

3.1

信号在网线和集线器中传输

3.1.1

每个包都是独立传输的

从计算机发送出来的网络包会通过集线器、路由器等设备被转发，最终到达目的地。我们在第2章的2.5.1节和2.5.2节讲过，转发设备会根据包头部中的控制信息，在转发设备内部一个写有转发规则的表中进行查询，以此来判断包的目的地，然后将包朝目的地的方向进行转发。邮递员在送信的时候只看信封，不看里面的内容，同样地，转发设备在进行转发时也不看数据的内容。因此，无论包里面装的是应用程序的数据或者是TCP协议的控制信息^①，都不会对包的传输操作本身产生影响。换句话说，HTTP请求的方法，TCP的确认响应和序号，客户端和服务端之间的关系，这一切都与包的传输无关。因此，所有的包在传输到目的地的过程中都是独立的，相互之间没有任何关联。

记住这个概念之后，本章我们来探索一下网络包在进入互联网之前经历的传输过程。这里我们假设客户端计算机连接的局域网结构是像图3.1这样的。也就是说，网络包从客户端计算机发出之后，要经过集线器、交换机和路由器最终进入互联网。实际上，我们家里用的路由器已经集成了集线器和交换机的功能，像图上这样使用独立设备的情况很少见。不过，把每个功能独立出来更容易理解，而且理解了这种模式之后，也就能理解集成了多种功能的设备了，因此我们这里将所有功能独立出来，逐个来进行探索。

^① TCP控制信息也叫TCP头部，但从以太网和IP传输网络包的角度来看，TCP头部并不算是“头部”，只能算是“数据”。

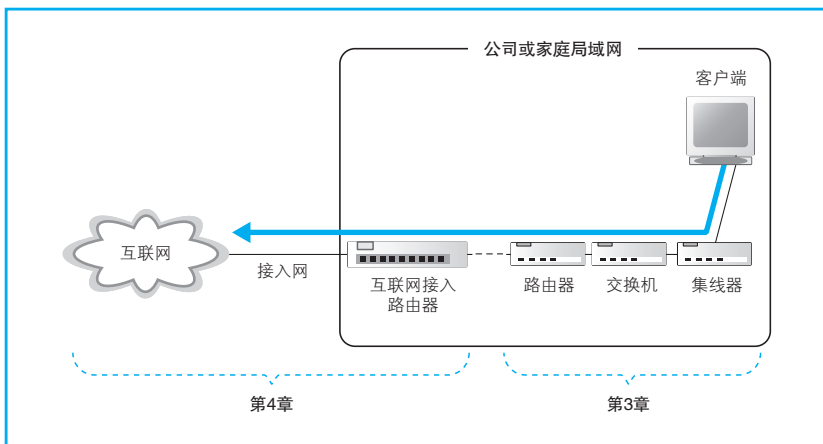


图 3.1 局域网的结构

3.1.2 防止网线中的信号衰减很重要

本章的探索从信号流出网卡进入网线开始。网卡中的 PHY (MAU)^① 模块负责将包转换成电信号，信号通过 RJ-45 接口进入双绞线，这部分的放大图如图 3.2 的右侧部分所示。以太网信号的本质是正负变化的电压，大家可以认为网卡的 PHY (MAU) 模块就是一个从正负两个信号端子输出信号的电路。

网卡的 PHY (MAU) 模块直接连接图 3.2 右侧中的 RJ-45 接口，信号从这个接口中的 1 号和 2 号针脚流入网线。然后，信号会通过网线到达集线器的接口，这个过程就是单纯地传输电信号而已。

但是，信号到达集线器的时候并不是跟刚发送出去的时候一模一样。集线器收到的信号有时会出现衰减（图 3.3）。信号在网线的传输过程中，能量会逐渐损失。网线越长，信号衰减就越严重。

① PHY (MAU)：以太网有多重派生方式，每种方式中信号收发模块的名称都不一样。现在 100 Mbit/s 以上的以太网中叫作 PHY (物理层装置)，以前低速方式中则叫作 MAU (介质连接单元)。

而且, 信号损失能量并非只是变弱而已。在第 2 章的图 2.25、图 2.26、图 2.27 中我们已经看到, 以太网中的信号波形是方形的, 但损失能量会让信号的拐角变圆, 这是因为电信号的频率越高, 能量的损失率越大^①。信号的拐角意味着电压发生剧烈的变化, 而剧烈的变化意味着这个部分的信号频率很高。高频信号更容易损失能量, 因此本来剧烈变化的部分就会变成缓慢的变化, 拐角也就变圆了。

