



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

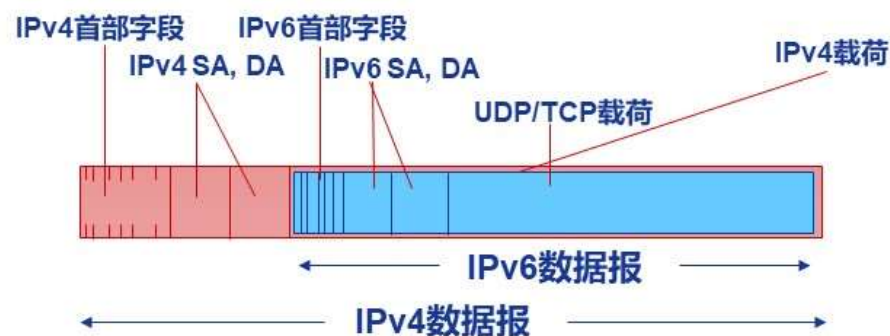
4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



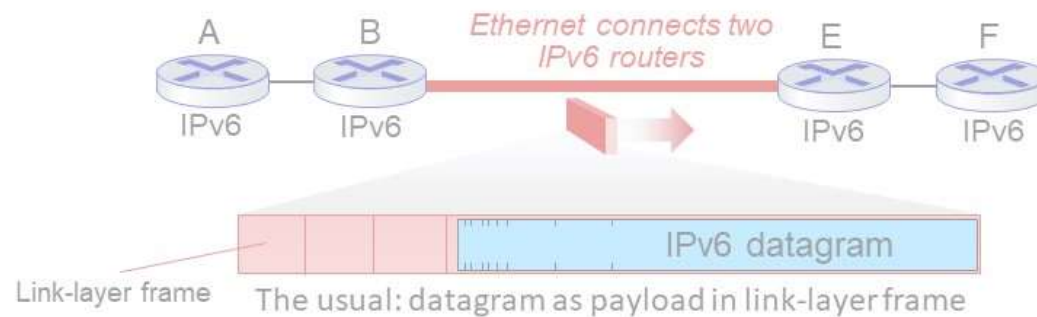
IPv4向IPv6过渡

- ❖ 不可能在某个时刻所有路由器同时被更新为IPv6
 - 不会有“标志性的日期”
 - IPv4和IPv6路由器共存的网络如何运行？
- ❖ **隧道(tunneling):** IPv6数据报作为IPv4数据报的载荷进行封装，穿越IPv4网络

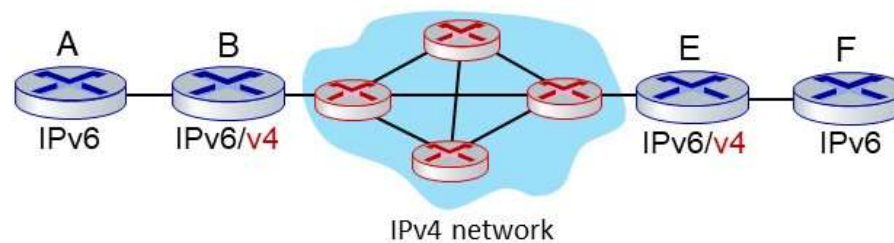


隧道和封装

以太网连接两个
IPv6 路由器:



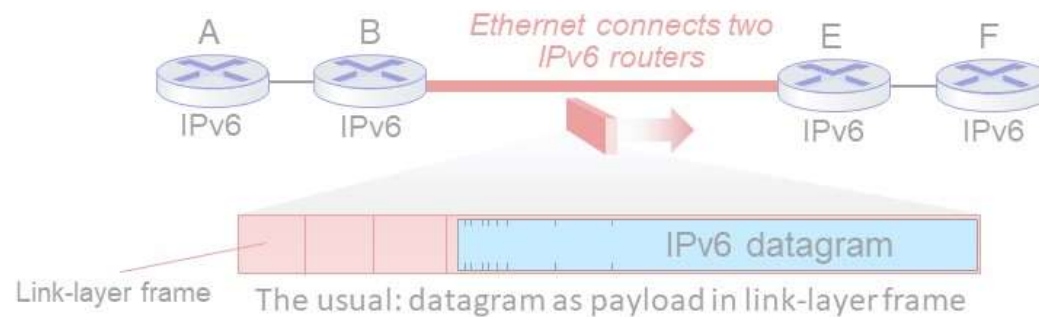
IPv4 网络连接两个
IPv6 路由器



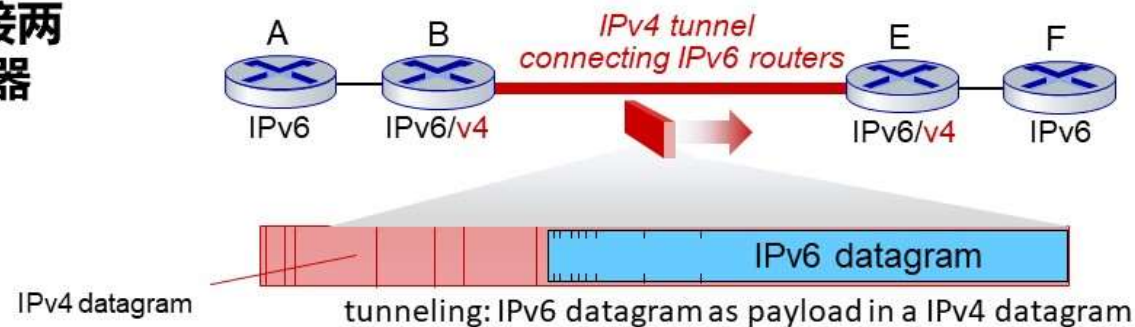
Network Layer: 4-199

隧道和封装

以太网连接两个
IPv6 路由器:



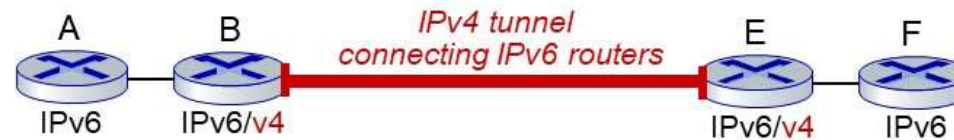
IPv4 隧道连接两个
IPv6 路由器



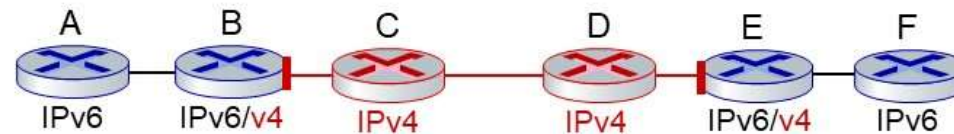
Network Layer: 4-201

隧道

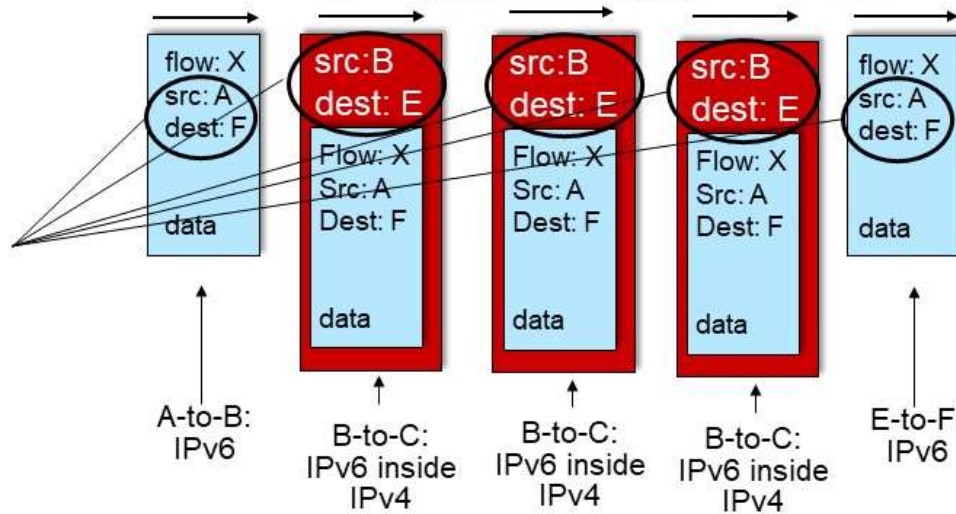
逻辑视图:



物理视图:



注意源地址和目标地址!



