讯与X东的合作

- 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





协议分层结构



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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

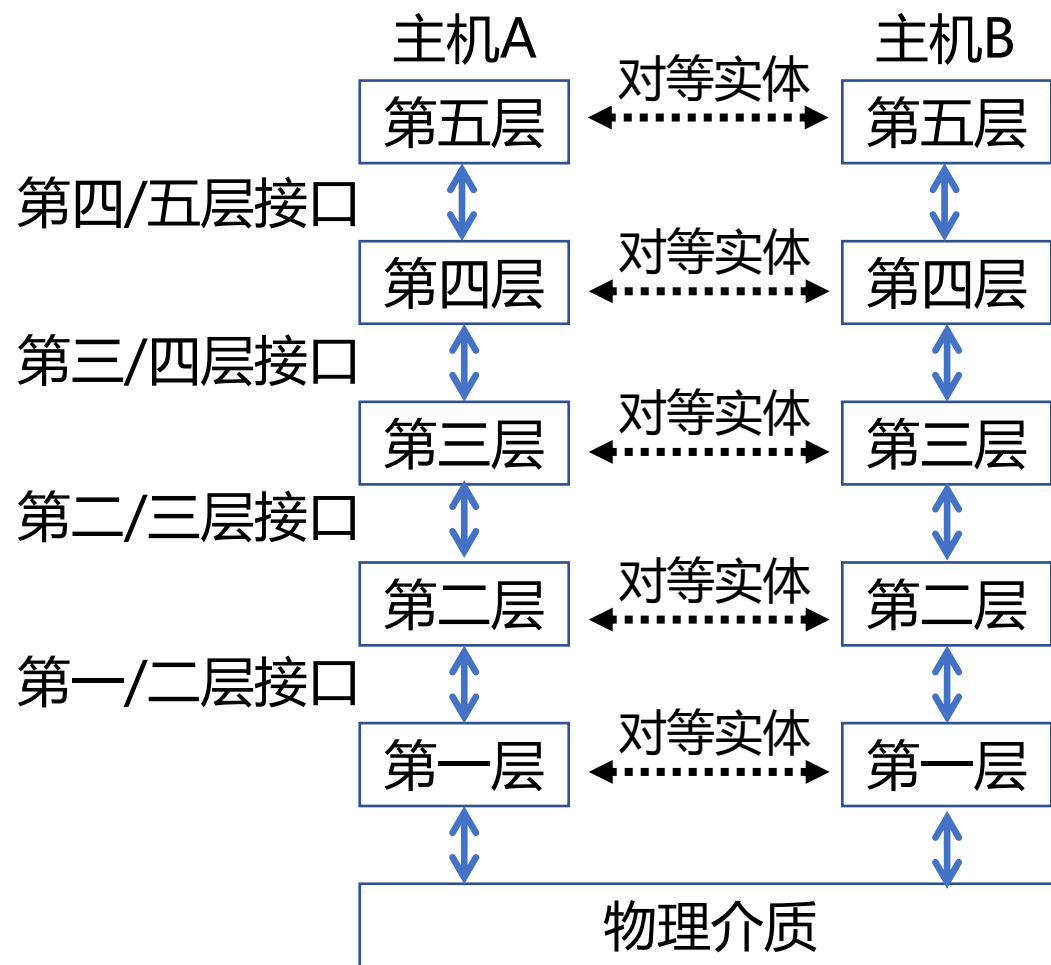
- 不同机器上构成相应层次的实体成为对等实体

➤ 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

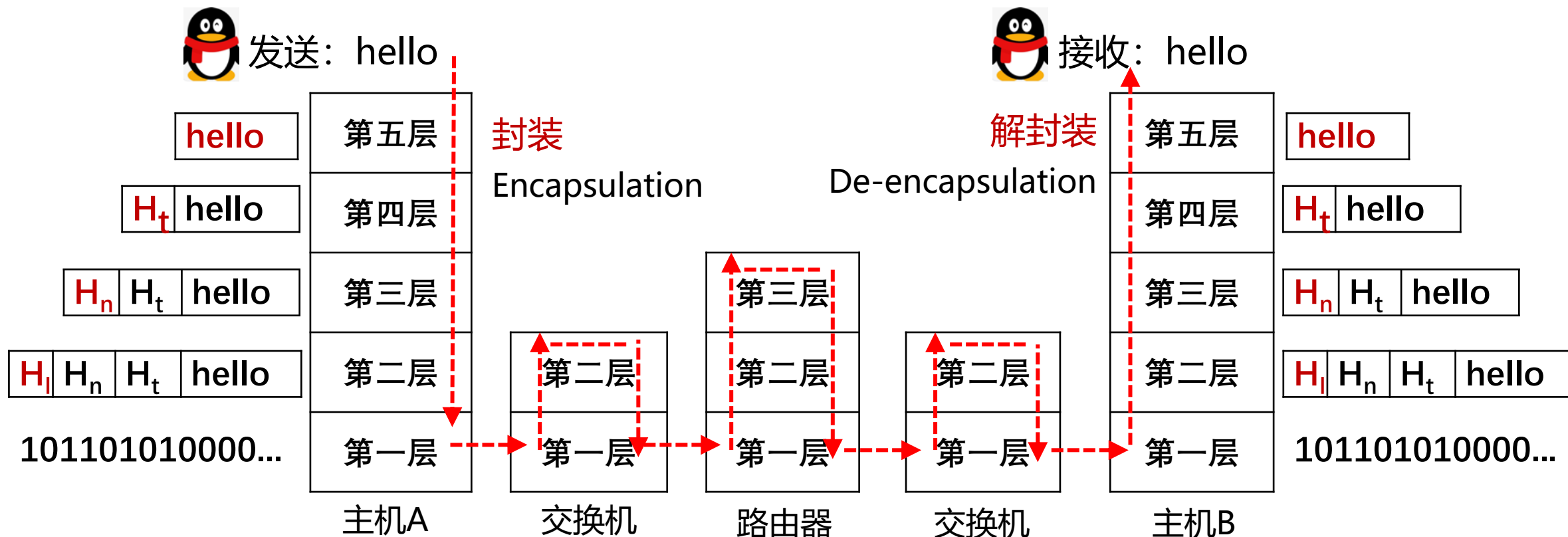
- 层和协议的集合为网络体系结构，一个特定的系统所使用的一组协议，即每层的协议，称为协议栈





协议分层结构

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





服务与服务原语



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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



服务与服务原语



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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

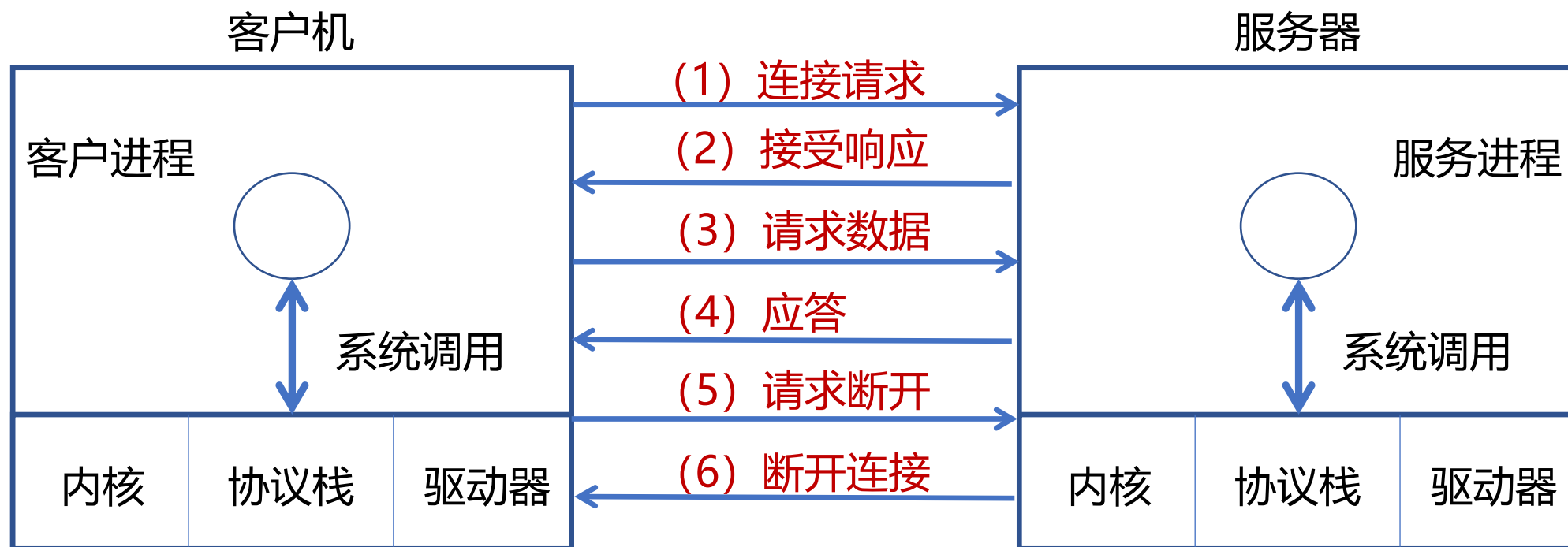


服务与服务原语

➤ 服务

- 典型服务：面向连接传输服务，无连接传输服务
- 服务由一组可用于用户进程以访问服务的原语（操作）形式指定
- 原语告诉服务执行某些操作或报告对等实体所采取的操作

