



北京邮电大学

Beijing University of Posts and Telecommunications

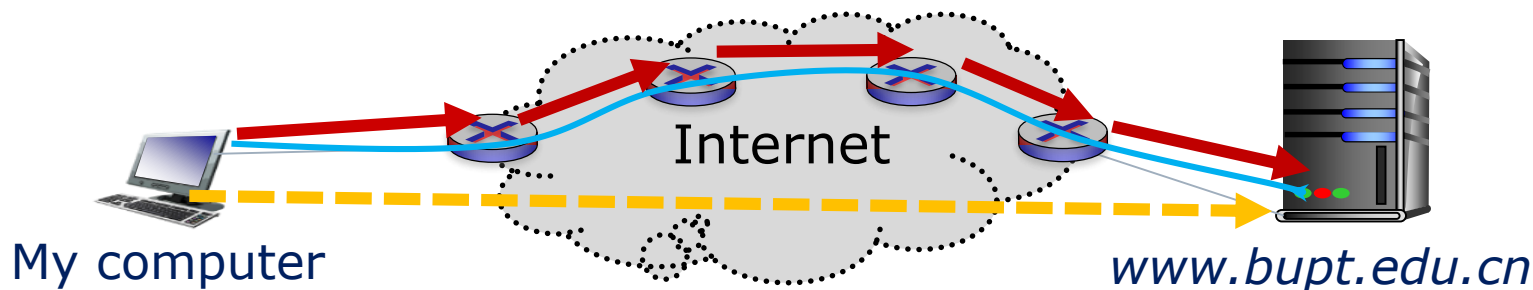
计算机网络

第五章 数据链路层

网络空间安全学院

2025年5月

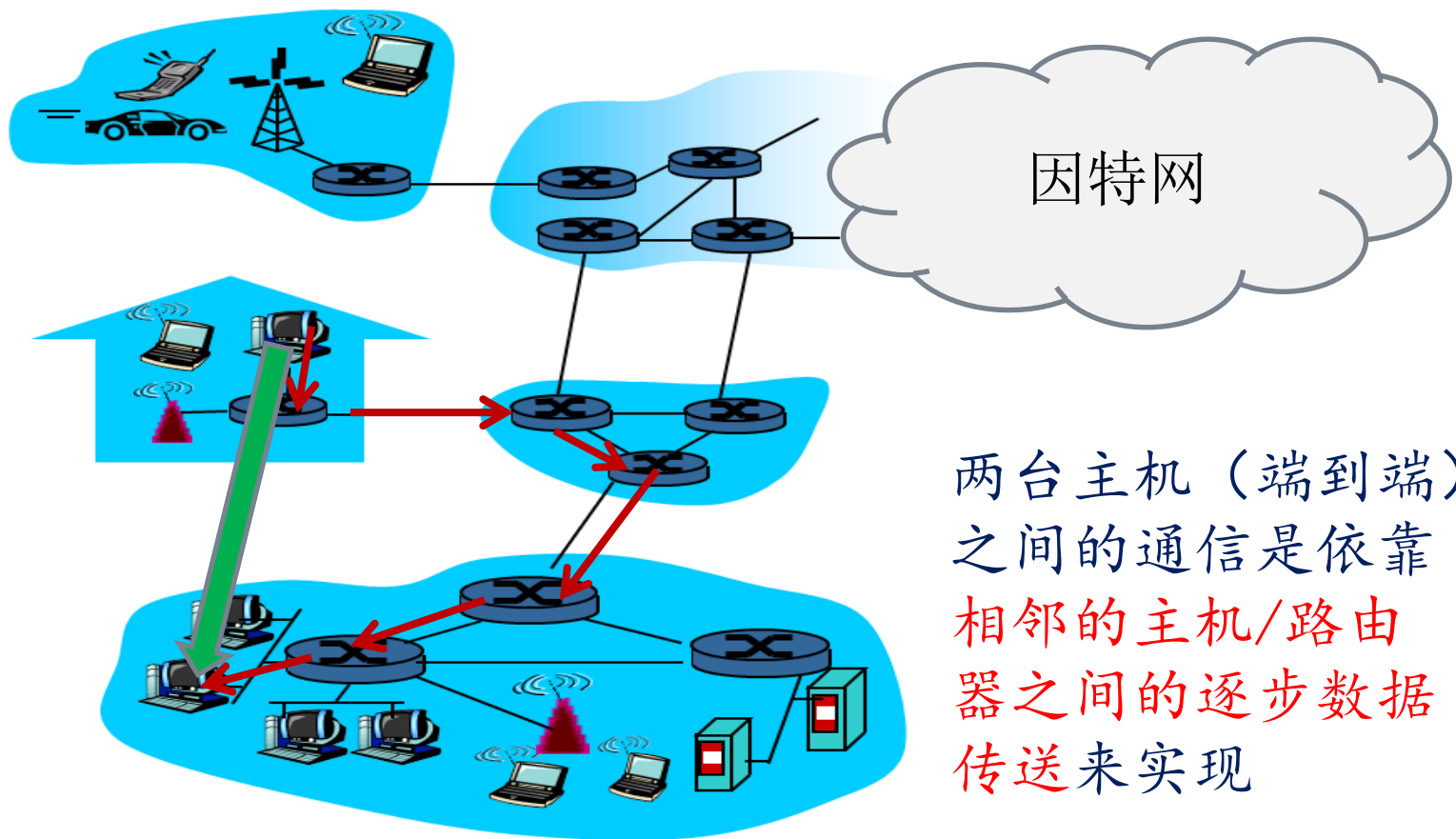
用户的应用需求：访问北邮主页



- ◆ 应用层：这是一个WWW应用
- ◆ 传输层：TCP提供了一个可靠的逻辑通道
- ◆ 网络层：通过路由选择，确定了一条主机-主机的路径
- ◆ 每一步：相邻节点（主机-路由器、路由器-路由器）之间的数据传输如何实现？

➡ 数据链路层负责

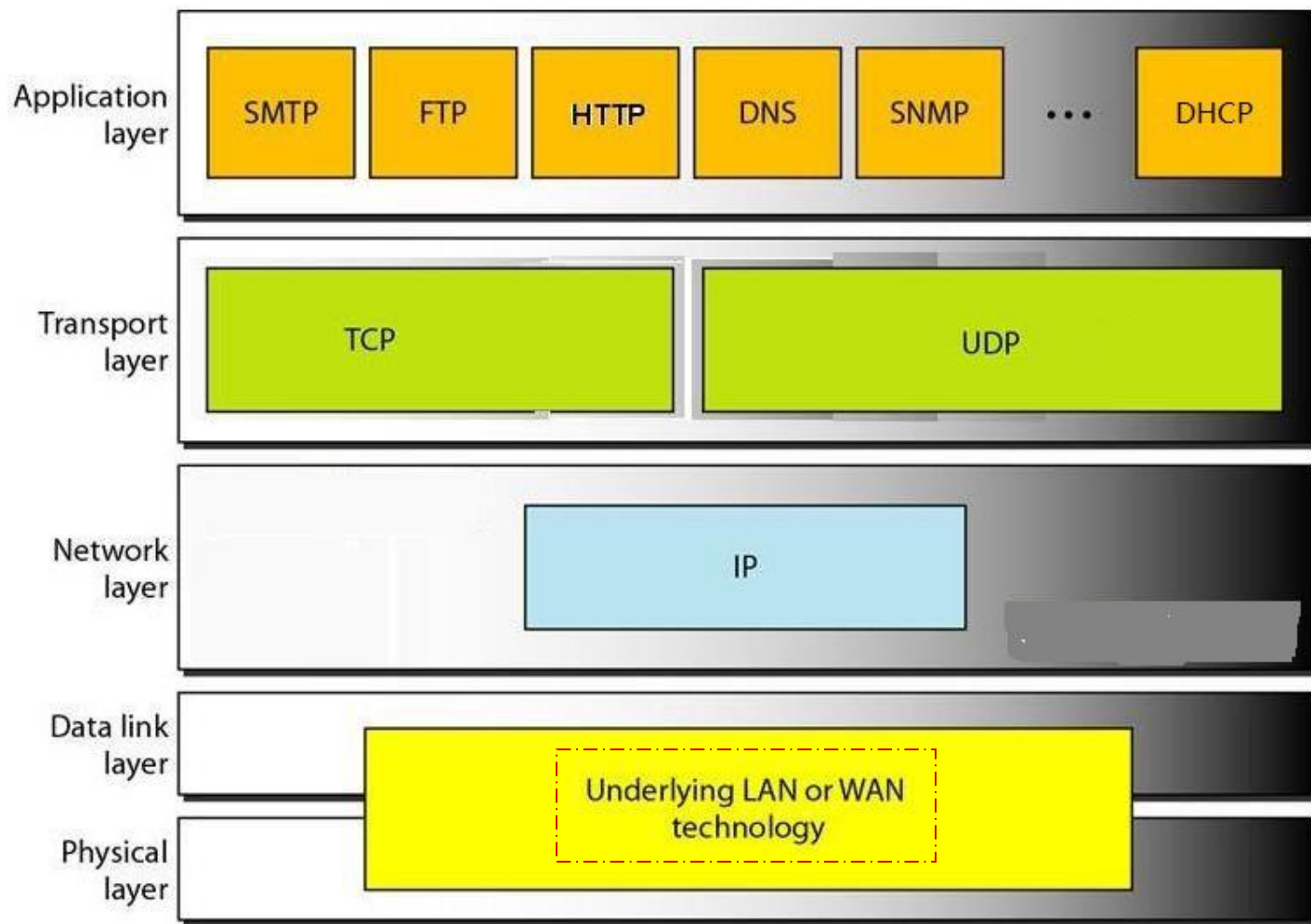
数据链路层的作用？



[Kurose]

TCP/IP协议栈

TCP/IP协议栈对于数据链路层和物理层没有规定



教学要求及内容

- ◆ 掌握数据链路层的功能和实现的技术要点
 - 数据成帧方法
 - 差错检测方法：CRC校验
 - 编址方法
- ◆ 了解数据链路层的协议实例
 - PPP

内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

为什么需要数据链路层？

◆ 物理信道是不可靠的！

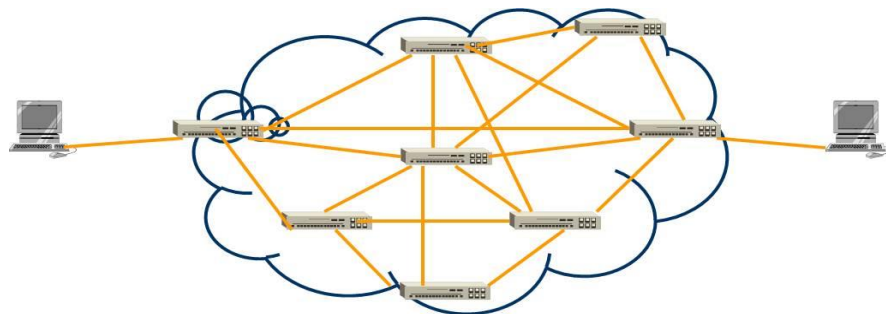
- 噪声的干扰可能导致数据传输差错
 - 需要进行差错检测和纠正
- 发送方的速率可能大于接收方的速率，从而导致数据丢失
 - 需要进行流量控制

