第一单元　基　　础

第一部分　概述

第1章　数据通信、数据网络和因特网

第2章　协议体系结构、TCP/IP和基于因特网的应用程序

第二部分　数据通信

第3章　数据传输

第4章　传输媒体

第5章　信号编码技术

第6章　差错检测和纠正

第7章　数据链路控制协议

第8章　复用

第三部分　广域网

第9章　广域网技术和协议

第10章　蜂窝无线网络

第四部分　局域网

第11章　局域网概述

第12章　以太网

第13章　无线局域网

第五部分　网际协议与运输协议

第14章　网际协议

第15章　运输协议

第一部分　概　　述

第1章　数据通信、数据网络和因特网

学习目标

在学习了本章的内容之后，应当能够：

- 概述数据通信业务量的发展趋势；
- 了解数据通信系统中的要素；
- 总结数据通信网络的类型；
- 概述因特网整体体系结构。

本书的目标是向读者完整展现数据和计算机通信这一广袤领域。从书中的章节结构组成可以看出作者力图将此庞大的主题细化成更易于理解的部分，并逐步带领读者纵览相关新技术。本章作为引言，首先要介绍的是一个通信的基本模型，然后分别简要地讨论第二部分至第四部分以及第六部分，第2章则是对第五部分、第八部分和第九部分的概述。

1.1　现代企业的数据通信和网络构成

高效实用的数据通信和网络设施对任何企业来说都是至关重要的。这一节，我们首先要了解一些发展趋势，它们使企业管理者在规划和管理此类设施时遇到越来越大的挑战。然后我们要具体考察不断提高的传输速度和网络能力方面的需求。

1.1.1　趋势

有三股来自不同方向的力量一直在推动着数据通信和网络设施的体系结构化和不断向前发展：通信量的上升、新服务的发展和技术的进步。

近几十年来，不论是本地的（指位于一幢楼或一个商业园区内的）还是远距离的，**通信量**（communication traffic）一直呈现持续稳定的增长状态。这些通信量已经不再局限于话音和数据，而是越来越多地包含了图片和视频。随着人们对远程接入、在线交易以及社交网络业务的重视程度不断提高，这种趋势显然还将持续下去。因此，商业管理者也总是承受着以最小代价提高通信容量的压力。

随着企业越来越依赖于信息技术，商业用户有意愿消费的**服务**（sevice）范围也在不断扩大。例如，移动宽带的业务量呈爆炸性增长，而这是因为智能手机和平板电脑推入移动网络的数据量正在呈爆炸性增长。此外，随着时间的推移，移动用户需要越来越高的优质服

务来支持内置高分辨率相机的手机、热点视频流以及高质量的音频。类似的需求增长同样表现在因特网和专用网络的有线接入上。为了紧随消费者和商业用户生成的业务量的迅猛发展，移动服务提供商必须对高性能网络和传输设备始终保持投资。反过来说，由于高速网络的不断发展，带来了价格的不断降低，从而又鼓励了业务的进一步扩展。因此说，业务的扩展与通信容量的发展是携手并进的。作为一个例子，图1.1展示了通信量的构成以及因特网有线用户通信量的增长趋势[IEEE12]。

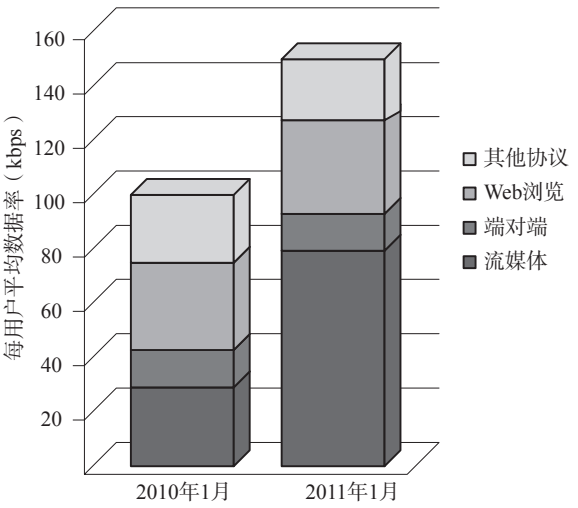

图1.1　每因特网用户的平均下行通信量

最后，**技术**（technology）的发展趋势使得我们能够提供越来越强大的通信性能，并支持更为广泛的服务。其中特别引人注目的技术发展方向有以下4个。

1. 不论是计算机系统还是通信系统，速度越来越高、价格越来越低的发展趋势从未停顿过。从计算机系统方面讲，这意味着更加强大的计算机和计算机群有能力支持那些要求更高的应用程序，例如多媒体应用程序。从通信方面看，光纤和高速无线技术的不断普及带来了传输价格的下降和性能的极大提高。例如，对于长途电信和数据网络链路来说，密集波分多路复用（dense wavelength division multiplexing，DWDM）技术能够使光纤承载的通信量达到每秒好几个太比特（Tb）的速率。对局域网来说，很多企业现在已拥有40 Gbps以太网或100 Gbps以太主干网络。图1.2描绘了对以太网数据率的需求趋势[IEEE12]。从图中的统计数据可以看出，因特网干线数据率的需求每18个月增加一倍，而企业/局域网应用的需求大约每24个月翻一番。
2. 今天的网络要比以前“聪明”多了。有两个方面的智能化是值得注意的。第一，今天的网络能够提供不同水平的服务质量（QoS），包括对最大延迟、最小吞吐量的规范等，以保证高质量地支持应用与服务；第二，今天的网络在网络管理和安全方面提供了多种可自定义的服务。
3. 不论是在工作上还是在个人生活中，因特网、Web及其相关的应用已经变得非常重要，“一切尽在IP上”的大迁徙仍然在继续，并给信息和通信技术（ICT）管理者带来了更多的机遇和挑战。除了利用因特网和Web来联络顾客、供应商和合作伙伴之外，企业还建立了内部网和外部网[①]，以隔离企业的私有信息，使之免受非法的访问。
4. 移动性是ICT管理者们面对的最新技术前沿，像iPhone、Droid和iPad此类流行的消费品已经成为推动商业网络及其应用发展的生力军。近几十年来，不断增强的移动性一直是一个发展趋势，而移动应用的爆发终成事实，并因此而解放了工作人员，使他们不再受限于一个物理位置固定的企业。由终端和办公桌面电脑来支持的传统企业应用，现在通过移动设备来支持已经非常常见。云计算目前正在被所有主要的商业软件生产商接纳，包括SAP、Oracle和微软，因此可以肯定的是，更进一步的移动变革即将到

① 简单地说，内部网就是在企业内部孤立的环境中应用因特网和万维网的技术。外部网就是将企业的内部网延伸出去，连接到因特网上，以允许特定的顾客、供应商和移动中的职员访问企业的私有数据和应用程序。

来。业内专家预测，至2015年移动设备将成为占据主导地位的企业计算平台，而在接下来的十年中，拥有能够随时随地利用企业信息资源以及服务的这一强大能力，将成为主导的发展趋势。

