

网原期末复习

2021.12.28

ch1 Introduction 引言 计算机网络的历史和新进展

- **体系结构** 是计算机网络的骨架，**协议** 是计算机网络的心脏、血液和神经
- 网络提供的最基本服务：信息传递
- 不同的网络用所提供的服务区分，服务用功能、延迟、带宽...等外特性区分
- 网络类型
 - 空间距离
 - 局域网（LAN）：以太网、令牌环、FDDI：几十米~一公里
 - 城域网（MAN）：DQDB, SMDS, RPR：校园~城市
 - 广域网（WAN）：X.25, ATM, INTERNET：城市、省、国家等
 - 个域网（PAN），家庭网络（HAN），星际网络/空间网络
 - 信息类型：数据网络vs电话网络（但互联网都可以发）
 - 应用类型：专用网络vs通用网络
 - 使用权or协议的使用权：私有vs公有
 - 地面vs卫星，有线vs无线...

1.1 计算机网络发展历史

- 1940年代 计算机诞生：ENIAC
- 1950年代 大型机（Mainframe），多终端系统
- 1960年代，计算机网络研究，Packet Switch vs Circuit Switch
 - Paul Baren 1960-1964 分组交换网络
- **1969年，ARPANET启动**
- 1970年代
 - **X.25**分组交换网：各国的电信部门建设运行
 - 各种**专用**的网络体系结构：SNA, DNA
 - Internet的前身ARPANET进行实验运行，带宽56kbps，不超过100台
 - 1979年，**TCP/IP**成熟
 - **telnet**，计算资源的共享访问
- 1980年代
 - 中国：局域网，OSI，低速广域网（电话线）
 - 标准化计算机网络体系结构：ISO/OSI
 - 局域网络LAN技术空前发展
 - 建成NSFNET，Internet初具规模，带宽1.544Mbps，连接1万台
 - 1986 Cisco公司成立；1987，中国第一个电子邮件发到Internet
 - FTP, NFS，数据和文件的共享访问；Email
- 1990年代
 - 中国

- 局域网Novell, TCP/IP
 - X.25广域网和应用（90-93）清华第一代校园网Tunet建成，自己的X.25交换机
 - Internet开始大规模发展
 - 1995年，CERNET（中国教育和科研计算机网）建成 64K
 - 90年代末，自主研成中低端IPv4路由器
- 1994，NSFNET骨干网解体，出现ANS，MCI，Uunet，Sprint...
- Internet商业化，Web技术应用
- 语音和视频，网上聊天室和即时消息
- 2000年代
 - 中国
 - IPv6位基础的下一代互联网CNGI，2006建成CNGI-CERNET2
 - 01年自主研制成功IPv4核心路由器；04年IPv6核心路由器
 - 网络应用大发展：搜索引擎、社交网络、P2P昙花一现
 - 移动互联网产业发展迅速
 - 2004 全球主要学术网宣布开通IPv6服务
- 2010年代
 - 数据中心网络、天地一体化网络、IPv6快速发展（2011年启动World IPv6 day）
 - 2011.2.3，ICANN宣布IPv4地址耗尽，今天IPv6普及率27.55%

1.2 互联网的发展和成功经验

网络时代三大定律

- 摩尔定律：CPU性能18个月翻番,10年100倍。
- 光纤定律：超摩尔定律，骨干网带宽9个月翻番，10年10000倍。
- 迈特卡菲定律：联网定律。未联网设备增加N倍，效率增加N倍。联网设备增加N倍，效率增加N²倍

互联网标准化组织

- **IAB**（Internet Architecture Board）互联网体系结构研究委员会
 - 定义Internet整体框架，为IETF提供大方向指导，下属机构有IETF、IRTF，归ISOC互联网协会管
- **IETF**（Internet Engineering Task Force）互联网工程任务组
 - 负责Internet协议的研发和改进，提交的标准称为RFC（Request For Comments）
- **IRTF**（Internet Research Task Force）互联网研究任务组
- **IESG**（The Internet Engineering Steering Group）
 - 技术上管理IETF活动，负责Internet标准制定过程

互联网的主要技术特点

- 分层的分布式结构、端到端的网络连接技术、无连接的分组交换技术、层次机构的域名技术、统一的网络互联协议IP、网络管理技术、路由器加专线技术、通用的应用技术、可扩展的路由技术

1.3 互联网的核心思想：分组交换

- Paul Baren 1960-1964 分组交换网络
 - 热土豆路由策略：如果不知道正确的路由，就把分组转发给所有邻居；不必每次都沿最短路转发
 - 分组发送：每个分组的转发都独立于其他分组，交换节点不保存端接点的状态
 - 分布式系统：所有交换节点是平等的；健壮性来自于足够的硬件冗余和适应性路由
 - 特定：简单性、灵活性、可扩展性、健壮性
- 今天的互联网与50年前相比：
 - 规模更大、用户更多、功能更多
 - **但健壮性、适应性和互联程度都下降了！**
 - IPv4地址空间耗尽，越来越多用户用NAT访问网络->导致端到端传输路径变成多个NAT级联，相当于虚电路。
 - IPv6
 - 43亿 vs 3.4×10^{38}
 - 改善路由性能（路由聚合减少路由表表项、简化IP头）
 - 增强了网络安全（IPsec）

1.4 国际、中国高速计算机网络研究计划

- NGI：美国下一代互联网研究计划，1996年启动
- Internet2：大学合作计划
- 全国IPv6下一代互联网主干网GTRN正在形成
- 欧盟下一代学术主干网GEANT
- 中国下一代互联网示范工程CNGI
 - CNGI核心网：CERNET2 最大的主干网

ch2 Network Architecture 计算机网络体系结构

2.1 计算机网络的定义和组成

- 计算机网络：一批独立自治的计算机系统的互联集合体
 - 组成：资源子网（服务器、客户计算机）和通信子网（网络互联设备eg路由 交换机 HUB）。
 - 通信方式：
 - 交换式通信：需要经过交换设备，转发给一个或一组节点
 - 拓扑：star, ring, tree, complete, intersecting rings, irregular
 - 关键技术：路由选择！
 - 应用在：城域网、广域网
 - 广播式通信：多台计算机共享通信线路，任一台发出的信息可以直接被其他接受

- 拓扑：bus, ring
 - 关键技术：通道分配！
 - 应用在：局域网
- 分布式系统：建在网络上、高度内聚、对用户透明，对用户好像是一台计算机
- 发展趋势：计算机网络与分布式系统逐渐统一

