1. **基于SDN和NFV融合的动态可重构网络的构建机制**

物联网应用海量终端设备的接入以及不同的业务需求，需要实现网络范围内的灵活部署，提供不同等级的内容和服务。SDN和NFV的融合可以提供智能的路由和调度解决方案，虚拟化的网络切片用于隔离满足不同要求的物联网应用。但是，海量的IoT终端设备将导致SDN交换机需要不断扩大的流表，设备持续进出网络时在交换机和控制器之间的通信开销增大。而且物联网业务的类型具有多样性，且服务实例的总体规模较大，网络应用对服务实例的请求具有动态特性，使得网络布局难以跟随用户需求动态变化。

虽然SDN和NFV技术的应用降低了网络管理大量服务的难度，但是SDN和NFV对网络服务的重新抽象和细粒度分解，又极大地增加了网络服务的数量，其组成成分更加复杂。由于巨大的服务规模以及高动态的网络负载，分布式地组织和优化服务实例供应以实现网络效用最大化是难点。因此，物联网复杂业务驱动的动态服务网络构建机制不论对当前网络还是未来网络都是一个挑战。

本申请拟在研究内容（1）提出的物联网业务流量分析模型的基础上，研究基于SDN和NFV融合的动态可重构网络的构建机制，根据物联网业务的需求，确定网络功能在网络中的位置，构建网络功能和节点序列，确定对应最优传输性能的路由和资源分配，从而有效保障用户QoS，并实现网络性能优化。

本申请拟构建如图5所示的动态可重构网络的转发图，表示虚拟功能，代表网络功能存在节点中。为向客户提供多样化的服务，网络运营商需要根据服务请求特征、业务分布、网络状况、资源分布等信息，为每个物联网服务定制从源节点到达目的节点之间穿过不同的网络功能序列，并基于SDN技术实现流量的动态转发，提高资源利用率，优化网络性能。

针对以上问题，各部分具体研究内容如下。

**①基于多目标优化的分布式协同网络服务布局算法**

本申请拟研究网络服务布局算法，通过网络节点的分布式协同，获取网络全局知识，以实现服务布局的优化，有效降低响应延迟，最大化网络效用和用户满意度，有助于保持网络及其应用的良好运行。

本申请拟基于协同博弈论将不同类型的网络服务看作博弈的参与者（player），博弈的商品（commodity）则是网络节点资源。在网络容量约束和用户请求分布已知的情况下，参与者不断的出价购买商品，实现网络收益和用户满意度的多目标优化，以布局其网络服务实例。

**②基于协同优化的SDN路由和NFV资源调度联合优化算法**

本申请拟研究动态服务网络的SDN路由和NFV资源调度联合优化算法，根据网络状态的动态变化、业务特性、网络功能的分布以及内容的分布提出路由和资源调度的联合优化算法，确定业务驱动的最优传输性能的路由和资源分配策略，从而有效保障用户QoS，并实现网络性能优化。

本项目拟采用协同优化方法的方法，把动态服务网络的资源优化分为两个层次：系统级（动态可重构网络总体）优化和子系统级（SDN路由和NFV资源调度）优化。系统级负责系统全局的优化；子系统级负责各个自身的优化。

本申请拟将SDN路由选择问题转化为图论中二分图理论的最佳匹配问题，网络中的功能和节点可看做二分图中两个互不相交的子集，将路由的选择问题建模成最小费用最大流模型解决，在满足计算、存储资源和通信等资源约束的条件下，为每项服务选择合适的节点与链路，即选择二分图中的最佳匹配，构建网络服务链。并拟将NFV资源调度问题映射为一个多维多选择的0-1背包问题。在多背包问题中，物体分为多个不同的组，每个组中的物体是互斥的，问题的目标是找到如何从每组中准确选择一个物体放置在背包中使得在背包容量有限的条件下总收益最大化的最优解决方案。



图5 动态服务网络构建示意图

1. **基于多维环境感知的网络功能快速自适应迁移算法**

随着SDN和NFV技术的发展，网络中出现了结合两者的部署范例。首先，NFV将大量传统硬件功能基于虚拟化技术软件实现，并将其运行于服务器等通用设备。SDN可编程交换机将特定流量转发到服务器的功能实例中进行处理，实现流量的可编程转发。但是，基于NFV实现的网络功能灵活部署，极易导致流量的不均衡问题，进而引发SDN控制平面的负载失衡。即使功能实例在网络建立之初被合理地布局于全网中，也可能由于流量的动态变化而出现某些控制器负载间的不均衡。另一方面，当用户移动时，需要根据QoS要求、QoE要求和网络基础设施迁移网络功能以保证服务质量。

