

可重构信息通信基础网络体系研究

兰巨龙, 程东年, 胡宇翔

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 提出了“可重构网络”思想并建立可重构信息通信基础网络体系, 然后在可重构网络功能参考模型的基础上分别创立了网络元能力理论、多态寻址路由机制、网络重构机理和安全可管可控机理, 从而为构建一个支持目前业务和未来新业务的不同服务质量需求, 功能灵活扩展, 满足泛在互联、融合异构、可信可管可扩需求, 支持现有网络兼容演进和适于规模应用的新型网络通信信息基础设施提供了一种解决途径。

关键词: 可重构网络; 元能力; 多态寻址与路由; 网络重构; 可管可控

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)01-0128-12

Research on reconfigurable information communication basal network architecture

LAN Ju-long, CHENG Dong-nian, HU Yu-xiang

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the thinking of network reconfiguration, the reconfigurable information communication basal network architecture was proposed, and then the network atomic capacity theory, polymorphic addressing and routing mechanism, network reconfiguration mechanism and the secure manageability and controllability mechanism were put forward respectively. The architecture would provide a resolution for current and future applications with different quality of services, flexible and expansible function, universal inter-connection, heterogeneous convergence, manageability and controllability, which also supports the compatible evolution with current internet and is feasible to be implemented on a large scale.

Key words: reconfigurable network; atomic capacity; polymorphic addressing and routing; network reconfiguration; manageability and controllability

1 引言

从基础网络体系和机制的角度看, 目前的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。TCP/IP 作为当今信息网络共同的基础承载机制, 其功能过于简单, 使网络基础能力与上层应用要求之间存在一条巨大鸿沟; 另一方面, 为了填补该鸿沟而付出的

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。这种核心薄弱的体系架构造成信息网络的基础能力低下, 无法从根本上保证泛在、互联、质量、融合、异构、可信、可管、可扩等高等级需求。

近年来, 国内外已相继从新型网络体系结构、可重构技术、网络路由交换架构与技术等不同侧面对新型信息通信网络体系进行了积极的研究和探索。国际上 GENI、FIND、FIRE、AKARI 等计划、

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2013-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315901); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA013505)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315901); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA013505)

国家“973”计划项目“新一代互联网体系结构理论研究”、“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”等项目均在该方向展开了积极研究,以探索一种新型网络体系结构。其主流研究计划的核心思想是探索通过诸如资源虚拟化、功能切片、身份与位置分离等机制构建对多样化的业务具有针对性的承载能力。

新型网络体系研究方向,美国于 2005 年启动了 FIND (future internet design) 项目^[1],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^[2]和 AUTOI (autonomic Internet)^[3]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。此外,日本开展了 AKARI 项目^[4],围绕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联和普适服务的有效支撑^[5,6]。清华大学从规模、性能、安全、功能、服务 5 个方面提出了一种多维可扩展网络体系结构^[7],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。

关于可重构技术与网络研究方向,开放可编程网络在顶层强调设备的控制面和数据面的标准化分离,在底层强调控制面和数据面内的模块化和标准化。国外相关研究包括 IEEE P1520 参考模型、IETF 组织的 GSMP 工作组、MSF、IETF 组织的转发与控制分离 (ForCES) 工作组、NPF、朗讯的软路由器 (SoftRouter)、Intel 提出的 IXA、斯坦福大学的 Openflow。国内同时也开展了相关研究,包括清华大学提出的可扩展路由器结构^[8]、解放军信息工程大学提出的具有可编程特性的高性能 IPv4/v6 路由器基础平台^[9]、国防科技大学提出的基于 ForCES 架构的路由器模型 OpenRouter^[10]以及软件集群路由器参考模型^[11]、浙江工商大学研制的遵循 IETF ForCES 架构和协议标准的路由器原型系统 ForTER^[12]。此外,解放军信息工程大学研究了以“构件—组件—平台”为体系结构的开放式可重构路由交换节点平台^[13],并且以网络承载服务为核心,以

可重构路由由交换平台为关键支撑技术,设计出一种面向服务提供的网络体系架构:一体化承载网络 (UCN) 模型^[14]。

关于路由交换技术研究方向,新型网络体系结构的路由交换方面研究主要是通过身份和位置分离等机制着力解决现有互联网的安全性、可扩展性、移动性等诸多问题。美国加州大学在 2002 年首先提出了互联网间接访问基础架构^[15]。在此基础上,麻省理工学院的 Balakrishnan 提出了互联网分层命名结构(LNAI)^[16]。同时,Cisco 在互联网研究任务组路由工作组 (IRTF RRG) 提出了位置与标识分离协议(LISP)^[17],解决了路由的可扩展性问题并最大限度地考虑了网络的演进性。Ericsson 不断完善主机标识协议 HIP^[18]相关技术体系,并在 IETF 和 IRTF 分别成立 HIP 工作组和研究组进行 HIP 相关的研究和标准化工作。在 2010 年美国的未来互联网体系结构国家项目计划 FIA (future internet architecture) 中,NDN 项目^[19]旨在开发一个“名字数据网络”的架构,建立以用户和应用所关心的具体内容为中心的内容创建、分发和传递的体系模型;XIA 项目^[20]旨在建立一个更安全的表达性互联网架构;MobilityFirst 项目^[21]将节点移动作为节点的常态行为处理,使用通用的容延网络技术 (GDTN) 增强网络的顽健性和可信性;NEBULA 项目^[22]通过由高速、高可靠和安全的骨干网络连接数据中心提供面向云计算的数据仓库和计算资源。清华大学提出了面向互联网的源地址验证模型与架构 SAVA^[23],通过接入层、域内和域间不同的方法与机制保证源地址的真实性;北京交通大学提出了标识与地址分离为核心思想的一体化路由与交换理论^[5,6];香港中文大学和北京大学在代数编码理论应用于交换结构与多播路由方面开拓了一个新型研究方向,并取得了突破性进展,对未来视频业务所占比重越来越大的新型网络提供了一种多播路由^[24]与交换^[25]的理论依据。

网络可重构是未来网络架构实现服务质量的自适应、异构融合、安全可信可管以及可扩展的有效解决方案。上文中介绍的已有研究成果为网络内在能力与结构的自适应重构提供了基础技术支持,对网络重构的整体架构设计也提供了重要参考,但这些研究对网络重构的框架模型、关键实现机理仍缺乏全面深入的理论研究。在此背景下,本文从增强信息通信网络基础互联传输能力入手,创造性地提

出“可重构网络”的核心思想，并按照革命性的设计思路创建了一种可重构可扩展的基础网络体系结构，然后在可重构网络功能参考模型的基础上分别创立了网络元能力理论、多态寻址路由机制、网络重构机理和安全可管可控机理，从而为构建一个支持目前业务和未来新业务的不同服务质量需求，功能灵活扩展，满足泛在互联、融合异构、可信可管可扩需求，支持现有网兼容演进和适于规模应用的新型网络通信信息基础设施提供一种解决途径。