2.2 计算机网络体系结构

- (def) 计算机网络体系结构
 - 定义网络及其部件通过协议应该完成的**功能**，是 **层次和层间关系** 的集合
 - **不定义** 协议细节和协议之间的**接口关系**
- 网络功能的分层->协议的分层->体系结构的分层
- (def) 对等进程：不同计算机上进行对话的 **第N层通信各方** 可以分别看成是一种进程
- (def) 协议 protocol：计算机网络 **同等层次中，通信双方** 进行信息交换时必须遵守的规则
 - 协议的组成
 - **语法**：以二进制形式表示的命令和相应结构（编码）
 - **语义**：由发出的命令请求、完成的动作和回送的响应组成的集合（编码的意义）
 - **定时关系**：有关事件顺序的说明（因果关系）
 - 协议分层
 - 目的主机第N层收到的报文与源主机第N层发出的报文相同
 - 洋葱结构（第N层到N-1层，可能会外面加一个包头）
 - (prop) 对于第N层协议，有如下特性：
 - 不知道上下层的内部结构、独立完成某功能、为上层提供服务、使用下层的服务
- (def) 服务：**同一实体上下层间** 交换信息时必须遵守的规则
 - 分类
 - 面向连接的服务：建立连接、传输数据、关闭连接。顺序性好
 - 无连接服务：直接传数据，每个包独立进行路由选择。顺序性差
 - 连接不意味可靠，可靠要通过确认、重传等机制来保证（无连接也可以可靠！）
 - 服务原语：服务在形式上是由一组**接口原语**（或操作）来描述的，分为四种类型：
 - 请求Request、指示Indication、响应Response、确认Confirm
 - 指示：An entity is to be **informed** about an event
 - A的N+1层给N建立连接的请求，B的N收到后给N+1层指示，B的N+1同意建立连接给N响应，A的N收到后给N+1层确认。
- (def) 接口 interface：相邻层之间有接口，定义了 **下层向上层** 提供的原语操作和服务
- (def) 服务访问点SAP（service access point）：任何层间服务是在接口的 **SAP** 上进行的，每个SAP有唯一的识别地址，每个层间接口可以有多个SAP。
- (def) 接口数据单元IDU（interface data unit）：IDU=ICI+SDU，通过**SAP**进行传送的层间信息单元。
 - ICI是上层接口控制信息interface control information，SDU是上层的服务数据单元service data unit
 - 是上层到下层的
- (def) 协议数据单元PDU（protocol data unit）：PDU=SDU+PCI，第N层实体通过网络传送给对等实体的信息单元
 - SDU是上层的服务数据单元或其分段，PCI是协议控制信息protocol control information

- 涉及分段和重组
- 原则
 - 分层原则：优点为模块化、功能抽象、可重用；缺点为信息隐藏会低效
 - 端到端原则：核心简单，边缘复杂；只有对性能有明显提升的才放底层
 - Rule of Thumb：在低层实现一个功能，应该对其他不用这个功能的应用有很少的性能影响！

2.3 典型计算机网络参考模型

- 电信标准：1865年成立国际电信联盟ITU (international telecommunication union)
- 国际标准：1946年成立的国际标准化组织ISO负责制定各种国际标准
 - 技术委员会TC -> 分委员会SC -> 工作组WG
- Internet标准：自发而非政府干预，称为RFC，从ARPANET开始发布，1983成立IAB，1986在IAB底下成立IETF，1989在IAB底下成立IRTF

【重要】！！！！

- 1983年 **ISO的OSI模型** 正式成为国际标准
 1. 物理层 The Physical Layer：在 **物理线路** 上传输原始的二进制数据位（基本网络硬件，bit）
 2. 数据链路层 The Data Link Layer：在有差错的物理线路上提供 **无差错** 的数据传输（帧Frame）
 3. 网络层 The Network Layer：控制通信子网提供 **源点到目的点** 的数据传送（包Packet）
 4. 传输层 The Transport Layer：为用户提供 **端到端** 的数据传送服务
 5. 会话层 The Session Layer：为用户提供 **会话控制** 服务（安全认证），例如令牌管理和同步
 6. 表示层 The Presentation Layer：为用户提供 **数据转换和表示** 服务 eg ASN.1抽象语法表示法
 7. 应用层 The Application Layer
- 端节点要实现完整的7层，但网络层、链路层不用很完备（例如不用路由转发功能），而路由只需要实现到网络层就可以。往下传的过程中每层加一个header，其中链路层查错控制，还要有一个CRC校验码尾巴边发送边计算，发完之后算完了所以在最后。
- **TCP/IP参考模型**：比OSI早！！
 1. Host-to-Network：物理层+数据链路层
 2. Internet（网络层）：控制通信子网提供源点到目的点的IP包传送，实现异构网络互联
 3. 传输层：提供端到端的数据传送服务。TCP和UDP
 4. 应用层：提供各种Internet管理和应用服务功能
- **混合模型**：物理层，数据链路层，网络层，传输层，应用层

2.4 其他网络体系结构

- Novell NetWare
 - NetWare是Novell公司开发的PC上的网络操作系统，**client-server**结构，1983-2005
 - 基本思想：文件共享（当时其他是磁盘共享，粒度太大）
 - 基于XNS，但有很多改进
 - 网络层协议 IPX (Internetwork Packet eXchange) **不可靠无连接**协议，类似IP，但地址有10字节（4字节网络号+6字节MAC），而IP是4字节

- 传输层协议NCP (NetWare Core Protocol) , SPX (Sequenced Packet eXchange) : **面向连接**
- X.25分组交换网
 - 70年代CCITT提出, 早于ISO/OSI, 为公用包交换网与用户之间提供接口
 - **面向连接, 支持交换虚电路和永久虚电路**
 - 定义了三层协议: 物理层 (X.21, X.3 28 29) , 数据链路层协议 (LAP, LAPB) , 网络层 (PLP)
 - DTE: Digital Terminal Equipment 数据终端设备
 - DCE: Digital Circuit Terminating Equipment 用户互联
 - PAD: Packet Assembler and Disassembler 包的封装和解封装
- B-ISDN和ATM
 - 宽带综合业务数字网B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network)
 - 背景: 多种网络共存, 电信公司想统一成一个网络B-ISDN
 - 技术基础: 异步传输模式ATM (Asynchronous Transfer Mode)
 - ATM: **面向连接. 异步传输, 没有主时钟**。传输单元是短的、**定长**的包, 称为信元。速率主要有两种: 155M, 622M。采用**虚电路**交换。

