北京郵電大學

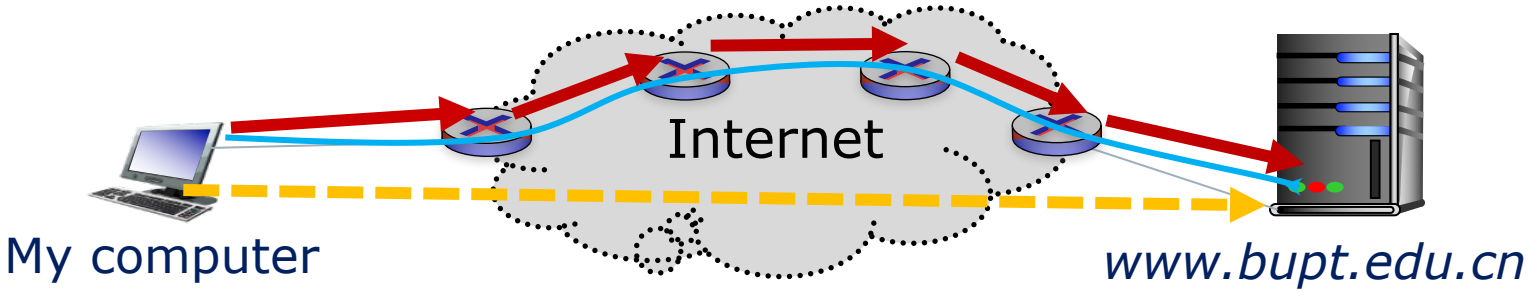
计算机网络

第五章 数据链路层

网络空间安全学院

2025年5月

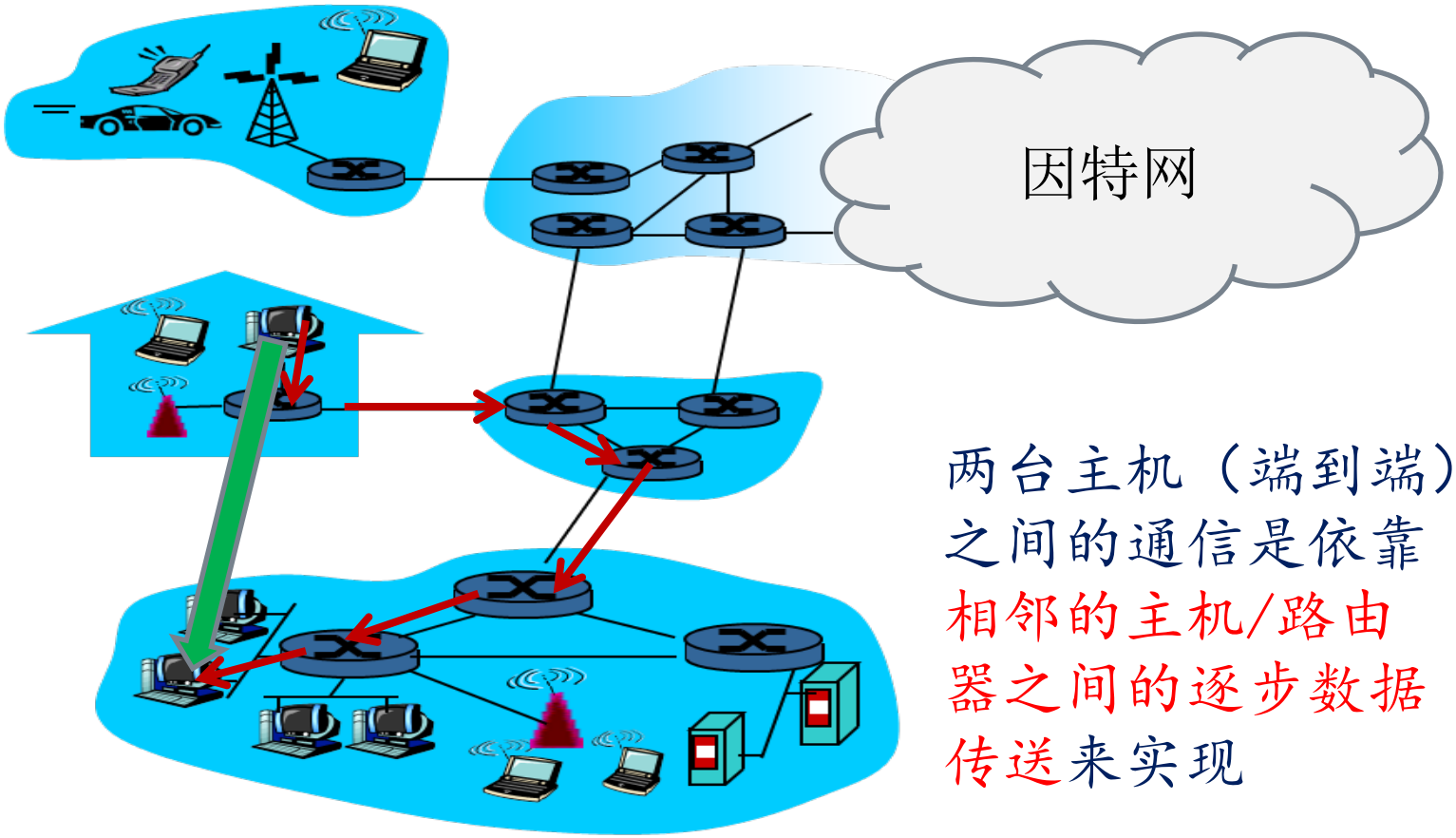
用户的应用需求：访问北邮主页



- 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？

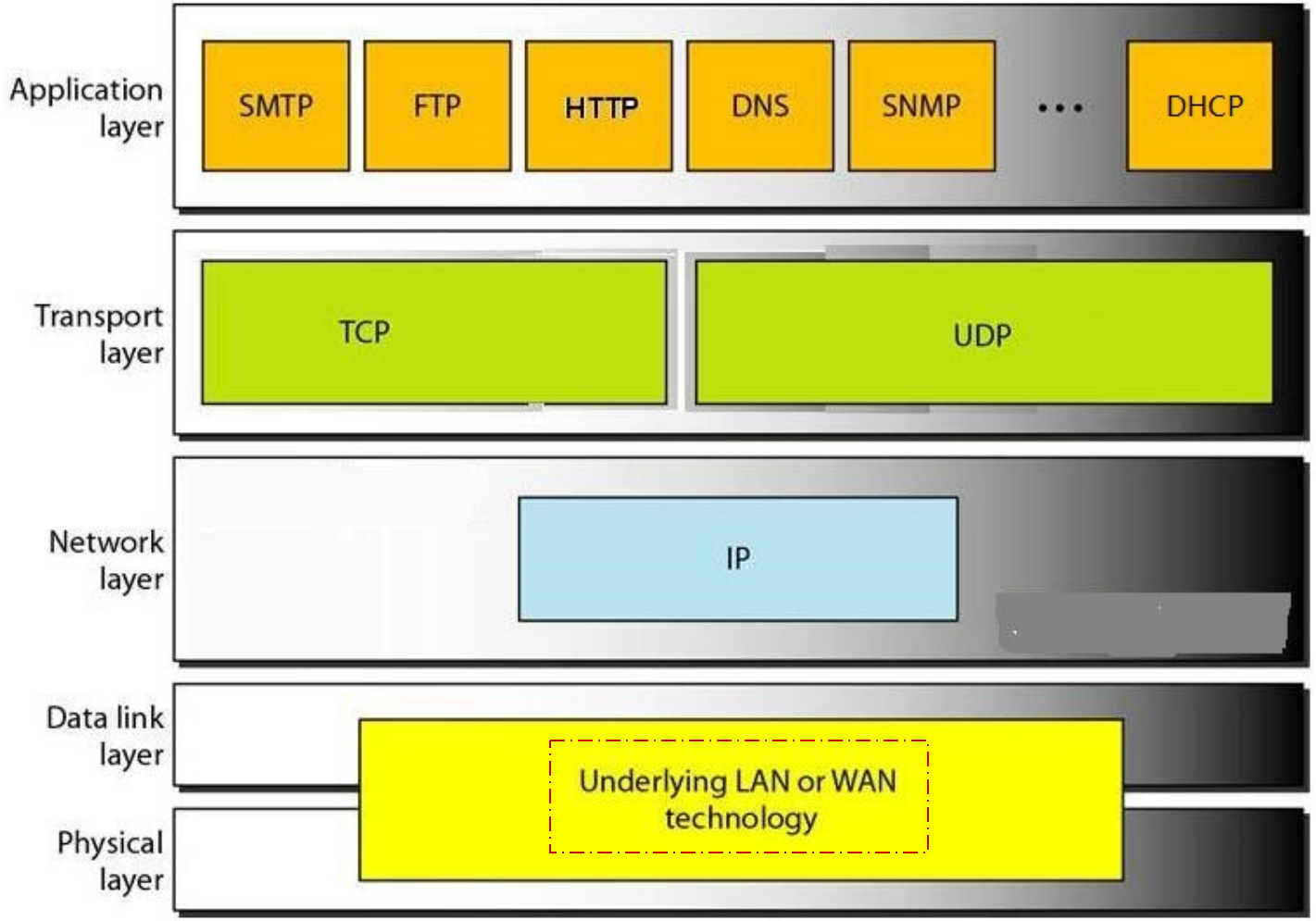


两台主机（端到端）之间的通信是依靠相邻的主机/路由器之间的逐步数据传送来实现

[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
  - HDLC
  - PPP

内容提要

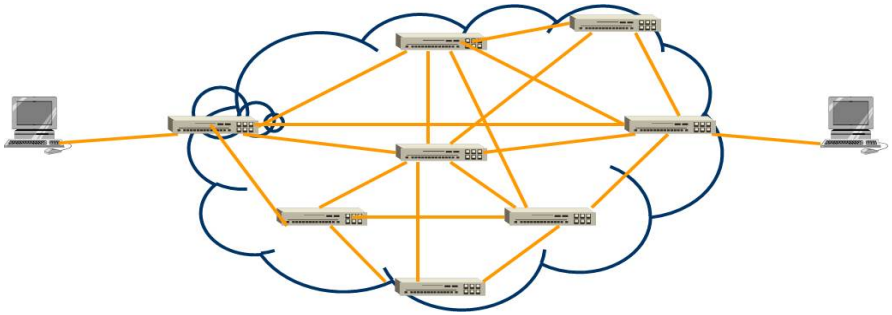
- *5.1 数据链路层的功能及服务*
- 5.2 数据链路层的成帧原理
- 5.3 差错检测与纠错技术
- 5.4 数据链路层的编址
- 5.5 数据链路层的协议实例
- 5.6 数据链路层的安全隐患

