

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

Computer Networks

张曾科 吉吟东 编著

- 剖析网络核心技术
- 讲解网络协议规范
- 跟踪网络发展潮流



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

TP393/218=5

2009

计算机网络

Computer Networks

张曾科 吉吟东 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 / 张曾科, 吉吟东编著. —北京: 人民邮电出版社, 2009.10
21世纪高等学校计算机规划教材
ISBN 978-7-115-20799-9

I. 计… II. ①张…②吉… 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094980号

内 容 提 要

本书重点讲述计算机网络的基本概念和原理, 同时介绍了网络发展的各种新技术。本书首先介绍计算机网络的体系结构, 然后以物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层为主线, 介绍计算机网络的基本原理、核心技术和应用服务, 最后介绍网络安全与管理技术。

本书作为高等院校非计算机类专业“计算机网络”课程的教材, 也可供从事计算机网络系统开发工作的工程技术人员参考。

21 世纪高等学校计算机规划教材

计算机网络

-
- ◆ 编 著 张曾科 吉吟东
责任编辑 滑 玉
执行编辑 贾 楠
 - ◆ 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>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15.5
字数: 402 千字 2009 年 10 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2009 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-20799-9/TP

定价: 28.00 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”的良好格局。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。

计算机网络特别是 Internet 的产生和发展在现代科学技术史上具有划时代的意义,为全球信息化构建了四通八达的支撑平台。计算机网络是现代计算机科学与技术学科中发展异常迅速、应用空前活跃的一个领域,技术发展日新月异,应用服务层出不穷。

计算机网络方面的教学工作倍受教育部门的重视,计算机网络已经成为普通高等院校教学中的一门重要的课程,国内外计算机网络方面的教材也不断问世。

作者在清华大学多年从事有关计算机网络、企业网等方面的教学工作,并承担相关的科研开发项目,在此基础上编写了本书。本书作为计算机网络的基础教程,主要读者对象为理工类非计算机类专业本科生。授课学时可以控制在 32~48 之间。

本书内容组织的指导思想:一方面,重点介绍计算机网络的基本原理、重要概念和核心技术。虽然计算机网络发展迅速,新技术层出不穷,新设备不断涌现,新应用目不暇接,但是其基本原理、重要概念和核心技术,乃是学习计算机网络的最重要的知识点,是掌握网络技术并进一步进行网络应用和研发的必备基础;另一方面,本书也尽量反映计算机网络发展的新技术,紧跟网络技术飞速发展的潮流。

本书第 1 章介绍计算机网络的基本概念、发展历程和计算机网络的体系结构,使读者对计算机网络有一个初步的认识,对计算机网络系统的总体架构建立起一个全局性的概念,对各层的主要功能有一个总体的了解。第 2~7 章,依照计算机网络体系结构的层次,以物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层五层体系结构为主线(这是目前国际国内计算机网络教材编排的主流结构),自下而上地介绍计算机网络的基本原理和技术,使读者逐步有序地深入了解各种网络技术,学习和掌握各个层次的核心技术和协议规范。第 8 章介绍网络安全与网络管理技术。随着网络经济时代的到来,网络安全和管理是目前必须面对和倍受关注的课题。

书中涉及的重要专业术语,一般是依据全国科学技术名词审查委员会公布的《计算机科学技术名词(第二版)》(科学出版社,2002 年)给出,并注明英文。

本书由张曾科、吉吟东共同编写。由于编者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,期盼广大读者批评指正。

编 者

2009 年早春于清华园

目 录

第 1 章 概述.....1

- 1.1 计算机网络的基本概念.....1
 - 1.1.1 什么是计算机网络.....1
 - 1.1.2 计算机网络的分类和网络结构.....2
 - 1.1.3 计算机网络的性能指标.....6
- 1.2 计算机网络的发展历程.....8
 - 1.2.1 计算机网络产生的背景.....8
 - 1.2.2 计算机网络的产生.....9
 - 1.2.3 计算机网络的飞速发展.....10
 - 1.2.4 Internet 时代.....12
 - 1.2.5 计算机网络在我国的发展.....13
- 1.3 计算机网络体系结构.....14
 - 1.3.1 OSI 体系结构.....14
 - 1.3.2 TCP/IP 体系结构.....16
 - 1.3.3 五层体系结构.....17
- 习题.....19

第 2 章 物理层.....21

- 2.1 数据通信模型.....21
- 2.2 频带传输技术.....22
 - 2.2.1 什么是频带传输.....22
 - 2.2.2 调制解调技术.....23
- 2.3 基带传输技术.....24
 - 2.3.1 什么是基带传输.....24
 - 2.3.2 编码解码技术.....25
 - 2.3.3 信道的极限传输速率.....27
- 2.4 信道复用技术.....28
 - 2.4.1 概述.....28
 - 2.4.2 频分复用.....29
 - 2.4.3 时分复用和统计时分复用.....29
 - 2.4.4 准同步数字系列.....30
 - 2.4.5 同步数字系列.....32
 - 2.4.6 波分复用.....35
- 2.5 宽带接入技术.....35

- 2.5.1 概述.....35
- 2.5.2 xDSL 接入.....36
- 2.5.3 HFC 接入.....38
- 2.6 传输介质.....40
 - 2.6.1 双绞线.....40
 - 2.6.2 同轴电缆.....41
 - 2.6.3 光纤.....41
 - 2.6.4 无线传输.....43
- 习题.....45