2 可重构信息通信基础网络理论体系

可重构信息通信基础网络体系的设计采用自顶向下方法，将泛在互联、服务质量保证、融合异构、安全可信、可管可扩等功能内嵌到网络体系结构中去，从而使新的信息通信网络具有解决信息通信网络在泛在、互联、质量、融合、异构、可信、可管、可扩等方面存在的问题的“基因”，天然满足这些需求。

通常，业务的特征和需求是多样和多变的，相对而言，网络的服务能力却是有限和确定的，有效弥合这种差异性的一个可行途径是参照网络虚拟化技术的相关思想，将业务特征需求与网络承载服务二者抽象成一种特定的“业务—元服务—元能力”模型，即将直接承载一种业务的网络服务分解成一组细粒度的基本网络服务元素 S_{Mi} ，称每一个基本网络服务元素为“元服务”，每一种业务由一个元服务集合 $S=\{S_{Mi}, i=1, 2, \dots, M, M$ 为元服务个数}提供服务，该集合是封闭的，其中的元素是有限的。全部业务对应的网络服务元素总和就构成网络的“元服务层”。进一步，每一个元服务需要一组基本网络功能元素 C_{Mj} 予以支撑，称每一基本网络功能元素为一个“元能力”，支撑一个元服务的所有元能力集合为 $C=\{C_{Mj}, j=1, 2, \dots, N, N$ 为元能力个数}，该集合也是封闭的，其中的元素也是有限的。于是，全体元服务所对应的基本网络功能元素总和就构成网络的“元能力层”。上述“业务—元服务—元能力”模型如图 1 所示。

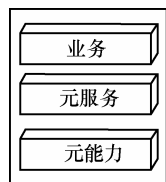


图 1 “业务—元服务—元能力”功能模型

该“业务—元服务—元能力”模型构成网络元能力理论的核心。业务层通过相应的认知机制对网络业务的特性和要求进行聚类 and 抽象，提炼出各类业务需要的基本网络服务元素。元服务层利用网络元能力功能层提供的全网范围内的基本承载能力，对基本承载功能组件进行认知适配，针对多样业务的公共承载特性和要求进行聚类从而形成元服务。元能力层表征网络的元能力，它通过动态感知业务、节点资源和网络资源的动态行为特征，对网络提供的基础传输能力进行聚类 and 组配，在全局网络范围内对能力和资源进行认知协调和动态调节，从而为元服务层提供全网范围内的多种基础承载能力。

网络元能力的 2 种基本传递模式是分组传递和宏电路，它们之间的内在逻辑结构如图 2 所示。分组传递模式是支持基础数据传递和网际互联的原子功能要素。宏电路是一种全新的基础数据传递模式，它是网络为一组具有共同传输路径的同类业务流而动态建立的自适应型虚电路。宏电路直接表达基础数据传递模式的增强，这种增强可以具体表现为基础网络在性能、安全、多播、移动性、可扩展等方面的功能扩展，使得可以将“从基础上增强和扩展信息基础传输能力”作为研究切入点，最终达到满足信息通信网络对多样化业务的承载和服务、多态寻址路由、可信可管可扩展等多重应用需求的目标。

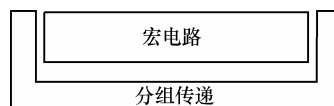


图 2 网络元能力理论下的传递模式

可重构信息通信基础网络体系采用以网络元能力为基础、以可重构基础网络为核心、以满足业务多样要求为目标的新型模型，其功能参考模型如图 3 所示。这是一种新型的网络功能分层模型，在数据平面，它具有一个增强型的网际互联传输层——可重构多态网络层，而在管理平面，它在原有 5 大功能的基础上引入一个全新的认知承载功能。

可重构多态网络层是一个增强型的网际互联传输层，其直接目标是增强基础网络的互联传输能力，其基本功能包括 OSI 七层网络参考模型中网络层和传输层的功能，并增加了支持业务需求的新功能。可重构多态网络层由基态和多态 2 个子层构成，基态子层实现基本寻址、路由和交换功能，是同时

支持面向连接和无连接分组传递的网际互联传输子层。从满足业务要求的角度看，要求宏电路呈现性能特定、安全特定、多播特定等多模态特性，即：对于具有同类性能（或安全、多播等）要求的一组业务流，通过确保其性能要求的特定宏电路形态予以承载，称其为性能（或安全、多播等）特定的宏电路。这样，多态子层就包含了各种模态的宏电路。

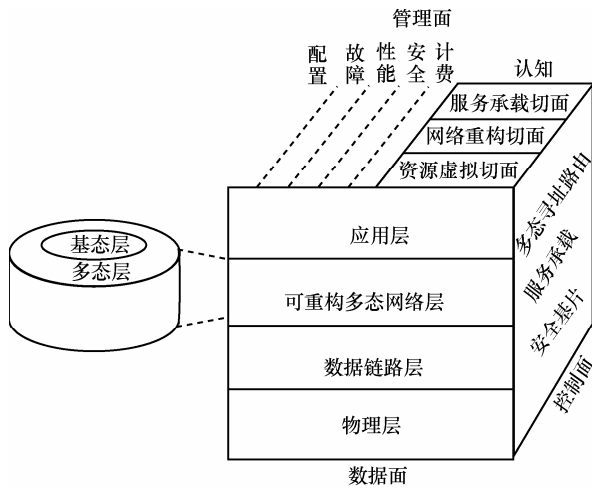


图 3 可重构新型网络体系功能参考模型

可重构新型网络体系功能参考模型中的认知功能是位于管理面内的一个全新网络管理功能，它为管理面中的业务承载管理提供对业务和网络的认知服务以及节点与网络之间的协同服务。作为基于认知机理的管理功能，认知功能包含资源虚拟切面、网络重构切面和服务承载切面，它一方面为业务承载直接提供基础性的认知功能组件，另一方面还完成对节点资源和网络资源的抽象与汇聚，通过对特征、要求和行为的认知建立柔性重构实现多态的服务网络，以满足多种服务需求。

由上述功能参考模型可以看出，网络元能力理论是多态寻址路由机制和安全可管可控机制的实现基础，而这 2 种机制又为网络重构的实现提供了底层支持。本文下面分别围绕网络重构的关键机制及结构形态、业务自适应认知承载机理、可重构基础网络的多态寻址及路由交换机制、可重构基础网络的安全可管可控机理 4 个方面展开论述。

3 网络重构的关键机制及结构形态

为摆脱传统网络技术体系束缚，本节针对重构的关键机制及结构形态展开研究。在网络元能力理论的基础之上，细化“业务—元服务—元能力”的

功能模型，并借鉴 SDN 中控制与转发分离的思想，提出了“面元能力—点元能力”的元能力结构形态，该形态通过节点能力和网络资源的重构，实现了网络结构和功能的按需灵活调整与多态呈现，提高了网络的可扩展性。

