普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新世纪计算机及相关专业系列教材

第二版

计算机网络原理与技术

华蓓 主编

科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书以简化的OSI参考模型为框架，以主流的TCP/IP技术和应用为主要内容，介绍计算机网络的基本概念、理论与技术。本书的重点是数据链路层、网络层和传输层，阐述计算机网络的基本设计问题与设计技术；应用层主要结合网络基本原理讨论应用层协议工作机制；网络安全介绍基本的网络安全技术及主要的安全应用以使读者对网络安全问题有一个全面的了解。

本书力求做到理论与技术相结合，重点突出，内容精练，论述严谨，通俗易懂。每章后面的习题有助于读者掌握和复习知识要点。

本书适合作为高等院校计算机、电子、通信工程等专业本科生的计算机网络课教科书或教学参考书，也可作为其他专业学生普及计算机网络知识的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络原理与技术/华蓓主编．—2版．—北京：科学出版社，2008

（普通高等教育“十一五”国家级规划教材·新世纪计算机及相关专业系列教材）

ISBN 978-7-03-020971-9

Ⅰ．计… Ⅱ．华… Ⅲ．计算机网络-高等学校-教材 Ⅳ．TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第010686号

责任编辑：陈晓萍/责任校对：柏连海

责任印制：吕春珉/封面设计：王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1998年10月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2008年 2月第 二 版 印张：15 1/2

2008年 2月第十三次印刷 字数：364 000

印数：35 001—38 000

定价：22.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉）

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135763-8003

前　言

计算机网络无疑是当今世界上发展最快、最激动人心的技术之一。从1969年第一个计算机网络诞生至今不足四十年的时间里，计算机网络经历了从无到有、从小到大、从简单到复杂的发展历程，从最初仅有四个节点的实验性网络发展成目前遍布全球的因特网，应用领域也从最初的教育科研领域延伸到几乎所有的人类社会生活领域。

从1998年本书第一版出版以来，计算机网络的技术格局发生了巨大的变化。20世纪90年代中期，各种各样的局域网、广域网呈遍地开花的态势，伴随着多种协议栈存在。进入21世纪之后，经过优胜劣汰的市场竞争，目前得到广泛应用的有线局域网只剩下以太网，几乎所有的广域网都依附于因特网，而TCP/IP协议栈成为唯一流行的协议栈。除了一些技术被淘汰外，大量新的技术不断涌现，如无线局域网、无线城域网、移动通信网、移动自组织网、无线传感器网络等。各种各样的网络应用也以惊人的速度涌现。20世纪90年代中期，Web应用的出现让公众第一次知道了因特网；仅仅过了十几年，今天已有包括电子商务在内的数百种应用建立在Web应用的基础上，正在改变着人们工作、生活与娱乐的方式。与此同时，随着网络的迅速普及以及人们对网络越来越强的依赖性，网络安全问题日益严重并引起世界各国的关注。

为适应网络技术日新月异的发展，作者对本书的第一版做了很大的改动，删除了不少过时的内容，并增加了许多对当前主流技术的介绍，力求使教材内容跟上网络发展的步伐。计算机网络的内容极为复杂，涉及以错综复杂的方式彼此交织的许多概念、协议和技术。为帮助初学者透过复杂的外表看清问题的本质，本书和大多数网络教材一样围绕计算机网络体系结构的层次来组织内容。借助于这种分层的组织结构，读者在学习网络各个局部的特定概念与协议的同时，也能知道所有这些部分是如何整合在一起的。对于每一个层次，本书着重描述该层次上主要的设计问题，以及目前的主流技术是如何解决这些问题的，帮助读者理解计算机网络的构成与运行机制。本书以因特网的体系结构和协议为基本载体来学习计算机网络的基本知识，这是因为因特网是计算机网络最具体、最实际和最广泛的应用实例，学习身边熟悉的网络有利于激发读者的学习兴趣。

作为60学时课程的一本教材，本书不可能在有限的篇幅内涉及太多的内容，因此本书仅着重介绍计算机网络的基本概念、基本理论与主要技术。事实上，尽管计算机网络一直在不停地发展，新兴的网络技术让人眼花缭乱，目不暇接；但是计算机网络领域中的许多革命性创新往往发生在底层的通信技术（如光纤通信、无线移动通信）及上层的应用（如流媒体、对等文件共享、即时讯息等）上，介于这两者之间的网络部分虽然也在不断地改进和调整，但却是基本保持稳定的。这个部分正是计算机网络的核心，其基本设计原则在几十年的实践中已经证明是非常有效的，并且在未来的网络中也是有效的。网络基本原理的掌握不仅能使读者理解今天的网络，也能使他们迅速理解几乎任何一种网络技术。这个部分正是本书的重点。

