

计算机网络

1. 概述

计算机网络的应用

商业应用：资源共享（共享打印机），VPN虚拟专用网等，典型服务模式为**Client-Server模式**。商业应用构建计算机网络的三个主要目标：数据共享，个人信息共享，电子商务。

家庭应用：购买家用计算机的重要原因是Internet，典型服务模式为**Client-Server**和**Peer-to-Peer(P2P)**

对等应用（P2P应用）：没有固定的客户端和服务端，任何计算机系统都既是客户端又是服务器。典型应用包括BitTorrent等。

电子商务相关的专有名词：B (Business)，C (Consumer)，G (Government)，P (Peer)，X2Y (X对Y)。eg. B2C企业对消费者，B2B企业对企业。

移动应用：智能手机，可穿戴设备等。与之相关的是无线网络和蜂窝网络。

BLABLABLA

通信系统到通信网络

通信系统：源端→发射机→传输系统→接收机→目的端。其中源端和发射机合称为信源系统，接收机和目的端合称为目的端系统。

点到点通信：各个终端间直接电路相连进行通信，提供两个终端之间的通信需要1对电路，N个终端两两相连需要 $\frac{N(N-1)}{2}$ 对电路。

由于电路或链路为稀缺资源，因此终端数线性增长时，电路数平方增长，极不实用！同时由于通信设备相距很远，点到点通信的浪费愈发显著。

使用交换机：终端数增多时，使用交换机实现交换。**交换**，将一条电路转接到另外一条电路，使之连通。

计算机网络的构成

计算机网络包括计算机系统，通信线路，传输设备和通信协议。

基本问题：数据如何在网络上传输。

电路交换：每次呼叫都建立一条专用电路，呼叫结束后释放。eg. 电话网。

需要**预约**端到端的资源。专用链路带宽即为交换容量，链路专用非共享，必须有呼叫建立的过程，类似保证性能的电路。

报文交换：发送的消息整段整段地通过链路进行转发，由一个节点发送到下一个节点，每个节点都需要存储转发整个消息，不需要建立专用电路。

分组交换：数据流划分为分组，以离散数据块的形式在网络上发送，每个分组占用全部链路带宽，资源按需按序使用。eg. 计算机网络。

统计复用：多个信源的分组序列没有固定模式，分组汇集到缓冲中，按到来的先后顺序进行发送。

资源竞争：需要的资源有可能超过可用的资源，发生拥堵时进行排队，等待使用链路。每个节点都必须具有缓存，接收整个分组之后再进行转发。

报文：或消息，需要发送的整段数据流。

分组：网络上交换数据的基本单位，结构为分组头+数据，分组头内包含源地址和目的地址等。

帧：链路上传输数据的基本单位，结构为帧头+帧尾+分组，帧头帧尾包含地址，帧号，校验位等。

分组交换的过程：1) 发送端，将长报文划分为较短的、固定长度的数据段；2) 每个数据段前面加上分组头的首部，构成分组，分组交换网以分组作为数据传输单元，依次发送各个分组；3) 接收端收到分组，剥离首部得到各个数据段，按顺序拼接数据段还原报文。

优点：**高效**，动态分配传输带宽，逐段占用通信链路；**灵活**，以分组为单位进行存储转发，各段链路速率允许不同；**迅速**，不需要预约建立连接即可发送分组，充分使用链路带宽；**可靠**，通过网络协议保证可靠性。

缺点：**时延大**，分组必须在节点存储转发时排队；**开销较大**，首部增大了开销；**分组丢失**，必须通过协议避免分组丢失等情况。

分组交换的时延：处理时延（检错，选择输出链路等），排队时延（在输出链路上等待发送，与路由器拥塞程度相关），发送时延（链路带宽/分组长度），传播时延（物理链路长度/信号在介质中的传播速度）

$$\begin{aligned} \text{节点延迟, } d_{\text{nodal}} &= d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}} \\ &= d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + \frac{L}{R} + \frac{d}{s} \\ &= \text{处理时延} + \text{排队时延} + \text{发送时延} + \text{传播时延} \\ &= \text{处理时延} + \text{排队时延} + \frac{\text{分组长度}}{\text{链路带宽}} + \frac{\text{物理链路长度}}{\text{信号传播速度}} \end{aligned}$$

网络硬件

两类传输技术：Broadcast广播，P2P点对点。

Broadcast：信道所有设备共享；分组可被所有设备接收，分组中地址字段给出接收者的地址，若设备地址是接收地址则进行处理，否则丢弃；允许一发多收。eg. WLAN，以太网都是典型广播链路。

Point-to-point：将一对设备连接起来；短消息需要访问一个或多个中间设备；网络中存在多个路由器；需要找到一条好的路由路径。

网络规模分类：Personal area network（~1m），Local area network（10m~1km），Metropolitan area network（~10km），Wide area network（100~1000km），The Internet（~10000km，全球）

PAN：个人网络，eg. 蓝牙连接。

LAN：无线IEEE 802.11 / WiFi，有线以太网。

MAN：光纤传输和混合光纤同轴电缆（HFC）。

HFC：非对称，上行最高2Mbps，下行最高30Mbps。

WAN：有线电话网，卫星网，蜂窝无线网。

网络软件

Entity实体：发送或接收信息的硬件或软件。

Protocol协议：通信实体之间的规则和约定。

Peers对等体：不同机器上，构成相同层的实体，对等体之间使用协议通信。

数据并非直接在两台机器上同层（最低层之上）的实体上进行直接传输，而是每一层将数据和控制信息向下传递给下面一层，直至到最低层，最低层通过物理介质进行直接传输。

Interface接口：定义下层向上层提供了哪些原语操作和服务。

网络体系结构：层和协议的集合。

协议栈：某个网络体系结构所使用的一系列协议，每层都有一个对应的协议。

设计问题：**可靠性**，网络部件不可靠，但网络必须正确可靠地工作；**检错纠错**；**路由**，找到设备到设备的路径；**协议分层**，网络规模扩大，需要解决网络如何连接入已存在的网络的问题；**寻址**，表示发送和接收方；**互联**，将具有不同约束和参数的网络连接；**可扩展**，网络变大后，性能还能保持良好；**资源分配**，避免一台主机占用过多的资源而影响其他主机的工作；**流量控制**，协调发送方和接收方的速度，使得发送方以适当速率发送数据且接收方能够及时进行处理；**拥塞控制**，检测拥塞，降低发送速率以进行缓解，避免网络过载传输效率急剧降低；**网络安全**，保密认证等。

