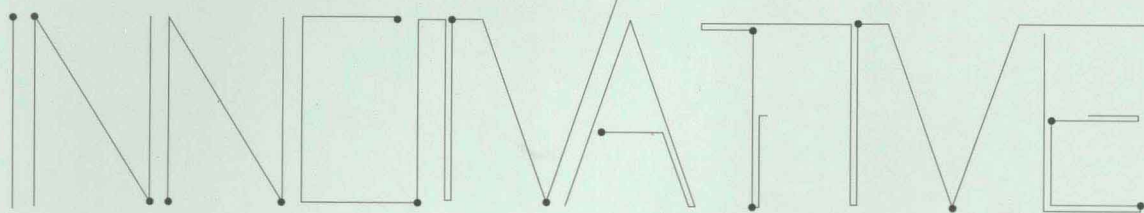




创新技术学术专著



# 高扩展性 IP 融合网络 服务质量协调保证机制

Scalable and Coordinated Mechanisms on Guaranteeing QoS  
in Converged IP-based Communication Networks

杨强 王滨 著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



创新技术学术专著



# 高扩展性 IP 融合网络 服务质量协调保证机制

Scalable and Coordinated Mechanisms on Guaranteeing QoS  
in Converged IP-based Communication Networks

杨强 王滨 著



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

高扩展性IP融合网络服务质量协调保证机制 / 杨强,  
王滨著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013. 9  
ISBN 978-7-115-32538-9

I. ①高… II. ①杨… ②王… III. ①通信网—网络  
服务—服务质量—研究 IV. ①TN915

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第156918号

## 内 容 提 要

本书重点介绍了基于主动队列管理和流量工程方式相结合的IP网络服务质量协调保证机制,并在此基础上延伸至网络虚拟化环境下的网络资源适配和优化机制以及服务质量的保证方法。首先为读者介绍了面向IP网络承载业务的服务质量保证理论与技术的研究背景和发展现状。随后提出了一种基于可灵活配置的主动队列管理算法和优化配置的IP-TE技术相结合的协调保障机制,并分别从通信网络节点队列为控制机制和路由行为控制与优化2个重要支撑技术进行了重点阐述和理论分析。然后,分别针对典型通信网络运营场景,对所提出的协调保证方法进行充分的实验验证和分析,包括单一业务逻辑承载情形、面向多业务融合的业务承载情形和动态网络不确定性条件下的服务质量保证机制,以及网络资源劣化下分级服务保证机制。随后结合当前网络虚拟化技术和理论进展,对网络虚拟化业务承载下的服务质量保证方法以及基于顽健优化的虚拟网动态带宽提供策略方面进行了充分的理论阐述和实验验证。

本书适合于高等院校和研究机构中从事大规模通信网络规划和分析领域的相关技术的科研人员,也可作为高等院校计算机网络、电子通信等专业硕士、博士研究生的参考书。

---

◆ 著 杨 强 王 滨  
责任编辑 代晓丽  
责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 15.5  
字数: 368千字

2013年9月第1版  
2013年9月北京第1次印刷

---

定价: 68.00元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

# 前 言

互联网应用已经渗透到了人类日常生活的各个方面，其网络规模和用户数量巨大，网络特性日趋复杂多样。当前，随着以因特网为重要代表的计算机互联网络相关技术的不断革新和基础通信设施规模的日益发展，传统数据业务与多媒体业务的逐渐融合已成为现实。由于传统网络的尽力服务体系使得多媒体业务的端到端传输服务质量难以得到有效的保证，无法满足期望的用户体验。信息通信网络所依赖的基础互联传输能力及其机制是制约整个信息网络整体功能的瓶颈，而且网络内在的能力与结构对业务需求的适应性较差，这将导致网络对各类型业务融合、泛在、质量、安全、扩展、可控、移动等的支持能力低下，使得业务需求与网络支撑能力之间的差距愈发显著。尽管学术界和工业界在过去 10 年中通过不断的基础理论和技术创新已相继提出了若干技术解决方案，如集成服务（IntServ）、区分服务（DiffServ）、多协议标签交换（MPLS）、流量工程（Traffic Engineering）等来进行网络通信资源预留、业务服务优先级和流量负载控制，但由于这些保障机制的部署和管理的高度复杂性，使得仍然很难提供透明的端到端性能保证，且在大规模网络中难以扩展和部署。因而，具有高度可扩展性的服务质量保障机制相关的理论和技术已成为国际上研究下一代互联网体系结构和服务的重要方向之一，并逐渐成为网络研究领域的一个前沿热点问题，对其开展深入的理论和应用研究具有重要的理论价值和现实意义。

