

第4章 网络层

张瑞

ruizhang@shu.edu.cn

1

第4章 网络层

- ❖ 4.1 网络层提供的服务
- ❖ 4.2 网际协议IP
- ❖ 4.3 划分子网和构造超网
- ❖ 4.4 网际控制报文协议ICMP
- ❖ 4.5 因特网的路由选择协议
- ❖ 4.6 IP多播
- ❖ 4.7 其他网络举例

2

4.1 网络层提供的两种服务

- ❖ 在计算机网络领域，网络层应该向运输层提供怎样的服务（“面向连接”还是“无连接”）曾引起了长期的争论。
- ❖ 争论焦点的实质就是：在计算机通信中，可靠交付应当由谁来负责？是网络还是端系统？

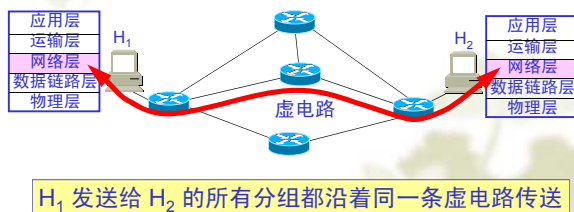
3

提供可靠的面向连接的传输服务

- ❖ 电话公司为代表，发送数据之前应该先建立连接。
- ❖ 建立虚电路(Virtual Circuit)，以保证双方通信所需的一切网络资源。
- ❖ 服务是可靠的，保证服务的质量
- ❖ 好处：对控制参数、可选服务类型、服务质量等进行协商；保证数据的顺序传送，便于流量控制。

4

虚电路服务



5

虚电路的概念

- ❖ 数据链路：相邻两节点间的数据传输通道。
- ❖ 逻辑信道：相邻两点间的一条数据链路可支持多条逻辑信道，为多对通信服务。
 - ⚡ 多条逻辑信道异步时分复用一条数据链路。
 - ⚡ 每个结点都会为每个逻辑信道分配一个输入缓冲区和一个输出缓冲区。
- ❖ 虚电路：不相邻的两点间的若干条逻辑信道串接成一条虚电路，建立一条虚电路后两点间就可进行全双工通信。

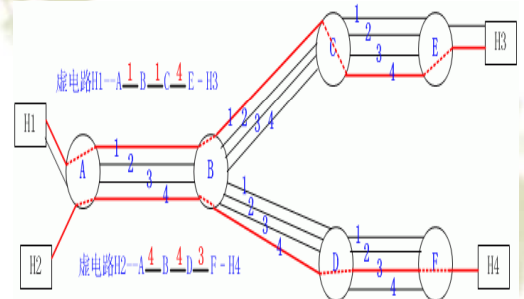
6

虚电路是逻辑连接

- ❖ 虚电路表示这只是一条**逻辑上的连接**，分组都沿着这条逻辑连接按照存储转发方式传送，而并不是真正建立了一条物理连接。
- ❖ 请注意，电路交换的电话通信是先建立了一条**真正的连接**。因此分组交换的虚连接和电路交换的连接只是类似，但并不完全一样。

7

通信子网中的物理信道、逻辑信道和虚电路



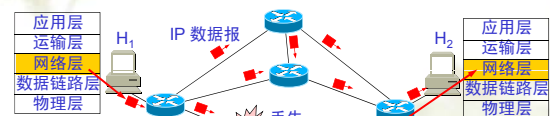
8

提供无连接的传输服务

- ❖ Internet团体为代表：认为通信子网本质上不可靠，数据的正确传输，主机总是要进行差错控制。
- ❖ 网络层向上只提供简单灵活的、**无连接的、尽最大努力交付的数据报服务**。
- ❖ 网络在发送分组时不需要先建立连接。每个分组（即 IP 数据报）携带完整的地址信息，独立传输，独立寻址，彼此之间不需要保持任何的顺序关系（不进行编号）。
- ❖ 网络层不提供服务质量的承诺（服务不可靠）。即所传送的分组可能出错、丢失、重复和失序（不按序到达终点），当然也不保证分组传送的时限。

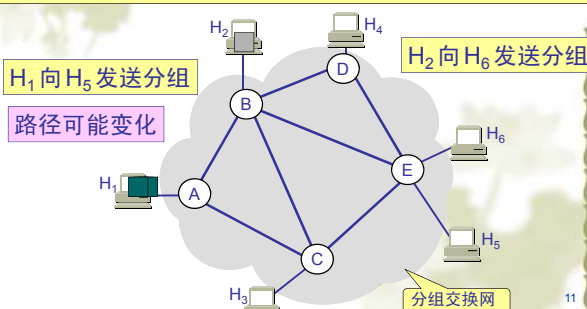
9

数据报服务



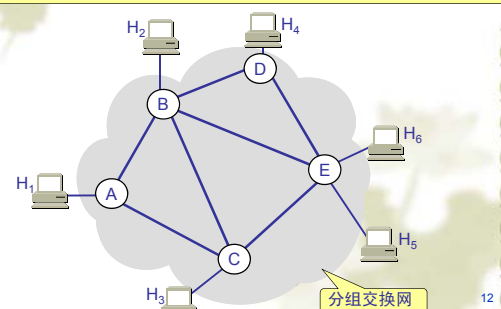
10

网络随时接受主机发送的分组（即数据报）
网络为每个分组独立地选择路由。



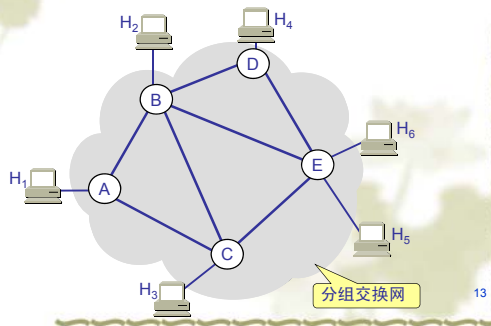
11

网络尽最大努力地将分组交付给目的主机，
但网络对源主机没有任何承诺。



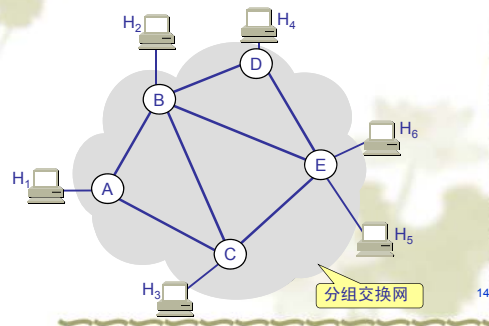
12

网络不保证所传送的分组不丢失
也不保证按源主机发送分组的先后顺序
以及在时限内必须将分组交付给目的主机



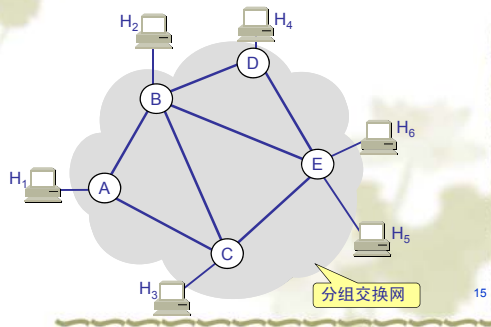
13

当网络发生拥塞时
网络中的结点可根据情况将一些分组丢弃



14

数据报提供的服务是不可靠的，
它不能保证服务质量。
实际上“尽最大努力交付”的服务
就是没有质量保证的服务。



15

尽最大努力交付的好处

- ❖ 使网络中的路由器设计简单，且价格低廉。
- ❖ 由网络主机中的运输层负责可靠传输（包括差错处理、流量控制等）。
- ❖ 好处：网络的造价大大降低，运行方式灵活，能够适应多种应用。
- ❖ 因特网能够发展到今日的规模，充分证明了当初采用这种设计思路的正确性。

16

两种服务的思路来源不同

- ❖ 虚电路服务的思路来源于传统的电信网。
 - ☞ 电信网负责保证可靠通信的一切措施，因此电信网的结点交换机复杂而昂贵。
- ❖ 数据报服务力求使网络生存性好和对网络的控制功能分散，因而只能要求网络提供尽最大努力的服务。
 - ☞ 可靠通信由用户终端中的软件（即TCP）来保证。

17

虚电路服务与数据报服务的优缺点

- ❖ 传送代价方面
 - ☞ 网络上传送的报文长度，在很多情况下都很短。
 - ☞ 用数据报既迅速又经济。
 - ☞ 若用虚电路，为了传送一个分组而建立虚电路和释放虚电路就显得太浪费网络资源了。

18

虚电路服务与数据报服务的优缺点

❖ 交换节点存储转发方面

- 在使用数据报时，每个分组必须携带完整的地址信息。
- 在使用虚电路的情况下，每个分组不需要携带完整的目的地址，而仅需要有个很简单的虚电路号码的标志。
- 这就使分组的控制信息部分的比特数减少，因而减少了额外开销。

19

虚电路服务与数据报服务的优缺点

❖ 差错和流量控制方面

- 在使用数据报时，主机承担端到端的差错控制和流量控制。
- 在使用虚电路时，分组按顺序交付，网络可以负责差错控制和流量控制。

20

虚电路服务与数据报服务的优缺点

❖ 使用场合

- 数据报服务对军事通信有其特殊的意义。当某个结点发生故障时，后续的分组就可另选路由，因而提高了可靠性。
- 但在使用虚电路时，结点发生故障就必须重新建立另一条虚电路。
- 数据报服务还很适合于将一个分组发送到多个地址(即广播或多播)。

21

虚电路服务与数据报服务的对比

对比的方面	虚电路服务	数据报服务
思路	可靠通信应当由网络来保证	可靠通信应当由用户主机来保证
连接的建立	必须有	不需要
目的站地址	仅在连接建立阶段使用，每个分组使用短的虚电路号	每个分组都有目的站的完整地址

22

虚电路服务与数据报服务的对比

对比的方面	虚电路服务	数据报服务
分组的转发	属于同一条虚电路的分组均按照同一路由进行转发	每个分组独立选择的路由进行转发
当结点出故障时	所有通过出故障的结点的虚电路均不能工作	故障结点可能丢失分组，一些路由可能会发生变化

23

虚电路服务与数据报服务的对比

对比的方面	虚电路服务	数据报服务
分组的顺序	总是按发送顺序到达目的站	到达目的站时不一定按发送顺序
端到端的差错处理和流量控制	可以由网络负责也可以由用户主机负责	由用户主机负责

24

服务的可靠与连接的关系？

- ❖ 可靠
 - 是指数据没有丢失、损坏或重复；
 - 采用**应答**来实现，即可靠/不可靠可用**有/无应答**来区分。
- ❖ 面向连接
 - 本质是保证数据的顺序传送；
 - 特征是数据传送必须经过**建立连接、传送数据和拆除连接**三个阶段。
- ❖ 结论：可靠性与是否连接之间没有关系！
- ❖ 可靠性与有/无连接的四种组合（主导的两种）
 - 可靠的面向连接的服务和不可靠的无连接的服务

25

第4章 网络层

- ❖ 4.1 网络层提供的服务
- ❖ 4.2 网际协议IP
- ❖ 4.3 划分子网和构造超网
- ❖ 4.4 网际控制报文协议ICMP
- ❖ 4.5 因特网的路由选择协议
- ❖ 4.6 IP多播
- ❖ 4.7 其他网络举例