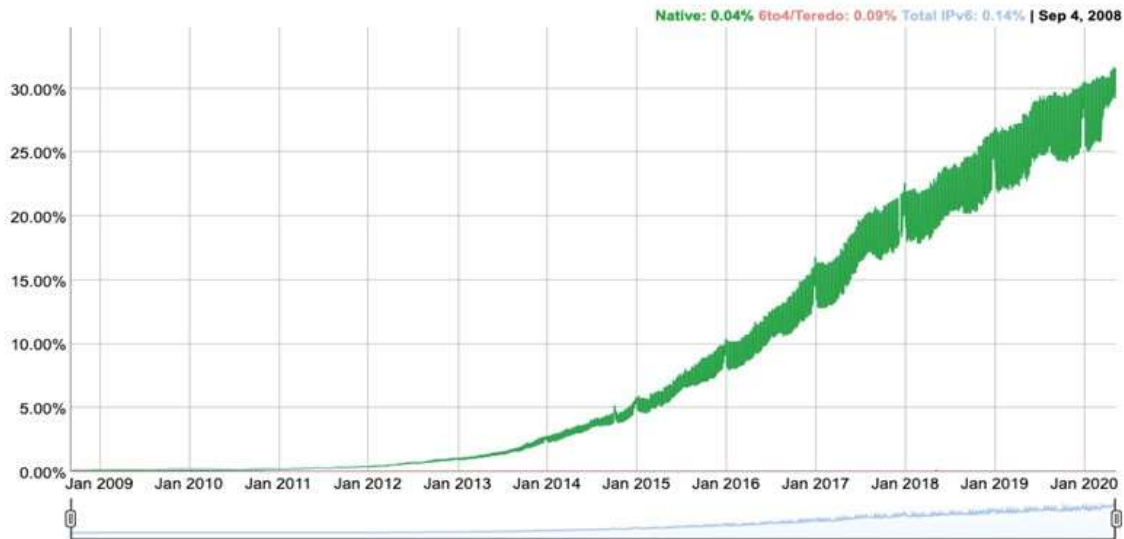
Network Layer: 4-203

IPv6: 使用情况

- Google¹: ~ 30% 的客户端通过 IPv6 访问服务
- NIST: 全美国1/3 的政府域支持 IPv6

IPv6 Adoption

We are continuously measuring the availability of IPv6 connectivity among Google users. The graph shows the percentage of users that access Google over IPv6.



1

<https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>

Network Layer: 4-206

IPv6: 使用情况

- Google¹: ~ 30% 的客户端通过 IPv6 访问服务
- NIST: 全美国1/3 的政府域支持 IPv6
- 部署时间长（是太长了！）
 - 25年了，而且还在继续！
 - 想想过去 25 年中网络应用的发展变化: WWW, social media, streaming media, gaming, telepresence, ...
 - **为什么?**

¹ <https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

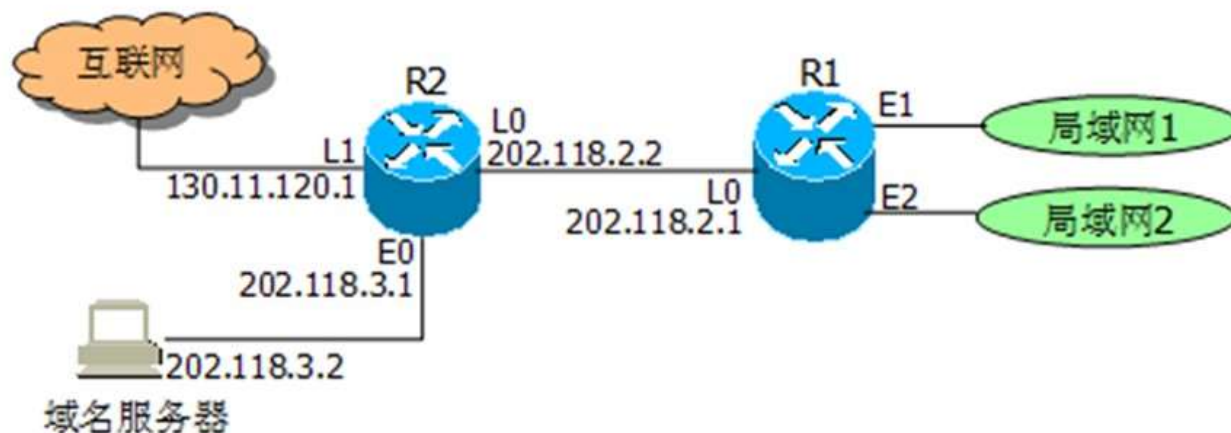
4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



例题

【例1】某网络拓扑如下图所示，路由器R1通过接口E1、E2分别连接局域网1、局域网2，通过接口L0连接路由器R2，并通过路由器R2连接域名服务器与互联网。R1的L0接口的IP地址是202.118.2.1；R2的L0接口的IP地址是202.118.2.2，L1接口的IP地址是130.11.120.1，E0接口的IP地址是202.118.3.1；域名服务器的IP地址是202.118.3.2。





4.1 网络层服务

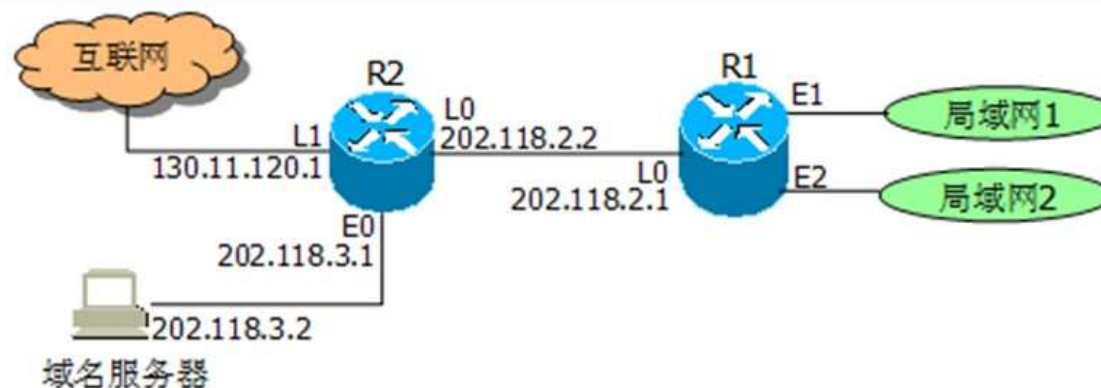
4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



例题



R1和R2的路由表结构为：

目的网络IP地址	子网掩码	下一跳IP地址	接口
----------	------	---------	----

(1) 将IP地址空间202.118.1.0/24划分为2个子网，分别分配给局域网1、局域网2，每个局域网需分配的IP地址数不少于120个。请给出子网划分结果，说明理由或给出必要的计算过程。

(2) 请给出R1的路由表，使其明确包括到局域网1的路由、局域网2的路由、域名服务器的主机路由和互联网的路由。

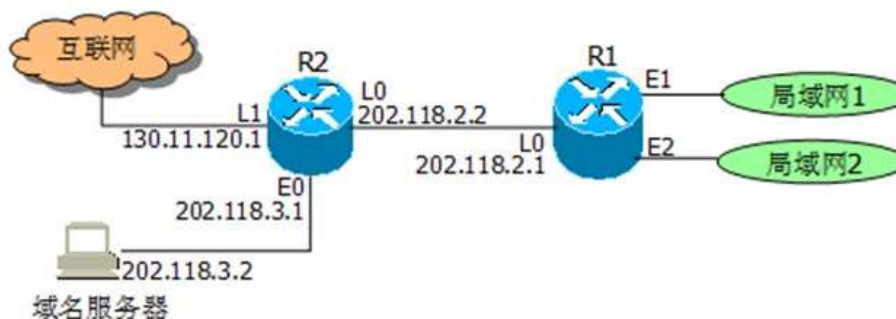
(3) 请采用路由聚合技术，给出R2到局域网1和局域网2的路由。

211

主观题 10分



(1) 将IP地址空间202.118.1.0/24划分为2个子网，分别分配给局域网1、局域网2，每个局域网需分配的IP地址数不少于120个。请给出子网划分结果，说明理由或给出必要的计算过程。





4.1 网络层服务

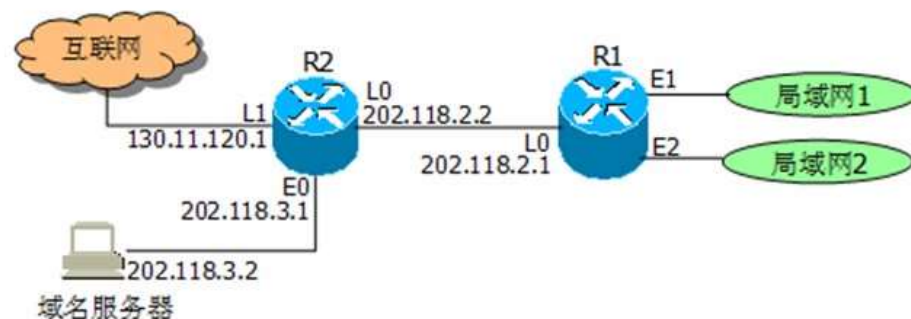
4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

例题

(1) 将IP地址空间202.118.1.0/24划分为2个子网，分别分配给局域网1、局域网2，每个局域网需分配的IP地址数不少于120个。请给出子网划分结果，说明理由或给出必要的计算过程。



解：

(1) 把IP地址空间202.118.1.0/24划分为2个等长的子网。划分结果：
子网1：子网地址为202.118.1.0，子网掩码为255.255.255.128
(或子网1：202.118.1.0/25)
子网2：子网地址为202.118.1.128，子网掩码为255.255.255.128
(或子网2：202.118.1.128/25)
地址分配方案：子网1分配给局域网1，子网2分配给局域网2。

