



智慧网络 协同组织机理

**Coordinated Organization
Mechanisms of Smart Network**

胡宇翔 王鹏 陈鸿昶 江逸茗 兰巨龙 程国振  

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



智慧网络 协同组织机理

**Coordinated Organization
Mechanisms of Smart Network**

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 (C I P) 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, 2018. 7

国之重器出版工程. 智慧协同标识网络系列

ISBN 978-7-115-48563-2

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(2018)第102677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,内容翔实,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 刘 琳

责任印制 杨林杰

◆ 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: 710×1 000 1/16

印张: 16.5

2018年7月第1版

字数: 305千字

2018年7月河北第1次印刷

定价: 118.00元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	

专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授

- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



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。

本书在编写过程中参考了国家“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



目 录

第 1 章 智慧网络协同组织结构概述	001
1.1 新型网络体系的发展	002
1.1.1 网络体系发展历程	003
1.1.2 破解当前网络体系困局的主要思路	008
1.1.3 国内外相关研究现状	015
1.1.4 小结	023
1.2 智慧网络的基本概念与原理	024
1.2.1 智慧网络产生的背景	024
1.2.2 智慧网络的基本概念	026
1.2.3 智慧网络的核心思想与目标	030
1.2.4 智慧网络的典型应用架构	034
1.3 智慧网络协同组织原理	039
1.3.1 智慧网络的协同组织架构	039
1.3.2 智慧网络的核心机理分析	042
1.4 智慧网络的发展趋势	046
参考文献	047
第 2 章 智慧网络标识映射技术	051
2.1 网络标识分离思想的起源	052
2.2 智慧网络标识映射的核心内涵	053



2.3	智慧网络标识映射结构	063
2.4	智慧网络标识映射方法	065
2.4.1	扁平身份标识位置解析方法	065
2.4.2	动态分布式映射解析机制	071
2.4.3	基于位置感知 DHT 的分层映射解析机制	078
	参考文献	090
第 3 章	智慧网络路由与交换技术	095
3.1	智慧网络分层路由结构	096
3.1.1	网络结构模型	096
3.1.2	广义交换路由机理	098
3.1.3	广义交换路由标识	100
3.2	智慧网络路由理论与技术	100
3.2.1	良收敛域间路由协议	100
3.2.2	多可达路径域间路由协议	106
3.2.3	高阶安全域间路由协议	118
3.2.4	快速自愈域内路由协议	123
3.3	智慧网络交换理论与技术	129
3.3.1	可扩展、大容量和支持普适服务的广义交换结构	129
3.3.2	支持公平服务的分层混合调度策略	132
3.3.3	支持 DiffServ 模型的 LBDS 交换机制	134
3.3.4	支持动态重路由交换机制 MHRS	136
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	137
3.3.6	支持服务质量的异构并行交换结构	139
	参考文献	141
第 4 章	智慧网络可编程技术	145
4.1	智慧网络可编程思想的提出及演进	147
4.1.1	早期开放可编程思想	147
4.1.2	控制与转发分离技术	148
4.1.3	软件定义网络与网络功能虚拟化	149
4.1.4	小结	153
4.2	智慧网络数据平面可编程技术	153



4.2.1	数据平面实现平台	154
4.2.2	数据平面协议无关性	157
4.2.3	数据平面可编程灵活性	159
4.2.4	小结	161
4.3	智慧网络控制平面可编程技术	161
4.3.1	集中式控制器	161
4.3.2	控制平面可扩展性	165
4.3.3	控制平面一致性	169
4.3.4	控制平面可用性	170
4.3.5	控制平面高级编程语言	171
4.4	网络可编程案例分析——可编程虚拟路由器	172
4.4.1	Click	173
4.4.2	PlanetLab	175
4.4.3	vRouter	175
4.4.4	PacketShader	176
4.4.5	SwitchBlade	177
4.4.6	RouteBricks	178
4.4.7	ServerSwitch	179
4.4.8	NetMagic	179
4.4.9	PEARL	180
4.4.10	OpenRouter	181
4.4.11	TUNIE	182
4.5	智慧网络可编程技术在网络功能管理中的应用研究	184
4.5.1	基于 SDN 的网络功能管理研究	184
4.5.2	基于 NFV 的网络功能管理研究	189
4.5.3	新型构架的网络功能管理研究	192
4.5.4	基于云的网络功能管理研究	195
4.6	小结	197
	参考文献	198
第 5 章	智慧网络虚拟化技术	203
5.1	网络虚拟化技术概述	204
5.2	智慧网络虚拟映射技术	207



5.2.1	映射问题基本模型	208
5.2.2	映射算法	210
5.3	虚拟化网络管理技术	224
5.3.1	资源标识机制	226
5.3.2	资源检测机制	226
5.3.3	多域资源管理机制	233
5.3.4	分布式协同构建机制	239
5.4	资源动态适配技术	242
	参考文献	244
	中英文对照表	247
	名词索引	251



