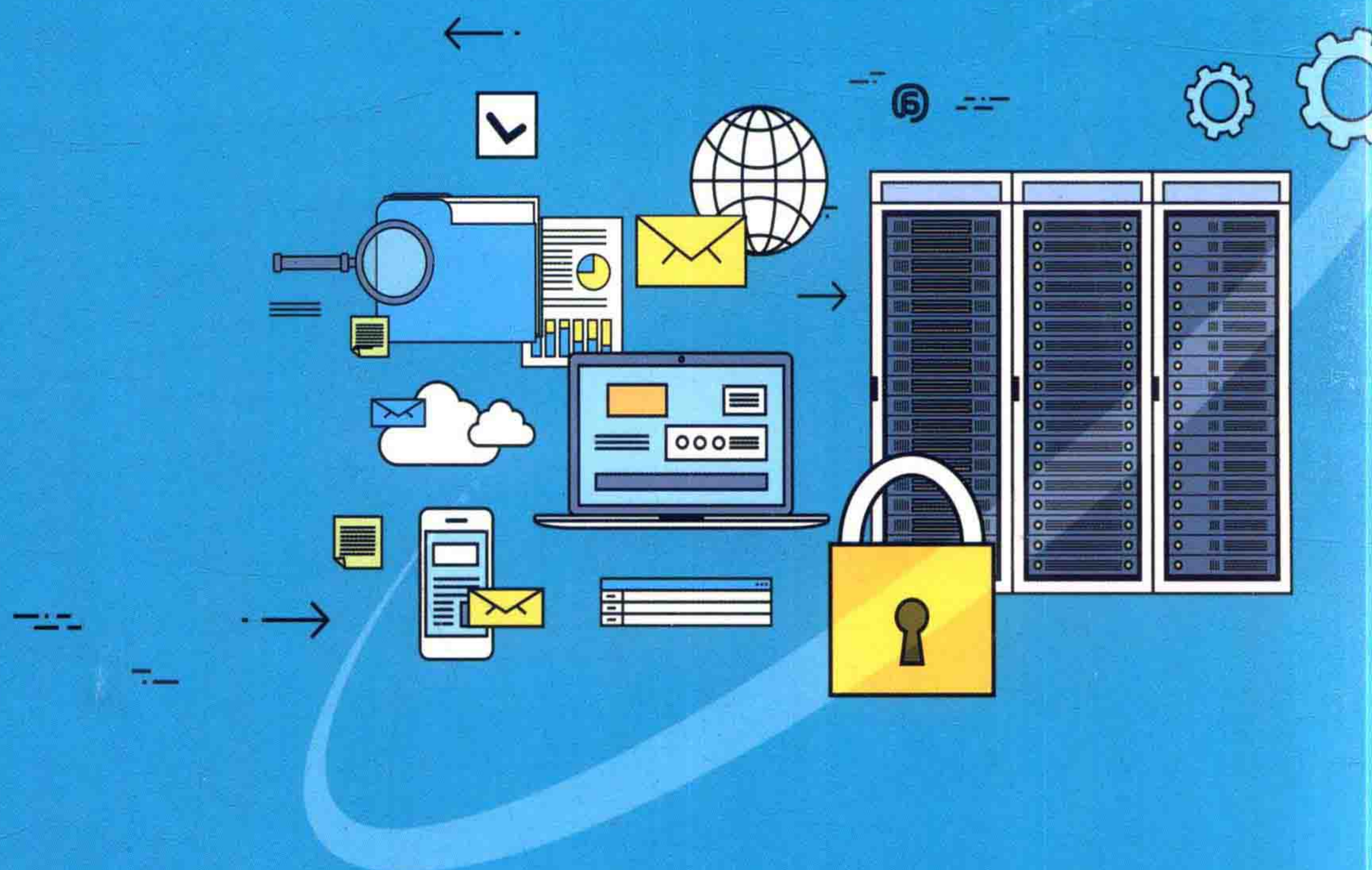




内容中心网络

Content-Centric Network

核心技术

/ 张 震 兰巨龙 伊 鹏 程国振 / 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容中心网络核心技术

张 震 兰巨龙 伊 鹏 程国振 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍内容中心网络组织机理概念和背景的基础上,对内容中心网络的内容命名技术、缓存技术、路由与转发技术、移动性技术、安全分析、软件定义技术、参数化自适应内容管线结构及仿真平台进行了全面系统的介绍。

本书取材新颖、内容翔实、实用性强,反映了国内外内容中心网络架构及其核心技术研究的现状与未来,既适合从事新型网络体系结构研究的工程技术人员阅读,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。

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,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

内容中心网络核心技术/张震等编著. —北京:电子工业出版社, 2018.5
ISBN 978-7-121-34077-2

I. ①内… II. ①张… III. ①计算机网络 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 076488 号

责任编辑:苏颖杰

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14 字数:358 千字

版 次:2018 年 5 月第 1 版

印 次:2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254468, quxin@phei.com.cn。

前言

随着互联网技术与应用的飞速发展，互联网正历经从“以互联为中心”到“以内容为中心”的演变。互联网的设计理念可以上溯至 20 世纪六七十年代，当时主要的应用需求是计算资源共享，核心理念是实现主机的互联互通，本质上是一种“主机—主机”的通信模式。TCP/IP 体系结构以 IP 地址为核心、以传输为目的，按照端到端原理设计，很好地满足了这一需求，促进了互联网飞速发展。经过 50 多年的发展，互联网的使用已发生了巨大的变化，现有互联网的应用需求更多关注的是“内容共享”。人们越来越关心获取内容的速度，以及内容的可靠性和安全性，内容中心化正成为互联网发展的主旋律。

内容中心网络采用“从零开始”互联网体系结构设计思路，以信息名字取代 IP 地址作为网络传输标识，将关注点由内容的位置（Where）转向了内容本身（What）。内容中心网络按照“发布—请求—响应”的传输模式，采用内容信息统一命名、网内节点动态缓存、内容路由查找及未决兴趣表等方法，实现了“用户侧”内容请求的快速应答，减小了“服务侧”负载和响应率，降低了“网络侧”流量拥塞的发生概率。作为一种适应海量数据有效传输和迅速扩散的新型网络体系架构，内容中心网络得到了海内外学者的高度关注，已成为下一代互联网体系结构的研究热点。

