

21世纪高等学校计算机规划教材

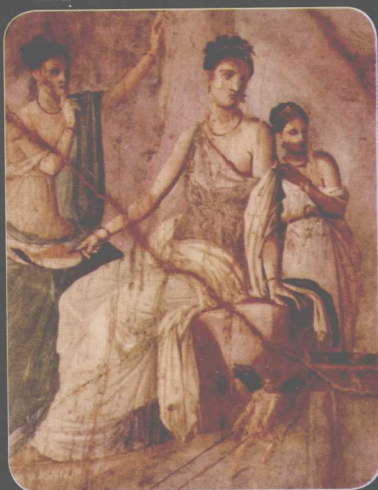
21st Century University Planned Textbooks of Computer Science

计算机网络(第2版)

Computer Networks (2nd Edition)

高传善 毛迪林 王雪平 编著

- 精选内容, 突出重点
- 注意应用性, 不片面追求理论完整
- 减少陈旧内容, 增加最新网络实用技术



名家系列



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

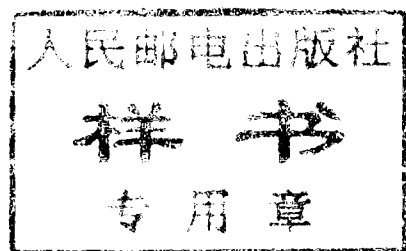
21世纪高等学校计算机规划教材

21st Century University Planned Textbooks of Computer Science

计算机网络 (第2版)

Computer Networks (2nd Edition)

高传善 毛迪林 王雪平 编著



名家系列

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

计算机网络 / 高传善, 毛迪林, 王雪平编著. —2版.
北京: 人民邮电出版社, 2009. 7
21世纪高等学校计算机规划教材
ISBN 978-7-115-19824-2

I. 计… II. ①高…②毛…③王… 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 (2009) 第058059号

内 容 提 要

本书是在作者编写的高等学校 21 世纪教材《计算机网络》的基础上, 适应计算机网络的发展, 并参考读者对该书的反馈意见而重新修订编写的。

本书面向非计算机专业使用, 在讲清基本原理的同时, 更注重其应用性, 而不片面地追求其理论的系统性和完整性。第 2 版在内容和编排结构上都作了较大的更新与调整, 篇幅也从 9 章调整压缩为 8 章, 即计算机网络基础、通信子网的基本技术、共享信道的传统局域网、基于交换的高速网络、广域网、无线网络、网络软件与应用以及网络管理与网络安全。这 8 章内容更适应一学期教学的需要。

本书可作为高等学校非计算机专业教材, 也可供从事计算机网络工作的人员学习参考。

21 世纪高等学校计算机规划教材

计算机网络 (第 2 版)

-
- ◆ 编 著 高传善 毛迪林 王雪平
责任编辑 刘 博
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.75
字数: 435 千字
印数: 12 001—15 000 册
- 2009 年 7 月第 2 版
2009 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-19824-2/TP

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

计算机科学与技术日新月异的发展,对我国高校计算机人才的培养提出了更高的要求。许多高校主动研究和调整学科内部结构、人才培养目标,提高学科水平和教学质量,精炼教学内容,拓宽专业基础,优化课程结构,改进教学方法,逐步形成了“基础课程精深,专业课程宽新”的良性格局。作为大学计算机教材建设的生力军,人民邮电出版社始终坚持服务高校教学、致力教育资源建设的出版理念,在总结前期教材建设的成功经验的同时,深入调研和分析课程体系,并充分结合我国高校计算机教育现状和改革成果,推出“推介名师好书,共享教育资源”的教材建设项目,出版了“21世纪高等学校计算机规划教材”名家系列。

本套教材的突出特点如下:

(1) 作者权威 本套教材的作者均为国内计算机学科中的学术泰斗或高校教学一线的教学名师,他们有着深厚的科研功底和丰富的教学经验。可以说,这套教材汇聚了众师之精华,充分显示了这套教材的格调和品位。无论是刚入杏坛的年轻教师,还是象牙塔内的莘莘学子,细细品读其中的章节文字,定会受益匪浅。

(2) 定位准确 本套教材是为普通高等院校的学生量身定做的精品教材。具体体现在:一是本套教材的作者长期从事一线科研和教学工作,对高校教学有着深刻而独到的见解;二是本套教材在选题策划阶段便多次召开调研会,对普通高校的教学需求和教材建设情况进行充分摸底,从而保证教材在内容组织和结构安排上更加贴近实际教学;三是组织有关作者到较为典型的普通高等院校讲授课程教学方法,深入了解教师的教学需求,充分把握学生的理解能力,以教材内容引导授课教师严格按照科学方法实施教学。

(3) 教材内容与时俱进 本套教材在充分吸收国内外最新计算机教学理念和教育体系的同时,更加注重基础理论、基本知识和基本技能的培养,集思想性、科学性、启发性、先进性和适应性于一身。

(4) 一纲多本,合理配套 根据不同的教学法,同一门课程可以有多本不同的教材,教材内容各具特色,实现教材系列资源配套。

总之,本套教材中的每一本精品教材都切实体现了各位教学名师的教学水平,充分折射出名师的教学思想,淋漓尽致地表达着名师的教学风格。我们相信,这套教材的出版发行一定能够启发年轻教师们真正领悟教学精髓,教会学生科学地掌握计算机专业的基本理论和知识,并通过实践深化对理论的理解,学以致用。

我们相信,这套教材的策划和出版,无论在形式上还是在内容上都能够显著提高我国高校计算机专业教材的整体水平,为培养符合时代发展要求的具有较强国际竞争力的高素质创新型计算机人才,为我国普通高等教育的计算机教材建设工作做出新的贡献。欢迎各位老师和读者给我们的工作提出宝贵意见。

前 言

本书第一版自出版以来已被许多学校计算机科学与技术专业或相关非计算机专业采用。但是，这几年计算机网络又有了持续飞速的发展，为了适应这种变化，我们在第一版的基础上根据读者的反馈意见进行了修订再版。