◆ 数据链路层实现相邻主机/路由器间的可靠的数据传输

数据链路层的信道类型

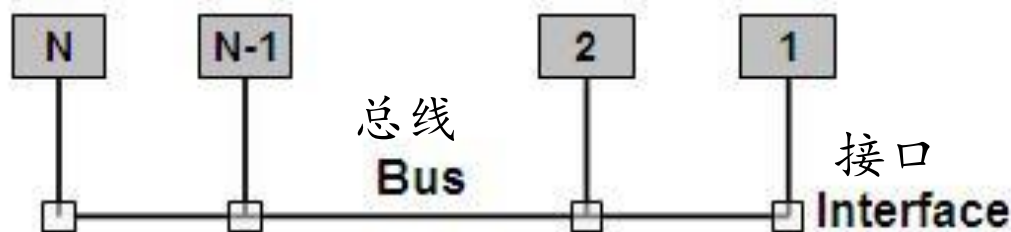
◆ 点到点信道

- 一条信道上只有两台设备
- 独占信道
- 一对一通信
- 本章学习



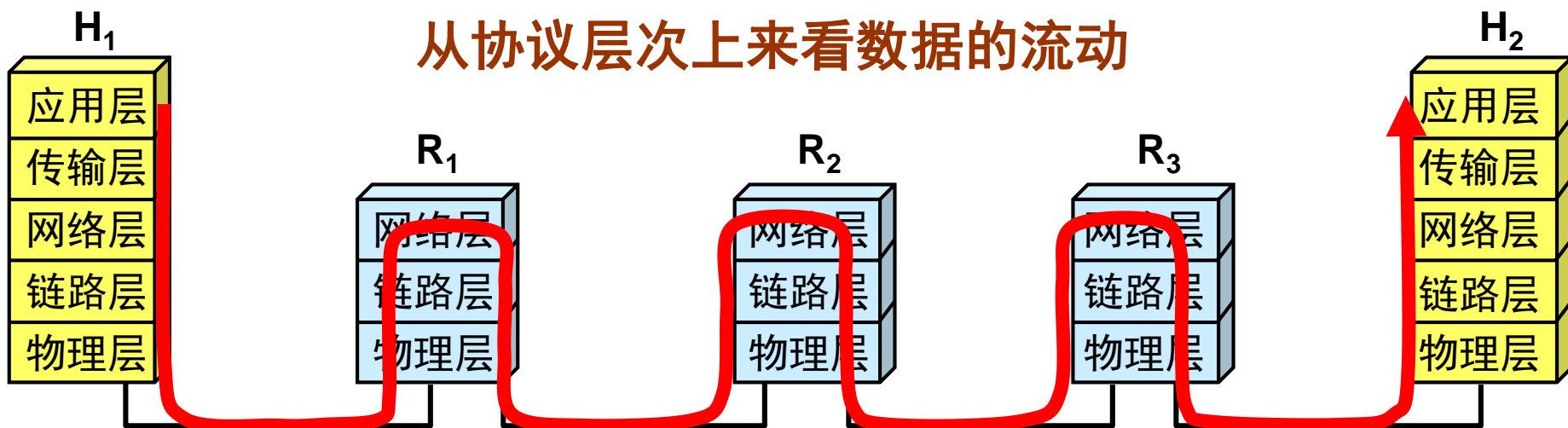
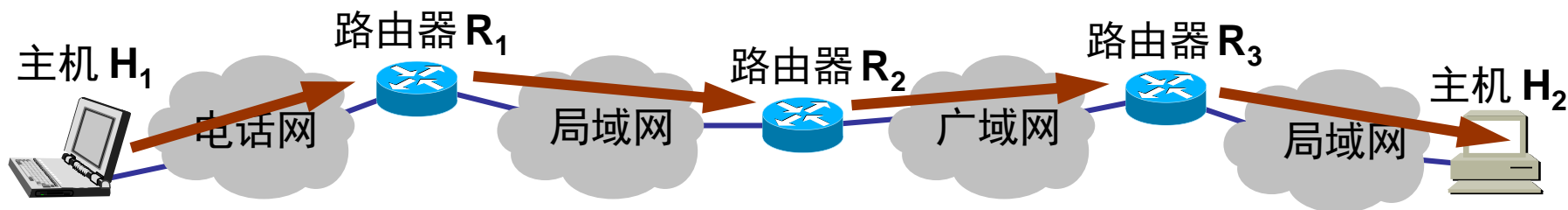
◆ 广播信道

- 多个设备共享一条公共信道
- 一对多通信
- 需要解决信道竞争问题
- LAN采用
- 在第6章学习



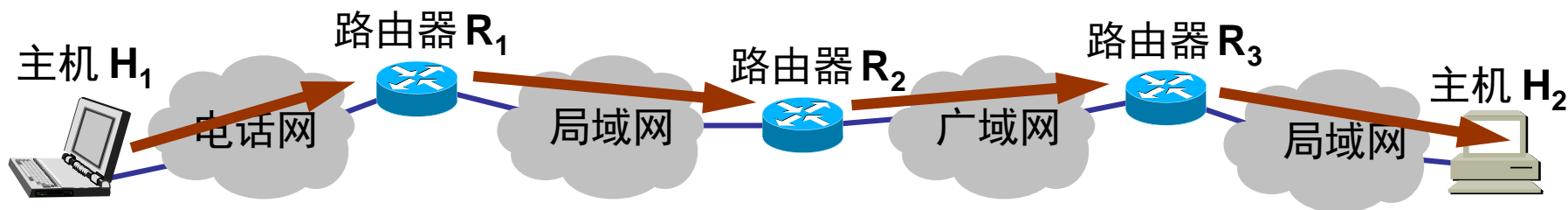
网络层：主机-主机通信

主机 H_1 向 H_2 发送数据

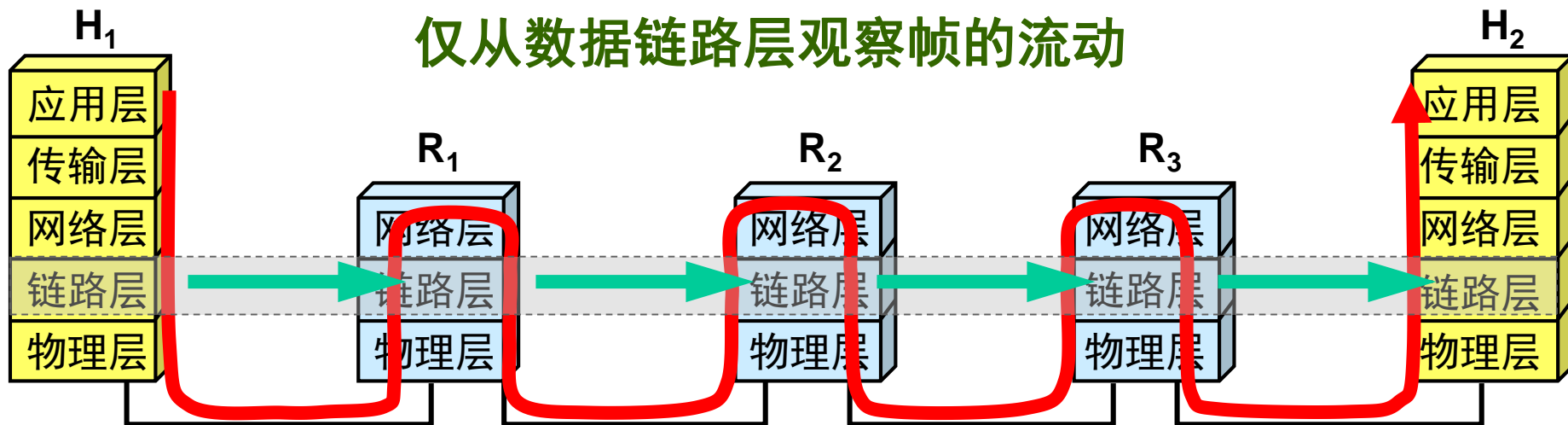


数据链路层：点到点通信

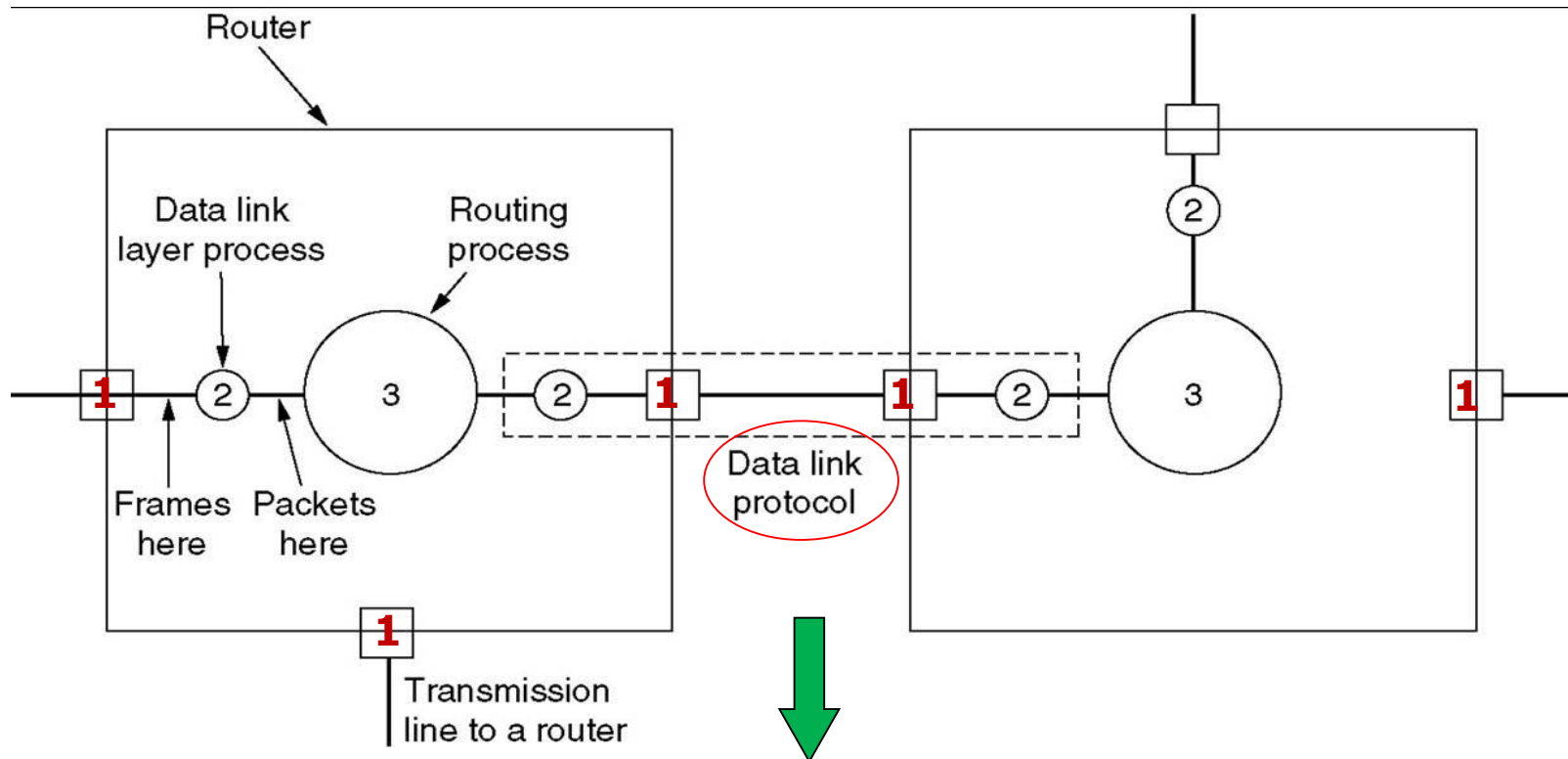
主机 H_1 向 H_2 发送数据



仅从数据链路层观察帧的流动



数据链路层的功能



- ➡流量控制：可以发送多少数据？
- ➡差错控制：如何发现传输差错并纠正？
- ➡访问控制：谁能发送？

数据链路层的主要功能

◆ 链路管理

- 数据链路的建立、维护和释放，以提供面向连接的服务

◆ 封装成帧

- 将网络层的数据（如IP包）加上首部和尾部，组成帧

◆ 差错控制

- 检查物理层的传输差错，并纠正错误

◆ 流量控制

- 防止发送方发送太快而淹没接收方

◆ 透明传输

- 允许网络层的数据包包含任何比特串

◆ 链路寻址：给网卡编址（物理地址/硬件地址）

数据链路层的服务

◆ 无确认的无连接服务

- 只发送不确认
- 适合于低误码率的信道，如LAN

◆ 有确认的无连接服务

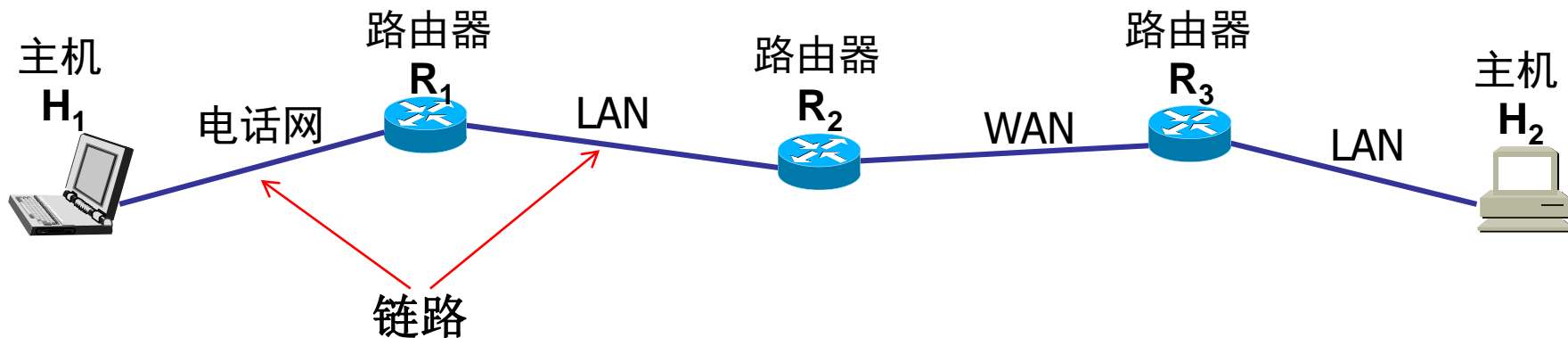
- 接收方收到数据后要回送确认
- 适合于误码率相对较高的不可靠信道，如WLAN

