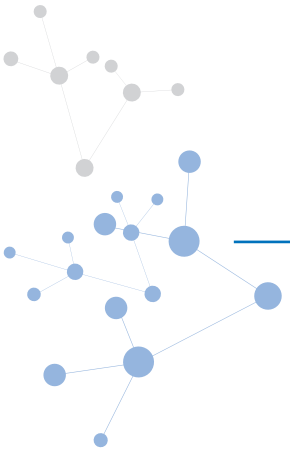

第 1 章　计算机网络概论

本章主要介绍计算机网络的概念、演变和发展、组成与功能、类别、计算机网络的体系结构以及发展趋势。

通过本章学习，可以了解（或掌握）：

- 计算机网络的概念；
- 计算机网络的发展历程；
- 计算机网络的组成、功能和类别；
- 计算机网络的体系结构；
- 计算机网络的发展趋势。

1.1　计算机网络发展概述

从 20 世纪 50 年代开始发展起来的计算机网络技术，随着计算机技术和通信技术的飞速发展而进入了一个崭新的时代。信息技术的迅猛发展，使得计算机网络技术面临新的机遇和挑战，同时也将促进计算机网络技术的进一步发展。

1.1.1　计算机网络

计算机网络是现代计算机技术和通信技术密切结合的产物，是随着社会对信息共享和信息传递的要求而发展起来的。所谓计算机网络是指利用通信设备和线路将地理位置不同的功能独立的多个计算机系统互联起来，以功能完善的网络软件，如网络通信协议、信息交换方式以及网络操作系统等，实现网络中信息传递和资源共享的系统。这里所谓功能独立的计算机系统，一般是指有中央处理器（central processing unit，CPU）的计算机。

1.1.2　计算机网络的演变和发展

计算机网络的发展过程经历了从简单到复杂，从单机到多机，由终端与计算机之间的通信到计算机与计算机之间直接通信的演变过程。至今其发展可以概括为 5 个阶段或者说 5 代。

1. 面向终端的计算机网络（1954—1968 年）

第一代计算机网络是面向终端的计算机网络。它以一台中央主计算机连接大量在地理上处于分散位置的终端。所谓终端通常是指一台计算机的外围设备，包括显示器和键盘，无 CPU 和内存。早在 20 世纪 50 年代初，美国建立的半自动地面防空系统，将远距离的雷达和其他测量控制设备通过通信线路汇集到一台中心计算机进行处理，开始了计算机技术和通信技术相结合的尝试。这类简单的“终端—通信线路—计算机”系统，构成了计算机网络的雏形。这样的系统除了一台中心计算机外，其余的终端设备都没有 CPU，因而无自主处理功能，还不能称为计算机网络。为区别后来发展的多个计算机互联的计算机网络，称其为面向终端的计算机网络。随着终端数的增加，为了减轻中心计算机的负担，在通信线路和中心计算机之间设置了一个前端处理器（front end processor，FEP）或通信控制器（communication control unit，CCU），专门负责与终端之间的通信控制，出现了数据处理与通信控制的分工，以便更好地发挥中心计算机的处理能力。另外，在终端较集中的地区，设置集线器或多路复用器，通过低速线路将附近群集的终端连至集线器和复用器，然后通过高速线路、调制解调器（modem）与远程计算机的前端机相连。面向终端的计算机网络示意图如图 1.1 所示。

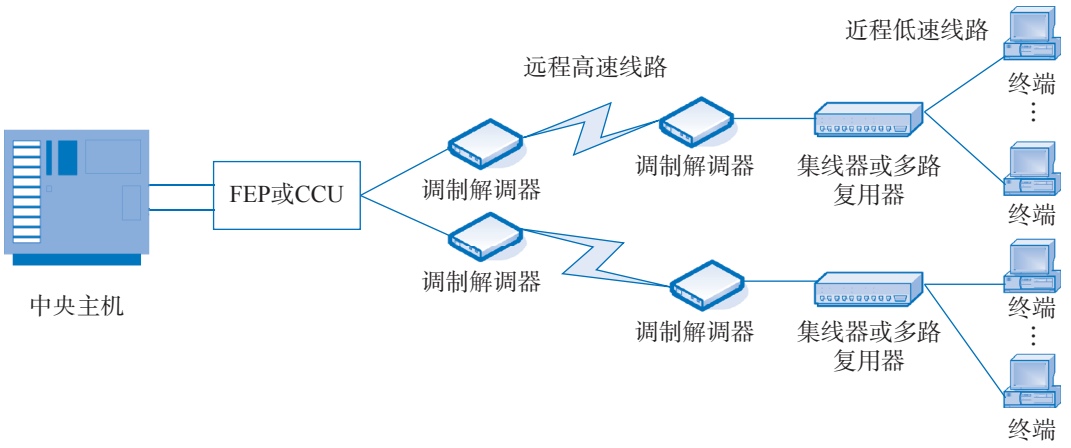

图 1.1　面向终端的计算机网络示意图

上述计算机网络有两个明显的缺点：一是中央主机负荷很重，以致对终端的响应较慢，甚至出现中央主机崩溃的现象；二是单台中央主机系统的可靠性较低，一旦发生计算机故障，将导致整个系统瘫痪。面向终端的计算机网络的典型应用是当时的美国航空公司与 IBM 公司在 20 世纪 50 年代开始联合研制，于 20 世纪 60 年代投入使用的飞机订票系统 SABRE-I，它由一台中央主机和全美范围的 2000 个计算机终端组成。

2. 计算机互联网络（1969—1983 年）

第二代计算机网络是计算机互联网络。从 20 世纪 60 年代中期开始，出现了若干计

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 2　　2023/6/15 14:16:23

算机互联系统，开创了“计算机 - 计算机”通信时代。20 世纪 60 年代后期，以美国国防部资助建立起来的阿帕网（Advanced Research Projects Agency network，ARPANET）为代表，从此标志着计算机网络的兴起。当时，这个网络把位于洛杉矶的加利福尼亚大学、位于圣巴巴拉的加利福尼亚大学、斯坦福大学及位于盐湖城的犹他州州立大学的计算机主机连接起来，采用分组交换技术传送信息。这种技术能够保证，如果这四所大学之间的某一条通信线路因某种原因被切断（如核打击）以后，信息仍能通过其他线路在各主机之间传递。这个 ARPANET 就是今天互联网（考虑到历史与习惯，全书中 Internet 与因特网、互联网通用）的雏形。到 1972 年，ARPANET 上的节点数已达到 40 个，这 40 个节点彼此之间可以发送小文本文件，当时称这种文件为电子邮件，也就是现在的 E-mail；并利用文件传输协议发送大文本文件，包括数据文件，即现在互联网中的文件传输协议（file transfer protocol，FTP）；同时通过把一台计算机模拟成另一台远程计算机的一个终端而使用远程计算机上的资源，这种方法被称为 TELNET。ARPANET 是一个成功的系统，它在概念、结构和网络设计方面都为后继的计算机网络打下了坚实的基础。

随后各大计算机公司都陆续推出了自己的网络体系结构，以及实现这些网络体系结构的软件和硬件产品。1974 年 IBM 公司提出的系统网络体系结构（systems network architecture，SNA）和 1975 年 DEC 公司推出的数字网络体系结构（digital network architecture，DNA）就是两个著名的例子。凡是按 SNA 组建的网络都可称为 SNA 网，而凡是按 DNA 组建的网络都可称为 DNA 网或 DECNet。这些网络也存在一些弊端，主要问题是各厂家提供的网络产品实现互联十分困难。这种自成体系的系统称为“封闭”系统。因此，人们迫切希望建立一系列的国际标准，渴望得到一个“开放”系统，这正是推动计算机网络走向国际标准化的一个重要因素。

计算机互联网络结构示意图如图 1.2 所示。

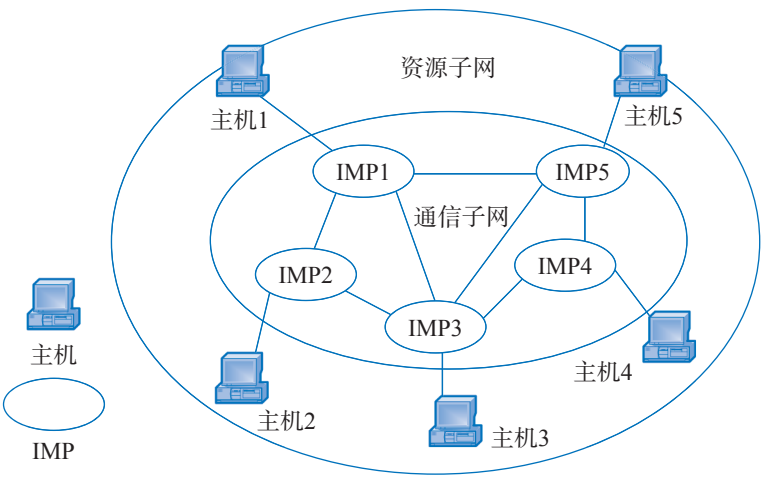

图 1.2　计算机互联网络结构示意图

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 3　2023/6/15 14:16:23

图 1.2 中的接口报文处理机（interface message processor，IMP）专门负责通信处理，类似于现在的交换机。此外，在美国的 ARPANET 中开始把整个计算机网络划分成两部分：各用户计算机（包括服务器）划分成“资源子网”，因为所有资源均存储在这些计算机上；而用于构建计算机网络通信平台的各 IMP 以及所连接的传输线路共同构成“通信子网”。用户不仅可共享通信子网中的线路和网络设备资源，还可以共享资源子网中其他用户计算机上的硬件 / 软件资源。

特别应指出的是，1964 年美国的巴兰（Baran）提出了“存储 - 转发”（store-and-forward），1966 年英国的戴维斯（D.Davies）提出了“分组”（Packet）的概念，这对计算机网络的发展具有里程碑意义。1971 年投入运行的美国 ARPANET 第一次采用了分组交换技术，计算机网络的发展也由此进入了一个崭新的纪元。第二代计算机网络的既分散（从地理位置上来讲）又统一（从服务功能上来讲）的多主机计算机网络，使得整个计算机网络的性能大大提高，不会因为中央主机故障而使整个网络系统瘫痪。另外，可以将第一代计算机网络中的单一中央主机的负载分配到第二代计算机网络的多个计算机主机上，大大提高了计算机网络系统的响应性能。

3. 标准化网络（1984—1991 年）

第三代计算机网络是标准化网络。20 世纪 70 年代中期，计算机网络开始向体系结构标准化的方向迈进，即正式步入网络标准化时代。为了适应计算机向标准化方向发展的要求，国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）于 1977 年成立了计算机与信息处理标准化委员会（TC97）下属的开放系统互联分技术委员会（SC16），开始着手制定开放系统互联的一系列国际标准。经过几年卓有成效的工作，1984 年 ISO 正式颁布了一个开放系统互联参考模型的国际标准 ISO 7498。模型分为 7 个层次，有时也被称为 ISO 7 层参考模型。从此网络产品有了统一的标准，此外这也促进了企业的竞争，尤其为计算机网络向国际标准化方向发展提供了重要依据。

20 世纪 80 年代，随着微型机的广泛使用，局域网获得了迅速发展。美国电气电子工程师学会（Institute of Electrical and Electronics Engineers，IEEE）为了适应微型机、个人计算机（personal computer，PC）以及局域网发展的需要，于 1980 年 2 月在旧金山成立了 IEEE 802 局域网络标准委员会，并制定了一系列局域网络标准。从 1980 年至今，802 委员会已相继发布了环形网、总线型网、令牌环网、光纤网、宽带网、城域网（metropolitan area network，MAN）和无线局域网（wireless local area network，WLAN）等局域网标准。这些标准绝大部分后来被 ISO 正式认定为局域网的国际标准。标准化网络结构示意图如图 1.3 所示。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 4 2023/6/15 14:16:23

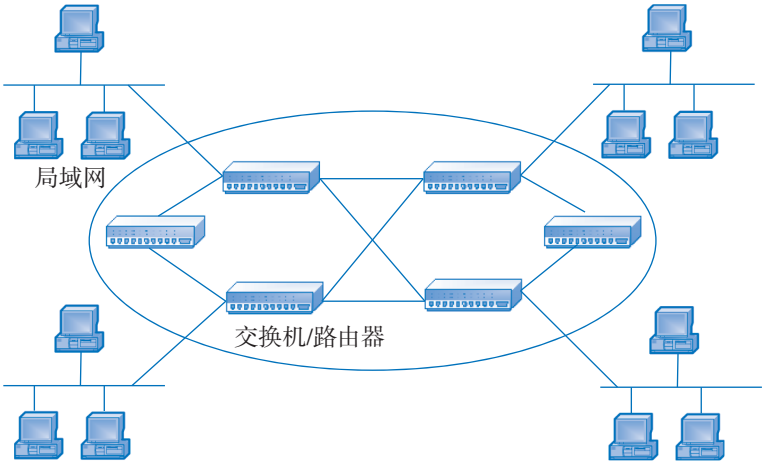

图 1.3　标准化网络结构示意图

4. 网络互联与高速网络（1992 年至今）

第四代计算机网络是网络互联与高速网络。进入 20 世纪 90 年代，特别是 1993 年美国宣布建立国家信息基础设施（national information infrastructure，NII）后，全世界许多国家都纷纷定制和建立本国的 NII，从而极大地推动了计算机网络技术的发展，使计算机网络的发展进入了一个崭新的阶段——计算机网络互联与高速网络阶段。

全球以互联网为核心的高速计算机互联网络已经形成，互联网已经成为人类最重要的和最大的知识宝库。网络互联和高速网络结构如图 1.4 所示，图中局域网（local area network，LAN）出入口与主干网出入口以及主干网之间的出入口一般均与路由器相连。

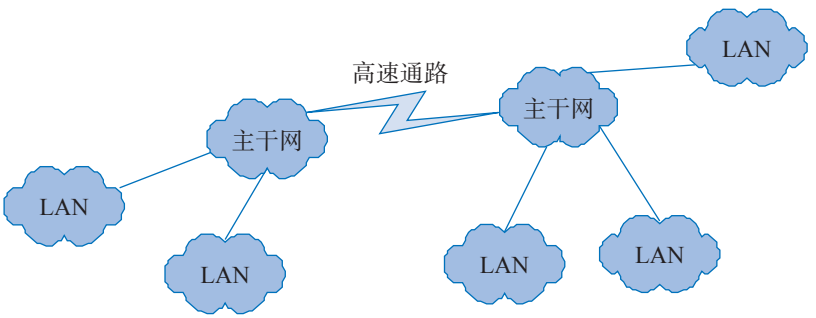

图 1.4　网络互联和高速网络结构示意图

5. 下一代计算机网络

1.5 节讨论了计算机网络的发展趋势。其中提到的触觉互联网（tactile Internet）、量子互联网（quantum Internet）、太赫兹互联网（terahertz Internet）是计算机网络较长远的发展方向。目前，下一代网络（next-generation network，NGN），即第五代计算机网络，普遍认为是互联网、移动通信网、固定电话网的融合，IP 网络和光网络的融合，是可以提供语言、数据和多媒体等多种业务的综合开放的网络架构；是业务驱动、业务与

