

高等院校精品课程系列教材

# 计算机网络原理

第2版

王志文 陈妍 夏秦 何晖 编著

西安交通大学



Introduction to  
Computer Networks  
Second Edition



机械工业出版社  
China Machine Press

高等院校精品课程系列教材

# 计算机网络原理

第2版

王志文 陈妍 夏秦 何晖 编著

西安交通大学

精品课程

常州大学图书馆  
藏书章

Introduction to  
Computer Networks  
Second Edition



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

计算机网络原理 / 王志文等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2019.8  
(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-63340-2

I. 计… II. 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 (2019) 第 165320 号

计算机网络原理是现代计算机学科领域的一门核心主干课程, 是计算机及相关专业必修的专业基础课程之一。本书以层次化的网络体系结构为线索, 针对通信子网功能详细地介绍了计算机网络的基本概念及数据通信的基本原理。在系统介绍网络体系结构、局域网、广域网及 Internet 基本原理的同时, 融合了大量近年来网络发展的热点技术, 如软件定义网络、物联网、云计算、P2P 应用等。

本书内容新颖、概念准确、深入浅出、图文并茂, 在突出计算机网络基本概念和原理的基础上, 与实用网络技术相结合, 力图反映计算机网络技术的最新发展。

全书共分 9 章, 内容选取适中、描述细腻、通俗易懂。除最后一章外, 其余各章均配有不同类型的习题, 便于学生强化和检验学习效果。本书可作为高等学校理工科专业本科生及研究生的计算机网络课程教材或教学参考用书, 也可供从事网络研究、网络工程建设与维护管理的技术人员使用。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余洁

责任校对: 李秋荣

印刷: 大厂回族自治县益利印刷有限公司

版次: 2019 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 20

书号: ISBN 978-7-111-63340-2

定价: 59.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东



# 前 言

计算机网络是当今发展迅速且广为应用的一门综合性学科，网络化已经成为信息化建设的必然，互联网已成为国家六大基础设施之一；相应地，计算机网络的开发、研究以及该领域专业技术人才的培养越发受到社会各界的广泛重视。

本书作者已从事计算机网络教学和研究工作多年，在长期的教学过程中，深切感受到新的网络技术和新的网络标准不断涌现，任何一本计算机网络教材若不能及时跟上新技术的发展步伐，都会变得陈旧。因此，作者依据多年为计算机专业本科生讲授计算机网络课程的经验以及相关科学研究的实践，在本书第1版的基础上加入了大量新的网络技术和应用知识，从而完成了本书的编写。

本书主要有以下特色：

1) 紧密结合国内实际教学需求。本书从组织形式、内容取舍到表述都更适合国内学生的思维模式与学习特点，更容易理解。

2) 理论与实践联系密切。本书在突出计算机网络基本概念和工作原理的基础上，加强与实用网络技术相结合，因此，本书不仅适合作为教材，也适合作为其他从事计算机网络工作的工程技术人员的参考用书。

3) 网络经典技术与新兴技术并重。本书在系统介绍计算机网络经典技术的同时，力图反映新兴的计算机网络技术，这对于拓展学生知识面、及时把握计算机网络技术的最新发展具有很大的参考价值。

4) 教辅资源配置合理。为了更好地让学生理解和掌握本书介绍的网络基础知识和实用技术，本书配置了专门的教辅资源，主要是通过实验的途径强化学生对课程内容的感性认识。

本书遵照计算机网络自底向上的层次结构进行编写，共分9章，各章内容简要介绍如下。

第1章为计算机网络概述，主要介绍计算机网络的发展历程、基本概念以及分类方式。

第2章介绍网络体系结构，涵盖网络体系结构的分层研究方法、专门术语及经典的网络参考模型。

第3章介绍数据通信技术，涵盖数据通信的基础知识及物理层协议，包括数据通信理论及模型、传输媒介、编码、复用以及交换等内容。

第4章介绍数据链路控制技术，涵盖差错控制、流量控制等协议，并概述了点到点协议。

第5章介绍局域网技术，涵盖IEEE 802标准、经典以太网技术、虚拟局域网技术、无线局域网技术。

第6章介绍广域网技术，涉及路由选择算法、拥塞控制、网络互连、网络接入，并描述了ATM、帧中继等广域网实例。

第7章介绍Internet基本原理，除了网际层协议IPv4、IPv6与传输层协议之外，还包括域名服务、电子邮件、万维网、远程文件传输以及网络管理等应用协议。

第8章介绍网络安全，包括网络安全定义与目标、密码学基础及应用、常见网络安全技术。

第9章介绍新兴网络技术与应用，涵盖当今热门网络技术与应用，包括SDN、MPLS、P2P、物联网、云计算以及移动互联网。

本书第1、2、3、4章由王志文执笔完成，第5、6、7章由陈妍执笔完成，第8、9章分别由夏秦、何晖执笔完成；全书由王志文统稿。另外，西安交通大学的朱海萍老师对本书的编写提出了很多有益的建言和提议，在此表示衷心感谢。

