

网络工程专业职教师资
培养系列教材

计算机网络 原理与实验

叶阿勇 主编



科学出版社

网络工程专业职教师资培养系列教材

计算机网络原理与实验

叶阿勇 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括计算机网络原理知识和网络仿真实验两部分。理论篇包括计算机网络概述、数据通信基础、直连网络、互联网络、端到端传输、网络应用协议等知识内容。实践篇包括数据链路层实验、网络层实验、运输层实验和应用层实验等内容。本书的编写采用自顶向下的问题分析方法来阐述计算机网络的工作原理与设计思想,即采用“提出总问题(设计目标)—子问题的分解与解决—具体实现”的三层架构来组织知识内容,这种分层分析的方法有助于对复杂系统的理解。另外,本书还采用了实验引领的机制,通过仿真模拟实验来引导学生实现“从具体到抽象”的学习过程。

本书可以作为高等院校计算机相关专业的计算机网络教材,也可以作为信息技术从业人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

计算机网络原理与实验/叶阿勇主编. —北京:科学出版社,2016.8
网络工程专业职教师资培养系列教材
ISBN 978-7-03-049737-6

I. ①计… II. ①叶… III. ①计算机网络—师资培养—教材 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 200304 号

责任编辑:邹 杰 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:15

字数:377 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

为加快建设现代职业教育体系、全面提高技能型人才培养质量，教育部和财政部在“职业院校教师素质提高计划”框架内专门设置了培养资源开发项目，系统开发用于职教师资本科培养专业的培养标准、培养方案、核心课程和特色教材等资源。本书是在该计划中网络工程专业开发项目（项目编号：VTNE035）的指导和资助下完成。

“计算机网络”是信息技术相关专业的重要基础课程之一。通过该课程的学习，学生不仅可以掌握计算机网络系统的基本知识、原理技术和主要协议标准，为后续的相关课程学习奠定基础；而且还可以窥探和理解计算机网络系统的设计方法和思想。这有助于提高分析与设计大规模分布式信息系统问题的能力。

长期以来，“计算机网络”一直是大家公认的困难课程之一。一方面，计算机网络本身就是一个复杂系统，计算机网络已发展成遍布全球各地的因特网，网络规模与主机数量都非常庞大。而且计算机网络的上层应用技术与底层组网技术各自蓬勃发展，这对系统的可扩展性和可靠性都提出了很高的要求。另一方面，计算机网络涉及的技术往往都封装在系统底层，无法直接观察与理解。针对上述问题，本书采用了自顶向下的问题分析方法来阐述计算机网络的工作原理与设计思想，即采用“提出总问题（设计目标）—子问题的分解与解决—具体实现”的三层架构来组织知识内容，这种分层分析方法有助于对复杂系统的理解。另外，本书还采用了实验引领的机制，通过模拟实验来引导学生实现“从特殊到一般，从具体到抽象”的学习过程。我们采用 Packet tracer 网络模拟系统设计了各层协议的验证实验，通过直观观察协议的工作过程和数据封装方法，加深对网络系统的理解程度。实验内容覆盖数据链路层、网络层、传输层和应用层等层的主要协议。

参与本书编写的人员主要是福建师范大学数学与计算机科学学院从事计算机网络教学、科研和实验教学的相关老师，包括叶阿勇、张桢萍、赖会霞、许力、郑永星、陈秋玲。本书第 1、3、4、8 章由叶阿勇编写，第 2、5、6、9、10 章由张桢萍编写，第 7 章由赖会霞编写；全书最后由叶阿勇统稿，许力教授负责全书的审稿。本书在写作过程中，得到了郭功德教授的多方帮助和指导，并提出许多宝贵的修改意见。

本书可以作为网络工程专业的计算机网络本科教材，也可以作为信息技术研发人员的参考资料。在教学过程中，可根据教学时间适当介绍一些最新的技术、当前研究热点问题等；也可以引导学生利用网络资源采取自学的方式去搜集、学习一些相关的知识。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者和同行批评指正。作者的电子邮箱：yay@fjnu.edu.cn。

