

信息通信热点技术应用丛书

计算机网络中的 拥塞控制与流量控制

徐昌彪 鲜永菊 编著

TP393.02/18

2007

信息通信热点技术应用丛书

计算机网络中的拥塞控制与流量控制

徐昌彪 鲜永菊 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机网络中的拥塞控制与流量控制 / 徐昌彪, 鲜永菊编
著. —北京: 人民邮电出版社, 2007.10
(信息通信热点技术应用丛书)
ISBN 978-7-115-16521-3

I. 计… II. ①徐…②鲜… III. 计算机网络—研究
IV. TP393.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 102755 号

内 容 提 要

本书主要阐述 Internet 中的拥塞控制与流量控制技术。全书共分 6 章, 内容包括计算机网络概述、网络拥塞控制与流量控制基础、TCP 拥塞控制与流量控制、路由器中的队列管理与调度、数据链路层流量控制与媒体访问控制、基于 NS 的仿真应用。

全书选材既有广度, 也有深度; 有理论, 也有应用。书中采用文本、流程图以及伪代码等相结合的方式描述相关算法, 易于读者掌握和实现。另外, 本书还给出了相关技术的研究进展, 以便于科研人员了解相关技术的研究动态。

本书适用于高等院校通信、计算机等专业的本科生和教师, 帮助他们全面了解网络拥塞控制与流量控制技术, 也特别适用于通信与计算机网络领域的研究人员。

信息通信热点技术应用丛书

计算机网络中的拥塞控制与流量控制

- ◆ 编 著 徐昌彪 鲜永菊
责任编辑 陈万寿
- ◆ 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>
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.75
字数: 331 千字
印数: 1—3 000 册
- 2007 年 10 月第 1 版
2007 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16521-3/TN

定价: 32.00 元

读者服务热线: (010)67129258 印装质量热线: (010)67129223

前 言

随着互联网规模和互联网应用的快速增长,网络拥塞和数据冲突问题已引起人们的密切关注。拥塞控制与流量控制技术针对网络中的拥塞和数据冲突而成为网络控制中的核心技术。近年来,国内外学者在拥塞控制和流量控制领域开展了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果。目前还没有书籍深入全面地介绍网络拥塞控制方面的专门知识和最新研究成果,给我国的相关研究和教学造成了很大的不便。

本书主要阐述 Internet 中的拥塞控制和流量控制技术。在拥塞控制方面,主要涉及传输层的 TCP 拥塞控制技术以及路由器的队列管理与调度技术。在流量控制技术方面,主要介绍 TCP 流量控制技术以及数据链路层的流量控制技术。具体内容如下:(1) 计算机网络概述,简要介绍计算机网络发展及体系结构;(2) 网络拥塞控制与流量控制基础,介绍网络拥塞与流量控制的背景知识、拥塞控制与流量控制的一般措施、拥塞控制与流量控制的有效性评价等;(3) TCP 拥塞控制与流量控制,主要介绍 TCP 拥塞控制原理、主要的 TCP 版本及其所采用的拥塞控制、Fcp-Friendly 拥塞控制、TCP 中的流量控制、TCP 拥塞控制研究进展;(4) 路由器中的队列管理与调度,主要介绍路由器中的队列管理原则、主要的队列管理技术(特别是主动队列管理,如 RED)、队列调度原则及主要的队列调度算法、队列管理与调度研究进展;(5) 数据链路层流量控制与媒体访问控制,介绍数据链路层的流量控制、常见的媒体访问控制技术、媒体访问控制技术的研究进展;(6) 基于 NS 的仿真应用,主要介绍 NS 仿真器、如何利用 NS 进行网络仿真、拥塞控制与流量控制的仿真示例等。

全书选材既有广度,也有深度;既有理论,也有应用。书中采用文本、流程图以及伪代码相结合的方式描述相关算法,易于读者掌握和实现。另外,本书还给出了相关技术的研究进展,利于科研人员了解相关技术的研究动态。

本书适用于高等院校计算机通信、电子信息等专业本科生和老师,帮助他们全面了解网络拥塞控制与流量控制技术。本书也特别适用于从事网络领域研究的研究人员和需要进一步深入研究拥塞控制与流量控制技术的研究人员。