如图6所示，图中表示了三个区域，区域L-1、区域L-2和区域L-3，分别有相应的网络管控中心对其进行管理和控制。当有大量用户流量流入区域L-1时，随着网络管控中心1的控制域承载的网络功能增加，该域控制平面可能过载，而其它控制平面仍有大量空闲资源，控制平面负载出现不均衡现象。因此，SDN静态分域结构难以适应网络功能的灵活部署模式，需要将一部分网络功能动态地从拥塞的区域迁移到空闲的区域。另一方面，如图6所示，当区域L-3中的用户UEB2从UEB2-1的位置移动到UEB2-2的位置时，其服务网关的位置从s-SGW2迁移到v-s-SGW3。因此，网络管控中心需要根据UEB2的位置和移动性、QoS要求、QoE要求和网络基础设施确定v-s-SGW2和v-s-SGW3的位置。

因此，需要对上述不同场景下的网络功能迁移进行建模分析。本申请拟研究基于多维环境信息感知的网络功能快速自适应迁移算法，重新计算最优控制平面布局方案。多维环境信息包括三个部分：一是SDN控制平面的计算(CPU)、带宽(bandwidth)和存储(storage)资源使用状况；二是SDN控制器管控范围的交互机的网络功能部署状况以及计算、带宽和存储资源使用状况；三是业务需求特征状况。拟基于感知的多维环境信息，通过网络功能迁移，实现控制平面的负载均衡，最小化网络迁移开销，并保证用户的服务质量。

由于SDN控制平面具有分布式架构，每个SDN控制器仅管理其域内的交换机，同时可与其邻居控制器进行交互，因此，本申请拟基于因子图/和积算法设计分布式的网络功能快速自适应迁移算法，将计算任务分布在不同控制器上。而且，运行分布式算法的网络更能适应控制器的动态加入或离开，对网络的动态变化更为健壮。在这种算法中，因子图把一个复杂的问题分成几个简单的局部问题，但是这些局部问题是同时进行求解而且是相互作用的，其相互作用通过传递的信息来完成，传递的信息包含了某个SDN控制器的资源使用状况以及负载情况，通过信息不断的传递（即不断的迭代），当所有的约束条件都满足时，可以输出一组接近最优的解，该解可通过和积算法理论来得到。

图6 虚拟网络功能迁移示意图

**（2）对于“基于SDN和NFV融合的动态可重构网络的构建机制”这一研究内容，本项目拟提出的技术路线如下：**

**①基于多目标优化的分布式协同网络服务布局算法**

本申请拟在研究内容（1）建立的业务流量分析模型的基础上，拟基于协同博弈论建模分布式协同网络服务布局问题，将不同类型的网络服务看作博弈的参与者（player），博弈的商品（commodity）则是网络节点资源。在网络容量约束和用户请求分布已知的情况下，参与者不断的出价购买商品，实现网络收益和用户满意度的多目标优化，以布局其网络服务实例。

如图10所示，节点包括源节点，中间节点和目的节点，每个节点放置多个虚拟网络功能，网络管控中心为每个服务选择序列功能和节点实现从源节点到目的节点的传输。例如，某个业务从源节点A出发，中间经过L1节点的虚拟功能F1和F2的处理后，然后到L2节点的虚拟功能F3处理最后到达目的节点B，这样就形成了为该业务服务的动态服务网络：A→F1@L1→F2@L1→F3@F2→B。由于某些服务类型的请求量大，而某些服务的请求量小，为了避免网络布局过程中过于偏向“受欢迎”服务，而挤掉“不受欢迎”服务的资源，导致无法响应这些服务的请求，所以每类服务在网络中的布局既要从网络角度出发提升网络资源利用率，又要从服务角度出发，提升用户体验。

首先拟将网络抽象为无向图模型,为节点集合，为链路集合。该抽象网络模型中的节点可以是一个物理节点，也可以是一个网络，单控制器控制的SDN网络，或者网络功能等。每个节点可布局*M*类型的服务。设不同类型服务的请求数为随机变量，在节点*k*上服务类型*i*的请求分布记为,,.中节点的容量约束向量为，即网络节点的布局容量为。服务布局问题可表述为:已知服务请求分布，在可行域内，从布局策略集合中选择最优策略，使得网络期望的效用*R*和用户满意度*S*最大化。