作 者

2016 年 4 月于福建师范大学长安山

目 录

前言

理 论 篇

第 1 章 计算机网络概述	3
1.1 计算机网络的基本概念	3
1.1.1 计算机网络的由来	3
1.1.2 计算机网络的定义	4
1.1.3 网络协议	5
1.1.4 计算机网络分类	5
1.2 因特网的组成	7
1.2.1 因特网的边缘部分	7
1.2.2 因特网的核心部分	9
1.3 计算机网络的性能指标	12
1.4 计算机网络的体系结构	15
1.4.1 分层的含义和必要性	15
1.4.2 OSI 模型	16
1.4.3 TCP/IP 模型	17
1.4.4 五层模型	18
1.4.5 TCP/IP 模型的数据封装过程	19
1.5 计算机网络的标准化	20
课后习题	21
第 2 章 数据通信基础	22
2.1 数据通信基础知识	22
2.1.1 通信系统的模型	22
2.1.2 信息、数据与信号	23
2.1.3 数据通信方式	24
2.1.4 数据传输速率与信道带宽	28
2.2 信号调制技术	31
2.2.1 基带调制 (编码)	31
2.2.2 带通调制	34
2.3 传输介质	38

2.3.1 导向性传输介质	39
2.3.2 非导向性传输介质	45
2.4 信道复用技术	47
2.4.1 频分复用 (FDM)	48
2.4.2 时分复用 (TDM)	49
2.4.3 波分复用 (WDM)	51
2.4.4 码分复用 (CDM)	52
2.5 接入技术	55
2.5.1 电话拨号接入	55
2.5.2 xDSL 接入	56
2.5.3 光纤同轴混合网 (HFC 网) 接入	59
2.5.4 光纤接入	60
2.5.5 以太网接入	61
2.5.6 无线接入	62
课后习题	63
第 3 章 直连网络	64
3.1 链路层概述	64
3.1.1 组帧	65
3.1.2 无差错接收	67
3.1.3 信道访问控制	69
3.2 PPP 协议	70
3.2.1 PPP 协议简介	71
3.2.2 帧格式	71
3.2.3 PPP 的工作过程	72
3.2.4 PPP 协议的身份验证机制	73
3.3 基于广播信道的以太网	73
3.3.1 传统以太网简介	74
3.3.2 CSMA/CD 协议	74
3.3.3 以太网的量化参数	77
3.3.4 帧格式	77
3.3.5 基于集线器的星型以太网	78
3.3.6 快速以太网	80
3.4 交换式以太网	81
3.4.1 网桥	81
3.4.2 交换机	83
3.4.3 生成树协议	84
3.4.4 VLAN 技术	86

3.5	PPPoE 协议	92
3.6	无线局域网	94
3.6.1	无线局域网架构	94
3.6.2	无线局域网的物理层	95
3.6.3	无线局域网的 MAC 层协议	97
3.6.4	MAC 帧	101
3.6.5	用户的接入过程	102
	课后习题	103
第 4 章	互连网络	105
4.1	本章概述	105
4.1.1	网络的互联问题	105
4.1.2	网络层的服务模型	106
4.2	网际协议 IP	109
4.2.1	IP 编址方案	109
4.2.2	IP 分组的封装格式	117
4.2.3	分组交付方法	119
4.3	ARP 协议	120
4.4	ICMP 协议	121
4.5	路由协议	123
4.5.1	路由协议概述	123
4.5.2	路由信息协议	124
4.5.3	OSPF 协议	128
4.5.4	边界网关协议 BGP	132
	课后习题	134
第 5 章	端到端传输	135
5.1	概述	135
5.1.1	进程之间的通信	136
5.1.2	端口号及套接字	136
5.1.3	运输层的多路复用与多路分解	137
5.1.4	运输层的两大协议	138
5.2	UDP 协议	139
5.2.1	UDP 协议简介	139
5.2.2	UDP 报文段的首部格式	140
5.3	TCP 协议	141
5.3.1	TCP 协议简介	141
5.3.2	TCP 报文段的首部格式	142