服务类型：每层都向上层提供两种不同的服务——面向连接和无连接。

面向连接的服务：电话系统是典型的面向连接服务。需要首先建立连接，在这一过程中发端，收端，通信子网进行参数协商；建立连接后，发端和收端可以使用该连接；使用完毕后释放连接。

eg. 移动下载（可靠的字节流），IP电话（不可靠的连接），顺序页面（可靠的报文流）

无连接的服务：因特网是典型的无连接网络。没有呼叫建立的过程，不维护端到端的连接状态，基于分组中的目的地址进行路由选择。

eg. 垃圾邮件（不可靠的数据报），文本消息（有确认的数据报），数据库查询（请求-应答）

服务原语：一组原语说明一个服务，上层通过原语访问该服务，高层服务进行某一个动作。

服务与协议的关系：服务是一层向上层提供的一组原语操作，只提供操作接口，不展示如何实现，属于垂直结构；协议规定对等实体之间交换的报文格式和含义，协议可以自由改变，但只要服务不变即可，属于水平结构。服务和协议完全独立。

参考模型

ISO-OSI国际标准化组织的开放系统互连模型：物理层，数据链路层，网络层，传输层，会话层，表示层，应用层。

TCP/IP参考模型：数据链路层，网络层，传输层，应用层。

五层模型：物理层，链路层，网络层，传输层，应用层。

物理层：线路上的比特传输。eg. 信号，介质，调制，复用等。

链路层：相邻网络部件间的数据传送。eg. PPP，以太网等。

网络层：源端到目的端之间的数据报路由。eg. IP，ICMP，路由协议等。

传输层：进程间的数据传输。eg. TCP，UDP等。

应用层：提供网络应用。eg. FTP，HTTP等。

网络标准化组织：**国际电信联盟ITU**（电信领域），**国际标准化组织ISO**，**电器和电子工程师协会IEEE**。

2. 物理层

数据传输理论

通信系统模型：信源→发射机→信道（引入噪声源）→接收机→信宿

数据：携带信息（比特）的实体。

信号：表示消息的物理量，随时间变化。

通信系统主要参数：

信号功率S：单位瓦特，焦耳/秒，或毫瓦。

信号带宽B：与收发设备及传输介质的特性相关，单位Hz。

噪声功率N：信道线路上的平均噪声功率。

信噪比SNR：单位分贝dB。

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) = 10 \log_{10} SNR$$

数据率：数据传输速率，单位bps或Bps。

误码率：数据传输错误的概率，用来衡量数据传输质量，单位为 1×10^{-n} 。

傅里叶分析：信号被分解为频率为 $\omega = 2\pi n f$ 的纯周期信号之和，信道对于每一种频率的信号的影响不同。

传输带宽影响数据率，而传输带宽与通信设备和传输介质有关。

传输过程中信号将损失能量，若所有成分的衰减相同，则信号只减弱不失真。但因为不同频率信号衰减不同，就一定会导致失真。为了尽量避免失真，需要将传输频率限制在一定范围内。

带宽：传输中幅度衰减不明显的频率范围，接收功率降至 $\frac{1}{2}$ （3dB）的频率范围。

奈奎斯特定理：理想**无噪声**的信道条件下，最大数据率 = $2B \log_2 V$ ，其中B为信道带宽，V为信号中的状态数。

香农容量公式：信道极限信息传输速率或无误码容量C。S信号功率，N噪声功率

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (b/s)$$

传输介质

有线传输：双绞线，同轴电缆，光纤。

Twisted Pair (TP)双绞线：两条相互绝缘的铜线（直径1mm）绞绕在一起。传输距离较短一般为100m，既可以传输模拟信号，也可以传输数字信号。带宽约在kHz。

Coax同轴电缆：传输数字信号，1km电缆速率可达 $1 \sim 2Gbps$ 。粗缆最长可达2.5km，细缆最长可达925m。带宽较大（但小于光缆），约在MHz

Optical Fiber光纤：光源+光纤线缆+检测器。传输数字信号，用光信号有无表示0和1。带宽约在GHz。**机械连接**，快速但会带来损耗，适合小数量和应急应用；**熔结**，损耗极低但设备昂贵，**是长距离链路的唯一方法。**

无线传输：微波（2GHz-40GHz，方向性强，P2P），无线电广播（30MHz-1GHz，全向性），红外（ 10^{11} - 10^{14} ，本地）

微波：100MHz以上，能量通过抛物面天线汇聚于窄束中，信噪比高，直线视距传输，受天气和频率影响大。

地波传播：2MHz以下，信号可以绕地表进行传播。

天波传播：2-30MHz，信号经过大气层和地表多次反射进行传播。

视距传播（LOS）：30MHz以上，信号基本严格直线传播，必须通过中继站才能绕地表进行传播。

卫星微波通信：卫星作为空间微波中继站，端到端传输实验约300ms，广播信道，容易受到雨衰（将使得信号严重衰减）影响。

红外线和毫米波：有方向性，偏移，穿透能力差，传输距离短。

eg. 遥控器，防盗报警。

数字调制技术

基带传输：将数字数据转换为数字信号，需要进行编码。不归零码NRZ，不归零反转码NRZI，曼彻斯特编码，差分曼彻斯特编码，4B5B编码。

符号率：信号改变的速率，单位为波特率。

NRZ：0表示信号高电平，1表示信号低电平。

时钟恢复问题：需要根据跳变周期来恢复时钟，但连0或连1会导致时钟无法被恢复。

基线漂移问题：需要用接收信号的均值来判断电平高低，但连0或连1会改变信号均值。

数据率为 $C = 2B \log_2 V = 2B \log_2 2 = 2B$ ，B为信道带宽。

NRZI：差分编码，信号跳变表示1，不跳变表示0。

连1引起的问题被解决，但连0的问题依然存在。

数据率为 $C = 2B \log_2 V = 2B \log_2 2 = 2B$ ，B为信道带宽。

曼彻斯特编码：发送0时，电平由高到低跳变；发送1时，电平由低到高跳变。

每个比特都必然会有一次跳变，检测跳变周期即可恢复时钟。

数据率为B，B为信道带宽。

差分曼彻斯特编码：每个bit时间内都有一个跳变，用于同步；在每位信号的起始出若有跳变则表示0，没有跳变则表示1。

抗干扰性更好，需要的设备更复杂。

4B5B编码：用5bit码组来编码4bit数据，编码保证码组前部最多一个0，尾部最多2个0。对码组再使用NRZI编码，每5bit至少2个1，对应两次跳变。

编码效率80%，用于以太网和光纤分布式数据接口。

基带传输在长距离的传输信道上受到衰减、畸变和噪音等影响，并且低频信号不适合远距离传输。

通带传输：各传输介质有其适用的信号频率范围。

调制：将数字信号转换成适于在信道上传输的信号的过程。

解调：从信号中提取数字信号的相反的过程。

调制方法：**调幅AM**，载波振幅随基带数字信号而变化；**调频FM**，载波频率随基带数字信号而变化；**调相PM**，载波初始相位随基带数字信号而变化。

调幅：使用两个不同的幅度表示0和1，一般使用恒定幅度载波的有无表示0和1。

$$\begin{aligned}s(t) &= A \sin(2\pi ft), & if\ 1 \\ s(t) &= 0, & else\ 0\end{aligned}$$