本书配套的电子教案及对应的教辅资源可在华章网站([www.hzbook.com](http://www.hzbook.com))免费下载。

由于计算机网络技术的发展迅速，而作者水平和能力有限，因此，尽管我们投入了大量的时间和精力，书中也难免存在某些缺点和错误，欢迎同行专家和读者批评指正，我们将不胜感激。

# 教学建议

若采用本书作为计算机网络课程的教材，那么根据作者的授课经历及经验，课时至少在 56 以上，最好是 60 课时，其中课堂授课 52 课时，实践环节 4~8 课时。下表给出了以 52 课时为标准的教学建议。

章节	教学要求	课时
第 1 章 计算机网络概述	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握计算机网络定义、分类标准、拓扑结构</li> <li>了解计算机网络发展历程、相关标准组织</li> </ul>	2
第 2 章 网络体系结构	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解分层设计思想</li> <li>掌握网络体系结构定义、接口服务、数据单元、服务类型</li> <li>掌握 OSI 模型与 TCP/IP 模型</li> </ul>	4
第 3 章 数据通信技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解傅里叶分析、信号频谱特性、数据通信系统模型</li> <li>掌握传输媒介、数据编码、通信评价指标、信号采样原理、信道复用技术、数字传输系统、数据交换技术、物理层规程</li> <li>了解物理层规程样例</li> </ul>	5
第 4 章 数据链路控制	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解向网络层提供的服务、帧边界划分方法、差错原因、海明码</li> <li>掌握 CRC 码、停等协议</li> <li>掌握发送窗口与接收窗口滑动过程、流量控制机理</li> <li>了解 SLIP 缺陷、PPP 工作流程</li> </ul>	5
第 5 章 局域网技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解 LAN 特征、IEEE 802 LAN 标准、ALOHA 协议、令牌协议</li> <li>掌握 CSMA 协议、以太网介质访问控制方法及帧格式、交换式与全双工以太网</li> <li>了解高速以太网的特点、VLAN 作用与划分方法</li> <li>掌握 802.11 WLAN 工作过程、信道分配方式</li> </ul>	8
第 6 章 广域网技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握数据报与虚电路转发机制</li> <li>了解路由器结构</li> <li>掌握距离向量路由、链路状态路由</li> <li>了解分层路由、组播路由</li> <li>掌握拥塞定义、开环控制、闭环控制</li> <li>了解网络互连设备、综合服务、区分服务、帧中继、ATM、互联网基本接入方式</li> </ul>	6
第 7 章 Internet 原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>掌握 IP 协议、IP 地址、ARP 协议</li> <li>了解 CIDR、ICMP、BGP</li> <li>掌握 RIP、OSPF、TCP、UDP</li> <li>了解网络应用模式、网络管理</li> <li>掌握 DNS、电子邮件、WWW</li> </ul>	15
第 8 章 网络安全	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解网络安全概念、网络安全威胁</li> <li>了解 IPSec、入侵检测、入侵容忍</li> <li>掌握公开密钥、数字签名、消息认证、防火墙工作机理</li> </ul>	4
第 9 章 网络技术与应用扩展	<ul style="list-style-type: none"> <li>了解 SDN 的缘由与机理</li> <li>了解 MPLS 工作原理</li> <li>了解物联网的概念及相关技术</li> <li>了解云计算的概念及相关技术</li> <li>了解 P2P 的概念及网络结构</li> </ul>	3

# 目 录

前言	
教学建议	
第1章 计算机网络概述	1
1.1 计算机网络的定义	1
1.2 计算机网络的发展历程	2
1.2.1 以单计算机为中心的联机系统	2
1.2.2 分组交换网络的出现	4
1.2.3 计算机网络体系结构标准化	5
1.2.4 局域网的崛起	6
1.2.5 Internet 时代	6
1.2.6 “三网”合一	8
1.2.7 宽带网络与全光网络技术	9
1.3 网络拓扑结构	10
1.4 计算机网络分类	12
1.5 计算机网络应用	14
1.5.1 计算机网络应用领域	14
1.5.2 计算机网络引发的社会问题	16
1.6 计算机网络技术国际标准化组织	16
1.6.1 国际标准组织	16
1.6.2 Internet 标准组织	17
1.6.3 电信标准组织	18
1.7 习题	18
第2章 网络体系结构	19
2.1 概述	19
2.2 网络分层	20
2.2.1 分层思想	20
2.2.2 层次设计主题	22
2.2.3 实体和协议	23
2.2.4 接口和服务	24
2.2.5 数据单元	25
2.2.6 面向连接服务和无连接服务	26
2.2.7 服务原语	28
2.2.8 服务与协议间关系	29
2.3 网络参考模型	30
2.3.1 OSI 参考模型	30
2.3.2 TCP/IP 参考模型	33
2.3.3 OSI 与 TCP/IP 参考模型的比较	34
2.4 五层网络参考模型	36
2.4.1 OSI 与 TCP/IP 参考模型的评价	36
2.4.2 五层网络参考模型概述	37
2.5 习题	37
第3章 数据通信技术	40
3.1 概述	40
3.2 数据通信理论基础	41
3.2.1 傅里叶分析	41
3.2.2 周期矩形脉冲信号的频谱特性	42
3.3 数据通信系统模型	43
3.3.1 数据通信系统基本结构	43
3.3.2 数据与信号	43
3.3.3 信道通信方式	44
3.3.4 数据传输方式	45
3.4 传输媒介	47
3.4.1 电磁波谱	47
3.4.2 双绞线	48
3.4.3 同轴电缆	49
3.4.4 光纤	50
3.4.5 无线媒介	52
3.5 数据编码	54
3.5.1 信号编码	54
3.5.2 调制编码	55
3.5.3 模拟数据数字化编码	56
3.6 数据通信性能指标	57
3.6.1 时延	57
3.6.2 传输速率	58
3.6.3 可靠性	59