为与因特网体系结构（即TCP/IP体系结构）相适应，本书以简化的OSI参考模型

（去掉了会话层和表示层）为框架，以主流的 TCP/IP 技术和应用为主体，介绍计算机网络的基本知识。全书共分八章，第一章概述计算机网络的发展、全书使用的核心概念以及计算机网络体系结构，第二章至第七章分别介绍从物理层到应用层的主要设计问题及基本技术，第八章讨论网络安全。数据链路层、网络层和传输层是本书的重点，网络的主要设计问题主要集中在这几个层次上。应用层主要结合前面章节介绍的网络原理讨论若干典型的网络应用，重点放在对应用层协议工作机制的理解上，而不过多涉及协议的细节。网络安全本身是一个非常广泛的研究领域，本书以网络安全应用为主线，介绍基本的网络安全技术及主要的安全应用，以使读者对网络安全问题及主要安全措施有一个总体的了解。第二版比第一版的另一个重要改进是每章后面都增加了习题，包括有一些动手的习题，要求学生写少量代码或使用现成的网络工具进行实验。

本书可以作为高校电子类专业学生的计算机网络专业课教材，也可以作为非电子类专业学生的计算机网络公共课教材。教师可根据授课专业的不同，有选择地讲授教材中的部分内容。对于计算机专业的学生，建议讲授教材中的全部内容。为便于教学，我们可以为广大教师提供本书的习题答案、实验素材、教学课件及全书的插图，欢迎广大教师向出版社索取。部分资料可从科学出版社网站（www. sciencep. com）的下载区或者作者的教学主页（http://staff. ustc. edu. cn/～bhua）下载，习题答案可发邮件（cxp666@yeah. net）向出版社索取。

作者在此要特别感谢中国科学技术大学的杨寿保教授，他在百忙之中仔细审阅了全稿，并对书稿提出了宝贵的意见。中国科学技术大学给予本书的编写提供了足够的资金支持。作者谨向所有为本书的修订与出版提供支持与帮助的人致以最诚挚的谢意，同时向参考文献中的各位作者表示衷心的感谢。

限于时间和学识水平，书中难免存在不妥和错误之处。如果发现本书有任何错误或有任何建议，欢迎给作者发送电子邮件（bhua@ustc. edu. cn），作者将与出版社联系在重印本书时改正错误。

华　蓓

2007 年 8 月 10 日

目　录

第1章 概 述

二十多年前网络还是一个鲜为人知的名词，十多年前浏览器的出现将因特网迅速推向公众，而现在网络已广泛应用于教育、科研、军事、管理、商业、文化等各个领域，连接着世界上几乎所有国家的亿万人口。从具有连网 PC 的传统办公区域到拥有智能家电和宽带接入的家庭网络，从提供无线接入功能的公共场所到能够随时随地上网的移动电话，到嵌入了无数连网传感器的建筑物、道路、生态保护区……网络已经无处不在。

随着计算机网络爆炸式的发展，计算机网络的新技术也层出不穷，从固定网络到移动网络，从有线网络到无线网络，从有基础设施的网络到无基础设施的网络，从被动网络到主动网络，从单纯的通信网络到集成了感知、计算和通信功能的智能无线传感器网络……尽管如此，计算机网络的一些基础理论与技术仍然是相通的。本书将向读者介绍计算机网络的基本概念、理论与技术，以帮助读者理解计算机网络的构成与运行机制，使读者不仅能理解今天的网络，也能理解明天的网络。

本书选择因特网作为讨论计算机网络的主要载体，因为因特网是目前世界上规模最大也是最为人熟知的计算机网络，它也是人类历史上一个伟大的里程碑，人类正是由此而进入了一个前所未有的信息化社会。计算机网络是一个复杂的系统，它的复杂性表现在网络不存在简单和统一的技术，多个组织可以定义各自的网络技术和标准，而这些技术和标准可能并不兼容，导致使用这些标准生产出来的网络产品和服务不能完全兼容；其次，网络的复杂性还表现在当连接两个或多个网络时可以使用多种技术，因此出现了许多不同的网络组合。为了克服网络的复杂性，本书主要关注于对概念的理解，而不是那些不必要的细节。比如，本书将重点解释每个网络设计问题的背景、每一种网络技术的目的、每一种技术的优点和缺点以及产生的结果等。建议读者在阅读的过程中也要超越细节，集中于对概念的理解。

