第 五 章　网络层(2)

课程名称：计算机网络
主讲教师：姚烨
课程代码：U10M11016.01　　第31-32讲
E-MAIL　：yaoye@nwpu.edu.cn

2021 – 2022 学年第一学期

本节内容

- 1. IP协议
  - IP 分组格式
  - IP 分片与组装
  - IP 分组转发机制
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

引言-因特网的网际协议 IP

- 网际协议IP是TCP/IP集中最主要协议之一,主要包括以下功能:
  - 分组生成,发送、接收和处理;
  - IP分片与组装(分片对象是上层协议数据单元);
  - IP分组转发：每个IP分组(或IP分片)独立路由
- 网络层其他四个协议:
  - 网际控制报文协议ICMP(Internet Control Message Protocol)
  - 因特网组管理协议IGMP(Internet Group Management Protocol)
  - 地址解析协议 ARP (Address Resolution Protocol)
  - 逆地址解析协议 RARP(Reverse Address Resolution Protocol)

本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 分组的分片与组装
  - 1.3 分组转发(路由选择)
  - 1.4 选项
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

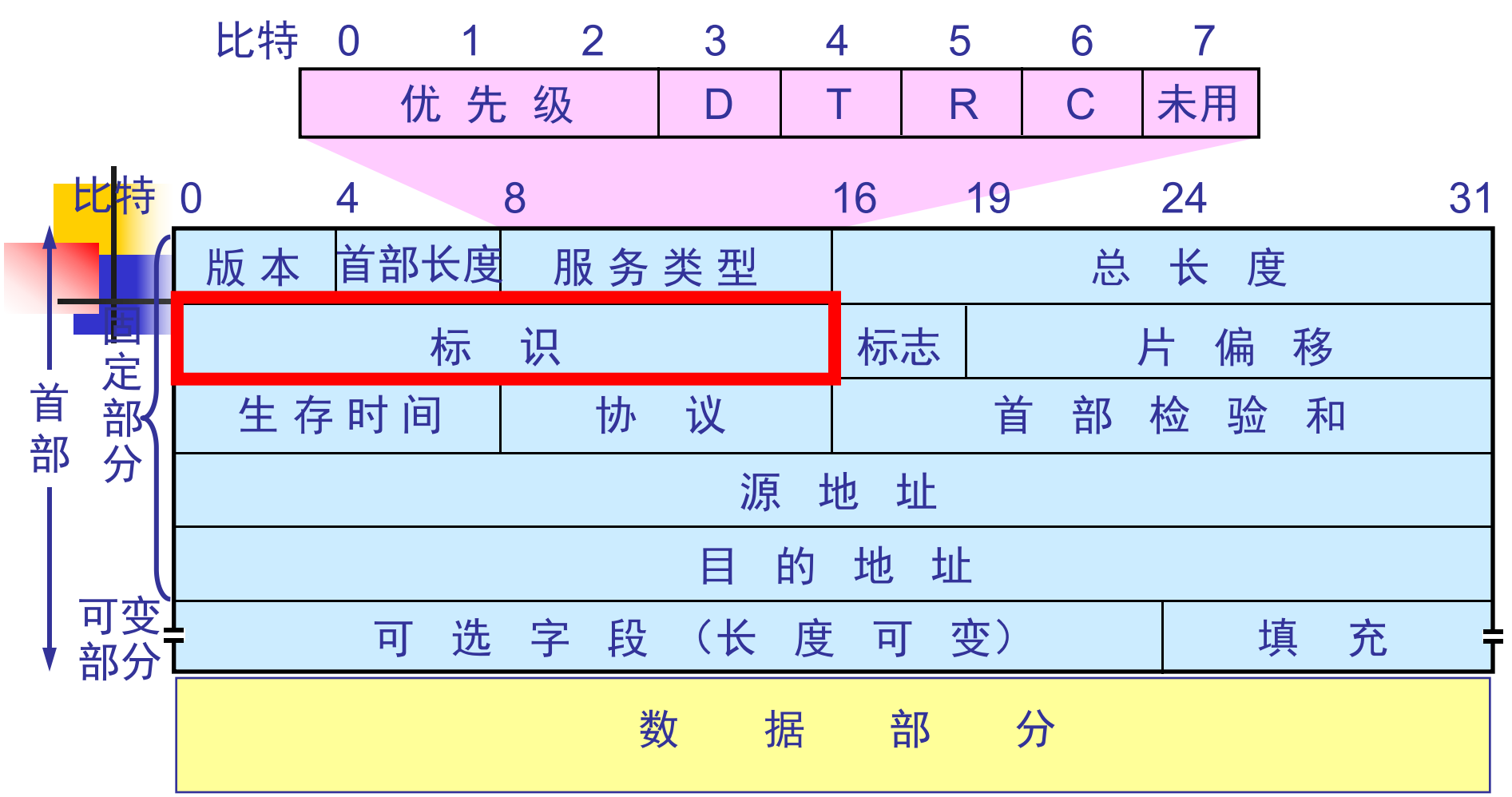
- 一个IP 分组由首部和数据两部分组成，首部由固定部分和可变部分组成。
- 固定部分，长度固定，共20字节，每个IP分组必须具有。
- 可变部分：长度可变（0~40B），可选字段和填充字段组成。

- IP版本：占 4 bit，指IP协议的版本
  - 目前的IP协议版本号为 4（即 IPv4）:0100

- IP首部长度：占 4 bit，可表示的最大数值是 15 个单位（一个单位为 4 字节）。
  - IP 的首部长度的最大值是60字节，其中固定长度20字节不变；
  - 可变部分长度：0~40字节；
  - IP首部长度范围：20~60字节；（0101-1111）

- 服务类型（ToS:Type of Service）
  - IP分组优先级别: 3 bit;8个优先级别，0最小，7最大.
  - D:低延迟（delay）;T:高吞吐量(throughput);R:高可靠性(reliability:被路由丢弃概率较小);C:选择代价更小路由.
  - ToS只是用户要求，对网络并不是强制，路由器进行路由选择等处理时仅仅作为参考。

- 总长度：占 16 bit，指首部+数据的长度（578-1500B），
  - 单位为字节，因此分组的最大长度为 65535 字节。
  - 总长度必须不超过最大传送单元 MTU。
  - 目前该长度足够，在将来高速网络中，数据帧MTU有可能大于65535字节；每个分片总长度仅仅指该分片首部+数据长度

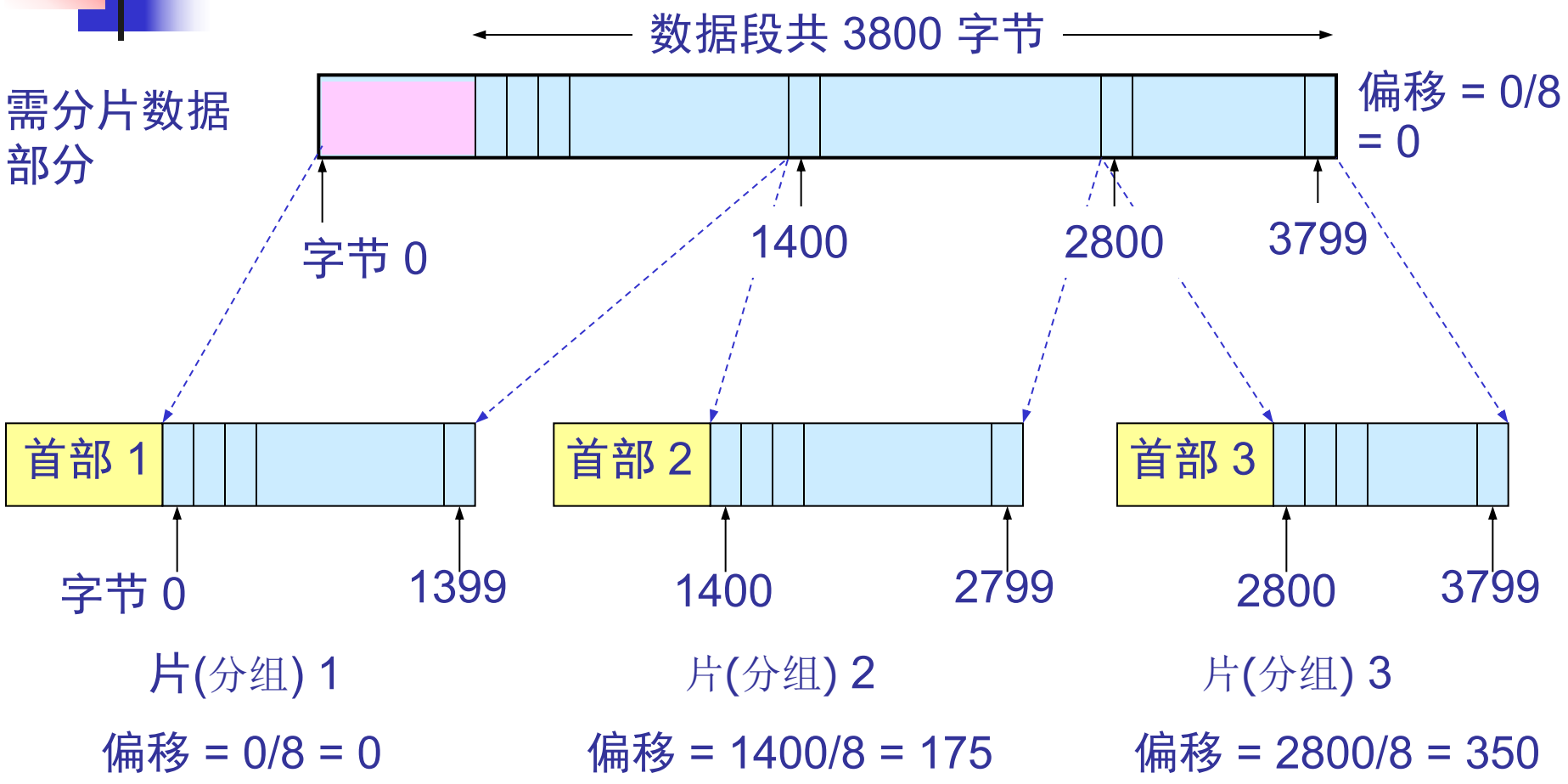


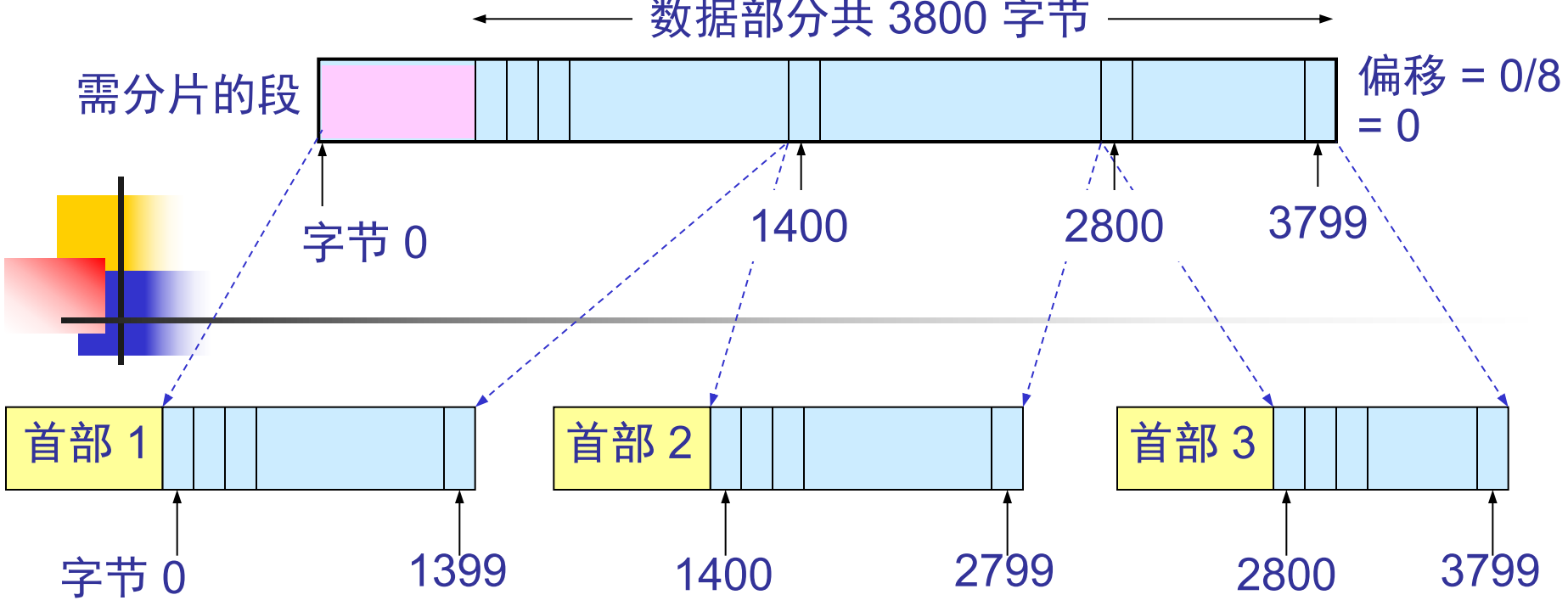
- 标识(identification)： 占 16 bit.
  - 源节点每产生一个新分组，计数器+1，作为该分组的标识，而不是序号，IP提供无连接通信，不存在按序接收.
  - 注意:一个分组不同分片具有相同标识.
  - 与分片与组装有关的字段：标识+标志+片偏移

- 标志(Flag)： 占 3 bit，目前只使用两个bit：0+DF+MF.
  - DF(Don't Fragment)， DF=1表示”不允许分片”，DF=0表示”允许分片”.
  - MF(More Fragment)，MF=1表示：这是一个分片后面有分片；MF=0表示：如果分片这最后一个分片；或者这是一个分组（没有分片）。

- 片偏移：12 bit
  - 针对较大上层协议数据单元，主要指数据部分在分片后，某一个分片(也是一个分组)的数据部分第一个字节在原始数据中的绝对位置。
  - 片偏移以8个字节为偏移单位。

分片举例


数据段共 3800 字节
需分片数据部分
偏移 = 0/8 = 0
字节 0
1400
2800
3799
首部 1
首部 2
首部 3
字节 0
1399
1400
2799
2800
3799
片(分组) 1
偏移 = 0/8 = 0
片(分组) 2
偏移 = 1400/8 = 175
片(分组) 3
偏移 = 2800/8 = 350



片(分组) 1

偏移 = 0/8 = 0

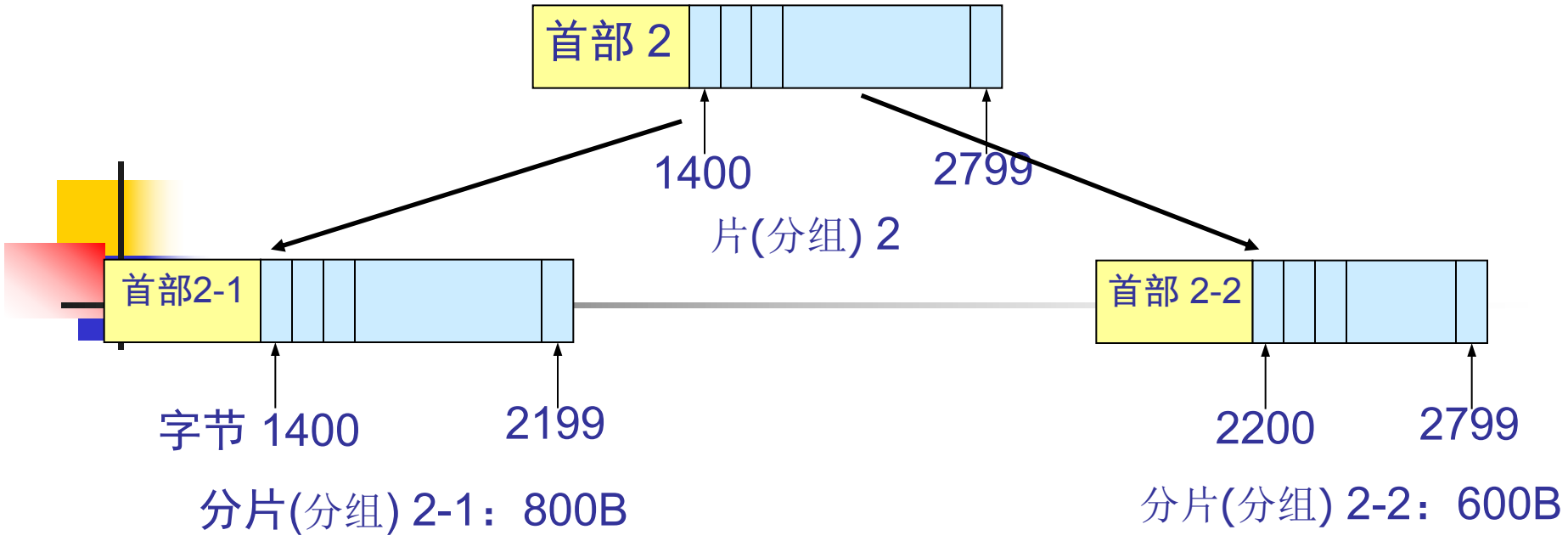
片(分组) 2

偏移 = 1400/8 = 175

片(分组) 3

偏移 = 2800/8 = 350

	总长度	标识	MF	DF	片偏移
原始段	3820	12345	0	0	0
分片1	1420	12345	1	0	0
分片2	1420	12345	1	0	175
分片3	1020	12345	0	0	350

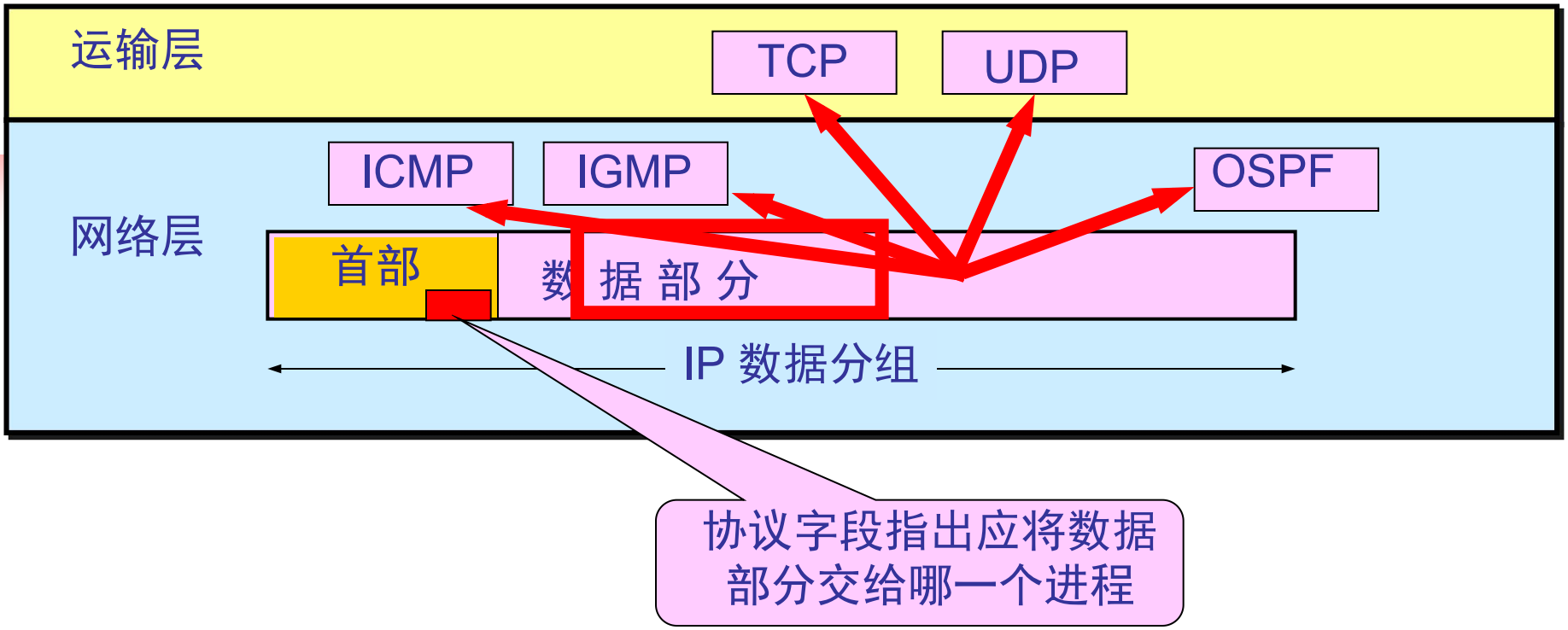


偏移 = 1400/8 = 175　　偏移 = 2200/8 = 275

	总长度	标识	MF	DF	片偏移
原始段	3800	12345	0	0	0
分组1	1420	12345	1	0	0
分组2-1	820	12345	1	0	175
分组2-2	620	12345	1	0	275
分组3	1020	12345	0	0	350

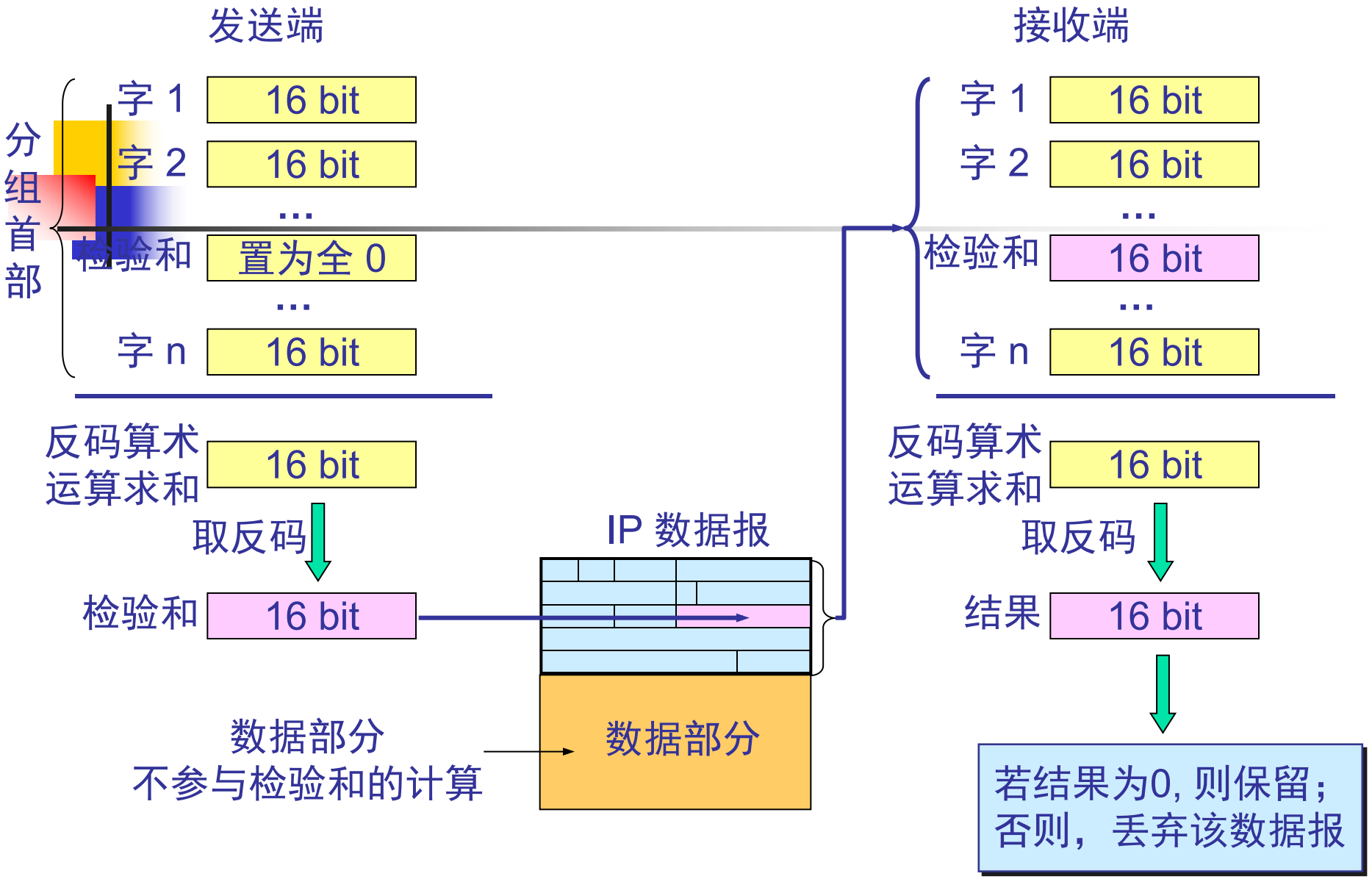
- 生存时间(TTL :Time To Live):8 bit
  - 目的：记录IP分组网络中转发时间长度（或者转发次数）。
  - 发送源一般TTL设置为64，最大255，每经过一个路由器，在转发前TTL减1，为0丢弃，同时向源端发送一个ICMP超时信息。
  - 情况：网络存在路由环路，或找不到确切路由，一直使用默认路由。

