

21世纪高等学校规划教材 | 软件工程



实用计算机网络教程

李领治 杨哲 纪其进 编著
朱艳琴 审校

清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 软件工程



实用计算机网络教程

李领治 杨哲 纪其进 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书在讲述计算机网络体系结构的基础上,按照层次对常用协议的基本原理进行了介绍与分析,并对引出的P2P、Ad Hoc、IPv6、MPLS、Wi-Fi等热点技术进行了说明。另外,本书还结合实践介绍了综合布线系统、交换机、路由器等网络设备以及常用服务器软件的基本使用方法,说明了网络编程技术的主要过程。本书的目标是使读者掌握计算机网络中解决各类问题的一般方法,了解网络技术的发展方向,熟悉各类网络软硬件系统的工作机制与使用方法,以加深对网络原理的理解,提高实践操作的技能。

本书结构清晰、内容丰富、重点突出、逻辑性强、理论与实践兼顾,具有很高的实用价值。本书可作为高等院校计算机科学与技术、网络工程、信息安全、物联网工程、软件工程、信息管理、信息系统、通信工程等专业的大学本科教材,也可作为计算机网络工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

实用计算机网络教程/李领治等编著.--北京:清华大学出版社,2012.7

(21世纪高等学校规划教材·软件工程)

ISBN 978-7-302-27509-1

I. ①实… II. ①李… 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(2011)第262562号

责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:张雪娇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.25 字 数:518千字

版 次:2012年7月第1版 印 次:2012年7月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00元

产品编号:039615-01

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学

周立柱 教授

章 征 教授

王建民 教授

冯建华 教授

刘 强 副教授

北京大学

杨冬青 教授

陈 钟 教授

陈立军 副教授

北京航空航天大学

马殿富 教授

吴超英 副教授

姚淑珍 教授

中国人民大学

王 珊 教授

孟小峰 教授

陈 红 教授

北京师范大学

周明全 教授

北京交通大学

阮秋琦 教授

赵 宏 副教授

北京信息工程学院

孟庆昌 教授

北京科技大学

杨炳儒 教授

石油大学

陈 明 教授

天津大学

艾德才 教授

复旦大学

吴立德 教授

吴百锋 教授

杨卫东 副教授

同济大学

苗夺谦 教授

徐 安 教授

华东理工大学

邵志清 教授

华东师范大学

杨宗源 教授

应吉康 教授

东华大学

乐嘉锦 教授

孙 莉 副教授

浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
扬州大学	李 云	教授
南京大学	骆 斌	教授
	黄 强	副教授
南京航空航天大学	黄志球	教授
	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授
南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	王宜怀	教授
	陈建明	副教授
江苏大学	鲍可进	教授
中国矿业大学	张 艳	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	叶俊民	教授
	郑世珏	教授
	陈 利	教授
江汉大学	颜 彬	教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	邹北骥	教授
中南大学	刘卫国	教授
湖南大学	林亚平	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
长安大学	巨永锋	教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
厦门大学	冯少荣	教授
厦门大学嘉庚学院	张思民	教授
云南大学	刘惟一	教授
电子科技大学	刘乃琦	教授
	罗 蕾	教授
成都理工大学	蔡 淮	教授
	于 春	副教授
西南交通大学	曾华桑	教授

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和教学方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail:weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

计算机网络技术发展迅速,知识更新频繁,传统的教学内容相对陈旧、结构比较松散、理论与实践结合得不够密切,难以适应社会发展对人才培养的要求。在本书的编写过程中,作者充分汲取以往的教学经验,对计算机网络课程的内容进行了较大幅度的调整,扩大了知识体系的覆盖范围,增强了知识结构的逻辑性,突出了知识点的实用性。本书至少具有以下3个特点:

(1) 主旨鲜明。以计算机网络中所要解决的关键问题为主线,串接各种主要协议,突出问题的纲领性作用,重点说明协议在解决问题时的思路、方法及其影响。对于与主线偏离较远的知识点不做详细叙述,避免影响教材的重点。目的在于使读者理解整个课程的基本构架,以及计算机网络中解决问题的一般原则与方法。

(2) 突出实践。计算机网络是一门实践性很强的学科,理论和实践相互促进,实践对于读者掌握课程的基本原理和基本技能具有不可替代的作用。教材的多数章节中都包含与实验密切相关的内容,教材的最后附加了可以在一般环境下进行的实验习题,形成了“原理归结到实验、实验促进原理理解”的良性循环。

