



新编 21 世纪高等院校计算机系列规划教材

计算机网络

北京希望电子出版社 总策划

黄道颖 主 编

张 杰 甘 勇 李学桥 副主编

 科学出版社
www.sciencep.com



新编 21 世纪高等院校计算机系列规划教材

计算机网络

北京希望电子出版社 总策划

黄道颖 主 编

张 杰 甘 勇 李学桥 副主编

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书共分8章。主要讲述了计算机网络的发展与应用、计算机网络的分类、体系结构、参考模型,数据通信的基本概念和基础理论、传输介质、信道复用技术,数据链路层的基本技术以及基本协议原理、各种底层网络技术、各种局域网和高速局域网技术,网络层、传输层的原理、互连技术及其相关协议,网络应用程序相互作用模式以及各种具体的网络应用,密码学原理与常用的加密、认证、数字签名、数字摘要算法技术,网络通信安全基本原理与技术等内容。

本书结构严谨、层次分明、内容新颖。突出基本原理与基本技术以及计算机网络基础知识点的阐述,同时力图反映计算机网络的最新发展趋势与成果。每章都配有适量的典型习题,使读者能够直观、迅速地掌握计算机网络的基础知识和基本技能,实现学与用的真正统一。

本书适合高等院校计算机专业、电子信息以及通信专业高年级本科生和硕士研究生作为计算机网络课程的教材使用,同时也可供计算机网络设计人员、开发人员以及管理人员作为技术参考书使用。

需要本书或技术支持的读者,请与北京清河6号信箱(邮编:100085)发行部联系,电话:010-82702660, 82702658, 62978181(总机)转103或238 传真:010-82702698 E-mail: tbd@bhp.com.cn。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络 / 黄道颖主编. —北京: 科学出版社, 2006.9

(新编21世纪高等院校计算机系列规划教材)

ISBN 7-03-017713-4

I. 计... II. 黄... III. 计算机网络 IV. TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第083011号

责任编辑: 张海玲 / 责任校对: 娄 艳
责任印刷: 东 升 / 封面设计: 梁运丽

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>

北京东升印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年9月第1版 开本: 787×1092 1/16

2006年9月第1次印刷 印张: 24

印数: 1-3 000 字数: 550 000

定价: 35.00 元

新编 21 世纪高等院校计算机系列规划教材编委会

主任： 陈火旺 全国工科院校计算机专业教学指导委员会主任
中国工程院院士

副主任： 沈复兴 全国高等师范学校计算机教育研究会理事长

何炎祥 武汉大学计算机学院院长

桂卫华 中南大学信息科学与工程学院院长

李仁发 湖南大学计算机与通信学院院长

陆卫民 中国科学出版集团北京希望电子出版社社长

委员：（按姓氏笔画为序）

于 戈 王志英 甘 勇 刘水强 刘先省 成礼智 李节阳

张 钢 肖建华 吴建国 陈立潮 陈志刚 杨 波 杨宗源

周学毛 金 海 郑明红 赵 锐 高守平 谢长生 韩国强

秘 书： 李节阳

总 序

一本好书，是人生前进的阶梯；一套好教材，就是教学成功的保证。为满足培养应用型人才的需要，我们成立了本编委会。在明确高等院校应用型人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系的框架下，我们组织编写了本套规划教材。

为了使本套教材能够达成目标，编委会做了大量的前期调研工作，在广泛了解各高等院校的教学现状、学生水平、培养目标的情况下，认真探讨了课程设置，研究了课程体系。为了编写出符合教学需求的好教材，我们除了聘请一批计算机知名专家、教授作为本套教材的主审和编委外，还组织了一批具备较高的学术水平、丰富的教学经验、较强的工程实践能力的学术带头人和骨干教师来承担具体编写工作，从而编写出特色鲜明、适用性强的教材，以真正满足目前高等院校应用型人才培养的需要。教材编写采用整体规划、分步实施、在实践中检验提高的方式，分期分批地启动编写计划。编写大纲以及教材编写方式的确定均经过编委会多次认真讨论，以确保该套教材的高质量和实用性。

本套规划教材的主要特点是：

(1) 以服务教学为最高宗旨，认真做好教学内容的取舍、教学方法的选取、教学成果的检验工作。本套教材在教学过程中的有益反馈，都将及时体现在后续版本。

(2) 面向应用型高等院校，在保证学科体系完整的基础上把握好理论的深度和难度。注重理论知识与实践相结合，使学生通过实践深化对理论的理解，学会并掌握理论方法的实际运用。从而较好地培养学生的专业技能和实施工程的实用技术能力。

(3) 教材在内容编排上，力求由浅入深，循序渐进；举一反三，突出重点；语言简练，通俗易懂。采用模块化结构，兼顾不同层次的需求，在具体授课时可根据具体教学计划适当取舍内容。

(4) 教材采用“任务驱动”的编写方式，以实际问题引出相关原理和概念，在讲述实例的过程中将本章的知识点融入，通过分析归纳，介绍解决工程实际问题的思想和方法，同时，引入案例教学和启发式教学方法，便于激发学习兴趣。

(5) 在教材中加大实训部分的比重，使学生能比较熟练地应用计算机知识和技术解决实际问题，既注重培养学生分析问题的能力，也注重培养学生解决问题的能力。

(6) 大部分教材配有电子教案，从而更好地服务教学。

为编写本套教材，作者们付出了艰辛的劳动，编委会的各位专家进行了悉心的指导和认真的审定。书中参考、借鉴了国内外同类的优秀教材和专著，在此一并表示感谢。

我们衷心希望更多的优秀教师参与到教材建设中来，真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵意见和建议。