- 协议字段：8 bit
  - 指出此分组携带的数据来自何种上层协议，以便目的主机在IP层将数据部分上交给上层相应协议进程处理.
  - 协议号由国际组织IANA负责分配。



TCP	6	EGP	8
UDP	17	IGP	9
ICMP	1	OSPF	89
IGMP	2	IPV6	41

- 首部校验和字段： 16 bit
  - 只校验IP分组首部，不包括数据部分，减少IP层处理分组时间，数据差错控制由端系统传输层完成。
  - 不采用CRC检验码，而采用简单的计算方法，减少路由器计算负荷。
  - 当分组从一个路由器转发给另一个路由器需前要重新计算首部校验和（至少TTL、片偏移，总长度等字段发生变化）；


发送端
接收端
分组首部
字 1
16 bit
字 2
16 bit
...
检验和
置为全 0
...
字 n
16 bit
反码算术运算求和
16 bit
取反码
检验和
16 bit
IP 数据报
数据部分
数据部分
不参与检验和的计算
检验和
16 bit
反码算术运算求和
16 bit
取反码
结果
16 bit
若结果为0, 则保留；
否则， 丢弃该数据报

- 源IP地址和目的IP地址：各占 4 字节；
- 在转发路径上，这两个字段的值一直保持不变（除了NAT技术外）。

- 选项字段:0个字节到40个字节不等;用于控制、测量和安全。
  - 提供选项服务：源路由选项、记录路由选项、时间戳选项服务等;
  - 可变部分增加IP协议功能的同时，也使得首部长度成为可变,增加了每一个路由器处理分组开销，实际上这些选项现在很少被使用。

- 填充字段：
  - 可变长度，保证IP分组首部以32比特位边界对齐。

本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 分组的分片与组装
  - 1.3 分组转发(路由选择)
  - 1.4 选项
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

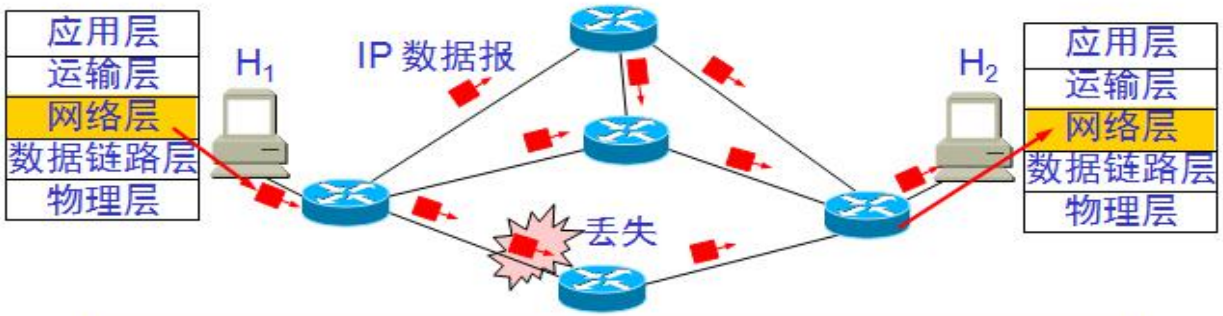
1.2 分组的分片与组装

- 物理网络中，数据链路层帧的数据字段都有不同的最大长度限制，称为最大数据传送单元MTU(Maximum Transfer Unit)

物理网络	MTU(字节)
Ethernet	1500
Token Ring(4Mb/s)	4464
Token Ring(16Mb/s)	17914
FDDI	4352
x.25	576
PPP	296
Hyperchannel	65535

1.2 分组的分片与组装

- IP分组应以适当大小在物理网络上传输，IP协议首先要根据物理网络所允许MTU对上层协议提交的协议数据单元长度检查，必要时通过分片，分成若干个分组发送。
- 特别强调：分片对象对上层协议数据单元；分组分片对象为该分组数据部分（不包括IP首部）；
- 分片操作一般为发送终端或路由器完成，组装由接收终端完成；
- 每个分片独立发送，独立路由，可能在接收方出现乱序；



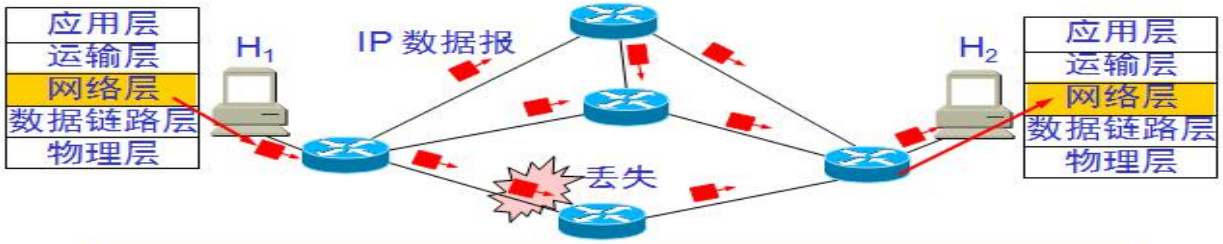
H_1 发送给 H_2 的分组可能沿着不同路径传送

1.2 分组的分片与组装

- 分片与组装有关字段：
  - 标识(ID)：每个分片具有唯一标识。
  - 标志(Flag)：如果是无分片的IP数据分组，　MF=0;如果是有分片的IP数据分组,除了最后一个分片IP数据分组MF=0外，MF=1。
  - 分段偏移：每一个分片（分组）要表明数据部分第一个字节在原始数据中的位置，用8字节倍数来表示。
  - 总长度：数据部分长度发生了变化。

1.2 分组的分片与组装

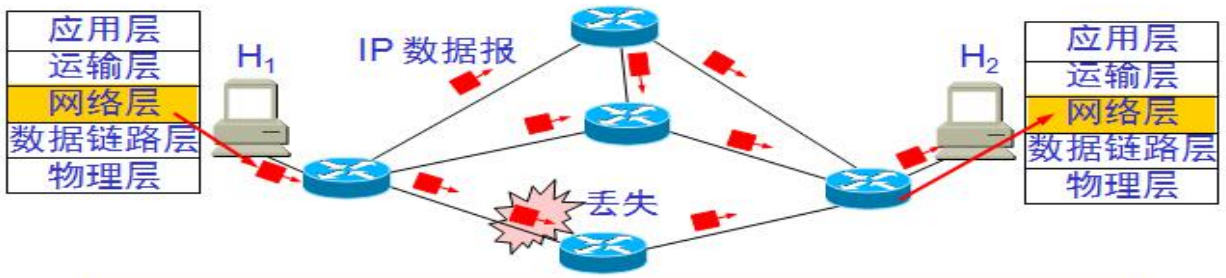
- 分片组装条件
  - 分片重新组装时，每个IP分片具有相同标识，按照片偏移字段排序。
  - 具有相同的上层协议号、源IP地址和目的IP地址。
  - 在一定的时间内要全部到齐，任何分片不能有丢失或者差错。
- 问题：
  - 如果个别分片（分组）首部有差错、有丢失、或者没有在规定时间到达接收端，发生什么事情？
  - 会造成分片组装失败，在传输层表现为一个数据段（用户数据报）丢失，这时由传输层TCP重发相应的数据段（UDP协议则采用鸵鸟策略）。



H1 发送给 H2 的分组可能沿着不同路径传送

1.2 分组的分片与组装

- 分组组装
  - 接收端将具有相同标识符字段的分片，按分片偏移字段大小，将数据组装成一个完整的原始上层协议数据单元；
  - 最后将组装好的上层协议数据单元按上层协议号提交给上层协议实体。
  - 如果传输层（TCP协议）检测到数据段有错误，发送方传输层需要重发该数据段；
  - 重传数据段在网络层到新的IP分组；



H_1 发送给 H_2 的分组可能沿着不同路径传送

本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 数据段的分片与组装
  - 1.3 IP分组选项字段
  - 1.4 分组转发(路由选择)
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

1.3 IP分组选项字段

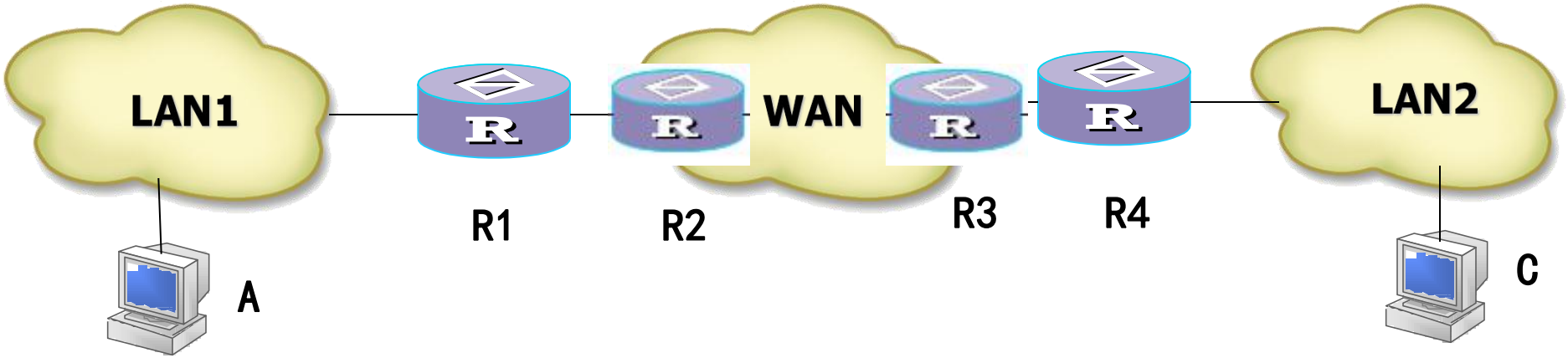

比特 0 1 2 3 4 5 6 7
优 先 级
D
T
R
C
未用
比特 0 4 8 16 19 24 31
首部
固定部分
可变部分
版 本
首部长度
服 务 类 型
总 长 度
标 识
标志
片 偏 移
生 存 时 间
协 议
首 部 检 验 和
源 地 址
目 的 地 址
可 选 字 段 （长 度 可 变）
填 充
数 据 部 分

1.3 IP分组选项字段

- IP首部头中选项字段组成：代码+长度+数据
- IPV4定义了5种选项服务
  - 限制源路由选项(strict route)
  - 自由源路由选项(loose route)
  - 记录路由选项(record route)
  - 时间戳选项(timestamp)
  - 安全选项(Security)

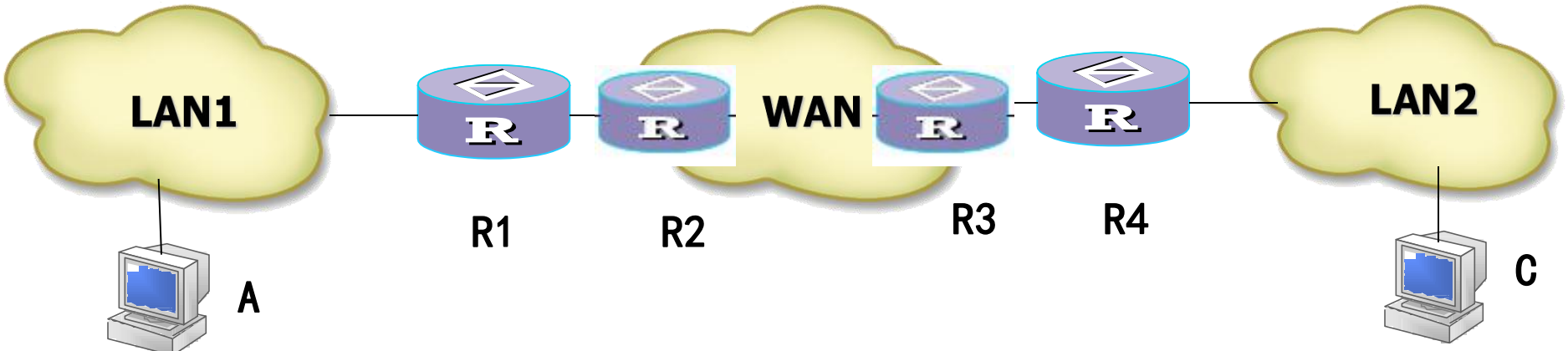
1.3 IP分组选项字段

- 源路由选项:指转发分组的路由信息是由源主机指定，而不是由IP协议通过路由表确定的;
- 源路由选项有两类:
  - 限制源路由：一条完整的路径信息。
  - 自由源路由：不完整的路径信息。
  - 目的：源路由选项可以用于测试某特定网络路径性能，或使分组尽可能绕开出错的网络路径等。



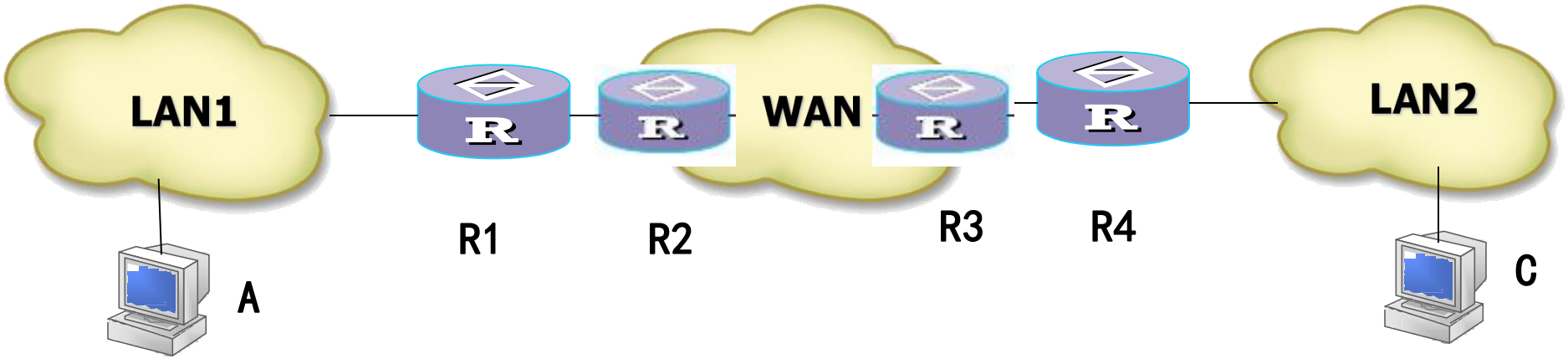
1.3 IP分组选项字段

- 记录路由选项:记录下分组从源到目的所经过路径上各个路由器IP地址。
  - 条件：源主机和目的主机双方都同意。
  - 具体内容：记录下分组从源主机到目的主机所经过路径上各个路由器的IP地址。
  - 特例：记录地址的区域大小是由源主机预先分配并初始化的，如果预先分配的区域不足以记录下全部路径，则IP协议将放弃记录余下地址。
  - 用途：利用该选项可得到源路由信息。（最多可记录10个IP地址）



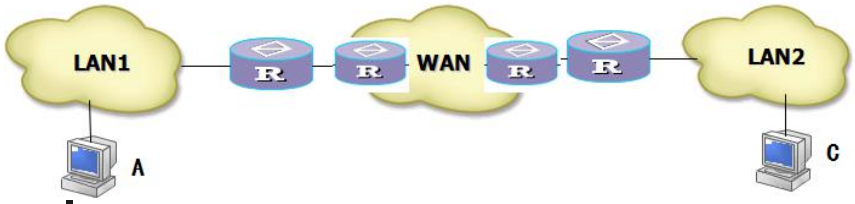
1.3 IP分组选项字段

- 时间戳选项:记录下分组从源到目的所经过各个路由器的时间。
  - 条件：源主机和目的主机双方都同意。
  - 具体内容：记录分组从源主机到目的主机经过路径上各个路由器的时间。
  - 使用：选择时间戳选项时，可以设置成时间戳选项和记录路由选项同时使用，或时间戳选项和源路由信息选项同时使用。
  - 作用：分析网络通信延迟、吞吐量、负载等情况。



本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 分组的分片与组装
  - 1.3 选项
  - 1.4 IP分组转发
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议



1.4 IP分组转发(路由选择)

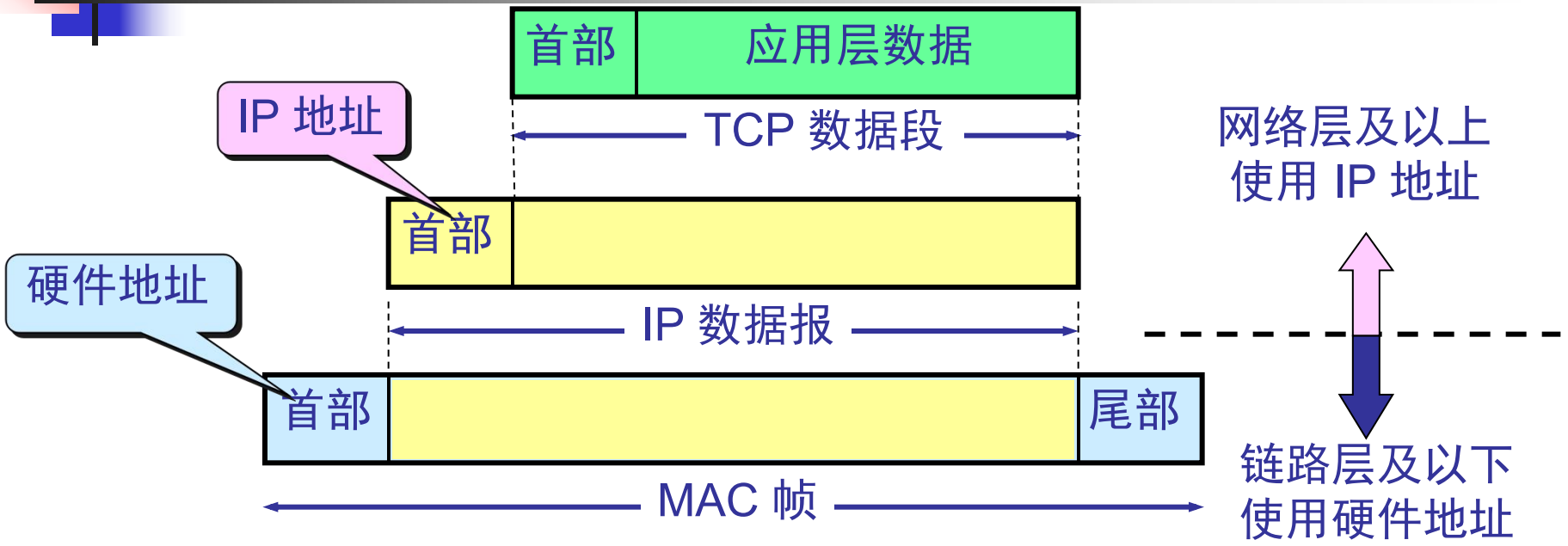
- IP分组转发
  - 当路由器接收到一个IP分组，TTL-1=0？判断；校验和检查，排队缓存。
  - 进行处理，如果发送端已指定了源路由信息，则按指定源路由转发。
  - 如果上层协议未指定源路由信息，IP协议则以IP分组中目的IP地址为与路由表中子网掩码，按照网络地址查找路由表。
  - 重新计算校验和；
  - 调用ARP协议，得到下一跳IP对应MAC地址，转发到转发接口，构建帧。

目的地址	子网掩码	下一跳	代价 (Metric)	优先 (Preference)
11.0.0.0	255.0.0.0	8.8.8.9	30	100(RIP)
11.168.0.0	255.255.0.0	12.8.8.9	10	40(OSPF)
11.168.1.0 11.168.2.0	255.255.255.0 255.255.255.0	13.8.8.9 Direct	40 20	20(静态) 0
0.0.0.0	0.0.0.0	14.8.8.9	200	(默认)

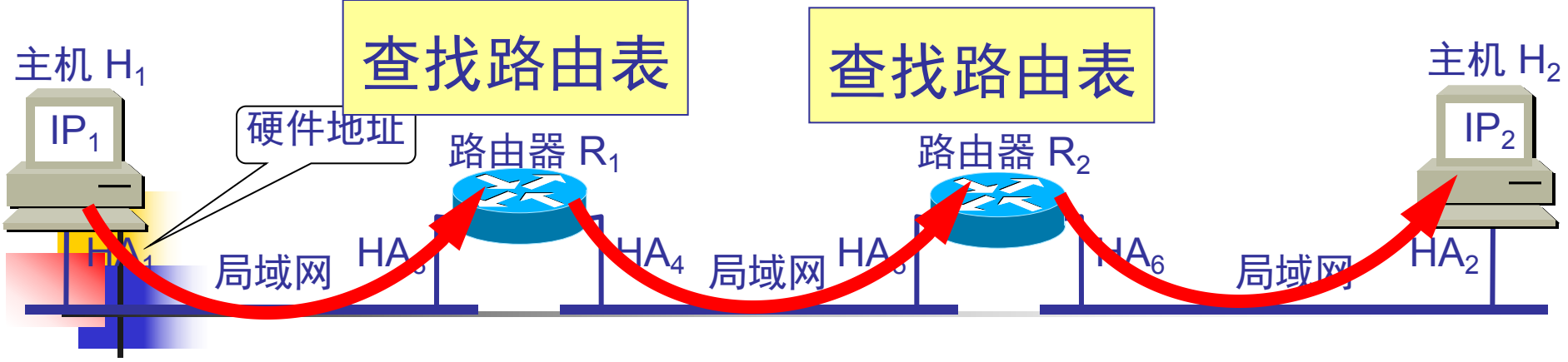
本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 数据段的分片与组装
  - 1.3 选项
  - 1.4 分组转发(路由选择)
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

（1）IP 地址与硬件地址



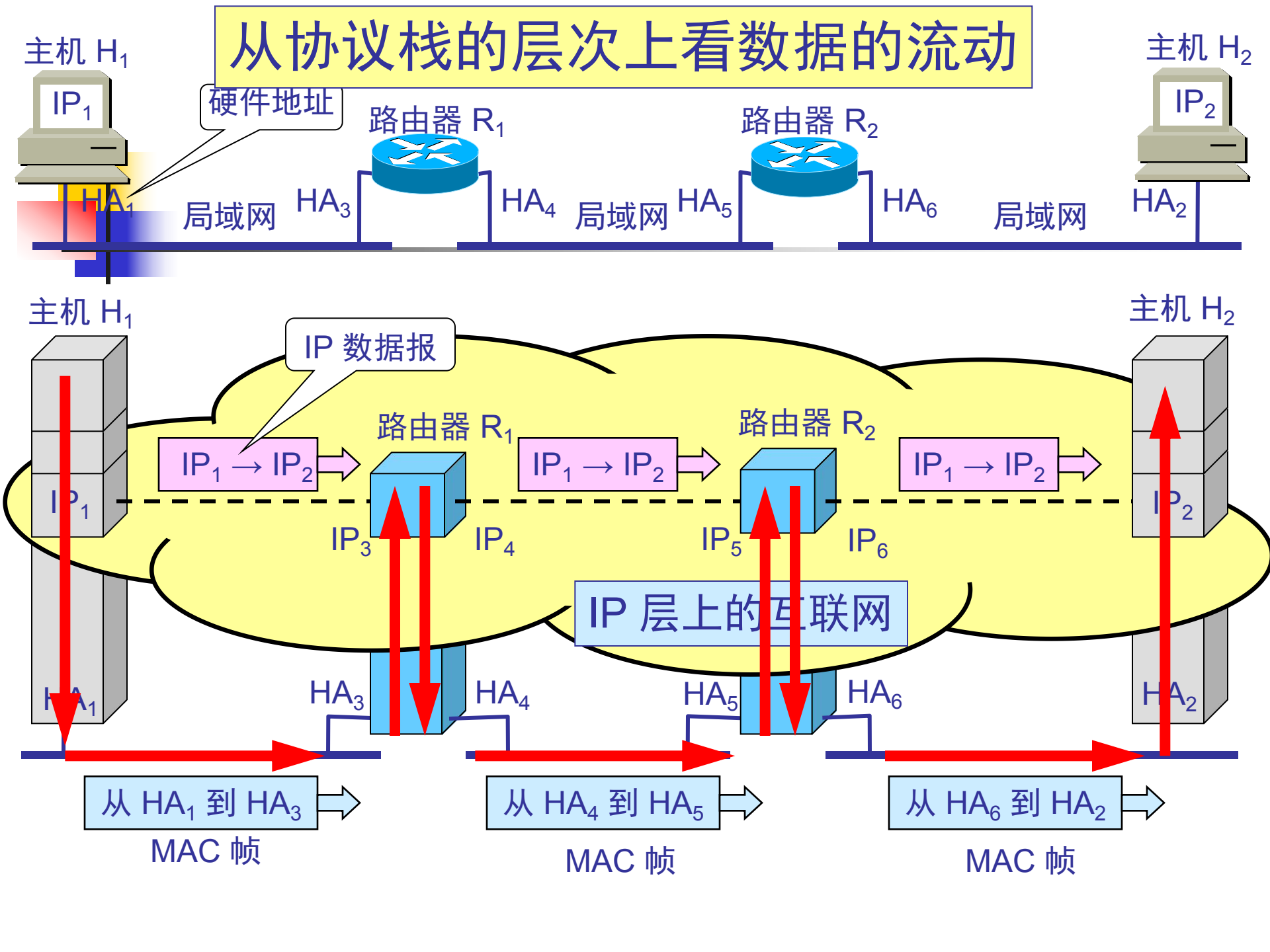
- IP地址（源、目的）在IP首部，网络层使用；
- MAC地址（源、目的）在数据帧首部，数据链路层使用；
- 当一个IP分组封装为数据帧时，在数据链路层看不到分组IP地址。

