

1

通信系统概论

在近二十年中,通信技术得到了飞速发展。无论在有线通信领域,还是在无线通信领域,人们经历了从模拟通信到数字通信的巨大转变。现在,通信技术正面临着从宽带传输转向超宽带传输、从单一的业务服务转向多媒体业务服务的转折。同时,通信的目的也不再是为了完成单一的信息传递功能,而是附加了移动计算、信息监控、信息重组等多项功能。因此,系统地了解通信技术的基本理论和基本概念变得越来越重要。本章以通信的网络化概念为基础,重点介绍通信系统的大系统概念,通信各功能块的基本组成、功能以及系统的各种分类方式和相关学科的近期发展概况。

1.1 信息通信技术的由来

简单地讲,通信的基本任务就是准确地将要传递的信息从一端传送到另一端。从通信的基本任务容易得知,一个简单的通信系统至少由三部分组成:信息的发端,传送媒体和信息的接收端。然而,关于发端、收端和传送媒体并没有规定具体的内容,因此,某一类特定收、发设备或传送媒体就组成了一特定的通信系统。图 1.1 给出了一个通用的通信系统的基本模型。

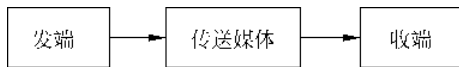


图 1.1 通信系统的基本框图

在这一基本模型中,系统的收、发端设备应匹配,同时应和系统的传输媒体相匹配。虽然现在数字通信已占据了主导地位,模拟通信已从主导地位转到从属地位,成为了数字通信的补充,但是,通信系统的

收、发端设备以及传输媒体的匹配原则必须遵守。回顾整个通信历史的发展,我们不难发现,作为信息的传递手段,最初的通信模式原本就是数字形式的。例如,在我国古代,古长城上一座座烽火台就是历史的见证。可以想像在当时,人们通过点燃篝火或释放狼烟的模式传递信息。虽然今天我们难以具体地描述这种通信采用的信息编码模式,但是可以推测出,我们的祖先是利用狼烟的颜色或火的堆数进行一定信息传递。尽管这种通信方式能够表达的信息很少,但总可以把信息迅速从一个地方传到另一个较远的地方,在一定程度上节省了大量的人力和物力,同时也缩短了信息交流的时间。这就是最初的光通信的模型。在此模型中,信息的发送就是点燃篝火或释放狼烟,信息的接收设备就是人的眼睛,而传输媒体就是大气。直到 1837 年,人类才开始利用电磁波作为媒介进行通信。当时由莫尔斯(Morse)研制出了世界上第一台电报传输系统。这个电报传输系统所传递的信号也是数字形式的,编码模式是将英文字母用点划线的序列表示。在这种编码中,较频繁出现的字母用短码字表示,而较少出现的英文字母用长码字表示,从统计意义上使发送报文的平均所用码字长度尽可能短。这种编码模式被称为莫尔斯码,即现代信息论中所述的变长码中的一种。之后,大约在 1876 年,Bell 发明了电话。对于电话系统,发送和接收设备都是电话机,信息的传递就是将讲话人的语音信号波形从发送端传递到接收端。因为在语音信息的传递过程中,对讲话者的语音信息几乎没有进行任何处理,除了电话线路的干扰外,它几乎完整地保留了原本的语音信息。我们将这种通信模式称为模拟通信模式。此时,通信的媒体就是电话线。自电话发明之后,在很长的一段时间内,以电话为代表的通信业务逐渐占据了主导地位,通信也由数字通信开始转入到模拟通信占统治地位的时代。直到 1948 年,由美国科学家 Shannon 提出了数字通信的理论之后,数字通信才开始真正地揭开了面纱。1960 年之后,集成电路技术得到了迅速地发展。在 1964 年,世界上第一片脉冲编码调制(PCM)编、解码器被研制出来,它表明数字通信将迎来一个新时代。事实上,PCM 编码器的主要功能就是将模拟的语音信号转化为数字模式,而 PCM 译码器,其功能是将数字模式的信号转化为模拟信号,恢复语音信号的本来面目。之后,电话通信系统的数字化逐步取代了模拟电话系统。尽管直到 20 世纪 80 年代,电话通信系统仍是信息通信的主要方式,但是,电话系统的数字化已证明了数字通信技术开始占据主导地位。数字通信开始占据主导地位的另一个重要的标志是在第二代移动通信设备中采用了 GSM 和 CDMA(码分多址),数字移动电话逐渐取代了模拟移动电话。同时,在有线通信中,构建公共电话网络的模拟(应用了几十年的步进式和纵横式交换机)交换设备也被以计算机为核心的程控交换机所替代。在 20 世纪 90 年代通信最大的变革在于无线移动通信的大普及,短短十几年的时间里其业务量与装机数已可与半个多世纪建立起的固定电话相抗衡,并继而超过;与此同时更为迅猛兴起的是光导纤维传输媒介的引入,形成光通信的推广与普及,随之而来的是宽带通信业务的兴起,其中,多媒体通信被认定为通信发展的主流。因此,各种信息的综合处理和传输技术得到迅速发展。

