

# 链路层

功能：点到点数据包传输

依托的物理层信道：

- 点对点信道：一对一
- 广播信道：一对多

基本概念：

- 链路
  - 无源的点到点的物理线路段，中间没有任何其他的交换结点。
  - 一段链路只是一条通路的组成部分。
- 数据链路
  - 物理线路 + 通信协议（硬件和软件）
- 传送单位：帧

## 三个基本问题

- 封装成帧
  - 辅助接收端物理层检测包开始和结束
- 透明传输
  - 处理报文内和包开始标志或结束标志相同的数据片段传输问题
- 差错控制
  - 实现无差错接受

封装成帧

- 封装成帧 (framing)——帧定界
  - 数据的前后添加首部和尾部，确定帧的界限。
  - 最大传送单元 MTU：规定了所能传送的帧的数据部分长度上限。
- 帧定界符
  - 控制字符 SOH：放在一帧的最前面，表示帧的首部开始。
  - 控制字符 EOT：放在一帧的末尾，表示帧的结束。

透明传输

- 目标：无论发送什么样的比特组合的数据，这些数据都能够按照原样没有差错地通过这个数据链路层。
- 用“字节填充”或“字符填充”法解决透明传输的问题
  - 在数据部分的 EOT 或 SOH 之前加入 ESC 字节填充

差错检测

- 误码率 BER
  - 一段时间内，传输错误的比特数占所传输比特总数的比率
  - 误码率受信噪比影响

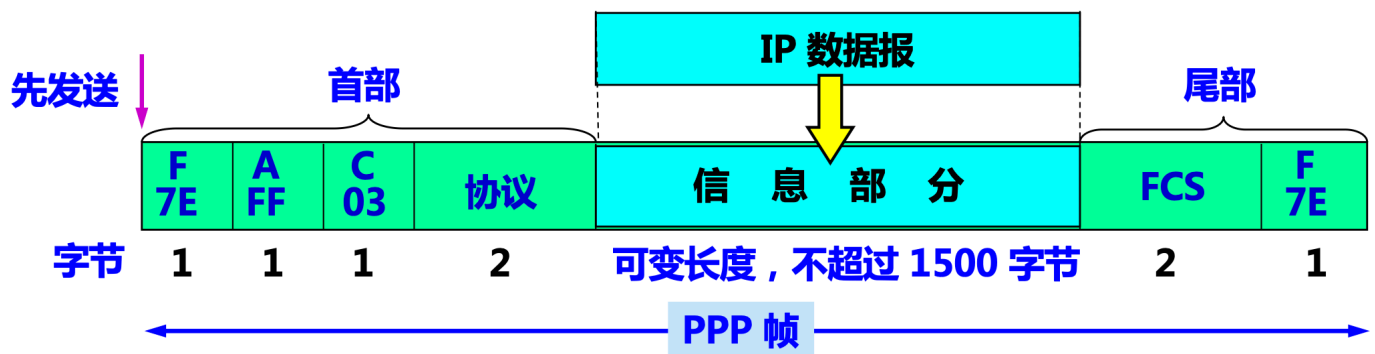
- 帧检验序列 FCS
  - 在数据后面添加上的冗余码(EDC)
- 循环冗余检验 CRC
  - 仅用 CRC 插座检测技术只能做到无差错接受
- 无差错传输
  - 要做到“可靠传输”，即发送什么就收到什么，必须再加上确认和重传机制。
- 纠错码
  - 汉明码

### 点到点链路 (PPP) —使用得最多的数据链路层协议

#### PPP协议功能

- 简单—首要
- 基本功能
  - 封装成帧
  - 透明性
  - 差错检测
- 兼容
- 不具备的功能
  - 纠错
  - 流量控制
  - .....

