



## 可重构技术与未来网络体系架构<sup>\*</sup>

兰巨龙,邢池强,胡宇翔,程东年

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

**摘 要:** 随着网络规模的不断扩大及新业务的不断部署,IP 网络僵化的体系架构所带来的弊端日益明显。可重构网络技术以其灵活性、可扩展性、对新业务的适应性、绿色节能等优势日渐得到广泛关注。首先详细分析了可重构技术的发展现状,然后讨论了可重构网络技术体系及其对业务发展的适应性,并对可重构网络的绿色节能特性进行了分析。

**关键词:** 可重构网络;未来网络体系架构;可扩展性;绿色节能

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.08.003

## Reconfiguration Technology and Future Network Architecture

Lan Julong, Xing Chiqiang, Hu Yuxiang, Cheng Dongnian

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

**Abstract:** As the scale enlargement of the internet and the continuous deployment of new applications, the disadvantages of the rigid IP architecture becomes increasingly evident. The reconfigurable network has drawn widely attention due to its characteristics such as flexibility, scalability, adaptability and green energy. The current situation of the reconfigurable technology was detailed, then the reconfigurable network architecture and its adaptability for new applications were discussed. Finally, the green energy-saving characteristic of the reconfigurable network was also analyzed.

**Key words:** reconfigurable network, future network architecture, scalability, green energy-saving

### 1 引言

互联网目前采用的分组交换协议 IP 具有网际互连的优质特性,不仅具有时间和空间双重意义的统计复用特性,也具有网络应用的语义透明性。然而,也正是 IP 的统计复用性和语义透明性使其成为互联网支持服务质量保证的软肋。从基础网络体系和机制的角度看,当今信息网络依赖的 IP 基础互联传输能力制约着整个信息网络的总体功能和性能,网络内在的能力与结构对业务需求的适应

性差,导致网络对融合、泛在、质量、安全、扩展、可管可控、移动等的支持能力低下,因此 IP 网络不能从根本上满足提供泛在的信息服务、支持多样化和全方位的网络业务、保证高质量的通信效果、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。

针对现有网络的种种弊端,国内外纷纷开展未来网络体系架构的研究工作。美国于 2005 年启动了 FIND(future internet design)计划<sup>[1]</sup>,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

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2012CB315901),国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2011AA01A103, No.2011AA01A101),国家科技支撑计划基金资助项目(No.2012BAH02B01, No.2012BAH02B03)

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。2010年美国又提出未来互联网体系结构(future internet architecture, FIA)国家项目计划。其中,NDN项目<sup>[2]</sup>旨在开发一个“命名数据网络”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<sup>[3]</sup>旨在建立一个更安全的表达性互联网架构;MobilityFirst项目<sup>[4]</sup>将节点移动作为节点的常态行为进行处理,使用通用的容延网络(GDTN)技术增强网络的顽健性和可信性;NEBULA项目<sup>[5]</sup>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。与此同时,欧盟通过FP7计划支持了Challenge One项目,其子项目4WARD<sup>[6]</sup>和AUTOI(autonomic internet)<sup>[7]</sup>分别依靠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克服网络僵化的问题。此外,日本开展了AKARI计划<sup>[8]</sup>,围绕通过网络虚拟化手段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线进行研究。在新型网络体系试验方面,美国于2005年启动GENI(global environment for network innovations)计划<sup>[9]</sup>,用于构建大规模的试验环境。斯坦福大学也于2008年提出OpenFlow<sup>[10]</sup>,从而为网络协议创新提供实验环境。

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体系,采用两层模型实现对泛在互联和普适服务的有效支撑<sup>[11,12]</sup>;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的网络体系结构<sup>[13]</sup>,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;国家科技部也于2012年部署“973”计划项目“可重构信息通信基础网络体系研究”,用于研究基于可重构技术的新型网络体系架构。由此可见,针对新型网络体系结构的基础研究已经成为国内外的研究热点。

网络重构是全面提升网络业务支持水平的一项全新的结构性方法。可重构网络的核心特征是其内在结构的时变性,即由时变的结构驱动时变的服务能力,最终实现网络服务对应用要求和特征的动态适配。从该意义上讲,可重构网络对单个应用呈现的最终结果应当是:构造并保持能够跟随业务服务质量需求和流量特征变化的时变信道,最大效率地满足网络应用的数据传送要求。下面围绕基于可重构技术的未来网络体系架构展开详细讨论。