本书遵循优化结构、精选内容、突出重点和提高质量的原则，面向非计算机专业，在讲清基本原理的同时，更注重其应用性，而不片面追求其理论的系统性和完整性。本书虽是在原教材基础上进行修订的，但内容和编排结构都作了较大的调整，缩减或删除相对陈旧或目前使用较少的内容（如 ALOHA、令牌网和 ATM 等）的同时，增加对最近涌现出来的网络实用新技术（多种新型的无线网络和虚拟专网等）的介绍。内容上的增删、修改和调整几乎到处都有。在结构上也作了一些调整，篇幅从 9 章调整压缩为 8 章，即计算机网络基础、通信子网的基本技术、共享信道的传统局域网、基于交换的高速网络、广域网、无线网络、网络软件与应用以及网络管理与网络安全。

作为教材，在每章后面都附有足够的练习题，可供教师和学员选择使用。参考文献列出的文献都是 2000 年以后出版的，并且全是目前书市中可以买到的，英文参考书全有中译版。由于书中内容覆盖面广，并包括了许多新的技术和进展，本书也可供从事计算机网络方面研究或应用的科研与工程技术人员自学或作为参考书阅读使用。由于其应用性的特点，也可用作培训班的教材。

本书由高传善、毛迪林和王雪平编写。高传善拟定了编写内容和大纲，执笔编写了第 1、第 2 和第 8 章，毛迪林执笔编写了第 3、第 4 和第 5 章，王雪平执笔编写了第 6 和第 7 章的内容。限于时间与水平，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 计算机网络基础1	
1.1 计算机网络的发展1	
1.1.1 计算机与通信相结合1	
1.1.2 以 ARPA 网为代表的计算机 网络2	
1.1.3 开放式标准化的计算机网络4	
1.1.4 网络计算的新时代6	
1.2 计算机网络的体系结构8	
1.2.1 层次模型8	
1.2.2 开放系统互连基本参考模型10	
1.2.3 因特网的体系结构14	
1.2.4 OSI 与因特网参考模型比较14	
1.3 计算机网络的组成与应用16	
1.3.1 什么是计算机网络16	
1.3.2 通信子网与资源子网17	
1.3.3 常用的网络设备17	
1.3.4 网络应用18	
1.3.5 Internet 工作原理和主要功能20	
1.4 计算机网络的分类27	
1.4.1 按拓扑结构分类27	
1.4.2 按地理范围分类27	
1.4.3 按物理传输介质分类28	
1.4.4 其他分类28	
习题29	
第 2 章 通信子网的基本技术30	
2.1 物理传输介质30	
2.1.1 双绞线30	
2.1.2 同轴电缆31	
2.1.3 光纤31	
2.1.4 无线传输介质32	
2.1.5 通信卫星34	
2.2 传输技术36	
2.2.1 数据通信中的若干技术参数36	
2.2.2 模拟传输与数字传输39	
2.2.3 数字调制技术40	
2.2.4 脉码调制41	
2.2.5 多路复用43	
2.2.6 数字信号的编码技术44	
2.3 差错控制技术46	
2.3.1 差错的检测与校正46	
2.3.2 奇偶校验码48	
2.3.3 海明码50	
2.3.4 循环冗余码52	
2.4 数据链路常用技术55	
2.4.1 帧定界方法55	
2.4.2 反馈重发57	
2.4.3 滑动窗口57	
2.5 交换技术63	
2.5.1 电路交换63	
2.5.2 分组交换64	
2.5.3 信元交换64	
2.6 接入技术64	
2.6.1 早期的低速接入65	
2.6.2 xDSL65	
2.6.3 有线通 HFC65	
2.6.4 无线接入66	
习题66	
第 3 章 共享信道的传统局域网68	
3.1 局域网标准68	
3.1.1 IEEE 802 与 ISO 880269	
3.1.2 介质访问控制子层71	
3.1.3 逻辑链路控制子层73	
3.2 介质访问控制协议74	
3.2.1 令牌传递74	
3.2.2 ALOHA 协议76	
3.2.3 CSMA77	
3.3 以太网79	
3.3.1 CSMA/CD79	
3.3.2 以太网帧格式81	

3.3.3 IEEE 802.3 标准	83	6.2 无线个人区域网	171
习题	85	6.2.1 WPAN 概述	171
第4章 基于交换的高速网络	87	6.2.2 超宽带技术	172
4.1 快速以太网	87	6.2.3 蓝牙技术	173
4.1.1 体系结构	87	6.2.4 ZigBee 技术	175
4.1.2 自动协商	89	6.3 无线局域网	178
4.1.3 快速以太网介质选项	90	6.3.1 无线局域网概述	178
4.2 吉比特以太网和 10 吉比特以太网	92	6.3.2 WLAN 拓扑结构	179
4.2.1 吉比特以太网的 CSMA/CD 扩展	92	6.3.3 WLAN 相关标准	180
4.2.2 吉比特以太网介质选项	93	6.3.4 WLAN 网络构建	181
4.2.3 10 吉比特以太网	94	6.3.5 WLAN 网络互连	182
4.2.4 全双工以太网	96	6.4 其他无线网络	182
4.3 局域网互连	99	6.4.1 移动自组网	182
4.3.1 网桥	99	6.4.2 无线传感器网	184
4.3.2 交换机	104	6.4.3 WiMAX	188
4.3.3 虚拟局域网	105	习题	192
习题	107	第7章 网络软件与应用	194
第5章 广域网	109	7.1 网络操作系统	194
5.1 Internet 的网络层	109	7.1.1 网络操作系统简介	194
5.1.1 网际协议	109	7.1.2 网络操作系统的分类	194
5.1.2 地址解析协议	117	7.1.3 网络操作系统的选择	196
5.1.3 网际控制消息协议	119	7.2 域名服务	196
5.1.4 IP 转发	122	7.2.1 域名系统的历史	196
5.2 路由协议	123	7.2.2 DNS 结构	197
5.2.1 路由信息协议	125	7.2.3 域名结构	198
5.2.2 开放最短路由优先协议	131	7.2.4 DNS 解析过程	199
5.2.3 边界网关协议	139	7.3 万维网	200
5.3 端到端的数据传输	145	7.3.1 概述	200
5.3.1 不可靠的数据传输	145	7.3.2 超文本传输协议	203
5.3.2 可靠的数据传输	146	7.3.3 超文本标记语言	204
5.3.3 多媒体信息的传输	157	7.3.4 MIME 标记	206
习题	162	7.4 文件传输	207
第6章 无线网络	165	7.4.1 基本原理	207
6.1 移动通信基础	165	7.4.2 文件传输协议	209
6.1.1 第1代无线通信系统	165	7.4.3 BT 下载	209
6.1.2 第2代无线通信系统	167	7.5 电子邮件	210
6.1.3 第3代移动通信系统	169	7.5.1 基本原理	210
		7.5.2 简单邮件传送协议	211
		7.5.3 邮件消息格式和 MIME	212

