

面向21世纪高等学校计算机学科系列教材

全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会推荐出版

计算机网络实验教程

谢 谦 向国全 郭拯危 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书深入浅出地分析了与网络协议设计、实现有关的一些问题,结合配套的实验环境,把抽象的网络概念具体化,使内部运行机制表面化。通过学习和实践,不仅可以加深对网络原理的了解,还可以树立起良好的协议设计思想和面向对象编程风格。

本书共分7章。第1章介绍了计算机网络设计的入门知识,并结合 OSI/RM 和 TCP/IP 层次结构,抽象出一个五层功能模型。其余部分针对基于该模型、使用面向对象技术开发的网络实验软件进行了介绍。第2章是对程序的总体说明,包括功能设计、使用方法、程序结构、运行流程、类体系等;第3章至第6章结合不同的实验专题,介绍了各层协议设计要点和建议实验目的、内容、要求,并列出了相应源代码。第7章列出了其他一些源代码。附录对程序中的对象类做了全面的描述,可以在阅读程序时速查。

与本书配套的光盘提供基于 DOS 和 Windows 的全部源程序和该书的光盘版。

本书既可作为大学本科计算机网络课程的配套实验教材,也可作为计算机网络课程设计的参考教材,还可作为广大爱好者自学计算机网络原理和协议设计的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络实验教程/谢谦,向国全,郭拯危编著. —北京:电子工业出版社,2000.8

面向 21 世纪高等学校计算机学科系列教材

ISBN 7-5053-6026-4

I. 计… II. ①谢… ②向… ③郭… 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(2000)第 63708 号

丛 书 名: 面向 21 世纪高等学校计算机学科系列教材

书 名: 计算机网络实验教程

编 著 者: 谢 谦 向国全 郭拯危

责任编辑: 刘文杰

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京大中印刷厂

装 订 者: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.75 字数: 507 千字

版 次: 2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6026-4
TP·3179

印 数: 6000 册 定价: 30.00 元(含光盘)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

JS433/08

序 言

这套教材是面向 21 世纪计算机学科系列教材。为什么要组织这套教材? 根据什么组织这套教材? 这些都是在这篇序言中要回答的问题。

计算机学科是一个飞速发展的学科, 尤其是近十年来, 计算机向高度集成化、网络化和多媒体化发展的速度一日千里。但是, 从另一方面来看, 目前高等学校的计算机教育, 特别是教材建设, 远远落后于现实的需要。现在的教材主要是根据《教学计划 1993》的要求组织编写的。这个教学计划, 在制订过程中主要参照了美国 IEEE 和 ACM《教学计划 1991》。

10 年来, 计算机学科已有了长足发展, 这就要求高等学校计算机教育必须跟上形势发展的需要, 在课程设置和教材建设上作出相应调整, 以适应面向 21 世纪计算机教育的要求。这是组织这套教材的初衷。

为了组织好这套教材, 全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会在天津召开了“全国高等学校计算机学科课程与教材建设研讨会”; 在北京召开了“教材编写大纲研讨会”。在这两次会议上, 代表们深入地研讨了全国高校计算机专业教学指导委员会和中国计算机学会教育委员会制订的《计算机学科教学计划 2000》和美国 IEEE 和 ACM《计算机学科教学计划 2001》。这是这套教材参照的主要依据。

IEEE 和 ACM《计算机学科教学计划 2001》是在总结了从《计算机学科教学计划 1991》到现在, 计算机学科十年来发展的主要成果的基础上诞生的。它认为面向 21 世纪计算机学科应包括 14 个主科目, 其中 12 个主科目为核心主科。它们是: 算法与分析(AL)、体系结构(AR)、离散结构(DS)、计算科学(CN)、图形学、可视化、多媒体(GR)、网络计算(NC)、人机交互(HC)、信息管理(IM)、智能系统(IS)、操作系统(OS)、程序设计基础(PF)、程序设计语言(PL)、软件工程(SE)、社会、道德、法律和专业问题(SP)。其中除 CN 和 GR 为非核心主科目外, 其他 12 项均为核心主科目。

将 2001 教学计划与 1991 教学计划比较可看出:

在 91 计划中, 离散结构只作为数学基础提出, 而在 2001 计划中, 则作为核心主科目提出, 显然, 提高了它在计算机学科中的地位;

在 91 计划中, 未提及网络计算, 而在 2001 计划中, 则作为核心主科目提出, 以适应网络技术飞速发展的需求;

图形学、可视化与多媒体也是为适应发展要求新增加的内容。

除此之外, 2001 计划在下述 5 个方面作了调整:

程序设计语言引论调整为程序设计基础; 将人一机通信调整为人机交互; 将人工智能与机器人学调整为智能系统; 将数据库与信息检索调整为信息管理; 将数值与符号计算调整为计算科学。