本书由徐昌彪博士和鲜永菊副教授合作编写,由范俐伽、刘艳玲、王尉任、司伟、刘琳、李凤凤等研究生协助。

限于编著者水平,书中不当之处在所难免,望读者批评指正。读者可将意见和建议发至编辑电子邮箱 chenwanshou@ptpress.com.cn。

作 者

目 录

第 1 章 计算机网络概述	1
1.1 计算机网络的发展	1
1.1.1 计算机网络的发展历程	1
1.1.2 Internet 应用与高速网络技术发展	3
1.1.3 计算机网络的发展趋势	5
1.2 计算机网络体系结构	6
1.2.1 相关概念	6
1.2.2 OSI 参考模型	7
1.2.3 因特网模型	10
参考文献	12
第 2 章 网络拥塞控制与流量控制基础	13
2.1 网络拥塞与流量控制的背景知识	13
2.1.1 网络拥塞的含义	13
2.1.2 互联网的网络模型	14
2.1.3 拥塞产生的原因	15
2.1.4 流量控制的含义	16
2.2 拥塞控制和流量控制措施	16
2.2.1 拥塞控制措施	16
2.2.2 流量控制措施	17
2.3 拥塞控制和流量控制的有效性评价	17
2.3.1 资源分配效率	18
2.3.2 资源分配公平性	18
参考文献	19
第 3 章 TCP 拥塞控制与流量控制	20
3.1 传输控制协议 (TCP)	20
3.1.1 TCP 概述	20
3.1.2 TCP 报文段格式	21
3.1.3 TCP 连接的建立和释放	23
3.1.4 TCP 实施策略	26
3.1.5 TCP 差错控制	27
3.1.6 TCP 的计时器	28
3.1.7 TCP 状态转换机	29

3.2	TCP 拥塞控制原理	32
3.2.1	慢起动 (Slow Start)	32
3.2.2	拥塞避免 (Congestion Avoidance)	33
3.2.3	快速重传 (Fast Retransmit)	34
3.2.4	快速恢复 (Fast Recovery)	34
3.3	主要的 TCP 版本及其所采用的拥塞控制	36
3.3.1	TCP Tahoe	36
3.3.2	TCP Reno	36
3.3.3	TCP New Reno	37
3.3.4	TCP SACK	38
3.3.5	TCP Vegas	41
3.3.6	FAST TCP	44
3.3.7	I-TCP	46
3.3.8	SNOOP	48
3.4	TCP-Friendly 拥塞控制	50
3.4.1	TCP 友好算法的提出背景	50
3.4.2	几种典型的 TCP 友好拥塞控制算法	51
3.5	TCP 中的流量控制	55
3.5.1	TCP 的数据编码与确认	55
3.5.2	滑动窗口协议	56
3.5.3	糊涂窗口综合症	59
3.6	TCP 拥塞控制研究进展	61
3.6.1	TCP 拥塞控制的改进	61
3.6.2	特定网络上的 TCP 拥塞控制研究	64
	参考文献	66

第 4 章	路由器中的队列管理与调度	70
4.1	队列管理原则	71
4.2	队列管理技术概述	72
4.3	用于“尽力而为”服务的主动队列管理技术	73
4.3.1	随机早期检测算法 (RED, Random Early Detection)	74
4.3.2	RED 的变形算法	77
4.3.3	BLUE 算法	83
4.3.4	AVQ 算法	83
4.3.5	其他几种 AQM 算法	84
4.4	可用于提供区分服务的 AQM 算法	85
4.4.1	区分服务体系结构	86
4.4.2	RIO 算法 (RED with In and Out/strong)	88
4.4.3	WRED (Weighted Random Early Detection) —— 加权随机早期检测	90

4.4.4 基于分类的阈值 (CBT, Class-Based Thresholds)	92
4.5 基于控制理论的其他 AQM 技术	92
4.5.1 TCP 流量控制中 AQM 系统的模型	93
4.5.2 PI 算法	94
4.5.3 H _∞ PID 控制器的主动队列管理算法	95
4.5.4 智能控制理论在 AQM 中的应用研究	98
4.6 AQM 技术比较分析及若干问题讨论	102
4.6.1 基于“尽力而为”服务的算法比较	102
4.6.2 基于区分服务的算法比较	103
4.6.3 AQM 技术中几个问题的讨论	104
4.7 队列调度技术概述	109
4.7.1 队列调度原理	109
4.7.2 队列调度原则及分类	110
4.7.3 分组排队策略	110
4.7.4 分组调度的功能	111
4.7.5 调度算法的性能指标	111
4.8 主要的队列调度算法	112
4.8.1 基于轮循的调度算法	112
4.8.2 基于 GPS 模型的 PFQ 调度算法	113
4.8.3 基于时延的调度算法	117
4.8.4 核心无状态调度算法	117
4.8.5 高速路由器的队列调度算法	121
4.9 队列管理和调度研究进展	130
参考文献	132
第 5 章 数据链路层流量控制和媒体访问控制	137
5.1 数据链路层的流量控制	138
5.1.1 最简单最基本的停止—等待 (Stop-and-Wait) 协议	138
5.1.2 停止—等待 ARQ 协议	139
5.1.3 连续 ARQ 协议	144
5.1.4 滑动窗口协议	145
5.1.5 选择重传协议	147
5.2 媒体访问控制技术	147
5.2.1 ALOHA 协议	147
5.2.2 载波检测多路访问协议 (CSMA)	150
5.2.3 无冲突的协议	154
5.2.4 有限竞争协议	156
5.2.5 波分复用协议	158
5.2.6 无线 LAN 协议	160