为什么需要数据链路层？

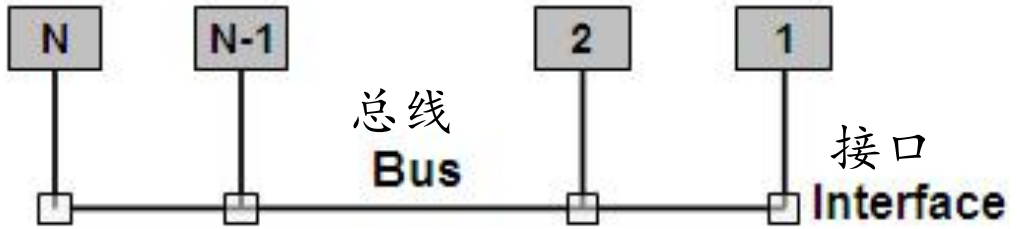
- 物理信道是不可靠的！
  - 噪声的干扰可能导致数据传输差错
    —需要进行差错检测和纠正
  - 发送方的速率可能大于接收方的速率，从而导致数据丢失
    —需要进行流量控制
- 数据链路层实现相邻主机/路由器间的可靠的数据传输

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

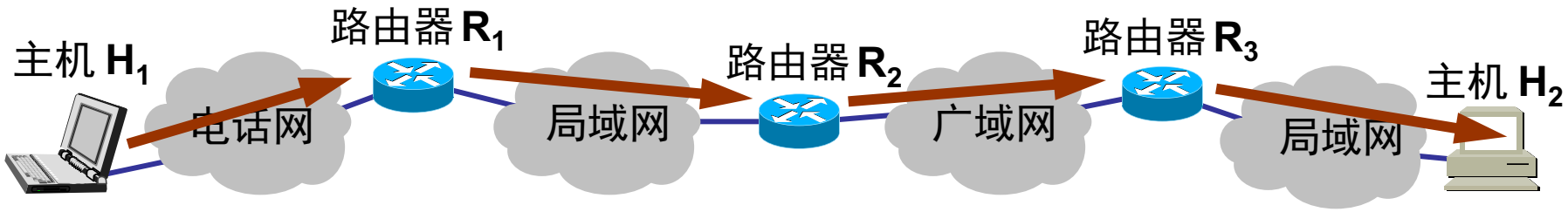


- 广播信道
  - 多个设备共享一条公共信道
  - 一对多通信
  - 需要解决信道竞争问题
  - LAN采用
  - 在第6章学习

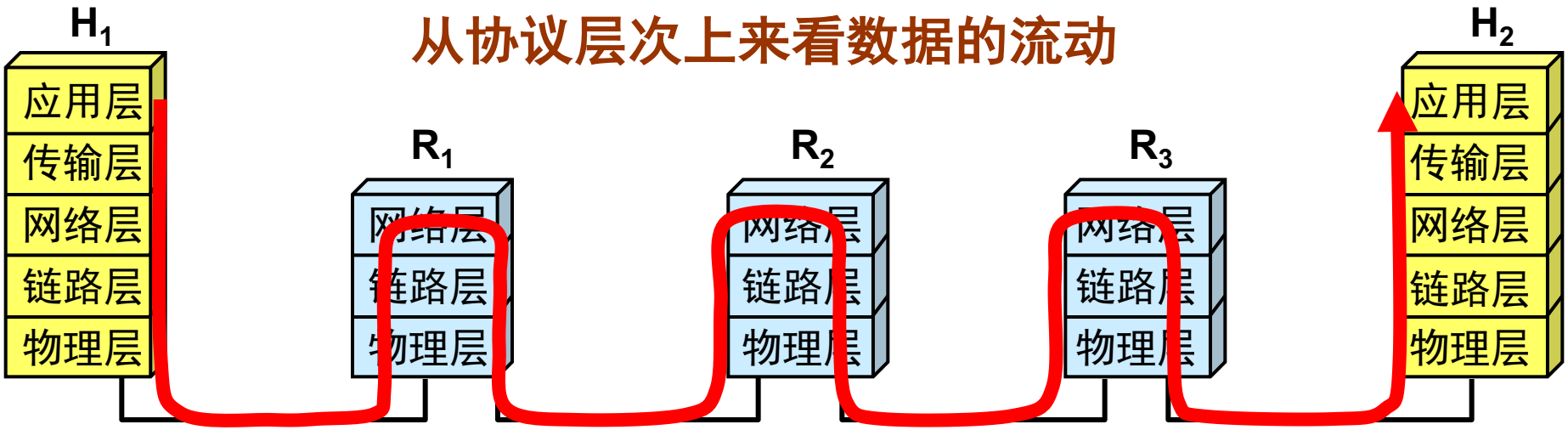


网络层：主机-主机通信

主机 H_1 向 H_2 发送数据



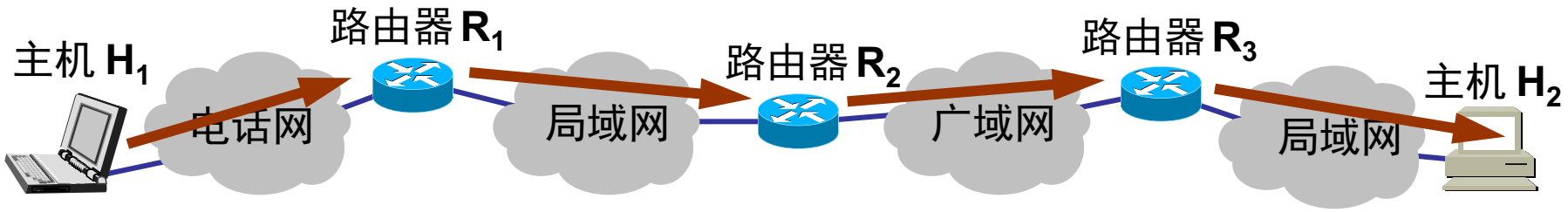
从协议层次上来看数据的流动

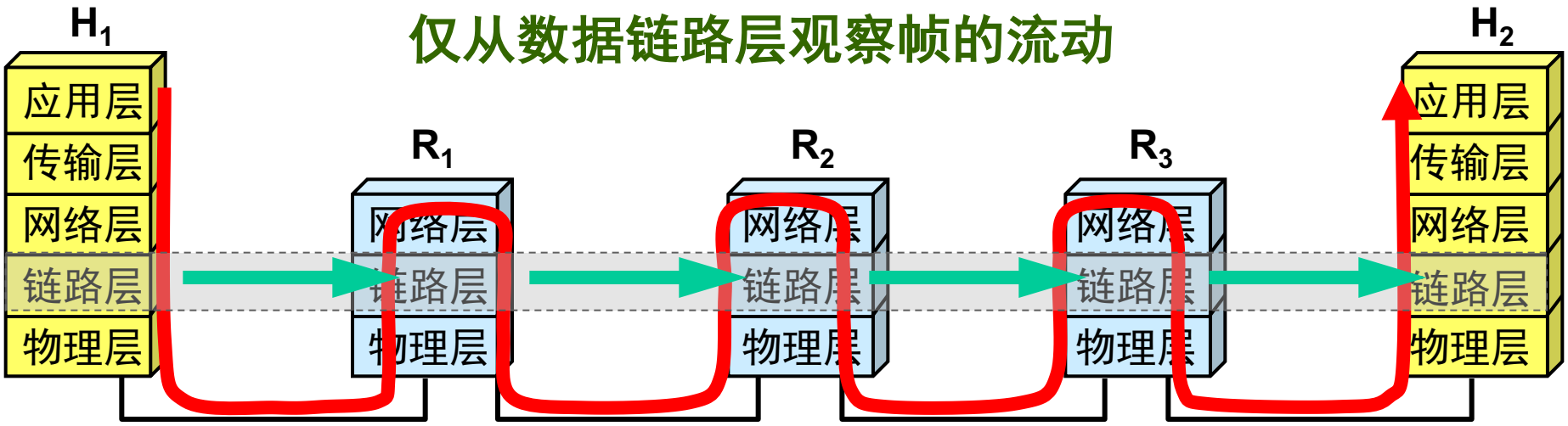


[谢]