第 3 章 数据链路层.....47

- 3.1 概述.....47
- 3.2 帧同步和透明传输.....48
 - 3.2.1 帧同步.....48
 - 3.2.2 透明传输.....49
- 3.3 差错检验.....50
 - 3.3.1 差错检验方法.....50
 - 3.3.2 循环冗余检验.....51
- 3.4 数据链路控制.....53
 - 3.4.1 数据链路控制的基本思想.....53
 - 3.4.2 数据链路控制的基本机制.....53
 - 3.4.3 自动请求重传.....55
- 3.5 高级数据链路控制规程.....59
- 3.6 因特网数据链路控制协议 PPP.....59
 - 3.6.1 PPP 及其帧格式.....59
 - 3.6.2 PPP 运行状态图.....60
 - 3.6.3 PPP 的身份认证.....61
- 习题.....61

第 4 章 局域网.....63

- 4.1 IEEE802 局域网体系结构.....63
 - 4.1.1 IEEE802 局域网参考模型.....63
 - 4.1.2 介质接入控制子层.....64
 - 4.1.3 逻辑链路控制子层.....66
- 4.2 以太网工作原理.....67

4.2.1 以太网技术的发展	67	5.2 网际协议 IPv4	118
4.2.2 以太网介质接入控制 方式 CSMA/CD	68	5.2.1 IP 地址分类及划分子网	118
4.2.3 以太网传输特点	74	5.2.2 IP 数据报格式	121
4.2.4 以太网帧格式	74	5.2.3 IP 差错检验算法	122
4.3 传统以太网	76	5.2.4 IP 数据报分片与重组	123
4.3.1 物理层	76	5.2.5 IP 数据报转发	125
4.3.2 网络接口卡	77	5.2.6 IP 数据报选项	129
4.3.3 中继器和集线器	77	5.3 地址解析协议	130
4.3.4 传统以太网及其网络结构	78	5.3.1 概述	130
4.4 高速以太网	80	5.3.2 ARP 机制	132
4.4.1 100Base-T	80	5.4 因特网控制报文协议	133
4.4.2 吉比特以太网	83	5.4.1 ICMP 及其报文格式	133
4.4.3 10 吉比特以太网	86	5.4.2 ICMP 报文	134
4.5 交换式以太网	88	5.5 无类别域间路由选择	136
4.5.1 概述	88	5.5.1 CIDR 编址	136
4.5.2 网桥	88	5.5.2 构造超网	137
4.5.3 交换机	90	5.5.3 最长前缀匹配	138
4.5.4 交换式以太网及其特点	91	5.6 路由选择协议	139
4.6 虚拟局域网	92	5.6.1 路由表的优化更新问题	139
4.6.1 VLAN 及其特点	92	5.6.2 两类路由选择协议	139
4.6.2 VLAN 划分	93	5.7 IP 多播	140
4.6.3 VLAN 帧格式	94	5.7.1 概述	140
4.6.4 VLAN 运行	94	5.7.2 因特网组管理协议	142
4.7 无线局域网	97	5.8 下一代网际协议 IPv6	144
4.7.1 IEEE802.11 WLAN	97	5.8.1 IPv6 及其特点	144
4.7.2 IEEE802.11 物理层标准	99	5.8.2 IPv6 地址	145
4.7.3 IEEE802.11 MAC 层帧 和帧格式	102	5.9 IP 主干网	145
4.7.4 IEEE802.11 MAC 层 DCF	103	5.9.1 IP over ATM	146
4.7.5 IEEE802.11 MAC 层 PCF	109	5.9.2 多协议标记交换	149
4.7.6 WLAN 管理	109	5.9.3 IP over SDH	150
习题	111	5.9.4 IP over WDM	151
第 5 章 网络层	114	习题	151
5.1 概述	114	第 6 章 传输层	154
5.1.1 网络互连	114	6.1 概述	154
5.1.2 分组交换	115	6.2 传输层端口	155
5.1.3 路由器	116	6.2.1 端口及其作用	155
5.1.4 Internet 网际层	117	6.2.2 两类端口	156
		6.3 用户数据报协议	157
		6.3.1 用户数据报	157