调频：使用两个不同频率的载波表示0和1。

$$\begin{aligned}s(t) &= A \sin(2\pi f_1 t), & if\ 1 \\ s(t) &= A \sin(2\pi f_2 t), & else\ 0\end{aligned}$$

调频抗干扰能力优于调幅，但频带利用率低，常用于传输低速数字信号。

调相：使用相位不同的载波表示0和1，一般使用相位为0和 π 的载波表示0和1。

$$\begin{aligned}s(t) &= A \sin(2\pi ft + \pi), & if\ 1 \\ s(t) &= A \sin(2\pi ft), & else\ 0\end{aligned}$$

BPSK：使用0和 π 相位表示1bit。

QPSK：使用 45° , 135° , 225° , 315° 四个相位表示2bit。

QAM：振幅和相位进行组合，表示更多的bit。QAM-16，振幅相位16种组合，表示4bit。

信道复用技术

Multiplexing复用技术：在一条传输线路上传输多路信号的技术。

Frequency Division Multiplexing (FDM)频分复用：信号在同样时间占用不同频段。

信道带宽为每路基带信号带宽的N倍，则可将信道分割为N个子信道，每个子信道上传输一路信号。稳妥做法是子信道间留有空白，留有保护间隔。

Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM)：子载波间没有保护间隔，带宽利用率更高，尽管子载波间频段出现重叠，但仍保持正交。OFDM要求子载波严格正交，接收频率也严格对准。

Time Division Multiplexing (TDM)时分复用：信号在不同时间占用同样频段。

所有用户占用同样的频带的不同时间，按轮访问信道，每次得到固定长度的时隙。用户之间需要同步，需要在时隙间设置保护间隔，应对用户同步的偏差和远近效应。

Code Division Multiplexing (CDM)码分复用：信号使用不同的正交编码，所有用户共享相同的频率，但每个用户使用自己的码序列对数据进行编码和调制。

正交码序列：对于任意的码 C_k 和 C_j ， $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{ki} C_{ji} = C$ ，当 $k = j$ 时， $C = 1$ ；否则 $C = 0$ 。此时码序列正交。

$$\text{编码信号} = \text{原始数据} \times \text{码序列}$$

$$\text{解码数据} = \text{编码信号} \times \text{码序列}$$

码速率：码片速率为信息速率的m倍，编码后信号频谱被展宽，称为扩频。

单工：只能在信道的一个方向上传输数据。

双工Duplex：可以在两个方向上同时传输数据。TDD时分双工，FDD频分双工。

电话系统

简化的电话电路路由模型：本地回路+中继线+交换局

电话 ··· 本地 环路 ··· 端局 — 中继线 — 长途局 = 超高带宽局间中继线 = 中心交换局

本地回路：端局到用户的模拟双绞线。

中继线：连接交换局的数字光纤。

交换局：将电话呼叫从一条中继线转接入另一条中继线。

电话调制解调器：使用本地回路接入网络，需要将计算机的数字信号转为本地环路支持的模拟信号，转换由Modem完成。

DSL数字用户线：使用高传输频率和高级的调制解调技术，在老式线路上提供高带宽。**ASDL**将带宽扩展至1MHz，并使用高级调制技术，本地环路线路上可以通过高频频带进行高带宽的网络接入，同时不影响正常的电话通信等服务。

Pulse Code Modulation (PCM)脉冲编码：将模拟信号变换为数字信号的方法，包括采样，量化，编码三个步骤。**Codec**编解码器。

采样：按照固定时间间隔对模拟信号幅值进行采样测量。根据**奈奎斯特定理**，若模拟信号带宽为WHz，当采样频率为2WHz时，数字信号便捕获原模拟信号的信息。

量化：对采样点的信号幅值分级取整。

编码：量化后的整数数值使用二进制表示。

T1标准：使用T1载波进行时分复用，每125微秒传输1bit帧码，24通道的数字化数据，每个通道中包含8bit数据（7bit语音数据+1bit信令）。T1标准总速率为1.544Mbps。

T2-T4：多个T1载波复用到一个更高阶的载波中，得到T2的群路信号；之后一直到T4群路信号。

由于群路信号要求低阶各信号同步，因此需要由同步措施：**PDH**各支路信号时钟频率具有一定偏差，复接时插入一定数量的脉冲进行同步；**SDH**系统由该京都主时钟控制，精确同步。

STS-1：每秒传输8000帧，数据速率为51.84Mbps。该基本信道为STS-1。n条STS-1复用，得到STS-n，对应STS-n的光纤线路为OC-n。

SONET基本帧：90列 × 9行 = 810Byte。每帧前3列传输管理信息，其中前3行为**段开销**，后6行为**线路开销**；剩余部分中真正有效的数据部分为**SPE**，SPE可以在任意位置开始，也可以跨越多个SONET基本帧，线路开销中的指针支出SPE的开始位置SPE的第一列为**路径开销**。

移动通信系统

1G：模拟语音

2G：数字语音

3G：数字语音+数据

4G：数字语音+更高速的数据

1G蜂窝网络：将一个地理区域划分为若干个**蜂窝**，相邻蜂窝使用不同频带，相近但不相邻的蜂窝（隔离带大小为两个蜂窝）可以使用相同的频带，以此扩大容量。当某个蜂窝压力超出系统负载，则可以将其划分为更小的**微蜂窝**，来增加用户数。

AMPS高级移动电话系统：FDM划分信道，832全双工信道，每个信道FDD频分为一对单工信道。824-849MHz，基站→用户的832信道；869-894，用户→基站的832信道。

控制信道：基站到用户，用于管理系统。

寻呼信道：基站到用户，用于通知被叫用户。

接入信道：双向，信道建立和分配。

数据新到：双向，传输语音和数据等。

2G网络：使用数字信号，方便语音数字化处理和压缩，提高安全性，催生手机短信。

GSM全球移动通信系统：FDM，200kHz划分124个信道；TDM，每个信道8个时隙组成TDM帧。

3. 数据链路层

链路层

node节点：主机及路由器。

link链路：连接相邻节点之间的通信信道，根据传输介质分为有线链路和无线链路。

frame帧：数据链路层上传输数据的基本单位，用于承载数据。

数据链路层：负责在一个节点与相邻节点之间经过一条链路传递数据。

NIC网卡：每个主机中，对链路层和物理层的实现。包括以太网卡，PCMCIA网卡，802.11网卡。NIC与主机系统总线连接，进行串并转换（与CPU通过总线并行通信，与网络串行通信），缓存数据，实现链路层协议等。

