

高等学校电子信息类教材

计算机网络 原理与技术 (第3版)

Computer Networking:
Principles and Technologies, Third Edition

◎ 刘化君 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

高等学校电子信息类教材

计算机网络原理与技术 (第3版)

Computer Networking:
Principles and Technologies, Third Edition

刘化君 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机网络工作原理、协议及其实现技术。全书由 10 章组成,在概述计算机网络基本概念、基本理论问题的基础上,主要讨论了数据通信基础、数据链路控制、局域网、网络互连及其协议、路由技术、网络传输服务、网络应用及其协议、多媒体通信网、网络性能分析与评价等内容,反映了当前计算机网络领域的新技术和理论成果。为帮助读者掌握基础理论知识,每章附有小结及思考与练习题。

本书具有理论性、创新性和应用性等鲜明特色,内容新颖而全面,适用范围广,既可以作为计算机、电子信息、自动化、电气等专业教材,也可作为相关专业的研究生教材或教学参考书,同时可供从事网络工程的科技人员和网络爱好者参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络原理与技术 / 刘化君编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2017.5

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-31390-5

I. ①计… II. ①刘… III. ①计算机网络—高等学校—教材 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 078283 号

责任编辑:张来盛

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:29.25 字数:748.8 千字

版 次:2005 年 7 月第 1 版

2017 年 5 月第 3 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价:69.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888/88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254459; qianwy@phei.com.cn。

前 言

随着计算机网络技术的不断发展,互联网已成为一种多学科的应用领域,已从一个以科研为主的网络演变为全球规模的信息基础设施。《计算机网络原理与技术》自2005年7月第1版、2012年6月第2版出行以来,受到广大读者的青睐。为更好地适应“计算机网络”课程教学的需要,跟踪计算机网络的发展态势,决定遵循本书的编写原则,在第2版的基础上进行全面修订,彰显理论性、创新性和应用性特色。

考虑到当代计算机网络技术的发展变化,本书在保持第1版和第2版体系结构及编写特色的基础上,对其内容进行了增补、调整和修改,重新绘制了部分图表。本次修订工作以“交换”、“路由”为主线,讨论计算机网络的工作原理,通过实例阐述计算机网络的技术实现。其修订内容主要为:改写了第1章绪论中现代网络发展趋势,增添网络新形态等内容,涉及物联网、互联网+、软件定义网络、第5代移动通信网以及量子通信网络等概念;调整了第3章数据链路控制的内容,给出了数据链路协议实例,并新增无线链路等内容;在局域网一章,删除了不常用的局域网技术,增添了交换机及配置、虚拟局域网的实现以及WLAN组网等技术;在第6章路由技术中,详细介绍了路由器及其配置,并增添了与路由优化相关的技术与策略;为突出多媒体通信网络的应用,在第9章围绕多媒体通信协议侧重讨论了视频会议系统的工作原理和组成;针对目前网络性能分析与评价的研究情况,在第10章更新了网络性能的测量与评价的具体技术方法。

第3版继续保持了本书理论性、创新性和应用性等特色,内容新颖而全面,适用范围广,既可以作为计算机、电子信息、自动化、电气等专业教材,也可作为相关专业的研究生教材或教学参考书,同时可供从事网络工程的科技人员和网络爱好者参考使用。

本书由刘化君编著,参与第3版编写工作的还有刘枫、解玉洁、陈杰等。自出版发行以来,一直得到众多同行的支持和广大读者的厚爱,他们提出了许多修订建议,在此一并表示衷心感谢!

计算机网络仍在继续迅速发展,应用领域不断拓宽,囿于编著者理论水平和实践经验,书中可能仍存在不妥或疏漏之处,恳请广大读者批评斧正。

编 著 者

2016年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机网络的诞生与发展	1
1.1.1 计算机网络的诞生	1
1.1.2 计算机网络发展历程	2
1.1.3 现代网络发展趋势	10
1.2 计算机网络的基本概念	14
1.2.1 计算机网络的定义	14
1.2.2 计算机网络的主要功能	16
1.2.3 计算机网络的分类	17
1.3 计算机网络的组成	20
1.3.1 计算机网络的组成结构	21
1.3.2 计算机网络的拓扑结构	22
1.3.3 计算机网络系统的组成	24
1.3.4 网络新形态	28
1.4 计算机网络的体系结构	30
1.4.1 网络体系结构的分层	30
1.4.2 OSI 参考模型 (OSI-RM)	33
1.4.3 TCP/IP 模型	38
1.4.4 基于 OSI 的实用参考模型	41
1.4.5 计算机网络标准及 RFC 文档	43
1.5 计算机网络的基本理论问题	44
本章小结	46
思考与练习	46
第 2 章 数据通信基础	47
2.1 数据通信的理论基础	47
2.1.1 数据通信的基本概念	47
2.1.2 傅里叶分析与有限带宽信号	52
2.2 数据编码技术	54
2.2.1 模拟信号传输模拟数据	55
2.2.2 模拟信号传输数字数据	55
2.2.3 数字信号传输数字数据	56
2.2.4 数字信号传输模拟数据	59
2.3 数据传输方式	60
2.3.1 数据通信方式	60