本书主要内容：第 1 章介绍了内容中心网络的体系结构，总结了内容中心网络的研究现状、研究意义、核心特征及发展趋势；第 2 章介绍了内容命名技术，包括层次命名、扁平命名和属性命名方法，并对这三种典型命名方法进行了比较；第 3 章阐述了网内缓存技术，包括网内缓存特征、面临的问题、核心机制、性能优化技术和缓存系统建模与分析等；第 4 章介绍了路由与转发技术，包括面向内容前缀的路由、面向缓存优化的路由、面向服务质量的路由和转发信息表聚合机制等；第 5 章介绍了移动性技术，包括请求者移动性支持技术、数据源移动性支持技术及以内容为中心的无线自组织网等；第 6 章介绍了命名安全、路由与转发安全和缓存安全等问题的分析和解决思路；第 7 章介绍了软件定义网络和内容中心网络相结合的典型技术；第 8 章介绍了参数化自适应内容管线结构；第 9 章介绍了 CCNx、ndnSIM、ccnSim、Mini-CCNx 等仿真平台。

本书在编写过程中参考了国家自然科学基金课题（编号：61372121、61309019）、国家“973 计划”项目“可重构信息通信基础网络体系研究”（编号：2012CB315900）和国家重点研发计划项目（编号：2016YFB0801200、编号：2017YFB0803200）等课题组的相关技术资料，在此表示感谢。

张震博士负责本书的统筹规划，并编写了第 1 章、第 4 章和第 5 章；兰巨龙教授、王志明博士编写了第 2 章和第 3 章；伊鹏研究员编写了第 8 章和第 9 章；程国振博士、张果博士编写了第 6 章和第 7 章。另外，项目组的李根、方馨蔚、陶勇、陈龙等人为本书的文字校阅、插图绘制等做了大量工作。

由于编著者水平有限，且各种新型网络体系结构及相关技术研究仍在快速发展和完善之中，本书难免存在错误之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章	内容中心网络体系结构概述	1
1.1	现有网络体系结构现状	1
1.2	内容中心网络体系演进	4
1.2.1	DONA 体系结构	4
1.2.2	PSIRP 体系结构	5
1.2.3	4WARD 体系结构	7
1.3	内容中心网络体系结构	8
1.3.1	基本架构	8
1.3.2	核心特征	10
1.4	内容中心网络研究进展	12
1.5	内容中心网络发展前景	14
1.5.1	与现有网络兼容	14
1.5.2	当前硬件处理速度和空间约束	14
1.5.3	构建基于内容寻址的服务承载网	15
	本章参考文献	15
第 2 章	内容命名技术	18
2.1	层次命名	19
2.1.1	TRIAD	19
2.1.2	NDN	20
2.2	扁平命名	22
2.2.1	DONA	22
2.2.2	NetInf	24
2.2.3	PSIRP	26
2.3	属性命名	26
2.4	比较分析	28
2.5	小结	29
	本章参考文献	29
第 3 章	CCN 缓存技术	31
3.1	网络缓存技术的演进	31
3.2	CCN 网内缓存的四大特征	32
3.2.1	缓存泛在化	32
3.2.2	缓存透明化	32
3.2.3	缓存细粒度化	33
3.2.4	缓存处理线速化	33

3.3	CCN 缓存技术面临的问题	34
3.3.1	节点缓存空间的分配问题	34
3.3.2	请求内容的缓存决策问题	35
3.3.3	节点暂态缓存的利用问题	36
3.3.4	差异化缓存与内容分发问题	38
3.3.5	泛在缓存带来的隐私泄露问题	39
3.4	CCN 缓存核心机制	40
3.4.1	缓存系统性能优化方法	41
3.4.2	缓存系统建模与分析	41
3.5	缓存系统性能优化技术	42
3.5.1	缓存资源分配与共享	42
3.5.2	缓存替换算法	43
3.5.3	缓存决策策略	44
3.5.4	缓存方式	47
3.6	缓存系统建模与分析	47
3.6.1	缓存网络拓扑结构	48
3.6.2	请求达到速率	48
3.6.3	缓存系统状态分析	49
3.7	未来探索方向	50
3.7.1	面向移动的内容缓存	50
3.7.2	面向网络编码的内容缓存	52
	本章参考文献	53
第 4 章	CCN 路由与转发技术	59
4.1	内容路由基本原理	59
4.1.1	内部网关路由	59
4.1.2	外部网关路由	61
4.2	内容转发基本原理	63
4.3	路由转发面临的问题	63
4.3.1	路由表项规模膨胀	63
4.3.2	路由查找复杂度增高	64
4.3.3	路由转发方式具有盲目性	66
4.4	面向内容前缀的路由	67
4.4.1	命名数据链路状态路由	67
4.4.2	域内分层路由	75
4.4.3	面向控制器的路由	79
4.5	面向缓存优化的路由	83
4.5.1	内容缓存势能路由	83
4.5.2	内容缓存便捷路由	85
4.5.3	内容缓存循迹路由	90

4.6	面向服务质量的路由	92
4.6.1	服务质量路由建模	92
4.6.2	SoCCeR 蚁群路由策略	93
4.6.3	RED-ACO 蚁群路由策略	94
4.7	转发信息表聚合机制	96
4.7.1	可选下一跳聚合	96
4.7.2	具体聚合算法	97
4.8	小结	98
	本章参考文献	99
第 5 章	CCN 移动性技术	101
5.1	CCN 移动性问题概述	101
5.1.1	现有网络体系的移动性技术	101
5.1.2	CCN 支持移动性的潜在优势	102
5.1.3	CCN 在支持移动性方面存在的挑战	103
5.1.4	CCN 移动主体划分	105
5.2	请求者移动性支持技术	106
5.2.1	请求者移动性问题分析	106
5.2.2	基于缓存发现的请求者移动性解决方案	107
5.2.3	基于主动缓存的请求者移动性解决方案	110
5.3	数据源移动性支持技术	114
5.3.1	数据源移动性问题分析	114
5.3.2	基于位置管理和路由更新的数据源移动性解决方案	115
5.3.3	基于缓存的数据源移动性解决方案	118
5.4	以内容为中心的无线自组织网络	123
5.4.1	无线自组织网络简介	123
5.4.2	无线自组织网络中 CCN 的优势	124
5.4.3	未来发展方向	124
	本章参考文献	125
第 6 章	CCN 安全分析	127
6.1	CCN 安全概述	127
6.1.1	基于内容的安全	127
6.1.2	CCN 安全威胁	128
6.1.3	CCN 安全需求	128
6.2	命名安全	129
6.3	路由与转发安全	130
6.4	缓存安全	132
6.4.1	缓存安全威胁分析	132
6.4.2	缓存攻击数学模型	134