## 2 可重构技术

目前,可重构技术主要包括硬件可重构、软件可重构和系统可重构,具体介绍如下。

### 2.1 软件可重构技术

为了改善软件的结构,提高清晰性、可扩展性和可重用性,可重构技术要求软件各个组件之间具有最小的耦合,目前软件可重构的主要方法是模块化方法,在具体的实现中又可分为5种方法:模块代理与模块实现相分离<sup>[14]</sup>、有保障的动态可重构架构<sup>[15]</sup>、plastic架构<sup>[16]</sup>、基于控制计划程序的可重构和基于XML的可重构体系<sup>[17]</sup>。

现有研究中,Xbind<sup>[18]</sup>研制了一套在ATM网络上创建、部署和管理多媒体服务的分布式软件组件。麻省理工学院的Click软件路由器项目<sup>[19]</sup>提供了一种模块化可扩展的网络设备结构。Louati W等<sup>[20]</sup>用Linux中的/proc文件系统作为内核和用户的通信方式,实现Click中的动态配置功能,而Houidi I等<sup>[21]</sup>用CORBA组件模型实现Click路由器。模块化可扩展的网络设备结构思想同样在Intel的IXA软件架构、Juniper的T4000、Cisco的CRS-3、斯坦福大学的100 Tbit/s路由器等诸多项目中得到了体现。但目前这些软件可重构的应用实例仅为可扩展性提供了一些简单的思想,离网络可扩展的需求相差甚远。

### 2.2 硬件可重构技术

参考文献[22]按照重构层次的不同,将硬件可重构分为4类:门级可重构、部件级可重构、指令级可重构与芯片级可重构。按照实现技术的不同,又将重构分为3类:基于FPGA的重构、基于XPP(extreme processing platform,极限处理平台)的重构和基于芯片的重构。下面以基于FPGA的重构为例,介绍硬件可重构的流程。

对于硬件可重构,在系统加电运行过程中,通过配置控制逻辑主动加载FPGA的配置文件,可以实现FPGA的重构,但需要中断系统的运行。而对于可提供部分可重构功能的芯片,如Xilinx公司的Virtex系列FPGA,则可以在不中断系统运行的情况下更新FPGA的部分逻辑,具有更高的灵活性。

可重构实现结构如图1所示,由可重构代理、配置引擎、配置文件存储器和待配置功能部件(由FPGA及相关器件组成)4部分组成。

其中,远程用户通过互联网与可重构代理连接,远程

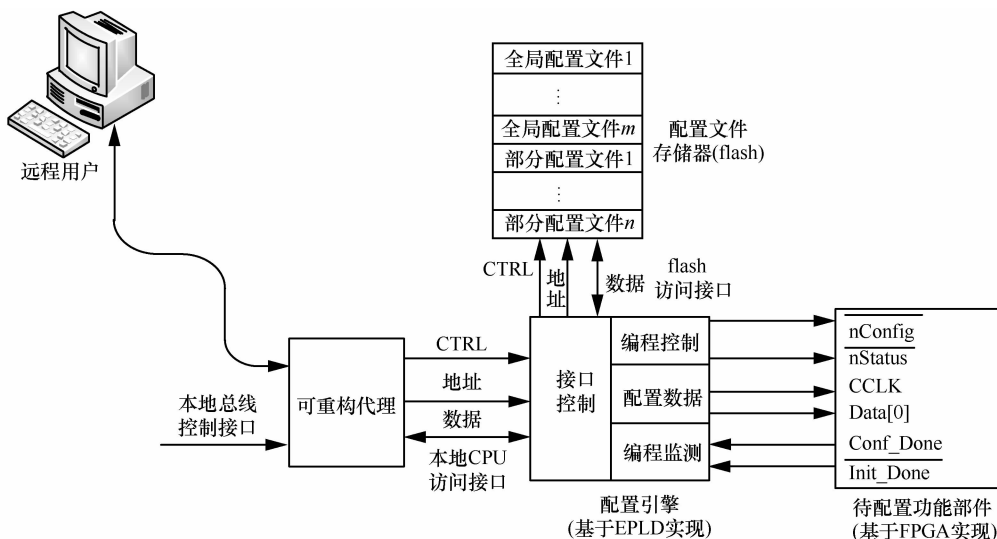


图1 可重构部件的重构实现

用户发布的命令通过可重构代理的解析提交配置引擎执行,通过可重构代理完成配置文件的读写、更新以及动态配置。本地CPU也可以通过可重构代理完成上述功能。配置引擎完成FPGA的配置控制以及配置文件存储器(flash)的读写控制。配置文件存储器主要存储FPGA的全局配置文件和局部配置文件。