数据链路层：点到点通信

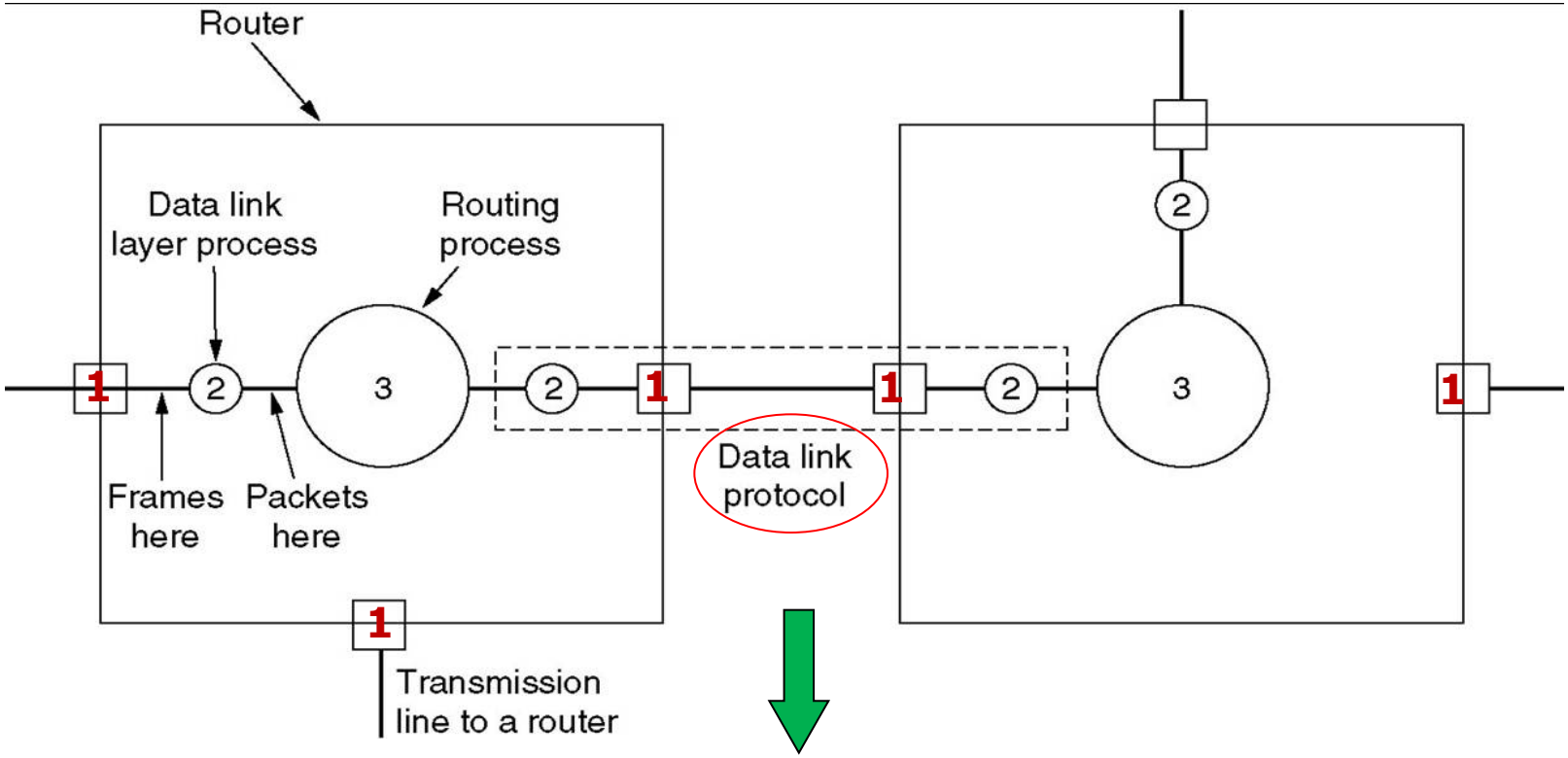
主机 H_1 向 H_2 发送数据





[谢]

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？ ——第六章

[Tanenbaum]

数据链路层的主要功能

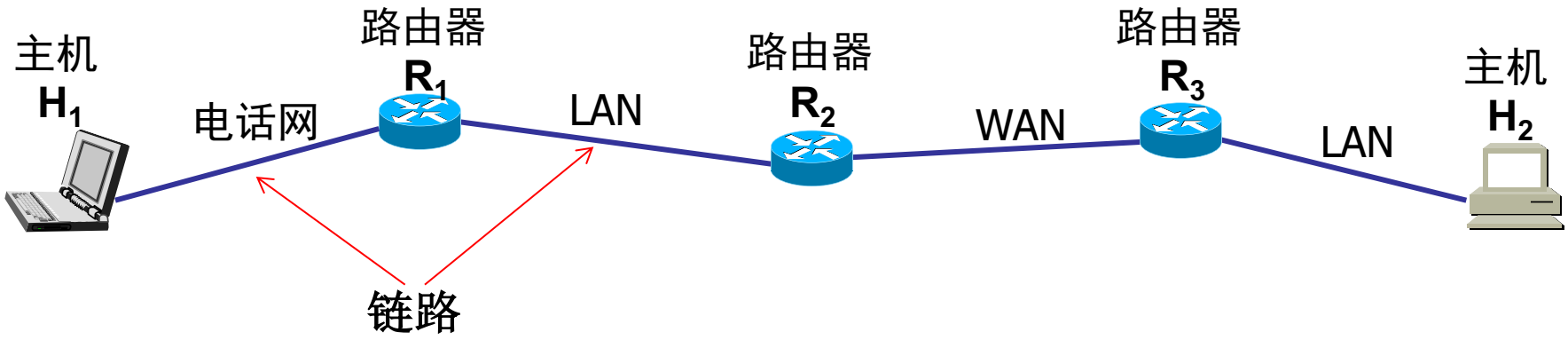
- 链路管理
  - 数据链路的建立、维护和释放，以提供面向连接的服务
- 封装成帧
  - 将网络层的数据（如IP包）加上首部和尾部，组成帧
- 差错控制
  - 检查物理层的传输差错，并纠正错误
- 流量控制
  - 防止发送方发送太快而淹没接收方
- 透明传输
  - 允许网络层的数据包含任何比特串
- 链路寻址：给网卡编址（物理地址/硬件地址）

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

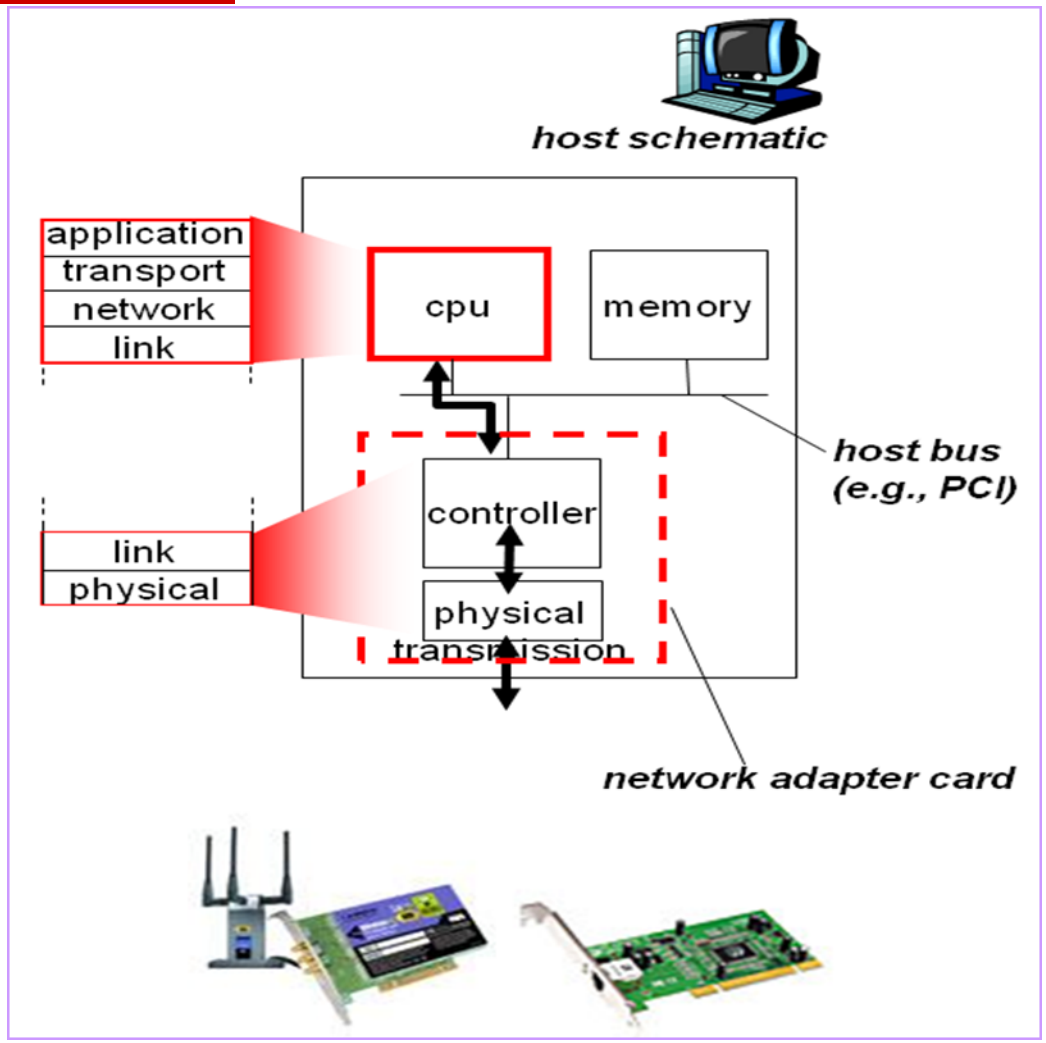
链路和数据链路

- **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节点
  - 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

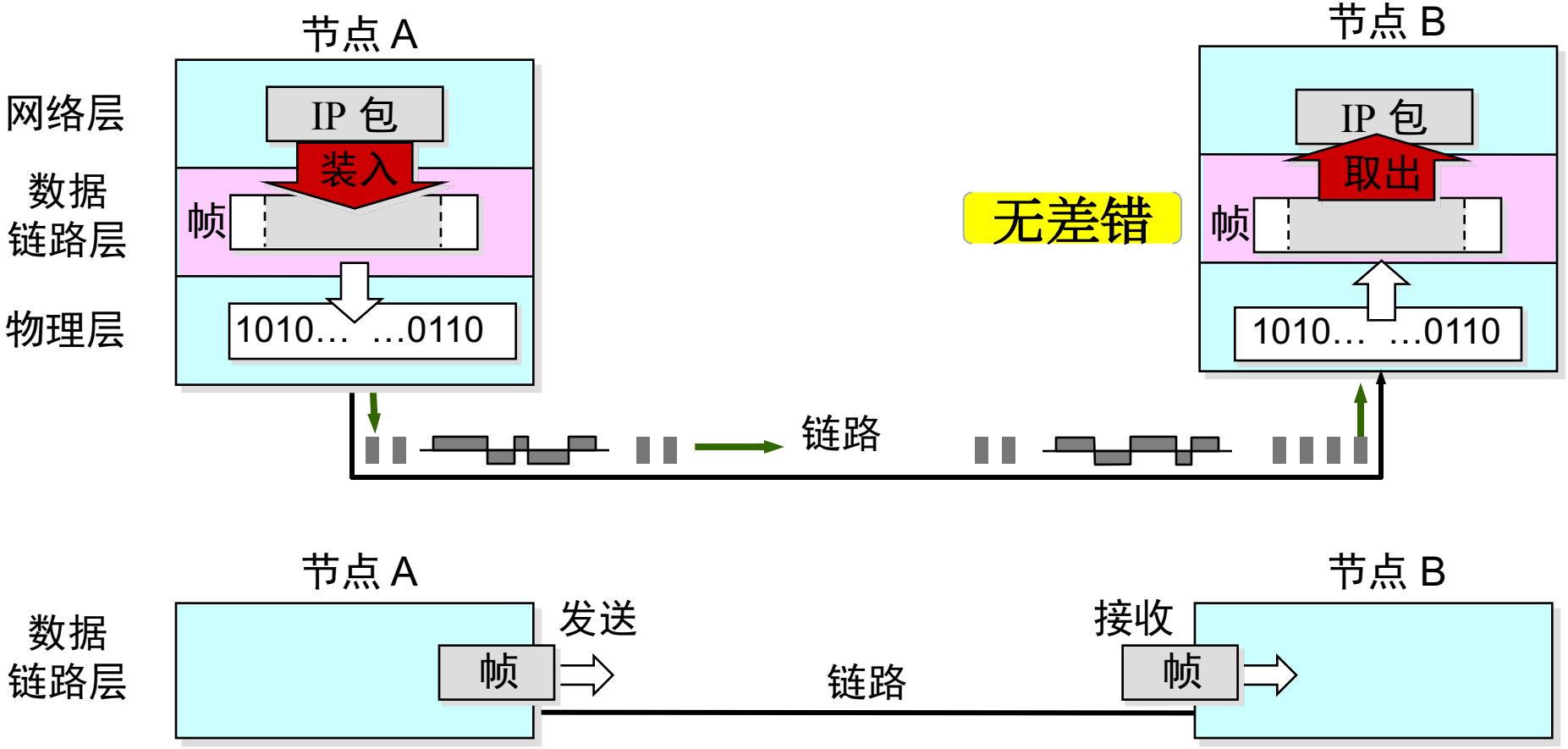
- 网卡
  - 网络适配器：NIC
  - 一般实现数据链路层协议和物理层协议