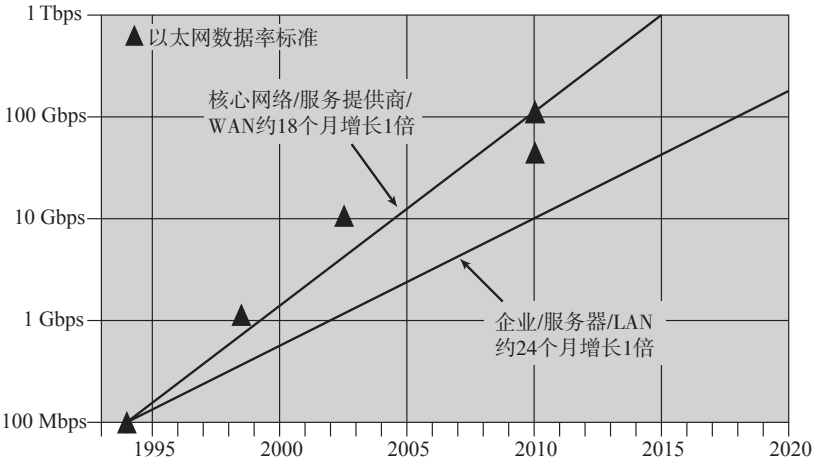

图1.2 过去的和预期的以太网数据率需求增长与现有以太网数据率之间的比较

1.1.2 数据传输和网络容量需求

企事业机构组织在其业务工作和处理信息的方式上，由于网络技术的改变而产生了巨大的变化，与此同时它又在不断促进着网络技术的改变。在这一点上就像是先有鸡还是先有蛋一样难以分辨。类似地，人们在工作和个人生活中对因特网的应用也反映了这一循环依赖关系：当因特网提供了新的基于图像的服务（即Web）后，导致其用户总数的激增以及每个用户产生的通信量的上升。反过来，这又对因特网的速度和效率提出了更高的要求。从另一方面讲，也正是因为速度的提高，才使得基于Web的应用程序能够让终端用户满意。

这一节将考察上述关系式中的终端用户这个因素。首先要介绍的是人们在工作环境中对高速局域网的需求，因为这一需求是最早出现的，并且它加速了网络发展的步伐。然后再介绍对企业广域网的需求。最后，我们简要介绍商用电子产品的变化对网络需求带来的影响。

高速局域网的出现

20世纪80年代初期，个人计算机和微型计算机工作站在商务计算系统中开始被人们广泛接受，时至今日更是取得了几乎与电话同等重要的地位，成为办公室职员最基本的工具。而在不久之前，办公室局域网所提供的还只是基础性的连接服务，也就是说将个人计算机或终端连接到运行着企业应用程序的大型主机或中型机系统上，同时提供部门级的工作组之间相互连接的功能。在这两种情况下，通信量模式相对而言都是比较轻的，其中用得比较多的只不过是文件传送和电子邮件。对于此种类型的工作负荷，当时可用的局域网主要是以太网和令牌环，确实能够适应当时的环境。

直至最近20年，以下两个重要的发展趋势不但改变了个人计算机的角色，而且同时也改变了对局域网的要求。

1. 个人计算机的速度和计算能力持续呈现爆炸性增长。这些更强大的平台支持了图形密集型的应用程序以及与操作系统之间的越来越精致的图形用户接口。

2. MIS（管理信息系统）机构已经认识到局域网是一个切实可行且不可或缺的计算平台，进而导致人们对网络计算能力的重视。这一趋势以客户/ 服务器模式的计算系统为开端，如今它已经成为商务环境中占主导地位的体系结构，另外还有最近出现的以Web为中心的内部网的趋势。这两种方式都涉及在面向事务环境下有可能会频繁传送很大量的数据。

上述趋势带来的影响就是局域网处理的数据量不断上升，并且由于应用程序的交互性越来越强，因此数据传送的可接受延迟必须减小。早期的10 Mbps以太网和16 Mbps令牌环显然无法胜任以上要求的工作。

下面的几个需求实例要求速度更快的局域网。

- **中央服务器群**　在很多应用程序中，要求用户或客户系统能够从称为服务器群（server farm）的多个中央服务器上读取大量的数据。其中的一个例子就是彩色出版系统，此时在多个服务器里通常包含了数十吉比特的必须被下载到图像处理工作站上的图像数据。随着服务器本身性能的提高，瓶颈也就转移到了网络上。
- **强大的工作组**　这些工作组通常由少数几个相互合作的用户组成，他们需要通过网络读取大量的数据文件。这样的例子包括正在对新的软件版本进行测试的某个软件研发小组，或者是定期对新设计进行模拟试验的某个计算机辅助设计（CAD）公司。此时，大量的数据分布在多个工作站上，并且以非常高的速度循环往复地处理和更新。
- **高速本地主干网**　随着处理要求的提高，导致在一个网点上局域网数量的激增，它们之间的高速互连也成为必然。

企业广域网需求

就在不久之前的20世纪90年代，很多企事业机构看重的还是集中式数据处理模式。在一个典型的环境中，可能在少数几个地区级办公场所中拥有大量重要的计算设施，包括大型主机或配置精良的中型计算机系统。这些集中式的设施，能够处理大多数的企业应用程序，包括基本的财务、会计、人事程序，以及很多商业专用的应用程序。而那些地处外围的较小的工作场所（如银行的支行）可能配置了一些终端和基本的个人计算机，并且在面向事务的环境下链接到某一个地区级的中心。

这种模式在20世纪90年代初期已经开始发生改变，从那以后这种改变不断加速。很多企事业机构将自己的职员分散到多个较小的办公场所。于是在家上班（telecommuting）的用户增多了。而最重要的是应用程序结构本身发生了改变。首先，客户/服务器模式的计算系统以及最近出现的内部网计算系统从本质上改变了企业数据处理环境的构成。如今对个人计算机、工作站和服务器的依赖性大大增加，而集中式的大型主机和中型计算机系统就用得很少了。再者，桌面计算机系统广泛采用了图形用户接口，使终端用户可以利用图形应用程序、多媒体和其他数据密集型的应用程序。另外，大多数企事业机构还要求接入因特网。当鼠标轻点几下就能触发大量的数据时，平均负荷随之升高，通信量模式也变得更加不可预测。

所有这些发展趋势都说明必将有更多的数据需要突破场所的限制而被传送至更广泛的区域。长期以来，人们一直认为在典型的商务环境中，大约有80%的通信量被保留在本地，只有大约20%的通信量会流入广域链路。但是现在这条规则已经不再适用于大多数公司了，因为进入广域网环境的通信量所占的百分比大大提高。这种通信流量的转移加重了局域网主干线路上的负担，当然也加重了企业使用的广域网设施的负担。因此，就如同在本地一样，企业数据通信量模式的改变促使着高速广域网的建立。

数字电器

家用电器向数字技术的迅速靠拢，对因特网和企业内部网来说都产生了巨大影响。随着这些新颖的小玩意逐渐进入人们的视野并且迅速普及，它们大大地增加了网络运载的图像和视频通信量。