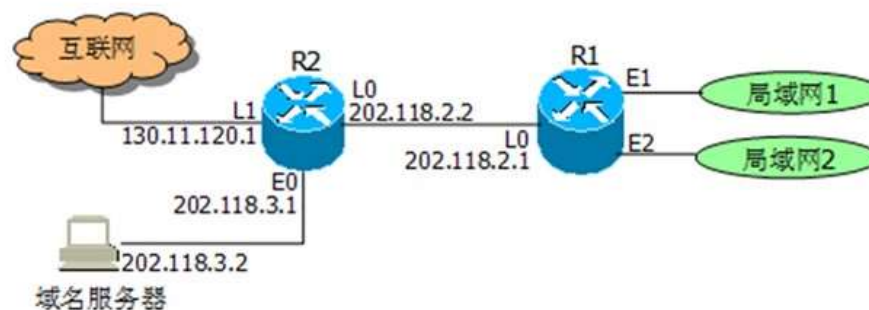
213

主观题 10分



网络

(2) 请给出R1的路由表，使其明确包括到局域网1的路由、局域网2的路由、域名服务器的主机路由和互联网的路由。





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

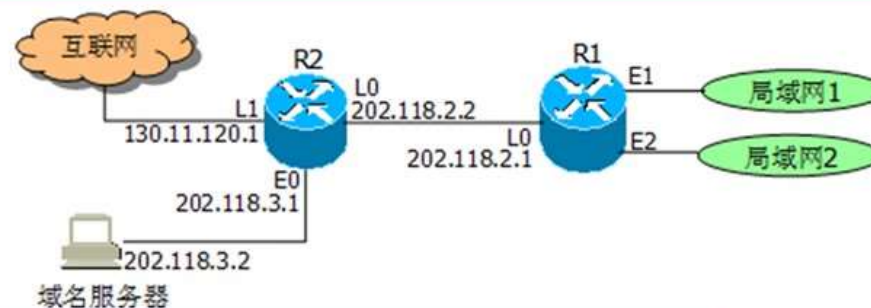
4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



例题

(2) 请给出R1的路由表, 使其明确包括到局域网1的路由、局域网2的路由、域名服务器的主机路由和互联网的路由。



解:

若子网1分配给局域网1, 子网2分配给局域网2

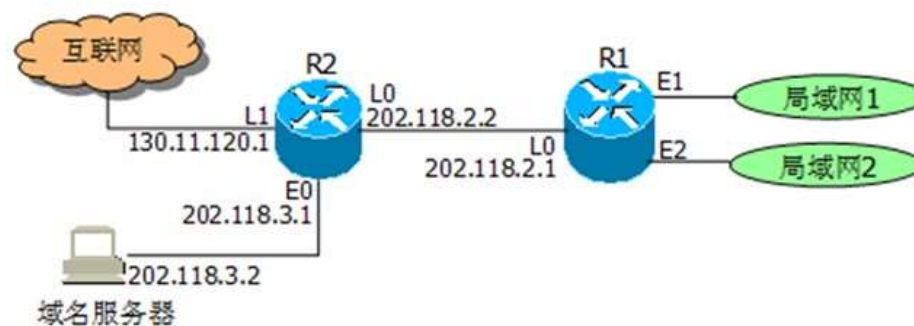
(2) R1的路由表如下:

主观题 10分



网络

(3) 请采用路由聚合技术，给出R2到局域网1和局域网2的路由。



216



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

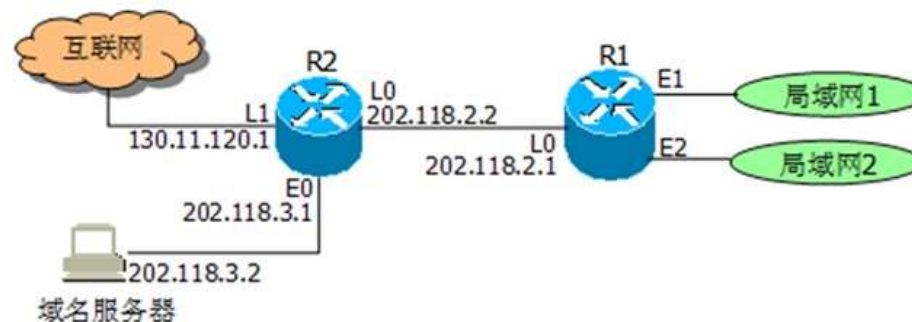
4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



