

网络结构自调整的柔性内涵初探

程东年, 汪斌强, 王保进, 张建辉

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 从微观和定量意义的服务效果对应用要求一致匹配的角度探索了网络重构柔性的内涵, 具体地揭示了跟随应用时变要求的时变信道这一可重构网络的核心特征, 然后从该时变信道“一致满足”应用要求的目标出发, 进一步揭示了重构柔性的“渐变跟随”、“着眼整体”、“隐性隔离”和“自主驱动”4个重要内涵, 采用指数移动平均、 $n:m$ 表决、马尔科夫决策和强化学习定量地刻画了效果对要求的稳定偏离和资源调整幅度的最佳顺序决策。

关键词: 网络体系结构; 可重构网络; 柔性; 马尔科夫决策过程; 强化学习

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)08-0214-09

Preliminary study on the connotation of flexibility in dynamically reconfigurable networks

CHENG Dong-nian, WANG Bin-qiang, WANG Bao-jin, ZHANG Jian-hui

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

Abstract: From the microscopic and quantitative viewpoints, the connotation of the structural flexibility of reconfigurable networks was explored. More accurately, a key feature, i.e., the dynamic data channel varying with service demands, of reconfigurable networks was first exhibited and explained. Four dominant implications of the flexibility were then revealed as gradually mapping to demands, keeping global performance good, implicit isolation, and self-driven control. Finally, related quantitative models and methods for both determining the stable deviation of outcomes from demands and computing the volume of resource dynamically reconfigured were investigated by using the exponentially moving average, the $n:m$ voting scheme, Markov decision processes (MDP) and reinforcement learning, respectively.

Key words: network architecture; reconfigurable network; flexibility; Markov decision process; reinforcement learning

1 引言

电信网的电路交换能力具有明确的网络业务针对性, 但恰是它的这种承载结构到网络业务的强针对性成为其资源利用效率低的重要原因。互联网采用的分组交换协议 IP 具有网际互连的优质特性, IP 一方面具有时间和空间双重意义的统计复用特性, 另一方面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

联网支持数据传送质量的软肋。不同于现有的服务质量保证方法, 内在结构可变的可重构网络是在分组交换条件下解决数据传送质量问题的一项全新的结构性方法, 它旨在既保留具有统计复用和语义透明等优质特性的分组交换模式, 又以动态改变自身结构和行为的方式^[1]来保证数据传送的质量。

可重构网络的研究大体沿自适应协议和可编程网络 2 个方向进行^[1]。在自适应协议方向, 文献 [2~4] 研究了可重构网络功能和结构的宏观性质。文

收稿日期: 2011-12-02; 修回日期: 2012-05-30

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, 2012CB315905)

Foundation Item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315901, 2012CB315905)

献[2,4]以服务提供为目标,研究了逻辑承载网的结构形态及其构建方法,文献[3]针对层次化结构,提出了松耦合、扩展、隔离等网络构建原则。由性能指标驱动结构的动态配置是另一个重要方面。文献[5]用数据平均网络时延作为性能度量,研究了树形和等级结构的动态可重构数据网络。针对高度动态环境中容易导致路由信息不一致的问题,文献[6]为可重构节点提出了一种基于消息的多队列同步机制。文献[7]用呼叫阻塞率作为性能度量来设计可动态重路由的机制。文献[8]研究了用可连接性(connectability)刻画传输网资源重构策略的特征,以提高对流量动态需求的适应性和资源效率。文献[9]针对多种不同的无线频谱和资源优化方法分别具有不同时间尺度的特点,提出了一种将多尺度方法进行融合的端到端可重构体系,旨在自动调节无线接入处理模块的操作参数,以实现网络对业务流量模式的自适应。文献[10]提出一种将认知和自主能力融入网络协议的端到端可重构无线网络结构。文献[11]针对网络节点失效的问题,提出一个分布式拓扑重建结构 DASH,通过自动连通失效节点的各个邻居来重建整个网络的连通性。文献[12]给出一种光传输资源动态优化配置的可重构光骨干网络结构,以达到有效支持由用户而非网络来动态定制其骨干网光通道的目的。文献[13]针对各种互联网设备在通信协议和技术上的异构性,提出了一种信息驱动体系结构 IDRA,通过网络重构技术在各异构设备之间建立并维持连通性,从而自动适应并弥合设备间的异构性。文献[14]研究了 DiffServ 中业务流服务速率的动态配置问题,在为路由器输出链路的服务速率动态配置问题建立数学模型的基础上,采用启发式算法探测网络对业务流的服务效果,将可用的资源分配给不再满足 QoS 约束的业务流,从而实现对服务速率的动态调节。在可编程网络方向,文献[15]研究了网络协议的动态构建问题,借助于协议推进器(protocol boosters),创建了一个对协议实施动态装配的“协议市场”机制,允许网络根据业务要求和自身状态来动态构建与之相配的网络协议。文献[16]针对骨干网络仅提供分组传递,网络服务由端系统提供,从而导致服务提供的灵活性差和效率低的问题,提出网络服务的一种动态构建体系 NetSerV,通过网络服务的节点公共执行环境,使得网络服务模块可在不同节点间进行动态迁移和组合,实现了以最佳服务效果为目的的网