### 2.3 网络可重构技术

网络重构是全面提升对网络业务支持水平的一项全新的结构性方法。从具体的结构形态上看,可重构网络可分为针对功能的重构和针对性能的重构、静态重构和动态重构、节点重构和网络重构等。

针对网络可重构的研究,参考文献[23]提出了一种应用于可重构的MIN (multistage interconnection network)的可伸缩性路由方法。参考文献[24]研究了一种可重构的覆盖网络,在节点或链路发生改变时,可通过重构网络结构保证网络的质量和性能。目前,针对业务网络重构方面的研究尚不多见,参考文献[25]对于可重构网络的部分特征进行了分析,而参考文献[26]则围绕重构的研究目的对beyond 3G无线通信网的协议族进行了梳理。

国内网络可重构相关研究方面,主要成果是由中国人民解放军信息工程大学牵头,清华大学、国防科技大学、浙江大学、浙江工商大学、华为技术有限公司参加的联合团队研究的以“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<sup>[27]</sup>,并且以网络承载服务为核心,以可重构路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<sup>[28~31]</sup>。

## 3 ForCES 与可重构网络

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,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(forwarding and control element separation, ForCES)工作组NPF、朗讯的软路由器(soft router)、Intel提出的IXA、斯坦福大学的SDN和OpenFlow。国内相关研究为可重构网络。下面将详细介绍ForCES、SDN及可重构网络的核心技术体系。

### 3.1 ForCES 技术体系

ForCES致力于转发件(forwarding element, FE)和控制件(control element, CE)的分离,并对转发面和控制面的信息交互进行了标准化。

ForCES的基本思想是实现路由器转发件和控制件的分离,并将路由器解耦合为由CE、多个FE以及连接它们的ForCES协议<sup>[32]</sup>构成。其中,CE用来指导一个或多个FE如何处理数据分组,FE在一个或多个CE通过ForCES协议控制并使用底层硬件对每个数据分组进行加工和处理。ForCES网络件(network element, NE)是由一个或多个CE及FE构成的对外隐藏内部细节的执行实体。

实现转发件与控制件分离需要定义一个结构化框架以及相关协议,使得NE内部的控制平面和转发平面之间的信息交换标准化,从而使CE与FE成为物理上分离的标准组件。根据ForCES需求分析文件RFC3654<sup>[33]</sup>和ForCES

框架文件 RFC3746<sup>[34]</sup>,NE 的结构如图 2 所示。

图 2 中,Fp(ForCES protocol)为 CE 和 FE 之间的通信协议,Fi 表示 FE 之间的接口,Fr 表示 CE 之间的接口,Fi/f 表示 FE 的外部接口。

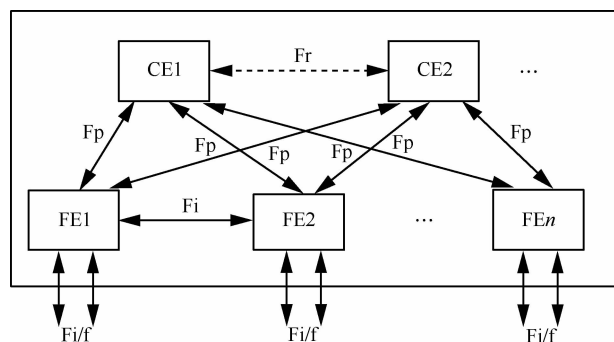


图 2 ForCES NE 体系结构

FE 模型包含能力模型和状态模型。前者描述了 FE 所能支持的各种功能及约束,用来告知 CE 在 FE 上所允许操作的状态及操作的数量限定和能力约束等信息;后者说明了 FE 的当前值与操作行为,向 CE 描述 FE 的当前实例。FE 向 CE 通告能力和状态信息,CE 依据这些信息对 FE 执行相应操作。

同时,FE 在逻辑上又被分为多个逻辑功能块(logical function block,LFB),CE 通过对相关 LFB 的控制操作实现对 FE 的控制操作。同时,多个 LFB 相互连接可形成不同的 LFB 拓扑结构以完成特定功能。基本的 LFB 包括分类器、调度器和转发器等,每一个 LFB 都会对经过的数据分组执行预定操作。根据对数据分组的不同操作,可将 FE 分成不同的 LFB,如图 3 所示。