6.3.2 UDP 伪报头	157	7.6.2 DHCP 工作机制	203
6.3.3 UDP 的特点	158	习题	204
6.4 传输控制协议	158	第 8 章 网络安全与管理	206
6.4.1 TCP 的编号与确认	158	8.1 网络安全概述	206
6.4.2 TCP 报文段	159	8.1.1 网络安全的重要性	206
6.4.3 TCP 连接管理	162	8.1.2 网络攻击和网络安全服务	207
6.4.4 TCP 重传机制	164	8.2 两种密码体制	207
6.4.5 TCP 流量控制	167	8.2.1 密码学基础	207
6.4.6 TCP 拥塞控制	169	8.2.2 对称密钥密码体制与 DES 算法	209
6.5 多媒体传输	173	8.2.3 公开密钥密码体制与 RSA 算法	212
6.5.1 概述	173	8.3 数字签名和报文摘要	214
6.5.2 一个多媒体传输的例子	174	8.3.1 数字签名	214
6.5.3 实时传输协议	175	8.3.2 报文摘要	216
6.5.4 实时传输控制协议	177	8.4 Internet 网络安全技术	217
习题	179	8.4.1 网络层安全技术	217
第 7 章 应用层	181	8.4.2 传输层安全技术	220
7.1 网络应用进程的工作模式	181	8.4.3 应用层安全技术	221
7.2 域名系统	182	8.5 防火墙	222
7.2.1 Internet 域名结构	182	8.5.1 概述	222
7.2.2 域名解析	183	8.5.2 防火墙技术	223
7.3 文件传送协议	187	8.5.3 防火墙系统	224
7.3.1 FTP 工作机制	187	8.6 网络管理概述	226
7.3.2 FTP 访问控制	188	8.6.1 网络管理的功能	226
7.4 电子邮件	188	8.6.2 SNMP 网络管理系统及其组成	227
7.4.1 概述	188	8.6.3 SNMP 网络管理规范	227
7.4.2 电子邮件系统	189	8.7 简单网络管理协议	228
7.4.3 电子邮件的信息格式	190	8.7.1 SNMPv1 报文及其交互方式	228
7.4.4 简单电子邮件传送协议	192	8.7.2 SNMPv1 报文格式	229
7.4.5 邮局协议	193	8.7.3 SNMPv2 和 SNMPv3	230
7.5 万维网	194	8.8 管理信息结构	231
7.5.1 概述	194	8.8.1 名称和对象命名树	231
7.5.2 万维网工作机制	194	8.8.2 语法	232
7.5.3 统一资源定位符	196	8.8.3 编码	233
7.5.4 超文本传送协议	197	8.8.4 被管理对象的定义	234
7.5.5 超文本标记语言	198	8.9 管理信息库	234
7.5.6 动态网页技术	200	习题	235
7.6 动态主机配置协议	202	参考文献	237
7.6.1 概述	202		

第 1 章

概述

本章对计算机网络进行概述，目的是使读者对计算机网络有一个基本的了解和总体的认识。为此，本章先介绍计算机网络的基本概念，包括计算机网络的定义、分类、拓扑结构和性能指标等，然后介绍计算机网络的发展历程，最后介绍计算机网络的体系结构，它描述了计算机网络系统的总体架构，即网络功能的层次结构的划分。这样就从全局的角度介绍了计算机网络的基本概念和总体架构，然后循着体系结构的层次，逐步深入地讲述各种网络技术。

1.1 计算机网络的基本概念

1.1.1 什么是计算机网络

计算机网络的产生和发展在现代科学技术史上具有划时代的意义。因特网彻底改变了人们的工作和生活方式，改变了企事业单位的运营和管理方式。电子邮件、IP 电话成为人们日常的交流方式，Web 浏览成为人们获取信息的重要渠道，网上办公、电子商务、网络金融、网络会议、远程教育、远程生产监控等迅速步入现代社会各个角落，成为人们日常工作和活动不可或缺的组成部分。

什么是计算机网络（computer network）？目前还没有一个权威的定义。荷兰阿姆斯特丹 Vrije 大学计算机科学系教授、荷兰皇家艺术与科学院院士、计算机专家 Andrew S. Tanenbaum 言简意赅的提法得到了广泛的认同，即计算机网络是指自治的计算机互连起来的集合（an interconnected collection of autonomous computers）。计算机之间相互连接并能相互交换信息则称为互连，自治是指计算机是能够独立进行处理的设备，而不是无自行处理能力的附属设备（如终端）。

上述定义概括地给出计算机网络的概念，要具体地说明它的内涵，可以从计算机网络的组成和应用两个方面描述。

1. 计算机网络的组成

计算机网络包括硬件和软件两部分。

① 硬件（hardware）。硬件包括计算机、通信设备、接口设备和传输介质等。

- 计算机。按照 ARPANET 沿用下来的术语也称为主机（host），可以是个人计算机（PC）、大型计算机、客户机（client）或称工作站（workstation）、服务器（server）等，在网络中它们称为端系统（End Systems，ES）。

- 通信设备。即中间系统（Intermediate Systems，IS），如交换机（switch）和路由器（router）等，为主机转发数据。端系统和中间系统在网络中称为结点（node，或节点）。

● 接口设备。网络接口卡 (Network Interface Card, NIC), 调制解调器 (Modem) 等, 作为计算机与网络的接口。

● 传输媒体也称传输介质 (medium)。双绞线、同轴电缆、光纤、无线电和卫星链路等。

② 软件 (software)。软件包括通信协议和应用软件两部分。

● 通信协议。如 CSMA/CD、TCP/IP、UDP、PPP、ATM、NIC 驱动 (driver) 等。

● 应用软件。如 HTTP、SMTP、FTP、TELNET 等。

2. 计算机网络的应用

计算机网络应用主要包括以下三类:

① 共享资源访问。如万维网访问、远程登录服务、网络文件访问等。

② 远程用户通信。如电子邮件、IP 电话、网络会议等。

③ 网上事务处理。如电子商务、电子政务、电子金融、远程教育、远程医疗等。

如上所述, 从组成和应用两个方面对计算机网络进行了概括描述, 进而对计算机网络有了更具体的认识。

20 世纪 90 年代初, 以太网的发明人鲍勃·麦特卡尔夫 (Bob Metcalfe) 提出了一个著名的论断; 即网络的价值同网络用户数量的平方成正比 (网络上的 n 个用户, 每一个人都可以看到其他人的内容, n 个人每一个人都可以看到 n 个人的内容, 所以网络的价值与 n^2 成正比)。计算机网络惊人的发展速度和它极大的应用价值, 已经改写了历史, 它也必将创造人类历史更加辉煌的篇章。