5.3.3 TCP 的连接管理	144
5.4 可靠传输的原理及实现	147
5.4.1 可靠传输的原理	147
5.4.2 TCP 可靠传输的实现	151
5.5 流量控制	157
5.5.1 接收流量控制	158
5.5.2 网络流量控制（即拥塞控制）	160
课后习题	167
第 6 章 网络应用协议	169
6.1 应用层的 C/S 模式与 P2P 模式	169
6.2 DNS 协议	170
6.3 DHCP 协议	172
6.4 Web 与 HTTP	175
6.5 电子邮件	177
6.6 文件传输协议	179
课后习题	182

实 践 篇

第 7 章 数据链路层实验	185
7.1 实验 1：以太网帧的封装实验	185
7.1.1 实验目的	185
7.1.2 实验配置说明	185
7.1.3 实验步骤	185
7.2 实验 2：交换机工作原理	187
7.2.1 实验目的	187
7.2.2 实验配置说明	187
7.2.3 实验步骤	188
7.3 实验 3：生成树协议（STP）分析	189
7.3.1 实验目的	189
7.3.2 实验配置说明	190
7.3.3 实验步骤	190
7.4 实验 4：虚拟局域网工作原理	193
7.4.1 实验目的	193
7.4.2 实验配置说明	193
7.4.3 实验步骤	194

第 8 章 网络层实验	198
8.1 实验 1: IP 协议	198
8.1.1 实验目的	198
8.1.2 实验配置说明	198
8.1.3 实验步骤	199
8.2 实验 2: IP 地址分配实验	201
8.2.1 实验目的	201
8.2.2 实验配置说明	201
8.2.3 实验步骤	202
8.3 实验 3: ARP 协议	204
8.3.1 实验目的	204
8.3.2 实验配置说明	204
8.3.3 实验步骤	205
8.4 实验 4: 路由协议分析	206
8.4.1 实验目的	206
8.4.2 实验配置说明	206
8.4.3 实验步骤	207
第 9 章 运输层实验	209
9.1 实验 1: 运输层端口观察实验	209
9.1.1 实验目的	209
9.1.2 实验配置说明	209
9.1.3 实验步骤	209
9.2 实验 2: UDP 协议与 TCP 协议的对比分析	211
9.2.1 实验目的	211
9.2.2 实验配置说明	211
9.2.3 实验步骤	212
9.3 实验 3: TCP 的连接管理	213
9.3.1 实验目的	213
9.3.2 实验配置说明	213
9.3.3 实验步骤	213
第 10 章 应用层实验	215
10.1 实验 1: DNS 解析实验	215
10.1.1 实验目的	215
10.1.2 实验配置说明	215
10.1.3 实验步骤	217
10.2 实验 2: DHCP 协议分析	220

10.2.1	实验目的	220
10.2.2	实验配置说明	220
10.2.3	实验步骤	221
10.3	实验 3: HTTP 协议分析	224
10.3.1	实验目的	224
10.3.2	实验配置说明	224
10.3.3	实验步骤	225
10.4	实验 4: 电子邮件协议分析	226
10.4.1	实验目的	226
10.4.2	实验配置说明	226
10.4.3	实验步骤	228
参考文献		230

理 论 篇

第 1 章 计算机网络概述

本章主要以因特网为代表，概述计算机网络系统的全貌。首先介绍计算机网络的基本术语、重要概念和基础知识；然后分析因特网的组成，并分别讨论因特网的核心部分和边缘部分的工作机制和原理；接着讨论评价分组交换网的各项指标，包括时延、速率、RTT 和利用率等；最后讨论计算机网络系统的体系结构。

