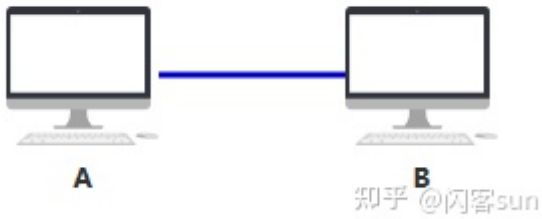
原文链接

> (44 封私信 / 80 条消息) 有了 IP 地址，为什么还要用 MAC 地址？ - 知乎 (zhihu.com)

你是一台电脑，你的名字叫 A

很久很久之前，你不与任何其他电脑相连接，孤苦伶仃。

直到有一天，你希望与另一台电脑 B 建立通信，于是你们各开了一个网口，用一根**网线**连接了起来。



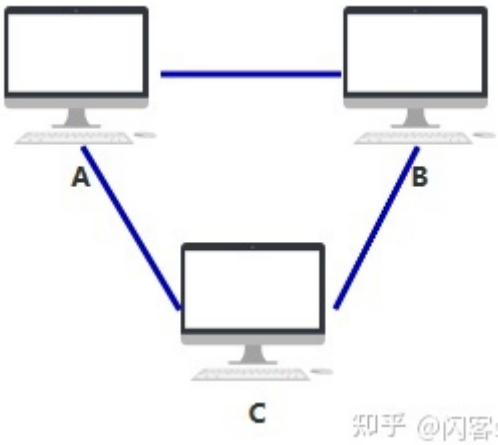
用一根网线连接起来怎么就能"通信"了呢？我可以给你讲 IO、讲中断、讲缓冲区，但这不是研究网络时该关心的问题。

如果你纠结，要么去研究一下操作系统是如何处理网络 IO 的，要么去研究一下包是如何被网卡转换成电信号发送出去的，要么就仅仅把它当做电脑里有个小人在**开枪**吧~

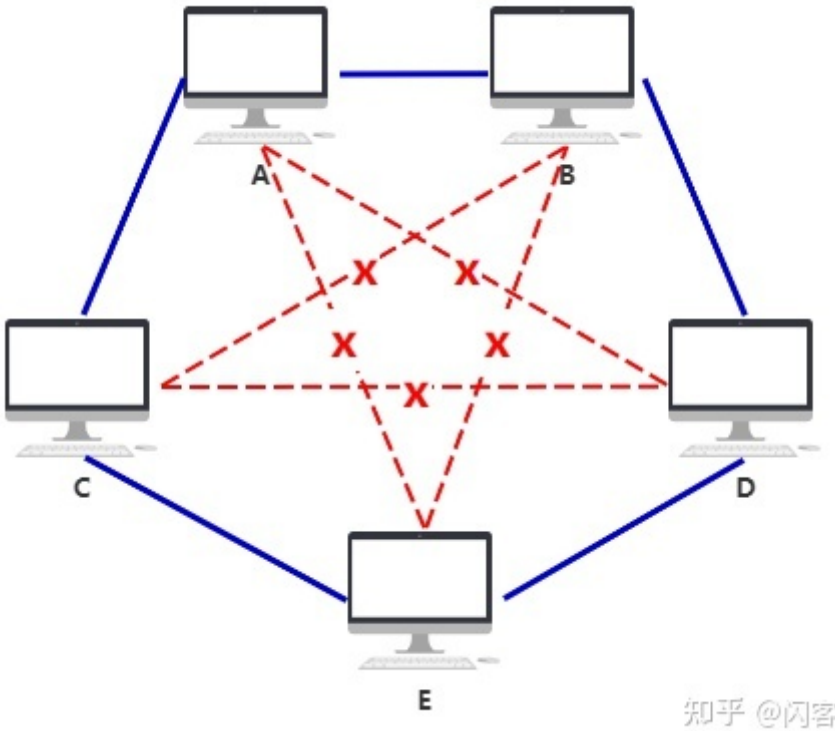
反正，你们就是连起来了，并且可以通信。

第一层

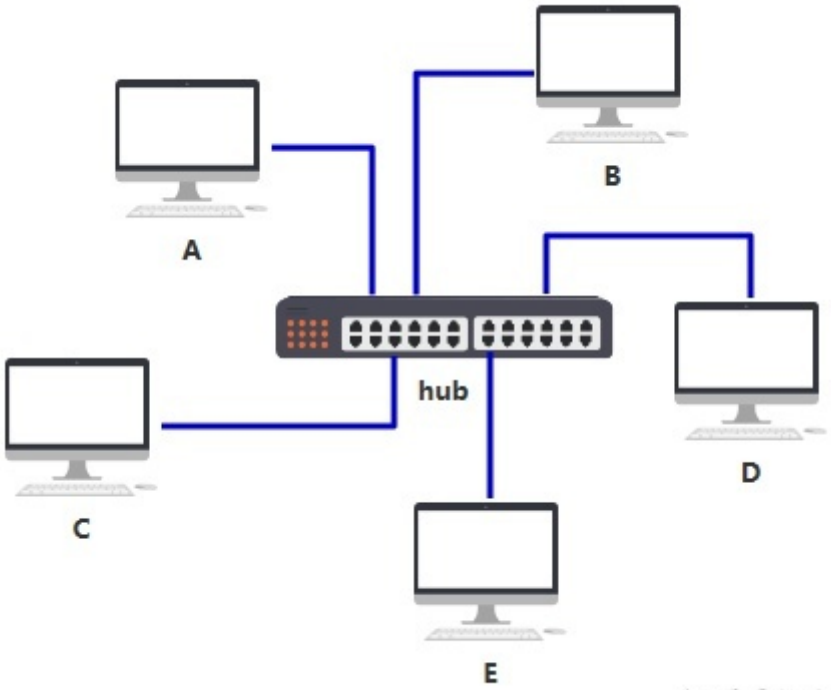
有一天，一个新伙伴 C 加入了，但聪明的你们很快发现，可以每个人开**两个网口**，用一共**三根网线**，彼此相连。



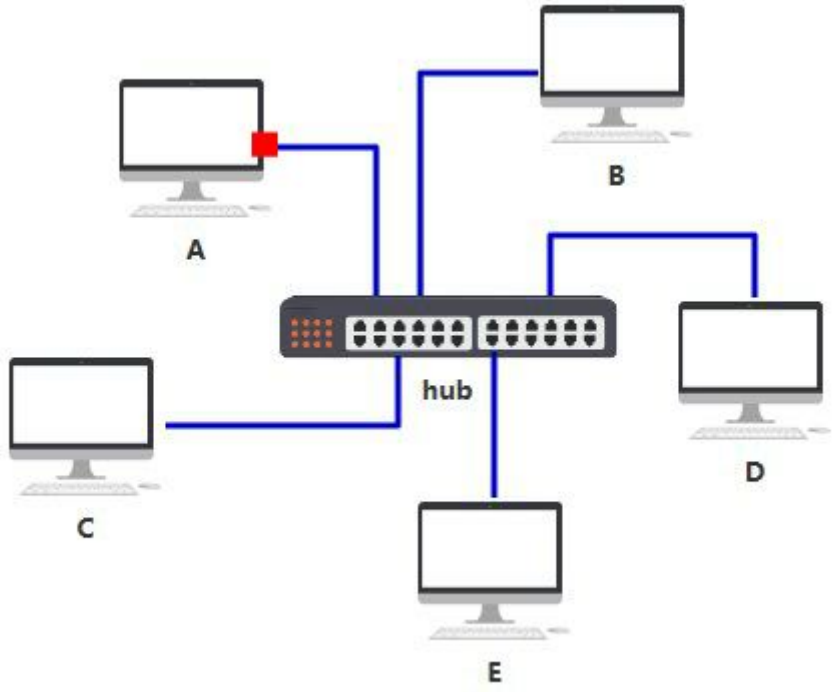
随着越来越多的人加入，你发现身上开的网口实在太多了，而且网线密密麻麻，混乱不堪。（而实际上一台电脑根本开不了这么多网口，所以这种连线只在理论上可行，所以连不上的我就用红色虚线表示了，就是这么严谨哈哈~）



于是你们发明了一个中间设备，你们将网线都插到这个设备上，由这个设备做转发，就可以彼此之间通信了，本质上和原来一样，只不过网口的数量和网线的数量减少了，不再那么混乱。



你给它取名叫集线器，它仅仅是无脑将电信号**转发到所有出口（广播）**，不做任何处理，你觉得它是没有智商的，因此把人家定性在了**物理层。**

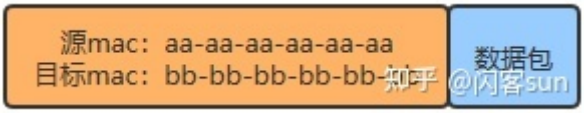


由于转发到了所有出口，那 BCDE 四台机器怎么知道数据包是不是发给自己的呢?