◆ 面向连接的服务

- 在发送数据之前首先要建立连接，确保数据传输的可靠性
- WAN采用

链路和数据链路

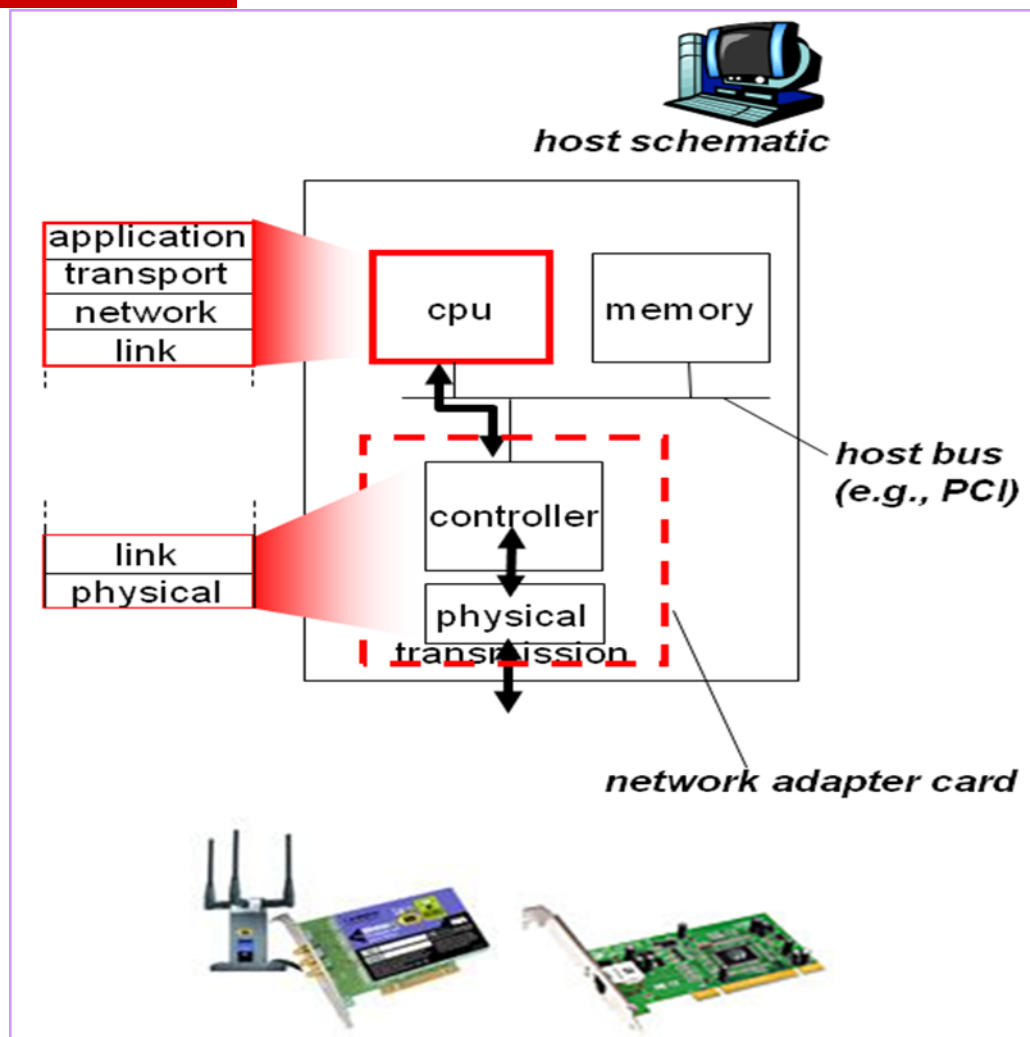
- ◆ **链路 (link)**: 是一条无源的点到点的物理线路段, 中间没有任何其他的交换结点
 - 链路是一条路径的组成部分
- ◆ **数据链路 (data link)**: 链路+数据链路层协议
 - 不同的链路可能采用不同的协议



数据链路层协议一般由网卡实现

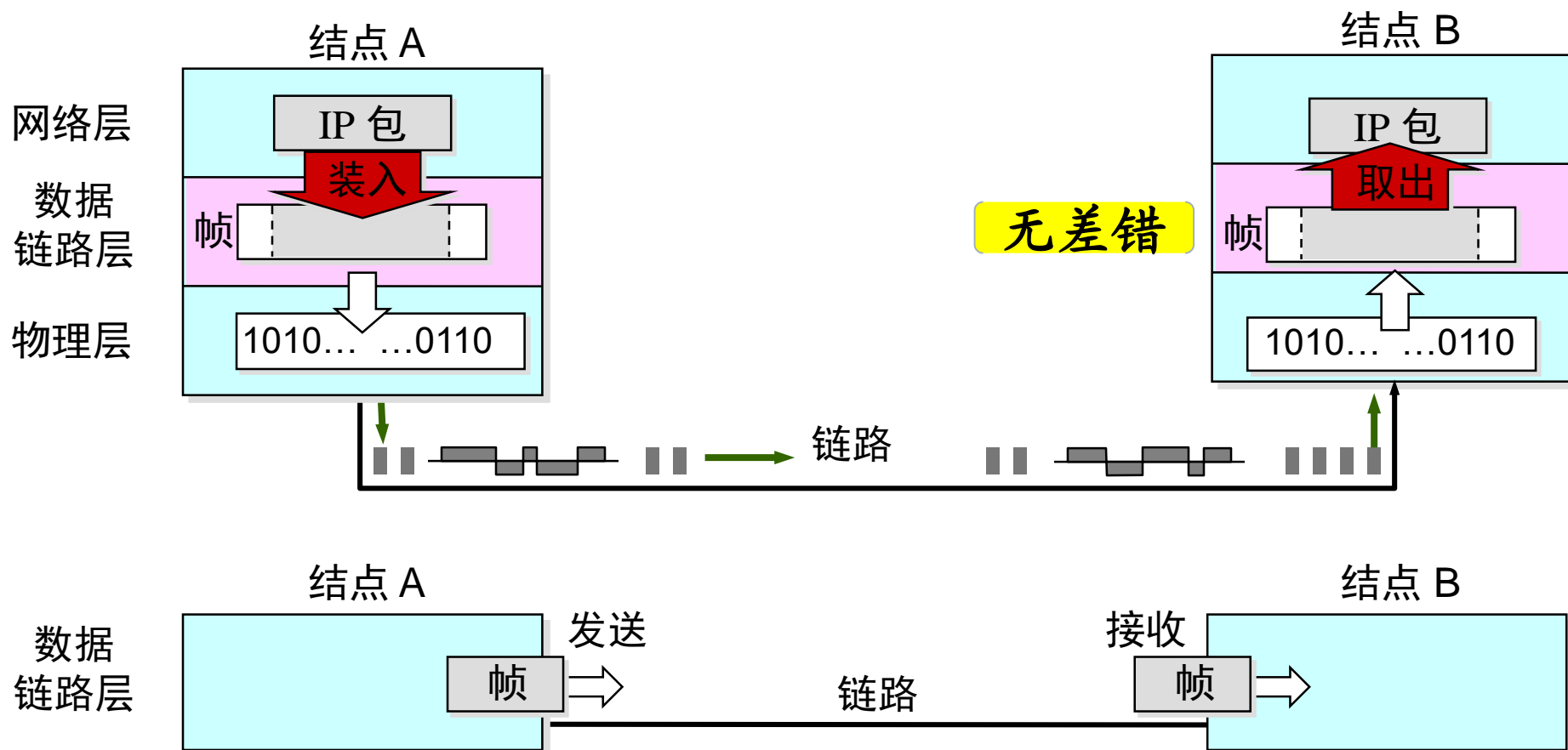
◆ 网卡

- 网络适配器：NIC
- 一般实现数据链路层协议和物理层协议



数据链路和帧

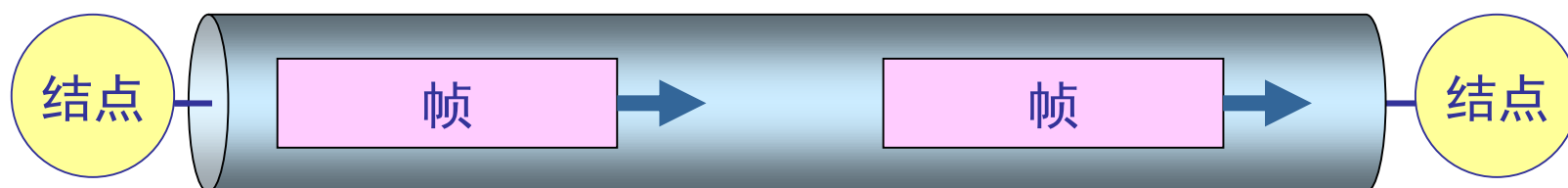
◆ 帧：数据链路层处理的数据单元



数据链路和帧

◆ 数据链路层像个数字管道

在这条数字管道上传输的数据单位是**帧**



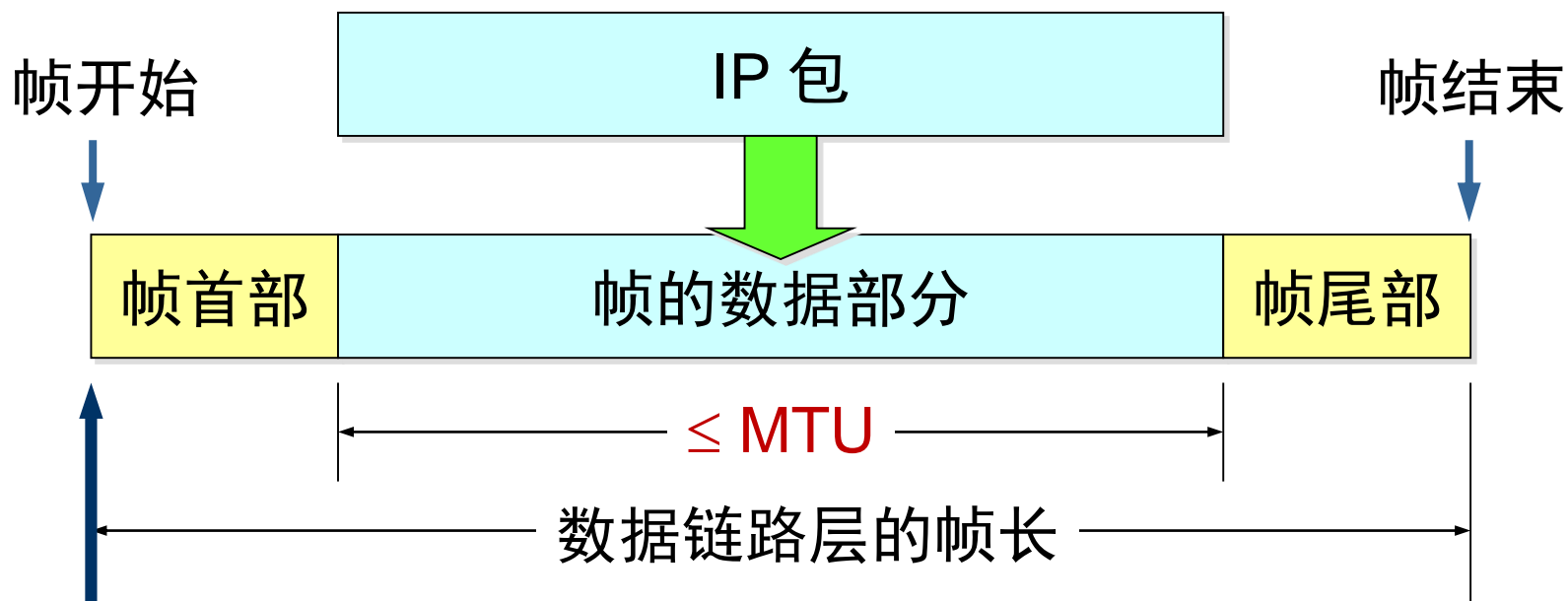
➤ 早期的数据通信协议曾叫作通信规程 (procedure)。因此在数据链路层，**规程和协议是 synonym。**