即便线路条件很好, 没有噪声, 信号在传输过程中依然会发生失真, 如果再加上噪声的影响, 失真就会更厉害。噪声根据强度和类型会产生不同的影响, 无法一概而论, 但如果本来就已经衰减的信号再进一步失真, 就会出现对 0 和 1 的误判, 这就是产生通信错误的原因。



3.1.3 “双绞”是为了抑制噪声

局域网网线使用的是双绞线, 其中“双绞”的意思就是以两根信号线为一组缠绕在一起, 这种拧麻花一样的设计是为了抑制噪声的影响。

那么双绞线为什么能够抑制噪声呢? 首先, 我们来看看噪声是如何产生的。产生噪声的原因是网线周围的电磁波, 当电磁波接触到金属等导体时, 在其中就会产生电流。因此, 如果网线周围存在电磁波, 就会在网线中产生和原本的信号不同的电流。由于信号本身也是一种带有电压变化的电流, 其本质和噪声产生的电流是一样的, 所以信号和噪声的电流就会混杂在一起, 导致信号的波形发生失真, 这就是噪声的影响。

影响网线的电磁波分为两种。一种是由电机、荧光灯、CRT 显示器等设备泄漏出来的电磁波, 这种电磁波来自网线之外的其他设备, 我们来看看双绞线如何抑制这种电磁波的影响。首先, 信号线是用金属做成的, 当电磁波接触到信号线时, 会沿电磁波传播的右旋方向产生电流, 这种电流会导致波形发生失真。如果我们将信号线缠绕在一起, 信号线就变成了螺旋形, 其中两根信号线中产生的噪声电流方向就会相反, 从而使得噪声电

