



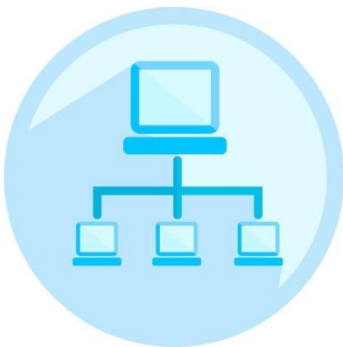
# 计算机网络



顾 军

计算机学院

[jgu@cumt.edu.cn](mailto:jgu@cumt.edu.cn)





# 专题4：数据包怎么在互联网中寻路和转发



- 应用层(application layer)
- 运输层(transport layer)
- 网络层(network layer)
- 数据链路层(data link layer)
- 物理层(physical layer)





## Q11: 什么是划分子网 ?

- 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。





# IP 地址空间的利用率有时很低

- 传统的 A 类、B 类和 C 类地址的概念会造成地址分配的浪费
  - 比如，一个网络(比如MIT的网络)分配了一个A类地址，那么该网络将容许16777216个主机。如果该网络无法用完这些IP地址，这些IP地址将无法被其他网络使用。
  - 再如，C类地址199.165.145必须作为整个网络存在，如果只有10台主机，那么将会有200多个IP地址被浪费。





## 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 地址变成**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。

IP地址 ::= {<网络号>, <子网号>, <主机号>}





# 子网号的出现

IP 地址 ::= [ 网络号, 主机号 ]

IP 地址 ::= [ 网络号, 子网号, 主机号 ]

- 划分子网只是把 IP 地址的主机号 host-id 这部分进行再划分，得到新的子网号 subnet-id 和主机号 host-id，而不改变 IP 地址原来的网络号 net-id。





# 划分子网的好处

- 子网编址的初衷是为了避免小型或微型网络浪费IP地址，减轻网络地址数不够的负担；
- 其次，可以重新组合网络的通信量
  - 将一个大规模的物理网络划分成几个小规模子网后，各个子网在逻辑上独立；
  - 如果没有路由器的转发，子网之间的主机不能相互通信，因此可以减少网络阻塞，减少网络的广播。





## Q12: 谁负责划分子网 ?

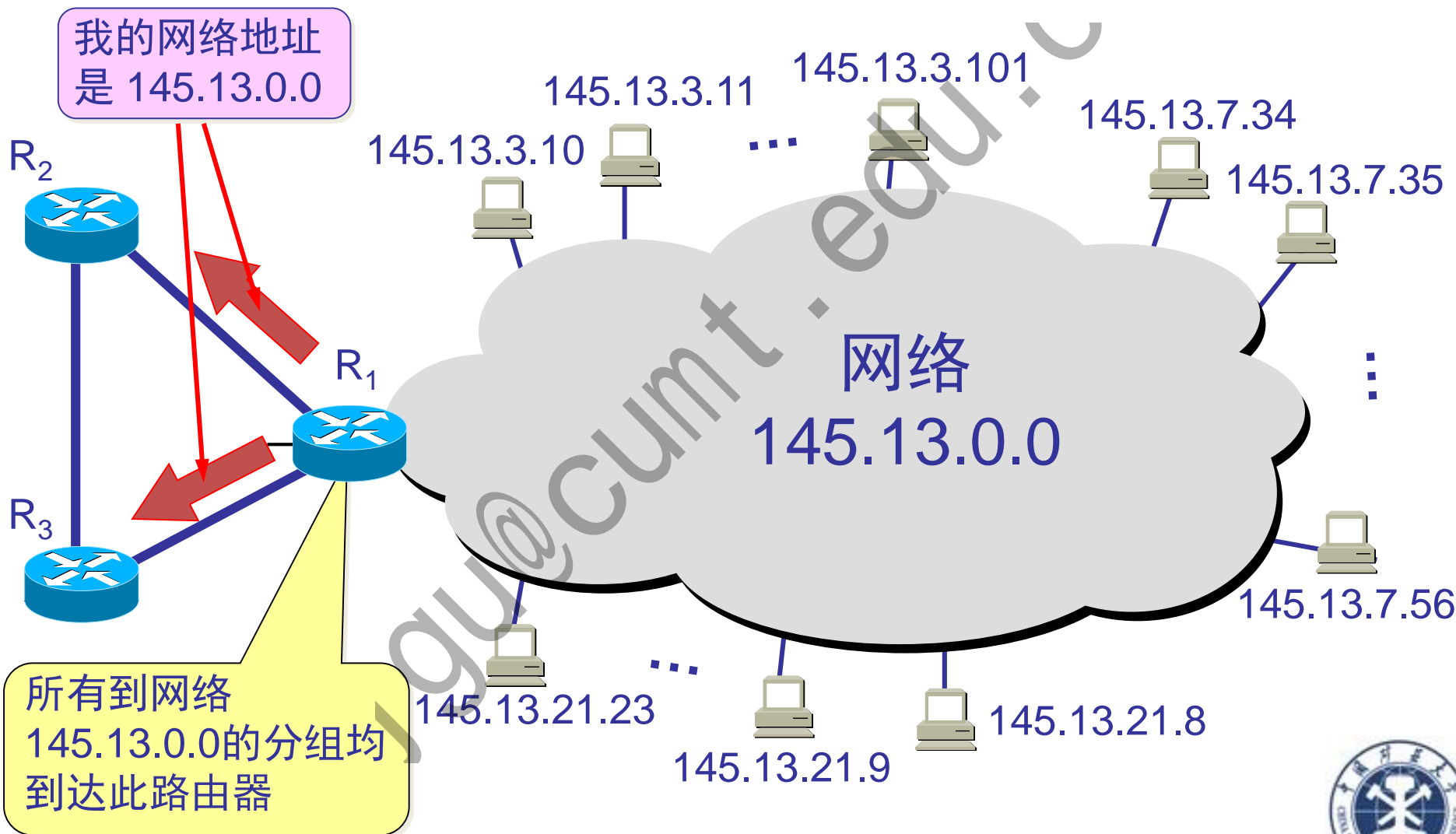
- 划分子网纯属一个单位内部的事情。单位对外仍然表现为没有划分子网的网络。
- 凡是从其他网络发送给本单位某个主机的IP数据报，仍然是根据IP数据报的目的网络号 net-id，先找到连接在本单位网络上的路由器。
- 然后此路由器在收到IP数据报后，再按目的网络号 net-id 和子网号 subnet-id 找到目的子网。
- 最后就将IP数据报直接交付目的主机。