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 5　2023/6/15 14:16:23

呼叫控制分离、呼叫与承载分离的网络；是基于统一协议和基于分组的网络，是高智能化、高实时性、高安全性和高扩展性的网络。

目前可以看到 NGN 的一些特征：如三网融合，即电信网、广播电视网、计算机网相融合；新的革命性技术广泛应用，如物联网、虚拟化、大数据、云计算等的应用。其中云计算和物联网可能是将来彻底改变目前计算机网络格局和应用的两大技术。对此，后面章节还要论及，此处不再赘述。

1.2 计算机网络的组成与功能

1.2.1 计算机网络的组成要素

计算机网络由计算机网络硬件系统和计算机网络软件系统两大要素组成。计算机网络硬件系统包括计算机设备、网络设备、通信线路。计算机网络软件系统包括网络操作系统、网络应用软件、网络通信协议。

1. 计算机网络硬件系统

（1）计算机设备。计算机设备是网络中使用的各种计算机，如 PC、笔记本电脑、平板电脑、具有上网功能的智能手机，甚至是一个很小的摄像头（可监测当地天气或交通情况，并在互联网上实时发布）；也可以是充当服务器的小型机、中型机，甚至是昂贵的大型机、巨型机等。

（2）网络设备。网络设备与通信线路（即传输介质）相连一起构成整个计算机网络的框架。最基本的网络设备就是安装在每台 PC 和服务器上的网卡，包括有线网卡和无线网卡，还有用于连接这些计算机的交换机（早期的中继器、网桥和集线器现在已基本不用或很少用了）、无线接入点（wireless access point，WAP）、用于连接不同网络的路由器、网关，用于连接安全防护的设备，如防火墙、入侵检测系统（intrusion detection system，IDS）、入侵防御系统（intrusion prevention system，IPS），用于远程广域网连接的各种调制解调器、宽带远程接入服务器（broadband remote access server，BRAS）、光端机（也称光纤收发器）等。

（3）通信线路。通信线路可以是物理有形的，如同轴电缆、双绞线、光缆（也称光纤）等，还可以是无形的，如各种无线通信中的通信线路，它其实就是各种肉眼看不见的各种电磁波。第 4 章将具体介绍计算机网络硬件系统，这里不再赘述。

2. 计算机网络软件系统

（1）网络操作系统。网络操作系统是安装在 PC、服务器、交换机、路由器、防火墙等所有设备上的软件，常用的网络操作系统有 Windows 类操作系统、UNIX 系统、

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 6 2023/6/15 14:16:23

Linux 系统以及国产银河麒麟操作系统、统一操作系统(unity operating system，UOS)等，第 5 章将具体介绍。

（2）网络应用软件。网络应用软件是为实现某项网络具体应用而安装的软件，如通信类软件微信、微博等；文件传输协议类软件，如 Serv-U、Easy FTP、简易文件传输协议（trivial file transfer protocol，TFTP）服务器软件等；电子邮件通信类软件，如 Outlook、Foxmail、Gmail 等；浏览器访问软件，如 IE、Chrome、Firefox 等浏览器，以及其他应用软件等。

（3）网络通信协议。网络通信协议是独立或内植于操作系统的一类软件，如传输控制协议 / 互联网协议（transmission control protocol/internet protocol，TCP/IP）协议簇、IEEE 802 协议簇等；网络设备中的虚拟局域网（virtual local area network，VLAN）、生成树协议（spanning tree protocol，STP）、路由信息协议（routing information protocol，RIP）、开放最短路径优先（open shortest path first，OSPF）、边界网关协议（border gateway protocol，BGP）；拨号通信的点对点协议（point to point protocol，PPP）、以太网点对点协议（point-to-point protocol over ethernet，PPPoE）协议；虚拟专用网（virtual private network，VPN）通信的互联网安全协议（Internet protocol security，IPSec）、点对点隧道协议（point to point tunneling protocol，PPTP）、第二层隧道协议（layer 2 tunneling protocol，L2TP）等。

1.2.2　计算机网络的组成

从网络拓扑结构而言，计算机网络的结构包括星形网络、树形网络、总线型网络、环形网络、网状网络以及由这几种网络构成的复合型网络，这里对其结构不多论述。但从宏观上、从工作方式上可对最复杂的覆盖全球的互联网进行分析，可将互联网抽象为两大组成部分，即网络的边缘部分和网络的核心部分，如图 1.5 所示。

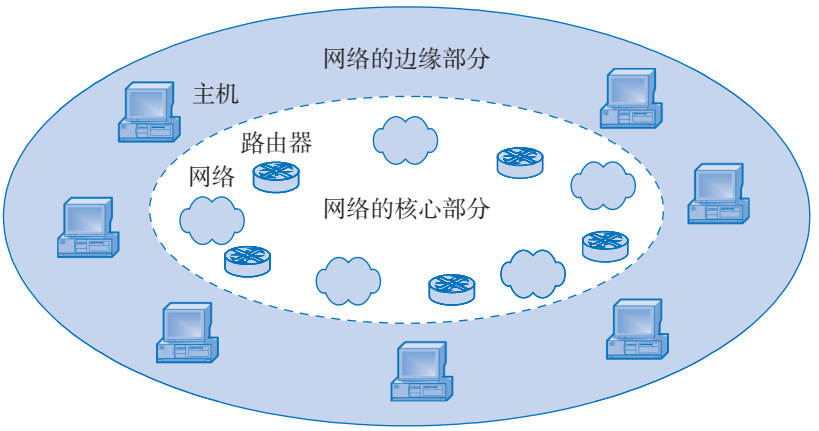

图 1.5　互联网的组成示意图

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 7　2023/6/15 14:16:24

1. 网络的边缘部分

网络的边缘部分就是连接在互联网上的所有主机（host），或称端系统（end system）。这些主机各式各样，可以是普通的 PC，包括笔记本电脑或平板电脑，以及智能手机，甚至微小的网络摄像头，也可以是小型机、中型机、大型机等。主机的拥有者可以是个人，也可以是单位，如企业、机关、学校等，也可以是互联网服务提供者（Internet service provider，ISP），即 ISP 不仅提供服务，还可以拥有若干主机。网络的边缘部分的主机使用网络的核心部分提供的服务，于是相互之间便可通信并交换或共享信息。

网络的边缘部分主机之间的通信通常又分为两大类：客户机 / 服务器模式（client/server，C/S）（见 6.2.3 节）和对等模式（peer to peer）（见 1.3.5 节）。

2. 网络的核心部分

网络的核心部分是互联网中最复杂的部分，它的功能是向网络的边缘部分中的大量主机提供连通性，使任何一台主机都能够与其他主机通信。在网络的核心部分起特殊作用的是网络设备路由器（router），它是一种专用计算机（但不叫主机）。路由器通过光缆将核心部分中的网络互联起来，实现分组交换或包交换（packet switching）。它转发收到的分组交换，这是网络的核心部分最重要的功能。分组交换将在第 2 章介绍。

1.2.3 计算机网络的功能

计算机网络的主要目标是实现资源共享，其主要功能如下。

1. 数据通信

该功能用于实现计算机与计算机之间的数据传输，这是计算机网络最基本的功能，也是实现其他功能的基础。为实现数据传输，数据通信功能包含以下 6 项具体内容。

（1）连接的建立和拆除。为使网络中源主机和目的主机进行通信，通常应先在它们之间建立连接，即建立一条由源主机到目标主机之间的逻辑链路，通信结束时拆除连接。

（2）数据传输控制。在通信双方建立起连接后，即可传输用户数据。为使用户数据能正确传输，必须为数据配上报头，其中含有用于控制数据传输的信息，如目的主机地址、源主机地址、报文序号等。此外，传输控制还应对传输中出现的异常情况进行及时处理。

（3）差错检测。数据在网络中传输时，难免会出现差错。为减少错误，网络中必须

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 8 2023/6/15 14:16:24

具有差错控制设施，既可检错，又可纠错。

（4）流量控制。数据在网络中传输时，应控制源主机发送数据流的速率，使之与目的主机接收数据流的速度相匹配，以保证目的主机能及时接收和处理所接收的数据流。否则，可能使接收方缓冲区中的数据溢出而丢失，严重时可能导致网络拥挤和死锁。

（5）路由选择。网络中，由源站到目的站通常有多条路径。路由选择指按一定策略，如传输路径最短、传输时延最小或传输费用最低等为被传输的报文选择一条最佳传输路径。

（6）多路复用。为提高传输线路利用率，通常都采用多路复用技术，即将一条物理链路虚拟为多条虚链路，使一条物理链路能为多个“用户对”同时提供信息传输功能。

上述主要内容将在第 2 章中详细讨论。

2. 资源共享

计算机网络中的资源可分为数据、软件、硬件 3 类。相应地，资源共享也可分为以下 3 类。

（1）数据共享。当今数据资源的重要性越来越大。前面提到的网络边缘主机之间通信的 C/S 模式中，客户机通常是桌面 PC、移动 PC 和智能手机等，而服务器通常是更为强大的机器，用于存储和发布 Web 页面、流视频、中继电子邮件等。目前，大部分提供搜索结果、电子邮件、Web 页面和视频的服务器都属于大型数据中心。例如，谷歌公司（Google）拥有 50 ～ 100 个数据中心，其中 15 个大型数据中心都有 10 万台以上的服务器，其存储的数据等资源可被全世界网络用户所使用。

（2）软件共享。通过计算机网络，可实现各种操作系统及其应用软件、工具软件、数据库管理软件和各种互联网信息服务的共享。共享软件允许多个用户同时调用服务器中的各种软件资源，并能保持数据的完整性和一致性。用户可以通过 C/S 或浏览器 / 服务器（browser/server，B/S）模式，使用各种类型的网络应用软件，共享远程服务器上的软件资源。

（3）硬件共享。为发挥巨型机和特殊外围设备的作用，并满足用户的要求，计算机网络也应具有硬件资源共享的功能。例如，某计算机系统 A 由于无某种特殊外围设备而无法处理某些复杂问题时，它可将处理问题的有关数据连同有关软件，一起传送至拥有这种特殊外围设备的系统 B，由系统 B 利用该硬件对数据进行处理，处理完成后再把有关软件及结果返回系统 A。此外，用户可共享网络打印机、共享磁盘、共享 CPU 等。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 9　2023/6/15 14:16:24

3. 负荷均衡和分布处理

（1）负荷均衡。负荷均衡是指网络中的工作负荷均匀地分配给网络中的各个计算机系统。当网络上某台主机的负载过重时，通过网络和一些应用程序的控制和管理，可以将任务交给网上其他的计算机处理，由多台计算机共同完成，起到负荷均衡的作用。

（2）分布处理。分布处理对一个作业的处理可分为 3 个步骤：提供作业文件，对作业进行加工处理，把处理结果输出。在单机环境下，上述 3 步都在本地计算机系统中进行。在网络环境下，根据分布处理的需求，可将作业分配给其他计算机系统进行处理，以提高系统的处理能力，高效地完成一些大型应用系统的程序计算以及大型数据库的访问等。

4. 提高系统的安全可靠性

计算机通过网络中的冗余部件可大大提高系统的可靠性，例如在工作过程中，一台机器出了故障，可以使用网络中的另一台机器；网络中一条通信线路出了故障，可以取道另一条线路，从而提高了网络整体系统的可靠性。

1.3 计算机网络的类别

为了对计算机网络有更进一步的认识，可以从不同的角度，如网络拓扑结构、网络控制方式、网络作用范围、通信传输方式、网络配置、使用范围、物理通信媒体、通信速率、数据交换方式、传输信号类型和网络操作系统等对计算机网络进行分类。

1.3.1 按网络拓扑结构分类

拓扑结构一般是指点和线的几何排列或组成的几何图形。计算机网络的拓扑结构是指一个网络的通信链路和节点的几何排列或物理布局图形。链路是网络中相邻两个节点之间的物理通路，节点是指计算机和有关的网络设备，甚至是一个网络，这是抽象原理的应用。按拓扑结构，计算机网络可分为以下 5 类。

1. 星形网络

星形拓扑是以中央节点为中心，并与各节点连接组成的，各节点与中央节点通过点到点的方式连接。其拓扑结构如图 1.6 所示，中央节点执行集中式控制策略，因此中央节点十分复杂，负担要比其他各节点重得多。现有的数据处理和语音通信的信息网大多采用星形网络。传统的专用小交换机（private branch exchange，PBX），即电话交换机就是星形网络结构的典型实例。

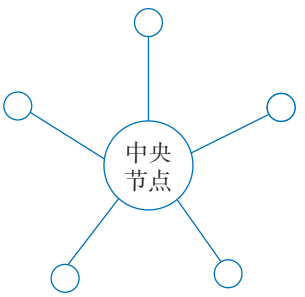

图 1.6 星形网络拓扑结构

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 10 2023/6/15 14:16:24

在星形网络中任何两个节点要进行通信都必须经过中央节点。因此，中央节点的主要功能如下：当要求通信的站点发出请求后，中央节点的控制器要检查中央节点是否有空闲的通路，被叫设备是否空闲，从而决定是否能建立双方的物理连接；在两台设备通信过程中要维持这一通路；当通信完成或者不成功要求拆线时，中央节点应能拆除上述通道。

由于中央节点要与多机连接，线路较多，为便于集中连线，可采用集线器（hub）或交换机（switch）作为中央节点。hub 工作在开放系统互连参考模型（open system interconnect，OSI/RM）的第一层，是一种物理层的连接设备，主要起信号的再生转发功能，通常有 8 个以上的连接端口。每个端口之间电路相互独立，某一端口的故障不会影响其他端口状态，可以同时连接粗缆、细缆和双绞线。交换机工作在 OSI/RM 的第二层，功能比集线器更强。星形网络是目前广泛使用的局域网之一。

星形网络的特点是：网络结构简单，便于管理；控制简单，建网容易；网络延迟时间较短，误码率较低；网络线路共享能力差；线路利用率不高；中央节点负荷较重。

2. 树形网络

在实际建造一个大型网络时，往往是采用多级星形网络，即将多级星形网络按层次方式排列而形成树形网络，其拓扑结构如图 1.7 所示。由图 1.7 可见，树形拓扑以其独特的特点而与众不同：具有层次结构。中国传统的电话网络即采用树形结构，其由多级星形网构成。互联网（Internet）从整体上看也采用树形结构。位于树形结构不同层次的节点具有不同的地位，而且节点既可以是一台机器，也可以是一个网络。在互联网中，树根对应于最高层 APRANET 主干或 NSFNET 主干，中间节点对应于自治系统，一组自治管理的网络；叶节点对应于最底层的局域网。不同层次的网络管理、信息交换等问题上都是不平等的。