^① 高频信号会释放出更多的电磁波, 这些电磁波带走了一部分能量, 就造成了能量的损失。

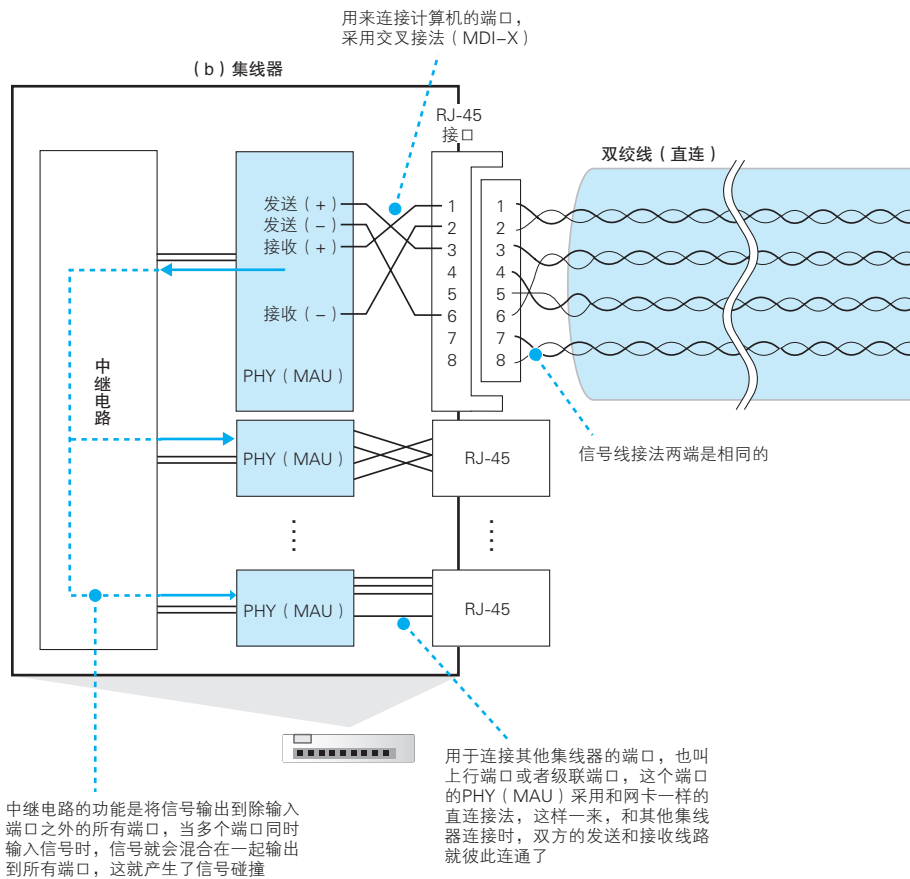
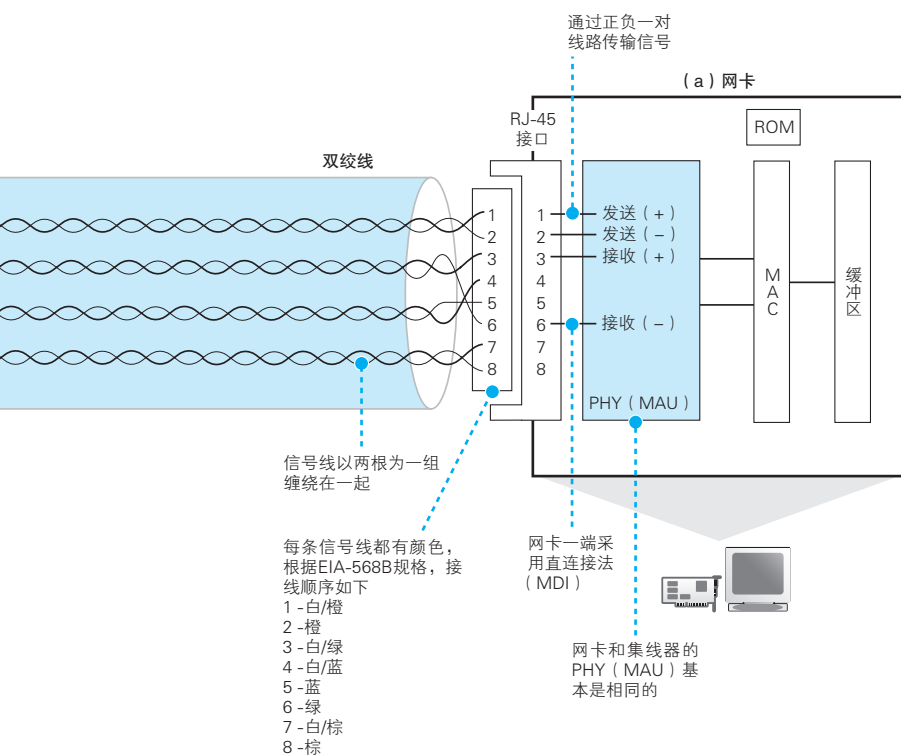


图 3.2 网卡与集线器用双绞线连接的形态



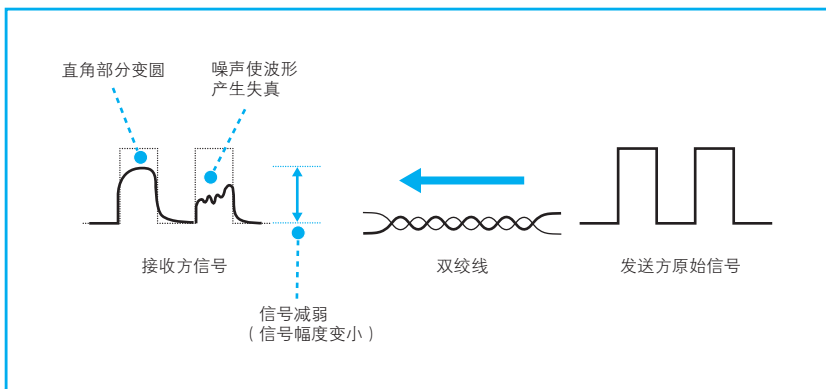


图 3.3 接收方信号变得难以识别

在发送方一端还十分清晰的矩形信号波形，在传输过程不断衰减，波形也会失真，导致接收方难以读取。

流相互抵消，噪声就得到了抑制（图 3.4（a））。当然，即便信号线变成螺旋形，里面的信号依然可以原样传输，也就是说，信号没有变，只是噪声被削弱了。

另一种电磁波是从网线中相邻的信号线泄漏出来的。由于传输的信号本身就是一种电流，当电流流过时就会向周围发出电磁波，这些电磁波对于其他信号线来说就成了噪声。这种内部产生的噪声称为串扰（crosstalk）。