例题

(3) 请采用路由聚合技术，给出R2到局域网1和局域网2的路由。



解：

(3) R2的路由表中，到局域网1和局域网2的路由表项如下：

目的网络IP地址	子网掩码	下一跳IP地址	接口
202.118.1.0	255.255.255.0	202.118.2.1	L0

单选题 1分

4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



某主机的IP地址为180.80.77.55，子网掩码为255.255.252.0。若该主机向其所在子网发送广播分组，则目的地址可以是_____。

- ☐ A 180.80.76.0
- ☐ B 180.80.76.255
- ☐ C 180.80.77.255
- ☒ D 180.80.79.255

218

单选题 1分

4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议



若将101.200.16.0/20划分为5个子网，则可能的最小子网的可分配IP地址数是_____。

- ☐ A 126
- ☒ B 254
- ☐ C 510
- ☐ D 1022

219



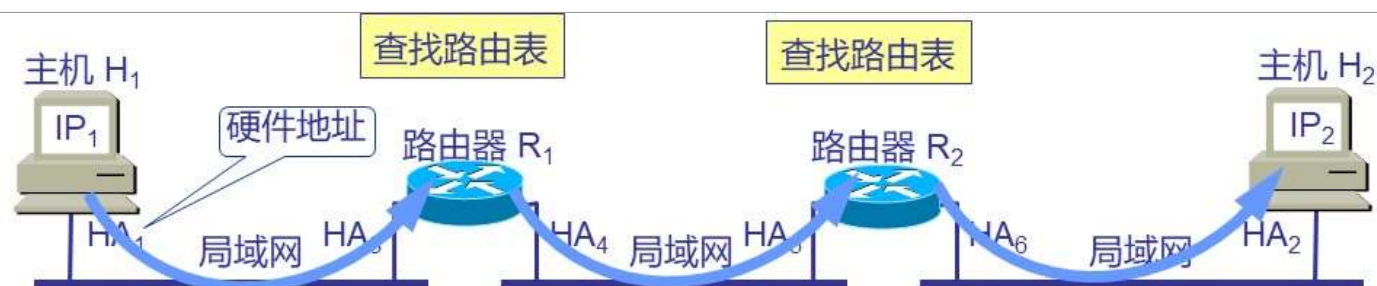
4.5 IP相关协议

刘亚维

220

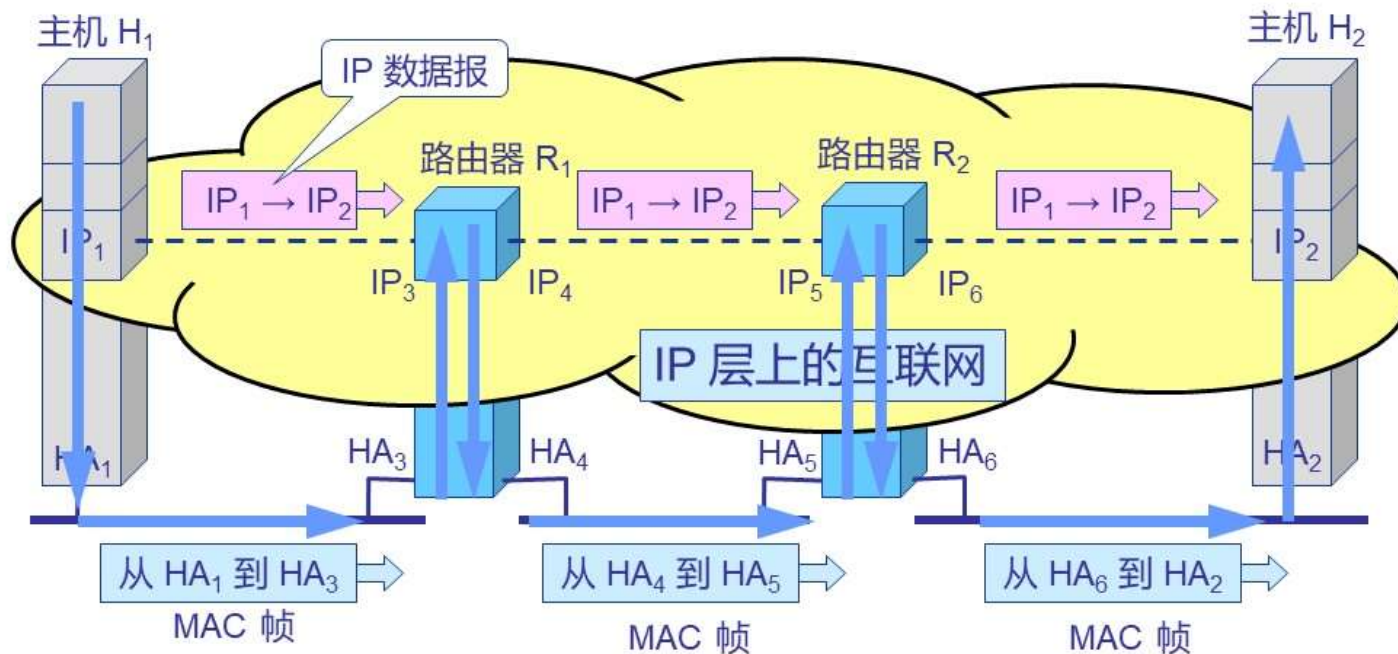
IP 地址与硬件地址