显然, 这些变化使 2001 计划更具有科学性, 也更好地适应了学科发展的需要。

在组织这套教材的过程中, 充分考虑了这些变化和调整, 在软件和硬件的课程体系、界面划分均做了相应的调整, 使整套教材更具有科学性和实用性。

另外, 还要说明一点, 教材建设既要满足必修课的要求, 又要满足限选课和任选课的要求。

因此,教材应按系列组织,反映整个计算机学科的要求,采用大拼盘结构,以适应各校不同的具体教学计划的要求,各校可根据自己的需求进行选拼使用。

这套教材包括:《微机应用基础》、《离散数学》、《电路与电子技术》、《电路与电子技术习题与实验指南》、《数字逻辑与数字系统》、《计算机组成原理》、《微机接口技术》、《计算机体系结构》、《计算机网络》、《计算机网络实验教程》、《通信原理》、《计算机网络管理》、《网络信息系统集成》、《多媒体技术》、《计算机图形学》、《计算机维护技术》、《数据结构》、《计算机算法设计与分析》、《计算机数值分析》、《汇编语言程序设计》、《PASCAL 语言程序设计》、《VB 程序设计》、《C 语言程序设计》、《C++ 语言程序设计》、《JAVA 语言程序设计》、《操作系统原理》、《UNIX 操作系统原理与应用》、《LINUX 操作系统》、《软件工程》、《数据库系统原理》、《编译原理》、《编译方法》、《人工智能》、《计算机信息安全》、《计算机图形学》、《人机交互》、《计算机伦理学》等。对于《IEEE 和 ACM 教学计划 2001》中提出的 14 个主科目这套系列教材均涵盖,能够满足不同层次院校、不同教学计划的要求。

这套系列教材由全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会主任李大友教授精心策划和组织。编者均为具有丰富教学实践经验的专家和教授。所编教材体系结构严谨、层次清晰、概念准确、论理充分、理论联系实际、深入浅出、通俗易懂。

教材组织过程中,得到了哈尔滨工业大学蒋宗礼教授,西安交通大学董渭清副教授、武汉大学张焕国教授、吉林大学张长海教授、福州大学王晓东教授、太原理工大学余雪丽教授等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

李大友
2000.6

前 言

本科教学计划应使学生具有把他们的知识用到某一特定的、有一定约束条件的问题中去并产生求解方案的能力。这种能力包括:清楚地定义问题、确定它的易解性;评价和选择一个适当的解题策略;研究、确定、设计、实现、修改求解议案并生成文档;评估替代的求解并对设计作边缘分析;把替代技术用于求解方案;向其他领域的同事、专业人员介绍求解方案,包括在整个问题求解过程中协作共事的能力。

——摘自《计算机学科教学计划 1993》本科教学计划目标

近十年来,信息产业得到飞速发展,计算机网络技术的进步和普及尤为引人注目。据有关资料介绍,Internet 的上网机器已超过 5000 万台,一些发达国家上网家庭已超过总数的 80%,中国的各行各业也在迅速网络化。

当越来越多的中国人,包括中国农民,已经开始在网上获得商业行情,出售他们产品的时候,迅速培养高素质的拥有知识创新能力的网络设计人才和高级网络管理人才,应是高等学校计算机网络教学的目标。为了追求这个目标,经过几年的网络教学改革探索,我们开发出一套学生可以“做”、“读”和“写”的可自行扩展的模拟网络实验环境:

- “做”:是指按照各个专题所列的内容做实验,包括对网络环境的观察、操作、记录和对实验结果进行分析。使抽象的网络原理变成可以“看得见”、“摸得着”,可以交互的环境,让学生顺利通过网络理论课程的学习。

- “读”:是指阅读源程序,理解网络软件运行的机制。

- “写”:是指在理解现有程序的基础上,进行一些改写和改进,完善系统的功能。本书建有自己的网站,收集全国学生的优秀习作进行交流。我们的站点设在河南大学,通过 www.henu.edu.cn 访问,希望全国的计算机网络课老师和青年学生关心和支持这个网站,使它成为未来计算机网络设计师成长的摇篮。

计算机网络是一个非常复杂的系统,通常用 OSI、TCP/IP 等模型对实系统进行抽象。我们在上述分层模型的基础上设计了模拟网络环境,通过不同的实验环节,学生可以加深对网络模型和所依据的理论的理解,并可以对特定的协议设计和实现进行实验、分析,与具体的计算机网络对照比较。优秀的学生还可以分析、评价模拟网络环境的局限性和特点,为构造自己的网络模型,设计、实现协议作准备。

计算机网络系统的设计作为一个工程学问题,要求开发出能够求解给定问题的系统和设备。设计的要素包括:

- 需求说明;
- 规格说明;
- 设计和实现方法;
- 测试和分析。

计算机网络的专业人员在进行设计时,对网络系统的感知和认识受现实世界的制约。学

生可以通过做实验、读程序和研究我们设计的网络模型来学习设计,进一步编写新的网络协议,改进和完善现有网络模拟系统,为将来开发新的计算机网络系统积累直接的经验。

若本书的读者能自觉地完成“做”、“读”、“写”三个环节,认真体会计算机网络系统的“抽象过程”和“设计过程”,也许在新的世纪,“中国造”的计算机网络系统将从这些青年人手中诞生。这就是设计者积多年计算机网络教学和科研实践经验,在一个简单易行的条件下开发出一个计算机网络模拟环境,并和盘托出的初衷和目的。