这种噪声的强度其实并不高，但问题是噪声源的距离太近了。距离发生源越远，电磁波就会因扩散而变得越弱，但在同一根网线中的信号线之间距离很近，这些电磁波还没怎么衰减就已经接触到了相邻的信号线。因此，尽管信号线产生的电磁波十分微弱，也能够在相邻的信号线中产生感应电流。

要抑制这种噪声，关键在于双绞线的缠绕方式。在一根网线中，每一对信号线的扭绞间隔（节距）都有一定的差异，这使得在某些地方正信号线距离近，另一些地方则是负信号线距离近。由于正负信号线产生的噪声影响是相反的，所以两者就会相互抵消（图 3.4（b））。从网线整体来看，正负的分分布保持平衡，自然就会削弱噪声的影响。

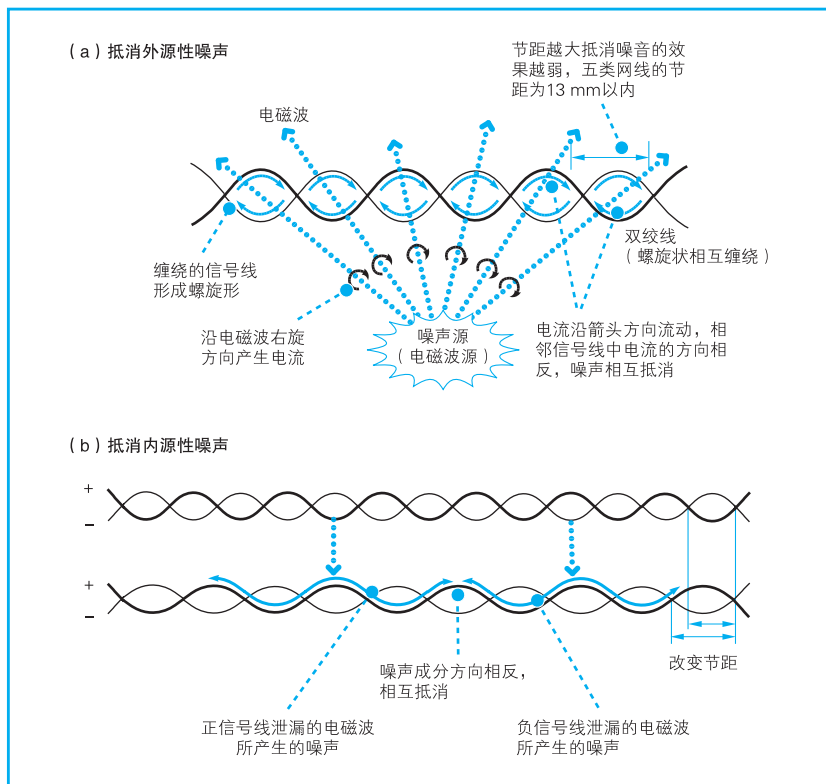


图 3.4 双绞线对噪声的抑制

(a) 通过两根信号线的缠绕抵消外源性噪声；(b) 通过改变节距抑制内源性噪声。

通过将信号线缠绕在一起的方式，噪声得到了抑制，从结果来看提升了网线的性能，除此之外还有一些工艺也能够帮助提升性能。例如在信号线之间加入隔板保持距离，以及在外面包裹可阻挡电磁波金属屏蔽网等。有了这些工艺的帮助我们，现在可以买到性能指标不同的各种网线。网线的性能是以“类”来区分的，现在市售双绞线的主要种类如表 3.1 所示。

表 3.1 双绞线的种类

类	含 义
五类 (CAT-5)	用于 10 Mbit/s (10BASE-T) 和 100 Mbit/s (100BASE-TX) 以太网, 可以最高 125 MHz 的频率在最长 100 米的距离内传输信号
超五类 (CAT-5e)	用于千兆 (1000BASE-T) 以太网, 对五类网线进行了改良, 改善了串扰, 也向下兼容 10BASE-T 和 100BASE-TX
六类 (CAT-6)	支持最高 250 MHz 的信号传输, 用于 1000BASE-TX 规格的千兆以太网和 10GBASE-T 规格的万兆以太网, 同时向下兼容 10BASE-T、100BASE-TX 和 1000BASE-T
超六类 (CAT-6A)	对六类网线进行了改良, 改善了外部串扰, 兼容 10GBASE-T、1000BASE-TX、1000BASE-T、100BASE-TX 和 10BASE-T
七类 (CAT-7)	支持最高 600 MHz 的高速信号传输, 兼容 10GBASE-T、1000BASE-TX、1000BASE-T、100BASE-TX 和 10BASE-T