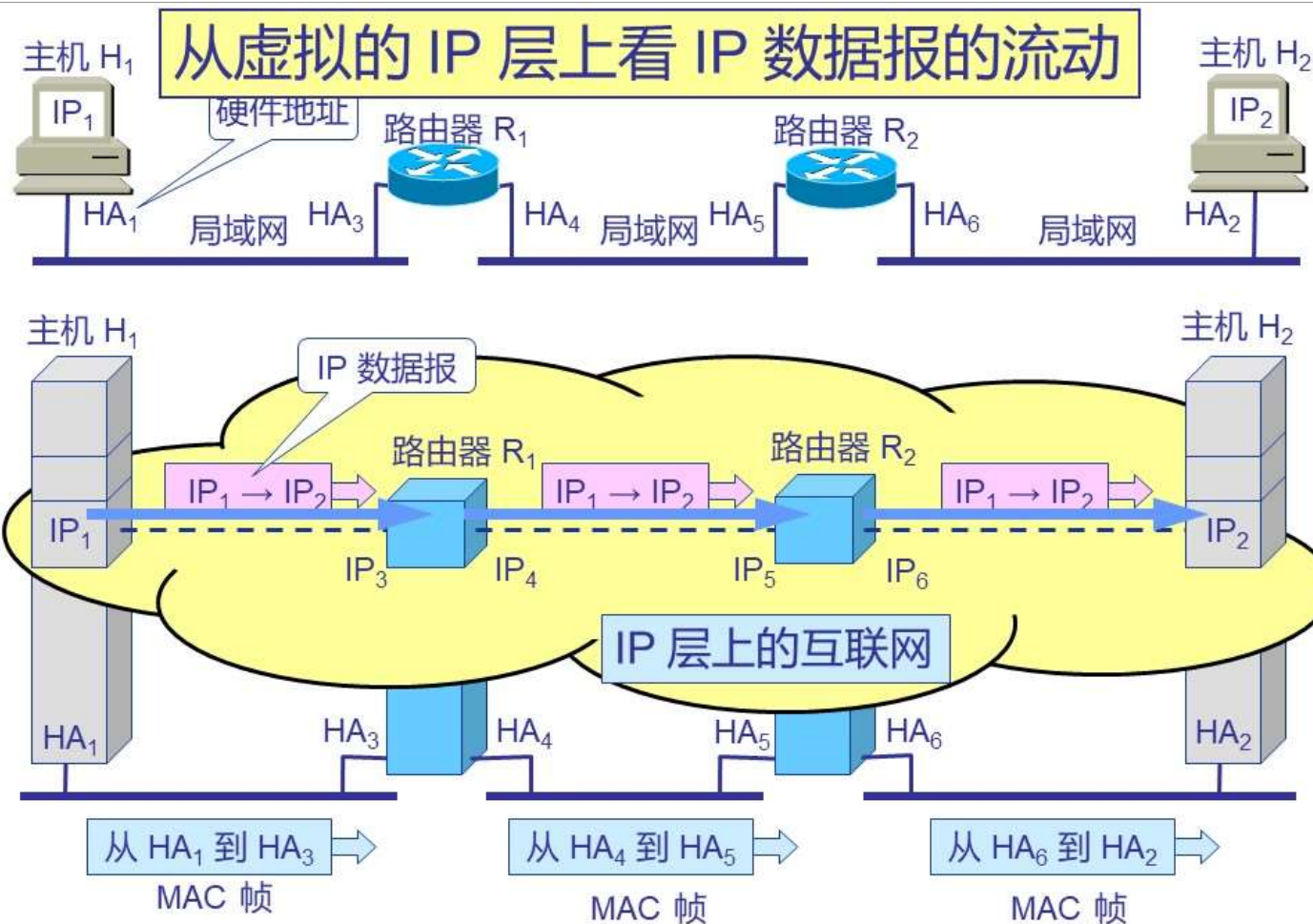


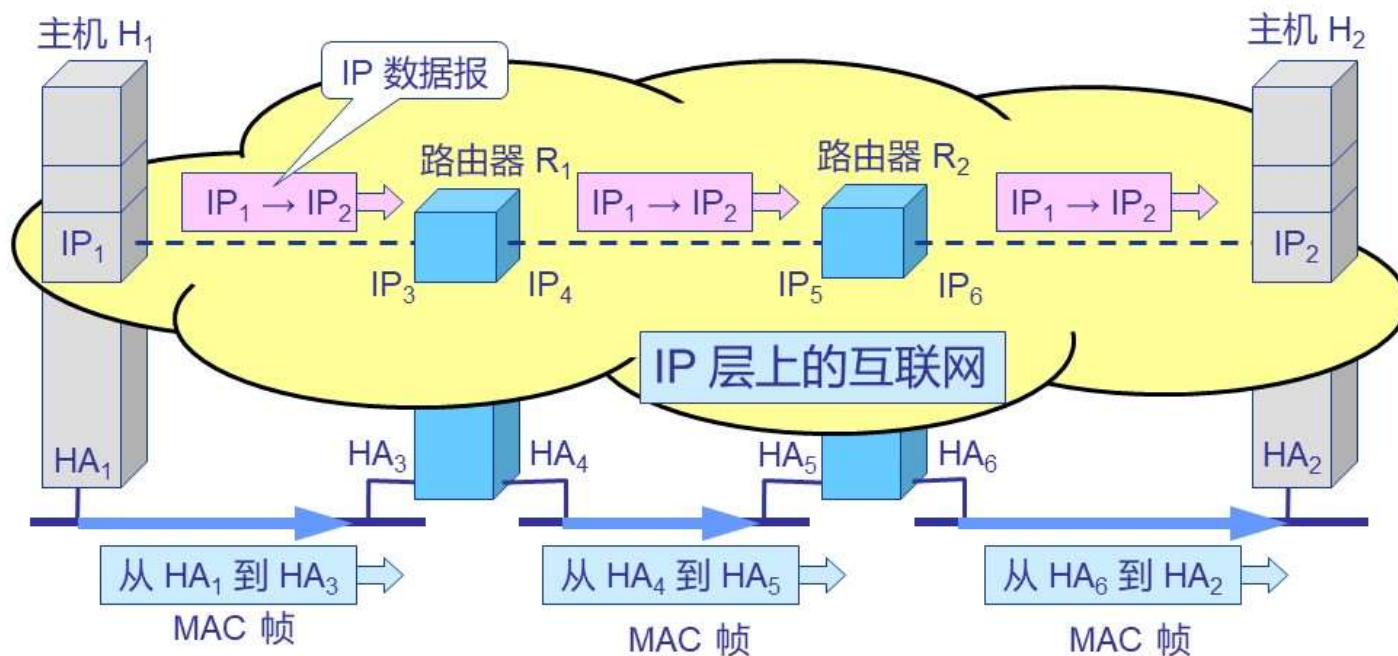


通信的路径
 $H_1 \rightarrow$ 经过 R_1 转发 \rightarrow 再经过 R_2 转发 $\rightarrow H_2$

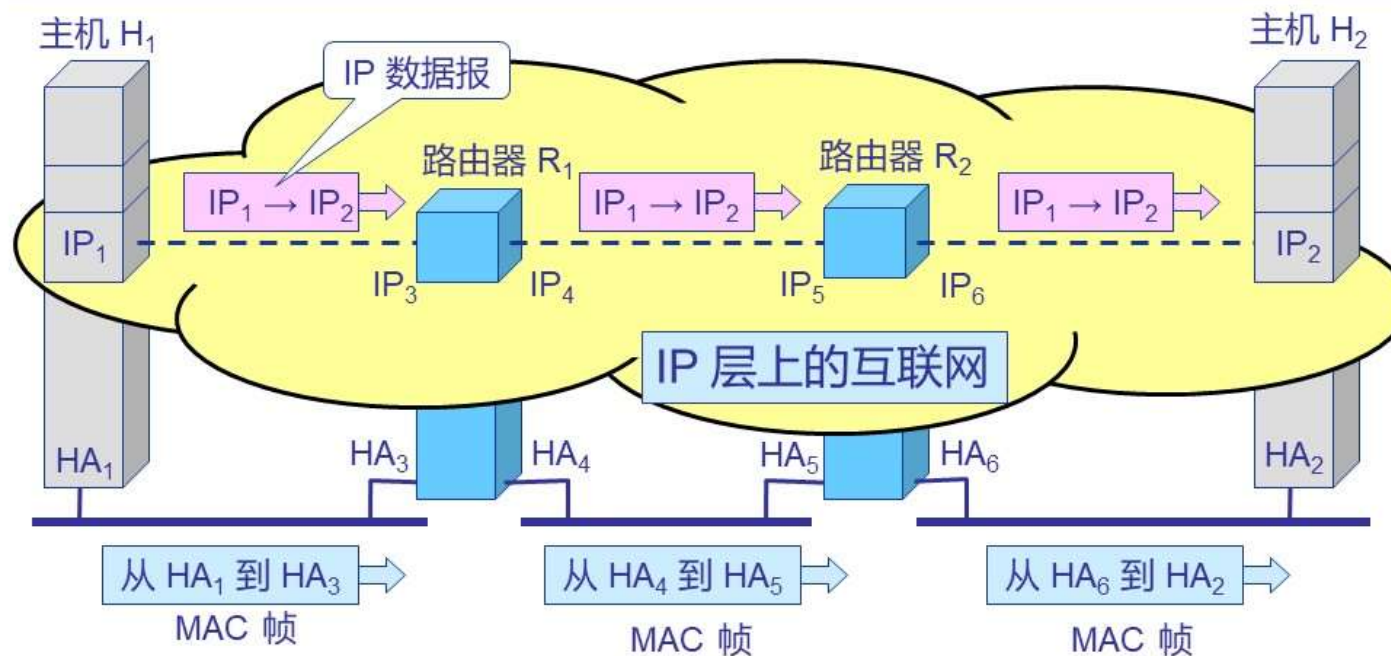
从协议栈的层次上看数据的流动



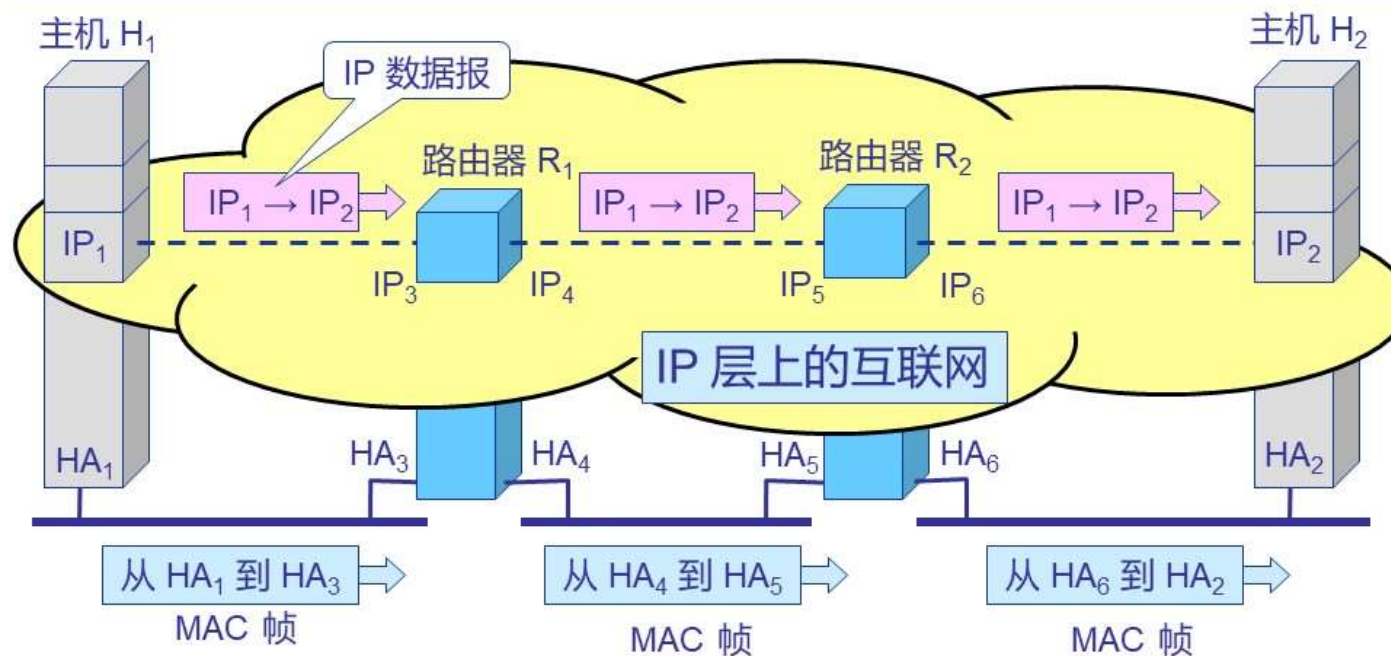




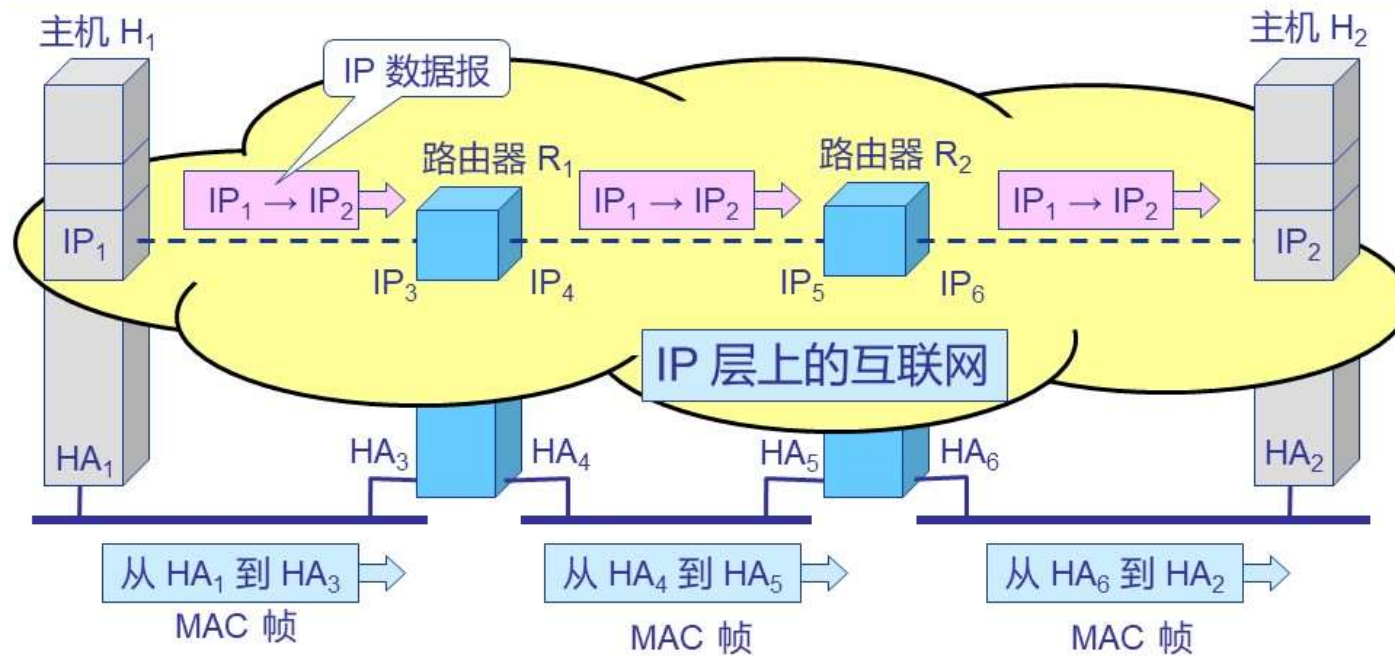
在 IP 层抽象的互联网上只能看到 IP 数据报
图中的 $IP_1 \rightarrow IP_2$ 表示从源地址 IP_1 到目的地址 IP_2
两个路由器的 IP 地址并不出现在 IP 数据报的首部中



路由器只根据目的站的 IP 地址的网络号进行路由选择



在具体的物理网络的链路层
只能看见 MAC 帧而看不见 IP 数据报





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

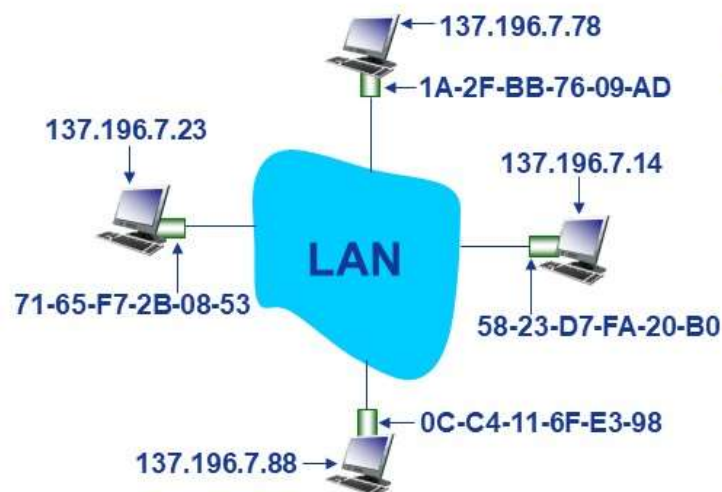
4.5 IP相关协议

ARP



ARP: 地址解析协议

问题: (在同一个LAN内)
如何在已知目的接口的IP地址前提下确定其MAC地址?