TCP/IP 协议作为当今信息网络共同的基础承载机制，由于其设计之初针对的是满足互联网络中的数据传输需求，因而信息网络不能从根本上满足提供泛在的信息服务、互联多样化的异构网络、支持多样化和全方位的网络业务、具备高质量的通信效果、确保信息交互的安全可信、实施有效的管理控制等迫切需求。另一方面，人们为了填补网络传输能力与业务需求的鸿沟而付出的增强网络功能的各种努力均建立在不改变 TCP/IP 承载能力的基础上，这又必然导致这类增强是修补式的，没有与核心功能有效融合。

随着网络逐步成为国家信息基础设施最为重要的组成部分，网络薄弱的基础能力与业务对网络日益提高的要求之间的差距必然日益扩大，已经严重影响到通信网络业务承载和服务质量的问题。为了能够推动互联网技术和应用的进一步发展，必须对大规模信息网络中易于部署和管理的服务质量保障机制进行全面地分析和研究，为新型技术与服务地研究和部署以及网络的高效运营提供有效保障。

本书重点介绍和总结国内外大规模通信网络下的多媒体服务质量保障机制的重大理



论研究成果及前沿发现,全面详细地阐述其面临的独特技术挑战和解决方案。本书中结合作者近年来科研工作的最新发现和实践,提出了一种基于可灵活配置的主动队列管理算法和优化配置的 IP-TE 技术相结合的高扩展服务质量协调保障机制,为深入研究互联网技术和网络多媒体服务质量保证提供了一种创新性的技术思路和方法,并从当前互联网体系架构发展的特点和趋势的角度,阐述了面向业务逻辑承载和网络资源优化的服务质量保证思路。本书详细阐述了相关关键支撑技术和对大规模网络中的多媒体服务质量保证的相关理论。首次提出了通信网络节点中主动队列管理算法对多媒体通信网络业务服务质量保证的有效性理论,并提出了较为严格的数学模型和理论验证。该理论很大程度上改变了学术界长久以来的观点,即 AQM 仅对具有网络拥塞响应控制机制的传输协议有效,而对多媒体业务为代表的弹性流量无意义。所提出的理论和数学模型以及针对 VoIP 流的实验验证等学术成果已发表在 IET 和 IEEE 重要国际期刊和学术会议上,该方法无需对目前已有的 TCP/IP 传输机制的互联网体系架构进行调整,实际大规模网络部署和管理机制复杂度低、兼容性强,且具有高度可扩展性和灵活的可配置性,因而易于在大规模尺度互联网络中进行部署。此书具体涉及网络环境下的主动队列管理算法及其建模方法和理论、路由行为控制与优化算法,以及网络虚拟化情况下的逻辑承载思想和资源优化管理与适配方法,通过大量的仿真实验结果和理论分析对提出的方法进行了全面地解读和验证。此书中的内容可为大规模网络的网络规划、性能评价和运营提供有价值的参考和借鉴。

本书的主要内容以作者在英国伦敦大学攻读博士学位、英国伦敦帝国理工学院从事博士后研究,以及在浙江大学教学与科研工作期间在计算机网络研究方向上的科研成果的一个初步系统地表述。其中,所涉及的研究内容包含了作者本人和学术合作者们近年来的共同研究成果,包括理论方面的探索、工程技术应用方面的创新,同时也是作者在过去若干年中所参与承担相关科研课题的成果汇总。这些科研课题包括欧盟信息社会技术计划 (IST) 研究项目 “ADAMANT” (EU IST-39117) 和英国工程和自然科学研究委员会 (EPSRC) 资助的科研课题 “超大规模信息网络全局建模和假使性能分析” (GR/T18615)。同时,本书所阐述的内容包括了作者进入浙江大学工作后所承担的一系列在该研究领域的国家级课题研究成果,包括国家自然科学基金青年基金项目 “微电网多尺度时空规划与调度耦合的能量优化管理机制的研究” (51107113), “面向突发毁击事件的 IP 网络路由自愈方法研究” (61103200), “服务适配的虚拟网资源配置与管理机制研究” (61070157) 和国家 “973” 课题 “可重构信息通信基础网络体系研究” (2012CB315903)。

需要特别说明的是,本书在撰写过程中得到了作者导师、科研工作的同事和研究生

的鼓励和支持，没有他们的悉心指导与热情协助，便不会有本书的顺利出版。希望借此机会向他们表达深深的谢意，其中包括作者在留英期间的两位导师：英国伦敦大学玛丽女王学院电子工程与计算机学院计算机网络研究中心主任 Jonathan M. Pitts 教授，英国伦敦帝国理工学院电子与电气工程系智能系统与网络研究中心的 Javier A. Barria 教授，以及在浙江大学工作期间密切合作的浙江大学新一代网络实验室主任、“863”信息领域专家组成员吴春明教授。感谢他们对作者科研工作期间以及本书撰写过程中所提出的建设性意见和细致的审读。浙江大学电气工程学院电气自动化研究所颜文俊教授对作者在工作期间提供了无私的指导和热心的关怀。同时，浙江大学计算机科学与工程学院新一代网络技术研究实验室张旻博士、电气工程学院电气自动化研究所房新力博士参与了本书中部分章节的编辑工作，向他们的工作表示感谢。