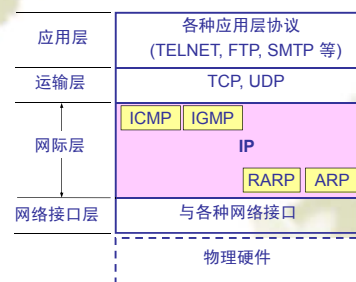
26

因特网的网际协议IP

- ❖ 网际协议 IP 是 TCP/IP 体系中两个最主要的协议之一。与 IP 协议配套使用的还有四个协议：
 - 地址解析协议 ARP (Address Resolution Protocol)
 - 逆地址解析协议 RARP (Reverse Address Resolution Protocol)
 - 网际控制报文协议 ICMP (Internet Control Message Protocol)
 - 网际组管理协议 IGMP (Internet Group Management Protocol)

27

网际协议IP及其配套协议



28

IP地址及其表示方法

- ❖ 我们把整个因特网看成为一个单一的、抽象的网络。IP 地址就是给每个连接在因特网上的主机（或路由器）分配一个在全世界范围是唯一的 **32 位** 的标识符。
- ❖ IP 地址现在由**因特网名字与号码指派公司** ICANN (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) 进行分配

29

IP 地址的编址方法

- ❖ IP地址编址方法的三个阶段
 - 分类的IP地址。这是最基本的编址方法，在 1981 年就通过了相应的标准协议。
 - 子网的划分。这是对最基本的编址方法的改进，其标准[RFC 950]在 1985 年通过。
 - 构成超网。这是比较新的无分类编址方法。1993 年提出后很快就得到推广应用。

30

分类 IP 地址

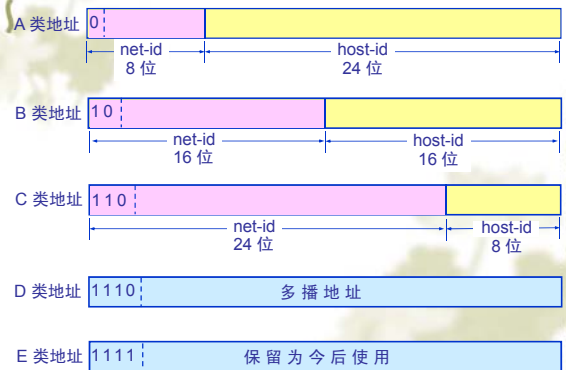
- ❖ 每一类地址都由两个固定长度的字段组成，其中一个字段是**网络号 net-id**，它标志主机（或路由器）所连接到的网络，而另一个字段则是**主机号 host-id**，它标志该主机（或路由器）。
- ❖ 两级的 IP 地址可以记为：

IP 地址 ::= { <网络号>, <主机号> }

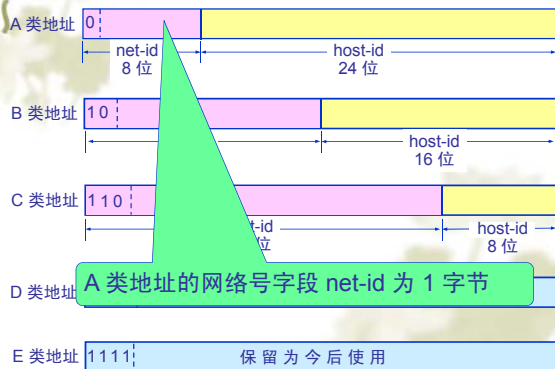
::= 代表“定义为”

31

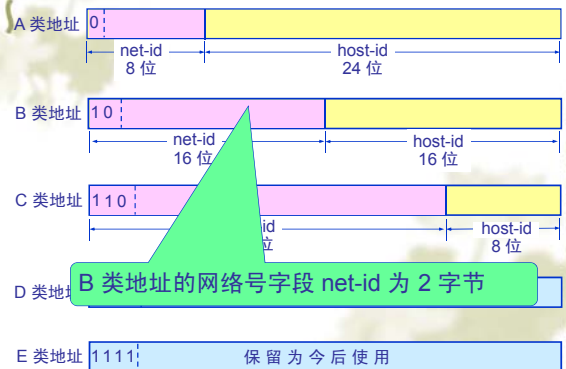
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



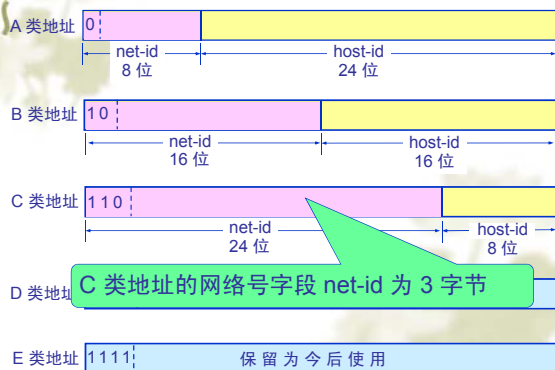
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



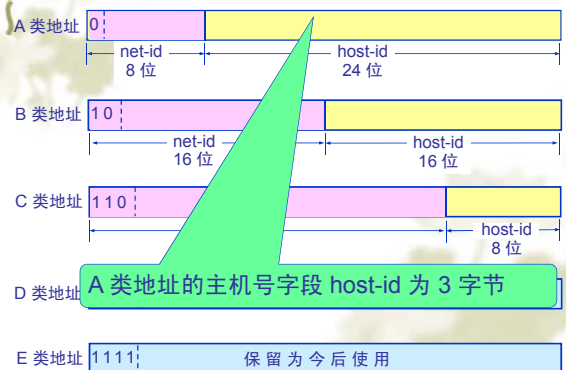
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



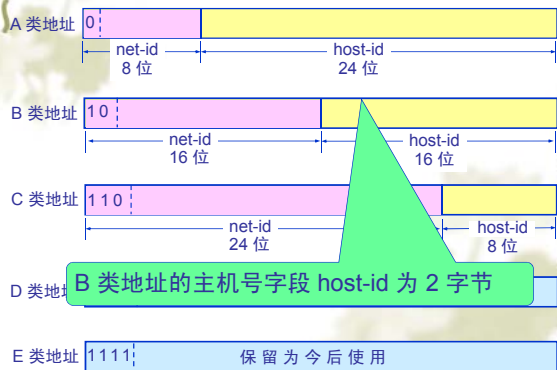
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



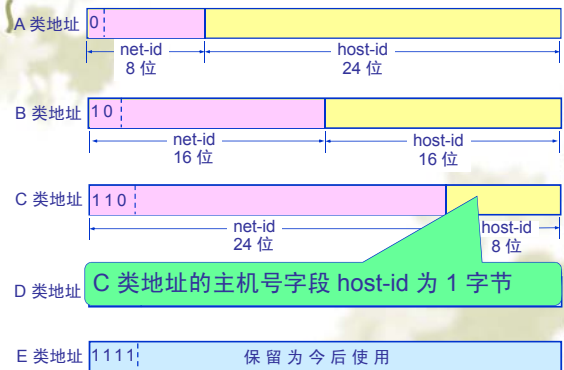
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



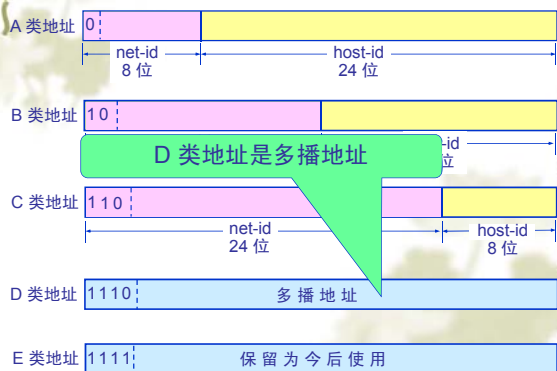
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



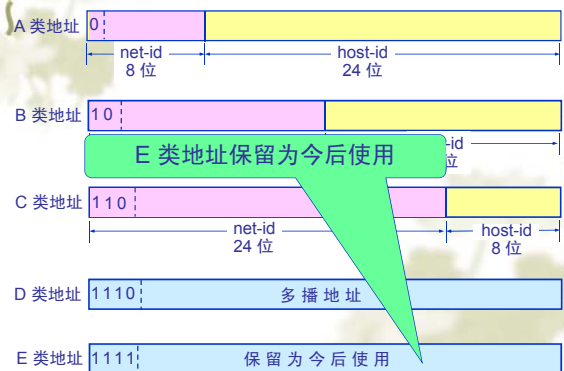
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



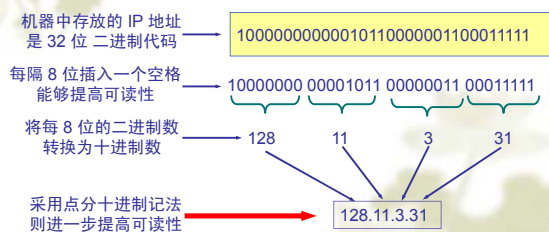
IP 地址中的网络号字段和主机号字段



IP 地址中的网络号字段和主机号字段



点分十进制记法



IP地址分类的好处

- ❖ 划分成不同类别的考虑
 - 各种网络差异很大, 有的网络拥有很多主机, 而有的网络拥有的主机数目很少。
 - 将IP地址划分成不同类别A、B、C可以满足不同用户的需求。
 - 当一个单位申请到一个IP地址时, 只是申请了一个网络号Net-id, 具体的主机号由各个单位自行分配。
- ❖ D类和E类使用较少
 - D类的多播地址主要留给IAB (因特网体系结构委员会) 使用。

路由器转发分组的步骤

- ❖ 先按所要找的IP地址中的网络号net-id把目的网络找到。
- ❖ 当分组到达目的网络后，再利用主机号host-id 将数据报直接交付给目的主机。
- ❖ 按照整数字节划分 net-id 字段和 host-id 字段，就可以使路由器在收到一个分组时能够更快地将地址中的网络号提取出来。

43

常用的三种类别的 IP 地址

IP 地址的使用范围

网络类别	最大网络数	第一个可用的网络号	最后一个可用的网络号	每个网络中最大的主机数
A	126 ($2^7 - 2$)	1	126	16,777,214
B	16,383 ($2^{14} - 1$)	128.1	191.255	65,534
C	2,097,151 ($2^{21} - 1$)	192.0.1	223.255.255	254

44

三种类别的IP地址

- ❖ 三个类别的IP地址中，2个特殊的Host-id含义：
 - ⚡ 全“0”的Host-id表示该IP地址是“本主机”所连接的单个网络地址。
 - ❖ 如IP地址为5.6.7.8，则网络地址为5.0.0.0;
 - ⚡ 全“1”的Host-id表示“所有(all)”，即该网络上的所有主机。

因为是A类地址，所以网络号占一个字节

45

三种类别的 IP 地址

- ❖ A类地址
 - ⚡ 网络号为126个 ($2^7 - 2$)：减2的原因是什么？
 - ⚡ (1) IP地址的全“0”表示“这个(This)”。
 - ⚡ (2) Net-id为全“0”，是保留地址，表示“本网络”。
 - ⚡ (3) Net-id为127，为本地软件的环路测试，本主机使用。
 - ⚡ 全部的IP地址为 2^{32} 个，A类IP地址共有 2^{31} 占50%。
- ❖ B类地址：共有 2^{30} 个，占25%。
- ❖ C类地址：共有 2^{29} 个，占12.5%。

46

一般不使用的特殊IP地址

Net-id	Host-id	源地址	目的地址	含义
0	0	可以	不可以	在本网络上的本主机
0	Host-id	可以	不可以	在本网络上的某个主机
全1	全1	不可以	可以	只在本网络上进行广播（各路由器均不转发）
Net-id	全1	不可以	可以	对Net-id上所有主机进行广播
127	任何数	可以	可以	用作本地软件进行环回测试用