若有投稿或建议，请发电子邮件到 textbook@bhp.com.cn。谢谢！

新编 21 世纪高等院校计算机系列规划教材编委会

前 言

随着微电子技术、计算机技术和通信技术的迅速发展和相互渗透，计算机网络已成为当今最热门的学科之一，在过去的几十年里取得了很大的进步，尤其是在近十几年来得到了高速发展。在 21 世纪，计算机网络尤其是 Internet 技术已经在改变着人们的生活、学习、工作乃至思维方式，并对科学、技术、政治、经济以及整个社会产生了巨大的影响，一个国家的经济建设、社会发展、国家安全以及政府的高效运转都将越来越依赖于计算机网络。

本书重点阐述了目前计算机网络采用的比较成熟的思想、结构和方法，并且力求做到深入浅出、通俗易懂。在内容选择上，一方面以 ISO/OSI 参考模型为背景介绍了计算机网络的体系结构、基本概念、原理和设计方法；另一方面以 TCP/IP 协议族为线索详细讨论了各种常用的网络互连协议和网络应用协议，并较系统地讨论了计算机网络安全原理与技术。考虑到许多计算机专业的学生对数据通信知识的缺乏，书中介绍了有关数据通信基础知识的内容，力求使本书在内容上保持相对完整。

本书共 8 章，第 1 章为计算机网络概述，内容涉及计算机网络的发展与应用、主要功能、分类、网络体系结构、网络参考模型以及网络标准化组织的有关知识；第 2 章介绍了数据通信知识，涉及数据通信基本概念和基础理论、传输介质、多路复用技术、数据交换技术、调制解调技术以及物理层接口技术等内容；第 3~4 章讨论了数据链路层基本技术基础以及基本协议原理，各种底层网络技术，涉及各种局域网和高速局域网技术；第 5~6 章讨论网络层原理、互连技术及其相关协议，涉及网络互连、TCP/IP 参考模型、IP 协议簇、IP 路由以及 TCP 和 UDP 以及客户/服务器模型、套接字编程接口等内容；第 7 章讨论了网络应用程序相互作用模式以及各种具体的网络应用，涉及域名系统、文件传输和访问、电子邮件、万维网技术以及流式多媒体技术、新型应用层网络——P2P 网络；第 8 章讨论了密码学原理与常用的加密、认证、数字签名、数字摘要算法技术、网络通信安全基本原理与技术等内容。

本书由黄道颖担任主编，张杰、甘勇、李学桥担任副主编。第 1 章由黄道颖、甘勇编写，第 2 章由梁文静、李勇编写，第 3 章由申红雪、张杰编写，第 4 章由吉星、李建春、刘书如、吴强编写，第 5 章由黄道颖、程立辉编写，第 6 章由李学桥、吴强编写，第 7 章由甘琤、程源、杨杰、崔建涛编写，第 8 章由熊坤、张静、张杰编写。黄道颖、张杰、甘勇、李学桥还负责了本书的统稿和组织工作。在本书的编写和出版过程中，得到了郑州轻工业学院教务处和中国科学出版集团北京希望电子出版社的大力支持，在此由衷地向他们表示感谢！

由于计算机网络技术发展非常迅速，涉及的知识面广，加之作者水平有限，书中错漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 计算机网络概述	1	2.2 导向的传输介质和非导向的传输介质	43
1.1 计算机网络的发展与应用	2	2.2.1 导向的传输介质	44
1.1.1 计算机网络的定义	2	2.2.2 非导向的传输介质	50
1.1.2 计算机网络的发展过程	2	2.3 模拟传输与数字传输	55
1.1.3 计算机网络的应用	11	2.3.1 模拟传输系统	57
1.2 计算机网络的分类	12	2.3.2 调制解调器	58
1.2.1 按网络的交换功能进行分类	12	2.3.3 数字传输系统	60
1.2.2 按网络的作用范围进行分类	12	2.4 信道复用技术	62
1.2.3 按用来控制网络的网络操作系统来分类	14	2.4.1 频分多路复用	63
1.2.4 按照协议对网络分类	16	2.4.2 时分多路复用	64
1.2.5 按网络的使用者进行分类	17	2.4.3 波分多路复用	66
1.3 计算机网络体系结构	17	2.4.4 码分复用	67
1.3.1 协议分层	17	习题	69
1.3.2 面向连接与无连接的服务	19	第3章 数据链路层	70
1.3.3 服务原语	20	3.1 数据链路层的设计要点	70
1.3.4 服务与协议的关系	22	3.1.1 为网络层提供的服务	70
1.4 参考模型	23	3.1.2 成帧	71
1.4.1 OSI 参考模型	23	3.1.3 错误控制	74
1.4.2 TCP/IP 参考模型	27	3.1.4 流控制	75
1.4.3 OSI 参考模型与 TCP/IP 参考模型的比较	30	3.1.5 链路管理	75
1.4.4 本书网络教学参考模型	32	3.2 错误检测和纠正	75
1.5 网络标准化	34	3.2.1 纠错码	75
1.5.1 电信领域中最有影响的组织	34	3.2.2 检错码	77
1.5.2 国际标准领域中最有影响的组织	35	3.3 基本数据链路协议	80
1.5.3 Internet 标准领域中最有影响的组织	36	3.3.1 一个无限制的单工协议	81
习题	37	3.3.2 一个单工的停-等协议	82
第2章 物理层	38	3.3.3 有噪声信道的单工协议	83
2.1 数据通信概述	38	3.4 滑动窗口协议	86
2.1.1 傅立叶分析	38	3.4.1 滑动窗口协议的基本原理	86
2.1.2 有限带宽信号	39	3.4.2 1位滑动窗口协议	88
2.1.3 信道的最大数据传输速率	42	3.4.3 回退 n 帧滑动窗口协议	89
		3.4.4 选择性重传滑动窗口协议	89
		3.5 数据链路层协议示例	90
		3.5.1 高级数据链路控制 HDLC	90