(3) 兼顾新技术。新技术是推动学科发展和提高学习兴趣的原动力。计算机网络发展到现在,其基本体系结构已经比较成熟,但是仍然有一些热点技术问题有待解决。教材在围绕主线介绍基本原理的基础上引出当前的热点技术,并对这些技术所面临的主要问题与可能产生的影响进行了讨论,有利于读者了解本学科的发展方向。

全书共分为8章,其中第1章为概述;第2~6章分层次对计算机网络的基本原理与热点技术进行了介绍,同时对各层涉及的软硬件技术进行了说明;第7章介绍了常用的网络多媒体技术;第8章介绍了网络安全的基本知识。为了扩大本书的使用范围,对其中的一些要点技术进行了详细说明,以方便读者在使用该技术时进行查阅和参考。对于一般读者不需要深入掌握的内容,相应的章节标题后加了*号。

教材的第1~4章由李领治编写,第6章和第8章由杨哲编写,第5章和第7章由纪其进编写,朱艳琴教授对全书进行了审校和统稿。陆建德教授及网络工程系的各位老师对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者在计算机网络方面的研究与教学水平有限,编写时间也很局促,书中难免存在错误和不足之处,敬请各位专家与读者批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 计算机网络的定义.....	1
1.1.2 计算机网络的类别.....	1
1.1.3 计算机网络的性能指标.....	3
1.2 计算机网络的发展	5
1.2.1 计算机网络的起源.....	5
1.2.2 计算机网络的发展过程*	5
1.2.3 计算机网络的发展趋势.....	7
1.3 计算机网络的体系结构	8
1.3.1 协议与分层.....	8
1.3.2 计算机网络体系结构的形成	10
1.3.3 5 层协议体系结构	12
第 2 章 物理层	16
2.1 数据传输技术.....	16
2.1.1 通信的基本概念	16
2.1.2 脉冲编码调制	18
2.1.3 数字数据的模拟信号编码	19
2.1.4 数字数据的数字信号编码	21
2.2 多路复用技术.....	23
2.2.1 频分复用	24
2.2.2 时分复用	25
2.2.3 波分复用	27
2.2.4 码分复用	28
2.3 传输介质.....	31
2.3.1 双绞线	31
2.3.2 同轴电缆	32
2.3.3 光纤	34
2.3.4 无线通信	35

2.4 综合布线技术	39
2.4.1 综合布线系统的设计	39
2.4.2 无屏蔽双绞线的制作与测试	41
2.4.3 光纤的制作与测试	45
第3章 数据链路层	50
3.1 数据链路层协议的基本功能	50
3.1.1 帧的封装	50
3.1.2 差错检测	52
3.1.3 交换技术	53
3.1.4 信道与数据链路层传输技术	55
3.2 以太网技术	57
3.2.1 CSMA/CD 协议	58
3.2.2 以太网 MAC 帧	60
3.2.3 以太网的演进	62
3.3 以太网的物理规范	64
3.3.1 传统以太网的物理规范*	64
3.3.2 快速以太网的物理规范	65
3.3.3 千兆以太网的物理规范	67
3.3.4 万兆以太网的物理规范*	71
3.3.5 以太网规范总结	72
3.4 交换型以太网	73
3.4.1 从集线器到交换机	73
3.4.2 虚拟局域网	76
3.4.3 交换机的组成	79
3.4.4 交换机的配置	82
3.5 无线局域网	84
3.5.1 无线网络的类型	85
3.5.2 802.11 WLAN 的物理结构	89
3.5.3 CSMA/CA 协议	92
3.5.4 802.11 MAC 帧*	96
3.6 广域网	99
3.6.1 广域网技术的演变*	99
3.6.2 PPP	101
3.6.3 MSTP*	104
3.6.4 万兆以太网在广域网中的应用*	106
第4章 网络层	109
4.1 IP 协议	109

