

计算机网络原理

第3章：数据链路层

阮晓龙

13938213680 / rxl@hactcm.edu.cn
http://network.xg.hactcm.edu.cn

河南中医药大学信息管理与信息系统教研室
信息技术学院网络与信息系统科研工作室
河南中医药大学医疗健康信息技术研究所

2022.9

1

OSI 的七层协议体系结构



TCP/IP 的四层协议体系结构



五层协议的体系结构



2

本章教学计划

- ✓ 使用点对点信道的数据链路层
 - ✓ 点对点协议 (PPP)
 - ✓ 使用广播信道的数据链路层 (CSMA/CD)
-
- ✓ 使用广播信道的以太网
 - ✓ 扩展的以太网
 - ✓ 高速以太网

数据链路层原理

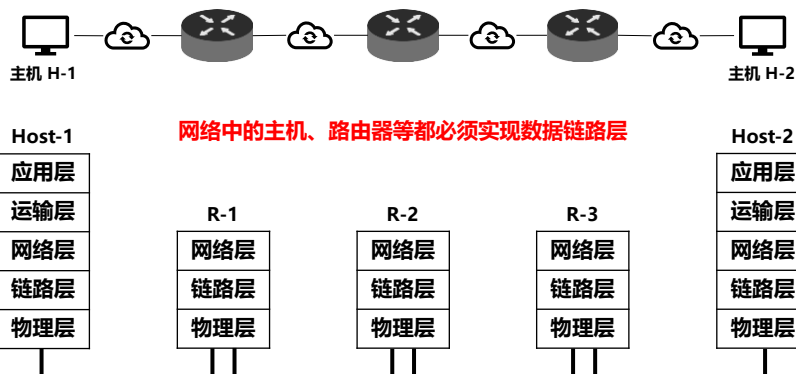
局域网通信

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

3

本章教学计划

0.1 数据链路层的地位

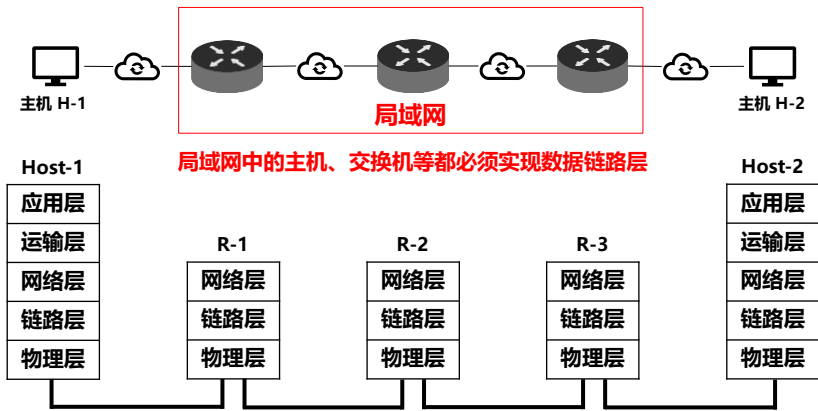


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

4

本章教学计划

0.1 数据链路层的地位

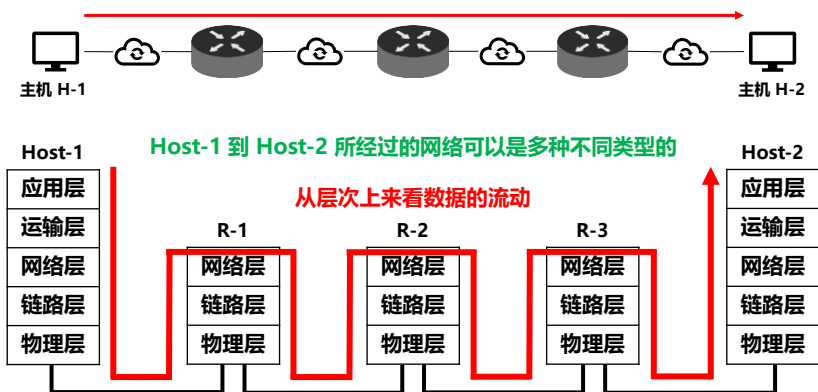


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

5

本章教学计划

0.1 数据链路层的地位

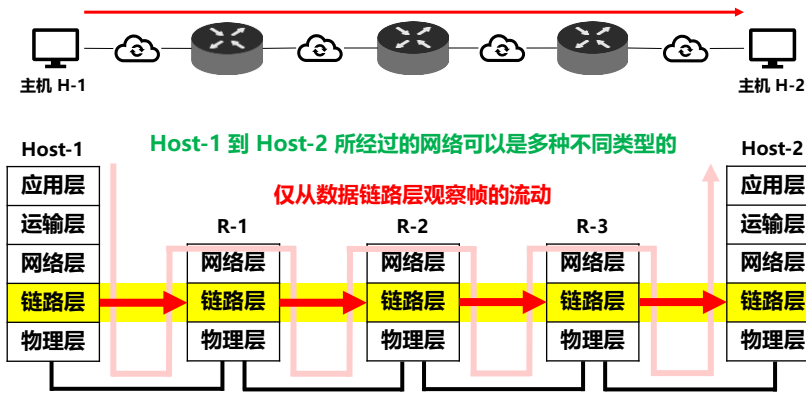


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

6

本章教学计划

0.1 数据链路层的地位



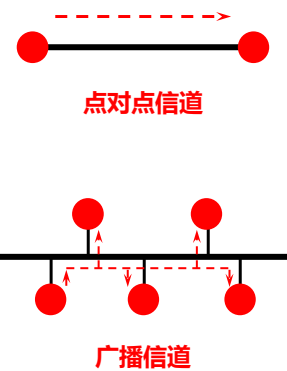
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

7

本章教学计划

0.2 数据链路层信道类型

- 数据链路层属于计算机网络的**低层**。
- 数据链路层使用的信道主要有两种类型：
 - 点对点信道：
 - 使用一对一的点对点通信方式。
 - 广播信道：
 - 使用一对多的广播通信方式。
 - 必须使用专用的共享信道协议来协调主机的数据发送。
- 由于局域网内通常不包括路由选择和分组转发，
 - 因此局域网的内容也在本章进行讨论。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

8

1. 使用点到点信道的数据链路层

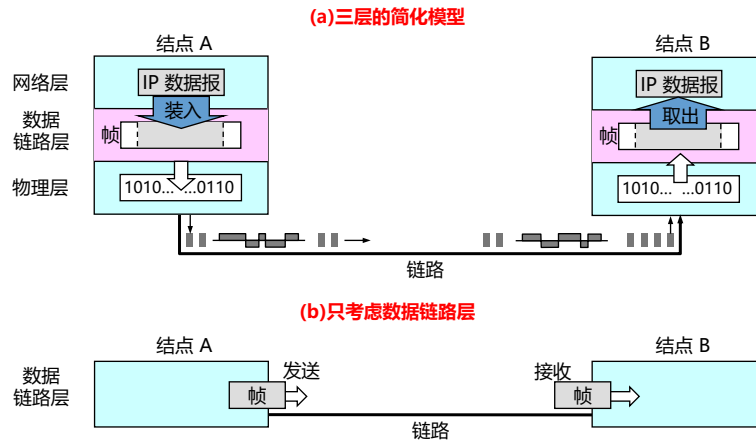
- 链路 (link) :
 - 一条无源的点到点的物理线路段，中间没有任何其他的交换结点。
 - 一条链路只是一条通路的一个组成部分。
 - 或物理链路。
- 数据链路 (data link) :
 - 把实现控制数据传输的协议的硬件和软件加到链路上，就构成了数据链路。
 - 或逻辑链路。
 - 典型实现：适配器（即网卡）
 - 一般的适配器都包括了数据链路层和物理层这两层的功能。

1. 使用点到点信道的数据链路层

- 数据链路层把网络层交下来的数据构成帧发送到链路上，以及把接收到的帧中的数据取出并上交给网络层。
 - 数据链路层协议数据单元是数据帧（帧）。
 - 网络层协议数据单元是IP数据报（数据报、分组、包）。
- 把重点放到数据链路层，只考虑数据链路层的通信，把网络体系简化为三层。

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.1 数据链路层和帧

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

11

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.1 数据链路层和帧

- 常常在两个对等的的数据链路层之间画出一个数字管道，而在这条数字管道上传输的数据单位是帧。
- 早期的数据通信协议曾叫作通信规程(procedure)。
 - 在数据链路层，规程和协议是同义语。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

12

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

13

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 封装成帧 (framing) :

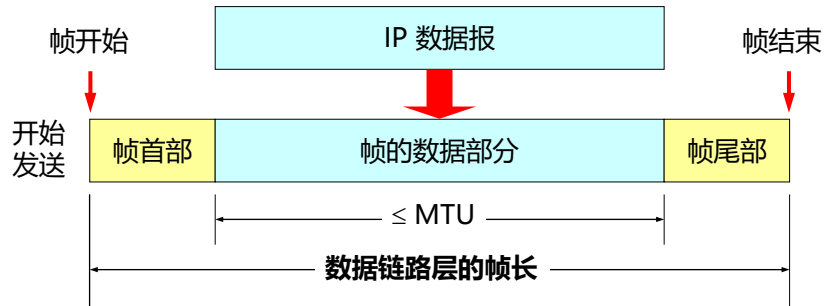
- 是在一段数据的前后分别**添加首部和尾部**，然后就构成了一个帧。
- 数据帧的长度就是数据加上首部和尾部的总长度。
- 首部和尾部的重要作用之一就是进行帧定界，确定数据帧的界限。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

14

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能



最大传送单元 MTU (Maximum Transfer Unit)：规定了所能传送的帧的数据部分长度上限。

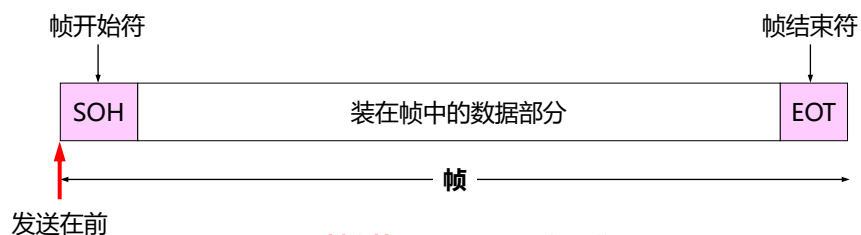
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

15

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

- ✓ 控制字符 SOH (Start Of Header) 放在一帧的最前面，表示帧的首部开始。
- ✓ 控制字符 EOT (End Of Transmission) 放在一帧的末尾，表示帧的结束。



用控制字符进行帧定界的方法举例

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

16

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 透明传输：

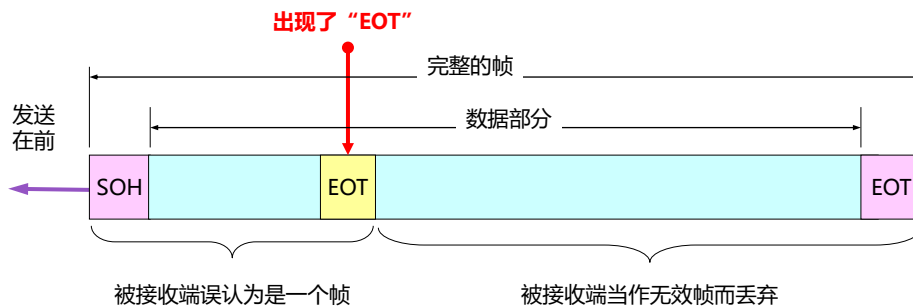
- 由于帧的开始和结束的标记是专门指定的字符，因此所传输的数据中不能够有任何 8 比特的字符和用作帧定界的控制字符的比特编码一样。
- 也就是说传输的数据中，不能够有任何和 SOH、EOT 一致的 8 比特的字符。
- 为了解决这个问题，就采用了转义字符“ESC”。
 - ESC 值是确定的，十六进制 1B，或二进制 00011011。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictm.edu.cn

17

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能



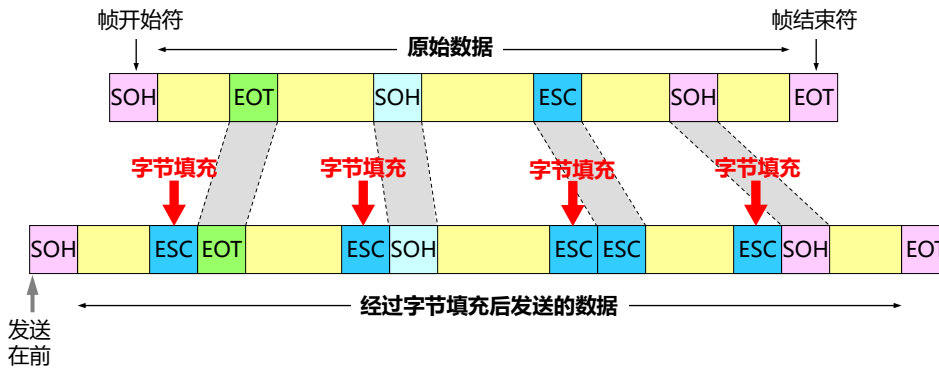
如果数据中的某个字节的二进制代码恰好和 SOH 或 EOT 一样，数据链路层就会错误地“找到帧的边界”，导致错误。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictm.edu.cn