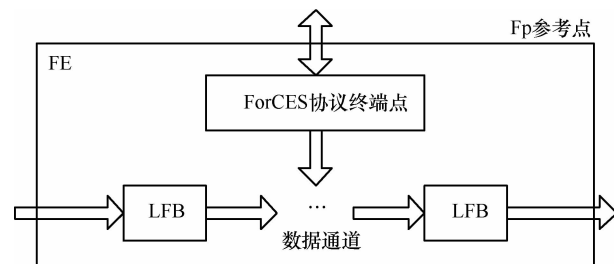


图 3 ForCES FE 基本结构

CE 通过 Fp 参考点和 ForCES 协议终端点间接地对 LFB 的输入、输出和属性进行询问和操作。在图 3 中,水平方向描述了一个 FE 内部整个转发平面各个 LFB 之间的输入和输出关系,垂直方向表示 CE 与 FE 之间通过 Fp 参考点形成的双向交互通道。CE 对 FE 的通信主要是对 FE

执行一些配置、查询和控制工作,或向 FE 发送数据分组,在 CE 内部实现时,会将其向 FE 查询关于 FE 的能力状态信息的 ForCES 资源进行存储,即对 LFB 类库和实例库信息进行存储,保证 CE 的工作效率;FE 对 CE 的通信主要是向 CE 发送一些重定向数据分组,或向 CE 报错,或向其提供一些所需要的监控或统计信息等。值得注意的是,CE 与 LFB 之间的通信是抽象而间接的,这种通信主要是为了实现 CE 对 LFB 属性的操作而设置的。

### 3.2 SDN 技术体系

软件定义网络<sup>[35]</sup>(software defined network,SDN)是由美国斯坦福大学 Clean Slate 研究组提出的一种新型网络创新架构。SDN 基于 OpenFlow<sup>[36]</sup>技术发展而来,并通过在新型网络试验平台 GENI<sup>[37]</sup>上的推广应用,得到了学术界和工业界的广泛认可。

SDN 体系架构分为应用层、控制层和基础设施层 3 部分,其逻辑架构如图 4 所示。应用层包括各种不同的应用和业务;控制层主要负责维护网络拓扑和状态信息,并对数据平面的资源编排进行处理等;基础设施层负责数据的处理、转发和状态收集。OpenFlow 技术被认为是 SDN 架构中控制平面和数据平面间的第一个标准通信接口,初步实现了 SDN 的原型设计思想,简化了网络的配置模式,增加了网络控制权的开放性,推动了 SDN 技术的快速发展。

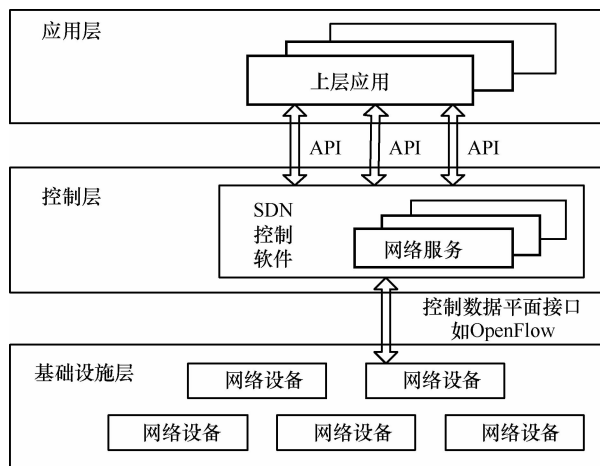


图 4 SDN 体系逻辑架构

控制与转发分离是 SDN 最本质的特征。转发平面由受控转发的网络设备组成,控制面上的控制应用负责运行转发方式以及业务逻辑,以实现构建可编程、可管理和可动态变化的新型网络。此外,SDN 还具有两个基本特征:通过为控制平面提供开放的网络操作接口,控制应用只需要



关注自身逻辑,而不需要关注底层更多的实现细节;控制面在逻辑上是集中的,即一个控制平面可以控制多个转发平面设备,从而控制整个物理网络,以获得全局的网络状态视图,并根据全局网络状态视图对网络实现进行优化控制。

通过上述特征,SDN 可实现以下功能:网络设备与业务特性解耦合,硬件只需关注转发和存储能力,可采用相对廉价的商用架构实现;可通过软件配置确定网络设备的种类与功能,服务器可作为网络操作系统完成对网络的操作控制及运行;业务可定制路由、安全、策略、QoS 流量工程等各种网络参数,并实时配置到网络中,缩短了开通具体业务的时间,响应相对更快。