ARP表: LAN中的每个IP结点(主机、路由器)维护一个表

- 存储某些LAN结点的IP/MAC地址映射关系:
< IP地址; MAC地址; TTL >
- TTL (Time To Live):
经过这个时间以后该映射关系会被遗弃(典型值为20min)



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ARP



ARP协议: 同一局域网内

- ❖ A想要给同一局域网内的B发送数据报
 - B的MAC地址不在 A的ARP 表中
- ❖ A广播ARP查询分组, 其中包含B的IP地址
 - 目的MAC地址 = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - LAN中所有结点都会接收 ARP查询
- ❖ B接收ARP查询分组, IP地址匹配成功, 向A应答B的MAC地址
 - 利用单播帧向A发送应答
- ❖ A在其ARP表中, 缓存B的IP-MAC地址对, 直至超时
 - 超时后, 再次刷新
- ❖ ARP是“即插即用”协议:
 - 结点自主创建ARP表, 无需干预

230



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

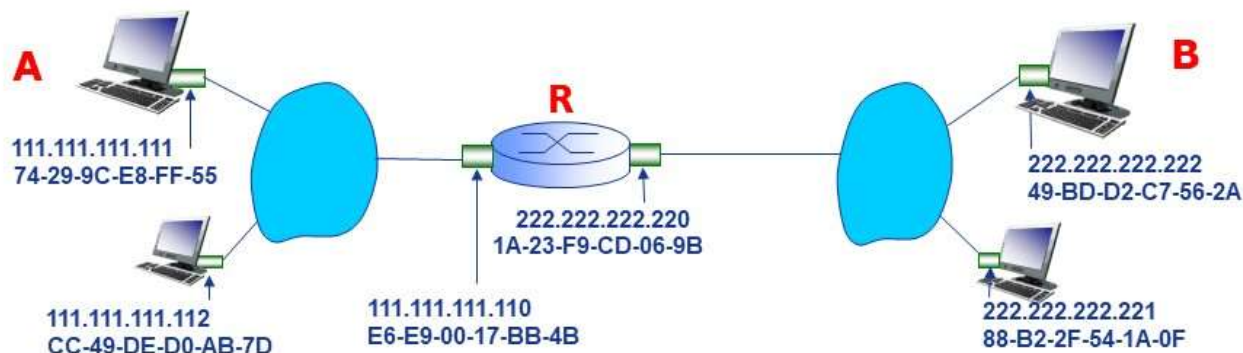
ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

通信过程: A通过路由器R向B发送数据报

- 关注寻址: IP地址(数据报中)和MAC地址(帧中)
- 假设A知道B的IP地址(怎么知道的?)
- 假设A知道第一跳路由器R (左)接口IP地址 (怎么知道的?)
- 假设A知道第一跳路由器R (左)接口MAC地址 (怎么知道的?)





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

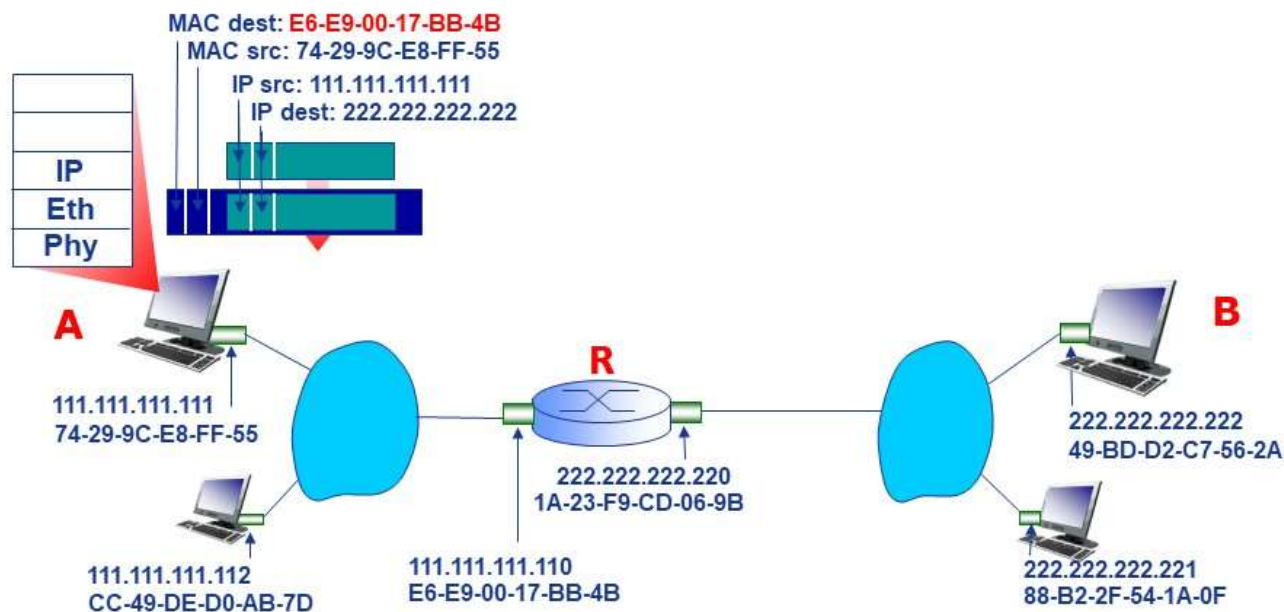
4.5 IP相关协议

ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

- ❖ A构造IP数据报, 其中源IP地址是A的IP地址, 目的IP地址是B的IP地址
- ❖ A构造链路层帧, 其中源MAC地址是A的MAC地址, 目的MAC地址是R(左)接口的MAC地址, 封装A到B的IP数据报。





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

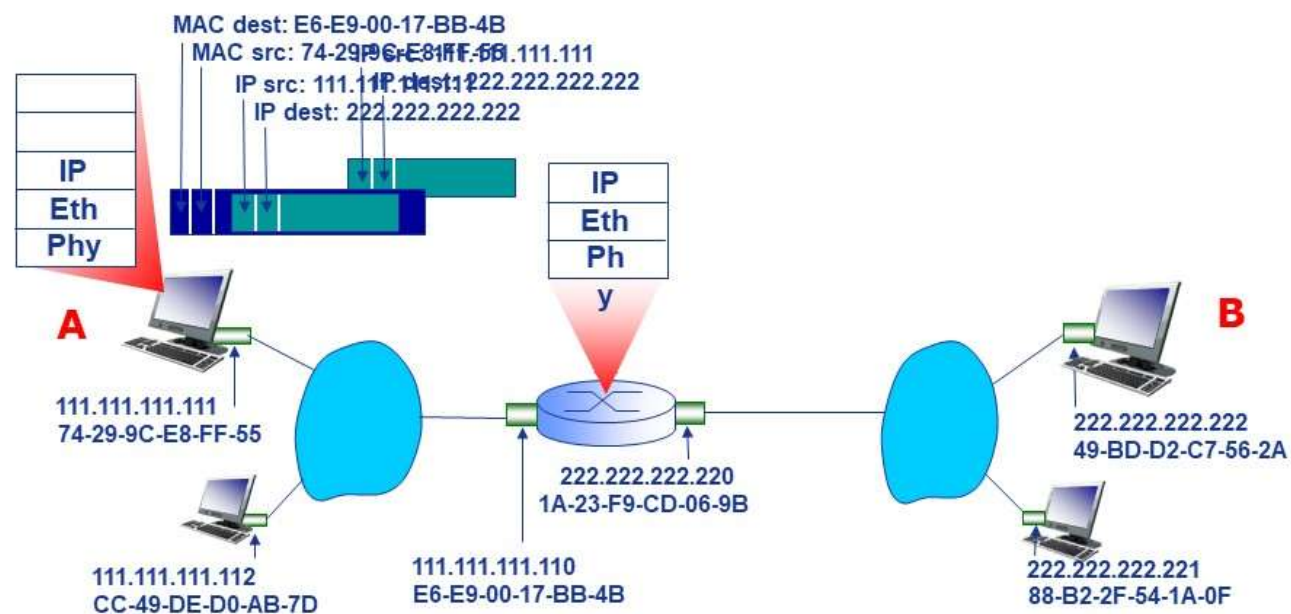
ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

