

第一章 概述

最重要的内容：

1. 互联网边缘部分和核心部分的作用，包含分组交换的概念。
2. 计算机网络的性能指标
3. 计算机网络分层次的体系结构，包含协议和服务的概念。

1.1 计算机网络在信息时代的作用

信息时代的特征：

1. 数字化
2. 网络化
3. 信息化
4. 以网络为核心

三网融合的概念

三类网络

1. 电信网络
2. 有线电视网络
3. 计算机网络

电信网络与有线电视网络都融入了现代计算机网络的技术，扩大了原有的服务范围。计算机网络也能提供电话通信视频通信以及传送视频节目的服务。

三网融合指的就是将三种网络融合成一种网络。

互联网

网络

计算机互联的集合体

互联网

由数量极大的各种计算机网络互连起来。

互连网

局部范围内互连的计算机网络。

互联网特征

1. 连通性
用户之间不管相距多远都可以交换各种信息。
2. 共享
如信息共享、软件共享甚至是硬件共享。

1.2 网络的网络

概念

计算机网络（简称为**网络**）由若干节点 (node) 和连接这些节点的链路 (link) 组成。

互连网 多个网络通过一些路由器相互连接起来，构成了一个覆盖范围更大的计算机网络。称为互连网，因此也是“**网络的网络**”。

网络把计算机连接起来，互连网则把许多网络通过路由器连接起来。与网络相连的计算机称为主机。

1.2.2 互联网基础结构发展的三个阶段

1. 从单个网络 ARPANET 向互连网发展

2. 建成了 **三级结构的互联网**

1. 主干网

2. 地区网

3. 校园网 / 企业网

注意这不是并列关系而是从宏观到微观。

3. 逐渐形成了全球范围的多层次 ISP 结构的互联网

ISP Internet Service Provider **互联网服务提供商**

如 中国移动。

1.2.3 互联网标准的三个阶段

1. 互联网草案

2. 建议标准

3. 互联网标准

1.3 互联网的组成

从工作方式划分：

1. 边缘部分

2. 核心部分

边缘部分 就是 连接在互联网上的所有主机。

1.3.1 边缘部分

主机之间通信方式：

1. 客户 - 服务器方式 (C/S 方式)

2. 对等方式 (P2P)

P2P 本质仍然是 C/S 模式，但双方主机既是客户端也是服务器。

1.3.2 核心部分

作用是 为 边缘部分 提供 连通性。

起特殊作用的是 **路由器**。路由器是实现 **分组交换** 的关键构件。任务是 **转发收到的分组**。

交换 就是 按照某种方式动态地分配传输线路 的 资源。

电路交换

过程：**建立连接---通话---释放连接**。

|--占用通信资源--|-归还资源-|

特点：

1. 在通话的全部时间内，通话双方始终占用端到端的通信资源。
2. 线路的传输效率往往很低。传输数据是突发式地出现在传输线路上的，因此真正传输数据的时间很少。

分组交换

采用 **存储转发** 技术。

发送的整块数据称为 **报文**。

较长报文划分为一个个更小的 **等长** 的 **数据段**。

每个段前加上 一些必要的控制信息 组成的 **首部**，就形成了 **分组**。

分组也称为 **包**。

首部也可以称为 **包头**。

包头使得分组独立地选择传输路径，正确地交付到分组传输的终点。

核心部分的 **主机** 是 **为用户进行信息处理的**。

路由器 则 **进行分组交换**。

路由器接收到分组，检查分组首部，查找转发表，通过合适的接口转发出去。或许有时会经过几十个不同的路由器。因此路由器之间必须经常交换彼此掌握的路由信息，更新路由转发表。

注意 路由器暂时存储的是短分组，不是整个报文。这保证了较高的交换速率。

主要优点

1. 高效——动态分配传输带宽，逐段占用通信链路
2. 灵活——为每个分组选择合适的转发路由
3. 迅速——以分组为单位，不先建立连接（起点与终点间）就可以发送
4. 可靠——保证可靠性的网络协议，分布式多路由的分组交换网

不足

1. 时延
2. 无法确保所需带宽

3. 分组携带的包头造成一定的开销
4. 分组交换网需要专门的管理和控制机制

概述

三种数据交换方式

1. 电路交换——比特流连续地直达终点
2. 报文交换——报文发送到相邻节点，再通过转发表转发。
3. 分组交换——分组发送到相邻节点，再通过转发表转发。

若传送时间 远大于 建立连接时间，则电路交换快。

分组交换则应对突发数据时，可以保持较高的信道利用率。

1.5 计算机网络分类

1. 按照作用范围

1. 广域网 WAN (Wide Area Network)

作用范围：几十到几千公里

2. 城域网 MAN (Metropolitan Area Network)

范围：一个城市

3. 局域网 LAN (Local Area Network)

4. 个人区域网 PAN (Personal Area Network)

2. 按照网络使用者

1. 公用网

电信公司出资建造的大型网络。缴费即可使用。

2. 专用网

满足本单位特殊需求的网络，不向本单位外的人提供服务。

3. 把用户接入互联网的网络

称为接入网 AN (Access Network)，称为 **本地接入网** 或 **居民接入网**

1.6 计算机网络的性能

1.6.1 性能指标

1. 速率

单位 bit/s

2. 带宽

两个意义：

1. 频带宽度

2. 某通道传送数据的能力。单位是 bit/s 是计算机网络中采用的主要的意义。

3. 吞吐量

单位时间内通过某个网络的实际数据量。

4. 时延

网络时延由

1. 发送时延——所有 bit 发出的时间，即第一个 bit 发出开始，到最后一个 bit 发出为止的一段时间
2. 传播时延——一个 bit 在链路上传输的时间
3. 处理时延——主机或路由器收到分组时需要处理分组
4. 排队时延——分组在路由器输入队列中排队

组成

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据帧长度}(\text{bit})}{\text{发送速率}(\text{bit/s})} \quad (1)$$

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度}(m)}{\text{电磁波在信道上的传播速率}(m/s)} \quad (2)$$

5. 时延带宽积

$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延} \times \text{带宽} \quad (3)$$

表示 如果发送端不断地发送 bit，当第一个 bit 到达终点时，发送端已经发送的 bit 数。

6. 往返时间 RTT

有效数据率 可以理解为 计算一段时间的总速率。

假设 主机 A 向 主机 B 发送报文，当 B 接收完报文后，发送一个确认，A 收到确认后才会继续发送，则

$$\text{有效数据率} = \frac{\text{数据长度}}{\text{发送时间} + RTT} \quad (4)$$

发送时间就是发送时延，是第一个 bit 到最后一个 bit 发送之间的时间，RTT 则是往返时间，包含了最后一个 bit 传播的时间和确认传播的时间。那么 **发送时间 + RTT 就是总时间**。

7. 利用率

两种利用率

1. 信道利用率

指的是某信道有数据通过的时间的比例。并非越高越好，太高会导致堵塞。

2. 网络利用率

全网络的信道利用率的加权平均值。

如下公式：

$$D \text{ (当前网络时延)} = \frac{D_0 \text{ (网络空闲时延)}}{1 - U \text{ (现在的网络利用率)}} \quad (5)$$

拥有较大主干网的 ISP 的网络利用率一般不超过 50%，超过了则要扩容。

1.6.2 非性能指标

1. 费用
2. 质量
3. 标准化
4. 可靠性
5. 可扩展性和可升级性
6. 管理维护难度

1.7 计算机网络体系结构

协议：明确规定所交换数据的格式和有关的同步问题。

同步含有时序的意思。

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**。

网络协议的三要素：

1. 语法
数据和控制信息的结构或格式。
2. 语义
发出何种控制信息，作出何种响应，完成何种动作。
3. 同步
事件实现顺序的详细说明。

协议两种形式：

1. 程序代码
2. 文字描述

复杂的计算机网络协议，是 **层次式的**。

分层的好处：

1. 各层之间是独立的
2. 灵活性好
3. 结构上可以分割开
4. 易于实现和维护
5. 能促进标准化工作

计算机网络的层次需要有以下功能：

1. 差错控制
2. 流量控制
3. 分段和重装
4. 复用和分用

5. 连接建立和释放

计算机网络的各层及其协议的集合 就是 网络的 **体系结构**。

计算机网络的体系结构就是这个计算机网络及其构件所应完成的功能的精确定义。

1.7.3 五层协议的体系结构

五层协议是原理性的，如下

5. 应用层

最高层。

任务：通过应用进程间的交互 来完成 特定网络应用。

定义 了 应用进程间通信和交互的规则。

PDU 为 **报文**。

4. 运输层

为主机**进程之间**通信提供服务。

提供 **两台主机进程之间** 的**通用数据传输**。

多个应用可以使用同一个运输层，所以有复用分用的功能。

保证了可靠性。（TCP 是可靠的：停止等待协议，连续 ARQ 协议）

主要使用以下协议

1. TCP

PDU 是 **报文段**。

2. UDP

PDU 是 **用户数据报**。

PDU 是 **元组**。

3. 网络层

为**主机之间**通信提供服务。

发送报文分组。

网络层的协议是 无连接的 网际协议 IP。

PDU 是 **IP 数据报**。二进制反码求和检验。

网络层，网际层，IP 层 是 同义词。

2. 数据链路层

是链路上的协议。用来操作链路。

数据链路层将网络层的 IP 数据报封装成 **帧**。

可以检错纠错。帧差错检测 CRC。

PDU 是 **帧**。

1. 物理层

传输的单位是 bit。也就是 0、1。

考虑发送的电压，接收方的识别。确定电缆插头的引脚，以及引脚如何连接。但不包括物理传输媒体（也就是硬件）。

PDU 是 **比特**。

数据报/ IP 数据报 就是 **分组**，但用户数据报不是。

PDU 指的是 **协议数据单元**，是对等层次之间传送的数据单位。

协议栈 就是指从上到下的全部协议，因为协议层次图像栈结构。

1.7.4 协议和服务 服务访问点

协议可以向上一层提供服务，协议依赖于下一层所提供的服务。

协议是对等实体间通行的规则，服务是下层向上层通过接口提供的。

协议是水平的，服务是垂直的。

协议必须考虑所有的不利条件，而不能假设一切都是正常和非常理想的。

服务访问点 即 **SAP**，指的是两层协议之间交换信息的地方，一般是逻辑接口。层与层之间交换数据的单位为 **服务数据单元 SDU**。与 PDU 可以不一样。

1.7.5 TCP/IP 的体系结构

- 应用层
- 运输层
- 网际层
- 链路层（网络接口层）

网络的核心部分越简单越好，复杂的部分让网络边缘实现。

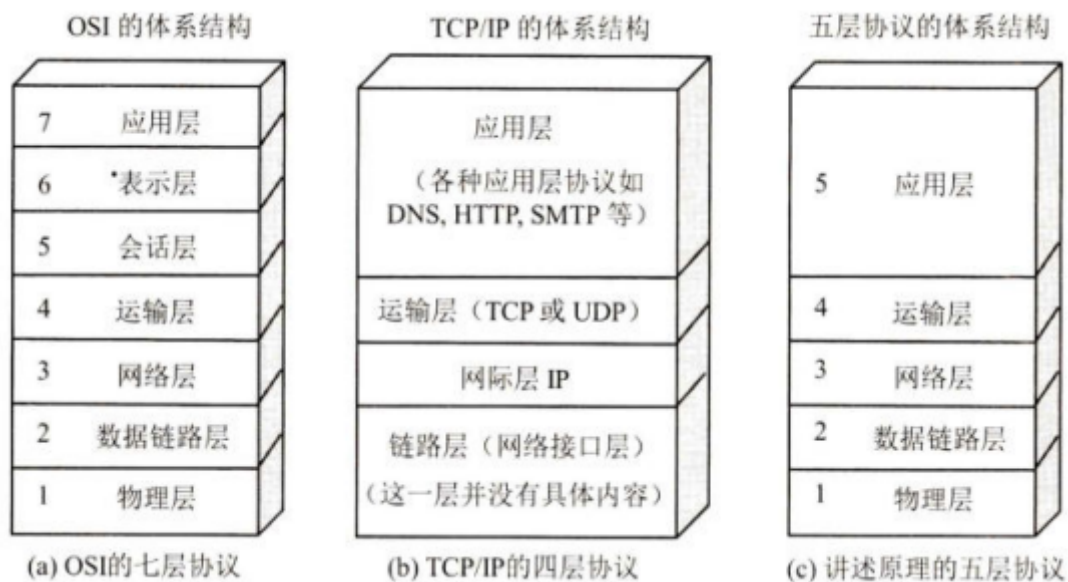
C/S 架构是建立在应用层上的。

番外

OSI 的七层结构

- 应用层
- 表示层
- 会话层
- 运输层
- 网络层
- 数据链路层
- 物理层

对比图



另外，请注意一个单位的不同意义。在计算机领域，数字使用二进制，而计算机网络则使用十进制。以下表格可大概对比这种不同：

	计算机领域（通常是数据量）	计算机网络
B	8 bit	8 bit
K	$1,024/2^{10}$	1,000
k		1,000
M	2^{20}	10^6
G	2^{30}	10^9
15 GB	$15 \times 2^{30} \times 8 \text{ bit}$	
10 Gbit/s		$10 \times 10^9 \text{ bit/s}$