3.5.2 PPP 协议.....	93	4.7.1 从 802.x 到 802.y 的网桥.....	155
3.5.3 帧中继.....	99	4.7.2 本地的网络互连.....	158
习题.....	103	4.7.3 生成树网桥.....	160
第 4 章 局域网及介质访问控制子层.....	107	4.7.4 远程网桥.....	161
4.1 局域网概述.....	107	4.7.5 虚拟 LAN.....	161
4.2 多路访问协议.....	108	习题.....	164
4.2.1 ALOHA 系统.....	108	第 5 章 网络层及网络互联.....	165
4.2.2 载波检测多路访问协议.....	109	5.1 网络层设计要点.....	165
4.2.3 无冲突的协议.....	114	5.1.1 为传输层提供的服务.....	165
4.2.4 有限竞争协议.....	115	5.1.2 无连接服务的实现.....	166
4.2.5 波分多路访问协议.....	117	5.1.3 面向连接服务的实现.....	167
4.3 以太网.....	119	5.1.4 虚电路交换和数据报交换 的比较.....	168
4.3.1 以太网的体系结构.....	120	5.2 路由算法.....	169
4.3.2 曼切斯特编码.....	124	5.2.1 路由算法概述.....	170
4.3.3 以太网 MAC 子层协议.....	125	5.2.2 最短路径路由选择.....	171
4.3.4 二元指数后退算法.....	126	5.2.3 固定式静态路径选择算法.....	173
4.3.5 以太网的性能.....	127	5.2.4 扩散路由算法.....	173
4.3.6 交换式以太网.....	128	5.2.5 基于流量的路由选择.....	174
4.3.7 快速以太网.....	129	5.2.6 动态自适应路由选择算法之 距离矢量路由选择算法.....	175
4.3.8 千兆以太网.....	132	5.2.7 动态自适应路由选择算法之 链路状态路由选择算法.....	178
4.3.9 IEEE 802.2: 逻辑链路控制.....	134	5.2.8 分级的路由选择.....	181
4.4 无线 LAN.....	136	5.3 拥塞控制算法.....	181
4.4.1 802.11 协议栈.....	137	5.3.1 拥塞控制的通用原则.....	181
4.4.2 802.11 物理层.....	137	5.3.2 拥塞控制的一般原理.....	184
4.4.3 802.11 MAC 子层协议.....	138	5.4 服务质量.....	184
4.4.4 802.11 帧结构.....	141	5.5 网络互联.....	186
4.4.5 无线 LAN 提供的服务.....	142	5.5.1 网络的不同之处.....	186
4.5 宽带无线网络.....	143	5.5.2 路由器及其在网际互联中 的作用.....	188
4.5.1 802.11 和 802.16 的比较.....	143	5.6 IP 协议.....	192
4.5.2 802.16 协议栈.....	146	5.6.1 IP 协议.....	192
4.5.3 802.16 物理层.....	146	5.6.2 IP 地址.....	192
4.5.4 802.16 MAC 子层协议.....	148	5.6.3 IP 地址与硬件地址.....	196
4.5.5 802.16 帧结构.....	150	5.6.4 地址解析协议 ARP 和逆地址 解析协议 RARP.....	197
4.6 802.5 令牌环网.....	151		
4.6.1 802.5 令牌环网的体系结构.....	151		
4.6.2 802.5 MAC 子层协议.....	152		
4.6.3 802.5 协议栈.....	153		
4.6.4 802.5 帧结构.....	154		
4.7 数据链路层交换.....	155		

5.6.5	IP 数据报的格式	200
5.7	划分子网和构造超网	204
5.7.1	划分子网	204
5.7.2	使用子网掩码的分组转发过程	207
5.7.3	无分类编址域间路由 CIDR	208
5.8	因特网控制报文协议	212
5.9	因特网路由选择协议	214
5.9.1	内部网关协议 RIP	216
5.9.2	内部网关协议 OSPF	220
5.9.3	多播路由	224
5.10	外部网关路由协议	227
5.11	IPv6	230
5.11.1	IPv6 的首部	233
5.11.2	IPv6 的地址空间	235
5.11.3	从 IPv4 向 IPv6 过渡	237
5.11.4	ICMPv6	238
习题		239
第 6 章	传输层	241
6.1	概述	241
6.1.1	向上层提供的服务	241
6.1.2	传输服务原语	242
6.1.3	Berkeley Socket (伯克利套接字)	244
6.1.4	套接字程序设计的例子: 一个 Internet 文件服务器	245
6.2	传输协议的要素	249
6.2.1	编址	249
6.2.2	建立连接	252
6.2.3	释放连接	254
6.2.4	流控制和缓冲	256
6.2.5	多路复用	257
6.3	用户数据报协议	257
6.3.1	UDP 协议的主要特点	257
6.3.2	UDP 的基本工作过程	258
6.3.3	UDP 端口号分配方法	260
6.3.4	UDP 数据报格式	261
6.3.5	远程过程调用	262
6.3.6	实时传输协议	264
6.4	传输控制协议 TCP	266