❖ 帧从A发送至R

❖ R接收帧, 提取IP数据报, 传递给上层IP协议





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

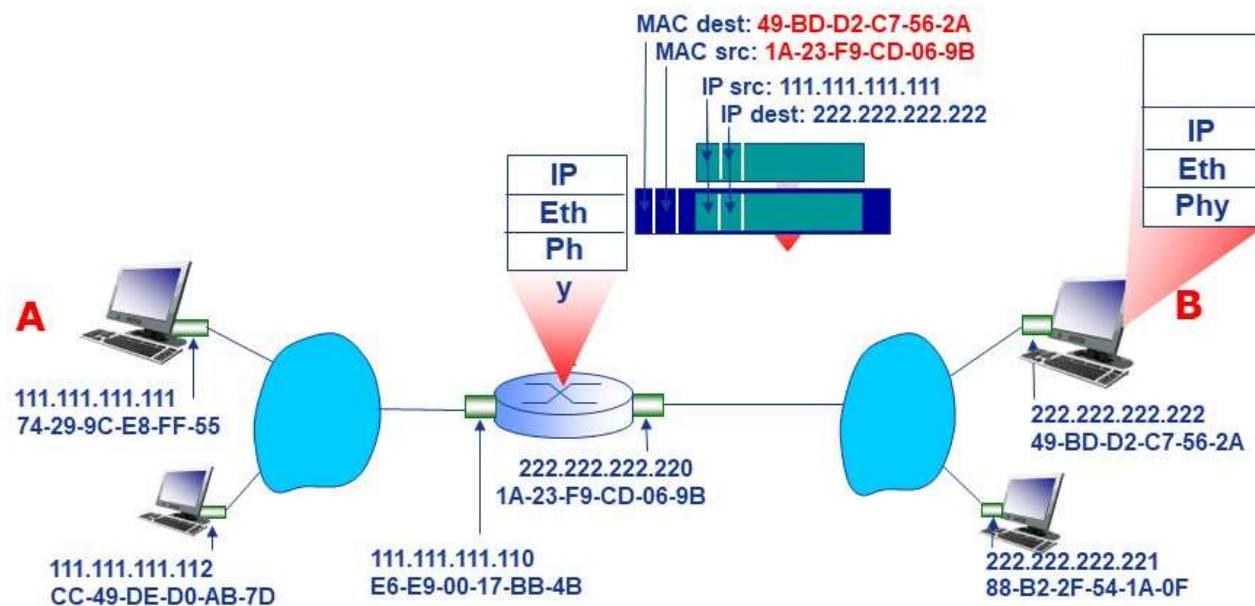
4.5 IP相关协议

ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

- ❖ R转发IP数据报 (源和目的IP地址不变!)
- ❖ R创建链路层帧, 其中源MAC地址是R(右)接口的MAC地址, 目的MAC地址是B的MAC地址, 封装A到B的IP数据报。





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

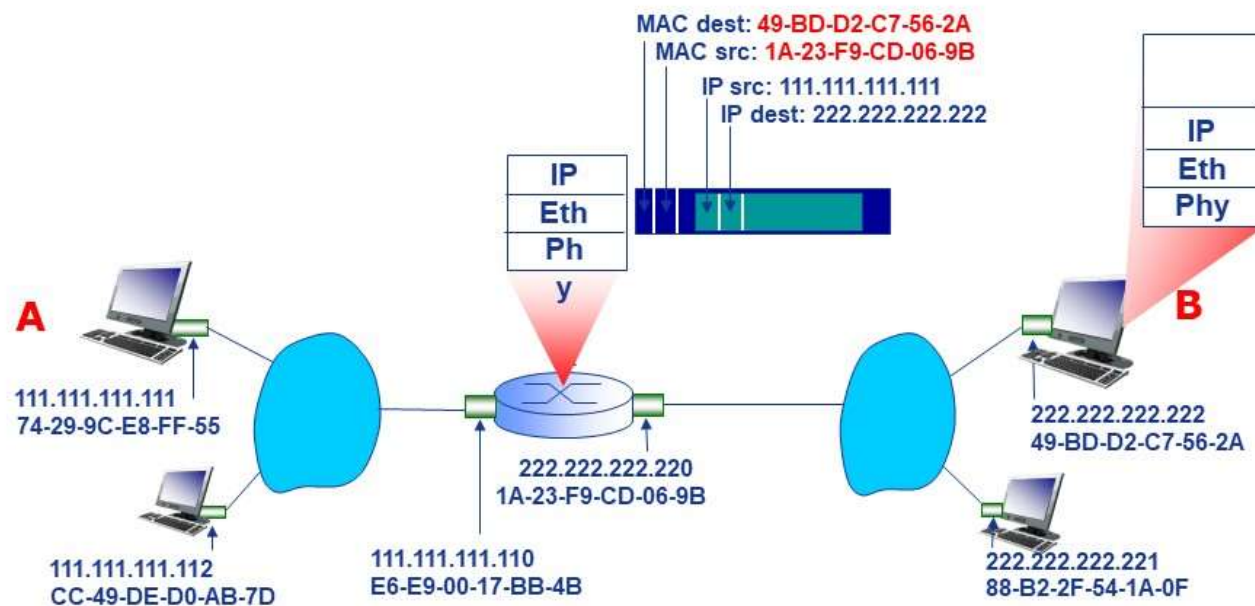
4.5 IP相关协议

ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

- ❖ R转发IP数据报 (源和目的IP地址不变!)
- ❖ R创建链路层帧, 其中源MAC地址是R(右)接口的MAC地址, 目的MAC地址是B的MAC地址, 封装A到B的IP数据报。



235



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

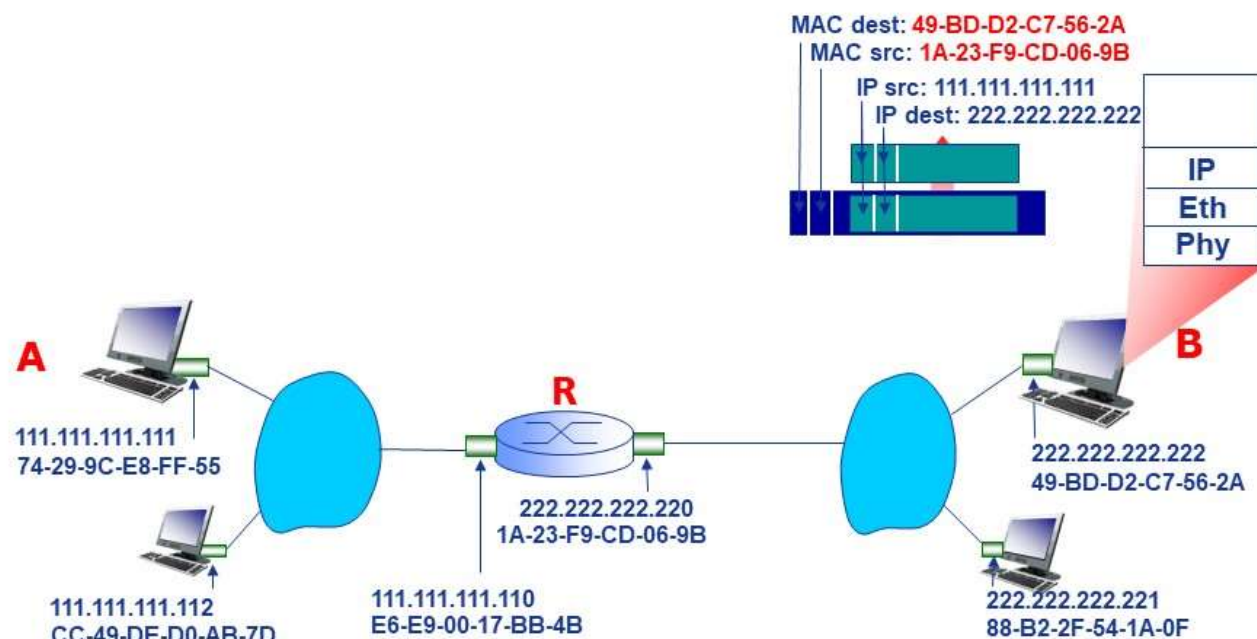
4.5 IP相关协议

ARP



寻址: 从一个LAN路由至另一个LAN

- ❖ R转发IP数据报 (源和目的IP地址不变!)
- ❖ R创建链路层帧, 其中源MAC地址是R(右)接口的MAC地址, 目的MAC地址是B的MAC地址, 封装A到B的IP数据报。



单选题 1分

4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

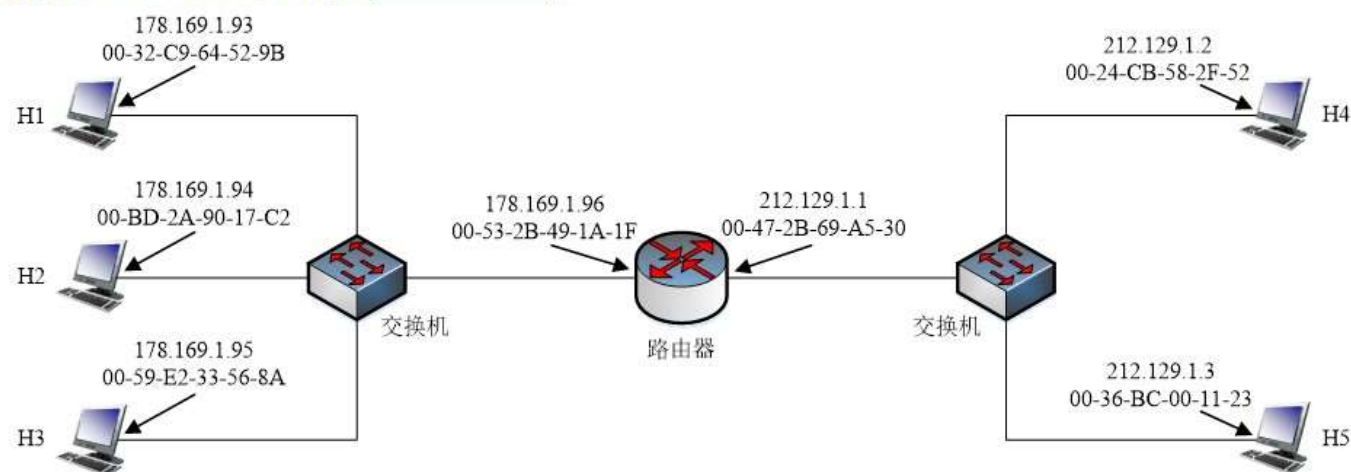
4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议