18

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

19

透明

指某一个实际存在的事物看起来却好像不存在一样。

“在数据链路层透明传送数据”表示：

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。

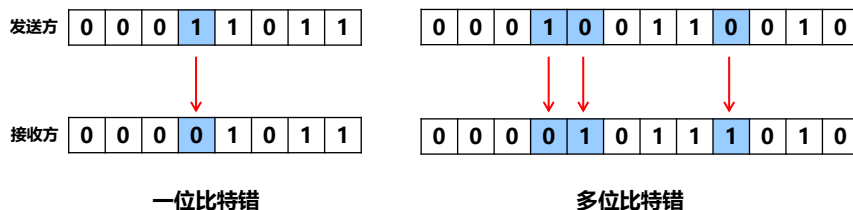
20

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测:

- 数据帧在传输中可能发生两种错误:
 - **比特差错**: 1可能变成0 或者 0可能变成1。
 - **传输差错**: 收到的帧没有出现比特差错, 但出现帧丢失、帧重复和帧失序。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

21

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测:

- 在一段时间内, 传输错误的比特占所传输比特总数的比率称为**误码率BER** (Bit Error Rate)。
- 误码率通常和信噪比关系密切。
 - 信噪比越高, 误码率越低。
- 为了保证数据传输的可靠性, 在计算机网络传输数据时, 必须采用各种差错检测措施。
- 在数据链路层传送的帧中, 广泛使用了**循环冗余检验 CRC** 的检错技术。

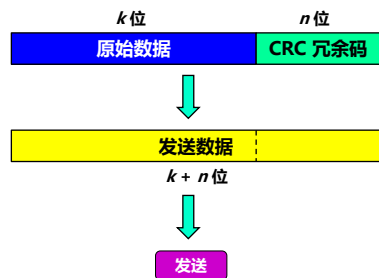
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

22

1. 使用点到点信道的数据链路层

□ 差错检测：

■ CRC 的基本原理：



- 在发送端，先把数据划分为组。假定每组 k 个比特。
- 在每组 M 后面再添加供差错检测用的 n 位冗余码，然后一起发送出去。

1. 使用点到点信道的数据链路层

□ 差错检测：

■ CRC 的基本原理：

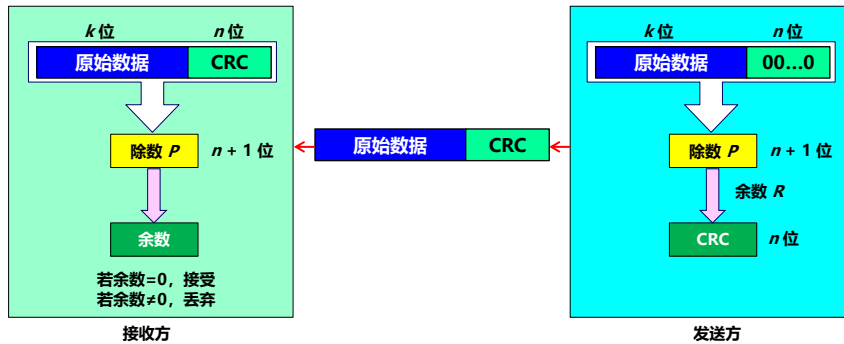
- 在发送端：
 - 先把数据划分为组，假定每组 k 个比特。
 - 通过CRC运算，在数据 M 的后面添加供差错检测用的 n 位冗余码，然后构成一个帧发送出去，一共发送 $(k+n)$ 位。
- 在接收端：
 - 先从接收的数据帧中提取出 n 位冗余码，进行CRC检验。
 - 如果检验的结果正确，则接受 (accept) 数据帧。
 - 如果检验的结果不正确，则直接丢弃。
- CRC 检验不能确定错误发生的原因，只能判断数据帧是否正确。

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测：

■ CRC 的基本原理：



25

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测：

■ 循环冗余校验码 (CRC) 的基本原理是：

- 在K位信息码后再拼接R位的校验码，整个编码长度为N位，因此，这种编码也叫(N, K)码。
- 对于一个给定的(N, K)码，可以证明存在一个最高次幂为N-K=R的多项式G(x)。
- 根据G(x)可以生成K位信息的校验码，而G(x)叫做这个CRC码的生成多项式。
- 假设要发送的信息用多项式C(x)表示，将C(x)左移R位(可表示成 $C(x) \cdot 2^R$)，这样C(x)的右边就会空出R位，这就是校验码的位置。
- 用 $C(x) \cdot 2^R$ 除以生成多项式G(x)得到的余数就是校验码。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

26

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测：

- 循环冗余校验码 (CRC) 的两个计算：
 - 发送端：如何计算出冗余码
 - 接收端：如何通过冗余码判断数据帧是否错误
- 冗余码的计算：
 - 用二进制的模 2 运算进行 2^n 乘 M 的运算，这相当于在 M 后面添加 n 个 0。
 - 得到的 $(k + n)$ 位的数除以事先选定好的长度为 $(n + 1)$ 位的除数 P ，得出商是 Q 而余数是 R ，余数 R 比除数 P 少 1 位，即 R 是 n 位。
 - 将余数 R 作为冗余码拼接在数据 M 后面，一起发送出去。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

27

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测：

- 循环冗余校验码 (CRC) 的两个计算：
 - 发送端：如何计算出冗余码
 - 接收端：如何通过冗余码判断数据帧是否错误
- 通过冗余码判断数据帧是否错误：
 - 若得出的余数 $R = 0$ ，则判定这个帧没有差错，就接受 (accept)。
 - 若余数 $R \neq 0$ ，则判定这个帧有差错，就丢弃。
 - 但这种检测方法并不能确定究竟是哪一个或哪几个比特出现了差错。
 - 只要经过严格的挑选，并使用位数足够多的除数 P ，那么出现检测不到的差错的概率就很小很小。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

28

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测:

■ 冗余码的计算举例:

- 现在 $k = 6$, $M = 101001$
- 设 $n = 3$, 除数 $P = 1101$
- 被除数是 $2^n M = 101001000$
- 模 2 运算的结果是: 商 $Q = 110101$, 余数 $R = 001$
- 把余数 R 作为冗余码添加在数据 M 的后面发送出去。

- 发送的数据是: $2^n M + R$, 即: **101001001**
- 发送的数据共: $(k + n)$ 位

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictm.edu.cn

29

1. 使用点到点信道的数据链路层

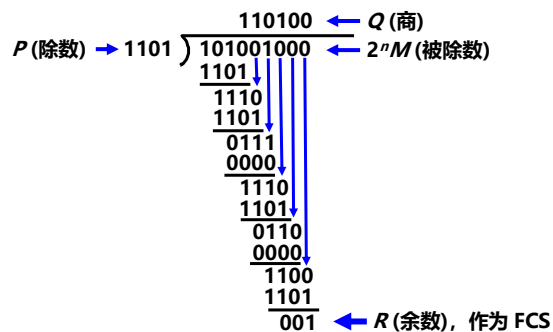
1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测:

■ 冗余码的计算举例:

原始数据 $M = 101001$
除数 $P = 1101$

得到:
发送数据 = **101001001**



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictm.edu.cn

30

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测:

- 在数据后面添加上的冗余码称为帧检验序列 FCS (Frame Check Sequence)。
- 循环冗余检验 CRC 和帧检验序列 FCS 并不等同。
 - CRC 是一种常用的检错方法，而 FCS 是添加在数据后面的冗余码。
 - FCS 可以用 CRC 这种方法得出，但 CRC 不是获得 FCS 的唯一方法。

广泛使用的生成多项式P(X)

$$\text{CRC-16} = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$$

$$\text{CRC-CCITT} = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

$$\text{CRC-32} = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

31

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

请通过查阅资料，了解 CRC 详细计算方法。
http://www.repairfaq.org/filipg/LINK/F_crc_v31.html

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

32

1. 使用点到点信道的数据链路层

1.2 数据链路层的基本功能

□ 差错检测：

- 仅用循环冗余检验 CRC 差错检测技术只能做到**无差错接受 (accept)**。
 - **无差错接受**是指：凡是接受的帧（即不包括丢弃的帧），都能以非常接近于 1 的概率认为这些帧在传输过程中没有产生差错。
 - 也就是说：凡是接收端数据链路层接受的帧都没有传输差错，因为有差错的帧被丢弃。
- 单纯使用 CRC 差错检测技术不能实现“无差错传输”或“可靠传输”。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

33

“无比特差错”与“无传输差错”是不同的。

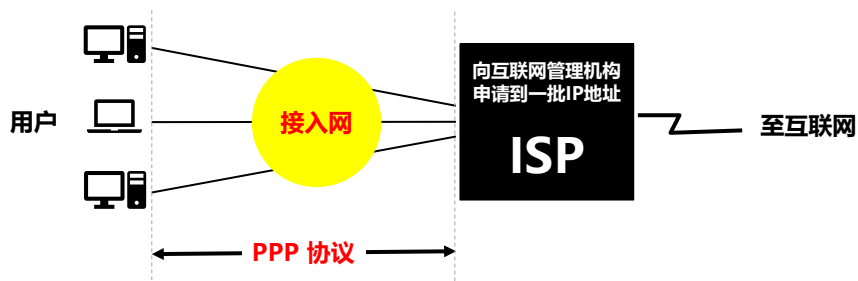
- **可靠传输**：数据链路层的发送端发送什么，在接收端就收到什么。
- **传输差错**可分为两大类：
 - 比特差错；
 - 传输差错：帧丢失、帧重复或帧失序等。
- 在数据链路层使用 CRC 检验，能够实现无比特差错的传输，但这还不是可靠传输。
- 要做到可靠传输，还必须再加上**帧编号、确认和重传等机制**。

34

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

- 点对点协议 PPP (Point-to-Point Protocol):
 - 对于点对点的链路，目前使用得最广泛的数据链路层协议是点对点协议 PPP (Point-to-Point Protocol)。
 - PPP 协议在 1994 年就已成为互联网的正式标准 [RFC 1661, STD51]。



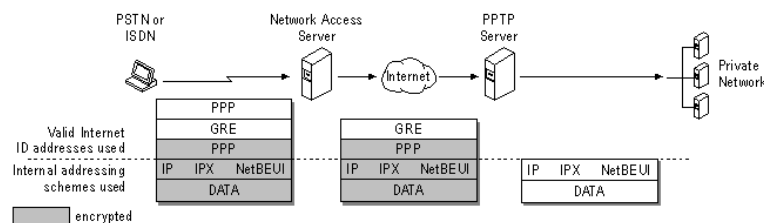
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

35

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

- 什么情况下使用点对点协议 PPP?
 - 用户使用拨号电话线接入因特网时，一般都是使用 PPP 协议。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

36

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

□ PPP协议的基本需求：

■ 简单：

- IETF在设计因特网体系结构时把其中最复杂的部分放在TCP协议中，而网际协议IP则相对比较简单，它提供的是不可靠的数据报服务。
- 数据链路层就应该设计的比网络层更加简单，因此数据链路层的帧，不需要纠错，不需要序号，也不需要流量控制。
- “简单”是首要追求。对简单的追求还使得协议不易出错，不同厂商在协议的不同实现上提高了互操作性，促进了协议标准化工作。

■ 封装成帧：

- PPP协议规定特殊的字符作为帧定界符，便于在比特流中方便地确定帧的开始和结束位置。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

37

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

□ PPP协议的基本需求：

■ 透明性：

- PPP协议要保证数据传输的透明性，也就是转义符。

■ 多种网络层协议：

- PPP协议必须能够在同一条物理链路上同时支持多种网络层协议的运行。

■ 多种类型链路：

- PPP协议必须能够在多种类型的链路上运行，要支持并行和串行通信、同步和异步通信、低速和高速通信、电或者光通信、交换和静态通信。

■ 差错检测：

- PPP协议要对接收的帧进行检测，对检测错误的帧立即丢弃。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

38

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

- **PPP协议的基本需求：**
 - **检测连接状态：**
 - 能够及时自动检测出链路是否处于正常工作状态。
 - **最大传送单元：**
 - 必须对每一种类型的点对点链路设置最大传送单元 MTU 的标准默认值，促进各种实现之间的互操作性。
 - **网络层地址协商：**
 - 必须提供一种机制使通信的两个网络层实体能够通过协商知道或能够配置彼此的网络层地址。
 - **数据压缩协商：**
 - 必须提供一种方法来协商使用数据压缩算法。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

39

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

- **PPP协议不需要实现的功能：**
 - **不支持可靠传输：**
 - 可靠传输由TCP协议负责，PPP协议不需要进行纠错、不需要设置序号来解决传输错误、不需要进行流量控制。
 - PPP协议不支持多点线路，仅支持点对点链路通信，且只支持全双工通信。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