2021.12.29

ch3 Data Communication 数据通信基本原理

3.1 数据通信基础理论

- $g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + b_n \cos(2\pi nft)$
- (def) 频谱spectrum: 一个信号所包含的频率的范围
- (def) 带宽bandwidth: 信号的绝对带宽等于频谱的宽度, 信号的主要能量集中在相对窄的频带内, 这个频带被称为有效带宽, 或带宽。带宽越宽, 信号的信息承载能力越强。
- 信道有截止频率 f_c , 则0到 f_c 是信道的有限带宽 (此范围内振幅衰减较弱, 以上衰减厉害)
- 【计算】通过信道的 **谐波次数越多, 信号越逼真**。若信道比特率为B bps, 8位为一个周期T, 则一次谐波的频率 $f_1 = B/8Hz$, 能通过信道的最高次谐波数目为: $N = f_c/f_1$ 。有限的带宽限制了数据传输速率 (比特率和 f_1 成正比, 与N成反比)。
- (def) 波特率baud: 每秒钟信号变化的次数, 也称调制速率。比特率bit: 每秒钟传送的二进制位数。波特率与比特率的关系取决于信号值与比特位的关系。(每个信号值表示3位, 则比特率为波特率的3倍)
- 【计算】Nyquist (无噪声有限带宽信道): 最大数据传输率 $= 2H \log_2 V(bps)$, 带宽为H的低通滤波器, 每秒采样2H次, 信号电平分为V级。
- 【计算】香农 (信道受随机热噪声干扰): 最大数据传输率 $= H \log_2 (1 + S/N)(bps)$, 与采样速度、信号电平技术无关。信号功率S、噪声功率N, 信噪比为 $10 \log_{10} S/N$ (分贝)

3.2 数据通信技术

- 传输方式分类
 - 连接方式: 点到点、点到多点
 - 信息传送方向和时间: 单工 (监视信号可回送!)、半双工 (某一时刻只能单向)、全双工
 - 同步方式

- 同步传输：传输开始时以同步字符使收发双方同步，传输 **效率较高** 但需要 **透明传输处理**（透明传输：传输的信息中不能有同步字符出现），以 **报文为单位**
 - 接收方必须知道每一位信号的开始及其持续时间，以便正确采样接收
 - 基于位的传输一般用同步传输，以二进制位流为单位，以位为单位同步
 - 异步传输：需要辅助位（起始位、奇偶校验位、终止位），传输 **效率低**，主要用于 **字符终端与计算机之间的通信**，以 **字符为单位**
- 数据编码技术
 - 模拟数据 <-电话系统-> 模拟信号
 - 数字数据 <-调制解调器MODEM -> 模拟信号
 - 模拟数据 <-编码解码器CODEC -> 数字信号
 - 数字数据 <-数字编码解码器->数字信号
 - 数字信号发送的优点是：价格便宜，**对噪声不敏感**；缺点是：**易受衰减**，频率越高，衰减越厉害。
 - **基带传输（数字数据的数字传输）**：传输时直接使用基带信号。基带：基本频带，是原始信号所固有的频带。使用于低速高速的各种情况。限制：因基带信号所带的 **频率成分很宽**，所以对传输线有一定的要求。
 - NRZ Non-Return to Zero **不归零编码**：0就是0，1就是1。难以分辨位的结束和开始。发送方和接收方必须有时钟同步。连续的0/1会导致信号直流分量累加。
 - Manchester **曼彻斯特码**：每一位中间跳变。0->1表示0（!!!），1->0表示1。跳变又是数据，又可以作为时钟自同步。
 - Differential Manchester **差分曼彻斯特码**：每一位中间跳变表示时钟。开始时有跳变表示0（!!），无跳变表示1。时钟、数据分离，便于提取（考虑开始时是0还是1）
 - 逢“1”/“0”变化的NRZ码：在每位开始时，逢“1”或“0”电平跳变，否则不跳变。（考虑开始是0还是1）
 - **频带传输（数字数据的模拟传输）**：载波传输，用基带信号对载波信号进行调制MO（控制某些参量），之后解调DE ---> MODEM
 - 三种调制技术：调幅 Amplitude-shift keying（ASK），调频 Frequency（FSK），调相 Phase（PSK）
 - **脉冲代码调制PCM（模拟数据的数字传输）**：根据Nyquist原理进行采样
 - 将模拟信号振幅分成多级（ 2^n ），每一级用 n 位表示。**T1 载波** 将模拟信号分成**128级**，每次采样用7位二进制数表示
 - 差分脉冲代码调制：根据前后两个采样值的差进行编码
 - δ 调制：根据前后两个采样值的差进行编码，但每次只输出0/1表示下降/上升。编码速度跟不上变化太快的信号。
- 多路复用技术
 - TDM时分复用：每个用户分到一部分的bit
 - **T1载波**（1.544Mbps）使用**TDM，分成 24 个信道**，控制信息带内传输（开头的1个bit）
 - FDM频分复用：（频率分割为频段，手机用）
 - WDM波分复用：（光传输使用，对波长分段，其实是特殊的频分复用但习惯叫波分复用）
- 交换技术
 - 电路交换 circuit switching（电话网、ISDN等）：适用实时信息、模拟信号传送，带宽低时经济

- 原理：直接利用可切换的物理通信线路，连接通信双方
- 3个阶段：建立电路→传输数据→拆除电路
- 特点：发数据前必须建立点到点物理通路，建通路时间长，但数据传送延迟短
- 时分复用：时间分为帧，帧分为时槽（时槽在帧内的相对位置决定所属会话），收发双方需要同步，非永久会话需要动态绑定时槽到一个会话
- 报文交换 message switching——存储转发方式：适用带宽高的情况，可靠灵活，延迟大
 - 原理：信息以报文（逻辑上完整的信息段）为单位进行存储转发
 - 特点：线路利用率高；要求中间结点缓冲大；延迟时间长
- 分组交换 packet switching——存储转发方式（可以认为是对报文交换的改进）
 - 原理：存储转发的单位——分组（比报文小，可定长可变长），源节点把报文分成分组→信息以分组的单位（在中间结点）存储转发→目的节点把分组合成报文
 - 统计复用，按需分配信道资源，不需要等待时槽；用附加的分组头区分数据
 - 特点：每个分组独立进行路由选择，网络结点设备中不预先分配资源，（统计复用）线路利用率高，易于重传，可靠性高，易于开始新的传输，让紧急信息优先通过，开销增加
 - 分组交换相比电路交换的最大优势是可以实现统计复用，有效的利用带宽；但要处理拥塞
 - 数据报分组交换（IP网络等）：
 - 每个分组均带有网络地址（源、目的），可走不同的路径，可扩展性更好
 - 虚电路分组交换（ATM网络等）：
 - 数据以分组形式传输，来自同一流的分组合通过同一预先建立的路径（虚电路）传输，（建立时会发带有全称网络地址的呼叫分组）
 - 分组头不需要包含完整的地址信息，要保证分组的顺序，路由器需要维护虚电路的状态信息
- 交换结构switch fabric
 - crossbar交换：无阻塞， $n \times k$ 矩阵
 - 空分交换：多个crossbar级联
 - 时分交换：类似路由表，有一个mapping table，要求中间机器处理速度快