3.1.4 集线器将信号发往所有线路

当信号到达集线器后, 会被广播到整个网络中。以太网的基本架构^①就是将包发到所有的设备, 然后由设备根据接收方 MAC 地址来判断应该接收哪些包, 而集线器就是这一架构的忠实体现, 它就是负责按照以太网的基本架构将信号广播出去。下面来看看它的工作方式。

集线器的内部结构如图 3.2 左侧部分所示。首先, 在每个接口的后面装有和网卡中的 PHY (MAU) 功能相同的模块, 但如果它们像网卡端一样采用直连式接线, 是无法正常接收信号的。要正常接收信号, 必须将“发送线路”和“接收线路”连接起来才行。在图 3.2 中, 集线器中的 PHY (MAU) 模块与接口之间采用交叉接线的原因正是在于此。

集线器的接口中有一个 MDI/MDI-X^② 切换开关, 现在你应该知道它是

① 2.5.6 节介绍过。

② MDI 是 Media Dependent Interface (媒体相关接口) 的缩写, MDI-X 是 MDI-Crossover 的缩写。

干什么用的了吧^①？MDI就是对RJ-45接口和信号收发模块进行直连线，而MDI-X则是交叉接线。由于集线器的接口一般都是MDI-X模式，要将两台集线器相连时，就需要将其中一台改成MDI模式（图3.5（a））。如果集线器上没有MDI切换开关，而且所有的接口又都是MDI-X时，可以用交叉网线连接两台集线器。所谓交叉网线，就是一种将发送和接收信号线反过来接的网线（图3.6）。