40

2. 点到点协议 (PPP)

2.1 PPP 协议的特点

□ PPP协议的组成三要素：

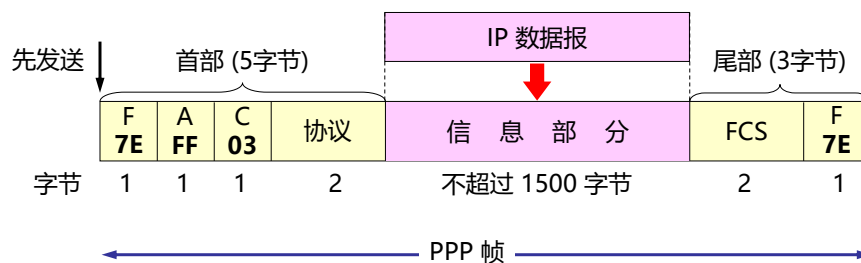
- 封装方法：
 - PPP协议要包含一个将IP数据报封装成串行链路的方法。
 - 封装方法既要支持异步链路，也要支持同步链路。
- 链路控制协议 (LCP, Link Control Protocol)：
 - 用来定义建立、配置和测试数据链路连接的协议。
- 网络控制协议 (NCP, Network Control Protocol)：
 - PPP包含了一套NCP，每个NCP协议支持不同的网络层协议。
 - 例如IP、OSI的网络层、DECnet、AppleTalk等，实现向上兼容。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

41

2. 点到点协议 (PPP)

2.2 PPP 协议的帧格式



首部：4 个字段

- 标志字段 F：0x7E。连续两帧之间只需要用一个标志字段。
- 地址字段 A：只置为 0xFF。实际上不起作用。
- 控制字段 C：通常置为 0x03。
- 协议字段。

尾部：2 个字段。

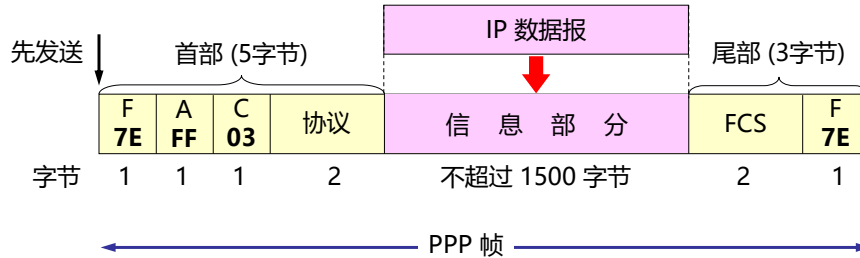
PPP 是面向字节的，所有的 PPP 帧的长度都是整数字节。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

42

2. 点到点协议 (PPP)

2.2 PPP 协议的帧格式



协议字段, 2字节:

- 若为 0x0021, 则信息字段就是 IP 数据报。
- 若为 0x8021, 则信息字段是网络控制数据。
- 若为 0xC021, 则信息字段是 PPP 链路控制数据。
- 若为 0xC023, 则信息字段是鉴别数据。

PPP 是面向字节的, 所有的 PPP 帧的长度都是整数字节。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

43

2. 点到点协议 (PPP)

2.2 PPP 协议的帧格式

异步传输: 字节填充

- 对信息字段内出现标志字段的组合时, 使用转义字符进行字节填充。
 - (0x7E) -> (0x7D, 0x5E)
 - (0x7D) -> (0x7D, 0x5D)
- ASCII码的控制字符, 即 <(0x03) 在字符前增加 0x7D, 并对该字符的编码加以改变。

同步传输: 零比特填充

- 同步传输通过硬件或者软件扫描整个信息字段。
- 对于五个连续的1, 在后面填入一个0, 避免六个连续的1的出现。

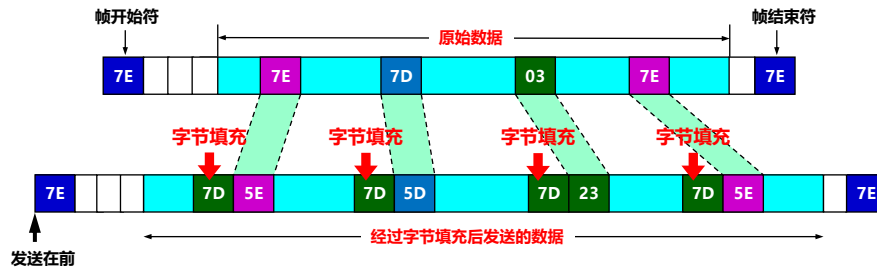
透明传输问题的解决方法

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

44

2. 点到点协议 (PPP)

2.2 PPP 协议的帧格式

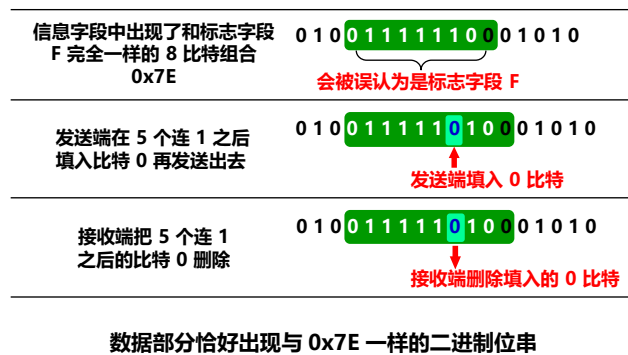


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

45

2. 点到点协议 (PPP)

2.2 PPP 协议的帧格式



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

46

2. 点到点协议 (PPP)

2.3 PPP 协议的工作状态

□ PPP 链路初始化过程：

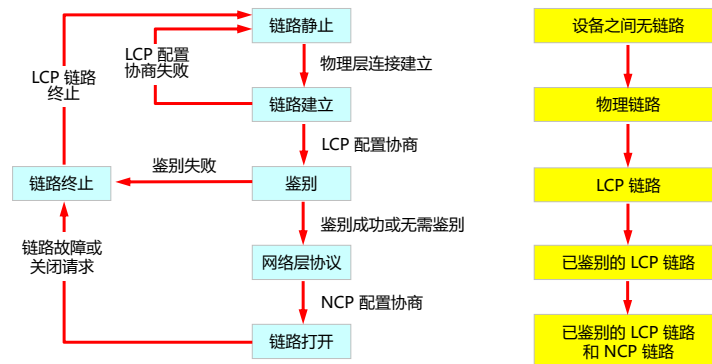
- 用户拨号接入 ISP 后，就建立了一条从用户个人电脑到 ISP 的物理连接。
- 用户个人电脑向 ISP 发送一系列的链路控制协议 LCP 分组（封装成多个 PPP 帧），以便建立 LCP 连接。
- 之后进行网络层配置。网络控制协议 NCP 给新接入的用户个人电脑分配一个临时的 IP 地址。
- 当用户通信完毕时，NCP 释放网络层连接，收回原来分配出去的 IP 地址。LCP 释放数据链路层连接。最后释放的是物理层的连接。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

47

2. 点到点协议 (PPP)

2.3 PPP 协议的工作状态



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

48

3. 使用广播信道的数据链路层

3.1 局域网的数据链路层

- 局域网是20世纪70年代末发展起来的。
- 局域网技术在计算机网络中占有非常重要的意义，对于今天的国际互联网更是意义深远。
- 局域网最主要的特点是：
 - 网络为**一个单位所拥有**
 - **地理范围和站点数目均有限**
- 学校、企业、政府、小区等的网络，都是局域网。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

49

3. 使用广播信道的数据链路层

3.1 局域网的数据链路层

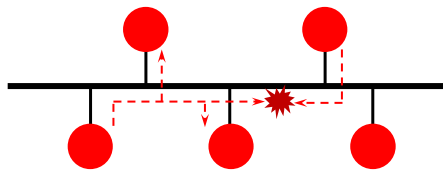
- 局域网具有的主要优点：
 - 具有广播功能，从一个站点可很方便地访问全网。
 - 局域网上的主机可共享连接在局域网上的各种硬件和软件资源。
 - 便于系统的扩展和逐渐地演变，各设备的位置可灵活调整和改变。
 - 提高了系统的可靠性、可用性和生存性。
- 局域网常使用的拓扑结构三种：
 - 星形拓扑、环形拓扑和总线拓扑。
- 局域网可以使用多种传输介质，以双绞线最为常见。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

50

3. 使用广播信道的数据链路层

- 局域网的工作层次跨越了数据链路层和物理层。
 - 由于局域网中的大部分内容都在数据链路层，因此在数据链路层部分来讨论局域网技术。
- 局域网是一对多的通信，因此局域网内必须要**共享信道**。
- 若多个设备在共享的广播信道上同时发送数据，则会造成彼此干扰，导致发送失败。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

51

3. 使用广播信道的数据链路层

- 共享信道要着重考虑的一个问题就是：
 - 如何使众多用户能够合理而方便的共享通信媒体资源。
- 共享信道的常用方法有两种：
 - 静态划分信道：
 - 频分复用、时分复用、波分复用和码分复用。
 - 成本较高，不适合局域网使用。
 - 动态媒体接入控制：又称为**多点接入**。
 - 通常分为随机接入和受控接入。
 - 随机接入：所有的用户可随机地发送信息。
 - 受控接入：用户必须服从一定的控制，如轮询 (polling)。

局域网最常用的共享信道为随机接入

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

52

3. 使用广播信道的数据链路层

3.2 以太网标准

- 以太网是一种基带总线局域网，其数据率经历了10Mbps、100Mbps、1000Mbps、10Gbps等。
 - 通常：
 - 标准以太网：10Mbps速率
 - 快速以太网：100Mbps速率
 - 千兆以太网：1000Mbps速率
 - 万兆以太网：10Gbps速率叫做
- 以太网有两种标准：[DIX Ethernet V2](#) 和 [IEEE 802.3](#)。
 - DIX 是 DEC、Xerox（美国施乐）、Intel（英特尔）三家公司的名称缩写。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

53

3. 使用广播信道的数据链路层

3.2 以太网标准

- DIX Ethernet V2：
 - 诞生于1982年，是世界上第一个局域网产品（以太网）的规约。
 - 定义传送速率为 10Mbps。
- IEEE 802.3：
 - IEEE 委员会 802.3 工作组在1983年制定了第一个IEEE的以太网标准。
 - 定义传送速率为 10Mbps。
- DIX Ethernet V2 标准与 IEEE 802.3 标准只有很小的差别。
 - 通常把 802.3局域网简称为“以太网”。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

54

3. 使用广播信道的数据链路层

3.2 以太网标准

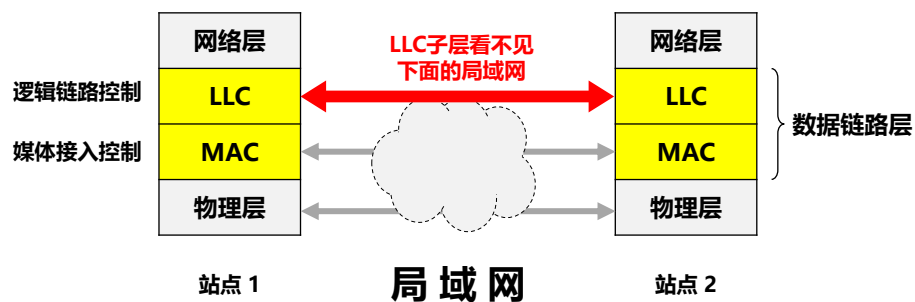
- 为了使数据链路层能更好地适应多种局域网标准，802 委员会将局域网的数据链路层拆成两个子层：
 - 逻辑链路控制 LLC (Logical Link Control) 子层
 - 媒体接入控制 MAC (Medium Access Control) 子层
- 与接入到传输媒体有关的内容都放在MAC子层，而LLC子层则与传输媒体无关，不管采用何种协议的局域网对LLC 子层来说都是透明的。
- IEEE的做法，主要是由于商业的激烈竞争。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

55

3. 使用广播信道的数据链路层

3.2 以太网标准



逻辑链路控制 LLC (Logical Link Control) 子层：与传输媒体无关。
 媒体接入控制 MAC (Medium Access Control) 子层：与传输媒体有关。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

56

3. 使用广播信道的数据链路层

3.2 以太网标准

- 由于TCP/IP体系经常使用的局域网是 DIX Ethernet V2，而不是802.3标准中的几种局域网。
 - 现在 802 委员会制定的逻辑链路控制子层 LLC（即802.2标准）的作用已经不大。
 - 很多厂商生产的适配器上就仅装有 MAC 协议而没有 LLC 协议。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