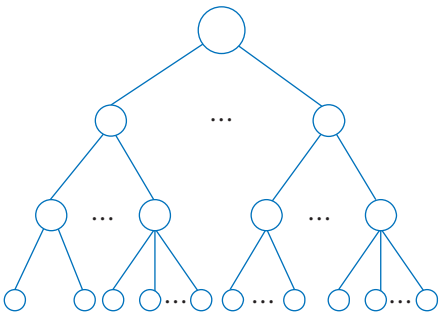

图 1.7　树形网络拓扑结构

图 1.8 所示为某大学校园网子网（商学院网络）的拓扑结构示意图，其为典型的树形网络。图中校园网内含一级交换机、路由器和服务器等设备。

树形网络的主要特点是：结构比较简单，易于扩展，成本低。在网络中，任意两个节点之间没有回路，每个链路都支持双向传输。网络中节点扩充方便灵活，寻找链路路径比较方便。但在这种网络系统中，除叶节点及其相连的链路外，任何一个节点或链路产生的故障都会影响整个网络。树形拓扑结构是目前企、事业单位局域网中应用最广泛的拓扑结构。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 11　2023/6/15 14:16:24

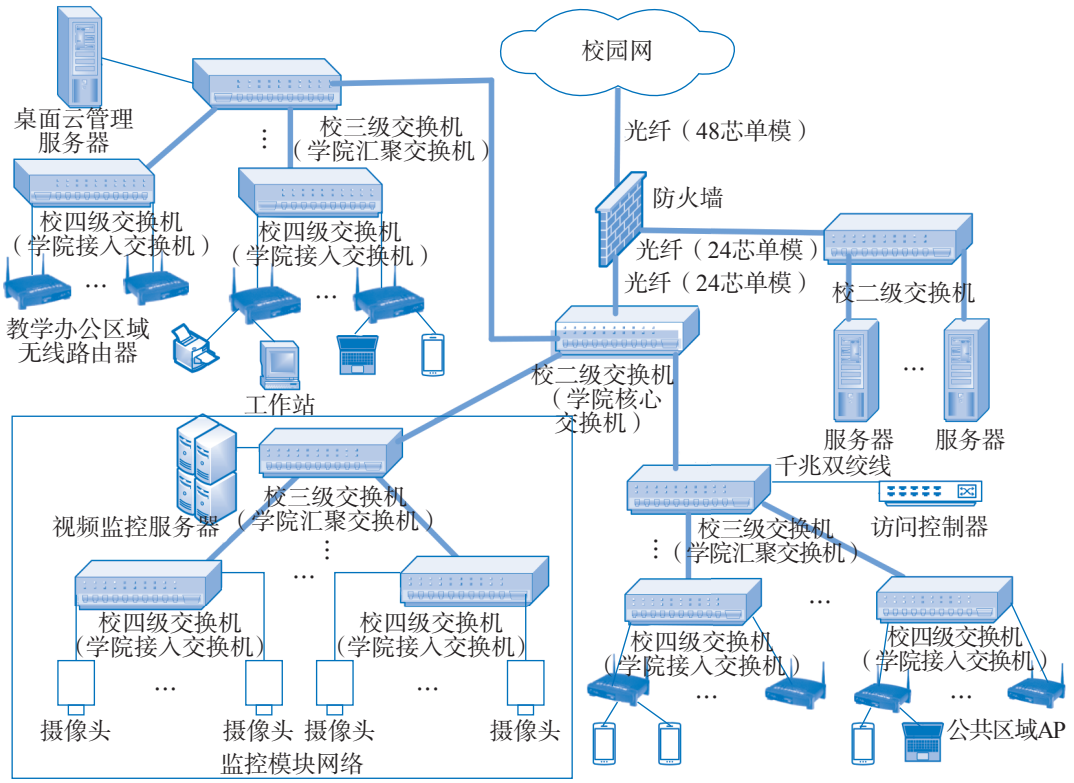

图 1.8　某大学校园网子网（商学院网络）的拓扑结构示意图

3. 总线型网络

由一条高速公用总线连接若干节点所形成的网络即为总线型网络，其拓扑结构如图 1.9 所示。其中一个节点是网络服务器，它提供网络通信及资源共享服务，其他节点是网络工作站，即用户计算机。总线型网络采用广播通信方式，即由一个节点发出的信息可被网络上的任一个节点所接收。由于多个节点连接到一条公用总线上，容易产生访问冲突。因此，必须采取某种介质访问控制方法来分配信道，以保证在一段时间内，只允许一个节点传送信息。

总线型网络的主要特点是：结构简单灵活，便于扩充，是一种很容易建造的网络；由于多个节点共用一条传输信道，因此信道利用率高，但容易产生访问冲突；数据速率高；但总线型网络常因一个节点出现故障（如接头接触不良等）而导致整个网络瘫痪，因此可靠性不高。

4. 环形网络

环形网络中各节点通过环路接口连在一条首尾相连的闭合环形通信线路中，其拓扑结构如图 1.10 所示，环上任何节点均可请求发送信息。由于环线公用，一个节点发出的信息必须穿越环中所有的环路接口，信息流的目的地址与环上某节点地址相符时，信

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 12　　2023/6/15 14:16:24

息被该节点的环路接口所接收，并继续流向下一环路接口，一直流回到发送该信息的环路接口为止。

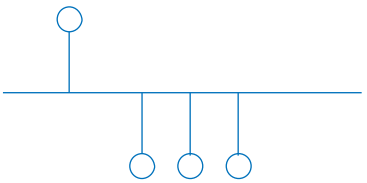

图 1.9　总线型网络拓扑结构

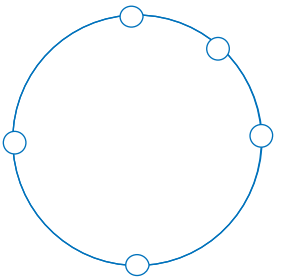

图 1.10　环形网络拓扑结构

环形网络的主要特点是：信息在网络中沿固定方向流动，两个节点间有唯一的通路，因而大大简化了路径选择的控制；某个节点发生故障时，可以自动旁路，可靠性较高；信息是串行穿过多个节点环路接口，当节点过多时，网络响应时间会变长，但当网络确定时，其延时固定，实时性强。

环形网络也是微机局域网使用的拓扑结构之一。

5. 网状网络

网状网络拓扑结构如 1.1 节图 1.2 所示，其中的通信子网即为网状拓扑结构。

网状网络是广域网中常采用的一种网络形式，是典型的点到点结构。虽然点到点信道可能会浪费一些信道带宽，但是用带宽换取了信道访问控制的简化。在长距离信道上一旦发生信道访问冲突，控制起来十分困难。而在这种点到点的拓扑结构中，没有信道竞争，几乎不存在信道访问控制问题。除了网状网络采用点到点的结构外，上面介绍的星形网络、某些环网，尤其是广域环网，也采用点到点的结构。在树形网络中，如果每一个节点都是一台机器，则上下层节点之间的信道也采用点到点的结构。总线型网络、局域环网是广播型结构，即网络中所有主机共享一条信道，某主机发出的数据，所有其他主机都可能收到。在广播信道中，由于信道共享而引起信道访问冲突，因此信道访问控制是首先要解决的问题。

网状网络的主要特点是：①网络可靠性高，一般通信子网任意两个节点之间，存在着两条或两条以上的通信路径。这样，当一条通信路径发生故障时，还可以通过另一条通信路径把信息送到目的节点。②可扩充性好，该网络无论是增加新功能，还是要将另一台新的计算机入网，以形成更大或更新的网络时，都比较方便；网络可建成各种形状，采用多种通信信道，多种数据速率。

以上介绍了 5 种基本的网络拓扑结构，以此为基础，还可以构造出一些复合型的网络拓扑结构。例如，中国教育和科研计算机网（CERNET）可认为是网状网络、树形网

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 13　2023/6/15 14:16:24

络等网络的复合。其主干网为网状结构，连接的每一所大学大多是树形结构。早期的中国教育科研计算机网主干网拓扑结构示意图如图 1.11 所示。

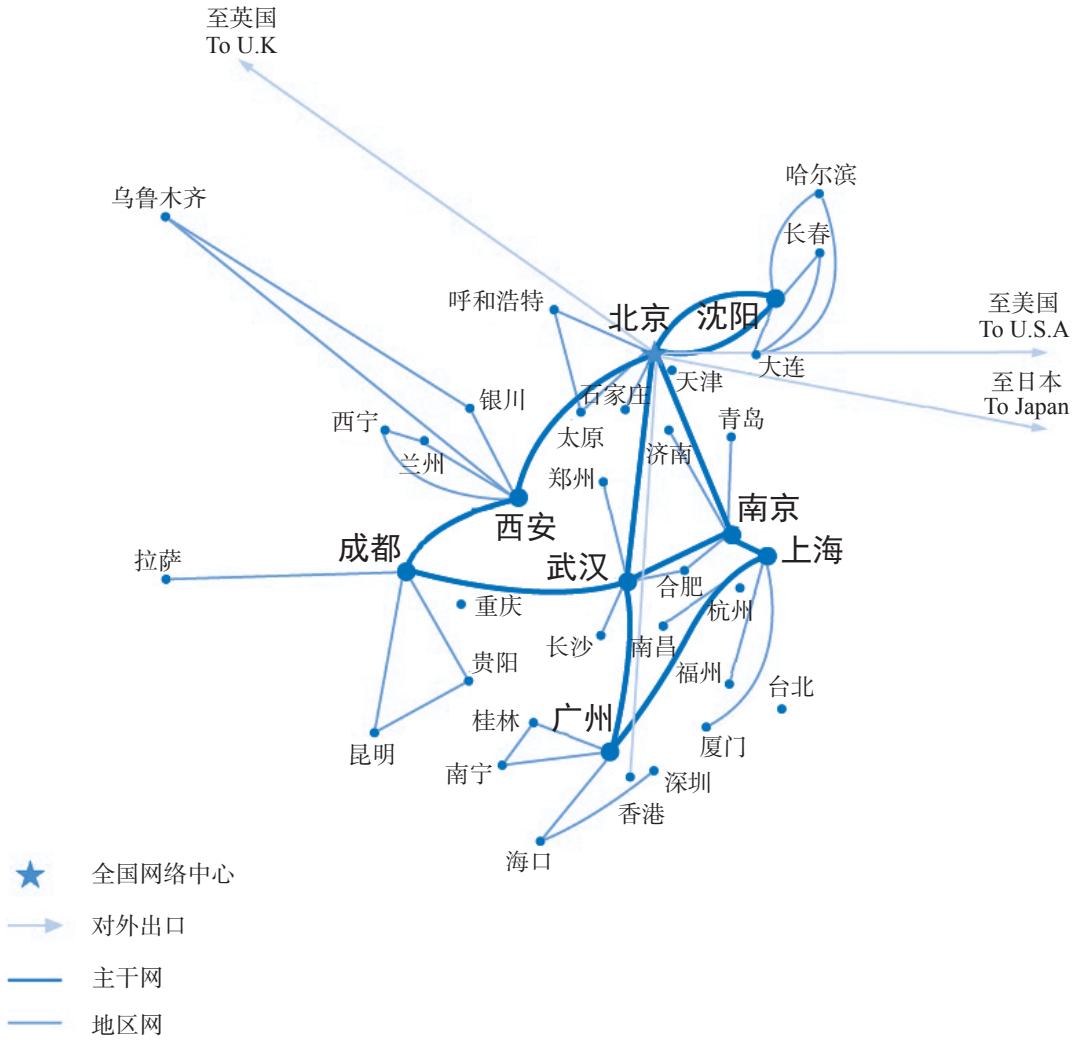

图 1.11　早期的中国教育科研计算机网主干网拓扑结构示意图

1.3.2　按网络控制方式分类

按网络所采用的控制方式，计算机网络可分为集中式计算机网络和分布式计算机网络。

1. 集中式计算机网络

这种网络的处理和控制功能都高度集中在一个或少数几个节点上，所有的信息流都必须经过这些节点之一。因此，这些节点是网络的处理和控制中心，其余的大多数节点则只有较少的处理和控制功能。星形网络和树形网络都是典型的集中式计算机网络。集中式计算机网络的主要优点是实现简单，其网络操作系统很容易从传统的分时操作系统

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 14　　2023/6/15 14:16:24

经适当扩充改造而成，故早期的计算机网络都属于集中式计算机网络，目前仍广泛采用。其缺点是实时性差，可靠性低，缺乏较好的可扩充性和灵活性。应当指出，20 世纪 80 年代所推出的大量商品化的局域网中，用于提供网络服务和网络控制功能的软件主要驻留在网络服务器上，因而也把它们归于集中式控制网络，但它们具有分布处理功能。

2. 分布式计算机网络

在这种网络中，不存在一个处理和控制中心，网络中任一节点都至少和另外两个节点相连接，信息从一个节点到达另一个节点时，可能有多条路径。同时，网络中各个节点均以平等地位相互协调工作和交换信息，并可共同完成一个大型任务。分组交换网、网状网络属于分布式计算机网络。这种网络具有信息处理的分布性、可靠性、可扩充性及灵活性等一系列优点。因此，它是网络发展的方向。目前，大多数广域网中的主干网采用分布式控制方式，并采用较高的通信速率，以提高网络性能；对于大量非主干网，为了降低建网成本，则可采取集中控制方式。

1.3.3　按网络作用范围分类

按网络作用范围，计算机网络可分为个人区域网、局域网、城域网、广域网和互联网 5 类。

1. 个人区域网

个人区域网（personal area network，PAN）是指将个人使用的电子设备（如鼠标、键盘、打印机、平板电脑、便携电脑以及智能手机等）通过有线和（或）无线技术连接起来的小范围网络。个人区域网也称个域网。当全部采用无线技术将属于个人使用的电子设备连接起来时，则称为无线个人区域网（wireless personal area network，WPAN），不需要使用接入点（access point，AP）。这种无线网络就是蓝牙（bluetooth），目前整个网络的直径为 10m 左右。

WPAN 与 WLAN 不一样。WPAN 是以个人为中心的一个小网络，实际上它是一种低功率、小范围、低速率和低价格的电缆替代技术，但使用方便。而 WLAN 则是同时为多用户服务的一个大功率、中等范围和高速率的局域网。

2. 局域网

局域网是最常见的计算机网络，其分布范围小，一般直径小于 10km，一方面容易管理与配置；另一方面容易构成简洁规整的拓扑结构。局域网还具有速度快，延迟小等特点，使之得到了广泛应用。一般企业内部网、校园网等都是典型的局域网。局域网中的类型和规范较多，目前主流的局域网是以太网（ethernet）和 WLAN。以太网中

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 15　　2023/6/15 14:16:24

又有许多规范，如 10Mbit/s 标准以太网、100Mbit/s 快速以太网、1Gbit/s 千兆以太网、10Gbit/s 万兆以太网和 100Gbit/s 10 万兆以太网。此外，局域网以前还有 IBM 令牌网（传输速率仅为 16Mbit/s）、光纤分布式数据接口（fiber distributed data interface，FDDI）网（最高传输速率可达 100Mbit/s）、异步传输方式（asynchronous transfer mode，ATM）网（最高传输速率可达 1Gbit/s）。