第二章 物理层

2.1 基本概念

主要任务：确定与传输媒体的接口有关的一些特性。

特性

1. 机械特性

接口规格。

2. 电气特性

电缆电压范围。

3. 功能特性

电压意义。

4. 过程特性

指明不同功能的各种可能时间的出现顺序。

2.2 数据通信基础知识

2.2.1 数据通信系统的模型

数据通信系统的三部分

1. 源系统（发送端）

1. 源点（源站、信源）

2. 发送器

2. 传输系统（传输网络）

3. 目的系统（接收端）

1. 接收器

2. 终点（目的站，信宿）

通信的目的是 **传送消息**。

数据 是运送消息的实体。

根据 信号中代表消息的参数的取值方式不同，**信号** 分为以下两种：

1. 模拟信号（连续信号）

消息的参数的取值是连续的。

2. 数字信号（离散信号）

消息的参数的取值是离散的。

2.2.2 信道

通信的基本方式：

1. 单向通信

单工通信，信息只沿一个方向。例如广播。

2. 双向交替通信

半双工通信，信息在同一时刻只能沿一个方向。一方发送，一方接收。

3. 双向同时通信

全双工通信，双方可以同时发送和接收信息。

单向通信的信道最少，只需要一条。半双工和全双工都需要两条信道，一个方向一条。双向同时通信的传输效率最高。（也就是传输数据的量最多）

来自信源的信号称为 **基带信号**（基本频带信号）。

基带信号中往往有较多低频分量，许多信道不能传输这种低频分量或直流分量，因此会对基带信号进行**调制**。

调制 的目的：转换基带信号中的低频分量或者直流分量。

两种调制：

1. 基带调制

把数字信号转换成另一种形式的数字信号，也叫 **编码**。

常用的四种编码方式：

1. 不归零制

电平 正 1 负 0。

2. 归零制

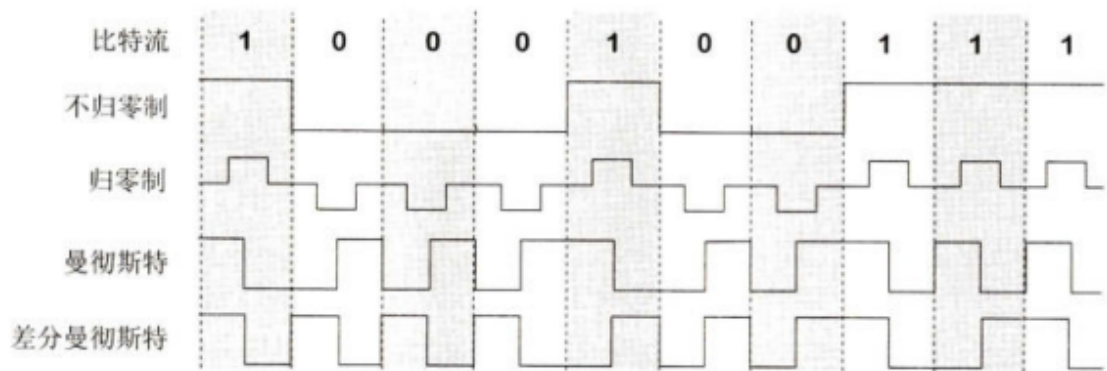
脉冲 正 1 负 0。

3. 曼彻斯特

周期中心下跳为 1，上跳为 0。

4. 差分曼彻斯特

中心始终有跳变，位开始有跳变为 0，无跳变为 1。



2. 带通调制

使用 **载波**。

把基带信号的频率范围搬移到较高的频段，并转换为模拟信号，以便更好地在模拟信道中传输。

三种方法：

1. 调幅

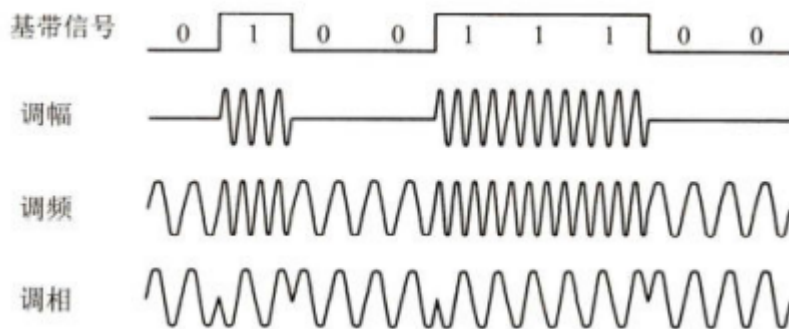
振幅随数字信号而变化，例如有载波为 1，无载波为 0。

2. 调频

频率随数字信号变化，如 f_1 为 1， f_2 为 0。

3. 调相

载波初始相位随数字信号变化，如 0° 为 0， 180° 为 1。



2.2.3 信道的极限容量

码间串扰 使得码元之间的界限不清晰，无法识别。

奈氏准则

在带宽为 W Hz 的低通道中，若不考虑噪声影响，则码元传输的最高速率是 $2W$ (Baud/s)。传输速率超过这个上限，就会出现严重的码间串扰，使得接收端不可能判决码元。

其中带宽的意义是：频带宽度，也就是信号的频率范围。

信噪比

定义：信号的平均功率和噪声的平均功率比。

$$\text{信噪比}(dB) = 10 \log_{10} \frac{S}{N} (dB) \quad (6)$$

信噪比本身是 S/N ，但如果使用 dB 为单位，则需要用以上公式转换。

香农公式

$$C (\text{极限信息传输速率}) = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (bit/s) \quad (7)$$

其中 W 为信道频带宽度，单位为 Hz， S/N 为信噪比。

这是理论极限速率。

意义：只要信息传输速率小于极限信息传输速率，就一定存在某种方法实现无差错传输。

提高信息传输速率

提高信息传输速率，可以提高每个码元携带的比特数，若一个码元含有 K bit，则信号需要有 2^K 种离散值，但相应的，相较于一个码元只含有 1 bit，信息传输速率提高了 K 倍。

如果一个码元含有的比特数越多，则需要的离散值也就越多，对于接收端解析码元难度也就越大（可能会出现错误），还需要信噪比达到一定的数值，否则干扰会使得解码难度增大甚至不可能。

奈氏准则鼓励创新更好的编码技术，相当于给了极限信息传输速率的下限，而香农公式则给出了极限信息传输速率的上限。

2.3 物理层下的传输媒体

两类传输媒体

1. 导引型传输媒体
2. 非导引型传输媒体

2.3.1 导引型传输媒体

1. 双绞线

1. 无屏蔽双绞线 UTP
 2. 屏蔽双绞线 STP
 3. 铝箔屏蔽
- $$F/UTP < U/FTP < F/FTP$$

2. 同轴电缆

3. 光缆/光纤

1. 多模光纤

存在多条不同角度入射的光线在同一条光纤内传输。

2. 单模光纤

光纤直径只有几个波长，使得光线一直向前，而不多次反射。

优点：

1. 通信容量大。
2. 传输损耗小，中继距离长。远距离传输特别经济。
3. 抗雷电和电磁干扰性能好。
4. 无串音干扰，保密性好，不易被窃听。
5. 体积小，重量轻。

2.3.2 非导引型传输媒体

即利用无线电的传播。例如手机信号。

多径效应

信号经过障碍物多次反射，到达终端，多条路径的信号叠加产生很大的失真。

微波通信

短波通信（高频通信）主要靠电离层的反射，质量较差。

误码率是无线信道传输数字信号的一个重要衡量标准，误码率有一些基本概念如下：

1. 给定调制方式和数据率，信噪比越大，误码率越低。
2. 相同信噪比，更高数据率的调制技术误码率更高。
3. 如果用户在改变自己的地理位置，则无线信道的特性也会改变，信噪比和误码率都会变化，因此要求用户的移动设备的物理层有一定自适应能力。

卫星通信

特点：

1. 距离远，费用与距离无关（但较高）。
2. 频带宽，通信容量很大。干扰小，通信稳定。
3. 较大传播时延。平均值大约是 270 ms。

ISM

指的是 Industrial, Scientific and Medical.

即工业、科学和医药。

ISM 指的是工科医频段，供大众使用的频段。

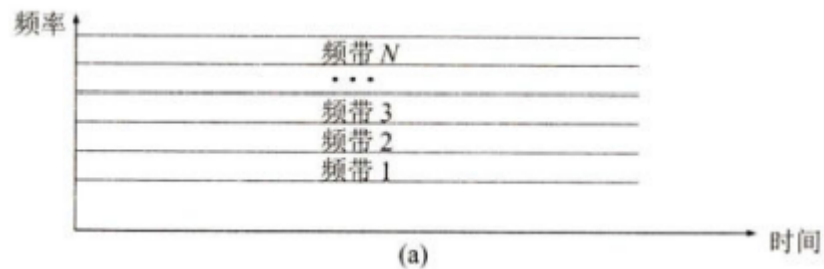
其它非导引型传输媒体

- 红外通信
- 激光通信

2.4 信道复用技术

1. 频分复用 FDM

把各路信号分别搬移到适当的频率位置，彼此不产生干扰。频分复用的各路信号在同一时间占用不同的带宽资源。

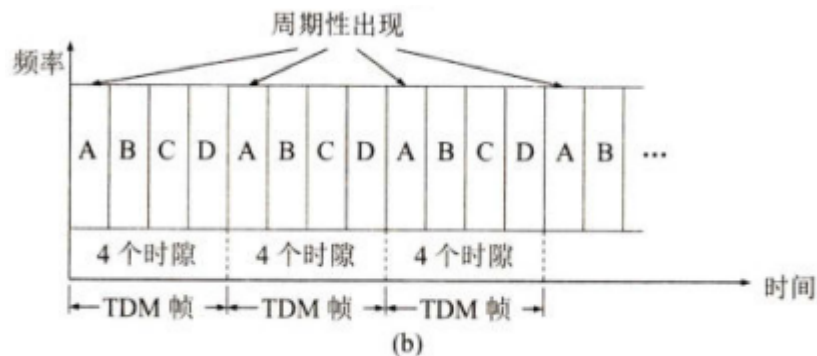


频分多址 FDMA

利用频分复用，N 个用户各使用一个频带，或让更多的用户轮流使用 N 个频带。

2. 时分复用 TDM

所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度。



时分多址 TDMA

多个用户轮流使用 N 个时隙。

空闲的时隙被浪费，信道利用率不高。

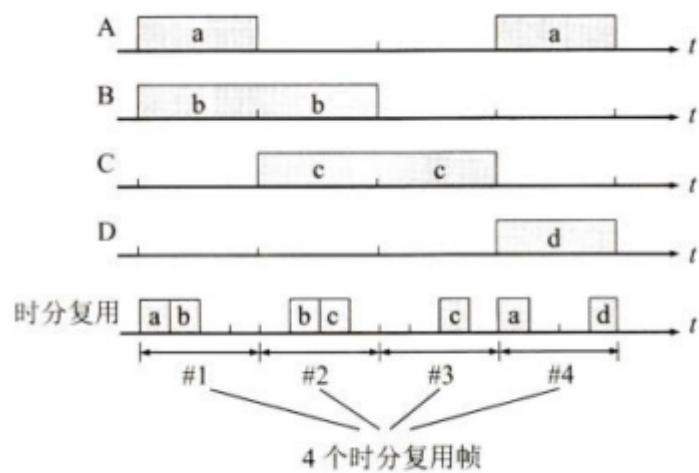


图 2-17 时分复用可能会造成线路资源的浪费

3. 统计时分复用 STDM (异步时分复用)

数据随时发往集中器的输入缓存，集中器按顺序依次扫描输入缓存，把缓存中的输入数据放入 STDM 帧中。当一个帧数据满了则发送出去。
提高了信道利用率。

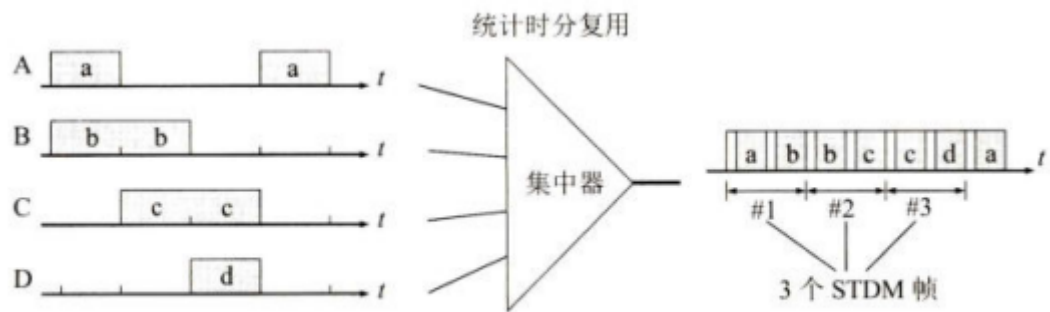


图 2-18 统计时分复用的工作原理

4. 波分复用 WDM

就是光的频分复用。用一根光纤传输多个频率相近的光载波信号。因为光载波频率一般很高，所以习惯上使用波长来表示光载波，因此这种复用称为波分复用。

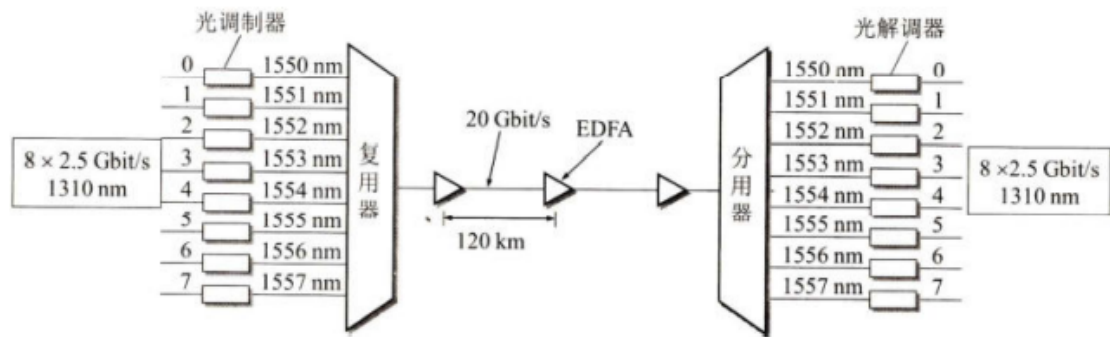


图 2-19 波分复用的概念

5. 码分复用 CDM

每个用户可以在同样的时间使用同样的频带。各用户使用经过特殊挑选的不同码型，不会互相干扰。

有很强抗干扰能力，频谱类似白噪声，不易被发现。

码分多址 CDMA

码分复用信道为多个不同地址用户共享。

每个站有一个自己的唯一的 m bit 码片序列，如果它需要发送 $\text{bit} = 1$ ，则发送自己的码片序列，如果 $\text{bit} = 0$ ，则发送其码片序列的二进制反码。

这样发送，是将 1 bit 的信息转换成 m bit 了，故其实际数据率变成了 m 倍，频带宽度也提高到原来的 m 倍。这叫 **扩频通信**。上面这种方法称为 **直接序列扩频 DSSS**。另一种是 **跳频扩频 FHSS**。

CDMA 系统的重要特点

- 每个站的码片序列不仅各不相同，而且必须相互 **正交**。实际运用使用 **伪随机码序列**。

正交 即 **规格化内积** 都是 0。

规格化内积为 0：

$$\vec{S} \cdot \vec{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (8)$$

就是对应项相乘后求和。

(n 维空间中最多有 n 个向量线性无关，因此最多 n 个正交。——线代)

当对 S 站的信息解码时，只需要把 S 站的码片序列与收到的信号作规格化内积。

解析（不用背，原理性的）：

收到的信号可以分解为 $S_x + T_x$ ，其中 S_x 为 S 站发送的序列， T_x 则必与 S 正交，不必考虑。

则 $S \cdot S_x$ 。

若 $x = 1$ ，则对应项必然相等且全是 1 或 -1，此时相乘必然全是 1。再除以 n （维数），则必然得 1。

若 $x = 0$ ，则对应项必然相反，此时相乘则全是 -1。除以维数必然得 -1。

复用器和分用器总是成对使用。

2.5 SONET/ SDH (ITU-T)

是一种时钟同步的方式。

2.6 宽带接入技术 ADSL/HFC/FTTx

ADSL 采用 DMT 编码，一个码元含有多个比特。

第三章 数据链路层

数据链路层的信道主要有以下类型

1. 点对点信道。一对一点对点。
2. 广播信道。一对多。

数据链路层的三个基本问题：

1. 封装成帧
2. 透明传输
3. 差错检测

3.1 数据链路层的几个共同问题

3.1.1 数据链路和帧

链路 是从一个节点到相邻节点的物理线路。

数据链路 是传输数据必要的通信协议的硬件软件加到链路上构成的。

一般使用 **网络适配器** 来实现这些协议。

数据链路层通信的主要步骤：

1. 把网络层交来的数据添加首部和尾部，封装成帧。
2. 发送
3. 若接收方的数据链路层接收的帧无差错，则提取 IP 数据报上交给网络层。若有差错则丢弃。

3.1.2 三个基本问题

1. 封装成帧

添加首部和尾部，作用是 **帧定界**，即确定帧的界限。

MTU——最大传送单元。帧长度小于 MTU。

定界的作用：

1. 识别帧的开始与结束。
2. 防止差错的无效数据帧。

2. 透明传输

指的是不论怎样比特组合的数据，都能按照原样无差错传输。

若数据中出现 SOH 或者 EOT，发送方则在其前面加入一个转义字符 ESC，接收端收到后会对其还原。若数据中出现转义字符 ESC，也会在其前面插入一个转义字符 ESC。这种方法叫 **字符填充** 或 **字节填充**。

3. 差错检测

两种差错

1. 比特差错

比特差错的检测使用 **循环冗余检验 CRC**，发送端和接收端商定一个 $(n+1)$ 位的除数 P ，发送端计算比特流左移 n 位后除以 P 的余数（二进制模 2 除法）并插入到比特流后面，接收方对比特流做二进制模 2 除法，必然得到无余数的结果。若有余数则认定出现差错，丢弃这个帧。