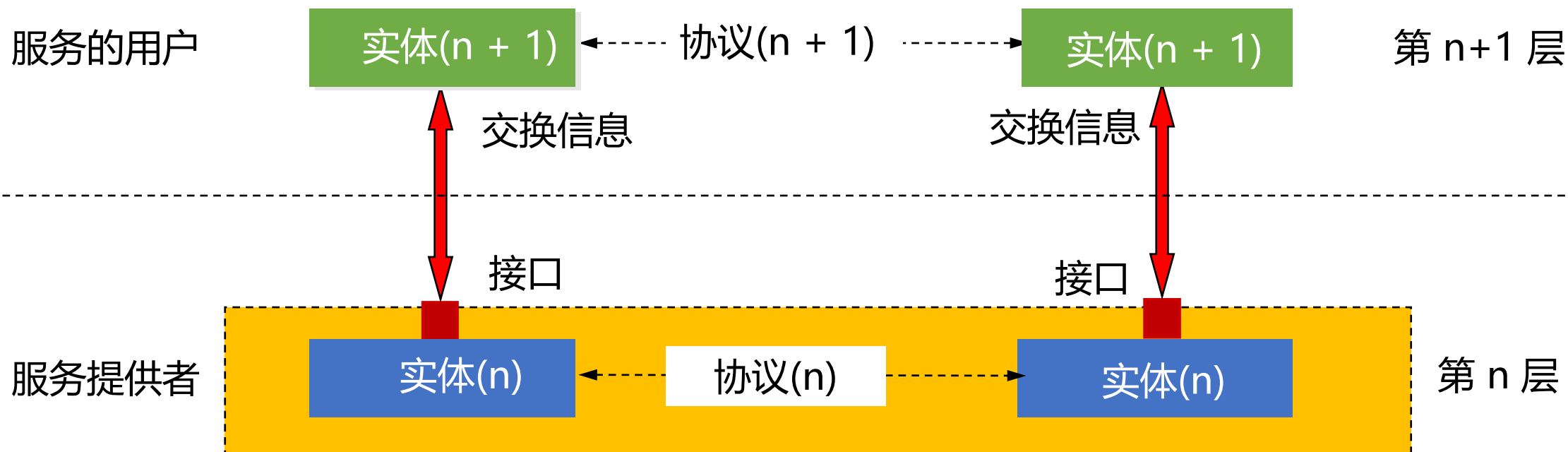
➤ 六个核心服务原语（以面向连接服务为例）





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





小结：协议与分层结构

➤ 协议分层结构

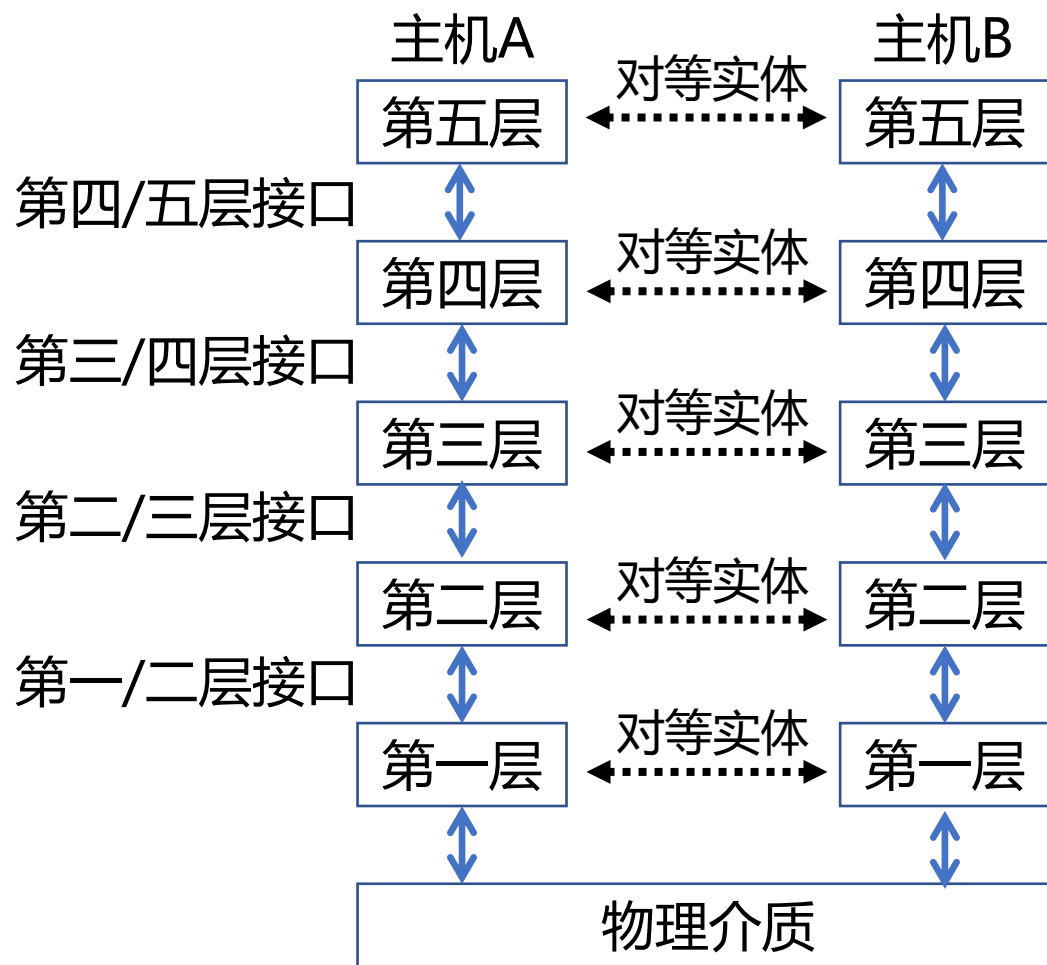
- 层次栈：每一层都使用下层的
服务、给上层提供服务
- 对等实体：counterpart
- 接口