47

IP 地址的一些重要特点

- (1) IP 地址是一种分等级的地址结构。分两个等级的好处是：
 - ❖ 第一，IP 地址管理机构在分配 IP 地址时只分配网络号，而剩下的主机号则由得到该网络号的单位自行分配。这样就方便了 IP 地址的管理。
 - ❖ 第二，路由器仅根据目的主机所连接的网络号来转发分组（而不考虑目的主机号），这样就可以使路由表中的项目数大幅度减少，从而减小了路由表所占的存储空间。

48

IP 地址的一些重要特点

(2) IP地址是标志一个主机（或路由器）和一条链路的接口。

❖ 当一个主机同时连接到两个网络上时，该主机就必须同时具有两个相应的 IP 地址，其网络号 net-id 必须是不同的。这种主机称为**多归属主机** (multihomed host)。

❖ 由于一个路由器至少应当连接到两个网络（这样它才能将 IP 数据报从一个网络转发到另一个网络），因此一个路由器至少应当有两个不同的 IP 地址。

49

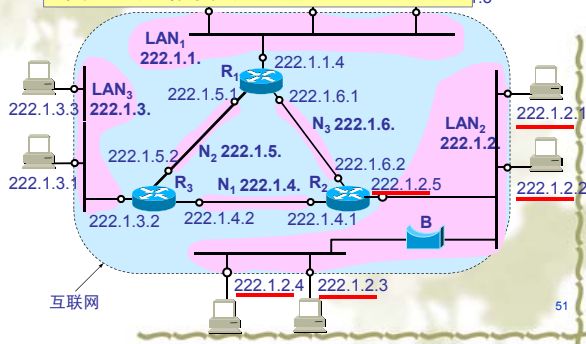
IP 地址的一些重要特点

(3) 用转发器或网桥连接起来的若干个局域网仍为一个网络，因此这些局域网都具有同样的网络号 net-id。

(4) 所有分配到网络号 net-id 的网络，范围很小的局域网，还是可能覆盖很大地理范围的广域网，都是平等的。

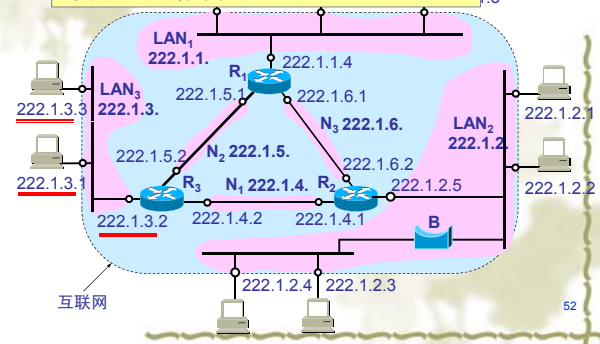
50

在同一个局域网上的主机或路由器的 IP 地址中的网络号必须是一样的。
图中的网络号就是 IP 地址中的 net-id



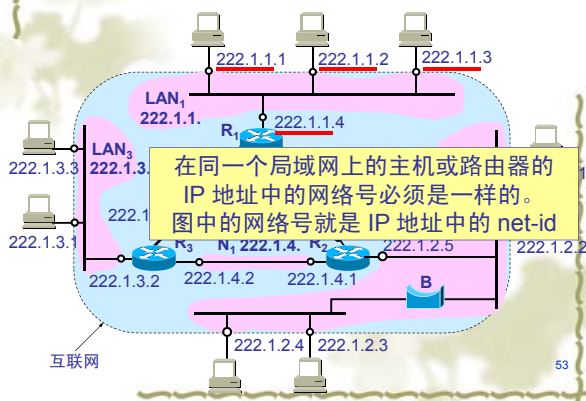
51

在同一个局域网上的主机或路由器的 IP 地址中的网络号必须是一样的。
图中的网络号就是 IP 地址中的 net-id



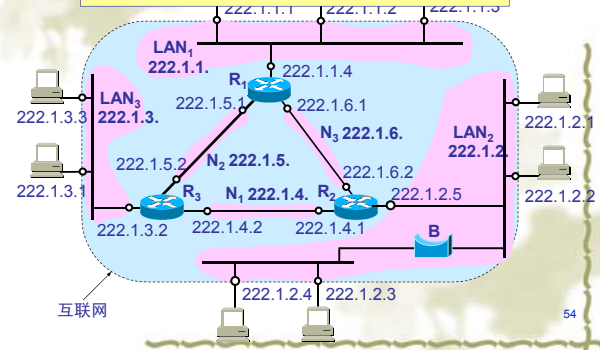
52

互联网中的 IP 地址

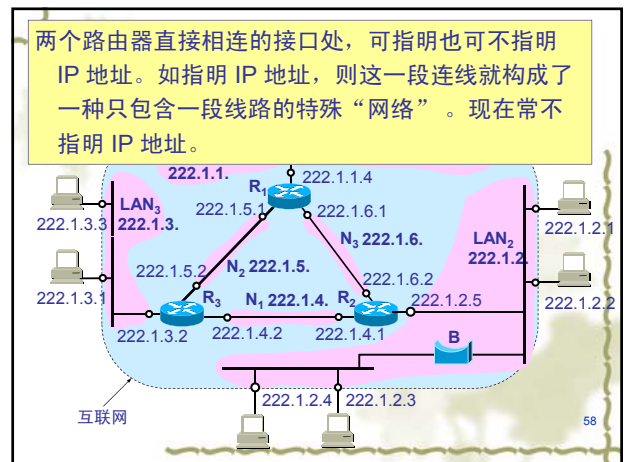
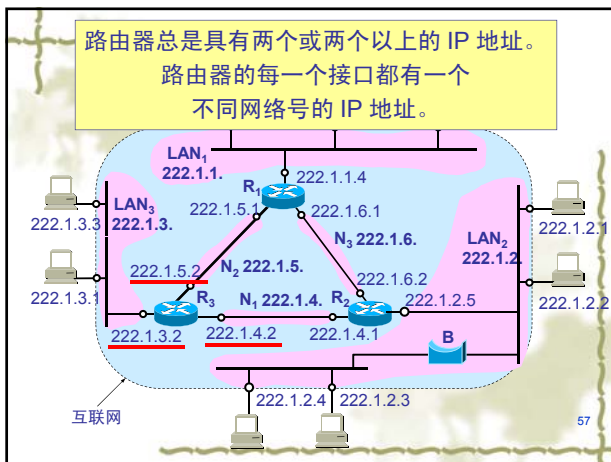
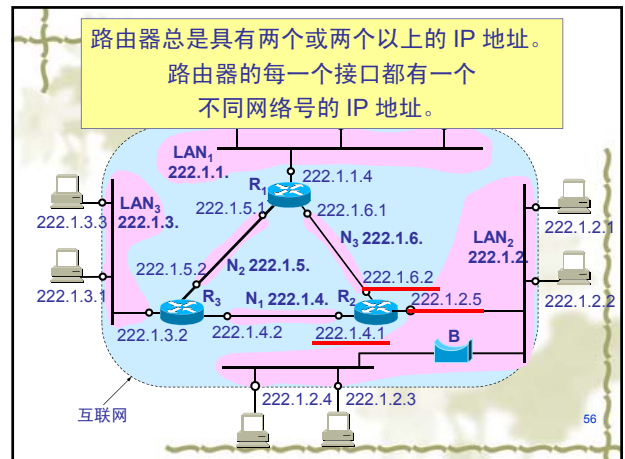
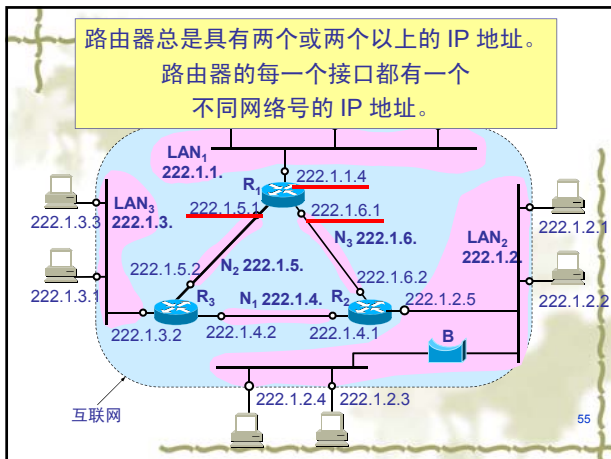