络服务内在结构的动态构造。

然而,作为一种新型的结构形态,可重构网络的微观核心特征、重构的柔性内涵、柔性重构的驱动因素和驱动机理等可重构网络体系的核心要素仍然是未解的公开问题。当前对网络结构重构柔性的认识大多是宏观和定性的,少有揭示网络结构重构柔性微观的、过程的和定量的内涵,而恰是后者决定可重构网络最终呈现的真正功能和性能。本文从网络服务的实际效果应最大程度地符合应用传送要求这一角度出发,探讨网络柔性重构的固有内涵。

本文第 2 节揭示了跟随应用要求而变化的时变信道这一可重构网络的核心特征;第 3 节进一步揭示并阐述了结构柔性的“渐变跟随”、“着眼整体”、“隐性隔离”和“自主驱动”4 个重要内涵,分别采用指数移动平均、 $n:m$ 表决、MDP 和强化学习模型定量刻画了服务效果对应用要求的稳定偏离和资源调整幅度的最佳顺序决策;第 4 节给出了一种支持柔性重构的网络节点功能结构;第 5 节是结束语。

2 网络重构的核心特征

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流量特征变化的时变信道,用过程意义的服务效果来一致地满足网络应用的数据传送要求。

这里,可变化的网络内在结构是指网络资源的分配和使用方式可以动态改变,换句话说,网络可以适时改变它对应用所分配的资源和对资源的使用方式。网络服务能力的适配性则指网络向其使用者提供的业务能够匹配时变的应用要求和特征。传统电信网的业务是确定的、离散的,互联网使用的 IP 也仅仅做到了在分组层面实施随机的资源分配,这种随机性本质上是局部的和不受控的。可重构网络与基于 IP 的互联网的一个重要不同之处在于,可重构网络的一个重要目标就是通过动态的过程控制,使得其内在结构的变化调整以显式的方式受控于网络业务的数据传送要求和特征,最终使得服务效果对传送要求之偏离程度达到最小,或者效果对要求的符合程度达到最大。

给定网络应用要求的总和 A 和网络实际的服务效果 B ，网络重构的一个重要目标就是使得二者之差的绝对值 $|B-A|$ 最小化。就网络本身而言，网络在时刻 t 的重构就是通过改变其内部的结构 $S(t)$ 来实现网络资源对网络应用的分配，在时刻 t 进行资源分配的本质则是确定总体网络资源集合的一个划分 $D(t)$ ， $D(t)$ 的每一个资源子集则对应时刻 t 的一个应用要求和特征子集。在统计复用网络中，网络资源的划分是时变的。若 t_i 为第 i 次重构的时刻，则网络资源划分 $D(t)$ 的演变轨迹为：

$$D(t_1) \rightarrow D(t_2) \rightarrow \dots \rightarrow D(t_i) \rightarrow \dots$$

其中， $t_1 < t_2 < \dots < t_i < \dots$ 。记 h 和 g 分别为概念意义的映射，则有 $D(t) = h(S(t))$ ， $B(t) = g(D(t), A(t))$ ，这样，网络服务效果“一致满足”应用传送要求可以近似地表示为如下的优化问题：

$$\min |B(t) - A(t)| \tag{1}$$

网络中所有应用（或者某种应用类型中的所有应用）要求的总和 A 具有 2 个典型特征：第一，在宏观上， A 不依赖于网络的结构、状态等而独立存在，即任何一个应用的数据传送要求不会因网络结构、状态等条件的变化而变化。比如，话音应用不会因网络资源受限而降低其话音数据的传送质量要求；第二，在微观上， A 是时变的。对于共同使用某种网络资源的一组应用而言，虽然单个应用的传送要求通常是确定的，但由于网络应用的复合是随机的，就使得因应用复合而施加到该共享资源上的总体服务要求也是随机变化的，因此， A 是所有应用需要的网络资源量的随机叠加。由于参与叠加的每个应用通常都有与众不同的要求、不同的叠加时刻和不同的生命周期，因此， $A(t)$ 是时变的随机序列。

实际服务效果 $B(t)$ 是网络的自身结构、网络资源的被占用状态、改变资源划分的网络重构能力、独立变化的应用要求等因素相互作用的结果，它的最终外在数量特征与 $A(t)$ 相同，即为所有应用实际分配的网络资源的总量，显然 $B(t)$ 也是时变的。然而， $B(t)$ 有 2 点与 $A(t)$ 不同：第一， $A(t)$ 是导致 $B(t)$ 变化的一个重要因素，例如，突然增大（或减小）的高优先级流量会显著挤占（或提升）低优先级的瞬时相对带宽。第二， B 既可以大于 A ，也可以小于 A ，而且 B 和 A 的这种数量对比关系依然是时变的，可针对该数量对比关系建立网络重构的策略。从网络自身的角度看， B 大于 A 是一种“利他”型

的策略，其目标是用过量的资源来保证应用的要求，而 B 小于 A 则是一种“利己”型的策略，它优先考虑网络资源的效率，力求资源效益最大化而可以忽略部分应用服务效果的降级。

网络对自身结构的调整改变了网络资源针对网络应用的划分 $D(t)$ ，时变的资源划分与应用要求又进一步地确定了下一时刻新的实际服务效果 $B(t)$ ，而在下一时刻，新的服务效果与新的应用要求又会作用于可重构网络的认知控制结构从而进入新一轮的网络重构循环，其中诸要素间的因果关系和操作循环如图 1 所示。