3.6.4 信道极限容量	59	4.8 习题	99
3.7 信道复用技术	60	第5章 局域网技术	101
3.7.1 频分、时分复用	60	5.1 局域网概述	101
3.7.2 统计时分复用	61	5.1.1 局域网的基本特征	101
3.7.3 波分复用	62	5.1.2 IEEE 802 局域网体系结构	102
3.7.4 码分复用	63	5.2 广播式信道共享技术	104
3.8 数字传输系统	65	5.2.1 无冲突协议	105
3.8.1 PCM 体制	65	5.2.2 冲突协议	106
3.8.2 SONET 与 SDH	66	5.3 以太网	107
3.9 数据交换技术	68	5.3.1 传统以太网	107
3.9.1 电路交换	69	5.3.2 高速以太网	112
3.9.2 报文交换	70	5.3.3 交换式以太网	118
3.9.3 分组交换	70	5.3.4 全双工以太网	120
3.10 物理层规程	72	5.4 虚拟局域网	121
3.10.1 DTE 与 DCE	72	5.5 无线局域网及无线网络	124
3.10.2 物理层接口标准	73	5.5.1 无线局域网概述	124
3.10.3 EIA-232	74	5.5.2 IEEE 802.11 无线局域网	125
3.11 习题	76	5.5.3 IEEE 802.16 宽带无线网络	131
第4章 数据链路控制	78	5.5.4 移动网络	132
4.1 概述	78	5.5.5 蓝牙网络	135
4.2 帧边界划分方法	79	5.5.6 ZigBee 网络	138
4.3 差错控制	80	5.5.7 RFID	139
4.3.1 差错原因与特点	80	5.6 习题	141
4.3.2 差错控制方法	80	第6章 广域网技术	143
4.3.3 海明码	81	6.1 广域网概述	143
4.3.4 垂直水平奇偶校验码	82	6.1.1 广域网与网络层	143
4.3.5 循环冗余检验码	82	6.1.2 数据报与虚电路	144
4.3.6 校验和	84	6.2 路由算法	147
4.4 停等协议	85	6.2.1 路由基础	147
4.4.1 简单停等协议	85	6.2.2 距离向量路由算法	149
4.4.2 带流量控制的停等协议	86	6.2.3 链路状态路由选择算法	151
4.4.3 带差错控制的停等协议	87	6.2.4 路由器	152
4.4.4 停等协议效率分析	88	6.2.5 组播路由和广播路由	154
4.5 连续 ARQ 协议	90	6.3 拥塞控制	156
4.5.1 连续 ARQ 协议的工作原理	90	6.3.1 拥塞产生的原因	156
4.5.2 连续 ARQ 协议的定量分析	91	6.3.2 常用的拥塞控制方法	157
4.5.3 滑动窗口	92	6.4 网络互连	159
4.6 选择重传 ARQ 协议	95	6.4.1 网络互连的基本要求	159
4.7 点对点数据链路接入控制	95	6.4.2 网络互连设备	161
4.7.1 串行线路网际协议 (SLIP)	96		
4.7.2 点到点协议 (PPP)	97		