6.5 小结	140
本章参考文献	140
第 7 章 软件定义 CCN 技术	142
7.1 软件定义网络	142
7.1.1 概述	142
7.1.2 SDN 控制器	143
7.1.3 OpenFlow 南向协议	144
7.1.4 展望	145
7.2 基于 SDN 的内容中心网络体系	147
7.2.1 软件定义的 CCN 架构概述	147
7.2.2 CONET	147
7.2.3 ContentFlow 代理	148
7.2.4 I.C.N.P.的消息标识方案	149
7.2.5 Blackadder	150
7.2.6 C-Flow	151
7.2.7 SD-CCN	153
7.3 基于“SDN+NFV”模式的 CCNaaS 架构	154
7.3.1 网络功能虚拟化	154
7.3.2 CCNaaS 部署架构	156
7.3.3 CCNaaS 设计细节	157
7.3.4 CCNaaS 系统	158
7.3.5 原型实现	159
7.3.6 展望	159
7.4 小结	160
本章参考文献	160
第 8 章 参数化自适应内容管线结构	162
8.1 参数化自适应内容管线结构研究意义	162
8.1.1 研究背景	162
8.1.2 内容中心网络对参数化自适应内容管线结构的需求	163
8.2 内容管线结构详细介绍	164
8.2.1 内容特征解析	164
8.2.2 内容管线结构	165
8.2.3 管线对内容特征的自动匹配	167
8.3 内容管线研究算法	174
8.3.1 基于内容感知的 QoS 保证机理和模型	174
8.3.2 基于内容共性特征的跨层映射算法	177
8.4 小结	179
本章参考文献	180

第 9 章	CCN 仿真平台	181
9.1	CCNx 介绍	181
9.1.1	CCNx 基本介绍	181
9.1.2	CCNx 框架	185
9.1.3	CCNx 组件	186
9.1.4	CCNx 网络配置	189
9.1.5	CCNx 网包处理	191
9.2	CCNx 安装指导	193
9.2.1	CCNx 代码安装	193
9.2.2	代码开发	197
9.2.3	CCNx 库	198
9.3	ndnSIM 介绍	199
9.3.1	相关工作	199
9.3.2	ndnSIM 2.0 介绍	200
9.3.3	ndnSIM 2.0 设计	200
9.4	ccnSim 介绍	207
9.4.1	目录和流行度模型	207
9.4.2	报文和数据块	208
9.4.3	节点架构	208
9.5	Mini-CCNx 介绍	208
9.5.1	Mini-CCNx 简介	208
9.5.2	Mini-CCNx 的安装	209
9.5.3	Mini-CCNx 的使用	209
9.5.4	图形用户界面	210
	本章参考文献	211

第 1 章 内容中心网络体系结构概述

如果说使用专用线路的有线电话网络开启了人们接触通信网络的大门，那么以数据包交换为根本通信模式的互联网络的诞生则划时代地颠覆了人们的认知和生活。以 TCP/IP 为通信协议的端到端（End-to-End）网络，通过物理链路共享满足了人们对于互联互通的需求。这种本质上依旧类似于电话的端到端通信模式在一定程度上兼容异构，降低了硬件开销成本。但随着互联网的普及，数据密集型应用已然成为当今用户个性化和内容化需求的重要构成部分，而传统的端到端通信模式基于 IP 寻址、以终端为中心，缺乏有保障的数据包交换，导致传输性能和传输稳定性的低下。另外，由于 TCP 传输维持面向连接的会话（Connection-Oriented Sessions），中间节点无法实现数据复用，导致信息共享时产生大量数据冗余，网络资源的利用率较低。目前，基于 IP 网络的增补式方案或覆盖网络通过应用层“打补丁”来增强内容分发，但这种大规模的组播部署方式仍是以主机为中心，没有从根本上解决问题。为了打破当前“主机到主机”的通信模式，实现互联网数据处理的强大功能，内容中心网络（Content-Centric Network, CCN）^[1,2]作为一种革命式的新型网络体系结构应运而生。

1.1 现有网络体系结构现状

1. 信息内容服务的海量需求与网络带宽瓶颈的矛盾日益加剧

如今，人们对于流媒体等数据密集型应用的需求与日俱增，网络数据急剧膨胀，内容分发已经成为网络时代的主旋律。Cisco Visual Networking Index（2014—2019）报告显示^[3]，预计到 2019 年，全球 IP 流量将超过 2ZB（相当于 20 万亿亿（Sextillion）字节），相当于 2005 年全球 IP 流量的 64 倍。2014—2019 年间，全球 IP 流量将增加 3 倍，年均复合增长率 CAGR 将达到 23%。相比 2014 年，2019 年内容分发流量占比将由原来的 39% 提升至 62%，全球互联网人均使用流量将由 6GB 提升至 18GB。该报告还重点指出视频类流媒体业务将引领新一代消费走向，预测到 2019 年，每秒都有将近 100 万分钟的视频内容经过互联网到达用户端，其中 67% 的 IP 流量均来自非 PC 设备。互联网应用已经从硬件资源共享转型为以服务为主导的用户驱动型网络，保证服务质量、提升用户体验是目前运营商们不断突破现有技术瓶颈的根本动因。当前的 TCP/IP 架构由于网络交换和连接设备等技术瓶颈，使得数据共享与网络传输性能产生不可调和的矛盾。因此，设计一个适应海量数据有效传输和迅速扩散的新型网络体系架构迫在眉睫。

2. 端对端通信无法适应内容传播对移动性的要求

如图 1-1 所示，2016 年 1 月 CNNIC 最新发布的《中国互联网发展状况统计报告》^[4]显示，截至 2015 年 12 月，中国网民数量已达 6.88 亿，互联网普及率为 50.3%。其中，