发端：将网络层的IP数据报封装成帧，增加校验位和接受地址等，发送bit流，进行流量控制。

收端：接收bit流，检查错误，检查接受地址，进行流量控制，提取IP数据报交给网络层。

硬件MAC地址：存放于NIC之中。

IP地址：存放于CPU和存储体系之中。

链路层成帧

同步：计算机通信双方需要协调发送和接收的动作，即进行同步。可以通过同步传输和异步传输进行同步。

异步传输：以字符为传输单位，字符之间的时间间隔可变，字符中的位之间按照固定速率传送。简单廉价，允许发送和接收时钟存在偏差，但速度慢。

异步传输帧：每帧一个字符，一帧包括起停位，数据位，校验位；字符间没有固定的时间间隔。

同步传输：发送和接收之间的每一位都同步，接收端从接收的信号中提取时钟，保持和发送信号的时钟同步。效率高，适合长距离数据传输。

以太帧：物理层帧的头部有8字节的同步码，前7字节为 $(10101010)_2$ ，称作前同步码，最后一字节为 $(10101011)_2$ ，称作帧开始定界符；之后为MAC帧。MAC层帧包括6字节目的地址和6字节源地址的地址字段，2字节的标记上一层所用协议的类型字段，数据字段（IP数据报）和FCS字段。数据字段为IP层的数据报。

封装成帧：在数据前后分别添加首部和尾部，进行帧定界，构成一个帧。

成帧方法：字节计数法，字符填充

字节计数法：利用头部的一个字段标识帧的字节数。但若计数字段出错则会失去同步（因为没有帧定界）。

简单帧定界：在帧头部添加SOH(0x01)字节，尾部添加EOT(0x04)字节，标定帧的首尾。但无法透明传输，因为数据部分不能再出现SOH和EOT，否则会使得定界出错。

透明传输：不论传输的数据按照怎样的bit顺序组合，都可以在链路上进行传输。

字符填充：若数据中出现SOH或EOT或ESC(0x1B)，发端则在其之前插入转义字符ESC；收端收到单独的SOH和EOT则意味着帧定界，若其之前有ESC则为数据中的字符，删去ESC即可，若收到两个连续的ESC则删去一个。

比特填充：HDLC中规定帧标志F为 $(01111110)_2$ ，采用零比特填充。当数据中出现与F相同的bit组合时，则在五个连1之后插入一个0再发送；接收端在收到5个连1之后，若又收到1则意味着收到F，否则收到0，将其删除回复原bit组合。

差错控制技术

差错：数字通信系统中，接收位与发送位不一致。

信道误码率： $P_b = \frac{\text{误码位数}}{\text{发送的总位数}}$

长度为L的无差错帧出现的概率为 $P_1 = (1 - P_b)^L$

差错检测：在信息位中加入冗余位形成编码，接收端检查接收到码字的信息位和冗余位关系，判断传输过程中是否出错。

信息位：要发送的数据。

冗余位：按某种关系对信息位运算得到的数据。

编码：在信息位中加入冗余位的过程。**码字**：信息位和冗余位构成的bit组合。

差错纠正：在检测出错误的同时，也给出错误的bit是哪些，从而从原码恢复出原始的正确码字。

奇偶校验：增加冗余位，使得码字中的1的个数为奇数（偶数）个，称为奇校验（偶校验）。

一维奇偶校验：给bit串添加一个冗余位，检测单bit错误。

二维奇偶校验：给 $n \times m$ 大小的bit矩阵添加 $m+n+1$ 个冗余位，可以检测和纠正1bit错，检测但不保证纠正2bit错，不保证检测4bit错。

码距：两个可以出现的正确的码字中不相同位的个数，Hamming距离。编码的过程对应着增大码距，解码的过程对应着找出唯一的距离该码字距离最小的正确码字。

检测d-bit错，需要码距为 $d+1$ 。纠正d-bit错，需要码距为 $2d+1$ 。

码率：衡量编码效率，若码长n-bit的码字中含有信息位m-bit，则码率 $= \frac{m}{n}$ 。一般的，纠错码码率低，检错码码率高。

汉明码：校验位 r 位 $(p_i), i = 1, 2, 4, \dots, 2^{r-1}$ ；信息位 m 位 (m_3, m_5, m_6, \dots) 。校验位 p_{2^i} 对码字所有下标第 i 位为1的bit进行奇偶校验，所有出错的校验位的下标之和对应1bit错的bit下标。

突发长度：码字中第1位错与最后一位错之间的位数。

突发错：数据传输过程中，成串出现的特殊差错。一般由于信道的连续干扰，接触不良等原因出现。

随机错：错误的码位彼此无关的错误。

交织：将突发错转换为随机错的方法，将信息位组织成 n 行 k 列，按列计算校验位，按行发送，只要突发长度 $\leq n$ （保证码字最多只有1位错），就可以进行检错。

校验和：对发送信息的数据位计算校验和，接收端实施同样的计算进行检错。

CRC循环冗余校验：d位数据位的二进制数D，选择r+1位生成式G，计算r位CRC校验位R。发端使得<D,R>被G模2整除，接收端已知G，使用<D,R>除G进行检错。**CRC可以检测所有突发长度小于r位的错误。**

编码：D后添加r位0，得到D'，计算D'/G的异或除法的余数R。将<D,R>作为码字发送。

解码：使用接收到的码字，除以双方约定的G，若余0则没有差错，可以提取数据，否则有错，丢弃数据。

特点：检出所有1bit错，2bit错，奇数位错，长度小于等于CRC长度的突发错；便于硬件实现，只用移位和异或即可。

差错控制方法：前向纠错，自动请求重传，混合纠错。

FEC前向纠错：采用纠错码，接收端发现差错并纠正；不需要发送端参与，发端不需要缓存发送过的数据；不需要反向信道，单工通信可行；由于需要纠错，冗余位多，设备复杂。

ARQ自动请求重传：采用检错码，接收端检测到差错，通知发送端重传，直到收到正确数据；发端有可能需要进行重传，必须缓存发送数据；必须工作在双工信道上。

HARQ混合纠错：检错码+纠错码，发现纠错范围内的差错，直接纠错；超出纠错能力时要求发端重传。

ARQ

流量控制：如果发送太快，会使得接收端来不及处理，导致数据丢失。

收端确认：由于帧会出错，收端需要发送确认，使得发端明确是否需要重传。

信道利用率U：发端发送时间所占的比率。

$$U = \frac{t_f}{t_f + t_{out}} = \frac{t_f}{t_f + (t_p + t_{pr} + t_a + t_p + t_{pr})} \approx \frac{t_f}{t_f + 2t_p},$$

t_f 数据帧发送时间， t_{out} 重传超时时间， t_p 传播时延， t_{pr} 处理时间， t_a 确认帧发送时间
假设 $t_{pr} \ll t_p$, $t_a \ll t_p$