1) 基于元能力表述的网络重构结构形态

网络元能力提出的功能模型从全网重构的角度，在业务、元服务、元能力 3 个功能层面对网络资源进行了抽象和划分，但是其并未明确元能力的结构形态。本课题从节点支撑全网重构的角度出发，研究性地提出“面元能力—点元能力”的元能力层次划分，如图 4 所示，自下而上从点元能力、面元能力、元服务 3 个层面对网络资源进行多尺度描述。点元能力是对网络节点中异构异质资源进行重构抽象而产生的逻辑实体，通过对节点所具备的网络资源进行优化调度和规划，点元能力对全网的重构提供基础网络承载；面元能力则从全网的角度出发，感知业务并对数据面的网络资源的行为特征进行聚类 and 组配，适配元服务进而实现对网络多种业务的普适。

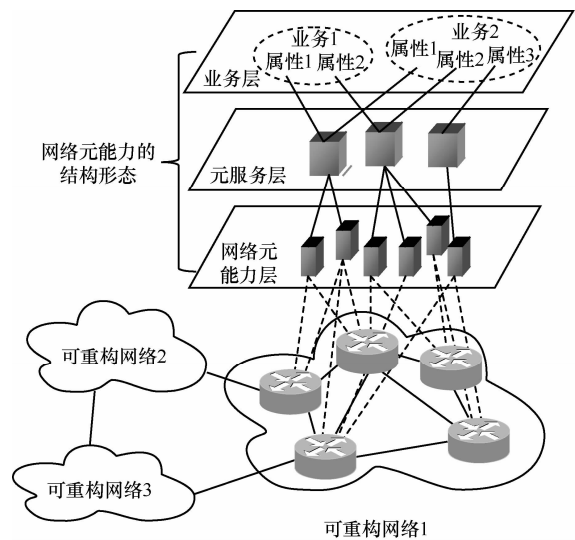


图 4 基于元能力的网络重构结构形态

2) 层次化的网络重构机理

就元服务而言，它通过对多样化业务的公共特性和要求进行聚类和抽象，可以在最大程度上降低网络资源与业务间的耦合性。元服务利用面元能力提供的全网范围内的基本网络承载能力，通过重构对业务进行适配。如图 5 所示，其重构过程表现为全网内节点相互协作、节点内部资源灵活组合以实现对业务的普适。

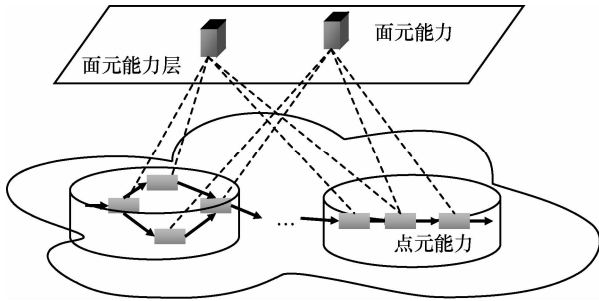


图 5 面元能力的重构机理

面元能力对元服务的支持应该是全方位的，绝不是简单的一对一的映射，因此，用于支撑面元能力的各个节点需要充分考虑彼此间的协调及资源共享问题。面元能力从全网的角度出发，感知业务特征并对数据面网络资源的行为进行聚类 and 组配，以支撑元服务的重构。面元能力的重构表现为适应元服务而整合点元能力的过程。如图 6 所示，通过对节点所具备的网络资源进行优化调度和规划，为部署点元能力提供最佳的节点资源配置方案。

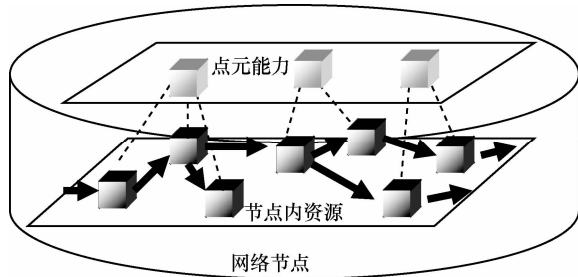


图 6 点元能力的重构机理

点元能力是可重构基础网络体系中最小粒度的资源或能力，对全网的重构提供基础网络承载。点元能力的重构是指对节点内的软件或硬件资源（节点的协议实体、表格管理、控制实体、用于分组转发的网络处理器微核等）的重新编程控制甚至包含对软件的完全重载，以实现对该资源模块功能的灵活重构。点元能力的控制通道性能对全网可重构性具有重要意义，可通过流量矩阵估算建模等方法对点元能力的控制通道的流量进行分析，较完整地估算出控制通道中流量的分布情况，进而给控制通道设计提供依据并优化通道流量。假如给定控制通道的流量序列 $X(t)$ ，那么在 N 阶次上的多尺度分析的结果 $y(t)$ 为

$$y(t) = \begin{bmatrix} (X(t)_H^M) \\ (X(t)_H^{M+1}) \\ \dots \\ (X(t)_H^{N-2}) \\ (X(t)_H^{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^M H^{M+1} H^{M+2} \dots H^{N-1} \\ G^M H^{M+1} H^{M+2} \dots H^{M-1} \\ \dots \\ G^{N-2} H^{N-1} \\ G^{N-1} \end{bmatrix} X(t)^N$$

其中，分别用 H^i 和 G^i 表示多尺度分析的尺度系数和小波系数。通过小波变换后的 Kalman Filter 算法，就可以求得 $y(t)$ 的估算值，即求得流量矩阵值。

3) 网络重构中的规范化

通过对元服务进行规范化建模，可以最大程度上减少元服务与业务的耦合性。本节对其进行标准化建模遵循以下思想：采用统一的形式化描述方法进行描述，以保证业务模型的准确性和一致性；完整地描述元服务包含的各种内容；支持与服务等级承诺之间的相互转化；方便实现元服务和点元能力的映射关系；具有良好的扩展性，能应对业务的演进和不断变化的用户需求。

点元能力是在对节点功能聚类的基础上抽象出的一组逻辑实体，根据对数据分组进行的不同处理操作，可将点元能力进行分类，典型的点元能力有端口、查表等。据此对点元能力外在形态进行统一描述并标准化，其模型描述可包含属性、容量、事件等，如图 7 所示。