6.5 互联网接入技术	162	第 8 章 网络安全	239
6.5.1 电信网接入技术	163	8.1 网络安全基础	239
6.5.2 HFC 及有线电视宽带接入	165	8.1.1 网络安全风险	239
6.5.3 以太网接入	166	8.1.2 网络安全目标、服务和机制	239
6.5.4 无线接入	167	8.2 密码学基础及应用	241
6.5.5 电力线接入	169	8.2.1 密码学的发展	241
6.6 广域网实例	170	8.2.2 对称密钥密码学	242
6.6.1 X.25 分组交换网	170	8.2.3 公开密钥体制	243
6.6.2 帧中继	170	8.2.4 消息认证和数字签名	244
6.6.3 ATM	172	8.2.5 密钥的分发和管理	245
6.7 习题	173	8.3 网络安全技术	246
第 7 章 Internet 原理	176	8.3.1 防火墙	246
7.1 Internet 概述	176	8.3.2 网络入侵检测	249
7.2 网际层协议	176	8.3.3 入侵容忍	252
7.2.1 IP 协议与 IP 地址	176	8.4 网络安全威胁	255
7.2.2 IP 分组及其转发	178	8.4.1 分布式拒绝服务	255
7.2.3 ARP 协议	181	8.4.2 僵尸网络	257
7.2.4 CIDR 协议	182	8.5 因特网安全协议	261
7.2.5 ICMP 协议	184	8.5.1 网际层安全协议	261
7.2.6 NAT 协议	185	8.5.2 传输层安全协议	264
7.2.7 DHCP 协议	187	8.5.3 应用层安全协议	265
7.2.8 服务质量	188	8.6 习题	267
7.2.9 IPv6 协议	190	第 9 章 网络技术与应用扩展	269
7.3 Internet 路由协议	197	9.1 SDN	269
7.3.1 Internet 路由基本概念	197	9.1.1 SDN 定义及发展	269
7.3.2 路由信息协议	198	9.1.2 SDN 实现方案	270
7.3.3 开放式最短路径优先协议	199	9.1.3 SDN 核心技术	272
7.3.4 边界网关协议	202	9.1.4 OpenFlow 交换机规范	274
7.4 传输层协议	204	9.2 MPLS	277
7.4.1 用户数据报协议	205	9.2.1 MPLS 的产生背景	277
7.4.2 传输控制协议	207	9.2.2 MPLS 的基本概念	278
7.5 应用层	214	9.2.3 MPLS 的工作原理	280
7.5.1 应用层概述	214	9.2.4 MPLS 应用	281
7.5.2 网络应用模式	215	9.3 P2P	283
7.5.3 域名服务	218	9.3.1 P2P 组织结构	284
7.5.4 电子邮件传输协议	220	9.3.2 P2P 典型应用	288
7.5.5 万维网	224	9.4 物联网	290
7.5.6 远程文件传输	229	9.4.1 什么是物联网	290
7.5.7 简单网络管理协议	231	9.4.2 物联网体系架构及关键技术	292
7.6 习题	235		

9.4.3 物联网应用 .....	294	9.6 移动互联网 .....	303
9.5 云计算 .....	295	9.6.1 移动互联网内涵 .....	303
9.5.1 什么是云计算 .....	295	9.6.2 移动互联网的特点 .....	304
9.5.2 云计算体系架构 .....	296	9.6.3 移动互联网技术 .....	305
9.5.3 云计算的关键技术 .....	298	9.6.4 移动互联网的应用 .....	309
9.5.4 云计算平台 .....	302	参考文献 .....	310

# 第 1 章 计算机网络概述

## 1.1 计算机网络的定义

在计算机网络发展过程的不同阶段，人们对计算机网络提出了不同的定义。不同的定义反映着当时网络技术发展的水平，以及人们对网络的认知程度。这些定义从三种不同的观点来看待计算机网络，即广义的观点、资源共享观点与用户透明性的观点。从目前计算机网络的特点看，资源共享观点的定义能比较准确地描述计算机网络的基本特征。相比之下，广义的观点定义了计算机通信网络，而用户透明性的观点定义了分布式计算机系统。

资源共享观点将计算机网络定义为“以能够相互共享资源的方式互连起来的自治计算机系统的集合”。资源共享观点的定义符合目前计算机网络的基本特征，这主要表现在以下几个方面。

1) 计算机网络建立的主要目的是实现计算机资源的共享。计算机资源主要是指计算机硬件、软件与数据。网络用户不但可以使用本地计算机资源，而且可以通过网络访问联网的远程计算机资源，还可以调用网络中不同的计算机共同完成任务。

2) 互连的计算机是分布在不同地理位置的独立“自治计算机”。互连的计算机之间没有明确的主从关系，每台计算机既可以联网工作，也可以脱离网络独立工作。联网计算机可以为本地用户提供服务，也可以为远程网络用户提供服务。

3) 联网计算机之间的通信必须遵循共同的网络协议。

计算机网络是由多个互连的节点组成的，节点之间要做到有条不紊地交换数据，每个节点都必须遵守一些事先约定好的通信规则。这就和人们之间的对话一样，要么大家都说中文，要么大家都说英文，如果一个说中文，一个说英文，那么就需要找一个翻译人员。如果一个人只能说中文，另一个人又不懂中文，而又没有翻译人员，那么这两个人就无法进行交流。