1.1 计算机网络的发展

当第一个真正意义上的计算机网络——阿帕网（ARPANET）于 1969 年诞生时，它只连接了四个节点，链路速度仅为 56kb/s，节点间通过专门的通信交换机（IMP）和专门的通信线路相互连接。但它是世界上第一个采用存储—转发方式的分组交换网络，它不论是在概念、结构还是网络设计上都为后来的计算机网络奠定了基础。

阿帕网的成功使它在短短的三年间就跨越了全美，并且随着 1974 年 TCP/IP 协议的问世及其核心技术的免费发布，更多的网络加入了阿帕网。20 世纪 70 年代末到 80 年代初是计算机网络蓬勃发展的时期，各种各样的网络应运而生，网络的规模和数量都有很大的发展。由于阿帕网为美国军方所有，只有获得美国联邦机构合同的学校才能使用，为此美国国家科学基金会（NSF）于 1986 年开始投资筹建面向全美大学的

NSFNET，并鼓励和资助各大学及研究机构将自己的局域网加入 NSFNET。从 1986 年到 1991 年，NSFNET 的子网迅速增加到 3000 多个。NSFNET 的正式营运以及实现与其他已有和新建网络的连接开始真正成为因特网的基础。

当进入 20 世纪 90 年代时，因特网事实上已经成为一个网际网，即各个子网分别负责自己的架设和运作费用，而这些子网又通过 NSFNET 互连起来。随着计算机网络在全球的拓展和扩散，美洲以外的网络也逐渐接入 NSFNET 主干或其子网。由于网络规模的急剧扩大及许多商业组织希望加入，政府不可能继续资助网络，于是在 1990 年开始了因特网的商业化过程，此举成为推动因特网发展的强大动力。1995 年 NSFNET 停止运作，因特网商业化过程完成，至此不再有任何一个组织或机构可以完全控制因特网。

1991 年欧洲原子能研究中心的 Tim Berners-Lee 发明了万维网，即 World Wide Web（WWW），这是因特网发展史上又一个重大事件。WWW 良好的界面大大简化了因特网的操作，从而将因特网带入了世界上数以百万计的家庭和企业中。作为一个平台，Web 也引入并设置了数百个新的应用程序，包括在线股票交易和银行业务、流式媒体服务和信息检索服务等。从 20 世纪 90 年代后期开始，因特网进入了爆炸式发展的时期。

今天的因特网已成为海量信息的载体和一个巨大无比的通信网络，在它上面运行着数百个流行的应用程序，包括 Web 冲浪、即时讯息、音频和视频流、因特网电话、分布式游戏、对等（peer-to-peer，P2P）文件共享、电子邮件等。

未来的网络将朝着更快、更好、更灵活和更安全的方向发展。传输链路及核心路由器的接口速率将越来越高，基于全光交换技术的光路由器将替代目前的“电”路由器，成千上万倍地提高网络速度。三网合一将成为现实，现有的电信网络、计算机网络以及广播电视网络将相互融合形成一个统一的网络系统，由一个全数字化的网络设施来支持包括数据、话音和视频在内的所有业务的通信，为各类用户提供满意的服务。无线和移动技术的发展和普及将给未来的网络带来更大的灵活性，宽带无线接入点将随处可得，无处不在的微型无线传感器将成为接入因特网的高速通道，用户将可随时随地使用任何设备接入网络，获得各种想要的信息。另外，先进的网络安全技术的运用及用户普遍提高的安全意识将使计算机网络变得更加安全。

1.2 什么是计算机网络

简单地说，计算机网络是指由单一技术连接起来的一群计算机，这里“连接”的含义是相互之间能够交换信息。这个定义是对异常复杂的计算机网络系统的一个极其简单的概括，我们有必要在这里稍稍作一些展开，以便对计算机网络的组成及运行机制有一个初步的了解。

从这个简单的定义可以看出，计算机网络至少应包括计算机、通信链路、通信协议及网络软件几个部分。

计算机（典型的包括 PC 机、工作站和服务器）用因特网的术语称为主机（host）或端系统（end system），运行着应用程序，是信息的源头和终点。

通信链路（包括双绞线、同轴电缆、光纤、无线电频谱等）提供端系统之间的连通性。节点之间的连接方法可以是点到点连接（图 1.1（a））或者多路访问（图 1.1（b）），当然这两种连接方法在网络覆盖的地理距离及所能连接的计算机数目上是不同的。如果限定所有节点都通过一个公共的物理介质彼此连接，那么网络的可扩展性是很差的，通常网络中使用交换设备（交换机、路由器等）来实现端系统间的间接连接（图 1.2）。连接了至少两条链路的交换设备将从一条链路收到的数据转发到另一条链路上，按这种方式连接起来的多个交换设备就形成了一个交换网。