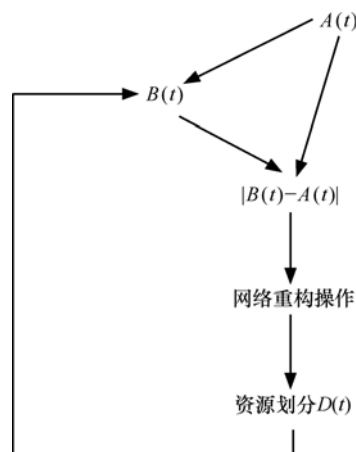


图 1 网络重构的因果要素和操作循环

3 网络重构的柔性

揭示网络结构自我调整中各个要素在功能意义的因果逻辑关系仅仅是第 1 步，还需要更加深入地探索网络重构的方式，换句话说，网络结构自调整的方式是可重构网络“一致满足时变要求”的美好目标得以实现的关键。为此，网络可以针对各个应用进行结构的调整，但这意味着忽略应用重要程度的差异性，使得有限的资源难以保证对所有应用要求的一致满足；网络也可以针对应用要求的任何变化立即进行结构调整，但这样既无法兼顾网络资源的效率，又未利用网络应用对服务效果降级的容忍性质；此外，针对一些应用对资源划分作出的改变是否需要考虑对其他应用的影响？网络重构操作是受独立于网络的外力（如，人工管理命令等）而被动进行的，还是受网络自身的某种控制机构（例如，内在的认知机制等）而主动实施的？作者认为，如果可重构网络能以某种“柔性”的方式对其结构进行调整，就可以很好地兼顾诸如一致满足

所有应用的时变要求、改善资源效率、保证重构的透明性、建立对时变要求的自然和自主的适应性等多种我们所期望的目标。这里的柔性是网络结构调整方式的总体特性，进一步地，柔性是网络针对应用要求对其内在结构、资源做出隐性调整，以实现其服务效果对应用要求动态和紧密的跟随，换句话说，我们将达到内在支持功能到外在服务要求一致和稳定匹配效果的结构调整方式称作网络结构重构的柔性，具体地，重构的柔性具有“渐变跟随”、“整体要求”、“隐性隔离”和“自主驱动”4个具体的内在特征。

3.1 柔性是渐变跟随

柔性首先表达的是可重构网络内在结构为跟随应用要求而渐变的特性。这既是网络结构变化的时间特性，又是网络重构的外在特征。网络结构的变化主要受网络服务要求和网络内部状态两大因素的驱动，施加到网络的所有应用要求之汇聚构成总的网络服务要求。显然，该要求随网络应用的复合行为和网络服务的提供方式而随机变化，另一方面，网络内部资源被占用的状态也相应地发生着随机改变，对于拥有统计复用结构的网络就更是如此。所谓网络对应用的支持就是在相应的层面（例如，会话级、流级、分组级等）为后者分配与其数据传送的规格和要求相吻合的确定网络资源。微观上，由于外部应用对网络的使用请求状态以及内在资源被占用的状态均随机变化，就使得应用要求与所分配的网络资源之间将不可避免地发生不相符合的情形，这样，网络重构就是对网络内部资源分配进行的调整或再分配，以达到应用要求与所分配的网络资源之间持续和一致吻合的目的。事实上，网络结构渐变是在动态适应网络应用的传送要求和保证网络资源效率之间的一种折衷，这一方面是为了充分利用网络应用对服务效果降级的容忍特性，另一方面是要避免网络结构跟随应用要求在小尺度（时间或空间意义的）上的随机波动作即时和频繁地变化，进而避免网络资源效率的稳定降低。

柔性的渐变跟随性质具有时间和空间的双重意义。结构对要求时间意义的渐变跟随具有3种基本模式：1) 滞后模式，它指结构改变发生在效果对要求不吻合发生之后；2) 同步模式，指在不吻合发生的同时立即改变结构；3) 超前模式，指在不吻合发生前就改变。与此相对，3种空间意义的渐变跟随模式是：1) 欠量模式，即为未达到要求（即欠支

持）的应用增加的资源量少于应当增加的量，或者为超过要求（即过支持）的应用减少的资源量少于应当减少的量；2) 等量模式，为欠支持的网络应用增加的资源量等于所需的增加量，或者为过支持的网络应用减少的资源量等于应当减少的量；3) 过量模式，为欠支持的网络应用增加的资源量大于所需的增加量，或者为过支持的网络应用减少的资源量大于应当减少的量。

结构的渐变是相对于突变而言的，它是指滞后或同步的时间模式加上欠量或等量的空间模式。效果跟随旨在吸收汇聚后的流量在小尺度上自然的随机波动，有效捕获并利用其中的相对确定性，进而达到既提高结构调整的效率，也提高资源自身效率之目的。