1.1.2 计算机网络的分类和网络结构

1. 计算机网络的分类

计算机网络有多种分类方法, 可以从不同的角度和特征进行划分, 主要分类方式如下:

① 从网络覆盖的地域范围或者跨越的距离, 可以分为局域网、城域网和广域网;

② 从网络的拓扑结构, 可以分为总线网、环形网、星形网、树形网、网形网和混合网;

③ 从数据的交换方式可以分为电路交换网、分组交换网、帧中继网、信元交换即 ATM 网等;

④ 从网络使用的传输技术, 可以分为广播网络和点对点网络;

⑤ 从网络的传输介绍, 可以分为光纤网、卫星网、有线网和无线网等;

⑥ 从网络使用单位的性质, 可以分为企业网、校园网、园区网、政府网等;

⑦ 从网络的应用性质, 可以分为远程教育网、证券业务网、税务网、工业控制网等。

还可以有其他的分类方式, 但最常用最有意义的还是按网络覆盖的地域范围划分, 因为网络覆盖的地域范围大小影响到网络诸多方面的特性, 如传输速度、拓扑结构、使用的网络技术和网络设备等。

按网络覆盖的地域范围, 计算机网络可以分为 3 类, 即局域网 (Local Area Network, LAN)、城域网 (Metropolitan Area Network, MAN) 和广域网 (Wide Area Network, WAN)。

另外, 若干个 LAN、MAN 或 WAN 互连在一起就构成互联网 (internetwork, internet), 互联网是网络的集合。目前全世界绝大多数网络都互连在一起, 形成了因特网, 即 Internet。为了将不同的网络互连在一起, 互联网使用了专门的技术。

接下来对 LAN、MAN、WAN、互联网和因特网的特点和拓扑结构进行简要介绍。

2. 局域网及其网络结构

顾名思义, LAN 是局部范围内的小规模的计算机网络, 一般地理范围在 10km 以内。

对于 LAN, 电气电子工程师协会 (IEEE) 的 LAN 标准委员会曾提出如下定义, 即 LAN 在以下方面与其他类型的数据网络不同, 通信一般被限制在中等规模的地理区域内, 例如, 一座办公楼、一个仓库或一所学校; 能依靠具有从中等到较高数据传输速率的物理通信信道, 而且这种信道具有始终一致的低误码率; LAN 是专用的, 由单一组织机构所使用。

LAN 的一个重要特点是短距离传输数据, 其他特点大都是由此引发, 如下所述。

① 具有较高的带宽, 数据传输速率高, 一般为 $10\text{Mbit/s} \sim 100\text{Mbit/s}$, 随着技术的发展, 数据传输速率也在不断提高。

② 数据传输可靠, 误码率低, 通常为 $10^{-7} \sim 10^{-12}$ 。

③ 大多数 LAN 采用总线 (bus)、环形 (ring) 及星形 (star) 拓扑, 结构简单易于实现。图 1.1 所示为 LAN 主要的网络结构。

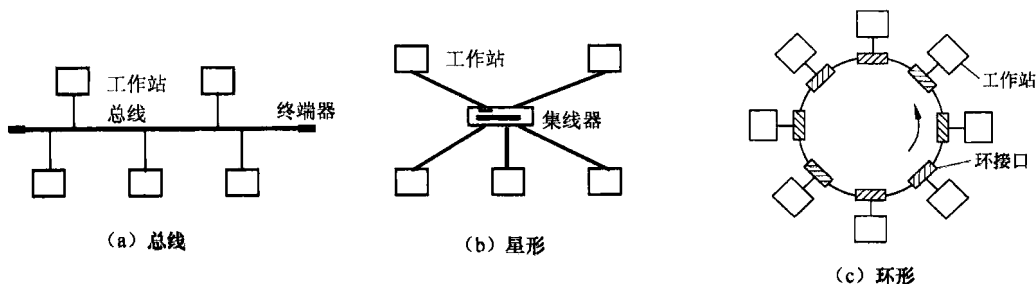


图 1.1 LAN 网络结构

④ 一般使用广播链路, 广播链路上的多台主机共享一条通信信道 (channel), 一台主机发送信息, 所有主机都能收到。多台主机同时访问信道时就可能产生冲突 (collision, 亦称碰撞), 因此共享信道的接入控制是 LAN 要解决的重要问题。

⑤ 通常是由单一组织所拥有和使用, 不受公共网络所属机构的规定约束, 容易进行设备更新和使用最新技术不断增强网络的功能。

LAN 应用非常广泛, 世界上绝大部分的计算机都连接在 LAN 上, 进而接入 Internet。

LAN 类型主要包括以太网 (Ethernet)、令牌环网 (token ring network)、令牌总线网 (token bus network) 和无线局域网 (Wireless LAN, WLAN) 等。

LAN 的发展始于 20 世纪 70 年代。1975 年 Xerox 公司研制了第一个总线结构的实验性以太网, 1974 年英国剑桥大学建立了剑桥环 (Cambridge ring)。20 世纪 80 年代后, 微型计算机技术的兴起和飞速发展, 极大地推动了 LAN 的发展和应用。目前, 以太网是 LAN 的主流网络类型。

3. 广域网及其网络结构

WAN 覆盖的地域可达 100km 以上, 甚至数千千米, 可以覆盖一个地区、一个国家、一个洲甚至更大范围, 因此 WAN 又称远程网 (long haul network)。

除了跨距远, 与 LAN 相比, WAN 在技术上还有如下特点:

① WAN 一般由主机和通信子网组成, 通信子网 (communication subnet) 由通信线路连接交换结点 (交换机) 组成, 往往是电信部门提供的公共通信网。

② WAN 一般是由点对点链路组成, 每条通信线路连接一对结点。直接相连的结点间可以直接传输数据, 而不直接相连的结点间的数据传输, 需要通过中间结点的转发。转发使用的技术称为数据交换技术, 因而这种网络属于交换式网络 (switched network)。WAN 多使用分组交换 (packet

switching) 技术, 把数据分割为若干个小的分组或称包 (packet), 以分组为单位进行转发, 这种交换式网络称分组交换网。用户的计算机是连接在交换结点上。

③ WAN 网络拓扑一般比 LAN 复杂、不规整, 多为网形 (mesh)、树形 (tree) 或它们的混合结构, 图 1.2 (a) 和 (b) 分别是网形拓扑和树形拓扑的交换式网络。

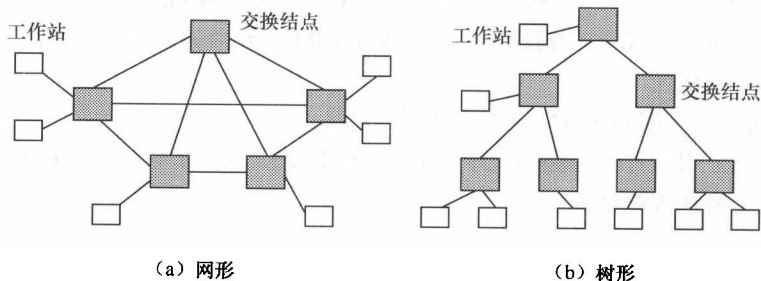


图 1.2 WAN 网络结构

④ WAN 常常采用信道复用技术, 以提高传输线路的利用率。

早期的 ARPANET 就是一个典型的 WAN。1983 年, ARPANET 有 50 台 C30 和 C300 小型机作为交换机, 称为接口报文处理机 (IMP), 从电信公司租用的点对点线路将它们连接成一个网络。IMP 上还有多达 22 个的端口用来连接用户主机, 当时连接了数百台主机。

欧洲早期的 WAN 则是 X.25 分组交换网, 其技术规范 X.25 建议于 1976 年由国际电报电话咨询委员会 (CCITT) 提出, 曾有很大的影响。现在, X.25 网已经退出历史舞台。

帧中继 (Frame Relay, FR) 和异步传输模式 (Asynchronous Transfer Mode, ATM) 是后来兴起的 WAN 技术。FR 主要应用是为长距离用户提供永久虚电路, 实现 LAN 互连。ATM 网络也是一种分组交换网络, 它交换的分组是短的固定长度的信元 (cell)。ATM 网络由 ATM 交换机连接, ATM 交换机上可以连接计算机。

4. 城域网

MAN 规模介于 LAN 和 WAN 之间, 局限在一座城市的范围内, 一般在 10 ~ 100km 的区域。MAN 也是公共网络性质, 提供数据、语音、图像等多业务的传输服务。

IEEE 曾专门为 MAN 定义了一个标准 IEEE802.6, 称为分布式队列双总线 (Distributed Queue Dual Bus, DQDB)。DQDB 由两条单向总线组成, 计算机连接到这两条总线上, 支持站点的全双工通信, 但 DQDB 并没有得到成功的应用。

由于 LAN 性能的不断提高和 WAN 技术的发展, 它们都广泛地渗透和应用到 MAN 领域中。以太网技术已经从 LAN 扩展到了 MAN 领域, 吉比特和 10 吉比特以太网是 MAN 可以使用的技术。10 吉比特以太网只定义了全双工方式, 达到了 40km 的传输距离, 突破了 LAN 的覆盖范围, 进入了 MAN 和 WAN 的范畴, 在 MAN 主干网方面有着广阔的应用前景。

WAN 中的 ATM、同步数字系列/同步光纤网 (SDH/SONET) 和波分多路复用 (WDM) 技术、LAN 中的光纤分布数据接口 (FDDI) 等, 也都是 MAN 可以选择使用的技术。

最近, 主要应用于 MAN 的弹性分组环 (Resilient Packet Ring, RPR) 技术的研究成果令人瞩目, 其标准由 IEEE 802.17 工作组制定。因特网工程任务部 (IETF) 的 IPoRPR (IP over RPR) 工作组、Cisco 公司等组成的 RPR 联盟等, 也在致力于 RPR 技术研究和标准制定。

5. 互联网及其网络结构

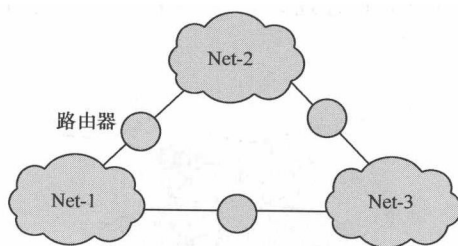
若干个网络由称为路由器 (router) 的网络设备连接在一起便成了互联网。互联网是网络的集