➤ 服务与服务原语

- 典型服务：面向连接、无连接
- 服务原语

➤ 服务与协议的关系

- 协议是“水平”的
- 服务是“垂直”的





本章内容



2.1 协议与分层结构

2.2 参考模型

2.3 标准化组织

2.4 计算机网络度量单位

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



思考

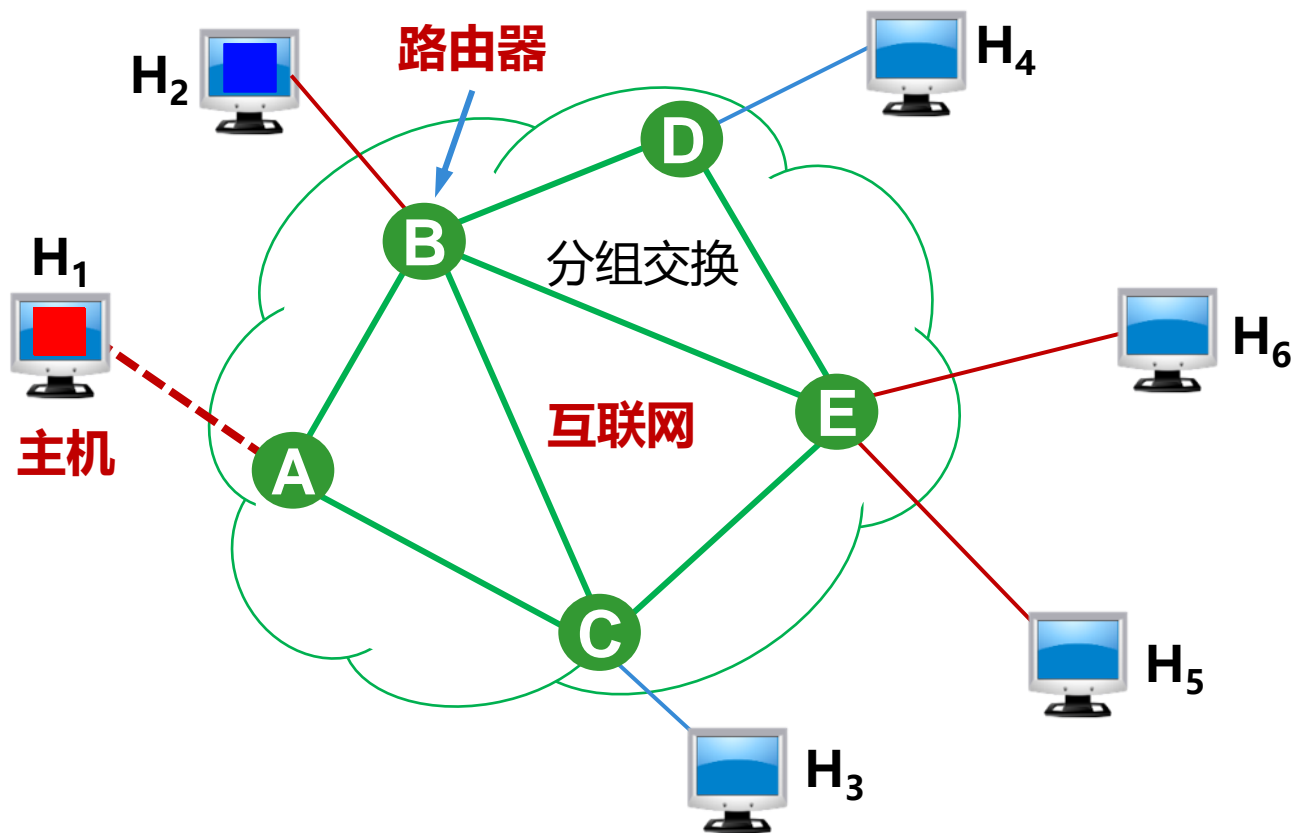


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 如何分层
 - 目标：拆分网络功能
- 最简单的传输
 - 传输1比特（能连上吗？）
 - 一跳连通：有线、无线，铜线/光纤，电话线/网线？
- 更复杂的情况
 - 一跳竞争，给谁的？
 - 多跳传输（找路/ 1比特？）
 - 可靠性（各种差错）
- 主机上不同应用要什么？





OSI参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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
- ...

1比特的局限性

出错? 给谁?

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参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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, 如同一间教室内, 多人同时发言, 需要纪律来控制
- ...

1帧的局限性

跨越五湖四海来清华?

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参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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)：在网络中选取从源到目的的转发路径，根据网络可达性动态选取最佳路径（也可用静态路由）
- 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？

到了主机后的局限性

哪个应用要什么？

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参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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

应用的需求千差万别

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参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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
- 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...

ARPNET
最终采用TCP和IP
为主要协议

核心诉求：
核战中的全球联网和各类应用



- 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参考模型的特点



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ TCP/IP参考模型的端到端设计原则

- 摒弃电话系统中“笨终端&聪明网络”的设计思路
- 采用**聪明终端&简单网络**，由**端系统TCP**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的重要性

- 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

➤ 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）

应用层
表示层
会话层
传输层
网络层
数据链路层
物理层

OSI 7层模型

应用层
传输层
互联网层
网络接口层

TCP/IP 4层模型



OSI模型与TCP/IP模型比较



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

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



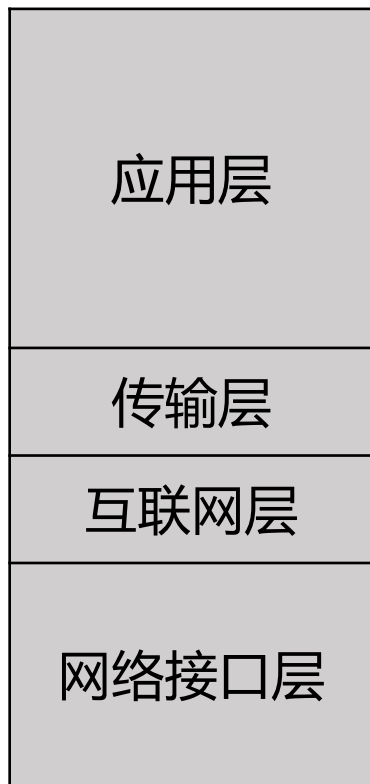
清华大学
Tsinghua University



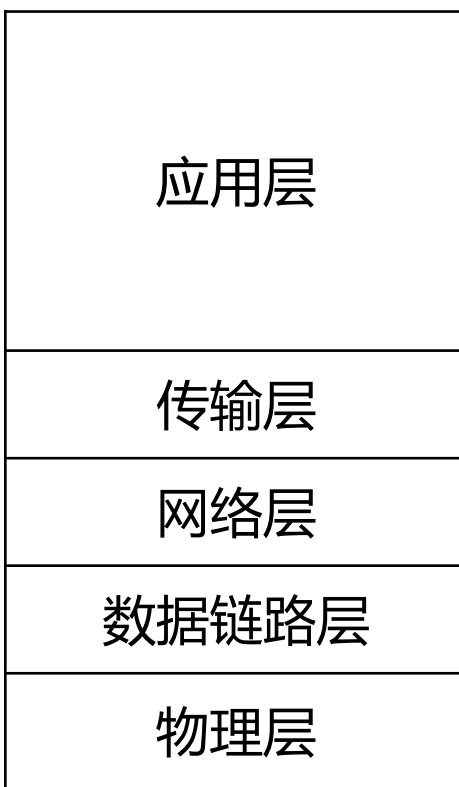
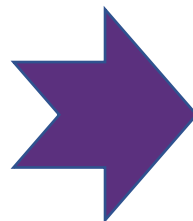
计算机网络教案社区



OSI 7层模型



TCP/IP 4层模型

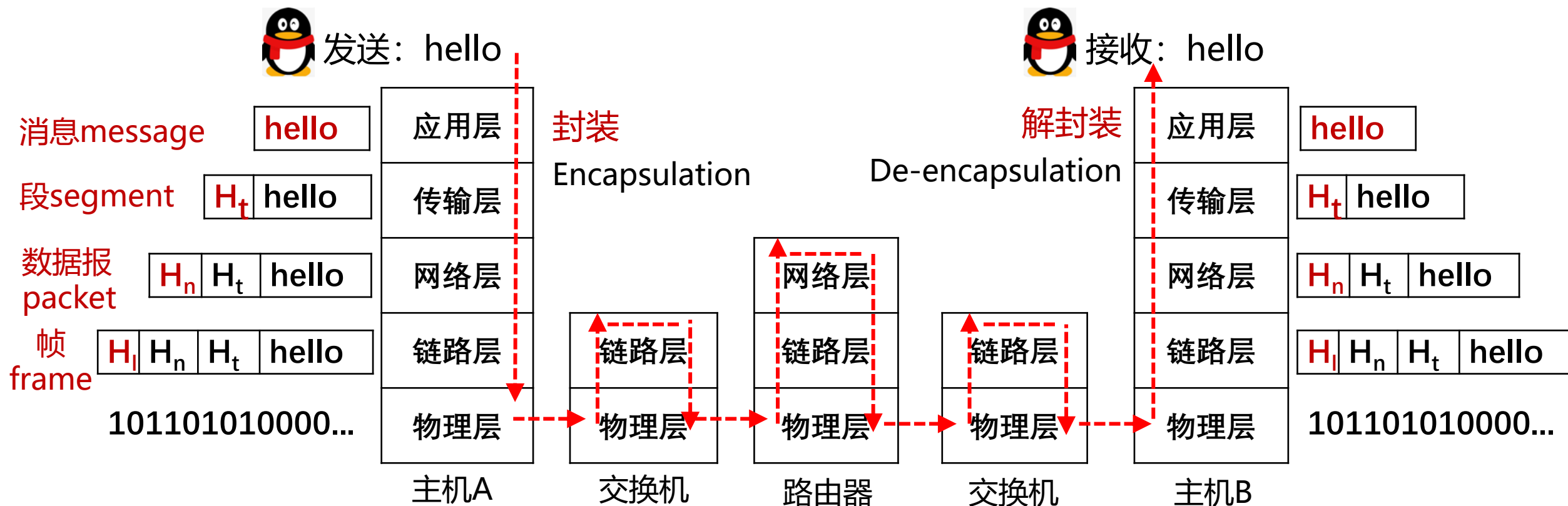


本教程的分层组织

- 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



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



小结：参考模型



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ OSI 参考模型（7层）

- 物理层：定义信道上0、1的传输
- 数据链路层：相邻实体间数据传输
- 网络层：设备之间(不要求相邻)的通信
- 传输层：进程到进程
- 会话层：在程序之间建立会话
- 表示层：关注信息的语法和语义、数据表示
- 应用层：提供应用程序便捷的网络服务调用