对可重构网络服务效果的度量可采用多种方法。首先，可用效果对要求的绝对偏离作为度量。在时刻 t ，记应用的业务要求为 $d(t)$ ，网络为应用提供的服务资源量为 $x(t)$ ，网络对应用的服务效果为 $g(x(t))$ ，则可用 $f(t)$ 表达效果对要求的“绝对偏离”程度：

$$f(t) = |g(x(t)) - d(t)| \quad (2)$$

其次，也可用效果对要求的相对符合来度量。对于具有服务要求下限 d_L （或上限 d_U ）的应用，可用 $f_L(t)$ 或 $f_U(t)$ 表达效果对要求的“相对符合”程度：

$$f_L(t) = cg(x(t))/d_L \quad (3)$$

$$f_U(t) = cd_U/g(x(t)) \quad (4)$$

其中， c 为代价系数（ $0 < c < 1$ ）。这样，网络重构的总体目标就是使得 $f(t)$ 、 $f_L(t)$ 或 $f_U(t)$ 最小化，即可重构网络的核心机制是实现式(5)给出的多阶段随机数学规划问题（这里忽略式(5)的约束条件）：

$$\min_{x_0} \{f(x_0) + E[\min_{x_1} \{f(x_1) + E[\min_{x_2} \{f(x_2) + \dots + E[\min_{x_i} \{f(x_i) + \dots\}]\}]\}]\} \quad (5)$$

具体而言，网络重构的目标就是使得 $f(t)$ 的均值不大于服务降级的最大容限。比如，在无连接分组交换网络中，对于端到端时延要求为 b 、最大容限为 β 的应用而言，网络为其提供的服务资源为各个节点上一定数量的分组缓存、相应的分组调度优先级和策略等，这些共同构成网络为其提供的服务资源量 $x(t)$ 。如果网络测量单元在某时段得知网络服务的实际效果已经不符合“时延不大于 $b+\beta$ ”的要求，就可以启动网络重构单元改变相关网络节点对该应用的服务结构，比如启用迂回路由避开拥塞

区域、提高该应用或它所在的业务类的优先级或增加对它的调度权重等，在式(2)的意义上，这些都对应着以调整服务结构的方式增加 $x(t)$ ，从而达到减小服务效果对要求的绝对偏离之目的。

网络调整其服务结构还有 2 个要点：第一，在发现效果低于要求之时，是否立即进行结构调整？即如何确定对 $x(t)$ 的调整时机？第二，调整 $x(t)$ 的定量规则是什么，即在一次调整操作中， $x(t)$ 到底该增加或减小多少？

确定 $x(t)$ 调整时机的基本原则是：调整应针对效果对要求的稳定偏离。可以采用指数移动平均^[17] y 来度量服务效果 z 的稳定偏离：

$$y_k = (1-\alpha)y_{k-1} + \alpha z_k, 0 < \alpha < 1 \quad (6)$$

如果

$$y_k + c\Delta y_k \geq b (\Delta y_k = y_k - y_{k-1}, c = 1/(1-\alpha)) \quad (7)$$

已经稳定地成立，就可判定形成了效果对要求的稳定偏离。这里，“稳定地”成立可以通过如下简单的 $n:m$ “表决”机制来表达 ($n/2 < m < n, n, m > 0$)，记

$$Y = \{ y_k | k = i, i+1, \dots, i+n-1 \} \quad (8)$$

$$Y_{\geq} = \{ y_r | y_r \geq [(1-\alpha)b - \alpha\Delta y_k]/(1-\alpha), y_r \in Y \} \quad (9)$$

则效果对要求的稳定偏离是指：

$$|Y_{\geq}|/|Y| \geq m/n, \forall i \quad (10)$$

显然，满足 $y_k + c\Delta y_k = \beta$ 的时刻 k 可以作为调整 $x(t)$ 的一个时机。同理，引起从 $y_k + c\Delta y_k \geq b$ 向 $y_r + c\Delta y_r < b - \delta$ 变化的时刻 $r (k < r)$ 可以作为反向调整 $x(t)$ 的一个时机，即可在时刻 r 取消在时刻 k 对 $x(t)$ 做出的调整。

基于服务效果对服务要求稳定偏离的资源调整构成可重构网络内在结构渐变的核心机制。

3.2 柔性的整体观

结构的柔性强调网络结构的改变“敏感”于具有显著意义的服务效果。一般而言，应用集合比单个应用的意义更显著，因此，网络服务总体效果对所有应用要求的适应性构成驱动网络结构改变的另一个核心因素。

总体服务效果 E 的含义是网络对全体应用的加权平均服务结果。 E 可被定义为应用重要性与网络传送效果之积，具体地，每个应用 i 均有一个与其重要性相对应的重要性权值 w_i ，单个应用的加权效果 = (应用重要性权值) × (应用的平均传送效果)，而应用集合的加权效果 = (应用重要性权值之和) × (集合应用的平均传送效果)。在重构的意义下，通常仅

需考虑不小于某个下限 W 的重要性权值，即若应用 i 的重要性权值 w_i 不小于 W ，则单独考虑 i 的加权平均服务效果，反之，将 i 纳入一个其成员具有相似重要性的应用集合，该集合内所有应用的重要性权值之和不小于 W ，然后再将该集合作为一个整体考虑其加权平均服务效果。在现实中，可以将重要性按离散方式处理，比如，对于高优先级的应用，可按单个应用或者构造小的应用集合来定义重要性，而对低优先级的应用，则可以按某种原则（如应用性质或要求是否相同或相近）构造大的应用集合来定义重要性。针对总体服务效果来改变结构的一个明显好处是，网络不轻易地为一个或少数次要应用的服务效果变差而改变其结构，相反，当一个重要性权值不小于 W 的单个应用或应用集合的服务效果变差时，才触发网络进行重构，从而提高可重构网络对服务效果的针对性，避免结构变化呈现低效或无效地抖动，最终将与网络重构行为相对应的效果收益最大化。

