

# 支持网络多模态共生与演化的体系结构及运行逻辑

张慧峰<sup>①</sup> 胡宇翔<sup>③</sup> 朱俊<sup>①</sup> 邹涛<sup>①</sup> 皇甫伟<sup>\*②</sup> 隆克平<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(之江实验室 杭州 311121)

<sup>②</sup>(北京科技大学 北京 100083)

<sup>③</sup>(信息工程大学 郑州 450002)

**摘要:** 针对多模态网络(PN)动态演化与共生协同的关键需求, 该文分析了多模态网络业务域、模态(网络模态(NM))域、功能域、资源域的组成与域间映射, 将其建模为复杂的动力学系统, 并以业务服务质量、网络资源复用水平和业务包容性为系统目标, 指出多模态网络的运行遵循最小自由能原理, 并揭示了该动力学系统中的双尺度现象, 为网络模态共生(SNM)和演化(ENM)提供理论指导。进而, 提出一种网络模态共生与演化的3切面结构, 即网络模态演化决策切面、网络模态智能生成切面和网络模态共生平台切面, 为实现网络模态共生和演化提供使能架构。最后, 分析了该体系结构的运行逻辑, 为多模态网络中网络模态的高效协同与动态演化提供了运行指导。

**关键词:** 多模态网络; 体系结构; 运行逻辑; 网络模态共生; 网络模态演化

中图分类号: TN91; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)02-0607-11

DOI: 10.11999/JEIT250949

CSTR: 32379.14.JEIT250949

## 1 引言

随着数字化时代垂直行业应用的蓬勃发展, 工业互联网、车联网、远程医疗、机器人控制、视频点播和人工智能(Artificial Intelligence, AI)推理等新型业务不断涌现, 对网络的大带宽、高可靠、低时延和巨连接等核心能力提出了更高且差异化的要求, 消费互联网向多行业垂直应用产业互联网转型的趋势不可阻挡<sup>[1,2]</sup>。沿袭传统互联网“补丁摺补丁”式的技术路线, 以单一的网络制式支撑现有及未来的业务暴露出极大的局限性。新型的网络制式如身份标识网络、命名标识网络<sup>[3]</sup>、身份标识网络和算力网络等被相继提出, 已在部分行业网络或局部范围中初步应用并取得良好效果。然而, 为每一类新型网络制式部署新的物理网络设施不仅缺乏经济性, 在业务发生变化(业务量的扩缩或者新型业务的出现)时也难以适应。对已知业务的服务质量保障能力、对未来业务不确定性的包容性、网络部署运行的经济性三者的矛盾成为学术界和工业界所必须直面的核心难题。

软件定义网络(Software Defined Network, SDN)<sup>[4]</sup>、网络切片等通过虚拟化技术能在同一物理网络上形成多个逻辑网络, 不同的逻辑网络间可以实施灵活的资源分配, 不仅能够一定程度上为异构业务提

供了服务质量保障, 也具备很好的灵活性和经济性。在这类方案中, 不同逻辑网络的制式仍是同构的, 即不同的逻辑网络具有相同的报文格式、路由协议、交换方式及转发逻辑。因此, 在面对新型业务时, 仅基于物理资源在不同逻辑网络中的分配而无法定制网络制式本身仍难以彻底地解决服务质量保障难题。

多模态网络(Polymorphic Network, PN)<sup>[5]</sup>通过从报文格式、路由协议、交换方式到转发逻辑的全维度虚拟化技术将同一物理网络映射为多个逻辑网络, 因而每个逻辑网络可以运行不同的制式, 称为网络模态(Network Modality, NM)。在此上下文中, “网络模态”NM既指特定的网络制式, 即特定的报文格式、路由协议、交换方式和转发逻辑形成的模式, 也强调其随着业务的动态发展而不断演进变化。与软件定义网络、网络切片不同, 多模态网络中的不同网络模态可以具有完全不同的数据面行为, 这使得多模态网络从本质上具有对多样业务更好的适应性<sup>[4]</sup>。基于“技术体制与网络环境分离”的思路, 多模态网络<sup>[4,6]</sup>能够实现多种网络技术体制(网络模态)在同一基础设施(多模态网络环境)中智能动态部署, 为各类应用提供多样化、定制化的网络能力精准支撑, 为解决服务质量保障、业务包容性和网络部署运行经济性的矛盾提供了新的范式。值得注意的是, 网络模态不仅可以人为设计, 也可以由智能体根据业务特征自主设计报文格式、路由协议、交换方式等, 这使得多模态网络能够和生成式人工智能深度结合, 推进网络模态的自主智能演进, 其未来应用具有极大的想象空间。