1.1 计算机网络的基本概念

1.1.1 计算机网络的由来

计算机网络(下简称网络)是 20 世纪 60 年代美苏冷战时期的产物。当时，美国国防部下属的远景研究规划局(Defence Advanced Research Project Agency, DARPA)提出要研制一种生存性(survivability)很强的通信网络，用于替代脆弱的电信网络，目的是提高其军事指挥网络系统在核战争环境下的可生存性。

传统的电信网络是采用面向连接的电路交换和具有中心结构的星型拓扑。一方面，星型拓扑存在脆弱性，一旦中心节点出故障或者被攻击，则可能导致整个网络系统瘫痪；另一方面，在面向连接的通信中，如果电路中有一个交换机或一条链路出故障或被攻击，则整个通信就要中断。为此，兰德公司的 Paul Baran 提出了一种分布式数字分组交换设计方案，如图 1-1 所示。与传统网络相比，该方案的主要特征是采用面向无连接的分组交换和无中心的网状拓扑，克服了传统电信网络的缺陷，大大提高了网络的可生存性。

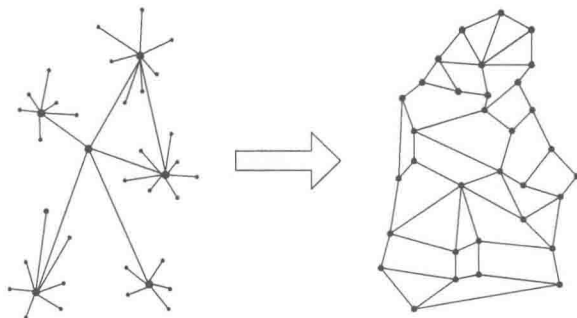


图 1-1 传统电信网和分布式网络的拓扑模型对比

1969 年，DARPA 又资助建立了一个名为 ARPANET 的网络实验平台，该网络把位于洛杉矶的加利福尼亚大学、位于圣巴巴拉的加利福尼亚大学、斯坦福大学，以及位于盐湖城的犹他州州立大学的计算机主机连接起来，如图 1-2 所示。在 ARPANET 中，位于各个节点的大型计算机采用分组交换技术，并通过专门的通信交换机和专门的通信线路相互连接。最初，ARPANET 主要是用于军事研究目的，它的指导思想是：网络必须经受得住故障和攻击的考

验, 当网络的某一部分因遭受攻击而失去工作能力时, 网络的其他部分应能维持正常的通信工作。ARPANET 的另一个重大贡献是 TCP/IP 协议簇的开发和利用。作为 Internet 的早期骨干网, ARPANET 的试验并奠定了 Internet 存在和发展的基础, 较好地解决了异构网络互联的技术问题。现代计算机网络正是在 ARPANET 的基础上逐渐发展起来的。

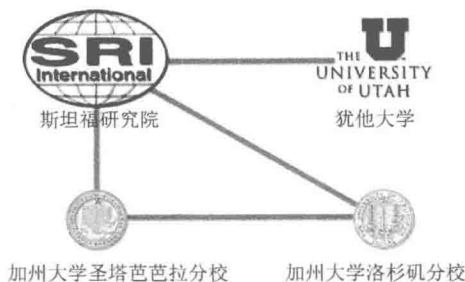


图 1-2 ARPANET 网络拓扑

1.1.2 计算机网络的定义

计算机网络是计算机技术与通信技术密切结合的必然产物, 是随着人类社会对信息服务日益增强的需求而发展起来的。计算机网络的最简单定义是: 一些相互连接的、以共享资源为目的、自治的计算机系统的集合, 如图 1-3 所示。其实质是利用通信设备和线路将地理位置不同的、功能独立的多个计算机系统互连起来, 以功能完善的网络软件(即网络通信协议、信息交换方式和网络操作系统等)实现网络中资源共享和信息传递的系统。