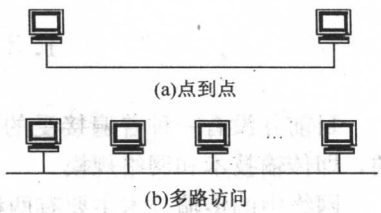

图 1.1　直连链路

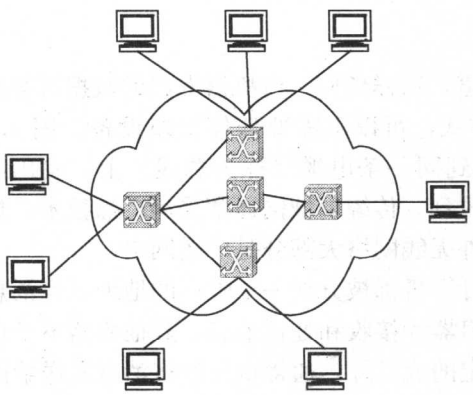

图 1.2　交换网

仅有物理上的连接还不能保证端系统间能够相互通信。端系统至少应能说明它想和哪个端系统通信，并且由源节点发出的数据应能在交换网中通过交换设备的逐跳转发正确到达目的节点。第一个问题可以通过给每个端系统指定一个唯一的地址来解决，第二个问题就是网络中的路由问题。由于网络是通过节点间的相互协作来完成整个通信过程的，这就要求通信双方必须遵守共同的约定和通信规则（称通信协议），对诸如数据的表示、组织、传输、控制等有共同的认识。

协议实现通常由硬件和软件配合完成。除了协议软件外，还需要有控制和管理网络运行、分配和管理共享资源的软件，如网络操作系统。另外，应用是网络存在的目的，每一种网络应用都需要有相应的软件为用户提供访问网络的手段及相关的网络服务。以上所有这些软件合称为网络软件。

在上面的叙述中我们还忽略了“单一技术”这个限定词。由于计算机网络存在着多种技术和标准，而采用不同技术和标准的网络可能互不兼容，因此通常把采用不同技术的网络看成是不同的网络。另外，从网络管理的角度还将处于不同管理域的网络看成是不同的网络。不同的独立网络通过交换设备互连可以形成一个互连网络（图 1.3，其中每个独立网络用云图表示），按照因特网的术语用小写 i 开头的 internet 表示，而大写开头的 Internet 总是表示因特网。因特网就是由无数独立网络互连而形成的一个巨大无比的互连网络。

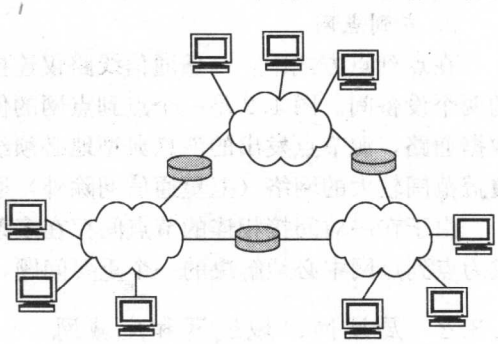

图 1.3　网络的互连

1.3 计算机网络的分类

目前并没有一种普遍接受的网络分类法，但有两个设计维度被公认为是非常重要的，即传输技术和网络规模。

网络中的传输技术主要有两种：广播方式和点到点方式，采用这两种技术的网络分别称为广播网和点到点网。网络规模通常以网上相距最远的两台计算机之间的距离来衡量，网络按规模大小通常分为局域网、城域网和广域网三种。下面分别讨论这两种分类方法，以及每一种分类法下每种网络的特点。

1.3.1 广播网与点到点网

1. 广播网

广播方式是令所有计算机共享一条通信信道，这样任何一台机器发出的数据可被所有其他机器接收到。这是一种最简单的组网方式，可以不需要任何交换设备。图 1.1 (b) 是一个广播网的示意图，所有机器被连接到同一条电缆（称为总线）上，发出的消息沿着电缆向两边传输，网上所有机器都能收到。传统局域网通常采用广播技术，如总线式以太网、令牌环网、令牌总线网等，另外无线网络大部分是广播网络。