收稿日期: 2025-09-22; 改回日期: 2025-12-09; 网络出版: 2025-12-17

\*通信作者: 皇甫伟 huangfuwei@ustb.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2903900)

Foundation Item: The National Key Research and Development Project of China (2023YFB2903900)

多模态网络研究方兴未艾,存在一系列基础理论或关键技术亟待突破。考虑到深度定制与动态演进的网络模态是多模态网络的本质特征,本文聚焦于网络模态相关的两个基础问题,一是基于同一基础设施的多样化网络模态共生问题,即网络模态共生的条件、机制和增益;二是全生命周期目标导向的网络模态演化问题,即网络模态演化的时机、目标和路径。

本文紧扣多模态网络的设计初衷,分析其基本概念与组成,描写多模态网络中的业务域、模态域、功能域、资源域以及域间映射,剖析多模态网络的系统目标与决策变量,从理论视角提出多模态网络运行所遵循的最小自由能原理,揭示多模态网络中的双尺度现象,为网络模态的共生和演化提供理论依据。进而,提出一种网络多模态共生与演化的使能结构,包含网络模态演化决策切面、智能生成切面与共生平台切面。其中,网络模态演化决策切面基于业务域、模态域演化生成,用于实现业务驱动的网络模态适配与优化功能;网络模态智能生成切面基于模态域、功能域演化生成,用于实现网络模态的生成与部署功能;网络模态共生平台切面基于功能域、资源域演化生成,用于实现基线能力按需编排与网络模态实例化功能。最后,本文还分析了支持网络多模态共生与演化的运行逻辑,为多模态网络的落地提供理论支持。

## 2 多模态网络的基础概念

多模态网络<sup>[7-10]</sup>将现有或未来的各种网络技术体制以网络模态的形式,在网络基础设施上动态加载和运行,实现多种网络模态在同一物理环境内的共生与演进。在物理形态上,多模态网络是由多模

态网元、运维管理单元和传输链路组成,如图1所示。多模态网元<sup>[11]</sup>是一种基于网络全维可定义技术和一组标准化软硬件接口实现、支持多种或多个网络模态共生运行的网络设备或系统。其具备标准化的即插即用接口,为运行其上的多种网络模态定义的寻址方式、报文格式、路由协议、信令方式、计算/存储/转发机制、交换方式、调度策略、安全机制、服务质量和运维管理等提供技术实现层面的软硬件支持,具有网元内软硬件资源的智能化动态分配、管理和保障功能,一般具备一体化的功能安全和网络安全之内生安全属性。运维管理单元负责多模态网络环境的配置、网络模态的部署与卸载、采用多样的网络模态来承载不同的网络业务类型,提供动态的、针对性、专业性的网络服务,达成服务多元化多样性(Service-Multiplexity-Variouness, SMV)综合目标,即保障业务服务质量(Quality of Service, S)、网络资源的复用水平即经济性(Multiplexity, M)和对多样业务的包容性(Variouness, V)。传输链路包括无线与有线通信媒介,实现网元间、网元与运维管理单元间的互连互通。

网络模态是多模态网络的逻辑形态,在同一物理设施上可以同时存在多个网络模态,这些网络模态随时间动态加载、调整和卸载。网络模态共生<sup>[12]</sup>(Symbiosis of Network Modalities, SNM)指一种网络模态共存的状态,该状态在网络业务需求、网络模态状态和多模态网络环境资源间建立了一种最优化的映射关系,实现网络业务的最优承载、网络资源的最优利用和网络模态多样性的最优表达。网络模态演化(Evolution of Network Modalities, ENM)指因业务或资源变化而进行的由一种网络模态共生状态向另一种网络模态共生状态跃迁的过程。演化