➤ TCP/IP 参考模型（4层）

- 层次更简单



OSI 7层模型



TCP/IP 4层模型



本章内容



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

2.1 协议与分层结构

2.2 参考模型

2.3 标准化组织

2.4 计算机网络度量单位

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



思考



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 终端厂商

- 华为、小米、oppo、苹果、联想、浪潮

➤ 设备厂商

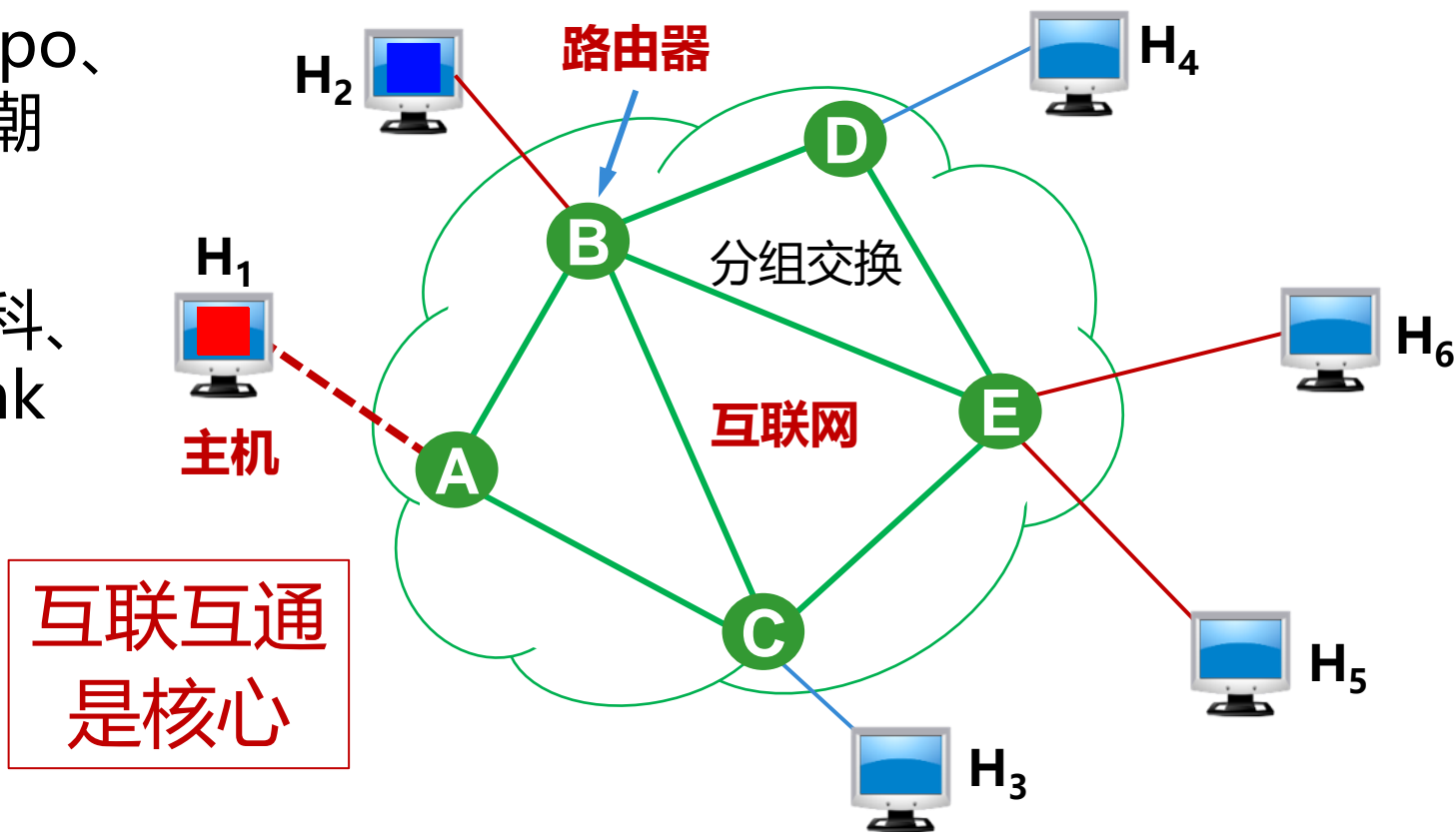
- 华为、中兴、思科、Juniper、TP-Link

➤ 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





国际标准组织



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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



清华大学
Tsinghua University



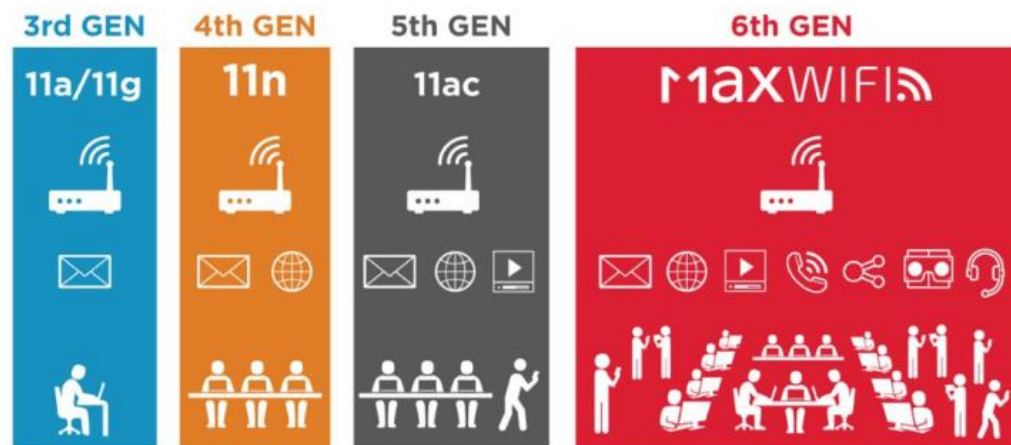
计算机网络教案社区

- 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

THE EVOLUTION OF WIFI





Internet标准化组织



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区



➤ 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 (WorkingGroup) 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



Internet标准化组织



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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