【重要计算！！】各种交换技术的网络延迟

对各类通信子网定义下列参数：

- N = 两个给定站点之间所经过的段数；
- L = 报文长度（L为分组大小P的整数倍），单位：位；
- B = 所有线路上的数据传输速率，单位：位/秒；
- P = 分组大小（ $P \leq L$ ），单位：位；
- H = 每个分组的分组头，单位：位；
- S1 = 线路交换的呼叫建立时间，单位：秒；
- S2 = 虚电路的呼叫建立时间，单位：秒；
- D = 各段内的传播延迟，单位：秒。

- 电路交换： $S_1 + L/B + ND$ 建立之后可以直接传输，不用存储转发
- 报文交换： $N(L/B + D)$ 每一级必须收完完整报文才可转给下一级
- 数据报分组交换：

$$(L/P)((P + H)/B) + ND + (N - 1)((P + H)/B) = (L/P + N - 1)((P + H)/B) + ND$$

- 一共 L/P 个包，考虑 N 级一共要计算 $L/P+N-1$ 个包的发送延迟（记得加上 H ），然后再加上 N 段的传输延迟。（其实对比报文交换，就是发送的时候从1个包变成了 L/P 个包，然后加上了Header）
 - 虚电路分组交换： $S_2 + L/B + ND + (N - 1)(P/B)$ 加上建立时间，把 H 去掉即可。
-

ch4 Physical Layer 物理层接口及其协议

4.1 物理层的定义和功能

- ISO/OSI定义：物理层提供 机械、电气、功能、规程 的特性。目的是启动、维护和关闭【数据链路实体】之间进行比特传输】的 物理连接
- 功能：在两个网络设备之间提供透明的比特流传输
- 传输方式
 - 连接方式：点到点/点到多点
 - 通信方式：单工/半双工/全双工
 - 位传输方式：串行/并行

4.2 【重要！】物理层的四个特性

- 机械特性：主要定义物理连接的边界点，即接插装置。 eg. ISO 4903,15芯连接器，X.20-22
- 电气特性：规定传输二进制位时，线路上信号的电压高低、阻抗匹配、传输速率和距离限制。 eg. CCITT V.28：非平衡型/平衡型电气特性，EIA RS-232-C
- 功能特性：主要定义各条物理线路的功能（数据、控制、定时、地）
- 规程特性：主要定义各条物理线路的工作规程和时序关系
- 例子：EIA RS-232-C
 - 美国电子工业协会EIA 1969年提出
 - 机械特性：25芯连接器，DTE为插头，DCE为插座
 - 电气特性：非平衡型，低于-3V为1，高于+4V为0，最大20Kbps，最长15m
 - 非平衡传输：所有电路共享一个公共的地线，成本低
 - 平衡传输：每个主要电路需要两根线，没有公共地线，更准确
 - 功能特性：定义了21条线，许多子集，基本与CCITT V.24兼容
 - 规程特性：不同功能子集有不同规程，有14种不同接口，适用于单工... 同步...
 - 重新设计为X.21，改进为RS-449

4.3 传输介质

- 双绞线：模拟/数据传输均可，带宽依赖于线的类型和传输距离
- 同轴电缆
 - 基带同轴电缆：50欧姆，用于数字传输
 - 宽带同轴电缆：75欧姆，用于模拟传输

- 光纤
 - 单模光纤：半径小，只有一个角度的光可以进入，适于长距离
 - 多模光纤：半径大，多个角度的光可以进入，适于短距离
 - 都支持同时传输几个波长的光，支持波分复用
 - 850nm -> 1310nm -> 1550nm：衰减逐渐减小，价格逐渐提高
 - 组网方式：点到点：四根线（两根用于保护倒换）；环：两根线（一根用于保护倒换）
 - 中继器：光-电-光/ 全光（全光网：光因特网论坛OIF）

4.4 网络传输技术

• SONET/SDH（光纤传输）

- 80年代提出，SONET主要用于北美和日本，SDH主要用于欧洲和中国。
- 采用 TDM 技术，同步传输，由主时钟控制，时钟精度1ns。
- SONET路径：路径（path），线路（line），段（section）
- 基本SONET帧810字节/125us，即51.84Mbps，基本SONET信道称为STS-1
- 复用基于字节。OC-3和OC-3c区别：c表示级联，而不是复用
- 移动电话网络
 - 单方向的寻呼系统（单工）：需要很小的带宽
 - 蜂窝电话
 - 第一代：模拟蜂窝电话，只能传送语音
 - 第二代：数字蜂窝电话，主要传送语音，GSM，CDMA
 - 3G/4G：可以传送语音和数据
 - 模拟蜂窝电话
 - 早期用于军事通信，push-to-talk system，一个信道，半双工（类似对讲机）
 - 60年代，IMTS（improved mobile telephone system），双频，全双工
 - 1982年，AMPS（advanced mobile phone system），使用小的蜂窝（cell），蜂窝中心有基站，附近且不相邻的蜂窝中重用频率（可以分成三段，每个用 1/3）

ch5 Data Link Layer 数据链路控制及其协议

5.1 数据链路层概述

- ISO/OSI：目的是为了提供 功能和规程 上的方法，以便建立、维护和释放【网络实体】间的 数据链路
- 解决的问题：在有差错的线路上进行无差错传输
- 结点（node）：网络中的主机和网络设备（路由器、交换机等）
- 链路（link）：通信路径上连接相邻结点的通信信道
- 数据链路层协议定义了一条链路的两个相邻结点间交换的数据单元格式，以及结点发送和接收数据单元的动作
- 点到点（point to point）通信：一条链路上两个相邻结点间的通信
- 端到端（end to end）通信：从源结点到目的结点的通信，通信路径可能由多个链路组成
- 实际数据通路：网络层->数据链路层->物理层（图上是物理层的下方？）->另一方的物理层->...
- 虚拟数据通路：网络层->数据链路层->另一方的数据链路层->...