同时向代晓丽女士表示衷心感谢，正是她的不断积极推动和协助才最终完成了本书的出版，并且感谢她在本书的撰写过程中所表现出的极大耐心和严谨态度。

本书受到“浙江省科学技术协会育才工程计划”的重点资助，在此深表谢意。

最后，我要衷心感谢我的妻子，感谢她给予我留英期间学业和工作上的支持、精神上的鼓励和生活上的关心，同时把本书献给我刚刚出生的女儿 IVY。

由于作者科研水平有限，本书中的缺点、疏漏在所难免，希望得到广大专家、读者的批评和指正。

杨强

2013 年 3 月 20 日

于浙大求是园

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 问题与挑战 .....              | 1  |
| 1.2 服务质量保证与评价 .....          | 2  |
| 1.2.1 服务质量保证 .....           | 3  |
| 1.2.2 服务质量评价 .....           | 4  |
| 1.3 学术贡献与组织方式 .....          | 5  |
| 第 2 章 服务质量研究现状与趋势 .....      | 8  |
| 2.1 服务质量概念 .....             | 9  |
| 2.2 综合服务和区分服务模型 .....        | 9  |
| 2.3 基于标签交换的 QoS 技术 .....     | 13 |
| 2.4 面向服务质量的网络测量 .....        | 14 |
| 2.4.1 服务质量测量技术 .....         | 15 |
| 2.4.2 服务质量测量模型 .....         | 15 |
| 2.4.3 服务质量测量的应用 .....        | 16 |
| 2.5 服务质量性能指标 .....           | 17 |
| 2.5.1 业务分组延迟 .....           | 17 |
| 2.5.2 分组延迟抖动 .....           | 18 |
| 2.5.3 分组丢失率 .....            | 19 |
| 2.6 E-模型—端到端话音业务质量评价模型 ..... | 19 |
| 2.7 业务分组队列管理机制 .....         | 22 |
| 2.7.1 先入先出缓冲机制 .....         | 22 |
| 2.7.2 主动队列管理机制 .....         | 23 |
| 2.7.3 RED 算法及其改进算法 .....     | 24 |
| 2.8 业务分组调度策略与机制 .....        | 27 |



|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 2.8.1 调度算法概述 .....                 | 27        |
| 2.8.2 队列调度算法的性能指标 .....            | 28        |
| 2.8.3 常用调度算法的比较 .....              | 29        |
| 2.9 IP 路由和 MPLS .....              | 31        |
| 2.9.1 算法复杂性 .....                  | 31        |
| 2.9.2 基于链路状态的 OSPF 路由算法 .....      | 32        |
| 2.9.3 面向连接的多协议标签交换 (MPLS) 技术 ..... | 34        |
| 2.10 服务质量 (QoS) 路由和其复杂性 .....      | 36        |
| 2.10.1 基于服务质量指标的路由机制 .....         | 36        |
| 2.10.2 QoS 路由的复杂性 .....            | 37        |
| 参考文献 .....                         | 39        |
| <b>第 3 章 通信网络节点队列行为控制机制 .....</b>  | <b>43</b> |
| 3.1 RED 主动队列管理机制 .....             | 43        |
| 3.2 M/M/1/RED 理论在 VoIP 中的应用 .....  | 46        |
| 3.3 网络性能评价和分析 .....                | 54        |
| 3.3.1 仿真实验场景 .....                 | 54        |
| 3.3.2 实验研究 I: 单服务单跳的网络场景 .....     | 56        |
| 3.3.3 实验研究 II: 单服务端到端的网络场景 .....   | 69        |
| 3.3.4 实验研究 III: 多服务端到端的网络场景 .....  | 73        |
| 3.4 本章小结 .....                     | 79        |
| 参考文献 .....                         | 80        |
| <b>第 4 章 通信网络路由行为控制与优化 .....</b>   | <b>82</b> |
| 4.1 相关研究工作进展 .....                 | 83        |
| 4.1.1 基于 MPLS 的流量工程 .....          | 84        |
| 4.1.2 基于 IP 的流量工程 .....            | 85        |
| 4.1.3 IP-TE 的技术优势 .....            | 87        |
| 4.2 IP-TE 的实现 .....                | 88        |
| 4.2.1 测量: 网络配置参数和流量矩阵 .....        | 89        |
| 4.2.2 路由计算与路由矩阵 .....              | 90        |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 4.2.3 计算与优化: 路由权值重构 .....                     | 90         |
| 4.3 OSPF-TE 链路权值优化配置问题 .....                  | 91         |
| 4.3.1 问题定义 .....                              | 91         |
| 4.3.2 启发式算法设计 .....                           | 92         |
| 4.4 网络仿真实验与性能评价 .....                         | 94         |
| 4.4.1 性能评价指标 .....                            | 95         |
| 4.4.2 OSPF-TE 和其他 OSPF 路由策略的比较 .....          | 95         |
| 4.4.3 OSPF-TE (离线式) 与 MPLS-TE (在线式) 的比较 ..... | 100        |
| 4.4.4 OSPF-TE 的假使分析评估 .....                   | 106        |
| 4.4.5 OSPF-TE 路由权值范围选择 .....                  | 109        |
| 4.5 OSPF-TE 在 DiffServ 中的应用 .....             | 114        |
| 4.6 本章小结 .....                                | 118        |
| 参考文献 .....                                    | 120        |
| <b>第 5 章 单一业务逻辑承载下的服务质量保证 .....</b>           | <b>122</b> |
| 5.1 仿真实验场景 .....                              | 122        |
| 5.2 业务流量矩阵构建 .....                            | 124        |
| 5.3 网络仿真实验与性能评价 .....                         | 127        |
| 5.3.1 网络资源利用效率 .....                          | 127        |
| 5.3.2 服务质量性能评价与分析 .....                       | 129        |
| 5.4 本章小结 .....                                | 139        |
| <b>第 6 章 面向多业务融合的服务质量保证机制 .....</b>           | <b>141</b> |
| 6.1 仿真实验场景 .....                              | 143        |
| 6.2 网络业务流量分析 .....                            | 145        |
| 6.3 网络仿真实验与性能评价 .....                         | 148        |
| 6.4 本章小结 .....                                | 159        |
| <b>第 7 章 动态网络不确定性及服务质量保证 .....</b>            | <b>160</b> |
| 7.1 当前研究进展与分析 .....                           | 161        |
| 7.2 动态通信网络场景 .....                            | 162        |



