第3章 现代通信网及其交换技术

在数据通信系统中，如果在终端与计算机之间或者计算机与计算机之间并不是通过专用线路连接的，而是要经过通信网络的接续过程来建立连接，那么就需要在网络的各个中间节点处实现转接功能，从而提供一条端系统与端系统之间的数据通路。通常将网络节点以某种转接方式来实现数据通路接续的技术称为交换(switching)。交换是通信网的核心技术，对交换技术的学习必须和通信网结合起来。

传统的交换技术包括：①电路交换技术：采用面向连接的方式，为通信双方分配一条具有固定带宽的通信电路，在通信结束之前，将一直占用所分配的资源。电路交换的实时性强、时延小，适用于传送和语音相关的业务。②分组交换技术：在通信之前不需要建立连接，根据分组头部的地址选择适当的链路将其发送到下一个节点。分组交换比电路交换线路利用率高，但时延较大，适合非实时性的数据业务。但随着信息活动的丰富，人们越来越迫切地需要通信网络把语音、数据和图像结合起来，并以一种统一的接入方式提供综合的多媒体服务。于是，通信界和计算机界在多媒体综合服务领域展开了激烈的竞争。计算机界开发了分组交换、帧中继、快速分组交换，以及 ATM 交换；通信界则发展了电路交换、多速率电路交换、快速电路交换等。归纳来看，在数据通信技术的发展和演变过程中，人们曾经考虑过的通信网络可能采用的交换技术主要包括电路交换、分组交换、帧中继、信元交换等，如图 3-1 所示。

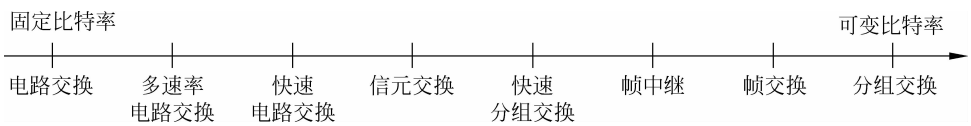


图 3-1　通信网可能采用的交换方式

交换技术发展的又一个里程碑是软交换技术，它提出了一个新概念，即将呼叫控制、承载建立、业务逻辑相分离，各实体之间通过标准的协议进行连接和通信，从而可以更加灵活的开展业务。下一代网络(next generation network，NGN)以软交换为核心，支持语音、视频、数据等多媒体综合业务。

本章将最后介绍无线数据通信网。无线数据通信网利用电磁波在空气中发送和接收数据，而不需线缆介质的连接。常用的无线数据通信网包括无线局域网、Ad hoc 网络和无线传感器网络。

3.1　电话网与电路交换

3.1.1　电话网的分级结构

在公用电话网中，通常采用本地接入、长途中继和国际出入的分级结构，如图 3-2 所示。本地网中的汇接局用于连接两个本地交换中心，主要作用是疏通本地话务。

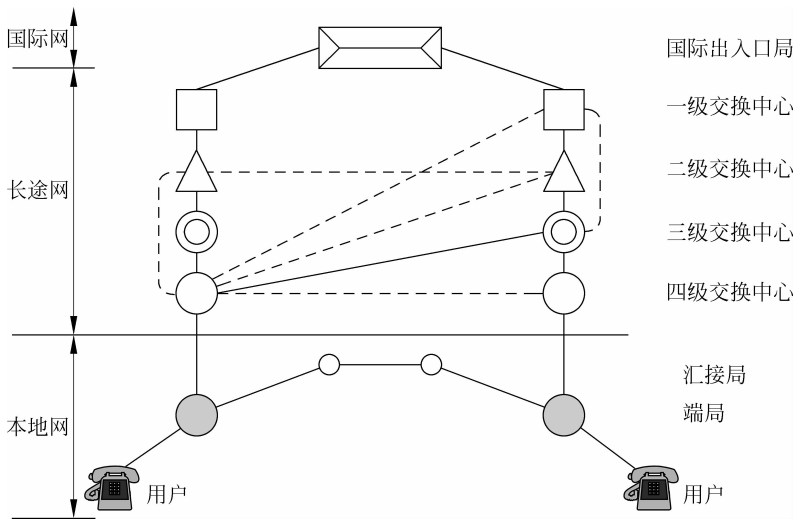


图 3-2　我国电话网的分级结构

在设计电话网时，必须考虑组网方面的几点基本要求（同时也是各种通信网络的基本组网要求）：

（1）分级式的网络可降低传输成本，但增加了交换中心的费用。组网时，要求在分级网的每一层次上，在传输成本与交换成本之间进行折中。这种折中很大程度上取决于制造传输设备和交换设备的技术。