合, 是网络的网络。互联网覆盖的地域范围与它互连了多少个网络有关。

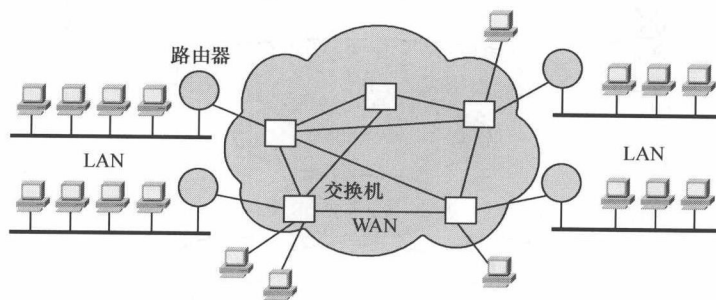
互联网中, 路由器连接的网络包括 LAN、MAN 和 WAN 等, 甚至可以是一条点对点的链路, 它们在互联网中属于底层网络, 处于负责网络互连的协议层 (Internet 中称为网际层) 之下, 在互联网看来, 它们属于物理层和数据链路层。

互联网技术的核心是实现网络的互连 (internetworking), 解决数据在网络之间特别是异种网络之间进行传输的一系列问题。实现网络互连的关键思想是在底层网络与高层应用程序和用户之间加入中间层次, 屏蔽底层细节, 向用户提供通用一致的网络服务。这样, 在用户看来, 整个互联网是一个统一的整体, 虽然在物理上由很多使用不同标准的各种类型的底层网络互连而成, 但在逻辑上是一个统一的网络, 提供通用一致的网络服务。

图 1.3 (a) 所示为互联网的概念结构。互联网是网络的集合, 由路由器连接若干个网络云组成。图 1.3 (b) 所示也表示互联网的网络结构, 这里把网络云进行了具体展开。



(a) 互联网概念结构——网络的集合



(b) LAN 和 WAN 组成的互联网

图 1.3 互联网模型示意图

6. 因特网及其网络结构

目前全世界绝大多数网络都互连在一起, 形成了覆盖全球并向全球开放的互联网, 即因特网 (Internet)。

Internet 使用 TCP/IP 协议族 (TCP/IP protocol suite) 实现网络互连。TCP/IP 协议族以其中最具有代表性的两个协议, 即传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP) 和网际协议 (Internet Protocol, IP) 来命名。因此, Internet 是使用 TCP/IP 协议族的覆盖全球范围的当今最大的开放的互联网。

Internet 已经经历了几十年的发展演变过程, 目前的 Internet 拓扑是松散的分层结构, 不受某个权威部门的控制, 在商业利益驱动下扩展演进。Internet 各个层次的网络干线由不同级别的 Internet 服务提供商 (Internet Service Provider, ISP) 建立经营, 并向社会提供网络服务。

ISP 可分为本地级、地区级和主干级 3 个层次。主干级 ISP 即 BSP (Backbone Service Provider) 常称为网络服务提供商 (Network Service Provider, NSP), 一般指国家级和国际级的 ISP, 如美国的 MCI、Sprint 等。本地级 ISP 可以是大学、公司和企业等组织, 也可以是专门提供网络服务的 ISP。用户的网络、工作站和服务器等可以连接到本地 ISP。本地级 ISP 又接入到地区级 ISP, 有时候本地级 ISP 也可以直接接入到 BSP。BSP 之间既要互相竞争服务业务又要彼此合作相互连接, 构成一个整体连通的网络。

图 1.4 所示为 Internet 的网络结构。图中包含了各级 ISP 的网络, 它们都设有网络中心, 供下一级的 ISP 或用户接入。网络中心必须具有必要的接入设备, 如路由器、交换机和调制解调器等, 接入点称为存在点 (Point Of Presence, POP)。BSP 一般通过网络接入点 (Network Access Point, NAP) 进行连接, NAP 担负着中转巨大网络流量的任务, 通常使用高速交换设备。1994 年开始建立了 4 个 NAP, 分别由 4 个电信公司经营, 到 21 世纪初, 美国的 NAP 已有十几个。一些比较大的 BSP, 也倾向绕过 NAP 直接通过高速通信线路 (如 10Gbit/s) 和其他 NAP 交换数据, 使通信可以更加快捷。

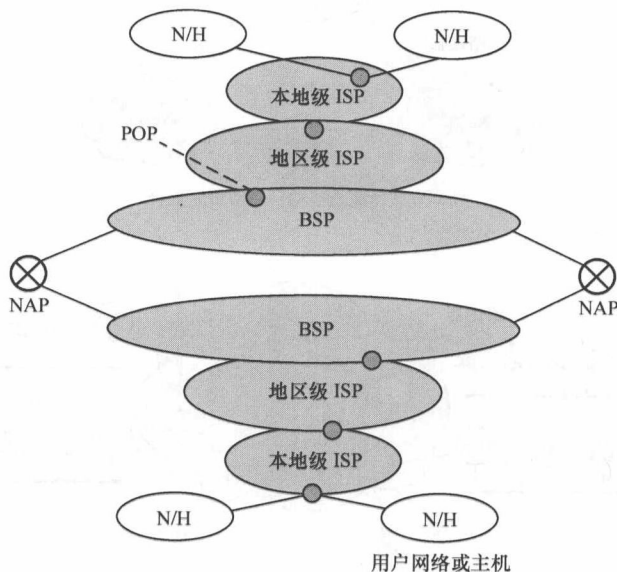


图 1.4 Internet 网络结构示意图

1.1.3 计算机网络的性能指标

1. 数据传输速率

计算机网络的数据传输速率是指每秒传输的编码前的数字数据的二进制比特数, 单位为比特/秒, 即 bit/s (bit/second)。数据传输速率可简称数据率, 又称比特率, 其中的“数据”包括传输的净负荷和控制信息。