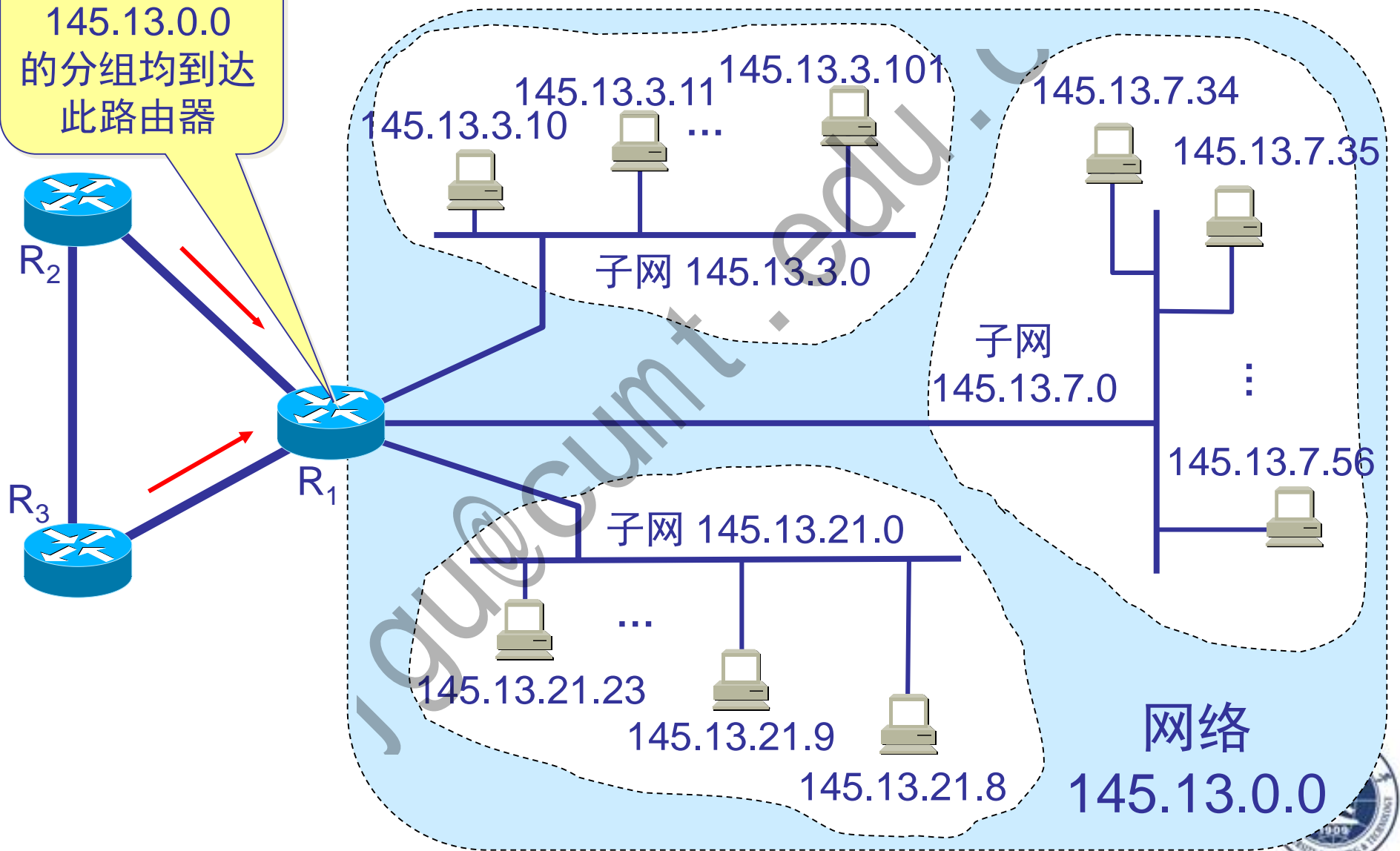
# 一个未划分子网的 B 类网络 145.13.0.0





# 划分为三个子网后对外仍是一个网络

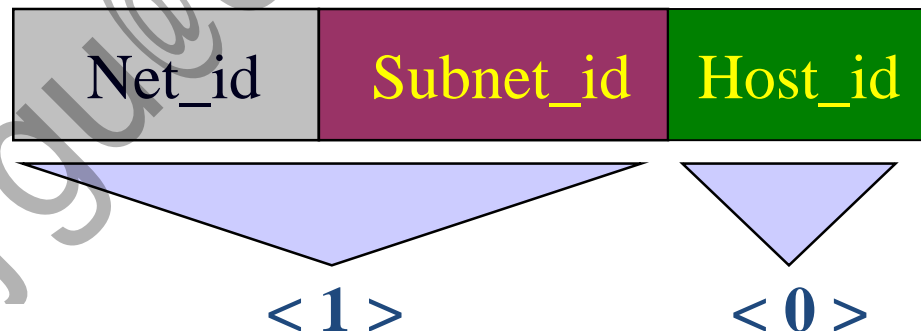
所有到达网络  
145.13.0.0  
的分组均到达  
此路由器





## Q13: 怎么判断是否划分了子网 ?

- 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。
- 子网掩码中值为“1”的位表示对应位置IP地址中的位是网络地址位，子网掩码中值为“0”的位，表示对应位置IP地址中的位是主机地址位。





## 子网掩码的表示

- 子网掩码是一个网络或一个子网的重要属性。
- 子网掩码表示形式可以有多种：
  - 一种表示方法和IP地址一样，可以使用“点分十进制”的形式。
  - 另一种形式是一个斜杠 “/”后面跟着一个数字，这个数字是掩码中 “1”的个数。这种简略的表示方法，通常是跟在一个IP地址后，表示这个IP地址对应的子网掩码。





# IP 地址的各字段和子网掩码





# 默认子网掩码

A类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.0.0.0	1 1 1 1 1 1 1 1	0 0
B类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.255.0.0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.255.255.0	1 1	0 0 0 0 0 0 0 0





# 比特串对应的十进制

128	64	32	16	8	4	2	1	
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
1	0	0	0	0	0	0	0	= 128
1	1	0	0	0	0	0	0	= 192
1	1	1	0	0	0	0	0	= 224
1	1	1	1	0	0	0	0	= 240
1	1	1	1	1	0	0	0	= 248
1	1	1	1	1	1	0	0	= 252
1	1	1	1	1	1	1	0	= 254
1	1	1	1	1	1	1	1	= 255