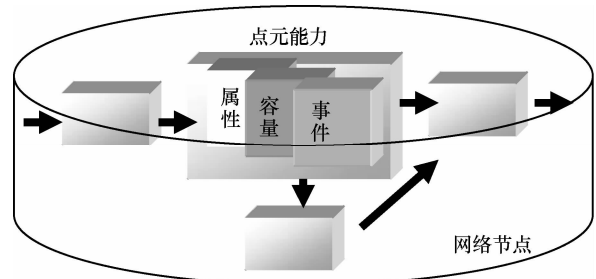


图 7 点元能力的规范化模型

为全面支撑管理面对全网实施重构操作，还需定义相应的标准接口以实现点对元能力进行统一的控制。点元能力的管理规范应包含：a) 对点元能力属性的配置、查询等；b) 对点元能力事件的订阅及查询；c) 对点元能力拓扑的配置及查询；d) 对点元能力容量的查询。

4 业务自适应认知承载机理

业务自适应认知承载机理主要围绕面向业务的精细化网络流量分析、多维感知及智能分析和业务自适应服务承载网生成机理展开研究。该机理通过节点能力和网络资源的组配实现网络结构和功能的按需灵活调整与多态呈现，支持不同业务对网络的不同功能需求。

1) 面向业务的精细化网络流量分析

本文突破传统业务粗粒度流量测量和分析模

式，提出面向业务的精细化流量测量、建模、预测和异常检测等系统化方法，从而分别实现网络流量状态精确感知、揭示业务行为规律和特征抽象、网络资源优化配置和提高可管可控性。具体如下。

首先，利用主动、被动及混合方式的智能测量方法进行网络流量测量。应用信息熵理论以及数据挖掘、知识发现、数理统计和可视化等方法对业务行为内在机理与动态规律进行剖析。基于所获得的流量特征，通过多维信息融合，为网络多维感知和智能分析提供基础和依据。

其次，通过对各种业务流量特征的全面提取、分析和融合，建立流量特性模型并抽象和聚类出揭示业务流量共性和规律的各种元服务。对元服务进行规范化建模，在最大程度上减少元服务与业务的耦合性，使各个异构网络或不同自治系统可进行统一的业务重构操作并实现快速的业务部署。

再次，基于感知得到的流量信息和流量模型，对多时间尺度上的网络业务流量行为进行预先估计和推测。运用统计信号处理、人工神经网络等方法构建预测数学模型，在不同时间尺度上对业务流量行为的动态趋势、方向和可能的状态做出合理的推断，提高新型可重构网络体系下的资源优化配置。

最后，通过对不同情形下的网络流量异常行为，如 DoS 攻击、瞬间流量激增和链路失效等，进行及时感知和快速处理，以提高可重构网络的自愈能力和可控可管性。利用时间序列分析、模式识别、机器学习和数据挖掘等方法分析流量的动态行为

特性及其分布，构建业务流量的异常行为模型。通过面向业务的实时流量检测，可快速感知异常事件，并对网络运行状况和业务行为进行诊断，从而及时采取有针对性的措施提高服务提供能力的稳健性。

2) 多维感知及智能分析

针对现有信息网络由于缺乏感知及智能处理所暴露出的网络层和业务层跨层资源管理能力弱、网络管控能力差、网络与业务匹配效率低下等问题，本节建立基于智能 agent 的多维认知体系，探索并形成“业务—元服务—元能力”模型中的多维感知与适配机制、方法。通过智能 agent 实现网络与业务之间的双向认知、元服务与网络元能力的感知与适配、域间服务承载能力的认知等。

根据精细化流量特性分析，抽象出业务流量的关键特征，同时，对网络资源的特征和状态进行多维感知，进一步通过信息融合、相关认知算法的分析和决策完成业务聚类，完成业务、元服务与元能力的认知计算和协同计算，渐进优化策略库，对应的知识库生成流程如图 8 所示。策略库的内容包含从多种业务抽象出的各种关键特征集与对应关键元服务及其参数集的规则列表，该策略库能有效地指导宏电路及服务承载网的构建和自适应调整，提高服务承载网业务适配的有效性及其整体性能。

3) 业务自适应服务承载网生成机理

可重构信息通信基础网络基于业务特性，通过构建服务承载网的方式为业务提供自适应的承载

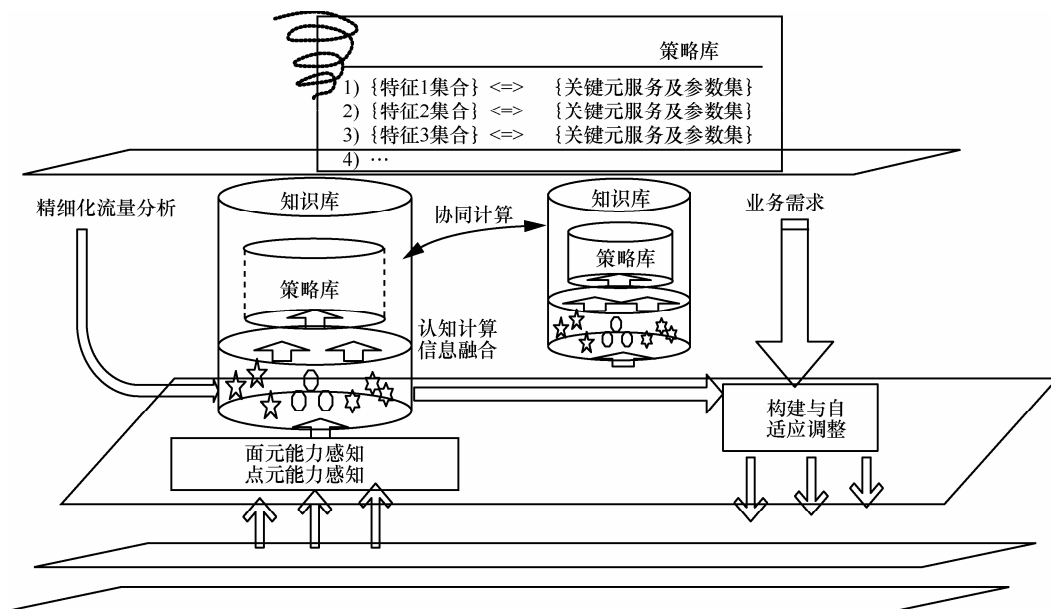


图 8 知识库的生成流程

服务。服务承载网的构建机制就是根据“业务—元服务—元能力”间的内在逻辑关系，确定业务承载所需的网络元能力的需求以及物理网络资源的需求，并将服务承载网的点到点逻辑链路映射到物理网络的端到端路径，该映射既要考虑服务承载网构建的业务需求，又需要结合其拓扑结构特性及资源的高效利用。

此外，为了使服务网构建机制具备扩展性，本节借鉴分层路由的思想，将服务承载网的构建问题分为域内构建和跨域构建 2 个子问题。

a) 域内服务承载网构建

通过对服务承载网的构建需求以及对物理网络的认知，本节提出基于知识的域内服务承载网构建机制，以达到构建的服务承载网与业务的适配和资源高效利用。该问题可以采用网络最大流理论、多商品流问题模型、跨层联合优化、数学规划等理论与方法，根据服务承载网业务需求和物理网络可用资源等约束条件，利用多径映射的思想，分别建立以业务适配度、网络二维负载均衡和构建代价为优化目标的服务承载网构建的建模理论与方法。