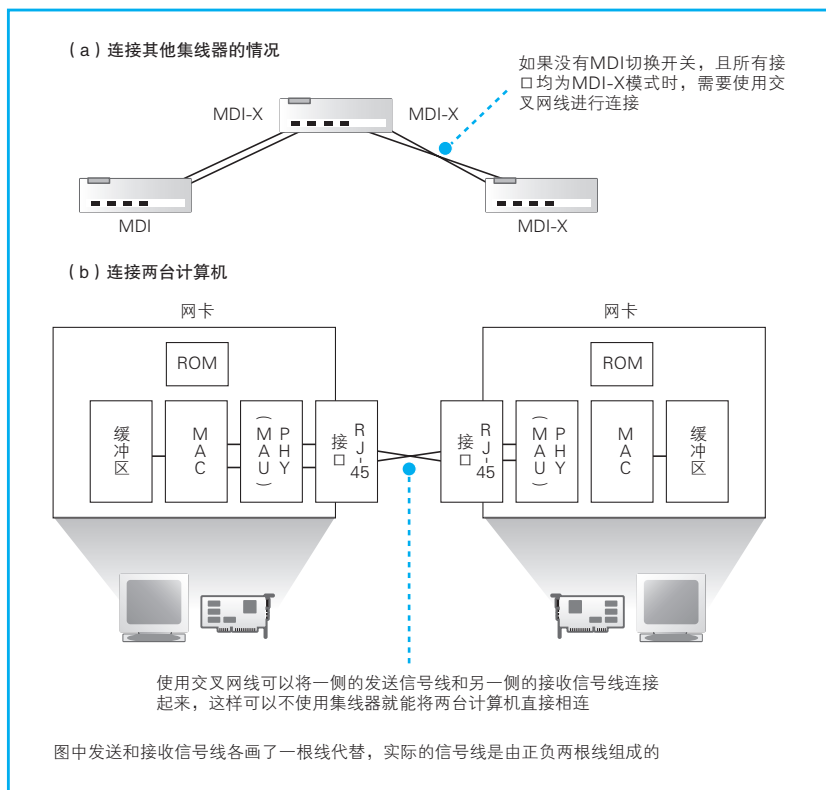


图 3.5 交叉网线的使用

① 也有一些产品上没有切换开关，而是安装了MDI和MDI-X两种接口。此外，还有一些产品能够自动判断MDI和MDI-X并在两种模式间自动切换。

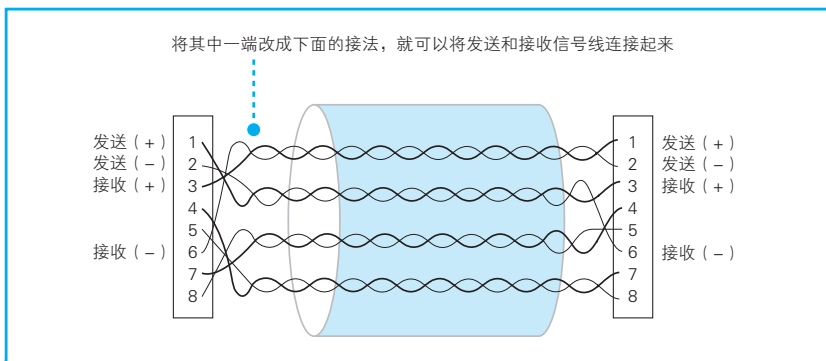


图 3.6 交叉网线

此外，交叉网线也可以像图 3.5 (b) 这样用于将两台计算机直接连接起来。网卡不仅可以连接集线器，因为网卡的 PHY (MAU) 模块和集线器都是一样的，所以两台计算机的网卡也可以相互连接，只要将一侧的发送信号线和另一侧的接收信号线连起来就可以收发数据了。

信号到达集线器的 PHY (MAU) 模块后，会进入中继电路。中继电路的基本功能就是将输入的信号广播到集线器的所有端口上。当然，也有一些产品具有信号整形、错误抑制等功能，但基本上就是将输入的信号原封不动地输出到网线接口。

接下来，信号从所有接口流出，到达连接在集线器上的所有设备。然后，这些设备在收到信号之后会通过 MAC 头部中的接收方 MAC 地址判断是不是发给自己的，如果是发给自己的就接受，否则就忽略^①。这样，网络包就能够到达指定 MAC 地址的接收方了。

集线器将信号发送给所有连接在它上面的线路。

^① 这一过程适用于客户端、服务器、路由器等所有具有收发以太网网络包功能的设备。我们后面会讲到，交换机是无视接收方 MAC 地址的，会将所有的包都接收下来。

由于集线器只是原封不动地将信号广播出去，所以即便信号受到噪声的干扰发生了失真，也会原样发送到目的地。这时，接收信号的设备，也就是交换机、路由器、服务器等，会在将信号转换成数字信息后通过 FCS^① 校验发现错误，并将出错的包丢弃。当然，丢弃包并不会影响数据的传输，因为丢弃的包不会触发确认响应。因此协议栈的 TCP 模块会检测到丢包，并对该包进行重传。

3.2 交换机的包转发操作

3.2.1 交换机根据地址表进行转发

下面来看一下包是如何通过交换机的。交换机的设计是将网络包原样转发到目的地，图 3.7 就是它的内部结构，我们边看图边讲。

首先，信号到达网线接口，并由 PHY (MAU) 模块进行接收，这一部分和集线器是相同的。也就是说，它的接口和 PHY (MAU) 模块也是以 MDI-X 模式进行连接的^②，当信号从双绞线传入时，就会进入 PHY (MAU) 模块的接收部分。

接下来，PHY (MAU) 模块会将网线中的信号转换为通用格式，然后传递给 MAC 模块。MAC 模块将信号转换为数字信息，然后通过包末尾的 FCS 校验错误，如果没有问题则存放到缓冲区中^③。这部分操作和网卡基本相同，大家可以认为交换机的每个网线接口后面都是一块网卡。网线接口和后面的电路部分加在一起称为一个端口，也就是说交换机的一个端口就

① FCS (帧校验序列) 在第 2 章介绍过。

② 早期的交换机基本上都和图 3.7 最上面的那种情况一样，是通过集线器和计算机进行连接的，由于集线器的接口是 MDI-X 模式，如果要用直连网线连接，那么交换机应该采用 MDI 模式的接口。不过现在我们基本上不使用集线器了，而是将计算机直接连接到交换机上，因此交换机也和集线器一样采用了 MDI-X 接线。

③ 如果检测到错误就丢弃这个包。

交换机内部有一张MAC地址与网线端口的对应表。当接收到包时，会将相应的端口号码和发送方MAC地址写入表中，这样就可以根据地址判断出该设备连接在哪个端口上了。交换机就是根据这些信息判断应该把包转发到哪里的。

MAC地址	端口	控制信息
00-60-97-A5-43-3C	2	...
00-00-C0-16-AE-FD	7	...
00-02-B3-1C-9C-F9	8	...
...