5.2.7	IEEE 802.3	163
5.2.8	令牌环 (Token Ring) 访问控制	164
5.2.9	令牌总线 (Token Bus) 访问控制	165
5.3	媒体访问控制技术研究进展	165
5.3.1	802.11 协议	166
5.3.2	802.16 协议	170
5.3.3	Ad Hoc 中的 MAC 技术	173
5.3.4	无线传感器中的 MAC 技术	177
	参考文献	180
第 6 章	基于 NS 的仿真应用	182
6.1	NS 仿真器简介	182
6.1.1	离散事件模拟器	182
6.1.2	丰富的构件库	182
6.1.3	分裂对象模型	183
6.1.4	开放的源代码	184
6.1.5	相关工具和资源	184
6.2	使用 NS 进行网络模拟	185
6.2.1	模拟过程	185
6.2.2	时间调度机制	186
6.2.3	事件 (Event)	187
6.2.4	节点 (Node)	188
6.2.5	链路 (Link)	191
6.2.6	仿真环境的建立	195
6.3	NS 中的仿真示例	198
6.3.1	TCP 仿真示例	198
6.3.2	队列管理与调度仿真示例	207
6.3.3	媒体访问控制仿真示例	209
	参考文献	211

第 1 章 计算机网络概述

计算机网络是计算机技术与通信技术相结合的产物，它的产生奠定了信息化社会发展的技术基础。如今，计算机网络已经成为我们日常生活的重要组成部分。

1.1 计算机网络的发展

计算机网络产生后，它的发展同计算机一样，历史虽然不长，但是发展非常迅速。

1.1.1 计算机网络的发展历程

从 1946 年第一台计算机问世后，计算机就不断地向高速度、高性能发展。在很短的时间内，许多大型计算机投入使用。由于计算机内传送的是数字信号，在传送过程中，数字信号很容易衰减或产生波形畸变，因此不能进行远距离的数据传送。如何利用已经发展起来的通信技术，使数据能够进行远距离传送呢？为了满足这一需求，计算机网络（computer networks）应运而生。关于计算机网络的发展目前大致划分为四个阶段^[1]：计算机—终端通信网络、以共享资源为目的的计算机网络、基于个人计算机的局域网和标准化网络。

1.1.1.1 计算机—终端通信网络

随着计算机技术的发展，在 20 世纪 50 年代出现了多终端、多用户计算机系统。但那时主机和终端的距离一般都限制在几百米，不能远距离使用终端，给远方用户带来了财力和时间上的浪费。随之而来的就是不能完全发挥主机的效能，即有时工作量不饱满。为此，必须在计算机内部增加通信功能，使得远方的终端用户能够通过通信线路和计算机相连。这就是在 20 世纪 50 年代中期出现的“具有通信功能的单主机多终端系统”。在这种系统中，一台计算机通过通信线路与若干近处终端及远方终端连接，或多个终端共享一条通信线路和一台主机连接，形成简单的“终端—通信线路—计算机”通信系统，这就构成了计算机网络的雏形。该系统主要解决了用户在本地使用远方计算机的问题。美国 20 世纪 50 年代末的半自动地面防空系统（SAGE）即属于此类系统。

这种系统除中心计算机外，其余的终端设备都没有自主处理功能，还不能称作是真正意义上的计算机网络，人们称之为以计算机为中心的联机系统。这种系统具有以下缺点。

（1）主机负载较重，因为既要承担数据处理工作，又要承担通信管理工作。

(2) 通信线路利用率低, 尤其是当主机与终端远距离连接时更为明显。因为每个终端都要用一条线路与主机连接, 但它们并不一定每时每刻都要与计算机进行通信。

1.1.1.2 以共享资源为目的的计算机网络

随着计算机性能的提高和价格的下降, 许多机构已经拥有自己的计算机, 没有必要再集中保存和处理所有的信息。因此, 在很多地方分别设置了若干独立的计算机系统。用户除了使用这些计算机系统提供的本地资源之外, 还希望与其他计算机系统互联, 使用其他系统的资源, 彼此交换信息, 或者与其他系统联合起来共同完成一项任务, 这样就形成了把多台主计算机通过通信线路互联起来, 以共享资源为目的的计算机网络。

例如, 1969 年美国国防部高级研究规划署建立的 ARPANET (通常称为 ARPA 网), 就是一个规模较大的计算机网络, 是计算机网络技术发展的重要的里程碑。此网络首次采用了网络信息传输过程中的分组交换技术, 并使用层次体系结构, 形成了四个层次的网络协议, 对于网络通信过程中采用的报文格式也作了详尽的规定。其在概念、结构和设计方面都为后继的计算机网络打下了基础。

随着 ARPANET 的建立和运行, 计算机网络的优越性得到充分证实。许多国家随后又组建了许多大型网络。它们在技术上和 ARPANET 很相似, 主要特点是:

- (1) 分布范围广, 站点距离远;
- (2) 有资源共享和通信两方面的目的, 但侧重前者;
- (3) 数据传输率比较低, 一般为几十 kbit/s 到几百 kbit/s;
- (4) 规模大, 投资高, 往往都由国家部门组建。

20 世纪 80 年代中期, ARPANET、NSFNET 等网络互联形成了 Internet 早期的骨干网络。现在, Internet 是最大的国际计算机互联网络, 能够提供各种信息资源, 而且将会在今后的信息高速公路建设中起到关键作用。

