

智慧协同标识网络系列

COORDINATED ORGANIZATION MECHANISMS OF
SMART NETWORK

智慧网络 协同组织机理

■ 胡宇翔 王鹏 陈鸿昶 江逸茗 兰巨龙 程国振 编著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

智慧协同标识网络系列

COORDINATED ORGANIZATION MECHANISMS OF
SMART NETWORK

智慧网络 协同组织机理

■ 胡宇翔 王鹏 陈鸿昶 江逸茗 兰巨龙 程国振 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

智慧网络协同组织机理 / 胡宇翔等编著. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2016.5
(智慧协同标识网络系列)
ISBN 978-7-115-41651-3

I. ①智… II. ①胡… III. ①计算机网络—研究
IV. ①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第021446号

内 容 提 要

本书在介绍智慧网络协同组织机理概念和背景的基础上,对智慧网络协同组织结构、智慧网络标识映射技术、智慧网络路由与交换技术、智慧网络可编程技术、智慧网络虚拟化技术的研究现状进行了全面、系统的介绍。

本书取材新颖,内容详实,实用性强,反映了国内外智慧网络架构及相关技术研究的现状与未来,适合于从事新型网络体系结构研究的广大工程技术人员阅读,也可作为大专院校通信、计算机等专业和相关专业培训班的教学参考书。

◆ 编 著 胡宇翔 王 鹏 陈鸿昶 江逸茗
兰巨龙 程国振

责任编辑 代晓丽

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 17

2016年5月第1版

字数: 276千字

2016年5月河北第1次印刷

定价: 78.00元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前言

随着科学技术的发展，信息网络已经成为推动社会进步的巨大动力，在各国经济与社会发展中起着关键性的作用。因此，信息领域的竞争将是世界经济竞争的焦点之一，而信息领域的关键取决于信息网络的基础理论研究水平。从诞生至今，互联网一直保持“沙漏模型”的设计思想，具有服务的资源和位置绑定、网络的控制和数据绑定以及身份与位置绑定这三重绑定的特性。这种网络体系和机制是相对静态和僵化的，在此基础上的演进和发展难以突破原始设计思想的局限，无法从根本上满足信息网络的高速、高效、海量、泛在等通信需求，难以解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题，更难以突破网络资源的高效利用与节能。发展下一代网络关键技术与服务已上升为国家战略，新型信息网络体系结构和关键技术的研究与建设迫在眉睫。

目前，国际上对新一代信息网络体系理论的研究已进入白热化阶段。然而，尚无一个完整的体系结构，能够在有效支持网络可扩展性、移动性、安全性的基础上，大幅度提高网络资源利用率、降低网络能耗、显著提升用户体验等。作为未来信息网络的基础理论变革，突破传统研究思路的智慧网络体系具有很好的发展前景和潜在机遇，是应对网络新问题、新挑战的有效途径，能够形成自主知识产权的重大创新，是使我国在知识产权问题上不再受国外制约的重要基础。同时，是满足国家和社会对信息网络的迫切需求、弱化乃至摆脱对国外信息网络理论及体系依赖的必然选择。

本书主要内容包括：第1章介绍了智慧网络协同组织结构，引入了智慧网络及协同组织的相关概念，总结了智慧网络系统组织的核心机理及相关技术和发展趋势；第2章主要介绍智慧网络标识映射技术，包括网络标识分离思想、智慧网络标识映射的内涵、技术以及多种映射方法；第3章则介绍了智慧网络路由与交换技术，包括分层路由结构、路由理论与技术、交换理论与技术；第4章介绍智慧网络可编程技术，包括网络可编程技术的演进、数据平面可编程技术、控制平面可编程技术、可编程案例分析以及可编程技术在网络功能管理中的应用研究；