手机网民规模达到 6.2 亿，占比提升至 90.1%，Wi-Fi 使用率达 91.8%。面对如此庞大的移动用户和多样的网络连接需求，移动宽带通信在不断重置网络连接的同时必须保证无缝对接的质量和速率，如图 1-2 所示。而端到端通信以位置为导向，无法适应当前以内容为中心的服务需求，主要体现在以下两个方面：（1）面向连接的通信协议进行数据交换必须维持面向连接的会话通道^[5]，中间节点没有存储功能，数据无法在多次会话中重复使用，在节点移动或者下线等拓扑发生变化的情况下数据共享效率较低；（2）拓扑变化的主机身份（Host-Identity）协议和移动 IP（Mobile IP）附加协议仍存在收敛速度慢和 IP 语义过载等问题，难以适应 IP 地址的移动性和扩展性，严重影响了服务质量与用户体验^[6,7]。因此，需要设计一个位置与标识分离的传输通信模式^[8]，以满足用户对移动性的需求。



图 1-1 中国互联网络发展状况统计结果

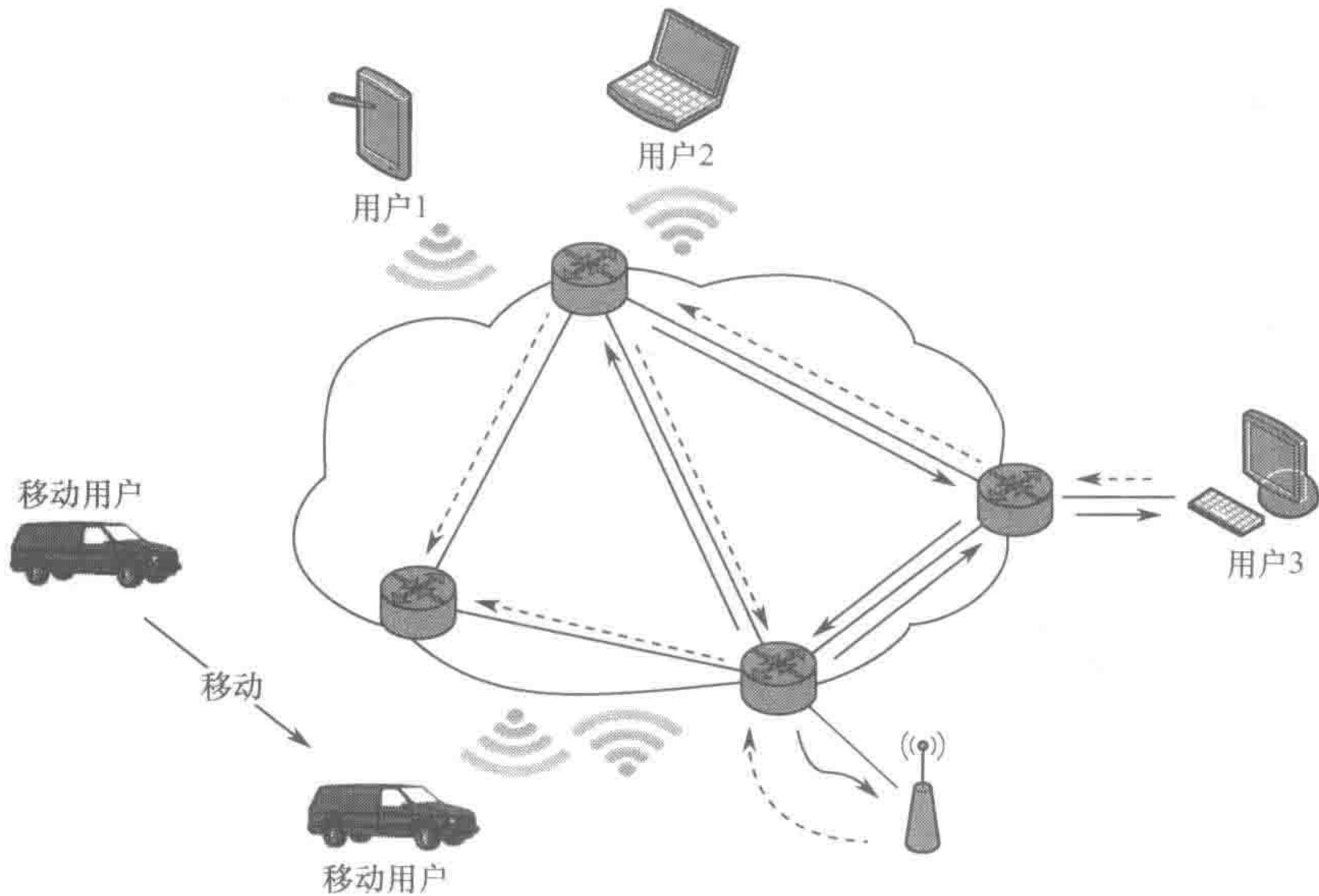


图 1-2 不同类型用户的移动性需求

3. 传统的 TCP/IP 架构难以实现可扩展性和服务质量保证

传统的 TCP/IP 架构基于端点寻址，数据包的可靠交换依赖于频繁的会话重连，容易造成网络带宽资源消耗过度，形成传输拥塞。当前典型的解决方法是通过在应用层搭建覆盖网络，如内容分发网络（Content Distribution Network，CDN）^[9]和对等网络（Peer-to-Peer，P2P）^[10]。这些叠加式的升级方式虽然在一定程度上缓解了内容分发和共享问题，特别是 CDN 的分布式存储在应对网络拥塞的问题上具有天然的优势，但其根本上仍是基于 TCP/IP 网络的传输模式，无法克服其自身固有的缺陷，即大量部署基础设施带来了高昂的成本，采用基于中央控制的统一调控技术导致管理复杂度的增加，使用专用网络虽能保证访问安全性却也带来了数据共享的难题。表 1-1 列出了 CCN、P2P 和 CDN 的对比分析。

表 1-1 CCN、P2P 和 CDN 的对比分析

类 别	CCN	P2P	CDN
协议类型	以内容为中心； 兴趣包驱动； 路由策略灵活多样； 容错、容断； 管理要求低	基于连接； 端到端通信； 动态调节； 抖动性高； 统一调控，管理要求高	基于连接； 层次化； 静态部署； 适度动态规划； 管理要求高
体系架构	去中心化； 对上层友好； 可靠性、普适性和可用性高； 大规模处理能力	结构化或混合型； 应用层覆盖网络； 依赖应用程序； 可用性一般，普适性差	星形、树形拓扑； 应用层覆盖网络； 依赖应用程序； 可用性高，普适性差
带宽消耗	支持多径路由	易形成拥塞	边缘收益大
缓存方式	网内节点处处缓存	应用层覆盖方式	边缘节点缓存方式