那么，网络结构的柔性变化应当具备何种定量特征呢？一个关键是确定资源调整幅度的量化模型。记 $x(t)$ 为时刻 t 的资源调整幅度，则确定 $x(t)$ 的基本原则应是充分、高效且透明。充分是指作为调整结果的 $x(t)$ 应当减小效果对要求的绝对偏离程度，高效指调整后应使得分配给应用的所有资源完全用于纠正偏离，不出现资源利用效率的降低，而透明则指对发生偏离的应用所进行的资源调整不应影响正在为所有未发生偏离的应用提供的正常服务水平。

确定调整幅度的定量机制是一个难点，其原因有 2 个，一是网络对应用的实际服务效果本质上是时间意义的随机量，二是即使可以计算出纠正偏离所需的资源调整量，也难以定量计算调整后对其他应用产生的未来影响以及影响的程度。事实上，真正需要关注的应当是资源调整导致的“长期”服务效果，具体地说，应当从应用集合的角度出发，使得资源调整控制单元和执行单元与它所面对的随机系统（即受随机要求影响的服务效果和资源状态）进行一系列的交互活动，确定每一次的资源调整量，从而使得所进行的一系列资源调整对所有应用的“长期”综合服务效果达到最佳。显然，可以将确定资源调整幅度的问题视为一个“顺序决策”问题，这样，可用 Markov 决策过程 (MDP, Markov decision process)^[18] 模型为资源调整幅度问题建立

最优的资源调整策略。

基于相对符合来度量可重构网络的服务效果，考虑如下基本的离散 MDP 模型。

1) 针对给定了上限要求 $d_U (d_U > 0)$ 的特定应用（或同类型应用集合），可给出一个相应的网络服务效果偏离容限 $\delta (\delta > 0)$ ，使得效果 $g(x(t))$ 的取值范围分别为 $g(x(t)) > d_U + \delta$ 、 $|g(x(t)) - d_U| < \delta$ 和 $g(x(t)) < d_U - \delta$ 。

2) 定义系统状态空间为 $S = \{G, N, P\}$ ，其中，3 个系统状态 G 、 N 和 P 分别代表服务效果的“优（good）”、“常（normal）”和“差（poor）”，它们各自对应 $g(x(t))$ 的取值分别落入上述 3 个范围。

3) 为 3 个状态分别引入一个立即回报 R ，比如， $R_G = R_+$ ($R_+ > 0$)， $R_N = 0$ ， $R_P = R_-$ ($R_- < 0$)。这里， R 可以静态的方式指定（比如，令 $R_+ = 1$ ， $R_- = -1$ ），也可定义为随系统状态而动态变化的函数（比如，令 $R_+ = R_- = f_L(t)$ ）。

4) 定义一个表达调整操作的动作集合 A ，比如， $A = \{I, Z, D\}$ ，其中， I 为按 Δ_+ 增加资源分配， Z 为无操作， D 为按 Δ_- 减少资源分配 (Δ_+ , $\Delta_- > 0$)。每个系统状态 s 都有一个与之关联的动作集合 $A(s)$ ($s \in S, A(s) \in A$)。

5) 确定各个状态间的条件转移概率：

$$P_a(i, j) = \Pr\{S_{n+1} = j \mid S_n = i, A_n = a\},$$

$$i, j \in S, a \in A(i), n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

对任一状态 i ($i \in S$) 和某个动作 a ($a \in A(i)$) 而言，式(11)指定的转移概率构成一个完整的概率分布。

实际的模型可以比上述模型复杂得多。例如，可将资源变化的增量 Δ_+ 和减量 Δ_- 细分为多个不同的量级，系统状态也作对应的细分。比如，将 Δ_+ 分成 $\Delta_{+1}, \Delta_{+2}, \dots, \Delta_{+p}$ ($\Delta_{+k} > 0, k = 1, 2, \dots, p$) 共 p 个等级，而将 Δ_- 分成 $\Delta_{-1}, \Delta_{-2}, \dots, \Delta_{-q}$ ($\Delta_{-w} > 0, w = 1, 2, \dots, q$) 共 q 个等级，动作集合相应地变为 $A = \{I_{+1}, I_{+2}, \dots, I_{+p}, Z, D_{-1}, D_{-2}, \dots, D_{-q}\}$ ，对应的系统状态则变为 $S = \{G_1, G_2, \dots, G_p, N, P_1, P_2, \dots, P_q\}$ 。这样虽然增加了最优策略的求解复杂度，但得到的一定是上述划分意义上的最佳长期资源调整量。

上述 MDP 模型可用于定量地确定资源调整的幅度，目标是通过使得每个状态的长期回报达到最大来得到整个资源调整幅度问题的最优策略，即 $\{<s, a> \mid s \in S, a \in A\}$ 。记在时刻 0 处于状态 s 、执行动作 a 且后续时刻采取策略 π 时所得到的长

期回报为 $J^\pi(s, a)$ ：

$$J^\pi(s, a) = E\{\sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i f_i \mid s_0 = s, a_0 = a\}, 0 < \gamma < 1 \quad (12)$$