第5章介绍了智慧网络虚拟化技术，包括智慧网络虚拟映射技术、虚拟化智慧网络管理技术以及资源适配技术。

本书在编著过程中参考了国家“973”计划项目“可重构信息通信基础网络体系研究”（项目编号：2012CB315900）和课题“网络组件模型与聚类机制”（课题编号：2013CB329104）、国家“863”计划课题“软件定义网络体系结构与关键技术研究”（课题编号：2015AA016102）、国家自然科学基金课题（课题编号：61309019、61372121、61572519、61502530）等课题组的相关技术资料，在此表示感谢。

胡宇翔博士负责本书的统筹规划并编写了第4章智慧网络可编程技术，陈鸿昶教授和程国振博士编写了第1章智慧网络协同组织结构概述，王鹏博士编写了第2章智慧网络标识映射技术以及3.3节智慧网络交换理论与技术，兰巨龙教授编写了3.1节智慧网络分层路由结构和3.2节智慧网络路由理论与技术，江逸茗博士编写了第5章智慧网络虚拟化技术。另外，项目组谢立军、王志明、周桥等人作为本书的文字校阅、插图绘制等做了大量工作。

限于作者水平，并且各种智慧网络体系结构以及相关技术研究仍在快速发展和完善之中，本书难免存在缺点甚至是错误之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2016年2月

第 1 章	智慧网络协同组织结构概述	
1.1	新型网络体系的发展	2
1.1.1	网络体系发展历程	2
1.1.2	破解当前网络体系困局的主要思路	8
1.1.3	国内外相关研究现状	15
1.1.4	小结	24
1.2	智慧网络的基本概念与原理	25
1.2.1	智慧网络产生的背景	25
1.2.2	智慧网络的基本概念	27
1.2.3	智慧网络的核心思想与目标	32
1.2.4	智慧网络的典型应用架构	36
1.3	智慧网络协同组织原理	41
1.3.1	智慧网络的协同组织架构	41
1.3.2	核心机理分析	44
1.4	智慧网络的发展趋势	48
	参考文献	49
第 2 章	智慧网络标识映射技术	
2.1	网络标识分离思想的起源	56
2.2	智慧网络标识映射的核心内涵	57
2.3	智慧网络标识映射结构	67
2.4	智慧网络标识映射方法	70
2.4.1	扁平身份标识位置解析方法	70
2.4.2	动态分布式映射解析机制	76
2.4.3	基于位置感知 DHT 的分层映射解析机制	83
	参考文献	96



第3章 智慧网络路由与交换技术

3.1 智慧网络分层路由结构	104
3.1.1 网络结构模型.....	104
3.1.2 广义交换路由机理.....	106
3.1.3 广义交换路由标识.....	108
3.2 智慧网络路由理论与技术	109
3.2.1 良收敛域间路由协议.....	109
3.2.2 多可达路径域间路由协议.....	115
3.2.3 高阶安全域间路由协议.....	128
3.2.4 快速自愈域内路由协议.....	133
3.3 智慧网络交换理论与技术	139
3.3.1 可扩展、大容量和支持普适服务的广义交换结构.....	139
3.3.2 支持公平服务的分层混合调度策略.....	142
3.3.3 支持 DiffServ 模型的 LBDS 交换机制.....	143
3.3.4 支持动态重路由交换机制 MHRS.....	145
3.3.5 支持预定带宽和预定时延同时保证的分组 调度模型与算法.....	146
3.3.6 支持服务质量的异构并行交换结构.....	148
参考文献	151

第4章 智慧网络可编程技术

4.1 智慧网络可编程思想的提出及演进	156
4.1.1 早期开放可编程思想.....	157
4.1.2 控制与转发分离技术.....	158
4.1.3 软件定义网络与网络功能虚拟化.....	159
4.1.4 小结.....	163
4.2 智慧网络数据平面可编程技术	164
4.2.1 数据平面实现平台.....	164