SDN 可以让网络研发者和管理者从软件层面更加灵活地定义和控制网络,摆脱对大规模硬件设备和复杂功能组件的依赖,降低建设成本和运行难度,实现对网络流量的灵活控制,为核心网络及应用的创新提供良好平台。

### 3.3 可重构网络体系

可重构网络是一种旨在通过网络结构的自组织、功能的自调节和业务的自适应最大程度地弥合网络能力与业务需求之间的时变鸿沟的新型网络体系,其使得网络能够按照业务需求动态地进行结构重组和功能重构,从而构建一个提供多样化和全方位的网络业务、满足多样性的业务要求、具备高质量通信效果的新型网络。其主要理论有元能力理论、认知与重构机理与多态寻址路由机制,如图 5 所示。

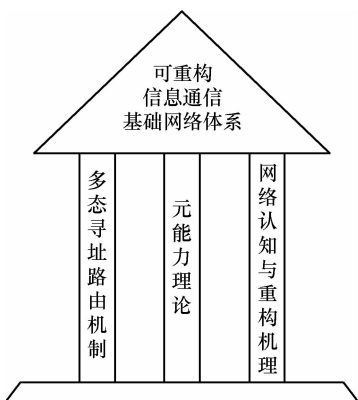


图 5 可重构信息通信基础网络理论体系

#### 3.3.1 元能力理论

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: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  $SM_i$ , 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  $S=\{SM_i, i=1, 2, \dots, M, M \text{ 为元服务个数}\}$  提供服务,该集合是封闭的,其中的元素是有限的。进一步,每一个元服务需要一组基本网络功能元素  $CM_i$  予以支撑,称每一个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  $C=\{SC_j, j=1, 2, \dots, N, N \text{ 为元能力个数}\}$ ,该集合也是封闭的,其中的元素也是有限的。上述“业务—元服务—元能力”模型如图 6 所示。

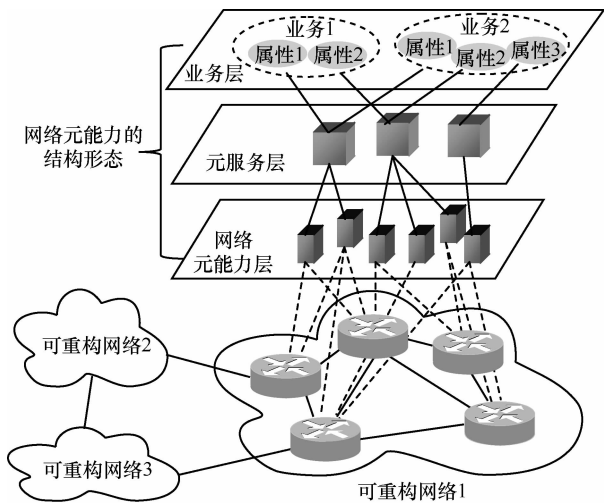


图 6 “业务—元服务—元能力”功能模型

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。再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。网络的元能力通过动态感知业务、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和组配,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的支持。

#### 3.3.2 认知与重构机理

为实现网络的可重构,可重构网络在管理面增加了一个全新的网络管理功能——认知重构功能。其中,认知是指网络借助从局部到整体的自学习能力,对其自身的实时运行状态、资源分布以及应用状态等信息进行全方位的获取。网络认知可分为网络状态认知和网络资源认知,网络状态认知用于获取网络上所有业务的传输需求,为网络重

构提供需求信息,为重构的触发提供必要凭据。网络资源认知获取网络设备的能力和运行状态,为网络重构提供底层设备的重要信息,是实现网络重构的必要前提。

重构功能基于认知功能获得的网络资源和业务需求信息,动态评估网络对业务的承载效果,判决是否进行重构操作。重构功能依据认知功能得到关于业务与网络状态的变化,依据重构策略库(用以存储重构策略,如最短路径、负载均衡等策略)将得到的服务需求与网络资源信息进行对比,动态评估网络对该业务的承载效果,并调用重构策略库中该业务所对应的重构策略,判断决定是否进行重构操作。若需要,则将重构指令传递给网络重构代理进行解析并执行。重构代理部署于可重构网络路由器中,负责实施重构指令。认知重构模型如图 7 所示。