1.1.1.3 基于个人计算机的局域网

早期的计算机网络大多为远程网络, 其作用的地理范围从数十千米到数千千米不等。进入 20 世纪 80 年代以后, 以 IBM PC 为代表的个人计算机 (简称 PC 机) 得到了蓬勃发展和普及。随着 PC 机性能的提高和价格的下降, 其数量在急剧增加, 应用范围迅速扩展到社会的各个方面。基于信息交换、资源共享的需求, 一些部门开始建立连接本部门有限区域内 PC 机的计算机网络。由于网络的覆盖范围有限, 一般是一个办公室或一栋办公楼, 因此将其称为局域网。由于局域网数据传输速度快、结构简单灵活、安装使用方便、工程造价低廉, 得到了迅速的发展和广泛的应用。其主要特点是局域网由实验室进入到产业界。这个时期最具影响力的是以太网 (Ethernet) 的出现, 这也是计算机局域网发展史上的一个里程碑。

20 世纪 80 年代是局域网大规模发展的时期, 也是局域网成熟的年代。其主要特点是局域网的商品化和标准化。国际上大的计算机网络公司都有自己的局域网产品, 著名产品有美国 Xerox 公司的以太网 (Ethernet), ZILOG 公司的 Z-NET, IBM 公司的 PC-NET, NETSTAR 公司的 PLAN 和 DATAPOINT 公司的 ARCNET 等。在这一时期, 不但计算机网络的硬件和软件技术得到了充分的发展, 而且计算机网络的各种国际标准也基本形成。

1.1.1.4 标准化网络

以往的计算机网络大都由研究部门、大学、计算机公司等各种机构自主研制，并没有统一的标准加以规范。各生产厂家的计算机产品、网络产品在技术、结构等方面存在着很大的差异，所以不同厂家生产的计算机和网络产品很难互连，这给用户带来了很大的不便。因为用户无法确定哪种网络更适合，而且如果一旦选定了某种网络产品，就无法再选用其他厂家的计算机或网络产品，否则不同的系统之间无法互连，不利于保护已有的投资。

20 世纪 70 年代后期，人们认识到这个问题的严重性，开始提出发展计算机网络的国际标准化问题。许多国际组织，如国际标准化组织 (ISO)、国际电报电话咨询委员会 (CCITT)、电气电子工程师协会 (IEEE) 等都成立了专门的研究机构。研究计算机系统互连、计算机网络协议标准化等问题，以便不同的计算机系统、不同的网络系统能互连在一起，实现“开放”的通信、交换、资源共享和分布处理等。1984 年，ISO 正式颁布了一个称为“开放系统互连基本参考模型”(OSI 模型)的国际标准 ISO 7498。该模型被国际社会普遍接受，并认为是新一代计算机网络体系结构的基础。20 世纪 80 年代中期，以 OSI 模型为参考，ISO 以及 CCITT、IEEE 等机构开发指定了一系列协议标准，形成了一个庞大的 OSI 基本标准集。OSI 标准确保了各厂商生产的计算机和计算机网络产品之间的互连，推动了 OSI 技术的发展和标准的应用。

从 20 世纪 90 年代开始，不仅局域网技术更加成熟，而且广域网也有了长足的发展。光导纤维的使用，极大地提高了计算机网络的信息传输速率；FDDI、ATM 等新技术的采用，也进一步促进了全球计算机网络时代的到来。

1.1.2 Internet 应用与高速网络技术发展

目前，计算机网络的发展正处于第四阶段。在这一阶段，Internet 被广泛应用，高速网络技术与网络计算技术迅速发展。

Internet 是在世界范围内基于 TCP/IP 协议的一个巨大的网际网，它把无数个局域网和广域网通过互连设备连接起来，形成一个全球性的大网，可译为“因特网”或“国际互联网”。现在因特网已发展成为世界上最大的国际计算机互联网，其增长速度非常令人吃惊，仅在几十年里，网络数已经从几十个增长到几十万个，连接在这些网络上的计算机数也从几百台增长到几百万台。由于因特网已影响到人们生活的各个方面，使得 20 世纪的 90 年代成为因特网时代，或简称为网络时代。

Internet 的前身是美国的 ARPANET，该网是全世界第一个比较完善的分布式跨国分组交换网。1969 年它仅有 4 个节点，1977 年网络节点已发展到 57 个，连接不同类型的计算机达 100 多台，连网用户达 2000 多个。20 世纪 80 年代初，TCP/IP 协议正式成为 ARPANET 的网络协议，成为美国军用标准。随着 TCP/IP 协议的标准化，ARPANET 的规模不断扩大。ARPANET 是 Internet 赖以生存和发展的基础，它较好地解决了一系列异种机、异构网络互连的理论和技术问题，所产生的关于资源共享、分散控制、分组交换、网络分级（资源子网和通信子网）、网络协议分层等思想，成为当代计算机网络建设的支柱。

1985 年，美国国家科学基金会 (NSF) 提供巨资建造了全美五大超级计算机中心。为了使全国的科学家、工程师能共享这类超级计算设施，NSF 首先想到可否利用 ARPANET 的通