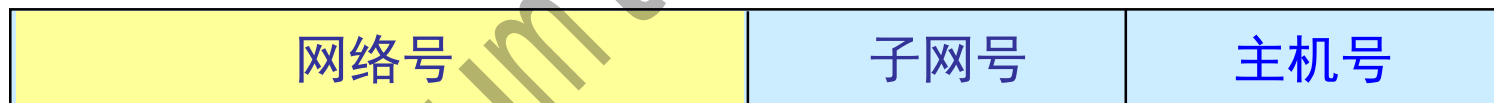


(IP 地址) AND (子网掩码) =  
网络地址

两级 IP 地址

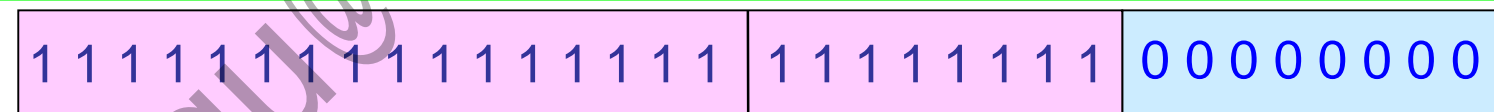


三级 IP 地址

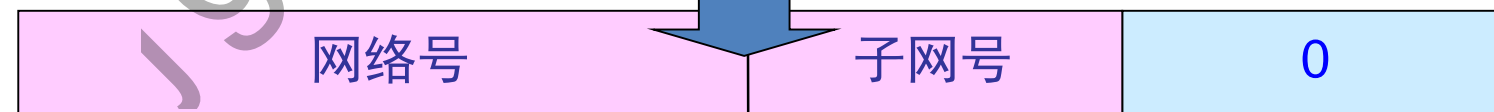


逐位进行 AND 运算

三级 IP 地址  
的子网掩码



子网的  
网络地址







# 同一个子网中每台主机的子网掩码都是一样的值

【例】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
----------	----------	----------	----------

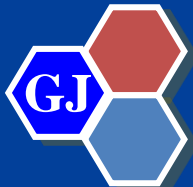
(d) IP 地址与子网掩码逐位相与

141	.	14	.	01000000	.	0
-----	---	----	---	----------	---	---

(e) 网络地址（点分十进制表示）

141	.	14	.	64	.	0
-----	---	----	---	----	---	---





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
-----	---	----	---	----	---	---

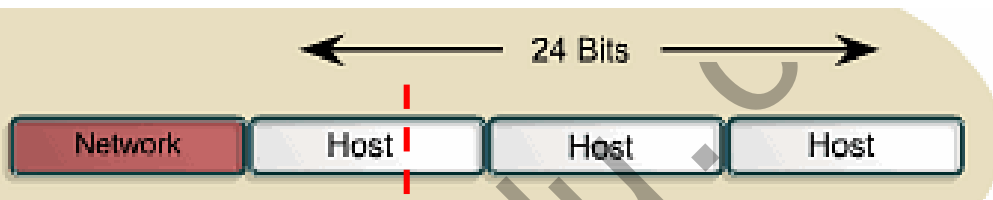
不同的子网掩码可能得出相同的网络地址，但其对应的子网号长度和子网中的主机个数是不同。





## Q14: 如何划分子网?

A类地址:



B类地址:



C类地址:



- 子网位从主机域的**最左边**开始连续借用。
- 子网号在网外是不可见的，仅在子网内使用。
- 子网号的位数是可变的，采用子网掩码(mask)反映子网号的长度。





# 子网的规划设计

设计子网划分方案时，必须考虑5个问题：

- (1) 该网络内将划分几个子网？
- (2) 每个子网有多少有效主机？
- (3) 有效的子网地址是什么？
- (4) 在该子网划分中，子网掩码是什么？
- (5) 每个子网的广播地址是什么？





- 已知某IP地址的二进制为11001011 01001010 11001101 10110110
  - 写出其点分十进制形式，并说明其地址类型。
  - 若子网号为4位，计算其十进制形式的子网掩码、子网地址、子网广播地址。

11001011 01001010 11001101 10110110

✓ 203.74.205.182

✓ C类

✓ 子网掩码：255.255.255.240 11110000

✓ 子网地址：203.74.205.176 10110000

✓ 广播地址：203.74.205.191 10111111





# 等长子网和变长子网

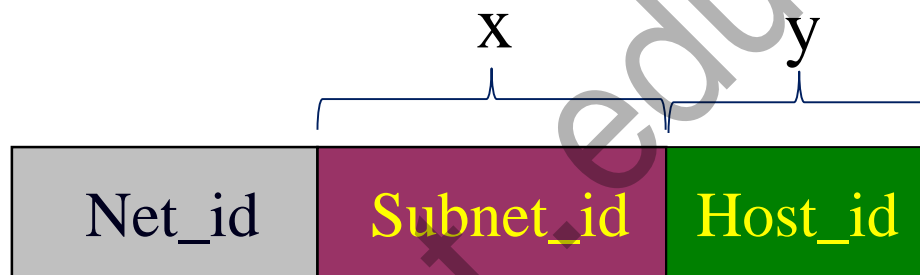
- 等长子网划分就是将一个有类网络等分成多个网络，也就是等分成多个子网，所有子网的子网掩码都相同。
- 但是，网络中不同子网中的主机数量是不固定的，采用定长子网掩码会造成IP地址的浪费与低效率。
- 变长子网划分是在等长子网的划分上，分别取不同等分子网中的某个或者多个子网。这对于网络内部不同网段需要不同大小子网的情形来说很有效。





## Q15: 如何划分等长子网 ?

- 等长子网划分的所有子网的子网掩码都相同。



- ① “全0子网” 代表的是对应子网的“子网ID”部分各位都是0，是第一个子网。
- ② “全1子网” 代表的是对应子网的“子网ID”部分各位都是1，是最后一个子网。





## RFC 950 vs. RFC 1878

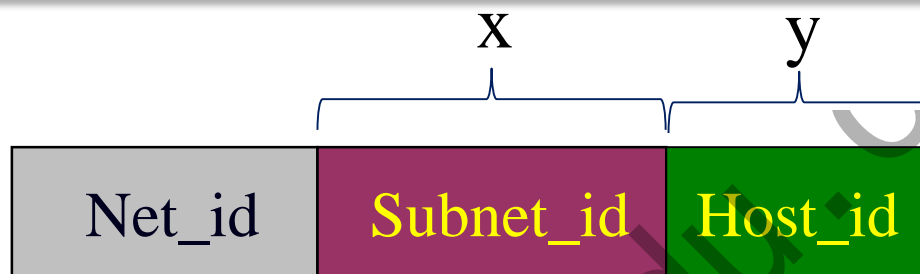
- **RFC950** 规定：第一个子网（也就是“全0子网”）和最后一个子网（也就是“全1子网”）不可用，为的就是避免全0子网的网络地址和全1子网的广播地址分别与没有划分子网前的网络地址和广播地址相冲突。
- 但是在后来**RFC1878**规定中，该项规定已被废止了，现在的设备基本上都普遍支持RFC1878。







