第5章

广　域　网

在第1章有关网络分类的内容中，根据网络的分布范围定义广域网，把广域网定义成一种分布范围广泛的网络，其广泛程度可以是一个国家，甚至全球。能够实现广域网分布范围内数据传输的传输网络很多，但目前互联网中最常见的广域网是同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy，SDH)。SDH是一种电路交换网络，而公共交换电话网(Public Switched Telephone Network，PSTN)是存在时间最长、使用最普遍的电路交换网络。因此，本章从PSTN开始讨论电路交换网络的工作原理。

5.1　PSTN

PSTN是电路交换网络，按需建立主叫与被叫之间的点对点语音信道。使用复用技术可以在一条线路上复用多条能够传输语音信号的物理链路，并用时隙表示这样一条物理链路。由于复用技术，按需建立点对点语音信道的过程成为通过转接表建立时隙之间映射的过程，在语音传输过程中，需要PSTN交换机完成时隙交换过程。PSTN交换机是电路交换机。

5.1.1　PSTN概述

1. 基于PSTN的TCP/IP体系结构

基于PSTN的TCP/IP体系结构如图5.1所示，PSTN作为电路交换网络，其功能是建立点对点信道，因此PSTN只是实现OSI体系结构中的物理层功能。点对点协议(Point to Point Protocol，PPP)实现OSI体系结构中的链路层功能。PPP和PSTN一起实现连接在PSTN上的两个结点之间的PPP帧传输过程。网络接口层IP over PSTN的功能是实现将IP分组封装成PPP帧的过程。

图5.1　基于PSTN的TCP/IP体系结构

2. PSTN 结构

1）电路交换网络

PSTN 是电路交换网络，如图 5.2 所示。话机通过线路与 PSTN 交换机相连，PSTN 交换机之间通过线路实现互连。电路交换网络必须保证能够按需建立任何两个话机之间的点对点信道。

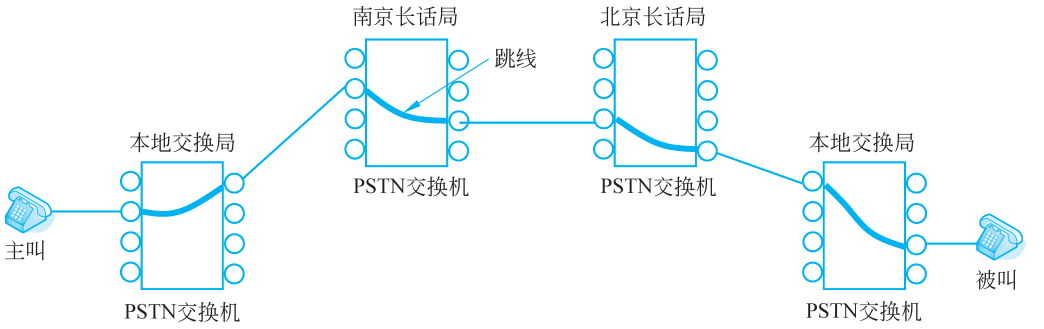


图 5.2　PSTN 结构

2）PSTN 交换机

保证任何两个话机之间都能建立点对点信道的关键设备是 PSTN 交换机，PSTN 交换机和以太网中讨论的数据报分组交换机是有本质区别的。PSTN 交换机的功能是根据需要在两个端口之间建立物理连接，如图 5.2 所示。在早期的电话网中，由话务员人工实现两个端口之间的物理连接。读者或许在以 20 世纪早期为时代背景的电影中看到过这样的镜头：人们摇动电话机接通话务员，告诉话务员要和某个地区、某个号码的人员通信，话务员手工完成当前 PSTN 交换机对应两个端口之间的物理连接，并通知下一站话务员继续类似工作，直到两个话机之间通信通路上的所有 PSTN 交换机都由话务员实现如图 5.2 所示的对应两个端口之间的物理连接。

这种由话务员人工完成 PSTN 交换机两个端口之间的物理连接的方式不仅不方便，也延长了建立主叫和被叫之间点对点信道的时间。随着电子技术的发展，人们开始生产能够根据主叫和被叫号码在 PSTN 交换机对应两个端口之间自动建立连接的 PSTN 交换机。这种 PSTN 交换机在自动建立连接过程中必须具有以下能力：①接收并处理和建立主叫与被叫之间连接相关的信息的能力；②能够根据被叫标识信息（被叫号码）确定正确的输出端口的能力。