#### PPP协议的帧格式



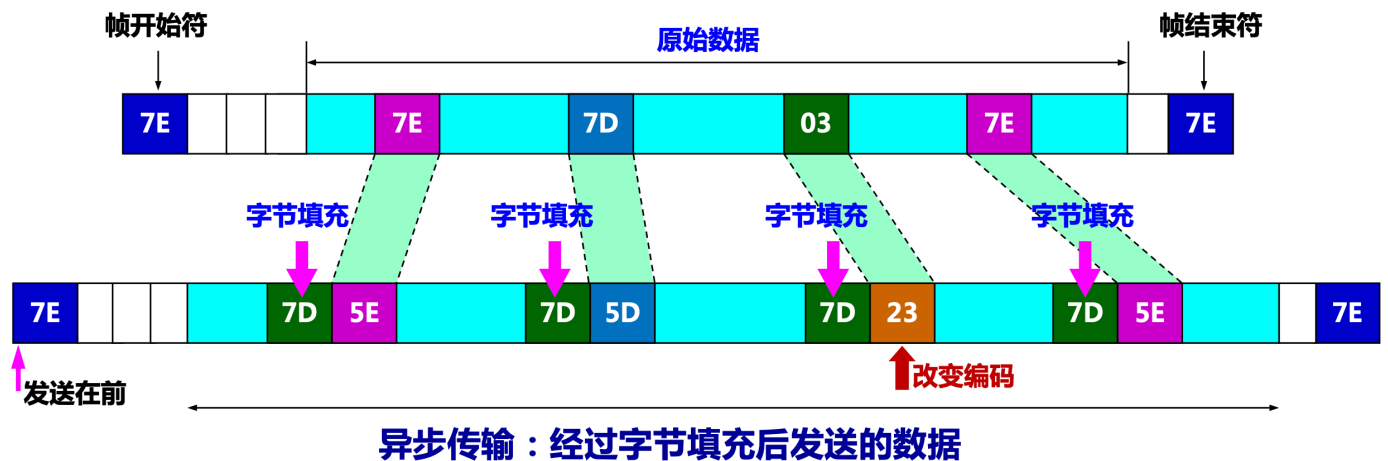
- 头部字段:
  - 标志字段 F = 0x7E (01111110)。
  - 地址字段 A 只置为 0xFF, 不起作用。
  - 控制字段 C 通常置为 0x03。
  - PPP 是面向字节的, 所有的 PPP 帧的长度都是整数字节。
- 帧结束:
  - F = 0x7E

#### 透明传输

- 异步传输：字节填充法。
- 同步传输链路（SONET/SDH 光纤链路）：零比特填充法。

当 PPP 使用异步传输时，它把转移符定义为 0x7D，并使用字节填充：

- 把信息字段中出现的每一个 0x7E 字节转变成成为 2 字节序列 (0x7D, 0x5E)
- 若信息字段中出现一个 0x7D 的字节（即出现了和转义字符一样的比特组合），则把 0x7D 转变成成为 2 字节序列 (0x7D, 0x5D)
- 若信息字段中出现 ASCII 码的控制字符（即数值小于 0x20 的字符），则在该字符前面要加入一个 0x7D 字节，同时将该字符的编码加以改变。例如，出现 0x03（在控制字符中是“传输结束” ETX）就要把它转变为 2 字节序列 (0x7D, 0x23)。