信能力。初期的 NSFNET 比当时的 ARPANET 小得多, 传输速率只有 56kbit/s, 所以无法实现连接美国 100 所高等院校的计算机与网络的目标。从 1987 年起, ARPANET 决定建立自己的基于 IP 协议的主干网。NSF 首先在全国建立按地区划分的计算机广域网, 然后将这些广域网与超级计算中心相连, 最后再将各超级计算中心互连起来。

1988 年 9 月, 新主干网 NSFNET 如期投入正式运行, 速度升至 T1 级, 即 1.544Mbit/s。它除了实现建网目标外, 还连接了其他 13 个国家的许多超级计算中心, 并逐步向全社会开放。1990 年, 它全面取代 ARPANET, 成为 Internet 的主干网。

然而随着网上通信量的剧增, NSFNET 很快就面临着不堪重负的局面。NSF 不得不考虑采用新的网络技术来适应发展的需要, 实施了一个旨在进一步提高网络性能的 5 年研究计划。该计划导致了 ANS 公司的诞生。由 IBM 公司提供计算机设备和软件, 电话公司 MCI 提供光纤长途通信线路, 网络公司 Merit 经营网络, ANS 提供能以 44.746Mbit/s 传送的 T3 级主干网, 传输线路容量是 NSFNET 的 30 倍。到 1991 年底, NSFNET 的全部主干网点都已同 ANS 提供的 3 级主干网连通。然而由于历史的原因, 人们并不常提起 ANSNET, 仍习惯继续称之为 NSFNET。

到 1996 年速率为 155Mbit/s 的主干网 vBNS 建成。1998 年又开始建造更快的主干网 Abilene, 数据率最高达 2.5Gbit/s。1999 年 MCI 和 Worldcom 公司开始将美国的因特网主干网速率提高到 2.5Gbit/s。到 1999 年底, 因特网上注册的主机已超过 1000 万台。

现在 Internet 是全球最大和最具有影响力的计算机互连网络, 也是世界范围的信息资源的宝库。Internet 是通过路由器实现多个广域网和局域网互联的大型网际网, 它对推动世界科学、文化、经济和社会的发展有着不可估量的作用。对于广大的用户来说, 它像是一个庞大的广域计算机网络。如果用户将自己的计算机连入 Internet, 便可以在这个信息资源宝库中漫游。Internet 中的信息资源几乎是应有尽有, 涉及到商业、金融、政府、医疗卫生、信息服务、科研教育、休闲娱乐等, 用户足不出户便可以知道天下事。如果用户希望在几分钟内将信件投递给远在外国的朋友, 可以使用 Internet 提供的电子邮件服务。此外, 用户还可以使用 Internet 上的 IP 电话, 通过 Internet 与未谋面的网友聊天, 在 Internet 上发表自己的见解或者寻求帮助。

未来的计算机网络将覆盖所有的企业、学校、科研部门、政府及家庭, 其覆盖范围可能要超过现有的电话通信网。为了支持各种信息的传输, 网上电话、视频会议等应用对网络传输的实时性要求很高, 未来的网络必须具有足够的带宽、很好的服务质量与完善的安全机制, 以满足电子政务、电子商务、远程教育、远程医疗、分布式计算、数字图书馆与视频点播等不同应用的需求。

在 Internet 飞速发展与广泛应用的同时, 高速网络的发展也引起了人们越来越多的注意。高速网络技术发展主要表现在: 宽带综合业务数字网 (ISDN)、异步传输模式 (ATM)、高速局域网、交换局域网与虚拟网络。以高速 Internet 和 ATM 为代表的高速网络技术发展迅速, 竞争激烈。目前, 在传输速率为 10Mbit/s 的 Ethernet 广泛应用的基础上, 速率为 100Mbit/s 与 1Gbit/s 的 Fast Ethernet、Gigabit Ethernet 已经进入实用阶段。传输速率为 10Gbit/s 的 Ethernet 正在研究中。同时, 交换式局域网与虚拟局域网技术发展十分迅速。基于光纤通信技术的宽带城域网与宽带接入技术已经成为当前研究、应用与产业发展的热点问题之一。

Internet 的广泛应用和网络技术的快速发展, 使得网络计算技术将成为未来几年里重要的

网络研究与应用领域。移动计算网络、网络多媒体计算、网络并行计算、网格计算、存储区域网络与网络分布式对象计算的各种网络计算技术正在成为网络新的研究与应用的热点问题。

为了有效地保护金融、贸易等商业机密,保护政府机要信息与个人隐私,网络必须具有足够的安全机制,以防止信息被非法窃取、破坏与损失。因此,随着社会生活对网络技术与基于网络的信息系统依赖的程度越高,人们对网络与信息安全的需求就越来越强烈。如何保证网络与信息的安全正在成为研究、应用与产业发展的重点问题,并引起了社会的高度重视。