假设网络*G*中的*M*类型的服务看作谈判博弈参与者，节点资源看作博弈的商品。首先，给定基本布局量和服务请求分布*D*，求解布局在每个节点的各种类型的服务*i*的实例数。节点约束为。为了保证最小布局量，本申请拟将约束作为参与博弈的门槛。设每类服务*i*的最低布局规模为基本量，节点上服务类型*i*的每个服务实例满足的请求数为。当用户请求服务类*i*的实例时，若请求在本地节点*k*上响应，则产生的效益为。若该请求在除节点*k*以外的节点被响应，产生的效益为。显而易见，。两者相差越大，说明远程响应的代价越大，效益也相应地降低。另外，为了获得更大的效益，需要考虑各种服务类型的布局效益，若设为用户对位于节点*i*上的服务类型为*k*的请求量，为单个服务实例能够处理的请求量。

假设网络*G*的所有节点掌握其它节点在时刻*t*的服务承载能力以及处理的服务请求分布等全局知识。那么，网络效用和用户满意度多目标最大化问题可表示为服务布局问题（Placement problem）的解。

 (4-1)

 (4-2)

 (4-3)

 (4-4)

其中，和分别为布局类型为*i*的服务产生的效用和相应的用户满意度。因此，网络服务布局的最优化问题就变成在上述多约束条件下求多目标优化的最优解问题，即。



图10 动态可重构网络构建示意图

**②基于协同优化的SDN路由和NFV资源调度联合优化算法**

本申请拟将网络中的功能和节点可看做二分图中两个互不相交的子集，将SDN路由选择问题转化为图论中二分图理论的最佳匹配问题。二分图最大匹配问题可以转为最大流的问题。在满足资源（计算资源，存储资源，通信资源等）约束的条件下，为每项服务选择合适的节点与链路，并构建网络服务链。拟将NFV资源分配问题建模成多维多选择的0-1背包问题（MMKP）问题，在MMKP中，物体分为多个不同的组，每个组中的物体是互斥的，问题的目标是找到如何从每组中准确选择一个物体放置在背包中使得在背包容量有限的条件下总收益最大化的最优解决方案。

优化目标：总成本最小（包括网络成本函数以及数据中心成本函数）



其中，各变量含义表示如下：表示成本，表示功能位置集，表示源节点集，表示汇节点集；表示eta节点集。表示链路的容量，表示节点eta处的流量衰减因子，表示位置处的处理负载上限值，表示汇节点接收的总流量速率，表示节点eta处总的到达流量速率；位置处总的到达流量速率，表示链路速率分配，：二值指示符，表示有无流量到达节点eta，二值指示符，表示有无流量到达位置。

如上述公式所示，该优化问题可转化为两个子问题：

SDN问题：（网络成本最小）

NFV问题：（数据中心成本最小）

第一组约束，(5-1)-(5-4)；第二组约束，(5-6)-(5-9)。这两个问题通过eta节点到达流量结合在一起，见约束(5-5)。

约束(5-1)计算源节点处分配的流量速率，约束(5-2)计算到达汇节点的流量速率。约束(5-3)确保流动守恒，流入每个eta节点的流量等于其衰减系数。约束(5-4)确保每段链路上的流量速率分配在不大于上限，即链路容量。

约束(5-6)表示节点eta处的流量守恒，约束(5-7)表示功能放置位置处流量守恒。约束(5-8)表示流入eta节点的流量不能超过该位置的负载处理上限值。约束(5-9)和(5-10)确保到达节点eta以及功能位置的流量不超过总的到达流量。

本项目拟采用协同优化方法的方法，把动态可重构网络的资源优化分为两个层次：系统级（动态服务网络总体优化）优化和子系统级（SDN路由和NFV资源调度）优化，如图11所示。系统级负责系统全局的优化；子系统级负责各个自身的优化。