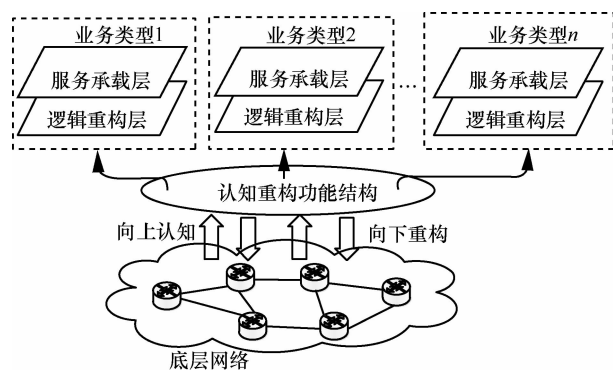


图 7 认知重构模型

图 7 中,认知重构功能结构对底层进行认知,基于认知结果构建针对不同业务类型的服务承载网;并基于认知结果动态调整服务承载网机构与元能力集合,动态适应业务、网络与节点资源的动态变化。

### 3.3.3 多态寻址路由机制

多态寻址与路由主要解决由元服务驱动的,支持多种网络体系并存、满足多种应用要求的网络寻址及路由问题。多态寻址路由机制可支持服务通信类、内容通信类、主机通信类和位置通信类等业务,对应服务标识(SID)、内容标识(CID)、主机标识(HID)和位置标识(LID)4种标识。

多态寻址是对统一网络报文格式进行特化,进而生成具有多种运行形态的寻址方案,即由统一报文格式派生出 4 种寻址标识下的特定报文格式,生成可用于数据传输的 4 种具体的报文头部。与多态寻址方式和不同传输要求的业务流对应的路径计算与更新过程,即多态路由。

## 4 可重构网络对业务发展的适应性

随着网络的发展,大量的网络新兴业务不断涌现,在给人们生活带来便捷的同时,也对网络的服务能力提出了更高的要求。在对新业务的适应方面,通过可重构基础网络体系架构的认知功能,可以分析出新业务流量的关键特征(如 QoS 等)并感知当前网络资源,基于认知机制的策略库有效指导服务承载网的构建和自适应调整,有效组合现有元能力、元服务为业务提供保障,提高业务适配性及整体性能。

另外,若网络新业务不能由现有元能力组合提供,需要针对新业务产生新的元能力,将新的元能力标准化并实例化。这样,新业务产生时即可对元能力集合进行扩充,既不影响原有业务的正常提供,亦可使可重构网络适应各种新业务的不同需求。可重构网络对新业务的适应过程如图 8 所示。

图 8 中,认知单元可以分析新业务的各种特征(如 QoS 等),并感知网络提供服务的能力,得到业务所需的关键元服务及参数集,为服务承载网构建和调整提供行为决策。通过接口将网络能力和节点能力信息传递至认知处理层,并通过网络调节单元完成服务承载网的构建以支持业务。当现有元能力不足以完全支撑新业务时,则通过更新元能力库的方法产生新的元能力,提供业务支持。

## 5 可重构网络的绿色节能特性

网络规模迅速膨胀使绿色节能难以保障,信息和通信技术行业作为全球增长最快的行业之一,其碳排放也随着行业的增长而不断增长,目前信息和通信技术领域的碳排放占全球的 2%,这一比例将在 2020 年翻一番。2008 年网络基础设施,包括路由器、服务器、交换机、冷却设施等设备共耗电 8 680 亿千瓦时,占全球总耗电量的 5.3%。按照目前的增长趋势,到 2025 年,IT 行业的平均能耗将达到 2006 年的 5 倍,网络领域更会达到 13 倍。能耗问题已成为信息和通信技术持续发展的重大障碍。所以,绿色节能已成为新型网络必须考虑的问题。

由于缺乏对网络运行状态的有效检测,使得无论网络中流量多少、流量分布如何随时间发生变化,网络交换节点时时刻刻都在满负荷运行,这种现象造成了资源的巨大浪费,也不利于网络设备的维护与使用寿命的延长。例如,2010 年 ACM SIGCOMM 国际会议上,美国普林斯顿大学指出,现有网络的骨干网链路利用率仅在 30%~40%<sup>[38]</sup>;2011 年 ACM SIGCOMM 国际会议上,西班牙电信的研究