[Kurose]

数据链路和帧

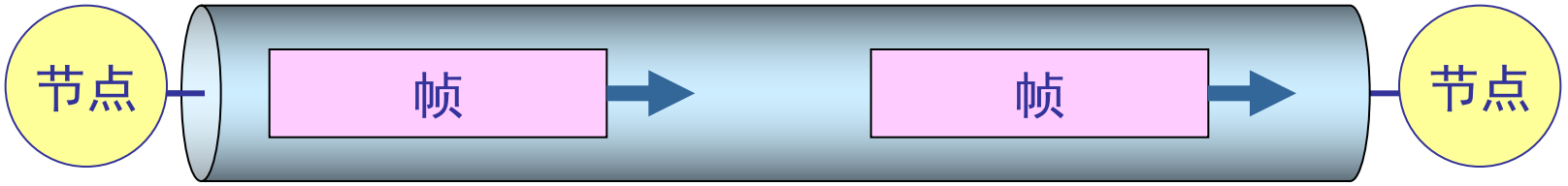
- 帧：数据链路层处理的数据单元



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，规程和协议是同义词。

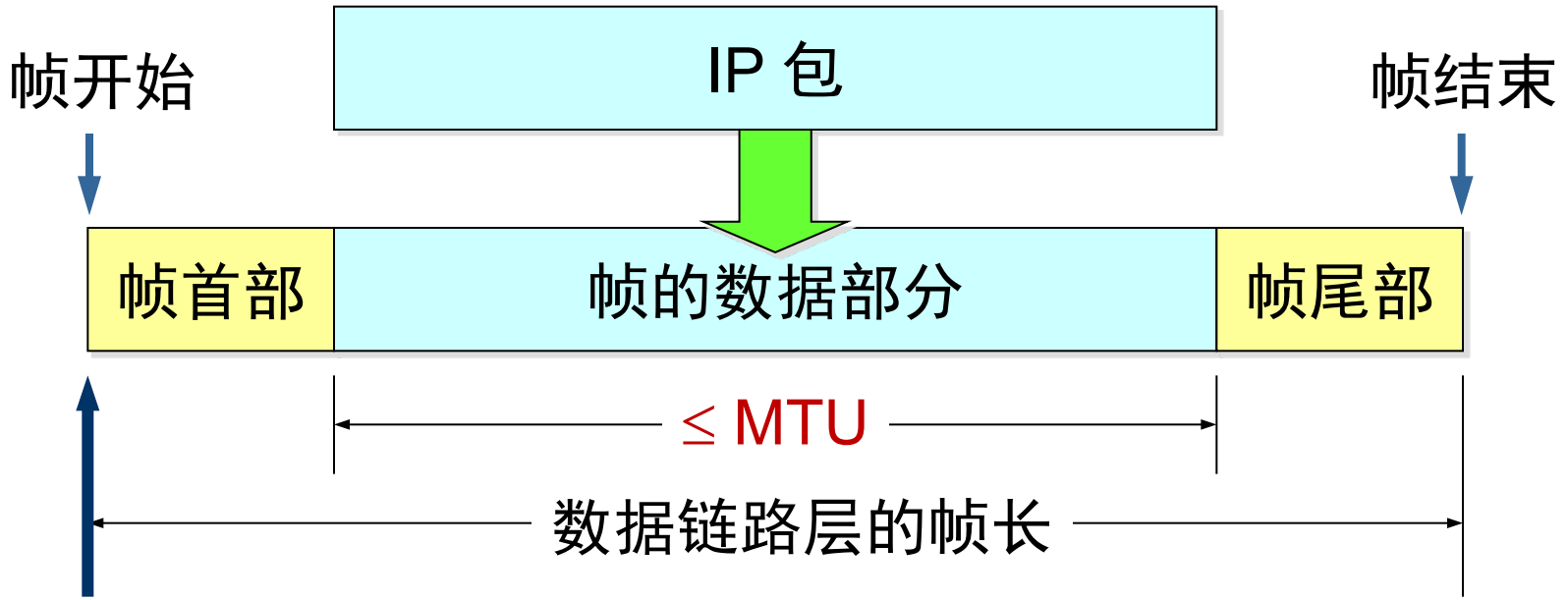
[谢]

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



[谢]

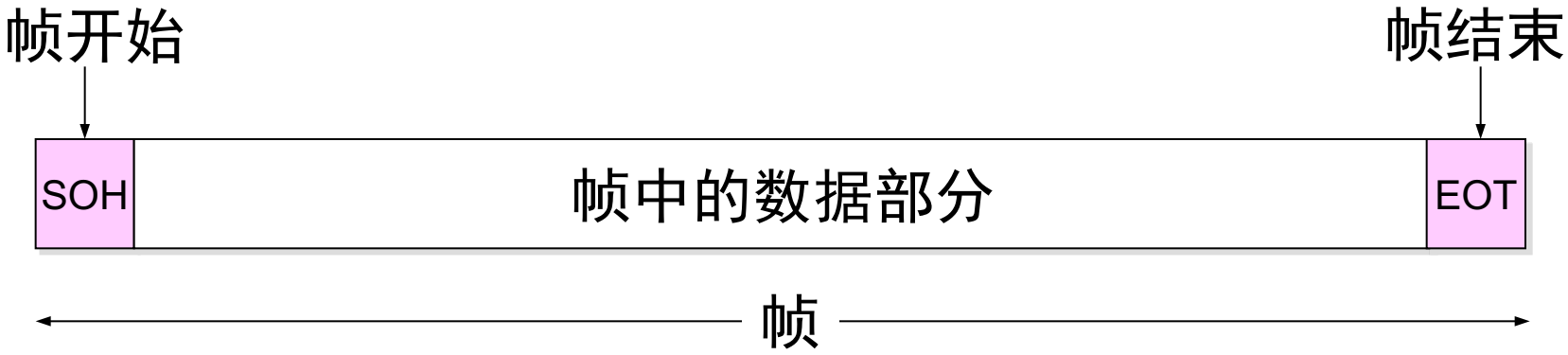
成帧方法：字符计数法

- 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）

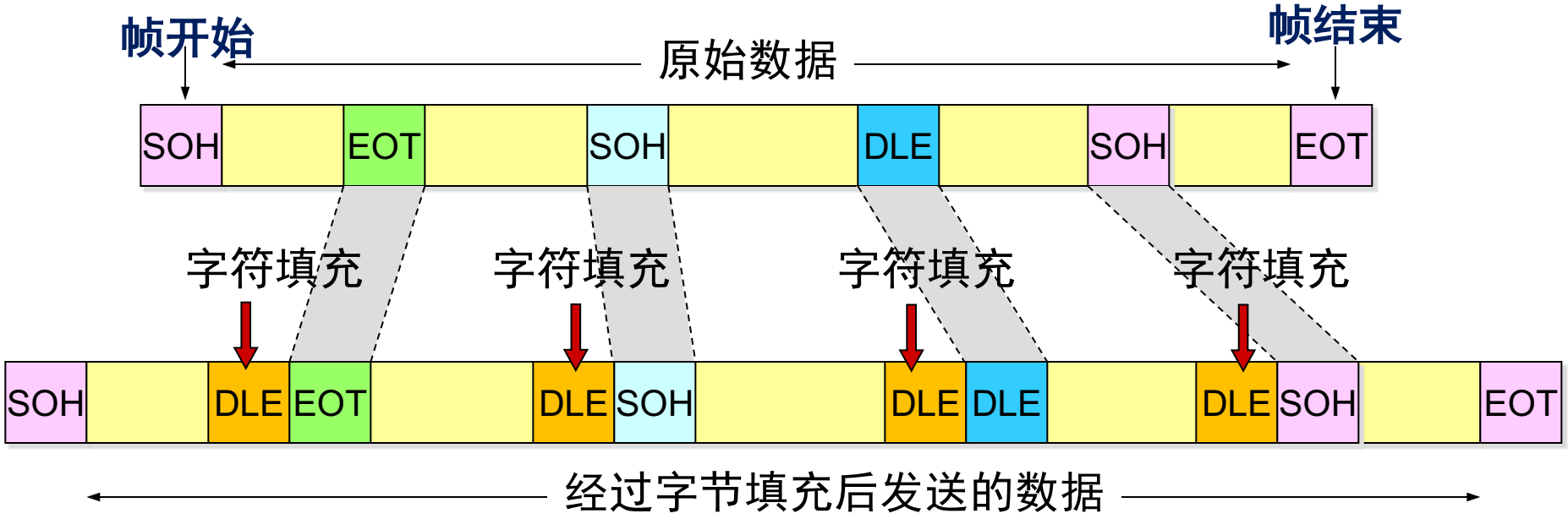


[谢]