（2）在本地网中，设置交换中心可以大大减少连接各个用户的线路。设有 n 个用户，若相互之间直接相连，则需要 $n(n-1)/2$ 条线路；但如果经过交换中心相连，则只需要 n 条线路。

（3）还需要考虑交换中心覆盖范围与交换中心总数间的折中。覆盖范围小，则总数多，而交换中心本身比较简单；反之，则本地接入线路的成本高，但中继线数目减少。

（4）设置多级的长途交换中心，可以减少相距较远的交换中心之间的直接线路数，从而减少了中继线的成本，但需要大容量的长途交换机。

3.1.2　电路交换基本原理

电路交换是最早用于数据通信的交换方式。所谓电路交换是指交换系统为通信的双方寻找并建立一条全程物理通路，以供双方传输信号（信息），直至信息交换结束。

电路交换是从一端到另一端传递信息的最简单方式，这种传输通路是双向的。因为电

路交换沿用了传统电话网(PSTN)的交换技术,所以可以直接利用电话网来进行数据通信。顺便指出,数字数据网(DDN)一般用于向用户提供专用的数字数据传输信道,或提供将用户接入公用交换网的接入信道,但这种专线方式不包括交换功能。

电路交换的基本过程是:在开始正式的数据传输之前,首先由通信的一方发起呼叫,等到与另一方建立起一条转接式的数据通路后开始数据传输。在整个传输期间,该通路始终为通信双方所占用。当所有的数据传输结束后,可以由任何一方发起断开连接,从而释放连接。电路交换的呼叫建立及线路上信息传输的情况如图 3-3 所示。

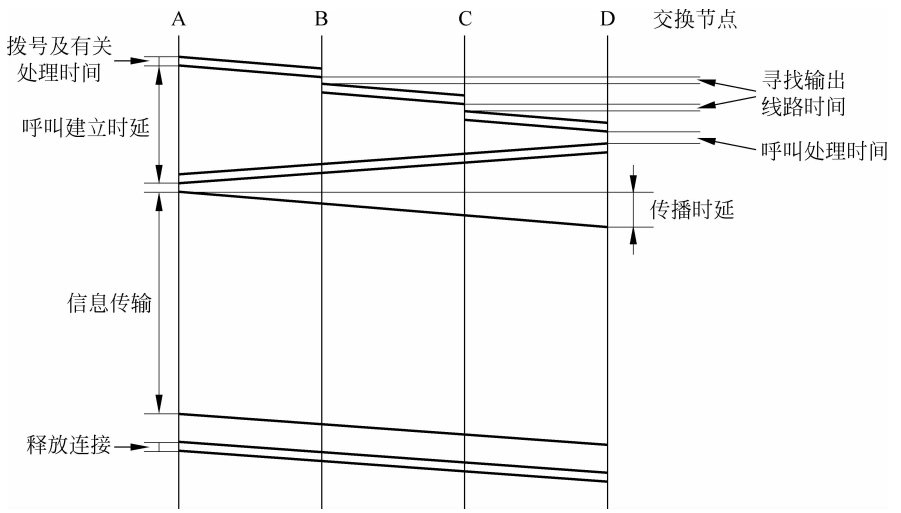


图 3-3 电路交换示意图

图 3-3 中表示了从源节点 A 到目的节点 D 采用电路交换的传输过程。节点 A 首先把希望与节点 D 建立连接的呼叫请求信号通过直接线路传送给节点 B。节点 B 收到这一呼叫请求信号后,经一定的处理时间以搜索一条合适的输出线路,然后把信号传送到节点 C。同样地,节点 C 又传送到目的节点 D。当节点 D 可以接纳这一条连接电路的建立时,就向节点 A 发送一个连接确认信号,这一信号将直接返回到节点 A,在中间节点 C 和 B 上没有任何搜索时延,因为该电路已建立。