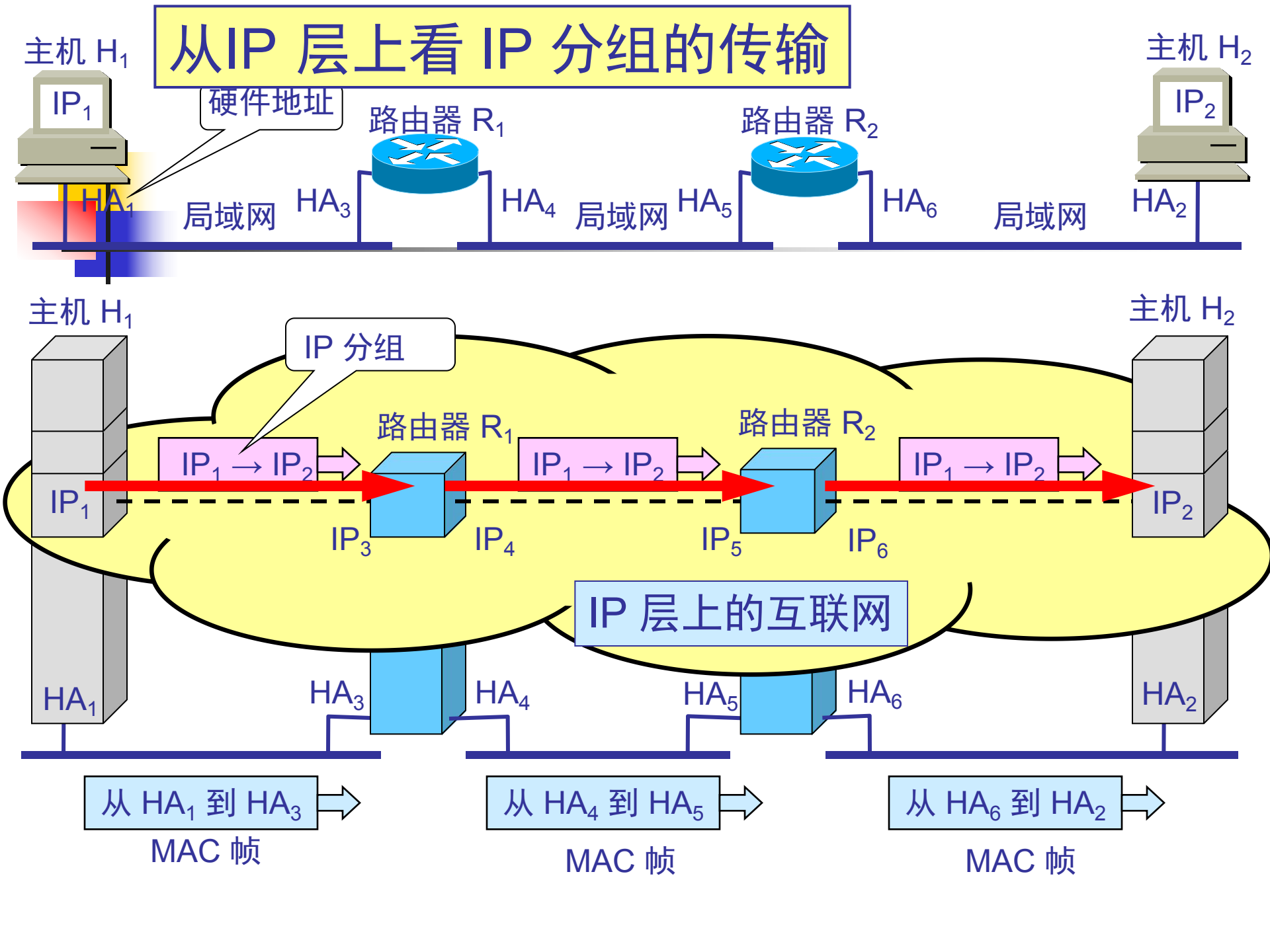


通信的路径

H_1→经过 R_1 转发→再经过 R_2 转发→H_2

从协议栈的层次上看数据的流动

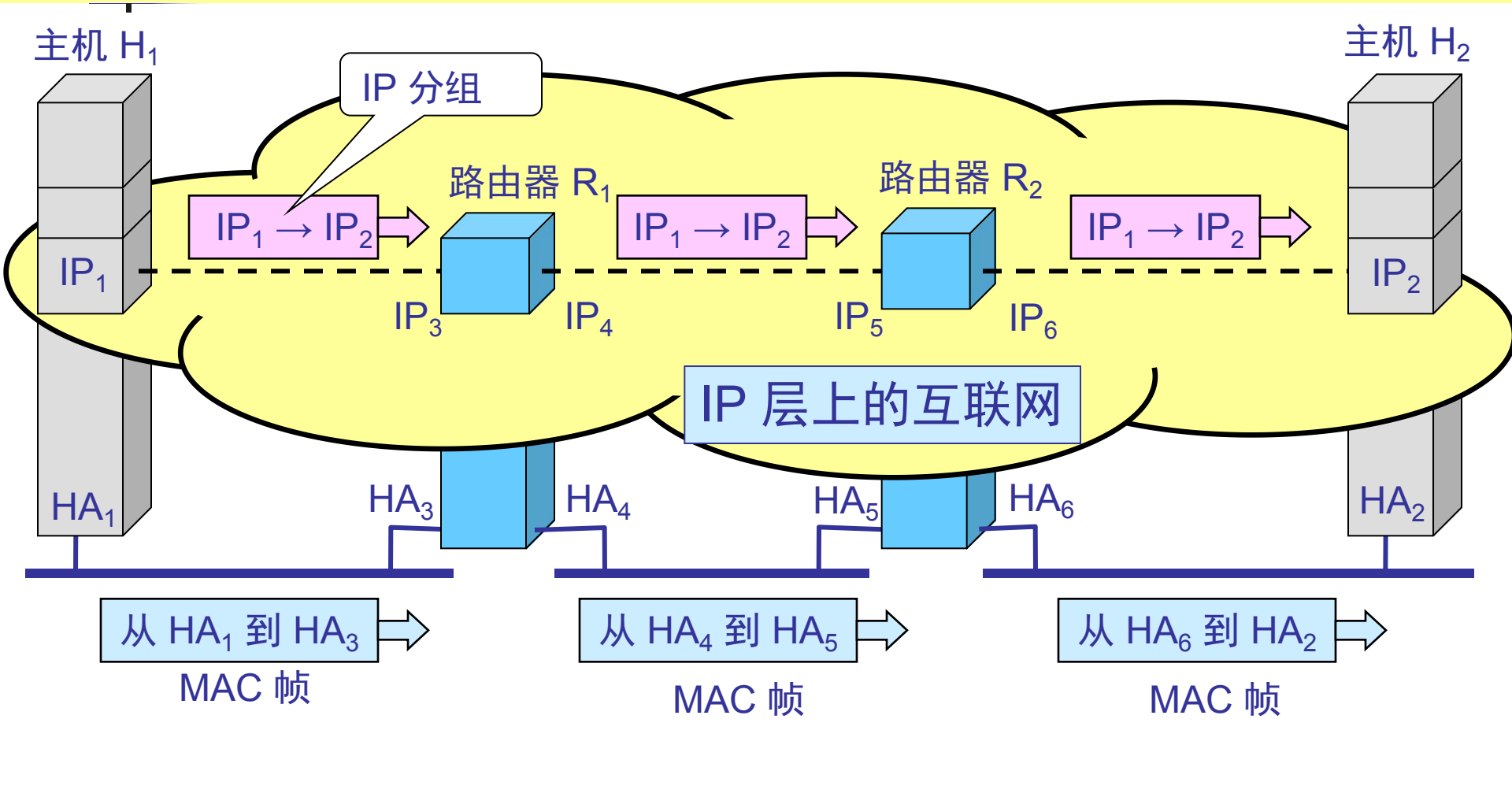



从IP 层上看 IP 分组的传输
主机 H1
IP1
硬件地址
HA1
局域网
路由器 R1
HA3
HA4
局域网
路由器 R2
HA5
HA6
局域网
主机 H2
IP2
HA2
主机 H1
IP 分组
IP1 → IP2
IP1
IP3
路由器 R1
IP4
IP1 → IP2
IP5
路由器 R2
IP6
IP1 → IP2
IP2
主机 H2
IP 层上的互联网
HA1
HA3
HA4
HA5
HA6
HA2
从 HA1 到 HA3
MAC 帧
从 HA4 到 HA5
MAC 帧
从 HA6 到 HA2
MAC 帧

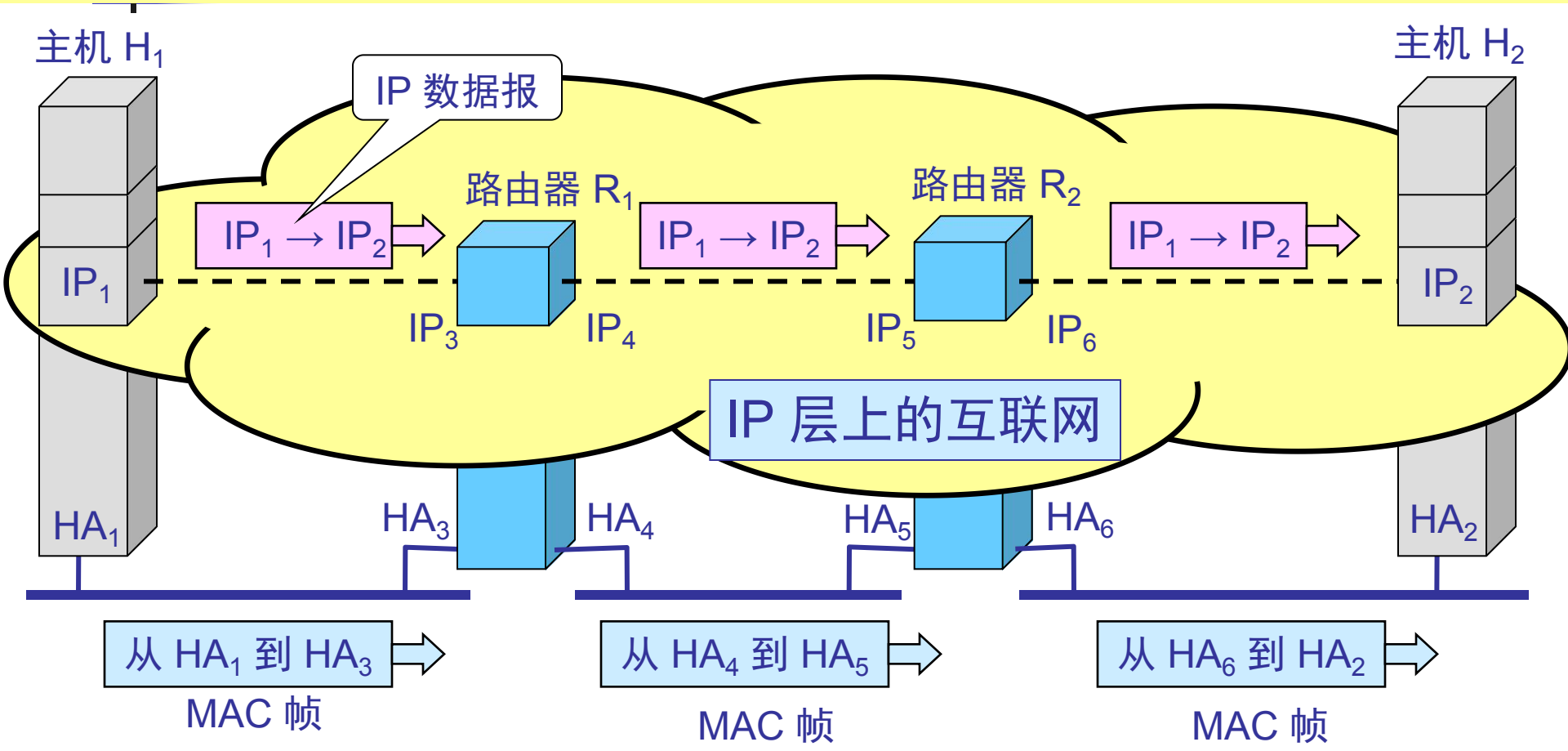
在 IP 层只能看到 IP 分组

图中的 $IP_1 \rightarrow IP_2$ 表示从源地址 IP_1 到目的地址 IP_2

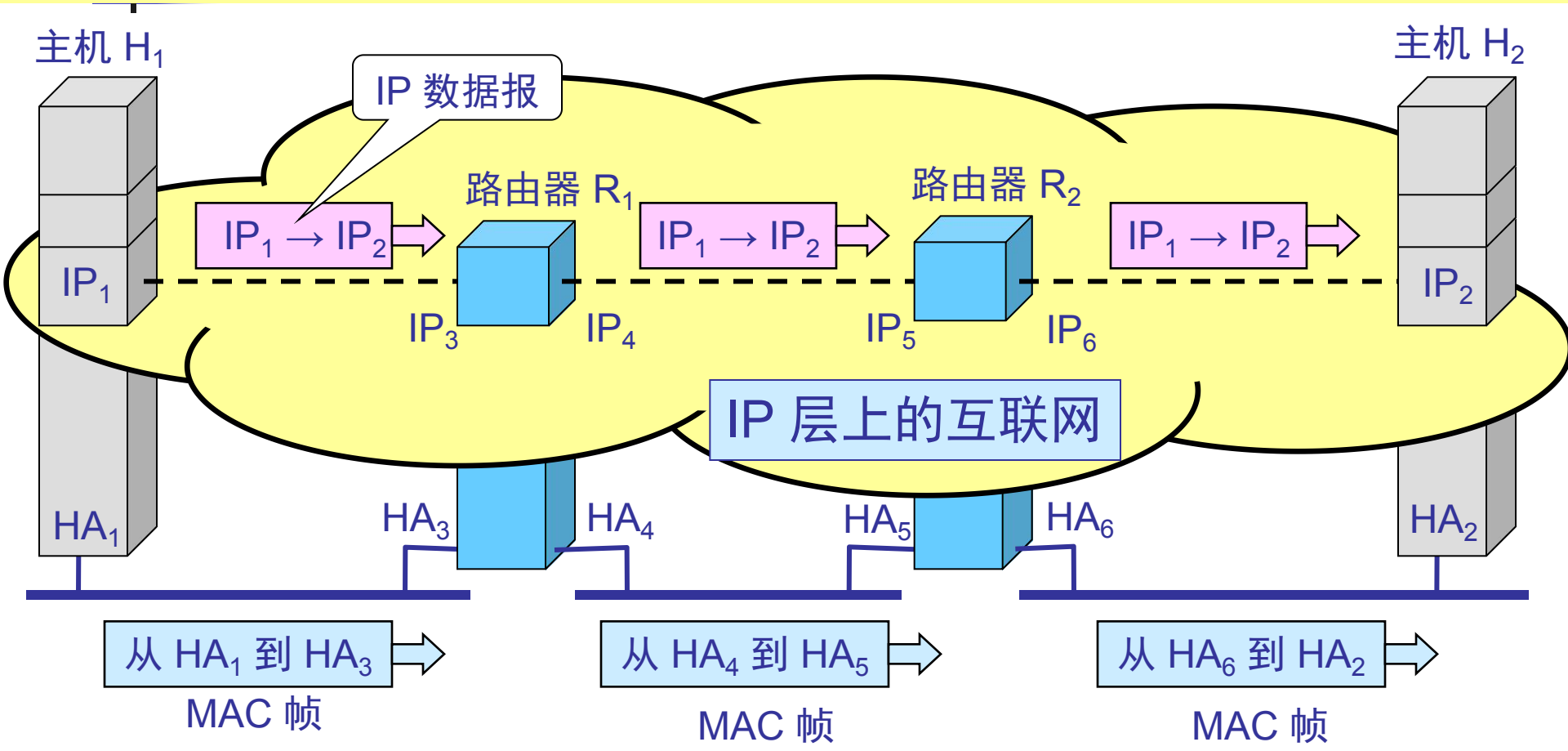
两个路由器的 IP 地址并不出现在 IP 分组的首部中



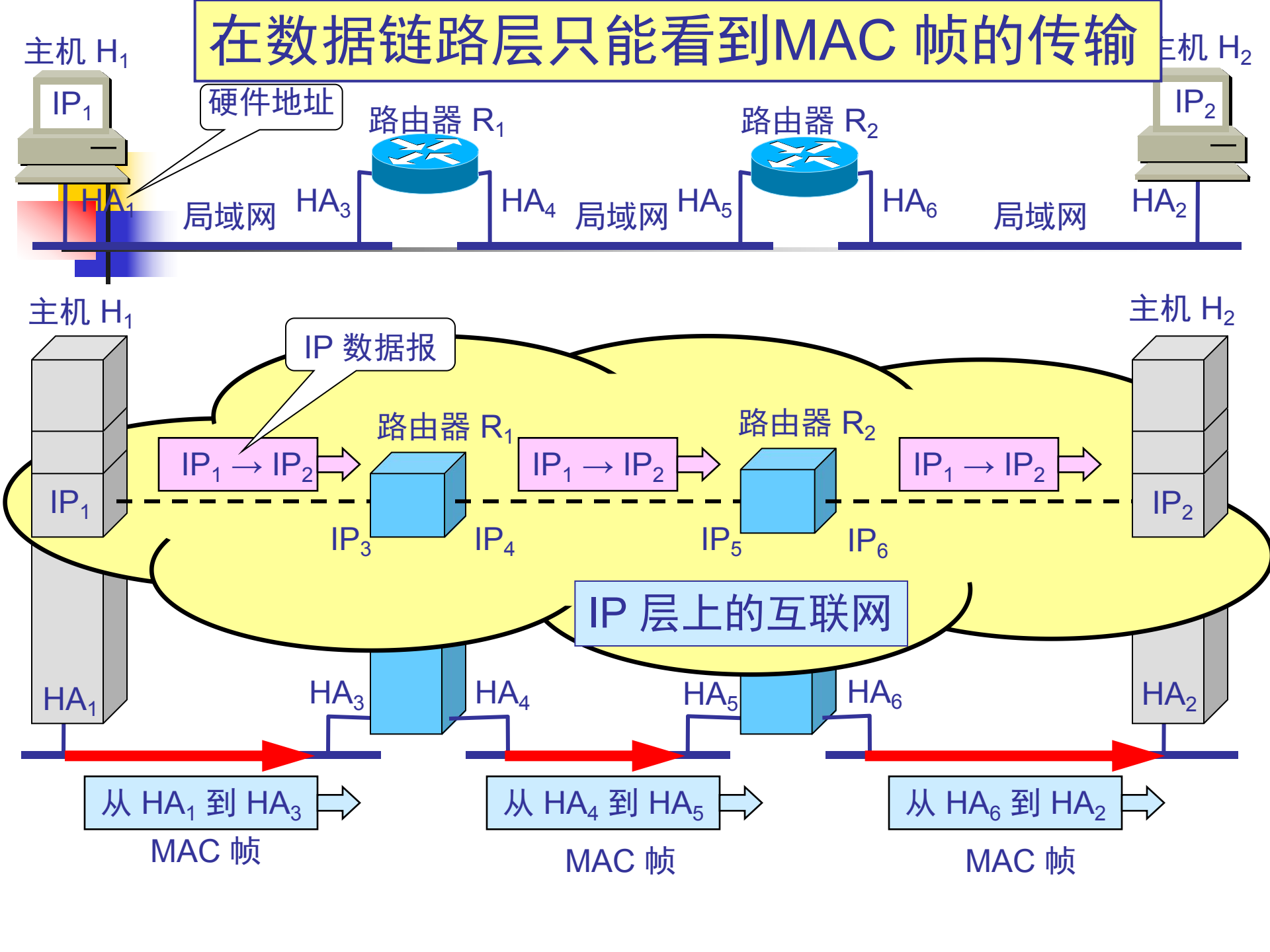
路由器只根据目的站的 IP 地址的网络号进行路由选择



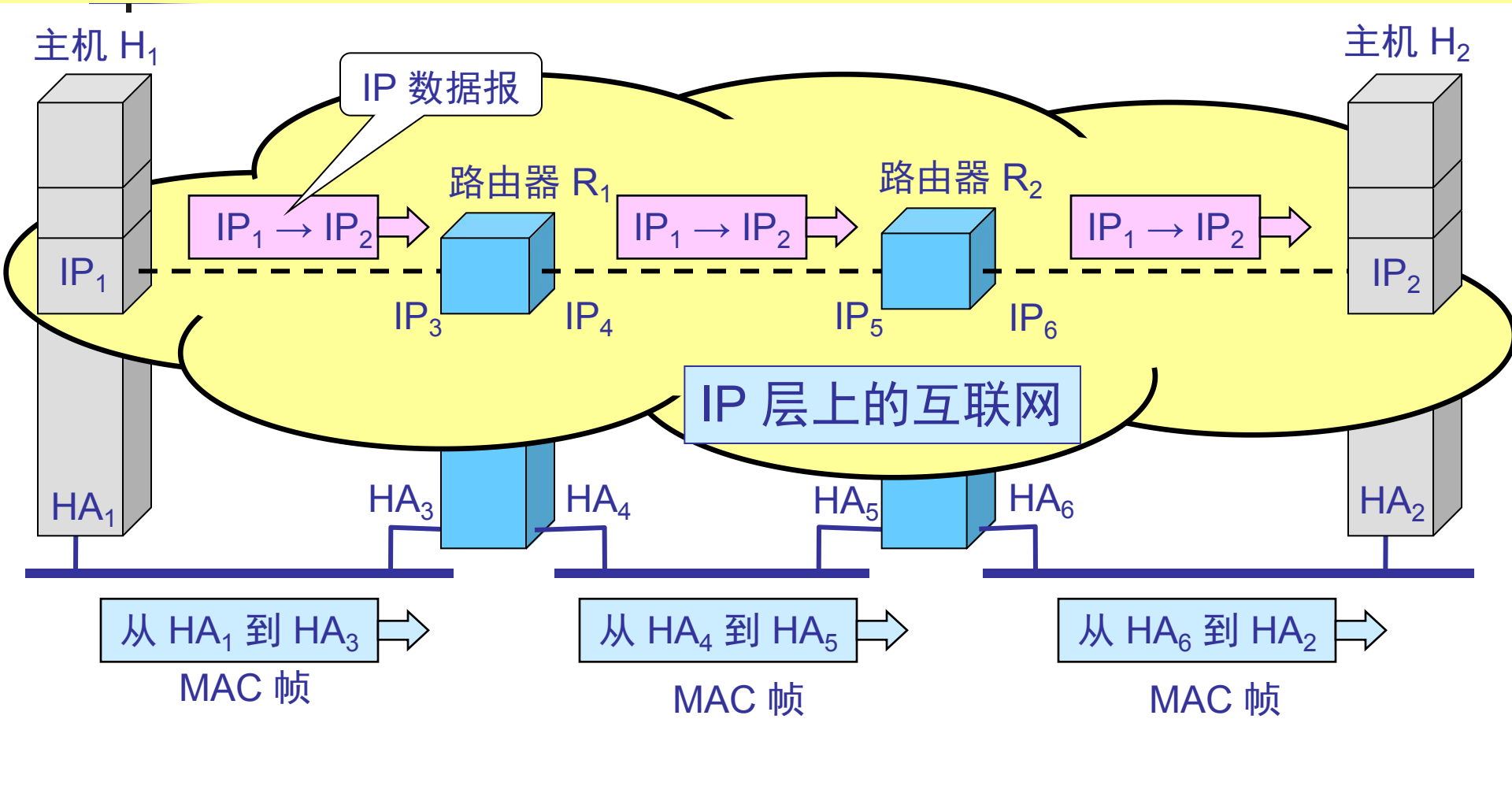
IP层使用统一的 IP 地址研究主机和主机、或主机和路由器，或者相邻路由器之间的通信