内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

什么是成帧？

- ◆ 在上层数据的前后分别添加首部和尾部，就构成了一个帧
- ◆ 首部和尾部的一个重要作用就是进行帧定界（帧同步），即标记帧的开始和结束



成帧方法：字符计数法

- ◆ 在帧中增加一个长度字段，表示帧的总字节数
- ◆ 早期的DDCMP协议使用

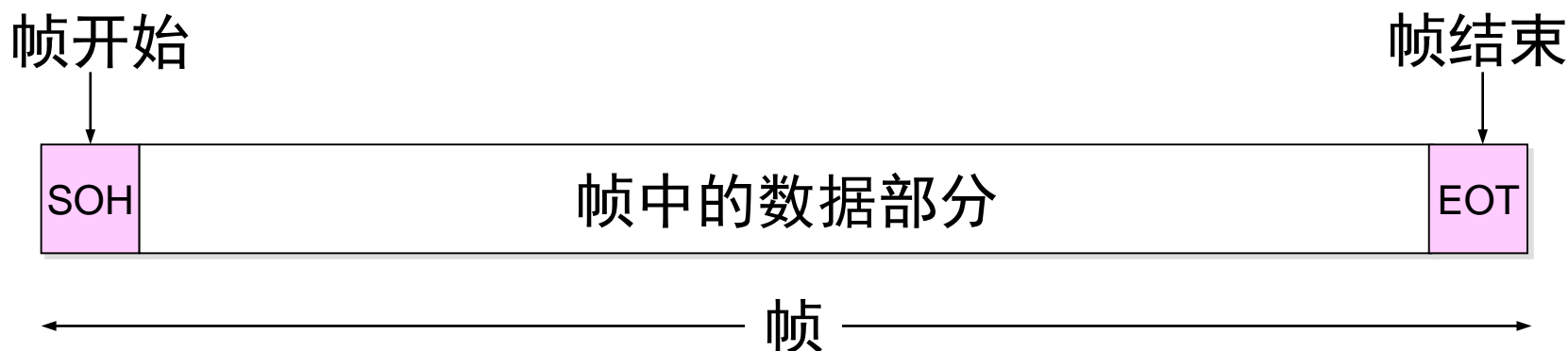


- ◆ 问题：一旦帧长度字段出错，无法再恢复同步！



成帧方法：字符填充法（1）

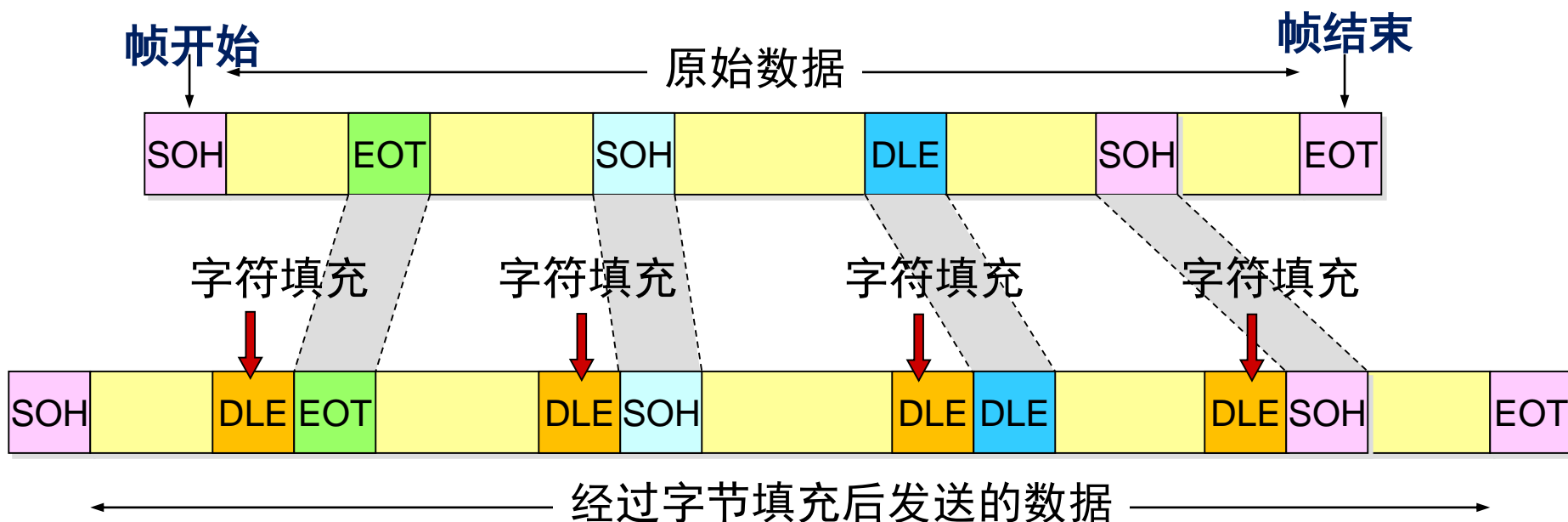
- ◆ 采用固定的字符作为帧首部和尾部
- ◆ 示例：IBM的BISYNC协议
 - 帧首字符：SOH (0x01)
 - 帧尾字符：EOT (0x04)



成帧方法：字符填充法（2）

- ◆ 透明传输：帧的数据中可以包含任何字符，即可以出现与帧首、帧尾相同的字符（*不能限制上层的数据！*）
- ◆ 字符填充：一旦数据中出现和帧首/尾字符相同的字符，则填充转义字符，以进行区别
- ◆ 转义字符：DLE (0x10)

缺点：依赖于字符集



成帧方法：零比特填充法

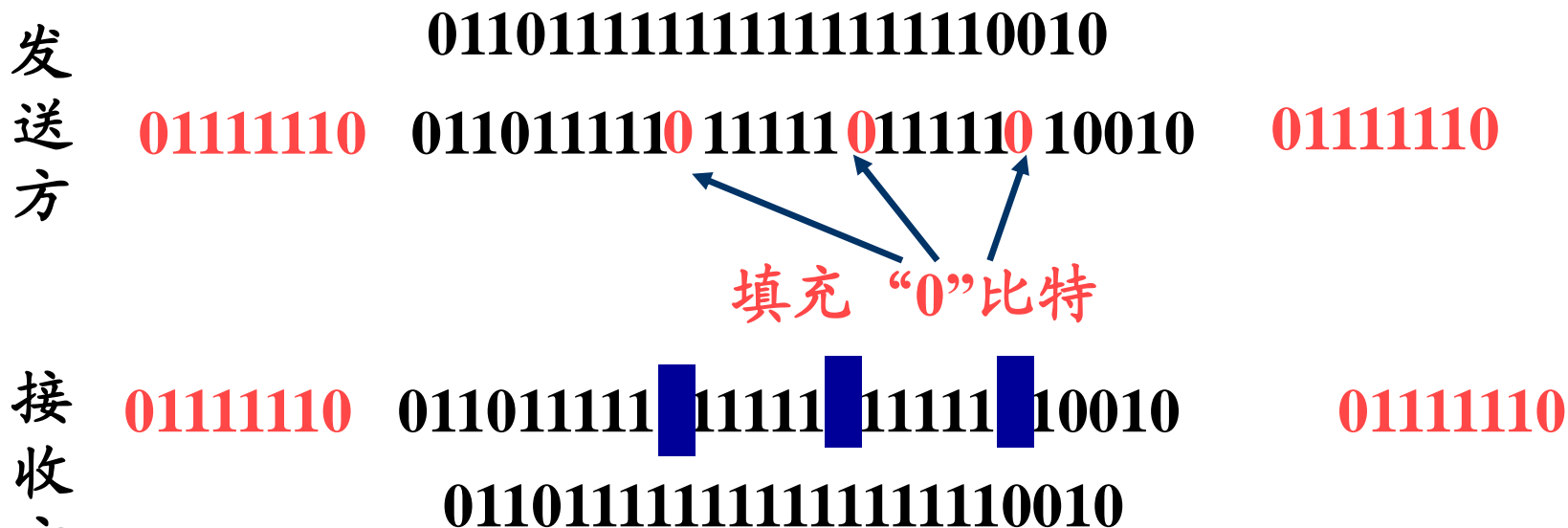
◆ 帧的长度为任意比特数

◆ 不依赖于字符集

◆ 帧首尾标志：0111 1110

◆ 透明传输：零比特填充

➤ 当帧中的数据出现连续5个1时，在其后插入一个0



成帧方法：物理层编码违例法

◆ 物理层编码有冗余



- 曼彻斯特编码：码元中间的跳变表示0和1
- 中间无跳变的码元即是冗余码元，可以表示帧的开始和结束
- 无需填充！



内容提要

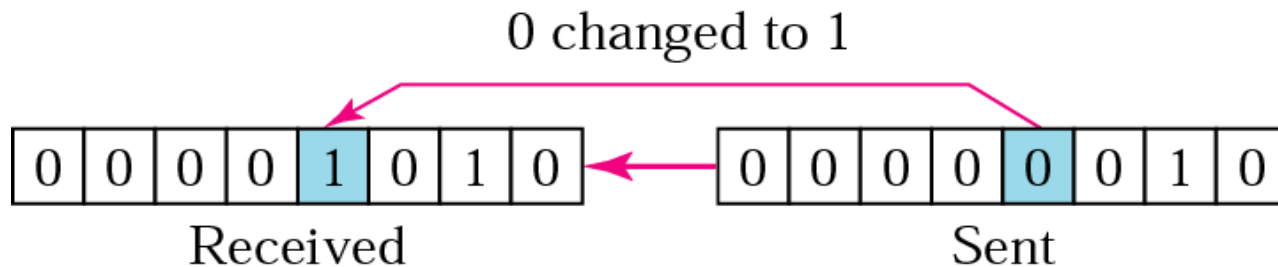
- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

什么是差错控制？

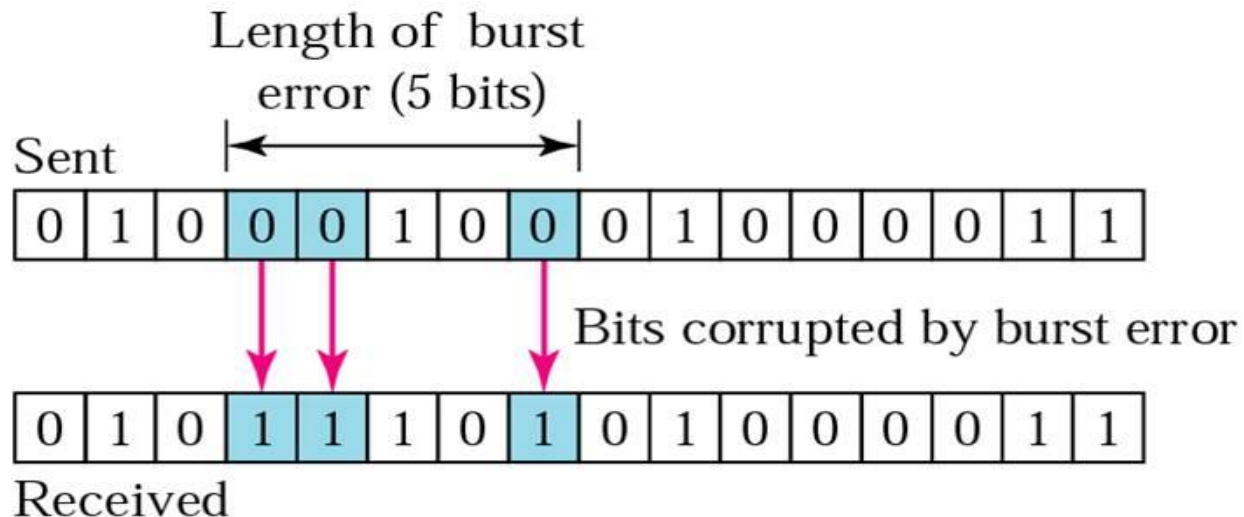
- ◆ 由于噪声的影响，数据在传输过程中可能会产生**比特差错**：1→0，0→1，增加、删除1个比特
- ◆ 误码率 BER (Bit Error Rate)：在一段时间内，传输错误的比特占所传输比特总数的比率
- ◆ 差错种类
 - 单比特差错 
 - 突发差错
- ◆ 差错控制
 - 差错检测：发现传输差错 
 - 差错纠正：恢复正确数据

单比特差错与突发差错

◆ 单比特差错：只有1个比特错误



◆ 突发差错：两个比特或更多比特发生错误



差错检测方法：奇偶校验

◆ 检错码：发送方在传输的数据中加入校验信息，接收方通过计算可以发现传输差错

◆ 奇偶校验码

➤ 1个校验比特

➤ 奇校验：加入校验位后，1的个数为奇数

1 0 1 1 1 0 1 0 0

0 0 1 1 1 0 1 0 0 1-bit error

0 0 0 1 0 0 1 0 0 3-bit error

0 0 1 1 1 1 1 0 0 2-bit error

➤ 偶校验：加入校验位后，1的个数为偶数

1 0 1 1 1 0 1 0 1

➤ 检错能力：如果发生错误的比特总数为奇数个，能发现

差错检测方法：循环冗余校验

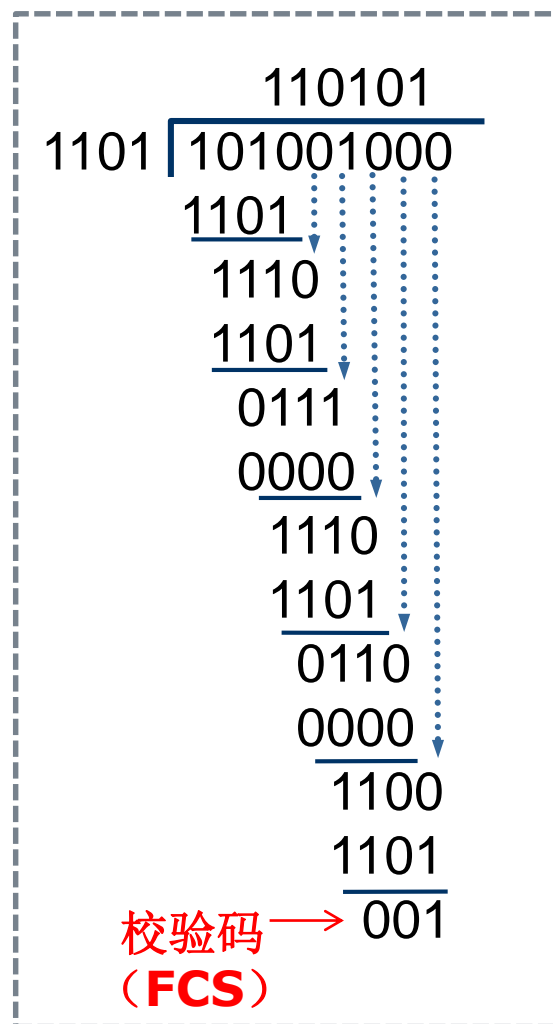
- ◆ CRC (Cyclic Redundancy Code) , 又称为多项式编码
- ◆ 把被处理的数据块看做是一个n阶的二进制多项式： $a_0x_0 + a_1x_1 + \dots + a_{n-1}x_{n-1}$
 - 如10110101对应的多项式是： $x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
- ◆ 采用模二除法计算校验码
- ◆ 生成多项式G(x)：发送方和接收方约定，作为除数
- ◆ 校验码：余数