57

3. 使用广播信道的数据链路层

3.3 网络适配器 NIC

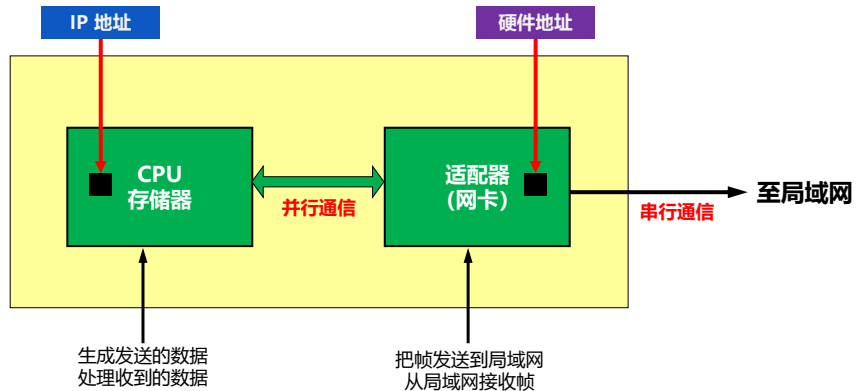
- 计算机与局域网的连接是通过通信适配器（adapter）。
 - 适配器本来是在主机内的一块网络接口板，又称为网络接口卡NIC（Network Interface Card），俗称为网卡。
 - 网络接口卡 NIC 的重要功能：
 - 进行串行/并行转换。
 - 对数据进行缓存。
 - 在计算机的操作系统安装设备驱动程序。
 - 实现以太网协议。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

58

3. 使用广播信道的数据链路层

3.3 网络适配器 NIC

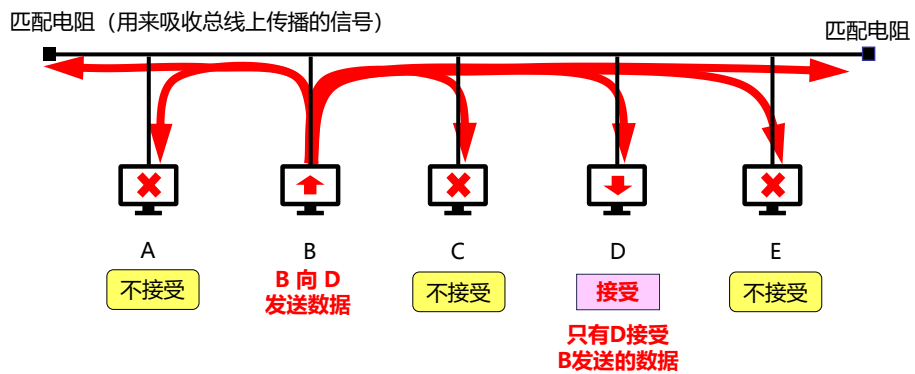
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

59

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

总线结构的以太网

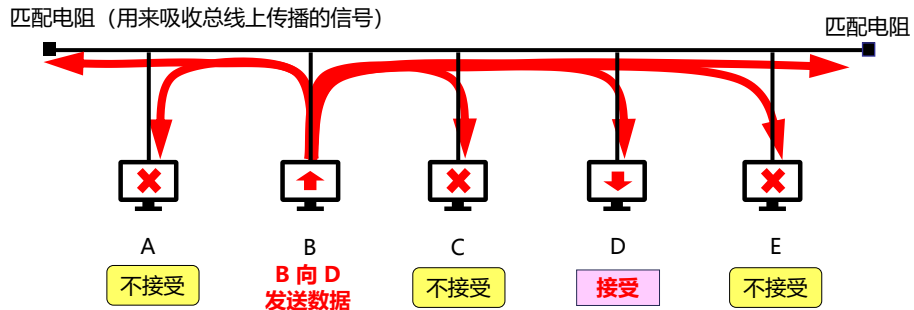
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

60

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

总线结构的以太网



为了实现一对一通信，将接收站的硬件地址写入帧首部中的目的地址字段中。
 仅当数据帧中的目的地址与适配器硬件地址一致时，才能接收这个数据帧。

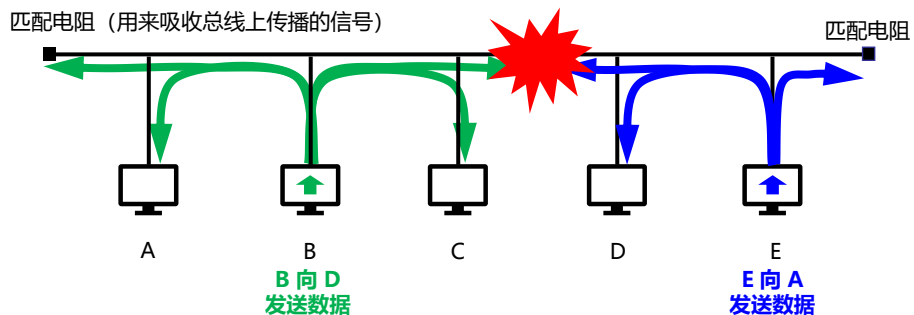
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

61

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

总线结构的以太网



多个站点同时发送时，会产生发送碰撞或冲突，导致发送失败。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

62

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 为了通信的简便，以太网使用了两种重要的措施：
 - 措施一：无连接的工作方式
 - 不必建立连接就可以直接发送数据。
 - 网卡发送的数据帧不进行编号，也不要求进行确认。
 - 最大程度交付，但不保证可靠交付。
 - 对差错帧的是否重传由上层决定。
 - 使用 CSMA/CD 进行冲突协调。
 - 措施二：曼彻斯特编码

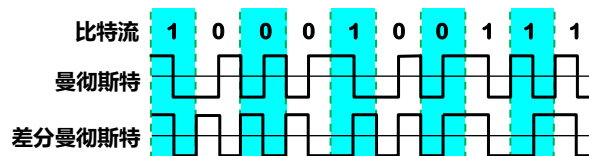
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictcm.edu.cn

63

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 为了通信的简便，以太网使用了两种重要的措施：
 - 措施一：无连接的工作方式
 - 措施二：曼彻斯特编码
 - 特点：从高到低表示1，从低到高表示0。
 - 优点：方便进行信息的提出，解决了位同步的困难。
 - 缺点：所占的频带宽度比原始的基带信号增加了一倍。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictcm.edu.cn

64

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- CSMA/CD的意思是：**载波监听多点接入 / 碰撞检测**，Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection。
 - CSMA/CD也被翻译为：**载波侦听多路复用/碰撞检测**。这是翻译的差异。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

65

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 多点接入：
 - 说明是总线型网络。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：
 - “载波监听”就是检测信道。
 - 不管在发送前，还是在发送中，每个站都必须不停地检测信道。
- 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）。

检测到碰撞后，适配器立即停止发送，等待一段随机时间后再次发送。

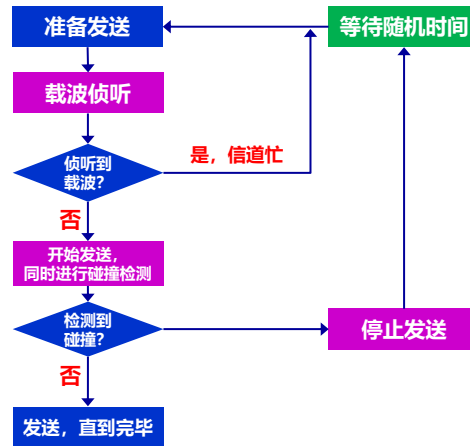
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

66

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

CSMA/CD 协议工作流程



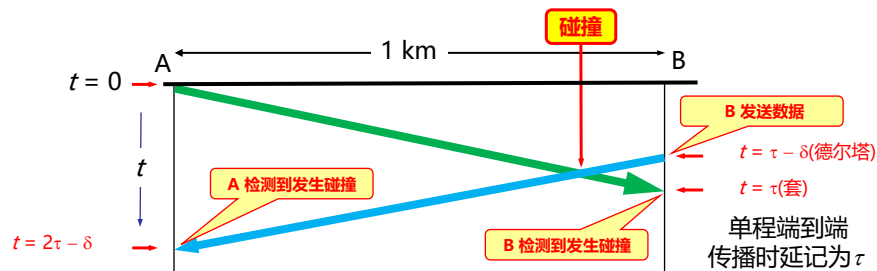
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

67

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 尽管使用了“碰撞检测”机制，但是在以太网上还是会发生碰撞的情况。
 - A 需要单程传播时延的 2 倍的时间，才能检测到与 B 的发送产生了冲突。

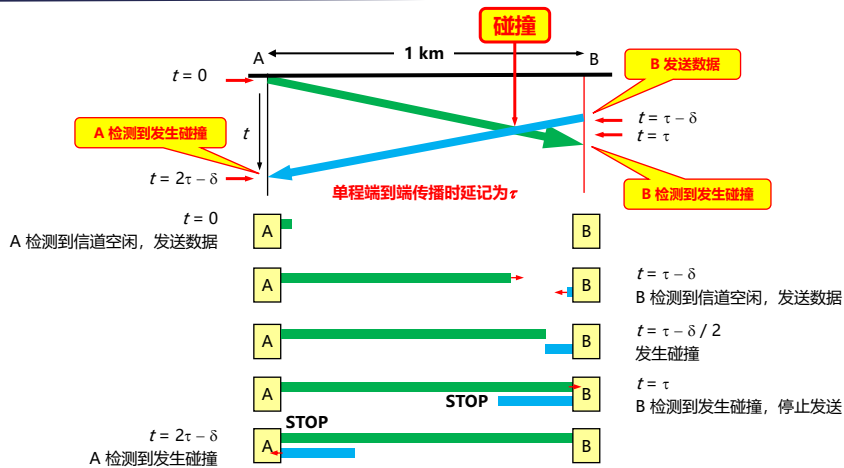


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

68

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议



69

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 最先发送数据帧的站, 在发送数据帧后至多经过时间 2τ (两倍的端到端往返时延) 就可知道发送的数据帧是否遭受了碰撞。
 - 以太网的端到端往返时延 2τ 称为**争用期**, 或**碰撞窗口**。
 - 经过争用期这段时间还没有检测到碰撞, 才能肯定这次发送不会发生碰撞。

70

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 发生碰撞的站在停止发送数据后，要推迟（退避）一个随机时间才能再发送数据。
- 以太网使用**二进制指数类型退避算法**来确定碰撞后重传的时机。
 - 基本退避时间取值为争用期 $2t$ 。
 - 从整数集合 $[0, 1, \dots, (2^k-1)]$ 中随机地取出一个数，记为 r 。重传所需的时延就是 r 倍的基本退避时间。
 - 参数 k 按下面的公式计算： $k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10]$
 - 当 k 不大于 10 时，参数 k 等于重传次数；当 k 大于 10 时，参数 k 等于 10。
 - 当重传达 16 次仍不能成功时即丢弃该帧，并向高层报告。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

71

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 以太网取 $51.2\mu\text{s}$ 为争用期的长度。（这是经验值）
- 对于 10Mbps 以太网，在争用期内可发送 512bit，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。
 - 如果发生冲突，就一定是在发送的前 64 字节之内。
 - 由于一检测到冲突就立即中止发送，这时已经发送出去的数据一定小于 64 字节。
 - 以太网规定了**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。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

72

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

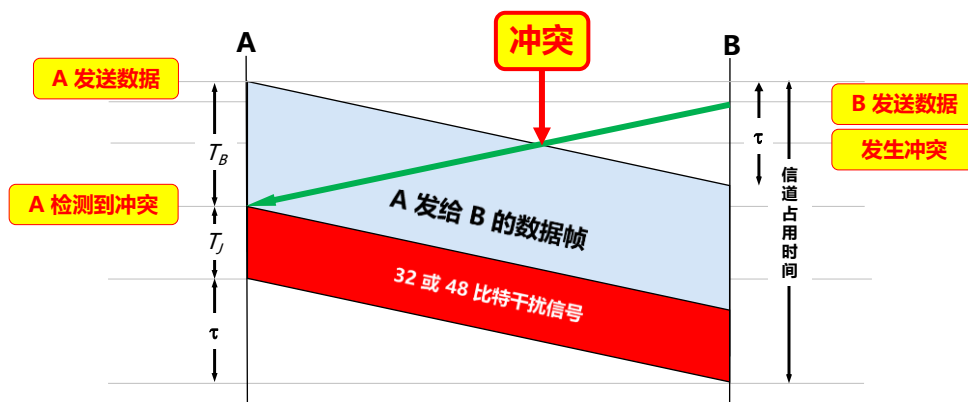
- 当发送数据的站一旦发现发生了碰撞时：
 - 立即停止发送数据；
 - 继续发送若干比特的人为干扰信号(jamming signal), 以便让所有用户都知道现在已经发生了碰撞。
- 这样的机制叫做“**强化碰撞**”。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictcm.edu.cn

73

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.haictcm.edu.cn

74

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

- 使用 CSMA/CD 协议的以太网不能进行全双工通信，而只能进行双向交替通信（半双工通信）。
 - 每个站在发送数据之后的一小段时间内，存在着遭遇碰撞的可能性。
 - 这种发送的不确定性使整个以太网的平均通信量远小于以太网的最高数据率。