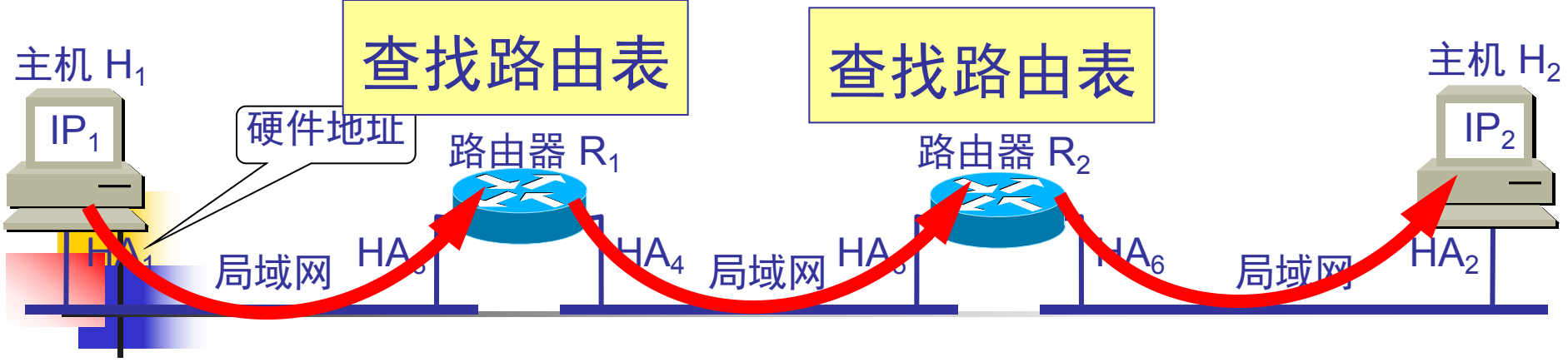


在数据链路层只能看到MAC 帧的传输



在具体物理网络数据链路层，只能看见 MAC 帧，看不见 IP 分组；MAC地址（源、目的）在不同物理网络上发生了变化；说明：（1）源发送数据帧时，需要封装MAC地址（源、目的）；（2） 路由器转发分组时链路层需要改变MAC地址（源、目的）。





通信的路径

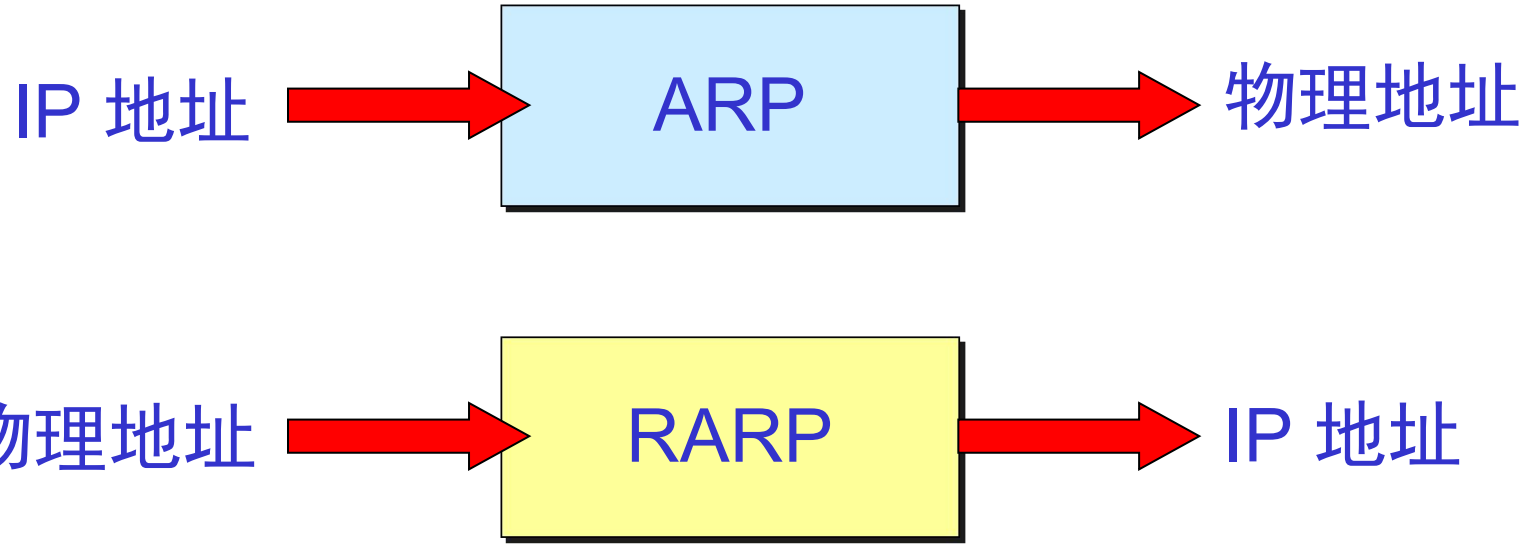
H_1→经过 R_1 转发→再经过 R_2 转发→H_2

有两个重要问题需要解决：

（1）通信过程中主机和路由器在数据链路层如何填写帧的MAC地址（包括源MAC地址和目的MAC地址）

（2）路由器中路由表是如何构建？

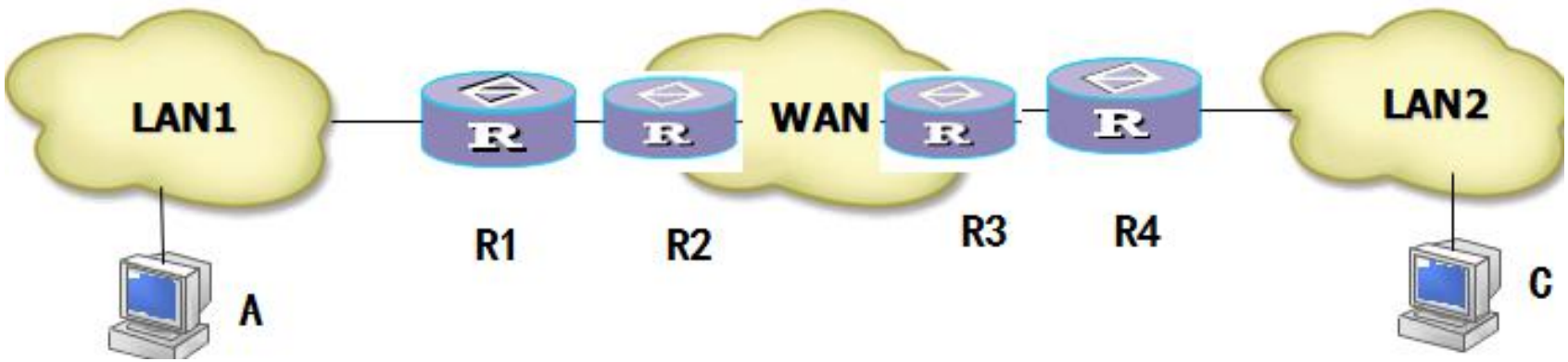
（2） 地址解析协议 ARP 和逆地址解析协议 RARP



- 逆地址解析协议 RARP在无盘工作站时代曾起到很重要作用；现在DHCP协议已经包含了RARP协议功能，本节不再单独讲解。

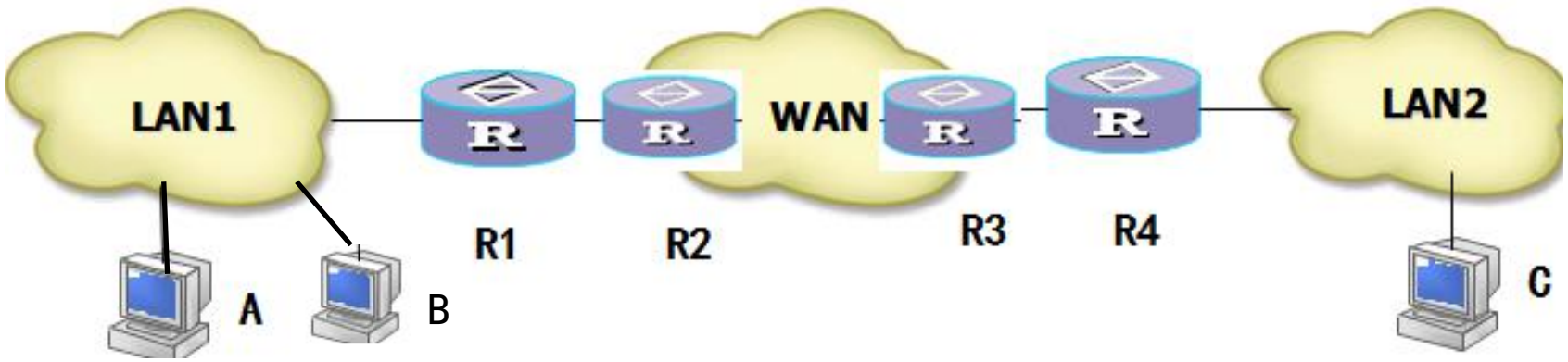
（2）地址解析协议 ARP

- 不管网络层使用什么协议，在数据链路上传送数据帧时，最终还是必须填写MAC地址（特别是目的MAC地址）。
  - 每一个主机都设有一个 ARP 高速缓存(ARP cache)，保存有所在的局域网上的各主机和路由器的 IP 地址到硬件地址的映射，每一条记录都有生存期。
  - 每个路由器也有一个 ARP 高速缓存，保存所知道的所有IP地址到MAC地址映射，每一条记录都有生存期。



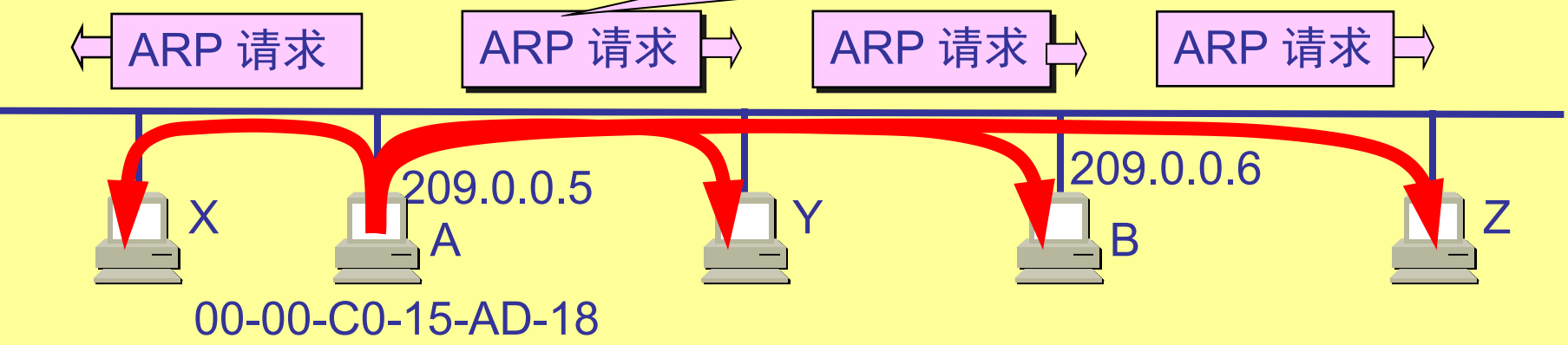
（2）地址解析协议 ARP

- 第一种情况：当主机 A 欲向本局域网上的某个主机 B 发送 IP 分组时，就先在其 ARP 高速缓存中查看有无主机 B 的 IP 地址到MAC地址映射；
  - 如有，就可查出B的MAC地址，再将此硬件地址写入 发送的MAC 帧中，然后通过局域网将该 MAC 帧发往B。
  - 否则，启动ARP协议，获得B的IP对应MAC地址，然后同上；



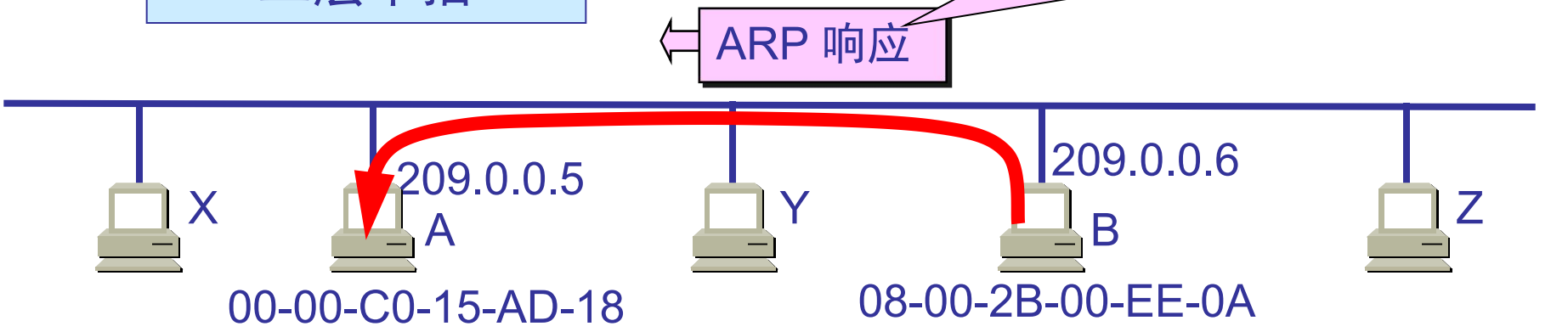
主机 A 二层广播发送
ARP 请求分组

我是 209.0.0.5，硬件地址是 00-00-C0-15-AD-18
我想知道主机 209.0.0.6 的硬件地址



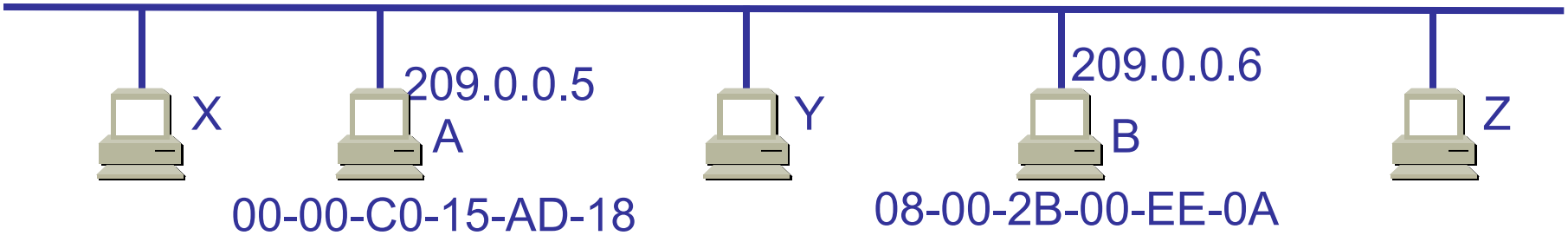
主机 B 向 A 发送
ARP 响应分组
二层单播

我是 209.0.0.6
硬件地址是 08-00-2B-00-EE-0A



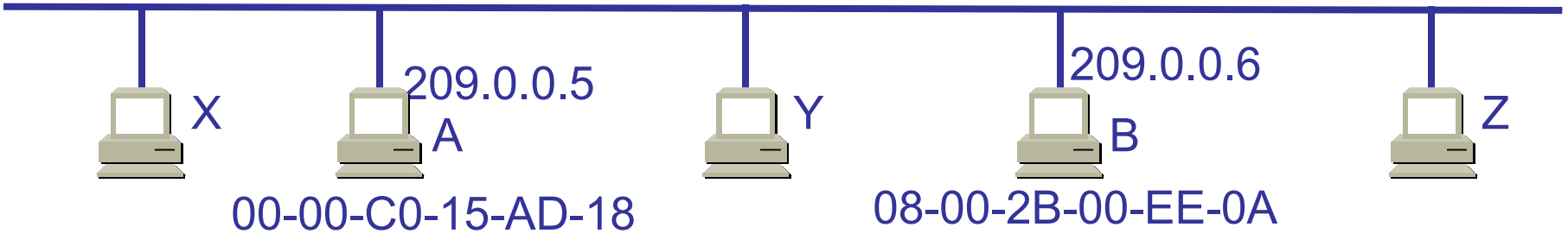
如何提高ARP协议效率

- ARP高速缓存作用（端系统和交换设备均有）
  - （1）为了减少网络上的通信量，主机 A 在发送其 ARP 请求报文时（二层广播帧），就将自己的 IP 地址到硬件地址的映射写入 ARP 请求报文。
  - 当主机 B （X,Y,Z）收到 A 的 ARP 请求报文时，就将主机 A 的这一地址映射写入主机 B 的 ARP 高速缓存中（具有生存期），主机 B 以后向 A 发送报文时就更方便了；防止接收方为解析源主机物理地址而发送ARP请求。
  - 命令：arp –a 查看主机ARP缓存内容.



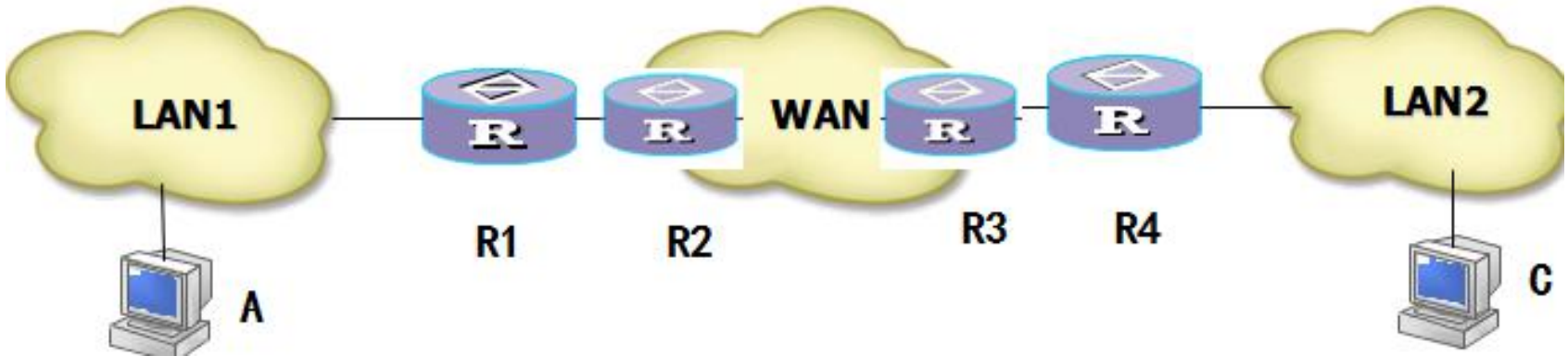
如何提高ARP协议效率

- 如何提高ARP协议效率
  - 源主机广播ARP请求(源IP地址+MAC地址)网络上所有主机要缓存该映射关系（具有一定生命期）。
  - 新主机加入网络时,最好主动广播自己地址映射关系,以避免其他主机对它MAC地址进行解析。（安全问题？）

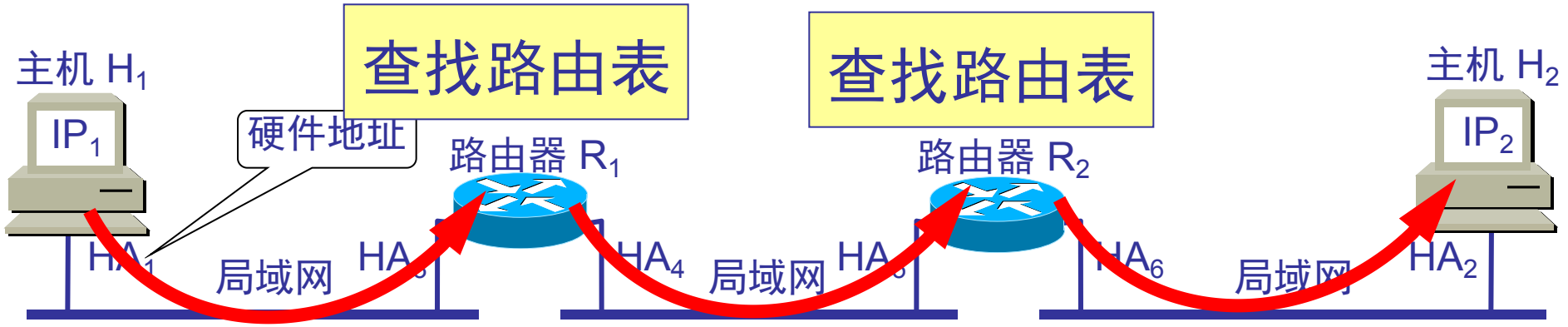


（2）地址解析协议ARP

- 目的节点和源节点在同一个网段
  - 源主机向本网段中广播一个ARP请求报文，报文中包含有“目的主机”的IP地址。
  - 本网段所有的主机都能接收到ARP请求报文，只有IP地址与ARP请求报文中目的IP地址相符合的主机才发送一个ARP响应报文，告知源节点自己的物理地址。
- 如果源节点和目的节点不在同一个网段，如何处理？



举例2：源和目的节点在不同网段

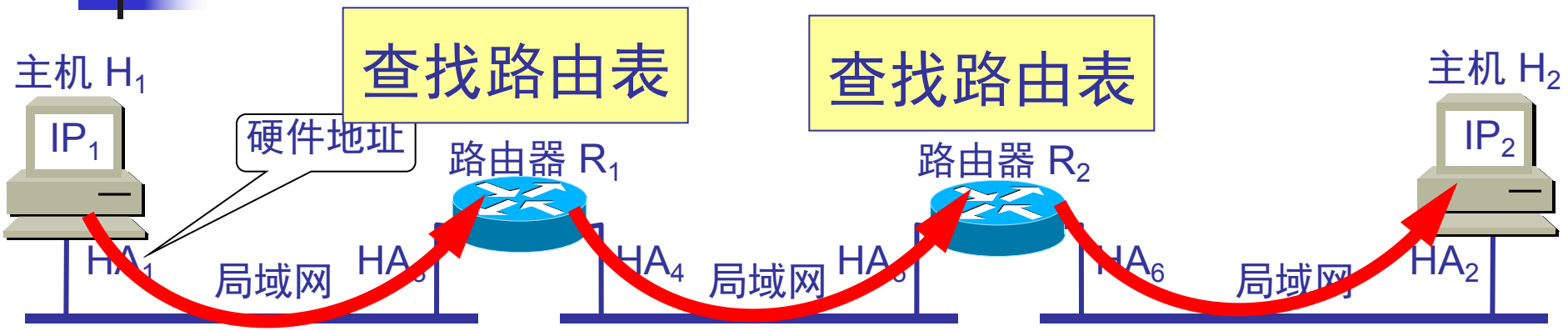


ARP请求 源到目的	MAC1	1…1		MAC4	1…1		MAC6	1…1	二层 广播帧
ARP应答 源到目的	MAC3	MAC1		MAC5	MAC4		MAC2	MAC6	二层 单播帧
数据分组 源到目的	IP1	IP2		IP1	IP2		IP1	IP2	
	MAC1	MAC3		MAC4	MAC5		MAC6	MAC2	

源：H1与H2不在一个网段，采用ARP；

路由器：H2与路由表提供的IP地址不在一个网段，采用ARP

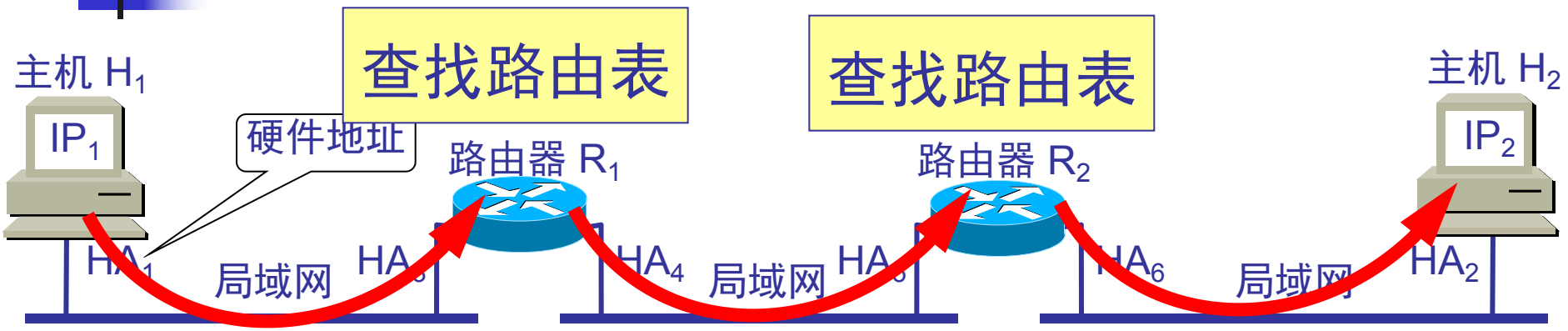
使用ARP的四种典型情况



（1）发送方是主机，要把IP分组发送到本网络上的另一个主机。这时用 ARP 找到目的主机的硬件地址。

（2）发送方是主机，要把 IP 分组发送到另一个网络上的一个主机。这时用 ARP 找到本网络上的一个网关（路由器）的硬件地址。剩下的工作由这个路由器来完成。

使用 ARP 的四种典型情况



（3）发送方是路由器，要把 IP 分组转发到另一个网络上的一个主机。这时用 ARP 找到本网络上下一个路由器的硬件地址。剩下的工作由这个路由器来完成。

（4）发送方是路由器，要把 IP 分组转发到本网络（目的网络）上的一个主机。这时用 ARP 找到目的主机的硬件地址。

ARP/RARP报文格式 – 语法

- 物理网络类型字段：2个字节，表示发送方主机的物理网络类型;如 “1”代表以太网。
- 协议类型字段:2个字节，表示发送方使用ARP获取物理地址的高层协议类型;如 “0x0800”代表IP协议。
- 物理地址长度字段:1个字节，用于规定物理地址字段的长度;通常物理地址6个字节。
- IP地址长度字段:1个字节，用于规定IP地址字段的长度;通常IP地址字段占4个字节(IP v4版本)。