网络与其他计算机系统的最主要区别在于: 计算机网络中的互联设备都是独立自主的, 其互连的基础是通信协议(或称网络协议), 以便双方能理解对方发来的信息。因此, 一个由计算机主机和外设(如打印机)组成的计算机系统不能算是计算机网络, 因为这些外设是在计算机指令控制下运行, 不是独立自主的。

将计算机连接成一个计算机网络的目的, 主要可以归纳成以下三点。

(1) 资源共享: 在网络环境中, 用户能够访问位于其他主机上的各种资源, 包括硬件资源、软件资源和数据资源等。

(2) 通信服务: 计算机网络能够提供各种便利的通信服务, 包括电子邮件、即时通信、聊天室和视频会议等。

(3) 协同计算: 在网络环境中, 各个主机可以协同计算, 共同完成特定的计算任务。

尽管网络的物理结构和网络设备可能复杂多样, 但从逻辑上看, 网络实体可以抽象成两种基本构件: 节点(node, 也称结点)和链路(link)。网络中的节点可以是 PC 机、服务器和智能终端等端系统(也称主机), 也可以是集线器、交换机和路由器等中间节点(只负责转发数据)。而链路就是光纤、电缆和无线信道等物理媒体。这些实体组建成计算机网络的方式主要有两种: 直连网络和互联网。直连网络是指采用某种链路将所有端系统连接起来, 其具体的连接方式可以是星型、树型、环型、总线型或者网状型。直连网络一般采用共享链路的方式组网, 仅能适用于数量有限的本地端系统联网。随着节点数量和网络覆盖范围变大, 网络需

要间接的连通技术。如图 1-4 所示, 可以将多个计算机网络通过路由器互连成一个更大规模的网络, 从而组成互联网, 即“网络的网络”。在互联网中, 主机之间不是直连的, 因此需要解决数据报转发的路由问题。我们所述的因特网(Internet)就是一个特定的互联网, 起源于美国的因特网, 现已发展成为世界上最大的国际性计算机互联网。

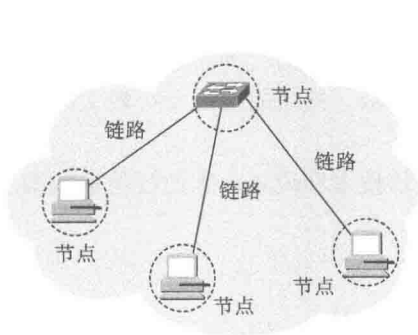


图 1-3 计算机网络示意图

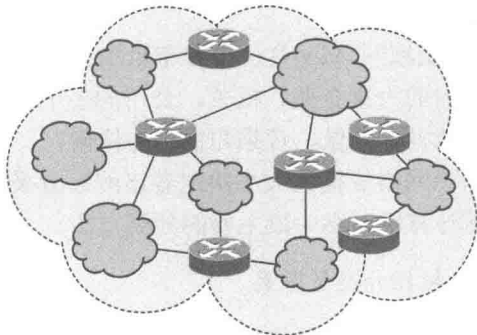


图 1-4 互联网示意图

1.1.3 网络协议

网络协议(network protocol)是计算机网络不可或缺的重要组成部分, 它是为计算机网络进行数据交换而建立的规则或约定的集合, 简称协议。在计算机网络中, 两个相互通信的实体(进程)处在不同的地理位置, 彼此之间也可能不熟悉(异构系统), 因此它们之间的信息交换必须严格按照一定的数据编码和通信规则进行。例如, 双方要约定好“如何封装数据”, 接收失败“如何处理”等问题。网络协议要涵盖数据交换所需的方方面面规则, 从内涵来看, 一个网络协议至少包括三方面的要素:

- (1) 语法: 涉及数据与控制信息的格式、编码和信号电平等。
- (2) 语义: 涉及用于协调与差错处理的控制信息。
- (3) 时序(定时): 涉及事件实现顺序的详细说明。

由于物理设备、通信链路和整个网络都有可能各种差错或故障, 因此网络协议要考虑数据传输的可靠性问题, 这也是网络设计的重点和难点问题。因此, 对于大规模的计算机网络而言, 其网络协议往往是非常复杂的。ARPANET 的成功经验表明网络协议应该采用分层设计方法, 既在制定协议时通常把复杂协议分解成一些简单协议, 然后再将它们复合起来。最常用的复合技术就是层次方式。但是, 网络协议并不是万能的。从理论上讲, 在通信信道不是完全可靠的情况下, 是不可能设计出完全可靠的通信协议。但从工程的角度, 只要通信信道的差错率足够小, 就认为网络是可靠的, 能够设计出可靠工作的协议。计算机网络课程中各章节的学习内容就包含了各种常用的、已经成为标准的网络协议, 如 TCP 协议、IP 协议等。

1.1.4 计算机网络分类

从不同角度看, 计算机网络有许多不同的分类方法, 具体如下。

1. 按网络的覆盖范围分类

- (1) 广域网(WAN): 其分布范围可达数百至数千千米, 可覆盖一个国家或者几个洲, 形

成国际性的远程网络。广域网的通信子网可以采用公用分组交换网、卫星通信网和无线分组交换网。

(2) 局域网 (LAN): 局域网一般由微型计算机或工作站通过高速通信线路相连而成 (速率通常在 10Mbit/s 以上), 但地理上则局限在较小的范围内 (1km 左右)。例如, 校园网和企业网都属于局域网。

(3) 城域网 (MAN): 是分布范围介于局域网和广域网之间的一种高速网络, 满足几十千米范围内的大量企业、机关、公司的多个局域网互联需求。其目的是在一个较大的地理区域内提供数据、图像、音频和视频的传输。

由于网络规模的大小决定着该网络应采用何种通信技术和设备, 因此按覆盖范围的分类是目前计算机网络中最主要的分类方法。

2. 按拓扑类型分类

网络拓扑是指网络形状, 或者是它在物理上的连通性。网络拓扑结构主要有如下几种。

(1) 星型网络: 由中央节点和通过点到点通信链路接到中央节点的各个站点组成, 中央节点通常是一个集线器。中央节点执行集中式通信控制策略, 因此中央节点相当复杂, 而各个站点的通信处理负担都很小。星型结构的优点是故障诊断和隔离容易, 适合综合布线。其缺点是电缆长度和安装工作量可观, 中央节点的负担较重, 各站点的分布处理能力较低。

(2) 总线网络: 采用一个广播信道作为传输介质, 所有站点都通过相应的硬件接口直接连到这一公共传输介质上, 该公共传输介质称为总线。任何一个站点发送的信号都沿着传输介质传播, 而且能被所有其他站点所接收。因为所有站点共享一条公用的传输信道, 所以一次只能由一个设备传输信号。通常采用分布式控制策略来确定哪个站点可以发送。总线结构的优点是所需电缆数量少、结构简单、易于扩充。其缺点是传输距离有限, 故障诊断和隔离较为困难。

(3) 环型网络: 由站点和连接站点的链路组成一个闭合环。每个站点能够接收从一条链路传来的数据, 并以同样的速率串行地把该数据沿环送到另一条链路上。这种链路可以是单向的, 也可以是双向的。数据以分组形式发送。由于多个设备连接在一个环上, 因此需要用分布式控制策略来进行控制。环型结构的优点是电缆长度短, 所有计算机都能公平地访问网络的其他部分, 网络性能稳定。其缺点是节点的故障会引起全网故障, 环节点的加入和撤出过程较复杂, 环型拓扑结构的介质访问控制协议都采用令牌传递的方式, 在负载很轻时, 信道利用率相对来说就比较低。