- 数据链路控制规程：为使数据能迅速、正确、有效地从发送点到达接收点所采用的控制方式（其实就是协议）
- 数据链路层协议应提供的基本功能：数据在数据链路路上的正常传输（建立、维护和释放）、成帧：定界与同步，处理透明传输问题、差错控制：检错和纠错、顺序控制（可选）、流量控制（可选）：基于反馈机制
- 为网络层提供三种服务：**无确认无连接**（用于误码率低/实时业务），**有确认无连接**（误码率高，如无线网），**有确认有连接**

5.2 成帧 Framing

- 组帧方法：往往使用字符计数法和一种其它方法的**组合**
 1. 字符计数法：在帧头用一个域表示整个帧的字符个数（包括第一个！），但若出错对后面的也有影响
 2. 带字符填充的字符定界法
 - 起始 DLE STX，结束DLE ETX；
 - DLE: data link escape, STX: start of text, ETX: end of text 都是一个字符，占一个byte
 - 缺点：局限于8位字符和ASCII字符传送
 - 若数据中出现DLE，在前面再填充一个DLE
 3. 带字节填充的字符定界法（用于bit stream）
 - FLAG 头 payload 尾 FLAG
 - 数据中有flag或esc，在前面加esc字节
 4. 带位填充的标记定界法
 - 帧的起始和结束都用一个标记（特殊位串）：“01111110”
 - “0”比特插入删除技术：连续出现5个1，后面直接填充一个0
 5. 物理层编码违例法：只适用于物理层编码有冗余的网络
 - 802 LAN：曼彻斯特用H->L/L->H表示1/0，而H->H和L->L不表示数据，可以做定界符

5.3 【计算】错误检测和纠正

- 差错出现的特点：随机，连续突发（burst）
- 纠错码：效率低，适用于不可能重传场合
 - （def）码字codeword：一个帧包括m个数据位，r个校验位， $n=m+r$ ，此n比特单元为n位码字
 - （def）海明距离：两个码字之间不同的比特位数
 - 检查出d个错，需要用海明距离为d+1的编码
 - 纠正d个错，需要用海明距离为2d+1的编码
 - 纠正1个错：对于 2^m 个有效信息，有n个距离为1的无效码字，因此 $(n+1)2^m \leq 2^n$ ，即 $(m+r+1) \leq 2^r$ 。
 - 检查每个校验位k的奇偶值是否正确，若不对，计数器+k，结束过若为0则有效；为m则第m位出错。
 - 纠正突发错误：采用k个码字组成k*n矩阵，按**列**发送，故有kr个校验位，km个数据位，可纠正最多k个突发性连续比特错。（如果是按行发就在一行里，纠正不过来。）
- 检错码：大多数情况，检错+重传
 - 循环冗余码（CRC码，多项式编码）
 - 生成多项式G(x)：事前商定，高位和低位必须是1，必须比传输信息对应的多项式短
 - checksum加在帧尾，使带checksum的frame的多项式能被G(x)除尽

- 计算checksum
 - 记帧对应多项式为 $M(x)$ ，若 $G(x)$ 为 r 阶（对应的位串是 $r+1$ 位！），则在帧的末尾加 r 个0，变成 $x^r M(x)$
 - 按%2除法计算 $(x^r M(x) \div G(x))$ 对应的位串（%2减法就是异或，除法同理）
 - 按%2减法减去余数之后结果就是要传的带校验和的多项式 $T(x)$ （就直接加后面就完了）
- CRC的检错能力：PPT 27-28面
- 网卡NIC（network interface card）可以硬件实现CRC校验，边发送边算
- 对于误码率低的链路，链路层协议可以不实现可靠传输功能！
 - 可靠传输：纠错检错码、确认和重传机制
 - 传输层协议TCP也提供可靠传输服务

5.4 基本的数据链路层协议

- 单工！
- 【protocol 1】无约束单工协议
 - 单工传输，发送方无休止工作，接收方无休止工作，信道不损坏、丢失帧
 - 发送程序：取数据，构成帧，发送帧；接受程序：等待，接受帧，送数据给高层
- 【protocol 2】单工停等协议
 - 接收方不能无休止接受→接收方每收到一个帧，给发送方回一个响应，发送方收到之后再继续发下一个
- 【protocol 3】有噪声信道的单工协议
 - 信道有差错，信息帧可能损坏、丢失→出错重传
 - 定时重传，发送帧头放入1位序号防止响应帧损坏
 - 发方在发下一个帧之前等待一个肯定确认的协议叫做PAR（Positive Acknowledgement with Retransmission）或ARQ（Automatic Repeat reQuest）
 - 确认帧也要有序号！否则超时时间太短时协议失败（见PPT第41面）

5.5 【重要！！】滑动窗口协议（TBD：看书，PPT代码）

- 单工→全双工！
- （def）捎带/载答piggybacking：暂时延迟待发确认，以便附加在下一个待发数据帧的技术
 - 优点：充分利用信道带宽，减少帧的数目和帧到达的中断，缺点：复杂
- 工作原理
 - 发送帧序号：0到 $2^n - 1$ ，用 n 位表示
 - 发送窗口
 - 上界为要发送的下一个帧的序号，下界为未得到确认的帧的最小序号。
 - 窗口大小=上界-下界（循环的减），大小可变
 - 发送一个序号是上界的帧，上界+1；接受一个确认序号是下界的正确响应帧，下界+1
 - 累计确认：若确认序号落在发送窗口之内，则下界连续+1直到下界=确认序号+1
 - 接受窗口
 - 大小固定，但不一定与发送端相同
 - 上界为允许接受的最大序号（不允许的第一个？），下界为希望接受的序号
 - 落在窗口外的帧被丢弃；序号等于下界的帧被正确接收、产生响应帧、上界下界都+1（大小不变）