本教程的第1章是计算机网络设计基础,可作为初学者网络设计的入门,对于熟悉 OSI 和 TCP/IP 模型的读者也可跳过这一章直接进入第2章。第2章是对实验软件的总体说明,第3~6章分别是物理层、数据链路层、网络层、运输层和高层实验,第7章列出了一些相关源程序。所附的软盘包括了所有源程序,不仅可供大学生学习计算机网络原理时配套使用,也可作为有志于计算机网络事业的青少年朋友开发自己的第一个网络协议的平台。

《计算机网络实验教程》是河南大学出版基金资助项目,是河南大学计算机学院计算机网络课程组的教学和科研成果,得到了计算机学院领导的大力支持。94、95、96级三届本科学生参与了三个程序版本的开发,软件应用于学生学习网络课程的配套实验,产生了良好的教学效果,极大地提高了学生对计算机网络的抽象和设计能力,因此我们决定将其整理出来正式出版,供更多的青年朋友学习网络协议设计之用。

北京工业大学的李大友教授审看了本书的初稿,对内容的完善提出了重要的指导意见。

感谢对我们的工作予以充分支持的申石磊、陈志国、阎焕宝、刘东平等老师,也感谢所有参加过网络模拟环境开发的学生,特别是张龙飞和刘扬同学,他们为 Windows 版本的开发作了大量工作。

由于作者的水平有限,书中难免存在着错误和不当之处,希望广大读者批评指正。

编著者
2000年2月

目 录

第 1 章 计算机网络设计基础	(1)
1.1 计算机网络的产生与发展	(1)
1.1.1 通信与计算机的结合	(1)
1.1.2 分组交换网试验成功	(1)
1.1.3 计算机网络系统结构的形成	(2)
1.1.4 Internet 成为世界上最大的网络	(2)
1.1.5 计算机网络在我国的发展	(2)
1.2 计算机网络的定义和组成	(3)
1.3 网络协议设计	(3)
1.3.1 协议分层	(3)
1.3.2 各层的设计问题	(6)
1.3.3 接口和服务	(7)
1.3.4 面向连接的服务和无连接的服务	(8)
1.3.5 服务原语	(10)
1.3.6 服务与协议的关系	(11)
1.4 OSI 参考模型	(12)
1.4.1 OSI 参考模型	(12)
1.4.2 物理层	(13)
1.4.3 数据链路层	(14)
1.4.4 网络层	(22)
1.4.5 运输层	(23)
1.4.6 会话层	(27)
1.4.7 表示层	(28)
1.4.8 应用层	(28)
1.4.9 OSI 模型的数据传输	(29)
1.5 局域网参考模型	(30)
1.6 TCP/IP 参考模型	(31)
1.6.1 ARPANET 的设计目标	(31)
1.6.2 TCP/IP 参考模型	(32)
1.6.3 主机至网络层(Host to network)	(32)
1.6.4 互连网层(internet layer)	(33)
1.6.5 运输层(transport layer)	(41)
1.6.6 Socket 机制和客户服务器模型	(46)
1.6.7 TCP/IP 应用层	(53)

1.7 OSI 参考模型和 TCP 参考模型的比较	(58)
1.7.1 两种模型的对比	(58)
1.7.2 OSI 模型协议的缺点	(59)
1.7.3 TCP/IP 参考模型的缺点	(61)
1.8 OSILite 的分层模型	(62)
1.8.1 OSILite 五层模型	(62)
1.8.2 OSILite 五层模型的服务、协议和服务访问点	(63)
1.8.3 OSILite 的运行机制	(65)
1.9 本章小结	(71)
习题一	(71)
第 2 章 实验软件总体说明	(73)
2.1 实验设置目标及基本情况	(73)
2.1.1 设置目标	(73)
2.1.2 基本情况	(74)
2.1.3 实验内容及总体要求	(74)
2.2 实验环境配置说明	(75)
2.2.1 软件安装	(75)
2.2.2 网络连接和配置	(76)
2.3 实验软件介绍	(78)
2.3.1 执行环境构成	(78)
2.3.2 软件开发说明	(79)
2.3.3 进一步开发的一些建议	(79)
2.3.4 软件操作说明	(80)
2.4 实验软件功能及设计思想	(81)
2.4.1 软件功能设计	(81)
2.4.2 总体结构设计	(81)
2.5 总体运行流程	(82)
2.5.1 基于循环查询的运行过程	(82)
2.5.2 执行流程示意	(83)
2.6 类体系说明	(83)
习题二	(85)
第 3 章 物理层实验	(86)
3.1 实验说明	(86)
3.2 物理层相关知识	(87)
3.2.1 串行通信简介	(87)
3.2.2 中断编程简介	(90)
3.2.3 Windows 下的串行通信机制	(91)
3.2.4 空 MODEM 连线	(92)
3.3 物理层相关源程序	(92)
3.3.1 相关程序介绍	(92)