7.5.4 邮件访问协议	214	8.2.4 病毒与防范	236
习题	215	8.3 数据加密	238
第 8 章 网络管理与网络安全	217	8.3.1 数据加密原理	238
8.1 网络管理基础	217	8.3.2 对称密钥算法	242
8.1.1 网络管理的功能	217	8.3.3 公开密钥算法	246
8.1.2 网络管理协议	220	8.4 身份鉴别、数字签名与数字证书	248
8.1.3 网络管理新技术	225	8.4.1 身份鉴别	248
8.2 网络安全基础	226	8.4.2 数字签名	251
8.2.1 网络安全隐患与对策	226	8.4.3 数字证书	255
8.2.2 防火墙	229	习题	257
8.2.3 虚拟专网	234	参考文献	258

第 1 章

计算机网络基础

计算机网络是基于计算机技术和通信技术而发展的一门学科,大约出现在 20 世纪 50 年代末,虽然出现得相对较晚,但其发展迅速并得到了广泛应用。当今人类社会正在进入信息化时代,信息的存储处理离不开计算机,而信息的流通则离不开计算机网络。信息、物质及能源一起构成了当今社会的三大资源。但是,信息与其他两类资源不同,其显著的特点是,信息在使用中非但不会损耗,反而通过交流会增值。因而,信息的流通就尤为重要,正是这种需求促使计算机网络飞速发展并得到广泛应用。

本章简略地介绍了计算机网络的基础和体系结构,同时引入一些在计算机网络中常见的名词和术语,这对我们将来的进一步学习是十分有用的。本章共分为 4 节。第 1 节主要介绍计算机网络发展的历史;第 2 节则着重论述计算机网络的层次体系结构,详细介绍开放系统互连参考模型和因特网参考模型,并进行比较;第 3 节说明计算机网络的组成,包括常用的网络设备,以及计算机网络的功能和应用;最后一节则简述了计算机网络的分类。

1.1 计算机网络的发展

计算机的发展经历了 3 次浪潮(wave)。在计算机诞生和使用的初期,主要是单机使用的年代,称之为主机(mainframe)浪潮。在随后的第二次浪潮中先后出现了小型计算机、局部区域网和微型计算机,形成了客户机/服务器(Client/Server, C/S)的浪潮,在这一浪潮中计算机网络也在不断发展。目前,计算机的发展已进入网络计算(Network Computing)的第三次浪潮,计算机网络的发展也同步进入了网络计算的新时代。本节中我们将回顾计算机网络发展所经历的几个阶段。通过对计算机网络发展过程的介绍,可以加深对什么是计算机网络本身的了解,这对我们将来的进一步学习是十分有用的。

1.1.1 计算机与通信相结合

计算机网络(Computer Network)出现的历史不长,但发展很快,经历了一个从简单到复杂的演变过程。1946 年,世界上第一台电子数字计算机 ENIAC 在美国诞生时,计算机和通信之间并没有什么关系。早期的计算机系统是高度集中的,所有的设备安装在单独的大房间中。开始时,一台计算机只能供一个用户使用。后来发展了批处理和分时系统,一台计算机尽管可同时为多个用户服务,但若不和数据通信相结合,分时系统所连接的多个终端都必须紧挨着主计算机,用户都必须到计算中心的终端室去使用,这种工作方式显然仍是不方便的。20 世纪 50 年代中期,美

国半自动地面环境（Semi-Automatic Ground Environment, SAGE）防空系统开始进行计算机技术和通信技术相结合的尝试，将远距离的雷达和其他测量控制设备的信息通过通信线路汇集到一台 IBM 计算机里进行集中的处理和控制在。接着，许多系统都将地理上分散的多个终端通过通信线路连接到一台中心计算机上。用户可以在自己办公室内的终端上输入程序，通过通信线路送入中心计算机，分时访问和使用其资源来进行处理，处理结果再通过通信线路送回到用户的终端上显示或打印出来。这样计算机技术和通信技术相结合，就出现了第一代的计算机网络。

第一代计算机网络实际上是以单台计算机为中心的远程联机系统。这样的系统中除了一台中心计算机，其余的终端都不具备自主处理的功能。在系统中主要存在的是终端和中心计算机间的通信。虽然历史上也曾称它为计算机网络，但现在为了更明确地与后来出现的多台计算机互连的计算机网络相区分，也称为面向终端的计算机网络。20 世纪 60 年代初期美国航空公司投入使用的由一台中心计算机和全美范围内 2000 多个终端组成的飞机票预订系统（Semi-Automatic Business Research Environment, SABRE）就是这种远程联机系统的一个代表。

在远程联机系统中，随着所连远程终端个数的增多，中心计算机要承担的和各终端间通信的任务也必然加重，使得以数据处理为主要任务的中心计算机增加了许多额外的开销，实际工作效率下降。由此出现了数据处理和通信的分工，即在中心计算机前面增设一个前端处理机（Front End Processor, FEP，有时也简称为前端机）来完成通信的工作，而让中心计算机专门进行数据处理，这样可显著地提高效率。另一方面，若每台远程终端都用一条专用通信线路与中心计算机连接，则线路的利用率低，且随着终端个数的不断增多，线路费用将达到难以负担的程度。因而，后来通常在终端比较集中的地点设置终端控制器（Terminal Controller, TC）。它首先通过低速线路将附近各终端连接起来，再通过高速通信线路与远程中心计算机的前端机相连。它可以利用一些终端的空闲时间来传送其他处于工作状态的终端的数据，提高了远程线路的利用率，降低了通信费用，其典型的结构如图 1.1 所示。图中的 M 代表调制解调器（Modem），是利用模拟通信线路远程传输数字信号所必须附加的设备；T 代表终端（Terminal）。前端机和终端控制器也可以采用比较便宜的小型计算机或微型机来实现。这样的远程联机系统已经具备了计算机和计算机间通信的雏形。