这一发展趋势的两个值得注意的例子分别是多功能数字化光盘（digital versatile disk，DVD）和数码相机（digital still camera）。有了大容量的DVD，电器行业终于找到了一种可以取代模拟VHS录像带的载体。DVD取代了盒式磁带录像机中使用的录像带，同时也取代了个人计算机和服务器中使用的CD-ROM。DVD让视频进入数字化时代。DVD带来了照片质量的电影，使普通光盘相形见绌，另外它还能像音频CD一样随机访问，而DVD机也能播放音频CD。大量的数据能够挤在一张盘片中。有了DVD的超大存储容量和生动的质量，PC游戏变得更加逼真，而教育软件也能够收录更多的视频。紧紧伴随着这些发展而来的则是在因特网和公司内部网上所承载的通信量的一个新顶峰，因为此类资源已经融入Web 网站中。

另一个相关的产品发展是数码摄像机。这种产品使得个人和公司能够很容易地制作出数字视频文件，并将其放到公司或因特网的网站上，同样又加大了通信量负载。

1.1.3 融合

融合是指原先相对独立的电话技术、信息技术及其市场的合并。我们可以从企业通信三层模型的角度对此加以探讨。

- **应用** 这是业务终端用户所感受到的。融合使得通信应用（如电话、语音邮件、电子邮件、短信）与商业应用（如工作组协作、客户关系的管理及其他公司后勤职能）有机地结合起来。通过融合，应用程序可以用无缝的、结构化的、增值的方式，提供话音、数据和视频的综合能力。彩信就是这样的一个例子，它使得用户仅使用一个接口就能访问到来自多种不同源的消息（如办公语音邮件、办公电子邮件、寻呼机及传真）。
- **企业服务** 在这一层面上，与管理员打交道的是信息网络为支持应用而提供的各种服务。网络管理员需要设计、维护并支持那些与布署基于融合的设施相关的服务。同样在这一层，网络管理员还要将企业网络视为一个功能提供系统。此类管理服务包括设置鉴别机制，为各类用户、团体及应用进行容量管理，并提供QoS服务。
- **基础设施** 网络和通信基础设施由通信链路、局域网、广域网及企业可用的因特网连接构成。越来越多的企业网络基础设施现在也开始包括专用的和/或公共的云，它们与具有大容量数据存储和网络服务的数据中心相连接。在此层面上，融合的主要特点是通过原本为运载数据通信量而设计的网络来运载话音、图像和视频的能力。基础设施的融合也发生在原本设计用于话音通信量的网络上。例如，将视频、图像、文字和数据都通过手机网络传送给智能手机用户，已经成为日常生活的一部分。

简言之，融合涉及将话音迁移到数据基础设施上，把一个用户组织内的所有话音和数据网络综合到一个数据网络基础设施上，并将其延伸至无线领域。融合的基础是使用了网际协议（IP）的基于分组的传输。融合提高了基础设施及应用的能力和范围。

1.2 通信模型

本节将介绍一个简单的通信模型，如图1.3(a)所示。

通信系统的基本作用是完成通信双方的数据交换。图1.3(b)所示为一个具体实例，在该实例中，工作站和服务器之间通过公用电话网进行通信。另一个例子是两部电话机之间通过同样的网络来交换话音信号。在这个模型中有以下一些要素。

- **源点（source）** 源点设备生成传输的数据，例如电话机和个人计算机即可作为源点。
- **发送器（transmitter）** 通常，源系统生成的数据不会以它最初生成时的格式直接传输，而是通过一个发送器将这些信息转换并编码成能够在某些传输系统中进行传输的电磁信号。例如，调制解调器从与之相连的设备（如个人计算机）上获得一个数字比特流，并将这个比特流转换成能够在电话网上传输的模拟信号。
- **传输系统（transmission system）** 它有可能是一根单独的传输线，也可能是连接在源点和终点之间的复杂网络系统。
- **接收器（receiver）** 接收器接收来自传输系统的信号，并将其转换成能够被终点处理的信息。例如，调制解调器接收来自网络或传输线路上的模拟信号，并将其转换成数字比特流。
- **终点（destination）** 获取来自接收器的数据。

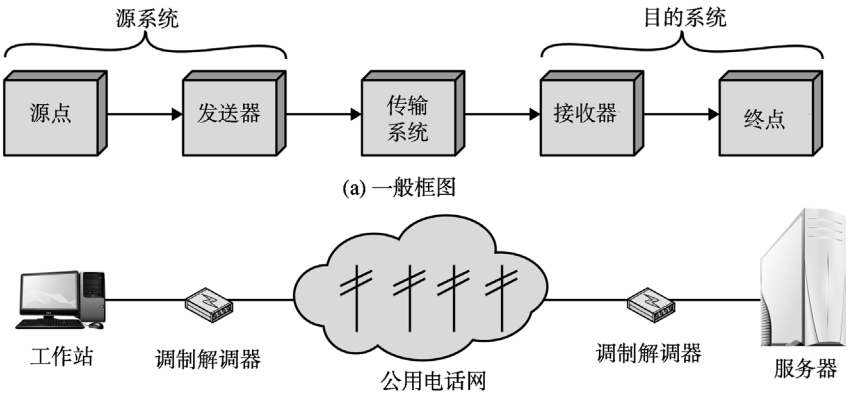

图1.3　简化的通信模型

上面这段简单的文字叙述掩盖了技术上的复杂性。为了使读者对此复杂性有所认识，表1.1列出了数据通信系统必须完成的一些关键任务。表1.1 并不很严谨，比如还可以向表中增加一些条目，表中的有些条目也可以互相合并，并且有些条目表示的若干任务是在系统的不同层次上完成的。尽管如此，这张表本身已提示了本书所涉及的范围。

表1.1　通信的任务

传输系统的利用	寻址
接口	路由选择
产生信号	恢复
同步	报文的格式化
交换的管理	安全措施
差错检测和纠正	网络管理
流控制	

第一项是**传输系统的利用**，它指的是如何充分利用传输设施，通常这些传输设施会被多个正在通信的设备共享。有多种技术（称为复用）可在多个用户之间分配传输系统的总传输能力。为保证系统不会因过量的传输服务请求而超载，需要引入拥塞控制技术。

任何想要通信的设备都必须与传输系统**接口**。本书所讨论的任何形式的通信都必须利用电磁信号在传输媒体上传播。因此，一旦建立了接口，若想进行通信还需要**产生信号**。信号的特性，如信号格式及强度，必须做到：（1）使信号能够在传输系统上进行传播；（2）使信号能够被接收器转换成数据。

仅仅根据传输系统和接收器的要求生成信号还不够，必须在发送器和接收器之间达成某种形式的**同步**。接收器必须能够判断信号在什么时候开始到达，又会在什么时候结束。它还必须知道每个信号单元的持续时间。

为了使双方顺利通信，除了要决定信号特性和定时这些基本要素之外，还有很多其他要求，我们将它们归类为**交换的管理**。如果在一段时间内，数据的交换是双向的，那么双方必须协同合作。例如双方进行电话交谈，有一方必须拨打另一方的电话号码，拨号产生的信号引起被叫方的电话振铃。被叫方拿起电话，双方就完成了连接。对数据处理设备来说，仅仅建立连接还是不够的，必须要达成某些协定。这些协定可能包括：两个设备是同时还是轮流地传送数据；每次传送的数据量；数据的格式；出现意外情况时的应对措施，比如出现了差错应如何处理。