# RFC 950规定下的子网数计算

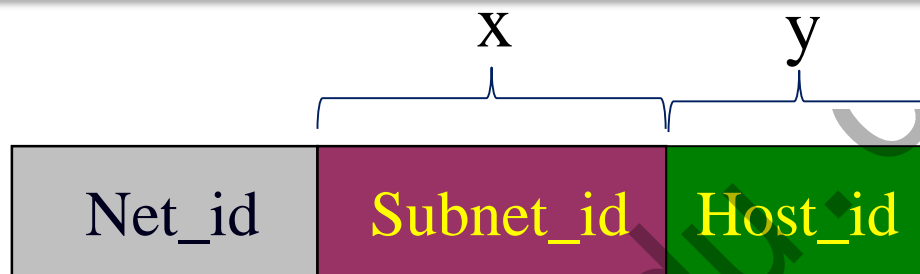


- 按照RFC 950 规定，划分子网后，只有 $n-2$ 个可用的子网（ $n$ 表示总的子网数）。
- 子网数 $= 2^x - 2$ 。
  - $x$ 是被占用的表示子网比特的数目，或者说1的个数。
  - 减2是指减去全0子网与全1子网。例如，11100000能产生  $2^3 - 2$  个子网。
  - 子网号必须是2位以上，即  $x \geq 2$ 。





# RFC 1878规定下的子网数计算

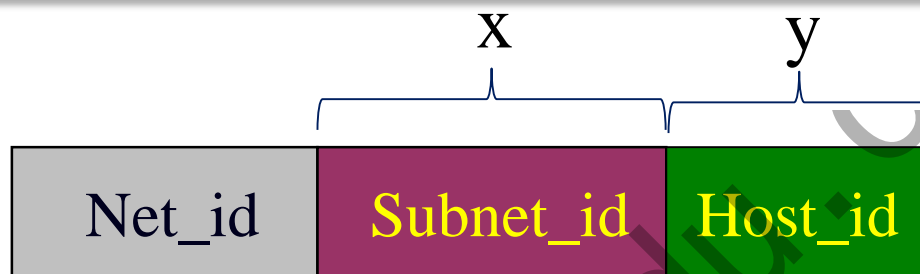


- 按照RFC 1878 规定，划分子网后，可以有n个可用的子网（n表示总的子网数）。
- 子网数 =  $2^x$ 。
  - x是被占用的表示子网比特的数目，或者说1的个数。
  - 例如，11100000能产生  $2^3$  个子网。





# 主机数的计算



- 每个子网的**主机数** $=2^y-2$ 。 $y$ 是未被占用的比特数目，或者说0的个数。
  - ▣ 有效主机数是所有主机号中去掉“全0”和“全1”后的数值。例如，11100000产生 $2^5-2$ ，每个子网中有30个有效主机号。
  - ▣ 主机号全“0”代表网络号加子网号，主机号全“1”代表这个子网的广播地址。





【例1】设有一个网络地址为 172.168.0.0，要在此网络中划分14个**等长子网**，试问：需要多少位表示子网？子网掩码的点分十进制数值是多少？每个子网地址是什么？

- 由网络地址可知，这是一个B类网络，网络地址和主机地址各为16位，网络掩码为 255.255.0.0 。
- RFC 950规定下，子网数  $2^3 - 2 \leq 14 \leq 2^4 - 2$ ，所以借用4位表示子网。
- 划分子网后，又使用主机地址部分的**最高4位**表示子网，则其对应十进制数值为  $128 + 64 + 32 + 16 = 240$ ，即子网掩码为 255.255.240.0 。





- 子网基数 =  $256 - 240 = 16$ ，RFC 950规定下的有效子网号为1~14，则子网地址为：

172.168.00010000.0

172.168.00100000.0

...

172.168.11010000.0

172.168.11100000.0

- 每个子网内表示主机的地址位为12位，则子网内有效主机数为  $2^{12} - 2 = 4094$ 。网络内总的主机数为  $4094 \times 14 = 57316$ 。

- 使用子网划分会造成部分主机地址损失，但仍可提高IP地址利用率。





【例2】某单位申请了一个C类网络地址：200.165.68.0，由于业务需要内部必须分成5个独立的子网，各子网拥有的主机数分别为24、28、16、16、20台，请用**等长子网**划分的方式，建立这五个子网，写出每个子网的网络地址、可用IP地址范围、子网广播地址和子网掩码。求分配方案的地址利用率。





根据要求， $2^2 - 2 \leq 5 \leq 2^3 - 2$ ，主机号5位，子网号3位  
子网掩码为：255.255.255.224，子网容纳最多主机数：30

子网	子网网络地址	可用IP地址范围	直接广播地址
1	200.165.68.32	200.165.68.33~200.165.68.62	200.165.68.63
2	200.165.68.64	200.165.68.65~200.165.68.94	200.165.68.95
3	200.165.68.96	200.165.68.97~200.165.68.126	200.165.68.127
4	200.165.68.128	200.165.68.129~200.165.68.158	200.165.68.159
5	200.165.68.160	200.165.68.161~200.165.68.190	200.165.68.191
6	200.165.68.192	200.165.68.193~200.165.68.222	200.165.68.223

(写出任5个子网便可)

IP地址利用率 = 使用状况 / 地址总数





# B类网络的等长子网划分

# Bits	Subnet Mask	# Subnets	# Hosts
2	255.255.192.0	2	16382
3	255.255.224.0	6	8190
4	255.255.240.0	14	4094
5	255.255.248.0	30	2046
6	255.255.252.0	62	1022
7	255.255.254.0	126	510
8	255.255.255.0	254	254
9	255.255.255.128	510	126
10	255.255.255.192	1022	62
11	255.255.255.224	2046	30
12	255.255.255.240	4094	14
13	255.255.255.248	8190	6
14	255.255.255.252	16382	2







# C类网络的等长子网划分

# Bits	Subnet Mask	# Subnets	#Hosts
2	255.255.255.192	2	62
3	255.255.255.224	6	30
4	255.255.255.240	14	14
5	255.255.255.248	30	6
6	255.255.255.252	62	2