首先，你要给所有的连接到交换机的设备，都起个名字。原来你们叫 ABCD，但现在需要一个更专业的，**全局唯一**的名字作为标识，你把这个更高端的名字称为 **MAC 地址。**

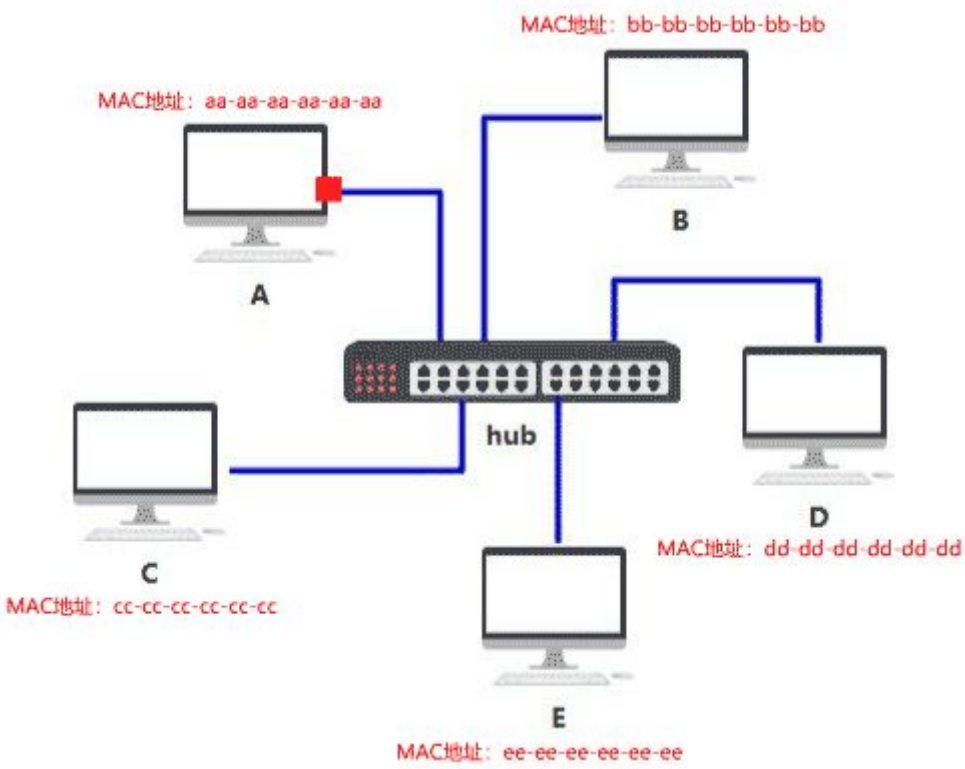
你的 MAC 地址是 aa-aa-aa-aa-aa-aa，你的伙伴 b 的 MAC 地址是 bb-bb-bb-bb-bb-bb，以此类推，不重复就好。

这样，A 在发送数据包给 B 时，只要在头部拼接一个这样结构的数据，就可以了。



B 在收到数据包后，根据头部的目标 MAC 地址信息，判断这个数据包的确是发给自己的，于是便**收下**。

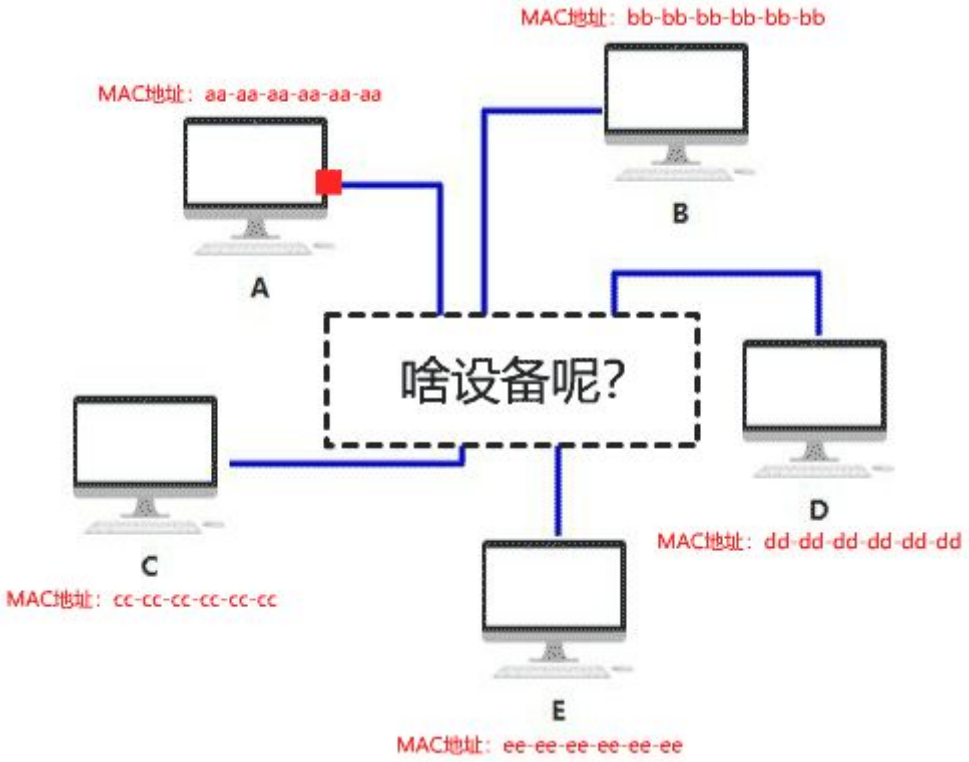
其他的 CDE 收到数据包后，根据头部的目标 MAC 地址信息，判断这个数据包并不是发给自己的，于是便**丢弃**。



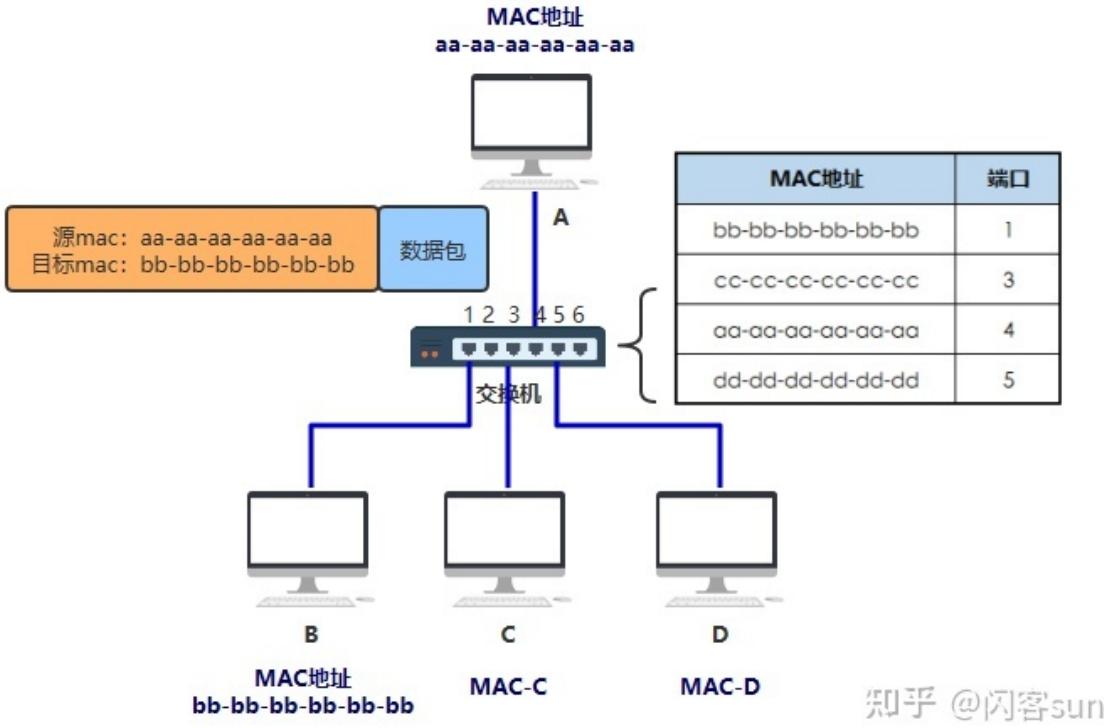
虽然集线器使整个布局干净不少，但原来我只要发给电脑 B 的消息，现在却要发给连接到集线器中的所有电脑，这样既不安全，又不节省网络资源。