4. 以内容为中心的新型网络更适应以用户服务为主导的新时代通信

在当前以用户为驱动核心、以服务为主导的新互联网时代，用户并不关心内容的来源与传输方式，而在意内容传递的速度与质量。在 TCP/IP 架构上进行的叠加式的升级改进，并不能适应多样的网络层功能，网络更加复杂。以主机为中心的网络架构难以适应海量信息的高效传输，设计一种革命式的、能打破端到端通信模式的新型网络体系结构，才是行之有效的解决方案。因此，以内容为中心的新型互联网“从零开始”，得到了广泛的关注。目前，典型的内容中心网络架构包括：美国伯克利大学提出的“面向数据的网络体系架构”（Data-Oriented Network Architecture，DONA）^[11]；芬兰赫尔辛基科技大学和赫尔辛基信息技术研究院提出的“发布-订阅式互联网路由范例”（Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm，PSIRP）^[12]；欧盟 FP7 资助的 4WARD^[13]；由加州大学洛杉矶分校牵头开展的研究项目 CCN（Content-Centric Network）^[1,2]和 NDN（Named Data Network）^[14]。其中，CCN 作为以内容为中心的新型网络体系结构的典型代表，将内容作为传输的关注点和基本单元，取代 IP 地址作为细腰的沙漏形结构，融入安全特征和流量自我调节，得到了海内外学者的高度关注，已成为下一代互联网体系结构研究的热点。CCN 演进示意图如图 1-3 所示。

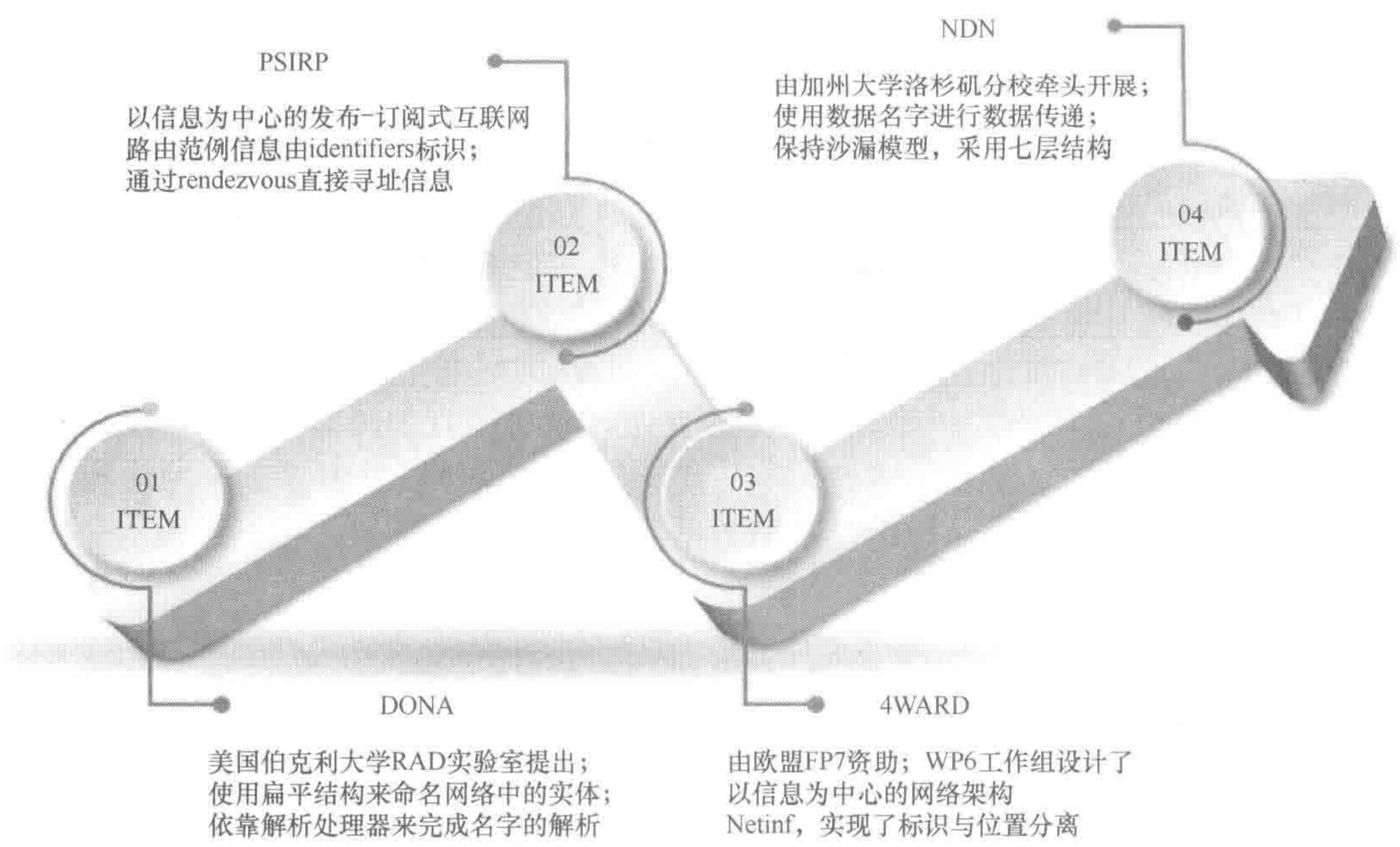


图 1-3 内容中心网络演进示意图

1.2 内容中心网络体系演进

1.2.1 DONA 体系结构

DONA (Data-Oriented Network Architecture)^[11]是由美国伯克利大学 RAD 实验室提出的以信息为中心的网络体系架构。DONA 对网络命名系统和名字解析机制做了重新设计, 替代了现有的 DNS, 使用扁平结构、Self-Certifying 名字来命名网络中的实体, 依靠解析处理器(Resolution Handler)来完成名字的解析, 解析过程通过 FIND 和 REGISTER 两类原语实现。