展,如数字图像信号(静态和动态)的压缩和处理技术就是当时最活跃的研究方向之一。进入 21 世纪以来,虽然仅仅过了短短的几年,然而通信技术的理念却发生了巨大的变化,无处不在(Ubiquitous)的通信与计算技术已成为当前研究的重点。人们已不再满足于单纯的信息传输或下载技术,也不再满足于狭义的多媒体通信,取而代之的是除了信息传递外,还附加了移动计算、信息监控、信息重组或裁剪等多项功能。此时,通信的发送和接收设备不但具有信息发送和接收能力,而且还具有了信息计算、重组和剪裁功能。在本章中,我们的重点不是解释和讨论现在正在迅速发展中的无处不在的通信与计算技术,而是从大系统的角度探讨传统的信息通信系统所涉及的各个层面与关键技术。

1.2 信息通信的网络化

回顾古典的烽火通信模式,不难发现,信息传递不只是一个点到点的通信,而是将多个点到点的通信组合在一起,形成的接力通信。其主要原因在于信息的发送端与信息的目的地之间的空间距离太大,只通过一个点到点的模式无法实现信息的正确传递。为了保证信息传递的可实现性和可靠性,需要在信息发送端与目的地之间设立大量的信息接力站用于信息的转接。烽火通信所采用的网络结构就是最原始的线型通信网络。这一技术至今仍在被采用,如大规模微波接力通信系统。对于现代通信而言,如果不考虑网络的复杂结构,只考虑一个用户与另一个远端的用户通过网络进行通信,只要仔细观察用户通信信息所经过的传输线路就会发现,用户信息的传递也是通过多级接力模式实现的。因此,接力模式也是现代通信所采用的必然方式。关于如何在现代通信中实现接力模式,将在后面仔细讨论。

现在以公共电话通信为例,考虑通信网络的概念。假设在一个地区内,电话用户的数目是 n ,若要实现任意两个电话用户之间可以实现通话,从理论上讲,每两个用户之间应铺设一条电话线,那么需要铺设电话线的总数为 $n(n-1)/2$ 。例如:一个大学校园的电话系统有 5000 用户,则理论上大约需要铺设 12.5×10^6 条线路,这一数据是不可想像的。一方面,用户话机需要接 5000 根线,设备的复杂度是令人难以接受;另一方面,通信线路的铺设所需要的费用也非常昂贵。为了简化通信设备的复杂度、压缩铺设电话线路所需要的费用,同时能满足每两个用户之间能实现电话通信,电信网络的概念就应运而生了。所谓的电信网,就是建立一个具有一定结构的、固定的信息交换网络,每个用户可以通过一条线路连接到这个电信网上。这样,任何两个与该电信网络已建立连接的用户都可以实现通信。显然,通过这种处理,用户设备的复杂度大为简化,它只需连接一条线路即可。同时,整个网络的铺设费用也得到大量压缩。然而,由于电信网的建设,相应的技术问题也随之出现。

通信的网络化涉及的问题可以归纳如下:

(1) 网络的复杂度问题

对于给定的用户数目和分布区域,在设计网络结构时,一方面需要保证总的线路铺设费用相对较低,另一方面又要保证网络管理和维护的复杂性低。这样一个综合问题,至今也没有得到很好的解决。

(2) 网络的容量问题

网络的容量可以简单地理解为:对于一个具有固定结构的电信网络和固定的用户数目,保证不同的用户对之间可以同时进行通信的最大数目。一般情况下,因为用户对的组合模式不同,得到的结果会有较大的差异。因此,网络的容量也是一个随机变量,具有一定的分布特征。所以,通常意义下所定义的网络容量应是一个统计平均值。有时,为了满足某些商业上的指标,往往采用网络容量分布的最大值定义为其峰值容量。