3. 呼叫连接建立过程

主叫为了建立与被叫之间的点对点信道，必须向连接它的 PSTN 交换机传输一些相关信息，这些信息至少包含被叫号码及付费方式等内容。这种为在主叫与被叫之间建立点对点信道而必须在主叫和主叫直接连接的 PSTN 交换机之间及点对点信道上相邻 PSTN 交换机之间传输的信息称为信令，而根据信令确定正确的输出端口的过程称为路由。

每一个 PSTN 交换机通过人工配置建立如图 5.3 所示的路由表，路由表中的每一项

称为路由项。路由项指明通往被叫的路径，如南京 847 局 PSTN 交换机中的路由项＜0＊，端口 7＞，表明所有区间呼叫必须经过端口 7 连接的线路。0＊是被叫号码模式，用于表示第一位为 0，长度任意、其他号码为任意数字的一组被叫号码，这一组被叫号码包含了所有属于区间呼叫的被叫号码。

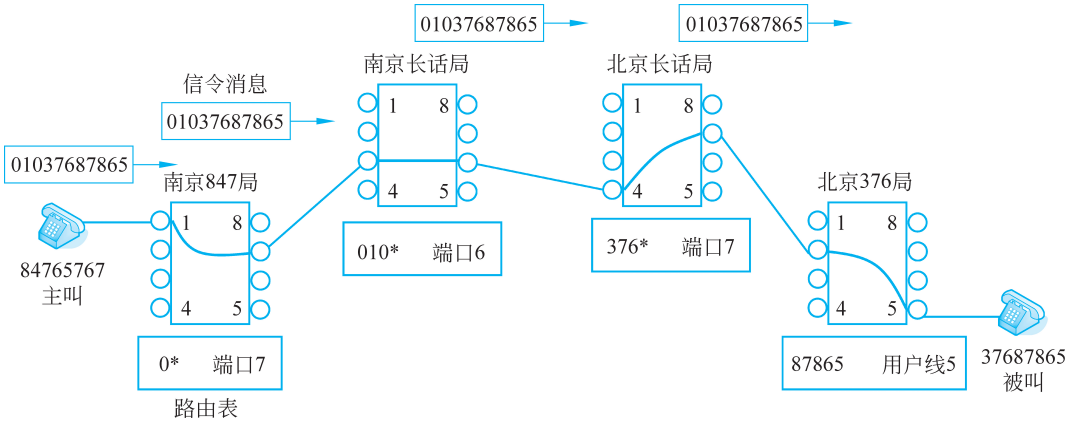


图 5.3 呼叫连接建立过程

用户通过对主叫话机拨号开始呼叫连接建立过程，用户拨入的被叫号码经过连接话机的用户线传输给本地局 PSTN 交换机，如图 5.3 中的南京 847 局 PSTN 交换机，本地局 PSTN 交换机用被叫号码检索路由表，检索的过程是用被叫号码逐项匹配路由项的过程。如果被叫号码属于路由表中其中一项路由项的被叫号码模式所指定的一组被叫号码，则被叫号码与该路由项匹配。由于图 5.3 中的南京 847 局 PSTN 交换机中路由项＜0＊，端口 7＞的被叫号码模式包含了所有第一位为 0 的被叫号码，因此被叫号码 01037687865 与路由项＜0＊，端口 7＞匹配。一旦匹配某项路由项，PSTN 交换机在接收到信令消息的端口和路由项指定的端口之间建立物理连接，如图 5.3 中南京 847 局 PSTN 交换机在端口 1(连接主叫话机用户线)和端口 7 之间建立物理连接。然后，通过路由项指定的端口(端口 7)将信令消息发送出去。通往被叫话机路径所经过的每一个 PSTN 交换机依次处理，最终建立主叫话机与被叫话机之间的点对点语音信道。

值得强调的是，图 5.3 给出的北京长话局 PSTN 交换机的路由项＜376＊，端口 7＞用于指明通往北京 376 局 PSTN 交换机的路径，其中被叫号码模式 376＊用于指定所有局号为 376 的被叫号码。因此，用被叫号码匹配该路由项时，只使用北京地区号码，不包含北京地区区号 010。同样，用被叫号码匹配北京 376 局 PSTN 交换机中路由项＜87865，用户线 5＞时，只使用局内号码 87865，不包含北京地区区号和 376 局局号。