1.1.3 计算机网络的发展趋势

计算机网络的发展趋势可以简单概括为^[2]: 一个目标、两个支撑、三个融合、四个热点。

1.1.3.1 一个目标

面向 21 世纪计算机网络发展的总体目标就是要在各个国家,进而在全球建立完善的信息基础设施。信息基础设施将改变人们的生活、学习、工作、交际的方式,减轻人们的工作负担,提高人民的生活水平,推动社会的进步。目前各国政府都在实施 NII(国家信息基础设施)计划。在 NII 建成之后,一个国家的信息网络能使任何人在任何地点、任何时间,可将文本、声音、图像等各种媒体信息传递给任何地点的任何人。

1.1.3.2 两个支撑

在实施面向 21 世纪计算机网络发展的总体目标中,有两个重要的支撑技术,即微电子技术和光电子技术。

微电子技术的发展是信息产业发展的基础,也是驱动信息革命的基础。如微处理器的发展速度就相当地惊人。驱动信息革命的另一个支撑技术就是光电子技术。评价光纤传输发展的标准是传输的比特率和信号需要再生前可以传输的距离的乘积。

1.1.3.3 三个融合

支持全球建立完善的信息基础设施的最重要的技术是计算机、通信、信息内容这三种技术的融合。计算机包括计算机硬件、计算机软件以及相应的服务;通信包括电话、电视电缆、卫星及无线通信等;信息内容包括教育、娱乐、出版、信息提供者等。信息时代的新经济是计算机、通信和信息内容三种关键经济成分的融合。

1.1.3.4 四个热点

(1) 多媒体

随着数字化技术的成熟,数据、文本、声音、图像这些多媒体信息都能数字化,这就是多媒体技术。多媒体包括静态的和基于时间的媒体,前者是数据、文本和静态数据,后者是音频和视频信号。多媒体的应用有视频点播、交互视频(包括视频的协同工作、文件共享、远程医疗和远程教学)等。

(2) 宽带网

要建立真正的宽频多媒体网络,达到信息高速公路的目标,需要高速的传输载体,即信

息高速公路的物理结构,包括网络、软件、交换设备。信息高速公路的载体有两个技术特征:一个是在任何时间、任何地点都能提供全彩色、全动态的视频信号,一般称为宽频容量;另一方面要提供全交互的、双向的信息流通信。将宽带业务带进每一个家庭,需要解决宽带接入方法,即所谓的最后一公里问题。

(3) 移动通信

便携式智能终端(PCS)可以使用无线技术,在任何地方以各种速率与网络保持联络。用户利用 PCS 进行个人通信,可以在任何地方接收到发给自己的呼叫信号。这些 PCS 系统支持语音、数据和报文等各种业务。PCS 网络和无线技术将改进人们的移动通信水平,成为未来信息高速公路的重要组成部分。

(4) 信息安全

当前网络与信息的安全受到了严重的威胁,一方面是由于 Internet 的开放性及其安全性不足,另一方面是由于众多的攻击手段,诸如病毒、隐通道、拒绝服务、侦听、欺骗、口令攻击、路由攻击、中继攻击、会话窃听攻击等难以防范。以破坏系统为目标的系统犯罪,以窃取、修改信息、传播非法信息为目标的信息犯罪,对国家的政治、军事、经济、文化都会造成严重的损害。为了保证信息系统的安全,需要完整的安全保障体系,包括保护功能、检测手段以及攻击预警和事故的处理能力。

1.2 计算机网络体系结构

1.2.1 相关概念

1.2.1.1 协议

计算机网络最基本的功能是资源共享、信息交换。为了实现这些功能,网络中各实体之间经常要进行各种通信和对话。这些通信实体的情况千差万别,如果没有统一的约定,其结果一定会乱作一团。因此,网络中各实体要能实现资源共享,交换信息,必须遵循一些事先制定好的规则标准,这就是协议。协议只确定计算机各种规定的外部特点,不对内部实现做任何的规定。一个网络协议主要包含以下三个要素^[3]。

语法(Syntax),即数据与控制信息的结构和格式,包括数据格式、编码及信号电平等。

语义(Semantics),是用于协调和差错处理的控制信息。如需要发出何种控制信息完成何种动作以及做出何种应答等。

时序(Timing),即对有关事件实现顺序的详细说明,如速度匹配、排序等。

1.2.1.2 网络体系结构

网络协议对计算机网络是不可缺少的,一个功能完备的计算机网络需要制定一套复杂的协议。对于复杂的网络协议来说,最好的组织方式是层次结构模型。每一相邻层之间有一个接口,不同层间通过接口向它的上一层提供服务,并把如何实现这一服务的细节对上一层加以屏蔽。人们将网络层次结构模型与各层协议的集合定义为计算机网络体系结构(Network

Architecture)。也就是说，计算机网络的体系结构就是这个计算机网络及其部件所应完成的功能的精确定义。而这些功能是用什么样的硬件与软件去完成的，则是具体的实现问题。体系结构是抽象的，而实现是具体的，是能够运行的一些硬件和软件。