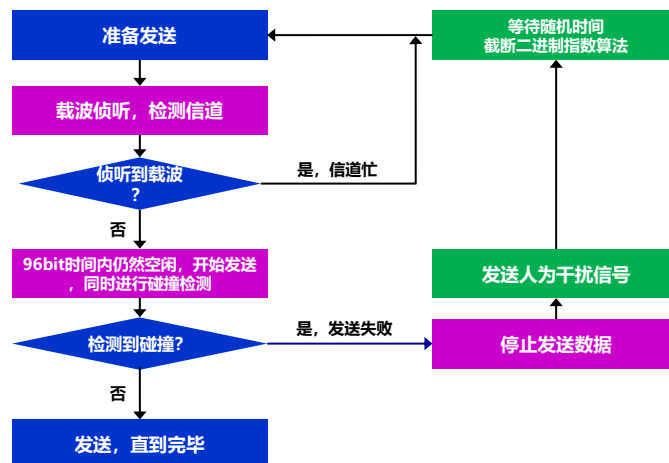
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

75

3. 使用广播信道的数据链路层

3.4 CSMA/CD 协议

**CSMA/CD
协议的要点**



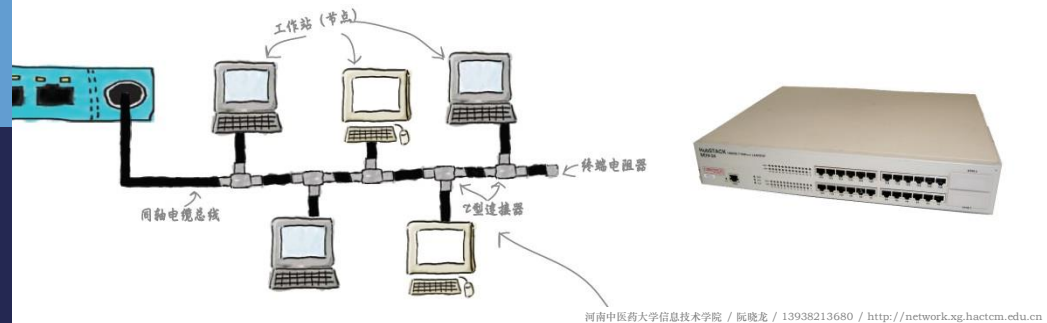
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

76

4. 使用广播信道的以太网

4.1 使用集线器的以太网

- 传统以太网传输媒体：粗同轴电缆 → 细同轴电缆 → 双绞线。
- 采用双绞线的以太网采用星形拓扑。
- 在星形的中心则增加了一种可靠性非常高的设备，叫做**集线器** (hub)。

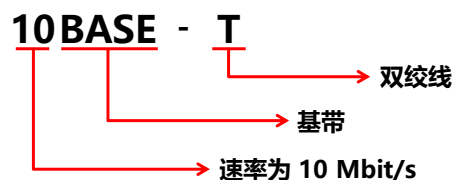


77

4. 使用广播信道的以太网

4.1 使用集线器的以太网

- 1990年，IEEE制定出星形以太网10BASE-T的标准802.3i。



- 由于使用双绞线和集线器的网络，其可靠性和易用性大大提升，并且使用双绞线电缆的以太网价格便宜，因此粗同轴电缆和细同轴电缆的以太网就逐步从市场上消失了。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

78

4. 使用广播信道的以太网

4.1 使用集线器的以太网

- 10BASE-T 以太网中，每个站都需要用到两对无屏蔽双绞线，分别用于发送和接收。
- 10BASE-T 以太网的通信距离稍短，每个站到集线器的距离不超过100m。
 - 10BASE-T双绞线以太网的出现，是局域网发展史上的一个非常重要的里程碑，它为以太网在局域网中的统治地位奠定了牢固的基础。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

79

4. 使用广播信道的以太网

4.1 使用集线器的以太网

- 集线器是使用电子器件来模拟实际电缆线的工作，因此整个系统仍然像一个传统的以太网那样运行。
- 使用集线器的以太网在逻辑上仍是一个总线网，各工作站使用的还是CSMA/CD协议，并共享逻辑上的总线。
- 集线器很像一个多接口的转发器，工作在物理层。
- 集线器采用了专门的芯片，进行自适应串音回波抵消，减少了近端串音。

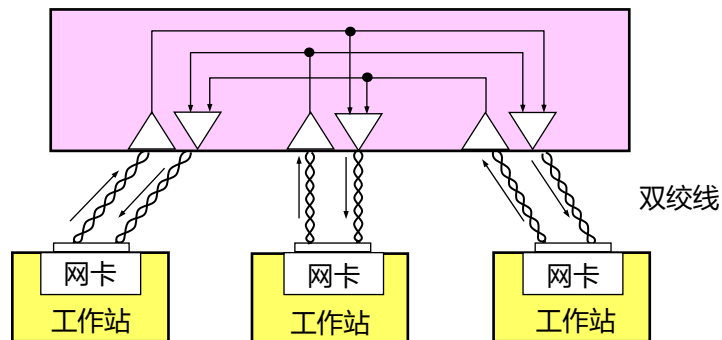
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

80

4. 使用广播信道的以太网

4.1 使用集线器的以太网

具有三个接口的集线器的逻辑结构



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

81

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率

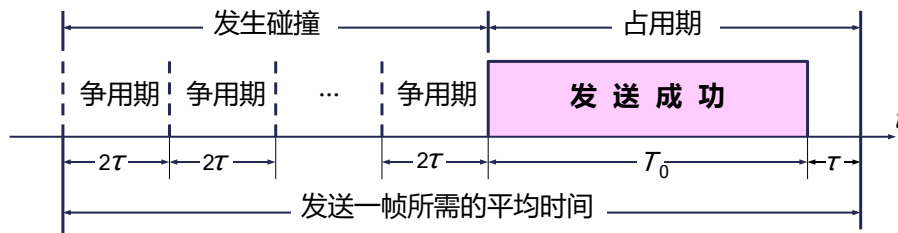
- 以太网信道被占用的场景：
 - 发送数据的时间。
 - 发送数据结束后，等待最后一个bit传送到接收方的等待时间。
 - 发生碰撞的争用期。
 - 没有数据传送的空闲时间。
- 发送数据的时间在总时间的占用率，就是通俗意义上的**信道利用率**。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

82

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率



- 一个站在发送帧时出现了碰撞。经过一个争用期 2τ 后，可能又出现了碰撞。
- 这样经过若干个争用期后，一个站发送成功了。
- 假定发送帧需要的时间是 T_0 。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

83

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率

- 要提高以太网的信道利用率，就必须减小 τ 与 T_0 之比。
 - 在以太网中定义了参数 a ，它是以太网单程端到端时延 τ 与帧的发送时间 T_0 之比：

$$a = \frac{\tau}{T_0}$$

- $a \rightarrow 0$ 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。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

84

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率

- 要提高以太网的信道利用率，就必须减小 τ 与 T_0 之比。
 - 在以太网中定义了参数 a ，它是以太网单程端到端时延 τ 与帧的发送时间 T_0 之比：

$$a = \frac{\tau}{T_0}$$

- 为提高利用率，以太网的参数 a 的值应当尽可能小些。
- 当数据率一定时，以太网的连线的长度受到限制，否则 τ 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。

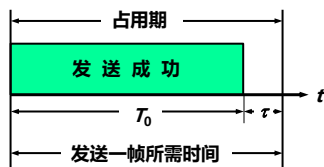
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

85

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率

- 理想化的情况下，以太网上的各站发送数据都不会产生碰撞，总线一旦空闲就有某一个站立即发送数据。
- 发送一帧占用线路的时间是 $T_0 + \tau$ ，而帧本身的发送时间是 T_0 。
 - 可计算出理想情况下的**极限信道利用率** S_{\max} 为：



$$S_{\max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a}$$

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / http://network.xg.hactcm.edu.cn

86

4. 使用广播信道的以太网

4.2 以太网的信道利用率

- 极限信道利用率 S_{\max} 为:

$$S_{\max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a}$$

- 结论:
 - 只有当参数 a 远小于 1 才能得到尽可能高的极限信道利用率。
 - 若参数 a 远大于 1, 极限信道利用率就远小于 1, 实际信道利用率就更低。
 - 据统计, 当以太网的利用率达到 30% 时就已经处于重载的情况。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

87

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

- 在局域网中, **硬件地址**又称为**物理地址**, 或 **MAC 地址**。
 - 802标准所说的“地址”严格地讲应当是每一个站的“名字”或标识符。
 - 大家都早已习惯了将这种48位的“名字”称为“地址”, 所以我们也采用这种习惯用法, 尽管这种说法并不太严格。
- MAC地址就是计算机系统的一种标识系统 (identification System) 。
 - 著名文献【SHOC78】对标识系统的定义:
 - 名字指出我们所要寻找的那个资源。
 - 地址指出那个资源在何处。
 - 路由告诉我们如何到达该处。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

88

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

- MAC层讨论两个问题：

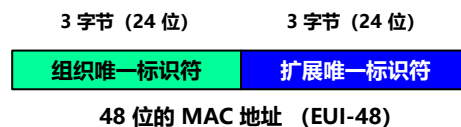
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

89

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

- **MAC地址：**
 - IEEE 802规定，MAC地址字段可以使用 6 字节（48位）或者 2 字节（16位）两种表示方式。
 - 随着以太网的迅猛发展，6 字节的表示方法可以使得全世界所有的局域网都使用不相同的地址，因此目前主要使用 6 字节的方式来表示MAC地址。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

90

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

□ MAC地址:

- IEEE 注册管理机构 RA 负责向厂家分配前 3 个字节 (即高 24 位), 称为组织唯一标识符 OUI (Organizationally Unique Identifier)。
- 厂家自行指派后 3 个字节 (即低 24 位), 称为扩展标识符 (extended identifier)。
- 必须保证生产出的适配器没有重复地址。
- 地址被固化在适配器的 ROM 中。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

91

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

□ MAC地址:

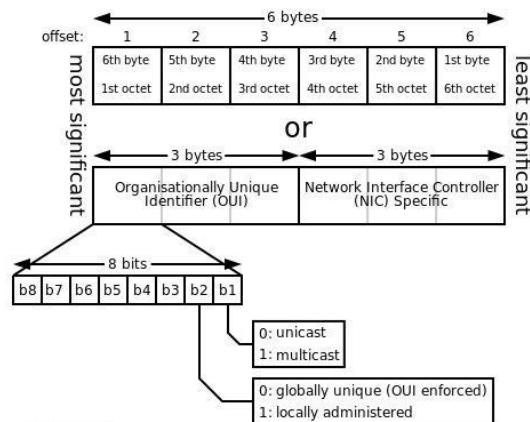
- IEEE规定地址字段的**第一个字节的最低位**为I/G位。
 - 单站地址: I/G 位 = 0。
 - 组 地址: I/G 位 = 1。组地址用来进行多播。
 - 广播地址: 所有 48 位都为 1 (全 1)。只能作为目的地址使用。
- IEEE规定地址字段的**第一个字节的最低第二位**为G/L位。
 - 全球管理: G/L 位 = 0。厂商向 IEEE 购买的 OUI 都属于全球管理。
 - 本地管理: G/L 位 = 1。用户可任意分配网络上的地址。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

92

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

93

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

- 适配器具有过滤功能
 - 每收到一个 MAC 帧，先用硬件检查帧中的 MAC 地址。
 - 如果是发往本站的帧则收下，然后再进行其他的处理。
 - 否则就将此帧丢弃，不再进行其他的处理。
- “发往本站的帧”包括以下 3 种帧：
 - 单播 (unicast) 帧 (一对一)
 - 广播 (broadcast) 帧 (一对全体)
 - 多播 (multicast) 帧 (一对多)

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

94

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

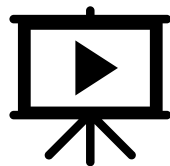
- 以太网适配器还可以设置为一种特殊的工作方式，即“混杂方式 (promiscuous mode) ”。
 - 工作在混杂方式的网卡只要“听到”有帧在以太网上传输就全部记录下来，而不管是发往哪里数据帧。
 - 如果网络上有混杂方式工作的网卡，那么就可以通过数据分析的方式窃取别人的信息。
 - 网络管理人员也可以通过此方式来监听和分析以太网的流量，已实现可量化的网络管理。
 - 最为常见的是“嗅探器”。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

95

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层



如何查看网卡的MAC地址呢？
可否自行修改网卡的MAC地址呢？

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

96

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

□ MAC帧格式:

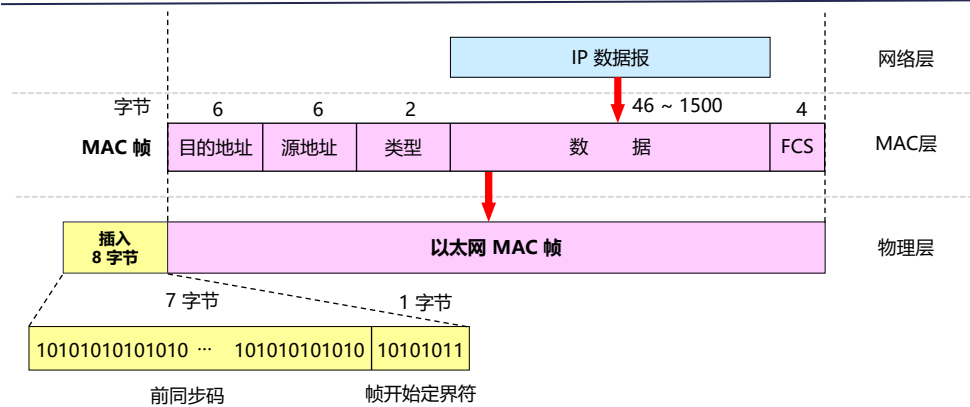
- 常用的以太网MAC帧格式有两种标准：
 - DIX Ethernet V2 标准
 - IEEE 的 802.3 标准
- 最常用的MAC帧是 DIX Ethernet V2 的格式。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

97

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

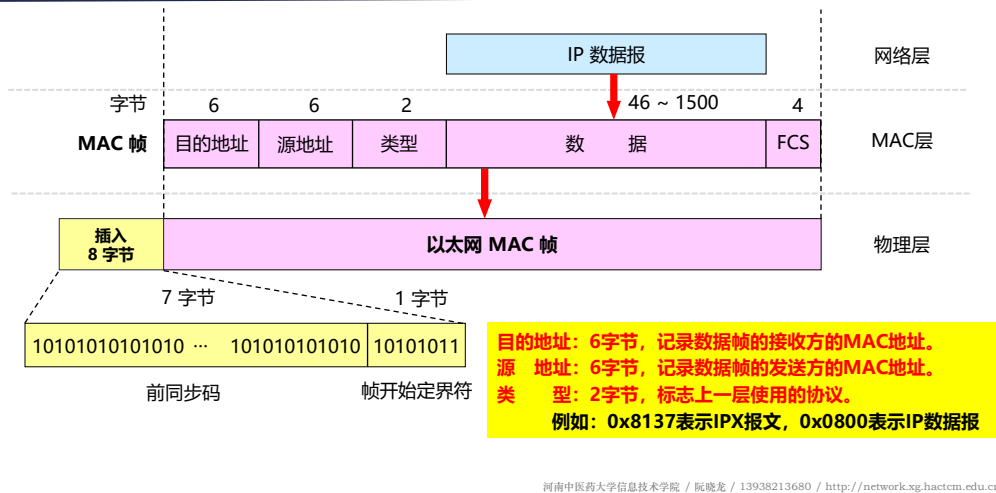


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

98

4. 使用广播信道的以太网

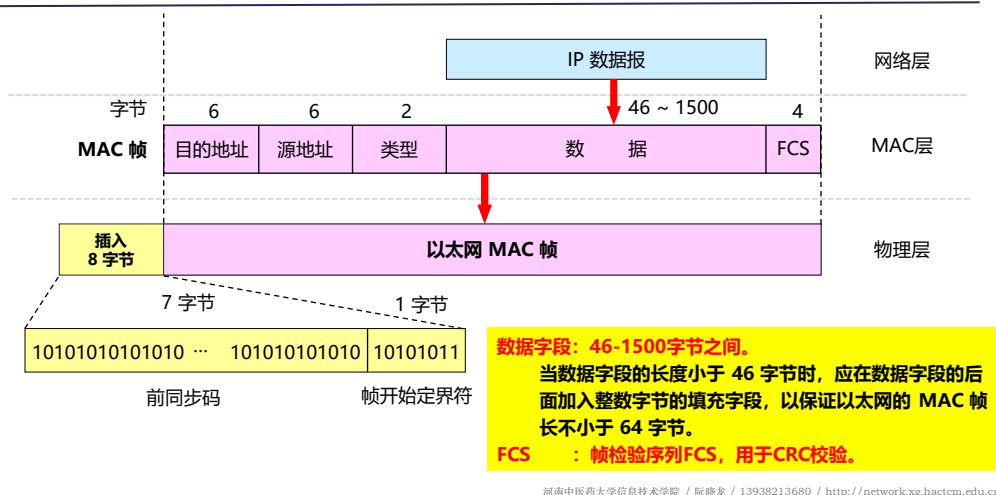
4.3 以太网的MAC层



99

4. 使用广播信道的以太网

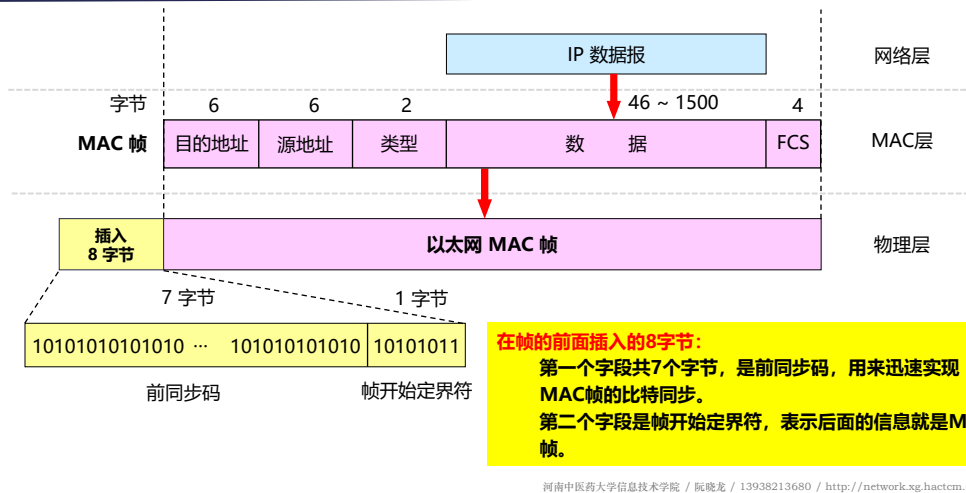
4.3 以太网的MAC层



100

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层



101

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

- 无效的 MAC 帧:
 - IEEE 802规定凡出现下述情况, 均为无效帧:
 - 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。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

102

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层

IEEE 802.3 MAC 与以太网 V2 MAC 帧格式的区别

	6字节	6字节	2字节	46 - 1500 字节	4字节
Ethernet V2 MAC 帧	目的地址	源地址	类型	数 据	FCS
IEEE 802.3 MAC 帧	目的地址	源地址	长度/类型	数 据	FCS

- 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。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

103

4. 使用广播信道的以太网

4.3 以太网的MAC层



安装并使用嗅探器软件Wireshark。
使用Wireshark软件抓取数据包，分析数据帧结构。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

104

5. 扩展的以太网

- 以太网技术的发展迅速，但以太网技术存在**传输距离**和**规模**的限制，因此希望能够把以太网进行扩展。
- 扩展主要在两个层面：
 - 物理层扩展：支持更远距离的网络。
 - 数据链路层扩展：支持更大规模的网络。
- 扩展的主要手段：
 - 集线器/HUB：物理层扩展。
 - 网桥/交换机：数据链路层扩展。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

105

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

- 以太网上的主机之间距离不能够太远，否则 CSMA/CD 会因为衰减而无法正常工作。
 - 10BASE-T 以太网的两个主机之间的距离不得超过 200m。
- 扩展主机和集线器之间距离的简单方法是使用光纤。
 - 通过光纤调制解调器，将传输的距离扩展。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

106

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

107

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

- 某单位有三个部门，每个部门都有一个局域网。
 - 通过主干集线器将三个部门的局域网连接起来，就变成了一个大的局域网。
 - 通过多级结构的集线器，将以太网进行了扩展。例如部门局域网的主机到集线器的距离为100m，主机间最远距离为200m，通过扩展后，最远主机间的距离为300m。
 - 扩展之后，三个局域网变为一个更大的局域网，扩展后的以太网是一个碰撞域（collision domain，冲突域），同时只能有一个主机发送数据，传输效率降低了。

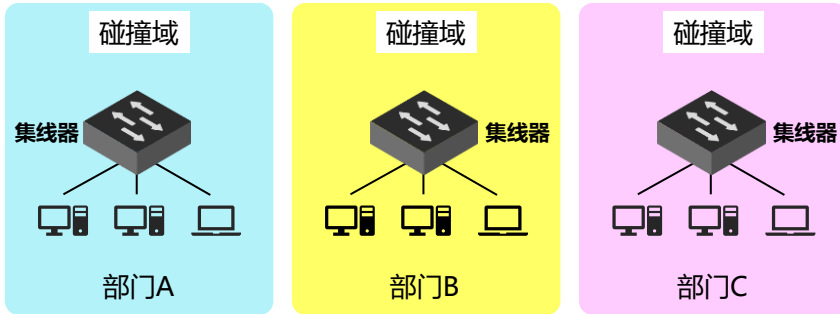
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

108

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

三个独立的碰撞域

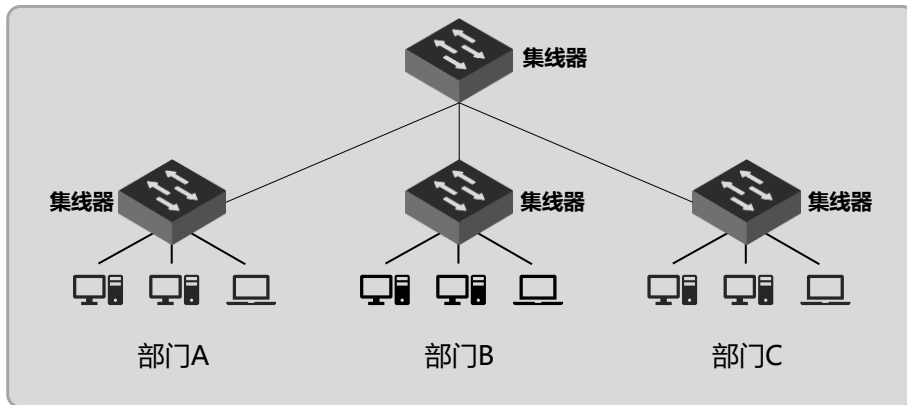


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

一个更大的碰撞域



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

- 在物理层通过集线器扩展局域网的**优点**:
 - 使原来属于不同碰撞域的局域网上的计算机能够进行跨碰撞域通信。
 - 扩大了局域网覆盖的地理范围。
- 在物理层通过集线器扩展局域网的**缺点**:
 - 碰撞域增大了，但总的吞吐量并未提高。
 - 如果使用不同的以太网技术（如数据率不同），那么就不能用集线器将它们互连起来。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

111

5. 扩展的以太网

5.1 在物理层扩展以太网

- 碰撞域
 - 碰撞域（collision domain）又称为冲突域，指网络中一个站点发出的帧会与其他站点发出的帧产生碰撞或冲突的那部分网络。
 - 碰撞域越大，发生碰撞的概率越高。

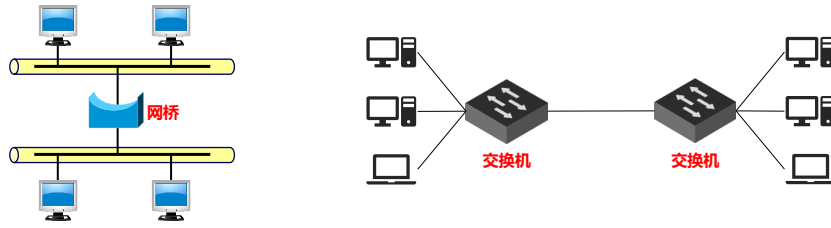
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

112

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 在数据链路层扩展局域网
 - 早期使用网桥，现在使用以太网交换机。



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

113

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

网桥

- 工作在数据链路层。
- 根据 MAC 帧的目的地址对收到的帧进行转发和过滤。或者转发，或者丢弃。

交换机

- 工作在数据链路层。
- 多端口的网桥。
- 可明显地提高以太网的性能。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

114

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 以太网交换机的特点
 - 实质上是一个多接口网桥。
 - 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，并且一般都工作在全双工方式。
 - 以太网交换机具有并行性。
 - 能同时连通多对接口，使多对主机能同时通信。
 - 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。

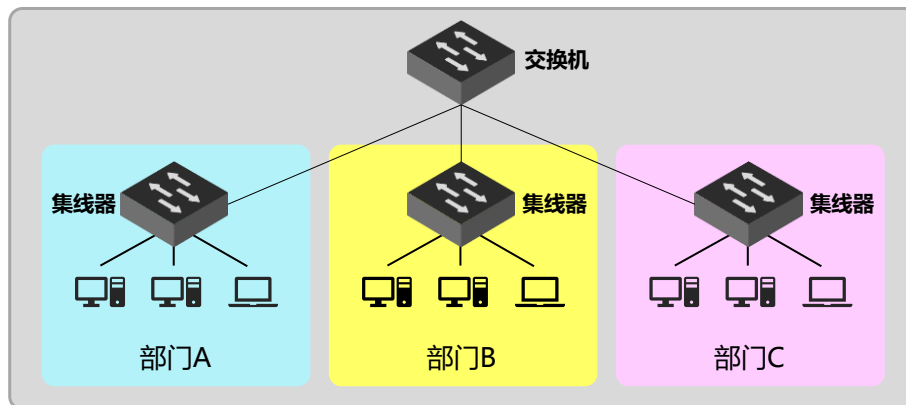
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