5.1.2 语音通信过程

1. 模拟通信和频分复用

话机生成的是模拟语音信号，可以直接通过主叫与被叫之间建立的点对点语音信道

传输模拟语音信号。当然，如果主叫与被叫之间的点对点语音信道的距离很远，中间可能需要经过若干级放大电路。

如图 5.3 所示，PSTN 交换机之间必须有多条线路相连，因为本地 PSTN 交换机和长话 PSTN 交换机之间的线路数决定了本地 PSTN 交换机所连接的话机可以同时进行长话呼叫的数目。同样，南京长话局 PSTN 交换机和北京长话局 PSTN 交换机之间的线路数也决定了同时进行两地通话的话机数。由于成本问题，在南京和北京之间铺设大量线路的方式并不可取，这就引申出在单条线路上同时进行多对话机通信的方法，这种方法称为复用技术。如果 PSTN 交换机之间采用模拟通信方式，就采用频分复用技术。一条优质线路的带宽大概在几十兆赫兹和几百兆赫兹之间，而人耳能够识别的最大频率范围为 20～20kHz，一般人比较敏感的带宽范围为 30～3000Hz。作为语音通信，30～3000Hz 的带宽已经完全能够满足模拟语音信号的传输要求，即经过其传输的模拟语音信号质量完全能够达到人们理解其语义的要求。这样，线路的带宽和传输模拟语音信号所要求的带宽相比就好像用一根直径为几十米的水管来流淌直径几毫米的水管就能容下的小水流。解决这一问题的方法就是复用，将直径几十米的大水管分割为成千上万个直径为几毫米的小水管，每一个小水管独自流淌适合它容量的水流，而大水管总的流量为所有小水管流量的总和，如图 5.4 所示。

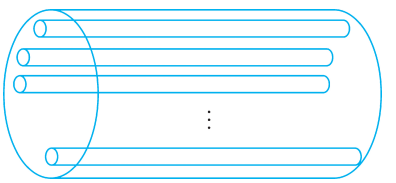


图 5.4　大水管分隔为无数个小水管的过程

频分复用的原理和图 5.4 所示非常相似，将线路的几十兆赫兹的带宽分割为成千上万个 4kHz 带宽的频段，每段频段用于传输一路模拟语音信号。这种复用方式需要解决的问题是：如果用 5.2～5.6MHz 的频段来传输一路语音信号时，如何将带宽为 0～4kHz 的模拟语音信号调制成带宽为 5.2～5.6MHz 的模拟信号，并通过 5.2～5.6MHz 的频段进行传输？到达另一端时，如何重新将带宽为 5.2～5.6MHz 的模拟信号还原成带宽为 0～4kHz 的模拟语音信号？

2. 数字通信和时分复用

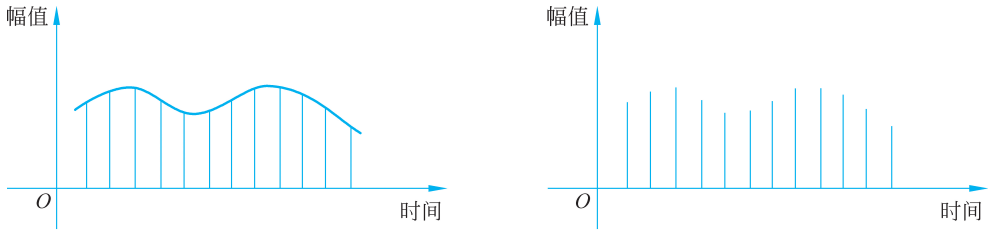
用模拟信号的方式传输语音信号会带来很多问题，由于远距离传输电信号会造成信号衰减，因此传输过程中需要逐段放大模拟信号，这种经过多级放大的模拟信号会造成失真，影响远距离通话效果。另外，随着光纤的出现和普及，光纤通信已成为主流，而光纤适合传输数字信号，因此无论从通信技术发展需要，还是从提高远距离通话质量的角度看，数字通信应该成为语音通信的基础。

1）PCM

目前话机只能生成模拟信号，如果实施端到端数字通信，势必需要更换已有全部话机，这是目前不可能实现的事情。因此，当前 PSTN 中，PSTN 交换机之间实现数字通信，而 PSTN 交换机和话机之间仍然传输模拟语音信号。这就要求直接连接话机的 PSTN 交换机（通常称为本地局 PSTN 交换机）必须具备模拟信号和数字信号的双向转换功能，即需要将传输给远端 PSTN 交换机的模拟信号转换成数字信号，并经过 PSTN