3.3.2 部分直接相关源程序清单	(93)
习题三	(105)
第4章 数据链路层实验	(107)
4.1 实验说明	(107)
4.2 数据链路层要点	(109)
4.2.1 协议数据单元(PDU)格式	(109)
4.2.2 协议时序说明	(110)
4.3 数据链路层相关源程序	(111)
4.3.1 相关程序介绍	(111)
4.3.2 部分直接相关源程序清单	(111)
习题四	(130)
第5章 网络层、运输层实验	(131)
5.1 实验说明	(131)
5.2 网络层要点	(132)
5.2.1 协议数据单元(PDU)格式	(132)
5.2.2 寻址和路由	(133)
5.2.3 设计中的其他问题	(133)
5.3 运输层要点	(134)
5.3.1 协议数据单元(PDU)格式	(134)
5.3.2 连接表及其状态变迁	(135)
5.4 网络层相关源程序	(136)
5.4.1 相关程序介绍	(136)
5.4.2 部分直接相关源程序清单	(137)
5.5 运输层相关源程序	(151)
5.5.1 相关程序介绍	(151)
5.5.2 部分直接相关源程序清单	(151)
习题五	(168)
第6章 高层实验	(169)
6.1 实验说明	(169)
6.2 会话层、表示层要点	(170)
6.3 应用层设计要点	(171)
6.3.1 应用层功能设计:FTP	(171)
6.3.2 协议机制	(172)
6.3.3 状态变迁	(173)
6.3.4 主机名解析和 FTP 用户管理	(174)
6.4 会话层、表示层相关源程序	(175)
6.4.1 相关程序介绍	(175)
6.4.2 部分直接相关源程序清单	(176)
6.5 应用层相关源程序	(179)
6.5.1 相关程序介绍	(179)

6.5.2 部分直接相关源程序清单	(180)
习题六	(211)
第7章 其他相关源程序	(212)
7.1 相关源程序说明	(212)
7.2 源程序清单	(212)
7.2.1 网络对象公共基础类	(212)
7.2.2 基本数据结构类	(220)
7.2.3 程序界面相关类	(238)
习题七	(272)
附录	(273)
A. 类说明	(273)
A.1 基础、数据结构类	(273)
A.2 网络对象类	(279)
A.3 TVision 派生类	(290)
A.4 其他对象类	(294)
B. TVision 简介	(297)
B.1 理解 TVision	(297)
B.2 基本的 TVision 应用程序	(298)
B.3 本程序中的 TVision 派生类	(302)
C. 源文件列表	(302)
C.1 DOS 版本文件列表	(303)
C.2 Windows 版本文件列表	(304)
参考文献	(306)

第 1 章 计算机网络设计基础

本章主要内容:

- 计算机网络的产生与发展
- 网络协议设计
- OSI 参考模型
- 局域网参考模型
- TCP/IP 参考模型
- OSI 参考模型和 TCP 参考模型的比较
- OSILite 的分层模型

1.1 计算机网络的产生与发展

1.1.1 通信与计算机的结合

计算机网络涉及通信和计算机两个领域。计算机与通信技术的飞速发展和日益紧密结合对人类社会的进步做出了极大的贡献。

计算机与通信的结合主要有两个方面: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,而计算机技术提供对信息的处理和存储功能,又提高了通信网络的各种性能。由于早期的计算机数量极少而且价格昂贵,用户需要到机房去使用计算机。1954 年,一种收发器(transceiver)终端被开发出来,人们使用这种终端,首次实现了将穿孔卡片上的数据从电话线上发送到远地计算机。随后,电传打字机也作为远程终端与计算机相连,用户可以在远地的电传打字机上键入自己的程序,而计算机算出的结果又可传送回远地的电传打字机打印出来。计算机与通信的结合就这样开始了。

为了与远程终端相连,人们为计算机设计了串行通信接口。如果需要通过电话线传送到更远的距离,在串行接口与电话线之间要加入一个叫调制解调器(MODEM)的设备。MODEM 将来自计算机的数字信号转换成能在电话线上传输的模拟信号(这叫调制),在接收端,从电话线传来的经过调制的模拟信号,要经过 MODEM 还原为数字信号(即解调)才能送往计算机。这种多台远程终端利用 MODEM 通过公用电话网与中央计算机相连的网络称为第一代计算机网络。

1.1.2 分组交换网试验成功

已有一百多年历史的传统电话交换机至今仍采用线路交换方式。即用户在通话之前,先要拨号呼叫申请建立一条从发端到收端的物理通路,双方才能互相通话。这种需要用户独占一定的传输带宽的方式用于计算机间的通信是不适合的,因为计算机的数据是突发式地和间歇性