其中， f_i 为时刻 i 的立即回报。由此可得状态 s 的最大“状态-值”函数 $J^*(s, a)$ ：

$$J^*(s, a) = \max_{\pi} J^\pi(s, a) \quad (13)$$

对于 $J^*(s, a)$ 的求解，既可采用依赖模型的动态规划方法^[19, 20]（例如，策略迭代或值迭代），也可采用不依赖模型的 Q-学习（Q-learning）方法^[19-22]。与动态规划方法相比，模型无关的 Q-学习方法一方面无需建立模型，另一方面它在本质上具备对动态变化环境的自主和自动适应性，因此非常适合可重构网络的时变网络环境。采用 Q-学习方法计算 $J^*(s, a)$ 时，需要引入 $J_{n+1}^*(s, a)$ 的估计 $\hat{J}_{n+1}(s, a)$ ，通过下述迭代^[23]：

$$\hat{J}_{n+1}(s, a) = (1 - \alpha_n(s, a)) \hat{J}_n(s, a) + \alpha_n(s, a) \cdot [f_n + \gamma \max_{a'} \hat{J}_n(s', a')] \quad (14)$$

使得 $\hat{J}_{n+1}(s, a)$ 逼近 $J_{n+1}^*(s, a)$ ，其中，参量 $\alpha_n(s, a)$ 为

$$\alpha_n(s, a) = 1 / (1 + v_n(s, a)) \quad (15)$$

其中， $v_n(s, a)$ 是到第 n 步迭代时在状态 s 执行动作 a 的累计次数。Mitchell 已从理论上证明：当 $n \rightarrow \infty$ 时，有 $\hat{J}_{n+1}(s, a) \rightarrow J^*(s, a)$ ^[23]。

状态 s 的最优策略 $\pi^*(s)$ 可通过 $J^*(s, a)$ 得到：

$$\pi^*(s) = \arg \max_a J^*(s, a) \quad (16)$$

遍历状态空间，最终可得到可重构网络资源调整规模问题的最优决策 π^* ：

$$\pi^* = \{\pi^*(s) \mid s \in S\} \quad (17)$$

在实际中的 π^* 是通过在线学习的方式逐步得到的，即 $\hat{J}_{n+1}(s, a)$ 将随系统状态的演进逐步逼近 $J_{n+1}^*(s, a)$ ，相应地，对最优决策的估计也将循序地收敛到最优决策 π^* 。

3.3 柔性的聚焦作用

对所承载的所有应用而言，网络重构的柔性表现为典型的服务效果聚焦作用。这里，“聚焦”的含义借用了信号分析中冲击函数 (δ -function) 的意义，是指网络结构调整完全也只针对特定的目标应用（例如服务效果降级的应用），而完全不针对其他任何非目标应用。换句话说，结构调整应仅仅对目标应用起效，而对其他非目标应用既不可见也不起效。服务效果的这种隔离效应一方面保证了结构调整对相关应用效益的最大化，另一方面也保证了结构调整对无关应用影响的最小化。

效果聚焦呈现的“完全作用-完全隐藏”性质是网络重构柔性的一个重要内涵,基于该性质可以导出结构调整方式的指导原则和设计方法,进而可从顶层设计的角度满足效果对要求一致匹配和网络资源高效使用的总体目标。相反,如果不考虑这一性质,就没有相应的聚焦控制逻辑,此时重构机构对网络资源进行的调整或再分配就可能导致2个不利的结果:一方面,真正出现效果降级的应用不能得到完全的服务补偿;另一方面却是并未出现效果降级的其他应用却额外得到了多余的资源和服务,从而导致网络资源调整的针对性减弱、效益分散,效果不佳。从网络应用的角度看,这种不利结果会使得服务效果降级的应用确定地“感受到”实际效果对其要求的不匹配,而这种可见性恰恰是可重构网络需要向网络应用隐藏的。

总体上,基于网络结构的隐性变化而对应用呈现的效果聚焦性质意味着既不会出现应用感受到传送质量的下降,也不会出现网络为应用提供冗余的资源。值得注意的是,应用要求、服务效果、网络状态等在时间和空间上都是随机的因素,而网络内每一个应用(或应用类)效果对要求的符合是可重构网络追求的一个目标。这种随机性、普遍性和全局性的交织给可重构网络带来了巨大挑战,特别是对于没有全局资源预留的分组交换,具有聚焦性质的资源动态调整的机理和实现方法成为未来设计所面临的一个难题。

3.4 柔性由网络自主驱动

可重构网络自主地驱动其内在结构的变化,不需要外力的介入。这里,外力是指凌驾于网络之上的支配因素,比如,人为的控制等。我们注意到,网络为应用所作的资源分配、资源被占用的状态和应用的实际传送效果这3种核心因素有3个共同的重要性质。首先,它们均发生在网络内部;其次,它们的发生、变化和终止在时间和空间上都呈现随机性;最后,它们的随机行为可以发生在时间和空间的任何点以及任何尺度。上述3个性质必然导致网络之外的支配因素均不可能从网络外部、在准确的时间点和空间点、以确定的方式对上述3种核心事件实施精准而有效地测量、判断和处理,因而也就不可能构建有效的反馈控制结构。相反,上述3类核心因素的固有性质表明只有网络自身才是其结构和资源真正的

和自然的控制者。

网络的自主驱动能力表现在表达、测量、处理和反馈4个方面。①网络要对服务要求和服务效果建立正确的内在表达。网络内部对要求和效果的表达应当等价于网络应用对要求和效果的表达。比如,对于时延这一要求或效果,网络对分组时延的刻画应当符合应用对请求的响应时延要求。②网络应具备内在和自主的测量能力。这里的测量泛指采样、计算和判断,即网络动态地对要求和效果的瞬时值进行采样,计算关于要求和效果的统计量,判别服务效果是否偏离了服务要求,计算偏离的程度。③网络基于测量结果自我和自动生成结构调整的控制信号,并将控制信号实时和准确地送给重构执行机构。④网络将结构调整的结果回送到反馈单元,从而形成网络重构的自主反馈和循环控制的结构。