交换机间线路将数字信号传输给远端 PSTN 交换机。同时，必须将经过 PSTN 交换机间线路接收到的数字信号还原成模拟信号后，通过用户线传输给话机。模拟信号与数字信号相互转换的过程中涉及模拟信号至二进制数(Analog to Digital，A/D)转换过程和二进制数至模拟信号(Digital to Analog，D/A)转换过程。模拟信号转换成数字信号的过程分为两个步骤，一是通过 A/D 转换将模拟信号转换成二进制数；二是通过编码将二进制数转换成数字信号。数字信号转换成模拟信号的过程同样分为两个步骤，一是通过解码将数字信号转换成二进制数；二是通过 D/A 转换将二进制数转换成模拟信号。

A/D 转换的关键指标为采样频率和量化精度。采样过程是将时间和幅值都连续的模拟信号变成时间上离散但幅值仍然连续的信号，如图 5.5 所示。



(a) 模拟信号　　(b) 采样后的信号

图 5.5　采样过程

为了保证能够用采样后的信号还原模拟信号，对采样密度有一定要求。已有研究证明：采样频率至少为模拟信号中所含有的最大频率谐波信号的两倍频率，对于带宽为 0～4kHz 的模拟语音信号，其采样频率至少为 8kHz。

量化精度解决用有限位二进制数表示采样后得到的信号幅值的问题。假定信号幅值范围为 0～5V，如果用两位二进制数表示采样后的幅值，那么可以用 00 表示 0V，01 表示 1.25V，10 表示 2.5V，11 表示 3.75V。如果采样后的幅值 V_i＜1.25V，就用 00 表示。1.25V≤V_i＜2.5V，就用 01 表示。2.5V≤V_i＜3.75V，就用 10 表示。3.75V≤V_i，就用 11 表示。由于两位二进制数只能表示 4 种幅值，连续幅值的信号只能用这 4 种幅值进行拟合，拟合后的幅值与采样后得到的原始幅值之间的最大误差为 $5V/2^2=1.25V$。显然，为了提高拟合精度(量化精度)，需要增加表示采样后幅值的二进制数位数。如果将表示幅值的二进制数位数定为 8 位，在采样频率为 8kHz 的情况下，每一秒模拟语音信号产生的二进制数位数＝8000×8＝64 000b。为了实时传输数字语音信号，对每一路语音信号，PSTN 交换机之间的数字传输系统必须提供一条 64kbps 传输速率的物理链路。

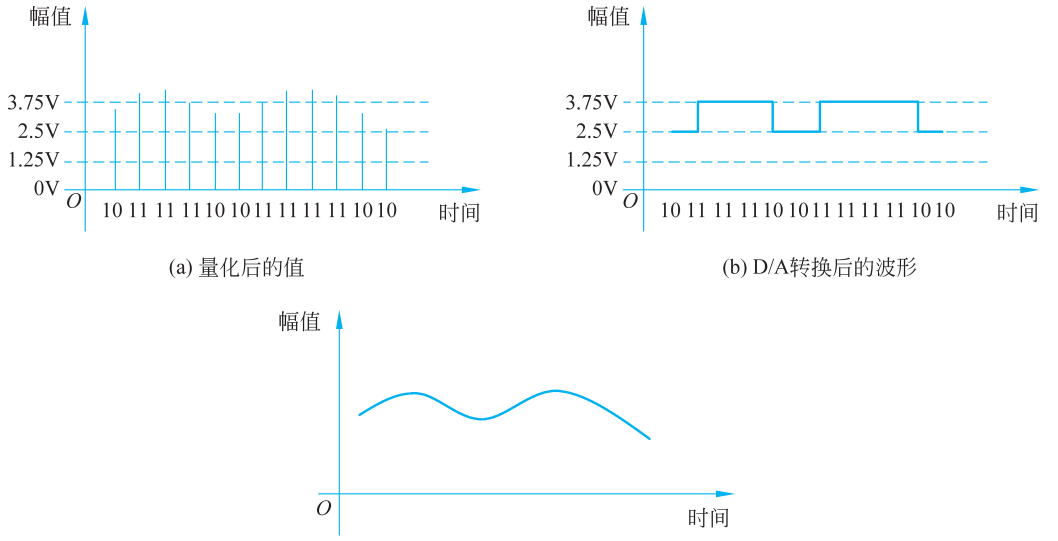
增加表示采样后幅值的二进制数位数可以提高拟合精度，如果 V 为最高信号幅值，n 为表示采样后幅值的二进制数位数，则最大误差≤$V/2^n$，但同时需要将每一路语音信号要求的数据传输速率提高到 n×8kbps。因此，需要在拟合精度和数据传输速率之间进行取舍。对于语音通信而言，经过研究表明：用 8 位二进制数表示采样后的幅值已经能够保证量化精度。