DONA 的命名系统是围绕当事者进行组织的。每个当事者都拥有一对“公开-私有”密钥, 且每个数据或服务或其他命名的实体(主机、域等)都和一个当事者相关联。名字的形式是 P:L, P 是当事者的公开密钥的加密散列, L 是由当事者选择的一个标签, 当事者应确保这些名字的唯一性。当一个用户用名字 P:L 请求一块数据并收到三元组<数据, 公开密钥, 标签>后, 他可以通过检查公开密钥的散列 P 直接验证数据是否确实来自当事者, 且标签也是由这个密钥产生的。

DONA 的名字解析使用名字路由的范式。DONA 的名字解析通过使用两个基本原语 FIND (P:L) 和 REGISTER (P:L) 实现。一个用户发出一个 FIND (P:L) 分组来定位命名为 P:L 的对象, 且名字解析机制把这个请求路由到一个最近的副本, 而 REGISTER 消息建立名字解析的有效路由所必需的状态。每个域管理实体都将有一个逻辑 RH, 当处理 REGISTER 和 FIND 时, RH 用本地策略。用户通过一些本地配置了解自己本地 RH 的位置。被授权用名字 P:L 向一个数据或服务提供服务的任何机器向它本地的 RH 发送一个 REGISTER (P:L) 命令, 如果主机向当事者关联的所有数据提供服务(或转发进入的 FIND 分组给一个本地副本), 则注册将采用 REGISTER (P:*) 的形式。每个 RH 都

维护一个注册表 (Registration Table)，将名字映射到下一跳 RH 和副本的距离 (也就是 RH 的跳数或一些其他向量)。除了各种 P:L 的单个条目外，P:*有一个单独的条目。RH 采用最长前缀匹配法，如果一个 P:L 的 FIND 请求到达，且有一个 P:*的条目而没有 P:L 的，RH 就会使用 P:*的条目；当 P:*的条目和 P:L 的条目都存在时，RH 会使用 P:L 的条目。当一个 FIND (P:L) 到达时，转发规则是：如果注册表中存在一个条目，则 FIND 将被发送到下一跳 RH (如果有多个条目，则根据本地策略选择一个最接近的条目)；否则，即 RH 是多宿主的，RH 将把 FIND 转发到它的双亲 (如它的供应者)，使用它的本地策略来选择，其过程如图 1-4 所示。

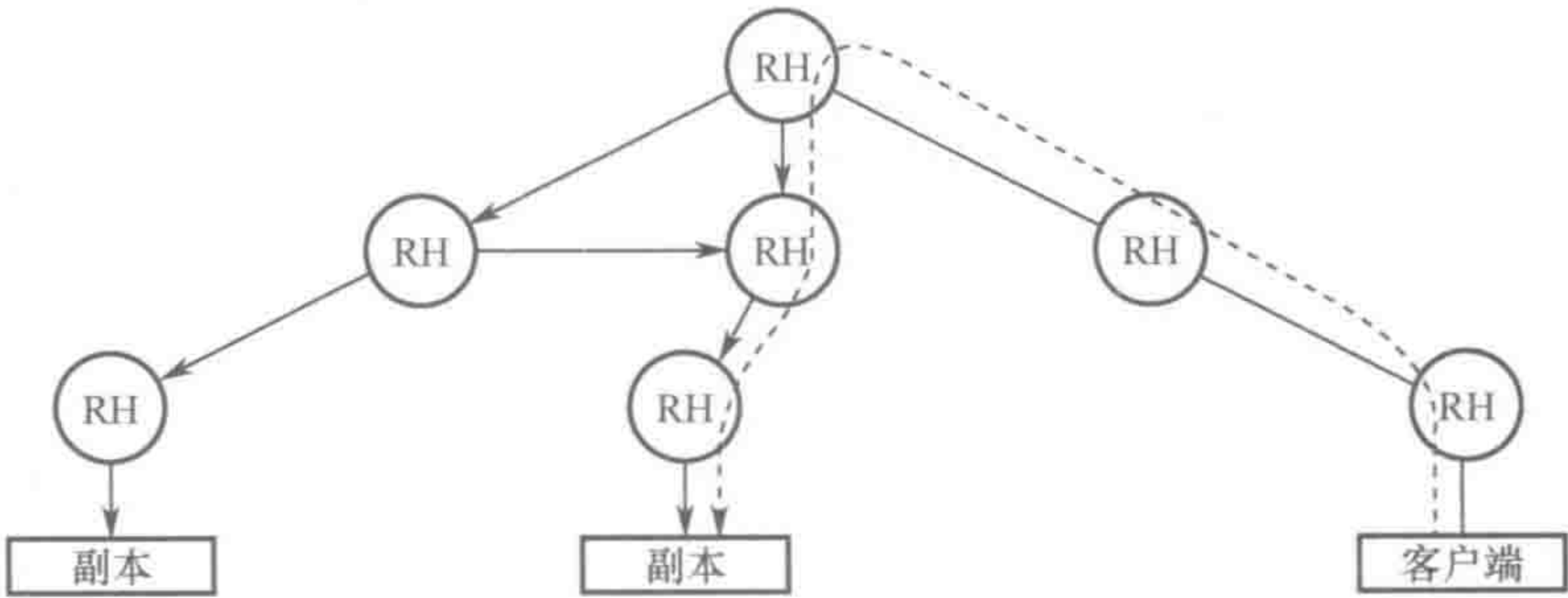


图 1-4 DONA 的名字路由过程示例

FIND 分组的格式如图 1-5 所示。DONA 相关的内容插入为 IP 和传输头部之间的一个填充片。DONA 提供的基于名字的路由确保数据分组到达一个合适的目的地。如果 FIND 请求到达一个 1 级 AS 且没有找到有关当事者的记录，那么 1 级 RH 会返回一个错误消息给 FIND 信息源。如果 FIND 没有定位一个记录，对应的服务器就会返回一个标准传输级响应，为了实现这个目的，传输层协议应绑定到名字而不是地址上，其他方面不需要改变。同样地，当请求传输时，应用协议需要修改为使用名字而不是地址。事实上，当在 DONA 上实现时，许多应用变得简单。例如 HTTP，注意到 HTTP 初始化中唯一关键的信息是 URL 和头部信息；考虑到数据已经在低层命名，不再需要 URL，同时，如果给定数据的每个变量都有一个单独的名字，头部信息页就变得多余。接收到 FIND 后发生的数据分组的交换不是由 RH 处理的，而是通过标准 IP 路由和转发被路由到合适的目的地。在这种意义上，DONA 并不需要 IP 基础结构的修改。