判断计算机是否互连成计算机网络，主要看它们是不是独立的“自治计算机”。如果两台计算机之间有明确的主从关系，其中一台计算机能够强制另一台计算机开启与关闭，或者控制另一台计算机的自主运行，那么其中的受控计算机就不是“自治”的计算机。根据资源共享观点的定义，由一个中心控制单元与多个从站组成的计算机系统不是一个计算机网络。同样，带有多个远程终端或远程打印机的计算机系统也不是一个计算机网络，只能称为联机系统（因为历史上的许多终端都不能算是“自治计算机”）。但随着硬件价格的下降，许多终端都具有一定的智能，因而“终端”和“自治计算机”逐渐失去了严格的界限。因此，若把微型计算机作为终端使用，按上述定义，则早期的那种面向终端的计算机系统也可称为计算机网络。

“计算机通信”与“数据通信”这两个名词在不同的领域经常混用。早期的数据通信与现代的计算机通信显然是有区别的。但随着技术的进步，数据通信的含义也在发生变化。因此，可以认为计算机通信与数据通信是可混用的名词，如美国的著名期刊《Data Communication》所刊登的文章现在也大多是计算机网络领域的文章。大多数情况下，数据通信网往往指的是计算机网络中的分组交换网络。

对用户而言，计算机网络就是一种透明的传输机构，用户在访问网络共享资源时，无须

考虑这些资源所在的物理位置。为此，计算机网络通常以网络服务的形式来提供网络功能和透明性访问。

从上述计算机网络的定义中不难看出，它的核心功能就是资源共享，而我们经常提及的分布式系统也是为共享资源而提出的，二者究竟有何差异呢？计算机网络与分布式计算机系统虽然有相同之处，但二者并不等同。分布式计算机系统的主要特点是系统中的各计算机对用户是透明的。对用户而言，这种分布式计算机系统就好像是一台计算机一样，用户通过输入命令就可以运行程序，但用户并不知道是哪一台计算机在运行程序。实际上，是分布式系统在为用户选择最合适的计算机来运行其程序，并将运行的结果传送到合适的地方，而这些工作都不需要用户的干预。计算机网络则不同，用户必须事先明确登录要运行程序的计算机，然后按照该计算机的地址，将程序通过计算机网络传送到该目标计算机去运行。最后，根据用户的命令将结果传送到指定的计算机。由此可见，计算机网络不同于分布式计算机系统，二者的区别主要是软件的不同，尤其是应用软件方面表现得更为突出。一般说来，可以将分布式计算机系统看作计算机网络的一个特例。

计算机网络已经存在了半个多世纪，为信息共享和人类交互提供了极大的方便，尽管时代的变迁使得计算机技术和网络通信技术发生了许多重大变化和进步，但它们在特定的领域总是表现出相似的变化过程。为此，一些专业人士提出了一系列关于 IT 技术变迁的论断和预言，其中最为著名的有下述四个。

- Intel 公司的创始人之一戈登·摩尔（Gordon Moore）先生在 1964 年曾预言：集成芯片的能力每 18 个月提高一倍，而其价格则降低一半，这就是著名的摩尔定律（Moore's Law）。摩尔本人当初也没有预料到，这一预言一直延续到 21 世纪初仍然成立。
- 贝尔定律（Bell's Law）作为对摩尔定律的补充，其核心思想是：如果保持计算机能力不变，微处理器的价格每 18 个月降低一半、体积每 18 个月减小一半。
- 20 世纪 90 年代，发明以太网的鲍伯·麦特尔卡夫（Bob Metcalfe）提出：网络的价值同网络用户数量的平方成正比。对于网络上的  $n$  个用户，每个用户都可以共享其他用户的信息，即任何一个用户都可以使用整个网络上  $n$  个用户的信息，所以网络的价值与网络用户数量的平方成正比。
- 被称为数字时代三大思想家之一的乔治·吉尔德（George Gilder）于 1996 年在其著作《遥观宇宙》中预测：在未来 25 年，计算机网络的主干链路带宽每 6 个月增加一倍，其增长速率远远超过摩尔定律，是芯片增长速率的三倍。

以上四个论断和预言被人们习惯性称为 IT 时代的四大定律，它们揭示了计算机和计算机网络技术惊人的发展速度和美好灿烂的前景。可以说，计算机和计算机网络技术已经改写了社会发展历程，它们的飞速发展必将创造出人类历史更加辉煌的篇章！

## 1.2 计算机网络的发展历程

### 1.2.1 以单计算机为中心的联机系统

以单计算机为中心的联机系统通常被称为第一代计算机网络。20 世纪 60 年代中期以前，计算机主机昂贵，而通信线路和通信设备的价格相对便宜，为了共享主机资源（强大的处理能力）和进行信息的采集及综合处理，通常采用以单计算机为中心的联机系统这一结构形式。

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。该系统分为 17 个防区，每个防区的指挥中心装有两台 IBM 公司的 AN/FSQ-7 计算机，通过通信线路连接防区内各雷达观测站、机场、防空导弹和高射炮阵地，形成联机计算机系统。由计算机程序辅助指挥员决策，自动引导飞机和导弹进行拦截。SAGE 系统最先采用了人机交互作用的显示器，研制了小型计算机形式的前端处理机，制定了 1600bit/s 的数据通信规程，并提供了高可靠性的多种路径选择算法。SAGE 系统最终于 1963 年建成，被认为是计算机技术和通信技术结合的先驱。