6.4.1	TCP 协议的主要特点	266
6.4.2	TCP 的端口号分配和 Socket 地址	267
6.4.3	TCP 报文段的格式	268
6.4.4	TCP 传输连接建立与释放	269
6.4.5	TCP 流量与拥塞控制	270
6.4.6	TCP 差错控制	274
6.4.7	TCP 的计时器	275
6.4.8	无线 TCP 和 UDP	276
6.4.9	事务型 TCP	278
习题		279
第 7 章	网络应用层	280
7.1	DNS 协议	280
7.1.1	DNS 名字空间	281
7.1.2	资源记录	283
7.1.3	DNS 服务器	284
7.1.4	域名解析过程	285
7.2	万维网	287
7.2.1	体系结构	288
7.2.2	超文本传输协议 HTTP	289
7.2.3	静态 Web 文档	291
7.2.4	动态 Web 文档	294
7.2.5	无线 WAP	296
7.3	文件传输协议 FTP	299
7.3.1	FTP 协议命令	300
7.3.2	FTP 协议命令响应	301
7.3.3	FTP 软件	303
7.4	电子邮件	303
7.4.1	简单邮件传输协议 SMTP 简介	304
7.4.2	邮局协议第三版 POP3 简介	306
7.4.3	电子邮件地址	308
7.4.4	电子邮件信息格式	308
7.4.5	邮件服务与 DNS MX 记录	310
7.5	多媒体	310
7.5.1	数字音频介绍	310
7.5.2	流式音频	312
7.5.3	Internet 电台	313
7.5.4	IP 电话	314
7.5.5	数字视频简介	316

7.5.6	视频点播.....	318	8.4.2	公开密钥数字签名.....	347
7.5.7	多播骨干网 MBone.....	319	8.4.3	消息摘要.....	347
7.6	新一代应用层网络技术		8.4.4	生日攻击.....	348
	——P2P 计算.....	320	8.5	认证协议.....	348
7.6.1	P2P 技术的起源.....	320	8.5.1	基于共享密钥的认证.....	348
7.6.2	P2P 网络的分类.....	321	8.5.2	Diffie-Hellman 密钥交换协议.....	350
7.6.3	P2P 技术的应用.....	324	8.5.3	使用密钥分发中心的认证协议.....	351
7.6.4	P2P 与 Client/Server (C/S) 比较..	326	8.5.4	使用 Kerberos 的认证协议.....	353
7.6.4	P2P 技术的未来.....	327	8.5.5	使用公开密钥密码学的认证协议...354	
	习题.....	327	8.6	通信安全.....	355
第 8 章	网络安全.....	328	8.6.1	IPSec.....	355
8.1	密码学.....	328	8.6.2	防火墙.....	356
8.1.1	密码学简介.....	328	8.6.3	入侵检测系统.....	358
8.1.2	置换密码.....	328	8.6.4	虚拟私有网络.....	360
8.1.3	代替密码.....	329	8.6.5	无线网络的安全.....	361
8.1.4	一次一密乱码本.....	331	8.7	电子邮件安全.....	361
8.1.5	两条基本的密码学原则.....	332	8.7.1	PGP 邮件公钥加密技术.....	361
8.2	对称密钥算法.....	333	8.7.2	PEM 加密加强型邮件标准.....	362
8.2.1	DES 数据加密标准.....	334	8.7.3	S-MIME 安全多用途网际 邮件扩充协议.....	363
8.2.3	密码算法的使用模式.....	338	8.8	Web 安全.....	364
8.2.4	其他密码算法.....	340	8.8.1	安全威胁.....	364
8.2.5	密码分析.....	341	8.8.2	安全的命名机制.....	366
8.3	公开密钥算法.....	341	8.8.3	安全套接字层 SSL.....	367
8.3.1	RSA.....	342	8.8.4	移动代码的安全.....	369
8.3.2	其他的公开密钥算法.....	343	习题.....		370
8.3.3	公钥的管理.....	344	参考文献.....		371
8.4	数字签名.....	345			
8.4.1	对称密钥签名.....	346			

第 1 章 计算机网络概述

在过去的近三百年中，每一百年都有一种关键技术改变着人类的生活方式。18 世纪伴随着工业革命的到来，人类进入机械时代；19 世纪则是蒸汽机时代；计算机是 20 世纪人类最伟大的发明之一，它的产生标志着人类开始迈向一个崭新的信息社会。从工业革命到信息革命，一个根本的变革就是从劳动密集型社会转入到知识密集型社会。在 20 世纪的最后 10 年中，信息技术领域的关键技术是信息的收集、处理和发布，全球性的电话、无线广播、电视系统的部署迅速地改变着人类社会，计算机技术与上述技术的快速融合，将人类带入了前信息时代；21 世纪则是一个以网络为核心的后信息时代，其重要特征就是信息的收集、处理和发布的数字化、网络化，而起核心作用的就是计算机网络，这正是本书所要讨论的内容。

计算机技术和通信技术的结合，对计算机系统的组织方式产生了深远的影响。单台大型计算机为机构中所有需求服务这一概念很快被大量分散但又互联的计算机共同完成的模式所代替。这样的系统被称为“计算机网络”。这就是早期计算机网络产生的原因。进入 20 世纪 90 年代以后，以因特网（Internet）为代表的计算机网络得到了飞速的发展，已从最初的教育科研网络逐步发展成为商业网络，并已成为仅次于全球电话网的世界第二大网络，并有望成为融合电话网络、电视网络的世界第一大“终极信息网络”。不少人认为现在已经是因特网时代，因特网正改变着人们工作和生活的各个方面，它已经为世界范围内的国家带来了巨大的好处，并加速推进了全球信息革命的进程。现代人们的生活、工作、学习以及交往都已离不开因特网。