|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 7.2.1 实验通信网络模型 .....                | 162        |
| 7.2.2 业务流量需求模型 .....                | 164        |
| 7.3 网络仿真实验与性能评价 .....               | 165        |
| 7.3.1 拓扑动态变化时的网络性能评价 .....          | 166        |
| 7.3.2 动态流量需求变化下的网络性能评价 .....        | 173        |
| 7.4 本章小结 .....                      | 179        |
| 参考文献 .....                          | 179        |
| <b>第 8 章 网络劣化下分级服务保证机制 .....</b>    | <b>181</b> |
| 8.1 网络资源劣化与服务质量保证 .....             | 181        |
| 8.2 仿真实验场景 .....                    | 184        |
| 8.3 分组排队行为控制和路由行为优化机制 .....         | 185        |
| 8.4 网络仿真实验与性能评价 .....               | 186        |
| 8.5 本章小结 .....                      | 191        |
| 参考文献 .....                          | 192        |
| <b>第 9 章 网络虚拟化业务承载与服务质量保证 .....</b> | <b>193</b> |
| 9.1 网络虚拟化的研究现状和主要问题 .....           | 194        |
| 9.1.1 基于物理网络资源优化利用的虚拟网构建方法 .....    | 195        |
| 9.1.2 虚拟网调整策略 .....                 | 197        |
| 9.1.3 网络资源管理 .....                  | 197        |
| 9.2 面向多播业务的虚拟网构建方法研究 .....          | 198        |
| 9.2.1 已有相关研究成果 .....                | 198        |
| 9.2.2 网络模型与问题描述 .....               | 199        |
| 9.2.3 多播虚拟网构建算法设计与实现 .....          | 200        |
| 9.2.4 网络仿真实验与性能评价 .....             | 205        |
| 9.3 基于顽健优化的虚拟网动态带宽提供 .....          | 208        |
| 9.3.1 研究现状和重要问题 .....               | 210        |
| 9.3.2 问题建模与描述 .....                 | 210        |
| 9.3.3 流量矩阵区间估计 .....                | 211        |
| 9.3.4 顽健带宽提供建模及算法设计 .....           | 213        |



# 第 1 章 绪论

## 1.1 问题与挑战

最近的 20 年来,互联网技术的迅猛发展和大量实时性应用和业务的快速涌现给计算机网络领域的学术界和工业界所带来的发展机遇和技术挑战都是前所未有的。在全世界范围内,因特网服务提供商(Internet Service Provider, ISP)的群体日益空前庞大,其所承载的具有不同需求的业务应用种类也日益多样。当前的互联网发展呈现出了诸多的新特点:首先,协议与标准从差别到统一,基于 IP(Internet Protocol)的网络和设备将成为了通信网络的主体。IP 网络和设备将成为未来互动视频、话音业务和数据通信的主要载体,提供无时无刻不在的个性化通信服务。有线通信系统、无线通信系统以及多种无线通信技术手段相互之间的不断深度融合,例如蜂窝通信网络(Cellular Network)、卫星通信网络(GEO/LEO)与地面互联网通信系统、无线传感网络系统的不断融合和统一。通信网络的接入方式从单一到多重,带宽与地址资源从稀缺到丰富。除了地址空间,IPv6 在服务质量、传送速度、通信安全性、支持移动性和多播等方面均有极大提高。同时,网络所承载的业务内容更为多元化,实现了多媒体应用的超速增长和数据与多媒体业务在网络传输中的融合。互联网中需要提供高可扩展和更加灵活、安全、可靠的差异化服务能力,从而充分地满足不同服务本身和终端用户的需求。服务提供商需要采用高效的控制和管理机制,从而使得其运营的通信网络能够充分满足这些多层次的需求。目前,互联网中的分布式多媒体应用包括话音、图形、图像、视频、动画等多种类型,而且这些应用程序具有不同的延迟、延迟抖动(抖动)、带宽和分组丢失率等需求。同时,其不仅对通信网络带宽有较高的要求,而且还需要能够满足业务在网络端到端传输过程中的低延迟和低抖动,这就使得基于非连接的 IP 网络“尽力而为”(Best Effort)的业务传输模式难以应对当前通信网络对实时性多媒体业务传输的新要求。