系统级与子系统级之间有紧密的耦合关系。子系统优化的目标就是使子系统的设计方案与系统级优化提供的战略效应最优化目标方案之间的差异最小。在进行子系统并行优化时，各个子系统之间的联系暂时被断开，各个子系统分别进行并行优化，而各个子系统设计产生的不一致性则有系统级优化来统一协调。设计变量只涉及与本子系统有关的变量和子系统之间的耦合状态变量，且只需满足本子系统的约束，子系统级优化的目标函数是使该子系统级优化方案与系统级所提供的目标方案之间的差异达到最小。系统级优化的任务一方面是使系统目标达到最优，另一方面是协调各子系统级优化间的不一致性，使这种不一致性逐渐减小，通过系统级优化和子系统级优化之间的多次迭代，最终找到一个符合子系统间一致性要求的系统最优方案。

在执行协同优化的过程中，为了加速算法的收敛速度，拓展搜索空间，提高求解的遍历性，本项目拟把混沌优化和协同优化相结合，通过协同优化机制的运行实现资源的均衡分配。



图11动态服务网络资源协同优化模型

**（3）基于多维环境感知的网络功能快速自适应迁移算法**

在SDN和NFV部署的可重构网络中，可编程交换机将目标流量转发到相应的网络功能单元进行处理，因此网络功能的动态部署可能导致网络控制域之间的负载不均衡。此外，当用户终端移动时，网络功能需要根据业务需求进行移动，实现网络人动的网络。因此，本申请拟提出基于多维环境感知的网络功能快速自适应迁移算法。网络管控中心根据用户的位置、移动性、QoS要求、QoE要求和网络基础设施确定网络功能迁移，如图12所示。

首先对多维环境信息进行建模，包括：SDN控制器资源使用模型；交换机资源使用模型；交换机网络功能分布模型；终端业务特征模型。给定一个软件定义网络*G*，由*N*个控制器和个交换机组成。SDN控制器可建模为一个四元组：，其中，和分别表示控制器的带宽，CPU 以及内存容量，而表示控制器管理的交换机集合。符号，和分别代表交换机中每个事件对控制带宽，CPU和内存的平均使用量，其中。令表示交换机的控制负载，表示交换机的负载上限。因此，交换机可以建模为一个五元组：。交换机网络功能分布模型可以表示为,其中表示交换机上网络功能的类型，比如路由、加密、安全等功能；分别对应于网络功能占用的CPU、带宽和存储资源占用量。业务*n*特征建模为其中，指与业务相关的终端速度、位置等特征向量，指业务的速率、时延等。

本申请主要目标是寻求最优的网络功能迁移策略，以最小化网络迁移开销为目标，同时保证用户的服务质量，并实现SDN控制平面的负载均衡。网络迁移开销最小化问题(Network Overhead Minimization，*NOM*)可建模如下：

 (6-1)

 (6-2)

 (6-3)

 (6-4)

 (6-5)

 (6-6)

 (6-7)

 (6-8)

其中代表控制器的实际资源利用率的估计值，表示交换机的实际消息到达率的估计值（即新流的到达率）。，和分别表示交换机的消息到达流事件实际占用的控制器带宽、CPU和内存资源的估计值。表示的最小服务质量要求值。

*NOM*问题的实质是要在带宽、CPU和内存等多维资源约束和QoS要求约束下，计算网络开销最小的网络功能迁移策略。

约束条件(6-2)~(6-4)保证了交换机事件的资源使用量不会超出控制器所能提供的总量。公式(6-5)保证了到达交换机的新流速率不会超过交换机的处理能力上限。公式(6-6)保证了不同控制器（这里指主控制器）所管理的交换机集合不会重叠。公式(6-7)保证了集合*M*是完备集。最后，公式(6-8)表示网络迁移时服务质量保证约束条件。

上述最优化问题的求解是一个非常复杂的问题，但是SDN控制平面具有分布式架构，每个SDN控制器仅管理其域内的交换机，同时可与其邻居控制器进行交互。因此，可以为上述最优化问题的求解设计快速的分布式算法，将计算任务分布在不同控制器上。而且，运行分布式算法的网络更能适应网络功能的动态加入或离开，对网络的动态变化更为健壮。因此，本申请拟提出利用因子图/和积算法理论对上述优化问题进行求解实现网络功能的快速迁移，该方法以最小化网络迁移开销为主要目标，同时也考虑SDN控制器的负载均衡、业务QoS要求。我们把它归纳为求多变量的最优解的问题，拟用低复杂度的因子图/和积算法理论来解决网络功能的迁移问题，把一个复杂的问题分成几个简单的局部问题进行同时求解，其主要的分析计算基于和积算法理论来进行，当所有的约束条件都满足时，算法收敛并可以输出一组接近最优的解。

图12 虚拟网络功能迁移示意图