115

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

以太网交换机的每个接口都是一个碰撞域



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

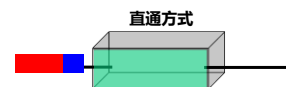
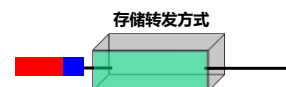
116

5. 扩展的以太网

- 以太网交换机的特点
 - 接口有存储器。
 - 即插即用。
 - 其内部的帧交换表（又称为地址表）是通过自学习算法自动地逐渐建立起来的。
 - 这种交换表就是一个内容可寻址存储器CAM (Content addressable Memory)。
 - 使用专用的交换结构芯片，用硬件转发，其转发速率要比使用软件转发的网桥快很多。
 - 以太网交换机的性能远远超过普通的集线器，而且价格并不贵。
 - 每个用户独享带宽，增加了总容量。

5. 扩展的以太网

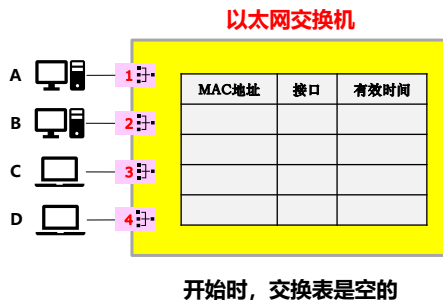
- 以太网交换机的交换方式
 - 存储转发方式
 - 把整个数据帧先缓存，再进行处理。
 - 直通 (cut-through) 方式
 - 接收数据帧的同时立即按数据帧的目的 MAC 地址决定该帧的转发接口。
 - 缺点：不检查差错就直接将帧转发出去，有可能转发无效帧。



5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 以太网交换机的自学习功能



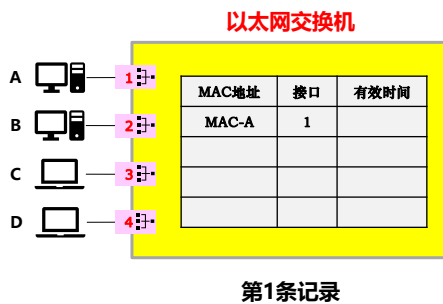
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

119

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 以太网交换机的自学习功能



以太网帧				
目的地址	源地址	类型	数据	FCS
B	A			

1. A 先向 B 发送一帧。该帧从接口 1 进入到交换机。
2. 交换机收到帧后，先查找交换表。没有查到应从哪个接口转发这个帧给 B。
3. 交换机把这个帧的源地址 A 和接口 1 写入交换表中。
4. 交换机向除接口 1 以外的所有的接口广播这个帧。
5. 由于与该帧的目的地址不相符，C 和 D 将丢弃该帧。

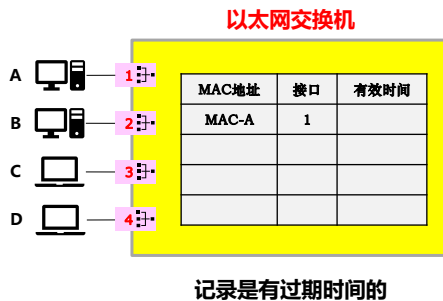
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

120

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

□ 以太网交换机的自学习功能



1. 考虑到可能有时要在交换机的接口更换主机，或者主机要更换其网络适配器，这就需要更改交换表中的项目。
2. 为此，在交换表中每个项目都设有一定的有效时间。
3. 过期的项目就自动被删除。

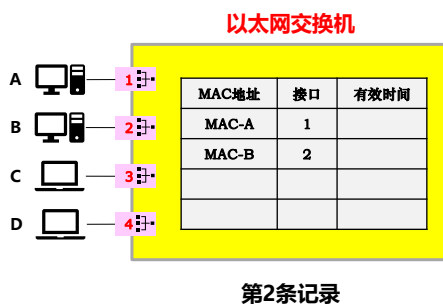
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

121

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

□ 以太网交换机的自学习功能



以太网帧

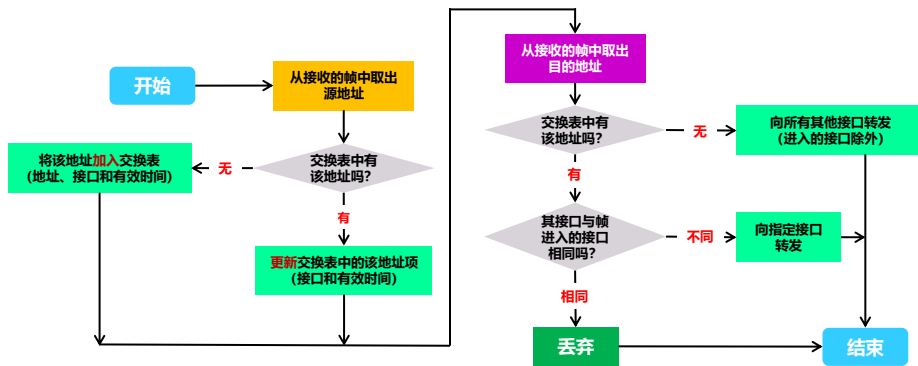
目的地址	源地址	类型	数据	FCS
A	B			

1. B 向 A 发送一帧。该帧从接口 3 进入到交换机。
2. 交换机收到帧后，先查找交换表。发现交换表中的 MAC 地址有 A，表明要发送给 A 的帧应从接口 1 转发出去。于是就把这个帧传送到接口 1 转发给 A。
3. 交换机把这个帧的源地址 B 和接口 3 写入交换表中。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

122

交换机自学习和转发帧的步骤归纳

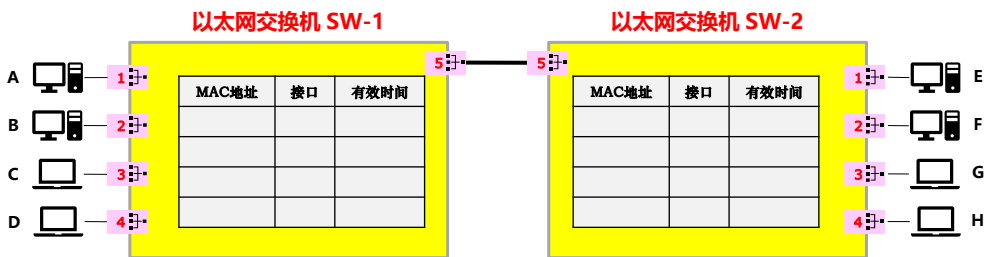


123

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 2 台以太网交换机互连



假设：A 向 B 发送了一帧，C 向 E 发送了一帧，E 向 A 发送了一帧。

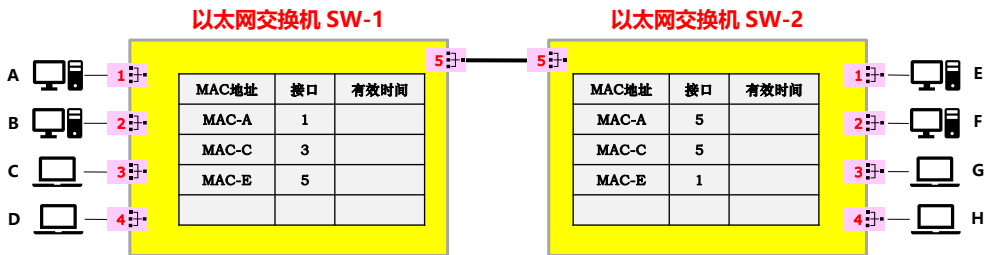
分析：以太网交换机 SW-1 和 SW-2 的交换表内容分别是什么？

124

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 2 台以太网交换机互连



假设：A 向 B 发送了一帧，C 向 E 发送了一帧，E 向 A 发送了一帧。

分析：以太网交换机 SW-1 和 SW-2 的交换表内容分别是什么？

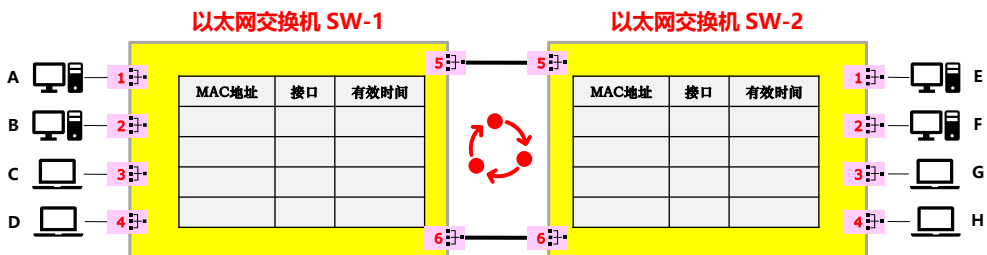
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

125

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 2 台以太网交换机互连存在的问题：回路



假设：开始时，交换机 S1 和 S2 的交换表都是空的。

假定：主机 A 向主机 E 发送一帧。

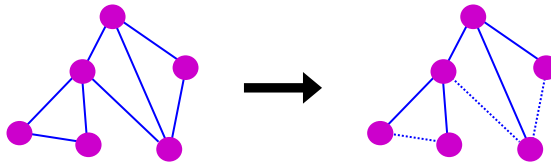
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

126

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 消除回路：使用生成树协议（STP）
 - 生成树协议 STP (Spanning Tree Protocol) 要点：
 - 不改变网络的实际拓扑，但在逻辑上则切断某些链路，使得从一台主机到所有其他主机的路径是无环路的树状结构，从而消除了兜圈子现象。



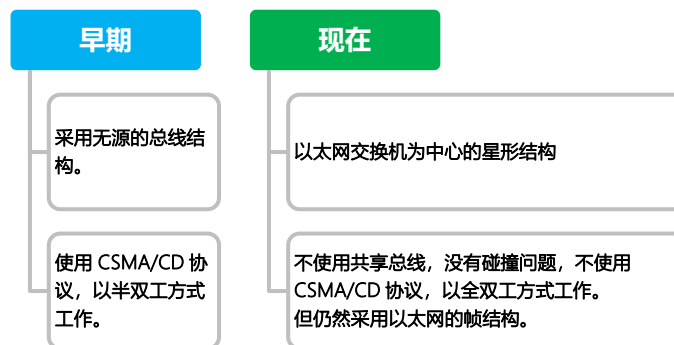
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

127

5. 扩展的以太网

5.2 在数据链路层扩展以太网

- 从总线以太网到星形以太网



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictcm.edu.cn>

128

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN

以太网存在的主要问题



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

129

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN

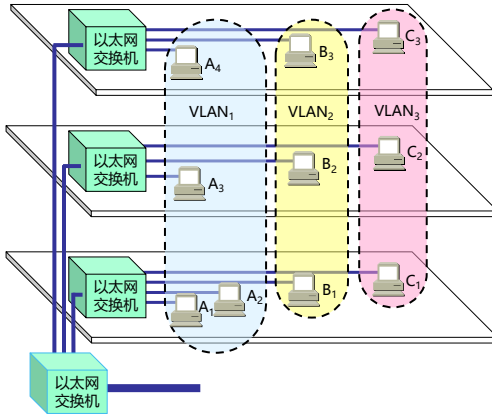
- 虚拟局域网 VLAN
 - 利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN (Virtual LAN)。
 - IEEE 802.1Q 对虚拟局域网 VLAN 的定义：
 - 虚拟局域网 VLAN 是由一些局域网网段构成的与物理位置无关的逻辑组，而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符，指明发送这个帧的计算机是属于哪一个 VLAN。
 - 虚拟局域网其实只是局域网给用户提供服务的一种服务，并不是一种新型局域网。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

130

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN



案例:

- ✓ 划分三个虚拟局域网: VLAN1, VLAN2 和 VLAN3。
- ✓ 每个虚拟局域网是一个广播域。
- ✓ VLAN₁, VLAN₂ 和 VLAN₃ 是三个不同的广播域。

应用:

- ✓ B1 向 VLAN2 内成员发送数据时, B2 和 B3 将会收到其广播的信息。
- ✓ B1 发送数据时, VLAN1 和 VLAN3 中的 A1, A2 和 C1 等都不会收到 B1 发出的广播信息。

优势:

- ✓ 虚拟局域网限制了接收广播信息的工作站数, 使得网络不会因传播过多的广播信息 (即“广播风暴”) 而引起性能恶化。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

131

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN

VLAN 技术的主要优点:

- 改善了性能
- 简化了管理
- 降低了成本
- 改善了安全性

划分 VLAN 的方法:

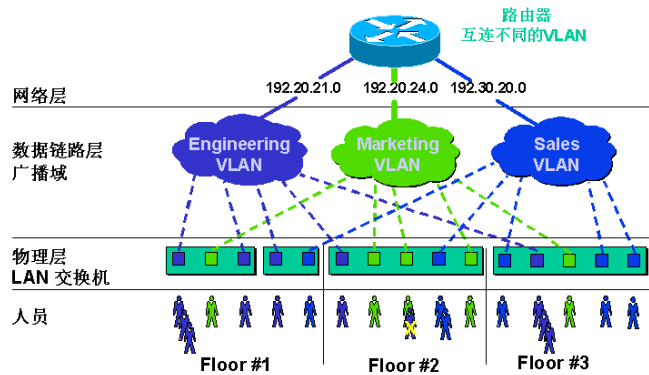
- 基于交换机端口
- 基于计算机网卡的 MAC 地址
- 基于协议类型
- 基于 IP 子网地址
- 基于高层应用或服务

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

132

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN



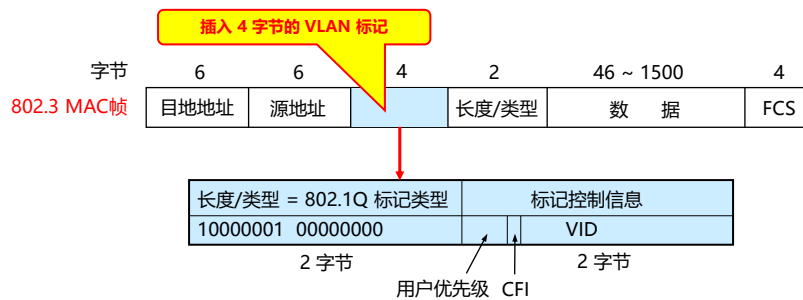
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

133

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN

- 虚拟局域网协议允许在以太网的帧格式中插入一个 4 字节的标识符，称为 VLAN 标记(tag)，用来指明发送该帧的工作站属于哪一个虚拟局域网。

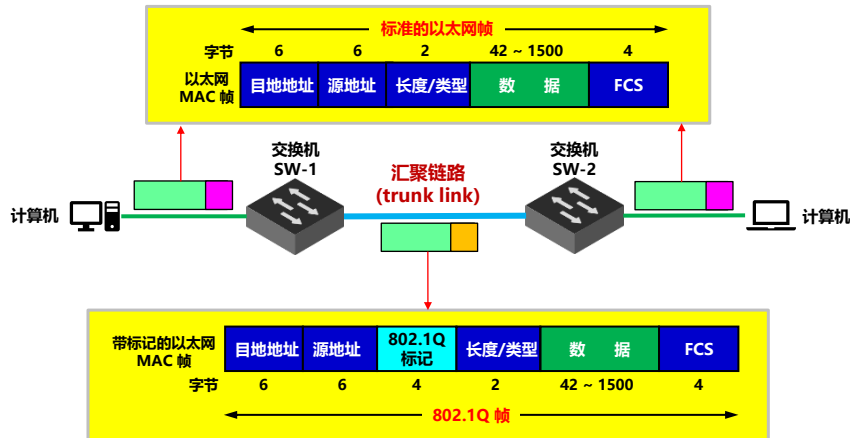


河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

134

5. 扩展的以太网

5.3 虚拟局域网 VLAN



河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

135

6. 高速以太网

- 速率达到或超过 100 Mb/s 的以太网称为**高速以太网**。
- 需要思考和总结的三个问题：
 - 从 10Mb/s 到 100Mb/s 是如何实现的？
 - 从 100Mb/s 到 1000Mb/s 是如何实现的？
 - 从 1000Mb/s 到 10Gb/s 是如何实现的？

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

136

6. 高速以太网

6.1 100Base-T

- 100BASE-T 以太网又称为快速以太网 (Fast Ethernet)。
- 在双绞线上传送 100 Mbit/s 基带信号的星形拓扑以太网。
- 仍使用 IEEE 802.3 的 CSMA/CD 协议。
- 1995 定为正式标准: IEEE 802.3u。

6. 高速以太网

6.1 100Base-T

- 100BASE-T 以太网的特点:
 - 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 $0.96\mu\text{s}$ 。

6. 高速以太网

6.1 100Base-T

100 Mbit/s 以太网的 3 种不同的物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
100BASE-TX	铜缆	100 m	两对 UTP 5 类线或屏蔽双绞线STP。
100BASE-T4	铜缆	100 m	4 对 UTP 3 类线或 5 类线。
100BASE-FX	光缆	2000 m	2 根光纤，发送和接收各用一根。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

139

6. 高速以太网

6.2 1000-BASE 以太网

- 吉比特以太网：
 - 1996 年夏季吉比特以太网的产品上市。
 - IEEE在 1997 年通过了吉比特以太网标准 802.3z, 1998年成为正式标准。
 - 吉比特以太网已成为以太网的主流产品。
- 吉比特以太网的特点：
 - 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，在全双工方式不使用 CSMA/CD 协议。
 - 与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

140

6. 高速以太网

6.2 1000-BASE 以太网

- 吉比特以太网的物理层
 - 使用 2 种成熟的技术：一是来自现有的以太网，二是美国国家标准协会 ANSI 制定的光纤通道 FC (Fiber Channel)。

吉比特以太网物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
1000BASE-SX	光缆	550 m	多模光纤 (50 和 62.5 μm)
1000BASE-LX	光缆	5000 m	单模光纤 (10 μm) 多模光纤 (50 和 62.5 μm)
1000BASE-CX	铜缆	25 m	使用 2 对屏蔽双绞线电缆 STP
1000BASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 UTP 5 类线

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

141

6. 高速以太网

6.2 1000-BASE 以太网

- 半双工方式工作的吉比特以太网
 - 半双工时采用 CSMA/CD，必须进行碰撞检测。
 - 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：
 - 载波延伸 (carrier extension)
 - 分组突发 (packet bursting)
 - 全双工方式工作的吉比特以太网不使用载波延伸和分组突发。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

142

载波延伸

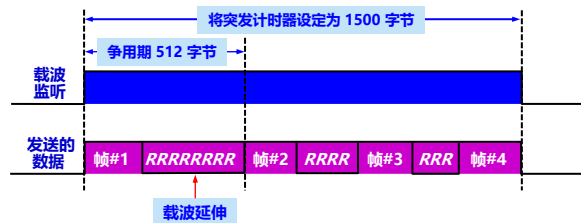
将争用时间增大为 512 字节。
凡发送的 MAC 帧长不足 512 字节时，就用一些特殊字符填充在帧的后面。



143

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。
这样就形成可一串分组的突发，直达到 1500 字节或稍多一些为止。



144

6. 高速以太网

6.3 10GE 和 100GE 以太网

- 10 吉比特以太网 (10GE) 主要特点:
 - 万兆比特。
 - 与 10、100、1000 Mbit/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。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

145

6. 高速以太网

6.3 10GE 和 100GE 以太网

10GE 的物理层标准

名称	媒体	网段最大长度	特点
10GBASE-SR	光缆	300 m	多模光纤 (0.85 μm)
10GBASE-LR	光缆	10 km	单模光纤 (1.3 μm)
10GBASE-ER	光缆	40 km	单模光纤 (1.5 μm)
10GBASE-CX4	铜缆	15 m	使用 4 对双芯同轴电缆 (twinax)
10GBASE-T	铜缆	100 m	使用 4 对 6A 类 UTP 双绞线

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

146

6. 高速以太网

6.3 10GE 和 100GE 以太网

- 以太网的技术发展很快，在 10GE 之后又制订了 40GE/100GE 的标准 IEEE 802.3ba-2010。
- 40GE/100GE 以太网的特点是：
 - 仅在全双工的模式下传输，没有争用问题。
 - 使用以太网的帧格式以及 802.3 标准规定的最小和最大帧长度。
 - 使用单模光纤传输时能够达到 40km（使用4个波长通过波分复用技术实现）。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

147

6. 高速以太网

6.3 10GE 和 100GE 以太网

40GE / 10GE 的物理层标准

物理层	40GE	100GE
在背板上传输至少超过 1 m	40GBASE-KR4	
在铜缆上传输至少超过 7 m	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10
在多模光纤上传输至少 100 m	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10, *100GBASE-SR4
在单模光纤上传输至少 10 km	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
在单模光纤上传输至少 40 km	*40GBASE-ER	100GBASE-ER4

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.haictm.edu.cn>

148

6. 高速以太网

6.4 端到端的以太网传输

- 以太网的工作范围已经扩大到城域网和广域网，实现了端到端的以太网传输。
- 端到端的以太网传输的优势有：
 - **技术成熟**：以太网是一种经过实践证明的成熟技术。
 - **互操作性很好**：不同厂商生产的以太网都能够可靠的进行操作。
 - **在广域网中使用以太网时价格便宜**
 - 广域网使用以太网，价格大约只有同步光网络SONET的1/5 和异步传递方式ATM的 1/10。
 - 能够适应多种的传输媒体，使得具有不同传输媒体的用户在进行通信时不需要重新布线。
 - **采用统一的以太网帧格式，简化了操作和管理**
 - 端到端都用以太网技术，数据帧格式都是802定义的帧格式，不需要进行帧格式转换。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

149

6. 高速以太网

6.4 端到端的以太网传输

- 以太网已成功地把速率提高到1~10Gb/s，所覆盖的地理范围也扩展到了城域网和广域网，因此现在人们正在尝试使用以太网进行宽带接入。
 - 以太网接入的重要特点是它可提供双向的宽带通信，并且可根据用户对带宽的需求灵活地进行带宽升级。
 - 采用以太网接入可实现端到端的以太网传输，中间不需要再进行帧格式的转换。这就提高了数据的传输效率和降低了传输的成本。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

150

6. 高速以太网

6.4 端到端的以太网传输

- IEEE 在 2001 年初成立了 802.3 EFM 工作组，专门研究高速以太网的宽带接入技术问题。
- 以太网宽带接入具有以下特点：
 - 可以提供双向的宽带通信。
 - 可以根据用户对带宽的需求灵活地进行带宽升级。
 - 可以实现端到端的以太网传输，中间不需要再进行帧格式转换。
 - 但不支持用户身份鉴别。

河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

151

6. 高速以太网

6.4 端到端的以太网传输

- PPPoE (PPP over Ethernet)：在以太网上运行 PPP。
 - 将 PPP 帧封装到以太网中来传输。
 - 现在的光纤宽带接入 FTTx 都要使用 PPPoE 的方式进行接入。
 - 利用 ADSL 进行宽带上网时，从用户个人电脑到家中的 ADSL 调制解调器之间的连接也使用 RJ-45 和 5 类线，也使用 PPPoE。

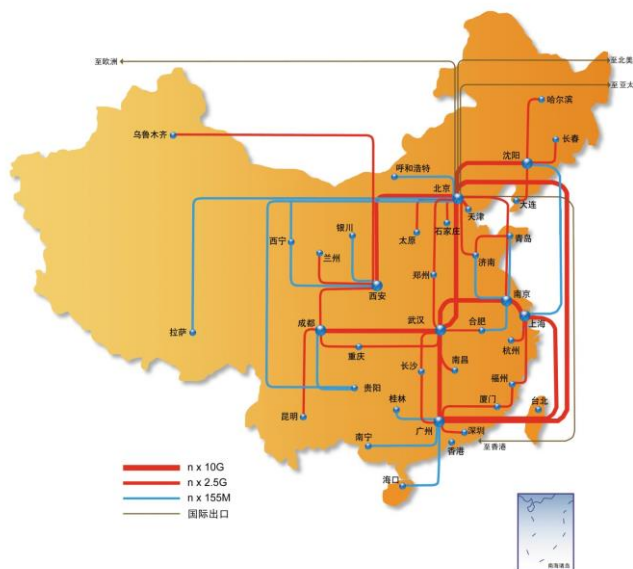
河南中医药大学信息技术学院 / 阮晓龙 / 13938213680 / <http://network.xg.hactcm.edu.cn>

152

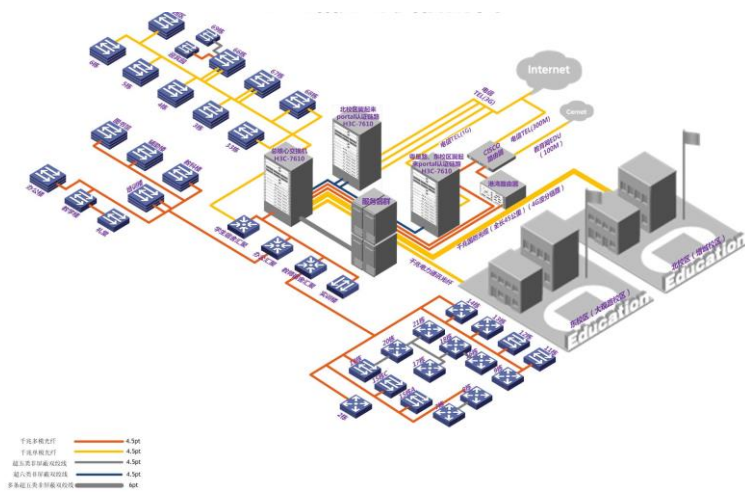
以太网从10Mbps到100Gbps的几十年来演进，充分说明了：



153



154



Thanks