- 【protocol 4】一比特滑动窗口协议
 - 窗口大小：N=1，发送和接受序号取值范围：0,1
 - 可数据双向传输，信息帧中可含有确认信息，信息帧中包括两个序号域：发送序号和确认序号
 - 问题：停等方式；若双方同时发送，则会有一半重复帧；效率低，传输时间长
 - 【计算】信道利用率
 - 设信道带宽b bps，帧长度L bit，往返传输延迟R秒
 - 信道利用率： $(L/b)/(L/b + R) = L/(L + Rb)$ ，帧短时利用率低
 - 解决：流水线技术，连续发送多帧后再等待确认-->误码率高时，对 损坏和非损坏帧 的重传非常多
- 【protocol 5】退后n帧重传（go back n）
 - 发送窗口大于1，接收窗口为1（期望按顺序到达！）
 - 接收方从坏帧起丢失所有后继帧，发送方从坏帧开始重传（超时就把上界置为下界）
 - 对于出错率高的信道，浪费带宽
 - 窗口设置：发送方有流量控制，为重传设缓冲！
 - 发送窗口尺寸<序号个数=MaxSeq+1
 - 确认种类：没新收到（1种）+收到n个（窗口尺寸种）<=序号个数
 - 多个未确认帧->多个计时器，用链表，记的内容有序号、和上一个帧超时时间的差值
 - 内部事件：network_layer_ready, timeout；外部事件：frame_arrival, cksum_err
- 【protocol 6】选择重传（selective repeat）
 - 发送窗口大于1，接收窗口大于1
 - 接收方可暂存坏帧的后继帧，发送方只重传坏帧
 - 接收窗口较大时，需较大缓冲区；不会因不必要的重传而浪费信道资源
 - 窗口设置：
 - 保证接收窗口移动前后，接收窗口内的帧没有重叠
 - 发送窗口尺寸>=接收窗口尺寸时，接收窗口尺寸<=(MaxSeq+1)/2=序号个数/2
 - 接收方不知道来的是旧的重传帧，还是新的帧！发送方发的最早的帧是接收窗口移动前的第一个（重传），如果移动一整个接收窗口距离后它也在范围内就会有问题。
 - 发送窗口尺寸<接收窗口尺寸时，发送窗口尺寸+接收窗口尺寸<=序号个数
 - 跟协议5原因类似。
 - 两方缓冲区大小=各自窗口大小
 - 增加确认计时器，解决两方负载不平衡带来的阻塞问题（如果没得捎带，到时间就单发确认）
 - 可随时发送否定性确认帧NAK
 - 内部事件：network_layer_ready, timeout, ack_timeout
 - 外部事件：frame_arrival, cksum_err
 - ACK计时器
 - 收到帧的序号等于接收窗口下界，或已经发过NAK时启动
 - 发送ACK帧时停止，超时则产生ack_timeout事件

5.6 协议说明与验证

- 协议工程
 - 协议说明：定义一个协议实体提供给它的用户的 **服务**，和该协议实体的 **内部操作**
 - 协议验证：验证协议说明是否完整正确
 - 用于设计阶段，以协议说明为基础，验证协议所有可能状态
 - **可达性分析** 是一种常用的验证方法：图论知识，解决不完整性、死锁、无关变迁
 - 协议实现：用硬件软件实现协议说明中规定的功能
 - 协议测试：检查协议实现是否满足要求：一致性测试、互操作性测试、性能测试
- 形式化描述技术FDT(formal description technique)/形式化方法FM(formal method)
 - 常见方法
 - 有限状态机FSM 扩展EFSM
 - 通信协议主要是由响应多个“事件”的相对简单的处理过程组成
 - 事件：命令（来自用户）、信息到达（来自底层）、内部超时
 - 优点简单，缺点复杂协议状态数爆炸
 - （TBD：阅读协议3）done!
 - 形式化语言模型 LOTOS，Estelle，SDL；都有相应扩展
 - Petri网 扩展有时间/随机/高级Petri网
 - 较强的对并行、不确定性、异步和分布的描述能力和分析能力
 - （TBD：阅读petri网模型）done!
 - 进程代数 扩展随机进程代数

5.7 常用的数据链路层协议

- 高级数据链路控制规程HDLC（high-level data link control）
 - 1976年，ISO提出HDLC
 - 站由计算机（路由器）和终端组成，分为主站（发送命令），次站（接受命令），组合站（同时具有主、次站功能）
 - 链路构型分为平衡型（主次-主次，组合-组合，适用于计算机-计算机）和非平衡型（主-次，主-多个次，适用于终端-计算机）
 - 基本操作模式分为正规响应模式 NRM（适用于非平衡型），异步响应模式 ARM（适用于主-次和主次-主次），异步平衡模式 ABM（适用于组合-组合）
 - 地址域：用来区分终端，可用来区分命令和响应。地址=接受方：命令；地址=发送方：响应
 - 控制域：滑动窗口，校验和：CTC校验，定界符：面向 **比特**，比特填充技术，01111110空闲一直传
 - 帧类型：信息帧，监控帧，无序号帧
 - 选择站构型——> 基本操作模式——> 基本帧种类——> 12种任选功能——> 得到协议
- X.25的链路层协议LAPB：是HDLC的 **子集**
- PPP：point-to-point protocol
 - 由SLIP协议改进而来，面向 **字符**，使用字符填充技术
 - 通常不使用滑动窗口技术
 - 支持差错检测、选项协商、包头压缩、动态分配IP地址和认证等
 - 包括两部分

- 链路控制协议LCP：可使用多种物理层服务：modem，HDLC串线，SDH/SONET等
- 网络控制协议NCP：可支持多种网络层协议

12.30

ch6 Mac Sublayer 局域网与介质访问子层

6.1 局域网概述

- (def) 局域网是一种将小区域内的各种通信设备互连在一起的通信网络。产生于1980年代。
- (prop) 高传输率(10M-100Gbps)，短距离(0.1km-10km)，低出错率(10^{-8} - 10^{-11})。使用广播信道。
- 拓扑：star ring bus tree 介质：双绞线，基带同轴电缆，光纤，无线

6.2 信道分配

- 解决信道争用的协议称为 介质访问控制协议 MAC (Medium Access Control)，是 数据链路层 协议的一部分。分配方法：静态、动态
- 静态分配：FDM (WDM) /TDM，都只适用于用户少且固定，各用户通信量大，无法灵活地适应站点数及其通信量的变化。
- 动态分配：信道分配模型！独立站点假设，单信道假设，冲突假设。连续时间/时间分槽，载波监听/非....