① 对于业务适配，通过感知机制获取路由节点当前的可用资源，根据所需构建的服务承载网的业务特性以及智能策略库中的知识，对节点和网络对业务的适配程度进行判定并做出决策，选择能够支持同类业务的宏电路进行传输。

② 为了提高物理网络资源的利用率，基于负载均衡构建服务承载网。由于服务承载网的动态构建和拆除，物理网络的业务负载是随着时间在变化的，因而导致负载均衡也是时变的，采用链路带宽资源占用和时间资源占用相结合的二维负载均衡度量方法构建服务承载网。

③ 服务承载网的构建势必消耗链路、节点及网络资源，因而需要以极小化的服务承载网构建代价为目标，建立对所消耗资源的代价度量。

b) 跨域服务承载网构建

跨域服务承载网的构建需要解决以下问题：各个域代理之间数据内容的一致性，尤其是具有邻接关系的域代理之间的数据同步；域间服务能力的抽象，建立由各个域构成的整体网络的能力模型；设计分布式协同策略和机制以解决同时构建多个服务承载网时产生的资源分配冲突问题。

跨域服务承载网构建的基本过程是域代理先根据域间拓扑连接关系以及用户的构建需求规划

出该业务承载网所覆盖的域，从而将一个跨域服务承载网构建需求分解为若干个彼此相对独立的域内构建需求，并将分解后的需求信息分别传递给相关的域代理，再由各个域代理在本域内实施处理。最后，根据上述构建策略，基于面元能力与点元能力间的适配关系，在相关物理节点上对要求的点元能力进行实例化，从而形成业务自适应的服务承载网生成机理，最终支持业务的特征和需求。

5 可重构基础网络的多态寻址及路由交换机制

多态寻址路由是一种动态、自适应的路由寻址算法，能够根据网络状态和传输需求为各类业务建立满足业务性能的路径，并根据网络状态变化情况进行动态调整。元服务驱动的多态寻址及路由交换主要解决由元服务驱动的，支持多种网络体制并存的网络寻址及路由交换问题，具体内容如下。

1) 基态协议体系寻址与路由机制

基态协议是可重构基础网络中核心的网络层协议，重点考虑 IPv4/v6、NDN 等多态体系协议的兼容和特化。在 TCP/IP 网络中，IP 地址既用于位置标识又用作端点的身份标识，这种双重身份不仅限制了网络移动性，也带来一些安全问题，基态协议的设计应集成内嵌的标识与地址分离的解决方案。此外，随着业务需求逐渐由关注通信转变为关注数据内容，新的基态协议必须能够有效支持面向数据内容的寻址与路由。

本文提出将身份位置分离作为基态协议命名系统的基本方法，并将面向内容的思想融入到基态协议的路由转发机制的设计中。为解决其中内容路由带来的网络状态膨胀以及智能多路径转发数据请求的问题，本文提出路由由节点基于局部信息计算名字空间和路由路径的方法以及数据内容名字空间结构和路由拓扑的优化，特定属性确定以及属性生成方法。

2) 多态协议的寻址与路由机制

多态协议是基于基态协议生成的具有多种运行形态的协议，既可表示为通过基态协议特化（specialization）的不同协议体系，也可以表示为一种协议体系的多个运行态。基态和多态协议的关系如图 9 所示。

在上述多态协议体系下，通过重构可将网络功能和行为根据用户需求进行动态改变，或根据不同要求在不同协议体系间或相同协议体系不同运行

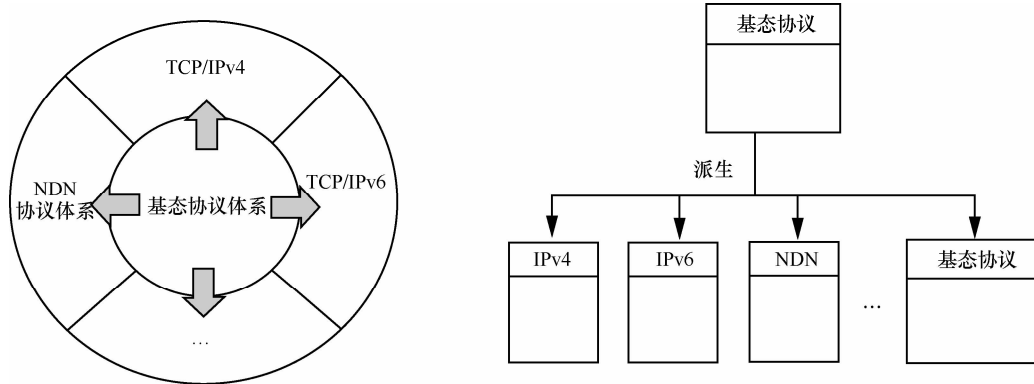


图 9 基态及多态协议体系

态间进行切换。通过重构可为不同协议体系形成多个服务承载网，为元服务的隔离及资源调配提供基础。在多态网络寻址路由体系下，IP 路由转发仅在一个或多个服务承载网内实现，物理网络上可同时运行多个不同的协议体系，以承载网的形式为不同特性的业务提供不同的元服务能力。

3) 支持元服务的交换机制

元服务在交换层次上是由宏电路支持的。宏电路代表某种基础数据传递模式的增强，如交换结构对分组传递的低时延线速转发保证，高效多播、安全、移动等特性的增强。目前大规模交换结构的主流，都采用结合了输入输出排队和每分组时隙调度的原理，其瓶颈是中央调度，且排队使其转发前等待的时延没有保证。

本文提出一种基于代数交换的交换机制。代数

交换以群论中位置换群为模型，系统的描述了多级互连网络 (MIN) 的模型。分治网络具有高度模块化和布局复杂度最低的特点，图 10 给出了 $N=64$ 的分治网络结构。

本文结合自路由集线器及分治网络，支持线速多播的自路由集线器，同时引入带可扩展的线速优先级分组机制，目标是构建一种能够大规模扩展交换容量，面向元服务内部具有优先级划分以及能够线速支持多播的交换结构。