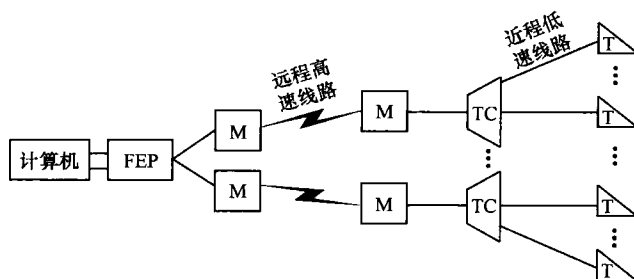


图 1.1 以单计算机为中心的远程联机系统

1.1.2 以 ARPA 网为代表的计算机网络

第二代计算机网络是多台主计算机通过通信线路互连起来而为用户提供服务，即计算机—计算机网络。这是 20 世纪 60 年代后期开始兴起的。它和以单台计算机为中心的远程联机系统的显著区别在于：这里的多台主计算机都是具有自主处理能力的，它们之间不存在主从关系。这样的多台主计算机互连的网络才是我们目前称作的计算机网络。这种系统中，终端和中心计算机间的

通信已发展到计算机和计算机间的通信,用单台中心计算机为所有用户需求服务的模式被大量分散而又互连在一起的多台主计算机共同完成的模式所替代。第二代计算机网络的典型代表是 **ARPA 网 (ARPANET)**。20 世纪 60 年代后期美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提供经费给美国许多大学和公司,以促进多台主计算机互联网络的研究,并最终导致一个实验性的 4 节点网络开始运行并投入使用。ARPA 网后来扩展到连接数百台计算机,从欧洲到夏威夷,地理范围跨越了半个地球。目前我们有关计算机网络的许多知识都与 ARPA 网的研究结果有关。ARPA 网中提出的一些概念和术语至今仍被引用。

ARPA 网中互连的运行用户应用程序的计算机称为主机 (Host)。但主机之间并不是通过直接的通信线路,而是通过称为接口报文处理机 (Interface Message Processor, IMP) 的装置转接后互连的,如图 1.2 所示 (图中的 H 代表 Host, 即主机)。当某台主机上的用户要访问网络上远地另一台主机时,主机首先将信息送至本地直接与其相连的 IMP,通过通信线路沿着适当的路径经若干 IMP 中途转接后,最终传送到远地的目标 IMP,并送入与其直接相连的目标主机。例如,图 1.2 中主机 H2 上的某个用户要将信息送往主机 H1,则首先将该信息送至 IMP2,然后沿图中粗黑线指出的路径,中间经 IMP4 和 IMP3 转接,最终传送到目标 IMP1,再送入主机 H1。转接是这样进行的:IMP2 将主机 H2 送来的信息接收并存储起来,在 IMP2 和 IMP4 之间的通信线路有空时,将其传送到 IMP4,IMP4 也是将该信息接收并存储起来,直至 IMP4 和 IMP3 之间的通信线路空闲时,再将它转发到 IMP3……这种方式类似于邮政信件의 传送方式,称为存储转发 (Store and Forward)。就远程通信而言,目前通信线路仍然是个较昂贵的资源。采用存储转发方式的好处在于通信线路不为某对通信者所独占,因而大大提高了通信线路的有效利用率。比如上述图 1.2 的例子中,当从主机 H2 送往 H1 的信息仍在 IMP2 和 IMP4 间的通信线路上传输时,IMP3 和 IMP4 间的通信线路就可被由 H3 经 IMP3、IMP4 和 IMP5 送往 H5 的另外的信息传输所使用。而一旦从主机 H2 送往 H1 的信息已为 IMP4 接收并存储后,IMP2 和 IMP4 之间的通信线路又可为其他的比如 H4 和 H2 之间的信息传输服务。

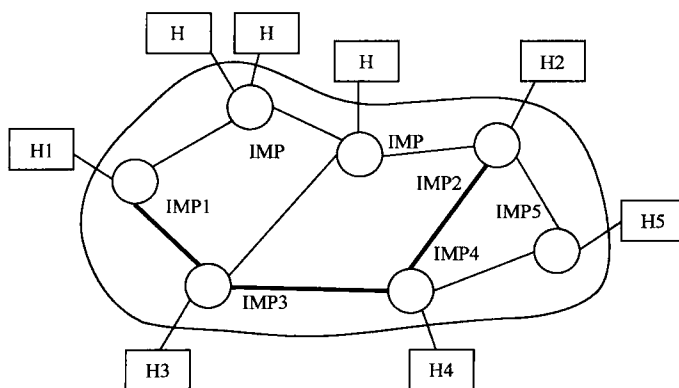


图 1.2 存储转发的计算机网络

ARPA 网中存储转发的信息基本单位叫做分组 (Packet)。以存储转发方式传输分组的通信子网则又被称作为分组交换网 (Packet Switching Network)。IMP 是 ARPA 网中使用的术语,在其他网络或文献中也称为分组交换节点 (Packet Switch Node)。IMP 或分组交换节点通常也是由小型计算机或微型机来实现的,为了和资源子网中的主机相区别,也被称为节点机,简称节点。

两台计算机通信时对传送信息内容的理解、信息表示形式以及各种情况下的应答信号都必须

遵循的一个共同的约定，称为协议（Protocol）。在 ARPA 网中将协议按功能分成了若干层次，如何分层，以及各层中具体采用的协议的总和，称为网络的体系结构（Architecture）。体系结构是个抽象的概念，其具体实现是通过特定的硬件和软件来完成的。

比较图 1.1 和图 1.2 可见，作为第一代计算机网络的远程联机系统和第二代计算机网络的区别之一是，前者以被各终端共享的单台计算机为中心，而后者以通信子网为中心，用户共享的资源子网则在通信子网的外围。