6.3 多路访问协议

竞争协议：轻负载下发送延迟小，重负载下信道效率低

1. ALOHA协议

1. 纯ALOHA：效率 Ge^{-2G} ，G是一个帧时平均产生G帧，最高18.4%信道利用率
 2. 分槽ALOHA：一个槽长度为一个帧时，槽开始时才能发。效率 Ge^{-G} ，最大36.8%
2. 载波监听多路访问协议CSMA (carrier sense multiple access)：发送帧前监听信道有无载波
1. 1-坚持型 CSMA：监听到信道空闲立即发送，忙时监听直至空闲，冲突时等待随机时间。减少信道空闲时间、增加发生冲突概率、广播延迟越大性能越差。
 2. 非坚持型 CSMA：信道空闲立即发送，忙或冲突时等待随机时间直至空闲。减少冲突概率、增加空闲时间。（随着G的增加，非坚持性比1-坚持型效率更高，延迟更大）
 3. p-坚持性 CSMA：分槽信道使用，若空闲则以概率p发送；若忙则等待下一个时槽（即坚持监听！）；冲突则等待随机时间。
3. 带冲突检测的载波监听多路访问协议CSMA/CD：边发送边监听，监听到冲突立刻停发
1. 确定冲突时间：最坏情况下 2倍电缆传输时间
 2. ？ 802.3的CSMA/CD是发完了就不听了

无冲突协议：轻负载下发送延迟大，重负载下信道效率高

- 分为传输周期、竞争周期、空闲周期
- 1. 基本位图协议 (A Bit-Map Protocol)：竞争周期分为N个时槽，如果一个站有帧发送，则在对应的时槽内发送比特1。竞争结束后，按照站序号一依次发送。
 - 预留协议：发送信息前先广播发送请求

- 轻负载下效率为 $d/(N+d)$ （数据帧由 d 个时间单位组成），重负载下效率为 $d/(d+1)$
 - 序号大的站得到的服务好（？？？）
2. 二进制下数法（Binary Countdown）：竞争 $\log_2(N)$ 轮，从高位到低位，每轮所有站若要发帧，则自己序号对应位做或操作，如果遇到更大的序号要发（即自身这一位是0而“或”结果是1），则放弃发送，最终胜利者是序号最大的站。
- 效率 $d/(d+\log_2(N))$ ，序号大的站得到的服务好
3. 令牌环：见后

有限竞争协议：轻负载下用竞争，重负载下用无冲突

1. 适应树搜索协议

- 站点组织成二叉树，叶节点是站点。一次成功传输后，第0槽，所有站可竞争，如果只有一个要发就成功了；如果冲突了，在第1槽，只有左子树（一半站点）参与竞争，若无冲突则此后的槽留给右子树，有冲突继续折半搜索。
- 负载重时，可以从中间结点开始竞争。

无线局域网协议：

- 特点：用无线信号通信，只有一个信道，短距离传输，一个站发送的信号只能被周围一定范围内的站点接收到

• 传统的**CSMA**协议不适合于无线局域网，需要特殊的**MAC子层协议**

■ **CSMA**

- 电缆上的信号传播给所有站点
- CSMA只判断发送站点周围是否有其它活跃发送站点
- 冲突被发送站点发现
- 某一时刻，信道上只能有一个有效数据帧

■ **无线局域网**

- 信号只能被发送站点周围一定范围内的站点接收
- 需要尽量保证接收站点周围一定范围内只有一个发送站点
- 冲突被接收站点发现 可以同时有多个人发，接收者只收一个就行
- 某一时刻，信道上可以有多个有效数据帧

• 问题：

- 隐藏站点：发送者距离接收者附近的竞争者太远，导致发送者不能发现竞争者
- 暴露站点：非竞争者距离发送者太近，导致发送者不能发送。

1. MACA(multiple access with collision avoidance)：发送者发送 **RTS**（Request To Send），发送者周围的站点一定时间内不能发送，保证CTS帧返回给发送者。接受者收到RTS后发送 **CTS**（Clear To Send），接收者周围的站点一定时间内不能发送。之后发送者开始发送。若发生冲突，采用二进制指数后退算法等待随机时间。
2. MACAW：改进。确认帧+发送站点的载波监听+冲突时针对 **数据流** 的后退算法（针对相同源和目的地址，而非每个站点）+拥塞时站点间交互信息

ethernet采用哪一种CSMA协议？ **IEEE 802.3 采用1-坚持CSMA/CD技术的局域网**

6.4 IEEE 802.3协议：无连接无确认

- IEEE 802的协议们（大概知道它们在干啥就行）
 - 802.1 基本介绍和接口原语定义
 - 802.2 LLC子层（逻辑链路控制，针对IP以外的其他协议，经常不需要）
 - 802.3 采用CSMA/CD技术的局域网（MAC子层，重点）
 - ◇ 【快速以太网】802.3u：10Mbps→100Mbps（Fast Ethernet）
 - ◆ 100Base-T4使用4对双绞线，8B6T编码，三进制信号
 - ◆ 共享式hub：一个冲突域
 - ◆ 交换式hub：输入帧缓存，一个端口构成一个冲突域
 - ◇ 【千兆以太网】802.3z：100Mbps→1Gbps
 - ◆ 使用扩展的802.3MAC子层接口，通过GMII（Gigabit Media Independent Interface）与物理层相连
 - ◆ 采用8B/10B、4B/5B等编码
 - ◆ 一个冲突域内只允许一个中继器
 - ◇ 【万兆以太网】802.3ae：1Gbps→10Gbps（10GE）
 - ◆ 帧格式和前面的完全相同
 - ◆ 只使用光纤
 - ◆ 只工作在全双工方式，不适用CSMA/CD，传输距离大大提高
 - 802.4 采用令牌总线技术的局域网（MAC子层）
 - 802.5 采用令牌环技术的局域网（MAC子层）
- 逻辑链路控制子层LLC（Logical Link Control）：
 - 数据链路层=MAC子层+LLC子层（可以没有LLC）。LLC位于MAC和网络层之间。IEEE 802.2。
 - 功能：提供 确认机制和流量控制；隐藏了不同802MAC子层的差异，给网络层提供统一接口；3种服务：不可靠数据报、有确认数据报、可靠的面向连接服务。
 - 帧头基于HDLC
- 介质访问控制子层MAC Medium Access Control
 - 功能：数据帧封装、发送和接收，介质访问管理
- IEEE 802.3和Ethernet
 - 物理层：
 - 10Base5含义
 - 速度10：10Mbps
 - 编码方式Base：基带传输（baseband medium）
 - 最大电缆传输长度5：500米（T100m，F2000m）
 - 曼彻斯特编码
 - 收发器（transceiver）：处理载波监听和冲突检测。
 - 中继器：物理层设备，放大信号。可以拓展网段长度。两个收发器之间最多使用4个中继器，最长2500米。
 - MAC子层：
 - 前导序列，7个字节10101010，帧开始标志，1字节10101011，帧长度域：2字节，取值在0-1500之间，校验和：CRC，四个字节
 - 帧中的地址：IEEE 802.3是2或6个字节，以太网是6个字节。
 - 目的地址第1位（最低位）为0表示单播，为1表示组播。目的地址全为1表示广播。源地址第一位总为0。第二位为0表示全球地址，为1表示本地地址
 - 最短帧长：帧的发送时间 $\geq 2 \times$ 电缆传输时间。如果中继器会把最大长度变长！网络速度提升时需要增大最短帧长或者减小站点间距离。10Mbps LAN -- 51.2us -- 64字节
 - 二进制指数后退的CSMA/CA:发生冲突时采用二进制指数后退算法，将冲突发生后的时间划分为长度为51.2微秒的时槽，第n次冲突后在0到 $2^n - 1$ 间随机选择。10次后固定0-1023，16次冲突后放弃。