这种采样频率为 8kHz，用 8 位二进制数表示采样后幅值的 A/D 转换过程在 PSTN 中称作脉冲编码调制(Pulse Code Modulation，PCM)过程，最终产生的二进制数称为

PCM 码，脉冲编码调制(PCM)过程中采用的 8kHz 采样频率、表示采样后幅值的 8 位二进制数及由此推导出的 64kbps 的数据传输速率作为 PSTN 数字传输系统的基本参数。

2) D/A 转换

假定用两位二进制数表示每一个采样后的幅值，则表示图 5.5(b)所示的每一个采样后幅值的两位二进制数如图 5.6(a)所示，模拟语音信号转换成一串二进制数“10 11 11 11 10 10 11 11 11 11 10 10”。



(a) 量化后的值　　(b) D/A转换后的波形

(c) 原始波形

图 5.6　模拟语音信号还原过程

D/A 转换将两位二进制数表示的 4 种不同的值转换成对应的 4 种信号幅值，如 00 转换成 0V，01 转换成 1.25V，10 转换成 2.5V，11 转换成 3.75V。转换间隔与采样间隔相同，每 125μs 转换两位二进制数，在新的转换后的信号幅值产生前，信号维持原来的幅值不变。因此一串二进制数“10 11 11 11 10 10 11 11 11 11 10 10”D/A 转换后产生的信号波形如图 5.6(b)所示，与原始模拟语音信号(如图 5.6(c)所示)相比，存在较大差异，但这种差异在采样间隔为 125μs、每一个采样后的幅值用 8 位二进制数表示时，可以降低到忽略不计。

3) 语音信号传输过程

语音信号从话机 A 传输到话机 B 的过程如图 5.7 所示，话机 A 产生的模拟语音信号经过用户线到达 PSTN 交换机 1，PSTN 交换机 1 将其转换成 PCM 码，PCM 码是以 8 位二进制数位为单位的二进制位流。PCM 码构成的二进制位流转换成数字信号后在 PSTN 交换机间传播，最终到达 PSTN 交换机 2，PSTN 交换机 2 从接收到的数字信号中还原出 PCM 码构成的二进制位流，以 8 位 PCM 码为单位进行 D/A 转换，D/A 转换后生成的模拟信号经过用户线到达话机 B。由于量化过程会造成量化误差，因此话机 B 接收到的模拟信号与话机 A 产生的模拟语音信号之间存在误差。

4) 时分复用技术

同样，PSTN 交换机间的优质线路，尤其是光纤，其传输速率远大于 64kbps，如何用

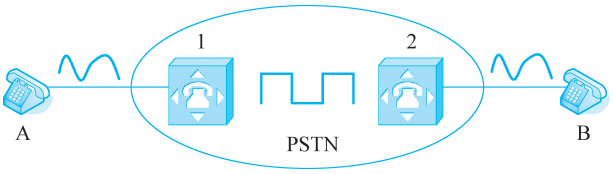
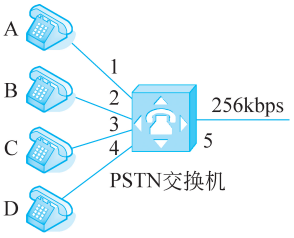