4) 面向多态的路由交换虚拟化技术

基于虚拟化技术的多态路由交换的实现可具有更好的通用性与统一性，可以为多态协议体系中的每个协议体系提供独立的网络设备，减少了多种网络协议体系聚合时的接入问题。

本文提出三层切分模式的网络虚拟化模型，如

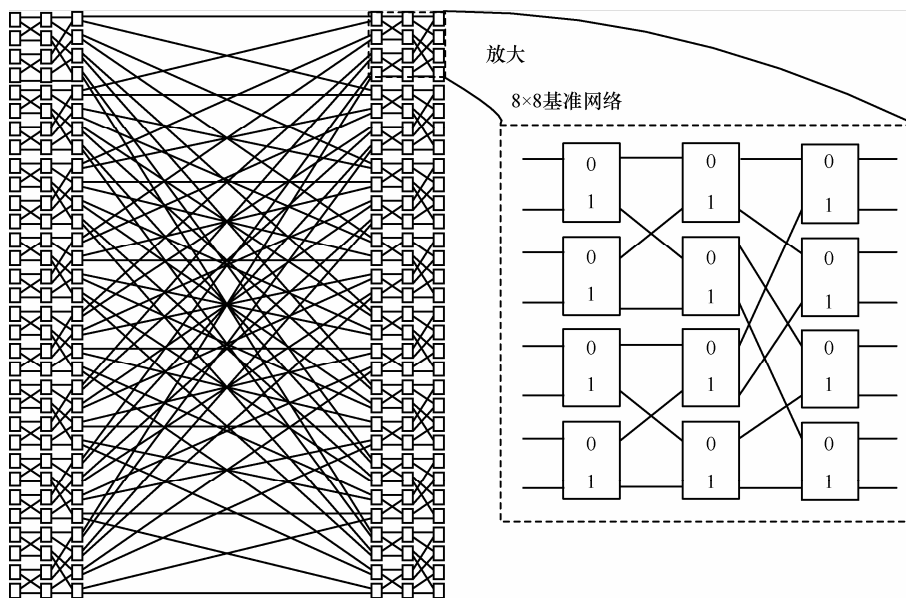


图 10 $N=64$ 的分治网络及其局部放大图

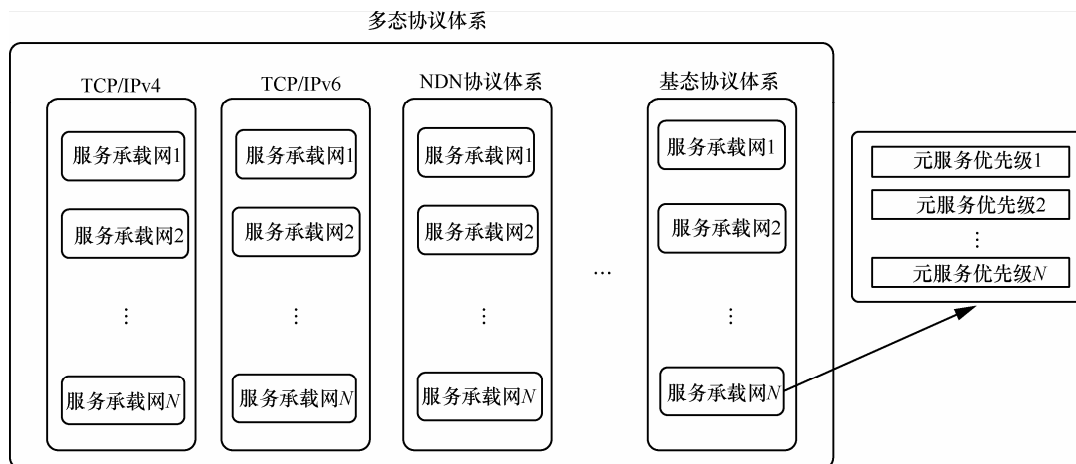


图 11 三层切分网络虚拟化模型

图 11 所示。该模型首先利用虚拟化技术将公共承载网络物理资源根据多态协议体系中的不同协议进行切分，为每个协议形成独立的虚拟设备；然后在虚拟设备中按元服务类型进行切分，构建多个基于不同元服务的服务承载网；最后在服务承载网中对资源进行虚拟化切分，用于满足业务子网中不同元服务特征的服务质量保证。

元服务切割针对每个元服务的特征，例如时延、吞吐量、容错率等特征，为其划分单独的虚拟网络，使转发策略制定无需兼顾所有的元服务类型。业务切割的主要目的是构建差异性的服务质量保证平面，实现对不同业务流的资源保证。

5) 探索利用网络编码等方法建立高效宏电路树的多播机理

网络编码理论的全新突破在于提出网络路由交换节点对输入的信息流进行编码后再发送，可进一步提升网络吞吐量，从而达到网络最大流最小割的理论上限。本文根据多播传输业务模型和特点，建立网络元能力与元服务之间的映射关系，利用本文提出的宏电路的思想，在分组网络上基于数据分发的链路公因子等信息，通过标签机制建立宏电路树，构建支持点到多点的高效传输路径。其基本原理是在研究元服务、元能力以及节点元能力之间的映射关系时，提取各类业务对网络链路带宽、网络中间节点存储与计算资源、网络端节点功能等方面的需求，为面向海量数据高效传输业务优化的传输功能扩展提供支持。同时，管理平面根据不同业务数据分发的多播树信息及其服务质量要求，建立公用的数据分发路径及宏电路树，探索利用网络编码理论建立高效宏电路树的多播机理。

6) 支持泛在互联的移动性管理模型与机制

目前针对移动性的管理大多仅局限于特定的网络环境和主机/子网移动性，不能应对未来多种接入网络共存、大量移动主机/子网接入等情形。鉴于此，为了在任何地方使用任何主机/子网以及在任何状态下都能不间断地获得一致的 QoS 服务，迫切需要研究和探索新的移动性管理模型与机制，要求它能实现控制功能和数据传输功能相分离，能适应各种接入技术而独立演进。以可重构为内在支持，探索基于主机的标识分离方法，研究支持主机或子网移动性的协同操作机制与策略，建立位置管理和协同切换机制。

6 可重构基础网络的安全可管可控机理

根据网络和业务的安全需求，提出了基于安全基片的网络安全理论机制，该机制能够动态确定安全元能力的组合，将其映射到网络传输路径上，形成安全服务路径，从而满足了可重构基础网络多级安全需求和安全功能动态重构的性能要求，实现业务的安全传输。通过该机制可以有效解决现有网络中没有内嵌安全机制的问题。

1) 基于网络重构的安全可管可控体系

在此，本文提出一种基于安全基片的服务承载网结构形态，如图 12 所示。安全基片是针对共性安全与管控特征要求而构造的基本安全要素和功能的总和。不同的安全基片具有不同的安全强度级别。服务承载网以业务承载需求充分满足和网络安全需求合理适配为构建目标，在充分利用网络资源提供最佳服务的同时，利用以分组传递、可重构和宏电路为核心要素的网络元能力，为网络、业务及