以 ARPA 网以及英国国家物理实验室 NPL 的分组交换网为先驱，20 世纪 70 年代和 20 世纪 80 年代中第二代计算机网络得到了迅猛的发展。其中有些是主要研究试验性的网络，如 IBM 沃森研究中心、卡内基—梅隆大学和普林斯顿大学合作开发的 TSS 网以及加利福尼亚大学欧文分校研制的 DCS 网等；有些是个别用户为特定目的（如资源共享）而自行研制和使用的网络，如加利福尼亚大学劳伦斯原子能研究所建立的 DCTOPUS 以及法国信息与自动化研究所负责发展的 CYCLADES 网等；有些是由用户联营为一定范围内应用而建立的网络，如国际气象监测网（World Weather Watch Network, WWWN）和欧洲情报网（European Information Network, EIN）等；有些是公用分组交换数据网，如美国的 TELNET、加拿大的 DATAPAC 和欧共体（欧盟前身）的 EURONET；有些是商用的提供增值通信服务的网络，如美国 Tymshare 公司的 TYMNET 和通用电气公司的 GE 信息服务网等。在这段时期内，各大计算机公司都陆续推出自己的网络体系结构，以及实现这些网络体系结构的软硬件产品。用户购买某计算机公司提供的网络产品，自己提供或租用通信线路，就可自己组建计算机网络。IBM 公司的 SNA（System Network Architecture）和原有 DEC 公司的 DNA（Digital Network Architecture）就是两个最著名的网络体系结构的例子。凡是按 SNA 组建的网络都可称为 SNA 网，而凡是按 DNA 组建的网都可称为 DNA 网或 DECNET。

当前世界上仍有一些第二代计算机网络在运行和提供服务。但是，第二代计算机网络也有不少弊病，适应不了信息社会日益发展的需要。其中最主要的缺点是，第二代计算机网络大都由研究单位、大学、应用部门或计算机公司各自研制，没有统一的网络体系结构。为实现更大范围内的信息交换与共享，要把不同的第二代计算机网络互连起来相对困难。比如说，只要增购一些网络产品把一台 IBM 公司的计算机接入一个 SNA 网是不困难的，但要把一台 HP 公司生产的计算机接入 SNA 网就不是一件容易的事情。同样，要把一台 IBM 公司生产的计算机接入 DECNET 也不是容易的，而要把多种不同的计算机和网络互连在一起就更难了。因此，计算机网络必然要向更新的一代发展。

1.1.3 开放式标准化的计算机网络

第三代计算机网络是开放式标准化的网络，它具有统一的网络体系结构、遵循国际标准化的协议。标准化使得不同的计算机能方便地互连在一起。标准化还能带来大规模生产、产品 VLSI 化和成本降低等一系列好处。

20 世纪 70 年代后期人们认识到第二代计算机网络的不足后，开始提出发展新一代计算机网络的问题。国际标准化组织（International Standards Organization, ISO）下属的计算机与信息处理标准化技术委员会（Technical Committee）TC97 成立了一个专门研究此问题的分委员会（Sub-Committee）。经过若干年卓有成效的工作，ISO 制定并在 1984 年正式颁布了一个称为开放系统互连基本参考模型（Open System Interconnection Basic Reference Model, OSI/RM）的国际标准 ISO 7498。这里“开放系统”是相对于第二代计算机网络中如 SNA 和 DNA 等只能和同种计算机互连的每个厂商各自封闭的系统而言的，它可以和任何其他系统（当然要遵循同样的国际标准）通信

且相互开放。该模型分为七个层次，也被称为 **OSI 七层模型**。OSI 模型目前已被国际社会所普遍接受，并公认为计算机网络的体系结构的基础。我国在 1988 年也制定了相应的国家标准即 GB 9387-1988。

20 世纪 80 年代中期，以 OSI 模型为参照，ISO 以及当时的国际电话电报咨询委员会（法文 Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique, CCITT）等为各个层次开发了一系列的协议标准，组成了一个庞大的 OSI 基本标准集。在 OSI 标准制定过程中 ISO 和原 CCITT 一直不断协调和密切合作，与 ISO 7498 等价的是 CCITT X.200。CCITT 是联合国国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）下属的一个组织，目前已被撤销，改组更名为 ITU-TSS（Telecommunication Standardization Sector, 电信标准化部），简称 **ITU-T**。由 CCITT 制定的标准都称为建议（Recommendation），虽然现在已没有 CCITT 了，但有些资料习惯上许多时候仍将其称为 CCITT 建议。本书中凡是原 CCITT 时期制定并发布的建议，我们有时也仍称为 CCITT 建议。最著名的 CCITT 建议是在公用数据网中广泛采用的 X.25、X.3、X.28、X.29 和 X.75 等 5 个建议。大多数国家都普遍存在这种公用数据网，其作用类似于公用电话网向用户提供话音通信服务一样，它向用户提供数据通信服务。

公用数据网在有些国家是由政府部门拥有并运行的，有些国家则是由私人公司经营的。不同国家的公用数据网内部也有很大差别，但它们对于外部用户提供的界面大都采用了国际标准，就是 CCITT 制定的 X.25 建议。这个建议规定了用分组方式工作和公用数据网连接的数据终端设备（Data Terminal Equipment, DTE）和数据电路端接设备（Data Circuit-Terminating Equipment, DCE）之间的接口。这里，DTE 和 DCE 是 CCITT 使用的术语，在我们所述计算机接入公用数据网的场合下，计算机就是 DTE，而公用数据网中的分组交换节点就是 DCE。这里所说的接口是广义的，泛指界面的意思。这个接口实际上覆盖了 OSI 七层模型中的下三层，是接入公用数据网的 DTE 和公用数据网间在下三层界面的总和，也就是下三层协议的总和。