53

在同一个局域网上的主机或路由器的 IP 地址中的网络号必须是一样的。
图中的网络号就是 IP 地址中的 net-id

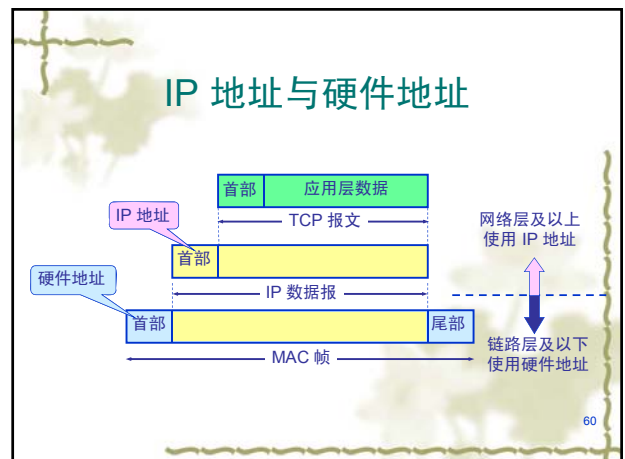


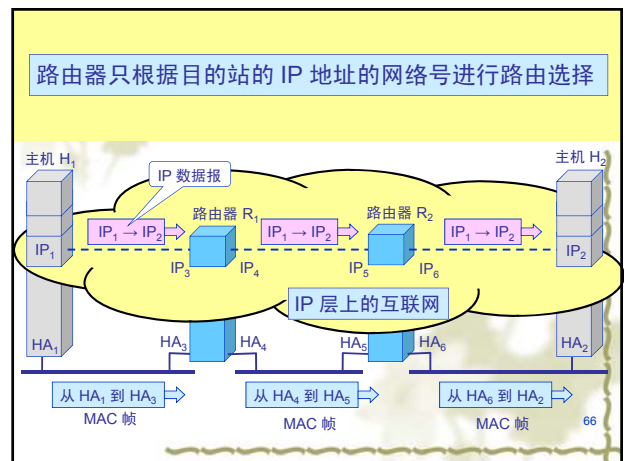
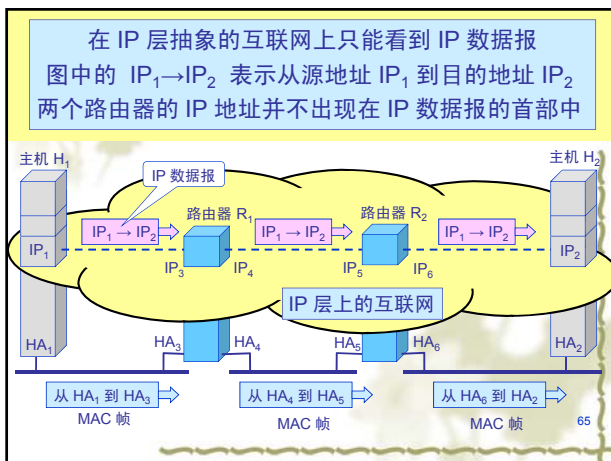
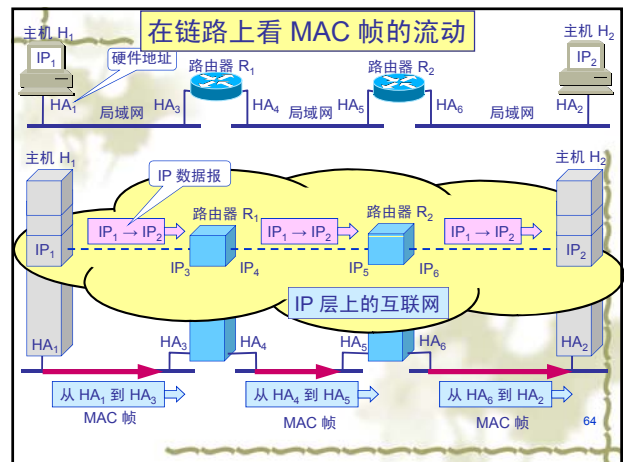
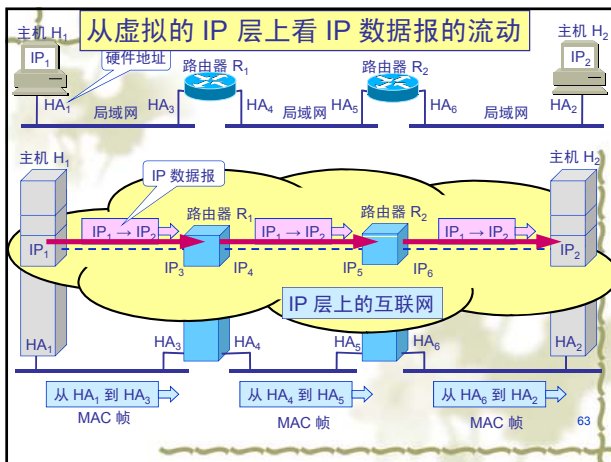
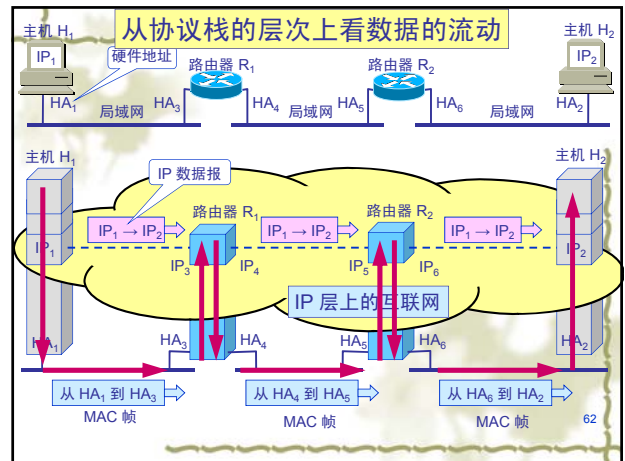
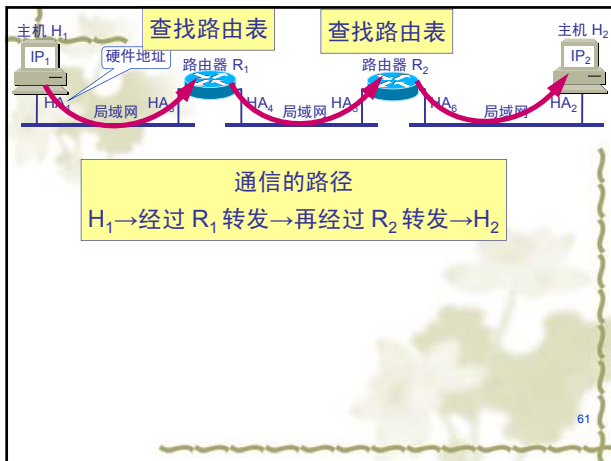
54

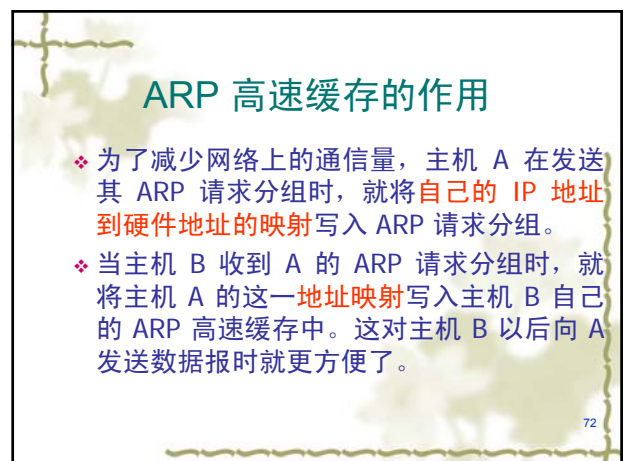
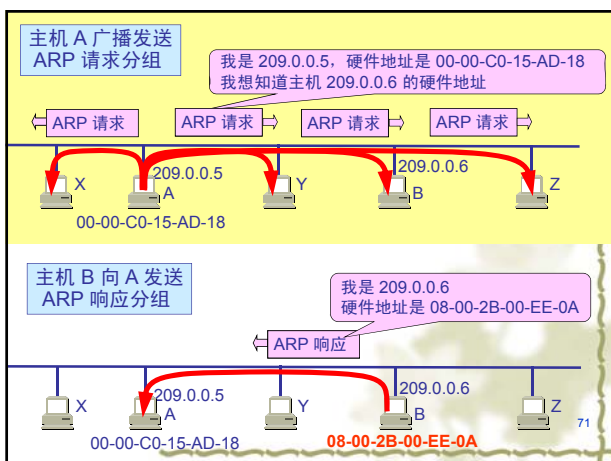
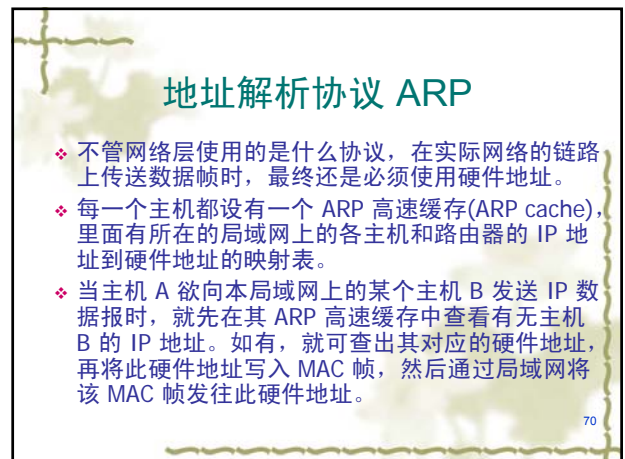
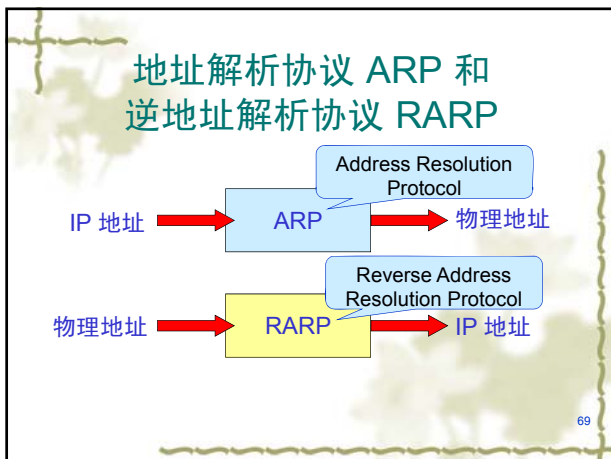
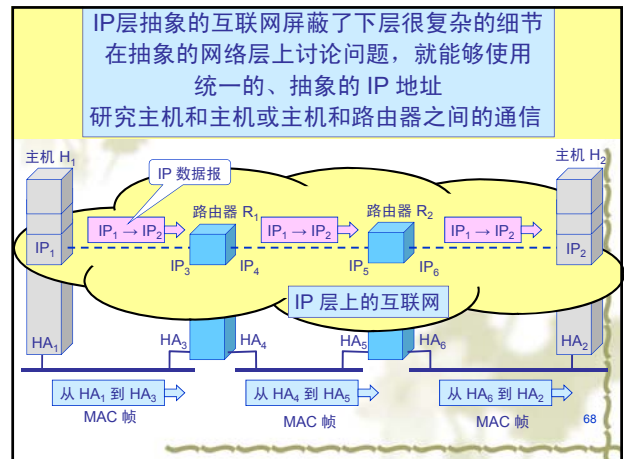
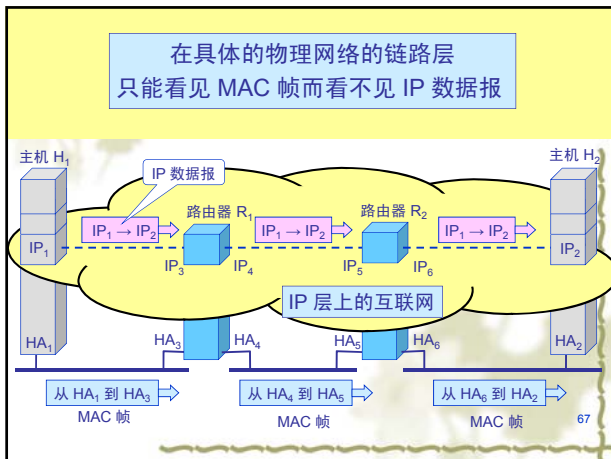


IP 地址与硬件地址

- ❖ 物理地址
 - 数据链路层和物理层使用的地址。
- ❖ IP 地址
 - 网络层和以上各层使用的地址。







应当注意的问题

- ❖ ARP 是解决**同一个局域网**上的主机或路由器的 IP 地址和硬件地址的映射问题。
- ❖ 如果所要找的主机和源主机不在同一个局域网，那么就要通过 ARP 找到一个位于本局域网上的某个路由器的硬件地址，然后把分组发送给这个路由器，让这个路由器把分组转发给下一个网络。剩下的工作就由下一个网络来做。

73

应当注意的问题（续）

- ❖ 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是不知道的。
- ❖ 只要主机或路由器要和**本网络**上的另一个已知 IP 地址的主机或路由器进行通信，ARP 协议就会自动地将该 IP 地址解析为链路层所需要的硬件地址。

74

使用ARP的四种典型情况

- ❖ 发送方是主机，要把IP数据报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。
- ❖ 发送方是主机，要把 IP 数据报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路由器的硬件地址。剩下的工作由这个路由器来完成。
- ❖ 发送方是路由器，要把 IP 数据报转发到本网络上的一个主机。这时用 ARP 找到目的主机的硬件地址。
- ❖ 发送方是路由器，要把 IP 数据报转发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路由器的硬件地址。剩下的工作由这个路由器来完成。

75

为什么我们不直接使用硬件地址进行通信？

- ❖ 由于全世界存在着各式各样的网络，它们使用不同的硬件地址。要使这些异构网络能够互相通信就必须进行非常复杂的硬件地址转换工作，因此几乎是不可能的事。
- ❖ 连接到因特网的主机都拥有统一的 IP 地址，它们之间的通信就像连接在同一个网络上那样简单方便，因为调用 ARP 来寻找某个路由器或主机的硬件地址都是由计算机软件自动进行的，对用户来说是看不见这种调用过程的。