第二层

如果把这个集线器弄得更智能一些，**只发给目标 MAC 地址指向的那台电脑**，就好了。



虽然只比集线器多了这一点点区别，但看起来似乎有智能了，你把这东西叫做**交换机**。也正因为这一点点智能，你把它放在了另一个层级，**数据链路层**。

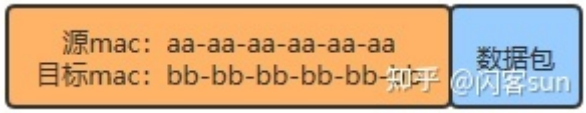


如上图所示，你是这样设计的。

交换机内部维护一张 **MAC 地址表**，记录着每一个 MAC 地址的设备，连接在其哪一个端口上。

MAC 地址	端口
bb-bb-bb-bb-bb-bb	1
cc-cc-cc-cc-cc-cc	3
aa-aa-aa-aa-aa-aa	4
dd-dd-dd-dd-dd-dd	5

假如你仍然要发给 B 一个数据包，构造了如下的数据结构从网口出去。

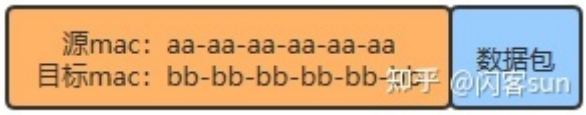


到达交换机时，交换机内部通过自己维护的 MAC 地址表，发现**目标机器 B 的 MAC 地址 bb-bb-bb-bb-bb-bb 映射到了端口 1 上**，于是把数据从 1 号端口发给了 B，完事~

你给这个通过这样传输方式而组成的小范围的网络，叫做**以太网。**

当然最开始的时候，MAC 地址表是空的，是怎么逐步建立起来的呢?

假如在 MAC 地址表为空是，你给 B 发送了如下数据



由于这个包从端口 4 进入的交换机，所以此时交换机就可以在 MAC地址表记录第一条数据：

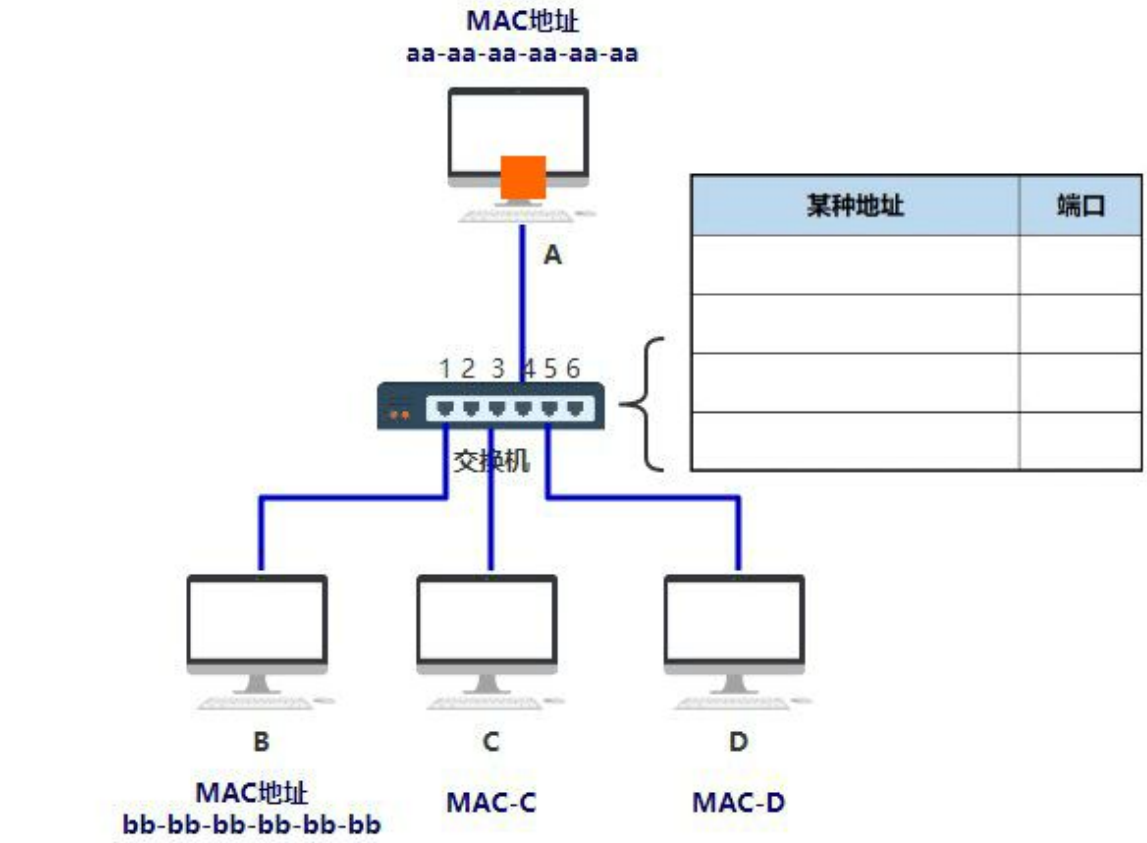
MAC：aa-aa-aa-aa-aa-aa-aa
端口：4

交换机看目标 MAC 地址（bb-bb-bb-bb-bb-bb）在地址表中并没有映射关系，于是将此包发给了**所有端口**，也即发给了所有机器。

之后，只有机器 B 收到了确实是发给自己的包，于是做出了**响应**，响应数据从端口 1 进入交换机，于是交换机此时在地址表中更新了第二条数据：

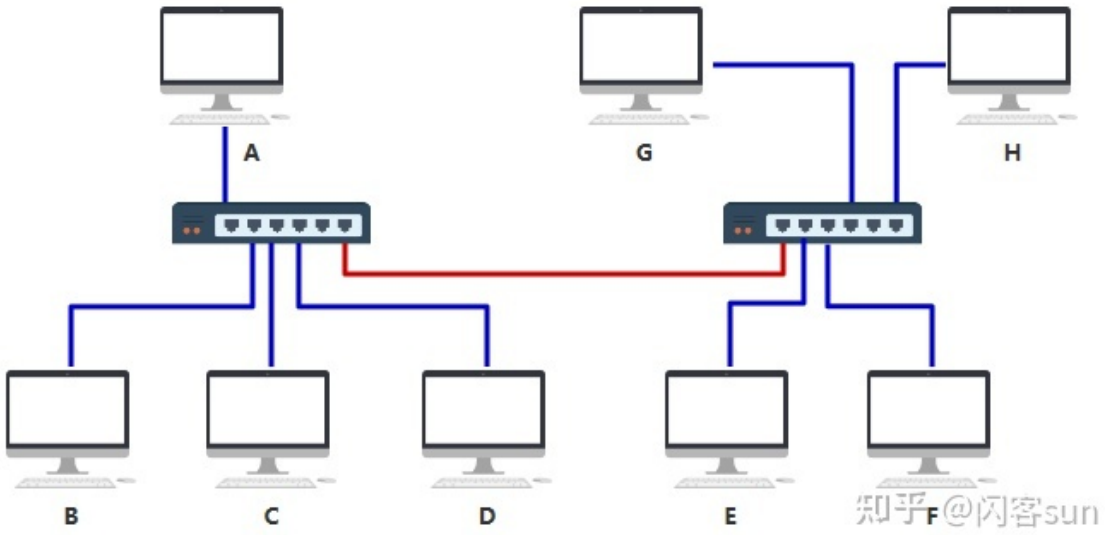
MAC：bb-bb-bb-bb-bb-bb
端口：1

过程如下



经过该网络中的机器不断地通信，交换机最终将 MAC 地址表建立完毕~

随着机器数量越多，交换机的端口也不够了，但聪明的你发现，只要将多个交换机连接起来，这个问题就轻而易举搞定~



你完全不需要设计额外的东西，只需要按照之前的设计和规矩来，按照上述的接线方式即可完成所有电脑的互联，所以交换机设计的这种规则，真的很巧妙。你想想看为什么（比如 A 要发数据给 F）。