零比特填充：

信息字段中出现了和标志字段 F 完全一样的 8 比特组合 0x7E

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0

会被误认为是标志字段 F

发送端在 5 个连 1 之后填入比特 0 再发送出去

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

发送端填入 0 比特

接收端把 5 个连 1 之后的比特 0 删除

0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0

接收端删除填入的 0 比特

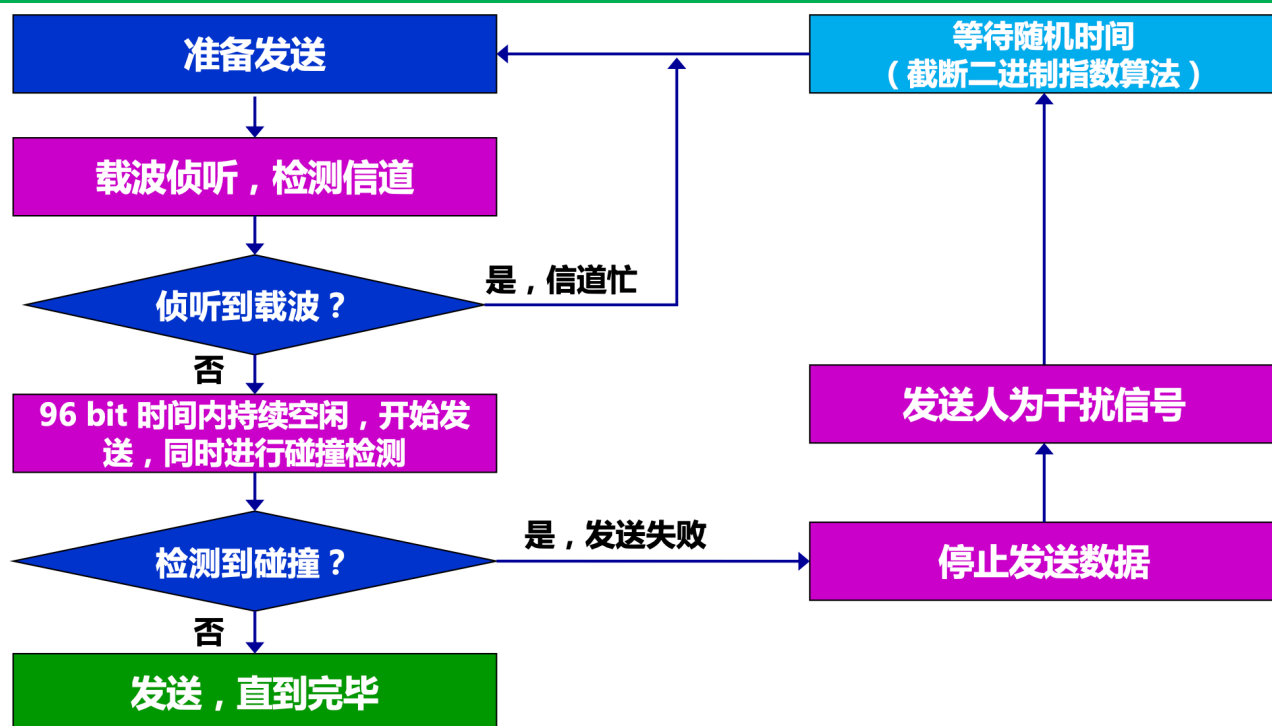
第一个无线链路协议：ALOHA

协议内容：

- 站有帧要发送，立即传送
- 冲突，间隔随机时间重发

## CSMA/CD协议：载波监听多址接入 / 碰撞检测

- 多址接入：总线型网络
  - 许多计算机以多点接入的方式连接在一根总线上。
- 载波监听：即“边发送边监听”。
  - 要发送数据之前，在发送数据之中，每个站都必须不停地检测信道。
  - 帧间最小间隔为96比特时间，在10M以太网为  $9.6 \mu s$ ，保证收到数据帧的站的接收缓存来得及清理，做好接收下一帧的准备。
- 碰撞检测
  - 适配器边发送数据，边检测信道上的信号电压的变化情况。电压摆动值超过一定的门限值时，就认为总线上至少有两个站同时在发送数据，表明产生了碰撞（或冲突）。
  - 碰撞处理：适配器立即停止发送；等待一段随机时间后再次发送。
- 工作流程



- 碰撞检测
  - 争用期
    - 以太网的端到端往返时延  $2\tau$  称为争用期，或碰撞窗口。
    - 经过争用期没有检测到碰撞，确定本次发送不会发生碰撞。
  - 对于 10 Mb/s 以太网，在争用期内可发送512 bit，即 64 字节。
    - 以太网在发送数据时，若前 64 字节没有发生冲突，则后续的数据就不会发生冲突。
    - 最短有效帧长为 64 字节。凡长度小于 64 字节的帧都是由于冲突而异常中止的无效帧，应当立即将其丢弃。
- 强化碰撞：人为干扰信号
  - 发送站检测到冲突后，立即停止发送数据帧，接着就发送 32 或 48 比特的人为干扰信号。