自主驱动的结构重构是可重构网络的一种内在能力,这种自我和自主性质使得可重构网络能够以符合应用要求和服务效果之间固有动力学规律的自然方式,有针对性并有效地把握对其结构实施改变的时间和空间尺度,进而以柔性变化的内在结构实现效果对外在要求的一致匹配。

4 系统结构形态

柔性重构的功能最终要表现为相应的网络协议和节点结构。图2给出了一个以网络认知为核心的网络节点功能结构,分为数据面和控制面2部分,控制面负责柔性重构决策的生成,完成结构重构操作,而数据面则负责正常的的数据转发操作。

控制面中包含网蚁(netant)、状态与视图、认知核、认知决策库、重构控制器和控制执行单元6个重要的柔性重构功能单元。

节点和网络的状态是重构的基础,因此,各个节点状态在全网的实时发布对于效果的实时跟随来说至关重要。本文引入称为“网蚁”的移动代理,它们以随机或定向的方式在网内游动,动态采集网络节点的实时状态信息并以“概率广播”的方式及时分发给所有其他节点,各个网蚁之间也以动态访问节点的方式实现交互。状态与视图则以统一的格式接收网蚁带来的实时状态信息,也将节点自身的最新状态信息交给网蚁进行广播,还完成内部外部状态的存储和格式的转换。

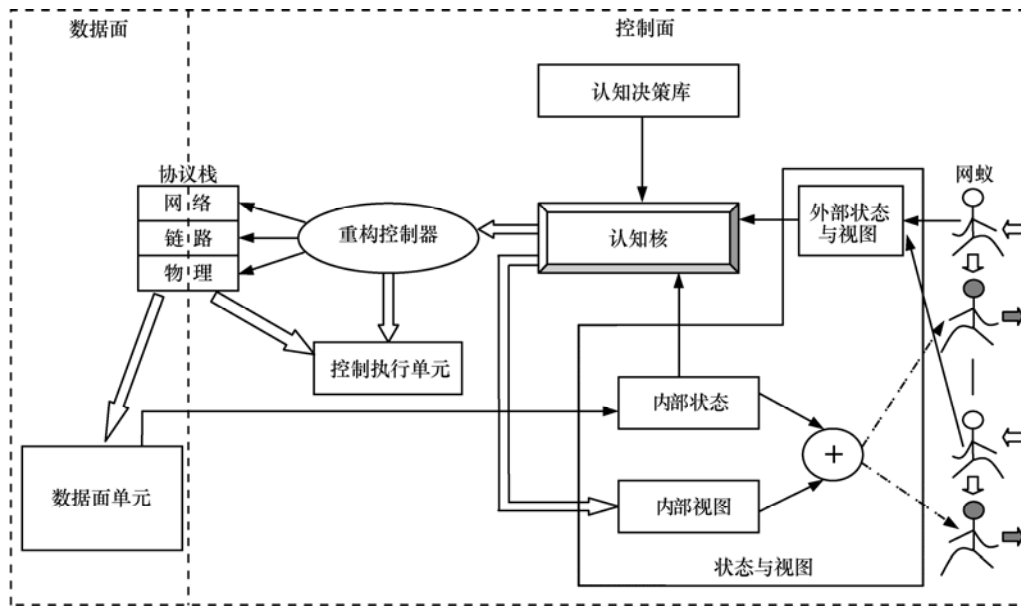


图 2 支持柔性重构的网络节点功能结构

认知核是柔性重构功能的计算处理中心，它基于业务要求和内部外部状态来动态计算节点和局部网络的服务效果对传送要求的偏离程度，按照传送要求对业务流进行分类，基于认知决策库和学习算法来动态计算资源分配量和调整的幅度。

认知决策库包含业务传送要求、优化模型和优化目标，它在为认知核提供计算模型和规则的同时，也基于认知核的计算结果提炼新知识。

重构控制器从认知核接收操作指令，对协议执行部件的操作模式和参数实施调整。比如，修改数据面内的分组队列门限，调整或重新定义业务优先级，调整调度器的队列带宽分配比例等，重构控制器也可以指示控制执行单元修改或重选路由。

数据面的核心任务在不断变化的处理结构之上，依照操作模式和参数执行数据转发，将操作结果以内部状态的形式提供给状态与视图单元。

在整体上，控制面的 6 个单元与数据面的操作单元一同构成“内外环境感知—认知计算决策—自主结构调节”的反馈控制环，形成柔性重构的微观处理机制，这是实现表达、测量、处理和反馈的重要系统平台。

5 结束语

当前对网络结构柔性的认识大多限于它的宏观和定性的方面，少有揭示网络结构柔性微观的、过程的和定量的内涵。从过程意义的服务效果一致

匹配应用要求之角度出发，本文探索了网络重构的柔性内涵。对于可重构网络而言，跟随应用时变要求的时变信道这一核心特征是重构柔性的决定因素。从“一致满足”应用要求的时变信道出发，本文揭示了重构柔性的“渐变跟随”、“着眼整体”、“隐性隔离”和“自主驱动”4 个重要内涵，采用指数移动平均、 $n:m$ 表决、MDP 和强化学习定量地刻画了效果对要求的稳定偏离和资源调整幅度的最佳顺序决策。