3. 城域网

城域网规模局限在一座城市的范围之内，辐射的地理范围从几十千米至数百千米。MAN 基本上是局域网的延伸，像是一个大型的局域网，通常使用与局域网相似的技术，但是在传输介质和布线结构方面牵涉范围较广。例如，涉及大型企业、机关、公司和社会服务部门的计算机联网需求，以及实现大量用户的多媒体信息，如声音方面包含语音和音乐，图形方面包含动画和视频图像，文字方面包含电子邮件及超文本网页等。MAN 列为单独一类，主要是因为有一个可实施的标准，即一般采用 IEEE 802.6。它通常采用异步传输技术作为骨干网传输技术，不过目前光纤技术也在 MAN 中得到了广泛使用。MAN 通常为一个或几个组织所有，更多的是为公众提供公共服务，如城市银行系统、城市消防系统、城市邮政系统、城市有线电视广播网络等。

多年来，局域网和广域网一直是网络的热点。局域网是组成其他两种类型网络的基础，MAN 一般都连入广域网。每个主机通过路由器连接到局域网上。

4. 广域网

广域网（wide area network，WAN）又称远程网，其分布范围广，网络本身不具备规则的拓扑结构。由于速度慢，延迟大，入网站点无法参与网络管理，所以，它要包含复杂的互联设备，如交换机、路由器等，由它们负责重要的管理工作，而入网站点只负责收发数据。

由上可见，广域网与局域网除在分布范围上的区别外，局域网一般不具有像路由器那样的专用设备，不存在路由选择问题；局域网具有规则的拓扑结构，广域网则没有。广域网采用点到点的传输方式，并且几乎都使用存储转发技术。

中国公用分组交换数据通信网（ChinaPAC），中国公用数字数据网（ChinaDDN），国家公用信息通信网［又称金桥网（ChinaGBN）］，中国教育和科研计算机网（CERNET）以及覆盖全球的互联网均是广域网。

5. 互联网

互联网是全球最大的网络，是广域网中的一种，也是最大的广域网，由众多网络相互连接而成。其前身是 ARPANet，采用 TCP/IP 协议簇进行通信。按工作方式，它由网络的边缘部分和网络的核心部分两部分组成。网络的边缘部分主要是主机、存储数据和

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 16 2023/6/15 14:16:24

软件，并进行信息处理。网络的核心部分主要是通信线路（光缆）和路由器，路由器按存储转发方式进行分组交换。

应注意的是，互联网的规模越来越大，上网的人数越来越多，主机的数量爆发式地增长。全世界超过 50% 的人通过手机和计算机（俗称电脑）成为互联网的网民。以我国为例，截至 2021 年 12 月，已有 10.32 亿人是互联网的网民，互联网普及率达 73.0%。早些年，接入互联网的主机主要是传统的桌面 PC 和服务器。而近年来，逐渐扩展到了各式各样的计算机和其他设备，如便携机、平板电脑、智能手机、电视、游戏机、摄像头、温度调节装置、家用电器、手表、眼镜、汽车运输控制系统等。目前，全世界已超过 250 亿台设备与互联网连接。特别是随着物联网的发展，接入互联网的设备将会大规模地增加。未来人们将能“随时随地”连接互联网等网络，享受多种多样的服务。

第 6 章将对互联网进行详细介绍。

1.3.4　按通信传输方式分类

如前所述，计算机网络常见的拓扑结构有总线型、星形、树形、环形和网状 5 类。不同拓扑结构的信道访问技术、性能、设备开销等各不相同，分别适用于不同的场合。尽管不同的信道拓扑结构差别明显，但总结起来可以分为两类：点到点（point-to-point）信道和广播（broadcasting）信道，信息只能沿着其中一种信道传播。因此，按通信传播方式可将计算机网络分为两类。

1. 点到点传播型网

网络中的每两台主机、两台节点交换机之间或主机与节点交换机之间都存在一条物理信道，机器（包括主机和节点交换机）沿某信道发送的数据只有信道另一端的唯一一台机器能收到。在这种点到点的拓扑结构中，没有信道竞争，几乎不存在访问控制问题。绝大多数广域网都采用点到点的拓扑结构，网状网络是典型的点到点拓扑结构。此外，星形结构、树形结构，某些环形网，尤其是广域环形网，也是点到点的拓扑结构。

广域网之所以都采用点到点信道，是用带宽来换取信道访问控制的简化，以防止发生访问冲突。在长距离信道上一旦发生信道访问冲突，控制起来将十分困难。

2. 广播型网

在广播型结构中，所有主机共享一条信道，某主机发出的数据，其他主机都能收到。在广播信道中，由于信道共享而引起信道访问冲突，因此信道访问控制是要解决的关键问题。广播型结构主要用于局域网，不同的局域网技术可以说是不同的信道访问控制技术。广播型网的典型代表是总线型网，局域环形网、微波、卫星通信网也是广播型

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 17　2023/6/15 14:16:24

网。局域网线路短，传输延迟小，信道访问控制相对容易，因此以额外的控制开销换取信道的利用率，从而降低整个网络成本。

1.3.5 按网络配置分类

这主要是对 C/S 模式的网络进行分类。按网络配置的不同，可将计算机网络分为对等网、单服务器网和混合网。几乎所有这种模式的网络都是这三种网络中的一种。

网络中的服务器是指向其他计算机提供服务的计算机，如文件服务器、Web 服务器、E-mail 服务器等。工作站是请求和接收服务器提供服务的计算机。

1. 对等网

如果在网络系统中，每台机器既是服务器，又是工作站，则这个网络系统就是对等网，也称同类网（peer to peer network，P2P）。在该网中，每台计算机都可以共享其他任何计算机的资源。

P2P 技术是近年被业界广泛重视并迅速发展的一项技术，它是现代网络技术和分布式计算技术相结合的产物，是一种网络结构的思想，与目前网络中占据主导地位的 C/S 模式的一个本质区别，是网络结构中不再有中心节点，所有用户都是平等的伙伴。

目前，P2P 技术的应用非常广泛，如应用于文件共享类软件：Napster、BitTorrent；通信类软件：Skype、QQ、MSN Message、Google Talk；多媒体传输类软件：PPLive、AnySee；共享类软件：OceanStore、Tapestry、Pastry；分布式计算类软件：GPU、SETI@home；协同类软件：Groove；搜索引擎类软件：Pandango 等。使用纯 P2P技术的网络系统有比特币网络、Gnutella 等。关于 P2P 技术及其应用将在 6.6.4 节中阐述。

2. 单服务器网

单服务器网是指只有一台机器作为整个网络的服务器，其他机器全部都是工作站。在这种网络中，每个工作站在网中的地位是一样的，并都可以通过服务器享用全网的资源。

3. 混合网

如果网络中的服务器不止一个，同时每台工作站不是都可以当作服务器来使用，那么这个网就是混合网。混合网与单服务器网的差别在于网中不仅仅是只有一个服务器，而且每个工作站不能既是服务器又是工作站。

由于混合网中服务器不止一个，因此它避免了在单服务器网上工作的各工作站完全依赖于一个服务器。当服务器发生故障时，全网都处于瘫痪状态。所以，对于一些大型的、信息处理工作繁忙的和重要的网络系统，均采用混合网系统。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 18 2023/6/15 14:16:24

1.3.6　按使用范围分类

按网络使用范围，计算机网络可分为公用网和专用网。

1. 公用网

公用网是由我国政府出资建设，由工业和信息化部统一进行管理和控制的网络。它由若干路由器和交换机互联而成，主要用于连接各专用网，但也可连接端点用户设备。公用网一般以单模光纤作为传输线路。公用网络中的传输和交换装置可以租给按电信部门规定缴纳费用的任何机构部门使用。ChinaPAC、ChinaDDN 等均是公用网络。企业或校园等局域网可以通过公用网连接到互联网。公用网又分为公用电话交换网（PSTN）、公用数据网（PDN）、数字数据网（DDN）和综合业务数字网（ISDN）等类型。

2. 专用网

专用网是由某个部门或企、事业单位自行组建，不允许其他部门或单位使用。如中国金融信息网、邮政绿网等。专用网也可以租用电信部门的传输线路。专用网络根据网络环境又可细分为部门网络、企业网络和校园网等。

（1）部门网络（department network）。部门网络又称为工作组级网络，它是局限于一个部门的局域网，一般供一个分公司、处（科）或课题组使用。这种网络通常由若干工作站点、服务器和共享打印机组成。部门网络规模较小且技术成熟，管理简单。在大型企业和校园中，通常包含多个部门网络，并通过交换机等互联。部门网络和部门网络之间遵循 80/20 原则：部门网络中的信息业务流局限于部门内部流动的约占 80%，而部门之间的业务流约占 20%。

（2）企业网络（enterprise-wide network）。企业网络通常高层为用于互联企业内部各个部门网络的主干网，而低层则是各个部门或分支机构的部门网络。中型企业通常位于一幢大楼或一个建筑群中，而大型企业往往由分布在不同城市的分公司或分厂组成。所以企业网络不仅规模大，而且还可能具有多种类型的网络、品种繁多的网络硬件设备和网络软件。企业主干网中关键部件多采用容错技术。企业网络还必须配备经验丰富的专职网络管理人员。

（3）校园网（campus network）。校园网通常利用主干网络将院系、行政、后勤、图书馆和师生宿舍等多个局域网连接起来。大部分校园网都有一个网络中心负责管理与运行维护。我国高等院校都已建成了各自的校园网。

1.3.7　其他分类方式

除了上述分类方法外，计算机网络还可以采用下述分类方式。

（1）按网络传输信息采用的物理信道来分类，可分为有线网络和无线网络，而且两

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 19　2023/6/15 14:16:25

者还可细分。

（2）按通信速率来分类，可分为低速网络（数据速率在 1.5Mbit/s 以下的网络系统）、中速网络（数据速率在 1.5 ～ 50Mbit/s 的网络系统）、高速网络（数据速率在 50Mbit/s 以上的网络系统）。

（3）按数据交换方式分类，可分为线路交换网络、报文交换网络、分组交换网络、ATM 等。

（4）按传输的信号分类，可分为数字网和模拟网。

（5）按采用的网络操作系统分类，可分为 Windows NT 网、Windows Server 网、UNIX 网和 Linux 网等。

1.4 计算机网络的体系结构

在计算机网络系统中，由于计算机类型、通信线路类型、连接方式、同步方式和通信方式等的不同，给网络各节点间的通信带来诸多问题。由于不同厂家不同型号的计算机通信方式各有差异，所以通信软件需根据不同情况进行开发。特别是异型网络的互联，它不仅涉及基本的数据传输，同时还涉及网络的应用和有关服务，应做到无论设备内部结构如何，相互都能发送可以理解的信息，因此这种真正以协同方式进行通信的任务是十分复杂的。要解决这个问题，势必涉及通信体系结构设计和各个厂家共同遵守约定标准的问题，这也即计算机网络的体系结构和协议问题。

为了对体系结构与协议有一个初步了解，先分析一下实际生活中的邮政系统，其如图 1.12 所示。人们平时写信时，都有个约定，即信件的格式和内容。一般必须采用双方都懂的语言文字和文体，开头是对方称谓，最后是落款等。这样，对方在收到信后才能读懂信里的内容，知道是谁写的，什么时候写的等。信写好之后，必须将信件用信封封装并交由邮局寄发。寄信人和邮局之间也要有约定，这就是规定信封写法并贴邮票。邮局收到信后，首先进行信件的分拣和分类，然后交付有关运输部门进行运输，如航空信交付民航、平信交铁路或公路运输部门等。这时，邮局和运输部门也要有约定，如到站地点、时间、包裹形式等。信件送到目的地后进行相反的过程，最终将信件送到收信人手中。由上可知，邮政系统可分为三层，而且上下层之间，同一层之间均有约定，亦即协议。这里的分层与协议，也即体系结构的基本含义。计算机网络中的通信也与邮政系统类似，首先将其分解为不同的层次，不同的层次完成相应的职能，然后层与层之间通过事先规定好的约定进行交互，从而完成整个通信任务。上述邮政系统的例子中涉及两个重要的概念，即体系结构与协议，下面进行介绍。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 20 2023/6/15 14:16:25

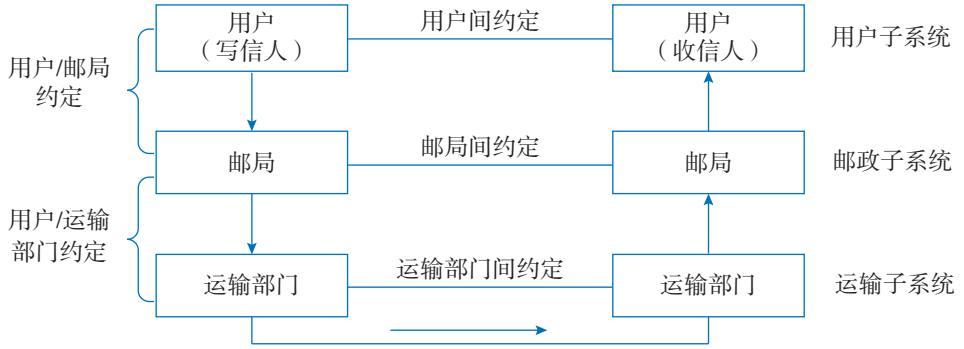

图 1.12　邮政系统分层模型

1.4.1　网络系统的体系结构

1. 层次结构

人类的思维能力不是无限的，如果同时面临的因素太多，就不可能做出精确的思维。处理复杂问题的一个有效方法，就是用抽象和层次的方式去构造和分析。同样，对于计算机网络这类复杂的大系统，亦可如此。如图 1.13 所示，可将一个计算机网络抽象为若干层。其中，第 *n* 层是由分布在不同系统中的处于第 *n* 层的子系统构成。

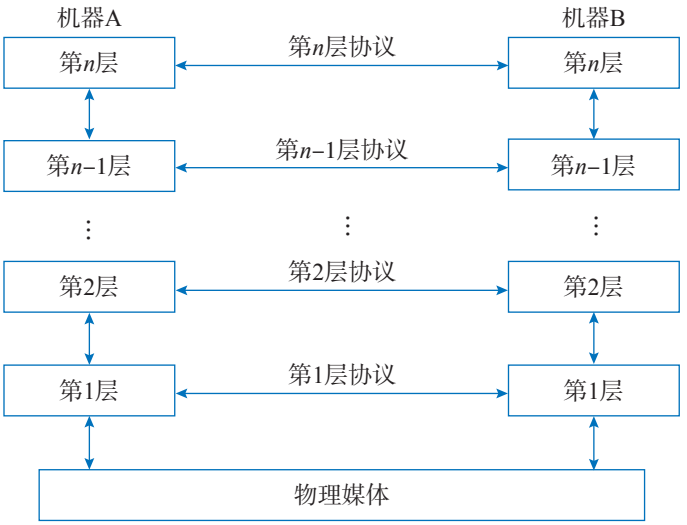

图 1.13　网络层次结构

在采用层次结构的系统中，其高层仅是利用其较低层次的接口所提供的服务，而不需了解其较低层次实现该服务时所采用的算法和协议；其较低层次也仅仅是使用从高层传送来的参数。这就是层次间的无关性。这种无关性使得一个层次中的模块可用一个新模块取代，只要新模块与老模块具有相同的服务和接口，即使它们执行完全不同的算法和协议也无妨。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 21　2023/6/15 14:16:25