为了指定接收和处理消息的计算机，每个计算机都被分配一个唯一的地址，且消息中用一个地址域来记录目的地址，只有指定的机器才接收和处理消息，其他机器不予理睬。广播网络除允许将消息发送给网上某个特定的成员外，通常也允许将消息发送给网上的所有成员或者部分成员，这三种发送方式分别称为单播、广播和多播。可以使用地址域中的特殊位来区分这三类地址，我们将在 4.3.1 节详细讨论这个问题。

由于所有机器共享一条信道，每次就只能由一台机器发送，否则会因为信号发生冲突导致发送失败。如何协调各个机器之间的消息发送是广播网必须解决的一个重要问题，这个问题称为介质访问控制（media access control），我们将在第 4 章详细讨论这个问题。

2. 点到点网

在点到点方式中，一条通信线路仅连接两台设备，直接的数据交换只能发生在直连的两个设备间。图 1.2 是一个点到点网的例子，源节点和目的节点间一般不存在直接的数据通路，源节点发出的消息典型地必须经过若干中间节点的转发才能到达目的节点。覆盖范围较大的网络（卫星通信网除外）通常采用这种技术，如因特网主干。

由于在一对间接相连的节点间存在多条可能的转发路径，如何选择最佳的转发路径成为点到点网中必须解决的一个重要问题，我们将在 5.2 节重点讨论这个问题。

1.3.2 局域网、城域网和广域网

网络规模在十几米至几公里的为局域网，在几十公里的为城域网，一百公里以上的为广域网。这样划分的目的是因为网络的大小通常预示着它能使用的基本技术，其中关键的因素是数据从网络的一端传播到另一端所花的时间。我们将在后面几章中讨论这个问题。

1. 局域网

局域网（local area network，LAN）广泛用于将小范围内的个人计算机和工作站连接起来以共享资源（如打印机）和交换信息，其地理范围一般局限在一个房间、一幢大楼或一个校园。

局域网最典型的特点是传输距离短，最坏情况下的端到端通信延迟有界且可预测，这个特点可用来大大简化通信协议的设计。同样因为传输距离短，局域网通常可以获得很高的传输速率和很低的误码率。传统局域网通常运行在 10Mb/s～100Mb/s，现在的局域网已经能达到 10Gb/s 甚至更高的速度。

传统局域网通常采用广播技术，使用双绞线及同轴电缆按总线或环型拓扑进行组网；现在的交换式以太网则采用点到点传输技术，使用双绞线或光纤按星型拓扑进行组网。

2. 城域网

城域网（metropolitan area network，MAN）覆盖一个城市，其目标是在较大的地理区域内提供数据、声音和图像的集成服务。

最熟悉的城域网例子是有线电视网。从 20 世纪 90 年代后期开始，有线电视网不再只是传播电视节目，它开始利用有线电视电缆中未用的频谱部分向公众提供双向 Internet 服务，从而开始了向城域网的转变。有线电视网还不是仅有的城域网，最近几年在宽带无线接入方面的研究产生了另一个城域网标准 802.16，其设计目标是为住宅用户提供数字电话、因特网访问、远程局域网连接、电视和无线电广播等服务。

与局域网仅服务于某个单位内部不同，城域网是要为公众提供公共服务，因此服务质量和网络安全是城域网要重点解决的问题。

3. 广域网

广域网（wide area network，WAN）覆盖更大的地理区域，常常是一个国家或一个洲。广域网由端系统和通信子网两部分组成：端系统是运行用户程序的计算机集合，归用户所有；通信子网由交换设备和通信链路构成，归电话公司或因特网服务提供商所有，负责为端系统传递数据。大部分广域网（卫星通信网除外）的通信子网采用点到点传输技术。

较早期的广域网采用 X.25 及帧中继技术，普遍存在传输时延长、数据速率低及误码率高的缺点。现在随着光通信技术的发展及 POS（PPP over SDH）技术的使用，广域网主干的速率已经达到了 10Gb/s 及以上，且误码率非常非常低。

1.4 网络体系结构

计算机网络是一个复杂的系统，在网络上即便是执行一个简单的操作，也需要涉及一连串复杂的功能。以人们熟知的 Web 应用为例，当我们点击网页上的一个链接时，我们知道该链接指向的网页会被取回，并显示在屏幕上。那么在这期间到底发生了哪些事情呢？首先每个网页都有一个唯一的标识符，称为统一资源定位器（uniform resource locator，URL），如 http://cs11.ustc.edu.cn/abc.doc。它包括三个部分：http 表明下载网页时要使用超文本传输协议 HTTP，cs11.ustc.edu.cn 是提供网页的计算机