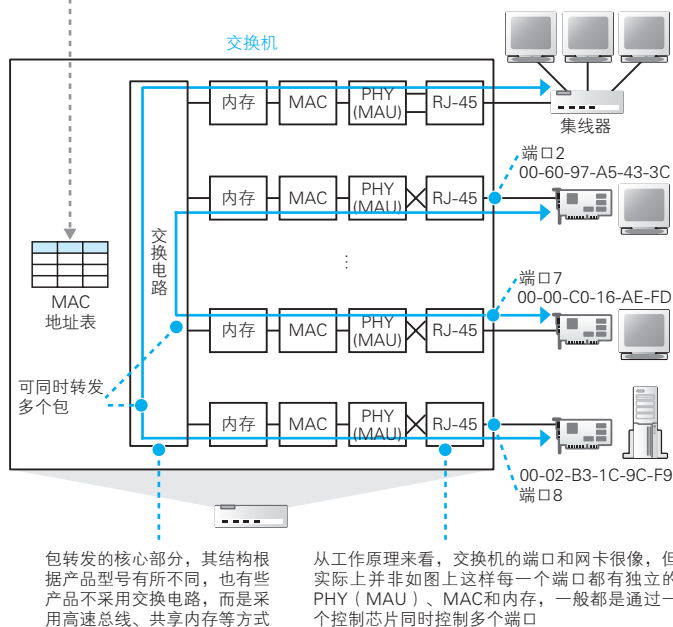


图 3.7 交换机的结构

相当于计算机上的一块网卡^①。但交换机的工作方式和网卡有一点不同。网卡本身具有 MAC 地址，并通过核对收到的包的接收方 MAC 地址判断是

① 换句话说，如果在计算机上安装多块网卡，并开启“混杂模式”让网卡接收所有的网络包，然后再安装一个和交换机具备同样功能的网络包转发软件，那么这台计算机就变成了一台交换机。

不是发给自己的，如果不是发给自己的则丢弃；相对地，交换机的端口不核接收方 MAC 地址，而是直接接收所有的包并存放到缓冲区中。因此，和网卡不同，交换机的端口不具有 MAC 地址^①。



交换机端口的 MAC 模块不具有 MAC 地址。

将包存入缓冲区后，接下来需要查询一下这个包的接收方 MAC 地址是否已经在 MAC 地址表中有记录了。MAC 地址表主要包含两个信息，一个是设备的 MAC 地址，另一个是该设备连接在交换机的哪个端口上。以图 3.7 中的地址表为例，MAC 地址和端口是一一对应的，通过这张表就能够判断出收到的包应该转发到哪个端口。举个例子，如果收到的包的接收方 MAC 地址为 00-02-B3-1C-9C-F9，则与图 3.7 的表中的第 3 行匹配，根据端口列的信息，可知这个地址位于 8 号端口上，然后就可以通过交换电路将包发送到相应的端口了^②。

现在来看看交换电路到底是如何工作的。交换电路的结构如图 3.8 所示，它可以将输入端和输出端连接起来。其中，信号线排列成网格状，每一个交叉点都有一个交换开关，交换开关是电子控制的，通过切换开关的状态就可以改变信号的流向。交换电路的输入端和输出端分别连接各个接收端口和发送端口，网络包通过这个网格状的电路在端口之间流动。举个例子，假设现在要将包从 2 号端口发送到 7 号端口，那么信号会从输入端的 2 号线进入交换电路，这时，如果让左起的 6 个开关水平导通，然后将第 7 个开关切换为垂直导通，信号就会像图上一样流到输出端 7 号线路，于是网络包就被发送到了 7 号端口。每个交叉点上的交换开关都可以独立工作，因此只要路径不重复，就可以同时传输多路信号。