习惯上, 在表示比特率时, 千、兆和吉分别用 k (小写)、M 和 G 表示, 分别代表 10^3 、 10^6 和 10^9 。而在表示数据量时 (单位为字节, 即 B 或 Byte), 千、兆和吉一般分别用 K (大写)、M 和 G 表示, 分别代表 2^{10} (1024)、 2^{20} (1048576) 和 2^{30} (1073741824)。

2. 带宽和宽带

计算机网络中, 与数据传输速率具有同样含义的另一个术语称为带宽 (bandwidth)。

带宽的定义原本来自通信领域。原来的通信信道是模拟信道，信道带宽是指信道上能够正常通过的模拟的物理信号的频率范围，即最大最小频率之差，单位为赫兹（Hz）。信道带宽受传输介质的物理性质的限制。

带宽这个术语后来又借用到计算机网络领域，用来表示传输数字数据的能力，即网络所能传输的最大数据率，单位是 bit/s。有时需要根据上下文来区分带宽的不同含义。

和带宽相关的一个词是宽带（broadband）。宽带即宽的带宽，在通信技术中，宽带解释为宽的频带。在早期的电话系统中，宽带曾指比 4kHz 的音频频带更宽的频带，但这已成为历史。

借用到计算机网络技术中，宽带则解释为高的数据传输速率。如人们常说的宽带 IP 网，就是指以 IP 为核心协议的支持宽带业务的高速计算机网络。宽带业务是指包含文本、语音、图像、视频等多媒体信息的各种传输业务，如 Web 信息浏览、远程教学、视频点播等，相对于传统的 56kbit/s 以下的窄带拨号业务，这些业务需要网络提供更高的带宽支持。实际上，宽带的含义是一个随着时代和技术的进步而变化的，目前，主干网带宽达到 2.5Gbit/s（OC-48）以上，接入网带宽达到 T1/E1（1.544Mbit/s/2.048Mbit/s）的量级以上，就认为属于宽带范畴。

3. 吞吐量

另一个和数据传输速率具有同样含义的术语称为吞吐量（throughput），它可以用单位时间发送的比特数、帧数或分组数来表示。

4. 时延

计算机网络中，时延（delay）指一个数据块（帧、分组、报文段等）从链路或网络的一端传送到另一端所需要的时间。时延由以下 3 个部分组成：

① 发送时间（transmission time）。结点发送数据时把整个数据块从结点送入传输介质所需要的时间，计算公式如下。

$$\text{发送时间} = \text{数据块长度} / \text{数据传输速率} \quad (1.1)$$

② 传播时延（propagation delay）。承载传输信号的电磁波在一定长度的信道上传播所需要的时间，计算公式如下。

$$\text{传播时延} = \text{信道长度} / \text{电磁波在信道上的传播速率} \quad (1.2)$$

在自由空间中，电磁波以光速 300 000km/s 传播。在铜线或光纤中，电磁波的速度大约降低到光速的 2/3，相当于 200m/μs。可见某一信道的传播时延取决于它的长度。

③ 转发时延（forwarding delay）。是数据块在中间结点（中继器、交换机、路由器等转发设备）转发数据时引起的时延。不同的中间结点有不同的转发时延，例如，路由器转发分组时可能产生如下的时延。

- 排队时延（queueing delay）。分组在输入和输出缓冲区排队花费的时间，与网络负载状况有关。

- 处理时延（processing delay）。进行转发处理所花费的时间，如首部处理、差错检验、转发时间等。

这样，数据块经历的总时延为上述 3 个部分时延之和，公式如下：

$$\text{总时延} = \text{发送时间} + \text{传播时延} + \text{转发时延} \quad (1.3)$$

时延是计算机网络的一项重要指标，各种时延也影响到网络参数的设计，在第 5 章有关以太网共享信道的冲突碰撞分析中将会涉及到这一点。

和时延相关的一个概念是往返时间（Round Trip Time, RTT），在 TCP 中，RTT 表示从报文数据段从发送出去的时刻到确认返回时刻这一段时间，即在 TCP 连接上报文段往返所经历的时

间。在 TCP 的重传策略设计中,将会使用这一概念。

5. 时延带宽积

一条传输链路的时延带宽积指其传播时延和带宽的乘积,公式如下:

$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延} \times \text{带宽} \quad (1.4)$$

时延带宽积的单位是比特。时延带宽积又称为比特长度,即以比特为单位的链路长度。

可以用一个圆柱形管道表示一条传输链路,管道的长度相当于链路的传播时延,管道的截面积相当于链路的带宽,因此管道的容积就相当于链路的时延带宽积,表示这一链路可以容纳多少比特。例如,某一链路的传播时延为 $500\mu\text{s}$,带宽为 100Mbit/s ,则时延带宽积为 $50\,000\text{bit}$,说明这个链路可以容纳 $50\,000$ 个 bit。对于一条传输链路,当链路在传输过程中总是充满比特流时,链路才得到充分的利用,就好像一条输水管总是充满水流时,它才能得到充分的利用一样。