地出现在传输线上的。比如远方用户向某一计算机提出请求后(如查询信息),该计算机处理该查询时,此时传输线路是空闲的,若该用户独占线路,就会造成资源浪费。另外,电话线路呼叫时间长达 10 秒~20 秒,这对于较短计算机信息的传输显得太长;同时,通过网络互连的计算机的速度相差很大,很难同步进行数据传输。由此可见,必须寻求新的适合于计算机通信的交换技术,这种技术称为分组交换。

1969 年 12 月,美国的分组交换网 ARPANET(当时仅 4 个结点)投入运行,计算机网络的发展进入一个崭新的纪元。

分组交换有如下特点:若干台计算机(习惯上称为主机,HOST)通过通信子网(communication subnet,简称子网)互连。当其中的主机 1 向主机 2 发送数据时,主机 1 先把数据划分为有限长的分组(例如 1000 比特),再把这些分组交给通信子网。通信子网由结点机(简称结点)和通信线路组成。当两个结点之间存在一个或多个其他结点,分组需要由中间的结点把它从一个结点发往另一个结点时,分组会完整地由每个中间结点接收并存放起来。当需要的输出线路空闲时,该分组就被转发出去。使用这种原理的子网被称作点到点(point-to-point)、存储—转发(store-and-forward)或分组交换(packet-switched)子网。几乎所有的广域网都使用存储转发子网。

1.1.3 计算机网络系统结构的形成

计算机网络是非常复杂的系统,相互通信的两台计算机必须高度协调才能工作。为了设计这样复杂的系统,又能使各种计算机在世界范围内互连成网,国际标准化组织 ISO 于 1977 年成立专门机构研究该问题,不久,他们提出了著名的开放系统互连参考模型 OSI/RM(Open System Interconnection Reference Model),简称 OSI。这是一个分为七层的网络体系结构,详细讨论参见 1.4 节。从这以后,开始了所谓的第三代计算机网络。

分层可将庞大而复杂的问题,转化为若干较小的局部问题。早在最初的 ARPANET 设计时,即提出了分层的方法。分层可以减少协议设计的复杂性。请同学们注意学习这种按层(Layer)或级(Level)的方式组织网络设计的方法。这是本书讨论的重点。

1.1.4 Internet 成为世界上最大的网络

Internet 是由 ARPANET 发展起来的目前最大的计算机网络。Internet 的本意是互连网,有人将其译为国际互连网,我国现使用音译为因特网。Internet 采用 ARPANET 的体系结构,通常称为 TCP/IP 协议族或简称为 TCP/IP。TCP/IP 是一个四层的网络体系结构,虽然与 OSI 体系结构不同,但也属于分层体系结构,所以仍属于第三代计算机网络。关于 TCP/IP 参考模型的详细讨论,请参见 1.6 节。

1.1.5 计算机网络在我国的发展

我国的计算机网络起步于 80 年代。1980 年,铁道部开始建设广域网,随后,公安部和军队组建了各自的专用网。1989 年 11 月,我国第一个公用分组交换 CNPAC 建成运行。由于数字业务的迅速发展,邮电部于 1993 年建成了新的公用分组交换 CHINAPAC。CHINAPAC 由国

家主干网和各省、区、市的省内网组成,全国范围的网络总容量超过 10000 个端口,覆盖范围超过 200 个城市和地区。

扩大后的分组交换网采用分级的网络拓扑结构。对于最重要的 8 个大城市(北京、上海、广州、南京、武汉、成都、西安和沈阳)的结点采用全连通的网络结构,构成了全网主干。其他的省会就近接入两个大区结点;各省可再设较低一级的结点。

1996 年 6 月,邮电部投巨资建成了中国公用计算机互连网 CHINANET,在全国范围提供远程高速 Internet 业务。从此,我国的计算机互连网进入了高速发展时期。1997 年,中国只有 64 万人上网,1999 年 6 月已超过 400 万。国际数据公司预计,到 2001 年,中国上网人数将达 2700 万,可能会超过日本的网民。

在中国公用计算机互连网这块待开发的土地上,蕴藏着巨大的商机。目前,只在干线网上采用了外国的通信产品。高速发展的网络市场,为民族工业留下了巨大的发展空间,同时也急需大量的高级网络设计人才。本书是一本网络设计的入门教材,帮助立志在网络事业中成才的年轻朋友早日起帆。

1.2 计算机网络的定义和组成

计算机网络这一术语指自主计算机(autonomous computers)的互连(interconnected)集合。两台计算机如能交换信息即称为互连,物理上的连接可通过同轴电缆、双绞线、光纤、微波和通信卫星等实现。自主计算机这一概念是指计算机网络中不存在主从关系,也就是一台计算机不可强制地启动、停止或控制另一台计算机。

计算机网络由三部分组成:

- (1) 若干台主机向各用户提供服务。
- (2) 一个通信子网由一些专用于通信的计算机(称为路由器或结点交换机)和通信线路组成。
- (3) 一系列协议,这些协议是为在主机与主机之间、主机与子网之间或子网中各路由器之间的通信而用。协议是通信双方事先约定的和必须遵守的规则,后面我们将详细讨论网络协议设计中的一些技术问题。