1993 年 9 月 15 日，美国政府发布“国家信息基础结构行动计划(NII, National Information Infrastructure)”，即所谓的“信息高速公路”计划，这个计划提出，高速信息网络是国家信息基础结构的一个重要组成部分。1997 年，美国又提出了“下一代互联网行动计划”NGN (Next Generation Network)，按照预想，NGN 几乎是一个无所不包的网络，将电话网、移动网、互联网等各种网络都涵盖进来，目的就是为了解决现有网络的缺陷和不足，满足人类对移动性和大数据量信息的需求。这是一个宽泛的名词，包括了软交换网络、下一代互联网以及下一代移动网的所有含义。

目前，互联网的发展又即将进入一个新的时代——网格计算时代。世界主要国家和地区都把发展网格技术放到了战略高度，纷纷投入巨资，抢占战略制高点。清华大学李三立院士将网格与 NII 作了比较，他说：“将先进计算基础设施（即网格）与信息高速公路相比较，可以说，信息高速公路是信息传输和获取的信息基础设施；而网格则是信息处理的信息基础设施。虽然，国内外都有不断把信息高速公路扩充频带宽度、改进路由器性能的计划；但是，目前国际上科学家一致认为：真正的下一代信息基础设施是先进计算基础设施（网格）。它将使以计算机为主体的信息处理发生根本性的变化。”

现在全世界所有的工业发达国家和很多发展中国家纷纷研究和制定本国的信息基础设施的计划。这就使得计算机网络的发展进入了一个新的历史阶段，并成为尽人皆知的热门学科。下面本书将从计算机网络的发展与应用开始讨论。

1.1 计算机网络的发展与应用

1.1.1 计算机网络的定义

计算机网络的精确定义并未统一。关于计算机网络的最简单的定义是：以交换共享信息为目的的，一些自主计算机的互联集合。两台计算机如果能够通过通信介质连接在一起，互相交换信息即可称为互联。自主计算机这一概念排除了网络系统中主从关系的可能性。如果一台计算机可以被另一台计算机强制启动、停止或控制，则它就不是自主的。因此，按照这一定义，一台主控机和多台从属机的系统不能称为网络。同样的，一台带有远程打印机和终端的大型机系统也不是网络。

最简单的计算机网络就只有两台计算机和连接它们的一条通信线路，即两个结点和一条链路。因为没有第三台计算机，因此不存在交换的问题。最庞大的计算机网络就是因特网，它由非常多的计算机网络通过许多路由器互连而成。因此因特网也称为“网络的网络”（network of networks）。

需要指出的是，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最主要特点是整个系统中的各计算机对用户都是“透明的”。也就是说，对用户来说，这种分布式计算机系统就好像只有一个计算机一样。用户通过键入命令就可以运行程序，但用户并不知道是哪一个计算机在为他运行程序。是操作系统为用户选择一个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，这些都不需要用户的干预。而计算机网络则不同，它主要解决的是计算机主机之间的互联通信的问题。因此，用户必须先要在欲运行程序的计算机进行登录，然后按照该计算机的地址，将命令请求通过计算机网络传送到该计算机去运行。最后，根据用户的命令将结果传送回原计算机。由此可见，计算机网络并不等同于分布式计算机系统。二者的区别主要是软件的不同。一般说来，分布式计算机系统是构建在计算机网络基础之上的系统。当然，也有一些分布式计算机系统从本质上讲不是计算机网络（例如，分布式多 CPU 并行计算机系统）。

1.1.2 计算机网络的发展过程

1. 分组交换网络的产生

计算机网络涉及到通信与计算机两个领域。计算机与通信日益紧密的结合，已对人类社会的进步做出了极大的贡献。计算机与通信的相互结合主要有两个方面：一方面，通信网络为计算机之间的数据传递和交换提供了必要的手段；另一方面，数字计算技术的发展渗透到通信技术中，又提高了通信网络的各种性能。当然，这两个方面的进展都离不开人们在超大规模集成电路 VLSI 技术上取得的辉煌成就。

现代计算机网络实际上是 20 世纪 60 年代美苏冷战时期的产物。在 60 年代初，美国国防部高级研究计划署 ARPA (Advanced Research Project Agency) 提出要研制一种创新性的、能够适应现代战争的、生存性 (survivability) 很强的网络，其目的是对付来自前苏联的核进攻威胁。当时传统的基于电路交换 (circuit switching) 的电话网虽然已经四通八达，但在核战争期间，一旦正在通信的某电话电路中有一个交换机或有一条链路被炸毁，则该电路整个通信就要中断。如要立即改用其他迂回电路通信，则必须重新拨号建立连接。这将要延误十几秒钟的时间，但这就可能造成不可挽回的重大损失（可能已被摧毁）。

根据当时美国军方提出的需求，这种新型的网络必须满足以下的一些基本要求：

(1) 和传统的电信网不同，这种新型的网络不是为了打电话，而是用于计算机之间的数据传送。

(2) 新型的网络能够连接不同类型的计算机，即不局限于单一类型的计算机。

(3) 所有的网络结点都同等重要，是对等的。因为网络必须经受得起敌人的核打击，将所有的结点设计成同等重要的，就可以大大提高网络的生存性。

(4) 计算机在进行通信时，必须有冗余的多条通信路径供选择。当网络中的某一个结点或链路被破坏时，冗余的路径选择功能能够使正在进行的通信自动地找到合适的路由，使通信维持畅通。