- B 也能够检测到冲突，并立即停止发送数据帧，接着就发送干扰信号。
- 碰撞后重传的时机
  - 采用截断二进制指数退避确定
  - 发生碰撞的站停止发送数据后，退避一个随机时间后再发送数据。

- 基本退避时间 =  $2\tau$
- 从整数集合  $[0, 1, \dots, (2k - 1)]$  中随机地取出一个数，记为  $r$
- 重传所需的时延 =  $r \times$  基本退避时间。
- 参数  $k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$
- 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告。

- 时延帧长比

## • 以太网中定义参数 $a$

- 以太网单程端到端时延  $\tau$  与帧的发送时间  $T_0$  之比

$$a = \tau / T_0$$

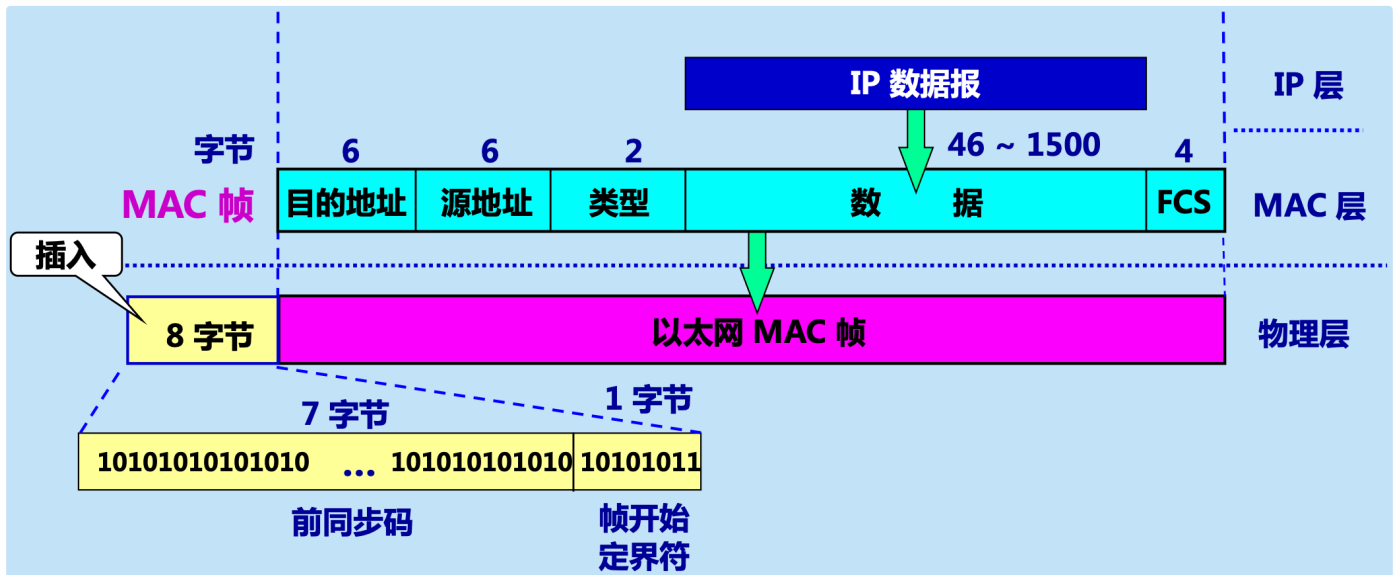
- $a \rightarrow 0$ ，表示一发生碰撞就立即可以检测出来，并立即停止发送，因而信道利用率很高。
- $a$  越大，表明争用期所占的比例增大，每发生一次碰撞就浪费许多信道资源，使得信道利用率明显降低。

## • 要求：

- 当数据率一定时，以太网的连线的长度受到限制，否则  $\tau$  的数值会太大。
- 以太网的帧长不能太短，否则  $T_0$  的值会太小，使  $a$  值太大