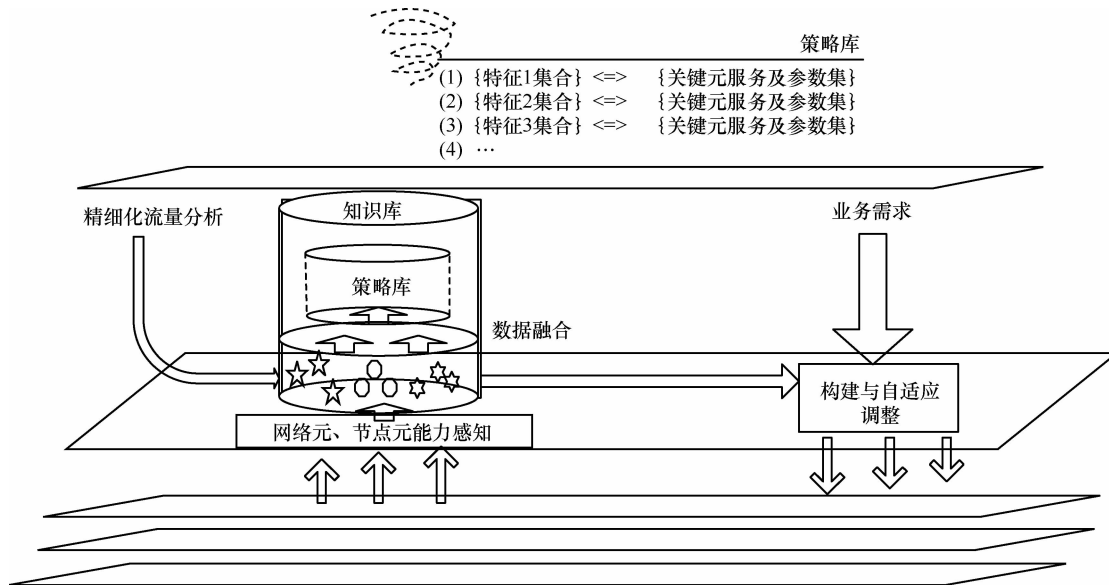


图8 多模态资源感知生成知识库的流程

人员指出,现有网络的接入网链路利用率不到10%<sup>[39]</sup>,网络资源利用率很低。

为了实现网络物理资源的高效利用与节能,基于目前网络绿色节能的机理,可重构基础网络体系的资源模型可划分为3个子层:物理资源子层、活跃资源子层和逻辑承载网络子层。其中,物理资源子层即物理网络资源;活跃资源子层由物理资源休眠或激活策略确定其资源;逻辑承载网络子层由逻辑承载网组成,是构建在活跃资源子层之上的服务于不同业务类型的承载网络。研究物理资源休眠或激活策略,以期在满足业务需求的同时,最大限度地高效利用网络资源和节约能源。

比如,网络流量时刻在发生变化,根据对网络流量的监测,当网络流量低于某一阈值时,可重构网络可以使网络中的一些节点在不影响整个网络可达性的原则上处于休眠状态,减少资源消耗;当网络流量回升时,再逐步激活某些节点,适应大流量的情景。针对流量的不同分布,可以使流量密集的区域大多数节点处于激活状态,而对于流量小的区域则可以增加处于休眠状态的节点,在保证网络正常运行的情况下实现资源的动态调整、合理使用,节约能耗。

## 6 结束语

随着网络规模的不断扩大及新业务的不断产生,IP网络越来越难以满足不同业务的多样化服务质量需求。针对这一问题,国内外纷纷开展未来网络体系架构研究,而可

重构技术以其灵活性、可扩展性、对新业务的适应性和能耗上的绿色节能等优势日渐得到广泛关注。

国家科技部于2012年部署“973”计划“可重构信息通信基础网络体系研究”项目,其目的就在于立足可重构技术实现新型网络体系结构,以克服IP网络的种种弊端,支持新型业务快速部署,并具有灵活的可扩展性和抗攻击能力。随着项目研究的不断深入,可重构网络体系将会越来越完善并标准化。该项目的实施必将对我国新型网络体系架构的发展起到积极的推动作用。

## 参考文献

- 1 NSF NeTS FIND initiative. <http://www.nets-find.net/>, 2013
- 2 Zhang L X, Estrin D, Burkr J, *et al.* Named data networking (NDN) project, 2010
- 3 Anand A, Dogar F, Han D S, *et al.* XIA: an architecture for an evolvable and trustworthy internet. Proceeding of ACM Hotnets-X, Cambridge, MA, USA, 2011
- 4 First M. A robust and trustworthy architecture for the future internet. <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/Index.html>, 2013
- 5 Nebula White Paper. <http://nebula.cis.upenn.edu/docs.html>, 2013
- 6 The European community's seventh programme. <http://www.4ward-project.eu/>, 2013
- 7 The European community's seventh programme. <http://ist-autoi.eu/autoi/>, 2013
- 8 National institute of information (NICT). <http://akari-project.nict.go.jp>, 2013