互联网将需要采用何种方式来应对当前承载多媒体业务而继续向前发展呢?现有大量运行于网络框架中的服务质量保证机制,如接入控制(Admission Control)、基于服务质量路由(QoS Routing)、流量整形(Traffic Shaping)、拥塞控制机制(Congestion Control)、服务优先(Service Prioritization)等。但是,作者发现这些加载于 IP 网络上的众多保证机制导致网络控制和管理的复杂度高、可扩展性差、传输机制透明性降低,使得在信息通信网络中业务的服务质量保证性能和网络利用率受限。经过对最近若干年服务质量保证机制和解决方案的研究,Grenville J. Armitage 在 2003 年的研究报告中给出了这样的评价:很多近年来出现的网络控制和保证机制算法复杂度过高,在实际大规模网



络中部署管理比较困难,难以实际应用并发挥其预期的作用。而且将很多复杂的算法设计和机制看做是“沦为纯粹的数学游戏”。鉴于目前已有的大量服务质量保证机制与算法对互联网运营和业务承载所带来的工程和运营复杂度较高,如何寻求一种具有高扩展性、低复杂度的服务质量保证机制和体系,使其不仅能够与当前互联网体系结构充分兼容,而且能够在大规模网络中降低服务质量保证机制部署和运行的成本,使得该领域的研究能够跳出“数学游戏”的怪圈,成为了摆在学术界和工业界的一项重要技术挑战,对未来互联网体系结构及相关机制而言,该方面的研究仍然是网络技术发展的热点领域。

人们知道,目前的 IP 通信网络体系架构的初始设计主要是面向数据业务传输的,是一种仅能提供“尽力而为”服务的通信网络。根据相关学术机构的研究预测,未来互联网骨干业务流量的 80% 以上将会是具有时延敏感性的流媒体业务。分布式多媒体应用不仅对网络的带宽有很高的要求,而且要求信息传输具有低延迟和低延迟抖动等。IP 网络“尽力而为”的业务模式已不适应未来网络业务的需求,为未来占统治地位的实时交互式流媒体业务提供良好支持的将是对下一代网络 (Next Generation Network, NGN) 有服务质量的要求,需要其提供更为高效和与目前网络体系架构兼容的服务质量 (Quality of Service, QoS) 控制机制和保证策略。同时,运营商可以根据不同用户对服务质量的不同要求,提供有针对性的服务,从而更有效地提高其收益并降低运营成本。

简单来讲,网络 QoS 控制和保证技术可分为基于 IP 终端的控制技术和基于 IP 网络的控制技术。基于终端的 QoS 控制技术主要是利用协议来控制发送端和接收端,从而使双方共同感知网络状况,使得双方同步发送和接收的过程;基于网络的 QoS 控制技术主要是通过改变网络“尽力而为”的业务传输模式,在无连接的端到端的传输路径上为所传输的业务提供 QoS 保证,并且通过改变网络存储转发中的调度策略、网络带宽资源的使用方式、借鉴交换的思想来提高转发速度等技术来显著地改变通信网络的服务质量保证能力。

## 1.2 服务质量保证与评价

随着互联网技术的快速发展和成功应用,在世界范围内各个国家的互联网基础设施也得到了快速的建设和发展。随着网络规模和互联范围的不断扩大,目前已经逐渐形成了覆盖全球范围的互联网络,并具有类型丰富多样的互联网应用和数十亿的互联网用户。20 世纪 90 年代,国际上由美国政府发起正式成立了 IAB (Internet Activities Board) 来对互联网技术的发展进行协调和管理,如今已经转变为公开而自治的管理机构,并负责任命各种与因特网相关的组织。IAB 协同研究和开发了 TCP/IP 协议集的底层结构,并长期引导了互联网技术的发展和革新。在这些委员会中,包括人们比较熟悉的因特网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 负责互联网标准的开发和推动,以及互联网研究任务组 (Internet Research Task Force, IRTF) 来对某些长期的互联网问题进行理论研究,并通过建立许多集中、长期的小型研究小组来促进对未来互联网发展重要问题的研究,其中包括互联网协议、应用、架构和技术等相关领域。