但是你要注意，上面那根红色的线，最终在 MAC 地址表中可不是一条记录呀，而是要把 EFGH 这四台机器与该端口（端口6）的映射全部记录在表中。

最终，**两个交换机将分别记录 A ~ H 所有机器的映射记录。**

这在只有 8 台电脑的时候还好，甚至在只有几百台电脑的时候，都还好，所以这种交换机的设计方式，已经足足支撑一阵子了。

但很遗憾，人是贪婪的动物，很快，电脑的数量就发展到几千、几万、几十万。

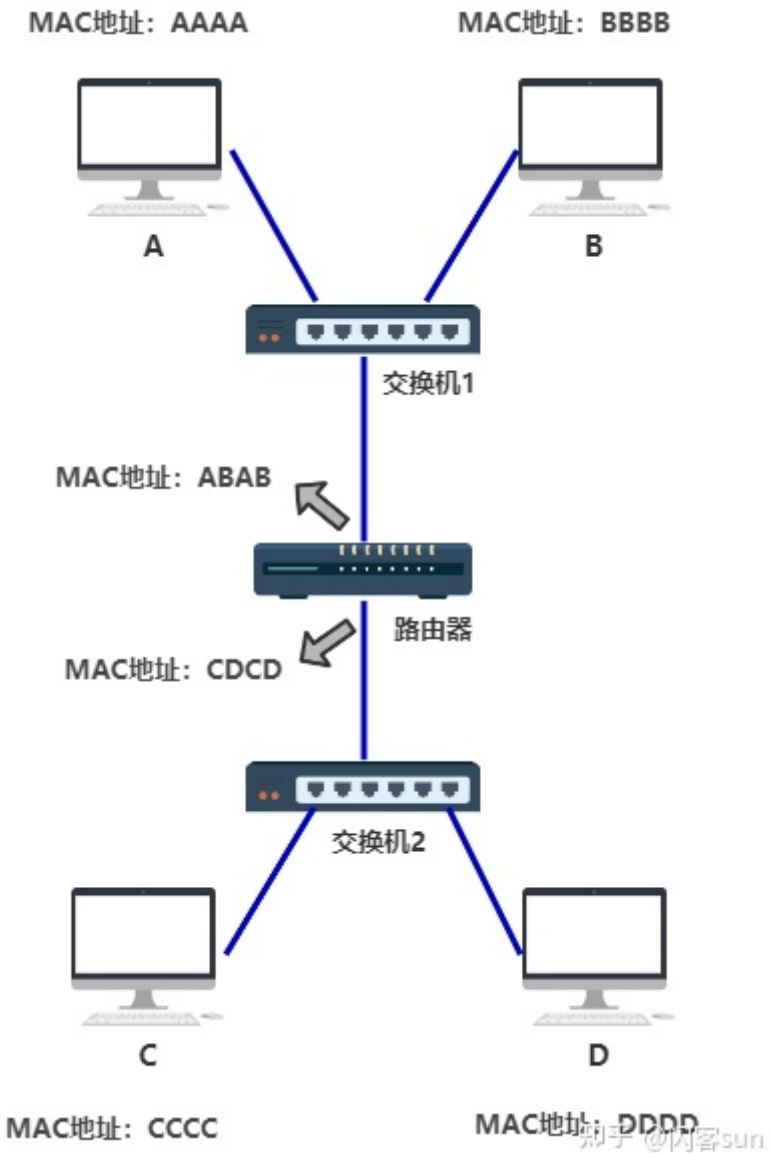
第三层

交换机已经无法记录如此庞大的映射关系了。

此时你动了歪脑筋，你发现了问题的根本在于，连出去的那根红色的网线，后面不知道有多少个设备不断地连接进来，从而使得地址表越来越大。

那我可不可以让那根红色的网线，接入一个**新的设备**，这个设备就跟电脑一样有自己独立的 MAC 地址，而且同时还能帮我把数据包做一次**转发**呢？

这个设备就是**路由器，**它的功能就是，作为一台独立的拥有 MAC 地址的设备，并且可以帮我把数据包做一次转发，你把它定在了**网络层。**



注意，路由器的每一个端口，都有独立的 MAC 地址

好了，现在交换机的 MAC 地址表中，只需要多出一条 MAC 地址 ABAB 与其端口的映射关系，就可以成功把数据包转交给路由器了，这条搞定。

那如何做到，把发送给 C 和 D，甚至是把发送给 DEFGH.... 的数据包，统统先发送给路由器呢？

不难想到这样一个点子，假如电脑 C 和 D 的 MAC 地址拥有共同的前缀，比如分别是

C 的 MAC 地址：FFFF-FFFF-CCCC
D 的 MAC 地址：FFFF-FFFF-DDDD

那我们就可以说，将目标 MAC 地址为 **FFFF-FFFF-？开头的**，统统先发送给路由器。

这样是否可行呢？答案是否定的。

我们先从现实中 MAC 地址的结构入手，MAC地址也叫物理地址、硬件地址，长度为 48 位，一般这样来表示

00-16-EA-AE-3C-40

它是由网络设备制造商生产时烧录在网卡的EPROM（一种闪存芯片，通常可以通过程序擦写）。其中**前 24 位（00-16-EA）代表网络硬件制造商的编号，后 24 位（AE-3C-40）是该厂家自己分配的，一般表示系列号。**只要不更改自己的 MAC 地址，MAC 地址在世界是唯一的。形象地说，MAC地址就如同身份证上的身份证号码，具有唯一性。

那如果你希望向上面那样表示将目标 MAC 地址为 **FFFF-FFFF-？开头的**，统一从路由器出去发给某一群设备（后面会提到这其实是子网的概念），那你就需要要求某一子网下统统买一个厂商制造的设备，要么你就需要要求厂商在生产网络设备烧录 MAC 地址时，提前按照你规划好的子网结构来定 MAC 地址，并且日后这个网络的结构都不能轻易改变。

这显然是不现实的。

于是你发明了一个新的地址，给每一台机器一个 32 位的编号，如：

11000000101010000000000000000001

你觉得有些不清晰，于是把它分成四个部分，中间用点相连。

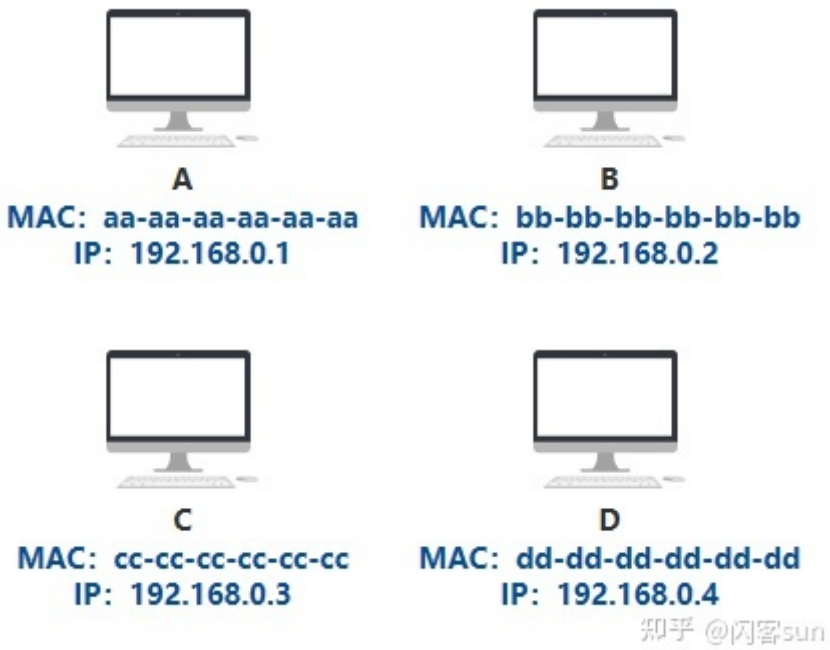
11000000.10101000.00000000.00000001

你还觉得不清晰，于是把它转换成 10 进制。

192.168.0.1

最后你给了这个地址一个响亮的名字，**IP 地址**。现在每一台电脑，同时有自己的 MAC 地址，又有自己的 IP 地址，只不过 IP 地址是**软件层面**上的，可以随时修改，MAC 地址一般是无法修改的。