76

逆地址解析协议 RARP

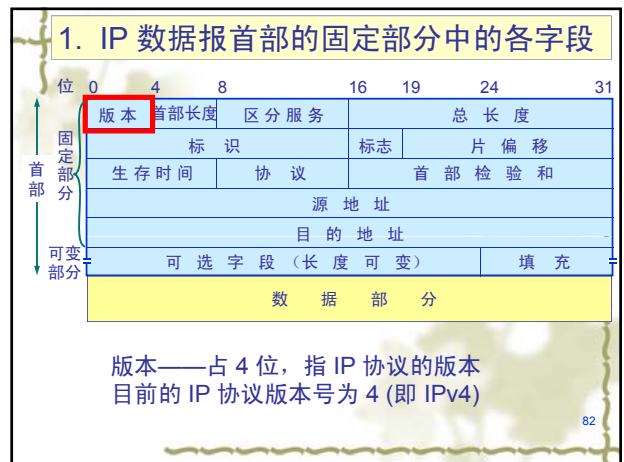
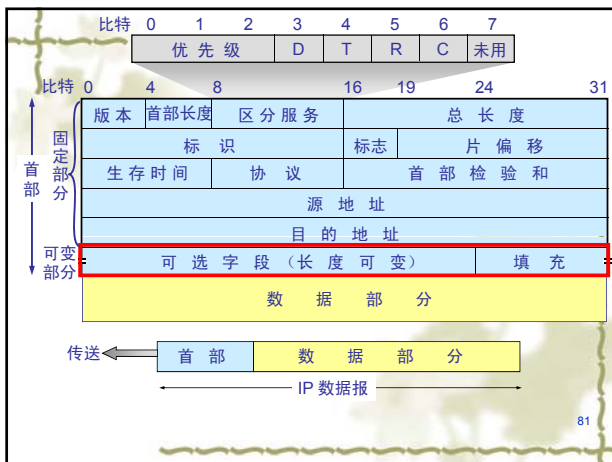
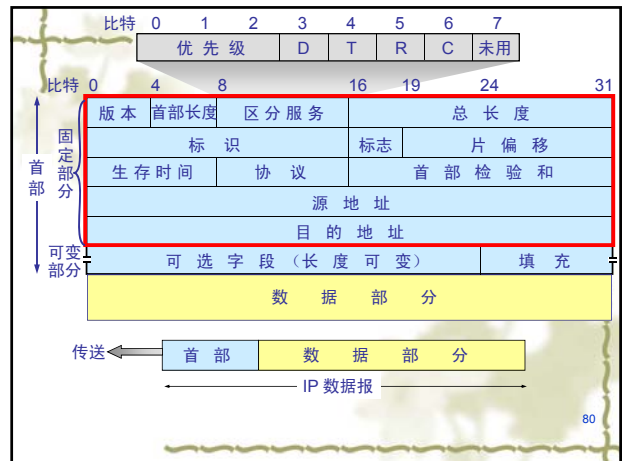
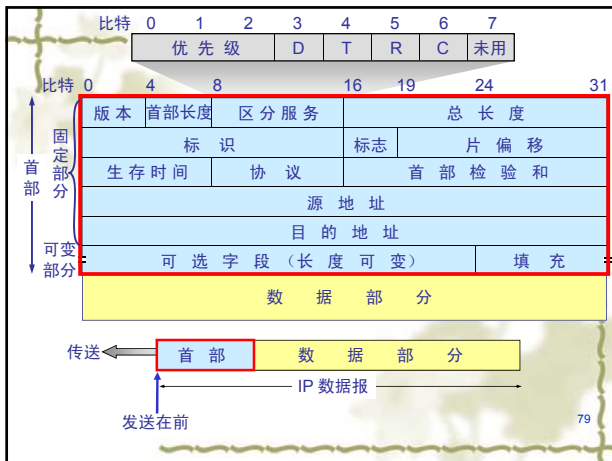
- ❖ 逆地址解析协议 RARP 使只知道自己硬件地址的主机能够知道其 IP 地址。
- ❖ 这种主机往往是无盘工作站，因此RARP协议目前已很少使用。
- ❖ RARP的基本思想
 - ❏ 1、无盘工作站启动时，首先从其接口卡中读取系统的硬件地址，然后发送一个RARP的请求分组，且封装在一个广播帧中；
 - ❏ 2、网络中有一个RARP服务器，上面存有MAC-IP映射配置文件，每当收到一个RARP请求，即读取配置文件，发现匹配时，用一个RARP应答回复。

77

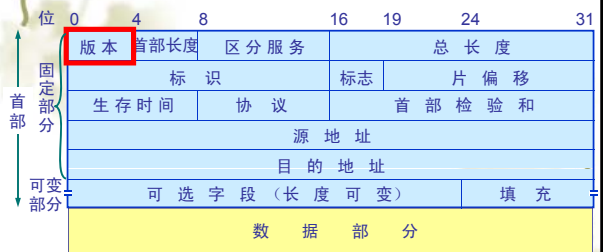
IP 数据报的格式

- ❖ 一个 IP 数据报由**首部**和**数据**两部分组成。
- ❖ 首部
 - ❏ 固定部分
 - ❖ 首部的前一部分是固定长度，共 20 字节，是所有 IP 数据报必须具有的。
 - ❏ 可变部分
 - ❖ 在首部的固定部分的后面是一些可选字段，其长度是可变的。
- ❖ 数据

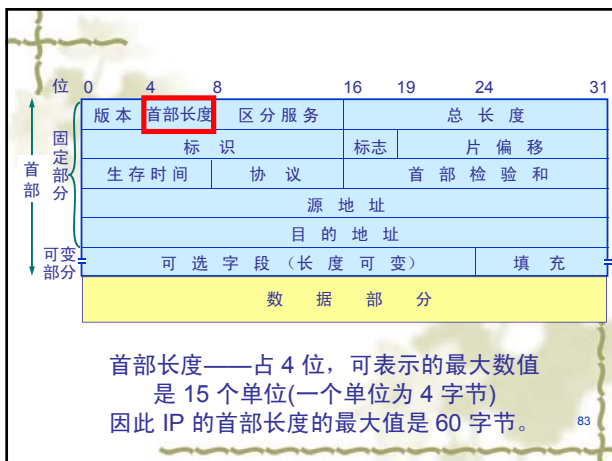
78



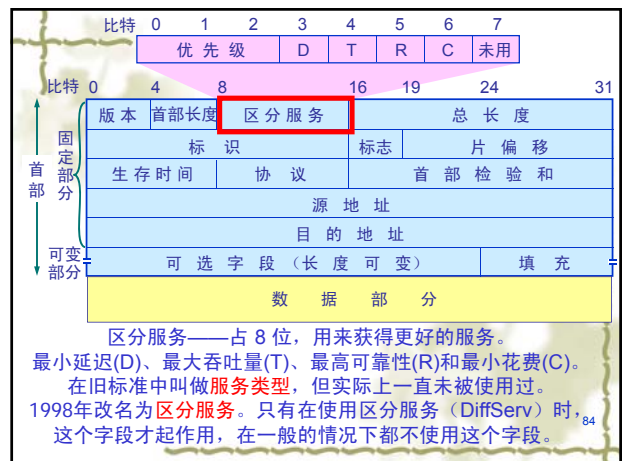
1. IP 数据报首部的固定部分中的各字段



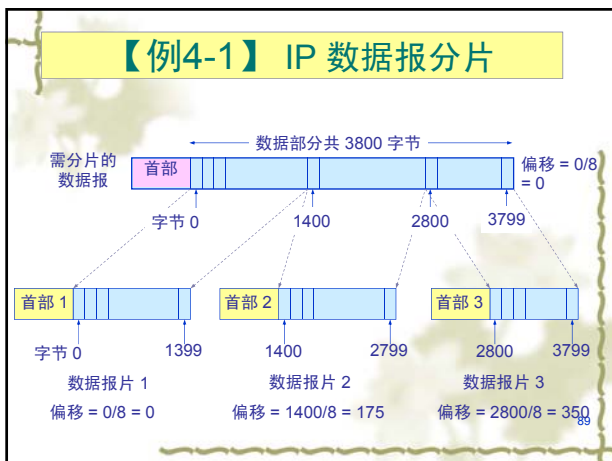
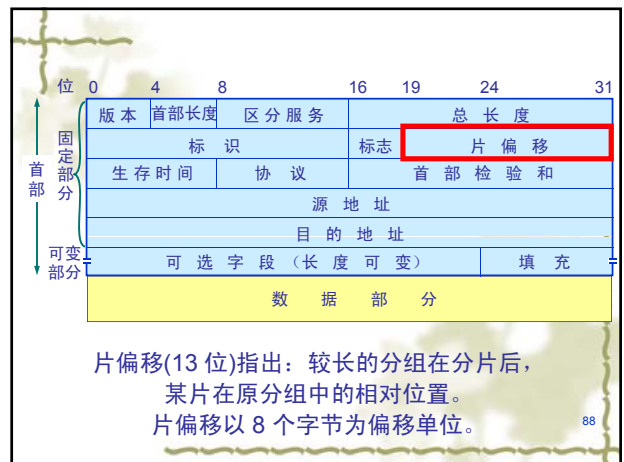
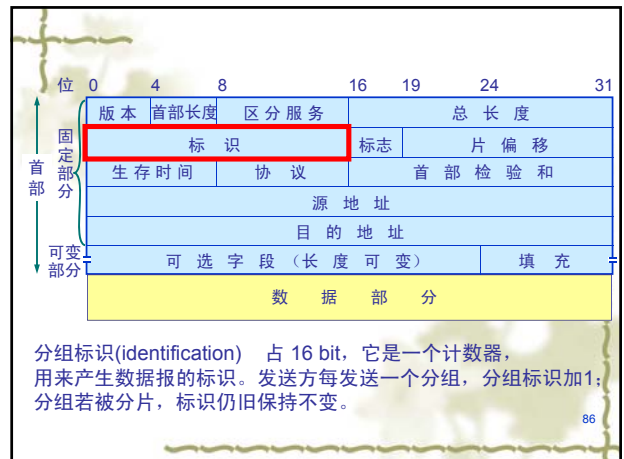
版本——占 4 位，指 IP 协议的版本
目前的 IP 协议版本号为 4 (即 IPv4)