另外一种网络容量的定义是,假定每个用户接入网络的概率和每个用户实现通信所占用网络的平均时间已知,根据具体的网络结构,利用时间齐次 Markov 模型计算得到的网络可容纳的平均用户数。

无论采用哪种定义,网络的容量问题分析至今仍是一个非常活跃的研究方向。与传统电话网络容量估计的主要差别是,基于信息流的排队论模型已不能适应现代基于信息包传输与交换的网络容量估计,需要建立新的数学模型,如随机图模型等。

(3) 网络的路由问题

因为用户之间的通信都需要网络的支持。当一个用户需要与另外一个用户进行通信时,需要借助网络的信息交换节点进行信息接力。也许在这两个用户之间存在多条不同的线路可以进行通信。此时,如何选择一条可用的通信线路,保证用户之间进行正常的通信并且满足一定的附加要求,如占用网络资源最少、通信费用最低、或使网络的拥塞程度增加量最小等。这就是人们通常所讲的网络路由问题。路由选取是通信网络研究的一个重点问题。目前比较常用的方法如最小费用路由算法、最少跳数路由算法、最短路径算法等。最小费用路由算法主要是为了减少用户通信的费用。最少跳数路由算法主要是为了减少用户间通信所需信息转接或交换的次数。而最短路径算法,主要是为了减少用户间通信所占用的物理资源。

(4) 网络的资源调度问题

由于用户间的通信需要多级接力或多级交换,那么在网络上一定存在许多节点,这些节点主要负责用户信息的转接,通常称之为交换节点,并且在这些节点上安置交换机。一旦有多条通信线路同时经过某些交换节点,那么在這些交换节点上必须对这些通信线路进行转接,此时就需要进行线路交换或数据包交换等。特别是当到达的用户信息流接近或超过交换节点的交换能力,在交换节点会发生链路拥塞问题。为了解决链路拥塞问题,需要设计合理的资源调度。到目前为止,资源调度问题仍是网络通信的主要问题。

(5) 网络接入控制问题

为了缓解或解决网络的拥塞问题,除了在网络内部增强交换节点的交换能力,设计更加有效的调度算法外,也需要对网络的入口信息进行控制。因为只靠增强交换节点的交换能力和提高调度算法的效率,系统总的调度交换能力也是有限的。如果不对网络的入口信息进行控制,系统的拥塞问题仍无法得到解决。因此,网络的接入控制、资源调度和拥塞控制是密不可分的,在通常情况下,需要综合考虑。

1.3 信息通信的智能化

除了 1.2 节讨论的问题外,为了有效地利用网络资源,也需要对网络进行控制和管理。网络的控制与管理主要是通过信令实现的。通俗来讲就是在一通信网络中如何为用户在必要时建立起特定的通信链路、删除该链路并传递必要的控制信息,如拨号音、忙音、振铃等。在数据业务中如何告知传输地址及服务等级等信息。因此智能网在通信系统中与信息传输网一样为一不可或缺的重要组成部分。

所谓信令就是在用户终端和交换中心或交换中心之间及交换机和用户间进行控制信息交换的协议规则。在实现交换连接、通信计费和附加信息传递(如拨号振铃、中断和信令内部管理)等情况下都需要信令。通常信令传输方法分为三类:随路(附加于用户通信线路)信令(channel associated signaling, CAS)、公共信令(common channel signaling, CCS)和网络寻址信令。

(1) 随路信令

在采用用户线路附加信令,即随路信令时,每个电话用户信道被分配一个固定的信令信道,并配置一定的容量。这种分配是固定的,与是否需要传递信令信息无关。用户通信线路的附加信令又分为带内信令和带外信令。所谓的带内信令就是在用户线路上预留一定的时隙作为信令传递的时间,它是一种混合信令模式,用户的数据和信令在同一条线路上传递。其主要缺陷是,一旦线路出现故障,信令信息也无法传递,可能导致线路瘫痪,线路检测和维修比较困难。所谓的带外信令就是用户的数据与信令通过不同的线路传递,可以避免带内信令因用户线路故障而导致无法检测的缺陷。

通常采用用户线路附加信令时,用户间的呼叫建立相对较慢,并且灵活性较差。这类信令在模拟电话通信中已使用许多年。近年,在利用信息包交换的网络中与其他信令模式联合应用也得到长足的发展。

(2) 公共信令

采用公共信令时,与采用用户线路附加信令最大的区别在于信令信息的传递与每个用户的数据、信道、数据所占用的时隙没有固定的关系,实际设有独立的为信令建立专用的信令网。每个用户的传输容量可以根据需要动态分配,并且连接建立快,比采用用户线