于是节点 A 与 D 之间的数据通路就得以建立起来。接着,数据传送阶段开始。在这一阶段,A 与 D 的用户之间的信息交换除了传播时延之外,没有其他的时延。这一数据传送结束之后,最后是一个简单的释放连接过程。

从图 3-3 可以看出,建立电路连接所需的呼叫时延较长。然而,在数据传送阶段,信息交换除了传播时延外,不需要中间交换节点的额外处理,故电路交换可用于实时性要求较高的场合。

可见,电路交换的主要优点在于:数据传输时延小、提供的电路对用户是透明的、信息传送的吞吐量大。它的缺点主要有两个:其一是必须有一个呼叫建立过程(时延较大);其二是电路建立后,专供通信的双方使用,即所占用的带宽是固定的。当无信息传输时,所建立的电路未被利用,所以网络资源的利用率较低,尤其是对于具有突发性的计算机数据而言效率更低。因此,电路交换不能适应网络发展的需求。

3.1.3　交换结构

在了解电路交换的基本原理之后，还需要考查其实现结构。这就涉及传输链路的互连问题，它包括以下两个方面：①为了更有效地利用长距离传输设备，要把某些链路上请求传送到同一处的业务量复用在同一条链路上，这称为业务量集中。②一条链路上的业务量可能需要解复用到抵达不同地点的几条传输链路上，这称为业务量交换。

输入-输出链路之间的互连方式，可以用图 3-4 作概念性的表示。m 条输入链路与 n 条输出链路用一个交换网络实现互连，这是交换网络的一般构造形式。

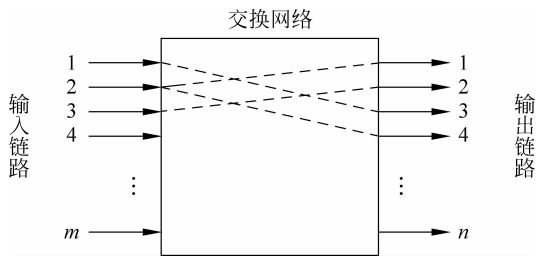


图 3-4　交换网络中链路之间的互连表示

从图 3-4 中可以看到可能有以下几种连接方式：

(1) 一条输入链路不需要任何输出。

(2) 一条输入链路需连接到一条输出链路，这就是点到点连接。

(3) 一条输入链路需连接到两条或多条输出链路，这称为点到多点连接。

需要指出，当多个输入需要同时连接到同一输出时，认为发生了输出冲突，这是交换机制中需要特别加以研究的问题，以下讨论中暂不考虑这种情况。

交换网络具有两种实现结构，下面分别进行介绍。

1. 空分交换

所谓空分交换，是指输入链路按空间分布来安排所需要的输出链路。一种典型的空分交换结构称为纵横制交换(crossbar switching)，如图 3-5 所示。

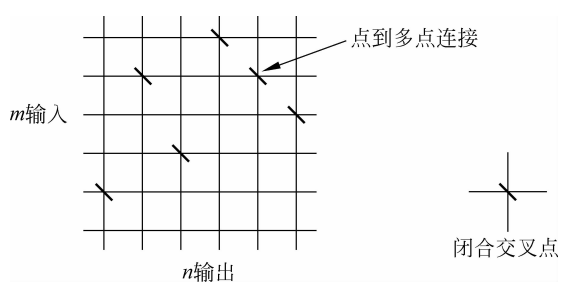
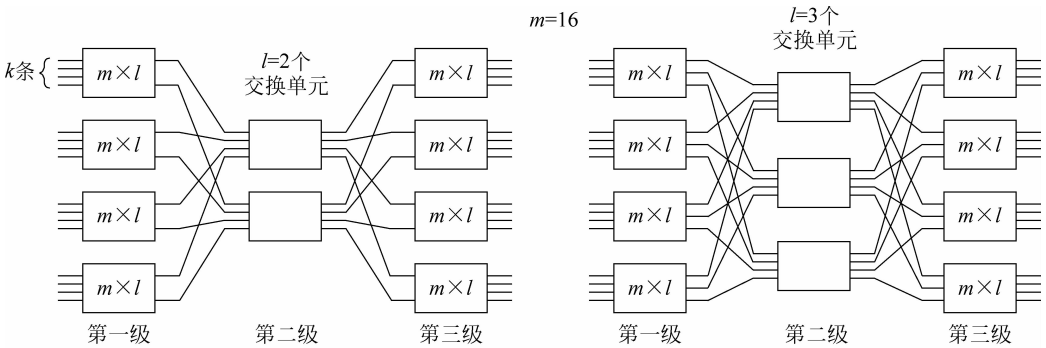