通过抽象和层次的方法可以使每一层实现一种相对独立的功能，因而可将一个难以处理的复杂问题分解为若干容易处理的较小问题。由于各层之间相对独立，因此每层的灵活性较高，易于实现和维护，而且每层都可以采用最合适的技术来实现。

2. 服务、接口与协议

下面介绍网络层次结构中的 3 个重要概念：服务、接口和协议，旨在更好地理解这三者之间的关系，从而深入地理解层与层之间的关系。

服务是计算机网络层次结构中一个非常重要的概念，指网络中的各层向上一层提供的一组操作，也就是从上一层的角度来看，下一层所能完成的工作。服务定义了能够为上层完成的操作，但丝毫未涉及这些操作是如何完成的。

接口是网络相邻两层之间的边界，它定义较低层向较高层提供的原始操作和服务。一方面，相邻层通过它们之间的接口交换信息；另一方面，高层通过接口来使用下一层所提供的服务。

计算机之间的通信是在不同系统上的实体之间进行的。这里的实体泛指可以发送或接收信息的任何对象，例如终端、应用程序、通信进程等；这里的系统是指计算机、终端等具有一个以上实体的物理设备。对等层（即同级层）中进行通信的一对实体称为对等实体。在计算机网络中，为了能在两个实体间正确地传递信息，必须在有关信息传输顺序、信息格式和信息内容等方面有一组约定或规则，这组约定或规则即网络协议。网络协议由 3 个要素组成。

（1）语义。语义是对构成协议的协议元素含义的解释，即“讲什么”。不同类型的协议元素规定了通信双方所要表达的不同内容。例如，在基本型数据链路控制协议中，规定协议元素 SOH 的语义表示传输的报文报头开始，协议元素 ETX 的语义表示传输的报文正文结束。

（2）语法。语法是指用于规定将若干协议元素组合在一起来表达一个更完整的内容时所应遵循的格式，或者对所表达内容的数据结构形成的一种规定，即“怎么讲”。例如，在传输一份数据报文时，可用适当的协议元素和数据，按照图 1.14 的格式来表达，其中 SOH、ETX 如上所述，HEAD 表示报头，STX 表示正文开始，TEXT 是正文，BCC 是校验码。

SOH	HEAD	STX	TEXT	ETX	BCC

图 1.14　语法格式示意图

（3）规则。规则规定事件的执行顺序，即“顺序控制”。例如，在双方通信时，首先由源站发送一份数据报文，如果目的站收到的是正确的报文，就应遵循协议规则，利用协议元素肯定应答（acknowledgement，ACK）来回答对方，以使源站知道其所

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 22　　2023/6/15 14:16:25

发出的报文已被正确接收；如果目的站收到的是错误的报文，便应按规则用否定认可（negative acknowledgement，NAK）元素做出回答，以要求源站重发刚刚发过的报文。由上可见，网络协议实质上是实体间通信时所使用的一种语言。在层次结构中，每一层都可能有若干个协议，当同层的两个实体间相互通信时，必须满足这些协议。

服务、接口和协议三者之间的相互关系可以用面向对象的程序语言中的类来说明。接口就相当于一个类，服务是这个类中所提供方法的种类，而协议则是方法的具体实现。综上，高层通过接口来调用低层所提供的服务，服务通过低层的协议来具体实现。

3. 网络体系结构

网络体系结构是指对计算机网络及其部件所完成功能的一组抽象定义，是描述计算机网络通信方法的抽象模型结构，一般是指网络的层次及其协议的集合。具体而言是关于计算机网络应设置哪几层，每层应提供哪些功能的精确定义。至于这些功能应如何实现，则不属于网络体系结构部分。也就是说，网络体系结构只是从层次结构及功能上来描述计算机网络的结构，并不涉及每一层硬件和软件的组成，更不涉及这些硬件和软件本身的实现问题。由此可见，网络体系结构是抽象的，是书面上的对精确定义的描述。而对于为完成规定功能所用硬件和软件的具体实现问题，则并不属于网络体系结构的范畴。对于同样的网络体系结构，可采用不同的方法设计出完全不同的硬件和软件来为相应层次提供完全相同的功能和接口。

1.4.2　网络系统结构参考模型 ISO/OSI

1. 有关标准化组织

1974 年，美国 IBM 公司公布了世界上第一个 SNA，凡是遵循 SNA 的网络设备都可以很方便地进行互连。此后，许多公司也纷纷建立起自己的网络体系结构，这些体系结构大同小异，都采用了层次技术，只是各有特点，以适合于本公司生产的网络设备及计算机互连。网络体系结构的提出，大大推动了计算机网络的发展。

但是，随着计算机网络技术的发展，网络形式呈现多样化、复杂化的特点，人们也提出了很多问题，其中最突出的问题是不同体系结构的网络很难互连起来（即所谓的异种机连接问题）。为了更加充分地发挥计算机网络的效益，应当让不同厂家生产的计算机网络设备能够相互通信，于是越来越需要制定国际范围的标准，以使计算机网络尽可能地遵循统一的体系结构标准。若干标准化组织促进了通信标准的开发，下面简要介绍 5 个标准化组织：美国国家标准学会、国际电信联盟、电子工业协会、IEEE 和国际标准化组织。

（1）美国国家标准学会（American National Standard Institute，ANSI）设计了 ASCII 代码组，它是一种广泛使用的通信标准代码。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 23　　2023/6/15 14:16:25

（2）国际电信联盟（International Telecommunications Union，ITU）有 3 个主要部门：无线通信部门（ITU-R）、电信标准化部门（ITU-T）和开发部门（ITU-D）。1953—1993 年，ITU-T 被称为 CCITT（国际电报电话咨询委员会）。

（3）电子工业协会（Electronic Industries Association，EIA）是美国的电子厂商组织，最为人们熟悉的 EIA 标准之一是 RS-232 接口，这一通信接口允许数据在设备之间交换。

（4）IEEE 建立了电子工业标准，IEEE 下设一些标准组织（或工作组），每个工作组负责标准的一个领域，工作组 802 设置了网络设备和如何彼此通信的标准。

（5）国际标准化组织（ISO）开发了开放系统互连（open system interconnection，OSI）网络结构模型，模型定义了用于网络结构的 7 个数据处理层。网络结构是在发送设备和接收设备间进行数据传输的一种组织方案。

2. 开放系统互联参考模型的制定

1977 年 3 月，国际标准化组织的技术委员会 TC97 成立一个新的技术分委员会 SC16 专门研究“开放系统互联”，并于 1983 年提出了开放系统互联参考模型，即著名的 ISO 7498 国际标准（我国相应的国家标准是 GB 9387），记为 OSI/RM（open systems interconnection/reference model）或者 ISO/OSI/RM。通常人们也称它为 OSI 参考模型，简称 OSI。开放系统互联的目的是使世界范围内的应用系统能够开放式（而不是封闭式）地进行信息交换。

所谓“开放”是指只要遵循 OSI 标准，一个系统就可以和位于世界上任何地方的、也遵循着同一标准的其他任何系统进行通信。这一点类似世界范围的电话系统和邮政系统，这两个系统都是开放系统。

所谓“系统”，本来是指按一定关系或规则工作在一起的一组物体或一组部件。但是在 OSI 术语中，“系统”则有其特殊的含义。我们用“真实系统”（real system）表示在现实世界中能够进行信息处理或信息传递的自治整体，它可以是一台或多台计算机以及和这些计算机相关的软件、外围设备、终端、操作员、信息传输手段等的集合。若这种真实系统在和其他真实系统通信时遵守 OSI 标准，则这个真实系统即称为开放真实系统。但是，一个开放式系统的各种功能并不一定都与互联有关。在开放系统互联参考模型中的系统，只是在开放式系统中与互联有关的各部分。为方便起见，我们就将这部分称为开放系统。所以，开放系统和开放系统互联参考模型一样，都是抽象的概念。

在 OSI 标准的制定过程中，所采用的方法是将整个庞大而复杂的问题划分为若干较容易处理的范围较小的问题，即前面提到的分层的体系结构方法。在 OSI 标准中，问题的处理采用了自上而下的逐步求精。先从最高一级的抽象开始，这一级的约束很少。然后逐渐更加精细地进行描述，同时加上越来越多的约束。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 24 2023/6/15 14:16:25

3. 开放系统互联参考模型的七层体系结构

OSI 7 层模型从低层到高层分别为物理层、数据链路层、网络层、运输层、会话层、表示层和应用层，其体系结构及协议如图 1.15 所示。通常将运输层及以上称为高层，其以下称为低层。该模型中每一层的功能是独立的，它利用其下一层提供的服务并为其上一层提供服务。服务是指下一层向上一层提供的通信功能和层间的会话规定，一般用通话原语实现，并通过层间接口由下层向上层提供，而与其他层的具体实现无关。

OSI 7 层模型中每个层次接收到上层传递来的数据后都要进行封装，即将本层次的控制信息加入数据单元的头部，部分层次还要将校验和信息附加到数据单元的尾部。模型中对等层之间传送的数据单位称为该层的协议数据单元。当数据到达接收端时，每一层读取相应的控制信息，根据控制信息中的内容向上层传递数据单元并解封封装，即在向上层传递之前去掉本层的控制头部信息和尾部信息（如果有）。逐层执行这个过程，直至将对端应用层产生的数据发送给本端相应的应用进程（process，即正在运行的程序）。

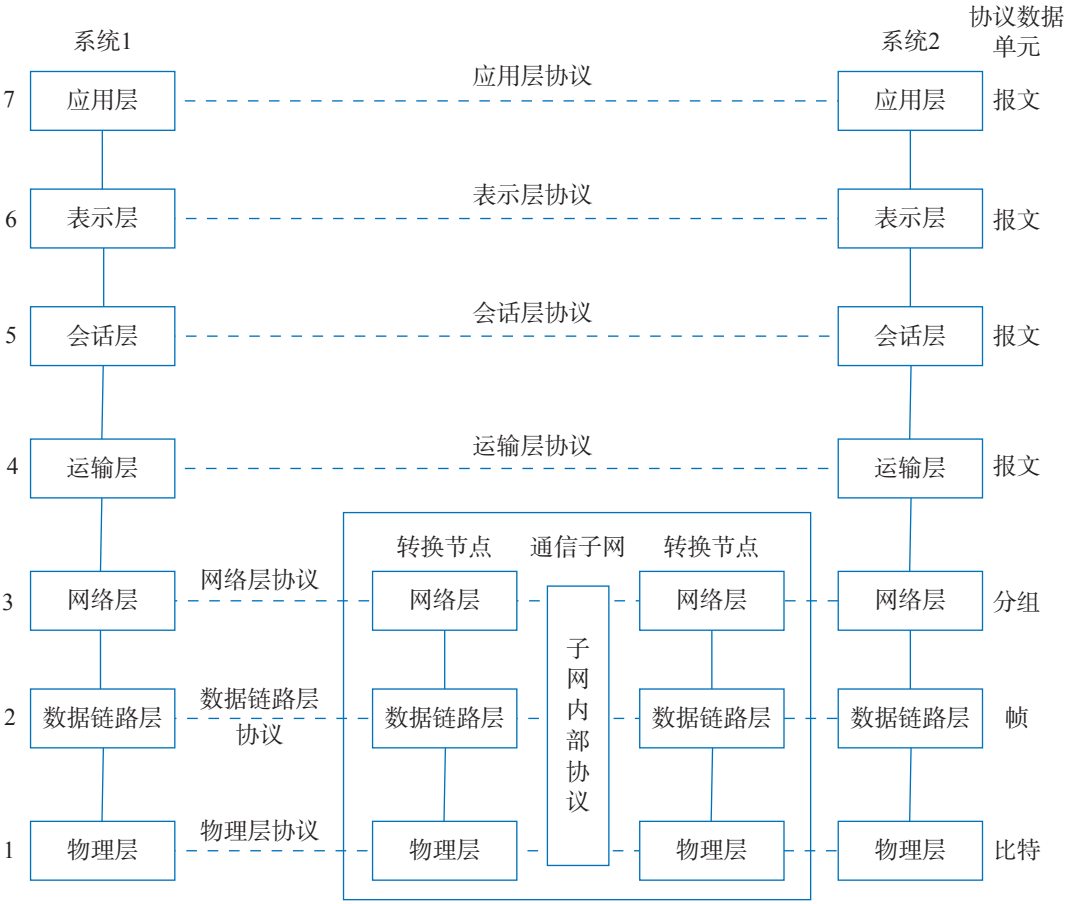

图 1.15　OSI 网络系统结构参考模型及协议

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 25　2023/6/15 14:16:25

1）物理层

物理层是 OSI 参考模型中的第一层，也是最底层。它包括物理连接的媒介，如线缆连接器等。

物理层的功能就是为数据链路层提供一个物理连接，规定物理接口的机械、电气功能和规程特性，以便透明地传送比特流，尽可能屏蔽具体传输介质和物理设备的差异。在物理层传输数据的单位是比特。

在此，“透明”表示某一个实际存在的事物看起来却好像不存在一样。而“透明地传送比特流”表示经实际电路传送后的比特流没有发生变化，即发送方发送“1”，接收方所接收到的是“1”；发送方发送“0”，接收方所接收到的是“0”。因此，对于对传送比特流来说，这个电路似未对其产生影响，像是不存在的。也就是说，这个电路对该比特流来说是透明的。

为了达到以上目标，物理层需要完成以下功能：在数据终端设备（data terminal equipment，DTE）和数据电路端设备（data circuit-terminal equipment，DCE）的接口处提供数据连接；在设备间提供控制信号和时钟信号，用以同步数据流和规定比特传输速率；提供机械连接器，以完成匹配。

DTE 是指所有与网络端口相连的用户设备，包括简单终端、智能终端、异步和同步终端等。而 DCE 是指模拟网中的调制解调器或数字网中的数据服务单元和信道服务单元。

2）数据链路层

（1）数据链路层的功能。数据链路层是 OSI 参考模型的第二层，它介于物理层与网络层之间。尽管物理设备之间的电气信号可以传输，但由于传输媒体本身的特性（如信号衰减）以及外部因素（如干扰信号等）的影响，使得线路上传输的信号可能产生差错，因此设立数据链路层的主要目的是建立和管理节点间的链路，通过各种控制协议将一条原始的、有差错的物理线路变为对网络层无差错的数据链路。为了实现这个目的，数据链路层必须执行链路管理、帧传输、流量控制、差错控制等功能。

数据链路层通常又分为介质访问控制（medium access control，MAC）和逻辑链路控制（logical link control，LLC）两个子层。MAC 子层的主要任务是解决共享型网络中多用户对信道竞争的问题，完成网络介质的访问控制。LLC 子层的主要任务是建立和维护网络连接，执行差错校验、流量控制和链路控制。

数据链路层的具体工作是接收来自物理层的位流形式的数据，并封装成帧，传送到上一层；同样，也将来自上层的数据帧拆装成位流形式的数据转发到物理层；另外，还负责处理接收端发回的确认帧的信息，以提供可靠的数据传输。