4.1.1	IPv4 地址与子网划分	109
4.1.2	IPv4 分组结构	113
4.1.3	IPv4 辅助协议	115
4.2	IPv6 协议	119
4.2.1	IPv6 地址	119
4.2.2	IPv6 分组结构	123
4.2.3	IPv6 辅助协议*	125
4.2.4	IPv4 向 IPv6 过渡	126
4.3	IP 路由	128
4.3.1	路由协议的分类	129
4.3.2	距离向量路由协议 RIP	130
4.3.3	链路状态路由协议 OSPF	133
4.3.4	外部网关协议 BGP*	139
4.3.5	IP 多播路由协议*	141
4.4	路由与交换	145
4.4.1	三层交换	146
4.4.2	多协议标记交换 MPLS	148
4.4.3	虚拟专用网 VPN	151
4.4.4	网络地址转换 NAT	154
4.5	路由器的组成与使用	156
4.5.1	路由器的工作原理	156
4.5.2	路由器的组成	160
4.5.3	路由器与三层交换机的配置	162
4.5.4	路由协议的配置	163
4.5.5	访问控制列表与 NAT 的配置*	166
4.6	自组织网络 Ad Hoc	170
4.6.1	自组织网络的基本概念	171
4.6.2	先验式路由 DSDV*	173
4.6.3	反应式路由 AODV*	174
第 5 章	运输层	176
5.1	运输层概述	176
5.1.1	运输层的功能	176
5.1.2	运输层的服务	178
5.1.3	端口的概念	179
5.2	用户数据报协议 UDP	180
5.2.1	UDP 概述	180
5.2.2	UDP 的报文格式	181
5.2.3	UDP 的特征	183

5.3	传输控制协议 TCP	183
5.3.1	TCP 概述	183
5.3.2	TCP 报文段的首部	185
5.3.3	TCP 的连接管理	188
5.3.4	TCP 的可靠传输	190
5.3.5	TCP 的流量控制机制	193
5.3.6	TCP 的拥塞控制机制	194
5.3.7	IP 层对改善 TCP 性能的支持	197
5.4	基于 Socket 接口的网络编程	199
5.4.1	Socket 编程基础知识	199
5.4.2	Winsock 接口规范及基本调用	203
5.4.3	无连接的 Socket 编程	206
5.4.4	面向连接的 Socket 编程	208
第 6 章	应用层	212
6.1	常用应用层协议	212
6.1.1	DNS 协议的原理与配置	212
6.1.2	电子邮件的原理与配置	218
6.1.3	文件传输的原理与配置	223
6.1.4	HTTP 的原理与配置	229
6.1.5	DHCP 的原理与配置	236
6.2	网络管理协议	239
6.2.1	SNMP 的原理	239
6.2.2	SNMP 程序设计初步	240
6.3	应用层网络	243
6.3.1	对等网络概述	243
6.3.2	非结构化对等网络	247
6.3.3	结构化对等网络	248
第 7 章	网络多媒体技术	251
7.1	网络多媒体概述	251
7.1.1	多媒体的概念	251
7.1.2	网络多媒体	252
7.1.3	网络多媒体应用	253
7.1.4	网络多媒体的关键技术	254
7.2	因特网服务质量保证技术	255
7.2.1	网络多媒体数据传输对网络性能的要求	256
7.2.2	分组网络服务质量保证的理论基础	258
7.2.3	集成服务(IntServ)模型	260

7.2.4	区分服务(Diff-Serv)模型	263
7.3	网络多媒体服务质量自适应控制机制	268
7.3.1	端到端的 QoS 层次模型	269
7.3.2	端到端的 QoS 保证机制	269
7.3.3	端到端服务质量保证的自适应控制机制	270
7.4	网络多媒体相关协议	272
7.4.1	实时传输协议 RTP	273
7.4.2	实时流协议 RTSP	275
7.4.3	会话发起协议 SIP	276
7.5	内容分发网络与网络多媒体	282
7.5.1	内容分发网络技术概述	282
7.5.2	CDN 的体系结构与工作原理	283
7.5.3	CDN 的关键技术	286
7.5.4	CDN 与网络多媒体应用	288
7.6	P2P 流媒体系统	288
7.6.1	P2P 技术概述	288
7.6.2	P2P 流媒体系统结构与工作原理	291
7.6.3	P2P 流媒体系统关键技术	292
7.6.4	基于 P2P 技术的流媒体系统实例	295
7.6.5	CDN 和 P2P 技术的融合	296
第 8 章	网络安全	297
8.1	网络安全基础	297
8.1.1	网络安全的内容	297
8.1.2	密码体制	298
8.1.3	数字签名	300
8.2	网络安全协议	302
8.2.1	IPSec 与 VPN	302
8.2.2	SSL 与 SET	305
8.2.3	PGP	312
8.3	防火墙	314
8.3.1	防火墙概述	314
8.3.2	防火墙的体系结构	315
8.3.3	防火墙的基本技术	316
附录 A		319
参考文献		326