图 3-5　纵横制空分交换示意图

每条水平的输入链路与垂直的输出链路之间都存在一个交叉点开关。将某个交叉点开关闭合形成电气接触，就能在相应的输入-输出之间形成连接。由此可见，当输入、输出链路

的数目增加时，交换网络的交叉点个数将按链路数的平方关系增长，这将使控制机构复杂化。

为了减少交叉点的数目，可以把所需的大容量交换网络划分成小容量的交换单元，并将这些交换单元互连起来构成级联的网络，这样所用的交叉点数和相应的控制机构将得到简化。图 3-6(a)和图 3-6(b)分别给出了采用三级交换单元来构造交换网络的例子。



(a) 第二级交换单元数为2的交换网络　　(b) 第二级交换单元数为3的交换网络

图 3-6　用三级交换单元的互连构造交换网络

为了示例的简单，设共有 m 条输入链路和 m 条输出链路，$m=16$。在第一级，每个交换单元各有 k 条输入链路，$k=4$，所以需要 $m/k=4$ 个交换单元，以容纳总的 m 条输入链路。而每个交换单元输出链路的数目则受到第二级交换单元的个数的限制。

在图 3-6(a)和图 3-6(b)的第二级中设置的交换单元个数(用 l 来表示)分别为 2 和 3，即 $l=2$ 和 $l=3$，这就说明相应的第一级交换单元的输出链路数分别为 2 和 3。另外，第二级交换单元的输入和输出链路数都等于第一级交换单元的个数(即 $m/k=4$)，以实现所有输入-输出对之间的转接。

第三级交换单元的设置与第一级交换单元是对称的。因此，按照图 3-6 中的互连方式，对于每对输入-输出都可以使用第二级交换单元中的任何一个。也就是说，在图 3-6(a)中，每对输入-输出可以有两条连接通路，而图 3-6(b)中则有三条连接通路。

下面来计算三级交换单元总共需要的交叉点数：在第一级中有 m/k 个交换单元，每个交换单元的交叉点数为 kl 个，总数即 ml 个；第二级中有 l 个交换单元，每个交换单元有 $(m/k)^2$ 个交叉点；第三级的交叉点数与第一级中的相同。所以，总共的交叉点数量为 $2ml+l(m/k)^2$。例如，对于 $m=800$，$k=40$，$l=20$ 的交换网络，需要 40 000 个交叉点。但是如果使用 $m\times m$ 的交换网络，则要求有 640 000 个交叉点。

需要注意，交叉点数目的减少是以连接的阻塞为代价的。例如图 3-6(a)，第二级的交换单元总共只能提供 8 条输入链路，因此最多只能同时接纳 8 个呼叫。当第 9 个呼叫到来时，它不被允许建立连接，即使此时输出链路是空闲的，通常将这种现象称为呼叫损失(简称呼损)。图 3-6(b)的交换网络要好一些，因为它同时能处理最多 12 个呼叫，但它引入了更多的交叉点。

以下介绍的 Clos 定理，给出了基于三级互连交换单元来构造严格无阻塞的交换网络的充要条件，对定理的证明从略。所谓严格无阻塞，是指不管网络处于什么状态，总有可能在