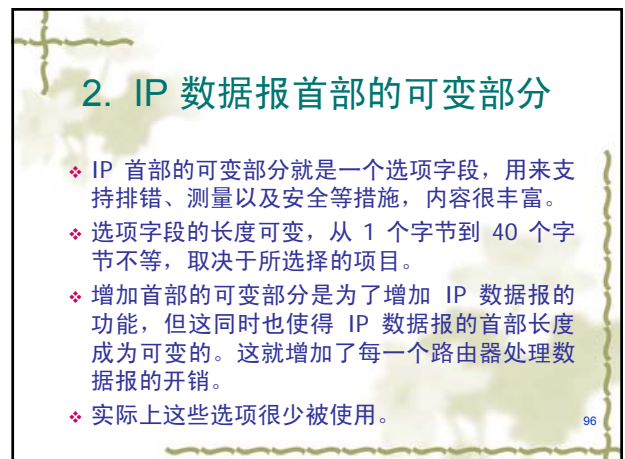
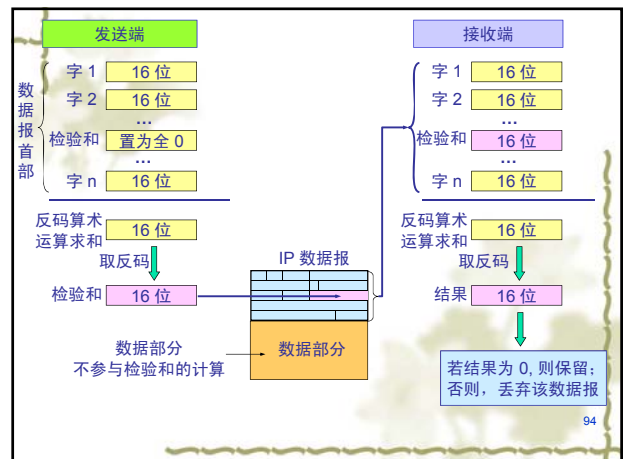
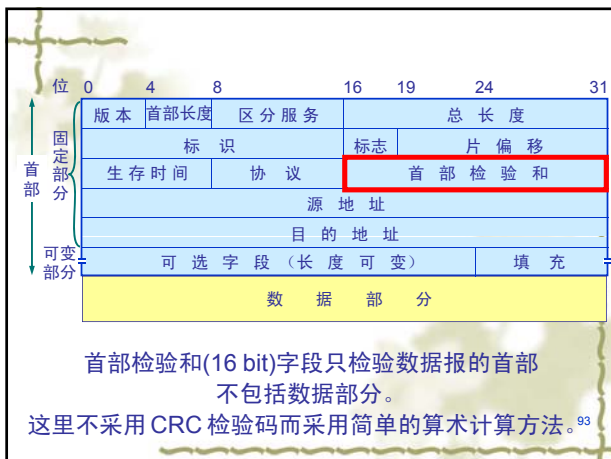
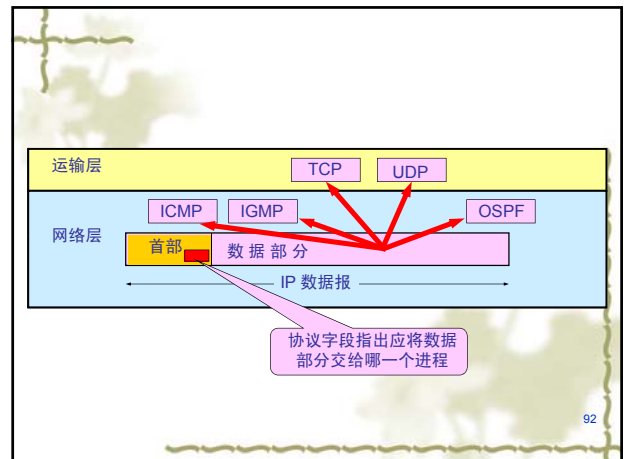
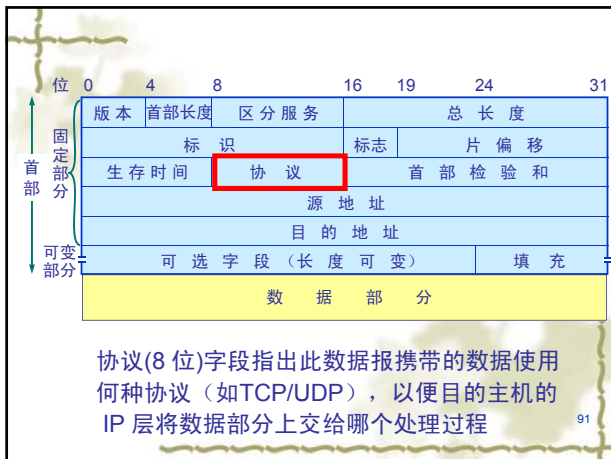


首部长度——占 4 位，可表示的最大数值是 15 个单位(一个单位为 4 字节)
因此 IP 的首部长度的最大值是 60 字节。



区分服务——占 8 位，用来获得更好的服务。
最小延迟(D)、最大吞吐量(T)、最高可靠性(R)和最小花费(C)。
在旧标准中叫做服务类型，但实际上一直未被使用过。
1998年改名为区分服务。只有在使用区分服务(DiffServ)时，这个字段才起作用，在一般的情况下都不使用这个字段。



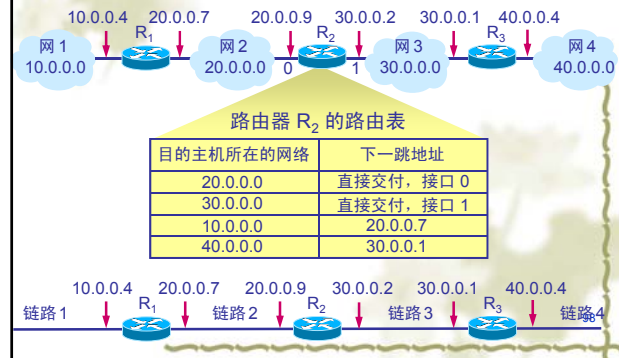


IP 层转发分组的流程

- ❖ 有四个 A 类网络通过三个路由器连接在一起。每一个网络上都可能有成千上万个主机。
- ❖ 可以想像，若按目的主机号来制作路由表，则所得出的路由表就会过于庞大。
- ❖ 但若按主机所在的网络地址来制作路由表，那么每一个路由器中的路由表就只包含 4 个项目。这样就可使路由表大大简化。

97

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）



查找路由表

根据目的网络地址就能确定下一跳路由器，这样做的结果是：

- ❖ IP 数据报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。

99

特定主机路由

- ❖ 分组转发大都是基于目的主机所在的网络，但也有特例。
- ❖ 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，例如对网络的连接或路由表排错时。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。

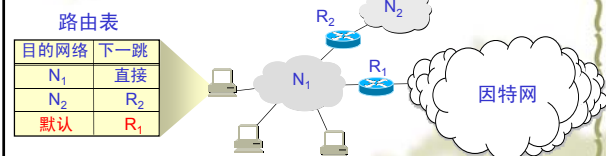
100

默认路由（default route）

- ❖ 路由器还可采用默认路由以减少路由表所占用的空间和搜索路由表所用的时间。
- ❖ 这种转发方式在一个网络只有很少的对外连接时是很有用的。
- ❖ 默认路由在主机发送 IP 数据报时往往更能显示出它的好处。
- ❖ 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。

101

只要目的网络不是 N₁ 和 N₂，就一律选择默认路由，把数据报先间接交付路由器 R₁，让 R₁ 再转发给下一个路由器。



102

实际中路由器如何转发分组

- ❖ IP 数据报的首部中没有地方可以用来指明“下一跳路由器的 IP 地址”。
- ❖ 当路由器收到待转发的数据报，不是将下一跳路由器的 IP 地址填入 IP 数据报，而是送交下层的网络接口软件。
- ❖ 网络接口软件使用 ARP 负责将下一跳路由器的 IP 地址转换成硬件地址，并将此硬件地址放在链路层的 MAC 帧的首部，然后根据这个硬件地址找到下一跳路由器。

103

分组转发算法

- (1) 从数据报的首部提取目的主机的 IP 地址 D ，得出目的的网络地址为 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 ；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，则把数据报传送给路由表中所指明的下一跳路由器；否则，执行(4)。
- (4) 若路由表中有到达网络 N 的路由，则把数据报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) 报告转发分组出错。

104

第4章 网络层

- ❖ 4.1 网络层提供的服务
- ❖ 4.2 网际协议IP
- ❖ 4.3 划分子网和构造超网
- ❖ 4.4 网际控制报文协议ICMP
- ❖ 4.5 因特网的路由选择协议
- ❖ 4.6 IP多播
- ❖ 4.7 其他网络举例

105

划分子网

- ❖ 从两级 IP 地址到三级 IP 地址
 - 在 ARPANET 的早期，IP 地址的设计确实不够合理。
 - ❖ IP 地址空间的利用率有时很低。
 - ❖ 给每一个物理网络分配一个网络号会使路由表变得太大因而使网络性能变坏。
 - ❖ 两级的 IP 地址不够灵活。

106

三级的 IP 地址

- ❖ 从 1985 年起在 IP 地址中又增加了一个“子网号字段”，使两级的 IP 地址成为三级的 IP 地址。
- ❖ 这种做法叫作划分子网(subnetting)。划分子网已成为因特网的正式标准协议。

107

划分子网的基本思路

- ❖ 划分子网纯属一个单位内部的事情。这个单位对外仍然表现为没有划分子网的网络。
- ❖ 从主机号借用若干个比特作为子网号 subnet-id，而主机号 host-id 也就相应减少了若干个比特。

IP地址 ::= {<网络号>, <子网号>, <主机号>}

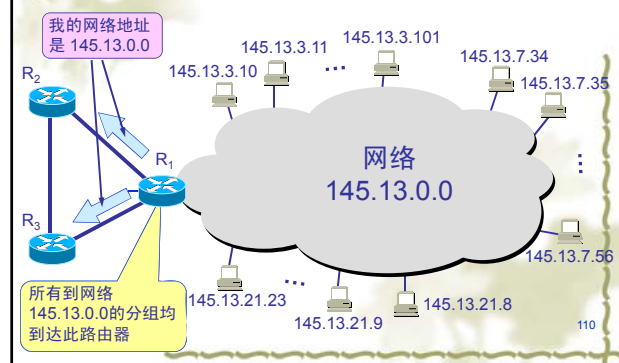
108

划分子网的基本思路（续）

- ❖ 凡是从其他网络发送给本单位某个主机的 IP 数据报仍然是根据 IP 数据报的**目的网络号 net-id**，先找到连接在**本单位网络上的路由器**。
- ❖ 然后**此路由器**在收到 IP 数据报后，再按目的网络号 net-id 和子网号 subnet-id 找到目的子网。
- ❖ 最后就将 IP 数据报直接交付目的主机。

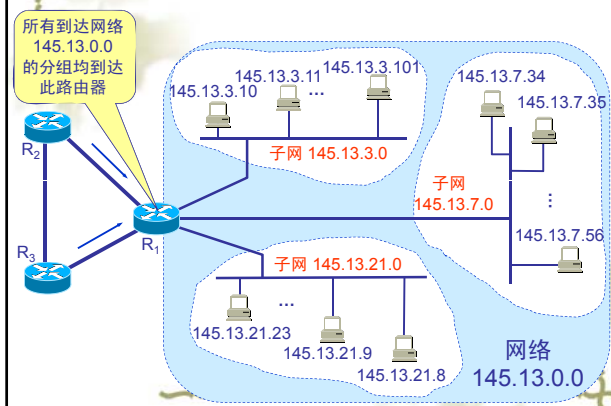
109

一个未划分子网的 B 类网络 145.13.0.0



110

划分为三个子网后对外仍是一个网络



划分子网后变成了三级结构

- ❖ 当没有划分子网时，IP 地址是两级结构。地址的网络号字段也就是 IP 地址的“**因特网部分**”，而主机号字段是 IP 地址的“**本地部分**”。
- ❖ 划分子网后 IP 地址就变成了**三级结构**。
- ❖ 划分子网只是把 IP 地址的**主机号 host-id** 这部分进行再划分，而不改变 IP 地址原来的**网络号 net-id**。

112

子网掩码

- ❖ 从一个 IP 数据报的首部并**无法判断**源主机或目的主机所连接的网络是否进行了子网划分。
- ❖ 使用**子网掩码 (subnet mask)** 可以找出 IP 地址中的子网部分。