在此需要提到“帧”这个重要的概念。在数据链路层，数据传输的单位为帧

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 26 2023/6/15 14:16:25

（frame）。帧是数据的逻辑单位，被称为数据链路协议数据单元，每一帧包括一定数量的数据和一些必要的控制信息。为了进一步说明帧的概念，首先要明白何谓报文（message）。简单地说，一个报文就是由若干字符组成的完整信息。在传输过程中，先把报文分块，每个块上加一定的信息，这样的代码块称为包或分组（packet）。在传输这些包时，为了实现差错控制，还要加上一层“封皮”。这层“封皮”分为首尾两部分，而包就在中间，形象地说，加了“封皮”的包称为帧。在这里可以打个比方，帧就是一本书，书的封面（分前后两页）就是“封皮”。这本书除封面以外的东西称为“包”。当帧进行传输时，包的内容不变，而“封皮”用过后就被取消。也就是说，在进行另外一个包的传输时，又要重新组合成一个新的帧来进行传输。

在传送数据时，若接收节点检测到所传数据中有差错，就要通知发送方重发这一帧，直到这一帧正确无误地到达接收节点。由于数据链路层中的帧包括控制信息，即同步信息、地址信息、差错控制以及流量控制信息等，因此，数据链路层就把一条有可能出差错的数据链路，转换成让网络层向下看起来好像是一条不出差错的链路。

（2）几种常用的数据链路层协议。数据链路层协议分为面向字符型和面向比特型两类。随着计算机通信的发展，面向字符型的协议逐渐暴露出通信线路利用率低，数据传输不透明，系统通信效率低，只适合停等协议与半双工方式等弱点。因此，1974 年 IBM 公司推出了面向比特型的同步数据链路控制（synchronous data link control，SDLC）协议，ANSI 将 SDLC 修改为高级数据通信控制协议（advanced data communications control protocol，ADCCP）作为国家标准。而 ISO 将修改后的 SDLC 称为高级数据链路控制（high-level data link control，HDLC），并将它作为国际标准 ISO 3309。在此，有必要对 HDLC、串行线路国际协议（serial line IP，SLIP）和 PPP 进行简要介绍，它们是互联网中使用的数据链路层协议。

在 OSI 参考模型中，数据链路层采用的是 HDLC 协议，HDLC 帧结构如图 1.16 所示。

标志字段	地址字段	控制字段	信息字段	帧校验序列字段	标志字段
F 01111110	A	C	I N位	FCS 16位	F 01111110

图 1.16　HDLC 帧结构

从图 1.16 中可以看出，HDLC 帧是由标志字段等 6 个字段构成，其简要说明如下。

标志字段 F：帧首尾均有一个由固定比特序列 01111110 组成的帧标志字段 F，其作用主要有两个：帧起始终止定界符和帧比特同步。

地址字段 A：在非平衡结构中，帧地址字段总是写入从站地址；在平衡结构中，帧地址字段填入应答站地址，全 1 地址为广播地址。按照协议规定，地址字段可以按 8 比特的整数倍扩展。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 27　2023/6/15 14:16:25

控制字段 C：是 HDLC 帧的关键字段，HDLC 中的许多重要功能均靠控制字段来实现。控制字段表示帧类型、帧编号、命令和控制信息，其可将 HDLC 划分为信息帧（I）、监控帧（S）和无编号帧（U）。

信息字段 I：信息字段可以是任意的比特序列组合，其长度通常不大于 256 字节。

帧校验字段：FCS 字段为帧校验序列，HDLC 采用 CRC 循环冗余码进行校验。

HDLC 的控制过程包括 3 个阶段。

第一阶段：建立数据链路连接阶段。当网络层向数据链路层发出连接请求后，链路层的发送端向接收端发出置正常响应模式的无编号帧，若接收端准备就绪，则发出无编号确认响应帧予以确认，这也就是表示同意建立数据链路连接，此时，数据链路就建好了。

第二阶段：传送数据阶段。链路连接建立好后，发送端开始按照某种流量控制策略发送信息帧。例如，采用滑动窗口进行流量控制，则发送端可连续发送多个信息帧。接收端收到信息帧后，通过校验序列来检验接收的数据是否正确。若数据正确，则由接收端向发送端发出确认监控帧，否则发出否认帧，而接收端将对出错的帧进行重传，如此循环直到数据发送完毕。

第三阶段：拆除数据链路连接。全部数据发送完毕，网络层发出断链请求，链路层的发送端收到请求后，向接收端发出拆除连接无编号帧。接收端收到连接无编号帧后，发出无编号帧作为响应。此后，从接收端开始向发送端方向，沿数据链路依次拆除各数据链路连接。

另外两种常使用的数据链路层协议是 SLIP 和 PPP，它们是用户接入互联网时所采用的数据链路层协议。SLIP 是一个在串行线路上对 IP 分组进行封装的简单的面向字符的协议，用以使用户通过电话线和调制解调器接入互联网。SLIP 主要用于低速串行线路中的交互性业务，它不能进行差错检测，仅支持 IP，并且数据传输效率较低。为了改进 SLIP，人们制定了 PPP。它所起的作用与 OSI/RM 中的数据链路层一致，可以完成链路的操作、维护和管理功能，并且在设计时考虑了与常用的硬件兼容，支持任何种类的 DTE-DCE 接口。运行 PPP 只需要提供全双工的电路以实现双向的数据传输，它对数据传输速率没有太严格的限制，故能适用多种远程接入的情形。PPP 灵活的选项配置、多协议的封装机制、良好的选项协商机制以及丰富的认证协议，使得它在远程接入技术中得到了广泛的应用。

3）网络层

（1）网络层简介。数据链路层虽然提供了理论上的可靠传输服务，但这种服务仅发生在相邻的两个节点之间，如交换机对交换机之间以及用户终端与交换机之间的通信服务等。但是用户的数据传输主要发生在端到端之间，也即用户之间的通信可能需要经过多条链路，并由多个中继节点，如交换机、路由器等，负责数据传输和转发。因此，网

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 28 2023/6/15 14:16:25

络层就是通过路由选择算法，为数据传输选择最合适的路径，从而实现通信双方在整个网络系统内的连接。

在 OSI 7 层模型中，网络层是第 3 层，同时也是通信子网的最高层。网络层的任务就是选择合适的路由，使发送端的运输层所传下来的分组信息能够正确无误地按照地址找到目的地，并交付给相应接收端的运输层，即完成网络的寻址功能。在这一层，数据的单位称为数据包或数据分组。

（2）网络层的功能及服务。网络层的主要功能可以归纳为以下 5 点。

① 提供路由选择。网络层利用各种路由算法，使得中继节点能够根据数据分组中的地址信息和依据某种策略做出决策，尽快地转发收到的数据分组，使得用户的数据能尽快地穿越网络，送往目的地。路由选择是网络层的一大特征，也是网络层的内在能力。

② 提供有效的分组传输，包括顺序编号和分组的确认。网络层利用分组技术，可以根据不同的网络情况将用户数据组装成适合网络传输的数据分组，使得用户数据能够在不同的网络中传输。

③ 流量控制。网络层的流量控制对进入分组交换网的通信量加以一定的控制，以防因通信量过大而造成通信子网性能的下降。

④ 将若干逻辑信道复用到一个单一的数据链路上。网络层提供了复用 / 解复用功能，利用复用 / 解复用技术，可以使得多对用户的数据交织在同一条数据链路上进行传输。

⑤ 提供交换虚电路和永久虚电路的连接。为了完成上述功能，网络层提供面向连接和面向无连接的两种服务。

所谓面向连接服务是指数据传输过程可以被分成连接的建立、数据传输与拆除连接 3 个阶段。在这种传输过程中，首先需要建立连接通路，然后数据沿着所建立好的链路按照顺序依次传送到接收端，接收端无须对所接收的信息进行排序。该方式可靠性比较高，常用于数据传输量比较大的场合。但是，由于存在着建立和拆除连接的过程，因此，传输效率不高。

面向无连接服务的最大特点是无须在传输数据前建立一条链路，当然也就不存在拆除链路的过程。要传送的分组将携带对方的目的地址而自找路由，因此到达接收端，信息分组可能是无序的，必须由接收端进行排序。这种方式传输效率较高。

应指出的是，面向连接服务的具体实现即是 2.7 节中所述的虚线路传输分组交换；面向无连接服务的具体实现也即 2.7 节中所述的数据报分组交换。

4）运输层

运输层是高低层之间衔接的接口层。数据传输的单位是报文，当报文较长时将它分割成若干分组，然后交给网络层进行传输。运输层是计算机网络协议分层中的最关键一层，该层以上各层将不再管理信息传输问题。运输层也称为传输层、传送层等。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 29　　2023/6/15 14:16:25

（1）运输层简介。网络层虽然实现了通信主机端与端之间的数据交换，然而实际上通信的是两个主机中的两个应用进程。另外，尽管第 3 层可实现数据在一定程度上的可靠传输，但仍存在着其自身所不能解决的传输错误。因此，运输层负责将数据可靠地传送到相应的端口，包括处理差错控制和流量控制等问题，保证报文的正确传输。

运输层位于 OSI 7 层参考模型中的会话层和网络层之间。从其所处的位置来看，运输层是 OSI 参考模型中比较特殊的一层，同时也是整个网络体系结构中十分关键的一层。从通信和信息处理的角度看，运输层是承上启下的一层，其属于面向通信部分的最高层和信息处理部分的最低层。运输层在使用通信网络提供的数据传输服务的基础上，为高层提供了应用程序到应用程序的可靠通信服务，其对高层屏蔽了通信网络的差异性，弥补了通信网络的不足，运输层在网络层的基础上为高层提供“面向连接”和“面向无连接”两种服务；低于运输层的各层不必再关心数据的产生和使用等问题，只注重数据的传输即可。由图 1.15 可以看出，运输层只存在于通信子网之外的端系统（即主机）之中，工作在网络层及以下各层的网络设备是没有运输层的。运输层的数据单元是报文。

（2）运输层的功能和服务。运输层的主要功能可以归纳为以下 6 点。

① 复用和分用。一个主机可能同时运行着多个进行通信的应用程序，例如，同时打开了多个网页和进行多个文件的下载，这时每个进行通信的应用进程通过不同的端口与运输层交换数据。每个进程都通过各自分配的端口将数据交给运输层，然后共用 IP 将数据发送到各自的目的主机，从而实现了多个进程对传输协议的复用。而在目的主机上，运输层将收到的 IP 分组重新组合成报文后，根据报文首部中的目的端口分别交付给各个目的进程，从而实现了传输协议对多个应用进程的分用。

② 数据分段。应用进程可能陆续产生很多数据，运输层对上层的数据进行分组，形成若干报文段，以报文段为传送单位分别通过网络传输给接收应用进程。

③ 提供端到端的面向连接的通信。运输层在网络层提供的不可靠的端到端传输功能的基础上，提供可靠的端到端的传输服务。这一点类似于数据链路层，只不过数据链路层是作用于相邻的节点之间的传输通路，而运输层是作用于通信主机端与端之间的传输通路。

④ 流量控制。任何接收端在接收数据、缓存数据和处理数据时都有一定的时间和能力限制，为了避免因接收端来不及处理接收的数据而产生数据丢失，运输层对发送主机端的数据速度进行了控制。这与数据链路层对数据进行流量控制不同，运输层实现流量控制是由主机实现的，而数据链路层对数据进行流量控制则是由通信子网中的网络设备实现的。

⑤ 差错控制。运输层的差错控制也是在端到端的主机上进行的。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 30 2023/6/15 14:16:25

⑥ 拥塞控制。运输层提供了拥塞控制手段，使通信进程以网络能够允许的速度发送数据，从而避免了网络拥塞的发生。

另外，有必要对端口稍加解释，端口是用来唯一标识某主机中的各个进程的，通过共同使用端口和地址可以实现不同主机的应用进程之间的互相通信。

5）会话层

运输层提供的服务可以保证用户数据按照用户的要求从网络的一端传输到另一端，剩下的问题是用户如何控制信息的交互过程，例如，数据交换的时序以及如何保证数据交换的完整性等。另外，网络应当提供什么样的功能来协助用户管理和控制用户之间的信息交换，从而进一步满足用户应用的要求也是需要考虑的。

会话层又称会晤层，其位于运输层之上，由于利用了运输层提供的服务，使得两个会话实体之间不需要考虑它们之间相隔多远、使用了什么样的通信子网等网络通信细节，而可以进行透明的、可靠的数据传输。当两个应用进程进行相互通信时，希望有一个作为第三者的进程能组织它们之间的通话，协调它们之间的数据流，以便于应用进程专注于信息交互，而设立会话层就是为了达到以上目的。从 OSI 参考模型来看，会话层之上的各层面向应用，会话层之下的各层面向网络通信，会话层则是应用程序和网络之间的接口，向两个实体的表示层提供建立和使用连接的方法。

会话层协议定义了会话层内部对等会话实体间进行通信所必须遵守的规则，而这些规则说明了一个系统中的会话实体怎样与另一个系统中的对等实体交换信息，以提供会话服务。会话层的主要功能是向会话的应用进程之间提供会话组织和同步服务，对数据的传输提供控制和管理，协调会话过程，为表示层实体提供更好的服务。

6）表示层

由于不同的计算机系统可能采用了不同的信息编码，例如，PC 通常采用 ASCII 码，而 IBM 主机通常采用广义二进制编码的十进制交换码（extended binary coded decimal interchange code，EBCDIC）编码，并且可能具有不同的信息描述和表示方法。例如，对于同样一个整数，有些计算机可能采用 2 字节表示，而另一些计算机可能采用 4 字节等。如果不加处理，不同的信息描述将导致通信的计算机系统之间无法正确地识别信息，正如汉语是一种描述事物的语言，但是未必所有的人都可以理解。

表示层主要解决异种计算机系统之间的信息表示问题，屏蔽不同系统在数据表示方面的差异。解决信息表示的方法是定义一种公共的语法表示方法，并在信息交换时进行本机语法和公共语法之间的转换，从而使通信的计算机之间能够正确地识别信息，真正达到信息交互的目的。这种方法类似于人类信息交流时惯于采用的方法，例如不同国别的交谈者在一起交谈时常常选择英语作为公共语言，并依靠翻译完成本地语言和英语的转换。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 31　　2023/6/15 14:16:26

7）应用层

应用层是计算机网络可向最终用户提供应用服务的唯一窗口，其目的是支持用户联网的应用要求。由于用户的要求不同，应用层含有支持不同应用的多种应用实体，提供多种应用服务。在 OSI/RM 中，这些应用服务被称为应用服务元素，包括电子邮件、文件传输、虚拟终端等。应用层以下各层通过应用层向应用进程提供服务，因此，应用层向应用进程提供的服务是 OSI 所有层服务的总和。