智慧网络协同组织结构概述

首先，通过回顾计算机网络体系结构的发展脉络以及梳理当前国内外的研究现状，总结出破解当前网络体系僵化困局的思路——赋能网络体系以智慧；其次，给出了智慧网络的基本概念和原理；然后，从运营商避免被通道化和网络管理自动化、智能化的角度，通过在网络体系中引入智能层，论述了智慧网络协同组织原理，提出感知组件、执行组件和中央处理器的闭环反馈协同结构，提高网络的自学习能力；最后，展望了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全球信息基础设施。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），又涵盖以大规模硬件租用和服务提供为特点的云计算数据中心等新型运营网络^[1, 2]。

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 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世纪的发展过程中，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，人类在其他方面也有了发展和进步：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。

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。

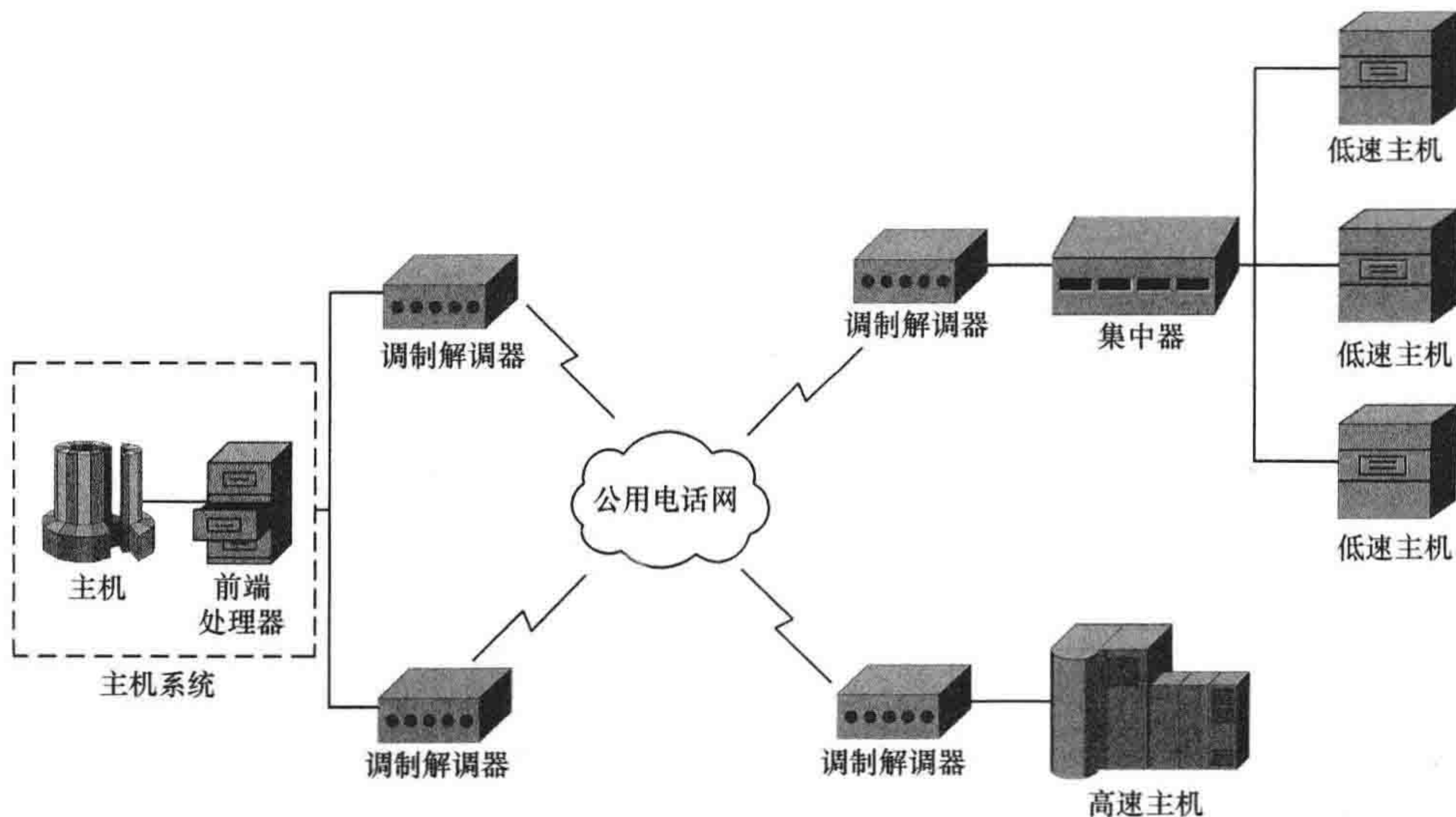


图 1-1 面向终端的计算机网络

(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，苏联发射了人类历史上第一颗人造地球卫星。这次人造地球卫星的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形成网络，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。

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。