## Q16: 如何划分变长子网 ?

- 网络中不同子网中的主机数量是不固定的，采用定长子网掩码会造成IP地址的浪费与低效率。
- **变长子网划分**其实就是在等长子网的划分上，分别取不同等分子网中的某个或者多个子网。这对于网络内部不同网段需要不同大小子网的情形来说很有效。





# 变长子网掩码VLSM

- 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。
- VLSM 根据不同子网中使用主机数来划分子网，尽可能在划分子网的情况下再次优化子网使用效率。





【例3】某公司 申请到一个IP 192.168.10.0，子网掩码是255.255.255.0。这个IP 按照 30，24，14，12，7，2台主机需求分配给各个部门，请划分**变长子网**。

计算公式：主机数 =  $2^n - 2$  // n 代表主机位个数

网络地址：192.168.10.00000000

30台主机：  $2^5 - 2 \geq 30$

需要分出5位主机位，则子网号为3位

假设遵照RFC1878的规定，全0和全1子网可用





子网掩码：255.255.255.224  
广播地址：192.168.10.31

则可得到8个子网：

192.168.10.00000000

192.168.10.00100000

192.168.10.01000000

192.168.10.01100000

192.168.10.10000000

192.168.10.10100000

192.168.10.11000000

192.168.10.11100000

分配给30台主机

分配给24台主机

子网掩码：255.255.255.224  
广播地址：192.168.10.63

14台主机： $2^4 - 2 \geq 14$

需要分出4位主机位，则子网号为4位





子网掩码：255.255.255.240  
广播地址：192.168.10.79

192.168.10.01000000可被进一步划分成2个子网：

192.168.10.01000000 分配给14台主机

192.168.10.01010000 分配给12台主机

余下的子网：

192.168.10.01100000

192.168.10.10000000

192.168.10.10100000

192.168.10.11000000

192.168.10.11100000

子网掩码：255.255.255.240  
广播地址：192.168.10.63.95

7台主机： $2^4 - 2 \geq 7$

需要分出4位主机位，则子网号为4位





子网掩码：255.255.255.240  
广播地址：192.168.10.111

192.168.10.01100000可被进一步划分成2个子网：

192.168.10.01100000 分配给7台主机

192.168.10.01110000

余下的子网：

192.168.10.10000000

192.168.10.10100000

192.168.10.11000000

192.168.10.11100000

2台主机：  $2^2 - 2 \geq 2$

需要分出2位主机位，则子网号为6位





子网掩码：255.255.255.252  
广播地址：192.168.10.115

192.168.10.01110000可被进一步划分成4个子网：

192.168.10.01110000 分配给2台主机

192.168.10.01110100

192.168.10.01111000

192.168.10.01111100

余下的子网：

192.168.10.10000000

192.168.10.10100000

192.168.10.11000000

192.168.10.11100000

待分配地址







# 变长子网掩码IP地址使用率

所需地址个数	子网地址	子网掩码	网络前缀	浪费 IP 地址个数
30	192.168.10.0	255.255.255.224	192.168.10.0/27	2
24	192.168.10.32	255.255.255.224	192.168.10.32/27	8
14	192.168.10.64	255.255.255.240	192.168.10.64/28	2
12	192.168.10.80	255.255.255.240	192.168.10.80/28	4
7	192.168.10.96	255.255.255.240	192.168.10.96/28	9
2	192.168.10.112	255.255.255.252	192.168.10.112/30	2

掩码长度变化：24→27→28→30

总共浪费的IP数量为：2+8+2+4+9+2+2+2+2+4\*2=39  
利用率 =  $(256-39) / 256 = 85\%$   
比等长划分子网提高不少利用率。

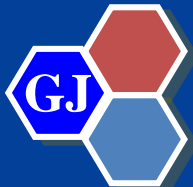




## Q17: 划分子网后怎么转发IP分组？

- 当一台主机要向另一台主机发送IP报文分组时，发送主机首先要判断目的主机是否和自己位于同一网络，以便决定是直接交付还是间接交付。
- 判断的依据是两台主机的IP地址的网络号部分是否相同：
  - 如果相同，表示两台主机位于同一网络，发送主机将IP报文直接交付给目的主机；
  - 如果不同，表示两台主机位于不同的网络。发送主机将IP报文转发给和它相连的路由器接口（默认网关），由该路由器负责间接交付。





# 主机的IPv4协议属性配置

Internet 协议版本 4 (TCP/IPv4) 属性

常规

如果网络支持此功能，则可以获取自动指派的 IP 设置。否则，你需要从网络系统管理员处获得适当的 IP 设置。

☐ 自动获得 IP 地址(O)

☒ 使用下面的 IP 地址(S):

IP 地址(I):

.

.

.

子网掩码(U):

.

.

.

默认网关(D):

.

.

.

☐ 自动获得 DNS 服务器地址(B)

☒ 使用下面的 DNS 服务器地址(E):

首选 DNS 服务器(P):

.

.

.

备用 DNS 服务器(A):

.

.

.

☐ 退出时验证设置(L)

高级(V)...

确定 取消

Internet 协议版本 4 (TCP/IPv4) 属性

常规 备用配置

如果网络支持此功能，则可以获取自动指派的 IP 设置。否则，你需要从网络系统管理员处获得适当的 IP 设置。

☒ 自动获得 IP 地址(O)

☐ 使用下面的 IP 地址(S):

IP 地址(I):

.

.

.

子网掩码(U):

.

.

.

默认网关(D):

.

.

.

☒ 自动获得 DNS 服务器地址(B)

☐ 使用下面的 DNS 服务器地址(E):

首选 DNS 服务器(P):

.

.

.

备用 DNS 服务器(A):

.

.

.

☐ 退出时验证设置(L)

高级(V)...