与基于电路交换 (Circuit-Switching) 机制的传统电话网络相比而言,互联网技术的成功普遍认为主要归因于其分组交换 (Packet-Switching) 模式、无连接的网络层协议以

及 TCP 协议所具备的拥塞控制等技术优势。最初的互联网体系结构采用分组交换方式,从根本上有别于传统的电信网络所采用的电路交换和时分复用方式,这对于具有固定带宽需求的业务应用而言是高效的,但对于具有突发性的数据通信而言,由于无法对通信资源有效地加以利用,无疑会造成较低下的通信和网络资源使用效率。基于分组交换的网络传输模式恰好适应了数据通信业务的流量特性,能够对有限的通信网络资源实现统计复用,从而为数据通信提供高速、高效的传输服务。在当前的互联网中,由于采用了基于 IP 的网络层协议,这样不但可以为基于各种不同通信介质的物理网络提供互联互通的平台,而且由于 IP 网络协议采用了无连接的传输机制,网络资源的分配变得相对简单且易于管理,从而显著地降低了网络设备设计的复杂度,这被普遍认为是互联网技术获得巨大成功的一个重要技术因素。而且,互联网采用了基于端系统的拥塞控制机制,这在很大程度上既解决了业务流量在网络端到端传输过程中的单跳部署流量控制而导致的低传输速率,同时又有效地避免了端到端窗口控制可能导致的拥塞崩溃问题,使得互联网具有了更强的可扩展性和网络业务承载能力。

### 1.2.1 服务质量保证

目前，互联网上所采用的基于分组交换的传输服务模式能够很好地针对非实时性的数据业务提供可靠的网络传输服务，如传统的数据文件传输、Web 浏览和媒体资料下载等业务。但是随着互联网技术和规模的快速发展，具有实时性和严格服务质量要求的多媒体应用已经逐渐开始扮演越来越重要的角色，例如 IP 电话（Voice over IP）经常成为了一种较为成熟的互联网业务，互联网必须为这些实时业务提供必要的服务质量保证，才可能取得进一步的发展。有关服务质量保证的理论研究早在学术界和工业界已开展了较长的时间，而其中一个研究热点是研究在分组交换机制下通信资源的优化分配和队列调度机制。相对早期的研究工作主要是集中在不同的队列调度算法和业务分组队列管理机制的具体实现方法和性能评价方面，从业务分组的水平上实现业务的端到端服务质量保证。

近年来,随着通信网络技术和通信传输设备的快速发展,网络中路由设备的通信传输链路速度越来越快,导致路由器的体系结构发生了变化。在当前的路由器体系结构下,随着总线(Crossbar)拥塞的产生,输入接口的队列阻塞问题、入口队列和出口队列的分布式联合调度问题正成为研究的热点。另一个方面,有关服务质量保证机制的网络应用也取得了丰硕的成果,在许多实验网上开展了服务质量保证的研究。集成服务是最早提出的服务模型之一,它采用资源预留协议作为其接入控制的手段,为每个数据流提供单独的队列,并保证端到端的服务质量。但在实验网的长期运行中已经发现,集成服务的保证机制导致其缺乏可扩展性(Scalability)。随着通信网络中业务流量的迅猛增长,无论是网络接入控制,还是在网络路由器节点中的队列调度和业务分组队列管理都对路由设备的处理能力产生了巨大的压力,特别是在核心网络中这种压力已经严重地影响了网络路由器的转发能力,于是当前的研究热点逐渐从基于资源预留思想的集成服务模式转向了基于业务区分思想的区分服务模式,区分服务的队列调度不再把每个数据流作为一个调度对象,而是在网络边界把每个数据流映射到特定的服务类型中,内部设备不是根据数据流,而是根据业务分组的服务类型来提供相应的端到端传输服务,这样就大大



减轻了队列调度的复杂性,提高了服务质量保证机制在大规模网络中部署的可扩展性。

### 1.2.2 服务质量评价

在目前已有的绝大多数服务质量模型中,通常都把业务分组的延迟、延迟抖动、丢失率和带宽作为重要的服务质量影响指标,但是这些指标对于不同类型的多媒体业务有着不尽相同的影响。分组延迟表示了业务分组从发送端到接收端的时间长度,包括固定部分(传输时延和转发时延)和可变部分(处理时延和排队时延)。其中,传输时延主要是由数据源节点和目的节点之间的通信链路距离来决定,并认为通常以光速传播。在目前常见的通信手段中,卫星通信的传输时延是最大的,它对于 TCP 拥塞控制和交互式会话都有很大的影响。而业务分组转发的延迟是由业务分组的尺寸和通信链路输出端口的处理速度决定的,表示了从分组发送开始到发送结束的时间间隔。处理时延取决于网络接点的处理能力和分组处理的复杂度,网关设备的过滤和地址转换功能将增大延迟,而且路由器由于采用复杂的队列调度算法也可能导致延迟的明显增加。排队时延则与网络负载、流量突发性和队列调度算法有关。采用复杂的调度算法可能减少排队时延,但由于增加了处理器的开销,又会导致转发时延的增长。队列调度算法的关键就是在满足应用需要的同时,寻求两者的平衡。延迟抖动是指端到端延迟的变化特性,它是由延迟可变部分的变化导致的,流量的突发性、不公平的队列调度方法都可能导致较大的分组延迟抖动。