接下来的两项也可以被容纳到交换的管理条目中，但由于它们十分重要，有必要将它们独立分列出来。任何通信系统都可能出现差错，传送的信号在到达终点之前会有不同程度的失真。在不允许出现差错的情况下就需要有**差错检测和纠正**机制。通常在数据处理系统中的确是这样的。例如，当一台计算机向另一台计算机发送文件时，如果文件的内容意外地被改变了，那么这肯定是无法接受的。同时，为了保证终点设备不会因源点设备发送数据过快，以致无法及时接收和处理这些数据而导致超载，就需要**流控制**。

下面来讨论**寻址**和**路由选择**，这是两个相关但又截然不同的概念。当两个以上的设备共享传输设施时，源点系统必须给出其想要通信的终点系统的身份。传输系统必须保证该终点系统能够且唯一能够接收到数据。再进一步看，传输系统本身可能就是具有不止一条路径的网络，那么还必须在这个网络中选择某条具体的路径。

恢复在概念上不同于差错纠正。当信息正在交换时，譬如数据库事务正在进行或文件正在传输时，由于系统的某处发生了故障而导致传输中断，那么在这种情况下就需要使用恢复技术。它的任务就是要么从中断处继续开始工作，要么至少把系统涉及的部分恢复到数据交换开始之前的状态。

报文的格式化是指双方必须就数据交换或传输的格式达成一致的协定。例如，双方都使用同样的二进制字符编码。在数据通信系统中采取某些**安全措施**常常是很重要的。数据发送方可能希望确保只有它期望的接收方能够接收到数据，而数据接收方则可能希望接收到的数据在传送过程中保证没有被改变过，并且此数据确实来自正确的发送方。

最后，数据通信设施是一个十分复杂的系统，它不可能自行创建或运行，于是就需要各种**网络管理**功能来设置系统，监视系统状态，在发生故障和过载时进行处理，并为系统的进一步发展做出合理的规划。

到此为止，我们已经从简单的源点和终点之间进行数据通信的概念出发，完成了对相当复杂的数据通信任务列表的介绍。我们还将在本书中进一步阐述这些任务，以期全面描述数据和计算机通信这一概念下涉及的一系列工作。

1.3 数据通信

1.3.1 数据通信模型

为了更加形象地说明第二部分的重点，如图1.4所示，我们从一个新的角度来考察图1.3(a)中的通信模型。让我们以电子邮件为例，逐步地详细说明该图。

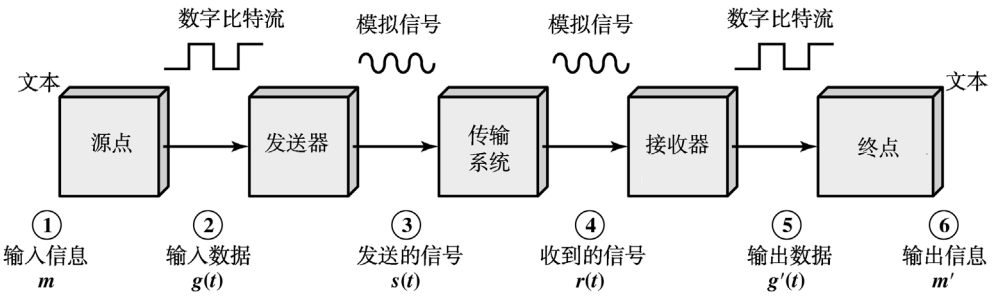

图1.4　简化的数据通信模型

假设图中的输入设备和发送器都是某台个人计算机的组件。使用这台计算机的用户希望向另一用户发送一条消息m。用户激活计算机上的电子邮件程序，并用键盘（输入设备）录入这条消息。此时字符串暂存在主存储器里。我们将此字符串视为主存储器中的一个比特序列g。这台计算机通过I/O设备，如局域网收发器或DSL调制解调器，与某种传输媒体相连接，例如局域网、数字用户线路（DSL）或无线连接。输入数据以一连串高低变化的电压$g(t)$的形式传递给发送器，这个电压变化在某些通信总线或线缆上代表了比特序列。发送器直接与传输媒体相连，并将输入的电压序列$g(t)$转换成适于传输的信号$s(t)$，具体使用的多种可互换的方法将在第5章中详细讲解。

在传输媒体上传送的信号$s(t)$在到达接收器之前会受到多种形式的损伤，这将在第3章中讨论。因此，接收到的信号$r(t)$很可能与$s(t)$不完全相同。接收器将根据$r(t)$以及它对该传输媒体的了解，尽量估算出$s(t)$的原貌，并产生比特序列$g'(t)$。这些比特被送到输出端的计算机上，在这里它们以比特块g'的形式暂存在主存储器中。在很多场合下，终点系统会试图判断是否有差错产生，如果有，则它将与源点系统合作，并最终获得没有差错的完整数据块。然后，这些数据通过输出设备，如打印机或屏幕，展现在用户面前。在正常情况下，用户看到的消息m'是和原消息m完全一样的副本。

现在考虑电话交谈的情况。在这种情况下，消息m以声波的形式输入电话机，电话机将声波转换成同频率的电信号。这些电磁信号不经过任何形式的改变直接在电话线上传输。因此，输入信号$g(t)$与被传输的信号$s(t)$是相同的。信号$s(t)$在传输媒体上会承受某些形式的失真，因此接收到的信号$r(t)$与$s(t)$并不完全一样。虽然如此，信号$r(t)$不经过任何形式的差错纠正，也不用提高信号质量，直接被转换回声波。因此m'与m并不完全一致。但是，对接听者来说，接收到的声音通常是能够听得懂的。

以上的讨论并没有涉及数据通信的其他几个关键性问题，包括用来控制数据流并检测、纠正差错的数据链路控制技术，以及用于提高传输效率的复用技术。

1.3.2　信息的传输

任何通信设施的基本构件都是传输线路。对企业管理者来说，并不会对如何将信息编码和如何通过线路来传输等大多数技术细节感兴趣。企业管理者关心的是在最小成本的前提下，某种特定的设施能否提供所要求的性能，并且具有能够接受的可靠性。但是，企业管理者还是应该了解某些传输技术特性，以便能够提出适当的问题并做出有理有据的决定。

企业用户要面临的一个最基本的选择是传输媒体。如果仅用于本企业范围内，则这个选择通常完全取决于企业本身。而对于远距离通信，此选择则通常取决于长途电信公司，当然也不总是如此。不论是在哪种情况下，技术上的变化正迅速改变着所用媒体的组成。特别引

人注目的是光纤（fiber optic）传输和无线（wireless）传输（如卫星和蜂窝通信）。这两种媒体目前正促进着数据通信传输技术向前发展。

不断增加的光纤信道容量使得信道容量成为几乎可以随意使用的资源。自20世纪80年代初期以来，光纤传输系统市场的发展是史无前例的。在过去的10年中，光纤传输费用下降了几个数量级以上，而此类系统的容量则几乎以相同的量级增长。不久的将来，美国境内的长途电话通信将几乎完全由光缆组成。因为它的容量大并具有安全特性（窃听光纤比较困难），在办公大楼内和局域网里也越来越多地使用光纤来运载不断加重的商务信息负载。光缆的大量使用也使通信交换技术和网络管理体系结构得到了迅猛发展。