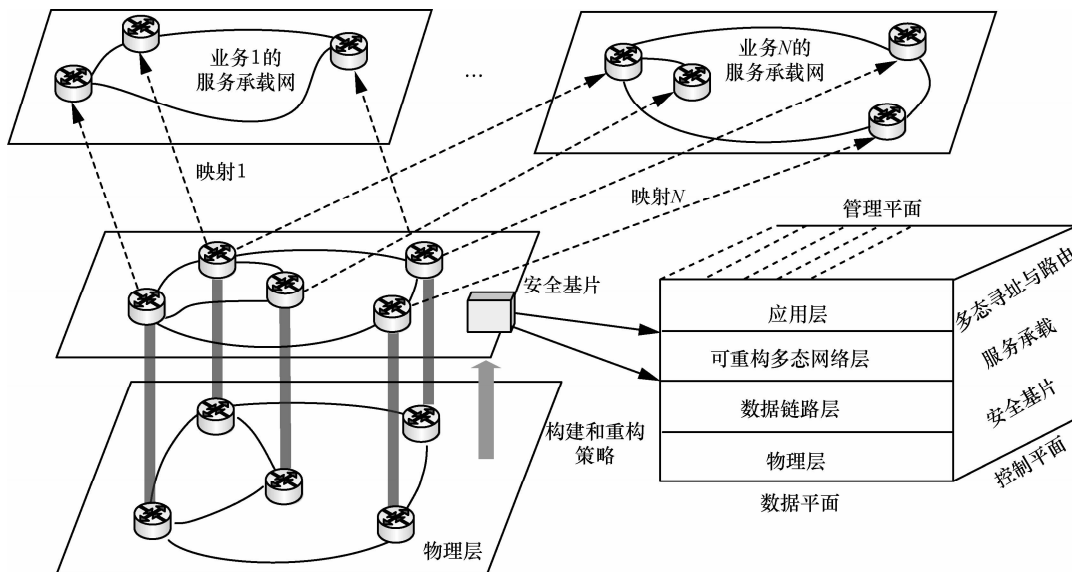


图 12 基于安全基片的服务承载网结构形态

用户提供安全保障。

2) 基于安全可信度量的安全基片构建机理

目前的网络业务由于没有细分安全性需求，从而导致或者完全忽略可能存在的安全问题，或者盲目追求高安全性而耗费大量网络资源，最终都违背了为用户提供安全、有效服务的网络设计初衷。为解决上述问题，本文针对不同的应用场景和用户需求，将网络安全性划分成多个级别，建立多级网络安全模型，基于多级安全强度构建安全基片，以网络资源充分利用和网络安全合理适配为原则进行优化，避免单一追求高安全级别或高服务质量的简单模式，从而为用户提供服务质量和安全性的保证。安全基片的强度可以采用基于密码理论和信任关系的方法来完成。事实上，安全基片构建需求可以转化为多个源和目的节点对之间的承载能力需求和安全提供能力需求。综合考虑网络拓扑、资源状态、安全强度等条件，安全基片构建可以抽象成源、目的节点对之间的拓扑规划和资源合理分配模型。

3) 基于用户和终端辨识的安全管控机制

服务承载网与用户接入网的接入点以及服务承载网内部，是多种同类业务融合至某特定宏电路以满足特定传输要求的关键点，也是筛查异常流量、对用户和终端实施管控的关键点。由于用户接入方式的多样化，接入终端的种类大大扩展。在关键点上基于用户接入时的认证信息和授权信息对用户和终端类型进行辨识，能够相对准确地区分其所属的业务类型，可基于认证信息对后续数据进行

持续跟踪和控制。同时，分析流入和流出分组流量的时空特性，可判别用户行为合法性，从而做出相应的控制措施。

4) 面向行为和内容的态势分析与追踪溯源

为了便于对服务承载网安全态势实时感知、预警和处置，本文采取由管控代理构成的安全管控功能结构，整个结构分为管控面和数据面。管控面由一系列前端管控代理和后端管控系统组成，管控代理在服务承载网内部分布式采集数据和实施分布式管控，管控系统负责集中式数据分析、安全操作识别以及管控策略维护等；数据面接受管控面的管理和控制。管控面向数据面开放某些接口，从而使业务能实时感知网络提供能力是否可用，网络可以根据用户要求提供的不同安全级别，有效利用网络中的可用资源达到安全保障。在该结构下，其安全管理和分级的决策依据由安全态势分析提供，并对网络出现的安全事件或异常状态进行层次化多粒度追踪溯源。

7 实验网部署

可重构实验网是下一代网络与业务国家实验床的组成部分，通过 5 个可重构路由交换平台和 5 个可重构光交换设备组成网络并开展相关实验。节点间建立 GE、10 G POS、2.5 G POS、10 G WAN 链路，采用全 mesh 互联拓扑。可重构综合管理平台负责构建具有可重构特性的逻辑承载网络，通过调整链路带宽，部署 QoS 构件适应不同的业务需