(5) 网络的结构应当尽可能地简单，但能够非常可靠地传送数据。

人们首先想到能否借鉴电话系统中所采用的电路交换（Circuit Switching）思想，多年来，虽然电话交换机经过多次更新换代，从人工接续、步进制、纵横制直到现代的计算机程序控制，但是其本质始终未变，都是采用电路交换技术。在电话问世后不久，人们就发现，要让所有的电话机都两两相连接是不现实的。因为，若 N 部电话要两两相连，就需要 $N(N-1)/2$ 对电线。当电话机的数量很大时，这种连接方法需要的电线数量就太大了（与电话机的数量的平方成正比）。于是人们认识到，要使得每一部电话能够很方便地和另一部电话进行通信，就应当使用电话交换机将这些电话连接起来，如图 1-1 所示。每一部电话都连接到交换机上，而交换机使用“交换开关”的方法临时为通话的双方电话机搭起一条通信电路，让电话用户彼此之间可以很方便地通信。一百多年来，电话交换机虽然经过多次更新换代，但交换的方式一直都是电路交换。

当电话机的数量增多时，就要使用很多彼此连接起来的交换机来完成全网的交换任务。用这样的方法，就构成了覆盖全世界的电信网。

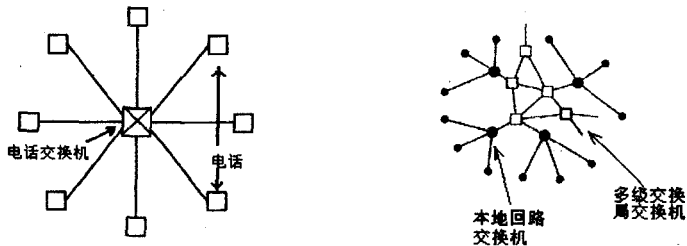


图 1-1 电话通过交换机连接与由多级交换机连接组成的多层次电信网

从通信资源的分配角度来看，“交换”就是按照某种方式动态地分配传输线路的资源。在使用电路交换打电话之前，必须先拨号建立连接。当拨号的信令（控制信号协议）通过许多交换机到达被叫用户所连接的交换机时，该交换机就向用户的电话机振铃。在被叫用户摘机时，便产生摘机信令，并被传送回到主叫用户所连接的交换机后，呼叫即完成。这时，从主叫端到被叫端就建立了一条电路连接（物理通路）。此后主叫和被叫双方才能互相通电话。通话完毕任何一方挂机后，挂机信令告诉这些交换机，使交换机释放刚才使用的这条物理通路。这种必须经过“建立连接—通信—释放连接”三个步骤的连网方式称为面向连接的（connection-oriented）连网方式。电路交换必定是面向连接的。

需要注意的是，这里所讨论的是一个连接着数百万用户的网络。这个网络的第一个部分是本地回路。它由电话机以及将电话机连接到本地交换局的、挂在常见的电线杆上或者藏在地下电缆里的铜线组成。本地交换局包含交换逻辑电路，负责为电话呼叫选择路由。如果呼叫的电话是属于同一个交换局的（号码的前3位），那么可以直接建立一个到目的地的连接。否则路由策略将取决于该呼叫的目的地。

图 1-2 显示了一个电信局的主要组成部分。一级电话分局数量最少，覆盖的范围最大（通常包含多个省）。二、三、四、五级中心的数量依次增加，覆盖面积也依次减小。覆盖面积较广的属长途电信公司所有，其他的属于本地公司。

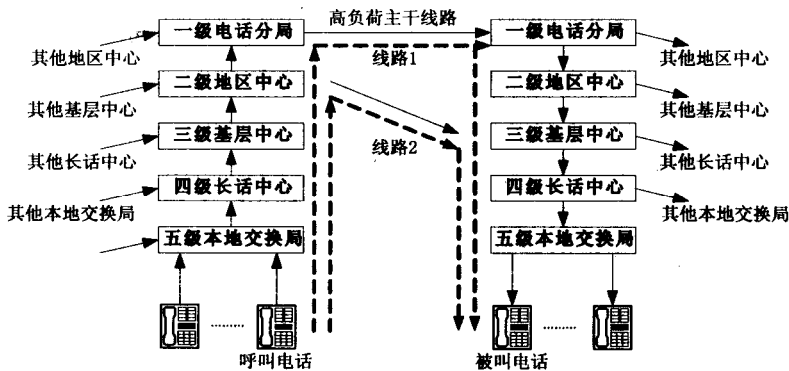


图 1-2 电信局的主要组成部分

一级电话分局连接着许多二级中心。同样地，二级中心连接着许多三级中心，依次类推。在最高层上，高容量的主干线将一级中心连接起来，它们能够同时传送很多个电话通话。一般而言，任意两部电话要实现连接，都必须从本地交换局开始逐个层次向上传送，一直到电话分局，接着穿过一条主干线到达另一个电话分局，然后再向下传送到适当的本地交换局（图 1-2 中的路径 1）。然而，这并不总是最佳的路线。理想的情况是一个呼叫尽可能经过较少的中心。而最极端的想法是网络上的每一对电话机都直接相连，当然，这是不可能的。有时，可能会有发生在一个地区中心和另一个基层中心之间的电话呼叫。在这种情况下，在它们之间铺设另一条高容量的干线将是非常有用的，这条干线可以作为避开某些中心的捷径，并提供另一种路由选择（图 1-2 中的路径 2）。