第二种媒体，即无线传输，是向统一的个人电信和统一的通信接入发展的趋势所带来的结果。其中第一个概念指的是个人可随时随地通过一个账号使用任何通信系统的能力，“随地”在理想情况下泛指全球。第二个概念指的是使用用户所亲睐的计算机设备在各种不同的环境下与信息服务连接的能力（如在办公室、在大街上，以及在飞机、公交、火车上可以同样出色工作的移动式终端、智能手机或平板电脑）。今天，这两个概念都可归入业务推动移动支持的概念。无线局域网已经成为企业网络及小型办公室/家庭办公室网络的常见组成部分，而具有无线功能的智能手机和平板电脑正迅速成为主流的商业用户通信设备。移动性的潜能还未完全释放，它应当在各种商业层面表现得更加出色：个人的、工作组的和企业范围的。这为人们在无线技术上投入更多的商业投资提供了令人信服的理由。

虽然传输设施的容量增加了，费用降低了，但是对大多数企业来说，传输服务仍然是通信预算中最昂贵的一部分。因此，企业管理者需要了解哪些技术能够提高这些设施的使用效率。提高效率的两种主要办法是复用和压缩。复用（multiplexing）指的是多个设备共享一个传输设施的能力。如果每个设备都只在某些时间段用到该设施，那么共享的安排可以让该设施的费用由多个用户分担。压缩（compression）这个名称很容易理解，就是将数据挤压变小，使得低容量、较便宜的传输设施能用来满足特定的需求。这两种技术本身是互相独立的，但在很多类型的通信设备中它们是合二为一的。企业管理者需要了解这些技术，才能正确评估市场上各种各样的产品，选择出适当且划算的产品。

传输和传输媒体

通过把信息转化成电磁信号并将这些电磁信号通过某些媒体（如电话双绞线）传播，信息就能进行通信了。最常见的传输媒体有双绞线、同轴电缆、光缆以及地面微波和卫星微波。能够达到什么样的数据率以及出现差错的机率有多少，全都取决于信息的特性和媒体的类型。第3章和第4章将考察电磁信号的重要属性，并对各种不同的传输媒体从费用、性能及应用方面进行比较。

通信技术

信息传输在经过传输媒体时所涉及的不仅仅是简单地将一个信号插入到媒体上，还要决定使用什么样的技术将信息编码成电磁信号。编码的方法有很多种，而且不同的选择会影响性能和可靠性。更进一步讲，成功的信息传输包括各个组成部分之间的高度合作。位于设备和传输媒体之间的接口必须经过协商达成一致。另外还必须使用一些控制信息流并能将其从丢失和损坏中恢复的手段。后面提到的这几种功能是由数据链路控制协议执行的。所有这些主题都将在第5章至第7章中介绍。

传输效率

在任何计算机/通信设施中，传输费用都是一项主要的花费。正因为如此，在给定的资源上运载最大量的信息，或者换一种做法，用最小的传输容量来满足给定信息的通信要求，

就显得非常重要。达到上述目标有两种做法：复用和压缩。这两种技术既可以单独使用，也可以结合起来使用。第8章将考察3种最常用的复用技术：频分、同步时分复用和统计时分复用，以及一些重要的压缩技术。

1.4　网络

在全球范围内，互联网用户数量预计将从2011年的大约20亿上升到2016年的大约30亿。这个数字其实是误导性的，因为一个终端用户可能拥有多种设备。据估计，至2016年将会有超过200亿固定的和移动的网络设备，以及设备到设备的连接，而在2011年这个数字大约是70亿。用户设备数量的增加，特别是宽带设备的增加，对通信量带来了多方面的影响。网络容量可能长时间地被一个用户消耗，并且同时被多个设备一起消耗。另外，不同的宽带设备可以支持不同的应用程序，这些应用程序有可能具备产生更大通信量的能力。其结果是，在因特网及其他基于IP的网络上，每年生成的总流量预测将从372艾字节（372×2^{60}字节）上升至2016年的1.3泽字节（1.3×2^{70}字节）[CISC12a]。此通信量需求为通信协议（在第2章中介绍）以及通信与计算机网络带来了性能上的刚性需求。

世界上最普遍的网络类型之一是局域网（LAN）。事实上，几乎在所有大中型办公楼里都能找到局域网。局域网，尤其是WiFi局域网，也越来越多地用于小型办公室和家庭网络。随着计算设备在数量和能力上的增长，办公楼中LAN的数量及其性能也相应地在增加。它们在企业中的激增得益于为局域网开发的国际公认标准。虽然以太网已经成为占主导地位的网络体系结构，但企业管理者仍然可以选择传输速率（从100 Mbps到100 Gbps），以及在企业内部网络中以何种方式组合有线的和无线的局域网。在目前的商业网络中，不同性质的局域网和计算设备之间的互连以及管理问题将为网络专业人员带来长期的挑战。

要求能够支持话音、数据、图像和视频业务的网络，这个商业需求并不局限于一栋办公大楼或局域网内部，今天它已是企业范围的通信需求。局域网交换机和其他数据通信技术上的进步导致局域网传输性能上的大大增强，并带来了综合这个概念。综合（integration）的含义是指通信设备和网络能够同时处理话音、数据、图像甚至视频。因此，你的备忘录或报告就可以伴有话音解说、图形演示，甚至可能是一部短小的视频介绍或总结。在局域网中显得轻而易举的图像和视频服务却会对广域网的传输带来很高的要求，并且价格昂贵。再者，随着局域网的普及以及传输速率的提高，用企业网络来支持地理上分散的地区间的互连需求也在增加。这又迫使企业不得不提高广域网的传输和交换容量。幸运的是，光纤和无线传输服务所具有的巨大且仍在不断提高的容量，为满足这些业务数据的通信需求提供了足够的资源。但是，为了应对传输链路的容量以及通信业务量的不断增长，交换系统的研发仍然是一个尚未被征服的挑战。

将企业网络作为一种积极的竞争工具，并视之为提高生产力，大幅度削减生产成本的手段的可能性是很大的。如果企业管理者了解这些技术，他们就能行之有效地与数据通信设备生产商和服务提供商打交道，这样就能够提高公司的竞争地位。

在这一节剩下的内容中，我们将简单介绍各种类型的网络。第三部分和第四部分将会更深入地讨论这些主题。

1.4.1　广域网

通常，广域网覆盖了很大的地理范围，需要穿越公众设施，并且至少有一部分依靠的是由公共电信运营公司（向公众提供通信服务的公司）建立的电路进行传输的网络。一个典型

的广域网内部包含了多个相互连接的交换结点。从任何一个设备出发的传输过程都要通过路由选择，途经这些网络结点，最后到达某个终点设备。这些结点（包括网络边缘的结点）并不关心所传输的数据具体是什么内容，它们只是提供交换功能，将数据从一个结点转交给另一个结点，直至这些数据到达终点。

传统上，广域网的建立采用以下两种技术中的一种：电路交换和分组交换。后来，帧中继和ATM网络开始担当主要角色。一方面，ATM及帧中继在某种程度上仍在广泛使用，而另一方面，它们的应用已渐渐被基于吉比特以太网和网际协议（IP）的技术所取代。

电路交换

在电路交换网中，两个站点之间建立一条专用的途经多个网络结点的通信路径。这一路径是由连接结点与结点的一连串物理链路组成的。每段物理链路都会为这一连接建立一条专用的逻辑通道。由源点生成的数据沿着这条专用通路被尽可能快速地传送。对每个结点来说，接收到的数据无延迟地通过路由选择或交换到达适当的出口通道。电路交换最常见的例子就是电话网。