确定 取消



# 路由器转发分组的算法需做相应改动

- 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。





# 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，则将分组传送给指明的下一跳路由器；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，则将分组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。





## 相邻路由器要交换子网掩码信息

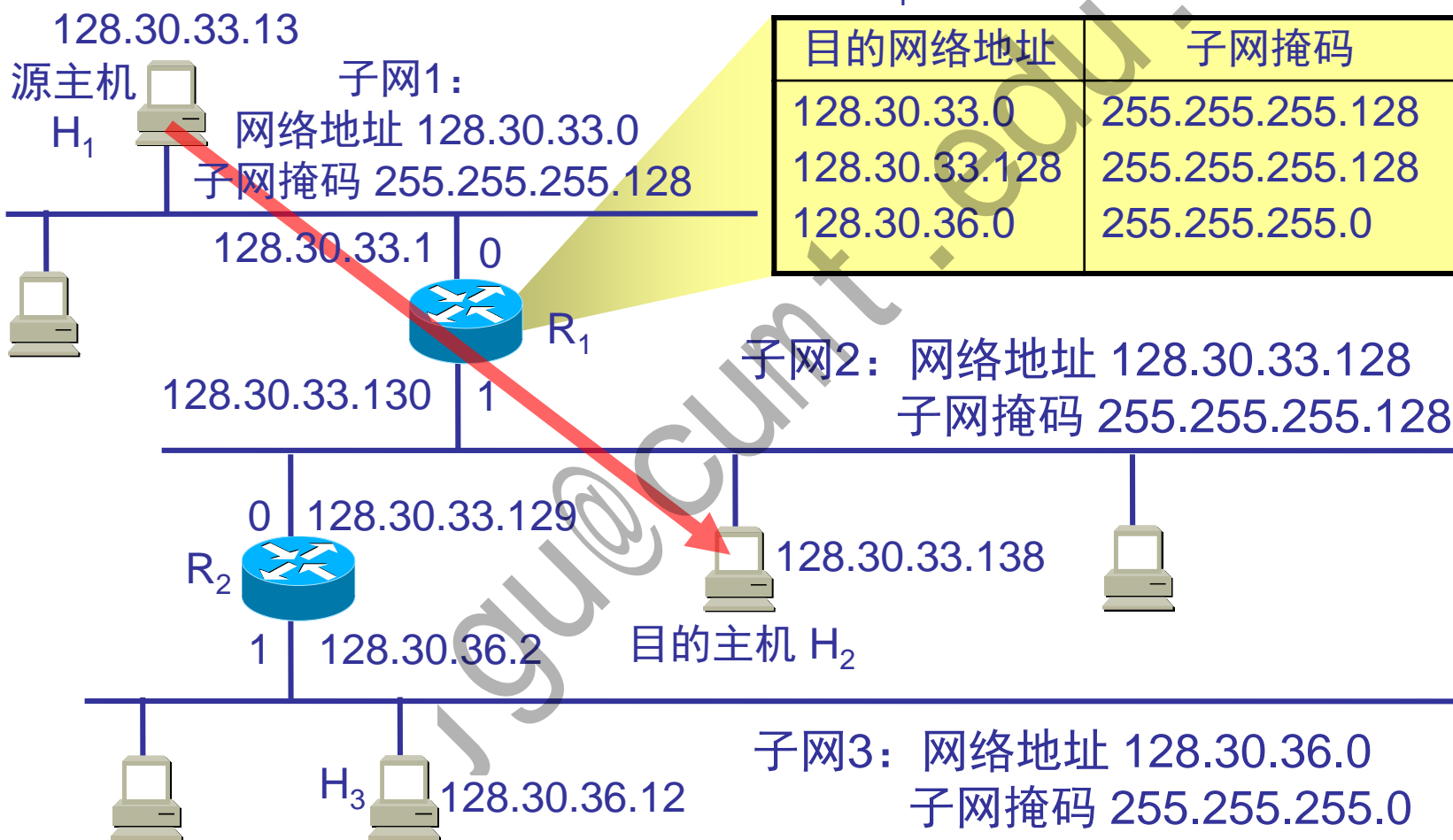
- 路由器在和相邻路由器交换路由信息时，必须把自己所在网络（或子网）的子网掩码告诉相邻路由器。
- 路由器的路由表中的每一个项目，除了要给出目的网络地址外，还必须同时给出该网络的子网掩码。
- 若一个路由器连接在两个子网上就拥有两个网络地址和两个子网掩码。



【例】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。

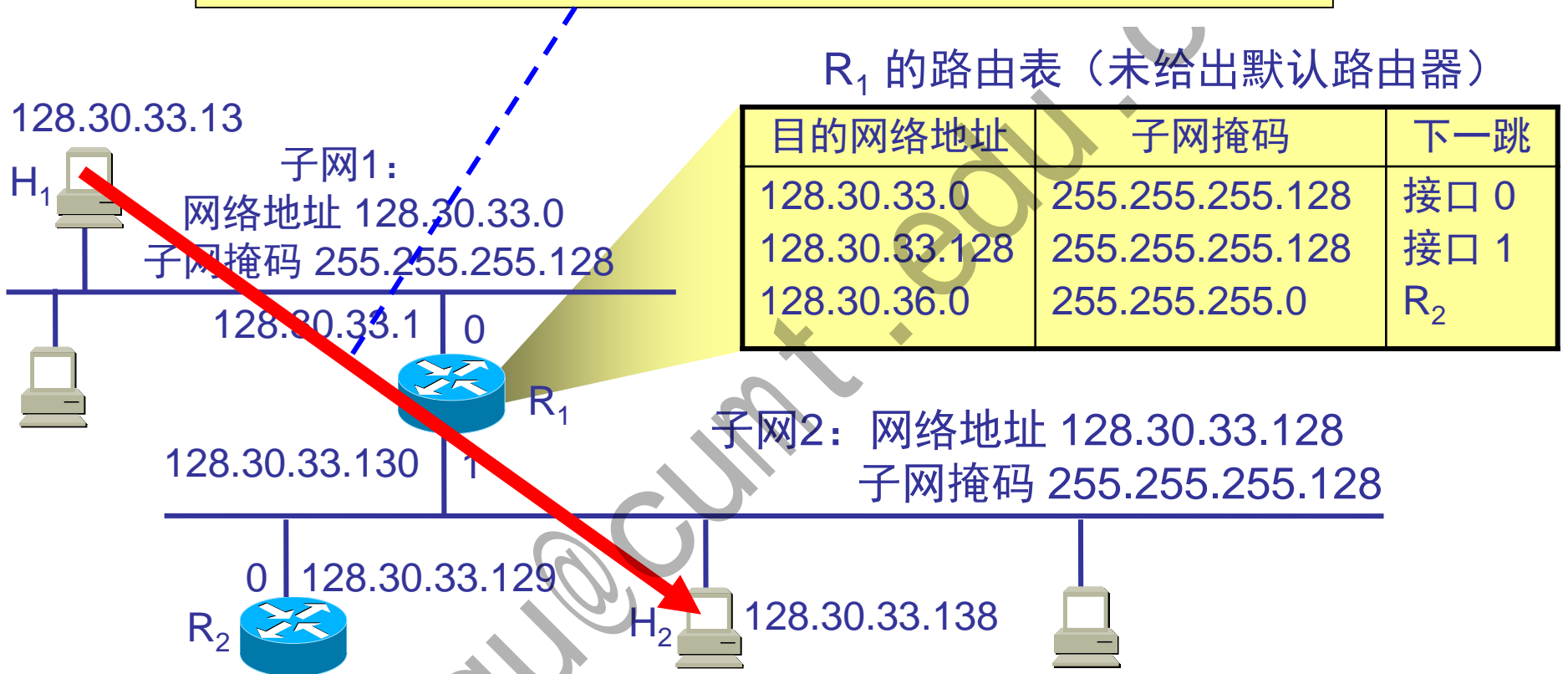
$R_1$  的路由表（未给出默认路由器）

目的网络地址	子网掩码	下一跳
128.30.33.0	255.255.255.128	接口 0
128.30.33.128	255.255.255.128	接口 1
128.30.36.0	255.255.255.0	$R_2$