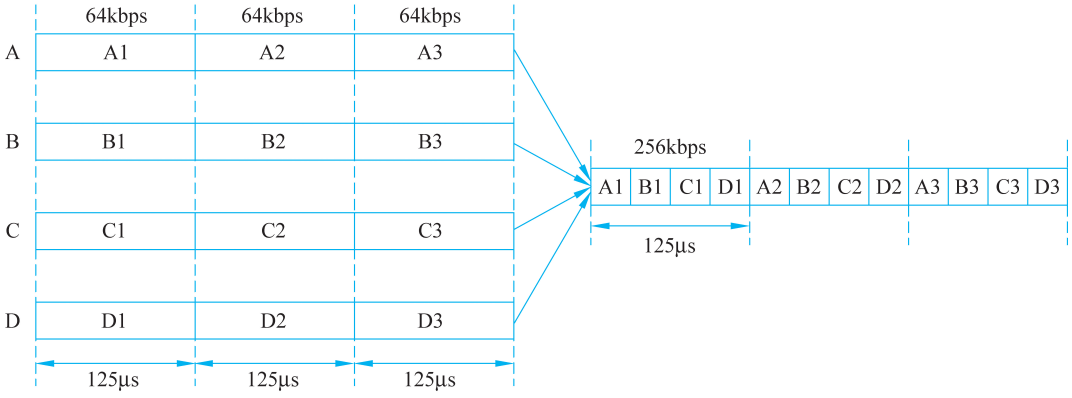
图 5.7　语音信号传输过程

一条高速的数字传输线路来同时传输多路数字化后的语音信号呢？对于数字传输线路，采用时分复用方法。

为了在一条传输速率为 2.048Mbps 的线路上传输多路传输速率为 64kbps 的数字语音信号，需要将线路的传输时间以 $T=125\mu s$ 为周期进行划分，每一周期内线路可以传输的字节数$=(125\mu s\times10^{-6}\times2.048\times10^{6})/8=32$。相同时间周期内，传输速率为 64kbps 的数字信号传输的字节数$=(125\mu s\times10^{-6}\times64\times10^{3})/8=1$。这样，可以把 125μs 分成 32(32/1=32)个时间片(也称时隙)，每一个时隙分配一路传输速率为 64kbps 的数字语音信号，32 个时隙可以同时传输 32 路传输速率为 64kbps 的数字语音信号。当然，线路上任何指定时刻，只能传输一路数字语音信号，所谓的同时传输是指 32 路传输速率为 64kbps 的数字语音信号在 125μs 时间周期内到达线路的数据肯定在 125μs 时间周期内全部由线路传输完毕。图 5.8 所示是 4 路传输速率为 64kbps 的数字语音信号通过时分复用技术同时经过传输速率为 256kbps 的线路进行传输的过程。



(a) 连接方式



(b) 复用过程

图 5.8　4 路 64kbps 线路时分复用一条 256kbps 线路的过程

在图 5.8 中，每一路传输速率为 64kbps 的数字语音信号每 125μs 传输 1 字节，4 路数字语音信号每 125μs 传输 4 字节，而传输速率为 256kbps 的线路每 125μs 传输 4 字节，恰好能够将 4 路传输速率为 64kbps 的数字语音信号在 125μs 时间内传输的 4 字节全部传输完毕。

传输速率为 2.048Mbps 的线路同时传输多路数字语音信号的过程如图 5.9 所示。一旦确定线路传输速率，也就确定了 125μs 时间内包含的时隙数。这些时隙构成一个物理帧，帧中的每一个时隙都有唯一的编号，如图 5.9 中的 Chi(i=0,1,…,31)。

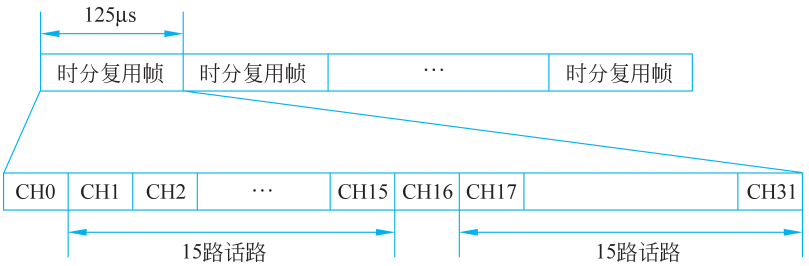


图 5.9　E1 的时分复用帧

在实际应用中，每 125μs 传输的 32 字节并不能全部用作数字语音通信，其中两个字节用作同步和信令通信。因此，真正能够用作数字语音通信的只有 30 字节，这意味着传输速率为 2.048Mbps 的线路能够同时支持 30 路语音通信。

时分复用的过程就是把 125μs 划分成多个传输 8 位二进制数需要的时隙，通过将多路数字语音信号对应到多个时隙来达到同一线路同时传输多路数字语音信号的目的的过程。时隙的长度由线路的传输速率决定，传输速率越高，125μs 时间内容纳的时隙数越多，能够同时传输的语音路数也越多。在这样的传输速率设计中，2.048Mbps 称为 E1 速率，比 E1 更高的是 E2 速率。表 5.1 给出了不同的传输速率及能够同时传输的语音路数。

表 5.1　E 系列传输速率和语音路数

速率类型	一次群(E1)	二次群(E2)	三次群(E3)	四次群(E4)	五次群(E5)
传输速率/Mbps	2.048	8.448	34.368	139.264	565.148
语音路数	30	120	480	1920	7680

从表 5.1 可以看出：PSTN 交换机间线路的传输速率不是任意的。这样做的目的是为了使 PSTN 交换机标准化，就像到商店买衣服，不可能存在任意尺寸的衣服，人们只能在有限尺寸标准的衣服中选择合适的，这就是规模生产带来的副作用。