出现差错而正好使得余数为 0 的概率极小，可以近似认为不存在。

二进制模 2 除法示例：

$$\begin{array}{r}
 110101 \leftarrow Q(\text{商}) \\
 P(\text{除数}) \rightarrow 1101 \overline{) 101001000} \leftarrow 2^n M(\text{被除数}) \\
 \underline{1101} \\
 1110 \\
 \underline{1101} \\
 0111 \\
 \underline{0000} \\
 1110 \\
 \underline{1101} \\
 0110 \\
 \underline{0000} \\
 1100 \\
 \underline{1101} \\
 001 \leftarrow R(\text{余数}), \text{作为 FCS}
 \end{array}$$

生成多项式的概念：

对于除数 P ，将二进制 P 的每一位对应多项式的系数，最低位为 0 次。其多项式即生成多项式。

若 $P=1101$ ，则 $P(X)=X^3+X^2+1$ 。

2. 传输差错

传输差错指的是出现了 **帧丢失、帧重复、帧失序**。

解决方法是 **帧编号、确认、重传机制**。接收方收到正确的帧就要发送确认，发送方若一定期限内未收到确认，则认为出现了差错，进行重传，直到收到确认。

现在互联网采用区别对待：

通信质量好的，不要求使用确认重传机制，改正差错的任务由上层协议如 TCP 来完成。

通信质量差的，使用确认重传机制。

3.2 PPP 点对点协议

特点（满足的需求）：

1. 简单

不纠错，无序号，不需要流量控制。只检错。

2. 封装成帧

3. 透明性

4. 多种网络层协议

5. 多种类型链路

6. 差错检测

7. 检测连接状态

8. 最大传送单元

9. 网络层地址协商

10. 数据压缩协商

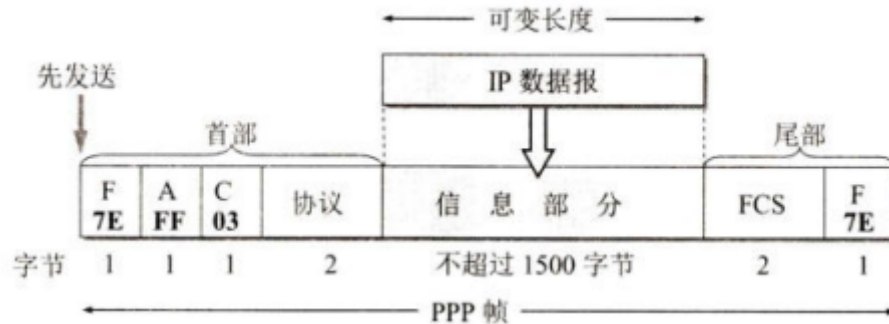
可靠性由运输层的 TCP 协议负责。

三个组成部分

1. 将 IP 数据报封装到串行链路的方法。
2. 链路控制协议 **LCP**，用于建立，配置和测试数据链路连接。
3. 网络控制协议 **NCP**。

3.2.2 PPP 帧格式

1. 字段意义



2. 字节填充

异步传输 中（按字符传输），使用字节填充来转义，实现透明传输。

需要避免的字符：

1. 0x7E（帧首尾标志位）
2. 数值小于 0x20 的字符
3. 转义字符本身。

转义符：0x7D

转换方法如下：

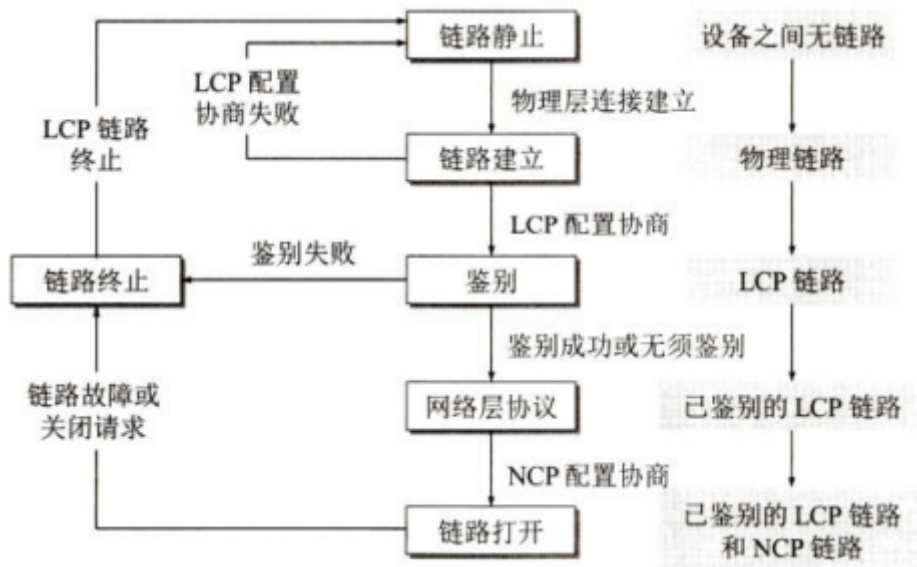
1. 0x7E → 0x7D, 0x5E
2. $X < 0x20, X \rightarrow 0x7D, X + 0x20$
例如 0x03 → 0x7d, 0x23
3. 0x7D → 0x7D, 0x5D

3. 零比特填充

同步传输 时（按比特传输），使用零比特填充来避免出现连续的六个 1，六个 1 是标志字段。

方法是，发送端一旦发现有五个连续的 1，则立刻发送一个 0。接收端接收完数据，判断帧边界，再还原信息。

3.2.3 PPP 协议的工作状态



1. 链路静止
2. 链路建立
3. 配置协商
4. 鉴别
 1. 口令鉴别协议 PAP
 2. 口令握手鉴别协议 CHAP
5. 网络层协议
6. 链路打开
7. 链路终止
8. 链路静止

3.3 使用广播信道的数据链路层

3.3.1 局域网的数据链路层

局域网特点：为一个单位所拥有，且地理范围和站点数目均有限。

局域网优点：

1. 具有广播功能
2. 便于扩展和逐渐演变
3. 提高了系统的可靠性、可用性、生存性

(P₈₄ 有部分内容略过，应该不是考点)

以太网两个主要标准

1. DIX Ethernet V2
2. IEEE 802.3
 - LLC 逻辑链路控制
 - MAC 媒体接入控制

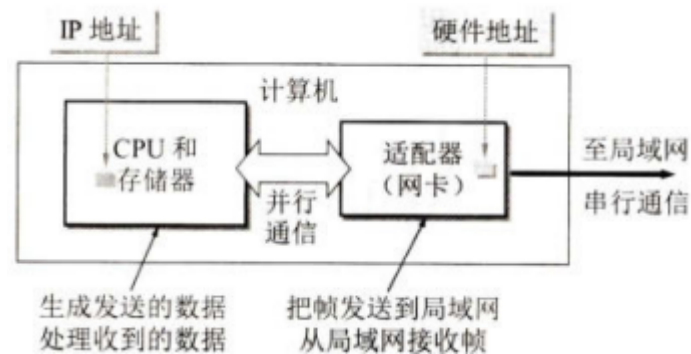
适配器

外接适配器就是 NIC 网口接入卡，简称 **网卡**。

现在的适配器一般集成在主板上。

适配器两个作用

1. 进行数据串行传输和并行传输的转换
2. 能够实现以太网协议



3.3.2 CSMA/CD 协议

总线的特点：当一台计算机发送数据时，总线上所有计算机都能检测到这个数据。（广播通信）

以太网的两个措施：

1. 采用较为灵活的 **无连接** 的工作方式

不进行帧编号，也不要求接收方发送确认。因此以太网提供的服务是尽最大努力的交付，即不可靠的交付。可靠性由上层协议（运输层）保证，如 TCP 协议。

2. 发送的数据采用曼彻斯特编码的信号

以太网的目的：协调总线上各计算机的工作。由于总线上同一时间只能有一台计算机发送数据。

CSMA/CD 协议

1. 多点接入

说明是总线型网络。

2. 载波监听

边发送边监听。发现碰撞则停止发送。

3. 碰撞检测

发现碰撞则停止发送。

电磁波在 1 km 电缆上传播的时间约为 5 μ s。

信号单程端到端的传播时延为 τ ，则**最多**需要 2τ （往返时延），**发送端**就知道是否发生了碰撞。 2τ 称为争用期，如果发送端经过争用期还没有检测到碰撞，则肯定不会发生碰撞。

一个站不可能同时发送和接收（这样就会碰撞导致帧不可用）。因此 CSMA/CD 协议是半双工通信。

发送的不确定性：以太网不能保证在检测到信道空闲的某段时间内一定能把自己的数据帧发出去。（空闲 - 发送 - 碰撞 - 退避 - 发送 - 碰撞 - 退避...）

退避方法：截断二进制指数退避

这种方法让发生碰撞的站停止发送数据后，退避一个随机的时间。

1. 基本退避时间为争用期为 2τ , $51.2 \mu\text{s}$, 对于 10 Mbit/s 以太网, 争用期可以发送 512 bit , 即 64 B ($512/8$)。也可以说争用期是 **512 比特时间**, 也可以说争用期是 **512 比特**。
2. 从离散整数集合 $[0, 1, \dots, (2^k-1)]$ 中随机取出一个数, 记为 r , 则下次重传帧应退避 r 倍争用期, 也就是 $2r\tau$ 。其中 $k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$ 。
3. 若重传次数到 16 次, 仍然不能成功, 则丢弃该帧, 并向高层报告。(应该是告诉上面的层比如网络层/运输层/应用层, 然后上面给客户端显示超时)

假如一个帧很短, 发送完之前没有检测到碰撞, 而传播过程中却发生了碰撞, 目的站会丢弃这个碰撞的帧, 但发送站却不知道这个帧发生了碰撞, 因此不会重传这个帧。这是不应该出现的, 因此以太网规定最短帧长是 64 B , 即 512 bit 。如果数据很短, 则填入一些填充字节, 使得帧长不小于 64 B 。这样发送时间就达到了争用期, 若发生碰撞则必然可以检测到。

如果发生碰撞, 必然是在争用期内检测到, 即发送数据的时间小于 512 比特时间。

如果检测到碰撞则停止发送, 会导致发送一个不完整的帧, 其长度必然小于 512 比特。因此对于所有小于 512 bit 的帧, 都可以认定其不完整, 是因冲突而异常终止的无效帧, 并丢弃。

帧间最小间隔 $9.6\mu\text{s}$, 即 96 比特时间。使目的站的接收缓存来得及清理, 做好接收下一帧的准备。

CSMA/CD 协议的过程归纳:

1. 准备发送
2. 检测信道, 96 比特时间内信道空闲 (帧间最小间隔)
3. 发送, 边发送边监听
 1. 成功
 2. 失败

3.3.4 以太网信道利用率

记参数 a 为

$$a = \frac{\tau}{T_0} \quad (9)$$

则以太网极限信道利用率为

$$S_{max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a} \quad (10)$$

以上 a 为 **单程端到端时延 τ** 与 **帧的发送时间 T_0** 之比。 $a \rightarrow 0$ 时, 信道资源浪费少, a 越大, 则说明争用期占的比例越大, 浪费越多。

为了使 a 小, 则 τ 越小越好, 也就是说线路长度受限制。同时帧长不能太短, 否则 T_0 很小。

3.3.5 以太网 MAC 层

IEEE 802 标准为局域网规定了 **48 位** 的全球地址，这个地址固化在适配器的 ROM 中。

更换适配器（网卡）则 MAC 地址也发生改变。

MAC 地址不随地理位置而变化。

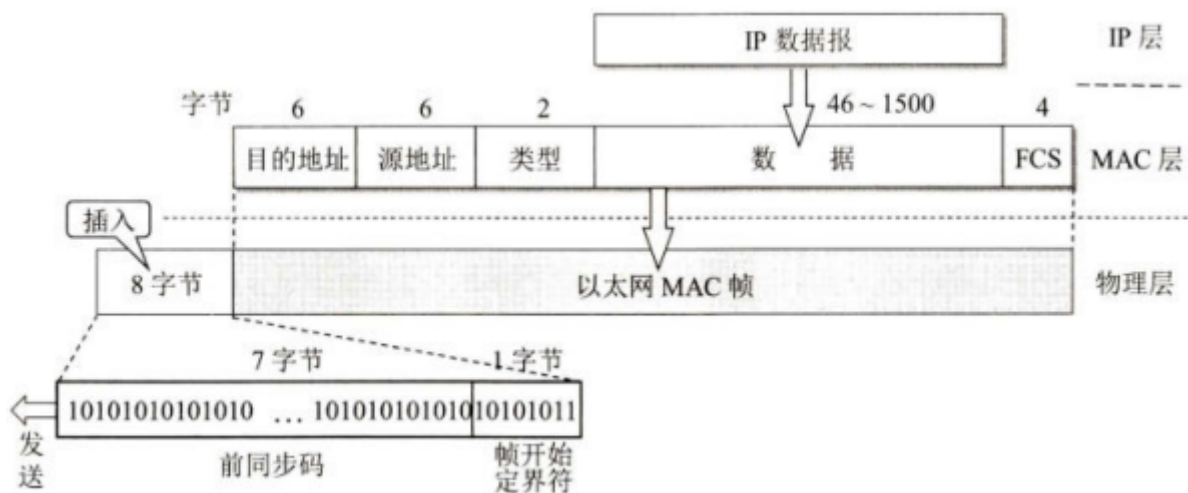
MAC 帧

1. 单播帧，帧 MAC 地址与本机相同。
2. 广播帧，帧 MAC 地址全为 1。发送给本局域网上所有站点。
3. 多播帧，发送给本局域网部分站点。

MAC 帧格式

两种标准

1. DIX Ethernet V2（主要介绍）
2. IEEE 802.3



前面 8 字节前同步码和帧定界符是物理层插入的，不属于帧的范围。

帧格式组成：

1. 6 字节目的地址
2. 6 字节源地址
3. 2 字节类型
4. 46~1500 字节数据字段
5. 4 字节 FCS

由于帧之间有间隙，因此不需要帧结束定界符。

出现以下情况则判定帧无效：

1. 长度不是整数个字节
2. 用 FCS 校验出错

3. 帧数据字段不在 46~1500 字节之间，即帧长度不在 64~1518 字节之间

3.4 扩展以太网

集线器

是星型拓扑结构中心的设备。

特点：

1. 使用集线器的以太网在逻辑上还是总线型。使用 CSMA/CD 协议。
2. 一个集线器上有许多端口。
3. 集线器工作在物理层，端口仅转发 0 和 1，不进行碰撞检测。
4. 自适应串音回波抵消，避免转发的强信号影响接收的弱信号。

网桥

根据帧目的地址，查找转发表，转发和过滤帧。（过滤就是没查到然后丢弃这个帧）

以太网交换机

交换式集线器也称以太网交换机，它淘汰了网桥，工作在数据链路层。

特点：

1. 实质是多端口的网桥。
2. 全双工方式通信。
3. 并行性，连通多对端口，使多对主机能同时通信。
4. 相互通信的主机都独占传输媒体，无碰撞地传输数据。
5. 端口有存储器，繁忙时暂时缓存收到的帧。
6. 内部的地址表是通过自学习算法自动地逐渐建立起来的。
7. 既可以存储 - 转发，也可以直通，即收到帧就立刻转发