2.3.2 数据同步方式	62
2.4 传输介质	63
2.4.1 导向传输介质	64
2.4.2 非导向传输介质	65
2.5 多路复用技术	68
2.5.1 频分多路复用	69
2.5.2 时分多路复用	70
2.5.3 波分多路复用	72
2.6 数据交换技术	73
2.6.1 电路交换	73
2.6.2 存储转发交换	74
2.6.3 光交换	77
2.7 物理层协议及标准	79
2.7.1 物理层接口的四种特性	80
2.7.2 物理层接口标准示例	82
2.7.3 数据传输质量参数	87
本章小结	89
思考与练习	89
第3章 数据链路控制	91
3.1 数据链路层的基本概念	91
3.1.1 数据链路层的功能	91
3.1.2 数据链路层提供的服务	92
3.2 帧与帧同步技术	93
3.2.1 帧的基本格式	93
3.2.2 帧同步方法	94
3.2.3 通用组帧规程	96
3.3 差错检测和纠错技术	97
3.3.1 奇偶校验	97
3.3.2 汉明码	98
3.3.3 循环冗余校验	100
3.3.4 校验和	101
3.4 数据链路控制机制	103
3.4.1 滑动窗口机制	104
3.4.2 停止等待式 ARQ 协议	106
3.4.3 后退 N 帧式 ARQ 协议	111
3.4.4 选择重传式 ARQ 协议	112
3.5 数据链路协议	114
3.5.1 点到点协议	114
3.5.2 数据链路协议实例	117

3.6 无线链路	120
3.6.1 IEEE 802.11/WiFi	120
3.6.2 蓝牙	122
3.6.3 宽带无线 (WiMAX)	123
本章小结	124
思考与练习	124
第4章 局域网	126
4.1 局域网概述	126
4.1.1 局域网的基本概念	126
4.1.2 IEEE 802 局域网标准系列	129
4.1.3 IEEE 802 局域网的体系结构	129
4.2 以太网工作原理	133
4.2.1 以太网帧格式	133
4.2.2 以太网介质访问控制方法	136
4.3 高速以太网技术	140
4.3.1 快速以太网	140
4.3.2 千兆以太网	143
4.3.3 万兆以太网	147
4.4 交换机及其配置	151
4.4.1 以太网交换机	151
4.4.2 交换机的基本配置	154
4.4.3 交换机的端口配置	157
4.5 虚拟局域网 (VLAN)	160
4.5.1 VLAN 的基本概念	161
4.5.2 VLAN 技术原理	162
4.5.3 VLAN 的实现	165
4.5.4 交换机的 VLAN 配置	166
4.6 无线局域网 (WLAN)	169
4.6.1 WLAN 组成结构	169
4.6.2 WLAN 帧结构	170
4.6.3 IEEE 802.11 MAC 协议	172
4.6.4 WLAN 组网	175
本章小结	177
思考与练习	178
第5章 网络互连及其协议	179
5.1 网络互连概述	179
5.1.1 何谓网络互连	179
5.1.2 网络互连的类型及层次	182
5.1.3 网络层服务模型	184

5.2 网际互联协议: IPv4	185
5.2.1 IPv4 数据报格式	185
5.2.2 IPv4 地址	190
5.2.3 IP 子网划分	193
5.2.4 无分类域间路由	198
5.2.5 地址解析	201
5.3 差错报告和控制机制	204
5.3.1 ICMP 报文格式	204
5.3.2 ICMP 差错报告报文	205
5.3.3 ICMP 查询报文	207
5.4 IP 数据报转发	209
5.4.1 IP 数据报转发处理过程	209
5.4.2 IP 路由表	210
5.4.3 IP 数据报转发算法	212
5.5 IP 组播和 IGMP	216
5.5.1 IP 组播	216
5.5.2 互联网组播管理协议 (IGMP)	218
5.6 IPv6	221
5.6.1 IPv6 编址	221
5.6.2 IPv6 数据报格式	226
5.6.3 从 IPv4 到 IPv6 的迁移	229
5.7 移动 IP 技术	231
5.7.1 移动 IPv4	231
5.7.2 移动 IPv6	235
本章小结	236
思考与练习	237
第 6 章 路由技术	240
6.1 路由的基本概念	240
6.1.1 何谓路由	240
6.1.2 路由选择算法	243
6.2 路由信息协议 (RIP)	248
6.3 开放最短路径优先 (OSPF) 协议	250
6.4 边界网关协议 (BGP)	254
6.5 路由器及其配置	257
6.5.1 路由器的工作原理及构成	258
6.5.2 路由器的配置环境	261
6.5.3 路由器的基本配置	266
6.5.4 动态路由协议配置	272
6.6 路由优化	278