ARP/RARP报文格式

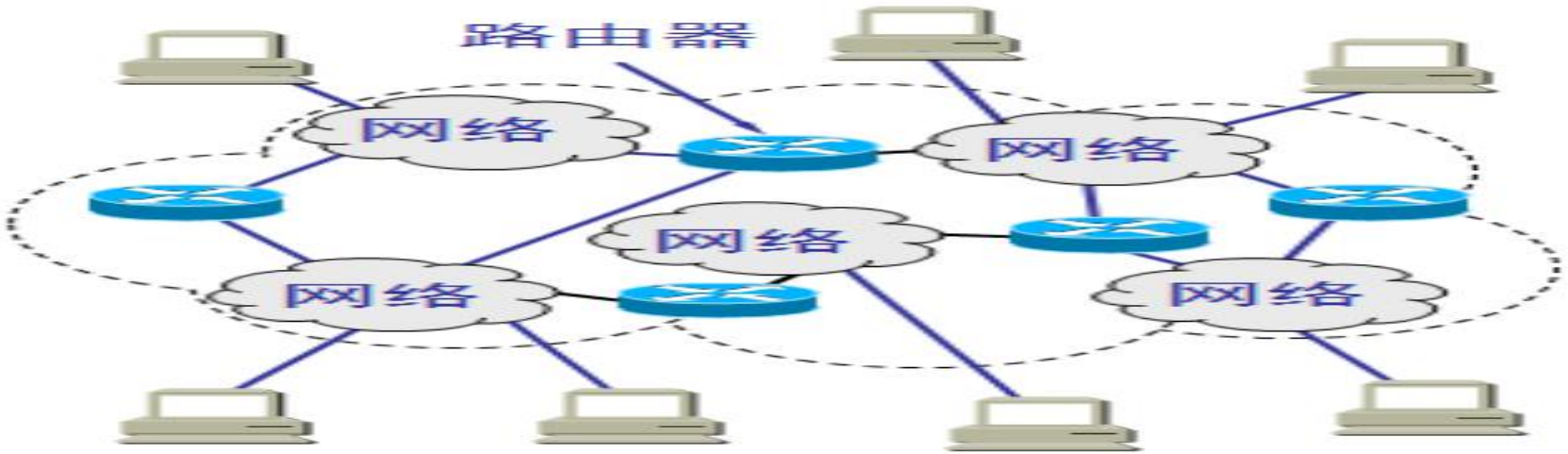
- 操作字段为2个字节，表示报文类型；其中：
  - 1 ：ARP请求报文；
  - 2 ：ARP响应报文；
  - 3 ：RARP请求报文；
  - 4 ：RARP响应报文。

ARP/RARP报文格式

- 发送方物理地址字段:6个字节，用于存放发送方的物理地址。
- 发送方IP地址字段:4个字节，用于存放发送方的IP地址。
- 目的方物理地址字段:6个字节，用于存放目的方的物理地址,对于ARP请求报文，该字段为空。
- 目的方IP地址字段:4 个字节，用于存放目的方的IP地址。

为什么我们不直接使用MAC地址进行通信？

- 目前存在着各式各样的物理网络，它们使用不同的MAC地址（硬件地址）；
- 要使这些异构物理网络利用MAC地址直接通信，必须进行非常复杂的MAC地址转换工作，这几乎是不可能的事。
- 连接到因特网的主机或三层交换设备拥有统一IP协议，在网络层采用同一的 IP 地址，可实现不同网络在IP层互联互通；
- 不同网络中数据链路层MAC地址，可通过ARP协议自动获取IP地址对应的MAC地址，对用户来说是透明的。



ARP协议要点

- 发送方在发送ARP请求报文时（二层广播），要除目的方物理地址字段外的其它字段均填写。
- 目的通过发送ARP响应报文(二层单播)报告自己物理地址。
- 发送与接收方在同一网段中，发送方的ARP请求报文可直接广播发送给本网段中目的主机，并直接获得目的IP地址对应的MAC地址。
- 如果不在同一网段，发送方实际上是想获取“下一跳”接口的物理地址。
- 从IP地址到硬件地址的解析是自动进行的，主机的用户对这种地址解析过程并不知道，即是透明的。

RARP协议

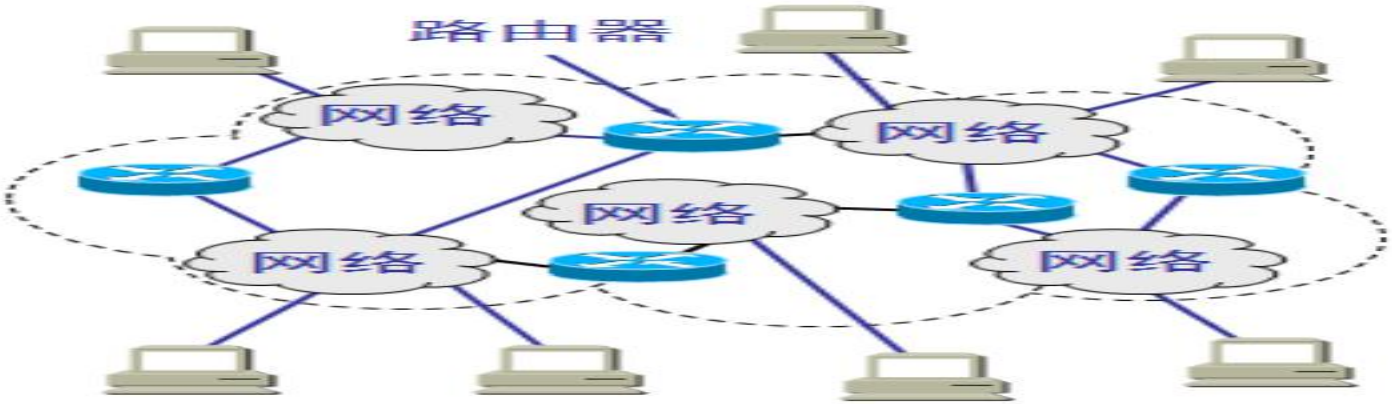
- 实质：无IP地址的主机可以通过RARP协议利用自己MAC地址来获取相应的IP地址。
- 工作原理：
  - 如果一个主机初始化后只有自己的物理地址而没有IP地址，则可通过RARP协议发送广播请求报文来请求RARP服务器告知自己的IP地址。
  - 当发送方以广播方式发送RARP请求报文时，在发送方物理地址字段和目的方物理地址字段上都填入本机物理地址。
  - RARP服务器接收到请求报文后，根据MAC+IP地址映射表，给发送方回送一个RARP响应报文，从目的方IP地址字段中带回发送方的IP地址。
- 应用场合：RARP协议主要用于无盘工作站来获取自己的IP地址；
- 注意：RARP的报文格式与ARP的相同。

本节内容提要

- 1. IP协议
  - 1.1 IP分组格式
  - 1.2 数据段的分片与组装
  - 1.3 分组转发(路由选择)
  - 1.4 选项
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

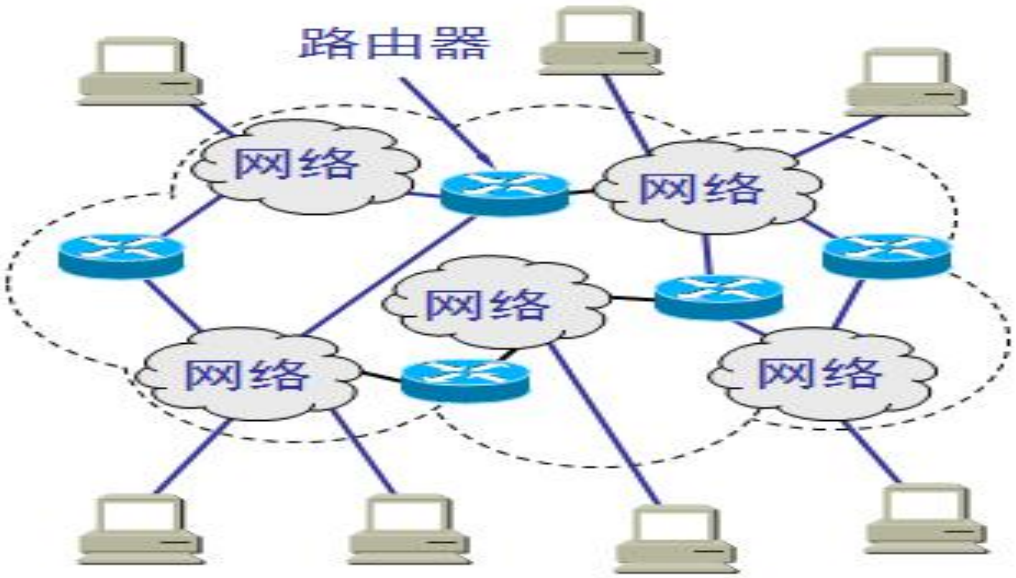
引言

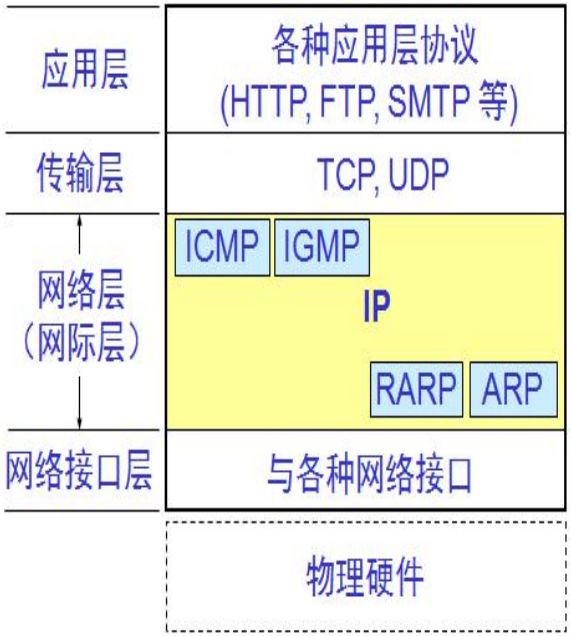
- IP协议提供了无连接的分组转发服务–尽最大努力交付。
  - 不提供IP分组传输可靠性；
  - 有检错功能，没有纠错功能。
  - IP分组出错丢弃，IP协议不发送差错报告；
- IP在传送过程中，如果发生差错或者异常情况，如：
  - 分组目的地址不可达。
  - 分组在网络中的滞留时间超过其生存期。
  - 网络交换节点或目的节点因缓冲区不足而无法接收分组。



引言

- 通过一种通信机制，向源节点报告异常情况，以便源节点对异常进行处理。
- 网际控制报文协议ICMP(Internetwork Control Message Protocol)正是提供这类差错报告、拥塞控制、路由优化和网络信息查询服务，以满足网络层通信需求。

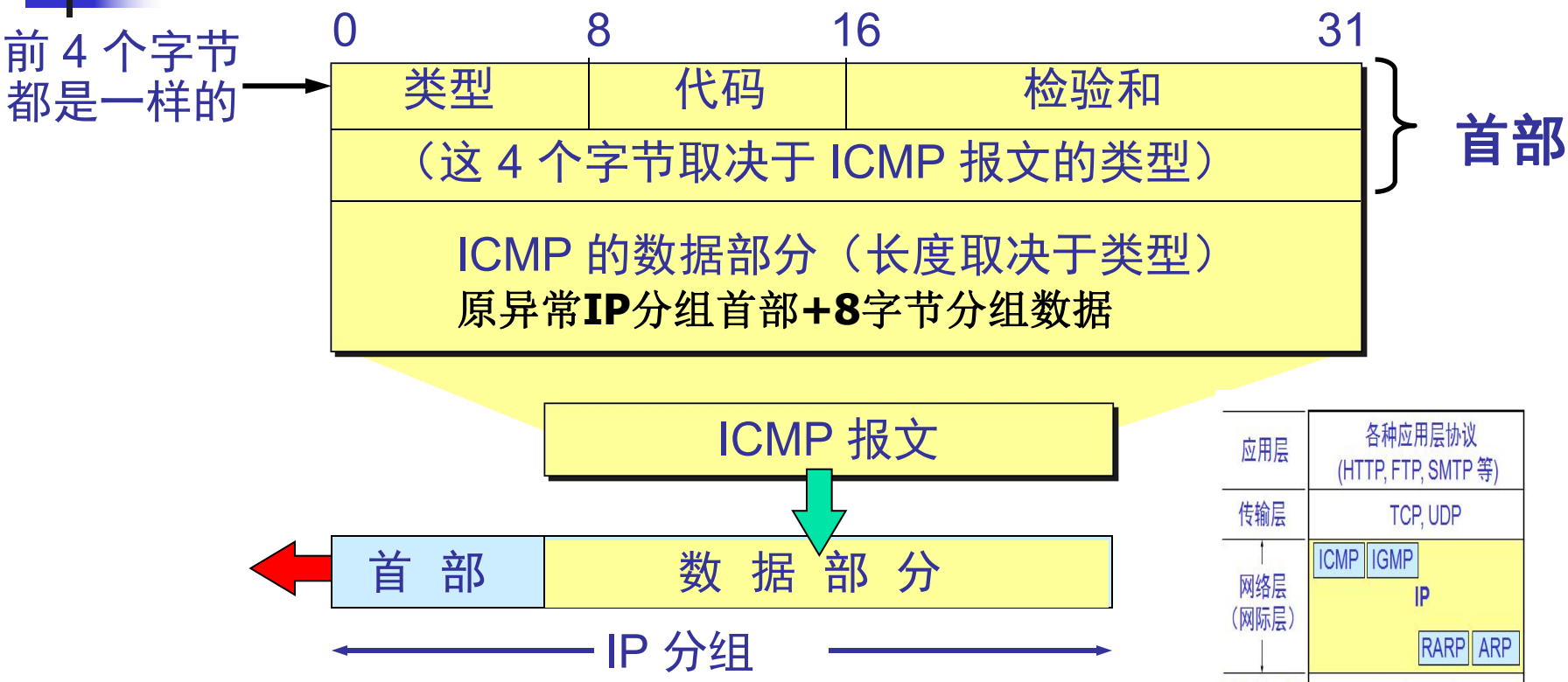




本节内容提要

- 3. ICMP协议
  - 3.1 ICMP报文格式
  - 3.2 ICMP差错报告报文
  - 3.3 ICMP控制报文
  - 3.4 ICMP查询报文

3.1 ICMP报文格式



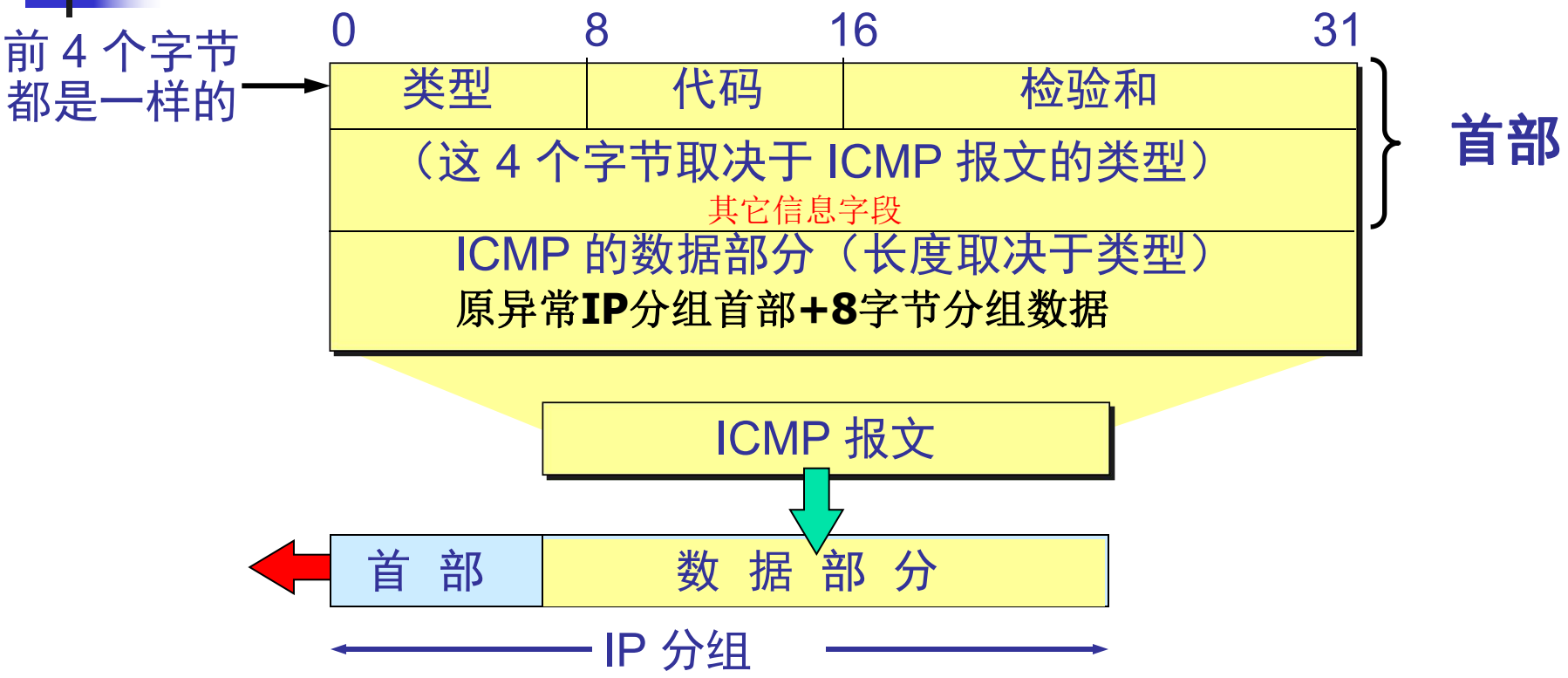
- 每个ICMP报文都是作为IP分组的形式在网络间转发。
- Type字段为1个字节，指出ICMP报文的类型。
- Code字段也是1个字节，提供关于报文类型的进一步信息，每种类型下子类型。

ICMP报文类型

种类	TYPE	含义
差错报告报文	3 11 12	目的不可达到 超时 （IP分组首部）参数出错
控制报文	4 5	源抑制 路由重定向
查询报文	8/0 13/14 17/18 10/19	ECHO请求/应答 时间戳请求/应答 掩码请求/应答 路由器请求/通告

- 差错报告报文和控制报文为单方向：路由器（目的节点）到源节点；
- 查询报文为双方向：发送节点与目的节点（或路由器）之间。
- 掩码请求/应答和路由器请求/通告不再使用[COME06]

3.1 ICMP报文格式



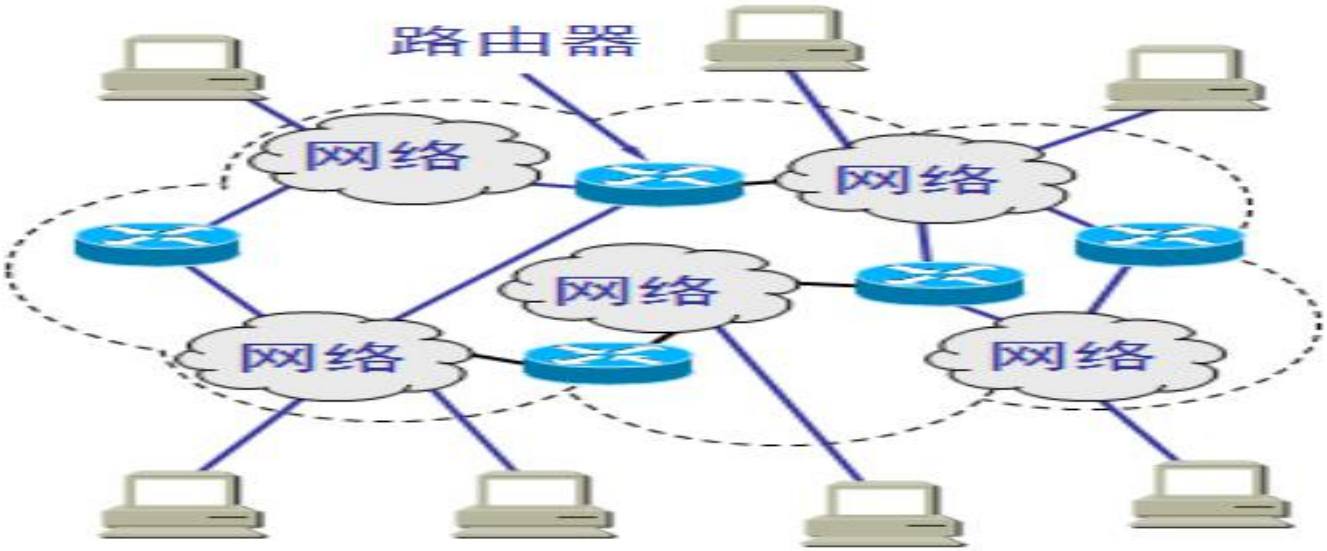
- 校验和范围为：ICMP首部+数据；而IP分组只对首部检验。
- 数据字段：包含出错分组IP头+该分组前比特64位数据(传输层头重要信息，特别是端口号，发送序号（TCP））。

本节内容提要

- 3. ICMP协议
  - 3.1 ICMP报文格式
  - 3.2 ICMP差错报文
  - 3.3 ICMP控制报文
  - 3.4 ICMP查询报文

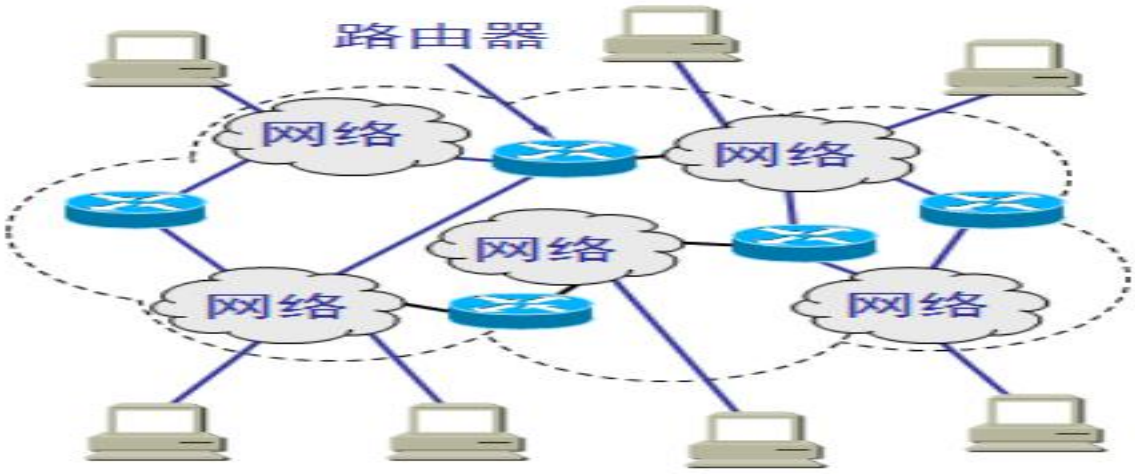
3.2 ICMP差错报告报文

- ICMP最基本的功能:提供差错报告。
- ICMP的差错报告都是采用路由器（或目的主机）向源主机报告模式。
  - 当路由器发现IP分组出现差错后,发生差错的IP分组被丢弃， IP协议调用ICMP协议向该IP分组的源主机发送ICMP差错报告；



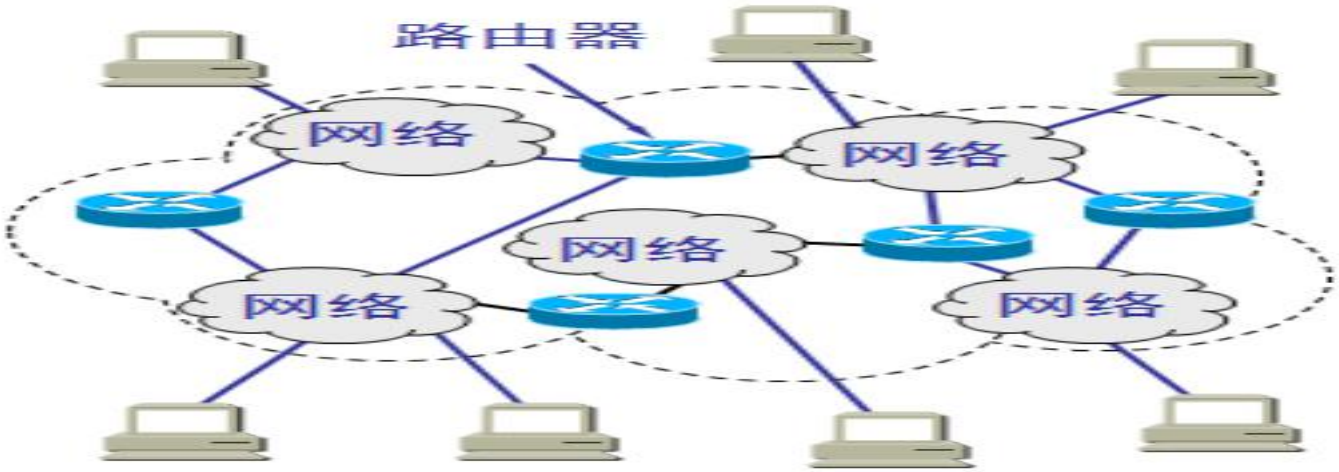
3.2 ICMP差错报告报文

- 对于差错报告处理方式，ICMP协议没有严格的规定。
  - 事实上，源主机网络层ICMP协议收到ICMP差错报文后，还需要上层协议（应用层协议）配合，才能决定所采取差错处理方式。
- ICMP差错报文分类：
  - 目的不可达报文：主机或路由器无法交付分组时向源发送目的不可达
  - 超时报文：路由器转发分组前TTL-1，如果为TTL=0，丢弃，向源发送
  - IP首部参数出错报文：主机或路由器收到IP分组首部某字段有错误时，向源发送该报文。