① 内置用于实现管理等功能的处理器的交换机除外。这种交换机相当于在一个盒子里同时集成了计算机和交换机两种设备，因此其中相当于计算机的部分是具有 MAC 地址的。

② 有些产品不是用交换电路来传输网络包的，但交换电路是交换机的原型，“交换机”这个词也是从交换电路来的。

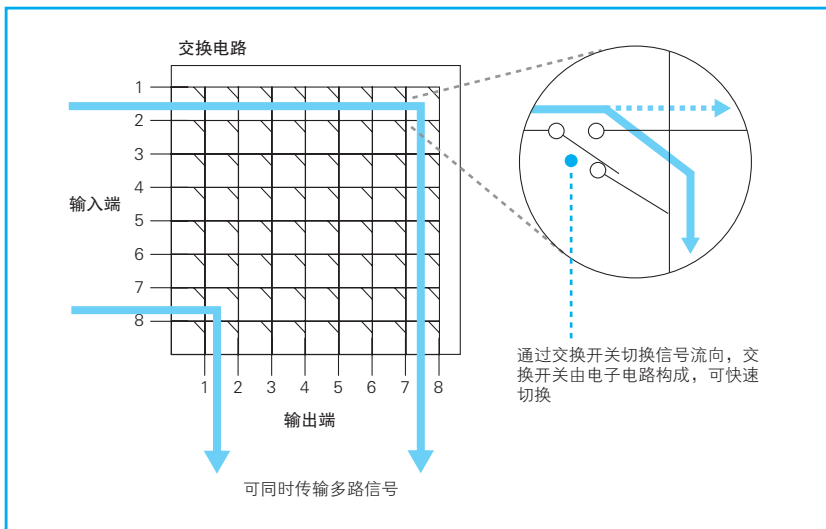


图 3.8 交换电路的设计

当网络包通过交换电路到达发送端口时，端口中的 MAC 模块和 PHY (MAU) 模块会执行发送操作，将信号发送到网线中，这部分和网卡发送信号的过程是一样的。根据以太网的规则，首先应该确认没有其他设备在发送信号，也就是确认信号收发模块中的接收线路没有信号进来。如果检测到其他设备在发送信号，则需要等待信号发送完毕；如果没有其他信号，或者其他信号已经发送完毕，这时就可以将包的数字信息转换为电信号发送出去。在发送信号的过程中，还需要对接收信号进行监控，这一点和网卡也是一样的。如果在发送过程中检测到其他设备发送信号，就意味着出现了信号碰撞，这时需要发送阻塞信号以停止网络中所有的发送操作，等待一段时间后再尝试重新发送，这一步和网卡也是一样的^①。

① 这个操作过程的前提是终端通过集线器连接到交换机，也就是半双工模式的工作方式。这是以太网的原型，但现在基本上都不使用集线器了，而是直接用交换机将终端和路由器相连接，在这种情况下，交换机的端口会自动切换为全双工模式。关于全双工模式的工作过程我们将稍后介绍。



交换机根据 MAC 地址表查找 MAC 地址，然后将信号发送到相应的端口。



3.2.2 MAC 地址表的维护

交换机在转发包的过程中，还需要对 MAC 地址表的内容进行维护，维护操作分为两种。

第一种是收到包时，将发送方 MAC 地址以及其输入端口的号码写入 MAC 地址表中。由于收到包的那个端口就连接着发送这个包的设备，所以只要将这个包的发送方 MAC 地址写入地址表，以后当收到发往这个地址的包时，交换机就可以将它转发到正确的端口了。交换机每次收到包时都会执行这个操作，因此只要某个设备发送过网络包，它的 MAC 地址就会被记录到地址表中。

另一种是删除地址表中某条记录的操作，这是为了防止设备移动时产生问题。比如，我们在开会时会把笔记本电脑从办公桌拿到会议室，这时设备就发生了移动。从交换机的角度来看，就是本来连接在某个端口上的笔记本电脑消失了。这时如果交换机收到了发往这台已经消失的笔记本电脑的包，那么它依然会将包转发到原来的端口，通信就会出错，因此必须想办法删除那些过时的记录。然而，交换机没办法知道这台笔记本电脑已经从原来的端口移走了。因此地址表中的记录不能永久有效，而是要在一段时间不使用后就自动删除。

那么当笔记本电脑被拿到会议室之后，会议室里的交换机又会如何工作呢？只要笔记本电脑连接到会议室的交换机，交换机就会根据笔记本电脑发出的包来更新它的地址表。因此，对于目的地的交换机来说，不需要什么特别的措施就可以正常工作了。

综合来看，为了防止终端设备移动产生问题，只需要将一段时间不使用的过时记录从地址表中删除就可以了。