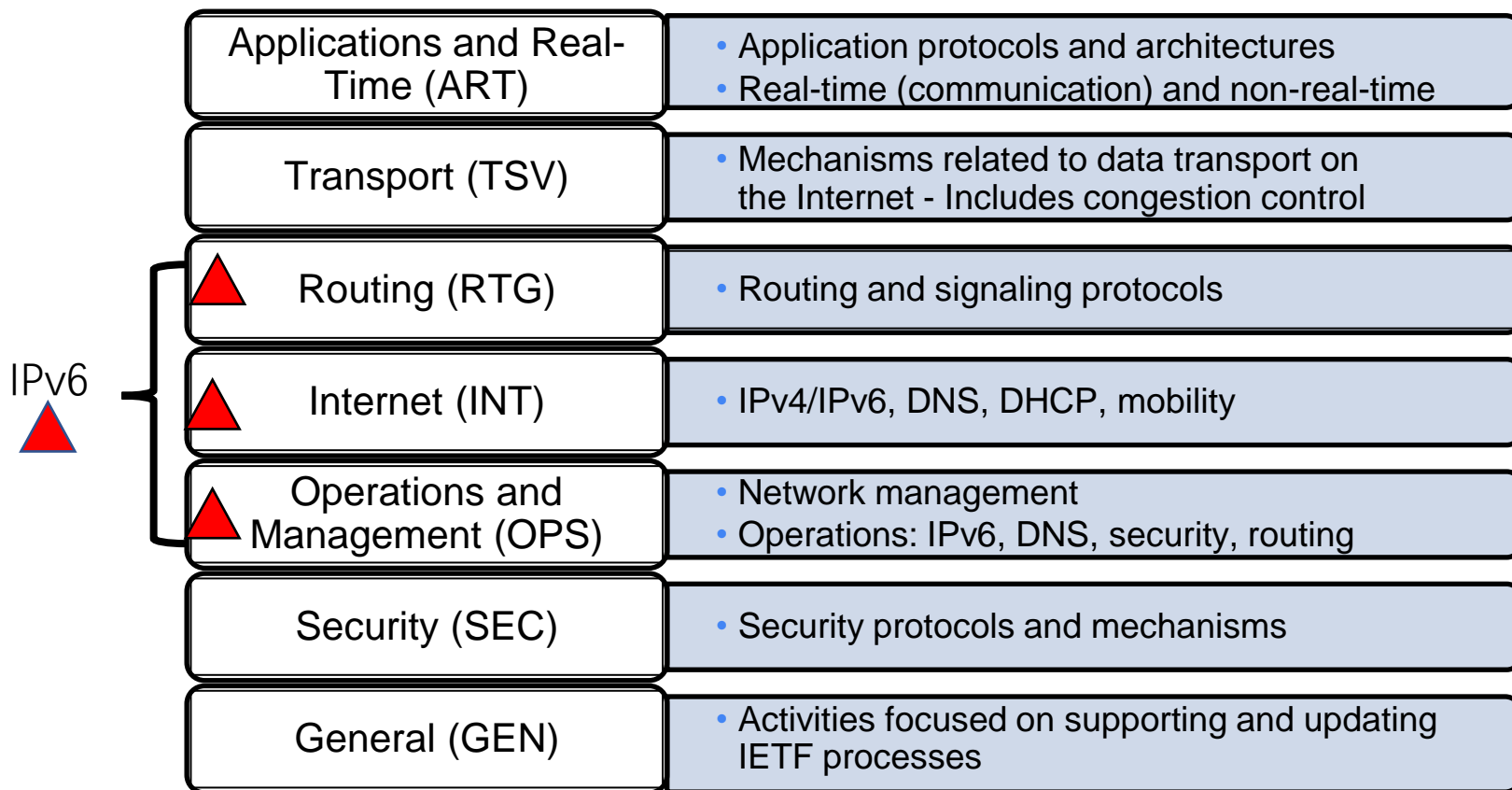
七大领域、120+工作组



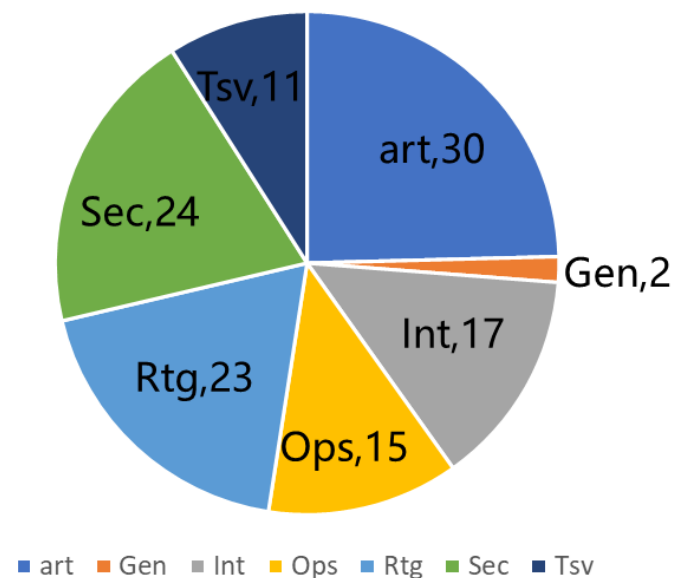
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区



各Areas活跃的WG数量



7各研究领域 (Area) , 有122各工作组 (WG)



IETF主要玩家

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



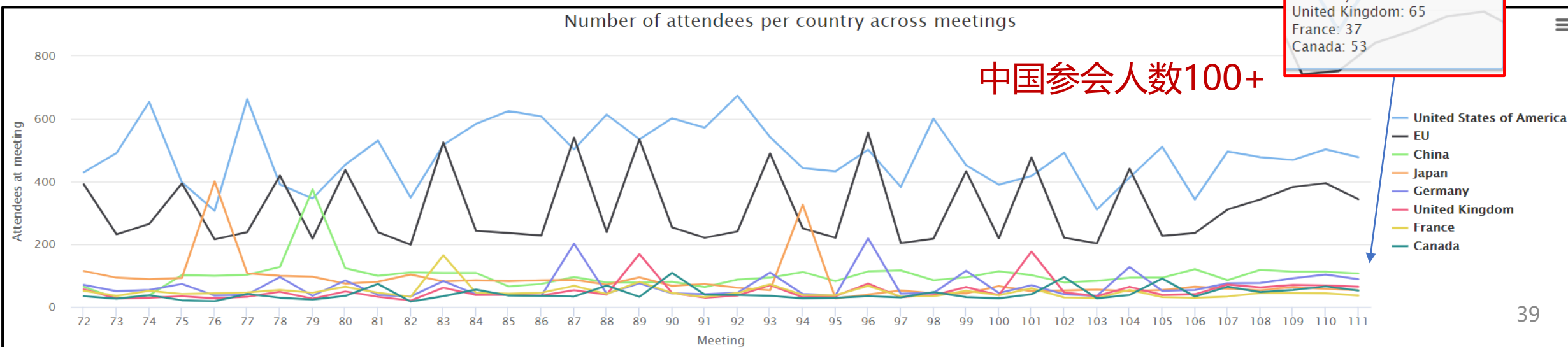
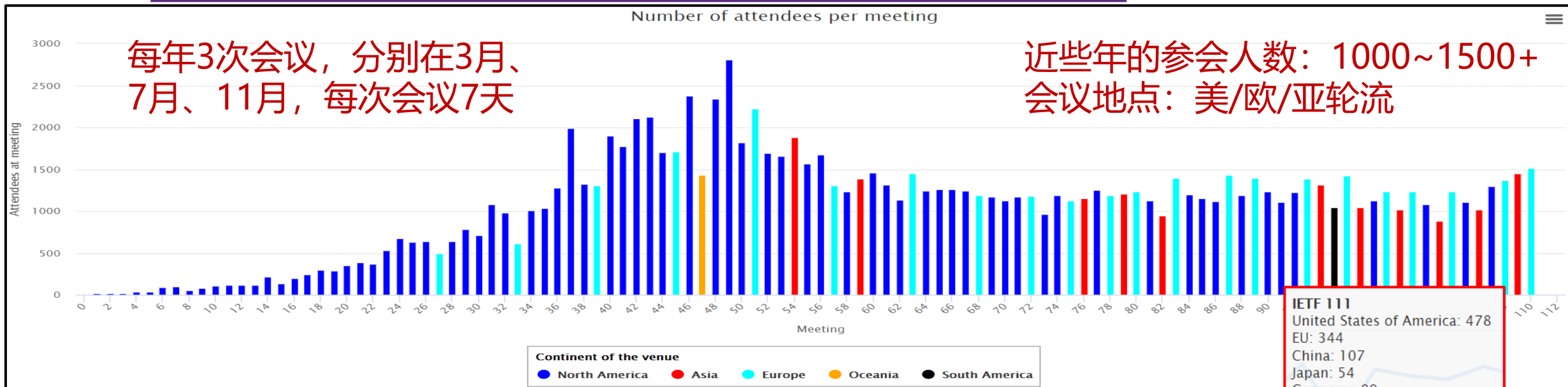
美、欧、亚三足鼎立，美国最强



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区





国内IETF参会情况对比



清华大学
Tsinghua University

计算机网络教案社区

110次会议（线上）

单位	CN	单位	全球
华为	37	华为	73
中兴	6	CISCO	62
思科	1	JUNIPER	33

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

设备商

互联网
服务商

电信
运营商

研究
机构





Internet标准化组织



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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，我国仅有不到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