分组交换

在分组交换网中使用的则是完全不同的方法。在这种情况下，没有必要建立一条独占传输能力的贯通网络的专用通道。相反，数据是以一连串小块的形式发送出去的，这些小数据块就称为分组。每个分组都将沿着从源点到终点的路径，途中经过一个个的结点，穿越整个网络。对每个结点来说，它接收完整的分组，先将其暂存，然后再传送给下一个结点。分组交换网常用于从终端到计算机和从计算机到计算机之间的通信。

帧中继

在分组交换网发展的那个时代，远距离数字传输设施与今天相比还存在相当高的误码率。因此，为了弥补差错，分组交换机制中引入了大量的额外开销。这些额外开销包括在每个分组中都要附加一些额外的比特，从而引入了冗余信息，并且在终端和途经结点上还需要有额外的处理过程，用以检测差错和从差错中恢复。有了现代的高速电信系统后，这些额外开销就变得没有必要，甚至阻碍发展。说它没有必要，是因为误码率已大大降低，即使发生了误码，也可以由终端系统通过分组交换逻辑层之上的高层逻辑来轻松地解决。说它妨碍发展，是因为分组交换中包含的额外开销会将网络提供的高能力中的很大一部分消耗掉。

帧中继的发展正是充分利用了这种高数据率和低误码率。传统的分组交换网能够达到的终端用户传输数据率约为64 kbps，而帧中继网络的终端用户传输速率可高达2 Mbps。达到这一高数据率的关键在于它抛弃了绝大多数与差错控制有关的额外开销。

ATM

异步传递方式（ATM）有时也被称为信元中继，它是电路交换和分组交换领域共同发展的结晶。ATM可被视为帧中继的进一步发展。帧中继和ATM之间最大的区别在于帧中继使用的是长度可变的分组，称为帧；而ATM 使用的是长度固定的分组，称为信元。和帧中继一样，ATM几乎不为差错控制提供额外开销，而依赖传输系统自身的稳定性以及终端系统的高层逻辑来捕获和纠正差错。由于使用了固定长度的分组，ATM需要处理的额外开销比帧中继还要少。因此,ATM预计的工作范围在几十到几百Mbps 之间，甚至可以工作在吉比特范围内。

ATM也可以视为从电路交换系统发展而来。在电路交换系统中，终端系统只能利用固定数据率的交换电路。ATM允许定义多条虚通路，而这些虚通路的数据率是在它被创建时动态定义的。ATM因为使用了长度固定且较短的信元而变得效率非常高，以至于即使是使用分组

交换技术也能提供固定数据率的通路。就这样，ATM扩展了电路交换技术，能够允许多条通路的存在，且每条通路的数据率又可以根据要求动态定义。

1.4.2　局域网

与广域网一样，局域网也是一种连接各式各样的设备并向这些设备提供交换信息手段的通信网络。局域网和广域网之间有以下几点主要区别。

1. 局域网的范围较小，通常是一栋楼或一片楼群。正如我们将要看到的，这种地理范围的不同导致了不同的技术解决方案。
2. 在通常情况下，局域网和与局域网相连接的设备都属于同一个组织。对广域网来说，这种情况很少见，或者至少有很大一部分网络资产并不属于使用者。这里隐含了两层意思。首先，选择使用局域网要谨慎，可能需要一大笔资金的投入用于采购和维护（与广域网的接入费或租用费相比较）；第二，局域网的网络管理完全由用户独自负责。
3. 一般来说，局域网内的数据率要比广域网高得多。

局域网采用了几种不同的配置。其中最普通的是交换局域网和无线局域网。交换局域网中最常见的是交换以太局域网，它可能只含有一个交换机，其上挂接了一些设备，也可能含有多个互连的交换机。无线局域网最常见的类型是WiFi局域网。

1.4.3　无线网络

正如上面所提到的，无线局域网在商务环境下的应用非常广泛。同样，无线技术在广域话音网及数据网中的应用也很常见。无线网络的优势在于它的移动性以及安装配置的简易性。

1.5　因特网

1.5.1　因特网起源

因特网是从美国国防部高级研究计划署（Defense Advanced Research Projects Agency，DARPA）于1969 年开发的ARPANET 演变而来的。它是第一个可运行的分组交换网络。ARPANET 最初只在4个地方运行。今天其主机的数量以千万计，用户的数量更是高达数亿，而参与其中的国家和地区有将近200 个。因特网连接数量仍然保持着呈指数级增长。

这种网络如此成功，以至于DARPA将同样的分组交换技术应用于战术无线通信（分组无线）和卫星通信（SATNET）上。由于这3个网络运行在完全不同的通信环境中，它们对特定参数的相应取值（如最大分组长度）就各不相同。面对如何将这些网络集成这个难题，DARPA的Vint Cerf 和Bob Kahn开始研究网络互连（internetworking）的方法和协议，也就是跨越多个任意的分组交换网络的通信。1974年5月，他们发表了一份影响深远的论文[CERF74]，概要说明了实现传输控制协议（Transmission Control Protoco，TCP）的方法。这个建议后来经过ARPANET协会的改良和充实，其中欧洲网络的参与也功不可没，最终迎来了TCP和IP（Internet Protocol）协议，而正是这两个协议为最终的TCP/IP 协议族奠定了基础。因此也就提供了因特网的基础。

1.5.2　要素

图1.5所示为因特网所包含的要素。当然，因特网的目标是终端系统的相互连接，这些终端系统称为**主机**，包括个人计算机、工作站、服务器、大型计算机，等等。使用因特网的绝

大多数主机都会连接到某个**网络**上，如局域网（LAN）或广域网（WAN）。而这些网络又通过**路由器**相连。每个路由器都与两个以上的网络相连。某些主机，如大型计算机或服务器，会直接与路由器相连，而不是通过网络。

因特网最基本的运行方式如下。有一台主机可能希望向位于因特网中任意某地的另一台主机发送数据。源点主机将需要发送的数据拆成一个分组序列，称为**IP数据报**或**IP分组**。每个分组包含一个目标主机的唯一的数字地址。这个地址称为**IP地址**，因为它在IP分组中携带。每个分组根据这个目的地址途经一连串的路由器和网络，从源点到达目的点。每个路由器在接收到一个分组时，要做出路由选择的决定，并将该分组沿着通往目的点的路径转发。