的名字，abc.doc 给出了网页在该计算机上的路径名。用户机器要做的第一件事情是将目标计算机的名字翻译成机器能够识别的因特网地址，这需要和提供这种名字翻译服务的域名服务器进行消息交互来获得。其次要将网页请求命令放在 HTTP 消息中发送给目标计算机。由于源机器和目标机器之间通常不存在直接的连接，消息必须经由中间节点的逐跳转发才能到达。中间节点是如何根据目标机器的地址找到正确的转发路径的呢？事实上每个中间节点都需要执行一个路由发现机制来发现并维护到所有可能的目的地址的转发路径，并在需要转发消息时查找路由表。当消息从一个节点发送到另一个节点时，消息必须转换成电信号或光信号在物理信道中传输，这要求相邻两个设备的收发器必须能彼此识别对方的信号并遵循相同的通信规程。当两个设备之间使用的是共享的广播信道时，它们还必须遵循相同的介质访问控制方法以决定谁可以使用信道发送。当网页请求消息到达目标机器时，目标机器取出被请求的网页，并用另一条包含网页的 HTTP 消息来响应，响应消息的发送需要经历同样的过程。如果这个网页过大，目标机器可能需要将它分成几个部分分别传输，然后在接收端机器上重新组装成一个完整的网页。如果这几个部分在传输的过程中发生损坏、丢失或者未按照顺序到达，接收机器该怎么办？为确保用户正确接收到网页，这两台机器之间必须建立起一条可靠的连接，接收机器要能够检测出传输错误并请求发送方重发出错的消息，并按照正确的顺序组装消息的各个部分，将完整的网页呈现给用户。

从以上描述已能看出网络设计的复杂性，而事实上这才只涉及问题的一小部分。我们尚未考虑到网络的互操作问题（不同技术或标准的网络如何兼容）、健壮性问题（网络出现故障或崩溃怎么办）、安全性问题（网络遭到攻击怎么办）、服务多样性问题（如何满足不同应用及不同用户的各种需求）以及网络的控制和管理问题等。

面对这样一个复杂的系统，网络设计者们已经制定了通用的蓝图（通常称为网络体系结构）用以指导网络的设计和实现。下面我们将介绍所有网络体系结构共同的核心思想，然后介绍两个具有代表性的参考体系结构。

1.4.1 分层结构

面对计算机网络的复杂需求，网络设计者们使用结构化设计的方法对网络进行分析和理解。其基本思想是将网络按照功能划分成一系列的层次，即从底层硬件提供的服务开始向上增加一系列的层次，每一层都为上层提供某些特定的服务，并向上层屏蔽实现这些服务的细节，高层仅使用低层提供的服务来实现本层的功能。例如，总结上面的例子，可以想象在应用程序和底层硬件之间夹有四个层次，硬件上面的第一个层次实现物理信号级的连通，即物理信号的识别和通信规程的实现；第二个层次实现共享广播信道的访问策略（如果使用的是广播信道）；第三个层次实现将消息从源节点传输到目的节点；第四个层次负责消息传输的正确性及顺序。

分层设计的好处是：①可以将一个复杂的大问题分解为一些容易处理的小问题，然后分而治之，逐一解决，简化系统的设计和实现；②当需要修改或增加服务时，只需要修改相应层次的功能，其他层次不受影响，易于系统的维护和升级。

以分层作为基础，下面我们更深入地来讨论网络的体系结构。图 1.4 是一个计算机网络的层次模型，其中第 N－1 层是第 N 层的服务提供者，第 N 层称为第 N－1 层的服

务使用者，而它同时又是第 N+1 层的服务提供者。事实上，系统的每一层上不只提供一种服务，而是有多种服务，但这些服务都建立在相同的低层服务之上。

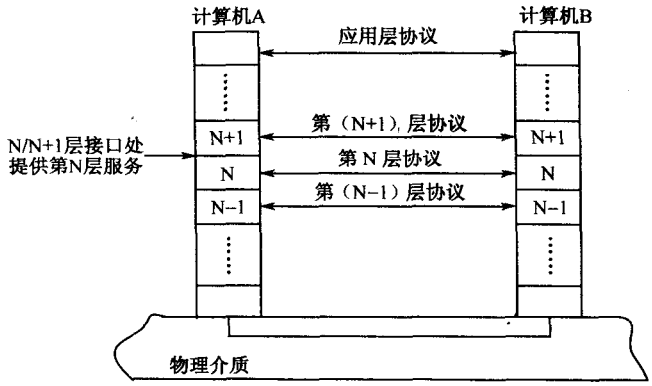

图 1.4　计算机网络的层次模型

系统的每一层上都有若干活动元素，称为实体，实体可以是软件（如一个进程）也可以是硬件（如一个智能 I/O 芯片）。不同机器上位于同一层中实现同一种服务的实体称为对等实体。不同系统间进行通信，实际上是各对等实体间在进行通信。对等实体间通信所要遵循的规则的集合称为协议。