- 9 Global environment for network innovations. <http://www.geni.net>, 2013
- 10 McKeown N. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(2): 69~74
- 11 张宏科. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务. *电子学报*, 2007, 35(4): 593~598
- 12 Luo H B, Qin Y J, Zhang H K. A DHT-based identifier-to-locator mapping approach for a scalable internet. *IEEE Transactions on Parallel Distribution System*, 2009, 20(12): 1790~1802
- 13 吴建平. 下一代互联网体系结构基础研究及探索. *计算机学报*, 2008, 31(9): 1536~1548
- 14 Yu L Z, Muller G C, Srinivasan H A. A framework for live software upgrade. *Proceedings of 13th International Symposium on Software Reliability Engineering, ISSRE 2003*, Annapolis, MD, USA, 2003
- 15 Niamanesh H H, Jalili M R. A framework to support run-time assured dynamic reconfiguration for pervasive computing environments. *Wireless Pervasive Computing*, 2006(2)
- 16 Batista T, Joolia A, Coulson G. Managing dynamic reconfiguration in component based systems. *Proceedings of 2nd European Workshop, EWSA 2005*, Pisa, Italy, 2005
- 17 Lai H, He L S. XML-based reconfigurable measurement system department of instrument department of instrument. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, Shandong, China, 2007
- 18 The xbind research project. <http://comet.columbia.edu/xbind/>, 2013
- 19 The click modular router project. <http://www.pdos.lcs.mit.edu/click/>, 2013
- 20 Louati W. Configurable software-based edge router architecture. *Comput Commun*, 2005, 28(14): 1692~1699
- 21 Houidi I. An extensible software router data-path for dynamic low-level service deployment. *Proceedings of High Performance Switching and Routing*, Poland, 2006: 6~9
- 22 王昭顺, 王沁, 由英杰. 可重构计算机体系结构. *北京科技大学学报*, 2001, 23(4)
- 23 Ferreira R. A low cost and adaptable routing network for reconfigurable systems. *Proceedings of IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, IPDPS 2009*, Roman, 2009: 1~8
- 24 Hidell M. Distributed control for decentralized modular routers. *Proceedings of SNCNW*, Karlstad, Sweden, 2004
- 25 Jamalipour A. Reconfigurable Networks. *IEEE Wireless Communications*, 2006(1): 2~3
- 26 Gazis V. A generic model for reconfigurable protocol stacks in beyond 3G. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 1(13): 70~78
- 27 汪斌强, 邬江兴. 下一代互联网的发展趋势及相应对策分析. *信息工程大学学报*, 2009, 10(1): 1~6
- 28 王浩学. 一体化承载网络体系架构研究. *计算机学报*, 2009, 32(3): 371~376
- 29 徐恪. 可重构路由开发环境. *中国教育网络*, 2010(1): 46~48
- 30 卢泽新, 张晓哲. 基于虚拟化技术的可重构路由器控制平面模型. *信息工程大学学报*, 2009, 10(1): 12~17
- 31 Yuan F. Service mapping in open and reconfigurable routing and switch node. *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, Paris, France, 2010: 199~203
- 32 Doria. ForCES protocol specification. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-forces-protocol-22>, 2009
- 33 Anderson K T. Requirements for Separation of IP Control and Forwarding. RFC 3645, 2003
- 34 Yang L, Dantu R, Anderson T, *et al.* Forwarding and Control Element Separation (ForCES) Framework. RCF 3746, Apr 2009
- 35 Raghavan B, Casado M, Koponen T, *et al.* Software-defined internet architecture: decoupling architecture from infrastructure. *Proceedings of the 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, Seattle, WA, USA, 2012: 43~48
- 36 McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, *et al.* OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(2): 69~74
- 37 Elliot C. GENI: global environment for network innovations. *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*, Montreal, Quebec, Canada, 2008: 8
- 38 Fisher W, Suchara M, Rexford J. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links. *Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking*, New Delhi, India, 2010: 29~34
- 39 Goma E, Canini M, Toledo A L, *et al.* Insomnia in the access. *Proceedings of ACM SIGCOMM'2011*, Toronto, ON, Canada, 2011: 338~349

## [作者简介]



兰巨龙,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师,主要研究方向为新型网络体系、网络建模。

邢池强,男,国家数字交换系统工程技术研究中心硕士研究生,主要研究方向为宽带信息网络、网络安全、新型网络体系。

胡宇翔,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为新型网络体系、路由与交换技术。

程东年,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心教授,主要研究方向为宽带信息网络体系结构、网络协议和网络性能分析。

(收稿日期:2013-07-20)