4.2.2	数据平面协议无关性	167
4.2.3	数据平面可编程灵活性	170
4.2.4	小结	171
4.3	智慧网络控制平面可编程技术	172
4.3.1	集中式控制器	172
4.3.2	控制平面可扩展性	176
4.3.3	控制平面一致性	180
4.3.4	控制平面可用性	181
4.3.5	控制平面高级编程语言	183
4.4	网络可编程案例分析——可编程虚拟路由器	184
4.4.1	Click	185
4.4.2	PlanetLab	187
4.4.3	vRouter	188
4.4.4	PacketShader	188
4.4.5	SwitchBlade	189
4.4.6	RouteBricks	190
4.4.7	ServerSwitch	191
4.4.8	NetMagic	192
4.4.9	PEARL	192
4.4.10	OpenRouter	193
4.4.11	TUNIE	194
4.5	智慧网络可编程技术在网络功能管理中的应用研究	196
4.5.1	基于 SDN 的网络功能管理研究	196
4.5.2	基于 NFV 的网络功能管理研究	202
4.5.3	新型构架的网络功能管理研究	204
4.5.4	基于云的网络功能管理研究	207
4.6	小结	209
	参考文献	211



第5章 智慧网络虚拟化技术

5.1 网络虚拟化技术概述	216
5.2 智慧网络虚拟映射技术	219
5.2.1 映射问题基本模型	220
5.2.2 映射算法	222
5.3 虚拟化网络管理技术	238
5.3.1 资源标识机制	239
5.3.2 资源检测机制	240
5.3.3 多域资源管理机制	248
5.3.4 分布式协同构建机制	253
5.4 资源动态适配技术	256
参考文献	259

中英文对照表	261
--------	-----

名词索引	263
------	-----



第 1 章

智慧网络协同组织结构概述

- 1.1 新型网络体系的发展
- 1.2 智慧网络的基本概念与原理
- 1.3 智慧网络协同组织原理
- 1.4 智慧网络的发展趋势



1.1 新型网络体系的发展

计算机网络构建于链路速率为 56 kbit/s 的大型机时代，并逐渐演进为当前复杂的大规模基础设施。现有网络取得的巨大成功得益于其体系结构设计之初遵循的原则：网络提供核心的通信服务，终端系统提供丰富的业务功能。因此，网络核心层对业务透明，业务的扩展不会影响核心网络的结构。基于该体系，终端系统可以快速地扩展大量业务，网络核心层保持原来的功能和结构。经过半个世纪的演进，当前计算机网络包罗万象，既包括以大规模数据传输为特点的业务（如 P2P、VoIP、在线游戏、视频会议、社交媒体等），也涵盖以大规模硬件租用和服务提供为特点的云计算和数据中心等新型运营网络。

历史经验表明：在当前互联网已经取得事实上巨大成功的前提下，下一代网络体系研究不太可能完全脱离现有计算机网络发展基础而重新建立一个全新网络。因此，需要对传统网络体系结构进行深入分析，认清传统网络体系结构的现状和利弊，进而为研究和建立满足下一代网络发展需求的新一代网络体系结构提供参考、借鉴和指导^[1]。

1.1.1 网络体系发展历程

自英国第一次工业革命以来，每个世纪都有一种占据主导地位的新技术。18 世纪是伟大的机械系统时代；19 世纪是瓦特的蒸汽机时代；在 20 世纪的发展历程中，各种技术井喷式出现，关键技术是信息的传输和处理。与此同时，人类还经历了其他方面的发展和进步：遍布全球的电话网络、无线电广播和电视的发明，计算机工业的诞生及其摩尔定律式的增长速度，通信卫星发射升空，当然还有计算机网络。

计算机与通信的结合对计算机系统的组织方式产生了深远的影响。一台服务于整个组织内所有计算需求的老式服务模式已经被新的模式所取代——大量相互独立但彼此连接的计算机共同完成计算任务，该系统称为计算机网络（Computer Network）。如何设计并组织这些网络，并使其更加稳固、高效、便利、安全，就是网络体系（Network

Architecture) 的研究内容。

纵观计算机网络的发展历史,网络体系结构的演变过程体现在计算机网络的形成与发展中,可以大致概括为 5 个阶段:面向终端的计算机网络、计算机—计算机网络、开放式标准化计算机网络、以 Internet 为中心的高速化网络、多样化网络体系结构研究。各个阶段在时间上存在部分重叠。其中,第三、四阶段便是网络体系结构产生和发展的阶段。