任意的输入-输出对之间建立连接，而不会扰乱原来网络中已建立起来的连接。

Clos 定理　对于 $m\times n$ 的交换网络，当且仅当第二级交换单元的个数 $l\geqslant m+n-1$ 时，交换网络是严格无阻塞的。特别地，对于 $m\times n$ 的对称网络，当且仅当 $l\geqslant 2m-1$ 时，该网络是严格无阻塞的。

2. 时分交换

除了空分交换以外，也可以利用时分交换（也称为时隙交换），把输入链路和输出链路连接起来。所谓时分交换，是指输入链路按时间顺序来安排所需要的输出链路。

在时分交换结构中，m 条输入链路共用一条物理总线，并被依次扫描，以建立一个 m 个时隙的输入帧。这样，各个用户按照所分配的时隙轮流使用传输媒介，从而提高了线路的利用率。此时，用户的传输在时间上是不连续的，但扫描总线的速度足够快，所以用户并不会觉察正与其他用户共享同一传输线路和交换资源。

时隙交换可以被看作为一个缓冲器，从一个输入帧写入，再按照不同的时隙顺序读出到一个输出帧中，如图 3-7 所示。

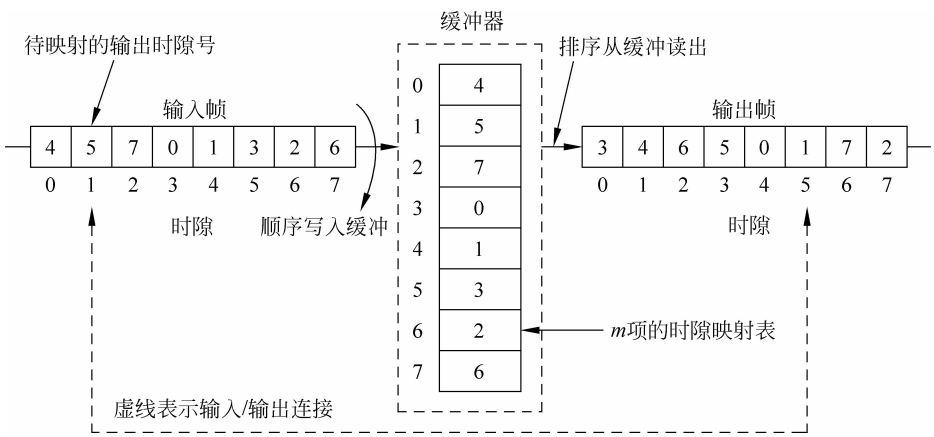


图 3-7　时分交换示意图

输入帧含有 m 个时隙，每个输入时隙内的数字表示信息传递所使用的输出时隙号。m 个输入时隙中的信息被顺序地写入到有 m 个相应存储区间的缓冲器中，而且输入帧的写入间隔是由扫描周期控制的。

输出帧一般也分为 m 个时隙。在一个输出帧内，缓冲器的内容是按照所请求的顺序被读到输出时隙内。所请求的顺序是指在输入时隙中指明的输出时隙号的先后次序，因此输出帧是被重新排序过的，其时隙顺序则由呼叫请求时确定的连接方式来决定。为了能建立输入时隙与输出时隙的对应关系，需要保存一张包含 m 项的时隙映射表。下面来说明图 3-7 中所示的时分交换的例子。

例如，输入时隙 1 中的数字为 5，表明需要在输出帧中的时隙 5 内，从缓冲器的第 1 号存储区间中读出信息，这也就说明了输入 1 与输出 5 建立了连接，或者说，输入时隙 1 被交换到输出时隙 5，从而完成了时分交换的功能。所以我们也可以将时分交换称为时隙交换。

当输入-输出连接建立完成之后，可交换的时隙也就确定下来了。即使在某个时隙内，

通信的一方没有信息要发送，该时隙仍旧必须为此连接保留着，所以虽然时分交换没有空分交换结构中明显的物理链路，但整个交换结构仍属于电路交换，这就意味着链路的带宽资源还是有所浪费。

实际上，空分交换和时分交换两者是等效的。如果把时分交换中的每一个时隙看成一条电路，则时分交换的效果与空分交换是相同的。例如，图 3-7 所示的时分交换可以等效于图 3-8 所示的空分交换结构。