计算机网络是对人类产生重大影响的当代科技成果之一,它不但推动了许多领域的技术进步,而且改变了人们的工作与生活方式。本章将介绍计算机网络的定义与形成和发展过程,并在分析其迅速发展的技术原因的基础上说明计算机网络的体系结构。

1.1 基本概念

1.1.1 计算机网络的定义

计算机网络是现代计算机技术与现代通信技术相互结合的产物,人们在不同的时期对计算机网络有着不同的认识和不同的研究着眼点,提出过不同的定义。现在人们所说的计算机网络一般是指利用通信设备和通信线路将分布在不同地理位置、具有独立功能的多个计算机系统互联起来,通过功能完善的软件实现信息传递和资源共享的系统。由这个定义可以看出,计算机网络有以下三个特征。

(1) 计算机网络所连接的对象是功能独立的计算机。脱离网络,每个计算机都可以独立地进行工作,相互之间的耦合度较松。根据这个特征可以将类似系统与计算机网络区分开来。例如:多终端联机系统虽然也是通过通信设备和线路互连,但是各终端都完全依赖于主机,不能独立工作,终端之间没有联系,所以不属于计算机网络;多机系统是在同一地点多台计算机为完成某项复杂运算而组成的系统,这种系统要求各设备之间高度耦合,其中的任一台计算机都难以独立完成系统的计算任务,所以也不属于计算机网络。

(2) 计算机网络的功能是进行信息传递和资源共享。根据这个特征,计算机网络逻辑上可以分为通信子网和资源子网两部分。通信子网主要完成信息传递功能,由通信设备和通信线路组成。资源子网为网络提供资源或使用网络资源,这里的资源可以是硬件设备,如海量存储器、打印机等,也可以是一些能共享使用的软件,还可以是为其他计算机所分析处理的数据。

(3) 要实现计算机网络的基本功能,除了要具备通信设备、通信线路、计算机等硬件设备外,还需要功能完善的软件。这些软件大致可分为网络操作系统软件、网络协议软件、网络应用软件三大类。当前的操作系统软件大部分都支持网络功能,属于网络操作系统;网络协议软件完成结点之间的通信,以后的章节中再详细说明;网络应用软件直接面向各种应用程序,为用户提供信息传递和资源共享服务。

1.1.2 计算机网络的类别

按照不同的属性,计算机网络有多种分类方法,这里介绍其中常用的两种。

1. 按覆盖范围分类

计算机网络覆盖范围的大小不同,所采用的传输技术也不同,这样就形成了以下 4 种不同的类型。

(1) 广域网(Wide Area Network, WAN)。广域网的覆盖范围很大,从几十千米到几万千米,可以覆盖一个省、一个国家甚至整个世界(如因特网)。广域网要使用复杂的技术才能实现高速数据传输,通信设备和传输介质都比较昂贵,一般是由电信部门提供,由多个部门或多个国家联合组建而成。

(2) 城域网(Metropolitan Area Network, MAN)。城域网的覆盖范围从几千米到几十千米,可以在一个城市或几个街区内使用,实现城市内大量的企业、学校、机关和住宅区等多个局域网的高速互联。

(3) 局域网(Local Area Network, LAN)。局域网的覆盖范围一般为几千米,通常在一个企业、学校或一栋大楼内使用。由于覆盖范围较小,局域网可以使用比较简单的技术实现高速数据传输,设备价格相对不高,组网也比较方便灵活。一些大型企业或学校可能拥有多个互联的局域网,这样的网络通常称为企业网或校园网。随着光纤技术的广泛应用,局域网的覆盖范围逐渐增大,与城域网的区分越来越不明显,现在的城域网也时常并入局域网的范围进行讨论。

(4) 个人区域网(Personal Area Network, PAN)。个人区域网的覆盖范围为 10 m 左右,可以在一个人工作的地方使用,它一般不需要在场所内布设通信设备和传输介质,而是使用无线技术将个人使用的各种电子设备互连。