路附加信令更可靠、更灵活。通常人们把具有公共信令传递系统的信息网络称为“智能交换网”。采用公共信令的另一个优势就是在扩充业务种类或增加新业务时,网络管理更加灵活,系统的可扩展性得到增强。

(3) 网络寻址信令

网络寻址信令是一种专用信令,主要用于存储和转发的数据传输网中,如 Internet 等。信令的信息以用户的地址码形式驻留在用户信息包中。每个用户的数据包可以依据其地址码选择其通过的路由,最终到达目的地。

1.4 通信系统的分类

现代通信系统的分类有许多种。但从信息的传输结构上分主要有三类,点到点的通信;点到多点的通信;多点到多点的通信,分别由图 1.2(a),(b)和(c)示出。总体上归结起来,都可看成点到点通信模式的组合模式。图 1.3 给出了一个点到点的数字通信的系统框图。它包括信源、信源编码、信道编码、数字调制、传输媒体、数字解调、信道译码、信源译码和信宿。

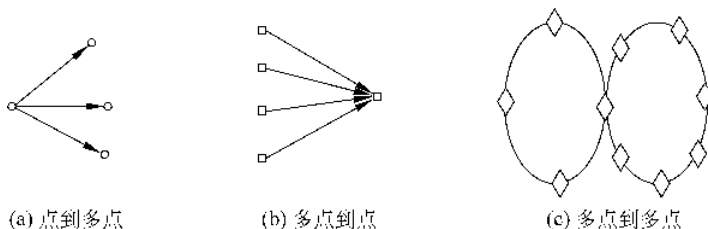


图 1.2 信息传输的基本结构图(网络图)

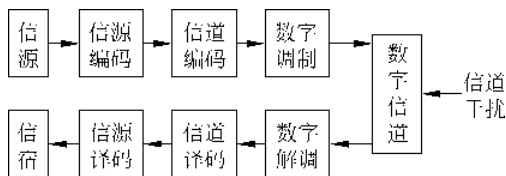


图 1.3 点到点的数字通信系统框图

我们将在 1.5 节仔细解释图 1.3 所示的点到点数字通信系统框图中各模块的功能。

通信系统按通信网络的用途可以分为:专用网(PVC)、公用网。按通信网络的规模可以分为家用网(personnel network)、局域网(local area network, LAN)、城域网(metropolitan area network, MAN)和广域网(wide area network, WAN)等。按传递信

息的物理特征分,可以概括为电报通信、电话通信、数据通信、图像通信和多媒体通信等。按是否采用调制方式分有基带传输和调制传输。按传输手段分为电缆通信、微波中继通信、光纤通信、卫星通信和移动通信等。本节主要介绍按物理信道的特征分类。

(1) 有线信道(电缆信道)

电话信道大量采用有线信道,即电缆信道。事实上,电缆主要用于传输话音信号、数据传真和有线电视信号等。电缆包括双绞线和同轴电缆。一般情况下,双绞线能提供几百千赫兹带宽,而同轴电缆能提供几兆赫的带宽。

信号通过这样的信道时会受到干扰,导致信号的幅度和相位的变形。双绞线还常常会受到串话干扰,即来自临近信道的干扰。因为电缆被广泛应用于日常的通信系统中,因此,早期的许多研究都是针对克服传输信号形变和抗串话干扰的。后面的章节将介绍最优传输信号的波形设计问题。

(2) 光纤信道

光纤信道能提供非常宽的带宽,特别是近年光纤技术的迅速发展,10~100GHz 带宽的光纤通信系统的铺设和应用,使得信息传递的速度大为提高。光纤信道的主要优点在于信道抖动特别低。高稳定可靠的光学设备可以用于光信号的发送和检测。目前光纤应用已无处不在,早期主要用于跨洋的海底通信和国家主要通信骨干通信网络中。随着光器件价格下降,光纤到户的技术也在逐步实施,特别是对一些新建的生活区和一些高技术企业、机关及学校,光纤到户技术得到快速发展。