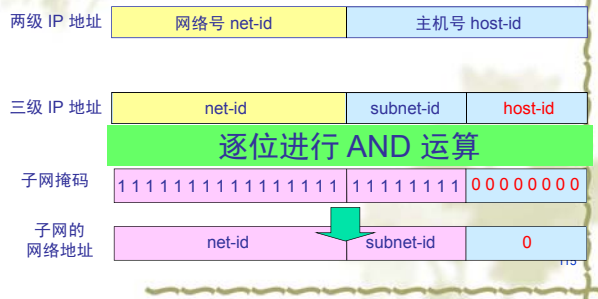
113

IP 地址的各字段和子网掩码

	net-id		host-id	
两级 IP 地址	145	.	13	3 . 10
	net-id		subnet-id	host-id
三级 IP 地址	145	.	13	3 . 10
	子网号为 3 的网络的网络号			主机号
子网掩码	1111111111111111			11111111 00000000
子网的网络地址	145	.	13	3 . 0

114

(IP 地址) AND (子网掩码) = 网络地址



默认子网掩码

A 类地址	网络地址	net-id	host-id 为全 0
	默认子网掩码 255.0.0.0	11111111	000000000000000000000000
B 类地址	网络地址	net-id	host-id 为全 0
	默认子网掩码 255.255.0.0	1111111111111111	0000000000000000
C 类地址	网络地址	net-id	host-id 为全 0
	默认子网掩码 255.255.255.0	11111111111111111111	00000000

子网掩码是一个重要属性

- ❖ 子网掩码是一个网络或一个子网的重要属性。
- ❖ 路由器在和相邻路由器交换路由信息时，必须把自己所在网络（或子网）的子网掩码告诉相邻路由器。
- ❖ 路由器的路由表中的每一个项目，除了要给出目的网络地址外，还必须同时给出该网络的子网掩码。
- ❖ 若一个路由器连接在两个子网上就拥有两个网络地址和两个子网掩码。

117

【例4-2】已知 IP 地址是 141.14.72.24，子网掩码是 255.255.192.0。试求网络地址。

(a) 点分十进制表示的 IP 地址	141 . 14 . 72 . 24
(b) IP 地址的第 3 字节是二进制	141 . 14 . 01001000 . 24
(c) 子网掩码是 255.255.192.0	11111111 11111111 11000000 00000000
(d) IP 地址与子网掩码逐位相与	141 . 14 . 01000000 . 0
(e) 网络地址（点分十进制表示）	141 . 14 . 64 . 0

118

【例4-3】在上例中，若子网掩码改为 255.255.224.0。试求网络地址，讨论所得结果。

(a) 点分十进制表示的 IP 地址	141 . 14 . 72 . 24
(b) IP 地址的第 3 字节是二进制	141 . 14 . 01001000 . 24
(c) 子网掩码是 255.255.224.0	11111111 11111111 11100000 00000000
(d) IP 地址与子网掩码逐位相与	141 . 14 . 01000000 . 0
(e) 网络地址（点分十进制表示）	141 . 14 . 64 . 0

不同的子网掩码得出相同的网络地址。
但不同的掩码的效果是不同的。

119

使用子网掩码的分组转发过程

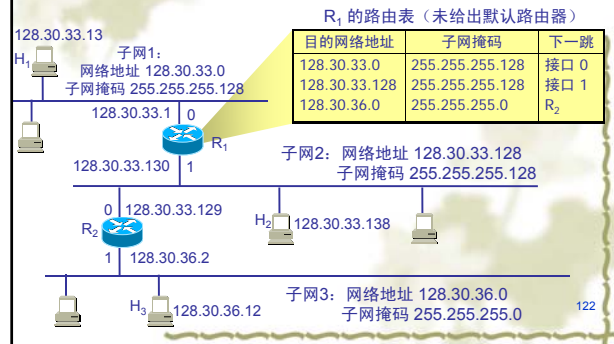
- ❖ 在不划分子网的两级 IP 地址下，从 IP 地址得出网络地址是个很简单的事。
- ❖ 但在划分子网的情况下，从 IP 地址却不能唯一地得出网络地址来，这是因为网络地址取决于那个网络所采用的子网掩码，但数据报的首部并没有提供子网掩码的信息。
- ❖ 因此分组转发的算法也必须做相应的改动。

120

在划分子网的情况下路由器转发分组的算法

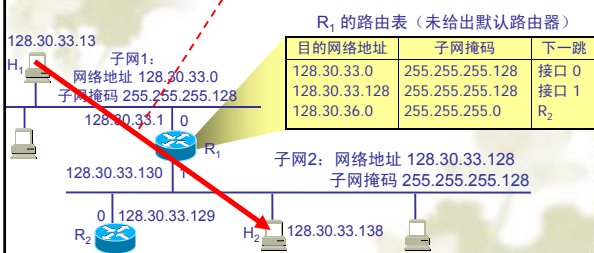
- (1) 从收到的分组的首部提取目的 IP 地址 D 。
- (2) 先判断是否直接交付。先用各网络的子网掩码和 D 逐位相“与”，看是否和相应的网络地址匹配。若匹配，则将分组直接交付。否则就是间接交付，执行(3)。
- (3) 若路由表中有目的地址为 D 的特定主机路由，则将分组传送给指定的下一跳路由器；否则，执行(4)。
- (4) 对路由表中的每一行的子网掩码和 D 逐位相“与”，若其结果与该行的目的网络地址匹配，则将分组传送给该行指定的下一跳路由器；否则，执行(5)。
- (5) 若路由表中有一个默认路由，则将分组传送给路由表中所指定的默认路由器；否则，执行(6)。
- (6) 报告转发分组出错。

【例4-4】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。



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



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。

主机 H_1 首先将本子网的子网掩码 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

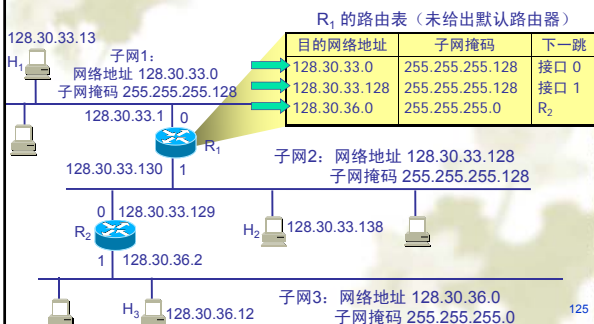
255 就是二进制的全 1，因此 255 AND xyz = xyz，这里只需计算最后的 128 AND 138 即可。

128 → 10000000
138 → 10001010

逐比特 AND 操作后：10000000 → 128

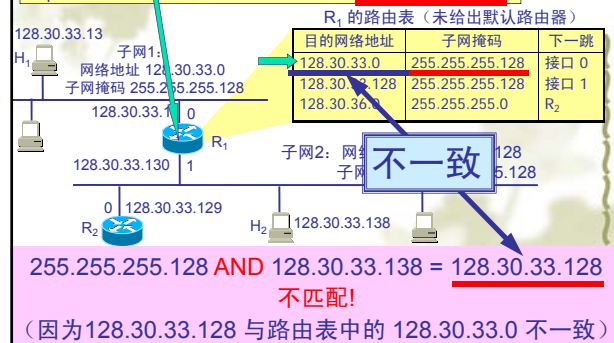
逐比特 AND 操作
255.255.255.128
128.30.33.138
128.30.33.128 ≠ H_1 的网络地址

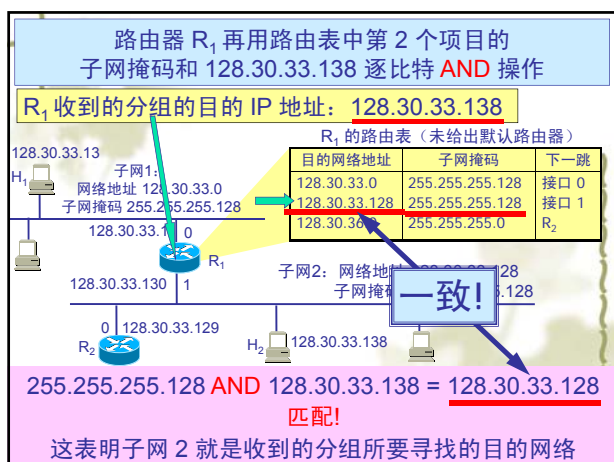
因此 H_1 必须把分组传送到路由器 R_1 ，然后逐项查找路由表



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





设计IP地址方案应考虑的问题

- ❖ 使用A、B、C类地址的单位, 通常又将主机部分分为子网号和主机号两个部分, 用于将内部网络划分为若干子网, 如B类网络:
 - 10 | 网络号 | 子网号 | 主机号
- ❖ 在设计IP地址方案之前, 应考虑以下几个问题:
 - 是否需将网络连入Internet;
 - 是否需划分为若干子网以方便网络管理;
 - 是采用静态IP地址分配还是动态IP地址分配;

128

非Internet连接的网络地址

- ❖ RFC1918, Address Allocation for Private Internets中定义了非Internet连接的网络地址。
- ❖ 留出三类网络号, 给不连到Internet上的专用网用, 分别用于A, B和C类IP网, 具体如下:
 - 10.0.0.0~10.255.255.255
 - 172.16.0.0~172.31.255.255
 - 192.168.0.0~192.168.255.255
- ❖ 如果计划将网络连入Internet, 则需要向ISP申请一个或一组网络地址。

129

子网掩码部分需掌握的内容(1)

- ❖ 子网掩码: 除主机ID全置0,其余全置1
- ❖ 例题:
 - 某单位申请得到C类网络地址192.37.12.0, 内部有2个LAN且没有扩充计划, 给出合理的子网划分方案。
 - 每人都尝试着分析一下?
 - 子网掩码? 每个子网可容纳的主机数? 地址范围?

130

例题解答

- ❖ 需要几位子网号?
 - 采用2位子网号
 - 支持 $2^2-2=2$ 个子网 (全0和全1的子网不用)
- ❖ 子网掩码是多少?
 - 255.255.255.11000000
 - 即为: 255.255.255.192
- ❖ 每个子网多少主机? 地址范围?
 - 每个子网可有 $2^6-2=62$ 台主机? 为什么-2

131

一个网络地址可分配的主机数

- ❖ 一个网络地址可分配的最大主机数是
 - 2^n-2
 - n是主机部分的位数, 全0地址表示本网络, 全1地址表示广播地址。

132

子网掩码的计算方法

- ❖ 确定所处网络环境的网段数后，确定大于所需子网数，且最接近该数的2的幂数。例如，若需要6个子网，则大于6且接近6的2的幂为8。
- ❖ 确定2的幂数的指数，该指数为子网化所需的位数，例如： $8=2^3$ ，则子网化所需的位数为3。
- ❖ 将子网化所需位数各高位设为1，来创建二进制位掩码，然后将二进制转换成十进制。例如：对于C类网，二进制掩码为11100000，则掩码为255.255.255.224。若为B类网络，则掩码为255.255.224.0

133

子网掩码部分需掌握的内容(2)

- ❖ 标准子网掩码
 - ↪ A类:255.0.0.0
 - ❖ IP地址：1.0.0.0~127.255.255.255
 - ↪ B类:255.255.0.0
 - ❖ IP地址：128.0.0.0~191.255.255.255
 - ↪ C类: 255.255.255.0
 - ❖ IP地址：192.0.0.0~223.255.255.255
- ❖ 例1：IP地址是131.107.33.10，求网络ID？
- ❖ 例2：IP地址是193.1.1.200，求网络ID？

134

子网掩码部分需要掌握内容(3)