ARQ停等协议：发端每发送一帧（带有帧号），就等待收端的确认（确认带有和帧号——对应的编号），如果超时没有收到则重发直至收到；收到无效的确认（比如迟到的确认）则无视之。

要点：发送端发送数据时缓存，收到确认帧后清除；数据帧和确认编号，且——对应；之后收到确认帧之后，才发送新的数据帧；接收端收到数据帧时发送确认，若是新数据帧则保存，否则是重复帧，丢弃。

$$U_{ARQ} = \frac{t_f}{t_f + 2t_p} = \frac{1}{1 + 2\alpha},$$
$$\alpha = \frac{t_p}{t_f}, \text{传播延迟与发送延迟之比}$$

优点：简单。缺点：信道利用率很低，尤其不适合长时延信道。

连续ARQ协议（Go-back-N ARQ）：发送方发送窗口W，每发送一帧则启动一个定时器，等待ACK；接收到ACK i则取消i-1前的定时器，调整发送窗口至[i, i+W-1]；若第j个定时器到时未收到ACK j+1，则调整发送窗口至[j, j+W-1]。接收方没有窗口，接收序号连续的帧；接收i号帧响应ACK i+1，期望收到i+1号帧。

$$U_{Go-back-NARQ} \leq \frac{w}{1 + 2\alpha},$$

w位可以连续发送的帧数

滑动窗口协议：发送端和接收端分别设置发送窗口和接收窗口，发送窗口 W_T 对发送端进行流量控制，接收端 W_R 表明接收端接收的数据帧范围。

若 $W_R = 1, W_T > 1$ ，则为连续ARQ协议。**当帧序号为n-bit时， $W_T \leq 2^n - 1$ 才能保证连续ARQ正确运行。**

若 $W_R = 1, W_T = 1$ ，则为ARQ停等协议。

选择重传ARQ协议：扩大 W_R ，接收并缓存序号不连续但仍然在接受窗口内的数据帧，等收齐所需序号的数据帧后再交送主机。

当帧序号为n-bit时， $W_R \leq \frac{2^n}{2}$ 才能保证选择重传ARQ正确运行。

协议开销：发送数据帧是有效的数据传输，而确认帧则是协议开销。

累计确认：接收端不在每收到一个数据帧就发送一个确认帧，而是累计多个一起发送，若发送ACK i，则表示i-1及之前所有数据帧都被确认，期望收到下一个帧序号为i。

捎带确认：接收端在向发送端发送ACK时，如果同时存在需要发送的数据，则合并ACK信息和数据，用一个帧发送回去。

链路控制规程HDLC

帧结构：标志字段F（01111110, 8bit），地址字段A（8bit），控制字段C（判断帧类型，8bit），信息字段Info（长度可变），帧检验序列FCS（16bit），标志字段F（8bit）。

FCS检验区间：A + C + Info

透明传输区间：A + C + Info + FCS

I帧：信息帧携带用户数据，捎带确认，帧序号在C字段N(S)子段，累计确认序号在N(R)子段。

S帧：监控帧提供单独确认机制，累计确认序号在N(R)子字段。

RR，准备接受I帧；RNR，未准备好接收；REJ，回退N；SACK，选择重传。

U帧：无编号帧提供其他链路控制功能，M子字段为U帧功能编码。

点对点协议PPP

PPP协议的组成部分：将IP数据报封装至串行链路的方法 + 链路控制协议LCP + 网络控制协议NCP。

PPP不采用链路层可靠传输协议（序号和确认）；传输的帧为字节整数倍，采用字节填充。

PPP协议帧格式：协议字段说明信息字段类型。

首部：F(0x7E) + A(0xFF) + C(0x03) + 协议字段(2 byte)。

信息字段：IP数据报，或PPP链路控制数据等。

尾部：FCS(2 byte) + F(0x7E)。

4. MAC层

MAC介质访问控制

两类链路：点到点，共享传输介质

点到点链路：拨号接入的PPP，以太网交换机到主机间的P2P链路

共享传输介质：传统以太网，HFC上行链路，蜂窝网上行控制信道，802.11 WLAN。

干扰：单个共享信道，多个节点同时发送。

碰撞：同时接收到两个或两个以上节点的发射信号。

Medium Access Control (MAC)：决定节点如何共享信道，确定下一个使用信道的节点。由于没有额外的用于控制的信道，对信道共享的控制也必须使用自身的信道。

理想的MAC：广播信道，R bps；当一个节点进行发送时，发送速率为R；当M个节点进行发送时，则各个节点平均发送速率为 $\frac{R}{M}$ 。**全分布式，简单**，没有特殊的用于协同传输的节点，没有同步时钟和时隙。

MAC协议分类：划分信道，随机接入。

划分信道：将总的信道资源分割成更小的信道（TDM，FDM，CDM），为需要使用信道的节点分配信道资源。

随机接入：不分割信道，允许碰撞出现，由接收端避免碰撞。

静态信道分配

传统复用技术，信道数和用户数相等（均为N）。

TDMA时分多址：按轮访问信道，每一轮每个接入站点得到固定长度的时隙，未使用的时隙则空闲。需要时隙同步，需要设置保护间隔。

FDMA频分多址：信道划分为频段，为每个接入站点分配固定频段，未使用的频段空闲。需要带通滤波器，需要设置频率保护带。

将信道划分为N个独立信道，降低了信道效率。

$$\begin{array}{ccccc} \xrightarrow{\text{arrival}=\lambda} & \text{FrameQueue} & \xrightarrow{\text{frameLen}=\frac{1}{\mu}} & \text{Link(Server)} & \xrightarrow{\text{capacity}=C} \text{Departures} \end{array}$$

排队论结论：平均延迟时间 $T = \frac{1}{\lambda - \mu C}$

划分为N个子信道，平均延迟增大N倍：

$$T_N = \frac{1}{(\frac{\lambda}{N}) - \mu(\frac{C}{N})} = \frac{N}{\lambda - \mu C} = NT$$