从充分利用网络重构真正价值的角度看，本文对结构柔性内涵的上述认识仍是初步的。时变信道基于众多随机因素实现对应用要求的“一致匹配”，这一性质既是可重构网络的一个近似正确或者合理的目标，也是设计可重构网络面临的一个难点。由于对资源的随机共享普遍存在于可重构网络中，就使得客观意义的随机性、全局性和主观意义的确定性相互交织，这种复杂性对于认清柔性内涵和重构机理以及明确可重构这种新型的网络结构形态带来了巨大挑战。另一方面，本文对柔性的“渐变跟随”、“着眼整体”、“隐性隔离”和“自主驱动”这 4 个内涵的认识是否完整、是否合理和是否有效，还不能仅仅靠说理，更重要的还需要用网络设计和应用的实践来验证并回答。比如，设计表达柔性重构内涵的具体网络协议、优化节点支持结构等，而这些将一并成为作者未来研究的一个重点方向。

参考文献:

- [1] HADŽIĆ I. Applying Reconfigurable Computing to Reconfigurable Networks[D]. University of Pennsylvania, 1999.
- [2] 齐宁, 汪斌强, 郭佳. 逻辑承载网构建方法的研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(9):1533-1540.
QI N, WANG B Q, GUO J. Research on construction methods of logical carrying network[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9): 1533-1540.
- [3] 刘强, 汪斌强, 徐格. 基于构件的层次化可重构网络构建及重构方法[J]. 计算机学报, 2010, 33(9):1557-1568.
LIU Q, WANG B Q, XU K. Construction and reconfiguration scheme of the hierarchical reconfiguration network based on the components[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9):1557-1568.
- [4] 王浩学, 汪斌强, 于婧等. 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.
- [5] NANCE R E, MOOSE R L J. Link capacity assignment in dynamic hierarchical networks[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1988, 15(3):189-202.
- [6] WU X C, WU C M, JIA F G. Research on a synchronization algorithm of look-up table in open reconfigurable router[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(3):419-422.
- [7] GOPAL G, KIM C K, WEINRIB A. Algorithms for reconfigurable networks[A]. The 13th International Teletraffic Congress[C]. Copenhagen, Denmark, 1991. 341-379.
- [8] MACGREGOR M, GROVER W D, MAYDELL U M. Connectivity: a performance metric for reconfigurable transport networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11(9):1461-1469.
- [9] MOESSNER K, LUO J, MOHYELDIN E, *et al.* Functional architecture of end-to-end reconfigurable systems[A]. 2006 IEEE the 63rd Vehicular Technology Conference[C]. Melbourne, Australia, 2006. 196-200.
- [10] BOUFIDIS Z, ALONISTIOTI N, HOLLAND O, *et al.* End-to-end architecture for cognitive reconfigurable wireless networks[A]. The 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit[C]. Budapest, Hungary, 2007. 1-5.
- [11] SAIA J, TREHAN A. Self-healing in reconfigurable networks[A]. 2008 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing[C]. Miami, USA, 2008. 1-12.
- [12] ZHANG X J, LUMETTA S S, CHIU A L, *et al.* Heuristic resource optimization for dynamic wavelength services on optically reconfigurable networks[A]. The 19th International Conference on Computer Communications and Networks[C]. Zurich, Switzerland, 2010. 1-8.
- [13] POORTER E D, MOERMAN I, DEMEESTER P. Support for heterogeneous dynamic network environments through a reconfigurable network service platform[A]. 2011 the 1st International Symposium on Access Spaces[C]. Yokohama, Japan, 2011. 174-179.
- [14] LOUTA M D, MICHALAS A C. Quality of service management in IP networks through dynamic service rate reconfiguration[J]. Journal of Internet Technology, 2006, 7(1):45-57.
- [15] SMITH J M, NETTLES S M. Active networking: one view of the past, present and future[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part C, 2004, 34(1):4-18.
- [16] LEE J W, FRANCESCANGELI R, JANAK J, *et al.* NetSerV: active networking 2.0[A]. 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-6.
- [17] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4):397-413.
- [18] SZEPESVARI C. Algorithms for Reinforcement Learning [M]. Morgan & Claypool, 2010.
- [19] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement Learning: An Introduction[M]. Bradford Book, MIT Press, 1998.
- [20] KAEHLING L P, LITTMAN M L, MOORE A W. Reinforcement learning: a survey[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1996, 4:237-285.
- [21] WATKINS C J C H, DAYAN P. Q-learning[J]. Machine Learning, 1992, 8(3):279-292.
- [22] WATKINS C J C H. Learning from Delayed Rewards[D]. Cambridge University, Cambridge, United kingdom, 1989.
- [23] MITSHELL T. Machine Learning[M]. McGraw-Hill, Boston, MA, 1997.

作者简介:



程东年 (1957-), 男, 河南原阳人, 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。



汪斌强 (1963-), 男, 安徽桐城人, 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, 主要研究方向为宽带信息网络体系结构。

王保进 (1974-), 男, 河北保定人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为可重构柔性网络、宽带信息网络、嵌入式系统等。

张建辉 (1977-), 男, 河南叶县人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为宽带信息网络体系结构、网络路由技术、网络协议分析等。