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

发送方

01101111111111111110010

01111110 01101111101111101111010 01111110

填充“0”比特

接收方

01111110 01101111111111111111010 01111110

01101111111111111110010

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

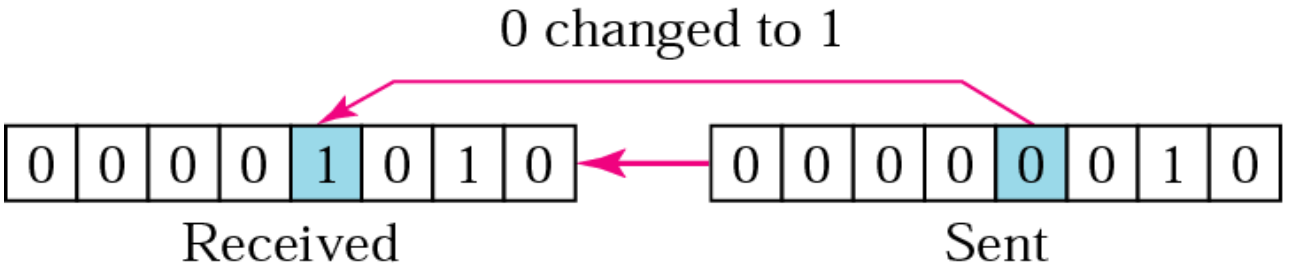
- 5.1　数据链路层的功能及服务
- 5.2　数据链路层的成帧原理
- *5.3　差错检测与纠错技术*
- 5.4　数据链路层的编址
- 5.5　数据链路层的协议实例
- 5.6　数据链路层的安全隐患

什么是差错控制？

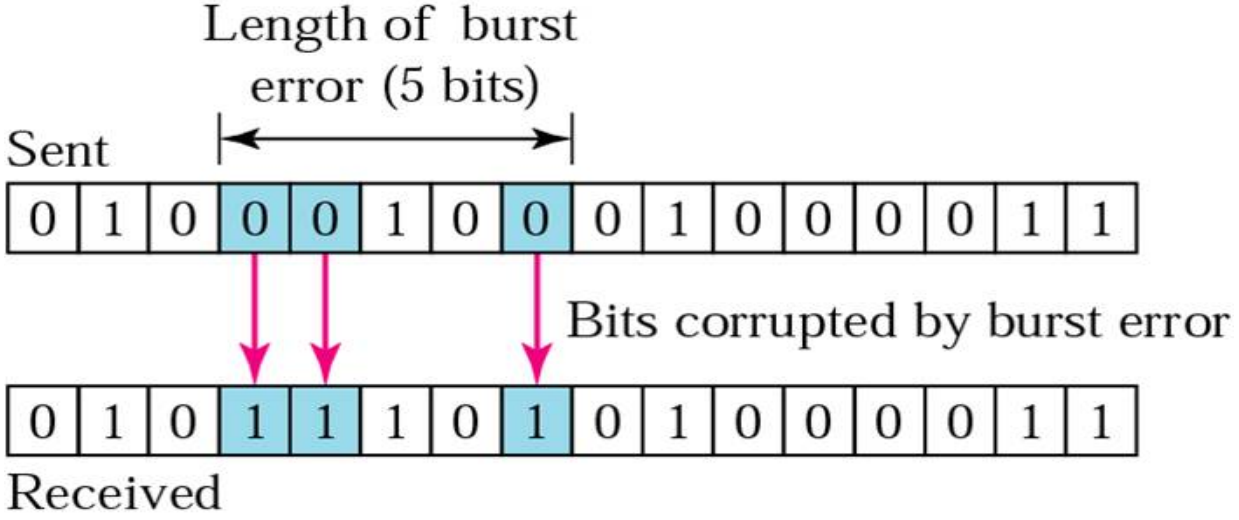
- 由于噪声的影响，数据在传输过程中可能会产生比特差错：1->0，0->1，增加、删除1个比特
- 误码率 BER (Bit Error Rate)：在一段时间内，传输错误的比特占所传输比特总数的比率
- 差错种类
  - 单比特差错
  - 突发差错
- 差错控制
  - 差错检测：发现传输差错
  - 差错纠正：恢复正确数据

单比特差错与突发差错

- 单比特差错：只有1个比特错误



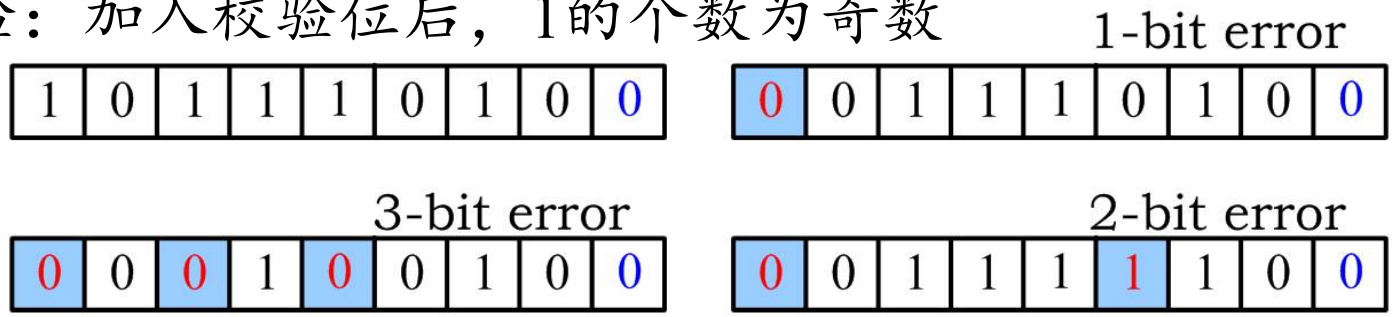
- 突发差错：两个比特或更多比特发生错误



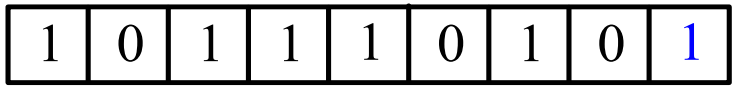
[Forouzan]

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



  - 偶校验：加入校验位后，1的个数为偶数



  - 检错能力：如果发生错误的比特总数为奇数个，能发现

[Forouzan]

差错检测方法：循环冗余校验

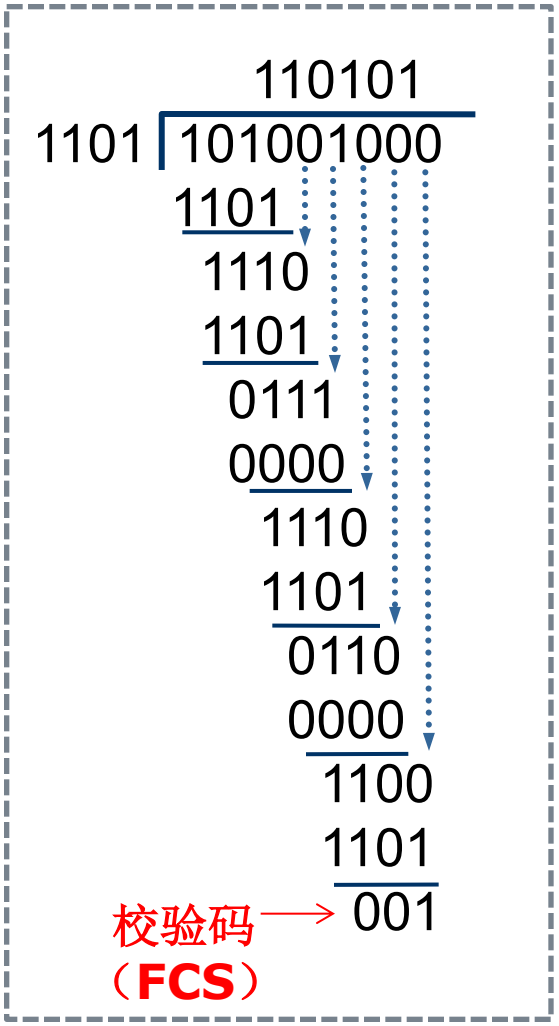
- CRC（Cyclic Redundancy Code），又称为多项式编码
- 把被处理的数据块看做是一个n阶的二进制多项式：$a_0x_0 + a_1x_1 + \cdots + a_{n-1}x_{n-1}$
  - 如10110101对应的多项式是：$x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
- 采用模二除法计算校验码
- 生成多项式G(x)：发送方和接收方约定，作为除数
- 校验码：余数

CRC的计算方法

- 发送端把数据划分为组，假定每组k个比特，假定要传的数据为M（k位），CRC计算是在M后添加冗余码
- 若生成多项式G(x)为r+1个比特，即最高阶为r，则先用模二运算进行2^r乘M，相当于在M后面增加r个0，得到k+r位的M`
- 采用模二除法， M`除以G(x)
- 余数即是所求的校验码（r位）
- 将余数附在数据M之后发送到信道上，共k+r位

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：101001001
- 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：
    $X^{32}+X^{26}+X^{23}+X^{16}+X^{12}+X^{11}+X^{10}+X^{8}+X^{7}+X^{5}+X^{4}+X^{2}+X+1$

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

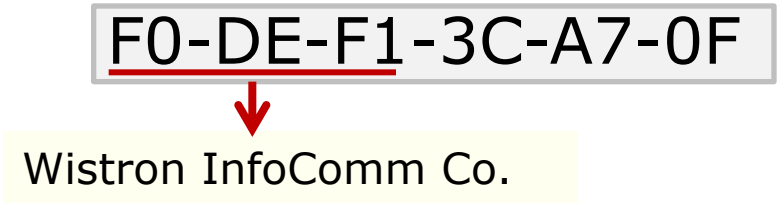
- 纠错码
  - 校验码足够长，不但能够检测出差错，而且能够发现差错的位置，直接恢复原始数据
  - 示例：汉明码（Hamming code，海明码），能纠正一比特错误