(3) 无线信道

无线信道主要是利用空气介质作为通信的媒体。它涉及的信道类型也较复杂。例如,卫星通信信道就包括同步卫星信道,中低轨移动卫星信道等。微波中继通信的信道基本为加性噪声干扰信道。此外,蜂窝通信已成为现代通信的一个主流业务,此时无线信道的特性与蜂窝的类型、大小及通信模式有关。不同的通信模式,相应的通信信道也有较大的差别。例如,GSM 系统采用的是时分多址(TDMA)模式,它的信道干扰主要来自信道自身的衰落特性和因定时误差导致的邻道干扰;而 CDMA 系统采用的是码分多址模式,它的信道干扰主要来自因用户租用的码间非正交性或因定时偏差导致的多用户干扰。具体的信道模型包括 Rayleigh 信道、Rice 信道、Nakagami 信道和对数正态信道等。对于宽带无线通信系统,多径干扰也会是一个影响系统性能的主要瓶颈。为了进一步提高系统的传输效率和传输可靠性,多载波传输系统被采用,如正交频分复用(OFDM)和多载波码分多址(MC-CDMA)等。值得一提的是现代无线通信中又增加了一种新的无线传输系统,即无线信息收集系统,它主要采用微型传感器收集信息,通过分布式网络将信息传送到信息处理中心。主要应用于卫生系统的病人医疗监护,大型商业中心的商品销售量估计等。它与海底探险信息收集的原理相同,主要的差别在于信息传输的介质不同。

(4) 水下声波信道

水下声波信道主要是用于海洋探测活动传递信息的信道。在海底探测中,通常是将一探测器放置在海底,利用探测器收集信息,并将相关信息传送到水面上,供研究人员分析。在有些情况下,一些信息会通过水上的通信设备进行接力通信,将它转发到卫星上,再传回信息处理中心。

除了超低频电磁波外,一般来讲电磁波在水下的传播距离很有限。而采用超低频的电磁波所需的大功率的发送机的造价非常昂贵,对于深海探测是不现实的。与此相反,声波信号在水中传播可达几十到几百千米。因此,水下声波信道成为一重要的研究对象。水下声波信道一般为多径信道,主要因为海洋表面和海底对信号的反射造成的。这种多径信道会引起信号衰落。另外,信号的衰落与信号的频率有关,衰落因子与信号的频率的平方成反比。

(5) 磁存储信道

在现在的信息社会中,信息的存储和提取变得越来越频繁。通常所用的磁带、磁盘、光盘等都是用于存储信息的。以计算机的硬盘为例,数据的存储系统看成一个通信系统。向硬盘上存数据的过程等同于向信道上发送数据,而从硬盘上读取数据的过程等同于接收机从信道上接收发送的数据。

磁存储信道通常描述成加性干扰信道,这是因为它的主要干扰来自邻近轨道的干扰。磁盘或磁带存储量的大小和磁盘的大小及存储密度(单位面积的存储的比特数目)有关。磁盘的数据存储和读取速度与存储系统中相应的机械或电子存储与读取的子系统设备有关。

1.5 ISO 分层标准

国际标准化组织(International Standardization Organization,ISO)在1983年针对数据传输网络(计算机网)提出了开放系统互连(Open System Interconnection,OSI)参考模型标准。其基本思想是将网络系统模块化,无论各个设备制造商如何修改和生产自己的产品,只要满足模块互连的标准就能实现设备间的互连互通。此参考模型的推出,对推动数据网络的发展发挥了巨大的作用。虽然有些模块的功能定义存在一些模糊,然而它对研究下一代网络(next generation network,NGN)仍有非常重要的理论参考价值。

图1.4显示了ISO关于开放系统互连参考模型的网络结构。它共分7层,每个层次都代表了一个可以为上一个更高层提供特定服务的虚拟通信链路。这种分层结构的理念在于网络系统的模块化(module)处理。此处模块可以指一个设备或某个计算机系统中的一个过程。最重要的是,模块可以通过执行某个功能支持整个系统的功能运作。通常将模块的一个功能称作模块提供的一项服务。对于这种模块的设计,设计者可以精细地