(1) 第一代计算机网络:面向终端的计算机网络(网络体系的孵化阶段)

1946 年,世界上第一台数字计算机 ENIAC 在美国诞生,计算机和通信并没有什么关系。早期的计算机系统是高度集中的,所有设备安装在单独的大房间内。最初,一台计算机只能供一个用户使用。后来出现了批处理和分时系统,一台计算机虽然可以同时为多个用户服务,但若不和数据通信相结合,分时系统所连接的多个终端都必须紧挨着主计算机,用户必须到计算机中心的终端使用,显然是不方便的。1951 年,美国麻省理工学院林肯实验室就开始为美国空军设计半自动化地面防空系统(Semi-Automatic Ground Environment, SAGE),该系统于 1963 年建成,被认为是计算机和通信技术结合的先驱。20 世纪 60 年代初,美国借助公用电话网,建成了全国性航空飞机订票系统,用一台中央计算机连接 2 000 多个遍布全国各地的终端,用户通过终端进行操作,如图 1-1 所示。

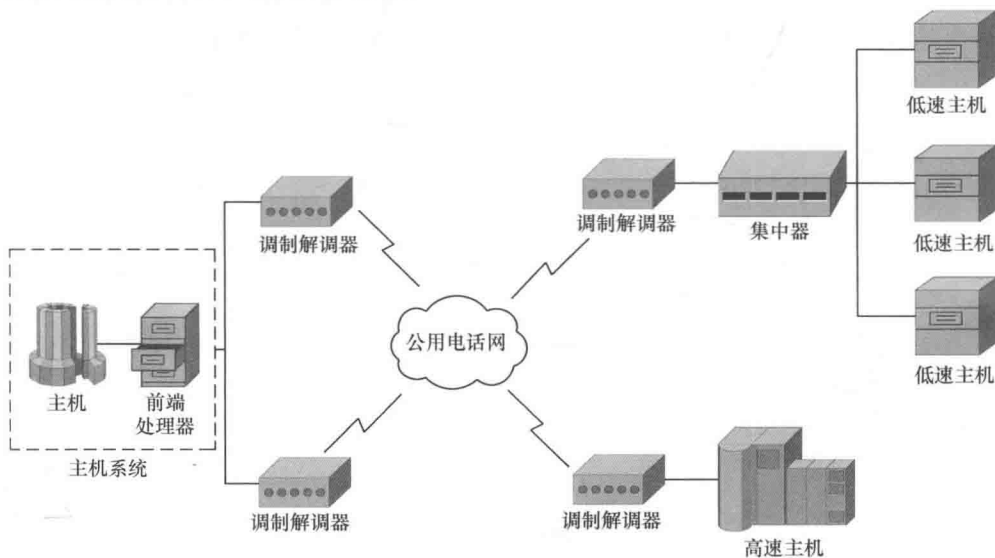


图 1-1 面向终端的计算机网络

在这一时期，计算机网络的雏形出现，但仅面向终端，没有形成网络体系结构。

(2) 第二代计算机网络：计算机—计算机网络（以通信子网为中心的网络体系结构初级阶段）

1957年10月，前苏联发射了人类历史上第一颗人造地球卫星。这次成功发射大大震惊了美国朝野。美国政府遂决定在美国国防部领导下成立高级研究计划局（APRA）。鉴于军事的刺激，为了更好地满足计算机之间通信的需要，计算机网络的鼻祖 ARPANet 应运而生。最初的 ARPANet 基于主机—主机通信协议。它的产生并非偶然，正是外界军事（经济）的刺激，原有的通信方式无法满足需要，才有了 ARPANet 的产生。

同第一代网络相比，第二代网络联网的计算机没有了主从关系，每一台计算机都具有强大的计算、存储能力。多台计算机通过通信线路互连而成的网络，即计算机—计算机网络。

ARPANet 是该网络系统的典型代表。运行用户应用程序的计算机被称为主机（Host），但主机之间并不是通过通信线路直接相连，而是通过接口报文处理机（Interface Message Processor, IMP）转接后互连，如图 1-2 所示。