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

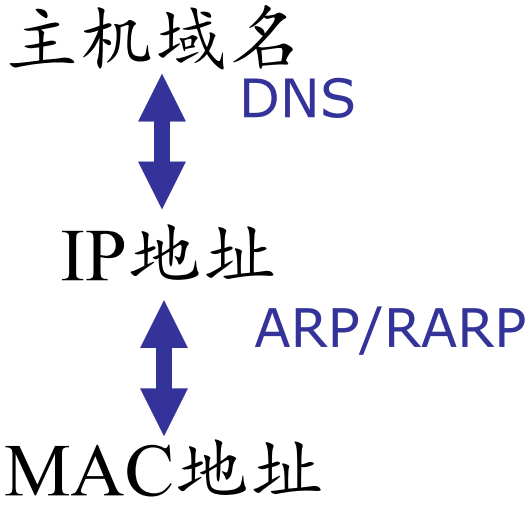
物理地址

- 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



http://standards.ieee.org/develop/regauth/oui/public.html

地址转换

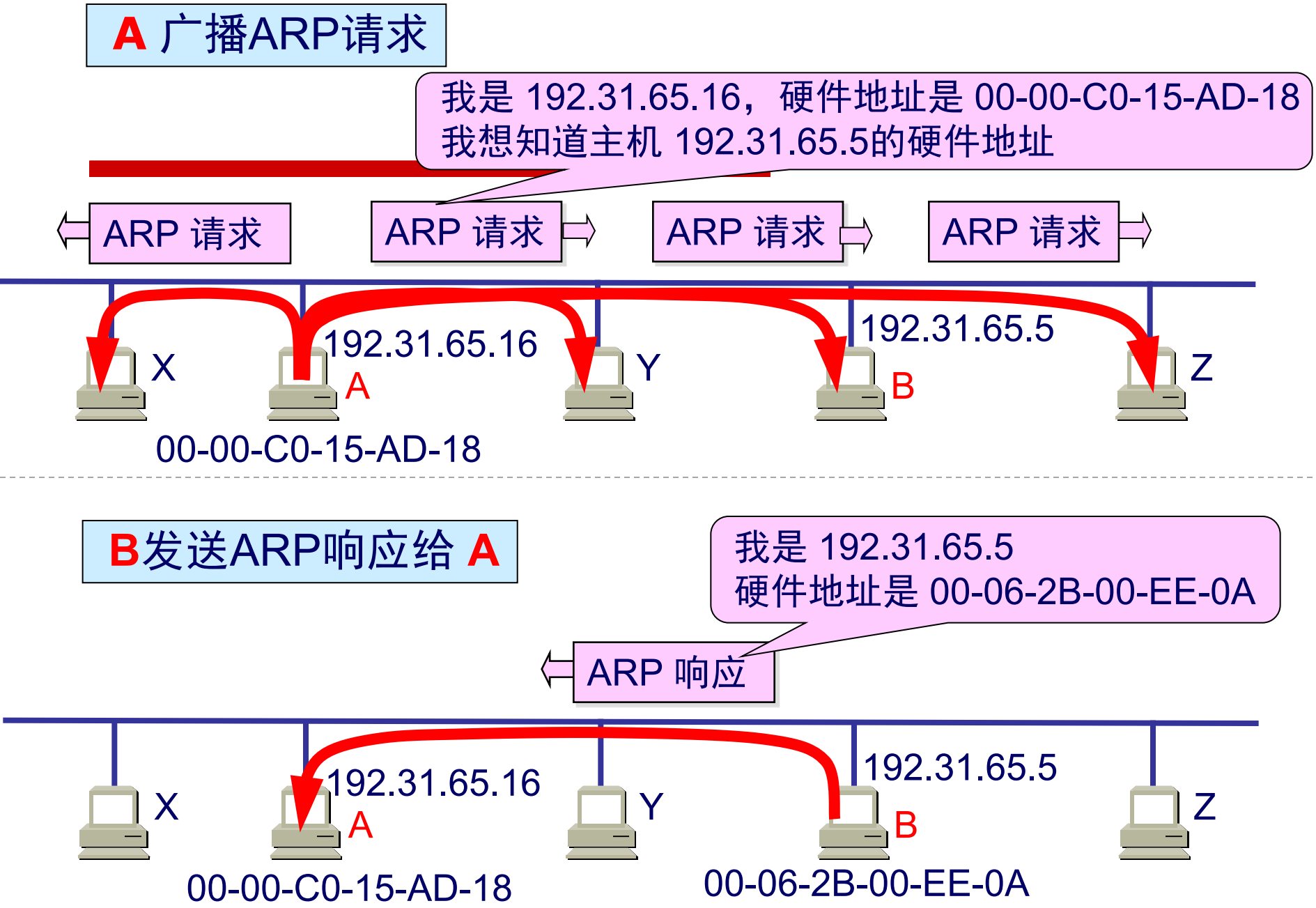


- 地址解析协议：ARP(Address Resolution Protocol)
  - 将IP地址转换为MAC地址

ARP缓存表

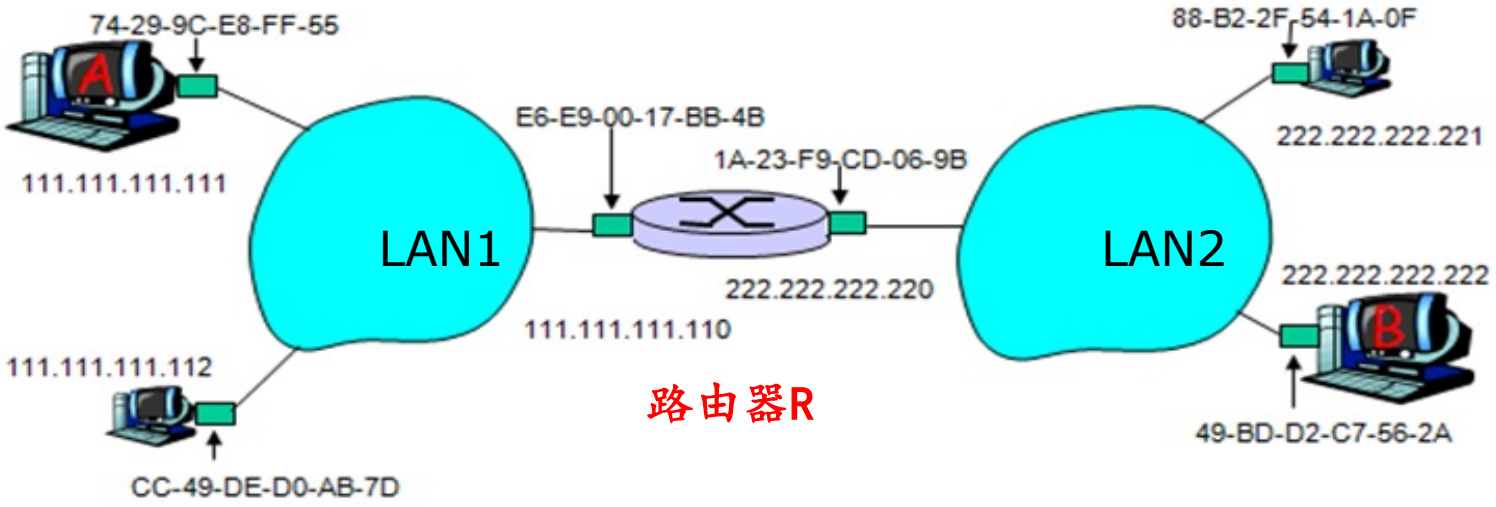
```
C:\Users\chengli>arp -a

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
ARP 请求
ARP 请求
ARP 请求
ARP 请求
X
192.31.65.16
A
Y
192.31.65.5
B
Z
00-00-C0-15-AD-18
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
ARP 响应
X
192.31.65.16
A
Y
192.31.65.5
B
Z
00-00-C0-15-AD-18
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

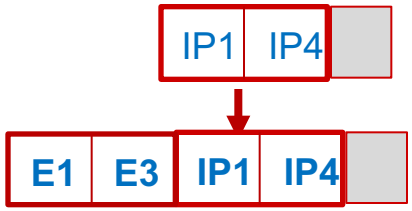


A-R：源IP 111.111.111.111　　目的IP 222.222.222.222

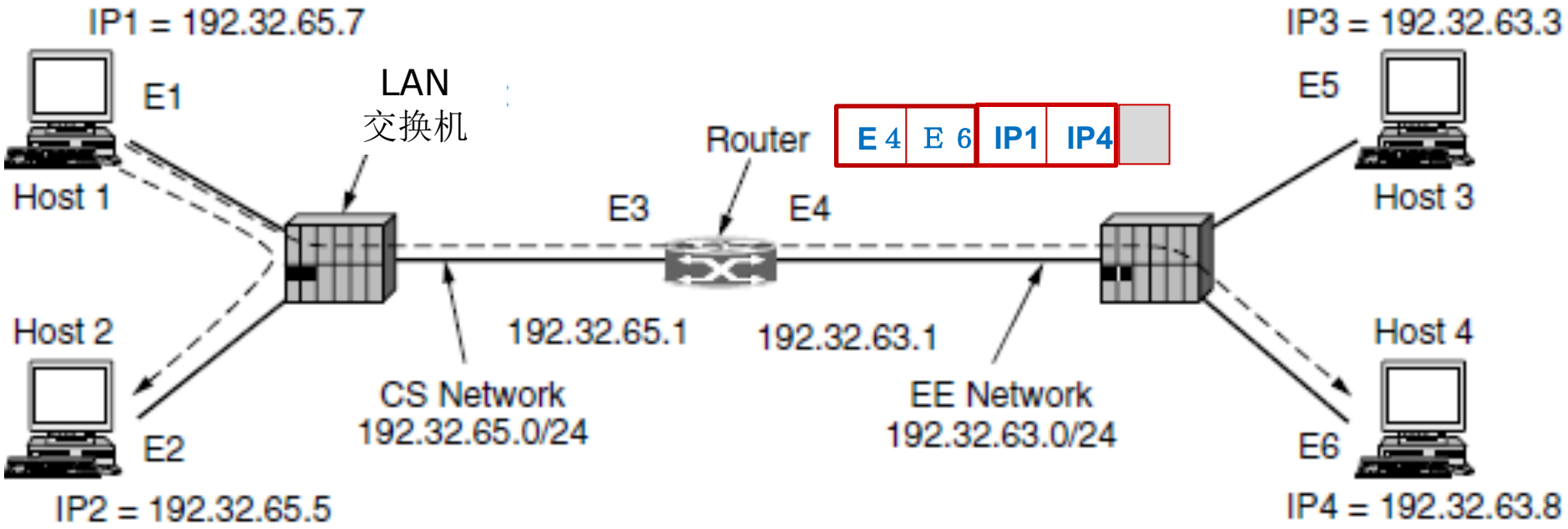