2. 按拓扑结构分类

将网络中的计算机及通信设备抽象为一个个的结点,将各种通信线路抽象为一条条的连线,则网络就成为具有一定结构的几何形状,这称为网络的拓扑结构。按拓扑结构可以将计算机网络分为以下 5 种不同的类型,如图 1-1 所示。

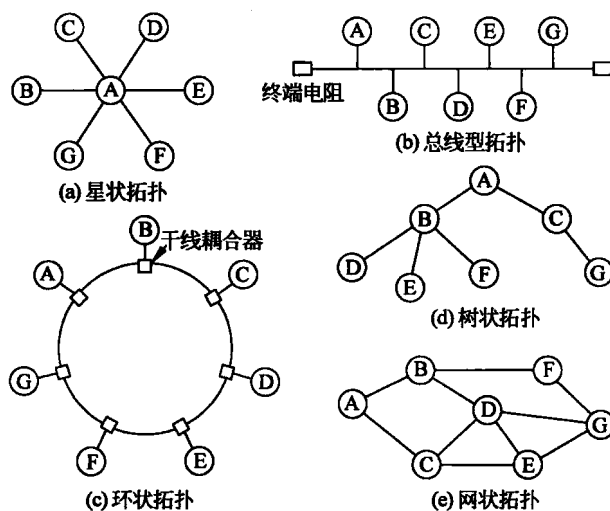


图 1-1 网络拓扑结构的类型

(1) 星状。星状拓扑结构就是核心结点通过点到点的线路与所有非核心结点相连,而非核心结点之间没有直连线路,如图 1-1(a)所示。星状拓扑采用集中式控制策略,由核心结

点控制所有通信,处理比较复杂,而非核心结点的通信处理负担很小。现在的局域网多使用这种拓扑结构。

(2) 总线型。总线型拓扑结构将网络中的各个结点用一根总线连接起来,总线两端使用匹配电阻吸收总线上的电磁波以阻止信号反射,如图 1-1(b)所示。总线状拓扑采用广播式传输,需要使用访问控制策略来协调结点的数据包发送,以保证任何时刻只能有一个结点发送数据包。任何一个结点发送的数据包其他所有结点都可以接收到,只有地址与数据包目的地址相同的结点会将数据包接收下来,不同的结点要将数据包丢弃。早期的以太网使用这种拓扑结构。

(3) 环状。环状拓扑结构的主干线路组成一个闭合的环,各个结点通过干线耦合器接入到这个环中,如图 1-1(c)所示。网络中各个结点的地位平等,数据包的流向是定向的,网络的传输延迟是确定的。令牌环网使用这种拓扑结构。

(4) 树状。树状拓扑结构可以看做多级星状拓扑结构,根结点是子结点的核心,子结点又是下一级子结点的核心,如图 1-1(d)所示。根结点可以转发网内所有结点间的数据包,而子结点只负责以它为核心的结点间的数据包转发。现在的一些多级交换网络常采用这种拓扑结构。

(5) 网状。网状拓扑结构由多个平等的结点通过多条线路互连而成,如图 1-1(e)所示。由于结点之间有多条路径相连,数据包在传输时需要选择适当的路径,这样可以绕过过忙的结点和线路。广域网多使用这种拓扑结构。

计算机网络还可以按照用途分为公用网和专用网两类。公用网由电信部门组建,单位或个人可以租用;专用网为某一单位或某一系统组建并单独使用。

1.1.3 计算机网络的性能指标

衡量计算机网络性能的参数指标很多,这里介绍以下两个常用的性能指标。

1. 带宽

在计算机网络中,带宽(bandwidth)是指信道传送数据的最高速率,单位为 b/s,即比特/秒。当带宽较高时可以用 Kb/s、Mb/s、Gb/s 或 Tb/s 表示,它们之间的换算关系为: $1 \text{ Kb/s} = 2^{10} \text{ b/s}$, $1 \text{ Mb/s} = 2^{20} \text{ b/s}$, $1 \text{ Gb/s} = 2^{30} \text{ b/s}$, $1 \text{ Tb/s} = 2^{40} \text{ b/s}$ 。也常将 b/s 省略来描述带宽,如 10 M 以太网实际上是指带宽为 10 Mb/s 的以太网。这里还需要注意,数据的存储单位一般默认为字节(B, $1 \text{ B} = 8 \text{ b}$),10 M 的文件一般是指大小为 10 MB 的文件,则通常所说的“10 M 的文件”使用“10 M 网络”传输最少需要 8 s 的时间。