这样一个可以随时修改的 IP 地址，就可以根据你规划的网络拓扑结构，来调整了。

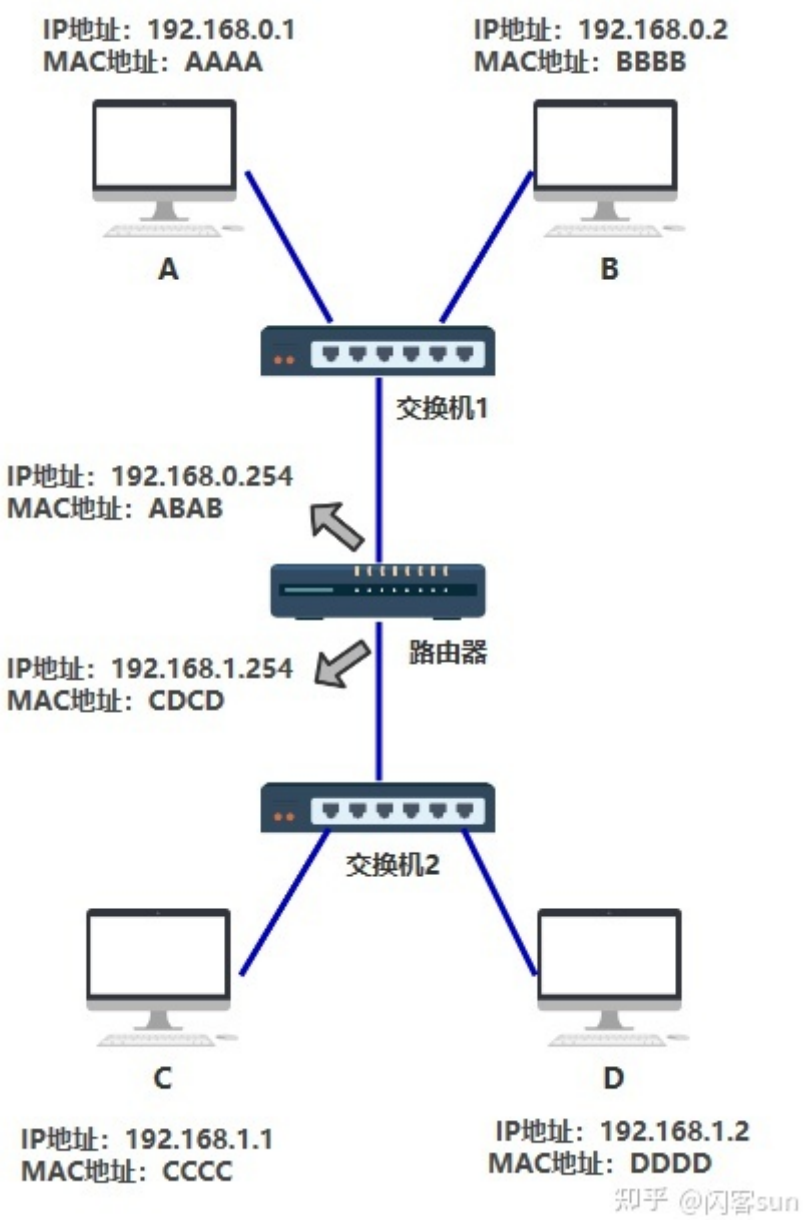


如上图所示，假如我想要发送数据包给 ABCD 其中一台设备，不论哪一台，我都可以这样描述，**"将 IP 地址为 192.168.0 开头的全部发送给到路由器，之后再怎么转发，交给它！"**，巧妙吧。

那交给路由器之后，路由器又是怎么把数据包准确转发给指定设备的呢？

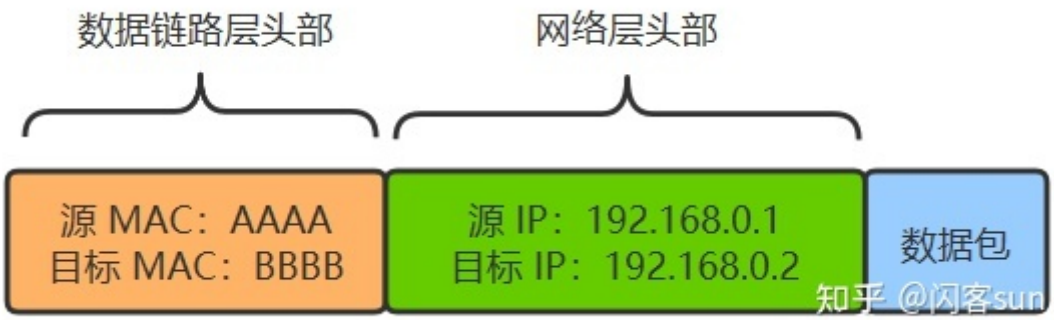
别急我们慢慢来。

我们先给上面的组网方式中的每一台设备，加上自己的 IP 地址



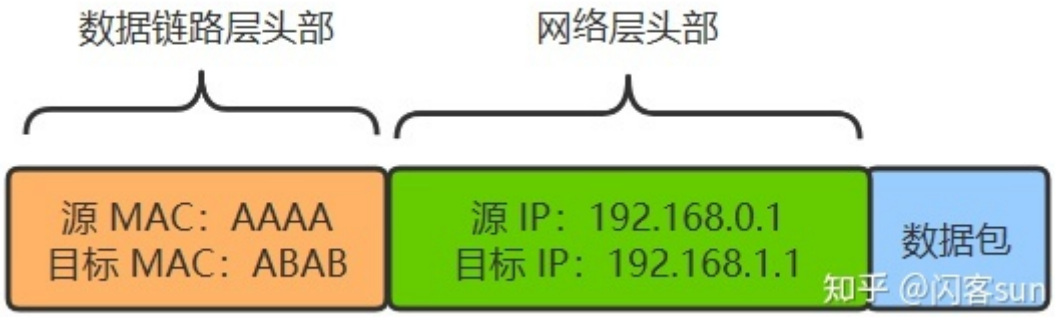
现在两个设备之间传输，除了加上数据链路层的头部之外，还要再增加一个网络层的头部。

假如 A 给 B 发送数据，由于它们直接连着交换机，所以 A 直接发出如下数据包即可，其实网络层没有体现出作用。

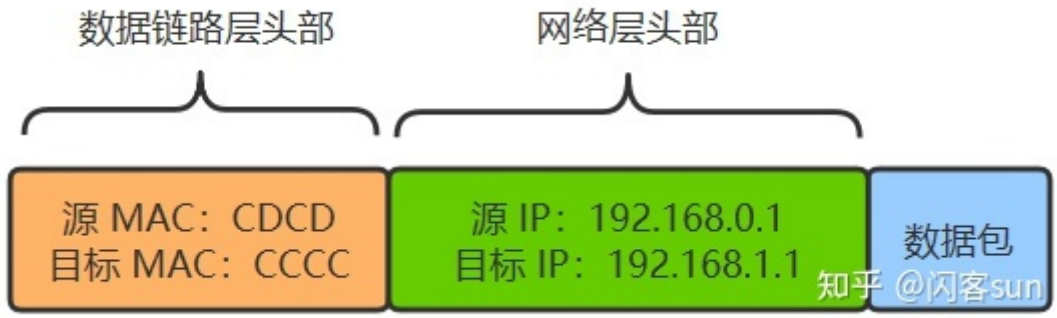


但假如 A 给 C 发送数据，A 就需要先转交给路由器，然后再由路由器转交给 C。由于最底层的传输仍然需要依赖以太网，所以数据包是分成两段的。

A ~ 路由器这段的包如下：



路由器到 C 这段的包如下：



好了，上面说的两种情况（A->B，A->C），相信细心的读者应该会有不少疑问，下面我们一个个来展开。

A 给 C 发数据包，怎么知道是否要通过路由器转发呢?