CRC的计算方法

- ◆ 若生成多项式 $G(x)$ 为 $r+1$ 个比特，即最高阶为 r ，则在待校验数据后面增加 r 个0
- ◆ 采用模二除法，除以 $G(x)$
 - 对应比特异或
 - 不进位、不借位
- ◆ 余数即是所求的校验码
- ◆ 将余数附在数据之后发送到信道上

CRC的计算示例

- ◆ 待校验数据：101001
- ◆ 生成多项式 $G(x) = x^3 + x^2 + 1$
- ◆ 被除数：101001 000
- ◆ 除数：1101
- ◆ 余数：001
- ◆ 发送的数据：101001**001**
- ◆ 接收方：
 - 用收到的数据比特串除以 $G(x)$ ，余数=0，则认为传输正确；否则，认为传输有差错



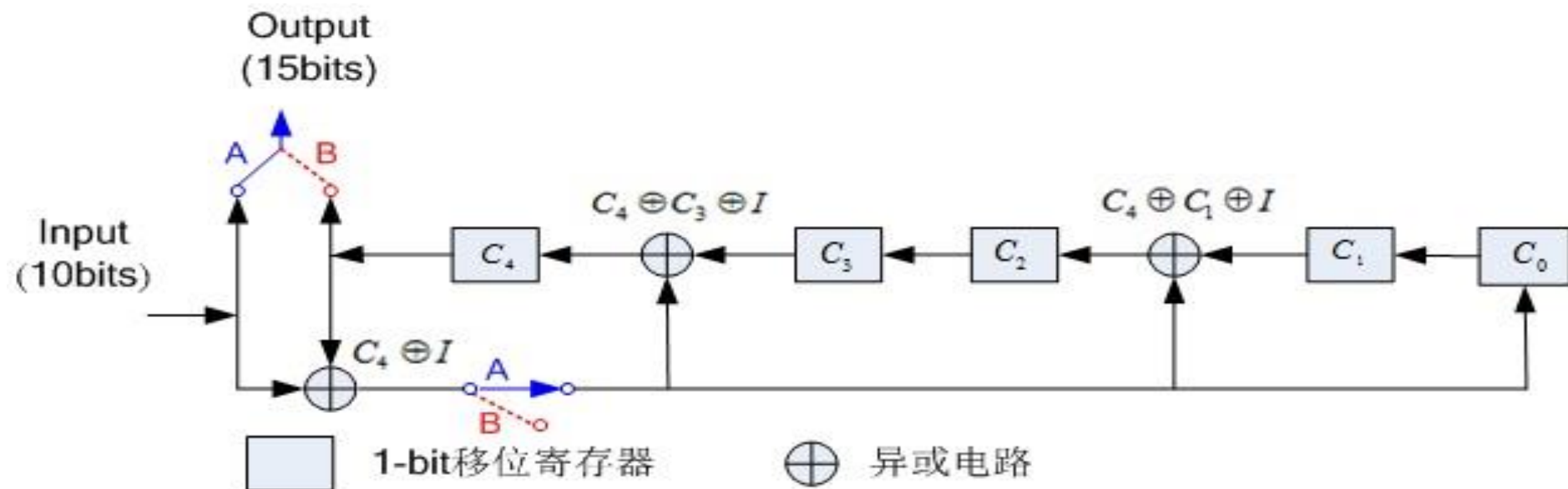
CRC的标准

- ◆ CRC-12码： 传送6位字符串
- ◆ CRC-16码： 传送8位字符，美国采用
- ◆ CRC-CCITT码： 传送8位字符，HDLC采用
- ◆ CRC-32码： LAN采用
- ◆ 常用的CRC标准生成多项式：
 - CRC-16: $X^{16}+X^{15}+X^2+1$
 - CRC(CCITT): $X^{16}+X^{12}+X^5+1$
 - CRC-32:
 $X^{32}+X^{26}+X^{23}+X^{16}+X^{12}+X^{11}+X^{10}+X^8+X^7+X^5+X^4+X^2+X+1$

CRC的硬件实现方法

了解

◆ 移位寄存器+异或门电路



- ◆ $G(x) = x^5 + x^4 + x^2 + 1$
- ◆ 初始时移位寄存器 $C_0 \sim C_4$ 清0
- ◆ 10个信息位发送之后，断开A接通B, 发送5位校验和，并将 $C_0 \sim C_4$ 清零，为下次发送做好准备

差错纠正方法

◆ 重传（ARQ协议）

- 发送方发送完一帧数据后，启动一个定时器
- 接收方发现错误后，丢弃收到的数据帧
- 发送方定时器超时，重发数据帧

◆ 纠错码

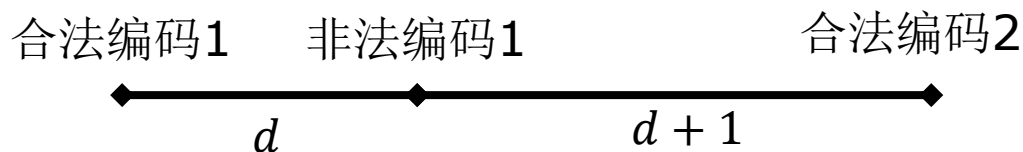
- 校验码足够长，不但能够检测出差错，而且能够发现差错的位置，直接恢复原始数据
- 汉明码（Hamming code，海明码），能纠正一比特错误

差错纠正：纠错码

◆ 汉明距离(Hamming Distance)：两个帧之间不同比特位的数目。

- 例：00000000和00110011的汉明距离为4
- 如果把两个帧的汉明距离为 d ，则需要 d 个单比特错误就可以把一个帧转换为另一个帧
- 为了检查出 d 个单比特错误，需要使用汉明距离为 $d+1$ 的编码；
- 为了纠正 d 个单比特错误，需要使用汉明距离为 $2d+1$ 的编码。

◆ 设计纠错码

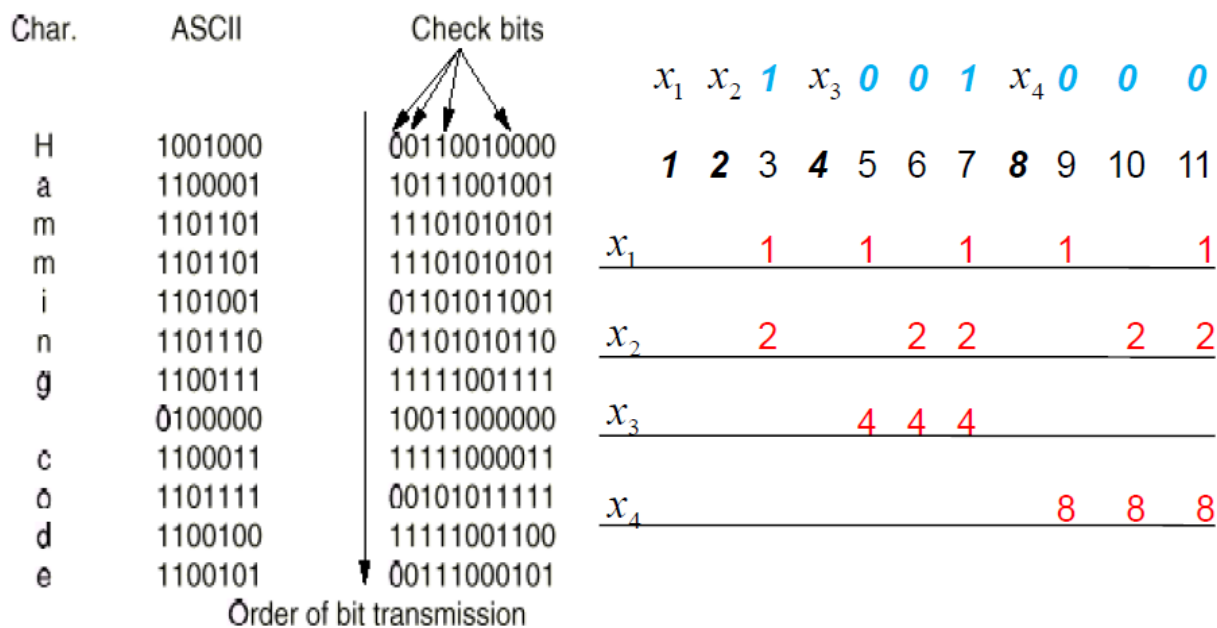


- 要求： m 个信息位， r 个校验位，纠正单比特错误
- 对 2^m 个有效信息中的任何一个，有 n 个与其距离为1的无效信息，因此有 $(n + 1)2^m \leq 2^n$
- 利用 $n = m + r$ ，得到 $m + r + 1 \leq 2^r$
- 给定 m ，可得出能纠正单比特错误的校验位数目的下界

汉明码的计算方法

自阅

- ◆ 校验位从左边开始编号，从1开始
- ◆ 位号为2的幂的是校验位，其余是信息位
- ◆ 每个校验位的取值，要使得包括自己在内的一些位的奇偶值为偶数，涉及位与当前校验位号的二进制表示的1位置相同



汉明码的计算示例

- ◆ 校验位从左边开始编号，从1开始
- ◆ 位号为2的幂的是校验位，其余是信息位
- ◆ 每个校验位的取值，要使得包括自己在内的一些位的奇偶值为偶数，涉及位与当前校验位号的二进制表示的1位置相同

要发送数据：101101

按 $m + r + 1 \leq 2^r$ ，最少需要 $r=4$ 个校验位

数据位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值			1		0	1	1		0	1

$P_1 \oplus D_1 \oplus D_2 \oplus D_4 \oplus D_5 = 0$, $P_1 = D_1 \oplus D_2 \oplus D_4 \oplus D_5 = 0$

数据位	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值	0		1		0	1	1		0	1

$P_2 \oplus D_1 \oplus D_3 \oplus D_4 \oplus D_6 = 0$, $P_2 = D_1 \oplus D_3 \oplus D_4 \oplus D_6 = 0$

数据位	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值	0	0	1		0	1	1		0	1

汉明码的计算示例

- ◆ 校验位从左边开始编号，从1开始
- ◆ 位号为2的幂的是校验位，其余是信息位
- ◆ 每个校验位的取值，要使得包括自己在内的一些位的奇偶值为偶数，涉及位与当前校验位号的二进制表示的1位置相同

要发送数据：101101
按 $m + r + 1 \leq 2^r$ ，最少需要 $r=4$ 个校验位

数据位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值			1		0	1	1		0	1

$P_3 \oplus D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 = 0$, $P_3 = D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 = 0$

数据位	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值	0	0	1	0	0	1	1		0	1

$P_4 \oplus D_5 \oplus D_6 = 0$, $P_4 = D_5 \oplus D_6 = 1$

数据位	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010
符号	P_1	P_2	D_1	P_3	D_2	D_3	D_4	P_4	D_5	D_6
取值	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1

内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

物理地址

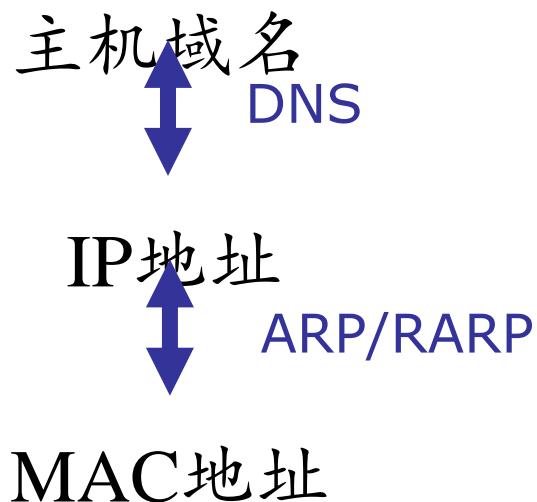
- ◆ 数据链路层的地址又称为物理地址或硬件地址
- ◆ 每个网络接口（网卡）一个地址
- ◆ 示例：MAC（媒体访问控制/介质访问控制）地址
 - LAN内使用
 - 48位，以16进制表示
 - 前24位为生产厂商标识OUI（Organizationally Unique Identifier）
 - 后24位为由厂商设定的内部编号

F0-DE-F1-3C-A7-0F



Wistron InfoComm Co.