网络中的带宽不同于传统信号传输时所用的带宽,信号带宽是指信号具有的频带宽度,单位是 Hz(赫兹)。例如,在传统线路上传送电话信号所使用的电磁波频率为 0.3~3.4 kHz 之间,则其带宽为 3.1 kHz。

吞吐量(throughout)也是反映网络速率的一项技术指标,单位也是 b/s,它指一组特定的数据在特定的单位时间内经过特定的路径所传送的实际测量值。显然,吞吐量的上限就是带宽,由于设备状况、数据包类型、网络负载等多种因素的限制,吞吐量常常远小于带宽。

2. 时延

时延(delay 或 latency)是指数据包从网络(或线路)的一端传送到另一端所需的时间,也称为延迟、迟延、延时等。时延是由以下几部分组成的。

(1) 发送时延。发送时延是指数据包从结点进入信道所需要的时间,也就是从数据包的第一个比特开始发送算起,到最后一个比特发送完毕所需要的时间,也称为传输时延。它的计算公式是:

$$\text{发送时延}(s) = \frac{\text{数据包长度}(b)}{\text{信道带宽}(b/s)} \tag{1-1}$$

(2) 传播时延。传播时延是指电磁波在信道的一端传播到另一端所花费的时间。它的计算公式是:

$$\text{传播时延}(s) = \frac{\text{信道长度}(m)}{\text{电磁波在信道上的传播速度}(m/s)} \tag{1-2}$$

电磁波在真空中的传播速率是 3.0×10^5 km/s,在网络传输介质中的传播速率比在真空中要低,例如,在铜缆中的传播速率约为 2.3×10^5 km/s,在光纤中的传播速率约为 2.0×10^5 km/s。

(3) 处理时延。处理时延是指中间结点在收到数据包时为转发出去而进行处理所花费的时间。例如,为了确定数据包应该在哪个接口转发出去,需要读取数据包首部中的目的地址、查找适当的路径、检查数据包是否正确等,这些操作都会产生处理时延。

(4) 排队时延。数据包在中间结点除了会产生处理时延外,还会产生排队时延。排队时延由两部分组成:一部分是数据包进入中间结点后,要先在输入队列进行排队等待处理而产生的时延;另外一部分是在处理完成后,还要在输出队列排队等待转发而产生的时延。

4 种时延所产生的位置以及影响其大小的主要因素如表 1-1 所示。

表 1-1 4 种时延的比较

时延类型	发送时延	传播时延	处理时延	排队时延
产生位置	结点至信道	信道	中间结点	中间结点
主要影响因素	数据包大小 信道带宽	信道长度 信道介质类型	结点处理能力 数据包类型、大小	结点负载状况 数据包优先级

数据经历的总时延就是以上 4 种时延之和:

$$\text{总时延} = \text{发送时延} + \text{传播时延} + \text{处理时延} + \text{排队时延} \tag{1-3}$$

在总时延中,难以恒定哪种时延会占据主导地位,必须根据具体情况进行分析。例如:在网络负载不大的情况下,带宽较小的用户之间传输大文件时,发送时延会占据主导地位;若使用该网络进行远程控制,用户之间仅仅使用字符的形式传送命令及其返回结果,传播时延会占据主导地位。若网络的基础设施比较陈旧,中间设备的处理能力比较低,即使负载很低,总时延也会很大,因为处理时延占据了主导地位;若网络设备性能很高,但大量的用户同时在进行大数据传输,则排队时延会占据主导地位。

初学网络的人往往会将传播时延误认为总时延。大部分人都知道,使用光纤后网络速度会明显提高,究其原因则认为是光在光纤中的传播速度比电磁波在铜缆中的传播速度高造成的。在介绍传播时延时,我们给出了电磁波(光也是一种电磁波)在两种介质中的传播速度,可以看出其在光纤中的传播速度略小于在铜缆中的传播速度,使用光纤后传播时延会略有增大。光纤之所以会加快网络速度,是因为光信号的处理比较简单,结点的发送时延和处理时延会大幅降低,引起总时延变小,从而提高了网络传输速率。