最早应用计算机通信技术的民用系统是美国航空公司与 IBM 公司在 20 世纪 50 年代初开始联合研究、60 年代初投入使用的飞机订票系统 SABRE-1。这个系统由一台中央计算机与全美范围内的 2000 个终端组成，这些终端采用多点线路与中央计算机相连。美国通用电气公司的信息服务 (GE Information Service) 系统则是当时世界上最大的商用数据处理网络，其地理范围从美国本土延伸到欧洲、澳大利亚和日本，该系统于 1968 年投入运行，具有交互式处理和批处理能力。网络配置采用分层星形结构：各终端设备连接到分布在世界上 23 个地点的 75 个远程集中器，远程集中器分别连接到 16 个中央集中器；同时，各计算机也连接到中央集中器；最后，中央集中器经过 50kbit/s 线路连接到交换机。由于覆盖的地理范围很广，所以可以利用时差达到资源的充分利用。

以单计算机为中心的联机系统涉及多种通信技术和多种数据传输设备、数据交换设备等。从计算机技术角度来看，这是由单个用户独占一个系统发展到远距离的分时多用户系统。多终端联机系统主要有如下缺点：一是主机负荷较重，既要承担通信工作，又要承担数据业务处理工作，主机的效率低下；二是通信线路的利用率低，尤其在远距离时，每个分散的终端都要单独占用一条通信线路，费用昂贵；三是这种网络结构属于集中控制方式，可靠性低，中央主机的失效直接导致整个系统崩溃。

在早期的计算机通信网络中，为了提高通信线路的利用率并减轻主机的负担，人们开始使用多点通信线路、终端集中器以及前端处理机，这些技术对以后计算机网络的发展有着深刻的影响。

1) 多点通信线路就是在一条通信线路上串接多个终端，如图 1-1a 所示。这样，多个终端可以共享同一条通信线路与主机进行通信。由于主机 - 终端间的通信具有突发性和高带宽的特点，所以各个终端与主机间的通信可以分时地使用同一高速通信线路。相对于每个终端与主机之间都设立专用通信线路的点对点通信配置方式，这种多点线路能极大地提高信道的利用率。

2) 终端集中器和前端处理机 (Front-End Processor, FEP) 的作用是类似的，不过后者的功能要强一些。主机资源主要用于业务计算任务，如果由主机兼顾与终端的通信任务，那么一来会影响主机的计算任务，二来使主机的接口很多，配置过于庞大，系统灵活性不好。为了解决这一矛盾，可以把与终端通信的任务分配给专门的终端集中器。终端集中器的软硬件配置都是面向通信的，可以放置于终端相对集中的地点，它与各个终端以低速线路连接，收集终端的数据，然后用高速线路传送给主机的前端处理机。这种通信配置的结构如图 1-1b 所示。

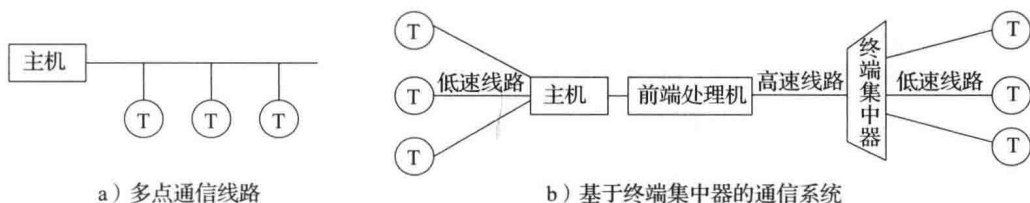


图 1-1 通信线路共享方式

终端集中器的硬件配置相对简单，它主要负责将数据从终端集中到主机，以及从主机分发到终端。显然，采用终端集中器可以提高远程高速通信线路的利用率。前端处理机除了具有以上功能外，还可以互相连接，并连接多个主机，具有路由选择功能，它能根据数据包的地址把数据发送到适当的主机。不过在早期的计算机网络中，前端处理机的功能还不是很强，互连规模也不是很大。

### 1.2.2 分组交换网络的出现

从 20 世纪 60 年代中期到 70 年代中期，随着计算机技术和通信技术的进步，能够将多个单计算机联机终端系统互相连接起来，形成了多计算机互连的网络。这种网络利用通信线路将多台计算机连接起来，利用分组交换技术传输网络数据，为用户提供服务。

第一种互连形式是通过通信线路将各计算机直接互连起来，主机既承担数据处理工作，又承担通信工作，如图 1-2a 所示。

第二种互连形式是把通信功能从主机中分离出来，设置专门的通信控制处理机 (Communication Control Processor, CCP)，主机间的通信通过 CCP 的中继功能间接进行。由多个 CCP 组成的传输网络称为通信子网，如图 1-2b 所示。