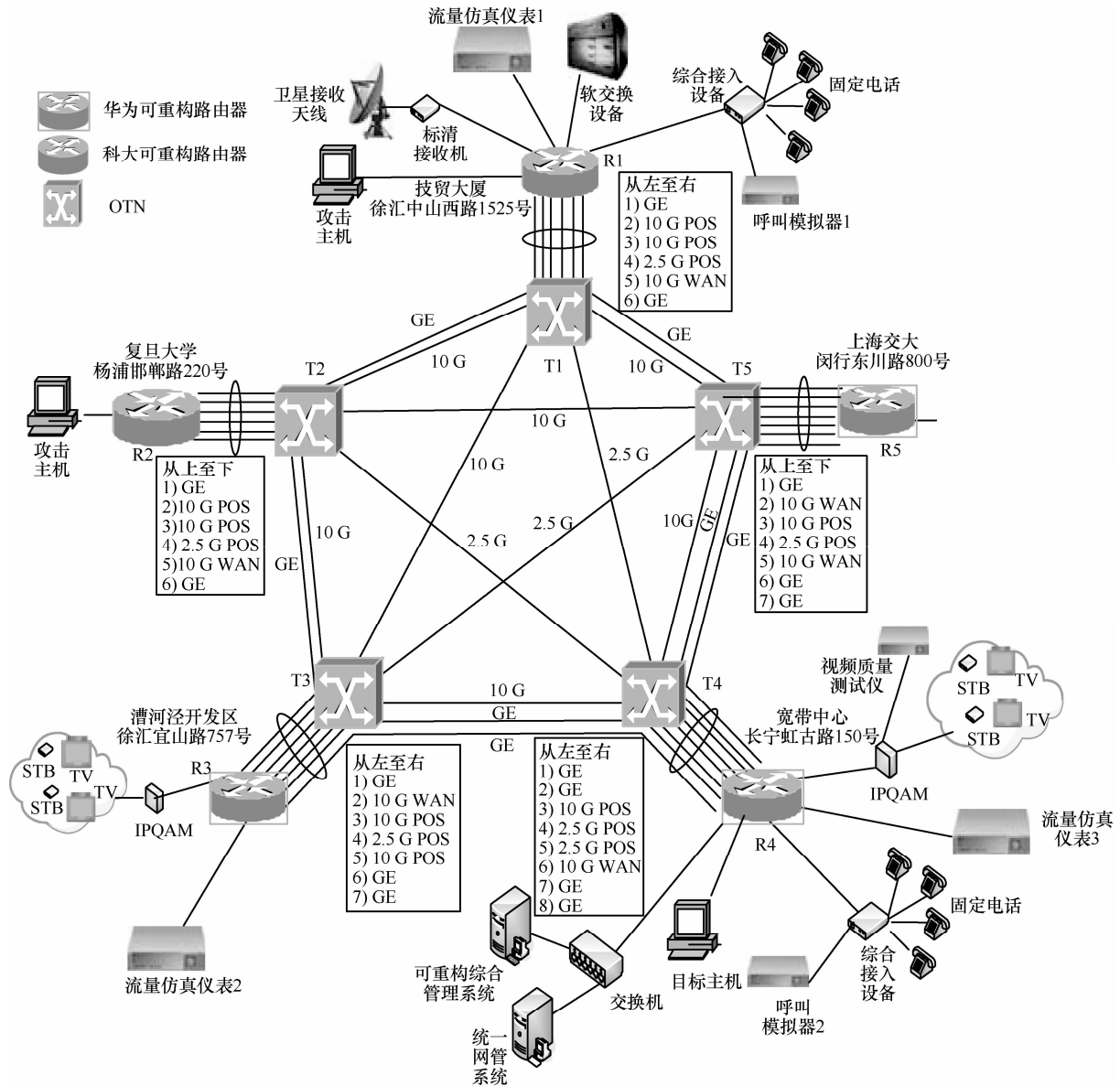


图 13 可重构实验网物理拓扑

求, 并提供满足业务特性需要的 QoS 保证。可重构柔性实验网物理拓扑如图 13 所示。

8 结束语

本文创造性地提出“可重构网络”思想并建立可重构信息通信基础网络体系, 然后在可重构网络功能参考模型的基础上分别创立了网络元能力理论、多态寻址路由机制、网络重构机理和安全可控机理, 从而为构建一个支持目前业务和未来新业务的不同服务质量需求, 功能灵活扩展, 满足泛在互联、融合异构、可信可控可扩展需求, 支持现有网络兼容演进和适于规模应用的新型网络通信信

息基础设施提供一种解决途径。

然而, 本文仅给出可重构信息通信基础网络体系的初步构想和考虑, 诸多新概念仍需继续完善和探讨, 模型中的重要理论和关键机制也需要进一步深入研究并开展相关的实验验证, 这也是作者下一步的工作。

参考文献:

- [1] NSF NeTs FIND Initiative. Future internet design[EB/OL]. <http://www.nets-find.net/>, 2005.
- [2] The European Community's Seventh Programme. The FP7 4WARD project[EB/OL]. <http://www.4ward-project.eu/>, 2007.
- [3] The European Community's Seventh Programme. The FP7 autonomic internet project[EB/OL]. <http://ist-autoi.eu/autoi/>, 2007.

- [4] National Institute Of Information (NICT). AKARI project[EB/OL]. <http://akari-project.nict.go.jp>, 2007.
- [5] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——体化网络与普适服务[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593-598.
ZHANG H K, SU W. Fundamental research on the architecture of new network—universal network and pervasive services[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 593-598.
- [6] LUO H, QIN Y, ZHANG H. A DHT-based identifier-to-locator mapping approach for a scalable internet[J]. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2009, 20(12):1790-1802.
- [7] 吴建平, 吴茜, 徐恪. 下一代互联网体系结构基础研究及探索[J]. 计算机学报, 2008, 31(9):1536-1548.
WU J P, WU Q, XU K. Research and exploration of next-generation internet architecture[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(9): 1536-1548.
- [8] 张小平, 刘振华, 赵有健等. 可扩展路由器[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 1452-1464.
ZHANG X P, LIU Z H, ZHAO Y J, *et al.* Scalable router[J]. Journal of Software, 2008, 19(2): 1452-1464.
- [9] HU Y, LAN J, WU J. Providing personalized converged services based on flexible network reconfiguration[J]. Science China Information Science, 2011, 54(2):334-347.
- [10] WANG B Q. Research and Implementation on a New Router Architecture[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [11] 龚正虎, 傅彬, 卢泽新. 软件集群路由器体系结构的研究[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 40-43.
GONG Z H, FU B, LU Z X. Research on the architecture of software-based cluster routers[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(3): 40-43.
- [12] WANG W, DONG L, ZHUGE B. Analysis and implementation of an open programmable router based on forwarding and control elements separation[J]. Journal of Computing Science and Technology, 2008, 23(5): 769-779.
- [13] 汪斌强, 邬江兴. 下一代互联网的发展趋势及相应对策分析[J]. 信息工程大学学报, 2009, 10(1):1-6.
WANG B Q, WU J X. Development trends and associated countermeasures analysis for NGN[J]. Journal of Information Engineering University, 2009, 10(1):1-6.
- [14] 王浩学, 汪斌强, 余婧等. 一体化承载网络体系架构研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 371-376.
WANG H X, WANG B Q, YU J, *et al.* Research on architecture of universal carrying network[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(3): 371-376.
- [15] STOICA I, ADKINS D, ZHUANG S, *et al.* Internet indirection infrastructure[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(2):73-86.
- [16] CAESAR M, CONDIE T, KANNAN J, *et al.* ROFL: routing on flat labels[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4):363-374.
- [17] FARINACCI D. Locator/ID Separation Protocol (LISP)[S]. 2007.
- [18] MOSKOWITZ R, NIKANDER P. RFC 4423: Host Identity Protocol (HIP) Architecture[S]. 2006.
- [19] ZHANG L, ESTRIN D, BURKE J, *et al.* Named Data Networking (NDN) Project[R]. 2010.
- [20] ANAND A, DOGAR F, HAN D, *et al.* XIA: an Architecture for an Evolvable and Trustworthy Internet[R]. 2011.
- [21] MobilityFirst, a robust and trustworthy architecture for the future internet[EB/OL]. <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/Index.html>.
- [22] Nebula white paper[EB/OL]. <http://nebula.cis.upenn.edu/docs.html>, 2010.
- [23] WU J, BI J, LI X, *et al.* A First-Hop Source Address Validation Solution for SAVA[S]. 2007.
- [24] LI S Y R, SUN Q T. Network coding theory via commutative algebra[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2011, 56(1):403-415.
- [25] LI S Y R, TAN X J. On rearrangeability of tandem of banyan-type networks[J]. IEEE Trans on Communications, 2009, 57(1):164-170.

作者简介:



兰巨龙 (1962-), 男, 河北张北人, 国家数字交换系统工程技术研究中心总工程师、教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术。

程东年 (1957-), 男, 河南原阳人, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、硕士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术。

胡宇翔 (1982-), 男, 河南周口人, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术。