　　源MAC 74-29-9C-E8-FF-55　目的MAC E6-E9-00-17-BB-4B

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

IP地址全程有效，MAC地址只在一个子网内有效

[Tanenbaum]

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*
  - *HDLC协议*
  - PPP协议
- 5.6 数据链路层的安全隐患

HDLC协议

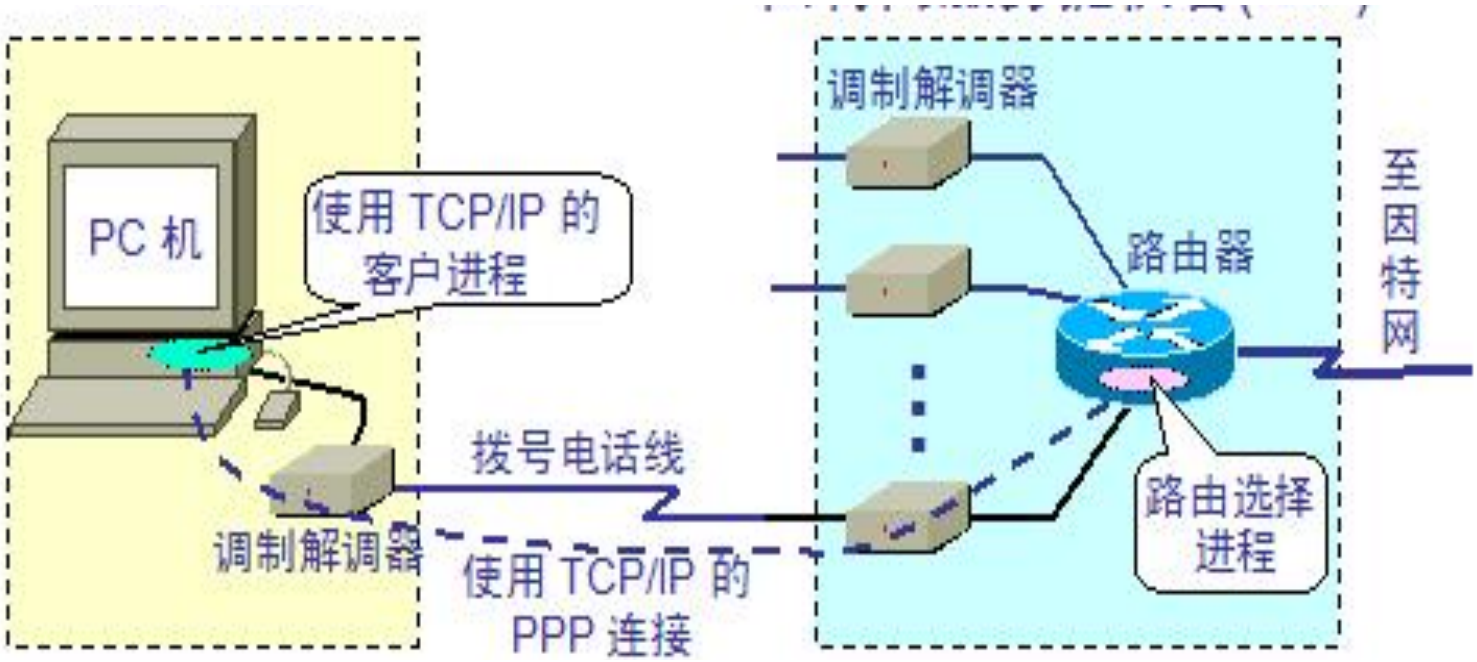
- 高级数据链路控制规程（High-Level Data Link Control ）
- 面向比特的协议，支持全双工传输
- 提供面向连接的服务
- 采用零比特填充方式实现透明传输
- 采用ARQ协议实现差错控制和流量控制
- 应用场合：
  - 广域网
    - X.25分组交换网（LAPB）
    - ISDN（LAPD）
    - 帧中继（LAPF）
    - PPP
  - LAN：LLC子层协议

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*
  - HDLC协议
  - *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



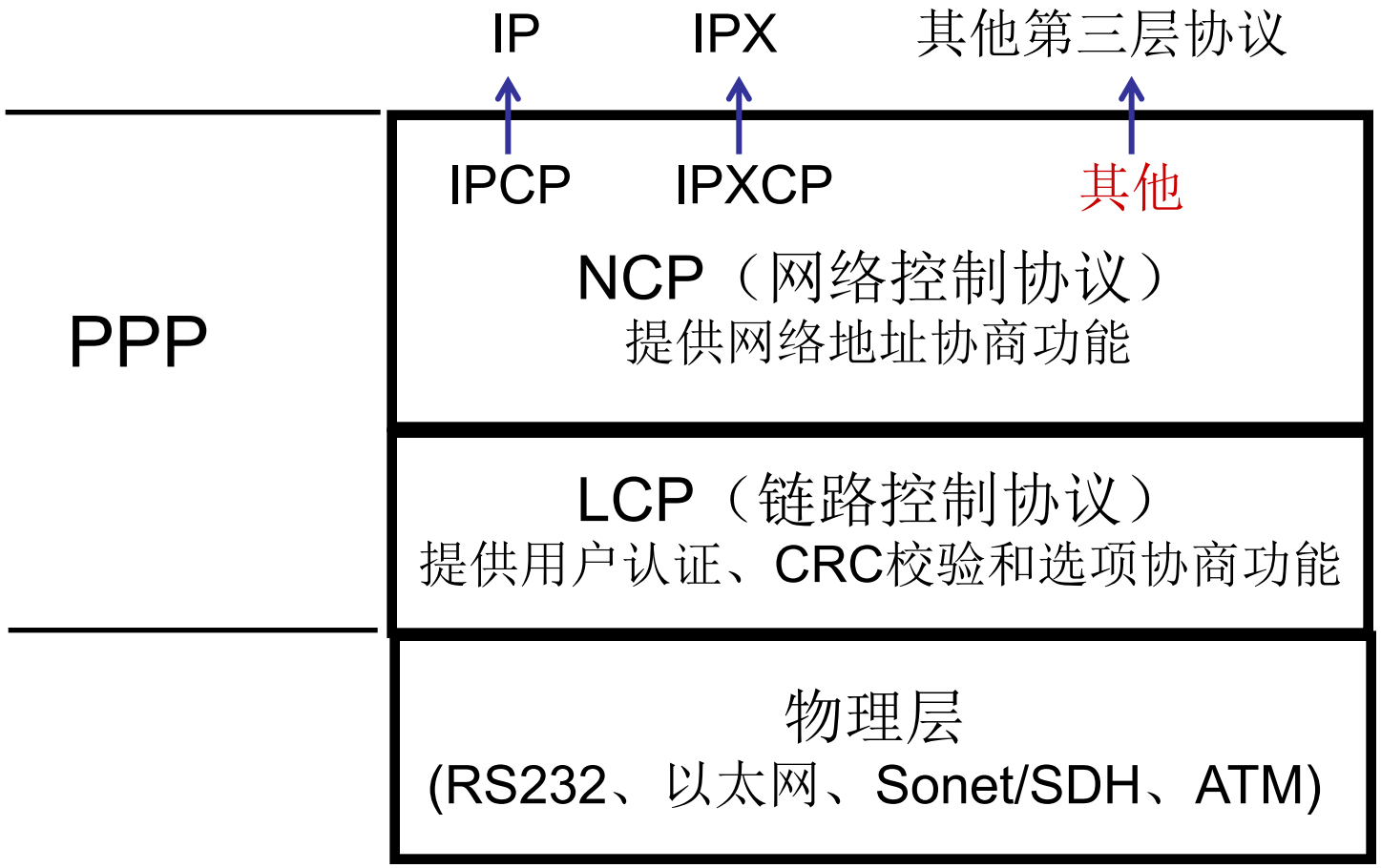
[谢]

PPP协议的特点

RFC 1661,1662,1663

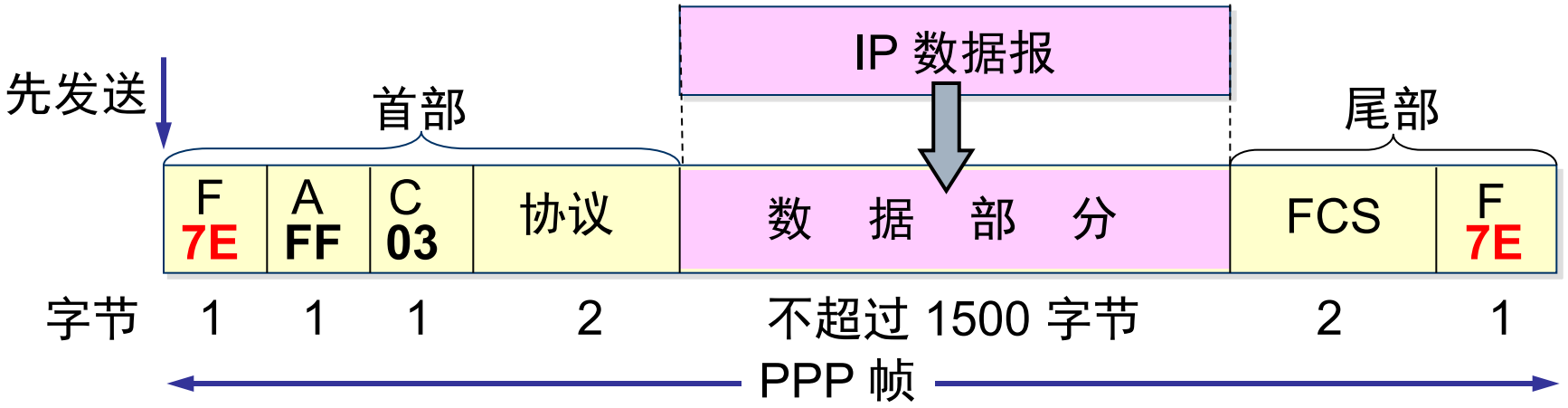
- 简单
- 面向连接
- 支持多种网络层协议
- 支持多种类型的物理链路
- 提供了建立数据链路连接、用户认证、帧头压缩协商等多种能力
- PPP取消了HDLC的下列功能：