6.6.1	路由重分发	278
6.6.2	路由过滤	283
6.6.3	策略路由	285
	本章小结	290
	思考与练习	291
第 7 章	网络传输服务	293
7.1	传输层概述	293
7.1.1	传输层的地位	293
7.1.2	传输层的基本功能	294
7.1.3	传输层提供的服务	295
7.2	进程间通信	298
7.2.1	端口及其作用	299
7.2.2	传输层的复用与解复用	302
7.3	传输控制协议 (TCP)	305
7.3.1	TCP 概述	305
7.3.2	TCP 报文格式	308
7.3.3	TCP 连接管理	312
7.3.4	TCP 流量控制	316
7.3.5	TCP 定时管理	318
7.3.6	TCP 拥塞控制	320
7.4	用户数据报协议 (UDP)	324
7.4.1	UDP 概述	324
7.4.2	UDP 数据报格式	325
7.4.3	UDP 校验和	326
7.5	协议分析器与协议分析	327
7.5.1	协议分析器及其应用	327
7.5.2	TCP 实例分析	329
	本章小结	331
	思考与练习	332
第 8 章	网络应用及其协议	334
8.1	网络应用概述	334
8.1.1	应用层的地位和作用	334
8.1.2	网络应用模式	335
8.1.3	应用层协议	339
8.2	WEB 服务与 HTTP	340
8.2.1	Web 服务工作原理	341
8.2.2	统一资源定位器	343
8.2.3	Web 页及其设计	344
8.2.4	超文本传输协议 (HTTP)	349

8.3 文件传输与远程文件访问	357
8.3.1 文件传输协议	357
8.3.2 简单文件传输协议	360
8.3.3 网络文件系统	361
8.4 电子邮件及其传输	362
8.4.1 电子邮件系统	363
8.4.2 电子邮件报文格式和 MIME	365
8.4.3 SMTP 邮件传输	368
8.4.4 邮件读取协议	370
8.5 域名系统	373
8.5.1 域名的分层结构	374
8.5.2 DNS 的工作机制	376
8.6 动态主机配置协议	380
8.6.1 DHCP 报文格式	380
8.6.2 DHCP 的操作	381
本章小结	384
思考与练习	384
第9章 多媒体通信网	386
9.1 多媒体通信概述	386
9.1.1 多媒体通信的概念	386
9.1.2 多媒体通信关键技术	390
9.1.3 多媒体通信协议体系	394
9.2 多媒体通信协议	395
9.2.1 实时传输协议	395
9.2.2 实时传输控制协议	398
9.2.3 实时流式协议	399
9.3 视频会议系统	399
9.3.1 基于 H.323 的视频会议系统	400
9.3.2 基于 SIP 的视频会议系统	402
9.4 流控制传输协议	407
9.4.1 SCTP 的功能特性	407
9.4.2 SCTP 数据报结构	409
9.4.3 SCTP 关联	415
9.4.4 SCTP 应用	418
本章小结	420
思考与练习	421
第10章 网络性能分析与评价	422
10.1 计算机网络中的数学问题	422
10.1.1 随机过程	422

10.1.2 排队论.....	424
10.1.3 图论.....	427
10.2 网络性能的测量与评价.....	429
10.2.1 网络性能测评的目的及准则.....	429
10.2.2 网络性能测量.....	431
10.2.3 互联网带宽测量.....	435
10.2.4 网络系统的性能分析与评价.....	438
10.3 计算机网络仿真.....	440
10.3.1 网络仿真软件.....	440
10.3.2 NS-3 简介.....	442
10.3.3 基于 Ubuntu 平台的 NS-3 的安装与运行.....	448
10.3.4 NS-3 仿真脚本示例.....	450
本章小结.....	451
思考与练习.....	452
参考文献.....	453