动态信道分配

用户数量很多且动态变化，每个用户数据突发时，静态信道分配性能很差。对于数据突发业务，N的数量会动态变化，就需要一种动态地信道分配技术。

随机访问控制：当节点有分组要发送时，则以全信道速率R发送分组，节点之间没有优先级协同；存在多个发送节点时会出现碰撞，需要考虑如何检测碰撞，以及如何在碰撞后恢复。

ALOHA协议：帧长度相同，假设发送时间为1单位时间；各个站点不进行同步，一个帧到达时，立即进行发送。

t_0 时刻发送的帧会与 $(t_0 - 1, t_0 + 1)$ 时刻发送的帧碰撞

N 个节点，任意节点在任意时隙发送的概率为 p ，节点发送成功的概率：

$$\begin{aligned}P(\text{某节点发送成功}) &= P(\text{该节点发送}) \cdot P(\text{没有节点在 } (t_0 - 1, t_0] \text{ 发送}) \cdot P(\text{没有节点在 } [t_0, t_0 + 1) \text{ 发送}) \\&= p \cdot (1 - p)^{N-1} \cdot (1 - p)^{N-1} \\&= p \cdot (1 - p)^{2(N-1)}\end{aligned}$$

$$P(\text{任意节点发送成功}) = NP \cdot (1 - p)^{2(N-1)}$$

$$\text{最大利用率} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2N}\right)^{2(N-1)}, \text{ 此时 } p = \frac{1}{2N}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{最大利用率} = \frac{1}{2e} = 0.18, \text{ 即当用户数无穷多时, 信道利用率不会超过 } 18\%.$$

时隙ALOHA协议：帧长度相同，信道时间划分为相同的时隙，每个时隙发送一帧；节点间同步，只在时隙开始时发送帧，降低碰撞概率；若一个时隙中两个以上的节点同时发送，则所有节点都可以检测碰撞。

节点得到新的帧，则在下一个时隙发送。若没有碰撞，节点可以在后续时隙发送新的帧；若碰撞，则节点在后续时隙中以概率 p 重传，直到成功发送。

优点：任何一个活动节点都可以以全信道速率连续发送数据；简单。缺点：碰撞引起时隙浪费，空闲时隙多；节点在发送数据之前无法检测碰撞；节点时钟必须同步。

$$\begin{aligned}P(\text{某节点发送成功}) &= p(1 - p)^{N-1} \\P(\text{任意节点发送成功}) &= Np(1 - p)^{N-1} \\ \text{最大效率} &= \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}, \text{ 此时 } p = \frac{1}{N} \\ \lim_{N \rightarrow \infty} &= \frac{1}{e} = 0.37, \text{ 即用户数无穷多时, 时隙 } ALOHA \text{ 信道利用率最大为 } 37\%\end{aligned}$$

Carrier Sense Multiple Access (CSMA)载波侦听多路访问：节点在发射信号前测试信道状态，如果空闲（没有检测到载波），则按特定算法发送。

1-坚持CSMA：信道空闲时，则以概率1发送；信道忙则持续监听直至空闲；若发生冲突，则随机等待一段时间。

容易引起“必然的”冲突（两个站点都在等待信道，之后一旦信道空闲就必然同时发送引起冲突）； $a = \frac{\tau}{T_p}$ 越大，性能越差（由于信号传播时间长，远处的站点监听不到“实时的”载波，会引起冲突）。

非坚持CSMA：若监听发现信道空闲，则发送；若信道忙，则随机等一段时间，之后再行监听；若冲突，则随机等待一段时间。

高负载下信道利用率提高，但延迟高于1-坚持CSMA。非坚持CSMA峰值吞吐率约比1-坚持CSMA高2倍。

p坚持CSMA：适用于时隙信道。若信道空闲，则以概率 p 在当前时隙发送，以概率 $1-p$ 推迟至下一个时隙再次监听；若冲突，则随机等待一段时间后再监听。

CSMA仍然会发生碰撞，尤其在 $a = \frac{\tau}{T_p}$ 很大的时候——传播延迟会使得两个节点无法听到对方发送的信号而引起冲突，使得整个分组的传输时间被浪费。

CSMA/CD带碰撞检测的CSMA：在短时间内进行碰撞检测，若发现碰撞，则终止冲突的发送，避免浪费信道。

CSMA/CD中一个站点在经过 $2\tau_{max}$ 后（ τ_{max} 为该站点到最远站点的传播时间）才能确认不会发生冲突。这段时间之后，便可以保证其余所有站点都监听到了载波。

CD碰撞检测：发送的同时接受信号，比对两信号是否一致。LAN中容易实现，WLAN中很难（因为接受信号强度远远小于发送信号强度）。

无冲突协议：通过竞争的方式预约信道，在已经预约的信道上面使用无冲突的方式传输数据。碰撞会降低带宽，增加发送时延，不利于实时业务传输，而无冲突协议才是有效的。

位图协议：N个站，每个站都有唯一的编号 $i, i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ ，传播延迟忽略不计；在竞争周期有N个时隙，j号站期望发送时，就在j时隙发送bit 1进行预约，其余各站不允许在该时隙发送；经过预约时隙之后，各个站都知道有哪些站要进行发送，之后按照各需要发送站的编号的顺序发送帧即可。

要求各站在预约时隙时严格同步。

低负载时信道利用率

对于低编号站，平均需要 $1.5N$ 的预约时隙才能完成预约

对于高编号站，平均需要 $0.5N$ 的预约时隙即可完成预约

平均而言，各站需要 N 的预约时隙完成预约

$$\text{信道利用率} = \frac{d}{d + N}, \quad d \text{ 为数据平均长度}$$

高负载时信道利用率

N 位竞争期， N 个数据帧

$$\text{信道利用率} = \frac{Nd}{N + Nd} = \frac{d}{d + 1}$$

轮询MAC协议：指定站点中的一个为主节点，其余为从节点；主节点按轮询的方式通知从节点进行传输（包括通知传输的时间，最大传输帧数等等）；一轮轮询后，所有从节点都可以完成一次传输。

问题：轮询开销大，单独活跃节点时无法独占全部带宽（因为主节点轮询也要占用带宽），主节点故障会导致网络瘫痪。

令牌环协议：控制令牌依次经过各个节点，携带各个节点发送的帧；当帧到达目的站点或绕环路一圈之后，接收站点或发送站点取下。

令牌环和位图协议类似，其将竞争期分散在数据帧周期中。开销为 $O(N)$ 级别。

二进制倒数计数协议：将N个站地址二进制编码，长度均为 $\lceil \log_2 N \rceil$ ，默认传输时延和发送时延忽略不计；当一个站需要申请信道时，广播其地址码（由高位向低位发送），同一时刻其余各站立刻收到地址码（时延忽略），同时发送的地址码按位取或；避免冲突的方法是，一个站看到地址码中自己的本来是0的位置为1，则放弃竞争。