计算机网络中采用层次结构，具有以下优点^[3]。

(1) 各层之间是独立的。某一层并不需要知道它的下一层是如何实现的，而仅仅需要知道该层通过层间的接口所提供的服务。由于每一层实现一种相对独立的功能，因而可将一个难以处理的复杂问题分解为若干个较容易处理的更小一些的问题。这样，整个问题的复杂程度就下降了。

(2) 灵活性好。当任何一层发生变化时，只要层间接口关系保持不变，则在这层以上或以下各层均不受影响。此外，对某一层提供的服务还可以进行修改。当某层提供的服务不再需要时，甚至可以将这层取消。

(3) 易于实现和维护。这种结构使得实现和调试一个庞大而又复杂的系统变得易于处理，因为整个系统已被分解为若干相对独立的子系统。

(4) 促进标准化工作。因为每一层的功能及其所提供的服务都有了精确的说明。

分层时应注意使每一层的功能非常明确。若层数太少，就会使每一层的协议太复杂。但层数太多又会在描述和综合各层功能的系统工程任务时遇到较多的困难。通常每层所要实现的一般功能往往是下面的一种或者多种功能。

(1) 差错控制：使得和网络对端的相应层次的通信更加可靠。

(2) 流量控制：使得发送端的发送速率不要太快，从而接收端来得及接收。

(3) 分段和重装：发送端将要发送的数据块划分为更小的单位，在接收端再进行还原。

(4) 复用和分用：发送端几个高层会话复用一条低层的连接，在接收端再进行分用。

(5) 连接建立和释放：交换数据前先建立一条逻辑连接。数据传送结束后释放此连接。

在 1974 年，IBM 公司提出了世界上第一个网络体系结构（SNA，System Network Architecture）。此后，许多公司纷纷提出各自的网络体系结构。这些网络体系结构共同之处在于它们都采用分层技术，但层次的划分、功能的分配与采用的技术有差异。随着信息技术的发展，各种计算机系统联网和各种计算机网络的互连成为人们迫切需要解决的课题。OSI 参考模型就是在这个背景下提出的。

1.2.2 OSI 参考模型

1.2.2.1 OSI 参考模型的提出

最初各厂商的网络体系结构都互不兼容，为了制定统一的标准以及使通信的各方都能准确、可靠地进行通信，1974 年国际标准化组织（ISO，International Standard Organize）发布了 ISO/IEC 7498 标准。在此标准中给出了开放系统互联参考模型 OSI/RM（Open Systems Interconnection/Reference Model），简称为 OSI 模型，并于 1995 年进行了修订。在 OSI 框架下，进一步详细规定了每一层的功能，以实现开放系统环境中的互联性、互操作性与应用的可移植性。CCITT 的建议书 X.400 也定义了一些相似的内容。

OSI 模型定义了异构网络互连的标准框架，为连接分散的“开放系统”提供了基础。这

里的“开放”表示只要遵守 OSI 标准，任何一个系统就可以与位于世界上任何地方、同样遵循同一个标准的其他任何系统进行通信。“系统”指计算机、外部设备和终端等。

从目前来看，OSI 模型并不是很成功。由于该模型过于追求完美，因而显得臃肿。实际上没有哪家公司的网络产品完全遵从它。尽管如此，OSI 模型的贡献仍然是很巨大的，特别是在模型中明确定义了服务、接口和协议这三个概念，对于实现协议软件工程化是非常重要的。因此，OSI 模型对讨论计算机网络仍然十分有用，是概念上的重要参考模型。

1.2.2.2 OSI 参考模型结构

OSI 模型是一个分层次的网络体系框架，其目的是为了使两个不同的系统能够较容易地进行通信，如图 1-1 所示^[4]。它包括了 7 个相对独立的层次，其中每一层次又都定义了通过网络传送信息的协议。OSI 模型的 7 层由上至下分别是应用层、表示层、会话层、传输层、网络层、数据链路层和物理层。有的将 OSI 模型的 7 层由上至下分别称为第 7、6、5、4、3、2、1 层。其中 1、2、3 层合称底层，第 4 层叫中间层，5、6、7 层合称高层。上面应用层、表示层和会话层都是面向应用程序的，它们负责和用户接口，且与下面的 4 层相对独立。下面 4 层负责处理数据的传输，并不关心接收和发送给应用程序的数据类型。一般而言，下面两层功能通过软件和硬件配合来实现，上面 5 层通过软件来实现。