转发表的自学习功能

登记发送方的 MAC 地址、端口、记录时间。

对于表中没有的目的端，以太网交换机把帧广播出去，能使目的端接收到。而其它主机则因为目的地址不符合而丢弃这个帧。丢弃帧也称为 **过滤**。

对于表中超过预设时间的数据会进行删除，使得转发表符合当前网络情况。

生成树协议 STP 不改变网络的实际拓扑结构，但逻辑上切断某些链路，使得一台主机到其它任何主机的路径是无环路的树状结构。避免帧在环路中无限制兜圈子。

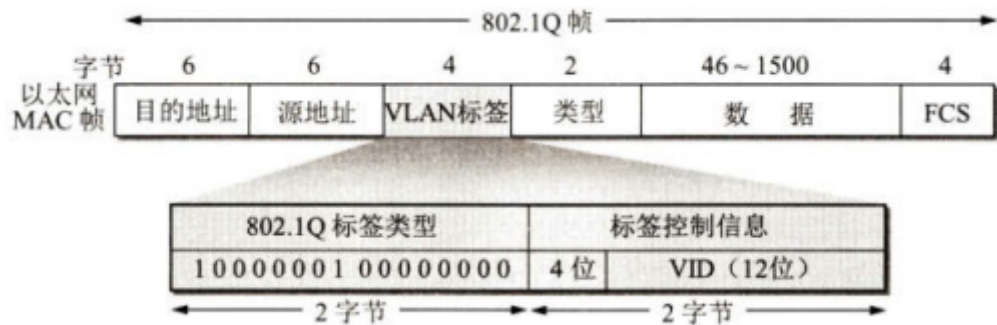
总线以太网使用 CSMA/CD 协议，半双工方式工作。但以太网交换机不使用共享总线，无碰撞，不使用 CSMA/CD 协议，以全双工方式工作。但其帧结构没有变，因此仍成为以太网。

3.4.3 VLAN 虚拟局域网

是由一些局域网网段构成的与物理位置无关的逻辑组，这些网段具有某些共同的需求。VLAN 的帧都有明确的标识符指明属于的 VLAN。

VLAN 是一种服务，不是新型的局域网。

帧格式中插入一个 **VLAN 标签**，变成了 802.1Q 帧。



3.5 高速以太网

- 1. 100 Mbit/s 的快速以太网
- 2. 吉比特以太网
- 3. 10 吉比特以太网
- 4. 400 吉比特以太网

什么是以太网？提供什么样的服务？

以太网是一种基带局域网技术。采用无连接工作方式，是不可靠的传输。

第四章 网络层

4.1 网络层的几个重要概念

4.1.1 网络层提供的两种服务

- 1. 面向连接的方式，提供可靠传输的服务，建立连接时建立一条**虚电路**。
- 2. 现行的主要服务：简单灵活的、无连接的、尽最大努力交付的**数据报服务**。不提供服务质量的承诺。

	虚电路服务	数据报服务
思路	可靠通信应由网络保证	可靠通信应由用户主机保证
连接建立	必须有	不需要
终点地址	连接建立阶段使用，每个分组使用短的虚电路号	每个分组都有完整的终点 IP 地址

	虚电路服务	数据报服务
分组转发	同一条虚电路的分组按照同一个路由转发	每个分组独立查找转发表转发
节点故障	所有通过故障节点的虚电路均不可工作	出故障的节点可能丢失分组，路由可能发生变化
分组顺序	按顺序发送	到达终点的顺序不一定按照发送顺序
差错处理和流量控制	可以由网络或用户主机负责	用户主机负责

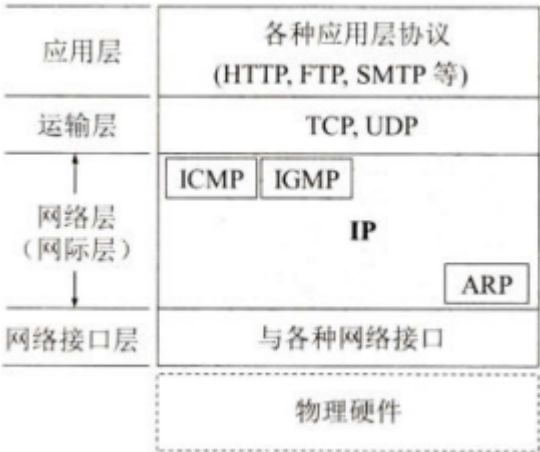
路由器之间传输的信息有以下两类

1. 转发源主机与目的主机之间传送的数据（数据层面）
2. 传送路由信息（控制层面，建立路由表）

4.2 网际协议 IP

协议 IP 配套使用的三个协议

1. 地址解析协议 ARP
2. 网际控制报文协议 ICMP
3. 网际组管理协议 IGMP



中间设备：

1. 物理层：转发器
2. 数据链路层：网桥/桥接器，交换机
3. 网络层：路由器
4. 网络层以上：网关

使用相同的网际协议 IP 的多个主机通过路由器相互连接起来，构成 **虚拟互联网络**，它们在物理上的异构客观存在，但逻辑上、网络层上看起来是统一的。使用协议 IP 的虚拟互联网络称为 IP 网，IP 网上的主机相互通信时看不见异构的物理细节。在 IP 网上层使用 TCP 协议，就是现在的互联网。

直接交付 和 间接交付

直接交付：当源主机和目的主机在同一个网络上，则不需要经过路由器，就可以发送信息，称为直接交付。

间接交付：当源主机与目的主机不在同一个网络上，源主机将信息发送给路由器，路由器查找转发表，并把信息传递给下一个路由器，直到信息传到目的主机所连接的路由器，此时这个路由器再将信息传递给目的主机。

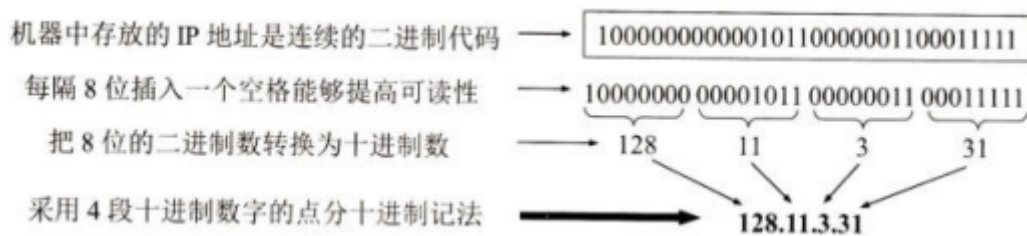
4.2.2 IP 地址

IP 地址表示

是给连接到互联网的每台主机（或路由器）的每一个接口分配一个全世界范围内唯一的 32 位的标识符。

现在由 **互联网名字和数字分配机构 ICANN** 分配。

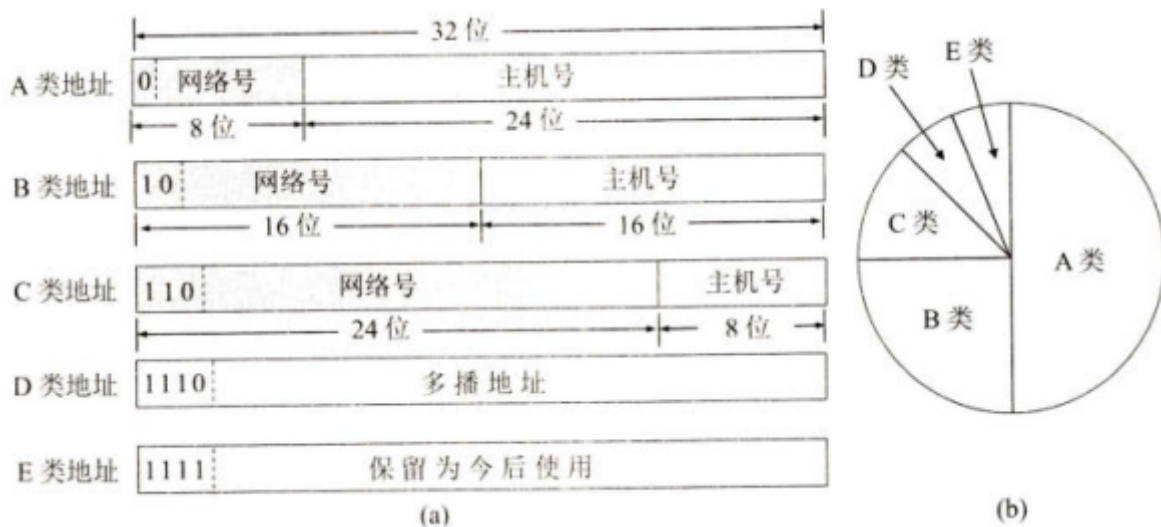
每八位换成十进制，然后中间用 **点** 隔开，称为 **点分十进制记法**。



IP 地址由网络号和主机号组成。其中网络号为 n 位，主机号为 $32 - n$ 位。

IP 地址分类

1. A 类， $n = 8$ ，占 50%。
2. B 类， $n = 16$ ，占 25%。
3. C 类， $n = 24$ ，占 12.5%。
4. D 类，多播地址，占 6.25%。
5. E 类，保留地址，占 6.25%。



网络号字段 就是网络号里前几位，如上图，它标识了 IP 地址是哪类地址。

A 类 IP 地址中，网络号全为 0 的表示“本网络”。网络号为 127（即 0111 1111）的保留作为 本地软件环回测试本主机进程之间通信 使用。因此 A 类地址网络号只有 126 个。主机号中全 0 或者全 1 的一般不指派。全 0 代表主机所连接到的网络地址。全 1 代表该网络上所有的主机。主机数 $2^{24} - 2$ 。

B 类地址可指派的网络数为 2^{14} ，16384。主机数 $2^{16} - 2$ 。

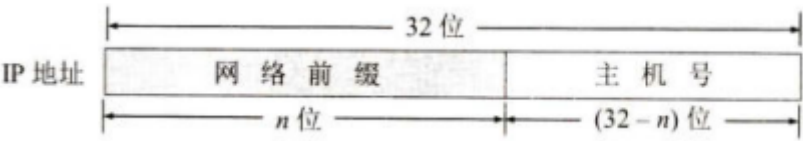
C 类地址可指派的网络数 2^{21} 。主机数 $2^8 - 2$ 。

一般不指派的 IP 地址：

网络号	主机号	源地址	目的地址	意义
0	0	√	×	本网络本主机
0	X	√	×	本网络主机号为 X 的主机
全 1	全 1	×	√	只在本网络上广播
Y	全 1	×	√	在网络号为 Y 的网络上广播
127	非全 0 或全 1 的任何数	√	√	本地软件环回测试

无分类编址 CIDR

CIDR 把网络号变为网络前缀，剩下的部分仍然是主机号。网络前缀的位数不固定，是 0~32 之间任意值。CIDR 也称 **构造超网**。



CIDR 记法 / 斜线记法

在地址后面加一个斜线，斜线后面注明网络前缀的位数。

例如 128.14.35.7/20，表示前二十位是网络前缀。

地址块

CIDR 编址中，把所有网络前缀相同的地址集合称为 **地址块**。

最小地址是地址块中主机号全为 0 的。

最大地址是主机号全为 1 的。

这两个地址一般不指派。

我们可以使用最小地址和前缀位数指明地址块，例如 128.14.0.0/16。0 可以省略，变为 128.14/16。

采用 CIDR 后，一个 IP 地址已经不能知道是分类的地址还是 CIDR 地址了。

掩码

地址掩码用于计算网络前缀的长度。既可以计算 CIDR 地址的网络前缀，也可以计算分类地址的网络前缀。

地址掩码也称为子网掩码，或者简称 **掩码**。

掩码中 1 的个数就是网络前缀的长度。

例如 /20 地址块的掩码是：

11111111 11111111 11110000 00000000

|----- 20 位 -----|

20 个连续的 1，和 12 个连续的 0。

掩码的 CIDR 记法是 255.255.240.0/20。

把二进制的地址和掩码按位与运算，即可得到网络前缀。

三个特殊的地址块

1. $n = 32$ ，用于主机路由。
2. $n = 31$ ，只有两个 IP 地址，主机号分别为 0 和 1。用于点对点链路。
3. 0.0.0.0/0，用于默认路由。

IP 地址特点

1. 由网络前缀和主机号组成。

分等级的结构好处：

1. IP 地址管理机构只需要分配网络前缀，主机号由分配到网络前缀的单位自行分配。
2. 路由器根据网络前缀进行转发，减少转发表的占用空间和查找时间。
2. IP 地址是标志一台主机和一条链路的接口。
3. 用转发器/交换机连接的多个局域网仍是一个网络，不同网络之间通过路由器连接。同一个网络的网络前缀必须相同。
4. IP 地址之间是平等的，互联网平等对待每个 IP 地址。

4.2.3 IP 地址和 MAC 地址

MAC 地址是物理地址。

IP 地址是虚拟地址。



1. 在传输 MAC 帧的时候，IP 数据报的首部中的源地址和目的地址始终是源主机和目的主机的 IP。
2. 路由器只根据目的站的 IP 地址进行转发。
3. MAC 帧在局域网链路层传送时，其首部的源地址和目的地址要变化，源地址是某次传送（主机 - 路由器/路由器 - 路由器/路由器 - 主机）的起点和终点的 MAC 地址。
4. 在网络层抽象的互联网屏蔽了下层的异构，可以使用统一的、抽象的 IP 地址研究主机与主机/路由器之间的通信。