另一方面，空分交换也可用时分交换来实现。由于已复用链路的每一时隙只是一条电路，而时隙形成的信息互换可以等效于各电路的交换。因此，时分交换也能用来互连多个输入-输出（每一输入-输出对提供一条电路），只要将多个输入先复用到一个时分复用（TDM）的数据流，然后将互换的 TDM 流解复用到各个输出上。

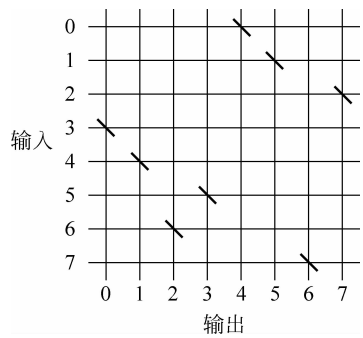


图 3-8　时分交换等效的空分交换

3. 时分复用的空分交换

空分交换和时分交换是两种基本的电路交换结构。现在来讨论这样一个问题：时分复用的链路如何用空分交换网络（如纵横制交换结构）来实现互连。在此假定在空分交换网络的输入链路上，帧和时隙都是同步的。

在每一个时隙内，每条输入链路可能要求连接到一条输出链路，而在各个时隙内，输入-输出的连接请求可能都不相同。因此，连接输入-输出的交叉点必须逐个时隙地予以设置。从这一意义上来说，可称空分交换是时间复用的，将这种结构称为时分复用的空分交换。

下面以图 3-9 所示的示意图为例，对时分复用的空分交换加以说明。

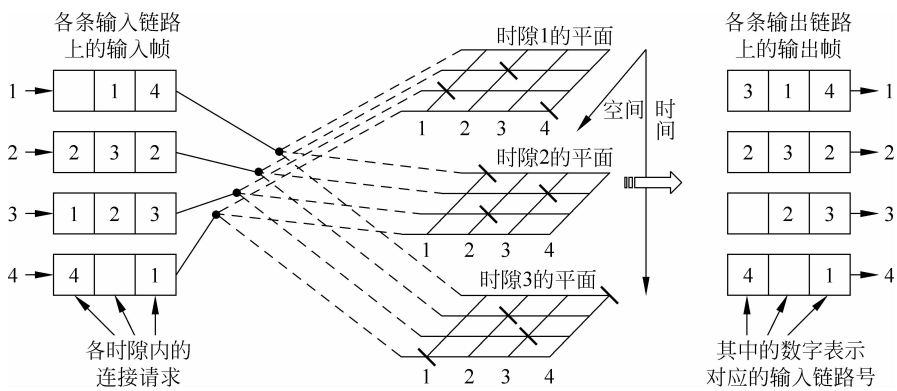


图 3-9　时分复用的空分交换示意图

例如，在时隙 1 内，输入链路 1 没有连接请求，对应时隙内为空，其余的输入链路 2、3、4 分别需要连接到输出链路 2、1、4 上去，所以时隙 1 的空分交换平面上就有三个闭合交叉点，即 2→2、3→1 和 4→4，于是此时输出链路 1、2、4 上分别传送来自输入链路 3、2、4 的信息，而输出链路 3 上为空。

3.2　数据网与分组交换

3.2.1　电路交换不适合计算机通信

从通信资源的分配方法来看，电路交换是预先分配传输带宽（这里是指广义的带宽，即将时分交换的时隙宽度也称为带宽）。在通信的全部持续时间内，用户始终占用端到端的固定传输带宽。然而，当电路交换的通信系统用来传输计算机或终端的数据时，就出现了新的问题。这是因为计算机的数据是突发性和间歇式地出现在传输线路上的，与电话通信时传送连续的语音信号相比，在计算机通信时，线路上真正用来传送数据的时间往往不到10%。在绝大部分时间里，通信线路实际上是空闲的，但带宽却始终被占据着，所以采用电路交换来传输计算机数据的效率是很低的。

不仅如此，电路交换中建立物理通路所需的呼叫过程对计算机通信而言也嫌太长，例如5Kb的计算机数据在传输速率为9600b/s的线路上传送时，只需半秒左右的时间，而从呼叫开始到连接建立的时延一般约5～10秒，相比而言，呼叫过程占用的时间就太多了。