计算机网络涉及的内容比较广泛，已成为迅速发展并在信息社会中得到广泛应用的一门综合性学科。本章在简单介绍计算机网络诞生及发展过程的基础上，介绍计算机网络的定义、功能、计算机网络系统的组成、计算机网络体系结构等基本概念，引出计算机网络研究的基本问题，给出全书的内容知识结构。

1.1 计算机网络的诞生与发展

计算机技术与通信技术(Computer and Communication, C&C)的紧密结合，形成了现代计算机网络技术。计算机网络的发展过程是计算机技术与通信技术的融合过程。20 世纪 60 年代，计算机网络技术萌芽，70 年代兴起，以试验网络为主，出现了计算机局域网，80 年代，国际标准化组织(ISO)制定于计算机网络的开放型互联参考模型，学术网络得到了飞速发展，90 年代以商业网络为主，Internet 空前普及推广，Web 技术在 Internet/Intranet 中得到广泛应用。现在，计算机网络已发展成为信息社会的重要基础设施。

1.1.1 计算机网络的诞生

自从 1946 年冯·诺依曼发明第一台存储程序电子计算机以来，计算机技术的研究和应用取得了迅猛异常的发展。计算机的应用渗透到了各技术领域和社会的各个方面。社会的信息化、数据的分布处理和各种计算机资源共享种种应用需求，推动了计算机技术和通信技术的紧密结合。计算机网络技术就是这种结合的结果。早在 1951 年，美国麻省理工学院林肯实验室就平均为美国空军设计称为 SAGE 的半自动化地面防空系统，该系统于 1961 年建成，可以看作计算机技术与通信技术首次结合。SAGE 系统是一个专用网，整个系统分为 17 个防区，每个防区指挥控制中心配备了 4 台 IBM 公司当时 704 AS/400 计算机(每台计算机有 58 000 只电子管，耗电 1 500 kW)，由全部计算机构成的前量延迟处理器(FEP)通过通信线路连接

第1章 绪 论

自 20 世纪 70 年代世界上出现第一个远程计算机网络开始,到 80 年代的局域网,90 年代的综合业务数字网……计算机网络得到了异常迅猛的发展。计算机网络的规模不断扩大,功能也不断增强,今天已经形成了覆盖全球的互联网,并向着全球智能信息网发展。计算机网络技术的发展促进了信息技术革命“第三次浪潮”的到来,把人类社会从工业化时代推向了信息化时代。在 20 世纪末,接触、应用网络的人还很少;现在,计算机网络已成为社会结构的一个基本组成部分。网络的出现,改变了人们使用计算机的方式;而互联网的出现,又改变了人们使用网络的方式。互联网使计算机用户不再被局限于分散的计算机上,同时也脱离了特定网络的约束,计算机网络已遍布社会各个领域。任何人只要进入了互联网,就可以利用网络中丰富的资源。从某种意义上讲,计算机网络的发展水平不仅反映了一个国家计算机科学和通信技术的水平,同时也是衡量其国力及现代化程度的重要标志之一。

计算机网络涉及的内容比较广泛,已成为迅速发展并在信息社会中得到广泛应用的一门综合性学科。本章在简单介绍计算机网络诞生及发展过程的基础上,介绍计算机网络的定义、功能、计算机网络系统的组成、计算机网络体系结构等基本概念,讨论计算机网络研究的理论问题,给出全书的内容知识架构。

1.1 计算机网络的诞生与发展

计算机技术与通信技术(Computer and Communication, C&C)的紧密结合,形成了现代计算机网络技术。计算机网络的发展过程是计算机技术与通信技术的融合过程。20 世纪 60 年代,计算机网络技术萌芽;70 年代兴起,以试验网络为主,出现了计算机局域网;80 年代,国际标准化组织(ISO)制定了计算机网络的开放型互联参考模型,学术网络得到了飞速发展;90 年代以商业网络为主,Internet 空前普及推广,Web 技术在 Internet/Intranet 中得到广泛应用。现在,计算机网络已发展成为信息社会的重要基础设施。

1.1.1 计算机网络的诞生

自从 1946 年冯·诺依曼发明第一台存储程序电子计算机以来,计算机技术的研究和应用取得了迅猛异常的发展,计算机的应用渗透到了各技术领域和社会的各个方面。社会的信息化、数据的分布处理和各种计算机资源共享等种种应用需求,推动了计算机技术和通信技术的紧密结合。计算机网络技术就是这种结合的结果。早在 1951 年,美国麻省理工学院林肯实验室就开始为美国空军设计称为 SAGE 的半自动化地面防空系统,该系统于 1963 年建成,可以看作计算机技术与通信技术的首次结合。SAGE 系统是一个专用网,整个系统分为 17 个防区,每个防区指挥中心配置 2 台 IBM 公司当时的 AN/FSQ-7 计算机(每台计算机有 58 000 只电子管,耗电 1 500 kW)。由小型计算机构成的前置通信处理机(FEP),通过通信线路连接