答案：子网

如果源 IP 与目的 IP 处于一个子网，直接将包通过交换机发出去。

如果源 IP 与目的 IP 不处于一个子网，就交给路由器去处理。

好，那现在只需要解决，什么叫处于一个子网就好了。

- 192.168.0.1 和 192.168.0.2 处于同一个子网
- 192.168.0.1 和 192.168.1.1 处于不同子网

这两个是我们人为规定的，即我们想表示，对于 192.168.0.1 来说：

http://192.168.0.xxx 开头的，就算是在一个子网，否则就是在不同的子网。

那对于计算机来说，怎么表达这个意思呢？于是人们发明了**子网掩码**的概念

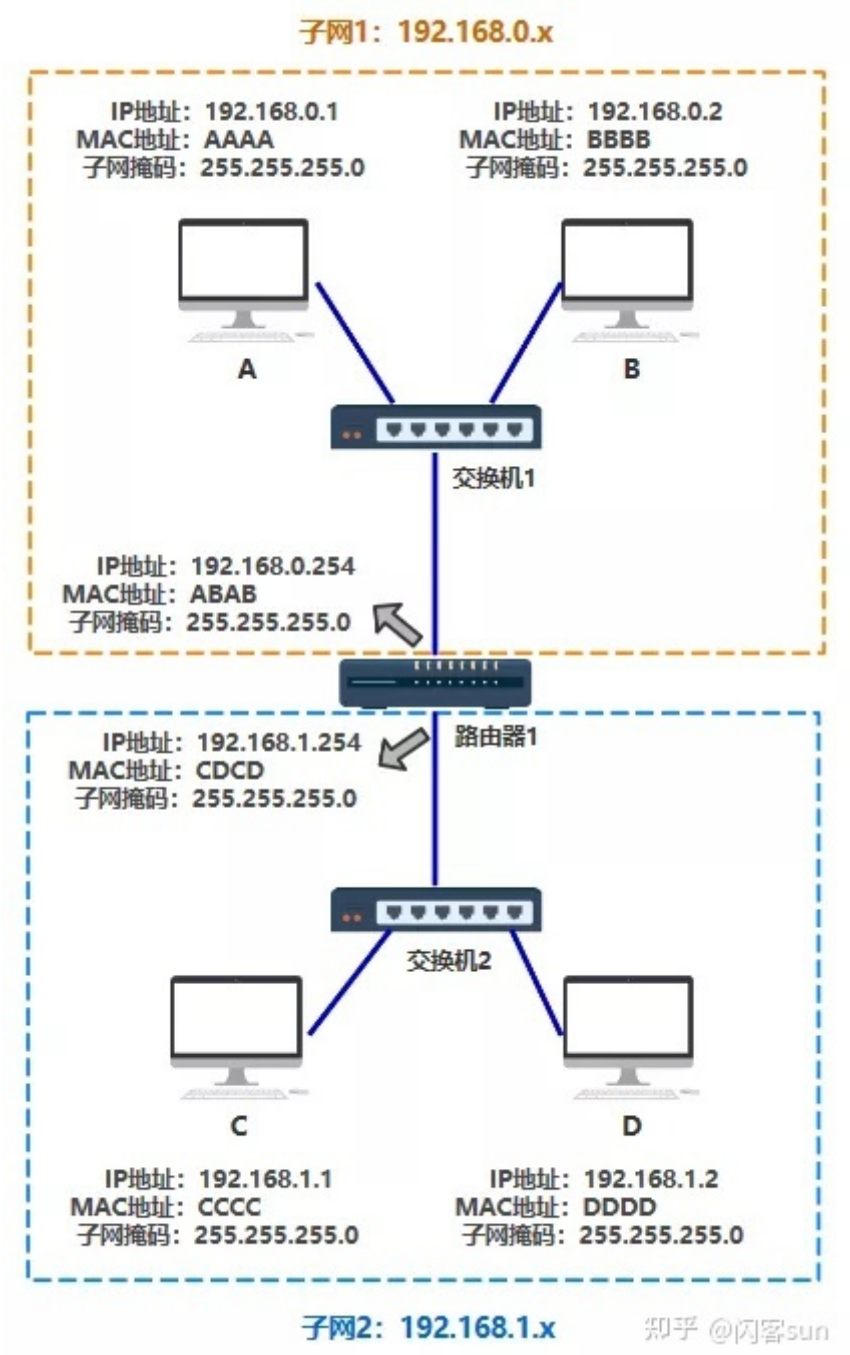
假如某台机器的子网掩码定为 255.255.255.0

这表示，将源 IP 与目的 IP 分别同这个子网掩码进行**与运算，相等则是在一个子网，不相等就是在不同子网**，就这么简单。

比如

- **A电脑**：192.168.0.1 & 255.255.255.0 = 192.168.0.0
- **B电脑**：192.168.0.2 & 255.255.255.0 = 192.168.0.0
- **C电脑**：192.168.1.1 & 255.255.255.0 = 192.168.1.0
- **D电脑**：192.168.1.2 & 255.255.255.0 = 192.168.1.0

那么 A 与 B 在同一个子网，C 与 D 在同一个子网，但是 A 与 C 就不在同一个子网，与 D 也不在同一个子网，以此类推。



所以如果 A 给 C 发消息，A 和 C 的 IP 地址分别 & A 机器配置的子网掩码，发现不相等，则 A 认为 C 和自己不在同一个子网，于是把包发给路由器，就不管了，**之后怎么转发，A 不关心。**

A 如何知道，哪个设备是路由器?

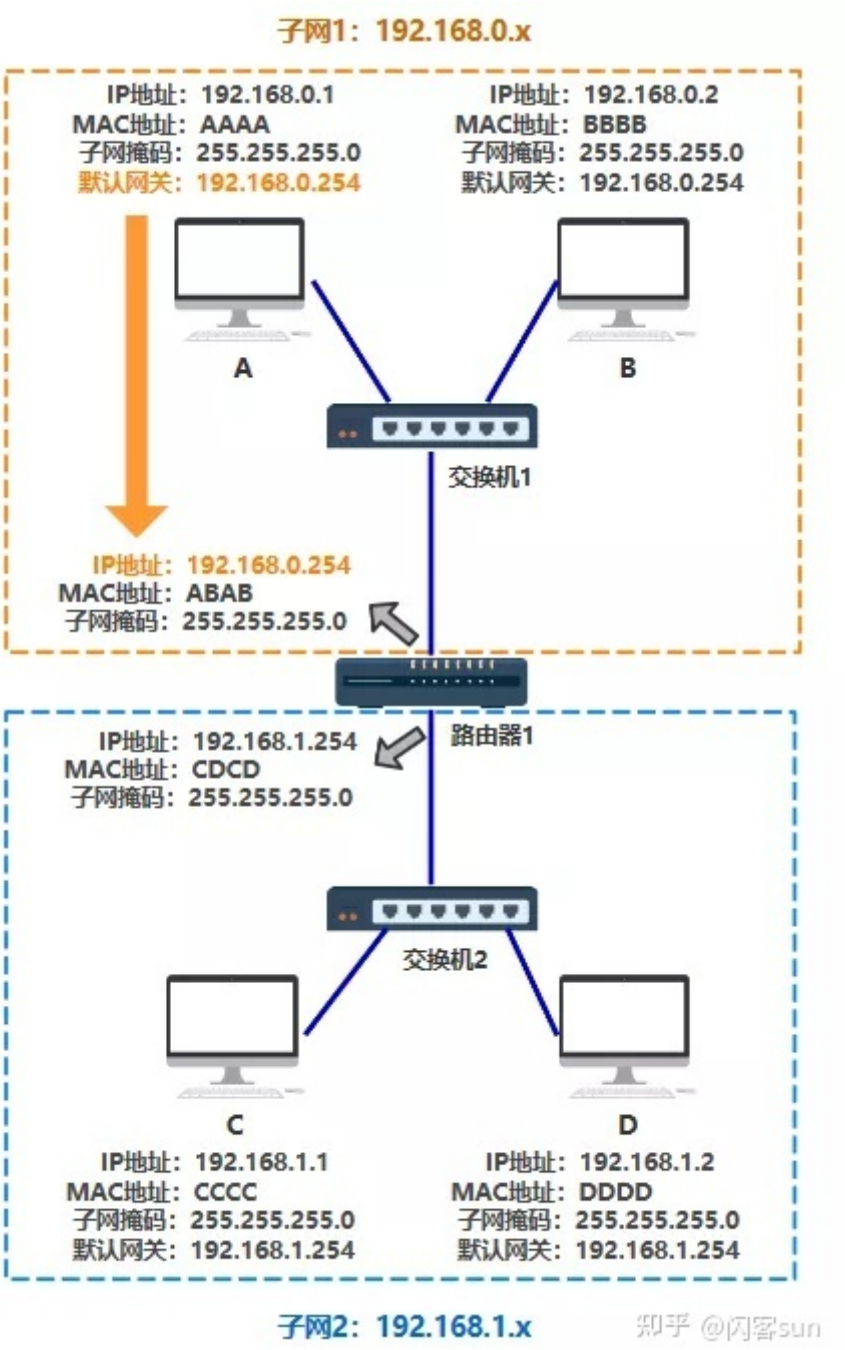
答案：在 A 上要设置默认网关

上一步 A 通过是否与 C 在同一个子网内，判断出自己应该把包发给路由器，那路由器的 IP 是多少呢?

其实说发给路由器不准确，应该说 A 会把包发给**默认网关。**

对 A 来说，A 只能**直接**把包发给同处于一个子网下的某个 IP 上，所以发给路由器还是发给某个电脑，对 A 来说也不关心，只要这个设备有个 IP 地址就行。

所以**默认网关，就是 A 在自己电脑里配置的一个 IP 地址**，以便在发给不同子网的机器时，发给这个 IP 地址。



仅此而已！

路由器如何知道C在哪里？

答案：路由表

现在 A 要给 C 发数据包，已经可以成功发到路由器这里了，最后一个问题就是，**路由器怎么知道，收到的这个数据包，该从自己的哪个端口出去**，才能直接（或间接）地最终到达目的地 C 呢。