Internet标准化组织

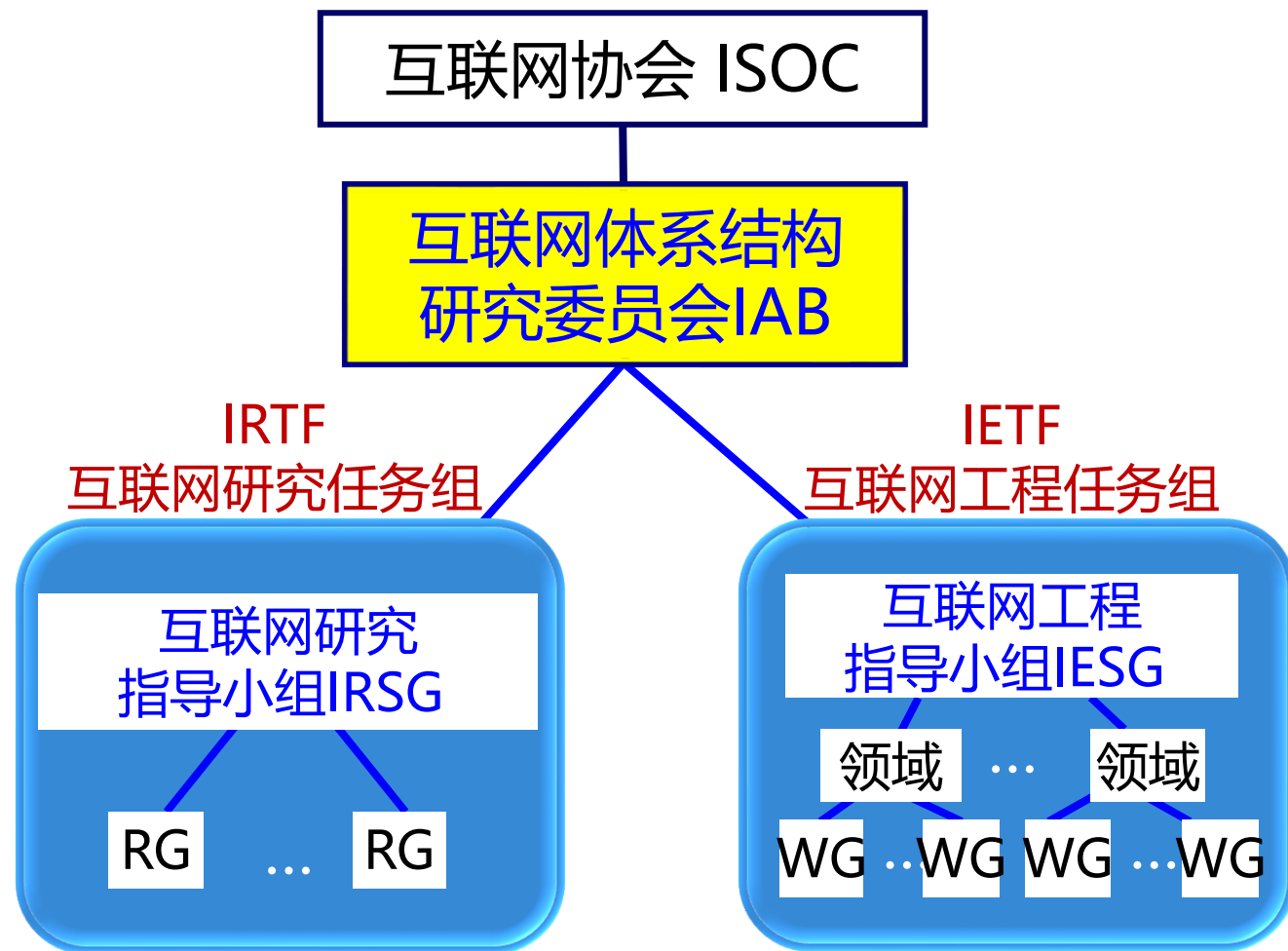


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

研讨会日程安排

时间	事 项	主讲人
14:00-14:10	开场介绍来宾	崔 勇
14:10-14:40	IETF 介绍	Lars Eggert (IETF 主席)
14:40-15:10	互联网技术演进，回顾和思考	李星 (清华大学)
15:10-15:40	Internet Area 综述	段晓东 (中国移动)
15:40-16:10	茶歇、合影	
16:10-16:40	Routing Area 综述	李振斌 (华为)
16:40-17:10	OPS Area 综述	姚健康 (CNNIC)
17:10-17:40	Transport Area 综述	石航 (清华大学)
17:40-18:00	开放研讨、总结	崔 勇

2021年9月1日成立IPv6国际标准工作组



中国通信标准化协会

China Communications Standards Association

中国通信标准化协会

通标发〔2021〕206号

关于召开 IPv6 标准工作组成立大会的通知

各有关单位：

为了深入贯彻落实习近平总书记关于网络强国的重要思想，全面深入推进 IPv6 规模部署和应用，加快促进互联网演进升级，中央网信办、国家发展改革委、工业和信息化部联合印发了《深入推进 IPv6 规模部署和应用 2021 年工作安排》，工业和信息化部、中央网信办也联合印发了《IPv6 流量提升三年专项行动计划（2021-2023 年）》。为落实文件中相关标准化工作要求，中国通信标准化协会在工业和信息化部和国家标准化委员会指导下，组织成立 IPv6 标准工作组，充分发挥自身平台优势，聚集国内

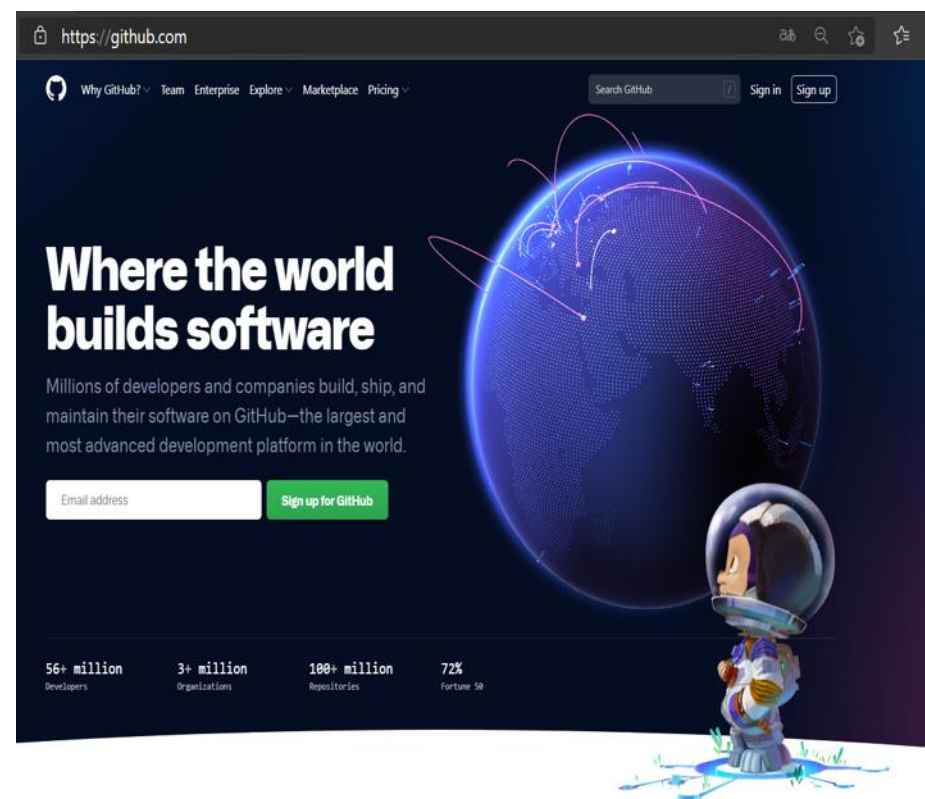


➤ 开源社区 (Open Source Community)

- 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>
- **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



小结：标准化组织



- 国际标准化组织
 - ISO：包含许多国家的标准团体，OSI七层参考模型即出自该组织
 - ITU：国际电信联盟，联合国机构，常由政府组织代表团参加
 - IEEE：国际电气和电子工程师协会，制定了IEEE 802.3、IEEE 802.11
- Internet标准化组织
 - IETF：互联网标准核心组织，制定了TCP、IP、HTTP
 - IRTF：Internet研究任务组，以研究报告为主，一般不制定协议标准
- 中国的相关组织与联盟
 - CCSA：中国通信标准化协会
- 开源社区
 - 公布软件源码的网络平台，提供了学习交流的空间



本章内容



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

2.1 协议与分层结构

2.2 参考模型

2.3 标准化组织

2.4 计算机网络度量单位

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



计算机网络度量单位

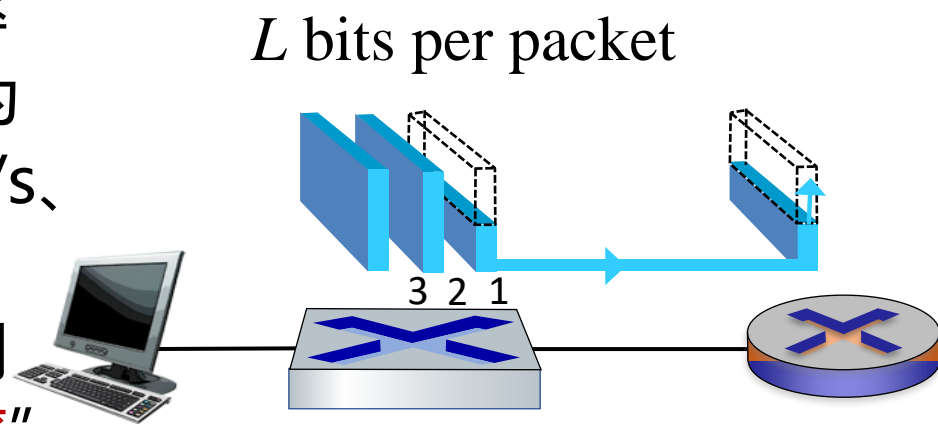


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 带宽：比特率(bit rate)
 - 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
 - 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”
- 分组转发率(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：网络设备端口的最大带宽