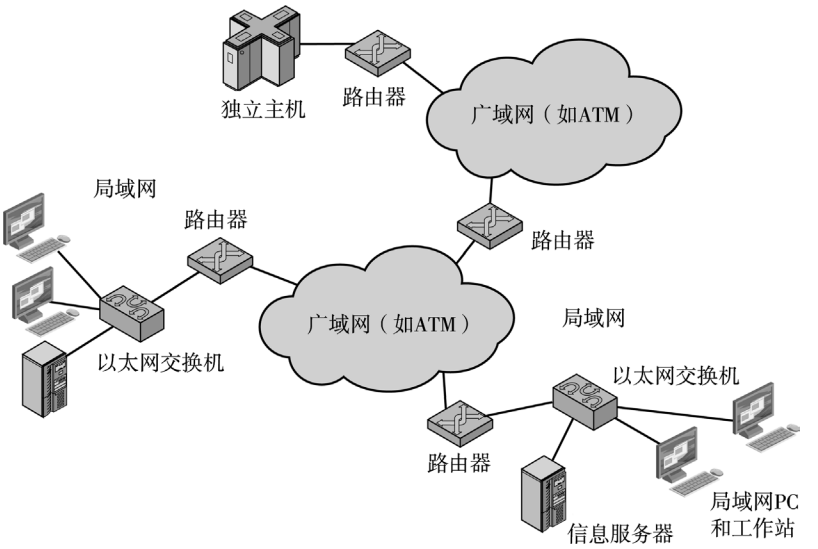

图1.5 因特网要素

1.5.3 因特网体系结构

今天的因特网是由几千个相互重叠的分层次的网络组成的。正因为如此，想要详细地描述因特网的确切体系结构或拓扑是不现实的。不过还是可以对其共同的普遍特征做全面概述，如图1.6所描绘的。表1.2总结了其中的术语。

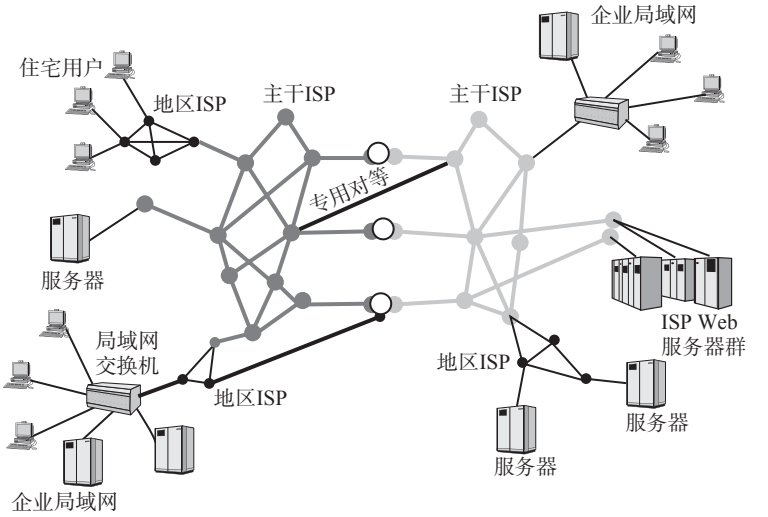

图1.6 部分因特网简化视图

因特网中的一个要素就是与因特网相连的主机集合。简单地说，一个主机就是一台计算机。今天，计算机的形式变化多样，包括移动电话甚至汽车。所有这些形式的计算机都可以是因特网上的一个主机。主机有时以局域网的方式聚集在一起。这种方式是企业环境中的典型配置。无论是单个主机还是局域网，都要通过一个**汇接点**（Point of Presence，POP）连接到一个**因特网服务提供者**（Internet Service Provider，ISP）。此连接分多步建立，用户首先连接的是**用户驻地设备**（Customer Premises Equipment，CPE）。CPE是位于主机一侧的通信设备。

表1.2　因特网术语

交换局（Central Office，CO）
是电话公司终结用户线路并放置交换设备，以将这些线路连接到其他网络的地方
用户驻地设备（Customer Premises Equipment，CPE）
是位于用户身边（物理位置），而不是在服务提供者周围或之间的电信设备。例如电话机、调制解调器、有线电视机顶盒、数字用户线路路由器。传统上，这个术语指的是位于电话线用户一端的设备，通常属于电话公司所有。今天，几乎所有的端用户设备都可以称为用户驻地设备，并且既可以属于用户，也可以属于服务提供者
因特网服务提供者（Internet Service Provider，ISP）
向其他公司或个人提供接入因特网或加入因特网的公司。ISP拥有一些设备和电信线路的接入权，这些条件是为服务范围内的用户提供连接因特网的汇接点所必须具备的。比较大的ISP具有自己的高速专用线路，这样它们就能减少对电信提供者的依赖，并能够为自己的用户提供更好的服务
网络接入点（Network Access Point，NAP）
在美国，一个网络接入点就是几个主要的因特网连接点之一，它们将所有ISP维系到一起。最初，全美国只有4个网络接入点，分别位于纽约、华盛顿、芝加哥和旧金山，它们是美国国家科学基金会创立并支持的，是从最初由美国政府资助的因特网向商业化转型过程中的一部分。自从那时起，又有几个新的网络接入点出现了，包括WorldCom公司位于加州圣何塞市的MAE West网点和ICS Network Systems公司的Big East网点
网络接入点提供面向大众服务的主要交换设施。公司需申请使用这些网络接入点设施。大部分因特网的通信量处理无须涉及网络接入点，而是使用对等约定和地理区域内的相互连接达成
网络服务提供者（Network Service Provider，NSP）
向因特网服务提供者（ISP）提供干线服务的公司。通常，ISP在一个称为因特网交换局（IX）的点上与地方ISP相连，然后再连接到NSP干线
汇接点（Point of Presence，POP）
具有一些电信设备的网点，通常指ISP或电话公司的网点。ISP的汇接点是ISP网络的边缘，来自用户的连接在这里被接受和鉴别。一个因特网接入提供者可能运营着多个分布在自己所辖区域内的汇接点，使自己的用户更有机会通过本地电话连接到其中一个汇接点上。最大的全国性ISP拥有的汇接点遍布全国

对许多家庭用户而言，用户驻地设备就是56 kbps的调制解调器。它对于电子邮件及其相关服务来说是非常合适的，但对图形密集型的Web就显得很勉强了。目前的用户驻地设备能提供更高的性能，并且在某些情况下具有保证的服务。此类接入技术的例子包括DSL（数字用户线路）、电缆调制解调器、地面无线系统以及卫星。在工作中需要连接到因特网的用户通常用工作站或个人计算机连接到属于雇主的局域网上，然后这个局域网通过共享的商业干线连接到一个ISP。在此类情况下，共享电路通常是T-1连接（1.544 Mbps）。而对于非常大的企业来说，有可能是T-3连接（44.736 Mbps）。还有另一种情况，企业局域网有可能挂接到广域网上，例如帧中继网络，然后通过广域网连接到ISP。

用户驻地设备在物理上连接到“本地环路”或“最后一里”。它们指的是位于服务提供者的设施和主机所在网点之间的基础设施。例如，使用DSL调制解调器的住宅用户将调制解调器连接到电话线路上。通常，电话线是从住宅到**交换局**（Central Office，CO）之间的一对铜线，由电话公司拥有和使用，而这条电话线的很大一段很可能采用的是光纤。在这种情况下，“本地环路”（local loop）指的就是住宅和交换局之间的这对铜线。如果住宅用户有电缆调

制解调器，那么本地环路就是从住宅到电缆设备公司之间的同轴电缆。上面这个例子有一点过于简单化了，但是对此处的讨论已经足够了。在很多情况下，从一个住宅延伸出来的电线要与从其他住宅出来的电线聚集到一起，然后转换成另一种不同的媒体，如光纤。此时，术语“本地环路”指的还是从住宅到交换局或电缆设备公司之间的线路。本地环路的提供者不一定是ISP。在很多情况下，本地环路的提供者是电话公司，而ISP则是一家大型的全国范围的服务公司。不过，一般来说本地环路的提供者也是ISP。