路由器收到的数据包有目的 IP 也就是 C 的 IP 地址，需要转化成从自己的哪个端口出去，很容易想到，应该有个表，就像 MAC 地址表一样。

这个表就叫**路由表。**

至于这个路由表是怎么出来的，有很多路由算法，本文不展开，因为我也不会哈哈~

不同于 MAC 地址表的是，路由表并不是一对一这种明确关系，我们下面看一个路由表的结构。

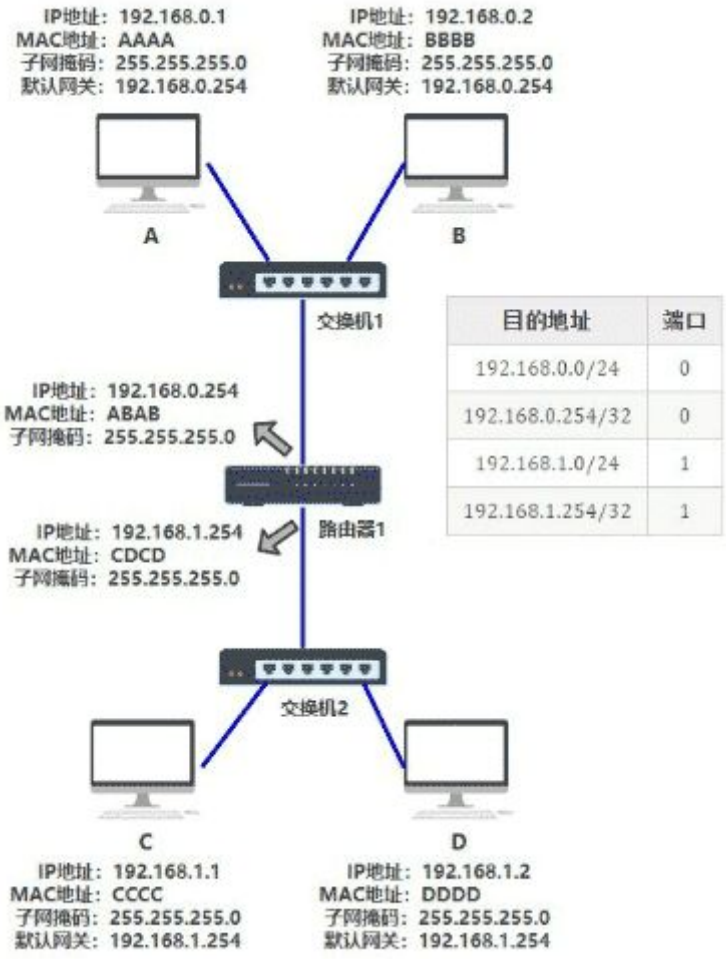
目的地址	子网掩码	下一跳	端口
192.168.0.0	255.255.255.0		0
192.168.0.254	255.255.255.255		0
192.168.1.0	255.255.255.0		1
192.168.1.254	255.255.255.255		1

我们学习一种新的表示方法，由于子网掩码其实就表示前多少位表示子网的网段，所以如 192.168.0.0（255.255.255.0） 也可以简写为 192.168.0.0/24

目的地址	下一跳	端口
192.168.0.0/24		0
192.168.0.254/32		0
192.168.1.0/24		1
192.168.1.254/32		1

这就很好理解了，路由表就表示，http://192.168.0.xxx **这个子网下的，都转发到 0 号端口，** http://192.168.1.xxx **这个子网下的，都转发到 1 号端口。**下一跳列还没有值，我们先不管

配合着结构图来看（这里把子网掩码和默认网关都补齐了）



刚才说的都是 IP 层，但发送数据包的数据链路层需要知道 MAC 地址，可是我只知道 IP 地址该怎么办呢?

答案：arp

假如你（A）此时**不知道**你同伴 B 的 MAC 地址（现实中就是不知道的，刚刚我们只是假设已知），你只知道它的 IP 地址，你该怎么把数据包准确传给 B 呢?

答案很简单，在网络层，**我需要把 IP 地址对应的 MAC 地址找到**，也就是通过某种方式，找到 **192.168.0.2** 对应的 MAC 地址 **BBBB。**

这种方式就是 **arp 协议**，同时电脑 A 和 B 里面也会有一张 **arp 缓存表**，表中记录着 **IP 与 MAC 地址**的对应关系。

IP 地址	MAC 地址
192.168.0.2	BBBB

一开始的时候这个表是**空的**，电脑 A 为了知道电脑 B（192.168.0.2）的 MAC 地址，将会**广播**一条 arp 请求，B 收到请求后，带上自己的 MAC 地址给 A 一个**响应。**此时 A 便更新了自己的 arp 表。

这样通过大家不断广播 arp 请求，最终所有电脑里面都将 arp 缓存表更新完整。

总结一下

好了，总结一下，到目前为止就几条规则

从各个节点的视角来看

电脑视角：

- 首先我要知道我的 IP 以及对方的 IP
- 通过子网掩码判断我们是否在同一个子网
- 在同一个子网就通过 arp 获取对方 mac 地址直接扔出去
- 不在同一个子网就通过 arp 获取默认网关的 mac 地址直接扔出去

交换机视角：

- 我收到的数据包必须有目标 MAC 地址
- 通过 MAC 地址表查映射关系
- 查到了就按照映射关系从我的指定端口发出去
- 查不到就所有端口都发出去

路由器视角：

- 我收到的数据包必须有目标 IP 地址
- 通过路由表查映射关系
- 查到了就按照映射关系从我的指定端口发出去（不在任何一个子网范围，走其路由器的默认网关也是查到了）
- 查不到则返回一个路由不可达的数据包

如果你嗅觉足够敏锐，你应该可以感受到下面这句话：

> 网络层（IP协议）本身没有传输包的功能，包的实际传输是委托给数据链路层（以太网中的交换机）来实现的。

涉及到的三张表分别是

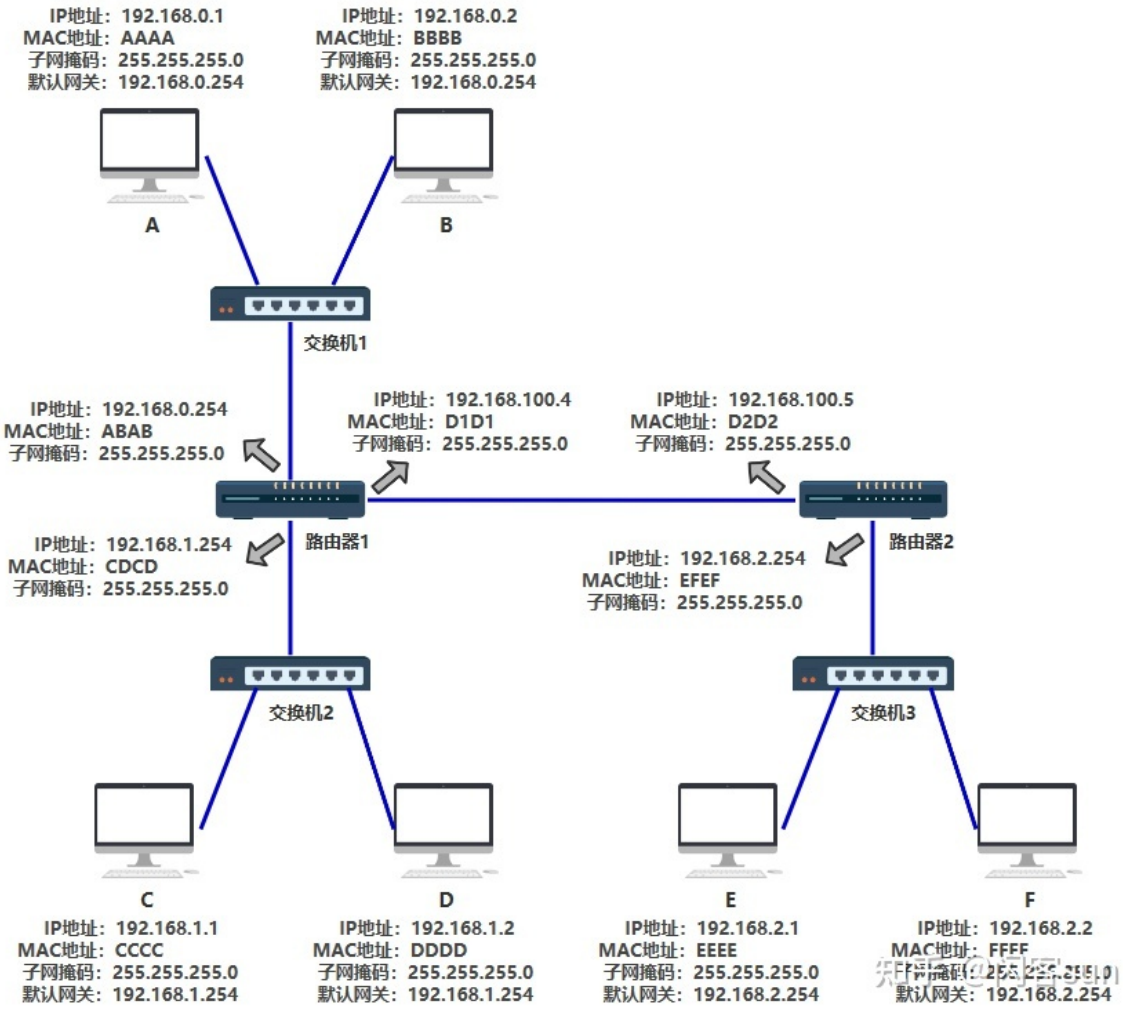
- 交换机中有 **MAC 地址**表用于映射 MAC 地址和它的端口
- 路由器中有**路由表**用于映射 IP 地址(段)和它的端口
- 电脑和路由器中都有 **arp 缓存表**用于缓存 IP 和 MAC 地址的映射关系

这三张表是怎么来的

- MAC 地址表是通过以太网内各节点之间不断通过交换机通信，不断完善起来的。
- 路由表是各种路由算法 + 人工配置逐步完善起来的。
- arp 缓存表是不断通过 arp 协议的请求逐步完善起来的。