为了对 OSI/RM 有更深刻的理解，表 1.1 给出了两个主机用户 A 和 B 对应各层之间的通信联系以及各层操作的简单含义。

表 1.1　主机间通信以及各层操作的简单含义

主机 H_A	控 制 类 型	对等层协议规定的通信联系	简 单 含 义	数 据 单 位	主机 H_B
应用层	进程控制	用户进程之间的用户信息交换	做什么	用户数据	应用层
表示层	表示控制	用户数据可以编辑、交换、扩展、加密、压缩或重组为会话信息	对方看起来像什么	会话报文	表示层
会话层	会话控制	建立和终止会话，如会话失败应有秩序地恢复或关闭	轮到谁讲话和从何处讲	会话报文	会话层
运输层	运输控制	会话信息经过传输系统发送，保持会话信息的完整	对方在何处	会话报文	运输层
网络层	网络控制	通过逻辑链路发送报文组，会话信息可以分为几个分组发送	走哪条路可到达该处	分组	网络层
数据链路层	链路控制	在物理链路上发送帧及应答	每一步应该怎样走	帧	数据链路层
物理层	物理控制	建立物理线路，以便在线路上发送位	对上一层的每一步怎样利用物理媒体	位（比特）	物理层

OSI 参考模型设计是为了解决通信网络的标准化问题，只要都支持 OSI 模型，两个互不兼容的端系统就能互相通信。从逻辑上讲，发送端的某应用程序通过应用层提供的接口将数据交给应用层，再加上该层的控制信息后传给表示层；表示层如法炮制，给数据加上本层的控制信息后，再传给会话层；以此类推，每一层都将收到的数据加上本层的控制信息传给下一层；最后到达物理层时，数据通过实际的物理媒体传送到接收端。接收端则执行与发送端相反的操作，即接收端系统由下往上，根据每层的控制信息执行某一特定的操作后，然后将该控制信息去掉，并把余下的数据提交给上一层，这一过程一直继续到应用层最终得到数据，并送给接收端相应的应用程序。这两个通信的应用程序以及网络节点中的各个对等层，都好像是在直接进行通信；但事实上，所有的数据都被分解为比特流，并由物理层实现传输。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 32　　2023/6/15 14:16:26

需要明确的是 OSI 参考模型只是一个理论模型，是一个用来制定标准的标准，到目前为止，在实际中并不存在一个通信网络系统完全与之符合。但是 OSI 参考模型在计算机网络的发展过程中起到了重要的指导作用，为理解网络的体系结构提供了重要的思考方式，也为今后计算机网络技术朝标准化、规范化方向发展提供了参考依据。

1.4.3　TCP/IP 模型

1. TCP/IP 简介

互联网是由成千上万个不同类型的工作站、服务器以及路由器、交换机、网关、通信线路连接而组成的超大型网络，因此解决不同网络、不同类型设备之间的信息交换和资源共享是成功构建互联网的关键，而 TCP/IP 正是打开这把“关键”锁的钥匙。

TCP/IP 是在美国国防部资助的项目 ARPANet 上所使用的协议。20 世纪 70 年代初，美国国防部为了实现异种网络间的互联，投入大量的资金进行不同网络之间互联的研发工作，并于 1974 年由鲍勃·凯恩与温登·泽夫合作提出了 TCP/IP 构想，到 20 世纪 70 年代末，TCI/IP 体系结构和协议规范基本成熟。TCP/IP 使用的范围很广，是目前异种网络通信中使用的唯一协议体系，成功地解决了不同网络硬件设备、不同厂商产品和不同操作系统之间的相互通信问题，从而成为互联网的核心协议，也因此成为目前事实上的国际标准和工业标准。

TCP/IP 并不是单纯的两个协议，而是一组通信协议的集合，包含了 100 多个协议。由于传输控制协议（transmission control protocol，TCP）和互联网协议（Internet protocol，IP）是 TCP/IP 中最重要的两项协议，因此通常就用 TCP/IP 来代表整个通信协议的集合。TCP/IP 体系结构是指根据 TCP/IP 中各协议在通信过程中所完成的功能而划分的一种层次结构，TCP/IP 体系结构也可以称为 TCP/IP 模型。

2. TCP/IP 模型的层次结构

TCP/IP 模型是一个 4 层结构，从下到上依次是网络接口层、网络互联层、传输层和应用层。

（1）网络接口层。TCP/IP 与各种网络的接口称为网络接口层，其是 TCP/IP 模型的最底层，然而它实际上在 TCP/IP 模型中并没有具体定义。该层的主要功能是传输经网络互联层处理过的信息，并提供主机与实际网络的接口，即负责从网络互联层接收 IP 分组并将 IP 分组封装成适合于不同网络传输要求的数据帧，然后通过物理网络发送出去，或者从低层物理网络上接收数据帧，抽出 IP 分组并交给网络互联层。

主机与实际网络具体的接口关系由实际网络的类型决定，例如可以是以太网、FDDI、X.25 和 ATM 等。因此，网络接口层与网络的物理特性无关这一特性充分体现

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 33　2023/6/15 14:16:26

了 TCP/IP 模型的灵活性以及 TCP/IP 网络的异构性。

（2）网络互联层。网络互联层是 TCP/IP 模型的第二层，它的主要功能是负责相邻节点之间的数据传送。具体可以分为 3 方面：①处理来自传输层的报文发送请求，首先将报文封装为 IP 分组，然后选择通往目的节点的路径，最后将 IP 分组交给适当的网络接口；②处理接收到的 IP 分组，首先对 IP 分组进行合法性检查，然后进行路由选择，若该 IP 分组已到达目的节点，则将 IP 分组的报头去掉，将余下的数据部分交给相应的传输层，若该 IP 分组仍未到达目的地节点，则转发该 IP 分组；③处理网络的路由选择、流量控制和拥塞控制等问题。

完成网络互联层以上功能的协议是互联网控制报文协议（Internet control message protocol，ICMP）、地址解析协议（address resolution protocol，ARP）和反向地址解析协议（reverse address resolution protocol，RARP）。

① IP。互联协议是网络互联层的重要协议，它的主要功能是实现无连接的 IP 分组和 IP 分组的路由选择。当 IP 分组传送到目的主机后，不予回送确认，也不保证分组正确进行，不进行流量控制和差错控制，这些功能将由传输层的 TCP 完成。由于 IP 所面对的是一个由多台路由器和物理网络所组成的复杂网络，而且每台路由器可能连接不止一个物理网络，每个物理网络可能连接多个主机。因此，IP 的任务是提供一个虚构的网络，找到下一台路由器和物理网络，把 IP 分组从源端无连接地、逐步地传送到目的主机，这就是 IP 分组的路由选择功能。另外，由于不同的物理网络对所传输的数据帧的长短要求不一样，所以 IP 需要对传输层所传来的报文进行适当分组。

② ICMP。IP 的路由选择主要由路由器负责，无须主机参与处理，而实际情况却有可能出现种种差错和故障，如线路不通、主机断链、超过生存时间、主机或路由器发生拥塞等。ICMP 则专门用来处理差错报告和控制，它能由出错设备向源设备发送出错报文和控制报文，源设备接到该报文后，由 ICMP 软件确定错误类型或重发数据报的策略。ICMP 报文不是一个独立的报文，而是封装在 IP 分组中。ICMP 提供的服务有测试目的地的可达性和状态、报文不可达的目的地、数据报的流量控制和路由器路由改变请求等，另外 ICMP 也用来报告拥塞。ICMP 将 IP 作为它的传输机制，这样看起来似乎 ICMP 成了 IP 的高层协议，其实 ICMP 只是 IP 实现的一个必要部分。

③ ARP。在局域网中所有站点共享通信信道，是通过使用每个站点唯一的物理地址 MAC 来确定报文的发往目的地，但仅通过 IP 地址并不能计算出 MAC 地址，ARP 的任务就是查找与给定 IP 地址相对应的主机的网络物理地址。ARP 通过采用广播消息的方法，从而获取网上 IP 地址所对应的 MAC 地址。

④ RARP。RARP 主要解决网络物理地址 MAC 到 IP 地址的转换。RARP 也采用广播消息的方法来获得特定硬件 MAC 地址相对应的网上 IP 地址。RARP 对于在系统引导

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 34 2023/6/15 14:16:26

时无法知道自己互联网地址的站点来说就显得十分重要了。

（3）传输层。传输层位于 TCP/IP 模型的第三层，它的主要功能是为源节点和目的节点的两个应用进程之间提供可靠的端到端的数据传输。为保证数据传输的可靠性，传输层协议规定在接收端进行差错检验和流量控制。另外，传输层还要解决不同应用程序的标记问题，因为在一般的通用计算机中，常常是多个应用程序同时访问互联网。为了区别各个应用程序，传输层在每一个报文中增加了识别源端和目的端应用程序的标记。为了完成以上功能，传输层提供了两个端到端的协议：TCP 和用户数据报协议（user datagram protocol，UDP）。

① TCP。TCP 是一个面向连接的协议，为网络提供具有有序可靠传输能力的全双工虚电路服务。TCP 允许从一台主机发出的消息无差错地发往互联网上的其他主机，它把经应用层传送来的报文分成报文段并传给网络互联层。在接收端，TCP 接收进程把收到的报文段再组装成报文后，再将报文交给应用层。TCP 的功能包括为了取得可靠的传输而进行的分组丢失检测，对收不到确认或者出错的信息自动重传，以及处理延迟的重复数据报等。此外，TCP 还能进行流量控制和差错控制。

TCP 进行报文交换的过程如下：建立连接、发送数据、发送确认、通知窗口大小，最后在数据帧发送完毕后关闭连接。由于 TCP 在发送数据时，报头包含控制信息，所以发送下一帧数据时，可以同时对前一帧数据进行控制和确认信息。

② UDP。UDP 是一个不可靠的、无连接的传输层协议，它将可靠性问题交给应用程序解决。UDP 主要面向请求 / 应答式的交易型应用，这些交易往往只有一来一回两次报文交换，如果像 TCP 那样建立连接和撤销连接，那么开销是很大的。这种情况下使用 UDP 就非常有效。另外，UDP 也应用于那些可靠性要求不高，但要求网络延迟较小的场合，如语音和视频数据的传送。

（4）应用层。应用层是 TCP/IP 模型的最高层，它是 TCP/IP 系统的终端用户接口，是专门为用户应用服务的。TCP/IP 模型的应用层包括所有的高层协议。互联网上早期的应用层协议有远程登录协议（Telnet）、FTP 和简单邮件传送协议（simple mail transfer protocol，SMTP）等，其中 Telnet 协议允许用户登录到远程系统并访问远程系统的资源，并且像远程机器的本地用户一样访问远程系统，FTP 提供在两台机器之间进行有效的数据传送的手段，SMTP 用于电子邮件的传送。随着互联网上应用不断地涌现，许多新的应用层协议也应运而生，如域名服务（domain name service，DNS）、网络新闻传输协议（network news transfer protocol，NNTP）和超文本传送协议（hyper text transfer protocol，HTTP）等。

TCP/IP 模型中各层的主要协议如图 1.17 所示。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 35　　2023/6/15 14:16:26

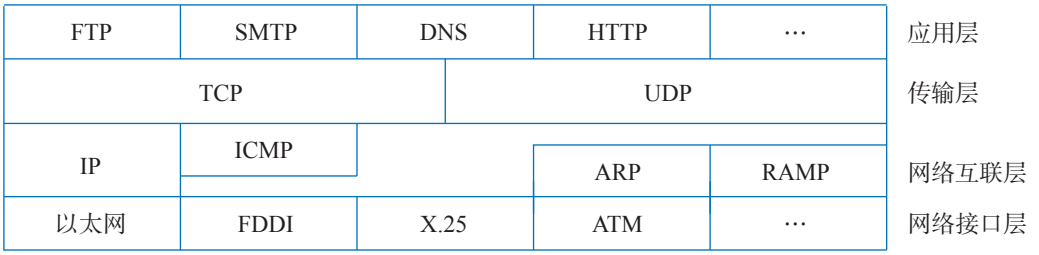

图 1.17　TCP/IP 模型各层主要协议

1.4.4　OSI 协议参考模型与 TCP/IP 模型的比较

OSI 参考模型与 TCP/IP 模型有很多相似之处，它们各层次功能之间存在着一定的对应关系。TCP/IP 模型的网络接口层大致对应于 OSI 参考模型的物理层和数据链路层，该层主要处理数据的格式化，以及将数据传输到通信线路上；TCP/IP 模型的网络互联层大致对应于 OSI 参考模型的网络层，该层主要处理信息的路由及主机地址解析；TCP/IP 模型的传输层大致对应于 OSI 参考模型的运输层，该层主要负责提供流量控制、差错控制和排序等服务；TCP/IP 模型的应用层大致对应于 OSI 参考模型的应用层、表示层和会话层，该层主要向用户提供各种应用服务。图 1.18 显示了这种对应关系。

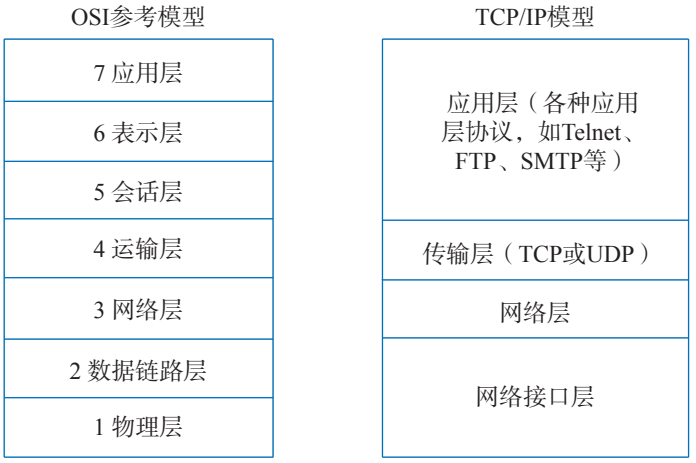

图 1.18　OSI 参考模型与 TCP/IP 模型各层的对应关系

除了这些基本的相似之处外，两个模型也存在很多的差别。

（1）OSI 参考模型明确区分了服务、接口和协议 3 个主要概念，但是 TCP/IP 模型最初并没有对其进行严格区分。因此，OSI 参考模型中的协议比 TCP/IP 模型中的协议具有更好的隐蔽性并且更容易被替换。

（2）OSI 参考模型并不是基于某个特定的协议集而设计的，因此它更具有通用性。而 TCP/IP 模型正好相反，先有协议，模型只是对已有的协议的描述，因而协议与模型配合得很好；但 TCP/IP 模型的问题在于其不适合于其他协议，因此，TCP/IP 模型不适

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 36　2023/6/15 14:16:26

合于描述其他非 TCP/IP 网络。

（3）OSI 参考模型在网络层提供面向连接和无连接的通信服务，但在传输层仅有面向连接的通信服务。而 TCP/IP 模型在网络层只有一种无连接的通信服务，而在传输层提供了面向连接和无连接的通信服务。

（4）OSI 参考模型有 7 层，而 TCP/IP 模型只有 4 层。

综上，OSI 参考模型可以很好地对计算机网络进行描述，但由于协议出现的时机不当以及协议本身难于实现等问题使得该参考模型并未流行起来。而 TCP/IP 模型是对现有协议的一个归纳和总结，由于其容易实现和被生产厂商广泛接受，故其已成为事实上的网络参考标准。