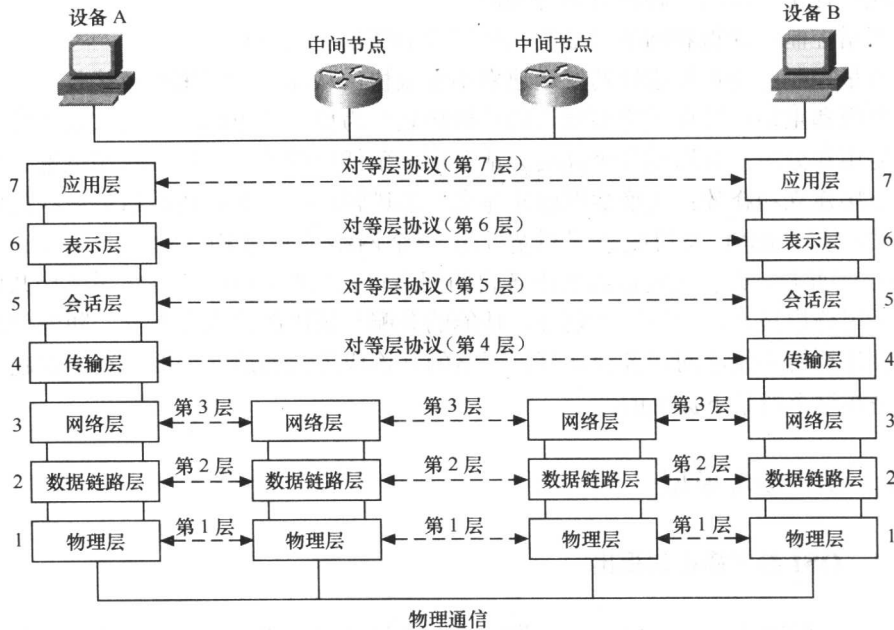


图 1-1 OSI 的层次

物理层 (physical layer) 物理层建立在通信介质基础上，是设备之间的物理接口。它的主要功能是：利用传输介质为数据链路层提供物理连接，负责处理数据传输率并监控数据出错率，以便能实现数据流的透明传输。物理层的数据传输单元是比特 (bit)。数据比特流通过这一接口从一台物理设备传送到另一台物理设备。设计上必须保证一方发出二进制“1”时，另一方收到的也是“1”而不是“0”。

这里典型的问题是用多少伏特电压表示“1”，多少伏特电压表示“0”；一个比特持续多少微秒；传输是否在两个方向上同时进行；最初的连接如何建立和完成通信后连接如何终止；网络接插件有多少针以及各针的用途。设计上主要处理机械的、电气的和过程的接口以及物理层下的物理传输介质等问题。

物理层仅仅接收和传送比特流，并不关心它的意义和结构。

数据链路层 (Data Link Layer) 数据链路层主要任务是加强物理层传输原始比特的功能，使之对网络层显现为一条无差错线路。发送方把输入数据分装在数据帧里，按顺序传送各帧，并处理接收方回送的确认帧，这就要求链路层能产生和识别帧边界。

数据链路层还要解决由于帧的破坏、丢失和重复所出现的问题。数据链路层要解决的另一个问题是防止高速的发送方的数据把低速的接收方“淹没”。因此，需要有某种流量调节机制，使发送方知道当前接收方还有多少缓存空间。通常流量控制和出错处理同时完成。

如果线路能用于双向传输数据，数据链路层软件还必须解决新的麻烦，即从 A 到 B 数据帧的确认帧与从 B 到 A 的数据帧竞争线路的使用权。广播式网络在数据链路层还要处理新的问题，即如何控制对共享信道的访问。

网络层 (network layer) 网络层功能以数据链路层的无差错传输为基础，为网络内任意两设备间的数据交换提供服务。网络层关系到子网的运行控制，其中一个关键问题是确定分组从源端到目的端如何选择路由。如果在子网中同时出现过多的分组，它们将相互阻塞通路，形成瓶颈。此类拥塞控制也属于网络层的范围。

当分组不得不跨越一个网络以到达目的地时，新的问题又会产生。第二个网络的寻址方法可能和第一个网络完全不同；第二个网络可能由于分组太长而无法接收；两个网络使用的协议也可能不同等。网络层必须解决这些问题，以便异构网络能够互联。

传输层 (transport layer) 传输层的主要功能是从会话层接收数据，如果需要就把数据分成较小的信息单元，并确保这些信息正确到达网络层。传输层保证系统之间有秩序、可靠地传输数据。

从某种意义上讲，传输层使会话层不受硬件技术变化的影响。通常，会话层每请求建立一个传输连接，传输层就为其创建一个独立的网络连接。如果传输连接需要较高的信息吞吐量，传输层也可以为之创建多个网络连接，让数据在这些网络连接上分流，以提高吞吐量。另一方面，如果创建或维持一个网络连接不合算，传输可以将几个传输连接复用到一个网络连接上，以降低费用。

会话层 (session layer) 会话层可以看作是网络 and 用户的接口，主要功能是为两个用户之间的对话进行管理。一次连接称为一次对话，提供包括访问验证和会话管理在内的建立和维护应用之间通信的机制。会话层通过提供对话控制来增强传输层的可靠服务。会话层可以控制数据交换的方式，如双工方式或半双工方式等。会话包括在两个端用户间建立和保持一个连接或会话所必需的协议，实现管理对话，会话同步及令牌管理等服务。

表示层 (presentation layer) 表示层主要解决用户信息的语法表示问题。表示层将欲交换的数据从适合于某一用户的抽象语法，变换为适合于 OSI 系统内部使用的传送语法，即对应用层送来的命令和数据加以解释和说明，对正文进行压缩和各种变换，提供格式化的表示和数据转换服务。

另外，表示层还有涉及到安全所需的数据加密、解密，能够显著降低费用并提高单位时