防区内各雷达观测站、机场、防空导弹和高炮阵地，形成终端联机计算机系统。

计算机通信技术应用于民用系统的最早范例，是由美国航空公司与 IBM 公司在 20 世纪 50 年代初期开始联合研制、60 年代投入使用的联机飞机票预订系统 SABRE-I。它通过通信线路，将一台中央计算机 CABRE-I 与全美范围内 2 000 多台终端连接起来，进行实时事务处理。可以认为 SABRE-I 是计算机技术与通信技术结合的典范。另一个典型范例是在 1968 年投入运行的美国通用电器公司的信息服务网络（GE Information Services）。这是 20 世纪 60 年代出现的面向终端分布的最大分时商用数据处理系统，各终端连接 75 个远程集中器，这些远程集中器再连接 16 个中央集中器，其地理范围从美国本土延伸到加拿大、欧洲、日本和澳大利亚，分布在世界上的 23 个地点。

20 世纪 60 年代初，世界正处于冷战时期，美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Project Agency, DARPA）组织研究了一种受到攻击仍能有效实施控制和指挥的计算机系统。在 1964 年研究小组提交的研究报告中指出，这样的网络必须是分布式的，能够连接不同类型的计算机；各网络结点（Node）平等独立，每个结点上的计算机都能生成、接收和发送信息；在网络上传输信息应分解成小包，从源结点沿不同路线传送到目的结点后重新组装。1969 年 DARPA 建成了这个计算机网络，并按该组织名称命名为 ARPANet。ARPANet 采用了崭新的“存储转发分组交换”原理及传输控制协议/网际互联协议，即著名的 TCP/IP（Transmission Control Protocol/Internet Protocol），成功地连接了 4 台计算机系统。在 ARPANet 中提出的一些概念和术语至今仍被引用，为计算机网络的发展奠定了基础。因此，它有分组交换网之父的殊荣，而分组交换网的出现则被公认为现代电信时代的开始。ARPANet 的开通，标志着计算机网络的正式形成，是计算机技术与通信技术全面深入结合的里程碑。此后，许多大学、研究中心、企业集团，以及一些工业国家纷纷开始研制和建立专用的计算机网和公用交换数据网。

20 世纪 70 年代中期，随着计算机技术、通信技术的发展和应用领域的扩大，计算机网络技术一直在迅速发展。为了在更大范围内实现计算机资源的共享，人们将众多的局域网（Local Area Network, LAN）、广域网（Wide Area Network, WAN）互联起来，形成了规模更大的、开放的互连网络，即常说的因特网（Internet）。

1.1.2 计算机网络发展历程

计算机网络的发展已经有了几十年的历史，到今天，最大的也是大家最熟悉的计算机网络就是因特网。实际上，在 20 世纪 80 年代，没有人敢设想计算机网络能够发展得这样快，应用得这么广泛。目前，网络就是计算机，这已是计算机领域人人皆知的格言。纵观计算机网络的发展，经历了由简单到复杂、从低级到高级的历程，这一历程大致可分为面向终端的通信网络、分组交换网络、体系结构标准化网络及高速互连网络四个阶段。

1. 面向终端的通信网络（第一代）

面向终端分布的联机系统是计算机技术与通信技术结合的前驱，它由一台大型计算机和若干台远程终端设备通过通信线路连接起来，构成面向终端的通信网络，解决远程信息的收集、计算和处理。根据信息处理方式的不同，它们可分为实时处理联机系统、成批处理联机系统和分时处理联机系统。较为典型的是 1963 年美国空军建立的 SAGE，其结构如图 1.1 所