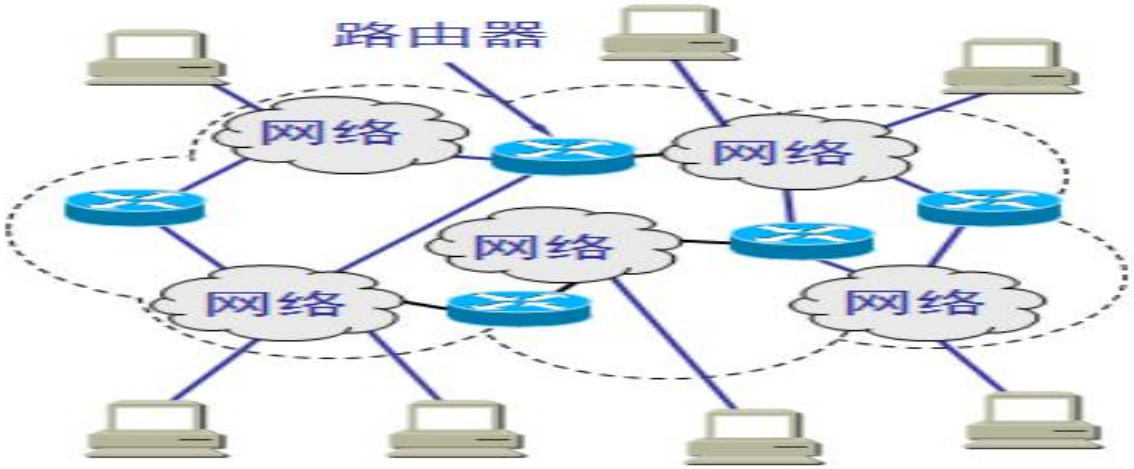
3.2 ICMP差错报告报文

- （1）目的不可达ICMP差错报告报文
  - 网络的主要功能是为接收到的IP分组选择路由并转发，当IP分组无法转发并交付给接收方应用进程时，则会发生目的不可达现象。
  - 路由器（目的）要向源主机发送目的不可达ICMP报文。
  - 目的不可达ICMP报文类型(Type)为 3，并进一步细分成 13 种子类，用代码(Code)来标识，其它信息字段（4B）未用，为全 0。



3.2 ICMP差错报告报文

Type	Code	含义	发送者
3	0	网络不可达，路由器找不到目的网络路由。	路由器
	1	主机不可达，到达目的网络后，路由器发送ARP请求报文不成功。	路由器
	2	协议不可达（传输层），IP分组携带的数据属于高层协议，目的主机高层协议进程没有运行。	目的主机
	3	端口不可达（应用层），目的主机应用进程没有运行	目的主机

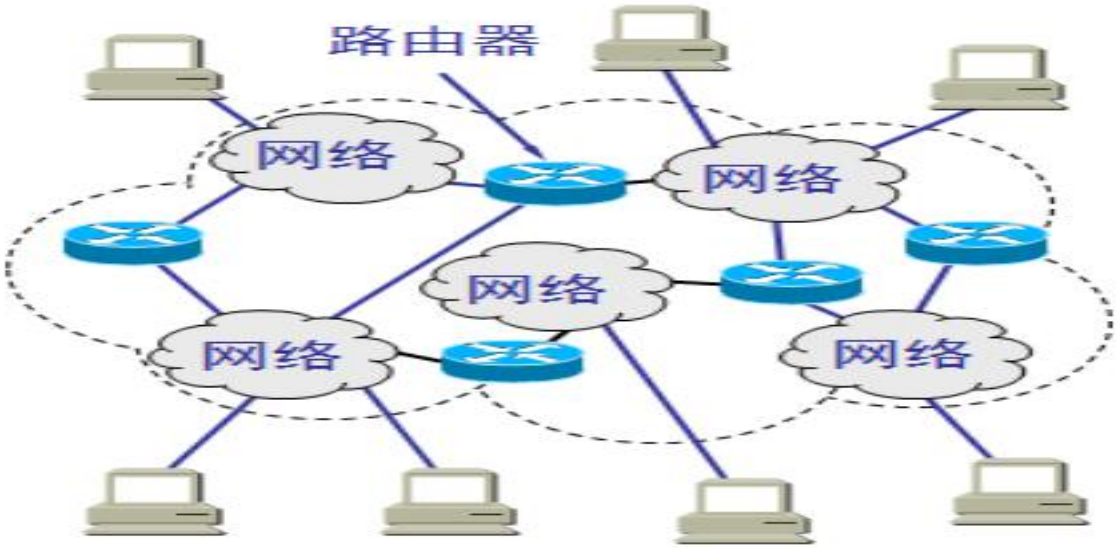


3.2 ICMP差错报告报文

- 超时差错报告报文
  - IP分组每经过一个路由器时，其生存期TTL都要减1，如果TTL递减为0时，路由器则会丢弃该分组，并向源主机发送Type=11、Code=0 的ICMP超时报文，报告该分组丢弃原因超时。
  - 当目的主机在对分片进行组装时，发生组装超时，将丢弃现已收到的所有分片，并向源主机节点发Type=11、Code=1的ICMP超时报文。
  - 举例：如何找到一条从当前节点到目的节点的路径信息？

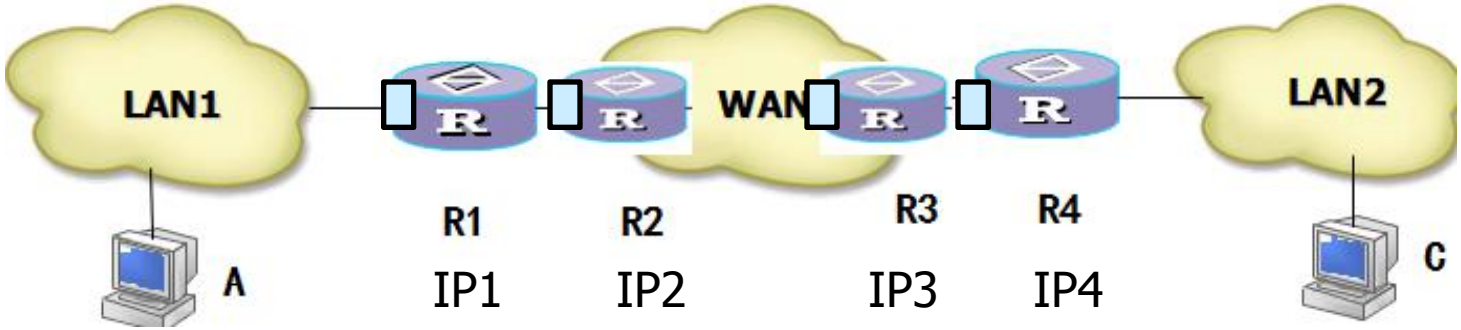
    tracert www.nwpu.edu.cn （WINDOWS.TTL=1,2,...）

    traceroute www.nwpu.edu.cn （LINUX）



ICMP的应用举例
Tracert命令

- Tracert：获取一个分组从源到目的传输参考路径。
- 工作原理：源主机向目的发送一连串的IP分组。
  - 源首先向目的发送第1个IP分组，并且TTL=1；当该分组到达路由器R1时，R1先接收，然后TTL-1=0，在不再转发，直接丢弃，并向源发送一个ICMP超时报文，源节点下R1的入口IP地址；
  - TTL+1，依次类推，当最后一个分组到达目的节点时，TTL=1，主机不转发，TTL也不减1，目的主机依据分组首部协议类型，将数据交付上层协议；一般上层协议（传输层-应用层）没有运行，这时，目的主机向源节点发送一个“目的不可达-端口不可达”ICMP差错报告报文。



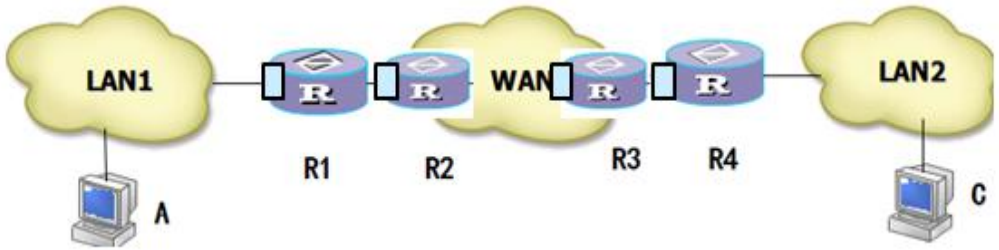
Tracert 应用举例-讨论

```
C:\Documents and Settings\XXR>tracert mail.sina.com.cn

Tracing route to mail.sina.com.cn [202.108.43.230]
over a maximum of 30 hops:

  1    24 ms    24 ms    23 ms  222.95.172.1
  2    23 ms    24 ms    22 ms  221.231.204.129
  3    23 ms    22 ms    23 ms  221.231.206.9
  4    24 ms    23 ms    24 ms  202.97.27.37
  5    22 ms    23 ms    24 ms  202.97.41.226
  6    28 ms    28 ms    28 ms  202.97.35.25
  7    50 ms    50 ms    51 ms  202.97.36.86
  8   308 ms   311 ms   310 ms  219.158.32.1
  9   307 ms   305 ms   305 ms  219.158.13.17
 10   164 ms   164 ms   165 ms  202.96.12.154
 11   322 ms   320 ms  2988 ms  61.135.148.50
 12   321 ms   322 ms   320 ms  freemail43-230.sina.com [202.108.43.230]

Trace complete.
```



问题1：获取的从A到C路径信息是是唯一路径吗？

问题2：从结果看，从A到C经过了多少个三层设备？

问题3：A节点所在网络的网关IP地址是多少？

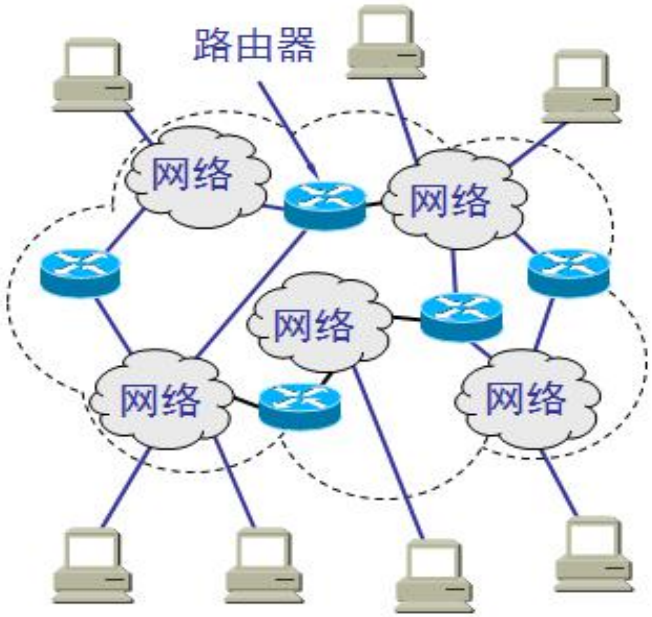
问题4：问题3：利用结果可以获得C节点所在网络网关IP地址吗？网关MAC地址？

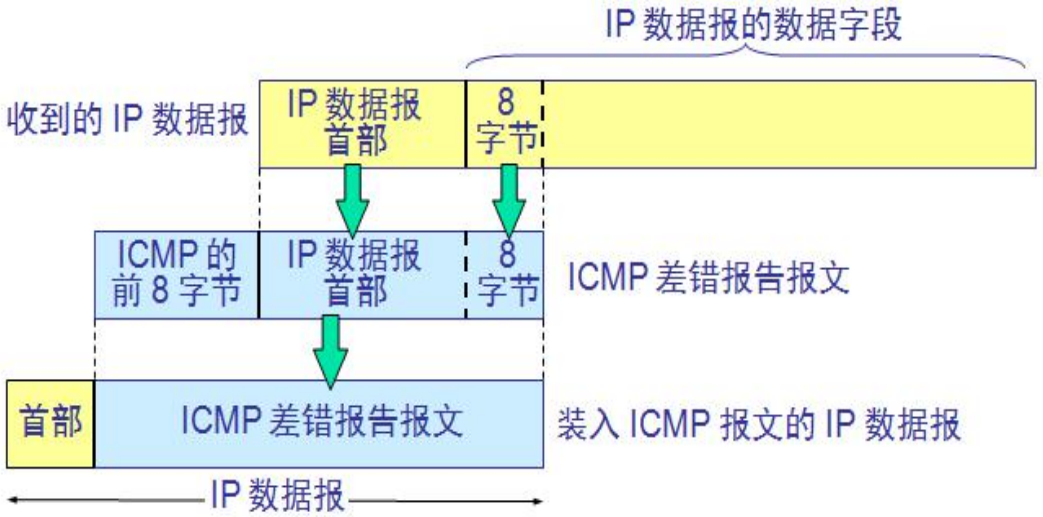
问题5：主机A可以获得接收方网关IP地址和MAC地址吗？

问题6：多次运行该命令，获得的路径结果信息一定相同吗？

3.2 ICMP差错报告报文

- IP分组首部参数出错差错报告报文
  - 当路由器或目的主机在对收到的IP分组进行处理时，检查发现IP分组首部有错误，分组丢弃，并向源主机发Type=12、Code=0的ICMP报文；
  - 在ICMP报文的其它信息字段中用1个字节作为指针来指出在分组首部中的差错位置(以字节为单位)。
  - 出错IP分组首部和分组前64比特（8B）数据信息填写在ICMP报文数据字段。





注意事项

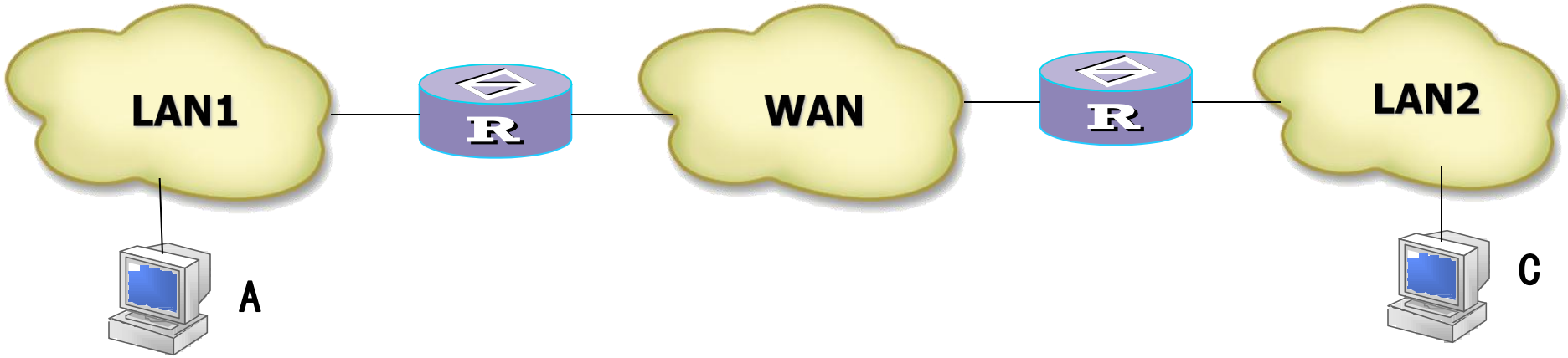
- 对于携带ICMP差错报告报文IP分组，不再产生ICMP差错报文；
- 有多个分片出现异常，原则上只发送一个ICMP差错报告报文。
- 对于组播的IP报文，不产生ICMP差错报文；
- 对于特殊地址（127.x.y.z;0.0.0.0）的IP报文，不产生ICMP差错报告报文。
- 所有ICMP差错报告报文中，只有参数出错报告报文包括数据字段，该字段包括源IP分组首部+源IP分组数据字段前8个字节（64比特）；
  - 这前8个字节数据提供了关于UDP和TCP端口号的信息，源主机根据协议号将差错情况报告给TCP/UCP，再通过端口号报告给应用进程。

本节内容提要

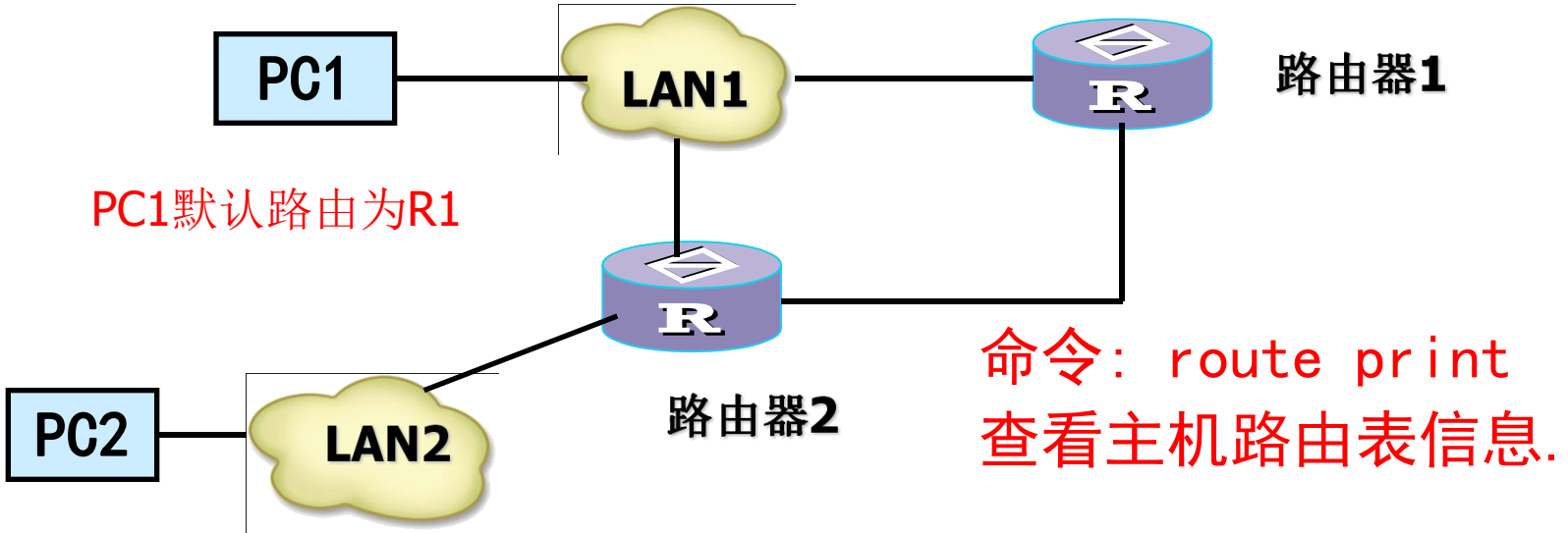
- 3. ICMP协议
  - 3.1 ICMP报文格式
  - 3.2 ICMP差错报告报文
  - 3.3 ICMP控制报文
  - 3.4 ICMP查询报文

3.3 ICMP控制报文

- 主要用于网络拥塞控制和路由重定向。
- （1） 源抑制报文:用于拥塞控制,抑制源主机节点发送数据报文的速率。
  - 网络节点由于缺乏缓冲区空间而无法接收新分组时，处理办法是丢弃（载荷脱落机制），并向源主机节点发送Type=4、Code=0的源抑制ICMP报文。
  - 当源主机节点收到源抑制报文后，降低其分组发送速率，直到不再收到报源抑制报文为止；然后源主机节点又逐渐增加分组发送速率,直到再次接收到源抑制ICMP报文为止。



- （2）重定向报文：提供了一种路由优化控制机制，使源主机能以动态方式寻找最短路径，通常ICMP重定向报文只能在同一段中的源主机与路由器之间使用。
  - 假设PC1的默认网关为R1，PC1向PC2发送分组？
  - 当路由器R1从处于同一子网的主机PC1收到一个需转发的IP分组时，R1将检查自身的路由表信息，它选定了下一个路由器R2继续转发该分组；
  - 如果这时R1判别确认R2和PC1也处于同一子网时，R1就向PC1发送重定向ICMP报文，通知PC1将分组直接发给R2将会是一条较短的转发路径。
  - 在重定向报文的其它信息字段中要填入重定向的路由器(如R2)IP地址。



本节内容提要

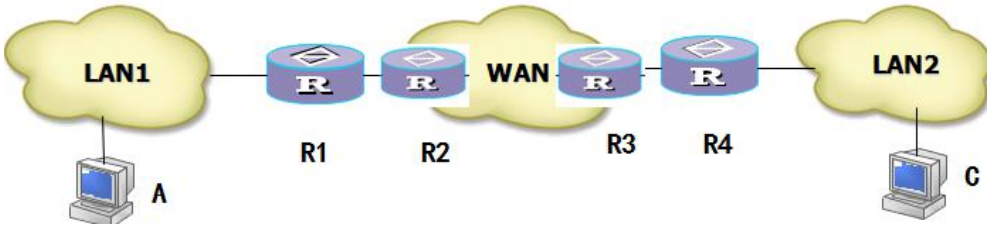
- 3. ICMP协议
  - 3.1 ICMP报文格式
  - 3.2 ICMP差错报文
  - 3.3 ICMP控制报文
  - 3.4 ICMP查询报文

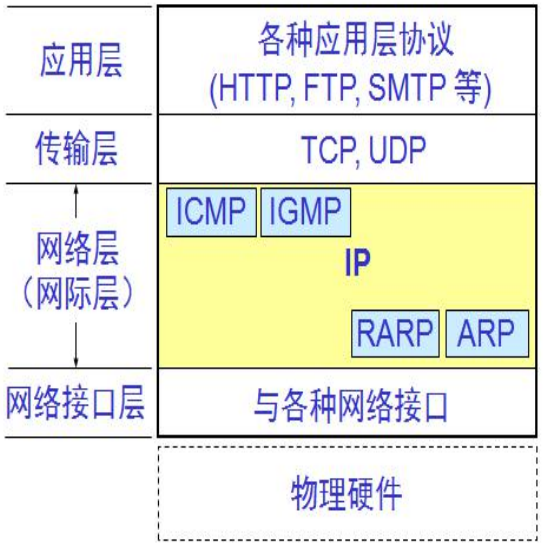
3.4 ICMP查询报文

- （1）回送请求/应答报文:主要用于测试网络目的节点（或路由器某个接口）的可达性。
  - 源节点使用ICMP回送请求报文向某一特定的目的主机发送请求，目的节点收到请求后必须使用ICMP回送响应报文来响应对方。
  - 在许多TCP/IP实现中，提供的一种用户命令Ping便是利用这种ICMP回送请求/响应报文来测试目的可达性的。
  - 命令:Ipconfig /all；查看主机网络配置信息.
  - 命令:ping 127.0.0.1；测试TCP/IP协议
  - 命令:ping 本机IP；测试本机网络配置信息（IP地址）.
  - 命令:ping 网关IP;

ICMP协议应用举例
PING (Packet InterNet Groper)

- ping 用来测试两个主机之间的连通性。
- 工作原理
  - ping 使用了 ICMP 回送请求+回送应答报文。
  - 源向目的发送ICMP 回送请求，目的接收到后给源发送回送应答报文
  - ping 是应用层直接使用网络层 ICMP 的例子，没有调用传输层的TCP 或UDP协议。
- 返回结果信息
  - 发送报文数、接收报文数、丢失报文数；
  - 往返时间最小值、最大值和平均值。





PING 的应用举例

```
C:\Documents and Settings\XXR>ping mail.sina.com.cn

Pinging mail.sina.com.cn [202.108.43.230] with 32 bytes of data:

Reply from 202.108.43.230: bytes=32 time=368ms TTL=242
Reply from 202.108.43.230: bytes=32 time=374ms TTL=242
Request timed out.
Reply from 202.108.43.230: bytes=32 time=374ms TTL=242

Ping statistics for 202.108.43.230:
    Packets: Sent = 4, Received = 3, Lost = 1 (25% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 368ms, Maximum = 374ms, Average = 372ms
```