由于还有一些计算机，特别是大量的非智能终端不能直接执行 X.25 中规定的协议和公用数据网相连接，它们就必须通过一个称为**分组组装/拆卸器**（Packet Assembly/Disassembly facility, PAD）的装置才能接入采用 X.25 接口的公用数据网。CCITT 已经制定了 3 个与 PAD 有关的标准即 X.3 建议、X.28 建议和 X.29 建议。其中 X.3 建议规定了 PAD 的功能以及控制它工作的一些参数；X.28 建议规定了终端和 PAD 之间的标准协议；X.29 建议则规定了 PAD 和用分组方式工作的 DTE 之间交换控制信息和用户数据的规程（Procedure）。这里，规程是通信界常用的术语，就是通信双方必须遵循的共同的约定，这种场合下我们可以看成是协议的同义语。只不过在 OSI 七层模型中，从低层到高层都统称为协议；而某些低层的协议在通信界有时又称为规程。有了这 3 个标准，普通的非智能终端就能够通过 PAD 接入公用数据网与远程主机通信了。与 PAD 有关的 CCITT 标准如图 1.3 所示。

一个 PAD 可以连接多个终端，具有集中器的功能，但与普通的集中器不一样，它还能将普通终端发出的字符流转换为 X.25 协议所要求的分组流。PAD 可以执行 X.25 协议和公用数据网直接相连，与主机一样也是 CCITT 所称的 DTE。X.75 建议则规定了两个公用数据网互连时接口的标准，公用数据网中用于按 X.75 建议与另一公用数据网互连

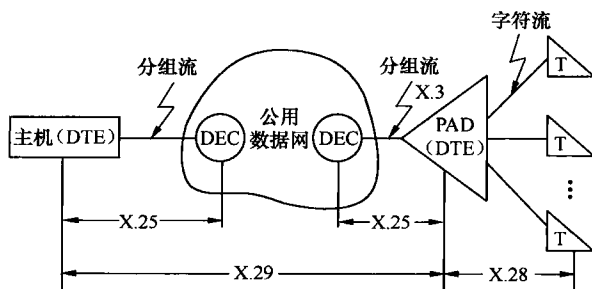


图 1.3 与公用数据网有关的 CCITT 标准

的设备称为信令终端设备 (Signaling Terminal Equipment, STE), 如图 1.4 所示。

遵循公开标准组建的网络通常都是开放的。遵守上述 CCITT X 系列建议组建的公用分组交换数据网是开放式标准化网络的一个典型例子。许多国家都有自己的公用分组交换数据网, 如美国的 TELENET、加拿大的 DATAPAC、法国的 TRANSPAC、德国的 DATEX-P、日本的 DDX-P 以及我国已于 1989 年开通并正式对外提供服务的 CHINAPAC 等。虽然这些网络内部的结构、采用的信道及设备不尽相同, 但它们向外部用户提供的界面是相同的, 互连的界面也是相同的, 因而也易于互连与互通。

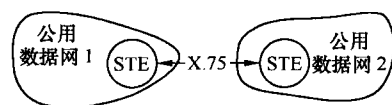


图 1.4 公用数据网的互连

另一个开放式标准化网络的著名例子就是因特网 (Internet, 也译为国际互联网), 它是在原 ARPANET 基础上经过改造而逐步发展起来的。它是对任何计算机开放的, 只要遵循 TCP/IP 协议簇的标准, 并申请到 IP 地址就都可以通过信道接入 Internet。这里 TCP 和 IP 是 Internet 所采用的一套协议中最核心的两个, 分别称为传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP) 和网际协议或互联网协议 (Internet Protocol, IP)。它们虽然不是某个国际官方组织制定的标准, 但由于被广泛采用, 已成为事实上的国际标准。

在这一时期局部区域网 (Local Area Network, LAN, 简称局域网) 也迅速发展, 逐步标准化, 并在客户机/服务器模式中得到广泛应用。最有代表性的局域网就是已被 (美国) 电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 和 ISO 标准化 (分别为 IEEE 802.3 和 ISO 8802-3) 的以太网 (Ethernet)。

1.1.4 网络计算的新时代

1993 年, 美国政府发布了名为“国家信息基础设施 (National Information Infrastructure, NII) 行动计划”的文件。NII 的俗称就是信息高速公路 (Information Super Highway)。这份文件的核心内容就是建设一个覆盖全国的高速宽带通信与计算机网络, 其功能类似于传输物流的高速公路, 不同在于传输的是信息流, 故俗称为信息高速公路。如同高速公路是工业社会中的基础设施一样, 高速宽带通信与计算机网络则是信息社会中的基础设施。该文件在全世界引起了很大反响, 许多国家和地区纷纷仿效, 提出了各自的计划。随后又有人提出建立全球信息基础设施 (Global Information Infrastructure, GII)。这几项举措在全球范围内极大地推动了计算机网络及其应用的发展, 使得计算机网络也随着计算机的发展进入了一个网络计算 (Network Computing) 的新阶段。“网络计算”这个名称是由 IBM 总裁 1994 年在著名的 COMDEX 大会讲话中提出来的。所谓“网络计算”, 我们可以理解为以网络为中心的计算 (Network Centric Computing) 或者以网络为基础的计算 (Network-based Computing)。换句话说, 在这个新阶段中任何信息处理即计算, 几乎都离不开网络。事实上, 现在几乎所有的计算机都必须以某种形式联网, 以共享信息或协同工作, 否则就无法充分发挥其效能。计算机网络的发展有若干引人注目的方向, 如迅速向高速宽带化发展、网络的应用多媒体化和深入到人们社会生活的各个方面等。

首先, 是计算机网络迅速向高速宽带化发展。早期的以太网的数据速率只有 10Mbit/s, 即每秒传送一千万比特 (binary digit, bit, 即二进制位或简称为位), 目前已为速度高十倍的 100Mbit/s 或 1Gbit/s (即 1000Mbit/s) 的以太网所替代, 而速度再提高十倍, 达 10Gbit/s 的产品 (俗称万兆网) 也已不是不少主干网络的首选。从远距离的网络来看, 早期如前所述按照 CCITT X.25 建议组建的公用分组交换数据网的数据速率只有 64kbit/s, 后来采用了帧中继 (Frame Relay) 技术已可提高至 2Mbit/s, 接着出