有许多连接着不同级别中心的干线。这些承担着两个地区之间巨大通信量的线路提供了很多不同的路由选择。当所有的线路都在最高负荷状态下工作时（这是不太可能发生的），呼叫将无法通过，呼叫者将收到一个忙音信号。

当使用电路交换来传送计算机数据时，其线路的传输效率往往很低。这是因为计算机数据往往是突发式地发送到传输线路上的，因此线路上真正用来传送数据的时间往往不到对线路占用总时间的 10% 甚至 1%。在绝大部分时间里，已被用户计算机占用的通信线路实际上是空闲的。例如，当用户阅读终端屏幕上的信息或用键盘输入和编辑一份文件时，或计算机正在进行处理而结果尚未返回时，被独占的通信线路资源实际上是被白白浪费了。因此，电路交换本来是电话通信而设计的，对于计算机网络来说并不适合。

1964 年 8 月，巴兰（Baran）在美国兰德（Rand）公司“论分布式通信”的研究报告

中提到了存储转发的概念。1962~1965年,美国国防部高级研究计划署(Advanced Research Projects Agency, ARPA)和英国的国家物理实验室(National Physics Laboratory, NPL)都在对新型的计算机通信技术进行研究。英国NPL的戴维斯(David)于1966年首次提出了“分组”(packet)这一概念。到1969年12月,DARPA的计算机分组交换网ARPANET投入运行。ARPANET连接了美国加州大学洛杉矶分校、加州大学圣巴巴拉分校、斯坦福大学和犹他大学四个结点的计算机。ARPANET的成功,标志着计算机网络的发展进入了分组交换网时期。

分组交换网采用“存储—转发技术”。

图1-3表示的是分组的概念,通常将欲发送的整块数据称为一个报文(message)。在发送报文之前,先将较长的报文划分成为一个个更小的等长数据段,在每一个数据段前面,加上一些必要的控制信息组成的首部(header)后,就构成了一个分组(packet)。分组又称为“包”,而分组的首部被称为“包头”。

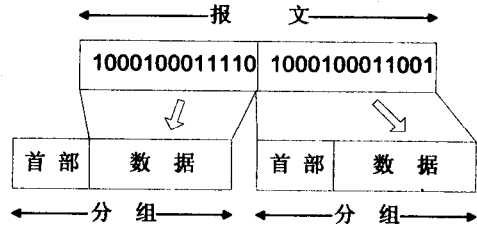


图1-3 分组交换网中的分组

分组是在计算机网络中传送的数据单元。在一个分组中,“首部”是非常重要的,因为分组的首部包含了诸如目的地址和源地址等重要控制信息,正是由于这些地址信息的作用,每一个分组才能在分组交换网中独立地选择路由。使用分组交换时,在传送数据之前可以不必先建立一条连接。这样就减少了建立连接和释放连接所需的开销,使得数据的传输效率更高。这种不先建立连接而随时可发送数据的连网传输方式,被称为无连接(connectionless)传输方式。分组交换还可以使用面向连接的方式(如在过去曾经出现过的X.25、帧中继、ATM等广域网)。因此面向连接的网络不一定是电路交换的网络。

分组交换网由若干个结点交换机(Node Switch)和连接这些交换机的链路组成,图1-4是其示意图。用圆圈表示的是结点交换机,它是网络的核心连接设备,完成对主机发送过来的分组(数据包)的转发。从概念上讲,一个结点交换机就是一个小型嵌入式计算机系统。图中Host1到Host6都是一些联网的计算机,在计算机网络中常被称为主机(host)。

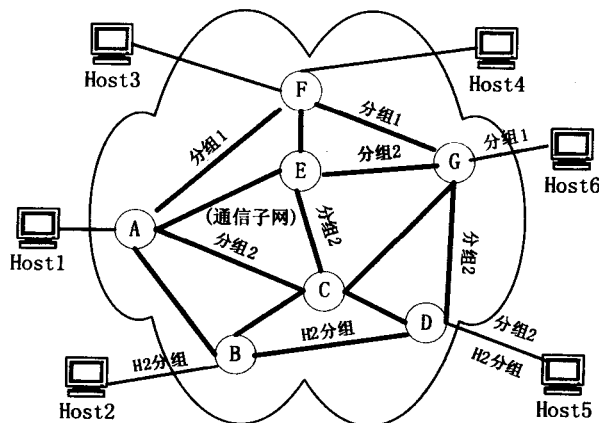


图1-4 分组交换网示意图

结点交换机处理分组的过程是：将收到的分组先放入缓存，再查找路由转发表，找出到某个目的地址应从哪个端口转发，然后由交换机构将该分组传递给适当的端口转发出去。各结点交换机之间要经常交换路由信息，其目的是为了将由某台计算机发出的去往另一台计算机的数据包进行路由选择，即为被转发分组找出一条最好的路径。

现在假定图 1-4 的主机 Host1 向主机 Host6 发送数据。主机 Host1 先将分组逐个地发往与它直接相连的结点交换机 A。此时，除链路 Host1—A 外，网内其他通信链路并不被目前通信的双方所占用。结点交换机 A 将主机 Host1 发来的分组（如分组 1）放入缓存。假定从结点交换机 A 的转发表中查出应将该分组送到该结点交换机的端口 1。于是分组就经链路 A—F 到达结点交换机 F。当分组正在链路 A—F 传送时，该分组并不占用网络其他部分的资源。结点交换机 F 继续按上述方式查找转发表，假定查出应从其端口 2 进行转发。于是分组又经结点交换机 F 的端口 2 向结点交换机 G 转发。当分组到达结点交换机 G 时，交换机 G 就将分组直接交给主机 Host6。