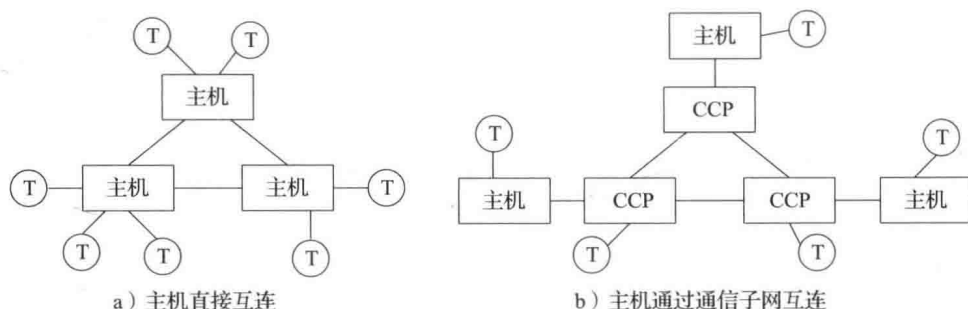


图 1-2 主机互连方式

通信控制处理机负责网上各主机间的通信控制和通信处理，它们组成的通信子网是计算机网络的内层或骨架层。主机负责数据处理，是业务资源的拥有者，它们组成了计算机网络的资源子网，是网络的外层。通信子网为资源子网提供信息传输服务，资源子网上用户间的通信是建立在通信子网基础上的。没有通信子网，主机间无法交互；而没有资源子网，通信子网的数据传输也失去了意义。两者共同组成了统一的资源共享的两层网络。将通信子网的规模进一步扩大，可使之变成社会公用数据通信网，如图 1-3 所示。这种网络允许异种机入网，兼容性好、通信线路利用率高，是计算机网络概念最全、设备最多的一种形式。

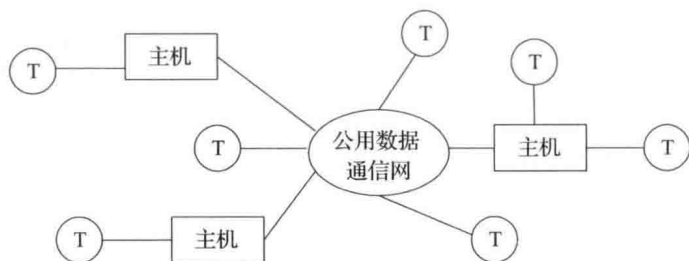


图 1-3 具有公用数据通信网的计算机网络

现代意义上的计算机网络是从1969年美国国防部高级研究计划署(DARPA)建成的ARPANET实验网开始的。该网络当时只有4个节点,以电话线路作为主干网络,两年后建成15个节点,进入工作阶段。此后ARPANET的规模不断扩大,到20世纪70年代后期,网络节点超过60个,主机有100多台,地域范围跨越了美洲大陆,连通了美国东部和西部的一些大学和科研机构,而且通过通信卫星与夏威夷和欧洲等地区的计算机网络相互连通。ARPANET的主要特点是:①资源共享;②分散控制;③分组交换;④采用专门的通信控制处理机;⑤分层的网络协议。这些特点往往被认为是现代计算机网络的一般特征。

早期的著名计算机网络还有以下几个:英国国家物理实验室NPL网络,20世纪70年代初连接主机12台,终端80多个;英国邮政局的EPSS公用分组交换网络(1973年);法国信息与自动化研究所(IRIA)的CYCLADES分布式数据处理网络(1975年);加拿大的DATAPAC公用分组交换网(1976年);日本电报电话公司的DDX-3公用数据网(1979年);等等。这些网络以远程大规模互连为其主要特点,称为第二代网络,根据应用目的可分为以下3种类型。

1) 用户为在一定地域范围内共享专用资源而建立的网络,如OCTOPUS网络,它是由美国加州大学劳伦斯原子能研究所建立的网络。它由2台CDC-7600、2台CDC-6600和其他一些机器的近500个终端组成,可共享容量巨大的数据库。另一个例子是DCS网,由加州大学欧文分校研制,是一个面向进程通信的分布式异构机环形网络。

2) 用户在一定的地域范围内以进行通信处理和通信服务为目的的通信网络,如欧洲情报网络(EIN)。

3) 用于商用目的的公用分组交换数据通信网络,如TELENET是由美国远航网络公司创建的,能够向美国国内250个城市、国外37个国家的用户提供服务的全球性分组交换网。另外,加拿大的DATAPAC、法国的TRANSPAC等都属于这一类型的网络。

### 1.2.3 计算机网络体系结构标准化

计算机网络通常按功能分为若干层(layer)。网络中各计算机之间要进行正常有序的通信,就必须遵循一定的约定,如信息应按什么顺序进行交互、信息应该如何表示等,这就是所谓的协议(protocol)。协议是同等层次实体之间进行信息交互的规则。计算机网络的层次结构及各层协议的集合统称为计算机网络的体系结构(architecture)。