现的异步传送模式 (Asynchronous Transfer Mode, ATM) 又可达到 155Mbit/s、622Mbit/s 甚至 2.5Gbit/s 的数据速率, 目前在主干传输线路上已普遍采用光纤和波分多路复用 (Wave Division Multiplexing, WDM) 技术, 目前已有高达 6.4Tbit/s (T 代表 Tera, 即 10^{12} , 故 1Tbit/s = 1000Gbit/s) 的密集波分多路复用 (Dense WDM, DWDM) 产品, 即在一条光纤上传输 640 路光波, 每路光波为 10Gbit/s。高速的网络必然需要新的高速交换和路由技术支持。从端用户 (如家用计算机) 的网络接入看, 也从早期的 2400bit/s 低速调制解调器, 经历了 56kbit/s 的高速调制解调器、可提供 128kbit/s 上网的窄带综合业务数字网 (Narrow-Integrated Services Digital Network, N-ISDN, 即目前中国电信或原中国网通提供的俗称“一线通”的服务, 前述 ATM 则是宽带综合业务数字网 B-ISDN, Broadband-ISDN, 的标准), 直至现在端用户可得到数百 kbit/s 上网速率的非对称数字用户线 (Asymmetrical Digital Subscriber line, ADSL, 俗称“高速通”) 和有线电视经双向改造后的有线通 (此为俗称, 正式名称是 HFC, 即混合光纤/同轴电缆) 接入。未来超高速数字用户线 (Very high speed Digital Subscriber line, VDSL) 和光纤到户 (Fiber To The Home, FTTH) 则可达到更高的用户入网接入速率。

其次, 早期计算机网络中传输的主要是数字、文字和程序等数据, 但随着应用的扩展, 提出了越来越多的图形、图像、声音和影像等多媒体 (Multimedium) 信息在网络中传输的需求。网络的多媒体应用不但要求网络有更高的数据速率, 或者说带宽, 而且对延迟时间 (实时性) 及时间抖动 (等时性) 等方面都提出了更高的要求。传统的 Internet 是一个只能提供尽力 (Best-effort) 服务的网络, 换句话说它不能保证服务质量 (Quality of Service, QoS), 这促进了集成服务 (Integrated Service, IntServ)、区分服务 (Differentiated Service, DiffServ) 和多协议标签交换 (Multi-Protocol Label Switching, MPLS) 等网络技术的研究和发展。还有, 许多多媒体应用, 如视频会议 (Video Conference) 和远程教育等, 都要求从一个源发送的信息通过网络同时传输到多个目标, 从而使得组播 (Multicast) 也成为目前网络研究和发展的方向之一。

还有, 网络技术的发展使得其应用的范围与领域越来越广泛, 可以说已深入到人类生活的各个方面。比如说政务信息化、网络学校、医疗远程诊断咨询、企业资源规划 (Enterprise Resource Plan, ERP)、计算机制造集成系统 (Computer Manufacture Integrated System, CMIS)、数字化城市、管理信息系统 (Management Information System, MIS)、办公自动化 (Office Automation, OA)、公安网通缉逃犯、电子商务以至于视频点播 (Voice On Demand, VOD) 等都离不开计算机网络。另一方面, 五花八门的应用需求反过来又成为推动网络技术发展的强大动力, 使得各种新的技术层出不穷, 如虚拟局域网 (Virtual Local Area Network, VLAN)、虚拟专网 (Virtual Private Network, VPN)、无线局域网 (Wireless LAN, WLAN)、新一代的网际协议 IPv6、对等计算 (Peer-to-peer Computing)、网格 (Grid)、移动自组网 (Mobil Ad Hoc Network, MANET)、无线传感器网 (Wireless Sensor Network) 和主动网 (Active Network) 等, 我们不再详述。

目前, 电话、有线电视和数据等都有各自不同的网络, 随着多媒体网络的建立和日趋成熟, 三网融合甚至多网融合是一个重要的发展方向。目前, 中国电信和原中国网通除原本的电话服务外已能提供上网和 IPTV 服务, 中国移动和原中国联通及中国电信不但提供移动语音通信而且也提供无线上网, 有线电视网则除能提供上网外也能提供数字互动电视服务。有人提出未来网络的结构如图 1.5 所示。

在图 1.5 中, 处于核心的是能传输各种多媒体信息的高速宽带主干网 (Backbone), 外联许多汇聚点 (Point Of Presence, POP)。端用户 (End User) 可以通过电话线、电视电缆、光缆、无线信道等不同的传输媒体组成的不同接入网 (Access Network), 再由汇聚点集中后连入主干网。由于 Internet 的巨大影响及成功运行, 在整个网络中核心的协议将采用 Internet 的网际协议, 即 IP,

通过它把下面各种各样的通信子网络互连在一起，并向上支持多种多媒体应用。这就是所谓的统一的 IP 网，即“IP over Everything”和“Everything on IP”。

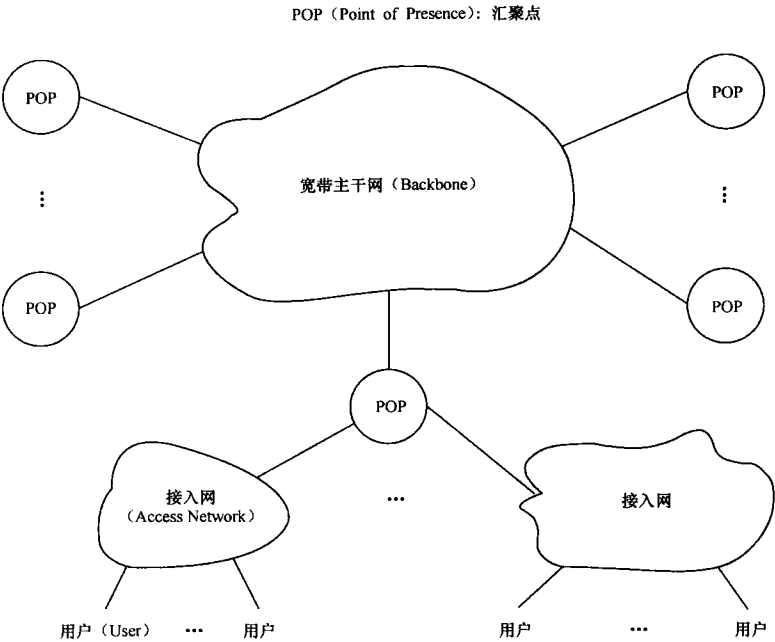


图 1.5 未来的网络结构

网络覆盖的地理范围必然不断扩大，向全球延伸，并逐步深入到每个单位、每个办公室以至每个家庭。有人描述的未来通信和网络的目标是实现“5W”的个人通信，即任何人（Whoever）在任何时间（Whenever）、任何地方（Wherever）都可以和任何一个其他人（Whomever）通过网络进行通信，以传送任何信息（Whatever）。也有人称为“6A”，即在任何时间（Anytime）、任何地点（Anywhere）通过任何连接将任何信息（Any connection leading to Any information）、任何服务提供给任何人（Any service for Anybody）。这是多么诱人的发展前景。