二进制倒数计数协议，自带优先级，地址码高的优先级更高。如果时延不可忽略，则各站必须严格同步。

有限竞争协议：K个站点竞争信道，各个站在各个时隙发送的概率为 $p, p = \frac{1}{K}$ 时，获得信道的概率为 $(1 - \frac{1}{K})^{K-1}$ ，降低竞争站数，可以有效增加获得新到的概率。有限竞争协议将站点分组，每组对应一个时隙，组内竞争其对应的时隙。

问题在于如何进行分配，最优情况下当负载低时，每个时隙中的站就多；负载高时，每个时隙中的站就少，甚至每个时隙一个站。

自适应树遍历协议：建立为二叉树，叶节点对应站，内部节点不对应站。时隙0，首次竞争，允许全部的站（即1节点/根节点下所有站）竞争，若成功则某个站获得信道并发送；若发生碰撞，则在时隙1，允许书中2节点下的站竞争，在时隙2，允许树中3节点下的站竞争；依次DFS搜索到发送的站，若冲突则持续向下搜索，否则空闲或发送成功，则停止向下搜索。

负载检测：负载重时，没有必要从1节点开始竞争，甚至也没有必要从2,3节点开始竞争...需要对负载定级，第0级对应1节点，第1级对应1, 3节点...假设有q个就绪站，并且**均匀分布**在各个站点中，对于第i级节点，其下的就绪站的数目的期望值为 $2^{-i} \cdot q$ ，在最好情况下，为了使得搜索尽量少，应该尽量使得开始搜索的层，每个节点下都只有一个就绪站，即 $2^{-i} \cdot q = 1$ ，解得 $i = \log_2 q$ 。

IEEE 802.3 以太网

星型拓扑：交换机Switch位于中心，各个节点与交换机相连，节点间不再碰撞。

总线拓扑：所有节点处于同一个碰撞域中，通过总线连接。

以太网MAC帧：首部8字节前导码 $((1010 \cdots 101011)_2)$ ，前7字节同步码用于帧同步，最后一个字节帧开始定界，之后为MAC帧。MAC帧前12字节为地址字段，包括6字节目的地址和6字节源地址；目的地址首位为0标志普通地址，为1标志组播地址，全1为广播地址；源地址前3字节为组织标识符，分配给设备制造商。之后2字节为类型字段，通知接收方帧内包含的协议类型。数据字段46-1500字节，不足时插入填充字段，数据字段可以放入IP数据报。最后4字节为FCS检错码。

CSMA/CD的二进制指数退避算法：发送数据帧后最多经过 2τ ，即可判断是否发生了碰撞， 2τ 时间成为争用期；发生碰撞后，推迟一个随机时间再次发送，退避时间通过二进制指数退避算法决定；初始的基本退避时间为 2τ

重传次数 k ，每次退避之后 k 累加

$$k = \min\{k + 1, 10\}$$

随机取 r , $r \in \{0, 1, \dots, (2^k - 1)\}$

重传时延设为 $r \cdot 2\tau$

当 $k = 10$ 时，丢弃该帧，并通知高层

争用期：以太网争用期为 $51.2\mu s$ 。

最短帧长：以太网最慢速率为10Mbps，该速率下争用期可发送64字节，因此最短的有效帧长为64Byte。

强化碰撞：发送数据站一旦检测到碰撞，立即停止发送数据，并发送若干bit的**干扰信号**，使得所有站都检测到碰撞。

$$\text{信道利用率: } efficiency = \frac{1}{1 + 5 \frac{t_{prop}}{t_{trans}}},$$

t_{prop} 为 LAN 上两节点的最长传播延时

t_{trans} 为最长帧的发送时间

$$efficiency \rightarrow 1, \text{ when } t_{prop} \rightarrow 0, \text{ or } t_{trans} \rightarrow \infty$$

信道利用率计算：假设总线上N个站，每个站发送帧的概率是p，帧长L，数据速率R，争用期 2τ ，检测到碰撞不发送干扰信号，发送一帧的平均时间为 T_{av} 。

$$T_{av} = N_R \cdot 2\tau + \frac{L}{R} + \tau, \quad N_R \text{ 个争用期后发送, 最后等待一个 } \tau \text{ 的回复}$$

$$\text{成功发送一帧的概率: } A = Np(1-p)^{N-1}$$

$$\text{发送一帧失败的概率: } 1 - A$$

$$\text{经过 } j \text{ 个争用期后发送成功的概率: } p[j] = (1 - A)^j A$$

$$\text{平均重发次数: } N_R = \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot p[j] = \frac{1 - A}{A}, \quad \text{错位相减}$$

$$\text{信道利用率: } S = \frac{\frac{L}{R}}{T_{av}} = \frac{T_0}{2\tau N_R + T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a(2A^{-1} - 1)}$$

$$\text{求 } S_{max} \text{ 即为求 } A_{max}: A_{max} = (1 - \frac{1}{N})^{N-1} = \frac{1}{e}, \quad p = \frac{1}{N}, \quad N \rightarrow \infty$$

$$S_{max} \approx \frac{1}{1 + 4.44\alpha}$$

10Mbps，512b争用期下，增加帧长，降低传播时延，减少站点数，信道利用率高。

IEEE 802.11 WLAN

802.11协议：2.4GHz-5GHz，MAC协议为CSMA/CA协议，具有基站模式和Ad Hoc模式。

BSS基本业务集：有固定基础设施，其下具有若干个无线主机和一个AP基站。

Ad Hoc模式：没有基站，节点只能在其信号覆盖范围内传输数据，节点路由。

802.11的速率自适应：基站和移动节点根据节点的移动以及SNR变化动态改变传输速率。节点与基站距离增加，SNR降低，BER（比特错误率）增大；BER太高时，切换至更低的传输速率，将BER降低。

802.11帧：2字节帧控制字段，2字节帧持续时间字段（**NAV**），3地址字段各6字节，2字节帧序号字段，6字节地址4字段（仅在Ad Hoc模式下使用），0-2312字节负载字段，4字节CRC。

地址1字段：接收该帧的无线主机或AP的MAC地址。

地址2字段：发送该帧的无线主机或AP的MAC地址。

地址3字段：AP连接的路由器的接口的MAC地址。

由于无线网络信道共享，并且信号衰减强，多个发射端和接收端之间会存在问题。例如，AC不可相互监听，而AB，BC均可相互监听，则AC信号在B处干扰。

隐蔽节点：多个发送端彼此无法侦听，但其均可覆盖至某个站点，若同时发送则引起碰撞，这些发送端互为隐蔽节点。

暴露节点：S1，S2，R1，R2中S位发送端，R为接收端，且R1只能接收到S1的信号，R2只能接收到S2的信号，而S1和S2互相覆盖，则当S1向R1发送时，S2由于载波监听，无法向R2发送，而事实上S2可以向R2发送。