3. 转接表和时隙交换

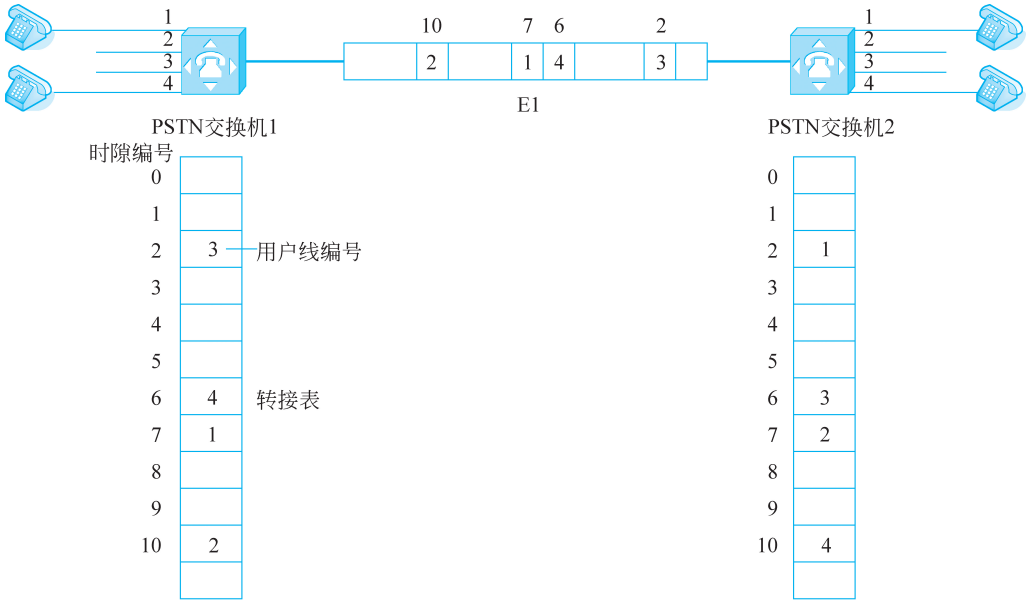
1) 转接表

为了动态建立主叫与被叫之间的点对点语音信道，通过如图 5.3 所示的呼叫连接建立过程，在主叫与被叫之间点对点语音信道经过的 PSTN 交换机端口之间动态建立物理连接。如果采用时分复用技术，则呼叫连接建立过程不再是 PSTN 交换机端口之间动态

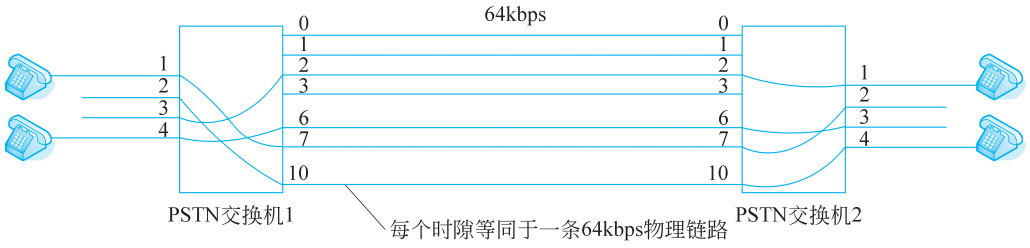
建立物理连接的过程。对于如图 5.8(a)所示的连接方式，是建立连接话机的端口与端口 5 中某个时隙之间的对应关系，如图 5.8(b)所示的时分复用过程对应的＜端口 1，端口 5 时隙 1＞、＜端口 2，端口 5 时隙 2＞、＜端口 3，端口 5 时隙 3＞和＜端口 4，端口 5 时隙 4＞。这种对应关系表明，从端口 1 输入的模拟语音信号经过 PCM 后，每 125μs 产生 8 位二进制数，该 8 位二进制数对应到端口 5 物理帧中的时隙 1。同样，每 125μs 通过端口 5 时隙 1 接收到的 8 位二进制数经过 D/A 转换后，输出到端口 1 连接的线路上。每一个 PSTN 交换机通过转接表建立不同端口时隙之间的对应关系。

2）时隙交换过程

图 5.10 所示是多对话机通过时分复用实现同时通信的过程，虽然图中没有画出，但 PSTN 交换机间的通信线路应该有两条，实现两个 PSTN 交换机间的全双工通信。PSTN 交换机 1 给出的转接表说明用户线 1 和时隙 7 对应，即话机通过用户线 1 传输到 PSTN 交换机 1 的模拟信号经 PSTN 交换机 1 转换成数字信号后，通过 PSTN 交换机间线路的时隙 7 传输给 PSTN 交换机 2。同样，PSTN 交换机 1 也将 PSTN 交换机 2 至