在网络设备上：大分组和小分组，哪个更容易实现线速？



计算机网络度量单位



清华大学
Tsinghua University

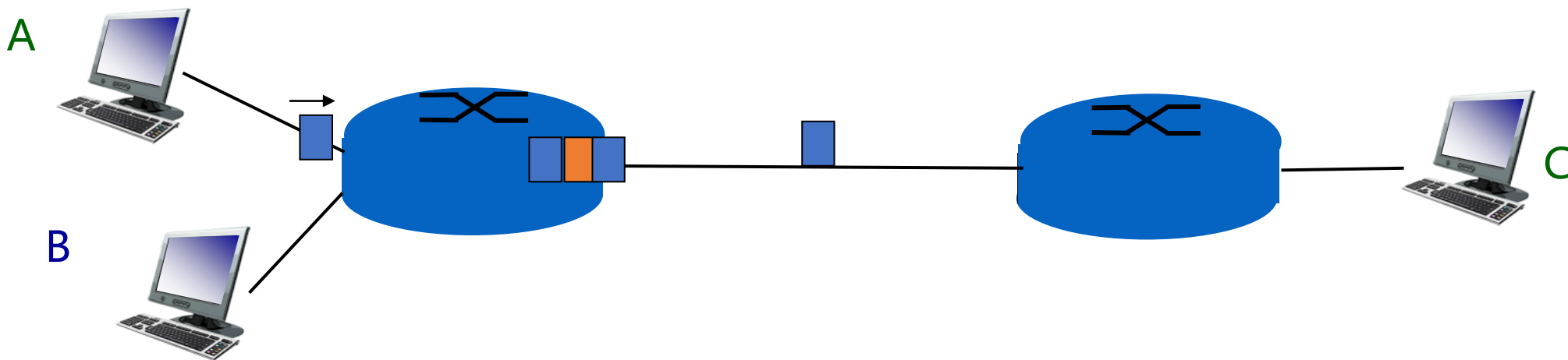


计算机网络教案社区

➤ 时延(Delay)

- 时延 (delay 或 latency) 是指数据 (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, 也称为延迟或迟延

学用大招：将一个大问题**分解**为多个小问题





计算机网络度量单位



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

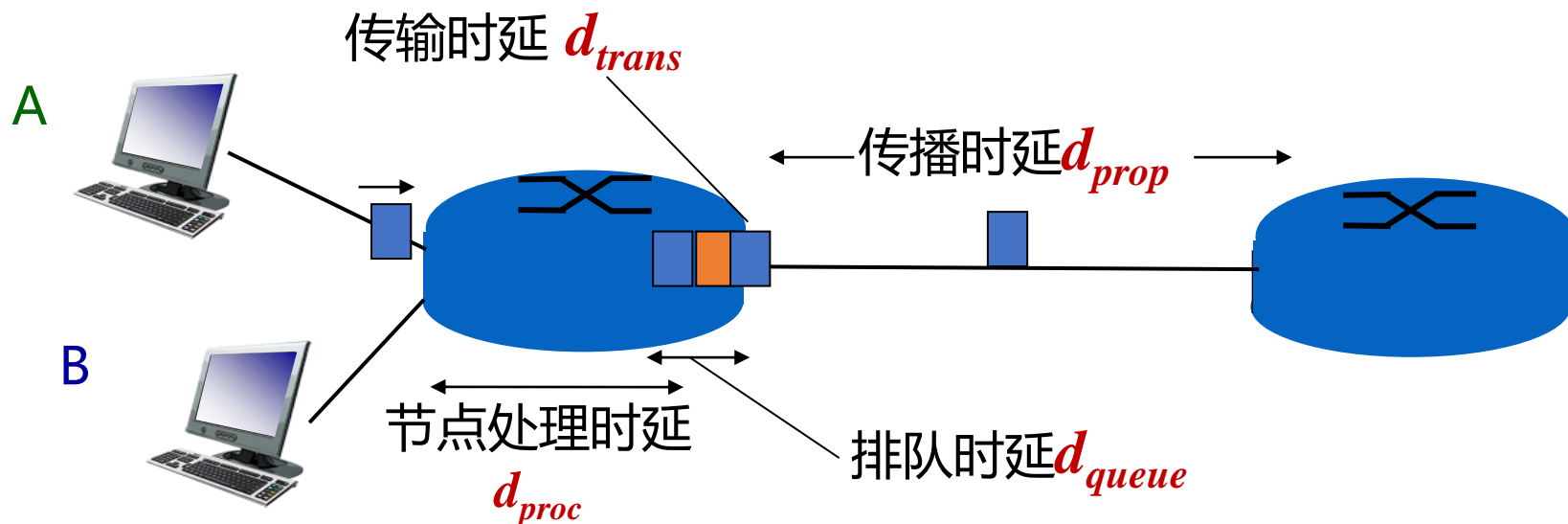
- 传输时延(transmission delay): 数据从结点进入到传输媒体所需要的时间, 又称为发送时延
- 传播时延(propagation delay): 电磁波在信道中需要传播一定距离而花费的时间
- 处理时延(processing delay): 主机或路由器在收到分组时, 为处理分组 (例如分析首部、提取数据、差错检验或查找路由) 所花费的时间
- 排队时延(queueing delay): 分组在路由器输入输出队列中排队等待处理所经历的时延

传输时延

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

传播时延

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



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



计算机网络度量单位

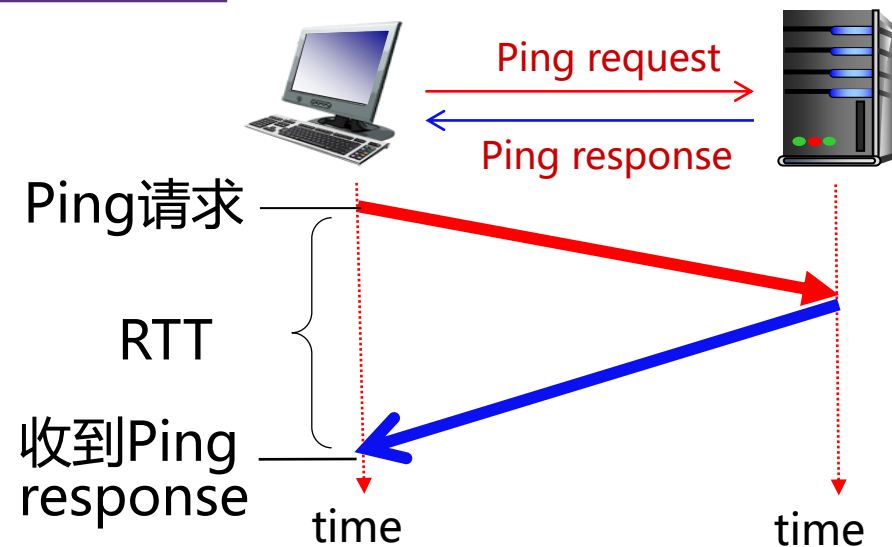


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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

```
dgdeMacBook-Pro:~ yongcui$ ping www.bytedance.com
PING www.bytedance.com.w.cdngslb.com (123.6.31.233): 56 data bytes
64 bytes from 123.6.31.233: icmp_seq=0 ttl=46 time=20.376 ms
64 bytes from 123.6.31.233: icmp_seq=1 ttl=46 time=19.869 ms
64 bytes from 123.6.31.233: icmp_seq=2 ttl=46 time=26.035 ms
^C
--- www.bytedance.com.w.cdngslb.com ping statistics ---
3 packets transmitted, 3 packets received, 0.0% packet loss
round-trip min/avg/max/stddev = 19.869/22.093/26.035/2.795 ms
```



计算机网络度量单位



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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