# 主机 $H_1$ 要发送分组给 $H_2$

要发送的分组的目的地 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 与分组的目 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  $\rightarrow$  10000000

138  $\rightarrow$  10001010

逐比特 AND 操作后: 10000000  $\rightarrow$  128

逐比特 AND 操作

255.255.255.128

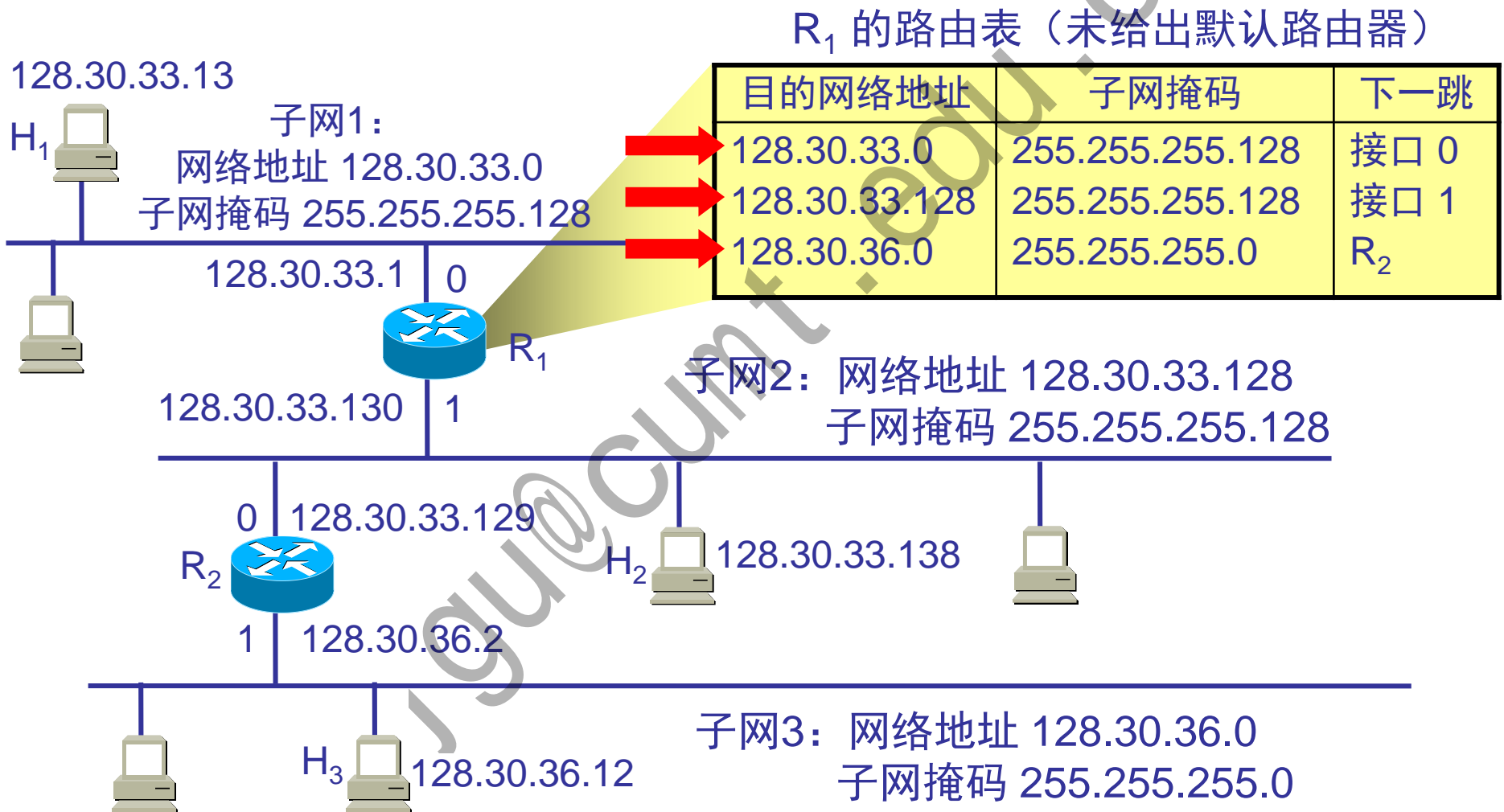
128. 30. 33.138

128. 30. 33.128

$\neq H_1$  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

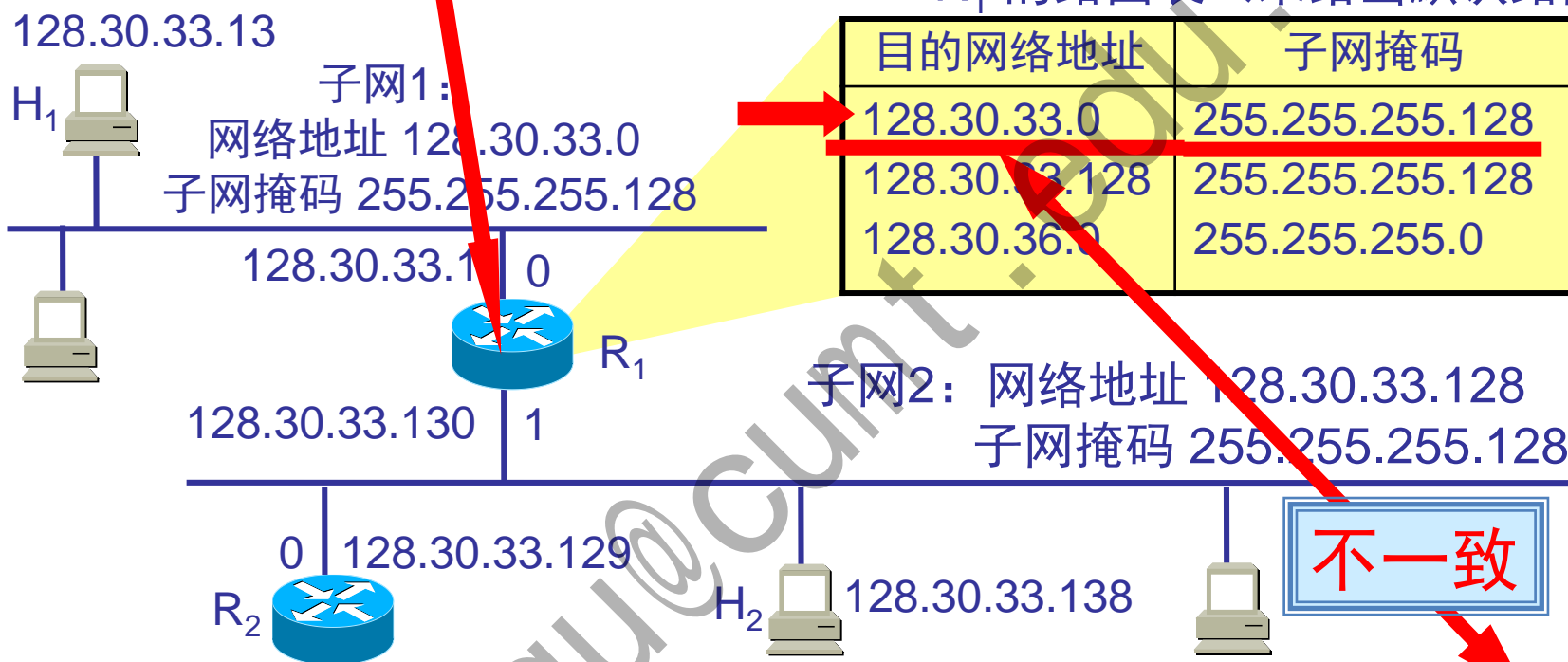


路由器  $R_1$  收到分组后就用路由表中第 1 个项目的子网掩码和 128.30.33.138 逐比特 **AND** 操作