1.2 计算机网络的体系结构

前面一节中我们简略地回顾了计算机网络演变的历史，并展望了网络未来发展的前景。在本节中我们将通过介绍网络的层次型的体系结构以帮助读者进一步了解什么是计算机网络。

1.2.1 层次模型

将多台位于不同地点的计算机设备通过各种通信信道和设备互连起来，使其能协同工作，以便于计算机的用户应用进程交换信息和共享资源，这是一个复杂的工程设计问题。将这个比较复杂的问题分解成若干个容易处理的子问题，再逐个解决，这种结构化设计方法是工程设计中常用的一种手段。分层就是系统分解的最好方法之一。

实际上单台计算机系统的体系结构也是一种层次结构，如图 1.6（a）所示。最内层是裸机，后面依次为操作系统、汇编语言处理程序、高级语言处理程序、应用程序等。每一层都直接使用

内层向它提供的服务，并完成其自身确定的功能，然后向外层提供“增值”后的更高级的服务。系统的功能也就逐层加强与完善了。在如图 1.6 (b) 所示一般的分层结构中， n 层是 $n-1$ 层的用户，又是 $n+1$ 层的服务提供者。 $n+1$ 层的用户虽然只直接使用了 $n+1$ 层提供的服务，实际上它通过 $n+1$ 层还间接使用了 n 层的服务，并更间接地使用了 $n-1$ 层及以下所有各层的服务。层次结构的好处在于使每一层实现一种相对独立的功能。每一层不必知道下面一层是如何实现的，只要知道下层通过层间接口提供的服务是什么以及本层应向上层提供什么样的服务，就能独立设计。由于系统已被分解为相对简单的若干层次，易于实现和维护。此外，当由于技术的变化或其他因素某层的实现需要更新或被替代时，只要它和上、下层的接口服务关系不变，则其他层次都不受其影响，具有很大的灵活性。分层结构还易于交流、易于理解和易于标准化，对于如计算机网络这种涉及两个不同实体间通信的系统就更有其优越性。

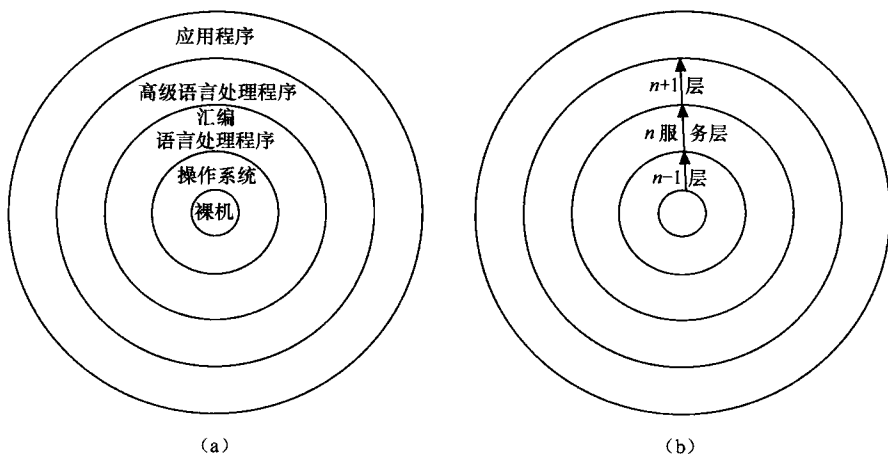


图 1.6 层次结构

现代计算机网络都采用了层次化的体系结构。但由于计算机网络涉及多个实体间的通信，其层次结构画成图 1.7 的垂直模型要比图 1.6 的“洋葱”式的模型更为清晰。在 A. S. Tanenbaum 所著的《Computer Networks》(Third Edition) (Prentice Hall Inc., 1996) 一书中曾经举了一个生动的例子来说明这样的层次结构。这个例子讲的是两位不同国家讲不同语言的哲学家间的对话，他们可以看成是在最高层，比如第三层。他们对所要通话的内容需要有共同的兴趣和认识，但是由于他们的语言不同并不能直接通话。因而，他们每个人都请来一位译员，将他们各自的语言翻译成两个译员都懂的第三国语言。这里，译员就在下面一层，即第二层，他们向第三层提供语言翻译的服务。两个译员可以使用共同懂得的语言交流，但是由于他们在不同的国家，还是不能直接对话。两个译员都需要有一个工程技术人员，按事先约定的方式如电话或电报，将交谈的内容转换成电信号通过物理介质传送至对方。这里，工程技术人员就在最下一层即第一层，他们都知道如何按约定的方式（如电话）将语音转换成电信号，然后发送到物理介质（medium，也译为媒体如电话线）上传送至对方，为上一层的译员提供传输服务。在这个例子中有三个不同的层次，从下到上不妨依次称为传输层、语言层和认识层。在认识层上对话的两个实体即两个哲学家，只意识到他们之间在进行通信，这种通信能够进行的前提是他们对所交谈的内容有共同的兴趣和认识，抽象地说就是遵循着共同的认识层的协议。他们之间的交谈并不是直接进行的，称之为虚通信。虚通信是通过语言层接口处译员提供的语言翻译以及译员间的交谈来实现的，抽象地说就是上一层的虚通信是通过下一层接口处提供的服务以及通信来实现的。这里，在语言层的两个译员都必