假定在某一个分组的传送过程中，链路 A—F 的通信量太大，那么结点交换机 A 可以将分组（如分组 2）转发端口改为端口 3。于是分组就沿另一个路由到达结点交换机 C。接下来分组 2 将沿 C—E—G—D 路径转发到结点交换机 D，最后将分组 2 送到主机 H5。

这里要注意，结点交换机暂时存储的是一个短分组，而不是整个的长报文。短分组是暂存在交换机的存储器（即内存）中而不是存储在磁盘中，这就保证了较高的交换速率。实际上，一个分组交换网可以容许很多主机同时进行通信（见图中的 Host2 与 Host5 之间的分组通信），而一个主机中的多个进程（即正在运行中的多道程序）也可以各自和不同主机中的不同进程进行通信。

在传送分组的过程中，由于采取了专门的措施，因而保证了数据的传送具有非常高的可靠性。当分组交换网中的某些结点或链路突然被破坏时，在各结点交换机中运行的路由选择协议（protocol）能够自动找到其他路径转发分组。这些将在下面有关章节中详细讨论。

从上述可知，采用存储转发的分组交换，实质上是采用了在数据通信的过程中断续（或动态）分配传输带宽的策略。这对传送突发式的计算机数据非常合适，使得通信线路的利用率大大提高了。为了提高分组交换网的可靠性，常采用网状拓扑结构，使得当发生网络拥塞或少数结点、链路出现故障时，可灵活地改变路由而不致引起通信的中断或全网的瘫痪。

无连接的分组交换网络有以下的特点：

(1) 一台主机无论何时都可以发送分组，因为任何到达交换机的分组都能立即转发（假设存在正确的转发表）。可以看到，这正和大多数面向连接的网络相反，在那些网络中，发送第一个数据分组之前需要建立某种“连接状态”。

(2) 当一台主机发送一个分组时，主机并不知道网络是否可以转发该分组或目的主机是否可以接收。

(3) 每个分组的转发都是独立于前几个分组的，哪怕这几个分组有可能是传送到相同的目的地。这样，从主机 A 到主机 B 的两个连续的分组可能走的是完全不同的路径（也许是由于网络中某个交换机更改了转发表）。

(4) 当一台交换机或一段链路出现故障时，如果有可能在故障点周围能够找到一条可替换的路径，并相应地更新转发表，那么对通信就不会产生任何严重的后果。

表 1-1 归纳了电路交换网络与分组交换网络的主要区别。

表 1-1 电路交换网络与分组交换网络的对比

对比的方面	电路交换网络	分组交换网络
基本设计思路	可靠通信应当由网络来保证	可靠通信应当由用户主机来保证
连接的建立	必须有	不要
目的站地址	仅在连接建立阶段使用, 每个分组使用短的虚电路号	每个分组都有目的站的全地址
路由选择	在虚电路建立时进行, 所有分组均按同一路由	每个分组独立选择路由
当结点出故障时	所有通过出故障的结点的虚电路均不能工作	出故障的结点可能会丢失分组, 一些路由可能会发生变化
分组的顺序	总是按发送顺序到达目的站	到达目的站时不一定按发送顺序
端到端的差错处理和流量控制	由电路交换网负责	由用户主机负责

ARPANET 的试验成功使计算机网络的概念发生了根本的变化。分组交换网是以网络为中心, 主机都处在网络的外围, 见图 1-4。用户通过分组交换网可共享连接在网络上的许多硬件和各种丰富的软件资源。这里又可以把分组交换网称为通信子网, 而将用户的主机的集合称为资源子网。但是应当注意的是, 在后面重点要讲述的 TCP/IP 协议族中需要使用“子网划分”技术中的“子网”的概念, 和上述“通信子网”、“资源子网”中的“子网”的概念是完全不同的, 通过上下文意思是可以将二者很好地区分开来的。

这种以分组交换网为中心的计算机网络比最初的面向终端的计算机主从系统的功能扩大了很多, 成为 20 世纪 70 年代计算机网络的主要形式。随之而来的因特网正是采用了这一技术完成了全球范围的计算机联网。

2. 因特网时代

进入 20 世纪 80 年代末期以来, 在计算机网络领域最引人注目的事件就是起源于美国的因特网 (Internet) 的飞速发展。现在因特网已发展成为世界上最大的国际性计算机互联网。下面简单介绍因特网的发展过程。

因特网的基础结构大体上经历了三个阶段的演进。但这三个阶段在时间划分上并非截然分开而是有部分重叠的, 这是因为网络的演进是逐渐的而不是突然的。

第一阶段是从单个网络 ARPANET 向互联网发展的过程。1969 年美国国防部创建的第一个分组交换网 ARPANET 最初只是一个单个的分组交换网 (并不是一个互联网)。所有要连接在 ARPANET 上的主机都直接与就近的交换结点机相连。在 ARPANET 问世后, 其规模增长很快。1984 年 ARPANET 上的主机已超过 1000 台。但到了 70 年代中期, 人们已认识到不可能仅使用一个单独的网络来满足所有的通信问题。于是开始研究多种网络 (如分组无线电网络) 互连的技术, 这就导致后来互联网的出现。1983 年 TCP/IP 协议成为 ARPANET 上的标准协议。同年, ARPANET 分解成两个网络, 一个仍称为 ARPANET, 是进行实验研究用的科研网; 另一个是军用的计算机网络 MILNET (MILNET 拥有 ARPANET 当时的 113 个结点中的 68 个)。这样, 在 1983~1984 年间因特网 Internet 就形成了。由于