地址转换



- ◆ 地址解析协议：ARP(Address Resolution Protocol)
 - 将IP地址转换为MAC地址

ARP缓存表

```
C:\Users\chengli>arp -a
```

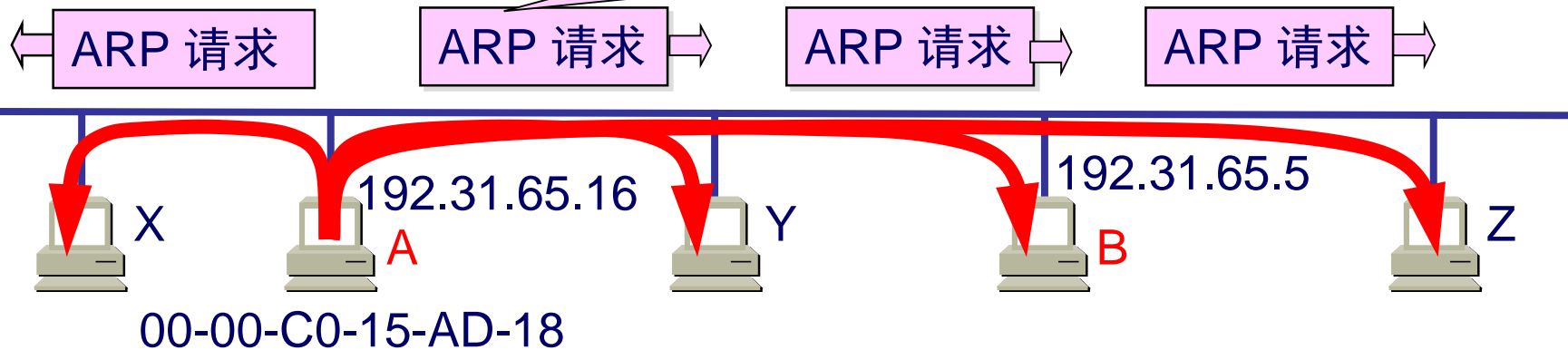
```
接口: 192.168.0.101 --- 0xe
```

Internet 地址	物理地址	类型
192.168.0.1	78-54-2e-e2-f9-24	动态
192.168.0.255	ff-ff-ff-ff-ff-ff	静态

- ◆ LAN的每个站点都有一个ARP缓存表，记录MAC地址与IP地址的映射关系
- ◆ 在LAN内发送IP包之前，源节点广播ARP请求，包含目的节点的IP地址
- ◆ 目的节点将自己的MAC地址放到ARP响应中，单播发送给源节点
- ◆ 源节点将ARP映射关系加入ARP表
- ◆ ARP缓存表会定时删除无用的内容

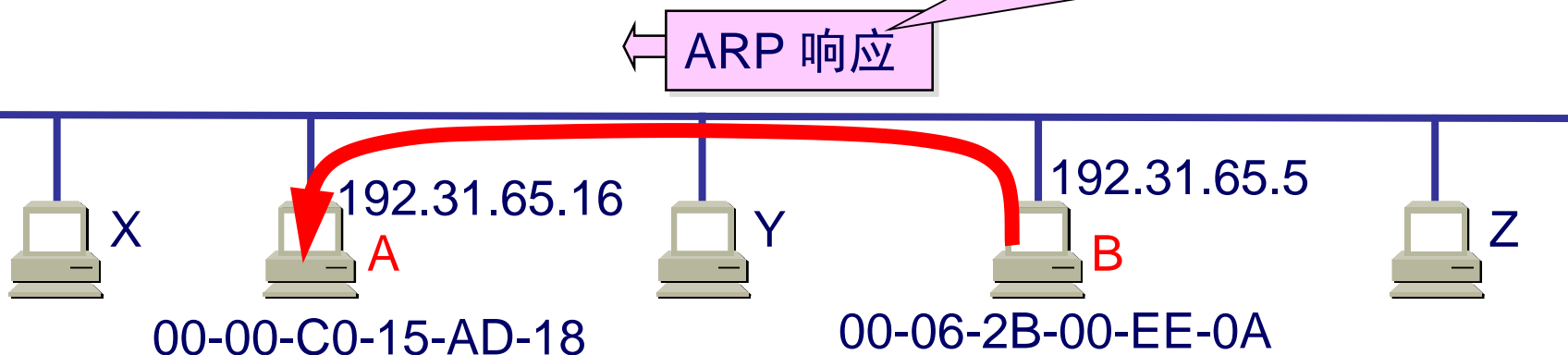
A 广播ARP请求

我是 192.31.65.16, 硬件地址是 00-00-C0-15-AD-18
我想知道主机 192.31.65.5的硬件地址



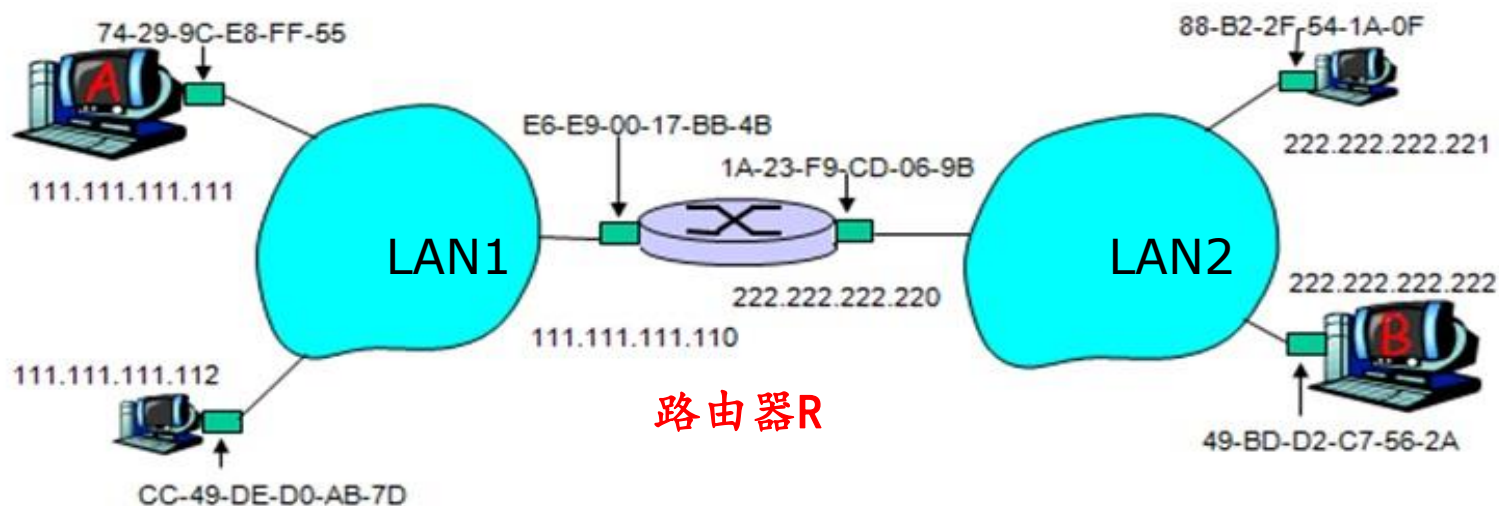
B 发送ARP响应给 A

我是 192.31.65.5
硬件地址是 00-06-2B-00-EE-0A



跨子网的数据传输过程

◆ 源主机A和目的主机B不在同一个子网



A-R: 源IP 111.111.111.111

目的IP 222.222.222.222

源MAC 74-29-9C-E8-FF-55

目的MAC E6-E9-00-17-BB-4B

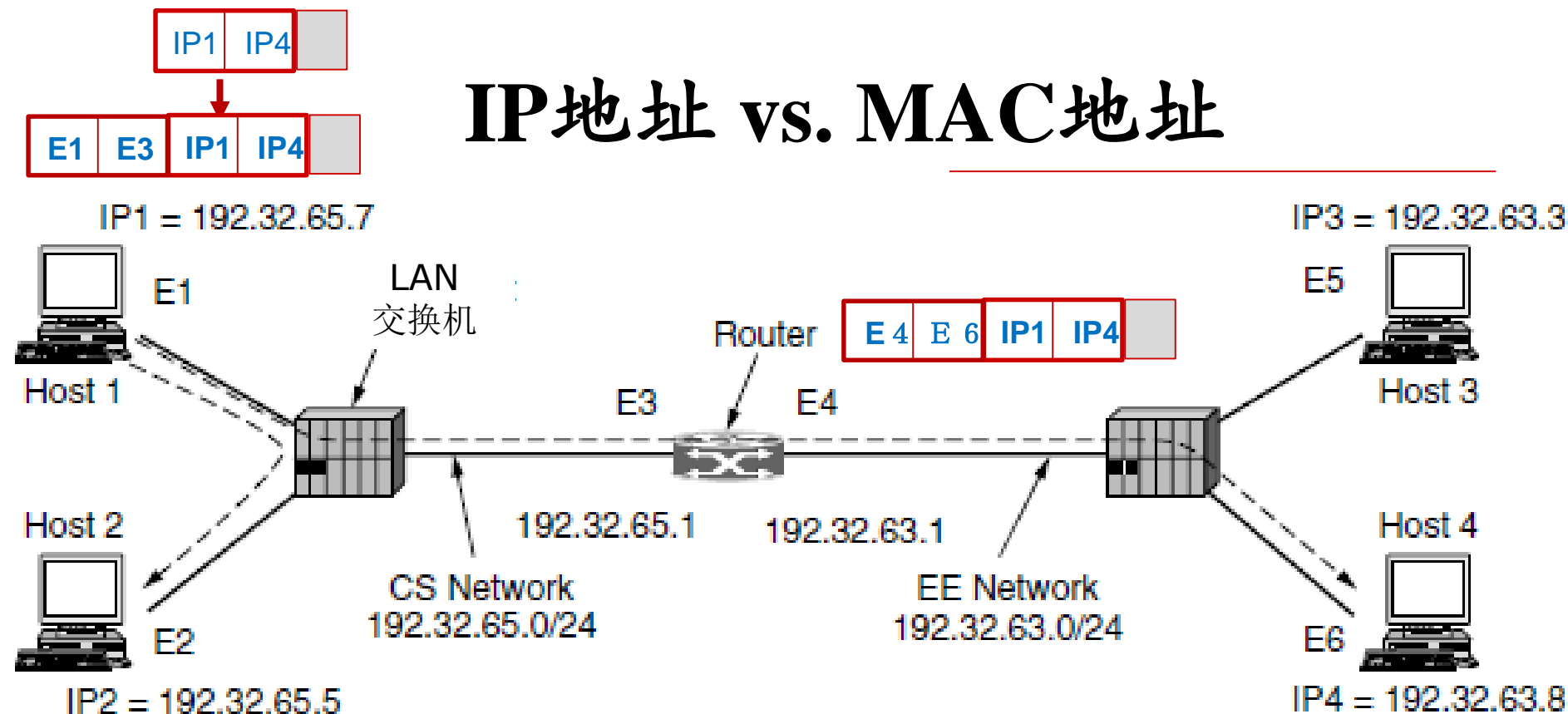
R-B: 源IP 111.111.111.111

目的IP 222.222.222.222

源MAC 1A-23-F9-CD-06-9B

目的MAC 49-BD-D2-C7-56-2A

IP地址 vs. MAC地址



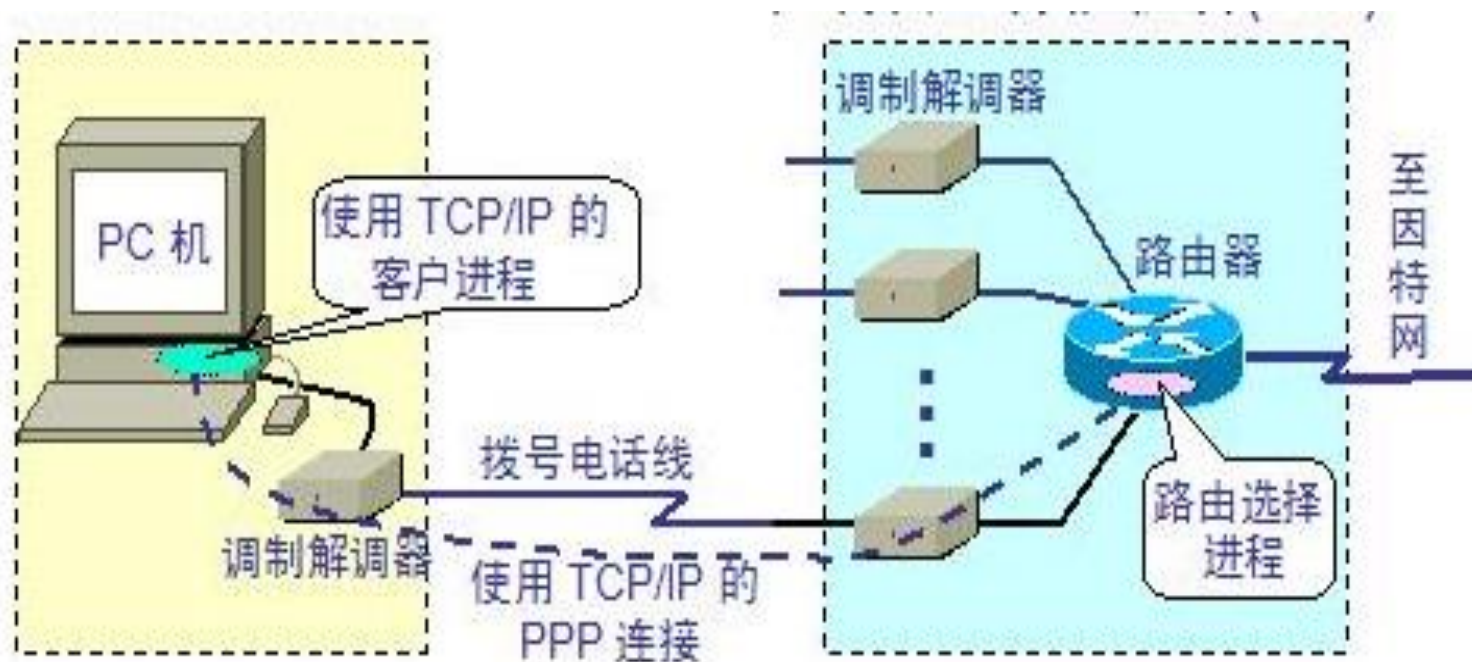
Frame	Source IP	Source Eth.	Destination IP	Destination Eth.
Host 1 to 2, on CS net	IP1	E1	IP2	E2
Host 1 to 4, on CS net	IP1	E1	IP4	E3
Host 1 to 4, on EE net	IP1	E4	IP4	E6