4.2.4 地址解析协议 ARP

当知道了 IP 地址，使用 ARP 可以获得 MAC 地址。

当知道了 MAC 地址，使用 DHCP 可以获得 IP 地址。

具体方法：在主机的 ARP 高速缓存中存放一个从 IP 地址到 MAC 地址的映射表，并且这个表会经常动态更新（新增或者超时删除）。

如果高速缓存中有目的站信息，则写入 MAC 帧，然后发往这个地址。

如果没有则运行 ARP，步骤如下：

1. 主机 A 发送 ARP 请求分组

内容： 本机 IP 地址 本机 MAC 地址 请求 IP 地址为 -.-.-.- 的主机的 MAC 地址

2. 分组在本局域网广播

3. 主机 B 收到这个请求，向主机 A 发送 ARP 响应分组，并将 A 的映射写入自己的 ARP 高速缓存

内容： 本机 IP 地址 本机 MAC 地址

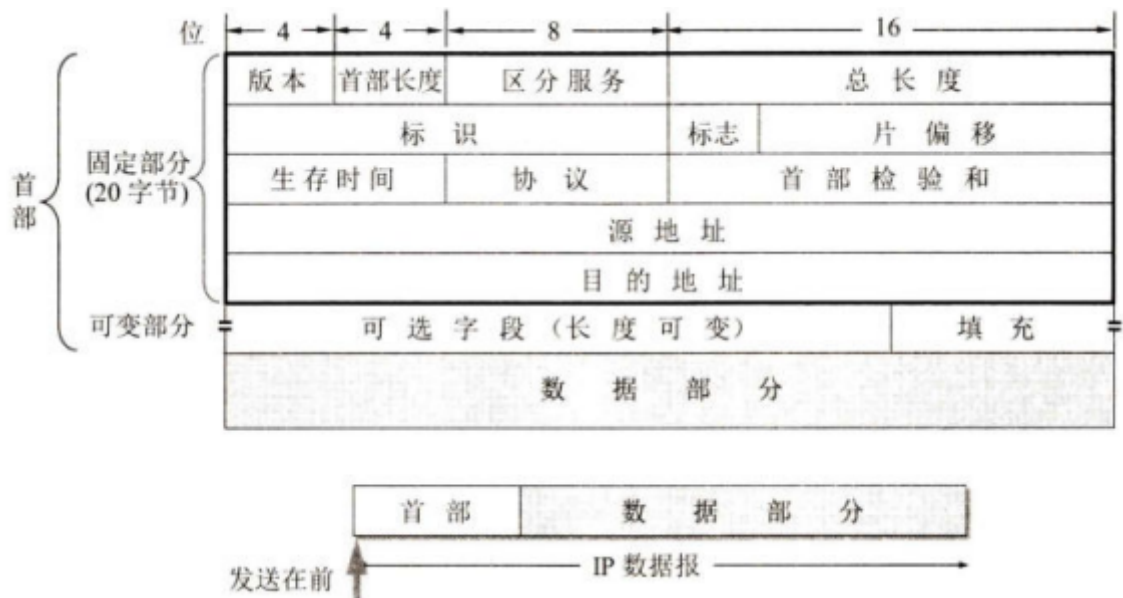
注意：请求分组是广播的，响应分组是单播的。

4. 主机 A 收到 ARP 响应分组，在 ARP 高速缓存中写入主机 B 的 IP 地址到 MAC 地址的映射。

ARP 高速缓存的每个项目都有生存时间，超过生存时间的项目会进行删除，目的是使 ARP 映射符合当前的网络情况。

ARP 用于解决 **同一个局域网** 上的 IP 与 MAC 映射问题，不同局域网之间使用路由器转发，而不是直接发送，因此不需要 IP 与 MAC 映射。

4.2.5 IP 数据报的格式



重要的部分

1. TTL 生存时间

防止数据报无限制循环转发，兜圈子。功能是跳数限制，就是传播次数限制。最大 8 位二进制即 255。如果是 1，则只能在局域网传播。每次传播减一。

2. 首部检验和

只检验首部，不检验数据部分。检验方法是二进制反码求和。发送端将结果写入检验和，接收端对包括检验和在内的首部计算二进制反码求和，其结果必为 0，否则出错。

方法如下：

0+0=0 0+1=1 1+1=10

低位进位到高位，最高位进位到最低位。

出错则丢弃数据报。

4.3 IP 层转发分组的过程

4.3.1 基于终点的转发

先查找目的网络（网络前缀），再查=】】【去【

4.3.2 最长前缀匹配

聚合路由把相同的前缀提取出来聚合。而分组会发送到最长的匹配前缀中。

例如

- 128.1.25.0/24
- 128.1.26.0/24
- 128.1.27.0/24

聚合，由于

- 25 = 0001 10 01

- 26 = 0001 10 10
- 27 = 0001 10 11

故聚合后为

128.1.24.0/22

当发送分组至 128.1.24.1，而路由表中有

- 128.1.24.0/22
- 128.1.24.0/24

则会发到前缀更长的第二个地址块中，这样更精准。称为 **最长前缀匹配**。

两种特殊路由

1. 主机路由

就是指定的特殊 IP，用于网络管理人员控制和测试网络。

转发表中主机路由优先，排在最前面。

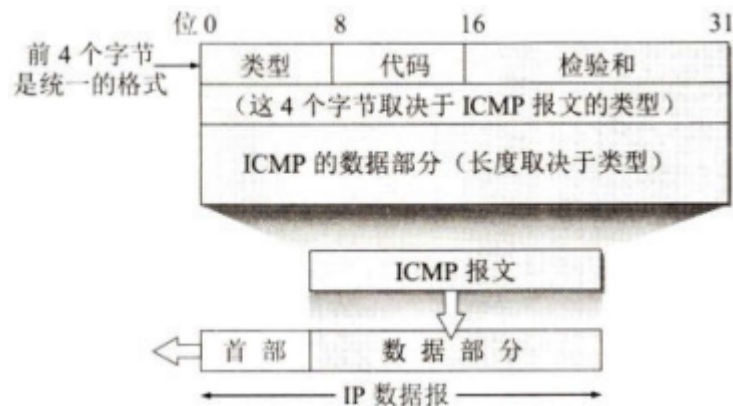
2. 默认路由

0.0.0.0/0

使得所有分组都默认交给转发表指示的路由器 R 来处理。

4.4 ICMP 网际控制报文协议

格式：



作用：更有效地转发 IP 数据报，提高成功交付的机会。

ICMP 不是高层协议，是 IP 层协议。

它作为 IP 层数据报的数据发送。

两种分类：

1. ICMP 差错控制报文
2. ICMP 询问报文

4.4.2 ICMP 应用举例

1. PING 分组网间探测

测试两台主机之间的连通性。

2. traceroute/Tracert

发送 TTL 值恰好为中转次数的报文，报文达到目的站时 TTL=1。目的主机返回一个 ICMP 终点不可达差错报告报文。包含以下信息：

1. 到达目的主机所经过的路由器的 IP 地址
2. 到达其中的每一个路由器的往返时间。

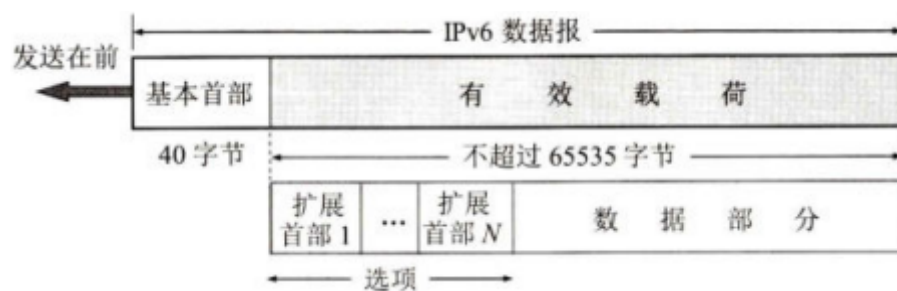
4.5 IPv6

主要变化：

1. 更大地址空间 128 位
2. 扩展的地址层次结构
3. 灵活的首部格式
4. 改进的选项
5. 允许扩充
6. 即插即用
7. 资源的预分配
8. 首部改为 8 字节对齐

IPv6 数据报的两个部分

1. 基本首部
2. 有效载荷



4.5.2 IPv6 地址

三种目的地址

1. 单播 一对一
2. 多播 一对多
3. 任播 ^{new!} 终点是一组计算机，但只会交付给其中一个。

记法：冒号十六进制记法

128 位，分为 8 个字段，每个 16 位，用十六进制表示为 4 位十六进制。允许省略数字前面的 0，例如 0000 → 0，0021 → 21。

零压缩

每个地址只能使用一次零压缩，做法是 把 一连串连续的 0 使用 一对冒号 取代。例如：

FF05 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : B3

FF05 :: B3

可以结合点分十进制记法，如

0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 128.10.2.1

: 分隔开的是 16 位，**.** 分割开的是 8 位。

零压缩后是

:: 128.10.2.1

CIDR 也可以使用零压缩和冒号十六进制记法。

2001 : 0DB8 : 0 : CD30 : 123 : 4567 : 89AB : CDEF /60

2001 : 0DB8 : 0 : CD30 : 123 : 4567 : 89AB : CDEF ^IPv6 地址^

2001 : 0DB8 : 0 : CD30 :: /60 子网号

4.5.3 IPv4/IPv6 过渡

策略

1. 双协议栈

同时装有 IPv4 和 IPv6 两种协议栈。

2. 隧道技术

把 IPv6 数据报封装成 IPv4 数据报的数据部分，在 IPv4 网络中发送，目的主机将数据部分交给 IPv6 协议栈。

4.5.4 ICMPv6

包含地址解析协议 ARP，网际组管理协议 IGMP

面向报文，利用报文 报告差错，获取信息，探测邻站，管理多播。

报文分类

1. 差错报文

2. 信息报文

3. 邻站发现报文

4. 组成员关系报文

4.6 路由选择协议

由网络层完成路由选择

概念名词

1. AS：自治系统，在单一的技术管理下的许多网络、IP 地址、路由器。
2. IGP：内部网关协议。AS 内部的路由选择协议，最多使用的是 RIP 和 OSPF 协议。

1. RIP

优点：简单。

基于距离向量。

要求每个路由器都要维护它到其它目的网络的 **跳数**。最高跳数 15，距离等于 16 则不可达。适用于小型互联网。

特点：

1. 仅和相邻路由器交换信息
2. 路由器之间交换的是路由表
3. 按固定时间间隔交换路由信息

距离向量算法：

路由表由 目的网络 距离 下一跳 组成

1. 相邻路由器 X 给本机的路由表 Table，把下一跳全改成 X。距离全加 1。
2. 对于 Table 中每一行，
 1. 如果 本机路由表 没有 目的网络，则加入 本机路由表。
 2. 如果有
 1. 下一跳为 X，则替换。（最新信息）
 2. 下一跳不为 X，则比较距离，短的更新

缺点：好消息传得很快，但坏消息/故障传得很慢。

2. OSPF

开放最短路径优先。

1. 向本 AS 中 **所有路由器** 发送信息。发送的是 **相邻路由器的链路状态** 和 **度量**（代价）。
2. 链路状态发生变化 或者 每隔一段时间，就发送一次。
3. 每个路由器根据收到的信息构造自己的路由表。

特点：

1. 更新过程收敛很快。
2. 层次结构的区域划分
3. 允许管理员指派代价
4. 负载均衡

同一个目的主机之间有多条代价相同的路径，则可以将通信量分配给这几条路径。

- 5. 鉴别功能
 - 6. 支持可变长度子网划分和无分类编址 CIDR。
 - 7. 32 位序号，越大说明链路越新。
3. EGP：外部网关协议。不同 AS 之间的路由选择协议。最多使用的是 BGP-4。
1. BGP

外部网关协议，力求选择一条能够到达目的网络前缀且比较好的路由，而不是最佳路由。

原因：

- 1. 互联网规模大，AS 之间路由选择很困难。
- 2. AS 之间路由选择必须考虑有关策略。

路由选择：

- 1. 本地偏好值
- 2. AS 跳数最少
- 3. 热土豆路由算法

分组就像热土豆，多条路径下选个发送出去最快的。

- 4. 选择 BGP 标识符数值最小的

4.7 IP 多播

4.7.1 基本概念

互联网多播就称为 IP 多播。

多播数据报的目的地址是多播组的标识符，是一个 D 类地址。

多播数据报是 **尽最大努力的交付**。

4.7.2 硬件多播

就是局域网内多播。

由于多播地址只有 23 位，而可分配的 IP 地址有 28 位，因此 IP 地址对多播地址是多对一，需要过滤 IP。

4.7.3 网际组管理协议 IGMP 和 多播路由选择协议

(猜测不考)

4.8 虚拟专用网 VPN 和 网络地址转换 NAT

VPN：利用公用互联网作为本机构专用网的通信载体

NAT：在局域网内使用本地地址的主机对外通信时通过 NAT 把 IP 地址转换成全球 IP 地址。

4.9 多协议标签交换 MPLS

IP 增强技术，标签值替代 IP 查询转发表。

特点

1. 支持面向连接的服务质量
2. 支持流量工程，均衡网络负载
3. 有效支持 VPN

4.10 软件定义网络 SDN

把网络的控制层面和数据层面分离，让 控制层面 利用软件 控制 数据层面的设备。

第五章 运输层

概念

1. 运输层为相互通信的应用进程提供逻辑通信
2. 端口和套接字的意义
3. 无连接的 UDP 的特点
4. 面向连接的 TCP 的特点
5. 在不可靠的网络上实现可靠传输的工作原理，停止等待协议和 ARQ 原理
6. TCP 的滑动窗口、流量控制、拥塞控制、连接管理

5.1 运输层协议概述

5.1.1 进程之间的通信

网络层为**主机**之间通信提供服务，而**运输层**为**进程**之间通信提供服务。

(TCP) 负责差错检测。(UDP 仍然不可靠)