- 在给定帧长度的情况下，增加网络带宽或者距离将会降低网络效率！！
- **快速以太网802.3u**：比特时间100ns→10ns，改进10Base-T，使用HUB
 - 100Base-T4：8B6T（8bit map to 6trits），信号频率25MHz，比特率 $25 \times 8 / 6 = 33.3\text{Mbps}$ ；4对双绞线1对to the hub 一对from the hub，两对根据数据传方向变换。正向100M，反向33.3M
- 千兆以太网：在一个冲突域内，只允许一个repeater。
- 万兆以太网：10GE只工作在全双工方式，不使用CSMA/CD协议，传输距离大大提高。使用单模或多模光纤。
- **IEEE 802.5 令牌环**
 - 环不是广播介质，而是不同的点到点链路组成的环。
 - 各个站点是公平的，获得信道的时间有上限，避免冲突发生。
 - 令牌（Token）是一种特殊的比特组合模式。环接口有两种操作模式：监听模式和传输模式。
 - 监听模式下经过1比特延迟后令牌继续传递。
 - 传输模式即站有数据要发送，它将令牌移出环，然后重新生成令牌，并转入监听模式。
 - 确认：帧内有一个比特域，初值为0，目的站收到后会变成1，AC在帧状态字节FS中出现两次
 - 时间延迟：每站的1比特延迟+信号传播延迟
 - 对于短环，必要时需要插入人工延迟。（环本身必须有足够的时延容纳一个完整的令牌）
 - 环接口引入了1比特的传输延迟。1比特物理长度：1比特的传输耗时*信号传播速率
 - 重负载下，效率接近100%。
 - 为解决环断裂导致整个环无法工作的问题，使用线路中心进行布线，线路中心设有旁路中继器。
 - 环上存在一个监控站，负责环的维护，通过站的竞争产生。职责：保证令牌不丢失，处理环断开情况，清除坏帧，检查无主帧
 - 接受站是怎么工作的？？？ TBD
- **FDDI（fiber distributed data interface）光纤分布式数据接口**
 - 多模光纤作为传输介质，MAC协议类似令牌环，4B5B编码，100M速率
 - A类站连接双环，B类站连接单环
 - 为提高信道利用率，站点发完数据后立即产生新令牌，环上可能同时存在多个帧。
- **DPT/RPR dynamic packet transport**
 - 是双环，每个环都同时用于用户数据和控制数据的传输。
 - SRP（Spatial Reuse Protocol）是一个媒介无关的MAC层协议，用来实现DPT在光纤环上的功能。

6.5 网桥技术

- （def）网桥：工作在数据链路层的一种网络互连设备，它在互连的LAN之间实现帧的存储转发
- 集线器中，所有站都位于同一个冲突域，必须使用CSMA/CD；交换机中每个端口都有独立的冲突域，电缆若是全双工则不用CSMA/CD，如果是半双工则要

- 中继器**不能**隔离冲突域，网桥/交换机**可以 隔离冲突域**。网桥有助于安全保密。网桥可互连不同类型的LAN。
- 连接k个不同LAN的网桥具有 **k个MAC子层和k个物理层**。
- 互连时需要解决的问题：
 1. 帧格式的转换
 2. 不同的LAN速率不同，网桥要有缓存能力
 3. 高层协议的计时器设置
 4. 最大帧长度不同。解决办法：丢弃无法转发的帧
- 分类
 - 透明网桥：CSMA/CD和Token Bus选择使用
 - 工作在混杂（promiscuous）方式，接收所有的帧
 - 刚启动时地址/端口对应表为空，洪泛转发帧
 - 采用 **逆向学习** (backward learning)算法收集MAC地址。分析帧的源MAC地址和端口的对应关系。
 - 不断更新；定时检查，删除一段时间没用的
 - 帧的路由过程
 - 目的LAN与源LAN相同：丢弃（同一个局域网不需要网桥转发）
 - 目的LAN与源LAN不同：转发
 - 目的LAN未知：洪泛
 - 生成树网桥：解决多个网桥产生回路的问题
 - 网桥间互相通信，用一棵连接每个LAN的生成树覆盖实际拓扑结构（LAN为点，网桥为边）
 - 构造生成树：
 - 每个桥广播自己的桥编号，号最小的桥称为生成树的根
 - 每个网桥计算自己到根的最短路径，构造出生成树，使得每个LAN和桥到根的路径最短
 - 生成树需要动态变化
 - 源路由网桥：Token Ring选择使用
 - 在发出的帧头内构造一个准确的路由序列，包含 **要经过的网桥、LAN的编号**（不包含主机编号，因为信息传递并不经过主机）。将发出帧的源地址最高位置为1
 - 源路由的产生：每个站点通过广播“发现帧” (discovery frame)来获得各个站点的最佳路由
 - 对带宽进行最优的使用（生成树则是集中在最短路径上）。但网桥的插入对于网络是不透明的，需要 **人工干预**
 - **面向连接** (why?)
- 交换机：让每个计算机位于单独的局域网网段上，并与其他网段通过网桥相连。