内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
 - PPP 协议
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

PPP协议

- ◆ 点对点协议（Point-to-Point Protocol）
- ◆ 用户使用电话线接入因特网时使用
 - 用户与ISP之间的通信协议

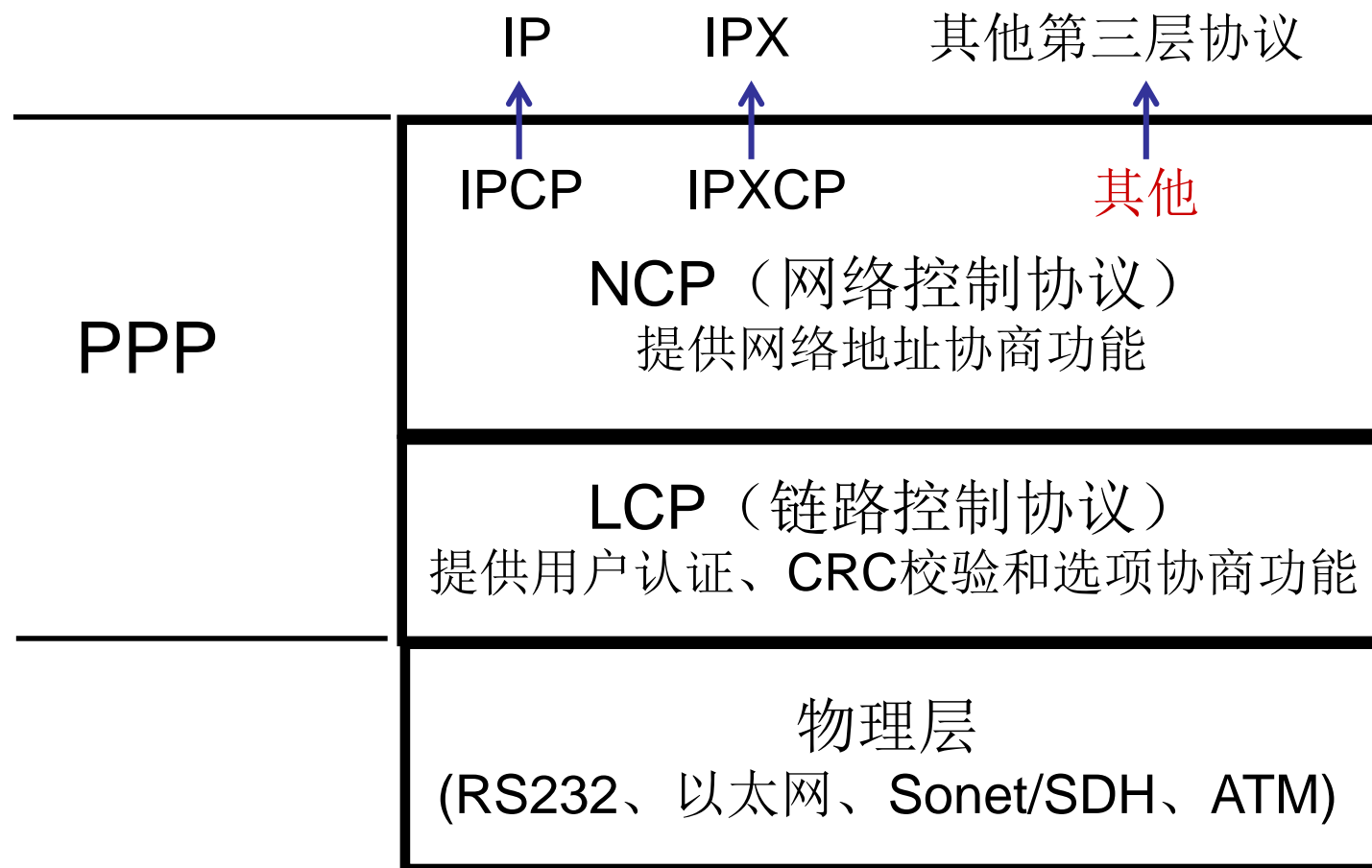


PPP协议的特点

RFC 1661,1662,1663

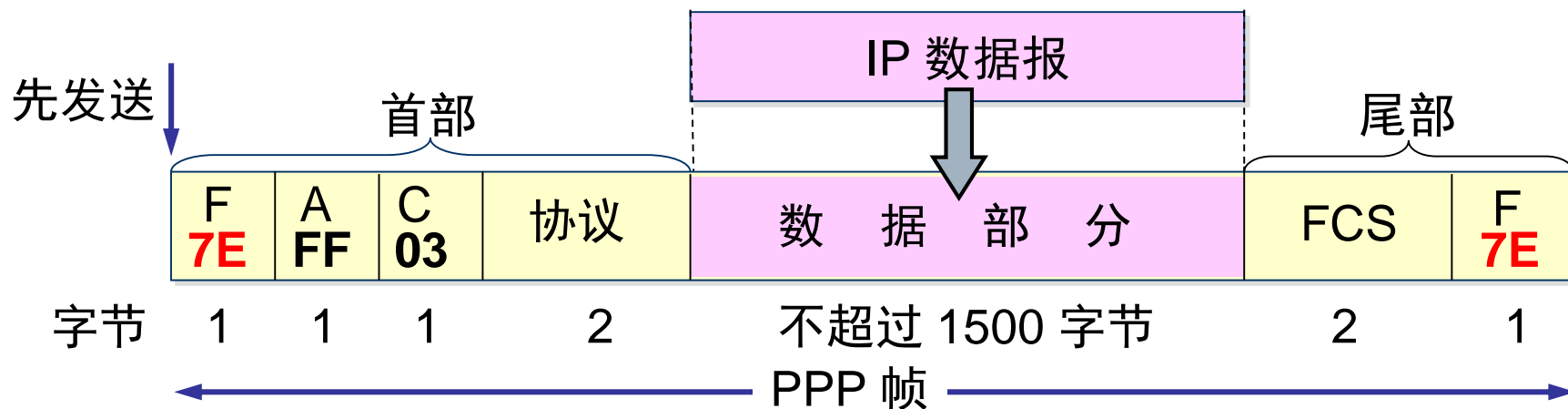
- ◆ 简单
- ◆ 面向连接
- ◆ 支持多种网络层协议
- ◆ 支持多种类型的物理链路
- ◆ 提供了建立数据链路连接、用户认证、帧头压缩协商等多种能力
- ◆ PPP取消了HDLC的下列功能：
 - 差错恢复（只检错不纠错）
 - 流量控制
 - 序号

PPP的三个子层



PPPoE: PPP over Ethernet

PPP的帧格式：PPPoE



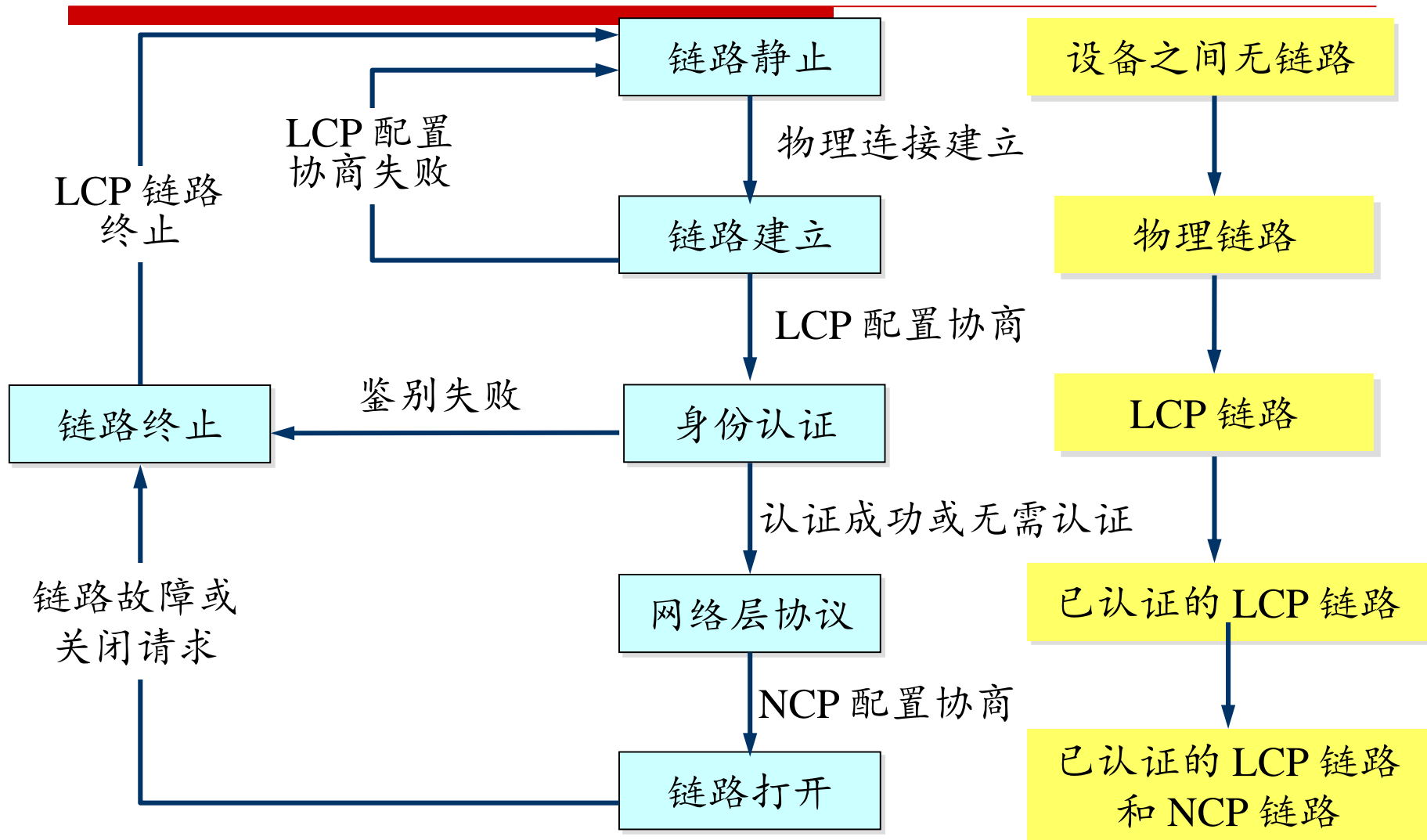
- ◆ **面向字符**，即整个帧的长度为字节的整数倍
- ◆ **地址**：FF表示任意站点
- ◆ **控制**：03表示无编号帧
- ◆ **协议**：表示数据部分是哪个协议的数据包，例如LCP、NCP、IP、IPX、AppleTalk.....
- ◆ **FCS**：采用CRC-16

PPPoE的透明传输

◆ 字符填充

- 转义字符：0x7D
- 0x7E → 0x7D 0x5E
- 0x7D → 0x7D 0x5D
- 在ASCII码控制字符($\leq 0x20$)前面也要加上0x7D