802.11无法进行CD，因为接收信号会很弱，而发送的信号很强，很难检测到碰撞。同时由于隐蔽节点的存在，使得碰撞无法检测。

带碰撞避免的CSMA（CSMA/CA）：发端——若信道空闲了DIFS，则不带CD地发送一帧；若信道占用则启动随机退避定时器，定时器在信道空闲时计时，在信道占用时暂停，若定时时间到则发送，发送后若没有接收到ACK，则增加随机退避时间间隔重新启动定时器。收端——收到一个帧，等待SIFS后，响应ACK。

MACA碰撞避免多路访问：发端采用CSMA先发送RTS帧，RTS可能发生碰撞，但很短；收端收到RTS后发送CTS，CTS被收端周围节点检测到，避免了隐藏节点问题。之后发端再发送更长的数据帧，而其他节点延迟发送。

载波监听：物理的载波侦听——通过PLCP在空闲信道评估阶段，进行监听。虚拟的载波侦听——基于NAV(网络分配矢量)，从RTS/CTS中提取NAV。

帧间隔优先级：优先级上SIFS>PIFS>DIFS，时间长短SIFS<PIFS<DIFS。

SIFS：高优先级，用于ACK,CTS，轮询响应等。

PIFS：中优先级，用于PCF方式的有期限限制的业务。

DIFS：低优先级，用于异步数据业务。

发送数据帧：发送端等待DIFS后，发送RTS预约信道；接收端接收后等待SIFS后，发送CTS；发送端接收CTS并等待SIFS后，发送数据帧并等待ACK；其他站点通过RTS/CTS获取NAV,进行虚拟的载波监听，等待NAV结束后再等待DIFS后才可以发送RTS进行预约。

DCF：分布式协调功能，每个站都独立行事，没有一个中央控制机制。

PCF：点协调功能，AP控制自己覆盖区域内的一切活动，类似蜂窝网络。

高速局域网

以太网具有不同的标准：2Mbps，10Mbps，100Mbps，1Gbps，10Gbps等，分别对应不同的物理层介质。

100BASE-T以太网（百兆）：仍采用802.3的MAC帧格式；R增大10倍， τ 减小至 $\frac{1}{10}$ ，保持最短帧长不变，将网段最大电缆长度减小到100m；帧间时间间隔由 $9.6\mu s$ 改为 $0.96\mu s$ 。

千兆以太网：允许1Gbps下全双工和半双工的工作方式，使用802.3帧。

全双工方式，发送接收同时进行，不发生碰撞，不需要CSMA/CD。

半双工方式，保持使用CSMA/CD技术，与1-BASE-T和100BASE-T后向兼容。

为了使得 α 较小并保持网段最大长度200m，使用**载波延伸**使最短帧长保持64字节，并将争用时间扩大至512字节（实际的最短帧为512字节）。

载波延伸：MAC帧长不足512字节时，则在帧后连续得填充直至512字节；接收端收到MAC帧后，删除填充的特殊字节之后再交付高层。

帧突发：允许发送方将多个帧级联在一起，每个帧都采用载波延伸填充至512字节，组成的大帧最长1500字节。

交换式以太网

物理层的转发器：来自一个端口的数据以相同速率在所有端口上发送，连接到Hub的所有节点相互侦听；不进行帧缓存；不进行CSMA/CD，主机NIC进行碰撞检测。

集线器Hub：相当于总线连接，随着以太网速率的提升，集线器的总线竞争方式限制了网络容量。

交换式以太网：需要决定一个帧可以去往哪个端口；可以提升安全性和网络容量；不发生碰撞。

交换机Switch：网状交换，避免竞争，提升容量。交换机属于链路层设备，可以存储和转发以太网帧，检测输入帧MAC，选择性向其余端口转发，并在转发接口对应的网段上进行CSMA/CD。

透明性：主机无法感知交换机是否存在。

网桥：构建LAN，连接设备；互联多个LAN；讲一个逻辑LAN分作多个LAN以均衡网络负载。目前网桥和交换机已经不作区分，都是链路层交换设备。

网关：工作在**传输层**以上的网络设备。

交换：允许多个节点同时传输；每条链路上都采用以太网协议，各个链路间没有碰撞，每条链路都有其自己的碰撞域。

交换是全双工的。

交换表：记录各个接口连接的主机，表项组成为主机MAC地址+到达主机的接口+时间戳标记。

自学习交换机：交换机通过交换表直到那个接口可以到达哪个主机，并且在这一过程中逐步更新交换表（比如冷启动时，或者某个主机插拔脱离或更换接口）。

接收到帧时：

1. 保存与链路相关的发送主机的地址
2. 用目的MAC地址索引交换表
3. 如果找到目的地址的表项
 - 3.1 则比对帧的目的网段与帧的发送网段是否相同
 - 3.2 相同则丢弃该帧
 - 3.3 否则在对应接口上进行转发
4. 没有找到目的地址的表项，FLOOD，在除帧接收端口以外的其它所有端口转发

交换机中存在一个守护进程，定期清除超时未更新的交换表表项，以此来更新网络拓扑结构（比如某个机器更换了接入的网桥）。

生成树网桥：网桥之间会设置冗余链路以增加可用性，但冗余链路会使得网络出现拓扑环，这会导致帧在环路中无限地FLOOD，因此需要构建一棵连接各个网桥的生成树，在逻辑上去掉环路。

1. 网桥周期性发送配置消息给邻居，并进行处理
2. 配置消息中包含基于MAC地址的标识，和其他节点的跳数
3. 选择最小标识作为生成树的根
4. 构造最小生成树，使得跳数最小

VLANs (Virtual LANs)：为了安全性，负载均衡，控制广播流量等考虑，按照用户的组织结构而非物理结构，按照逻辑拓扑结构，来构建局域网。

早期的LAN：根据计算机的地理位置或物理结构，以Hub/交换机（Hub和交换机）为中心来构建LAN。

VLAN命名：通常使用颜色进行命名，目的是可以得到一个颜色图来表示处于不同VLAN的机器的物理布局。

配置表：指明那些端口可以访问到哪些VLAN，一个端口可以被标记为多个颜色（因为有可能会有Hub连接在端口上，而Hub又连接了不同颜色的主机）。

帧的VLAN颜色标记：帧中带有VLAN颜色标记，网桥收到帧后，会按照标记仅在到对应标记的端口FLOOD。

IEEE 802.1Q标准：感知VLAN的交换机和NIC所支持的协议。对于不感知VLAN的主机和网桥，只需要支持802.3协议。

802.1Q帧在802.3帧之前添加VLAN标记。不支持802.1Q的以太网卡，收到802.1Q帧会出现长度异常。