计算机网络度量单位

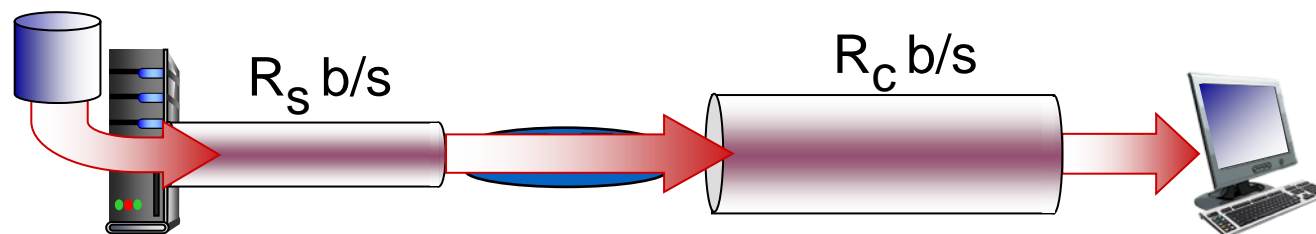


清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

- 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





计算机网络度量单位



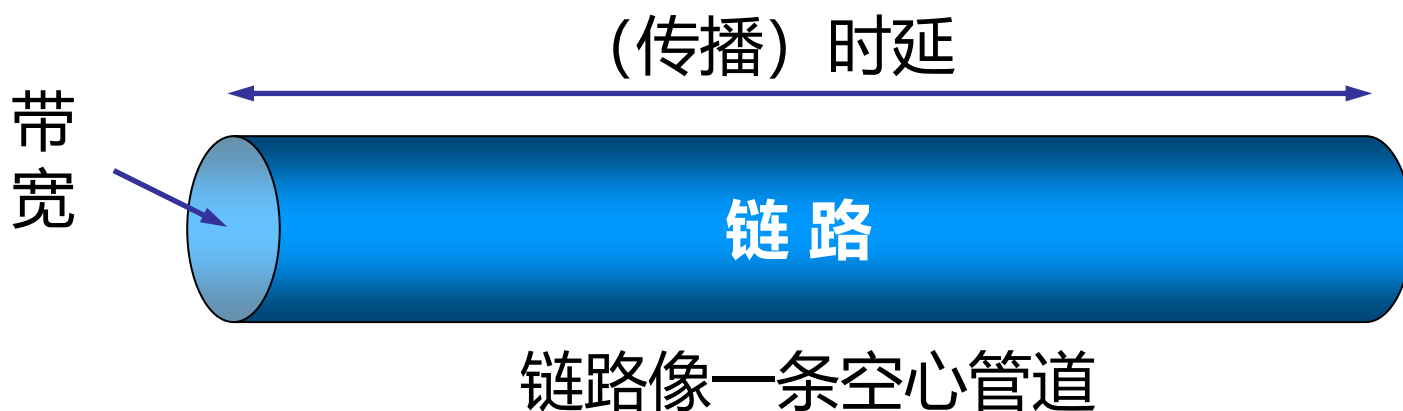
清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 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



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

充分利用好吗？



小结：网络度量单位



- 常见的数据传输速率描述
 - 比特率：数字信道上的数据传送速率
 - 带宽：网络中某通道传送数据的能力
 - 包转发率：以包为单位的转发速率
- 常见的数据发送后的统计指标
 - 吞吐量：单位时间内通过某个网络或信道的数据量
 - 丢包率：所丢失数据包的数量占所发送数据包的比率
 - 利用率：某信道有百分之几的时间是被利用的
- 常见的时延相关指标
 - 时延：数据从一端到另一端所需的时间
 - 时延带宽积、往返时间 RTT、时延抖动



本章总结



- 分层结构
 - 上下层之间的服务和接口
 - 对等的各层协议
- 网络参考模型
 - OSI 7层模型：理想，但难以实现
 - TCP/IP 4层模型：得到了广泛使用，但存在缺陷
- 标准化组织
 - 官方的ITU、ISO
 - 民间但发挥核心作用的IETF和IEEE
- 网络度量单位
 - 带宽等数据传输速率指标、丢包率等统计指标、时延指标



第二次作业



清华大学
Tsinghua University



计算机网络教案社区

➤ 书面作业

• 网络体系结构论文阅读报告二选一

- David D. Clark. "The Design Philosophy of the DARPA Internet Protocols" , In: Proceedings of ACM SIGCOMM' 88, Aug. 1988.
- Saltzer J, Reed D, Clark D. End-to-End arguments in system design. ACM Transactions on Computer Systems, 1984,2(4):195~206.

➤ 小实验作业

- Wireshark实验（协议分层结构观察与简述）

➤ 截止时间：两周后

- 详见网络学堂通知



致谢社区本章贡献者



崔勇

清华大学

- 1、初识互联网
- 2、网络实例
- 8、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



思考与展望



清华大学
Tsinghua University



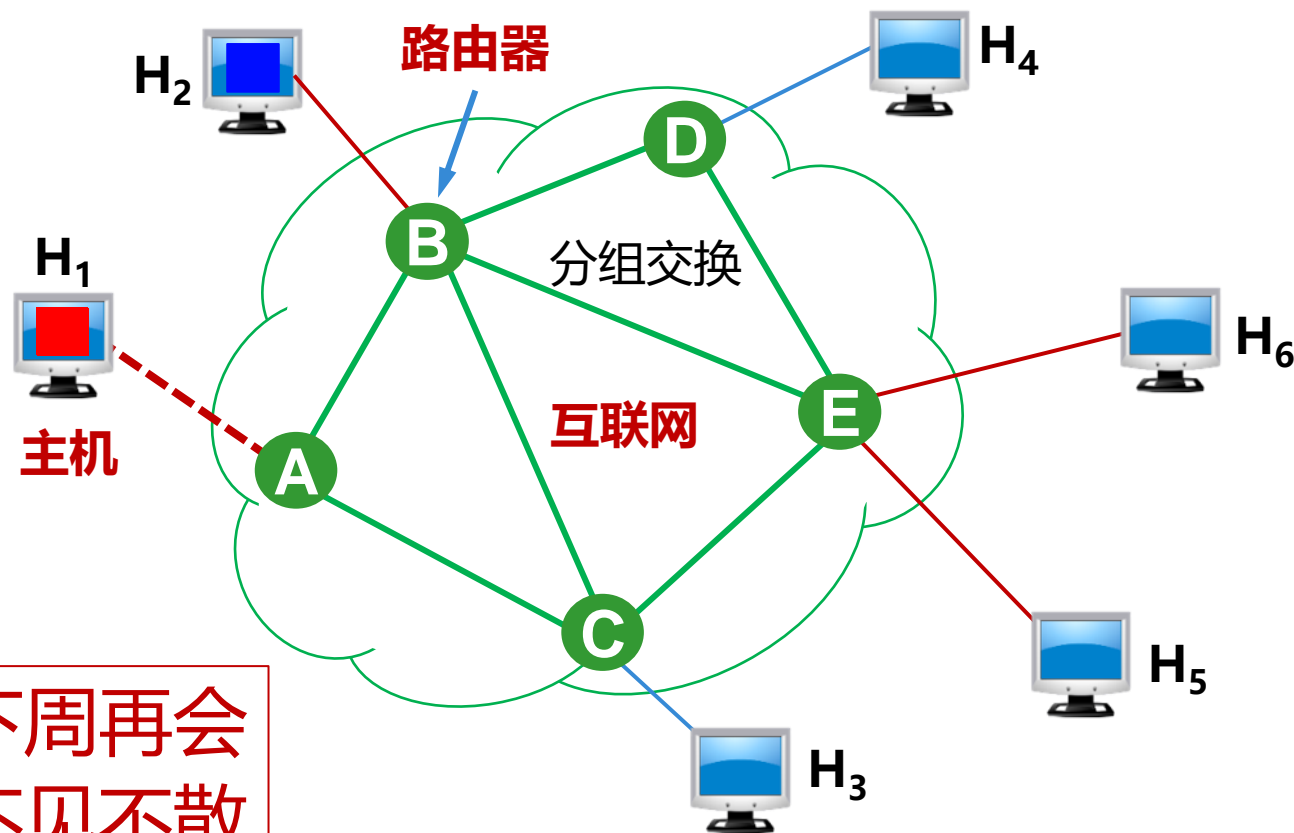
计算机网络教案社区

➤ 最简单的传输

- 传输1比特（能连上吗？）
- 一跳连通：有线、无线，铜线/光纤，电话线/网线？

➤ 物理层

- 如何传得远又传得对？
- 进行有效编码？
- 各种如何选取发明介质？
- 如何设计有效复用？
- 飞机上如何上网？



下周再会
不见不散