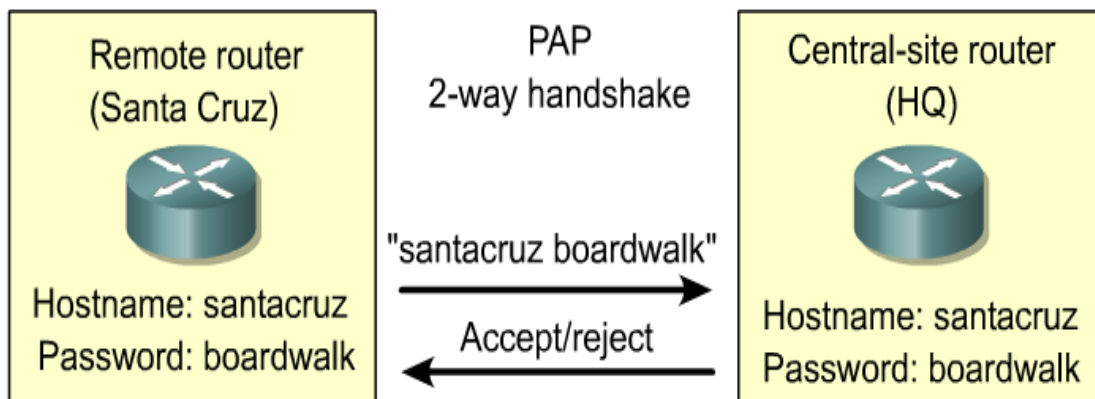
拨号上网时，PPP的工作过程



PPP 身份认证：PAP 或 CHAP

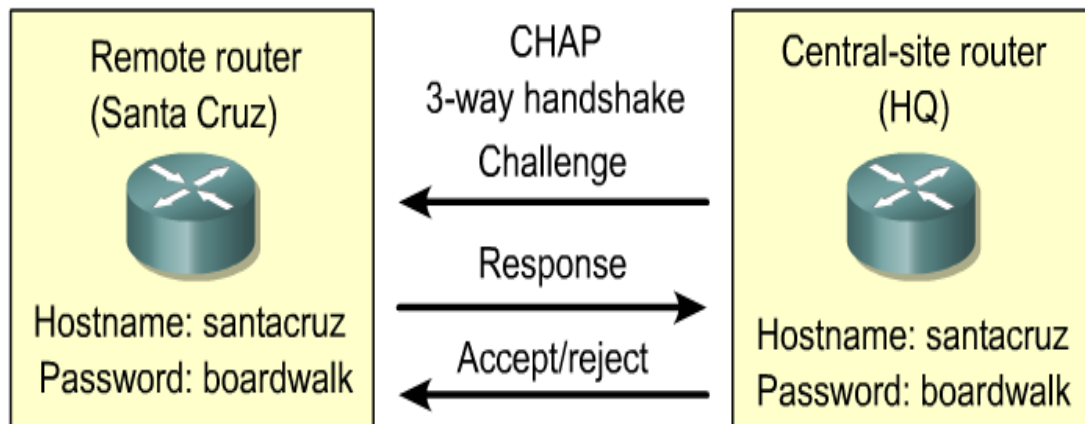
自阅

PAP: Password Authentication Protocol



- ◆ 密码明文传输
- ◆ 用户控制尝试登录的次数

CHAP: Challenge Handshake Authentication Protocol



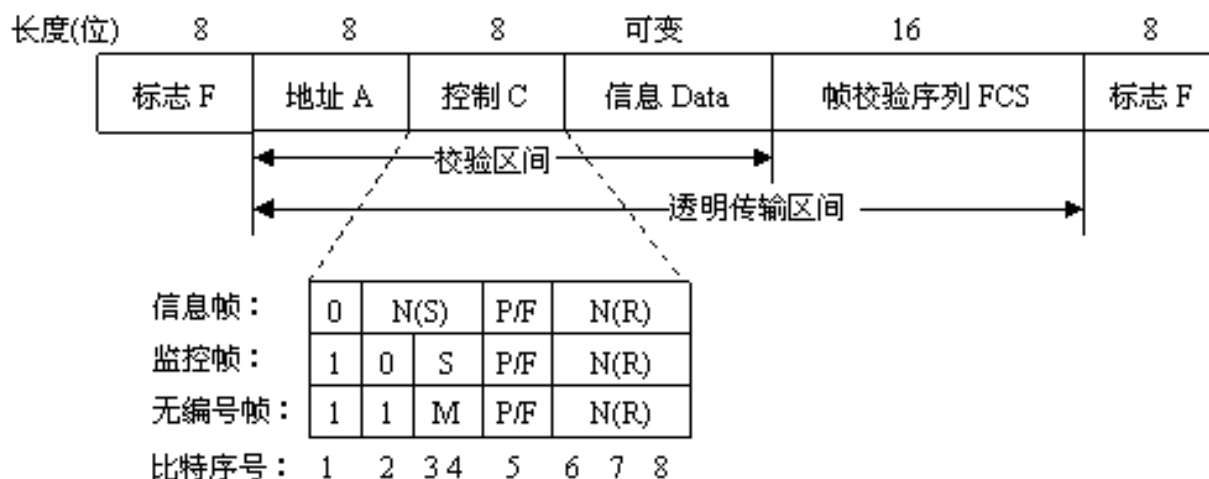
- ◆ ISP 路由器发送 Challenge 消息，包含一个由 MD5 计算出的值
- ◆ 用户根据 Challenge 值产生响应
- ◆ 密码加密传输
- ◆ 登录次数由 ISP 控制

内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
 - PPP协议
 - HDLC 协议
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

HDLC协议

- ◆ 高级数据链路控制规程 (High-Level Data Link Control)
- ◆ 面向比特的协议，支持全双工传输
- ◆ 提供面向连接的服务
- ◆ 采用零比特填充方式实现透明传输
- ◆ 采用ARQ协议实现差错控制和流量控制
- ◆ 应用场合：
 - 广域网、LAN的LLC子层协议等

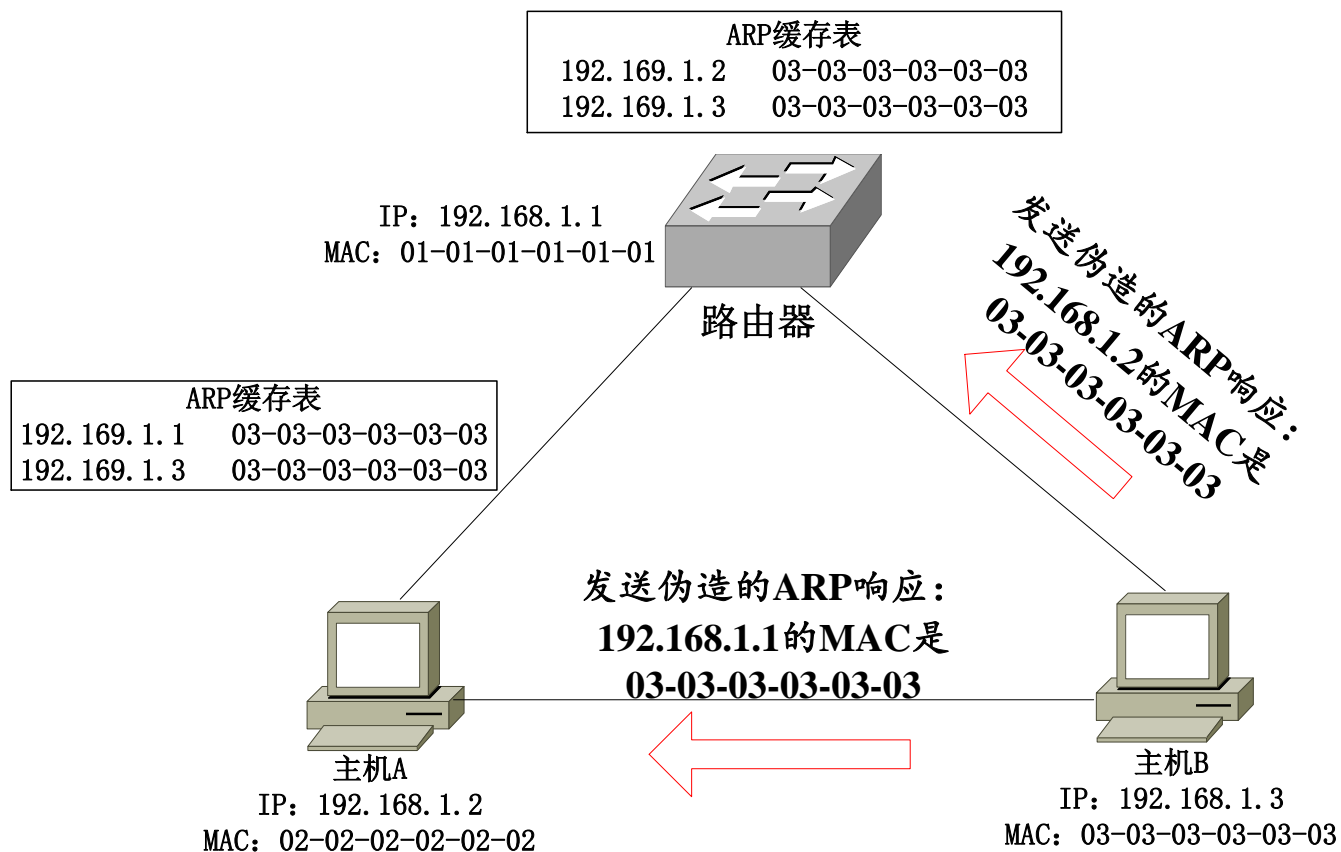


内容提要

- ◆ 5.1 数据链路层的功能及服务
- ◆ 5.2 数据链路层的成帧原理
- ◆ 5.3 差错检测与纠错技术
- ◆ 5.4 数据链路层的编址
- ◆ 5.5 数据链路层的协议实例
- ◆ 5.6 数据链路层的安全隐患

ARP欺骗

- ◆ 伪造IP地址和MAC地址，发送虚假的ARP请求/响应报文，导致LAN内的其他主机在ARP缓存表中记录错误的信息，从而将IP包发送给假冒主机



第五章小结

◆ 数据链路层的功能及服务

◆ 数据链路层的技术要点

➤ 成帧及透明传输：字符填充、比特填充、物理层编码违例法

➤ 差错控制：CRC的原理、汉明码的功能

➤ MAC地址和ARP的功能

◆ 数据链路层协议实例

➤ HDLC的特点和成帧

➤ PPP的应用场合、成帧

版权说明

- ◆ 本讲义中有部分图片来源于下列教材所附讲义：
 - Andrew S. Tanenbaum, Computer Networks, Fourth Edition, 清华大学出版社（影印版），2004，引用时标记为[Tanenbaum];
 - 谢希仁，计算机网络，第五版，电子工业出版社，2008年1月,引用时标记为[谢];
 - Behrouz A. Forouzan, Data Communications and Networking, Fourth Edition, McGraw-Hill Higher Education, 2007年1月，引用时标记为[Forouzan]
 - James F. Kurose, Keith W. Ross著，陈鸣译，计算机网络：自顶向下方法，机械工业出版社，2009，引用时标记为[Kurose];
 - 部分图片来源于网络，未找到确切来源，引用时标记为[来源于网络]。

本章勘误表(1)

页码	位置	原文	更正
165	标题5.1.2下第4行	事后也不用解释逻辑连接	事后也不用 释放 逻辑连接
166	第4行	识别比特流信息	识别 帧首部和帧尾部 信息
169	第1行	奇偶校验只可检查单个错误	奇偶校验只可检查单个 比特 错误
169	第6行	$D(x)=1x_7+0x_6+1x_5+1x_4+0x_3+1x_2+0x+1$	$D(x)=1x^7+0x^6+1x^5+1x^4+0x^3+1x^2+0x+1$
170	标题5.3.2下第9行	若行和列同时出现偶数	若行和列同时出现偶数 个错误
171	第12行	1011进行汉明编码（奇数）	1011进行汉明编码（ 奇校验 ）

本章勘误表(2)

页码	位置	原文	更正
172	图5-9下第1行	广播地址是48个连续1组成的字符串	广播地址是48个连续1 组成的 比特串
172	标题5.4.2下第2行	是获取网络中节点物理地址的一个TCP/IP	是获取网络中节点物理地址的一个TCP/IP 协议
173	第2行	每个接收节点都把该帧的ARP分组传递给它的父节点	每个接收节点都把该帧的ARP分组传递给 网络层
176	第2行	并要求采用拉回方式重发	并要求采用 回退N步（Go-Back-N） 方式重发
176	表5-1中，S类型的“应答”列（第3-6行）	RNR RNR REJ SREJ	删去，S类型帧无应答要求

本章勘误表(3)

页码	位置	原文	更正
176	表5-1中，第4行的“控制字段各位”列	1 0 0 1 P/F N(R)	1 0 1 0 P/F N(R)
176	表5-1中，第5行的“控制字段各位”列	1 0 1 0 P/F N(R)	1 0 0 1 P/F N(R)
177	图5-14	无符号帧	无 编号 帧
177	图5-15		参见本讲义p59-60 图
178	第10行	帧中最大接收单元（MRU） 的默认值为1500字节	帧中最大 传送 单元（ MTU ） 的默认值为1500字节

本章勘误表(4)

页码	位置	原文	更正
179	图5-18下第1行	标志字段F为0x7E（0x表示7E）	标志字段F为0x7E（0x表示 十六进制 ）
182	第6行	PPP是最常用的面向位的数据链路层协议	PPP是最常用的 面向字符 的数据链路层协议