早在20世纪70年代到80年代,世界上出现了大量的计算机网络,它们大都由研究部门、大学或公司各自独立研制开发,没有统一的体系结构,难以实现互连。这种封闭性使它们变成一个个孤岛,不能适应更大范围的信息交互与资源共享。于是,开放(open)就成为计算机网络发展的主题。

1977年,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成立了一个专门研究计算机网络体系结构标准化问题的分委员会,经过多年艰苦的努力,于1983年制定出了称为开放系统互连参考模型(Open System Interconnection/Reference Model, OSI/RM)的国际标准ISO 7498。该模型分为7层,每层都规定了相应的服务和协议标准,这些标准总称为OSI标准。OSI标准的基本宗旨就是开放,遵循该标准的系统都必须相互开放的,能够实现互连。

但是,OSI在实施时受到了诸多因素的制约,最终没有达到预期的效果。其原因是多方面的:首先,作为Internet基础的TCP/IP体系结构就是OSI的强大对手。因特网自诞生以来一直在迅猛发展,投资者(包括建网机构和用户)不会轻易放弃在TCP/IP上的巨额投资。其

次，OSI 虽然在学术上进行了大量的研究工作，但是它缺乏商业运作的驱动力。最后，OSI 网络体系结构本身分层过多，有些功能（如流量控制和差错控制）在多个层次中重复出现，比较复杂。

虽然 OSI 没有发展成新一代的计算机网络体系结构，但它所提出的不少关于计算机网络的概念和技术已被广泛地接受和使用，正是在 OSI 的推动和影响下，计算机网络体系结构的标准化才得以不断发展。

在 DARPA 资助下，20 世纪 70 年代末期鲍勃·卡恩和文特·瑟夫推出了 TCP/IP 协议规范。到 1983 年，DARPA 将 ARPANET 上的所有计算机都转向 TCP/IP 协议，并以 ARPANET 为主干建立和发展了 Internet，形成了 TCP/IP 体系结构。TCP/IP 体系结构虽然不是国际标准，但它的发展和应用都远远超过了 OSI，成为事实上的体系结构标准。20 世纪 90 年代，世界上多数国家相继建立了本国的主干网并接入 Internet。与此同时，Internet 则以惊人的速度发展，覆盖了全世界，使计算机网络迈入一个崭新的时代，这就是以 TCP/IP 体系结构为基础的 Internet 时代。

## 1.2.4 局域网的崛起

局域网（Local Area Network, LAN）是计算机网络发展史上的一个重要而又活跃的领域。LAN 的发展始于 20 世纪 70 年代，1972 年美国加州大学研制了 Newhall loop 网，1975 年施乐（Xerox）公司 Palo Alto 研究中心研制了第一个总线结构的实验性的以太网（Ethernet），1974 年英国剑桥大学计算机实验室建立了剑桥环（Cambridge Ring）网。20 世纪 80 年代，不同类型的 LAN 纷纷出现，并投入了市场。

超大规模集成电路（VLSI）技术的发展大大促进了微型计算机技术的发展，使得微型计算机的价格大幅度下降；同时，连接 LAN 的网络接口卡和其他联网设备的价格也不断下降，这些因素共同推动了微型机局域网 PC-LAN 的发展，其中以 Microsoft 公司的 Windows NT、Windows 2000 和 Novell 公司的 NetWare PC-LAN 最为著名和活跃。

目前，LAN 技术中发展最迅速的是以太网，历经 30 年的发展，其速度已由原来的 1Mbit/s 提高到今天的 10Gbit/s。以太网是 LAN 的主流网络，全世界大部分的 LAN 都是以太网，它保持了统治性的市场地位。

## 1.2.5 Internet 时代

Internet 自诞生以来也经历了几个阶段的变迁，包括 Internet、NGI 以及 Intranet 等。

### 1. Internet

20 世纪 90 年代以后，计算机网络进入一个崭新的历史时代，这就是因特网（Internet）时代。Internet 的应用发展从科研、教育到商用，逐步深入人类社会活动的各个角落。它改变了人们的生产、工作、生活和思维方式，对人类信息社会的发展有着巨大而深远的影响。

Internet 的形成和发展始于 20 世纪 60 年代后期，是由 ARPANET 发展演化而逐步形成的。70 年代末期，DARPA 又资助网络专家开发了著名的 TCP/IP 协议簇，并于 80 年代初期在 ARPANET 上正式使用。TCP/IP 协议簇为 Internet 的发展注入了新的活力，使网络互连成为现实。到 1983 年，ARPANET 网已连入 300 多台计算机，由美国政府部门和研究机构使用。1984 年，ARPANET 分成两个部分：一个用于军事，称为 MILNET；另一个用于民用科研和教育，仍称 ARPANET。它们都由多个网络互连而成。ARPANET 成为 Internet 的主干网。