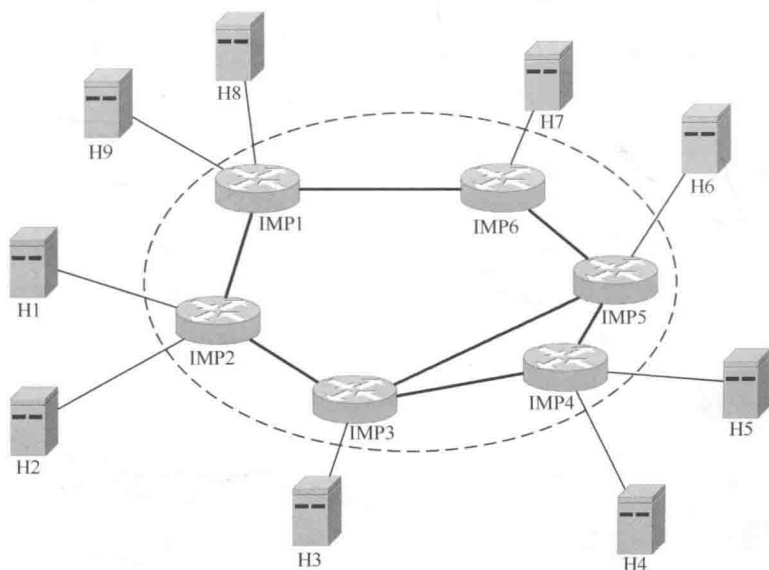


图 1-2 计算机—计算机网络

第二阶段的计算机—计算机网络强调网络的整体性，用户不仅可以使本地资源，还可以共享其他用户主机的资源，其工作模式一直延续到现在。但是，这种网络还存在一些弊端：不同厂商计算机不能接入同一网络；不同类型的计算机互连通信非常困难。

（3）第三代计算机网络：开放式标准化网络（网络体系结构——层次模型）

随着 ARPANet 的规模不断扩大，到 20 世纪 70 年代后期，网络节点超过 60 个，主机超过 100 台，地理范围跨越了美国东部和西部的许多大学和研究机构。

但是，这种计算机—计算机网络有不少弊病，不能适应信息社会日益发展的需要。随着不同网络的产生，如 ARPANet、PRNet、SATNet 等，它们有着各自的接口定义、分组长度、传输速率和通信协议，把不同的第二代计算机网络互连起来十分困难。网络的不断发展，不同的需求便产生了竞争。因此，一种更高级的、基于统一网络体系结构的网络便应运而生——开放式标准化网络，它具有统一的网络体系结构，遵循国际标准化协议。标准化使得不同的计算机能方便地互连在一起。

世界上第一个网络体系结构是美国 IBM 公司于 1974 年提出的系统网络体系结构（System Network Architecture, SNA）。遵守 SNA 规定的设备都可以方便地进行互连。之后许多大计算机公司也纷纷提出自己的网络体系结构，如 Digital 公司的 DNA、Honeywell 公司的分布式系统结构（Distributed System Architecture, DSA）等。但是不同的体系结构互不兼容，采用不同体系结构的两个网络之间很难通信。要想使所有的网络都能互相连通，需要制订一个国际性的网络体系结构标准。

1977 年国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）的 TC97 信息处理系统技术委员会 SC16 分技术委员会开始着手制订开放系统互连（Open System Interconnection, OSI）基本参考模型。作为国际标准，OSI 规定了可以互连的计算机系统之间的通信协议，遵从 OSI 协议的网络产品都是所谓的开放系统。几乎所有的网络产品都声称自己的产品是开放系统，不遵从国际标准的产品逐渐失去了市场。这种统一的、标准化的产品互相竞争的市场又进一步促进了网络的发展。