(4) 树型网络: 可以看成是总线和星型拓扑的扩展, 形状像一棵倒置的树, 顶端是树根, 树根以下带分支, 每个分支还可再带子分支。树根接收各站点发送的数据, 然后再用广播发送到全网。树型结构的优点是易于扩展, 故障隔离较容易。其缺点是各个节点对根的依赖性太大, 如果根发生故障, 则全网不能正常工作。

(5) 网状网络: 这种结构在广域网中得到了广泛的应用, 优点是不受瓶颈问题和失效问题的影响。由于节点之间有许多条路径相连, 可以为数据流的传输选择适当的路由, 从而绕过失效的部件或过忙的节点。这种结构虽然比较复杂, 成本比较高, 提供上述功能的网络协议也较复杂, 但由于它的可靠性, 仍然受到用户的喜欢。

3. 按通信介质分类

(1) 有线网：采用如同轴电缆、双绞线、光纤等物理介质来传输数据的网络。

(2) 无线网：采用卫星、微波等无线形式来传输数据的网络。

与有线网相比，无线网组网便利，用户可以随时随地接入网络，因此更受欢迎。

1.2 因特网的组成

因特网是一个连入千家万户、遍及全球各地的巨大网络。人们甚至无法确切地知道它的物理拓扑和节点数量。从物理结构上来看，因特网通过路由器将世界各地的计算机网络互连起来，构成一个范围巨大的互联网。但若从逻辑上进行划分(工作方式)，可以将因特网简单地划分为两部分：边缘部分和核心部分。图 1-5 给出了这两部分相互关系的示意图。

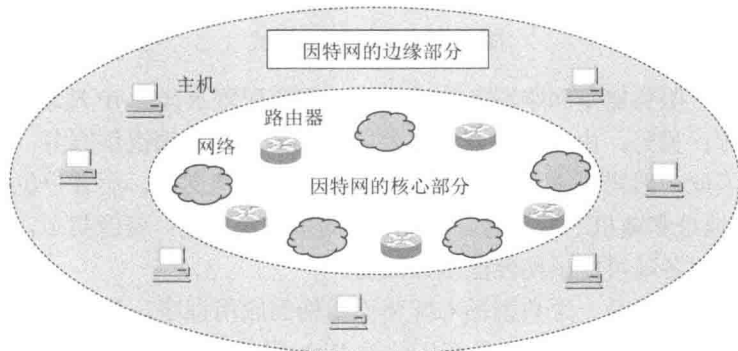


图 1-5 因特网的逻辑组成

因特网的设计遵循一个著名的“端到端原则”，即将复杂的网络处理功能(如差错控制、拥塞控制和安全保障等)尽量安置在因特网的边缘部分，以便网络的核心部分能只专注于分组交付处理。下面分别讨论这两部分的作用和工作方式。

1.2.1 因特网的边缘部分

因特网的边缘部分由端系统和运行在其上的应用程序所组成。这部分是用户直接使用的，用来进行通信(传送数据、音频或视频)和资源共享。因特网成功的因素在于：网络信息服务是由位于网络边缘的应用软件通过协作完成，可以方便地增加新的网络应用功能。从工作模式来看，边缘部分中进程之间的协作方式主要分两种：客户/服务器方式(C/S 方式)和对等方式(P2P)。

1. 客户/服务器方式

客户(Client)和服务器(Server)是指通信中所涉及的两个应用进程。客户/服务器方式(简称 C/S 模式)所描述的是进程之间服务和被服务的关系。客户是网络服务的请求方，而服务器是服务的提供方。在 C/S 模式中，服务器负责提供网络服务，用户通过客户端向服务器请求服务。如图 1-6 所示，客户机 A 和 B 都运行客户端程序，而服务器运行服务端程序。在这种情况下，A 和 B 都可以向服务器请求网络信息服务。