3.4 ICMP查询报文

- (2) 时戳请求/应答报文：估算源和目的节点间的分组往返时间。
  - 在报文中使用了三个时戳字段：初始时戳字段是源节点发送时戳请求报文的时间；接收时戳字段是目的节点接收到时戳请求报文的时间；发送时戳字段是目的节点发送时应答报文的时间。
  - 源节点首先发送时戳请求报文，然后等待目的节点返回其响应报文，并根据这三个时戳字段来估算两个节点间的报文往返时间。
- (3) 掩码请求/应答报文：主要用于主机获取所在网络的IP地址掩码信息。
  - 主机在发送掩码请求报文时，将IP分组头中的源和目的IP地址字段的网络号部分设为0。
  - 网络上的目的节点(通常为路由器)接收到该请求后，填写好网络的掩码向源节点回送应答报文。
- (4) 路由器询问/通告报文：用于查找连接到源主机或路由器上的正常工作的路由器情况，并从中选择一个作为源主机（或路由器）的默认路由。

本节小结

- 1. IP协议
- 2. ARP协议
- 3. ICMP协议

复习&预习&作业

- 复习

  教材PP171-178
- 预习

  教材PP178-185
- 作业

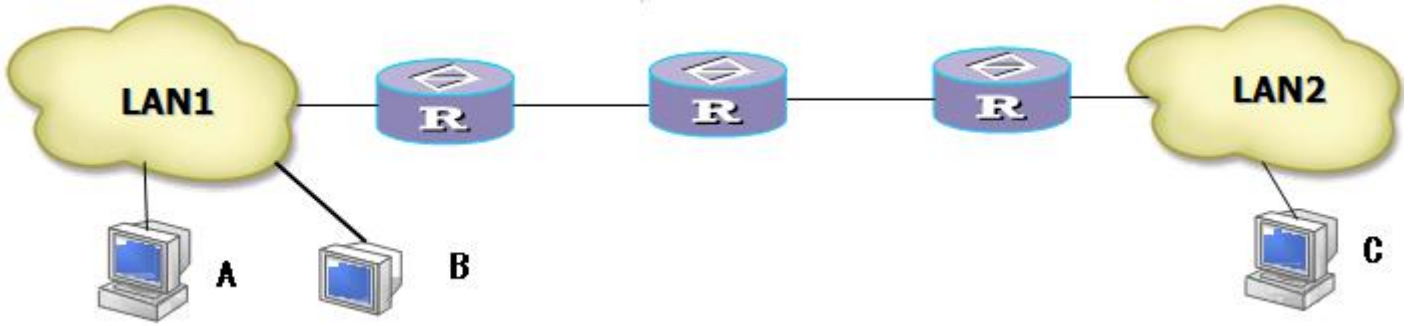
  教材PP199：6, 7, 9

五、IP分组存储转发

■ 1. IP分组存储转发—目的IP与子网掩码与操作

- 查找路由原则：Preference, Metric, 最长前缀匹配（特定主机路由）选择最优路由，最后选择默认路由。

目的地址	子网掩码 网络前缀长度	下一跳	代价 (Metric)	优先 (Preference)
11.0.0.0	255.0.0.0	8.8.8.9	30	100(RIP)
11.168.0.0	255.255.0.0	12.8.8.9	10	40(OSPF)
11.168.1.0 11.168.2.0	255.255.255.0 255.255.255.0	13.8.8.9 Direct	40 20	20(静态) 0
0.0.0.0	0.0.0.0	14.8.8.9	200	(默认)

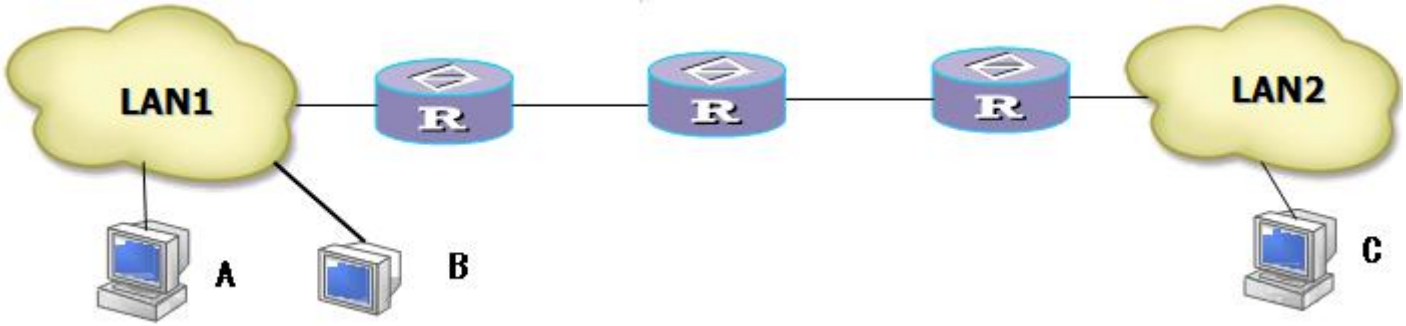


五、IP分组存储转发

■ 1. IP分组存储转发

- 查找路由原则：如果未找到任何路由记录(若无默认路由)，则说明“目的不可达”，调用ICMP协议，向发送节点报告错误信息。

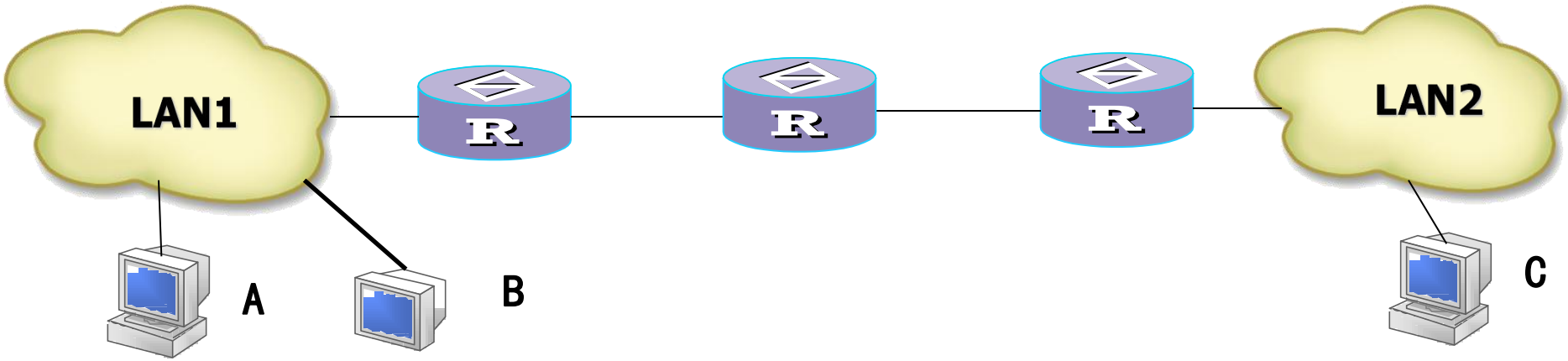
目的地址	子网掩码	下一跳	代价 (Metric)	优先 (Preference)
11.0.0.0	255.0.0.0	8.8.8.9	30	100(RIP)
11.168.0.0	255.255.0.0	12.8.8.9	10	40(OSPF)
11.168.1.0 11.168.2.0	255.255.255.0 255.255.255.0	13.8.8.9 Direct	40 20	20(静态) 0
0.0.0.0	0.0.0.0	14.8.8.9	200	(默认)



2. IP分组转发(路由选择)

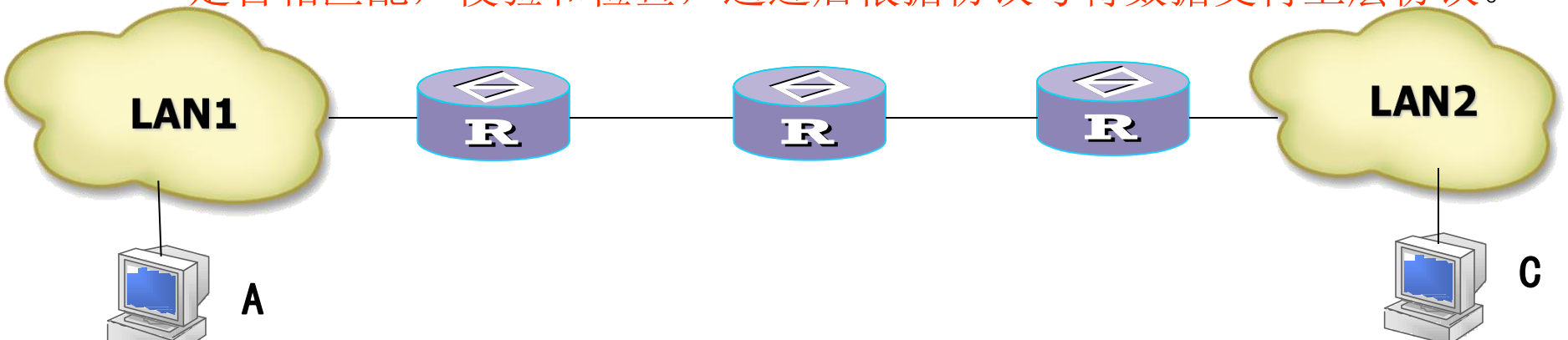
■ 1. IP分组存储转发

- 如果源和目的在一个LAN中（A发送IP分组给B），A主机IP协议调用ARP获取目的B主机MAC地址(路由器丢弃该IP分组)。
- 如果该路由不是直接交付（间接交付），则将路由表中下一跳路由器IP 地址记录下来,利用ARP获取下一跳路由器端口MAC地址。
- 如果找到路由,该路由是直接可达的(目的地址在和下一跳在同一网络段)，利用ARP获取目的主机MAC地址;



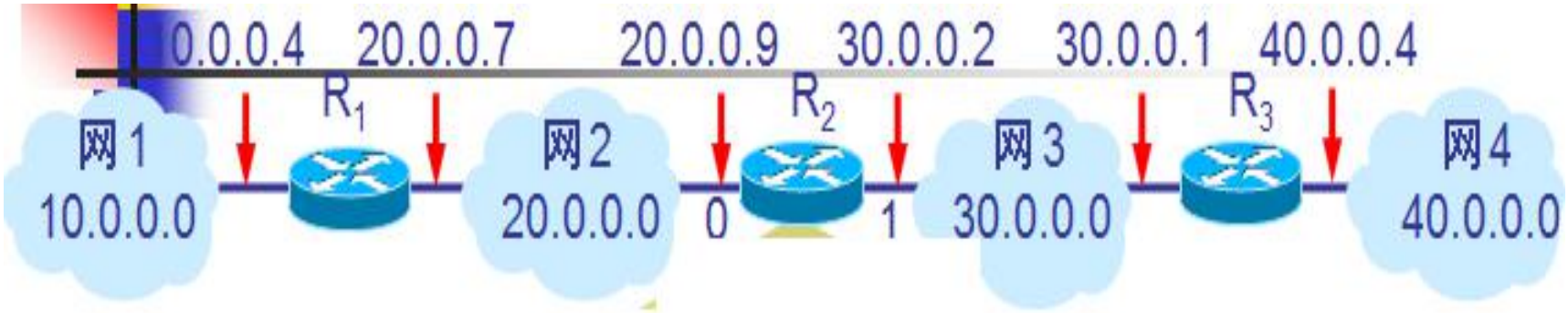
2. IP分组转发(路由选择)

- 2. IP分组接收：当接收节点IP协议收到由网络接口传来的IP分组时，分以下情况处理：
  - 当节点为路由器节点时，先TTL-1（=0，丢弃，发送ICMP超时报文）；如果TTL不为0,并且校验和检测通过,缓存排队，转发该分组，即用该分组的目的IP地址从路由表中查找转发路由（根据网络地址查找）。
  - 如果找到路由，则按该路由转发IP分组，并重新计算首部校验和；否则，向源主机发送“目的不可达” ICMP报文（注意默认路由信息）
  - 当该节点为主机节点时，则比较IP分组中的目的IP地址与本机IP地址是否相匹配，校验和检查，通过后根据协议号将数据交付上层协议。

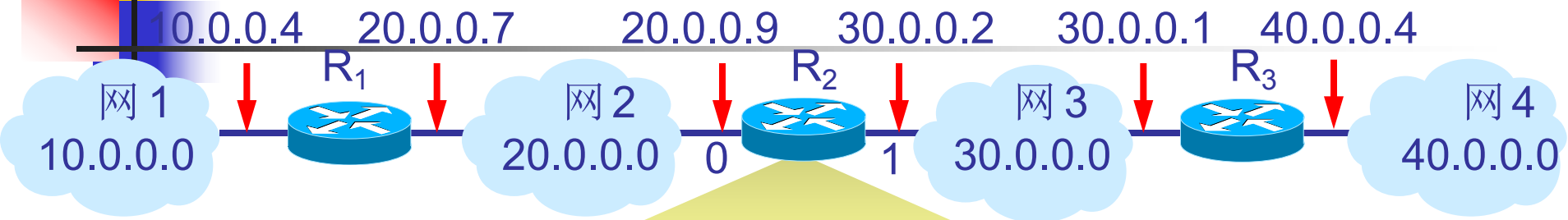


（1）未划分子网的分组转发–举例1

- 有四个 A 类网络通过三个路由器（R1、R2、R3）连接在一起；每一个网络上都可能有成千上万个主机。
- 如果按目的主机号（ip地址）来构造路由表，则所得出的路由表就会过于庞大。
- 若按主机所在的网络地址来构造路由表，那么每一个路由器中的路由表只包含 4 个路由记录，使路由表大大简化。

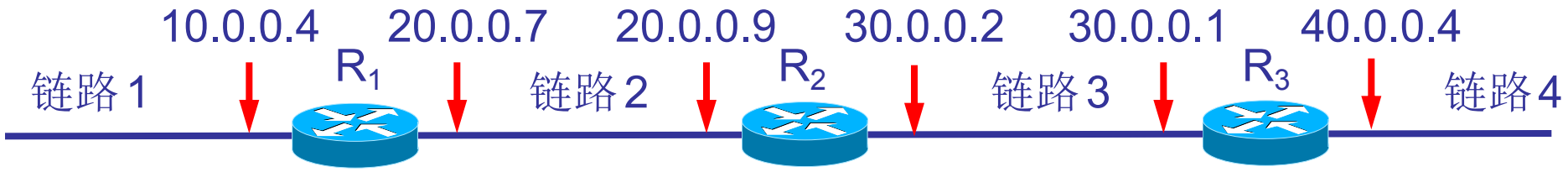


在路由表中，对每一条路由，最主要的是
（目的网络地址，下一跳地址）



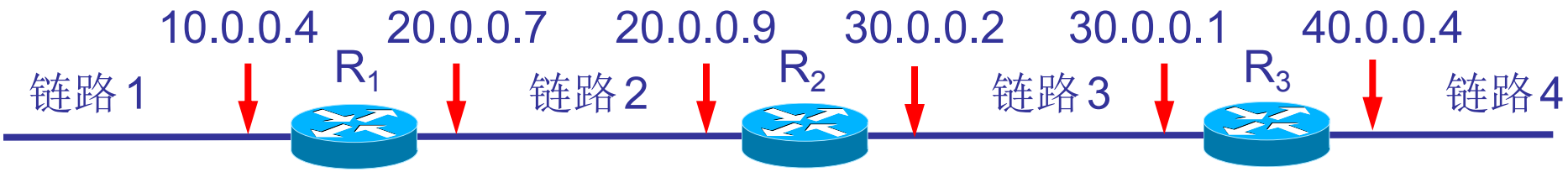
路由器 R_2 的路由表

目的主机所在的网络	下一跳地址
20.0.0.0/8	-
30.0.0.0/8	-
10.0.0.0/8	20.0.0.7
40.0.0.0/8	30.0.0.1



IP分组路由-讨论1

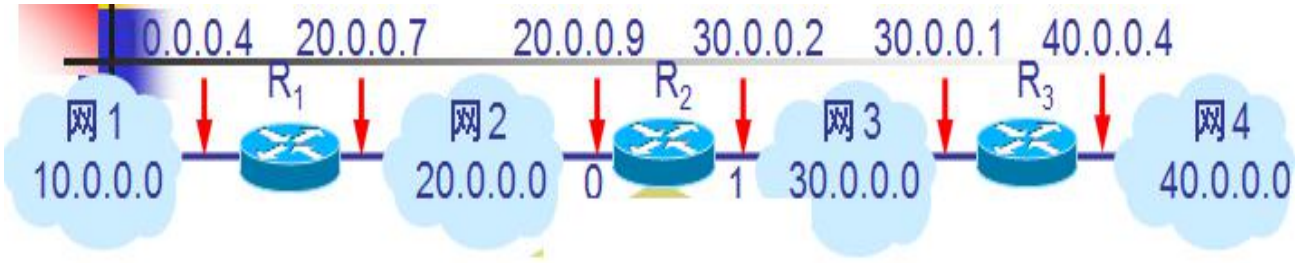
- 查找路由表
  - 根据目的网络地址就能确定下一跳路由器，结果是：
    - IP 分组最终一定可以找到目的主机所在目的网络上的路由器（可能要通过多次的间接交付）
    - 只有到达最后一个路由器时，才试图向目的主机进行直接交付。



IP分组路由-讨论2

- 特定主机路由
  - 这种路由是为特定的目的主机指明一个路由。
- 采用特定主机路由可使网络管理人员能更方便地控制网络和测试网络，同时也可在需要考虑某种安全问题时采用这种特定主机路由。

目的主机所在的网络	下一跳地址
20.0.0.0/8	直接交付，接口 0
30.0.0.0/8	直接交付，接口 1
10.0.0.0/8	20.0.0.7
10.0.0.1/32	20.0.0.7



IP分组路由- 讨论3

- 默认路由(default route)？
  - 目的是可以减少路由表所占用空间和搜索路由表所用时间。
  - 默认路由在一个网络只有很少对外连接时是很有用的。
  - 如果一个主机连接在一个小网络上，而这个网络只用一个路由器和因特网连接，那么在这种情况下使用默认路由是非常合适的。

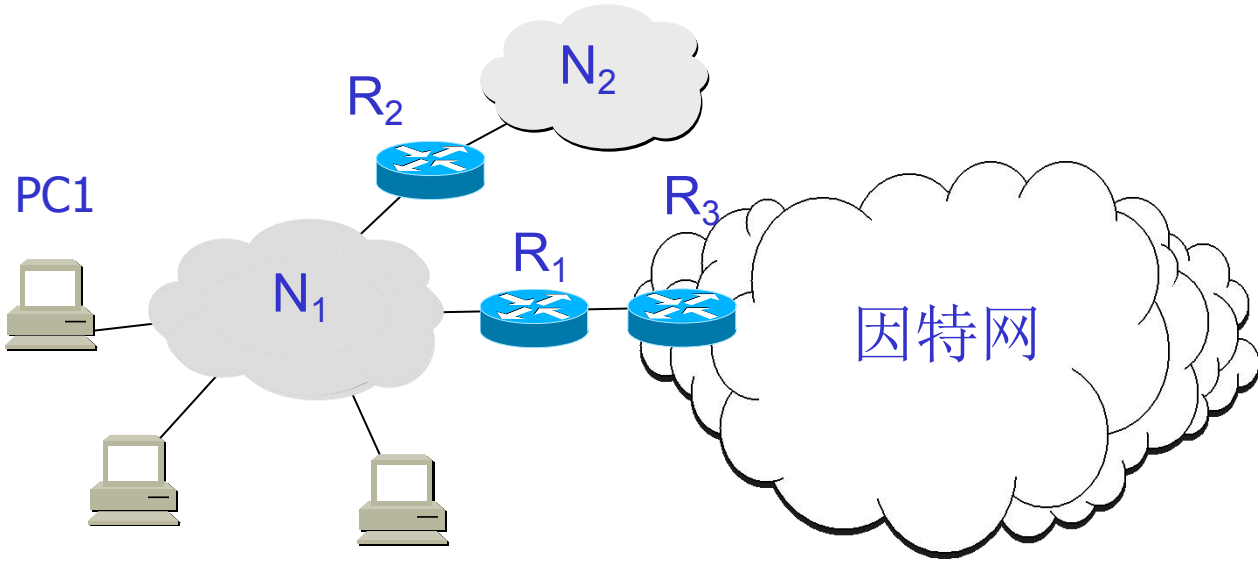
目的主机所在的网络	下一跳地址
20.0.0.0/8	直接交付，接口 0
30.0.0.0/8	直接交付，接口 1
10.0.0.0/8	20.0.0.7
0.0.0.0 0.0.0.0.0	40.0.0.1

IP 层分组转发–举例2

只要目的网络不是 N_1 和 N_2，
就一律选择默认路由，
把数据报先间接交付路由器 R_1，
让 R_1 再转发给下一个路由器。

R2 路由表

目的网络	下一跳
N_1	—
N_2	—
默认	R_1

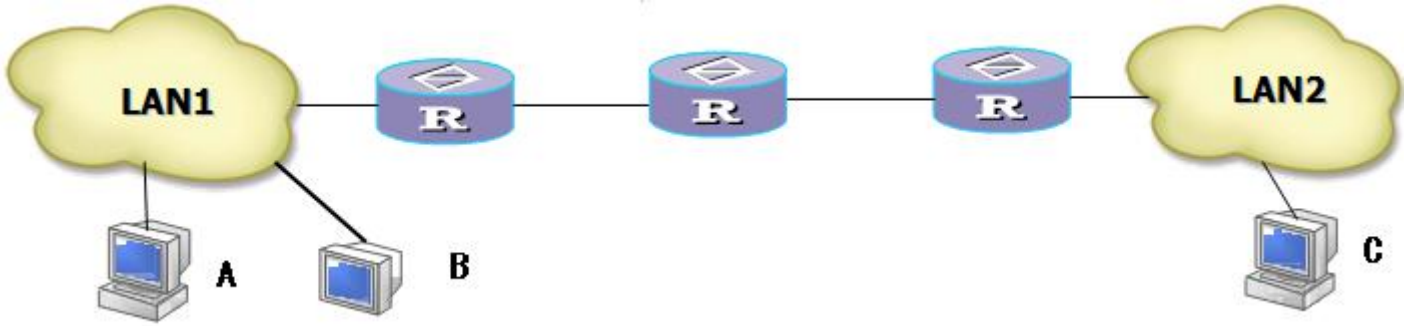


R1 路由表?