有复用、分用功能。

UDP 不需要先建立连接，TCP 则是面向连接的。

复用

所有进程都可以通过运输层传输信息，称为复用。

分用

运输层 收到 发送给各个应用进程的数据 后，分别交付给指明的各应用进程，就是分用。

5.2 UDP

1. 无连接的
2. 尽最大努力的交付
3. 面向报文
4. 没有拥塞控制

5. 支持一对一、一对多、多对一、多对多。

6. 首部开销小 8 字节

5.3 TCP

1. 面向连接的

2. 每条连接只有两个端点。故只能是一对一的。

3. 可靠交付

4. 全双工通信

5. 面向字节流

5.4 可靠传输的工作原理

1. 停止等待协议

发送一个分组后，在超时时间内等待确认，若未收到则重传。

2. 连续 ARQ 协议

发送窗口向前滑动，发送窗口内的分组都可以发送，收到一个确认，发送窗口就向前滑动。

累计确认：对按序到达的最后一个分组发送确认，发送方滑动窗口前移到确认分组前面。

如果中间有一个丢失了，丢失分组后面全部重传。

5.7 流量控制

控制发送方的速率不要太快，要让接收方来得及接收。

发送窗口不能大于接收窗口。单位是**字节**。

seq：数据报文段序号的初始值。

ACK = 1，固定的，标识确认报文段。

ack：最后一个确认的分组的序号。

rwnd：接收窗口的大小。

5.8 拥塞控制

防止过多的数据注入到网络中。使路由器/链路不至于过载。

四种算法

1. 慢开始

由小到大逐渐增大注入网络的数据字节。

每次传输量翻倍（相比于上一次传输）或增加 SMSS。

慢开始门限 ssthresh/cwnd 拥塞窗口

cwnd < ssthresh 慢开始算法

cwnd > ssthresh 拥塞避免算法

cwnd = ssthresh 慢开始算法或拥塞避免算法

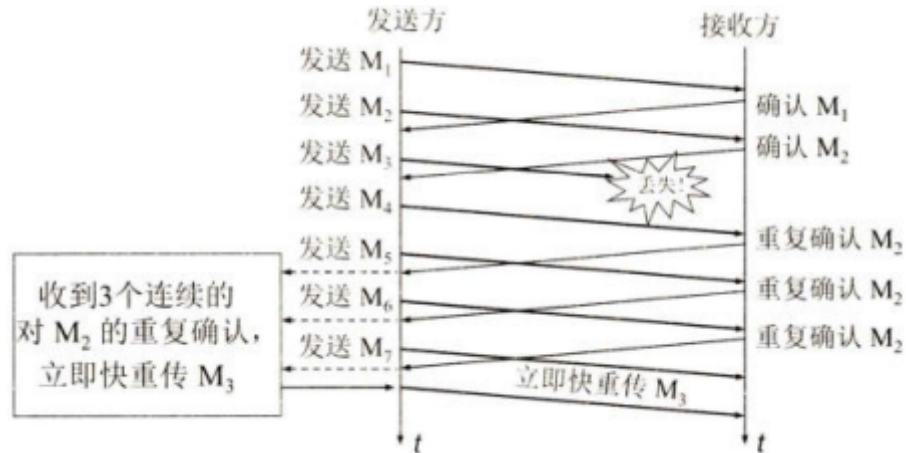
2. 拥塞避免

每经过一个往返时间 RTT，发送方的拥塞窗口 cwnd 大小加 1。也称加法增大。

3. 快重传

让发送方尽早知道发生了个别报文段的丢失。

一连收到 3 个重复确认，则认为没有网络拥塞，立即重传丢失的报文。

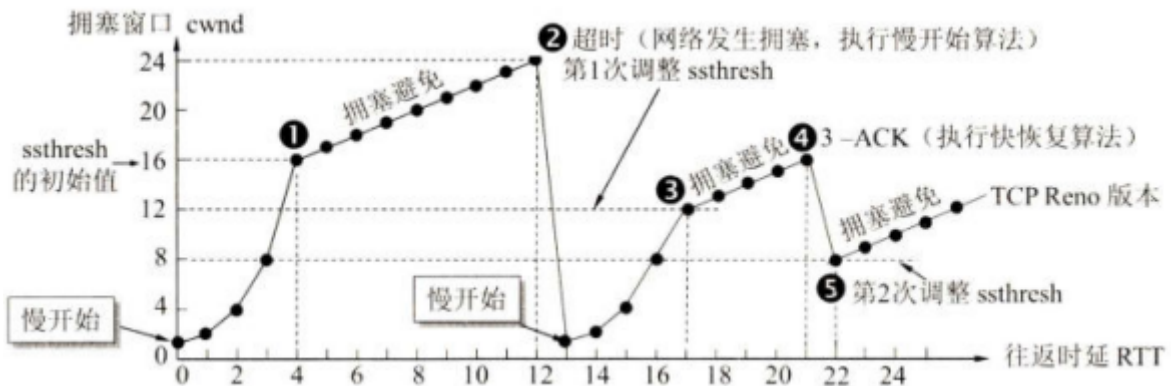


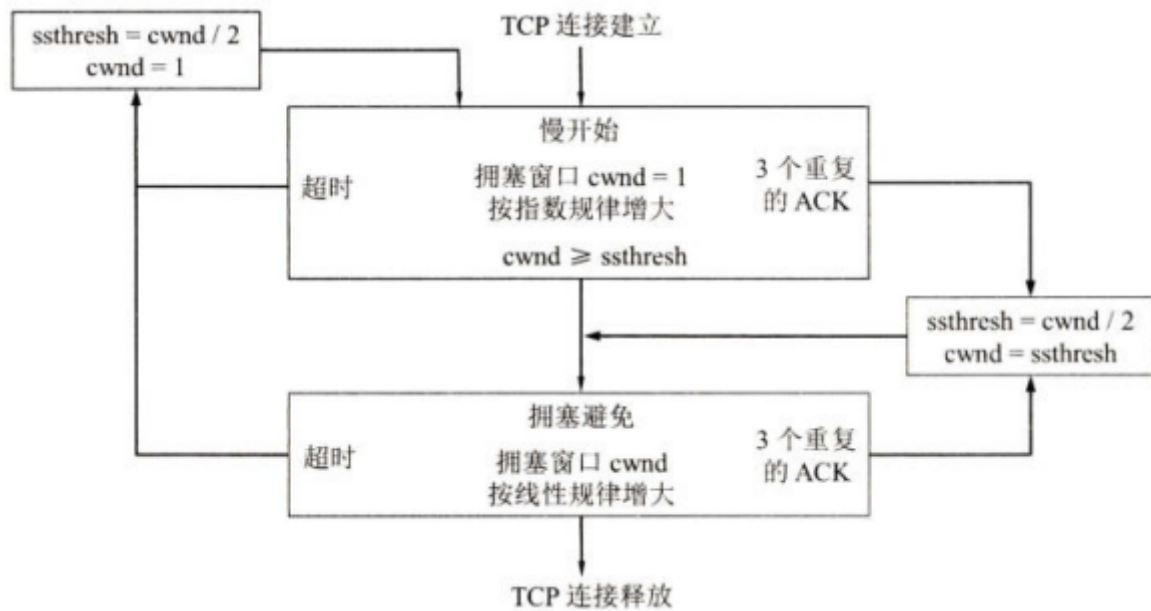
4. 快恢复

$ssthresh = cwnd = cwnd / 2$;

也就是慢开始门限和拥塞窗口都为原来拥塞窗口大小的一半。

然后立刻开始拥塞避免。

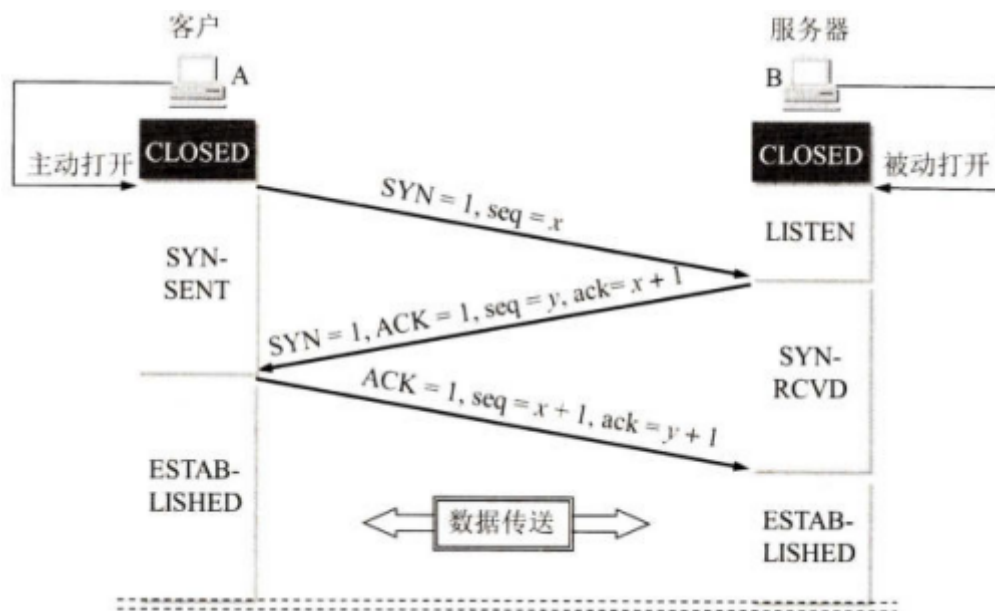




5.9 连接管理

5.9.1 连接建立

三报文握手。



客户端：

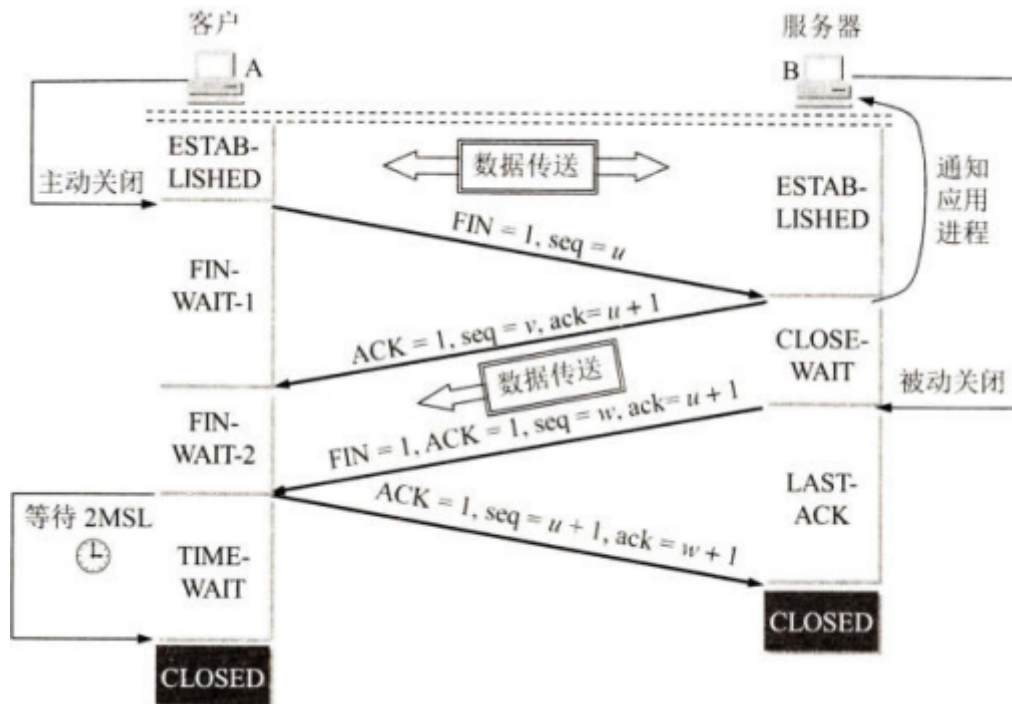
1. 发出连接请求报文段
2. 收到确认报文段
3. 发送确认的确认

服务端：

1. 接收到连接请求报文段
2. 发送确认报文段
3. 收到确认的确认

5.9.2 连接释放

四次挥手。



5.9.3 TCP 有限状态机

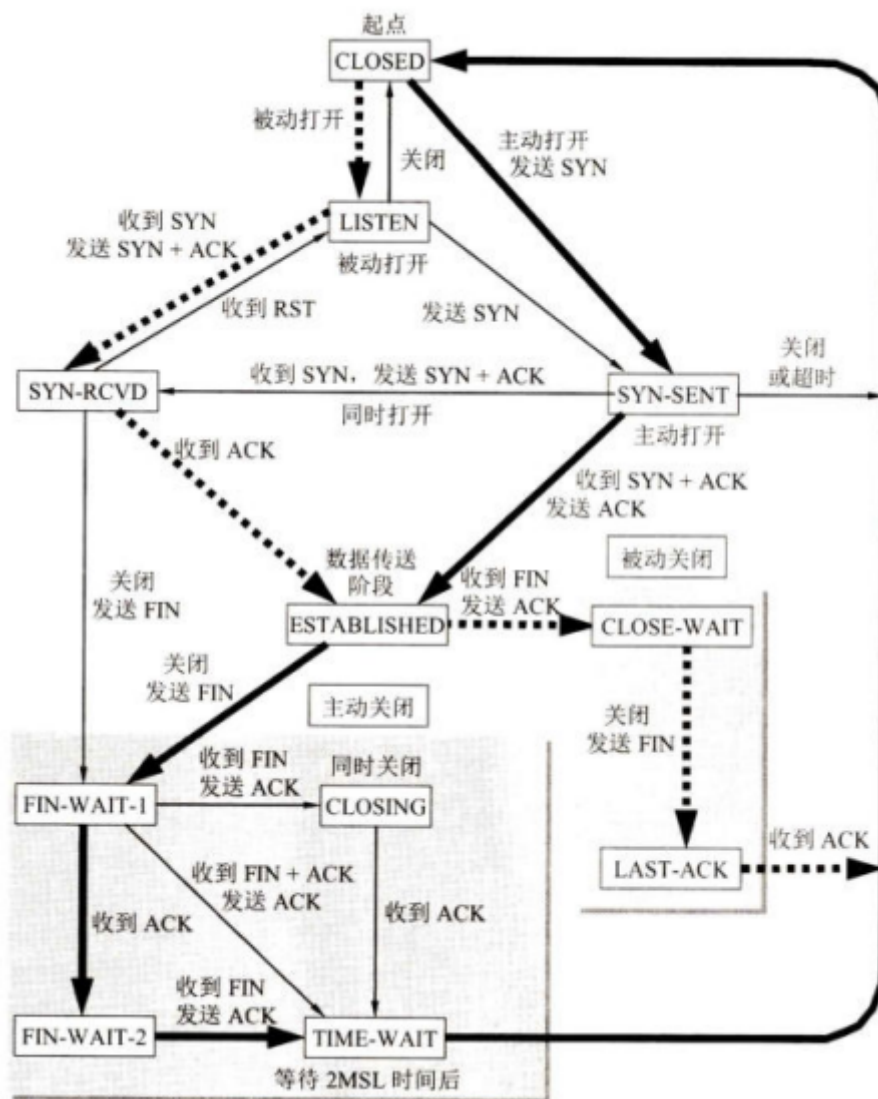
方框 是 TCP 可能的状态。

大写英文字符串 是 TCP 连接状态名。

粗实线 表示对客户进程的正常变迁。

粗虚线 对服务器进程的正常变迁。

细线 表示异常变迁。



第六章 应用层

定义的是应用进程之间的通信规则。

6.1 域名系统 DNS

把域名转换成 IP 地址。

6.1.2 域名结构



三类顶级域名

1. 国家顶级域名
2. 通用顶级域名
3. 基础结构域名

6.1.3 域名服务器

四种域名服务器

1. 根域名服务器
2. 顶级域名服务器
3. 权限域名服务器
4. 本地域名服务器

查询方式：

1. 递归查询，如果主机询问的本地域名服务器不知道被查询的域名的 IP 地址，则本地域名服务器就以 DNS 客户的身份，向其他根域名服务器继续发送查询请求报文。返回值要么是正确的 IP 地址，要么报错表示未查到。
2. 迭代查询，根域名服务器收到本地域名服务器的请求报文后，要么返回正确的 IP 地址，要么告诉本地域名服务器，下一步应该向哪个顶级域名服务器发送请求，如果顶级域名服务器仍然查不到，则需要把需要查询的权限域名服务器告诉本地域名服务器。

6.2 文件传送协议

6.2.1 FTP 概述

服务器端口 21。

步骤

1. 打开端口（熟知端口 21，可以修改）
2. 等待客户进程发起请求
3. 启动从属进程处理请求
4. 回到等待状态

控制连接 在整个会话期间一直保持打开。传送的是文件传送请求

数据传送连接 当传送文件时建立，传送完则关闭。端口 20。

6.5 电子邮件

协议

1. SMTP 简单邮件传送协议
 1. 连接建立
 2. 邮件传送
 3. 连接释放
2. 互联网文本报文格式
3. MIME 通用互联网邮件扩充

要点归纳

三种数据交换方式

1. 电路交换——比特流连续地直达终点
2. 报文交换——报文发送到相邻节点，再通过转发表转发。
3. 分组交换——分组发送到相邻节点，再通过转发表转发。

若传送时间 远大于 建立连接时间，则电路交换快。

分组交换则应对突发数据时，可以保持较高的信道利用率。

计算机网络定义

计算机网络（简称为**网络**）由若干节点 (node) 和连接这些节点的链路 (link) 组成。一些**相互连接的**、以**共享资源**为目的的、自治的计算机的集合。

（互联网的两个特点：连通性和共享）

计算机网络类型

1. 按照作用范围

1. 广域网 WAN (Wide Area Network)

作用范围：几十到几千公里

2. 城域网 MAN (Metropolitan Area Network)

范围：一个城市

3. 局域网 LAN (Local Area Network)

4. 个人区域网 PAN (Personal Area Network)

2. 按照网络使用者

1. 公用网

电信公司出资建造的大型网络。缴费即可使用。

2. 专用网

满足本单位特殊需求的网络，不向本单位外的人提供服务。

3. 把用户接入互联网的网络

称为接入网 AN (Access Network)，称为 **本地接入网** 或 **居民接入网**

网络性能指标

1. 速率

单位 bit/s

2. 带宽

两个意义：

1. 频带宽度

2. 某通道传送数据的能力。单位是 bit/s 是计算机网络中采用的主要的意义。

3. 吞吐量

单位时间内通过某个网络的实际数据量。

4. 时延

网络时延由

1. 发送时延——所有 bit 发出的时间，即第一个 bit 发出开始，到最后一个 bit 发出为止的一段时间

2. 传播时延——一个 bit 在链路上传输的时间

3. 处理时延——主机或路由器收到分组时需要处理分组

4. 排队时延——分组在路由器输入队列中排队

组成

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据帧长度}(\textit{bit})}{\text{发送速率}(\textit{bit/s})} \quad (11)$$

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度}(\textit{m})}{\text{电磁波在信道上的传播速率}(\textit{m/s})} \quad (12)$$

5. 时延带宽积

$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延} \times \text{带宽} \quad (13)$$

表示 如果发送端不断地发送 bit，当第一个 bit 到达终点时，发送端已经发送的 bit 数。

6. 往返时间 RTT

有效数据率 可以理解为 计算一段时间的总速率。

假设 主机 A 向 主机 B 发送报文，当 B 接收完报文后，发送一个确认，A 收到确认后才会继续发送，则

$$\text{有效数据率} = \frac{\text{数据长度}}{\text{发送时间} + \textit{RTT}} \quad (14)$$

发送时间就是发送时延，是第一个 bit 到最后一个 bit 发送之间的时间，RTT 则是往返时间，包含了最后一个 bit 传播的时间和确认传播的时间。那么 发送时间 + RTT 就是总时间。

7. 利用率

两种利用率

1. 信道利用率

指的是某信道有数据通过的时间的比例。并非越高越好，太高会导致堵塞。

2. 网络利用率

全网络的信道利用率的加权平均值。

如下公式：

$$D \text{ (当前网络时延)} = \frac{D_0 \text{ (网络空闲时延)}}{1 - U \text{ (现在的网络利用率)}} \quad (15)$$