CPE-ISP的连接还有几种不经过电话公司交换局的其他形式。例如，有线电视链路也可以连接本地用户到有线电视公司站点，而此处则包含或链接到ISP。移动用户可以利用无线链路连接到WiFi接入点，由它来提供对因特网的接入。而大型企业在接入ISP时也有可能通过专用的高速链路或经由一个广域网，如ATM或帧中继网络。

通过汇接点，ISP提供与其所拥有的大型网络的接入。汇接点只不过是一个让消费者能够连接到ISP网络上的设施。这个设施有时是属于ISP的，但通常是ISP从本地环路所属的电信公司租来的。汇接点可以很简单，例如在交换局的一个机架上安装调制解调器池再加上一个接入服务器就是一个汇接点。通常，这些汇接点遍布服务提供者所辖的地理范围内。ISP的作用就相当于因特网的网关，它提供很多重要的服务。对绝大多数住宅用户来说，ISP会提供一个唯一的IP地址，这是与其他因特网主机通信时必须具备的。大多数ISP还提供名字解析以及其他一些基本的网络服务。但是ISP所提供的服务中最重要的是对其他ISP网络的接入。这种接入的实现需要服务提供者之间有正式的对等约定。物理接入可以通过多个ISP的汇接点相互连接来实现。当这些汇接点的位置靠得很近时可以用本地连接直接接入，或者当汇接点不在一起时也可以利用专线接入。但更常用的机制是**网络接入点**（Network Access Point，NAP）。

网络接入点是一个物理设施，它提供设备以便在互相连接的网络之间运送数据。在美国，国家科学基金会（NSF）私营化计划催生了4个网络接入点。网络接入点的建立和运作都是私营的。近几年来，网络接入点的数量增长惊人，应用技术也从光纤分布式数据接口（FDDI）和以太网升级换代为ATM和千兆位以太网。今天的网络接入点大多都有一个ATM核心。连接到网络接入点上的多个网络都归**网络服务提供者**（Network Service Provider，NSP）所拥有和运作。NSP可以是一个ISP，但并不一定是。对等约定是NSP之间的事，并不包括网络接入点的运营者。NSP在网络接入点上安装路由器，并将它们连接到网络接入点设施上。NSP的设备负责路由选择，而网络接入点设施提供路由器之间的物理接入路径。

1.6 网络配置举例

先让我们感受一下本书主要内容所涉及的范围，图1.7所示为一些最典型的目前正在使用的通信和网络要素。图的中心部分是一个IP主干网，它可以代表因特网或企业IP网络的一部分。通常，主干网是由大容量光纤链路互相连接的高性能路由器（称为核心路由器，core router）组成的。光纤链路使用了所谓的波分复用（WDM）技术，因此每条链路具有多个逻辑通道，它们分别占用光纤带宽的不同部分。

在IP主干网的边缘是提供外部网络与用户连接的路由器。这些路由器有时被称为边缘路由器（edge router）或汇聚路由器（aggregate router）。汇聚路由器也用于企业网络中，它将多个路由器和交换机与外部资源相连接，如IP主干网或高速广域网。作为对核心路由器和汇聚路由器的性能需求的说明，[XI11]分析报告了中国因特网主干提供商和大型企业网络的此类需求预计。该分析归纳认为，至2020年汇聚路由器的需求大约在200 ~ 400 Gbps每光纤链路的范围，而核心路由器的需求则大约在400 Gbps到1 Tbps每光纤链路的范围。

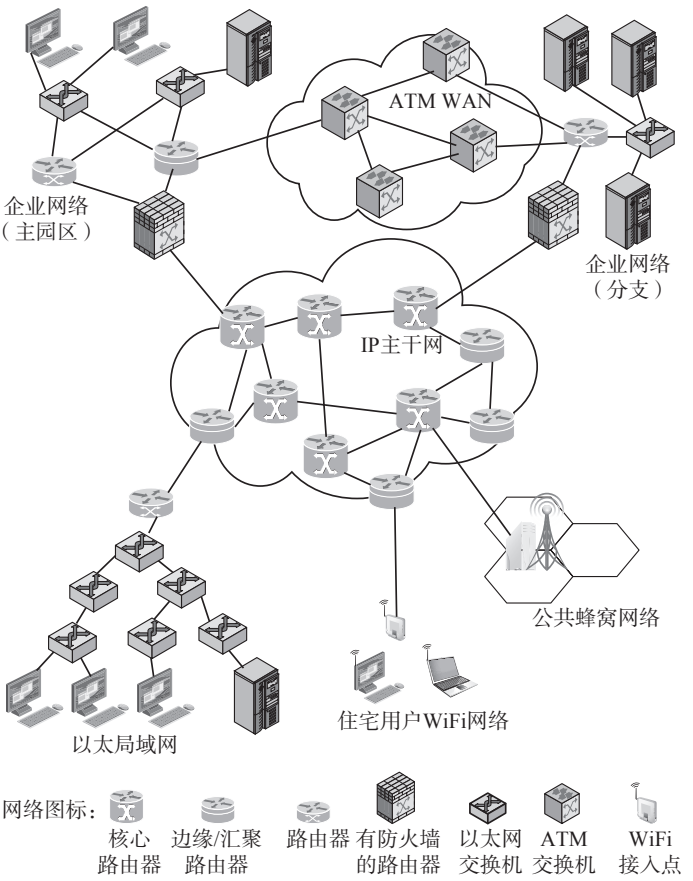

图1.7　一种网络配置

该图的上部描绘了类似大型企业网络的一部分。从图中可以看出该网络的两个区经由专用高速异步传递方式（ATM）广域网相连接，其中交换机使用光纤链路连接。企业资产通过具有防火墙功能的路由器连接到IP主干网或因特网，同时也受到防火墙的隔离保护，防火墙的这种布局方式十分常见。

图的左下角可能是一个小型或中等规模的基于以太网配置的局域网。经路由器到因特网的连接可以通过数字用户线路或者通过专用高速链路实现。

在图的下部我们看到一个住宅用户通过某种用户电路连接到因特网服务提供者（ISP）。这种连接最常见的例子有数字用户线路，它通过电话线向用户提供高速连接，同时也需要特殊的DSL调制解调器；另外的例子是有线电视设施，此时则需要电缆调制解调器。对于每一种情况，在信号编码、差错控制、用户网络的内部结构等方面所考虑的问题各不相同。

最后，像智能手机和平板电脑这样的移动设备可以经由公共蜂窝网络连接到因特网，它具有到因特网的高速连接，通常情况下是光纤链路。

ISP在图中并没有明确标绘出来。通常ISP包含数个相连的路由器，并通过高速链路与因特网连接。而因特网则由覆盖全球的很多相连的路由器组成。这些路由器转发数据包，使这些数据包通过因特网从源点到达终点。

两个相邻要素，如因特网上相邻的路由器或者ATM网络中相邻的交换机，或者是用户和ISP，它们之间的链路设计需要考虑很多因素，如信号编码和差错控制。不同种类的网络（电话网、ATM、以太网）的内部构造又牵扯到许多其他问题。本书的大部分内容讲的全部都是由图1.7所引申的设计特性。