6. 误码率

误码率 (Bit Error Rate, BER) 表示计算机网络和数据通信系统的可靠性。它是统计指标,指传输的比特出错的概率,当传输的总比特数很大时,误码率 P_b 可以近似为

$$P_b = \text{传错的比特数} / \text{传输的比特总数} \quad (1.5)$$

一般, $P_b \leq 10^{-6}$ 属于正常通信范围,LAN 和光纤传输误码率就更低。

1.2 计算机网络的发展历程

计算机网络的发展历程可以划分为以下 3 个阶段。

第 1 个阶段是 20 世纪 60 年代,计算机网络产生,即 ARPANET 分组交换网产生。

第 2 个阶段是 20 世纪 70 年代到 80 年代,计算机网络技术飞速发展,标志性的事件是局域网和互联网的产生和发展,以及计算机网络体系结构的形成。

第 3 个阶段是 20 世纪 90 年代至今,计算机网络进入了辉煌的 Internet 时代。

接下来,先从计算机网络产生的背景开始介绍,它是计算机网络产生和发展的基础。

1.2.1 计算机网络产生的背景

计算机网络是计算机技术和通信技术相结合的产物,它们的发展推动了计算机网络的诞生。

世界上第一台电子数字计算机于 1946 年诞生,它称为电子数字集成器和计算器 (Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC),由 18 000 个真空管组成,占地面积 170m^2 ,重量达 28t,如图 1.5 所示。

1971 年问世的第一块集成电路处理器 Intel 4004,仅集成了 2 300 个晶体管;而 2006 年推出的酷睿系列的 Core 2 Duo E6600 处理器就包含了 2.91 亿个晶体管。微处理器技术、存储技术的发展极大地促进了计算机技术的发展。ENIAC 比起现在的便携式笔记本电脑,可谓庞然大物,但其性能却是天壤之别。

通信 (communication) 是在计算机出现前早已有的技术。1838 年摩尔斯发明了有线电报,开创了通信技术时代,1876 年贝尔发明了电话,1896 年马可尼发明了无线电报。1927 年 AT&T 启动了跨越大西洋的电话业务,1966 年研究人员首次使用光纤传输电

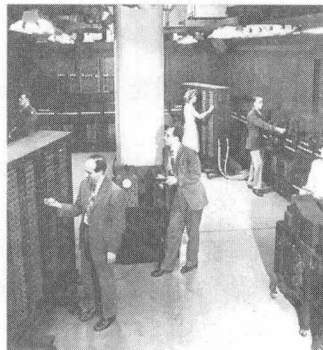


图 1.5 ENIAC

话信号。

计算机技术和通信技术的结合是最近几十年的新发展。20 世纪 50 年代人们开始进行通信技术与计算机技术相结合的尝试。美国地面防空系统 (Semi-Automatic Ground Environment, SAGE) 将远距离的雷达和其他检测装置的信号通过通信线路送入一台 IBM 计算机系统, 连接了 1 000 多台终端。然后, 一些系统通过通信线路将多个终端连接到一台中心计算机上, 用户可以在远离中心机房的办公室分时使用中心计算机的资源。当时的通信线路是电话系统, 通过调制解调器进行模拟信号和数字信号的转换。1964 年问世的美国航空公司的飞机票预定系统 SABER, 它由一台中心计算机连接了全美范围的 2 000 多个终端组成。

这些早期的应用系统也曾被称为计算机网络, 但不难看出, 连接到中心计算机的终端并没有自主处理能力, 它们并不符合前文给出的计算机网络的定义。确切地说, 这些早期的计算机网络是以单台计算机为中心的远程联机系统。但是, 在谈到计算机网络的发展时, 人们还是不会忘记它们的开创性的贡献。

1.2.2 计算机网络的产生

20 世纪 60 年代, 计算机网络应运而生, 开创先河的就是 ARPANET 分组交换网。它由多台具有自主处理能力的计算机通过通信线路连接起来, 使用分组交换方式进行通信。

美国国防部高级研究计划署 (ARPA), 目前称 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), 资助一些大学和公司进行计算机网络的研究, 设计了一个 4 结点的实验性网络 ARPANET 并于 1969 年成功地投入运行。4 结点分别设在加州大学洛杉矶分校、斯坦福研究院、加州大学巴巴拉分校和犹他大学。到 1971 年, ARPANET 在全美 15 个地点共连接 23 台主机。

图 1.6 所示为 ARPANET 的示意图。图中 H 代表主机, 运行各种应用程序; IMP (Interface Message Processor) 代表接口报文处理机, 作为交换结点。通信线路将 IMP 互连, 主机再与 IMP 连接。主机间的通信要通过 IMP 互连起来的网络传送。

图 1.7 所示为当时的 IMP。第一台 IMP 1969.5.1 安装在加州大学洛杉矶分校。图中的研究者 L. Kleinrock 是第一个发表分组交换技术论文的研究生。

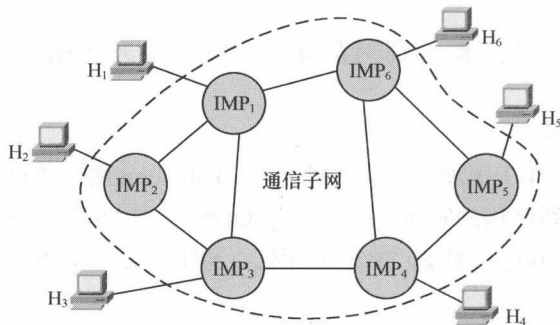


图 1.6 ARPANET 示意图



图 1.7 IMP (引自参考资料 9)

IMP 只是在 ARPANET 中使用的名称, 在分组交换网中通称分组交换结点 (packet switch node)。从技术上讲, ARPANET 是使用分组交换方式的 WAN。

主机间的数据传输是通过若干个中间的 IMP 转发实现的。例如, 图 1.6 中 H₂ 的用户欲发送数