知道了以上这些，目前网络上两个节点是如何发送数据包的这个过程，就完全可以解释通了

那接下来我们就放上本章 **最后一个** 网络拓扑图吧，请做好 **战斗** 准备！

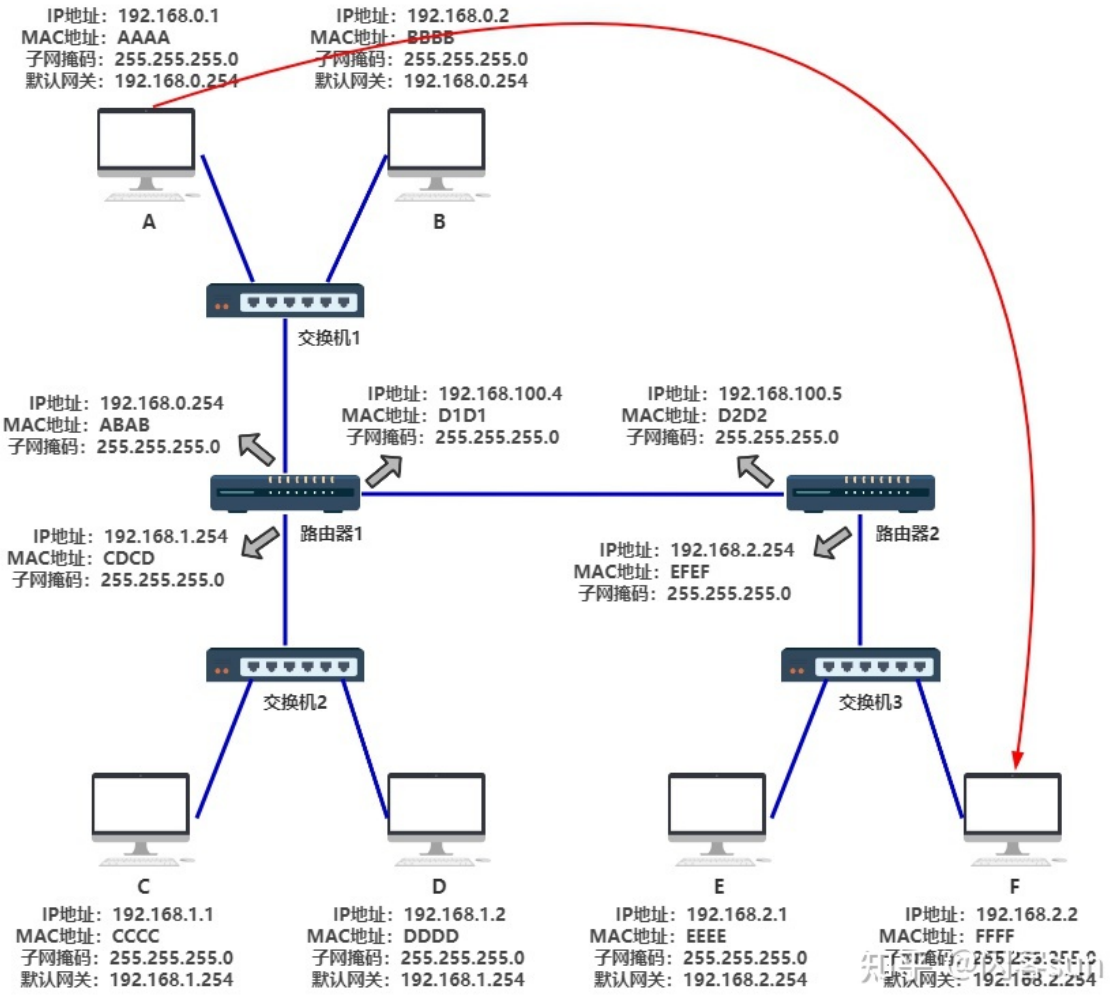


这时路由器 1 连接了路由器 2，所以其路由表有了下一条地址这一个概念，所以它的路由表就变成了这个样子。如果匹配到了有下一跳地址的一项，则需要再次匹配，找到其端口，并找到下一跳 IP 的 MAC 地址。

也就是说找来找去，最终必须能映射到一个端口号，然后从这个端口号把数据包发出去。

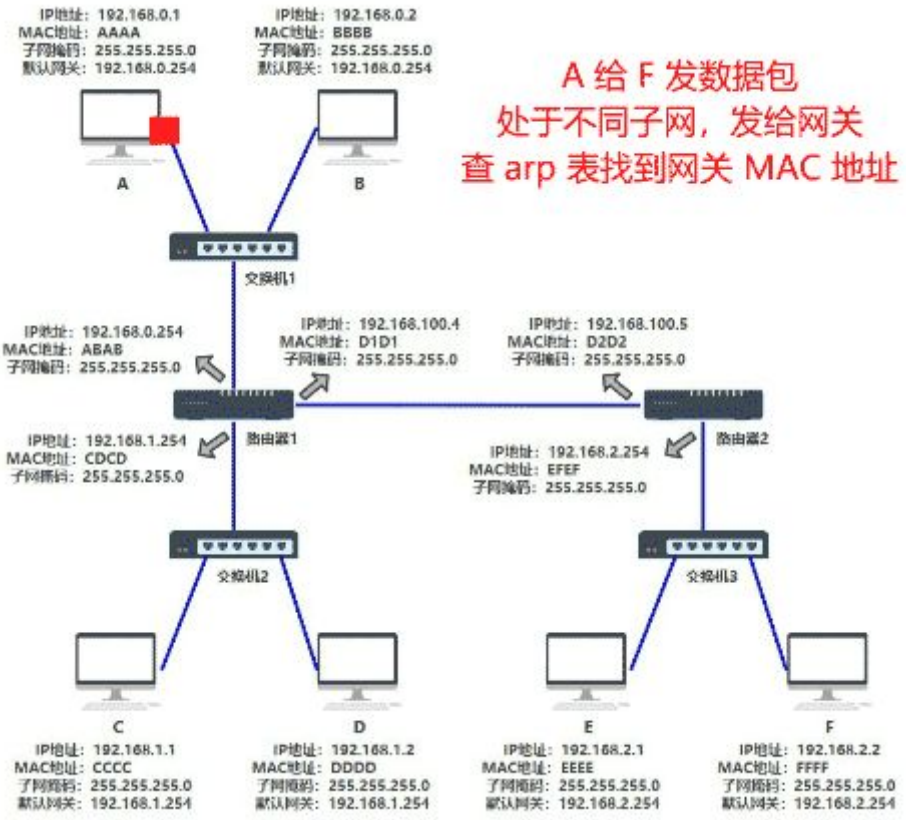
目的地址		下一跳
192.168.0.0/24		0
192.168.0.254/32		0
192.168.1.0/24		1
192.168.1.254/32		1
192.168.2.0/24	192.168.100.5	
192.168.100.0/24		2
192.168.100.4/32		2

这时如果 A 给 F 发送一个数据包，能不能通呢？如果通的话整个过程是怎样的呢？



思考一分钟...

详细过程动画描述：



详细过程文字描述：

1. 首先 A（192.168.0.1）通过子网掩码（255.255.255.0）计算出自己与 F（192.168.2.2）并不在同一个子网内，于是决定发送给默认网关（192.168.0.254）

2. A 通过 ARP 找到 默认网关 192.168.0.254 的 MAC 地址。

3. A 将源 MAC 地址（AAAA）与网关 MAC 地址（ABAB）封装在数据链路层头部，又将源 IP 地址（192.168.0.1）和目的 IP 地址（192.168.2.2）（注意这里千万不要以为填写的是默认网关的 IP 地址，从始至终这个数据包的两个 IP 地址都是不变的，只有 MAC 地址在不断变化）封装在网络层头部，然后发包

4. 交换机 1 收到数据包后，发现目标 MAC 地址是 ABAB，转发给路由器1

5. 数据包来到了路由器 *1*，发现其目标 *IP* 地址是 *192.168.2.2*，查看其路由表，发现了下一跳的地址是 *192.168.100.5*

6. 所以此时路由器 1 需要做两件事，第一件是再次匹配路由表，发现匹配到了端口为 2，于是将其封装到数据链路层，最后把包从 2 号口发出去。

7. 此时路由器 2 收到了数据包，看到其目的地址是 192.168.2.2，查询其路由表，匹配到端口号为 1，准备从 1 号口把数据包送出去。

8. 但此时路由器 2 需要知道 192.168.2.2 的 MAC 地址了，于是查看其 arp 缓存，找到其 MAC 地址为 FFFF，将其封装在数据链路层头部，并从 1 号端口把包发出去。

9. 交换机 3 收到了数据包，发现目的 MAC 地址为 FFFF，查询其 MAC 地址表，发现应该从其 6 号端口出去，于是从 6 号端口把数据包发出去。

10. F 最终收到了数据包！并且发现目的 MAC 地址就是自己，于是收下了这个包