以N1网络中一台计算机为例

必须强调指出

- IP 分组的首部中一般没有地方可以用来指明“下一跳路由器的 IP 地址”（除源路由情况）。
- 当路由器收到待转发的分组，通过查找路表，找到下一跳路由器入口的IP地址。
- 然后使用 ARP 负责将下一跳路由器的 IP 地址转换成硬件地址（该硬件地址放在链路层的 MAC 帧的首部）
- 根据这个硬件地址（MAC转发表）转发给下一跳路由器。



IPV4分组转发方法（未划分子网）

(1) 从IP分组的首部提取目的主机的 IP 地址 *D*, 与路由表中网络掩码与操作, 得出目的网络地址为 *N*。

(2) 若网络 *N* 与此路由器直接相连，则把数据报直接交付目的主机 *D(arp)*；否则是间接交付，执行(3)。

(3) 若路由表中有目的地址为 *D* 的特定主机路由，则把IP分组传送给路由表中所指明的下一跳路由器(调用ARP协议)；否则，执行(4)。

(4) 若路由表中有到达网络 *N* 的路由(ARP协议得到下一个路由器MAC地址)，则把IP分组传送给路由表指明的下一跳路由器；否则，执行(5)。

(5) 若路由表中有一个默认路由，则把数据报传送给路由表中所指明的默认路由器；否则，执行(6)。

(6) 丢弃分组，调用ICMP, 报告转发分组出错-目的不可达。

（2）划分子网的分组转发-实例

- 在未划分子网的两级IP地址下，从 IP 地址得出网络地址是个很简单的事（根据默认子网掩码）。
- 但在划分子网的情况下，从 IP 地址却不能唯一地得出网络地址来，这是因为网络地址取决于那个网络所采用的子网掩码，但数据报的首部并没有提供子网掩码的信息。
- 因此分组转发的算法也必须做相应的改动。

IPV4分组转发方法（划分子网）

(1) 路由器从收到的分组的首部提取目的 IP 地址 *D*。

(2) 先用各路由记录子网掩码和 *D* 逐位相“与”，看是否和相应的直连网络地址匹配。若匹配，则将分组直接，但直接交付前，ARP获得目的主机MAC地址）； 否则就是间接交付，执行(3)。

(3) 若路由表中有目的地址为 *D* 的特*定主机路由，则将分组传送给指明的下一跳路由器（转发前，ARP获得下一跳路由MAC地址）； 否则，执行(4)。*

(4) 对路由表中的每一行的子网掩码和 *D* 逐位相“与”，若其结果与该行的目的网络地址匹配，则将分组传送给该行指明的下一跳路由器*（转发前，ARP获得下一跳路由MAC地址）；*否则，执行(5)。

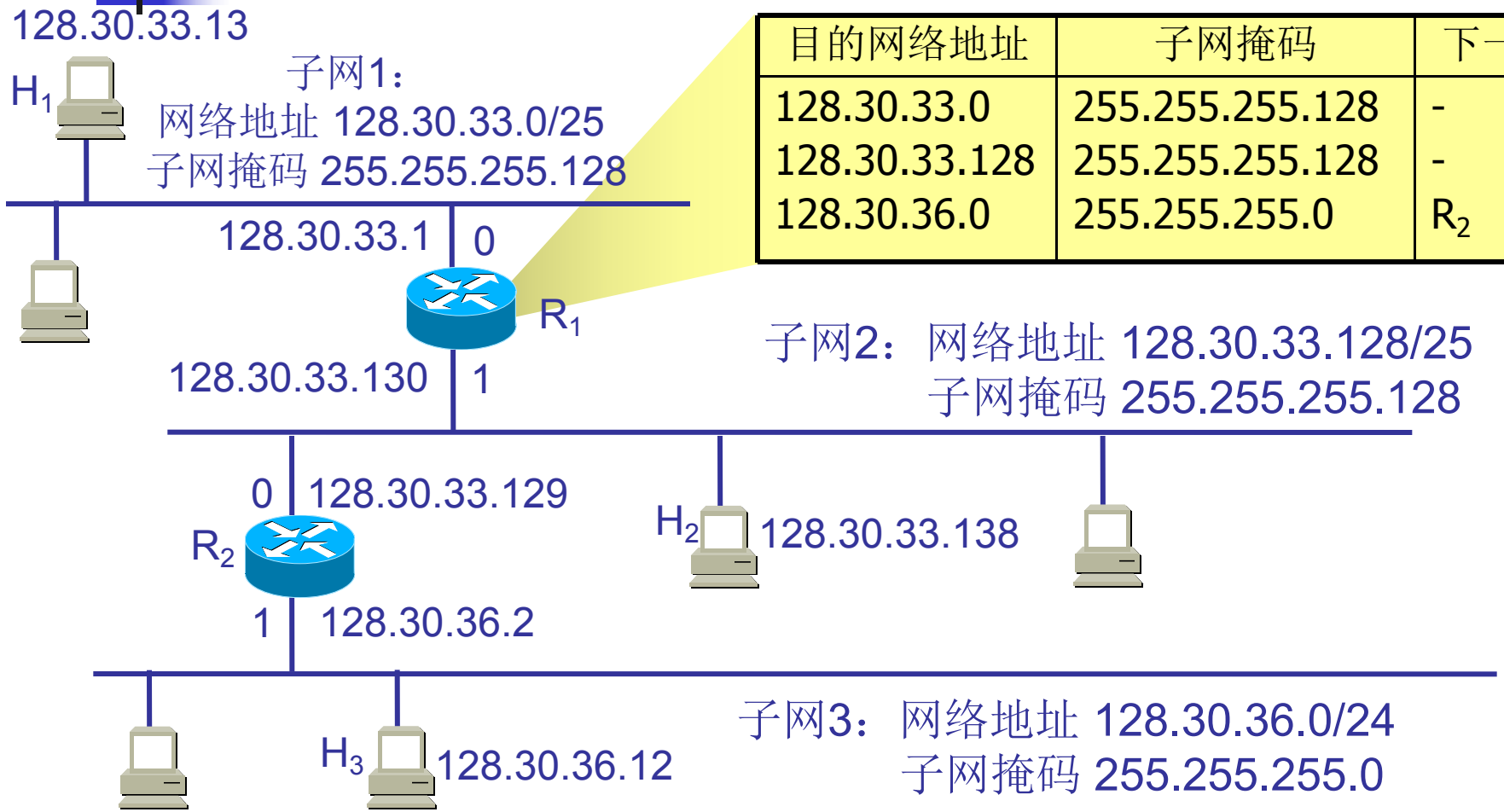
(5) 若路由表中有一个默认路由，则将分组传送给路由表中所指明的默认路由器*（转发前，ARP获得*默认路由器*MAC地址）；* 否则，执行(6)。

(6) 丢弃，向源发送ICMP差错报告报文（“目的不可达”）。

【例3】已知互联网和路由器 R_1 中的路由表。主机 H_1 向 H_2 发送分组。试讨论 R_1 收到 H_1 向 H_2 发送的分组后查找路由表的过程。

R_1 的路由表（未给出默认路由器）

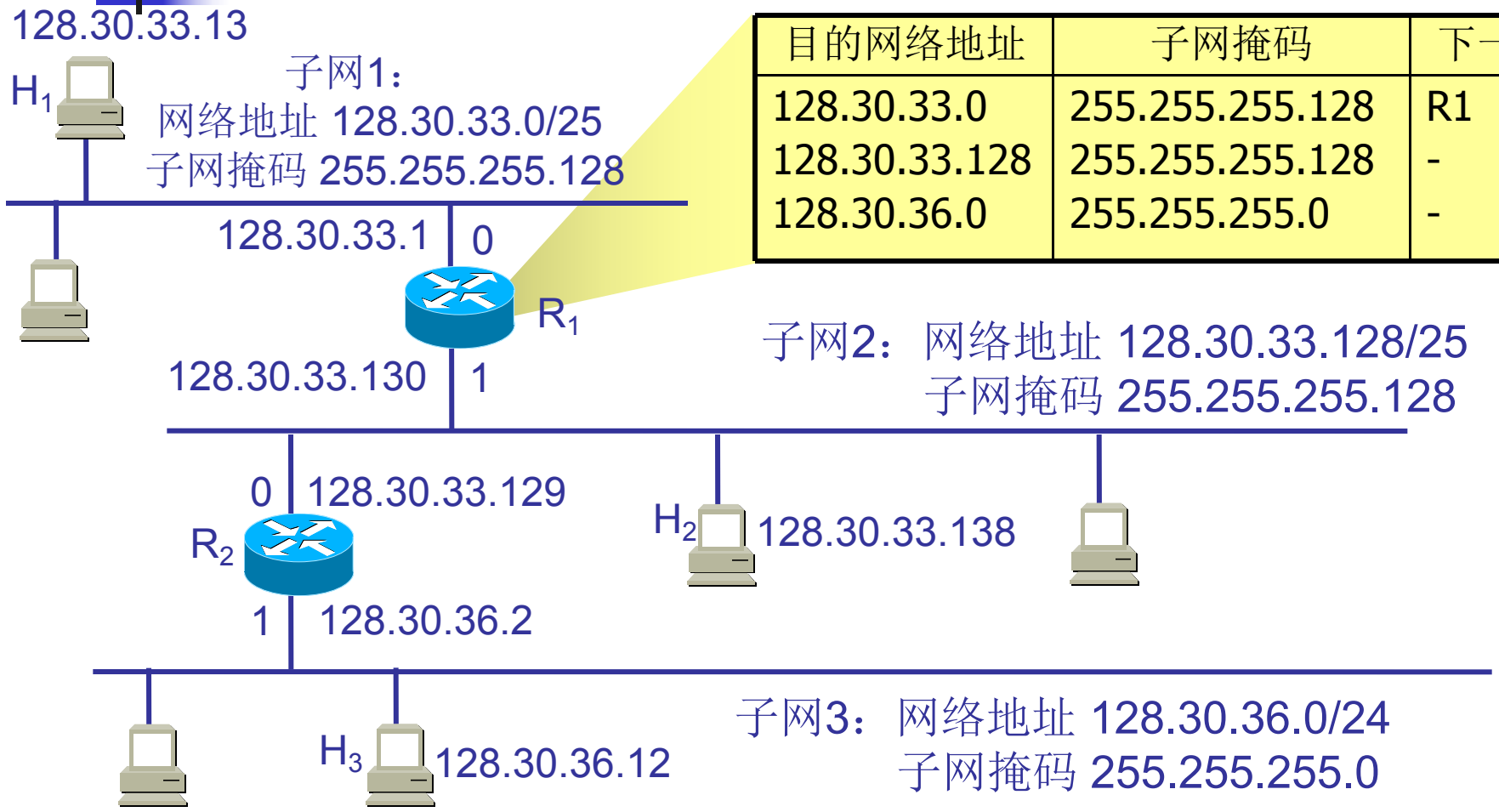
目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	-
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	R_2



【例3】已知互联网和路由器 R_1 中的路由表。主机 H_1 向 H_2 发送分组。试讨论 R_1 收到 H_1 向 H_2 发送的分组后查找路由表的过程。

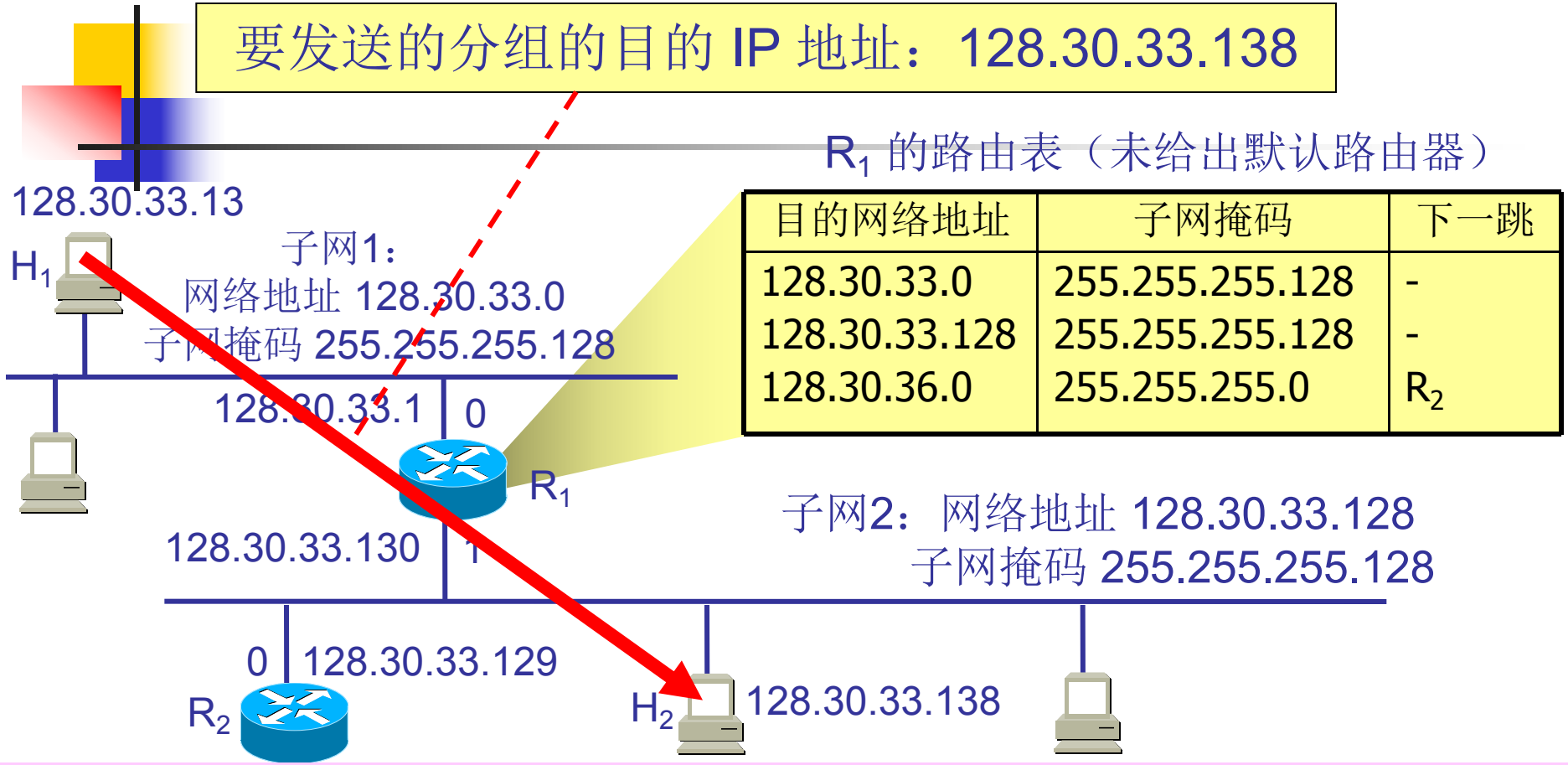
R_2 的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	R1
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	-



主机 H_1 要发送分组给 H_2

要发送的分组的目的 IP 地址：128.30.33.138



R_1 的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	-
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	R_2

因此H_1首先检查主机128.30.33.138是否连接在本网络上

如果是，则直接交付；

否则，就送交路由器R_1，并逐项查找路由表。

本子网的子网掩码 255.255.255.128

与分组的 IP 地址 128.30.33.138 逐比特相“与”(AND 操作)

255.255.255.128 AND 128.30.33.138 的计算

255 就是二进制的全 1，因此 255 AND xyz = xyz，
这里只需计算最后的 128 AND 138 即可。

128 → 10000000
138 → 10001010

逐比特 AND 操作后：10000000 → 128

	255.255.255.128
逐比特 AND 操作	128. 30. 33.138
	128. 30. 33.128

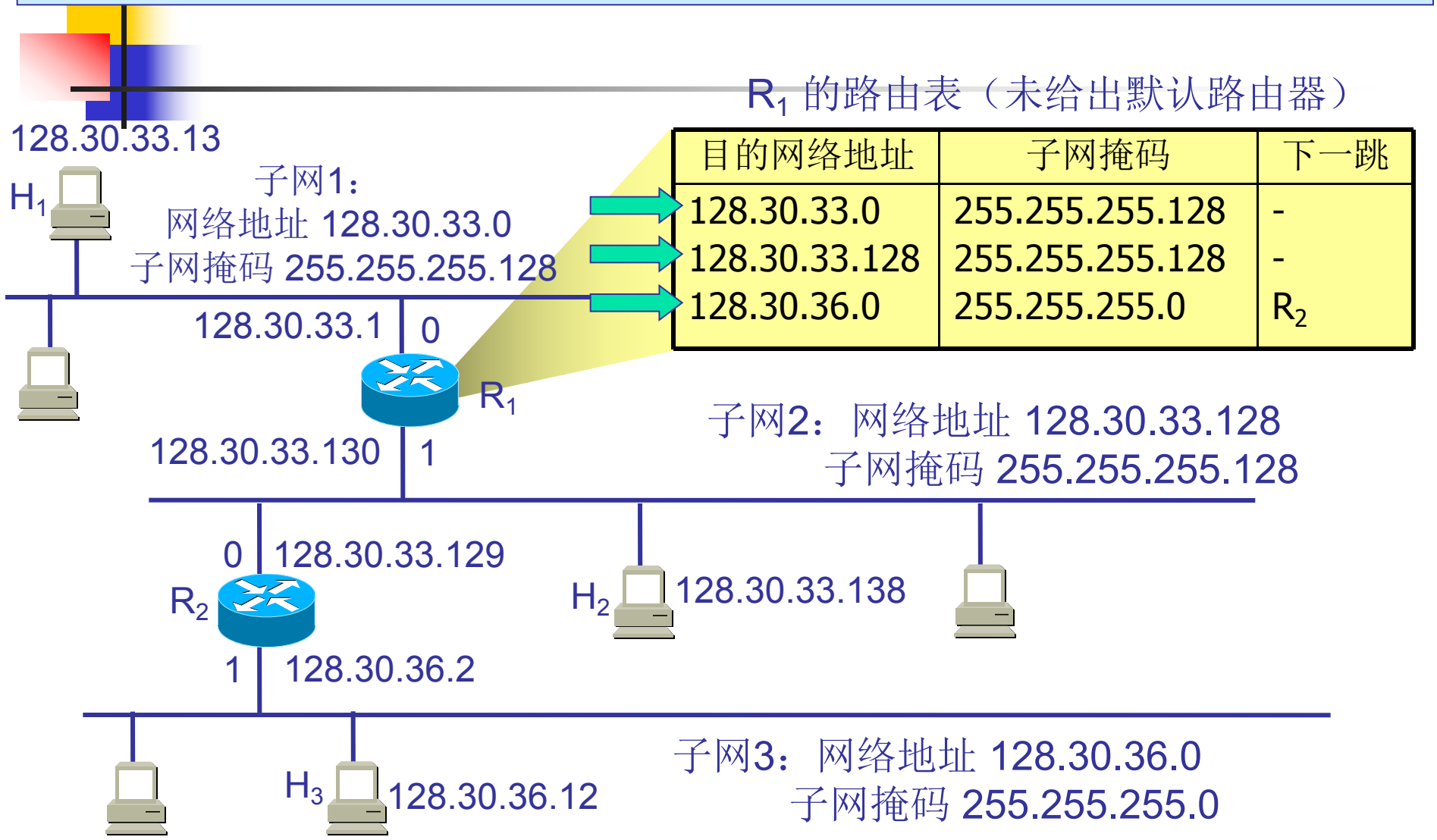
≠H_1 的网络地址

128.30.33.0

因此 H_1 必须把分组传送到路由器 R_1 然后逐项查找路由表

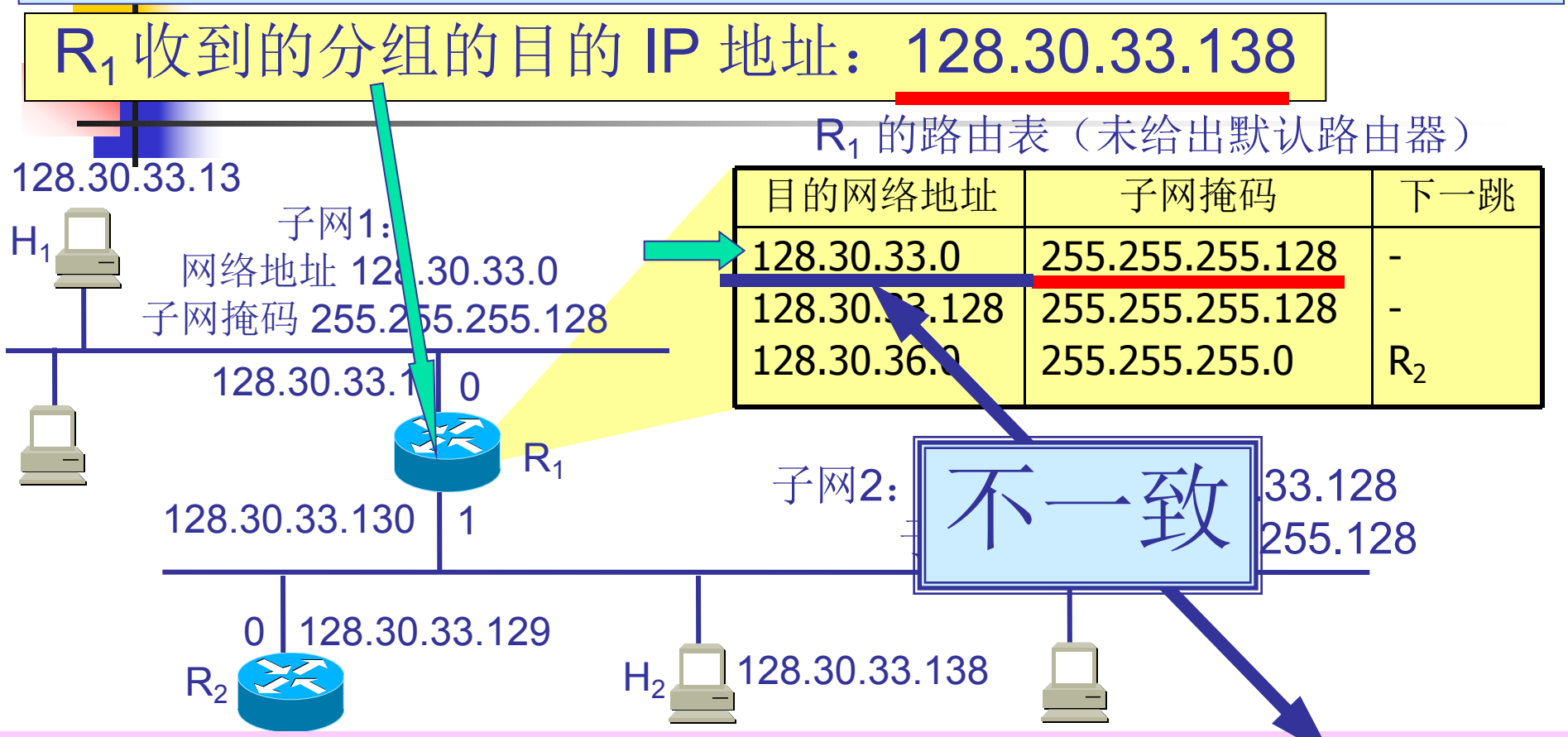
R_1 的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	-
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	R_2



路由器 R_1 收到分组后就用路由表中第 1 个项目的子网掩码和 128.30.33.138 逐比特 AND 操作

R_1 收到的分组的目的 IP 地址：128.30.33.138



R_1 的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	-
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	R_2

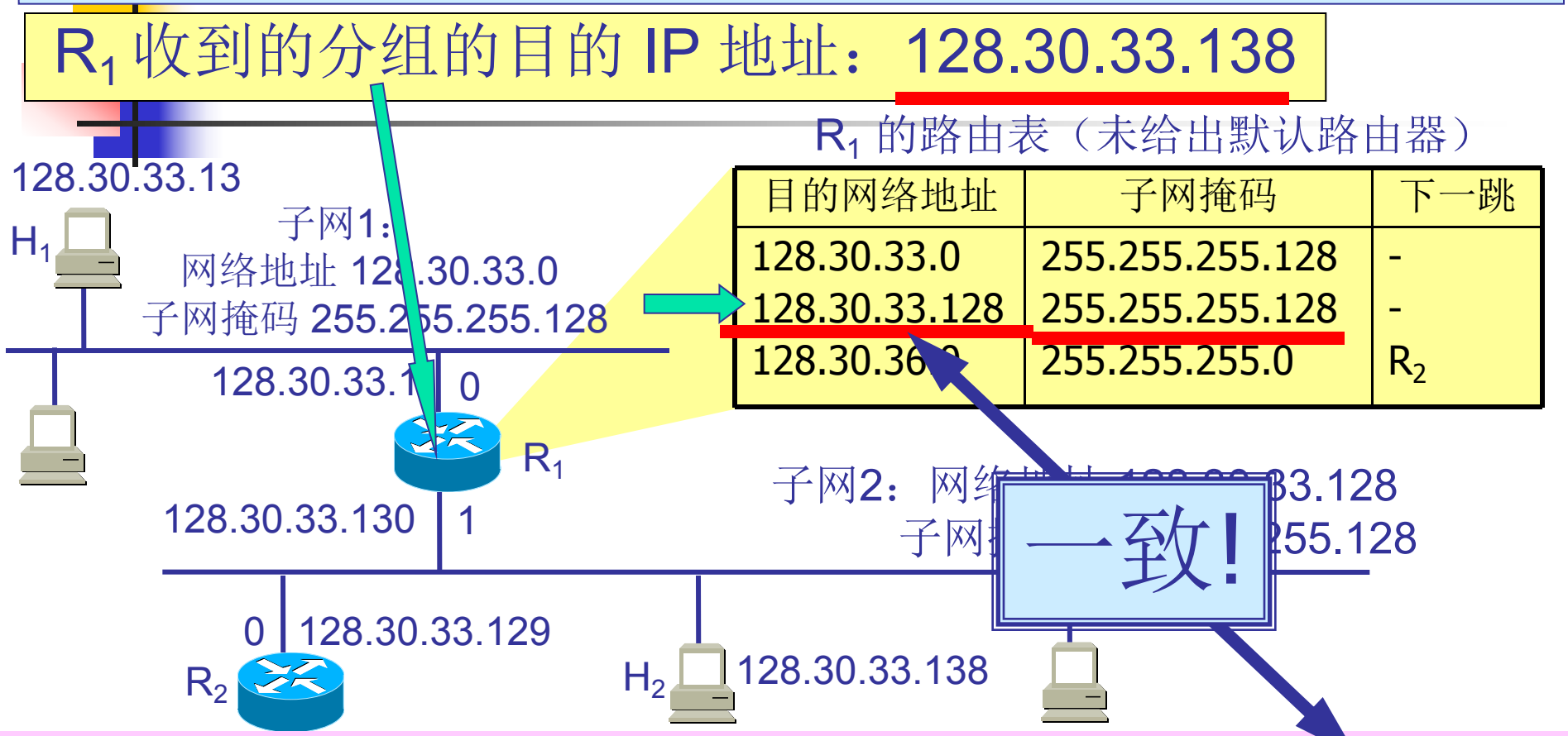
255.255.255.128 AND 128.30.33.138 = 128.30.33.128

不匹配!

（因为128.30.33.128 与路由表中的 128.30.33.0 不一致）

路由器 R_1 再用路由表中第 2 个项目的子网掩码和 128.30.33.138 逐比特 AND 操作

R_1 收到的分组的目的 IP 地址：128.30.33.138



R_1 的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	-
128.30.33.128	255.255.255.128	-
128.30.36.0	255.255.255.0	R_2

255.255.255.128 AND 128.30.33.138 = 128.30.33.128

匹配!

这表明子网 2 就是收到的分组所要寻找的目的网络