1.5　计算机网络的发展趋势

本节简要回顾计算机网络的发展历程，分析计算机网络未来发展的需求。基于需求探讨计算机网络面临的重大技术挑战及相应的研究问题，据此拟提出计算机网络的发展趋势和相关的技术制高点。

1.5.1　计算机网络发展的简要回顾

计算机网络诞生 50 多年来，国内外学者、研究机构、企业和各国政府对计算机网络的理论、技术及建立做了大量的工作。

1969 年底，美国国防部研制并建成 ARPANet，标志着计算机网络的诞生。1980 年代初，ISO 制定了一系列国际标准，奠定了互联网的雏形。20 世纪 90 年代，许多国家将信息高速公路作为国家战略，从而极大地推动了计算机网络技术的发展，使其发展和应用进入了崭新的阶段。21 世纪以来，高速通信网络技术、无线网络、移动互联网、云计算、智能终端、网络和信息安全技术的大力发展，已将计算机与网络融为一体，体现了“网络就是计算机”。当下流行的云计算、物联网、智慧城市、大数据、人工智能以及区块链等新技术，都是建立在互联网之上，依托其支撑来实现。在应用上，“互联网 +”已辐射到经济社会发展的多个领域。

1.5.2　计算机网络发展的新需求

国家经济社会的发展对计算机网络提出了新的需求，驱动着计算机网络的飞速发展。计算机网络未来发展的新需求似可归纳为以下四类。

1. 全息通信

以全息通信为代表的全息远程会议、远程故障诊断和维修等新兴沉浸式网络应用，对网络体系结构和能力提出了重大挑战。全息应用带宽需求为每秒 Tbit 级；时延需求

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 37　2023/6/15 14:16:26

为亚毫秒级；全息数据流内并行流为上千条级。以面向 2030 年的全息全感业务为例，真人级全息通信是对现实视觉的完整重构。如果用全息记录真人大小或 70 英寸左右的电视屏幕大小，则单个数据流所需的动态传输数据量约为 1.9Tbit/s，时延为 1 ～ 5ms。

2. 时间约束

在工业互联网等大型应用场景中，快速反应与时间体验是重要因素。超低时延是上述应用的共性需求，有些工业应用的闭环控制往返时延是毫秒级的，有些是亚毫秒级的，有些是微秒级的。未来工业连接需要提供的传送服务不仅要求是确定的、及时的，更应是准时的。工业从自动化到数字化、网络化和智能化，逐渐向虚拟世界与现实世界融合的方向发展，形成数字孪生世界，需要从应用的视角同步不同来源的数据。为此，应十分重视时间约束（time-engineered application）。

3. 网络内部机制智能化

未来网络必将向复杂系统方向发展，面对不同的应用场景，对网络服务的需求也会不同。网络流量控制、调度和拥塞控制等机制以及路由算法等，均需根据场景的实际情况进行优化。通过将机器学习和知识图谱等人工智能技术引入网络，可以对用户需求、网络资源以及网络威胁等多维主客观要素进行表示、学习，并在提炼获取知识的基础上，实现决策推理，以及动态调整重构网络。

4. 多维度传感

未来的全方位感知服务将极大增强虚拟服务的便利性和体验性，除了声音、图片和视频等听觉、视觉外，可能还有嗅觉、味觉甚至触觉。新形态的体验将带来不少挑战。触觉、味觉及嗅觉如何实现远程感知？声音和光是波的传送，没有化学反应，而味觉和嗅觉更接近感觉和情感，有直接的“化学”反应。而触觉对网络要求较高，需要毫秒级延迟，并无传输丢包。

1.5.3 计算机网络研究的问题

上述发展需求使计算机网络面临重大的技术挑战，为此应研究如下科学问题以及相应的内容。

1. 高智能化

高智能化是首要的挑战和核心。随着物联网、大数据和人工智能技术的快速发展和加速融合，智能物联网的应用正逐步融入国家重大需求和民生的各个领域，如智慧城市、智能制造和社会治理等。通过各种传感器联网实时采集各类数据，如环境数据、运行数据、业务数据和监测数据等；然后在终端设备、边缘设备或云端通过数据挖掘和机器学习来进行智能化处理和理解，如智能感知、目标识别、预测预警以及智能决策等，

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 38 2023/6/15 14:16:26

为用户提供综合、智能、易用和个性化的服务。高智能化的科学问题是人机物融合完成感知任务的问题，相应的研究内容如临境自然交互、人机协同感知和人机智能演进等。

2. 高实时性

高实时性也是互联网面临的一个重要挑战，如远程手术要求网络时延必须小于 200ms，敏感车联网要求控制时延必须小于 10ms。特别是军事和工业控制等应用，缺乏实时性将导致严重的后果和损失。如 2009—2013 年，因为网络传输延时，美国路基导弹防御系统三次拦截试验均未成功。同时，网络延时的增加还可能使互联网内容提供商蒙受巨大的利润损失。高实时性的科学问题是如何实现竞争资源的实时传输控制，相应的研究内容是扩展安全的分级实时传输控制理论和协同机理。

3. 高安全性

网络安全影响到国家安全。高安全性是计算机网络应用的基础。新一代互联网应该在开放、简单和共享为宗旨的技术优势基础上，建立完备的安全保障体系。从网络体系结构设计出发，保证网络信息的真实性和可追溯性，进而提供安全可信的网络服务。高安全性的科学问题是如何解决互联网体系结构安全可信基础的缺失，实现开放网络环境中的跨域可信访问。相应的研究内容是地址身份结合的网络可信访问体系和行为感知。更重要的是，应建立一个安全可信的新型网络体系结构。

4. 高扩展性

高扩展性是计算机网络应对未来更高要求的保证。新一代互联网应该从以连接计算机系统为主，扩展到连接所有可以连接的电子设备，即接入的终端设备种类和数量将更多、网络规模更大和应用更广泛。扩展性既为网络空间编址和路由带来了新的挑战，也为发展带来了机遇，高扩展性的科学问题实际上是超大空间的高效路由寻址问题。相应的研究内容包括多维分级的大规模编址以及路由的理论与方法。

1.5.4　计算机网络的未来方向

结合计算机网络未来发展的需求和问题，讲解计算机网络未来发展的趋势。

1. 触觉互联网

触觉互联网由德国德累斯顿工业大学（Dresden University of Technology）教授 Gerhard Fettweis 提出。它可以实现远程的触觉感受，从而实现对各类对象的远程控制与服务。触觉互联网需要低延迟、高可靠性和高安全性等能力。它的提出依赖于 5G 技术、虚拟现实、增强现实、新型网络技术、人工智能和触觉感知等技术的不断发展。2018 年，IEEE 成立了触觉互联网工作组，该工作组提出了触觉互联网的基本特征，即“实时感知”和“同步控制”。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 39　2023/6/15 14:16:26

触觉互联网定义了一个具备低时延、高安全性和高可靠性的基础通信网络，它是未来网络发展的主要方向。它的提出为自动驾驶和远程医疗等应用提供了更好的支撑。

触觉互联网的实现还存在诸多技术难点。首先，在网络架构上，如何在当前海量数据场景下，通过网络架构技术的不断创新实现业务的低时延需求。其次，实现触觉的精密化与数字化。触觉精密化是指复制人体皮肤敏感性，如何实现对人体皮肤触感的复制并进行数字化，这是一项极具挑战性的工作。最后，实现安全与隐私。由于当前互联网的开放性，如何保障网络的高安全性与用户隐私一直是研究者们探索的方向。

2. 量子互联网

2018 年，荷兰代尔夫特理工大学（Technische Universiteit Delft）教授 Stephanie Wehner 等在《科学》（*Science*）上发表综述文章，将量子互联网的发展划分为 6 个阶段。2019 年，美国能源部组织了量子网络研讨会，根据有无使用量子中继，将量子通信网络划分为量子局域网、量子广域网和量子互联网三个发展阶段。2020 年 7 月，美国能源部发布量子互联网国家战略蓝图，对照现有 TCP/IP 栈的 5 层结构，期望建立纠缠网络协议栈。物理层主要研究量子信息处理器或者量子计算机，数据链路层主要通过超导或者光量子实现节点的互联，网络层侧重于采用量子存储器实现量子纠缠的高效制备和分发，在传输层与经典网络协同工作，在应用层开展分布式量子信息应用。

量子纠缠网络的代表性成果是，2020 年 9 月，英国布里斯托大学和利兹大学、奥地利科学院与我国国防科技大学等研究机构合作实现 8 节点无可信中继量子网络。不同于目前点对点可信中继的量子通信网络，该研究实现了城域范围内无可信中继的量子纠缠分发网络，具备拓展为更大规模量子通信网络的潜力，从而为用户提供服务。

代尔夫特理工大学 QuTech 研究组在域间量子纠缠网络研究方面的工作具有代表性。他们于 2016 年主导成立了欧洲量子互联网联盟，2019 年在 SIGCOMM 会议上发布了量子网络链路层协议，2020 年介绍了其软件定义量子网络架构，2021 年完成了 3 节点量子网络实验。在 2019 年发布的量子网络链路层协议中，QuTech 研究组基于他们设计实现的金刚石色心纠缠源，将金刚石中一个碳原子替换为氮原子，经过操作可以在原子自旋和激发的光子之间实现纠缠，节点间通过贝尔态测量等方法可以实现多节点间的量子纠缠关联。2021 年 QuTech 研究组在 *Science* 上发表的实验文章，指出已完成了两个演示工作：一是在 3 节点间建立 GHZ 态（greenberger-horne-zeilinger），实现纠缠关联。二是采用 Bob 节点作为纠缠交换节点，实现 Alice 和 Charlie 之间的跨域纠缠互联。

在量子存储与量子中继方面，2021 年 4 月中国科技大学将光存储时间由分钟级提升至 1 小时，并在同年 6 月基于吸收型量子存储器实现了多模式量子中继，为构建高宽带远距离量子网络奠定了基础，表明量子存储与量子中继逐步走向实用化。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 40 2023/6/15 14:16:26

量子互联网未来的发展主要是两方面：一是量子组网技术本身在域内开展确定性纠缠网络研究，同时提升量子存储性能，实现跨域量子互联。二是量子互联网已经可以支撑开展端到端量子安全通信、量子时间同步、分布式量子传感和分布式量子计算研究，旨在促进量子信息技术的全面升级。

3. 太赫兹互联网

太赫兹波是位于毫米波和红外光波之间的电磁波，其频率范围是 0.1 ～ 10THz。太赫兹波拥有无线通信低频段波无法超越的优势：

（1）载波频率高，可以支持数十到上百 Gbit/s 的数据传输速率。

（2）太赫兹波穿透性好，光子能量低、安全性好，可无损检测。

（3）太赫兹波覆盖多数物质的特征谱。

太赫兹通信方面，目前国际上的研究主要以高载波频率和高带宽作为牵引。日本在太赫兹技术的应用上走在了世界前列。如日本大阪大学和日本电报电话公司（NTT）曾在 2008 年北京奥运会上展示了 120GHz 载波频率的太赫兹无线通信技术。日本岐阜大学和软银、日本情报通信研究机构以及俄罗斯托木斯克理工大学等组成的世界级团队于 2021 年 2 月宣布，研究团队利用比手机镜头孔还小的微型天线，成功进行了 300GHz 频带太赫兹无线通信。

太赫兹波独有的优势使太赫兹通信成为星间大容量互联互通的候选核心技术之一，能够解决现有空间微波通信带宽不大、速率不高的问题。同时，由于太赫兹天线的高定向性，可以解决卫星间激光通信组网困难和远距离跟瞄问题。

太赫兹互联网络技术将太赫兹点对点通信技术扩展至多节点组网。由于太赫兹波独有的物理特性，以致实现太赫兹互联网技术面临一系列技术挑战：一是高频、大带宽，100GHz 以上的频率、Tbit/s 级别的超高速率，需要提升分组交换能力，设计面向大容量网络中的拥塞控制技术。二是传输高损耗，太赫兹波在大气中传输衰减严重、信道利用率低、重传概率高，为实现远距离组网，需要研制高效介质访问控制方法和协同中继技术进行转发传输。三是定向窄波束，区别于具有广播特性的传统无线网络，太赫兹组网需攻克定向窄波束的捕捉与跟踪技术、空间多址接入、节点快速发现和控制技术。

太赫兹互联网应用前景广阔。首先，太赫兹通信技术被公认为是 6G 的关键技术之一，有望在下一代通信网络中实现宽带太赫兹通信。其次，太赫兹互联网技术在特定领域的超宽带高速传输具有重要的应用价值。目前，国内外对太赫兹组网技术的研究仍处于起步阶段。

综上，量子互联网和太赫兹互联网等前沿技术的攻关，有望实现网络技术的颠覆性突破。而触觉互联网将使人和机器能够在移动中和特定空间通信范围内实时地与其环

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 41　　2023/6/15 14:16:26

境进行交互，从而改变工业生产、学习和工作方式。这些前沿趋势，不仅是计算机网络未来发展的制高点，也是引领其高质量发展的可能突破点，抑或成为经济社会发展的创新极。

本章小结

本章概述了计算机网络的发展过程，对其发展的 5 个阶段做了简要回顾，并对各个阶段的特点做了分析。接着介绍了计算机网络的组成和功能，分析了计算机网络的构成要素，从宏观角度分析了计算机网络的组成，并重点讨论了计算机网络的类别，其中对按计算机网络的拓扑结构分类、网络控制方式分类、网络作用范围分类、通信传输方式分类、网络配置分类和使用范围分类做了详细论述，深入探讨了计算机网络的体系结构。最后对计算机网络的发展趋势做了简要介绍。

思考题

1.1 什么是计算机网络？计算机网络与分布式系统有什么区别和联系？

1.2 简述计算机网络的发展阶段。

1.3 计算机网络由哪几部分构成？各部分的构成要素是什么？

1.4 计算机网络有哪些功能？

1.5 按拓扑结构，计算机网络可分为哪几类？各有何特点？

1.6 按通信传输方式，计算机网络可分为哪几类？各有何特点？

1.7 计算机网络中为什么要引入分层的思想？

1.8 简述服务、接口、协议的概念。它们之间的联系与区别是什么？

1.9 什么是计算机网络的体系结构？

1.10 简述 OSI 七层参考模型结构，并说明各层的主要功能是什么？

1.11 在 ISO/OSI 中，“开放”是什么含义？

1.12 在 ISO/OSI 中，“透明”是什么含义？

1.13 说明 HDLC 帧的结构，各字段的功能是什么？

1.14 简述 TCP/IP 模型，各层的主要功能是什么？

1.15 简述 IP 的主要功能。

1.16 TCP 与 UDP 之间的差别是什么？

1.17 指出 ISO/OSI 七层参考模型与 TCP/IP 模型之间的异同之处？

1.18 结合自己的体会，论述计算机网络的发展趋势。

计算机网络技术及应用第2版 4校 正文.indd 42 2023/6/15 14:16:26