IP头部	
Type	Name (P:L, 40 byte)
	Next Header Type
Transport Protocol Header	

图 1-5 FIND 分组的格式

1.2.2 PSIRP 体系结构

PSIRP (Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm)^[12]是从 2008 年 1 月到 2010 年 9 月由欧盟 FP7 资助开展的项目。PSIRP 旨在建立一个以信息为中心的发布-订阅式互联

PSIRP 网络体系采用分域结构, 每个域至少有三类逻辑节点: 拓扑节点 (TN)、分支节点 (BN) 和转发节点 (FN)。其中, TN 负责管理域内拓扑、BN 间的负载平衡, TN 将信息传递给域的 BN; BN 负责将来自订阅者的订阅信息路由到数据源并缓存常用内容, 如果有多个订阅者同时请求相同的发布信息, 分支节点就会成为转发树的分支点将数据复制给所有接收者, 并将缓存用作中间拥塞控制点来支持多速率多播拥塞控制; FN 采用布隆过滤器实现简单、快速转发算法, 几乎没有路由状态, FN 也周期性地将它的邻接信息和链路负载发送给 BN 和 TN。

PSIRP 处理发布-订阅的基本过程如图 1-6 所示。第一，授权的数据源广播潜在发布信息集合。第二，订阅者向本地 RN (Rendezvous Network) 发送一个请求，请求由<Sid, Rid>对识别的发布信息。如果（缓存的）结果订阅者在本地 RN 中找不到，则汇聚信息被发送给 RI (Rendezvous Interconnect)，RI 将其路由到其他 RN。第三，订阅者接收到数据源集合和它们的当前网络位置，这些可用来将订阅信息路由到数据源。第四，向分支点发送的订阅信息形成一个转发树中新的分段。如果在中间缓存中找到发布信息，则它将被直接发回给订阅者。第五，用创建好的转发路径，发布信息被传送给订阅者。通过重新订阅发布信息的缺失部分可以获得可靠的通信。

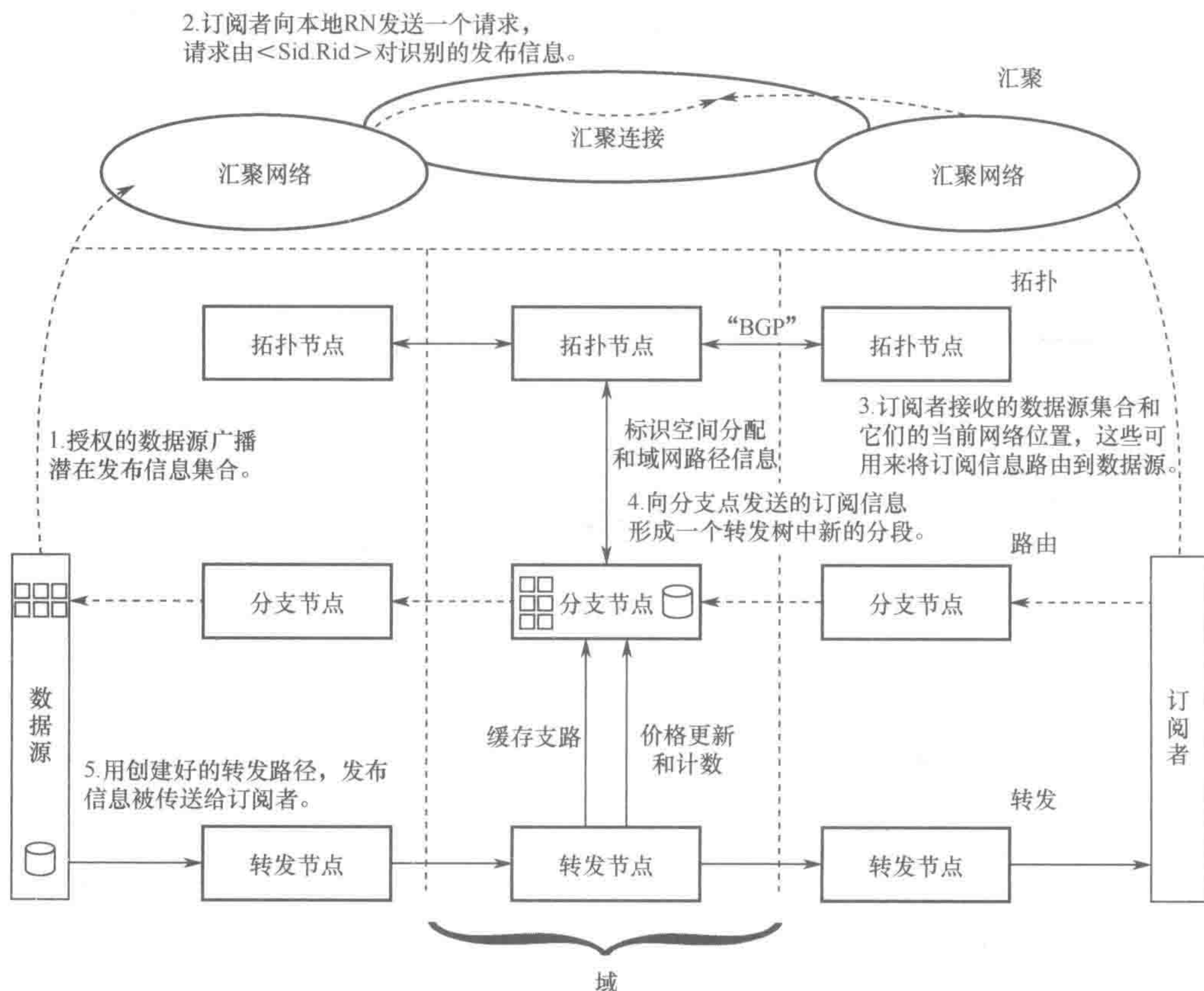


图 1-6 PSIRP 处理发布-订阅的基本过程

PSIRP 体系结构包括四个不同的部分：汇聚、拓扑、路由、转发。

汇聚系统在发布者和订阅者之间扮演中间人的角色。基本上，它是以一种位置独立的方式给订阅者匹配正确的发布信息。利用管理物理网络拓扑信息的拓扑功能提供的帮助，每个域都能够在出错的情况下配置自己内部和外部的路由并平衡网络的负载。路由的功能是负责为每个发布信息和在域内分支点缓存的常用内容都建立和维护转发树。最后，真实的发布信息用转发函数沿着有效的转发树发送给订阅者。