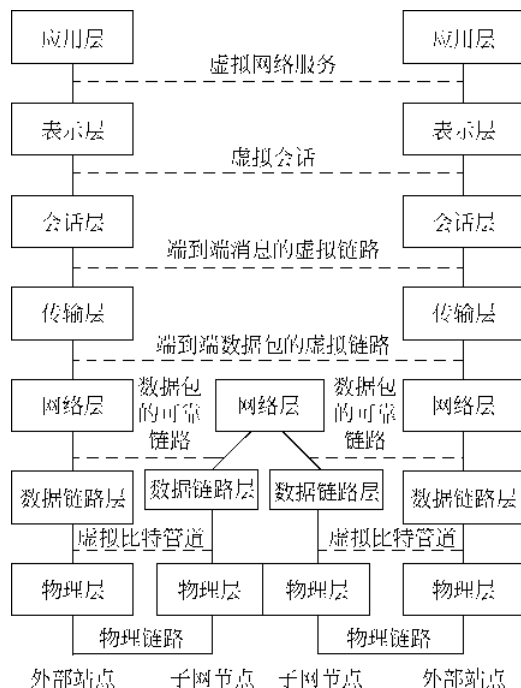


图 1.4 ISO 关于开放系统互连参考模型的网络结构

了解模块内部的每个细节和具体的运行模式。但对于用户而言,仅仅将模块作为系统的一部分,模块被看作一个黑盒子。也就是说,用户不必了解模块内的工作状况,而只关心模块的输入、输出以及它们之间的关系。因此,一个黑盒子是可以描述成一个具有明确定义的输入输出关系的模块。基于此模块化处理模式,ISO 定义了 7 层网络参考模型。在此参考模型中,对每一对具有对等功能的高层而言,比它们低一层的分层可以看作一个具有某项功能的黑盒子,即提供某项服务的功能模块。从较低层上看,它的上一层都可以看成由各种功能模块组成的一个子系统。注意,在现有的网络中,如 ARPANET, SNA, TYMNET 等在网络的层次数目上与上述定义的参考模型有所不同,但是,开放系统互连参考模型有一个相对明确的、可以帮助我们理解分层概念的结构,下面详细介绍分层模型的各个层次的功能。

1.5.1 应用层

应用层是最高层,主要是使网络如何服务于最终用户,一般是指为满足各种不同用户群的要求而设定的服务。其功能是执行特定的应用程序所指定的工作使通信伙伴能协同工作。近年来,随着通信技术的发展,应用层中涉及的业务类型越来越多,服务的模式越

来越复杂。例如：对电话业务而言，最初的实时的话音业务已难以满足人们的需要，取而代之的是可视电话、留言电话、自动回复电话等。又如，在第三代移动通信系统中，除了提供正常的语音通信服务之外，它还附加了短信息发送与接收、无线网页浏览、查询和文件下载、接收无线广播（包括电视和声讯广播）等多项服务功能。又如，近几年新发展起来的无线自组织网络（wireless ad-hoc network），它不仅能提供信息传递，更为主要的是能提供信息采集、信息计算和处理。它的应用范围相当广泛，如军事领域的战场信息收集与发布，医疗卫生领域的患者信息监视和收集、自然灾害的紧急处理、太空探测以及深海探险等领域。因此这种服务就体现在通信参与者之间都能对不同的信息界面与来源在自己面前可以准确表征出来。因此，业务种类和服务类型的个性化是未来通信发展的主流，那么如何使通信参与者能相互建立准确的沟通与表征自然就成为广泛的主题。可以预见，在未来的十年内，应用层的技术开发将面临更多的挑战。

1.5.2 表示层

表示层的主要功能是数据加密、数据压缩和代码变换。

关于数据加密，在军事通信中，这种要求是显而易见的。此外，对于单位或个人而言，随着社会信息化程度的提高，信息的保密问题亦越来越突出。为了保证发送的信息仅能被预定的接收者收听或阅读，防止因网络故障或恶意者导致发送信息被非预定接收者收听、窃听或阅读，必须采用严格的信息安全措施。

数据压缩主要是为了减少通信传递的数据量。这个功能虽然可以在任何一层实现，但是，在表示层实现，可以使每个会话的数据压缩分开进行。因为不同会话的消息中会有不同类型的信息冗余，所以数据压缩的分开处理会显著提高传输系统的利用效率。此外，因为加密过的数据中应避免含有易察觉的冗余信息，所以，数据压缩应在加密之前完成。

代码变换主要是为了适应不同类型的外部设备的需求。例如，由于通信终端、打印机、图像终端或文件系统等有时会不兼容，那么在这种情况下，代码变换是一个必要的操作。

1.5.3 会话层

从本质上讲，会话层服务于建立会话时处理两个终端节点的信息交换，其功能为：按正常状态建立和终止对话、完成数据变换和对话控制。它的功能类似于电话网中的目录咨询服务。如果一个用户希望网络能提供一个可行的服务，但又无法确定如何可以获得所需要的服务，那么会话层可以为传输层提供会话的信息。例如：会话层可以在网络中为共同完成同一项计算任务的多个处理器提供实现负荷共享的合适配置。同时，会话层提供了在建立会话时处理接入的权限，即选择通信的对象。例如：一个公司内部不同的