1.3 网络协议设计

计算机网络协议通常由软件实现,但在分层协议的较低层次常常以硬件或固件的方式实现,如以太网卡就实现了非常复杂的 CSMA/CD(载波监听多路访问/冲突检测)协议算法。为讨论方便,我们把网络协议的实现统称为网络软件。本书第 2 章至第 7 章详细介绍了一个设计的实例。

1.3.1 协议分层

为了减少协议设计的复杂性,大多数网络都按层(layer)和级(level)的方式来组织,每一层都建立在下层之上。不同的网络模型,其层的数量、各层的名字、内容和功能不尽相同。然而,在所有的网络模型中,每一层的目的都是向它的上一层提供一定的服务,而把如何实现这

一服务的细节对上一层加以屏蔽。

一台机器上的第 n 层与另一台机器上的第 n 层进行对话,通话的规则就是第 n 层协议(protocol)。协议基本上是通信双方关于如何进行通信达成的共识。

图 1.1 说明了一个 5 层的协议。不同机器内所包含的对应层实体叫对等进程(peer)。换言之,正是对等进程利用协议进行通信。实体(entity)既可以是软件实体(如一个进程),也可以是硬件实体(如智能输入/输出芯片),详见 1.3.3 节。

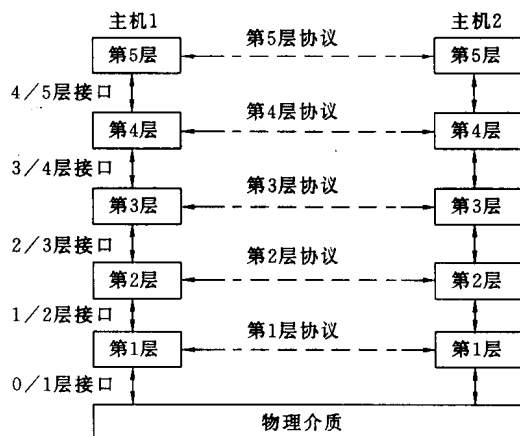


图 1.1 层、协议和接口

实际上,数据不是从一台机器的第 n 层直接传送到另一台机器的第 n 层,而是每一层都把数据和控制信息交给它的下一层,直到最下层。第 1 层下面是物理介质(physical medium),通过它进行实际的通信。在图 1.1 中,点线表示虚拟通信,实线表示物理通信。

每一对相邻层之间都有一个接口,接口定义下层向上层提供的原语操作和服务。当网络设计者在决定一个网络应包括多少层、每一层应当做什么的时候,其中一个很重要的考虑就是要在相邻层之间定义一个清晰的接口。为达到这些目的,又要求每一层能完成一组特定的有明确含义的功能。除了尽可能地减少必须在相邻层之间传递的信息的数量外,一个清晰的接口可以使同一层能轻易地用一种实现来替换一种完全不同的实现(如用卫星信道来代替所有的电话线),只要新的实现能向上层提供旧的实现所提供的同一组服务就可以了。

为便于理解协议分层,参照图 1.2,看一名河南大学学生李明(河南大学位于河南省开封市)和他在郑州市的朋友钟兴通信的过程:

发送方:

第 4 层:李明使用中文给朋友写信。

第 3 层:李明按中国邮政规定写信封,否则邮局不可能送达。

为了让邮局替他写信寄到目的地,李明必须到邮局提供的信箱交信(当然,应贴足邮票)。请注意:邮局提供的“信箱”是一个第 2 层向第 3 层提供服务的“接口”。

以下是邮局寄信的过程,通信双方既看不见,也不必了解过程。

第 2 层:邮局决定这封信经铁路送往郑州(路由选择);于是,这封信装入标有目的地郑州的邮包,并运到开封车站邮件转运站。

开封车站“邮件转运站”又是一个明显的接口例子,是 1/2 层的接口。

第 1 层:装车,将标有目的地郑州的邮包,装入不属邮政部门的火车车箱(传输媒体),送往

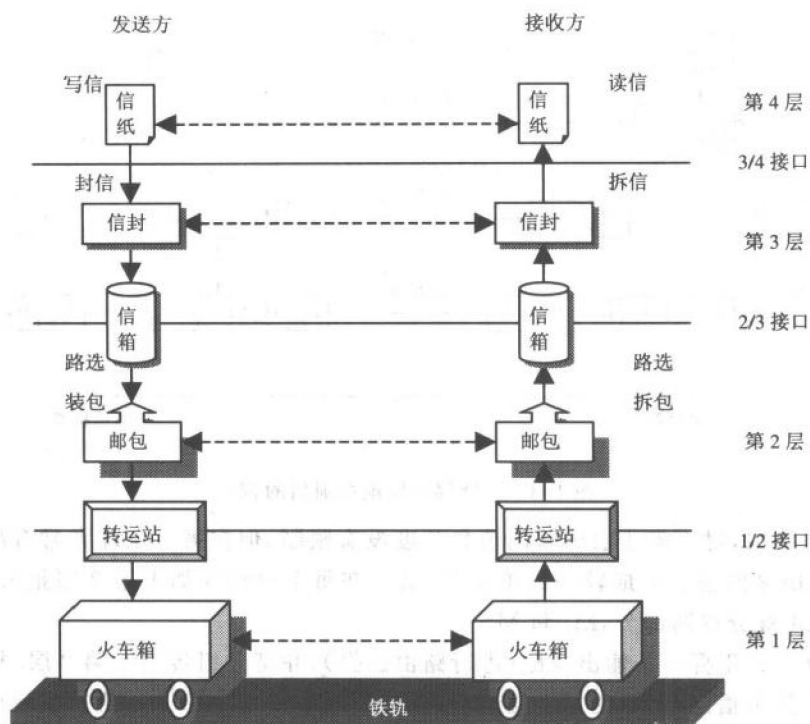


图 1.2 李明与钟兴之间的“虚通信”

郑州。

接收方：

第 1 层：卸车，从火车车箱中取出标有目的地郑州的邮包，然后送邮件转运站（1/2 层接口）。

第 2 层：郑州邮局从接口“邮件转运站”中取出邮包，打开邮包，取李明写给钟兴的信（经路由选择），核实已到目的地，邮递员将信送钟兴的信箱（2/3 层接口）。

第 3 层：钟兴从信箱中取信。

第 4 层：钟兴拆开信封，读信。

从图中可看出，李明和钟兴是一对“对等通信实体”，他们之间的虚通信是靠以下各层提供的服务来完成的。至于下层如何完成信息的传输（通过火车、汽车或飞机）他们并不关心。

层和协议的集合被称为网络体系结构（network architecture）。体系结构的描述必须包含足够的信息，使实现者可以用来为每一层编写程序和设计硬件，并使之符合有关协议。协议实现的细节和接口的描述都不是体系结构的内容，因为它们都隐藏在机器内部，对外部来说是不可见的。只要机器能正确地使用全部协议，网络上所有机器的接口不必完全相同。某一系统所使用的协议的分层列表，被称为协议栈（protocol stack）。网络体系结构、协议栈、协议及设计和实现是本书的主题。

现在来考虑如何向图 1.1 中 5 层网络的顶层提供通信。第 5 层运行的某应用程序进程产生了信息 M，并交给第 4 层进行传输。第 4 层在信息的前面加上一个报头（header）以识别该信息（如按规定填写的信封），并把结果通过接口传递给第 3 层。报头包括控制信息，例如序号，以使目标机器上的第 4 层能在下层未保持信息顺序时能按正确的顺序递交。在某些层里，报头还

包括长度、时间、地址和其他控制字段,如图 1.3 所示。

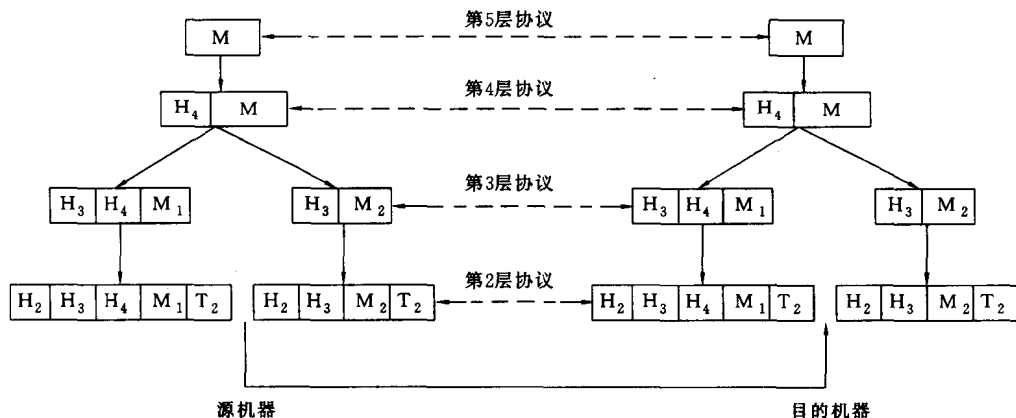


图 1.3 支持第 5 层虚拟通信的例子

在许多网络中,对于第 4 层传输的消息长度没有限制,但在第 3 层却常常有限制,因此,第 3 层必须把上层来的消息分成较小的单元(分组),在每个分组前加上第 3 层报头,在图 1.3 的这个例子中,M 被分成两部分, M_1 和 M_2 。

第 3 层决定使用哪一条输出线路(进行路由选择),并把分组传递给第 2 层。第 2 层不仅给每段信息加上报头信息,而且还加上尾部信息,然后把结果交给第 1 层进行实际传送。在接收方,报文每向上传递 1 层,该层的报头就被剥掉(如拆开邮包取出信)。决不会出现把带有第 n 层以下的报头的报文交给 n 层(如绝不会把邮包交给钟兴)的情况。