目前,互联网中所承载的多媒体业务根据其交互行为通常可以分为两类:交互式和非交互式。从对延迟和延迟抖动的敏感性角度而言,非交互式业务对分组延迟的影响不敏感,而对于分组的延迟抖动,只要缓存的长度大于延迟抖动的上界,就可以有效地避免其产生的影响。但是,对于交互式的多媒体业务则不同,它对于分组的延迟和延迟抖动性能都有严格的要求。另一方面,人们关注由于通信网络传输过程中的误码、路由变化和队列溢出等原因所造成的业务分组丢失率。随着传输设备性能的快速提高,由于误码所引起的业务分组丢失率已经非常小,而且由于路由变化所引起的分组丢失所占的比例也不高。由于目前的互联网没有对进入网络的业务采用接入控制机制,从而使得网络的流量拥塞所引起的队列溢出成为业务分组丢失的主要原因。实时多媒体业务由于不能采取重传方式补救丢失的数据,因而分组丢失对服务质量会产生巨大的影响。通常多媒体业务的业务分组尺寸都相对较大,传输过程中可能被分成多个小的业务分组,当有一个分组丢失时,就可能造成整个数据都无法实现重组,从而造成更大的损失。带宽是网络提供的吞吐能力,它反映了在一段时间内网络能为应用传送的信息量。多媒体业务的一个重要特点就是其业务量是不断变化的,活跃期与非活跃期业务量会有非常大的变化,这给网络通信资源的高效利用和网络接入控制都带来了巨大的挑战。从对网络带宽和业务分组丢失率的影响来看,多媒体业务分为恒定比特率(Constant Bit Rate, CBR)和可变比特率(Variable Bit Rate, VBR)。恒定速率的业务接入控制相对简单,只需要为它预留峰值带宽即可。可变速率的业务则较为复杂,若按照峰值速率来分配带宽,虽然可以避免分组丢失,但会导致网络资源的低效率和昂贵的运维成本;若按照平均速率来分配网络带宽,又将可能导致暂态情况情况下的网络流量拥塞,出现业务服务质量的劣化。通过采用漏斗(Leaking Bucket)机制来控制数据源的数据发送速率,并在网络的接入控

制中根据漏斗参数为其预留适当的带宽和缓存,就可以保证实时业务的延迟和分组丢失性能。

通过上面的阐述可以看出,随着互联网的飞速发展和业务服务质量保证体系的逐步建立,实时多媒体应用最终将成为在未来互联网中占有主体地位的业务类型,这也将为互联网的发展提供新的契机和挑战。在这个发展过程中,网络路由器队列调度技术也逐步通过研究走向成熟,从最初的公平分配带宽到按照业务需要分配带宽,以及更为理想的面向业务的网络资源适配管理机制,从按照会话来调度通信资源到按照业务类型来实现资源调度;网络接入控制也从 TCP 拥塞控制到集成服务模型,再到区分服务模型。过去的大量事实经验表明,互联网络技术的每一次跨越式发展都是大量理论研究和实践经验的充分结合。本书中,作者将在广泛研究和借鉴目前已有的理论研究成果和解决方案的基础上,从通信网络节点队列调度和网络路由优化的 2 个方面对互联网的服务质量保证进行初步研究和探讨。

### 1.3 学术贡献与组织方式

目前,在应对目前互联网传输服务质量控制方面的技术挑战中,虽然通过网络资源预留、服务优先级和负载控制、服务质量保证模型等已有技术能够在一定程度上达到对互联网多媒体业务端到端传输过程中服务质量保证的目的。但是,学术界仍然在不断研究来寻找一种在大规模信息通信网络中进行方便部署和高效应用的具有高度可扩展性且与现有 IP 网络体系架构相互兼容的端到端服务质量保证机制。具体而言,理想的服务质量保证机制需要满足如下的几个方面的要求:(1) 高度可扩展性,对规模庞大的计算机网络而言,控制机制的可扩展性尤为重要,计算复杂度较低的控制算法和低通信开销的管理机制才能适应当前规模快速扩大的信息通信系统;(2) 系统兼容性,所采用的服务质量保证机制和方法应与当前互联网的 TCP/IP 协议体系相兼容,使得所部属的解决方案在无需改变现有信息通信网络体系结构的情况下工作,从而降低了在实际网络中部署和运行的成本和难度;(3) 运行顽健性,服务质量的控制机制可以很好适应网络的快速动态变化和多变的运行特性,能够在复杂多变的信息通信网络运行环境和条件下实现所承载业务服务质量的控制和保证;(4) 部署灵活性,所提出的服务质量协调保证机制和技术可以同时以独立或相互协作的方式来实现业务承载过程中服务质量的控制和管理,可以实现在实际通信网络中进行灵活且快速的部署。