拥有较大主干网的 ISP 的网络利用率一般不超过 50%，超过了则要扩容。

网络协议的三要素

1. 语法

数据和控制信息的结构或格式。

2. 语义

发出何种控制信息，作出何种响应，完成何种动作。

3. 同步

事件实现顺序的详细说明。

五层协议模型各层功能

五层协议是原理性的，如下

5. 应用层

最高层。

任务：通过应用进程间的交互 来完成 特定网络应用。

定义 了 应用进程间通信和交互的规则。

PDU 为 **报文**。

4. 运输层

为主机**进程之间**通信提供服务。

提供 **两台主机进程之间** 的**通用数据传输**。

多个应用可以使用同一个运输层，所以有复用分用的功能。

保证了可靠性。（TCP 是可靠的：停止等待协议，连续 ARQ 协议）

主要使用以下协议

1. TCP

PDU 是 **报文段**。

2. UDP

PDU 是 **用户数据报**。

PDU 是 **元组**。

3. 网络层

为**主机之间**通信提供服务。

发送报文分组。

网络层的协议是 无连接的 网际协议 IP。

PDU 是 **IP 数据报**。二进制反码求和检验。

网络层，网际层，IP 层 是 同义词。

2. 数据链路层

是链路上的协议。用来操作链路。

数据链路层将网络层的 IP 数据报封装成 **帧**。

可以检错纠错。帧差错检测 CRC。

PDU 是 **帧**。

1. 物理层

传输的单位是 bit。也就是 0、1。

考虑发送的电压，接收方的识别。确定电缆插头的引脚，以及引脚如何连接。但不包括物理传输媒体（也就是硬件）。

PDU 是 **比特**。

数据报/ IP 数据报 就是 **分组**，但用户数据报不是。

PDU 指的是 **协议数据单元**，是对等层次之间传送的数据单位。

数据传输方式

1. 单向通信

单工通信，信息只沿一个方向。例如广播。

2. 双向交替通信

半双工通信，信息在同一时刻只能沿一个方向。一方发送，一方接收。

3. 双向同时通信

全双工通信，双方可以同时发送和接收信息。

单向通信的信道最少，只需要一条。半双工和全双工都需要两条信道，一个方向一条。双向同时通信的传输效率最高。（也就是传输数据的量最多）

比特率/波特率

比特速率就是信道单位时间内传输比特数，波特速率就是单位时间内传输的码元数，一码元可以是很多个比特。

奈奎斯特准则/香农公式

奈氏准则

在带宽为 W Hz 的低通信道中，若不考虑噪声影响，则码元传输的最高速率是 $2W$ (Baud/s)。传输速率超过这个上限，就会出现严重的码间串扰，使得接收端不可能判决码元。

其中带宽的意义是：频带宽度，也就是信号的频率范围。

信噪比

定义：信号的平均功率和噪声的平均功率比。

$$\text{信噪比}(dB) = 10 \log_{10} \frac{S}{N} (dB) \quad (16)$$

信噪比本身是 S/N ，但如果使用 dB 为单位，则需要用以上公式转换。

香农公式

$$C \text{ (极限信息传输速率)} = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) (bit/s) \quad (17)$$

其中 W 为信道频带宽度，单位为 Hz， S/N 为信噪比。

这是理论极限速率。

意义：只要信息传输速率小于极限信息传输速率，就一定存在某种方法实现无差错传输。

提高信息传输速率

提高信息传输速率，可以提高每个码元携带的比特数，若一个码元含有 K bit，则信号需要有 2^K 种离散值，但相应的，相较于一个码元只含有 1 bit，信息传输速率提高了 K 倍。

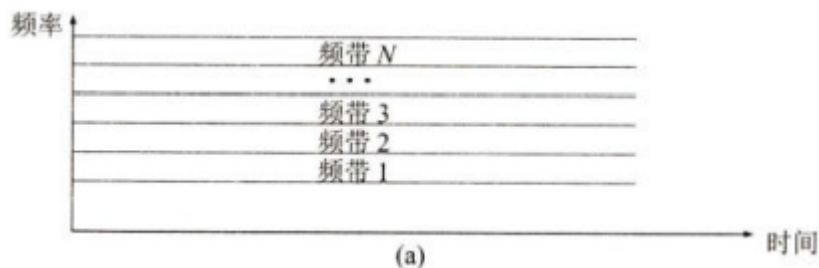
如果一个码元含有的比特数越多，则需要的离散值也就越多，对于接收端解析码元难度也就越大（可能会出现错误），还需要信噪比达到一定的数值，否则干扰会使得解码难度增大甚至不可能。

奈氏准则鼓励创新更好的编码技术，相当于给了极限信息传输速率的下限，而香农公式则给出了极限信息传输速率的上限。

信道复用技术

1. 频分复用 FDM

把各路信号分别搬移到适当的频率位置，彼此不产生干扰。频分复用的各路信号在同一时间占用不同的带宽资源。

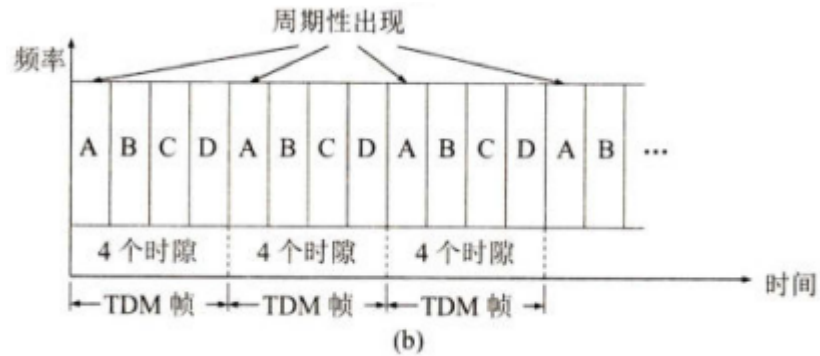


频分多址 FDMA

利用频分复用，N 个用户各使用一个频带，或让更多的用户轮流使用 N 个频带。

2. 时分复用 TDM

所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度。



时分多址 TDMA

多个用户轮流使用 N 个时隙。

空闲的时隙被浪费，信道利用率不高。

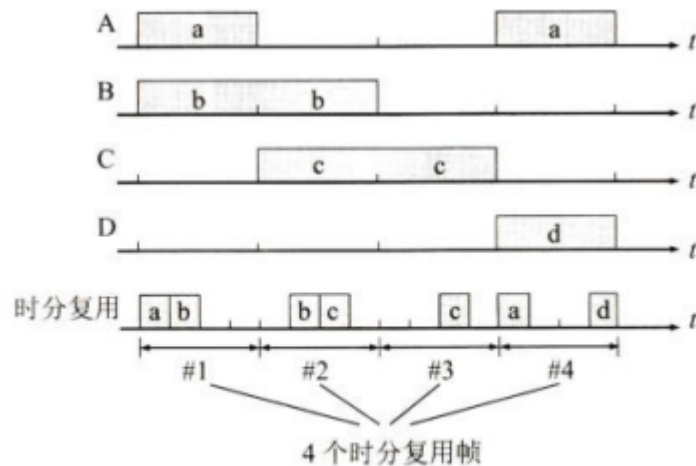


图 2-17 时分复用可能会造成线路资源的浪费

3. 统计时分复用 STDM (异步时分复用)

数据随时发往集中器的输入缓存，集中器按顺序依次扫描输入缓存，把缓存中的输入数据放入 STDM 帧中。当一个帧数据满了则发送出去。

提高了信道利用率。

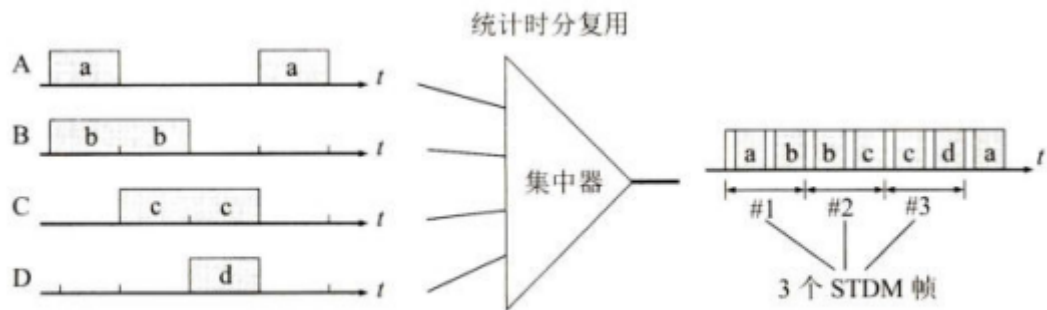


图 2-18 统计时分复用的工作原理

4. 波分复用 WDM

就是光的频分复用。用一根光纤传输多个频率相近的光载波信号。因为光载波频率一般很高，所以习惯上使用波长来表示光载波，因此这种复用称为波分复用。

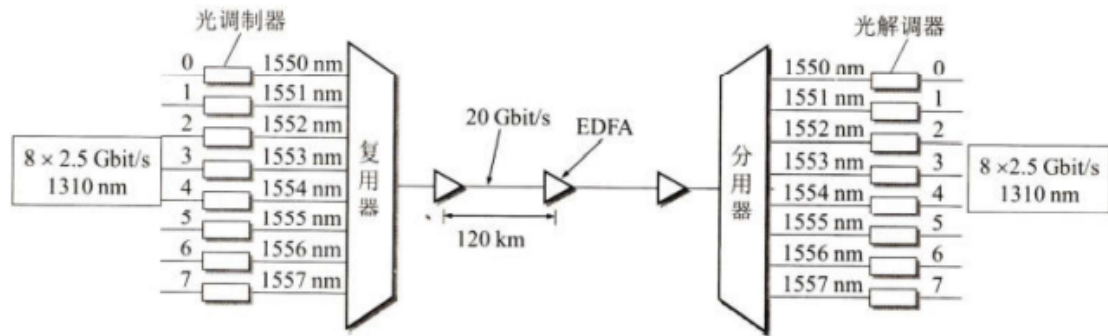


图 2-19 波分复用的概念

5. 码分复用 CDM

每个用户可以在同样的时间使用同样的频带。各用户使用经过特殊挑选的不同码型，不会互相干扰。

有很强抗干扰能力，频谱类似白噪声，不易被发现。

码分多址 CDMA

码分复用信道为多个不同地址用户共享。

每个站有一个自己的唯一的 m bit 码片序列，如果它需要发送 $\text{bit} = 1$ ，则发送自己的码片序列，如果 $\text{bit} = 0$ ，则发送其码片序列的二进制反码。

这样发送，是将 1 bit 的信息转换成 m bit 了，故其实际数据率变成了 m 倍，频带宽度也提高到原来的 m 倍。这叫 **扩频通信**。上面这种方法称为 **直接序列扩频 DSSS**。另一种是 **跳频扩频 FHSS**。

CDMA 系统的重要特点

- 每个站的码片序列不仅各不相同，而且必须相互 **正交**。实际运用使用 **伪随机码序列**。

正交 即 **规格化内积** 都是 0。

规格化内积为 0：

$$\vec{S} \cdot \vec{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (18)$$

就是对应项相乘后求和。

(n 维空间中最多有 n 个向量线性无关，因此最多 n 个正交。——线代)

当对 S 站的信息解码时，只需要把 S 站的码片序列与收到的信号作规格化内积。

解析（不用背，原理性的）：

收到的信号可以分解为 $\mathbf{S}_x + \mathbf{T}_x$ ，其中 $\mathbf{S}_x$ 为 S 站发送的序列， $\mathbf{T}_x$ 则必与 $\mathbf{S}$ 正交，不必考虑。

则 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}_x$ 。

若 $x = 1$ ，则对应项必然相等且全是 1 或 -1，此时相乘必然全是 1。再除以 n （维数），则必然得 1。

若 $x = 0$ ，则对应项必然相反，此时相乘则全是 -1。除以维数必然得 -1。

复用器和分用器总是成对使用。

停止等待协议原理

发送一个分组后，在超时时间内等待确认，若未收到则重传。

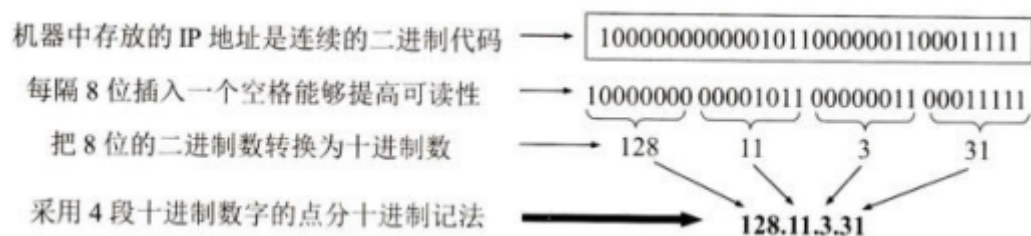
IP 地址分类/子网

IP 地址表示

是给连接到互联网的每台主机（或路由器）的每一个接口分配一个全世界范围内唯一的 32 位的标识符。

现在由 **互联网名字和数字分配机构 ICANN** 分配。

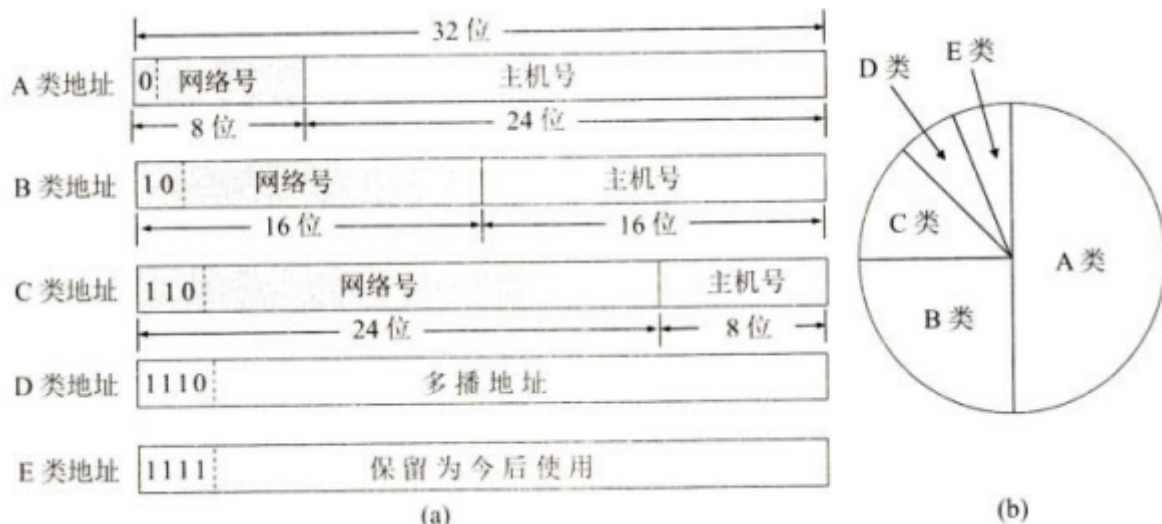
每八位换成十进制，然后中间用 **点** 隔开，称为 **点分十进制记法**。



IP 地址由网络号和主机号组成。其中网络号为 n 位，主机号为 $32 - n$ 位。

IP 地址分类

1. A 类， $n = 8$ ，占 50%。
2. B 类， $n = 16$ ，占 25%。
3. C 类， $n = 24$ ，占 12.5%。
4. D 类，多播地址，占 6.25%。
5. E 类，保留地址，占 6.25%。



网络号字段 就是网络号里前几位，如上图，它标识了 IP 地址是哪类地址。

A 类 IP 地址中，网络号全为 0 的表示“本网络”。网络号为 127（即 0111 1111）的保留作为本地软件环回测试本主机进程之间通信使用。因此 A 类地址网络号只有 126 个。主机号中全 0 或者全 1 的一般不指派。全 0 代表主机所连接到的网络地址。全 1 代表该网络上所有的主机。主机数 $2^{24} - 2$ 。