若主机H1向主机H5发送IP分组P，则H1发送的P的目的IP地址以及封装P的以太网帧的目的MAC地址分别是_____。



- ☐ A 178.169.1.96, 00-53-2B-49-1A-1F ☒ B 212.129.1.3, 00-53-2B-49-1A-1F
- ☐ C 178.169.1.96, 00-36-BC-00-11-23 ☐ D 212.129.1.3, 00-36-BC-00-11-23



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ICMP



互联网控制报文协议(ICMP)

❖ 互联网控制报文协议 ICMP (Internet Control Message Protocol)

❖ 支持主机或路由器:

- 差错(或异常)报告
- 网络探测

❖ 两类ICMP 报文:

- 差错报告报文(5种)
 - 目的不可达
 - 源抑制(Source Quench)
 - 超时/超期
 - 参数问题
 - 重定向 (Redirect)
- 网络探测报文(2组)
 - 回声(Echo)请求与应答报文(Reply)
 - 时间戳请求与应答报文

238



计算机网
络

4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ICMP



ICMP报文

类型(Type)	编码(Code)	description
0	0	回声应答 (ping)
3	0	目的网络不可达
3	1	目的主机不可达
3	2	目的协议不可达
3	3	目的端口不可达
3	6	目的网络未知
3	7	目的主机未知
4	0	源抑制(拥塞控制-未用)
8	0	回声请求(ping)
9	0	路由通告
10	0	路由发现
11	0	TTL超期
12	0	IP首部错误

239

计算机网络

- 4.1 网络层服务
- 4.2 虚电路vs数据报网络
- 4.3 路由器体系结构
- 4.4 IP协议
- 4.5 IP相关协议**

ICMP



例外情况

❖ 几种**不发送** ICMP差错报告报文的特殊情况:

- 对ICMP差错报告报文不再发送 ICMP差错报告报文
- 除第1个IP数据报分片外, 对所有后续分片均不发送ICMP差错报告报文
- 对所有多播IP数据报均不发送 ICMP差错报告报文
- 对具有特殊地址 (如127.0.0.0 或 0.0.0.0) 的IP数据报不发送 ICMP 差错报告报文

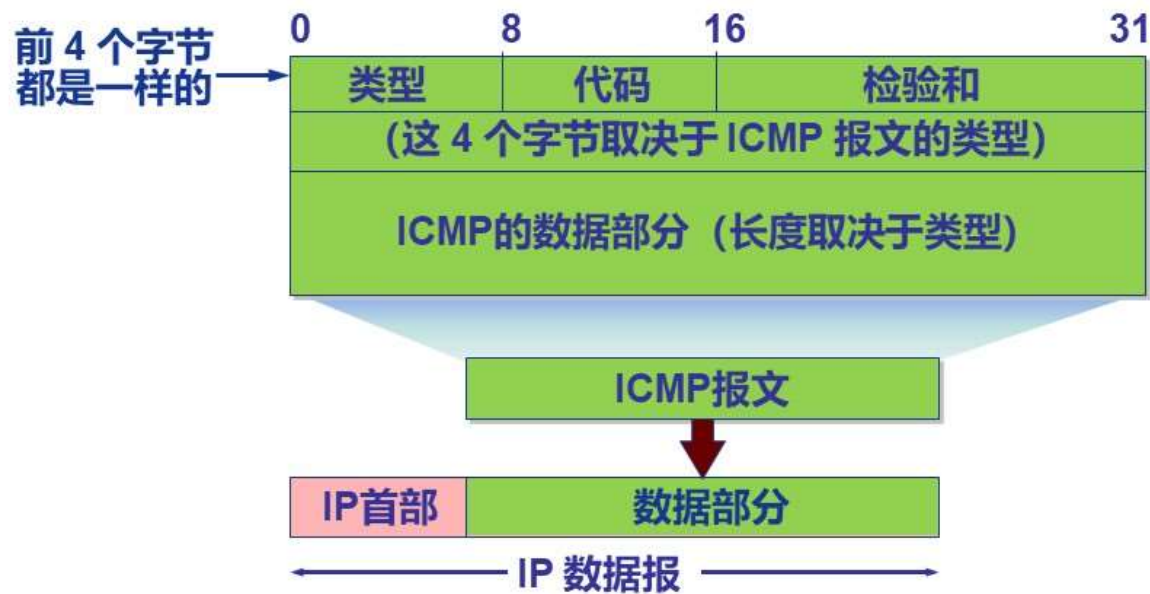
❖ 几种 ICMP 报文已不再使用

- 信息请求与应答报文
- 子网掩码请求和应答报文
- 路由器询问和通告报文

240

ICMP报文的格式

❖ ICMP报文封装到IP数据报中传输





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

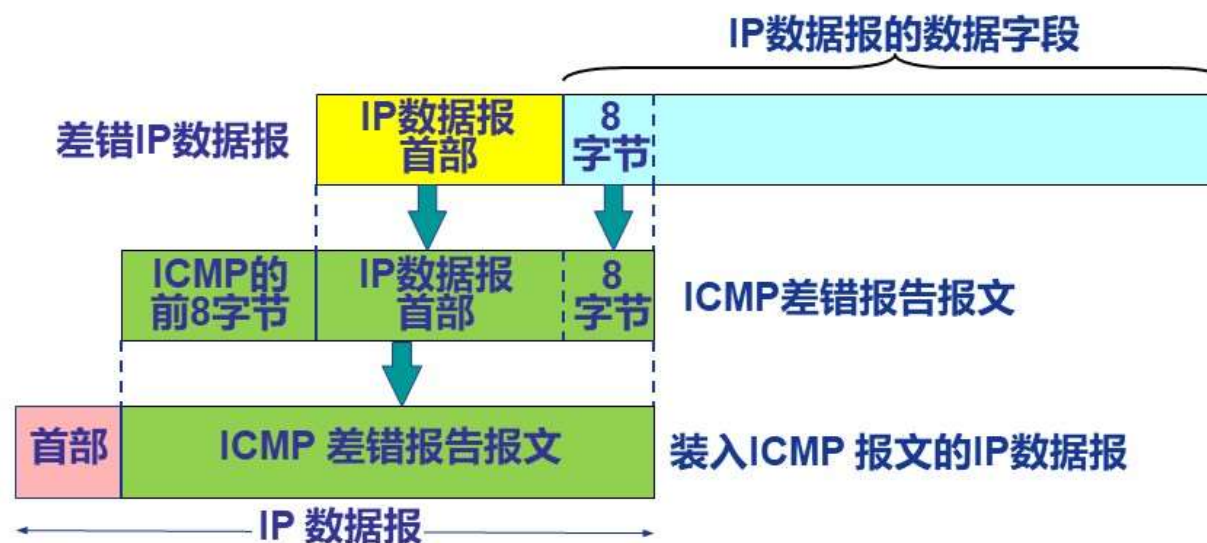
4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ICMP



ICMP差错报告报文数据封装





4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ICMP



ICMP的应用举例: Traceroute

❖ 源主机向目的主机发送一系列UDP数据报

- 第1组IP数据报TTL = 1
- 第2组IP数据报TTL=2, etc.
- 目的端口号为不可能使用端口号

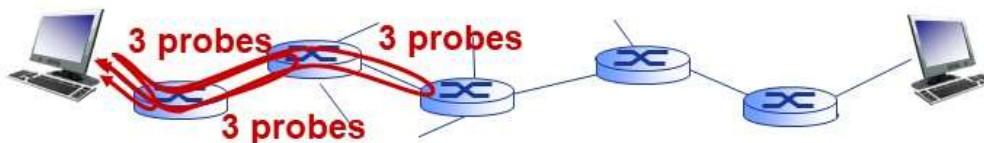
❖ 当第 n 组数据报(TTL= n)到达第 n 个路由器时:

- 路由器丢弃数据报
- 向源主机发送ICMP报文 (type=11, code=0)
- ICMP报文携带路由器名称和IP地址信息

❖ 当ICMP报文返回到源主机时, 记录RTT

❖ 停止准则:

- ❖ UDP数据报最终到达目的主机
- ❖ 目的主机返回“目的端口不可达”ICMP报文 (type=3, code=3)
- ❖ 源主机停止



243

单选题 1分

4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

ICMP



若路由器R因为拥塞丢弃IP分组，则此时R可向发出该IP分组的源主机发送的ICMP报文类型是_____。

- ☐ A 路由重定向
- ☐ B 目的不可达
- ☒ C 源抑制
- ☐ D 超时

244



4.1 网络层服务

4.2 虚电路vs数据报网络

4.3 路由器体系结构

4.4 IP协议

4.5 IP相关协议

NAT



网络地址转换(NAT)

动机:

- 只需/能从ISP申请一个IP地址
 - IPv4地址耗尽
- 本地网络设备IP地址的变更, 无需通告外界网络
- 变更ISP时, 无需修改内部网络设备IP地址
- 内部网络设备对外界网络不可见, 即不可直接寻址(安全)

251