示。在这种联机系统中，终端 T（键盘和显示器）分布在各地，并独占一条通信线路，主计算机是网络的中心和控制器，通过线路复用控制器（MCU）和各终端相连。

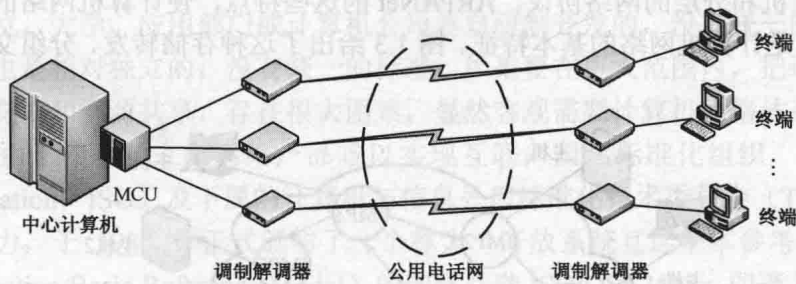


图 1.1 采用 MCU 的远程终端联机系统

20 世纪 60 年代初期，随着远程终端数目的增加，为减轻主计算机的负载，在通信线路和计算机之间设置了一个前端处理机（Front End Processor, FEP）或通信控制处理机（Communication Control Processor, CCP），专门负责与终端之间的通信控制，使数据处理和通信控制分工，形成了以单个计算机为中心的远程联机系统，如图 1.2 所示。其典型应用是由一台计算机和全美范围内 2000 多个终端组成的美国飞机订票系统。



图 1.2 以单计算机为中心的远程联机系统

面向终端的通信网络虽然还不能称为计算机网络，但它提供了计算机通信的技术基础，而这种系统本身也成为此后计算机网络的组成部分。因此，面向终端分布的联机系统称为面向终端的分布式计算机通信网，也称为第一代计算机网络。当时，人们把计算机网络定义为“以传输信息为目的而连接起来，实现远程信息处理或进一步达到资源共享的系统”。

2. 分组交换网络（第二代）

20 世纪 60 年代中期，出现了多台计算机互联的系统，开创了“计算机—计算机”的通信网络时代。

在面向终端的通信网络中，终端和计算机之间的数据通信是通过线路进行的。人们很快认识到这种传统的电路交换技术不适合计算机数据的传输，因为计算机中的数据通常是突发式、间歇性地出现在传输线路上，在整个占线期间，真正传送数据的时间往往不到 10%甚至只有 1%。在绝大多数时间内，线路往往是空闲的。另外，呼叫过程相对传送数据来说也太长。显然需要寻找一种新的交换方式来改变电路交换，以适应计算机通信的要求。在这种背景下，1964 年 8 月巴兰（Baran）在德国兰德公司（Rand）讨论分布式通信时提出了分组交换（Packet Switching）的概念。在此前后，即 1962 年至 1965 年，美国国防部高级研究计划局（DARPA）和英国国家物理实验室（NPL）对新型计算机通信网也进行了研究。1969 年 12 月，美国的分

组交换网络 ARPANet 投入正式运行，从此计算机网络的发展进入了一个新纪元。ARPANet 的主要特点是资源共享、分散控制、存储转发 (Store and Forward)、分组交换以及采用专门的通信控制处理机和分层的网络协议。ARPANet 的这些特点，使计算机网络的概念发生了根本变化，被认为是计算机网络的基本特征。图 1.3 给出了这种存储转发、分组交换计算机网络的示意图。

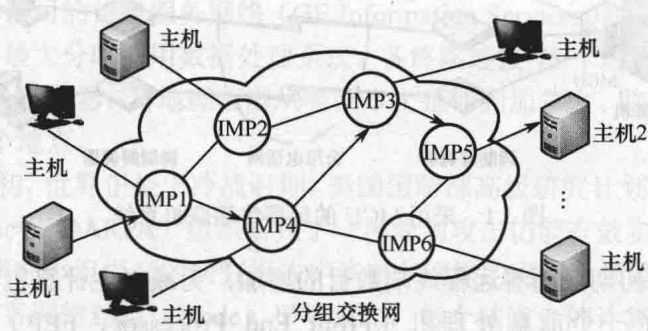


图 1.3 分组交换计算机网络示意图

在逻辑上，可以把 ARPANet 看成一种由资源子网 (Resource Subnet) 和通信子网 (Communication Subnet) 两级结构组成的计算机网络。ARPANet 中互联的运行用户应用程序的计算机称为主机 (Host)。但主机之间并不是直接通过通信线路互联，而是由接口报文处理机 (Interface Message Processor, IMP) 和它们之间的通信线路一起构成通信子网，实现数据传输与交换。由与通信子网互联的主机组成资源子网，负责信息处理、运行用户应用程序和向网络用户提供可共享的软硬件资源。当某主机 (如主机 1) 要与远程另一主机 (如主机 2) 通信时，主机 1 首先将信息送至本地直接与其相连的 IMP1 暂存，然后通过通信线路沿着适当的路径 (按一定原则静态或动态地予以选择) 转发至下一 IMP4 暂存，依次经过中间的 IMP3 中转，最终传输至目的 IMP5，并送入与之直接相连的目的主机 2。如此，由 IMP 组成的通信子网完成了数据在通信双方各 IMP 之间的存储和转发任务。采用这种方式，使通信线路不为某对通信双方所独占，大大提高了通信线路的利用率。ARPANet 中存储转发的信息基本单元是分组 (Packet)，它将整个要交换的信息报文 (Message) 分成若干信息分组，对每个分组按存储转发的方式在通信子网上传输。因此把这种以存储转发方式传输分组的通信子网，又称为分组交换数据网 (PSDN)。