OSI 模型划分 7 个层次，模型和协议本身存在着缺陷，层次划分不太合理，相同的功能在多个层次中重复出现，并且 OSI 的协议实现过分复杂，运行效率比较低。而同时期产生的 TCP/IP 模型，基于传输层、应用层、互联网层和网络接口层 4 个层次，可以很方便地实现，并且提供了简单方便的编程接口，因此，TCP/IP 模型结构在竞争



中存活了下来。而 OSI 模型则仅停留在了理论阶段。

1983~1985 年, TCP/IP 进入稳固发展阶段。到 1985 年, Internet 已相当完善。美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 利用 TCP/IP 建立了用于科学研究和教育的骨干网络——NSFNet。1990 年, NSFNet 代替 ARPANet 成为国家骨干网, 并且从大学和研究机构进入社会。

(4) 第四代计算机网络: 以 Internet 为中心的信息高速公路 (网络体系结构多样化发展, 下一代网络)

商业行为的介入, 成为 Internet 进一步发展最重要的推动力。网上的电子邮件、文件下载和信息传输越来越受到人们的欢迎并被广泛使用。1992 年, Internet 学会成立, 该学会把 Internet 定义为“组织松散的、独立的国际合作互连网络, 通过自主遵守计算协议和过程支持主机的通信”。1993 年, 美国伊利诺斯大学国家超级计算中心成功开发了网上浏览工具 Mosaic (后来发展成 Netscape), 使得各种信息都可以方便地在网上交流。浏览工具的实现引发了 Internet 发展和普及的高潮。上网不再是网络操作人员和科学研究人员的专利, 而成为一般人进行远程通信和交流的工具。在这种形势下, 美国总统克林顿于 1993 年宣布正式实施信息基础设施 (National Information Infrastructure, NII) 计划, 从此在世界范围内展开了争夺信息化社会领导权和制高点的竞争。与此同时, NSF 不再向 Internet 投入资金, 使其完全进入商业化运作。20 世纪 90 年代后期, Internet 以惊人的速度发展, 网上的主机数量、上网的人数、网络的信息流量每年都在成倍地增长。网络覆盖的地理范围向全球延伸, 并逐步深入每个单位、每个办公室以至每个家庭。有人描述未来通信和网络的目标是实现“5W”的个人通信, 即任何人 (Whoever) 在任何时间 (Whenever)、任何地方 (Wherever) 都可以和任何另一个人 (Whomever) 通过网络进行通信, 以传送任何信息 (Whatever)。

20 世纪 90 年代末至今的第四代计算机网络, 由于局域网技术发展成熟, 出现光纤及高速网络技术、多媒体网络、智能网络, 整个网络从一个对用户透明的大计算机系统, 发展为以 Internet 为代表的互联网。此时, 人们逐渐认识到现有网络体系结构参考模型 TCP/IP 在可扩展性、安全性、移动性、服务质量、可管可控和可信性等方面存在诸多缺陷, 因此, 对于下一代网络体系结构的研究开始出现了多样化的局面。

从计算机网络的发展过程看,人与网络的关系由传统的“网络在人之上”(Network on Human)、“网络在人之中”(Network in Human)到“网络与人”(Network with Human)相融合。也就是说,网络从远离人的一般应用到网络应用大大便利了人们的生活,人机关系日益紧密,最终必然向着网络与人更加友好的结合方向发展,达到一种随心所欲的境界。为了实现这一理想,要求应该更多地从人们应用的方便化和网络服务的灵活性、主动性角度寻找答案,使得今后的网络服务和网络应用可以根据人的个性需求而定制。这种美好憧憬进一步推动了网络体系结构的演化。

(5) 下一代计算机网络: 多样化网络体系结构研究(网络体系结构多样化研究)

现行网络体系结构基本上沿袭了传统网络体系结构的旧制,在今天看来已经明显滞后于新的历史条件和需求背景下计算机网络发展的要求。因此,现今的互联网必须新的网络体系结构指导下向下一代网络演进。近年来,一系列与下一代网络相关的研究已相继展开,如 GENI、FIND、NetSE、FP7、FIRE、4WARD、AKARI 和 CNGI 等。