## • 要点

- 准备发送
  - 发送之前必须先检测信道
- 检测信道
  - 若检测到信道忙，则不停地检测，一直等待信道转为空闲。若检测到信道空闲，并在 96 比特时间内信道保持空闲（保证了帧间最小间隔），就发送这个帧。
- 检查碰撞
  - 发送过程中仍不停地检测信道，即网络适配要边发送边监听。两种可能性：
    - 发送成功：在争用期内一直未检测到碰撞。这个帧肯定能够发送成功。发送完毕后，其他什么也不做。然后回到准备发送。
    - 发送失败：在争用期内检测到碰撞。立即停止发送数据，并发送人为干扰信号（32 或 48 比特时间），接着执行指数退避算法，等待  $r$  倍 512 比特时间后，返回检测信道。但若重传达 16 次仍不能成功，则停止重传而向上报错。



- 类型字段
  - 类型字段用来标志上一层使用的是什么协议，以便把收到的 MAC 帧的数据上交给上一层的这个协议。
- 数据字段
  - 最小长度 64 字节 - 18 字节的首部和尾部 = 数据字段的最小长度（46字节）
  - 当数据字段的长度小于 46 字节时，应在数据字段的后面加入整数字节的填充字段，以保证以太网的 MAC 帧长不小于 64 字节。

#### 无效的 MAC 帧

- 数据字段的长度与长度字段的值不一致；
- 帧的长度不是整数个字节；
- 用收到的帧检验序列 FCS 查出有差错；
- 数据字段的长度不在 46 ~ 1500 字节之间。
- 有效的 MAC 帧长度为 64 ~ 1518 字节之间。

对于检查出的无效 MAC 帧就简单地丢弃。以太网不负责重传丢弃的帧。



- 当“长度/类型”字段值大于 0x0600 时，表示“类型”；小于 0x0600 时，表示“长度”。
- 当“长度/类型”字段值小于 0x0600 时，数据字段必须装入逻辑链路控制 LLC 子层的 LLC 帧。
- 在 802.3 标准的文档中，MAC 帧格式包括了 8 字节的前同步码和帧开始定界符。

现在市场上流行的都是以太网 V2 的 MAC 帧，但大家也常常把它称为 IEEE 802.3 标准的 MAC 帧。

扩展以太网

物理层

主机使用光纤和一对光纤调制解调器连接到集线器，用多个集线器连成更大的以太网

## 集线器

- 多接口的转发器，在物理层用电子器件模拟电缆总线。
- 使用集线器的以太网在逻辑上是总线网，工作站使用 CSMA/CD 协议
- 优点
  - 扩大以太网覆盖的地理范围；不同碰撞域（冲突域）的计算机可跨碰撞域通信
- 缺点
  - 碰撞域增大，吞吐量未提高；不同以太网（数据率不同）不能用集线器互连