拓扑的管理功能复杂，其功能是选择域间路由来传送发布信息。每个域都有自己的拓扑管理功能，且每个域之间都互相交换域内的连接信息，与 BGP 类似。

PSIRP 采用布隆过滤器作为转发识别器，称为 zFiler。布隆过滤器是一个概率数据结构，允许一个简单的 AND 操作用来测试过滤器在一个集合中是否适用。基本上，每个网络链路都有一个自己的标识符，且布隆过滤器是由位于要求路径的所有链路标识符执行 OR 操作构成的。由于转发决定可以通过给予一个简单的 AND 操作做出而不需要使用一个大型转发表，布隆过滤器使用非常简单有效的路由器。zFilter 一个有趣的特性是只有网络链路具有标识符，网络节点并没有网络层标识符，因此与 IP 地址没有任何等价之处。

1.2.3 4WARD 体系结构

由欧盟 FP7 资助的 4WARD 项目的目标是研发新一代可靠的、互相协作的无线和有线网络技术。4WARD 项目的 WP6 工作组设计了一个以信息为中心的网络架构：NetInf (Network of Information) [13]。NetInf 关注高层信息模型的建立，实现了扩展的标识与位置分离，即存储对象与位置的分离。

信息在信息中心网中扮演着关键的角色，因此，表示信息的合适的信息模型是必需的，且必须支持有效的信息传播。为使信息访问从存储位置独立出来并获益于网络中可以得到的复制，信息网络需要建立在标识/位置分离的基础上。因此，需要一个用来命名独立于存储位置的信息的命名空间。此外，维护并分解定位器和识别器间的绑定需要一个名字解析机制。

1. 信息模型

NetInf 将信息作为网络的头等成员，使用一种所谓信息对象 (Information Object, IO) 的形式。IO 在信息模型中表示信息，如音频和视频内容、Web 页面和电子邮件。除了这些明显的例子，IO 也可以表示数据流、实时服务、(视频) 电话数据和物理对象，这些都归功于信息模型灵活通用的本质。一种特殊的 IO 就是数据对象 (Data Object, DO)。DO 表示一种特殊的位级别对象，如某个特定编码的 MP3 文件，也包括这些特定文件的副本。通过存储复制的定位器，一个 DO 集合了 (一些或) 所有某个特定文件的副本。元数据能够进一步表示 IO 的语义，如描述它的内容或与其他对象的关系。这一领域的现有研究为将这些特征整合入网络层中提供了很好的起点，特别是相关描述语言，如资源描述框架 (Resource Description Framework) 或创建 IO 之间的关系。

2. 命名及名字解析

名字解析 (Name Resolution, NR) 机制将 ID 分解为一个或多个位置，NR 应在全球范围内运行，以确保为世界范围内任何可获得的资源进行正确解析。NR 也可以在一个

不连接的网络中运行，如果一个数据对象是局部可获得的，则称为局部解析特性（Local Resolution Property, LRP）。通过支持多个共存的 NR 实现 LRP，一些控制全球范围，另一些控制局部范围。换句话说，识别任何世界范围内 ID 的 NR 系统都可以很自然地与处理局部范围内 ID 的 NR 系统共存。

NetInf 命名空间的特性将影响 NR 机制的选择。NetInf 命名空间的重要属性是名字的持久性和内容的无关性。这些属性可以通过使用平级的命名空间来实现。平级的命名空间基于一种分级的结构且相应地要求一个分级的命名空间。对平级名字来说，分布式散列表（Distributed Hash Table, DHT）是平级名字的一种很友好的方法。DHT 是分散且高度可扩展的，减少了对管理实体的需求。DHT 的典型应用是 P2P 覆盖网的小型路由协议（如 Chord、Pastry、Tapestry、CAN、Kademlia 等），DHT 可以在数跳由内路由信息，路由表只需要转发状态。

3. 路由

路由可以使用传统的基于拓扑的方案，如基于最短路径转发的分级路由，如目前互联网使用的协议（包括 OSPF、IS-IS、BGP 等），或一个基于拓扑结构的紧凑路由方案。但是，由于现实网络的拓扑是非静态的，无法达到对数级缩放的目标，路由研究的结果并不令人振奋。事实上，网络通信的成本也是动态变化的，通常以很高的速率增长。另外，可以使用基于名字的路由整合解析路径和检索路径，这可能会获得较好的性能。

1.3 内容中心网络体系结构

1.3.1 基本架构

CCN 作为一种革命式（Clean-Slate）的新型网络结构，以信息名字取代 IP 地址作为网络传输标识，将关注点由内容的位置（Where）转向了内容本身（What）。传输模式改“推”为“拉”，以用户的意愿和请求为主导。CCN 对内容进行统一标识，采用“发布-请求-响应”模式，直接根据内容名进行定位、路由和传输，更加契合了未来互联网的发展需求。

CCN 的通信主要依靠两类传输包，即兴趣包（Interest Packet）和数据包（Data Packet）。请求者发送名字标识的兴趣分组，收到请求的路由器记录请求来自的接口，查找 FIB 表转发此兴趣分组。兴趣分组到达有请求资源的节点后，包含名字、内容及发布者签名的数据分组沿着兴趣分组的反向路径传送给请求者。在通信过程中，兴趣分组和数据分组都不带任何主机或接口地址。兴趣分组是基于分组中的名字路由到数据提供者的，而数据分组是根据兴趣分组在每一跳建立的状态信息传递回来的，二者的格式如图 1-7 所示。

CCN 的最大特点是网内节点具有一定的缓存功能，且与上层应用无关（Application Independent）。接收端（Receiver-End）向上行节点发送包含内容名的兴趣包来请求数据，若沿途节点存储有相应的数据包，则可直接沿原路径反向到达用户端进行响应，无须执行任何路由转发策略，也无须与接收端进行直接的网络连接。因此，CCN 不依赖于 TCP/IP 的连接会话，也不同于 IP 执行的开环数据传输，CCN 采用反馈式的逐跳（Hop-by-Hop）流量平衡机制，仅通过控制 Interest 包转发的上行路径就可以控制网络中的流量布局，防止网络带宽过度消耗，减少数据重传。