美国于 2005 年启动了 FIND (Future Internet Design, 未来网络设计) 项目^[3], 提出了交换式和递归式网络体系结构、用户可控路由机制和网络虚拟化等若干解决方案,并在网络安全性、可用性、信息传播、位置管理、身份管理等方面进行了深入研究。与此同时,欧盟通过 FP7 计划开展了 Challenge One 项目,其子项目 4WARD^[4]和 AutoI (Autonomic Internet, 自动互联网)^[5]分别就具有可伸缩虚拟网服务提供能力的互联网体系结构和基于业务感知的资源优化管理来克服网络僵化问题,提出了解决方案。接着,欧盟于 2008 年启动了 FIRE (Future Internet Research and Experimentation, 未来网络研究和实验) 计划。此外,日本开展了 AKARI 项目^[6],通过网络虚拟化手段来支持多样化数据接入和网络功能扩展,对未来网络体系结构、关键技术以及网络演进路径进行研究。国内方面,北京交通大学提出了支持普适服务的一体化网络,基于两层模型实现对泛在互连和普适服务的有效支撑^[7,8]。清华大学从规模、性能、安全、功能、服务等 5 个方面提出了一种多维可扩展网络体系结构^[9],并在此基础上,进一步就互联网演进性、海量数据高效传输等问题展开研究。

任何对未来网络体系架构的理论研究成果和设想都需要在实验平台上进行广泛和深入的验证。美国于 2005 年启动的 GENI (Global Environment for Network Innovations, 网络创新的全球环境) 计划^[10],其目的是构建创新的互联网实验环境,



为大规模和长期的互联网实验提供一个共享性、专用性和基础性的实验平台。普林斯顿大学开展的 PlanetLab^[11]项目提供了一个覆盖网络的实验平台,可通过使用 PlanetLab 切片来真实地运行各种大规模的服务实验,包括文件共享、嵌入式网络存储、路由和多播、QoS 覆盖网等。目前全球有超过 600 多个实验项目在 PlanetLab 上运行。斯坦福大学于 2008 年提出 OpenFlow^[12],为信息通信网络创新性协议等提供了标准化的实验环境。

多样化新型网络体系结构研究繁荣发展的背后是当前网络体系结构面临的问题:至今仍然没有完全建立起一个能够对当前计算机网络发展方向提供指导的、满足下一代网络发展需求的、正确反映整个网络发展趋势的新一代网络体系结构模型。下一节将从网络体系结构第 3 个阶段形成的两个典型网络参考模型出发,探究当前网络体系结构面临的问题及破解问题的思路。

1.1.2 破解当前网络体系困局的主要思路

计算机网络体系曾经历过百家争鸣的时代,不同机构、不同组织纷纷提出自己的体系模型,如 IBM 公司所提出的 SNA、DEC 公司所提出的 DNA、国际标准化组织所提出的 OSI 以及互联网所采用的 TCP/IP 参考模型等。在所有这些不同的网络体系结构参考模型中,层次化结构和协议制订被称为核心工作。

为了降低网络设计的复杂性,绝大多数网络都组织成一个层次栈(Stack of Layer)。每一层都建立在其下一层的基础上,层的数量、层的名字、内容及功能不尽相同。每一层的目的是向上一层提供特定的服务,而如何实现这些服务的细节则对上一层加以屏蔽。从某种角度讲,每一层都是一种虚拟机,它向上一层提供特定的服务。机器 A 的第 n 层与机器 B 的第 n 层进行对话,该对话使用的规则和约定统称为第 n 层协议。所谓协议,是指通信双方就如何进行通信的一种约定。狭义来讲,计算机学家认为层次和协议的集合称为网络体系。本节以 OSI 参考模型和 TCP/IP 参考模型为例论述网络体系结构设计。

1. OSI 参考模型

OSI 参考模型基于国际标准化组织的提案,作为各层协议迈向国际化的第一步,并于 1995 年进行了修订。这个模型称为 OSI 参考模型,如图 1-3 所示。