  - 差错恢复（只检错不纠错），交由TCP负责
  - 流量控制，交由TCP负责
  - 序号
  - 点到多点链路

PPP的三个子层



PPPoE：PPP over Ethernet

PPP的帧格式：PPPoE



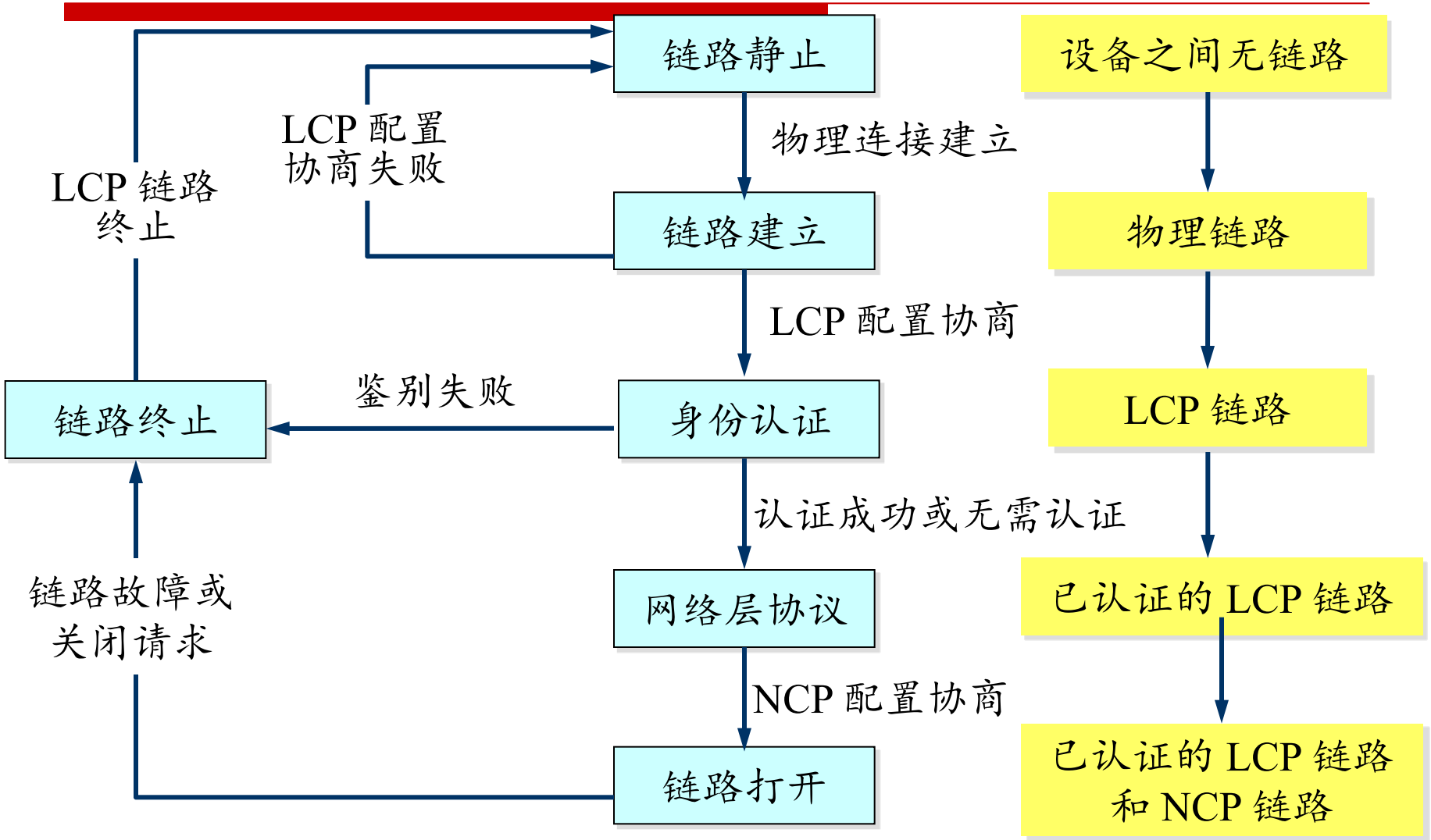
- 面向字符，即整个帧的长度为字节的整数倍
- 地址：FF表示任意站点
- 控制：03表示无编号帧
- 协议：表示数据部分是哪个协议的数据包，例如LCP、NCP、IP、IPX、AppleTalk……
- FCS：采用CRC-16

[谢]

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(≤0x20)前面也要加上0x7D

拨号上网时，PPP的工作过程

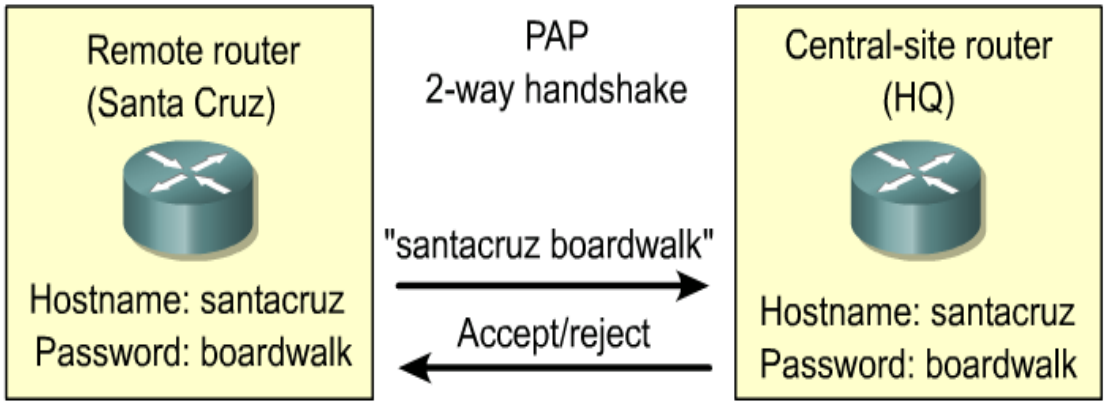


[谢]

PPP身份认证：PAP 或 CHAP

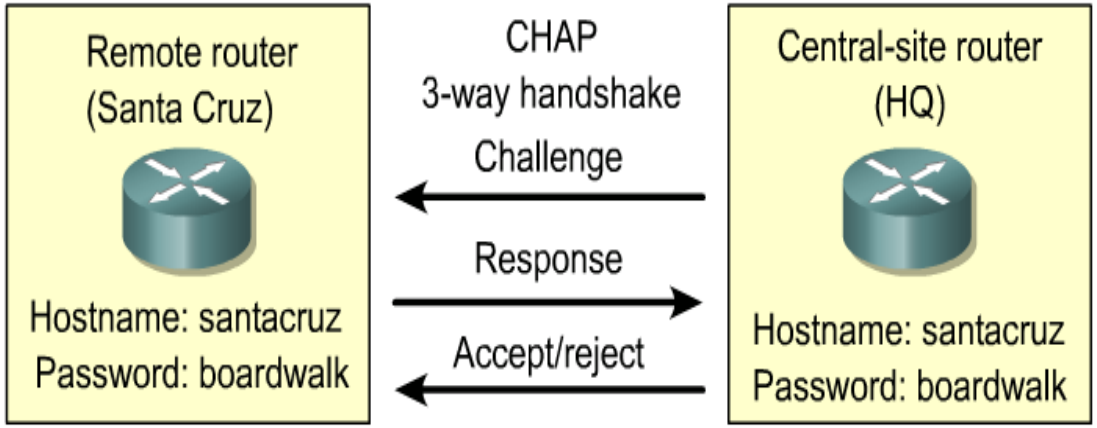
自阅

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

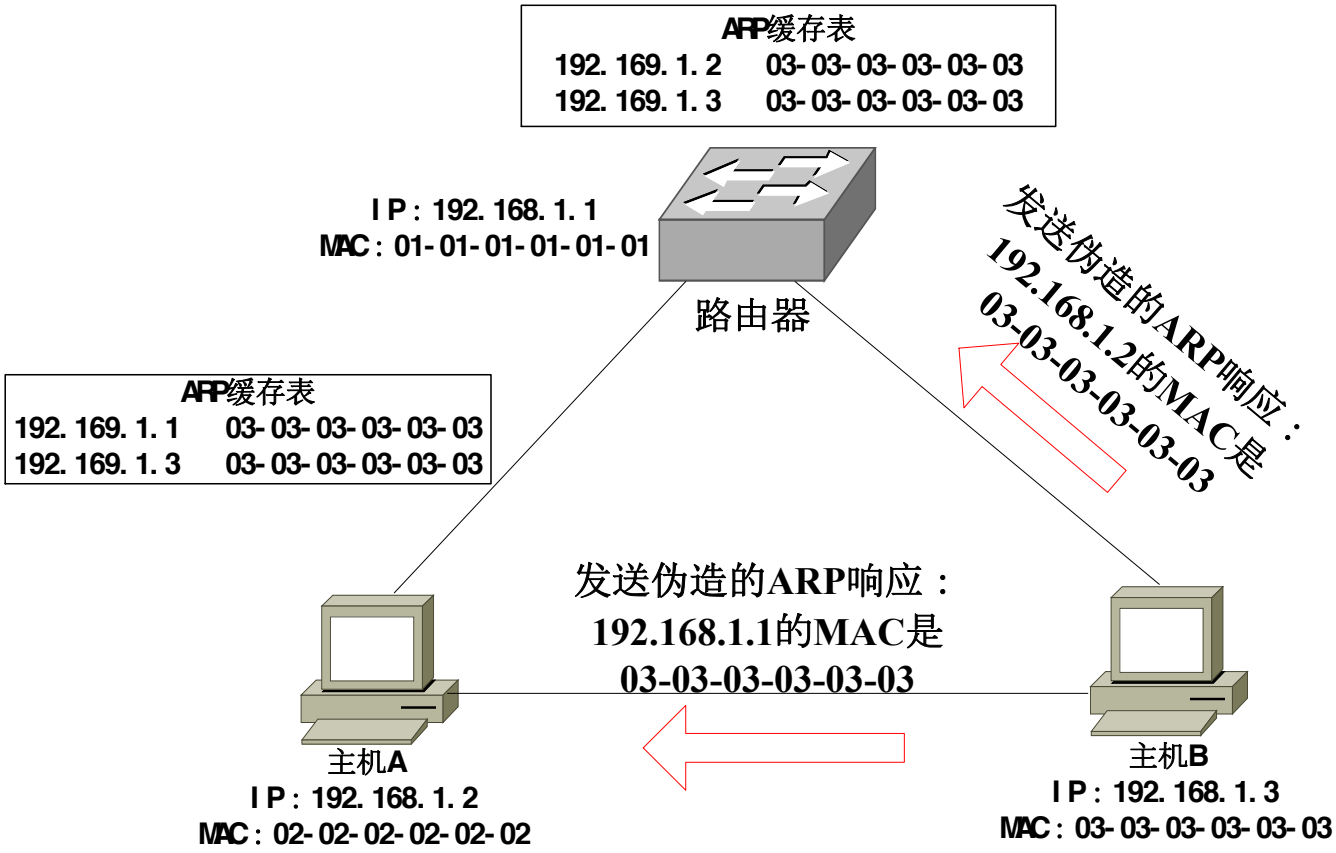
[Cisco CCNA training notes]

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* 自阅

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8版，电子工业出版社，2021年6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(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