目前，世界上运行的远程通信网多数采用分组交换数据网。由于这类通信子网大多数由政府部门或某个电信公司负责建设、运行，并向社会公众开放数据通信任务，如同公众交换电话网一样，故这类网也称为公用数据网 (Public Data Network, PDN) 或公用分组交换数据网 (PSDN)。ARPANet 中的 IMP，在 PSDN 中也被称为分组交换结点 (Packet Switch Node)。IMP 或分组交换结点通常是用小型计算机或微型计算机实现的，为了与资源子网中的主机相区别，也称为结点机。

ARPANet 的影响之所以深远，不仅在于它开创了第二代计算机网络，还在于由它发展成为了今天在世界范围内广泛应用的 Internet。

20 世纪 70 年代的计算机网络以试验网络为主，主要体现为由各国电信部门建设和运行的 X.25 分组交换网以及 Internet 的前身 ARPANet。

3. 体系结构标准化网络（第三代）

第二代计算机网络的出现，有力地促进了计算机网络技术的应用和发展。这个时期的网络多是由研究单位、大学、应用部门或计算机公司各自研制开发的，没有统一的网络体系结构；其网络产品也是相对独立的，没有统一的标准。如果要在更大范围内，把这些网络互联起来，实现信息交换和资源共享，存在很大困难。显然客观需要计算机网络体系结构由封闭式走向开放式。由于相对独立的网络产品难以实现互联，国际标准化组织（International Standards Organization, ISO）及下属的计算机与信息处理标准化技术委员会（TC97）经过多年卓有成效的努力，于 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）的国际标准 ISO/OSI 7498，即著名的 OSI 七层模型。自此，计算机网络开始走向国际化，网络具有了统一的体系结构，网络产品也有了统一的标准。通常把体系结构标准化的网络称为第三代网络。

20 世纪 70 年代中期，由于微电子和微处理机技术的发展，以及在短距离局部地理范围内计算机间进行高速通信要求的增长，计算机局域网技术应运而生。1980 年，美国电气电子工程师学会（IEEE）成立了 IEEE 802 局域网标准化委员会。经过几年的研究，IEEE 制定了 IEEE 802 系列标准，使局域网一开始就走上了标准化的轨道，所以说局域网是典型的第三代网络。进入 20 世纪 80 年代，随着办公自动化（OA）、管理信息系统（MIS）和计算机辅助设计（CAD）等各种应用需求的扩大，LAN 获得蓬勃发展。典型的 LAN 产品有较早的总线网 Ethernet，继之有 3COM 网、IBM 的令牌环网（Token Ring），以及新一代光纤局域网即光纤分布式数据接口（FDDI）等。这一阶段典型的标准化网络结构如图 1.4 所示，其通信子网的交换设备主要是路由器和交换机。

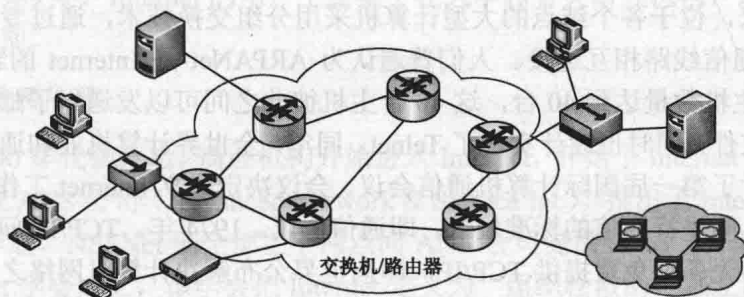


图 1.4 标准化网络结构示意图

20 世纪 80 年代的计算机网络以学术网络为主，主要体现在标准化计算机网络体系结构和局域网络技术的空前发展。

4. 高速互联网络（第四代）

随着局域网、城域网（Metropolitan Area Network, MAN）和广域网的迅速发展和应用，如何将它们连接起来，以便达到扩大网络规模和实现更大范围的资源共享成为人们关心的课题，Internet 恰好解决了这个问题。Internet 称为因特网或互联网，是全球规模最大、覆盖面最广的公共互联网。目前，全球以 Internet 为核心的高速互联网已经形成，并成为人类最重要的和最大的知识宝库。网络互联和高速计算机网络被称为第四代计算机网络。Internet 的一般框架结构如图 1.5 所示。