B 类地址可指派的网络数为 2^{14} ，16384。主机数 $2^{16} - 2$ 。

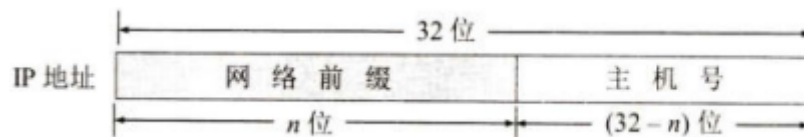
C 类地址可指派的网络数 2^{21} 。主机数 $2^8 - 2$ 。

一般不指派的 IP 地址：

网络号	主机号	源地址	目的地址	意义
0	0	√	×	本网络本主机
0	X	√	×	本网络主机号为 X 的主机
全 1	全 1	×	√	只在本网络上广播
Y	全 1	×	√	在网络号为 Y 的网络上广播
127	非全 0 或全 1 的任何数	√	√	本地软件环回测试

无分类编址 CIDR

CIDR 把网络号变为网络前缀，剩下的部分仍然是主机号。网络前缀的位数不固定，是 0~32 之间任意值。CIDR 也称 **构造超网**。



CIDR 记法 / 斜线记法

在地址后面加一个斜线，斜线后面注明网络前缀的位数。

例如 128.14.35.7/20，表示前二十位是网络前缀。

地址块

CIDR 编址中，把所有网络前缀相同的地址集合称为 **地址块**。

最小地址是地址块中主机号全为 0 的。

最大地址是主机号全为 1 的。

这两个地址一般不指派。

我们可以使用最小地址和前缀位数指明地址块，例如 128.14.0.0/16。0 可以省略，变为 128.14/16。

采用 CIDR 后，一个 IP 地址已经不能知道是分类的地址还是 CIDR 地址了。

掩码

地址掩码用于计算网络前缀的长度。既可以计算 CIDR 地址的网络前缀，也可以计算分类地址的网络前缀。

地址掩码也称为子网掩码，或者简称 **掩码**。

掩码中 1 的个数就是网络前缀的长度。

例如 /20 地址块的掩码是：

11111111 11111111 11110000 00000000

|----- 20 位 -----|

20 个连续的 1，和 12 个连续的 0。

掩码的 CIDR 记法是 255.255.240.0/20。

把二进制的地址和掩码按位与运算，即可得到网络前缀。

三个特殊的地址块

1. $n = 32$ ，用于主机路由。
2. $n = 31$ ，只有两个 IP 地址，主机号分别为 0 和 1。用于点对点链路。
3. 0.0.0.0/0，用于默认路由。

IP 地址特点

1. 由网络前缀和主机号组成。

分等级的结构好处：

1. IP 地址管理机构只需要分配网络前缀，主机号由分配到网络前缀的单位自行分配。
2. 路由器根据网络前缀进行转发，减少转发表的占用空间和查找时间。
2. IP 地址是标志一台主机和一条链路的接口。
3. 用转发器/交换机连接的多个局域网仍是一个网络，不同网络之间通过路由器连接。同一个网络的网络前缀必须相同。
4. IP 地址之间是平等的，互联网平等对待每个 IP 地址。

邮件收发协议

1. SMTP 简单邮件传送协议
 1. 连接建立
 2. 邮件传送
 3. 连接释放
 2. 互联网文本报文格式
 3. MIME 通用互联网邮件扩充
-

协议与服务

协议可以向上一层提供服务，协议依赖于下一层所提供的服务。

协议是对等实体间通行的规则，服务是下层向上层通过接口提供的。

协议是水平的，服务是垂直的。

协议必须考虑所有的不利条件，而不能假设一切都是正常和非常理想的。

直接交付/间接交付

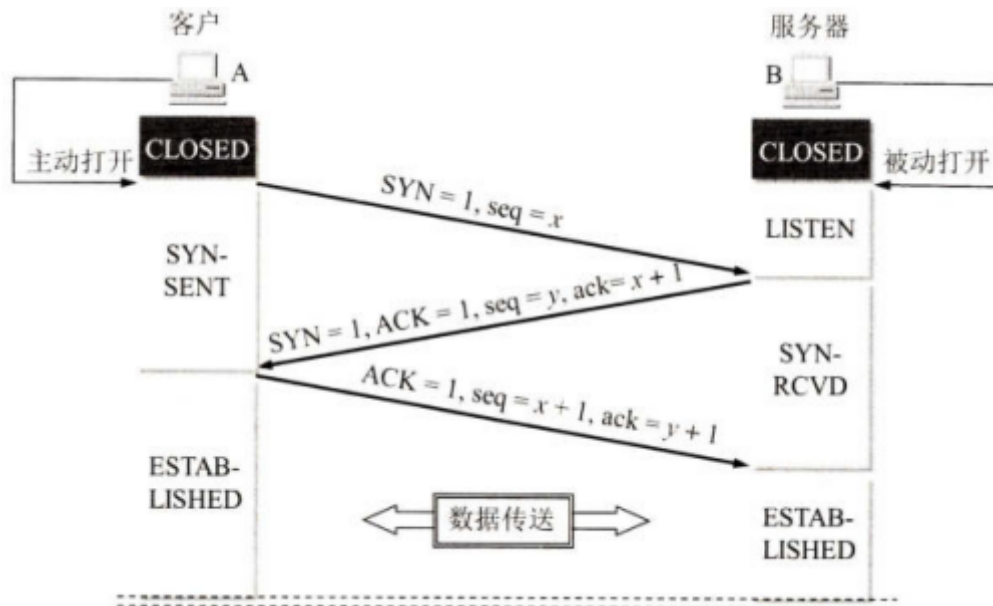
直接交付：当源主机和目的主机在同一个网络上，则不需要经过路由器，就可以发送信息，称为直接交付。

间接交付：当源主机与目的主机不在同一个网络上，源主机将信息发送给路由器，路由器查找转发表，并把信息传递给下一个路由器，直到信息传到目的主机所连接的路由器，此时这个路由器再将信息传递给目的主机。

TCP 运输连接中的三个阶段

连接建立

三报文握手。



客户端：

1. 发出连接请求报文段
2. 收到确认报文段
3. 发送确认的确认

服务端：

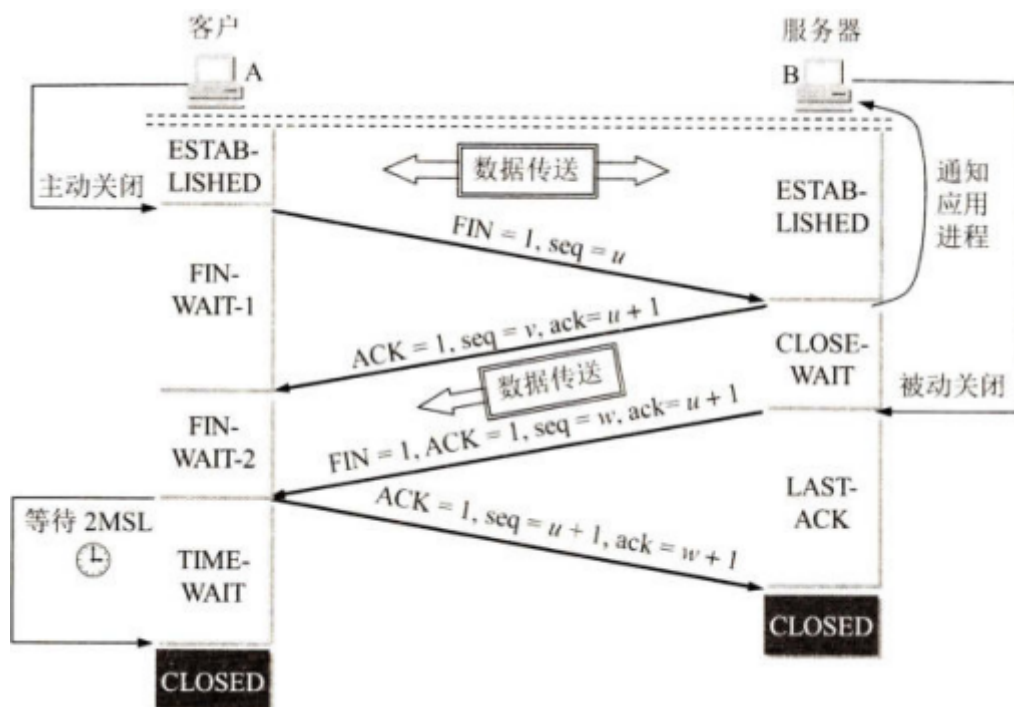
1. 接收到连接请求报文段

2. 发送确认报文段
3. 收到确认的确认

数据传送

连接释放

四次挥手。



分组交换的特点/不足

分组交换

采用 **存储转发** 技术。

发送的整块数据称为 **报文**。

较长报文划分为一个个更小的 **等长** 的 **数据段**。

每个段前加上 一些必要的控制信息 组成的 **首部**，就形成了 **分组**。

分组也称为 **包**。

首部也可以称为 **包头**。

包头使得分组独立地选择传输路径，正确地交付到分组传输的终点。

核心部分的 **主机** 是 **为用户进行信息处理的**。

路由器 则 **进行分组交换**。

路由器接收到分组，检查分组首部，查找转发表，通过合适的接口转发出去。或许有时会经过几十个不同的路由器。因此路由器之间必须经常交换彼此掌握的路由信息，更新路由转发表。

注意 路由器暂时存储的是短分组，不是整个报文。这保证了较高的交换速率。

主要优点

1. 高效——动态分配传输带宽，逐段占用通信链路
2. 灵活——为每个分组选择合适的转发路由
3. 迅速——以分组为单位，不先建立连接（起点与终点间）就可以发送
4. 可靠——保证可靠性的网络协议，分布式多路由的分组交换网

不足

1. 时延
2. 无法确保所需带宽
3. 分组携带的包头造成一定的开销
4. 分组交换网需要专门的管理和控制机制

判断是否误码

数据链路层的帧差错检测

比特差错的检测使用 **循环冗余检验 CRC**，发送端和接收端商定一个 $(n+1)$ 位的除数 P ，发送端计算比特流左移 n 位后除以 P 的余数（二进制模 2 除法）并插入到比特流后面，接收方对比特流做二进制模 2 除法，必然得到无余数的结果。若有余数则认定出现差错，丢弃这个帧。

出现差错而正好使得余数为 0 的概率极小，可以近似认为不存在。

二进制模 2 除法示例：

$$\begin{array}{r} \text{P (除数)} \rightarrow 1101 \quad \overline{) 101001000} \quad \begin{array}{l} 110101 \leftarrow Q \text{ (商)} \\ 101001000 \leftarrow 2^n M \text{ (被除数)} \end{array} \\ \underline{1101} \\ 1110 \\ \underline{1101} \\ 0111 \\ \underline{0000} \\ 1110 \\ \underline{1101} \\ 0110 \\ \underline{0000} \\ 1100 \\ \underline{1101} \\ 001 \leftarrow R \text{ (余数), 作为 FCS} \end{array}$$

生成多项式的概念：

对于除数 P ，将二进制 P 的每一位对应多项式的系数，最低位为 0 次。其多项式即生成多项式。

若 $P=1101$ ，则 $P(X)=X^3+X^2+1$ 。

网络层 IP 数据报的检验

首部检验和

只检验首部，不检验数据部分。检验方法是二进制反码求和。发送端将结果写入检验和，接收端对包括检验和在内的首部计算二进制反码求和，其结果必为 0，否则出错。

方法如下：

0+0=0 0+1=1 1+1=10

低位进位到高位，最高位进位到最低位。

出错则丢弃数据报。

码分多址 CDMA

码分复用信道为多个不同地址用户共享。

每个站有一个自己的唯一的 m bit 码片序列，如果它需要发送 bit = 1，则发送自己的码片序列，如果 bit = 0，则发送其码片序列的二进制反码。

这样发送，是将 1 bit 的信息转换成 m bit 了，故其实际数据率变成了 m 倍，频带宽度也提高到原来的 m 倍。这叫 **扩频通信**。上面这种方法称为 **直接序列扩频 DSSS**。另一种是 **跳频扩频 FHSS**。

CDMA 系统的重要特点

- 每个站的码片序列不仅各不相同，而且必须相互 **正交**。实际运用使用 **伪随机码序列**。

正交 即 **规格化内积** 都是 0。

规格化内积为 0：

$$\vec{S} \cdot \vec{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (19)$$

就是对应项相乘后求和。

(n 维空间中最多有 n 个向量线性无关，因此最多 n 个正交。——线代)

当对 S 站的信息解码时，只需要把 S 站的码片序列与收到的信号作规格化内积。

解析（不用背，原理性的）：

收到的信号可以分解为 $S_x + T_x$ ，其中 S_x 为 S 站发送的序列， T_x 则必与 S 正交，不必考虑。

则 $S \cdot S_x$ 。

若 $x = 1$ ，则对应项必然相等且全是 1 或 -1，此时相乘必然全是 1。再除以 n（维数），则必然得 1。

若 $x = 0$ ，则对应项必然相反，此时相乘则全是 -1。除以维数必然得 -1。

拥塞控制协议

防止过多的数据注入到网络中。使路由器/链路不至于过载。

四种算法

1. 慢开始

由小到大逐渐增大注入网络的数据字节。

每次传输量翻倍（相比于上一次传输）或增加 SMSS。

慢开始门限 $ssthresh/cwnd$ 拥塞窗口

$cwnd < ssthresh$ 慢开始算法

$cwnd > ssthresh$ 拥塞避免算法

$cwnd = ssthresh$ 慢开始算法或拥塞避免算法

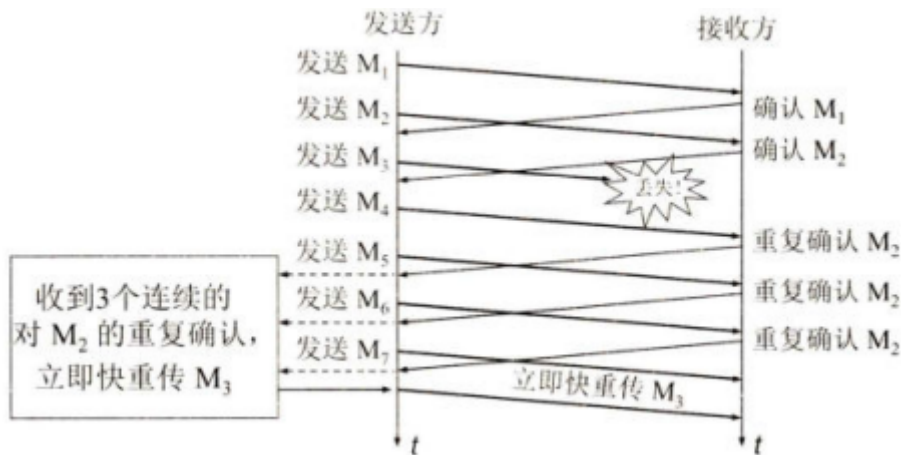
2. 拥塞避免

每经过一个往返时间 RTT，发送方的拥塞窗口 $cwnd$ 大小加 1。也称加法增大。

3. 快重传

让发送方尽早知道发生了个别报文段的丢失。

一连收到 3 个重复确认，则认为没有网络拥塞，立即重传丢失的报文。



4. 快恢复

$ssthresh = cwnd = cwnd/2$;

也就是慢开始门限和拥塞窗口都为原来拥塞窗口大小的一半。

然后立刻开始拥塞避免。