$R_1$  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	接口 0
128.30.33.128	255.255.255.128	接口 1
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!**

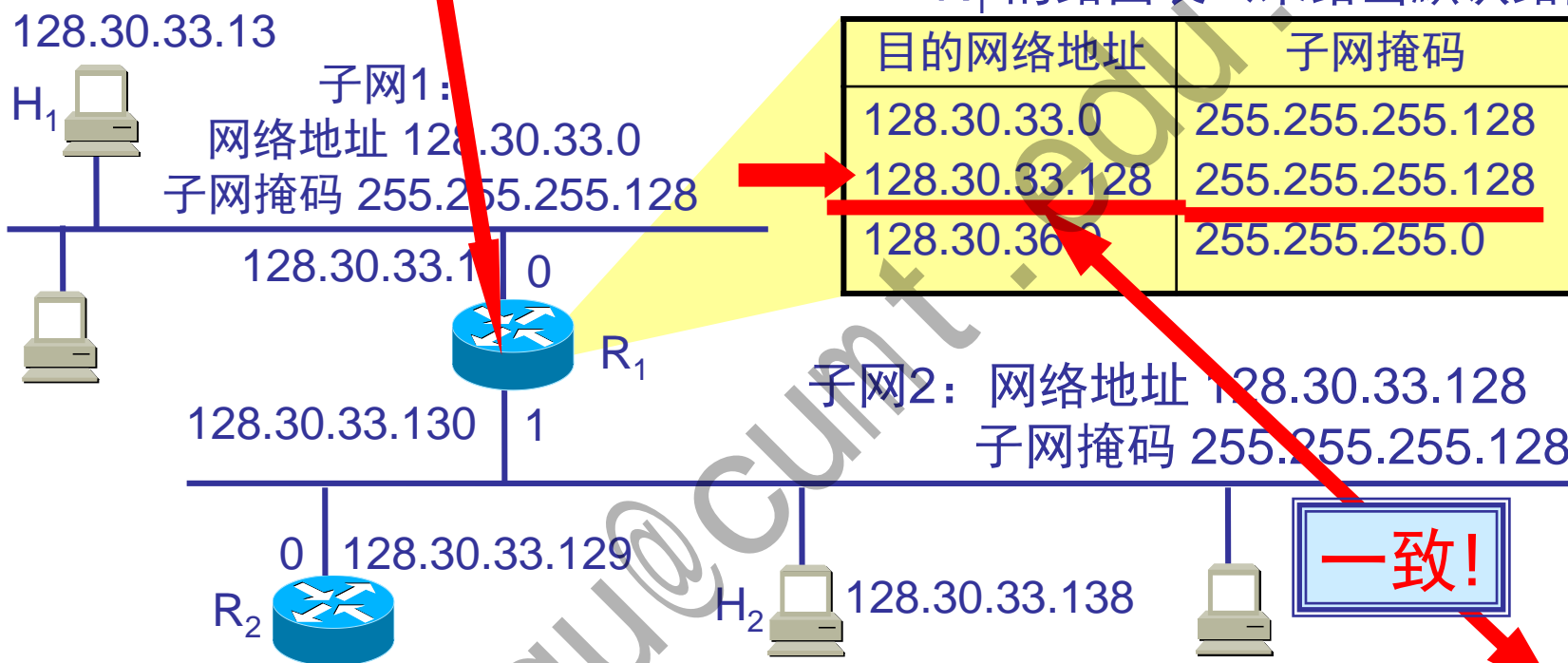
(因为  $128.30.33.128$  与路由表中的  $128.30.33.0$  不一致)

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	接口 0
<u>128.30.33.128</u>	<u>255.255.255.128</u>	接口 1
128.30.36.0	255.255.255.0	$R_2$

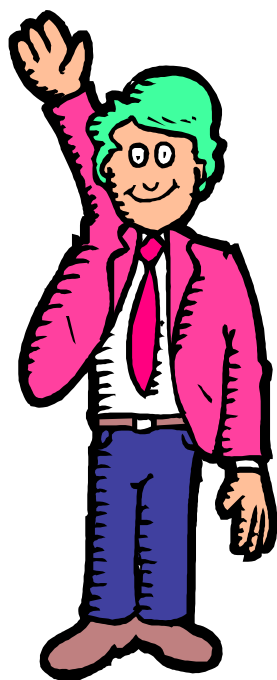


**一致!**

$255.255.255.128$  **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



**THANK  
YOU!**