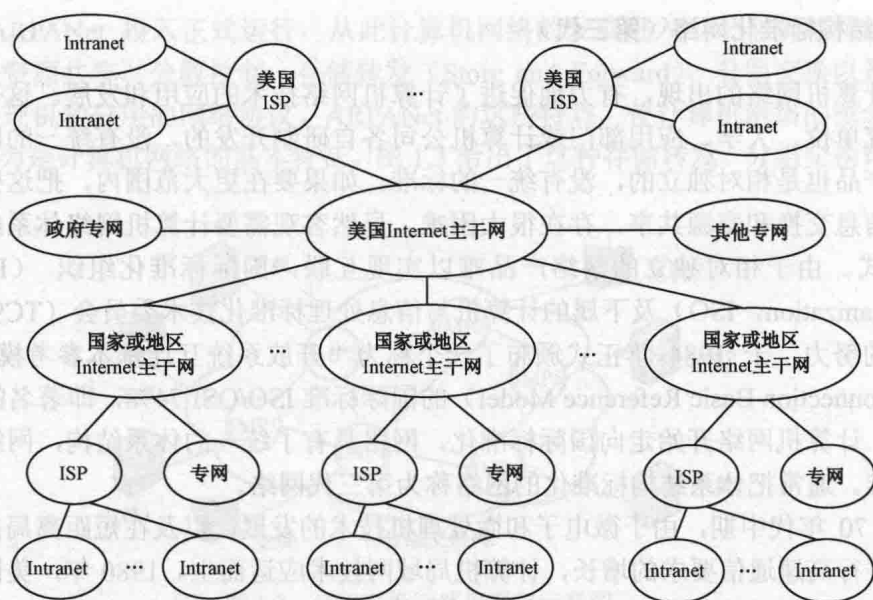


图 1.5 Internet 的基本框架结构

通过追溯 Internet 的起源与发展过程，可以进一步从宏观上理解 Internet 的体系结构。

1) 研究试验网阶段

Internet 的研究试验网阶段从 1969 年开始，结束于 1983 年主干网的形成，以 DARPA 建立的 ARPANet 网络为标志。当时建设这个网络的目的只是为了将美国的几个军事及研究用计算机主机连接起来，位于各个结点的大型计算机采用分组交换技术，通过专门的通信交换机（IMP）和专门的通信线路相互连接。人们普遍认为 ARPANet 是 Internet 的雏形。1972 年，ARPANet 网上的主机数量达到 40 台，这 40 台主机彼此之间可以发送电子邮件和利用文件传输协议发送文本文件，同时也设计实现了 Telnet。同年，全世界计算机业和通信业的专家学者在美国华盛顿举行了第一届国际计算机通信会议。会议决定成立 Internet 工作组，负责建立一种能保证计算机之间进行通信的标准规范，即通信协议。1974 年，TCP/IP 问世，随后美国国防部决定向全世界无条件免费提供 TCP/IP，即向世界公布解决计算机网络之间通信的核心技术。TCP/IP 模型核心技术的公开导致了 Internet 的大发展。1980 年，世界上有使用 TCP/IP 模型的美军方的 ARPANet，也有很多使用其他通信协议的各种网络。为了将这些网络连接起来，美国人 Vinton Cerf 提出了一个想法：在每个网络内部各自使用自己的通信协议，在与其他网络通信时使用 TCP/IP。这个思想催生了 Internet，并确立了 TCP/IP 模型在网络互联方面不可动摇的地位。1983 年初，ARPANet 上所有主机完成了向 TCP/IP 的转换，并使 TCP/IP 成为美国的军用标准，同时 Sun 公司也将它正式引入商业领域，以致形成了今天覆盖全球的 Internet。发展 Internet 时沿用了 ARPANet 的技术和协议，而且在 Internet 正式形成之前，已经建立了以 ARPANet 为主的国际网，这种网络之间的连接模式，也是随后 Internet 所采用的模式。

2) 推广普及网阶段

1983 年至 1989 年是 Internet 在教育、科研领域发展和普及使用的阶段，核心是美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）建设形成的主干网 NSFNet。1986 年，NSF