上述所提出的问题正是本书中研究工作所试图解决的技术挑战。我们希望在充分研究和利用现有互联网服务质量保证机制的基础上,在不引入新的 IP QoS 控制机制的情况下来实现这些机制的优化配置和协调工作,为大规模信息通信网络中实现更理想的多媒体业务服务质量保证机制提供创新性的研究思路和技术路线。

本书中重点介绍了基于主动队列管理和流量工程方式相结合的 IP 网络服务质量协调保证机制,并在此基础上延伸至网络虚拟化环境下的网络资源适配和优化机制以及服务质量保证的思路和方法。作者分别从通信网络节点队列为控制机制和路由行为控制与优化 2 个重要支撑技术的不同层面来探讨一种适用于 IP 通信网络的具有高扩展性、低复杂度的服务质量协调保证机制和体系,不仅能够与当前的互联网体系结构充分兼容,



而且能够在大规模的信息通信网络中降低服务质量保证机制的部署和运行的成本。同时,作者分别结合典型通信网络运营场景和典型的话音业务,对所提出的高扩展性协调保证机制进行了广泛和充分的仿真实验验证和分析。

本书将按照如下的组织方式对所提出的高扩展性服务质量协调保证机制进行研究和讨论,本书各章节的内容简要介绍如下。

第2章首先为读者介绍了面向IP网络承载业务的服务质量保证机制的相关理论与技术的研究背景、已有成果和未来技术发展趋势。具体涉及到服务质量测量和评估技术、IP网络业务分组队列管理机制和调度策略、话音服务质量计算和评价模型、MPLS和OSPF路由协议机制,以及服务质量路由和其复杂性的讨论等内容,这将为理解本书后续章节的内容提供相关的基础知识和理论。

第3章研究和提出了M/M/1/RED排队理论数学模型和算法配置机制,并结合实时性VoIP业务的应用进行研究和分析。同时,基于每跳、端到端路径和多业务融合的网络场景对所提的理论模型进行验证,而且严格评估AQM-RED算法对控制网络节点队列行为的潜在优势和对业务服务质量性能的影响。

第4章对IP流量工程(IP-TE)技术进行了详细介绍,同时对从网络路由层面实现IP流量工程的OSPF-TE方法进行了全面的性能评价。通过对基于IP协议框架的流量工程机制和优化方法进行研究,作者将流量工程的思路与通信网络的业务路由选择策略进行结合,通过利用对网络路由权值参数的全局优化方法实现了优化的网络端到端业务分组的路由行为控制机制。

第5章提出一种控制网络路由器节点分组队列行为和端到端传输径路上路由行为的协调保证机制。考虑网络承载单一多媒体业务的情形,即可设想在逻辑承载网络架构或基于网络虚拟化环境下的虚拟网承载某种单一类型业务的情况。通过这样的网络运行场景,来对作者所提出的服务质量协调保证机制的正确性和性能进行验证和分析。通过进行广泛的仿真实验并采用TU-T E-model模型对话音业务服务质量进行量化评价,实验结果充分表明了所提出的协调保证机制的有效性和正确性。

第6章进一步研究了在多业务承载的DiffServ网络环境下评估所提出的基于主动队列管理和流量工程方式相结合的IP网络服务质量协调保证机制。同时,创新性地提出在多服务DiffServ情境下结合DiffServ AF配置来实现多种不同类型话音业务的服务质量保证,并通过仿真实验进行了实验验证,结果表明了基于类的公平队列(CB-WFQ)和AQM-RED机制能够在保证多种流量特性实时性话音业务的服务质量的基础上不牺牲尽力服务业务的性能。

第7章继续深入地研究所提出的AQM-RED和OSPF-TE相结合的服务质量协调保证机制,研究该机制在通信网络发生链路故障或业务流量负载发生动态变化情况下的服务质量保证性能和缓解服务质量劣化的有效性,并且通过采用“假使”分析的评价方法来研究在动态因素存在的条件下通信网络对于业务服务质量的保证能力。

第8章考虑在通信网络由于网络通信链路故障或者受限时而出现通信网络链路传输容量劣化情况下的网络运行情形,结合所提出的扩展性强的服务质量保证机制来研究一种基于分级服务模式来保证实时业务传输服务质量的方法。通过在不同的网络场景下进行了大量的仿真实验,结果分析充分地证明了所提出方法的有效性和可靠性。