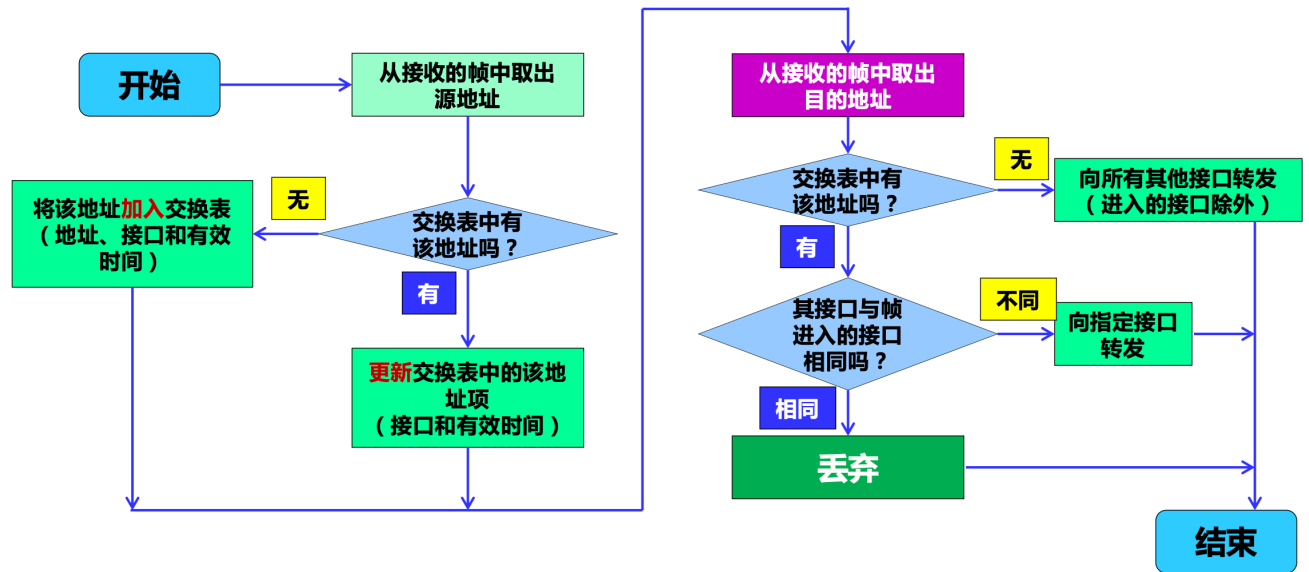
## 链路层

**网桥：**根据 MAC 帧的目的地址对收到的帧进行转发和过滤，或转发，或丢弃。

**交换机：**多端口的网桥。

- 特点
  - 多接口网桥
    - 通常有十几个或更多的接口。
    - 每个接口都直接与一个单台主机或另一个以太网交换机相连，并且一般工作在全双工方式。
  - 并行性
    - 能同时连通多对接口，使多对主机同时通信。
    - 相互通信的主机都独占传输媒体，无碰撞地传输数据。
    - 每一个端口和连接到端口的主机构成了一个碰撞域。
- 优点
  - 每个用户独享带宽，增加了总容量
- 交换方式
  - 存储转发方式
  - 直通方式
    - 缺点：不检查差错就直接将帧转发出去，有可能转发无效帧。
- 以太网交换机的自学习功能
  - 开始时交换表是空的

## 交换机自学习和转发帧的步骤归纳



- 收到一帧先自学习
- 然后转发帧
- 存在的问题：回路
  - 消除回路：使用生成树协议（STP）

### 广播风暴

交换机之间的冗余链路形成广播风暴

### 安全问题

交换机每个接口都处于一个独立的碰撞域（或冲突域）中，但所有计算机都处于同一个广播域中。

### 虚拟局域网 VLAN

- 每个虚拟局域网是一个广播域；限制广播范围

### 高速以太网

#### 100BASE-T 以太网

仍使用 IEEE 802.3 的 CSMA/CD 协议

特点：

- 可在全双工方式下工作而无冲突发生。
- 在全双工方式下工作时，不使用 CSMA/CD 协议。
- 使用 IEEE 802.3 协议规定的 MAC 帧格式。
- 保持最短帧长不变，但将一个网段的最大电缆长度减小到 100 米。
- 帧间时间间隔从原来的 9.6  $\mu\text{s}$  改为现在的 0.96  $\mu\text{s}$ 。

#### 吉比特以太网

特点：



- 允许在 1 Gbit/s 下以全双工和半双工 2 种方式工作。
- 使用 IEEE 802.3 协议规定的 MAC 帧格式。
- 在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议，而在全双工方式不使用 CSMA/CD 协议。
  - 为保持 64 字节最小帧长度，以及 100 米的网段的最大长度，增加了 2 个功能：（全双工方式工作的吉比特以太网没有）
    - 载波延伸：将争用时间增大为 512 字节。凡发送的 MAC 帧长不足 512 字节时，就用一些特殊字符填充在帧的后面。
    - 分组突发：当很多短帧要发送时，第 1 个短帧采用载波延伸方法进行填充，随后的一些短帧则可一个接一个地发送，只需留有必要的帧间最小间隔即可。
- 与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容。

## 10 吉比特以太网（10GE）和更快的以太网

特点：

- 万兆比特。
- 与 10、100 Mbit/s 和 1 Gbit/s 以太网的帧格式完全相同。
- 保留了 IEEE 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长。
- 只使用光纤作为传输媒体。
- 只工作在全双工方式，没有争用问题，不使用 CSMA/CD 协议。

## PPPoE

在以太网上运行 PPP