(a) 转接表和时隙交换



(b) 时隙交换本质

图 5.10　多对话机通过时分复用线路实现同时通信的过程

PSTN 交换机 1 线路中时隙 7 所传输的数字信号经 D/A 转换后，还原成模拟语音信号，通过用户线 1 传输到话机。PSTN 交换机 2 的转接表说明 PSTN 交换机间线路的时隙 7 和用户线 2 相对应，这说明 PSTN 交换机 1 用户线 1 所连话机产生的模拟语音信号最终到达 PSTN 交换机 2 用户线 2 所连话机。同样，PSTN 交换机 2 用户线 2 所连话机产生的模拟信号最终到达 PSTN 交换机 1 用户线 1 所连话机，这就实现了 PSTN 交换机 1 用户线 1 所连话机和 PSTN 交换机 2 用户线 2 所连话机之间的语音通信。通过分析转接表，可以得出同时进行语音通信的还有：PSTN 交换机 1 用户线 2 所连话机和 PSTN 交换机 2 用户线 4 所连话机、PSTN 交换机 1 用户线 3 所连话机和 PSTN 交换机 2 用户线 1 所连话机、PSTN 交换机 1 用户线 4 所连话机和 PSTN 交换机 2 用户线 3 所连话机。

图 5.10(a)中互连 PSTN 交换机 1 和 PSTN 交换机 2 的 E1 链路等同于 30 条传输速率为 64kbps 的全双工物理链路，PSTN 交换机通过转接表实现的时隙交换过程等同于在用户线和对应的传输速率为 64kbps 的输出物理链路之间建立连接，图 5.10(b)给出了图 5.10(a)对应的连接方式。

图 5.10 中 PSTN 交换机所具有的转接表在建立呼叫连接时创建，如果 PSTN 交换机间线路采用时分复用技术，则图 5.3 中建立的语音信号传输路径转变为如图 5.11 所示，PSTN 交换机不是在输入端口和输出端口之间建立连接，而是在输入线路某个时隙和输出线路某个时隙之间建立转接关系。

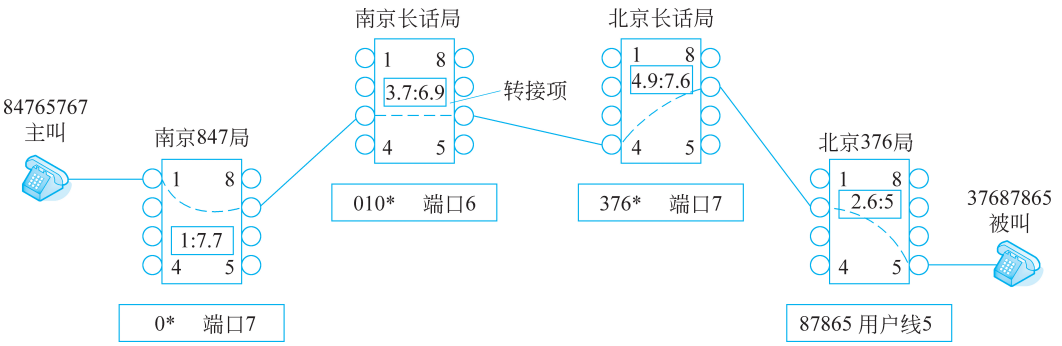


图 5.11 时分复用下的语音信号传输路径

如图 5.11 中南京 847 局 PSTN 交换机中转接项<1：7.7>，表明通过连接主叫话机用户线(端口 1)传输到南京 847 局 PSTN 交换机的模拟信号转换成数字信号后，通过连接南京长话局 PSTN 交换机的线路(端口 7)的时隙 7 发送出去。同样，南京 847 局 PSTN 交换机也将通过连接南京长话局 PSTN 交换机的线路的时隙 7 传输的数字信号经 D/A 转换后，还原成模拟信号，通过连接主叫话机用户线发送出去。

4. 时隙交换与虚电路分组交换的本质区别

PSTN 建立点对点语音信道时创建的转接项与虚电路分组交换网络建立虚电路时创建的转发项非常相似，但时隙交换是电路交换，与虚电路分组交换有本质区别。

1) 时隙和虚电路之间的区别

时隙在线路中是物理存在的，且每一个时隙独占线路的固定传输速率。PSTN 交换