事实上，除了在物理介质上进行的是实通信之外，其余各对等实体间进行的都是虚通信，即并没有数据流从一个系统的第 N 层直接流到另一个系统的第 N 层。每个实体只能和同一系统中上下相邻的实体进行直接的通信，不同系统中的对等实体是没有直接通信能力的，它们间的通信必须通过其下各层的通信间接完成。第 N 层实体向第 N+1 层实体提供的在第 N 层上的通信能力称为第 N 层的服务。由此可见，第 N+1 层实体通过请求第 N 层的服务完成第 N+1 层上的通信，而第 N 层实体通过请求第 N−1 层的服务完成第 N 层上的通信，以此类推直到最底层，最底层上的对等实体通过连接它们的物理介质直接通信。

相邻实体间的通信是通过相邻层间的接口进行的，这个接口称为服务接口。它定义了下层向上层提供的服务以及上层调用下层服务所使用的形式规范语句。这些形式规范语句称为服务原语（service primitive）。对等实体间通信所使用的接口称为对等接口，它定义了对等实体间交换的消息的格式和含义。换句话说，每一层上均定义了两类接口，服务接口用于定义本地输出的通信服务，而对等接口用于管理与对等实体间的消息交换以实现该通信服务。

网络的层次划分及协议统称为网络体系结构。网络体系结构的描述必须包含足够多的信息以帮助实现者构造可互操作的系统，即系统的每一个层次都正确执行相关协议。实现细节及服务接口均不属于网络体系结构的一部分，因为这些都是隐藏在各个端系统中，对外是不可见的。

1.4.2　封装和多路复用

由于任一层上都可能有提供不同服务的多种协议存在，所以我们通常用协议图

(protocol graph) 来表示构成网络系统的协议组，其中节点对应协议，边表示依赖关系。图 1.5是一个协议图的例子，其中文件传输和 Web 应用使用 TCP 协议来建立可靠的传输连接，视频应用依靠 RTP 协议和 UDP 协议实现实时的视频数据传输，而 TCP 和 UDP 均依赖 IP 协议将数据包从源节点传输到目的节点，云图表示某种具体的物理网络。