- ❖ 非标准子网掩码
 - ↪ 例1：已知主机IP地址是131.107.33.10，子网掩码是255.255.224.0，求子网地址？
 - ❖ 224.0 AND 33.10
 - ❖ $11100000 \text{ AND } 00100001 = 00100000$
 - ❖ 结果为：131.107.32.0
 - ↪ 例2：网络193.1.1.0，子网掩码是255.255.255.224。问：这个子网掩码可划分几个子网，每个子网的子网地址和主机IP地址范围是什么？（下课练习）

135

网络地址转换 NAT (Network Address Translation)

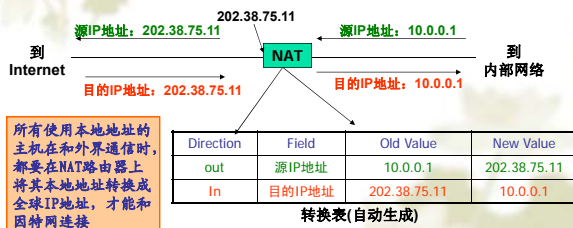
- ❖ 根据作用范围的不同，分两种IP地址
 - ↪ 全局IP地址：用于Internet上的分组转发，要求在Internet范围内唯一，
 - ↪ 私有IP地址：用于指定网络内的分组转发，只要求在指定网内部唯一

NAT：实现网络内的多台主机共享一个全局的IP地址



136

网络地址转换的过程



所有使用本地地址的主机在和外界通信时，都要在NAT路由器上将其本地地址转换成全球IP地址，才能和因特网连接

NAT操作会改变分组的IP头标，因此要重新计算校验和

137

NAT的分类

- ❖ 静态NAT
 - ↪ 将内部网络中的每个主机都永久映射成外部网络中的某个合法地址
- ❖ 动态地址NAT
 - ↪ 在外部网络中定义了一系列的合法地址，采用动态分配的方法映射到内部网络
- ❖ 网络地址端口转换NAPT
 - ↪ 把内部地址映射到外部网络的一个IP地址的不同端口上

138

无分类编址CIDR

划分子网在一定程度上缓解了因特网在发展中遇到的困难。然而在 1992 年因特网仍然面临三个必须尽早解决的问题，这就是：

- ❖ B 类地址在 1992 年已分配了近一半，眼看就要在 1994 年 3 月全部分配完毕！
- ❖ 因特网主干网上的路由表中的项目数急剧增长（从几千个增长到几万个）。
- ❖ 整个 IPv4 的地址空间最终将全部耗尽。

139

IP地址问题的演进

- ❖ 1987 年，RFC 1009 就指明了在一个划分子网的网络中可同时使用几个不同的子网掩码。使用**变长子网掩码 VLSM** (Variable Length Subnet Mask)可进一步提高 IP 地址资源的利用率。
- ❖ 在 VLSM 的基础上又进一步研究出无分类编址方法，它的正式名字是**无分类域间路由选择 CIDR** (Classless Inter-Domain Routing)。

140

CIDR主要的特点

- ❖ CIDR 消除了传统的 A 类、B 类和 C 类地址以及划分子网的概念，因而可以更加有效地分配 IPv4 的地址空间。
- ❖ CIDR 使用各种长度的“**网络前缀**” (network-prefix)来代替分类地址中的网络号和子网号。
- ❖ IP 地址从三级编址（使用子网掩码）又回到了两级编址。

141

无分类的两级编址

- ❖ 无分类的两级编址的记法是：

IP地址 ::= {<网络前缀>, <主机号>}

- ❖ CIDR 使用“**斜线记法**” (slash notation)，或称为CIDR记法，即在 IP 地址后面加上一个斜线“/”，然后写上网络前缀所占的比特数（这个数值对应于三级编址中子网掩码中比特 1 的个数）。
- ❖ CIDR 将网络前缀都相同的连续的IP地址组成“**CIDR 地址块**”。

142

CIDR地址块

- ❖ 128.14.32.0/20 表示的地址块共有 2^{12} 个地址（因为**斜线后面的 20 是网络前缀的位数**，所以这个地址的主机号是 12 位）。
- ❖ 这个地址块的起始地址是 128.14.32.0。
- ❖ 在不需要指出地址块的起始地址时，也可将这样的地址块简称为“**/20 地址块**”。
- ❖ 128.14.32.0/20 地址块的**最小地址**：128.14.32.0
- ❖ 128.14.32.0/20 地址块的**最大地址**：128.14.47.255
- ❖ 全 0 和全 1 的主机号地址一般不使用。

143

128.14.32.0/20 表示的地址（ 2^{12} 个地址）

最小地址	10000000 00001110 00100000 00000000
	10000000 00001110 00100000 00000001
	10000000 00001110 00100000 00000010
	10000000 00001110 00100000 00000011
	10000000 00001110 00100000 00000100
	10000000 00001110 00100000 00000101
	...
	10000000 00001110 00101111 11111011
	10000000 00001110 00101111 11111100
	10000000 00001110 00101111 11111101
	10000000 00001110 00101111 11111110
最大地址	10000000 00001110 00101111 11111111

所有地址的 20 位前缀都是一样的

路由聚合(route aggregation)

- ❖ 一个 CIDR 地址块可以表示很多地址，这种地址的聚合常称为**路由聚合**，它使得路由表中的一个项目可以表示很多个（例如上千个）原来传统分类地址的路由。
- ❖ 路由聚合也称为**构成超网**(supernetting)。
- ❖ CIDR 虽然不使用子网了，但仍然使用“**掩码**”这一名词（但不叫子网掩码）。
- ❖ 对于 /20 地址块，它的掩码是 20 个连续的 1。斜线记法中的数字就是掩码中 1 的个数。

145

CIDR记法的其他形式

- ❖ 10.0.0.0/10 可简写为 10/10，也就是把点分十进制中低位连续的 0 省略。
- ❖ 10.0.0.0/10 隐含地指出 IP 地址 10.0.0.0 的掩码是 255.192.0.0。此掩码可表示为

11111111 11000000 00000000 00000000
255 192 0 0

掩码中有 10 个连续的 1

- ❖ 网络前缀的后面加一个星号 * 的表示方法

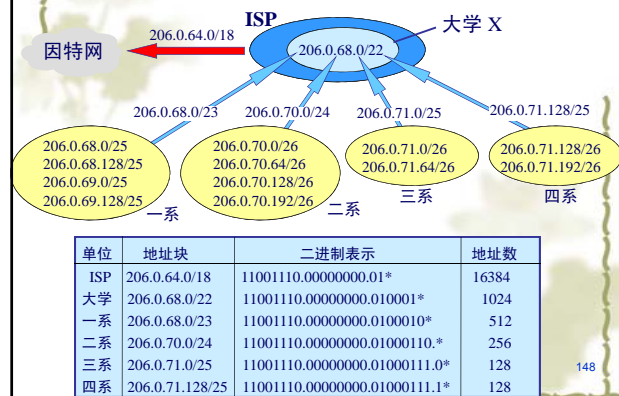
146

构成超网

- ❖ 前缀长度不超过 23 位的 CIDR 地址块都包含了多个 C 类地址。
- ❖ 这些 C 类地址合起来就构成了**超网**。
- ❖ CIDR地址块中的地址数一定是2的整数次幂。
- ❖ 网络前缀越短，其地址块所包含的地址数就越多。而在三级结构的IP地址中，划分子网是使网络前缀变长。

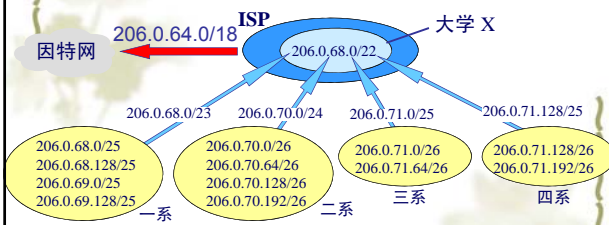
147

CIDR 地址块划分举例



148

CIDR 地址块划分举例



最长前缀匹配

- ❖ 使用 CIDR 时，路由表中的每个项目由“网络前缀”和“下一跳地址”组成。在查找路由表时可能会得到不止一个匹配结果。
- ❖ 应当从匹配结果中选择具有最长网络前缀的路由：**最长前缀匹配**(longest-prefix matching)。
- ❖ 网络前缀越长，其地址块就越小，因而路由就越具体(more specific)。
- ❖ 最长前缀匹配又称为**最长匹配**或**最佳匹配**。

150

最长前缀匹配举例

收到的分组的目的地址 $D = 206.0.71.130$

路由表中的项目: 206.0.68.0/22 (大学)
206.0.71.128/25 (四系)

查找路由表中的第 1 个项目

第 1 个项目 206.0.68.0/22 的掩码 M 有 22 个连续的 1。

$M = 11111111\ 11111111\ 11111100\ 00000000$

因此只需把 D 的第 3 个字节转换成二进制。

$M = 11111111\ 11111111\ 11111100\ 00000000$

AND	$D =$	206.	0.	01000111.	0
		206.	0.	01000100.	0

与 206.0.68.0/22 匹配

151

最长前缀匹配举例

收到的分组的目的地址 $D = 206.0.71.130$

路由表中的项目: 206.0.68.0/22 (大学)
206.0.71.128/25 (四系)

再查找路由表中的第 2 个项目

第 2 个项目 206.0.71.128/25 的掩码 M 有 25 个连续的 1。

$M = 11111111\ 11111111\ 11111111\ 10000000$

因此只需把 D 的第 4 个字节转换成二进制。

$M = 11111111\ 11111111\ 11111111\ 10000000$

AND	$D =$	206.	0.	71.	10000010
		206.	0.	71.	10000000

与 206.0.71.128/25 匹配

152

最长前缀匹配

$D \text{ AND } (11111111\ 11111111\ 11111100\ 00000000)$
= 206.0.68.0/22 匹配

$D \text{ AND } (11111111\ 11111111\ 11111111\ 10000000)$
= 206.0.71.128/25 匹配

❖ 选择两个匹配的地址中更具体的一个, 即选择**最长前缀的地址**。

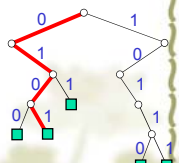
153

使用二叉线索查找路由表

- ❖ 当路由表的项目数很大时, 怎样设法减小路由表的查找时间就成为一个非常重要的问题。
- ❖ 为了进行更加有效的查找, 通常是将无分类编址的路由表存放在一种层次的数据结构中, 然后自上而下地按层次进行查找。这里最常用的就是**二叉线索**(binary trie)。
- ❖ IP 地址中从左到右的比特值决定了从根结点逐层向下层延伸的路径, 而二叉线索中的各个路径就代表路由表中存放的各个地址。
- ❖ 为了提高二叉线索的查找速度, 广泛使用了各种压缩技术。

用5个前缀构成的二叉线索

32 位的 IP 地址	唯一前缀
01000110 00000000 00000000 00000000	0100
01010110 00000000 00000000 00000000	0101
01100001 00000000 00000000 00000000	011
10110000 00000010 00000000 00000000	10110
10110111 00001010 00000000 00000000	10111



155

MTU

- ❖ MTU(Maximum Transfer Unit)最大传送单元
- ❖ IP层下面的每一种数据链路层都有其自己的帧格式, **帧中数据字段**的最大长度为MTU。
- ❖ 不同的链路层有不同的MTU值
 - 令牌环 (16Mbps): 17914字节
 - 令牌环 (4Mbps): 4464字节
 - FDDI: 4352字节
 - 以太网: 1500字节
 - X.25: 576字节
 - PPP: 296字节



156