理解图 1.1 和图 1.3 的关键是要理解虚拟通信和实际通信之间的关系,以及协议和接口之间的区别。例如,第 5 层中的对等进程,概念上认为它们的通信是水平方向地使用第 5 层协议。每一方都好像有一个叫做“发送到另一方去”和“从另一方接收”的过程调用。尽管这些调用实际上是跨过第 5 层与第 4 层间的接口与下层通信,而不是直接与另一方通信。

抽象出对等进程这一概念,对网络设计是至关重要的。有了这种技术,就可以把设计完整的网络这种难以处理的问题划分为 n 个小的、易于处理的问题,即各层的设计。

1.3.2 各层的设计问题

计算机网络的某些关键问题在几层的设计中都会出现。下面,我们将简要介绍其中一些比较重要的问题。

(1) 寻址:每一层都需要识别发送方和接收方的机制。因为网络中通常有很多计算机,其中一些有多个进程。一台机器上的进程必须有某种手段来指定想和谁通信,因为有多可能的目标,所以需要有某种寻址手段来指明特定的目标。

(2) 差错控制:物理通信电路并非完美无缺,所以差错控制是另一个重要的问题。已有的检错和纠错代码有多种,连接的双方必须一致同意使用哪一种。另外,接收方还应该通知发送方哪些报文已经被正确地收到了,哪些还没有收到。

(3) 流量控制:如何避免出现高速发送方发送数据过快,使低速接收方难以应付的局面,这问题在各层都存在。人们提出了各种方案,一些方案要求接收方向发送方直接或间接地反馈接收方的当前状态(即由收方控制发送方发送数据的速度),另一些方案是限制发送方以商定

的速率发送。

(4) 路由选择:当源端和目标端有多条通路时,必须进行路由选择。有时,路由选择需要由两层或多层来决定。比如,从北京向深圳送信,上层根据自己的原则,决定途径郑州(走京广)还是商丘(走京九);下层则根据当前的通信状况,在多条可供选择的线路中选择一条。

(5) 按顺序接收:并不是所有的信道都能保持报文发送的先后顺序(如邮政中的平信可不按发送的先后顺序到达)。为了解决可能出现的顺序错误,协议必须明确地保证接收方能够把各报文按原来的顺序重新组合在一起。一个易于想到的方法是对这些信息编号。不过,这仍未解决收到顺序错误报文时应该怎么做的问题。

(6) 数据单元的分割和重组:另一个必须在好几层中解决的问题是,所有的进程都应该能接收任意长的报文。这一特性要求我们能将报文分割、传输和重新组装,因为在通信子网中,为了提高效率和降低费用,通常按等长的分组进行传输,应用进程的长报文只好进行分割后传输,到目的主机,分割传输的分组需要进行重组还原,才能上交对应的应用进程。

(7) 单工通信与双工通信:一组设计决策与数据传送的规则有关,在某些系统中,数据仅在一个方向上传输,即单工通信(simplex communication);在另一些系统中,数据能在任意一个方向上传输,但不是同时传输,即半双工通信(half-duplex communication);还有一些系统,数据能同时双向传输,即全双工通信(full-duplex communication)。协议还需确定每条连接对应多少条逻辑通道,它们的优先级别如何。在很多网络中,每个连接至少提供两条逻辑通道,一条给正常数据,另一条留给紧急数据。

(8) 多路复用(multiplexing)和解多路复用(demultiplexing):当每一对通信进程建立一个独立的连接不方便或不合算时,可以利用下一层的同一连接为多个无关的对话服务。只要这种多路复用和解多路复用是透明的,任意一层都可以采用这种方法。比如,物理层需要多路复用,物理层上所有连接的通信量就可能在有限的几条物理线路上传送。同样,当进程要传送的数据单元太小时,发送的效率太低。解决方案是把几个传向同一目标的短报文收集成一个长报文,然后在接收方再分解为原报文。这种现象在互连的异构网中传输数据时最容易发生。

1.3.3 接口和服务

每一层的功能是为它的上层提供服务,本节我们将深入考察什么是服务。下面给出几个术语。

(1) 实体(entity):每一层中的活动元素通常被称为实体。实体既可以是软件实体(如一个进程),也可以是硬件实体(如智能输入/输出芯片)。不同机器上同一层的实体叫做对等实体(peer entity)。n层实体实现的服务为n+1层所利用,在这种情况下,n层被称为服务提供者(service provider),n+1层为服务用户(service user)。n层利用n-1层的服务来提供它自己的服务。它可能提供几类服务,如快速昂贵的通信或慢速低廉的通信。

(2) 服务访问点 SAP(service access point):服务是在服务访问点 SAP 提供给上层使用的,n层 SAP 是n+1层可以访问n层服务的地方。每个 SAP 有一个唯一的标识标明它的地址,电话系统中的 SAP 地址是每部电话机的电话号码。要想和他人通信,必须知道他的(电话机)SAP 地址(电话号码);同样,在邮政系统中,SAP 地址是街名和信箱号,发一封信必须知道收信人的 SAP 地址。在我们的实验系统中,物理层的 SAP 地址是每台机器的异步口地址,网络层 SAP 地址是我们给某台机器分配的网络地址。