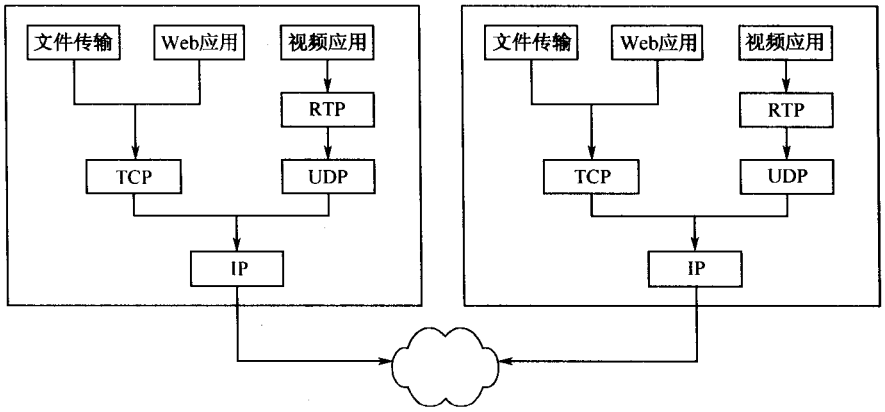

图 1.5　协议图示例

我们来看一下应用程序（如文件传输）发出的消息是如何到达另一端的应用程序的。由于 TCP 的任务只是将应用程序交给它的数据准确无误地传送到另一个系统上，它并不需要去解释这些数据的含义，但为了可靠地传输这些数据，它必须告诉对等实体一些额外的信息。比如，为了便于对等实体检测出收到的数据是否存在传输错误，它必须先对数据计算一个差错编码，然后将差错编码传给对等实体以便进行差错校验。再比如，当所要传输的数据量较大需要分成多个数据块传输时，为了便于接收端将收到的数据块按顺序组装起来，需要将每个数据块的序号告诉对方。为了传输这些控制消息，发送端的 TCP 实体要将一个头部（header）附加到所要传输的数据块前面。一般来说，头部是一个小的数据结构，从几个字节到几十个字节，用于对等实体之间的通信。在有些情况下，对等实体之间的控制信息附在数据块的末尾发送，这时称为尾部（tailer）。头部或尾部的确切格式由协议规范定义，这时数据块称为有效载荷（payload）。当数据块被加上了头部或尾部之后，我们称该数据块被封装（encapsulate）在了一个协议消息中。这个封装过程在协议图的每一层被不断重复。例如，IP 协议实体在 TCP 消息上加上自己的头部，即封装 TCP 消息，然后将 IP 消息传给下层实体。当 IP 消息通过网络发送到目的端系统时，它将以相反的顺序被处理：目的端系统上的 IP 协议实体首先剥下 IP 消息前面的头部，解释头部（即按头部的内容采取相应的动作），然后将载荷部分向上传递给 TCP 协议实体；TCP 协议实体剥下 TCP 消息的头部并解释，然后将 TCP 消息的载荷向上传给应用程序。在目标主机上由 TCP 传递给应用程序的载荷正是在源主机上由应用程序传递给 TCP 的数据，应用程序看不见任何加到消息上以实现更低层通信服务的头部。

从协议图可以看到，多个高层实体可以调用同一个低层服务发送消息。如文件传输和 Web 应用都调用 TCP 发送应用消息，而 TCP 和 UDP 都调用 IP 发送它们自己的消

息。这种多个实体共用同一个服务的方式称为多路复用（multiplexing）。那么，当消息到达目的端系统后，低层协议实体如何知道它应将消息的载荷送给哪一个上层实体呢？事实上，在每个消息的头部都包含有一个标识符，用于记录消息从属的实体，这个标识符称为解多路复用关键字（demultiplexing key）。低层协议实体正是通过检查消息头部的解多路复用关键字，将消息发送到正确的高层实体。

1.4.3 OSI 参考模型

为了规范网络体系结构的设计，国际标准化组织（International Standards Organization，ISO）于 20 世纪 80 年代提出了开放系统互连（Open System Interconnection，OSI）参考模型，简称 OSI 参考模型，其目的是使不同厂家生产的计算机系统和网络设备能够互连互通。OSI 参考模型本身并不是一个网络体系结构，因为它没有为每一层规定确切的服务及协议，它只是说明了每一层应当做些什么。虽然 ISO 后来也为每一层制定了协议标准，但这些标准很少被使用，其重要性远远比不上 OSI 参考模型。OSI 参考模型的最大优点是它的通用性，即它的层次功能划分对于大多数的网络来说都是适用的。

OSI 参考模型将网络按功能划分为七个层次，从低到高依次为物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层，如图 1.6 所示。下面依次介绍各层的主要功能。

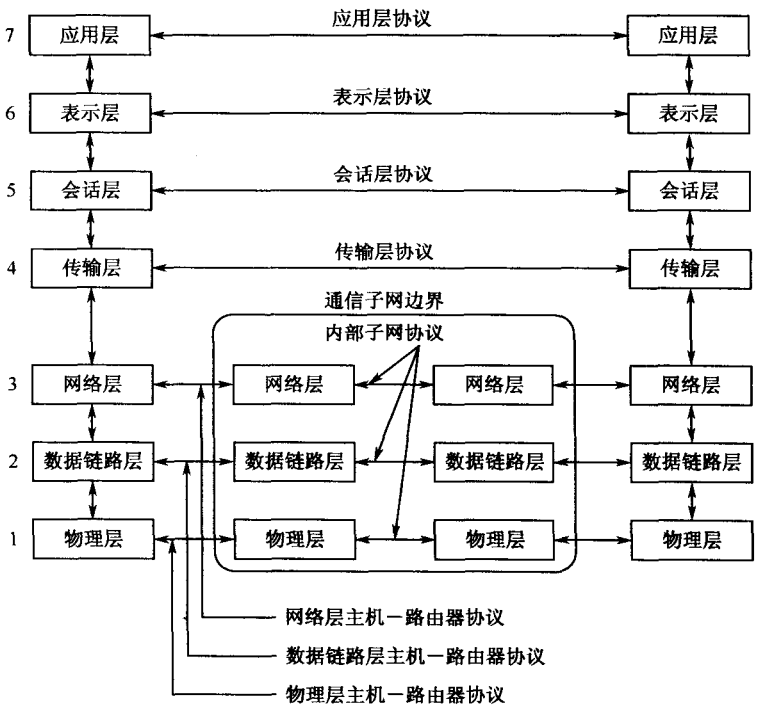

图 1.6 OSI 参考模型