另外，由于计算机和各种终端的传送速率很不一样，当采用电路交换时，不同类型、不同速率的计算机或终端很难相互通信，因此，可以考虑使传送的数据经过一些缓冲器暂存一下，经过适当变换之后再进行发送或接收，这就要求采用新的交换方式。而且，计算机通信中要求非常可靠、正确无误地传送每一个比特，这也需要采取有效的差错控制技术。

此外，电路交换中不可避免地存在呼叫损失现象。为了解决以上这些问题，在计算机通信网中一般不采用电路交换，而采用存储-转发（store-and-forward）的交换机制。

3.2.2　存储-转发机制

存储-转发是不同于电路交换的一种数据交换方式，它不需要通过呼叫建立起物理的端到端的接续通路，而是以接力方式将用户数据在交换节点之间逐段地传送，直至到达目的地。在存储-转发的交换方式中，用户的数据（可称为报文）所经过的通信线路都是动态地被利用，担任数据转接的交换节点总是先把数据报文接收并存储下来，然后根据对应的输出线路和下一个交换节点的当前状况（如线路是否拥挤、输入缓冲器是否溢出等）再将报文转发出去。

计算机通信网中采用存储-转发机制发送数据信息，其原因主要有以下几点：

（1）提高链路带宽或节点中的缓冲器等网络资源的利用率。采用存储-转发技术可以把不同用户的信息集中在一起传输，从而减少了信道的空闲时间，也可以减少时分交换中被不传输信息的空时隙所浪费的缓冲空间。

（2）提高系统的可靠性。例如，当电话网络中的交换局发生故障时，与该局相关的所有电话都将无法通信。而计算机通信网中的某一个交换节点发生故障时，数据仍可以通过其他交换节点绕道到达目的地。

（3）便于用户对高层信息资源的共享。例如电话系统中发送方必须等待接收方空闲时

才能和对方通信，且双方之间的通信是独占式的。而计算机通信网则允许多个用户同时和一个接收方通信，明显的一个例子就是世界范围内的用户随机访问同一个 WWW 服务器。另一方面，计算机通信网也允许一个用户向其他多个用户以广播方式或组播方式通信，而在电话网络中要实现多点通话并不十分容易。

(4) 便于计算机处理。计算机可以根据发送和接收的需要灵活地处理各个转发的数据信息。例如当接收方的计算机任务很繁忙时，交换节点可以暂缓将数据传送给它，而先处理发送到其他目的地的数据。

(5) 减少信息的重传。对于电路交换中的连续传输方式来说，接收方只有正确无误地接收到最后一个被传送的数据单元之后才能表示已收到对方发送来的信息。如果在传送过程中发生了误码或丢失等传输错误，则必须再次从头开始发送整个信息。而对于存储-转发方式来说，只需要重新传输出错的或后续的几个数据单元就可以了。

由此可见，存储-转发交换方式的主要优点是提供了可共享的网络资源(包括通信线路和缓冲器)，而这一特点正是计算机通信所需要的。但需要指出的是，当数据经过每一个交换节点时，都会引入交换时延，而不像电路交换那样仅存在传播时延。

3.2.3 从报文交换到分组交换

根据被交换数据单元长度的不同，存储-转发交换主要有两种实现方式，即报文交换和分组交换。下面来讨论它们的工作原理。

1. 报文交换

在报文交换(message switching)中，多个用户共享一条事先已存在的物理通路，但这种方式不要求在通信源端和宿端之间建立专用通路，这也就是与电路交换的本质不同。当源端发送信息时，它把要发送的信息按照网络认可的格式组织成一个数据包——报文(网络中交换与传输的数据单元)。报文包含了将要发送的完整的数据信息，其长短很不一致。例如一个报文可能是一封电子邮件，也可能是一个文本文件，或者可能是事务查询的应答信息等。

为了使交换节点能够确定将报文转发出去的路径(称为路由选择)，必须在该报文中某个约定的位置(称为报头)携带宿端的地址。整个报文在网络中一站一站地接力传送，当某一中间节点收到一个报文之后，将该报文存储下来，检查其中的目的地址，并排队等候到下一个节点的链路可用的时候，再把报文转发出去。经过多次的存储-转发，最终到达宿端，所以报文交换属于存储-转发交换方式。

关于报文交换，还需要说明以下几点。

(1) 报头中携带的信息除了目的地址外，还包括其他一些与传输和控制有关的附加信息。虽然不同的计算机通信网可能采用不同的协议规定而导致报文的具体格式可能不相同，但一般情况下每个报文都应包括以下信息：

- 报文的起始标志和报文长度；
- 有效数据的开始标志，这也可通过报头部分的长度来指明；
- 数据源端的地址，用来告知接收端报文是从哪里发出的；
- 数据目的端的地址，有些场合下还可能包括完整的传输路由信息；

- 控制信息，它可以包括该报文的排队优先级标志、途经交换节点的最多个数（以防止报文在网络中无限制的旅行或兜圈子），以及用于差错控制的校验序列等，并可指明该报文是传送的用户数据还是应答信息；
- 报文编号，用于为一系列报文安排顺序，以便发现和纠正差错。

（2）关于报文传输过程中的差错控制和应答。每个节点接收到报文后都要对它进行差错检测，若发现有错，则拒绝存储报文，并产生一个否定应答报文返回给前一个交换节点要求重发。如未检测到差错，则再进一步判断所收到的报文属于应答信息还是用户数据。如果是用户数据，则存储该报文，同时向前一个节点返回肯定应答信息。前一个节点收到肯定应答后，认为已完成转发任务，所以可清除存储的报文备份。而当前节点所存储的报文则进入输出链路的转发排队队列等候。

（3）与电路交换不同，报文交换没有呼叫建立电路的时间，因此报文方式适用于租用线路而不需要建立专用线路，线路的利用率也较高。但是，它要求中间交换节点具有足够大的存储空间（通常是磁盘）用于缓存接收到的长报文，而且报文交换还引入了额外的存储-转发时延。图 3-10 显示了一个报文由节点 A 传送至节点 D 的过程。

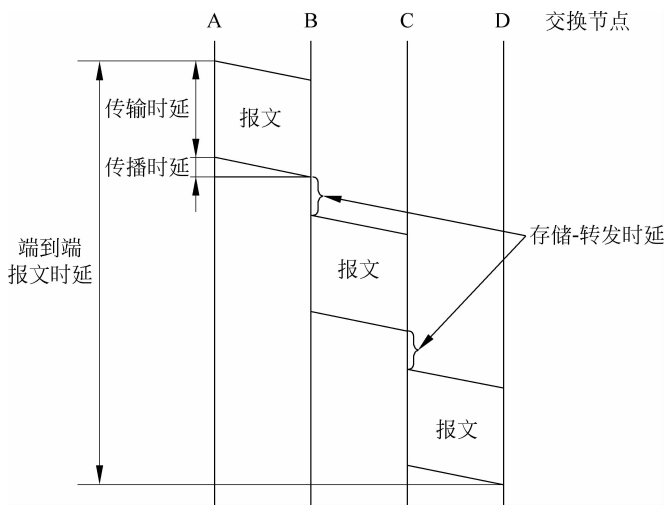


图 3-10　报文交换示意图

报文交换中的端到端时延除了传输时延和传播时延外，还包括附加的存储-转发时延，它包括以下三部分的时间：

（1）为了得到一条可用的输出链路而必须在中间节点上排队等候的时间，如有其他报文需争用同一条链路，则该时延可能增加。

（2）将报文存入中间节点所需的处理时间。

（3）将报文从节点的存储器送到输出链路的处理时间。

以上的后两者与报文实际长度有关，也与处理器的速度有关。通常报文的长度稍稍比电路交换中的信息长，因为每一个报文必须包含报头信息，以指明目的端、信息类型等。值得指出的是，由于一份数据报文往往比较长，每一个节点对报文的存储-转发时延也相应地比较长，从端到端传输一份报文的总时间并不比采用电路交换短，或许会更长，因而报文交换不适合实时性要求高的业务。