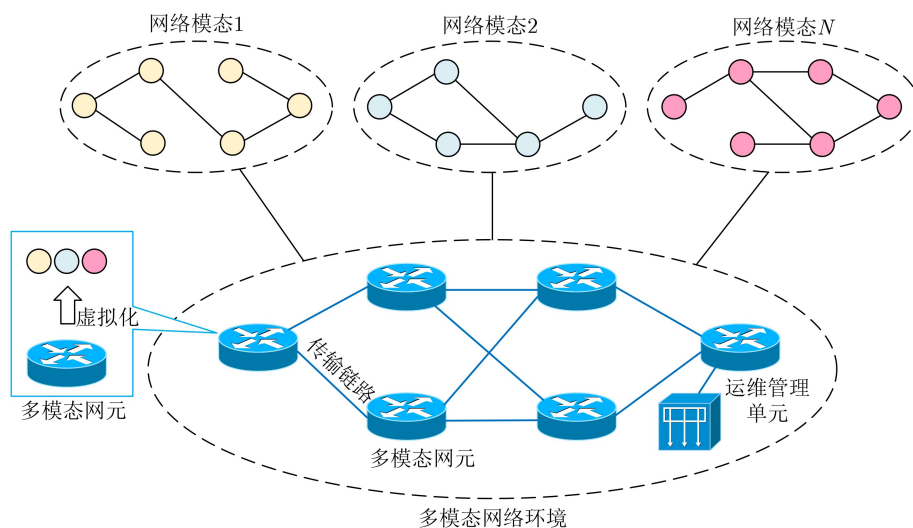


图1 多模态网络环境

的诱因为网络业务或多模态网络环境资源发生变化引起网络模态共生状态的破坏，演化的机制为对网络业务与网络模态、网络模态与网络资源的映射关系进行调整以达到新的网络模态共生状态。

网络模态功能层次参考模型如图2所示，包含业务域、模态域、功能域和资源域。业务域根据网络所服务的业务进行分类，例如电子商务、视频流媒体和云计算等。按照业务类型进行归类，便于业务聚类、管理和优化。模态域将业务需要的网络寻址方式、调度策略、安全机制、服务质量和运维管理等部署为一种网络模态，以满足垂直行业特殊应用需求，可以由领域专家进行方案设计，未来也可以由生成式人工智能提供。功能域将各个网络模态需要的网络功能进行基线能力池化，支持基线能力动态释放、重组，例如分组调度、流量控制、带宽分配、队列管理和缓存管理等。资源域将基线能力所需要的资源进行元素化拆分，包括中央处理器(Central Processing Unit, CPU)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、多核处理卡、静态随机存取存储器(Static Random-Access Memory, SRAM)，stage, table size等类资源。

### 3 网络模态共生与演化理论模型

通过上述分析，本节建立网络模态共生与演化理论模型。

域间映射是多模态网络环境要素的作用路径。海量的业务按照不同的服务质量需求分为不同的簇，映射到不同的网络模态。网络模态的服务能

力，即其所需要的报文处理、转发逻辑、队列功能等由功能域承担。功能域最终映射为计算、通信和存储等资源。因此，多模态网络最核心的目标就是保障多个网络模态既友好共生，也竞争演化，最终从全生命周期从总体上满足网络优化目标。

网络模态的共生与演化受到网络模态内部状态调整、网络模态间的相互作用以及网络模态管理单元调控的共同影响。网络模态是已有或未来网络制式的抽象，它具备自身的能动性，能够根据所承载的业务动态进行优化调整。网络模态间也存在在相互作用，但它们之间的作用路径不是直接的，需要经过业务域或功能域才能间接作用。从业务域来看，业务在动态涨落，新的业务类型不断出现，一些旧的业务类型则会退出，这些都会导致业务簇集的变化，它们被映射在网络模态上，导致网络模态承载的业务量与业务类型发生变化，进而影响网络模态对业务的服务水平和资源利用率。从功能域来看，如果对某个网络模态分配更多的功能(如转发能力)，一般来说会占用更多的资源，进而降低其它网络模态能够占用的资源数量，即资源竞争也能够诱导共存网络模态间相互作用。SMV评价单元能够随时观测各网络模态的资源占有率、业务服务水平等指标，网络模态管理单元则通过调整域间映射、加载或卸载网络模态改善多模态网络整体的业务服务水平、网络资源利用率以及对多样业务包容性，即从SMV的3个维度上优化网络运行。

在数学本质上，网络模态的共生与演化是以SMV为综合目标，通过调整域间映射和网络模态配置的

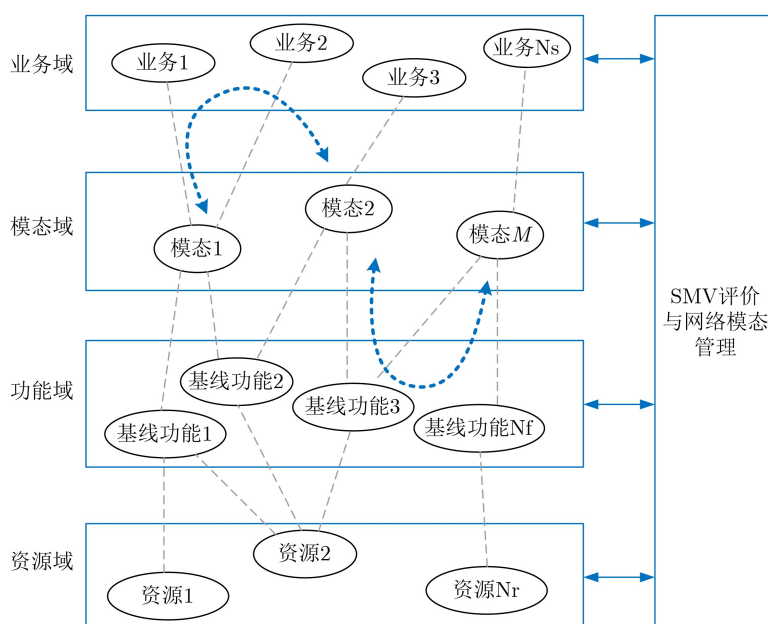


图2 多模态网络功能层次参考模型

网络优化问题。在该优化问题中, 决策变量空间包括:

(1) 网络模态配置, 指 $t$ 时刻的网络模态集合  $\mathbf{M}(t) = \{M_1^t, M_2^t, \dots, M_{m(t)}^t\}$ , 此处 $m(t)$ 为时刻 $t$ 的网络模态数量。

(2) 业务域到模态域的映射,  $f_{SM}(t): \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{M}$ , 即 $t$ 时刻从业务集合 $\mathbf{S}$ 到网络模态集合 $\mathbf{M}$ 的映射。

(3) 模态域到功能域的映射,  $f_{MF}(t): \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{F}$ , 即 $t$ 时刻从网络模态集合 $\mathbf{M}$ 到功能集合 $\mathbf{F}$ 的映射。

(4) 功能域到资源域的映射,  $f_{FR}(t): \mathbf{F} \rightarrow \mathbf{R}$ , 即 $t$ 时刻从功能集合 $\mathbf{S}$ 到资源集合 $\mathbf{M}$ 的映射。

(5) 网络模态内部变量  $\mathbf{X}_t = \bigcup_{i \leq m(t)} X_i(t)$ , 指 $t$ 时刻各网络模态内部决策变量的集合。

在上述变量中, 前4类变量构成的4元组  $\mathbf{Y}_t = \{\mathbf{M}(t), f_{SM}(t), f_{MF}(t), f_{FR}(t)\}$  表示 $t$ 时刻网络模态级决策变量的集合, 它与网络模态内部决策变量  $\mathbf{X}_t$  构成的2元组  $(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t)$  表示 $t$ 时刻的完整决策变量。记  $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_t\}$  和  $\mathbf{Y} = \{\mathbf{Y}_t\}$  分别表示网络模态内部和模态级的决策变量构成的连续时间过程。令  $e(t)$  表示网络 $t$ 时刻所承载业务和底层资源等输入因素的集合, 它是一个随机过程, 表达了业务和网络资源(如故障或节点导致的拓扑变化)的动态变化。令网络模态共生与演化策略为  $\pi$ , 它根据  $e(t)$  当前值和历史信息调整决策变量  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$ 。令网络对业务质量的满足能力为  $S_t = S(t, \mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t, e_t)$ , 资源经济性指标为  $M_t = M(t, \mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t, e_t)$ , 两者的加权和  $\alpha S_t + \beta M_t$  表示在时刻 $t$ 对网络从 $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{M}$ 视角的综合评价, 其中  $\alpha + \beta = 1$ , 且  $\alpha \geq 0$  及  $\beta \geq 0$  为权重系数, 表示在服务质量与资源效用间的权衡。那么, 全生命周期内网络的SMV综合评估 $Q$ 由式(1)给出

$$\begin{aligned} Q(\pi, e) &= \int_0^T \alpha S_\tau + \beta M_\tau d\tau \\ &= \int_0^T \alpha S(\tau, X_\tau, Y_\tau, e_\tau) + \beta M(\tau, X_\tau, Y_\tau, e_\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $T$ 为网络生命周期结束时刻。由于 $e(t)$ 是随机过程, 策略 $\pi$ 越能适应业务的多样性与资源的动态变化, 那么SMV的综合评估就越高, 因而包容性 $V$ 隐式地体现在式(1)中。因此, 以SMV综合评估为诱导的多模态网络最优共生与演化路径应遵循  $\max_\pi Q(\pi, e)$ , 即通过共生与演化决策调整网络模态级变量和网络模态内部变量达到SMV评估的综合优化。然而, 式(1)考虑的是网络全生命周期满足SMV指标的能力, 而未来时刻的 $e(t)$ 是未知的, 因

而在实践中无法直接求解。在给定时刻 $t$ , 系统仅知晓 $t$ 时刻及此前的信息, 而无法获知 $t$ 时刻之后的未来发展态势, 因此, 可将式(1)按时间拆解为过去、现在与未来3部分

$$\begin{aligned} Q(\pi, e) &= \int_0^t (\alpha S_\tau + \beta M_\tau) d\tau + \int_t^{t+\delta t} (\alpha S_\tau + \beta M_\tau) d\tau \\ &\quad + \int_{t+\delta t}^T (\alpha S_\tau + \beta M_\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\delta t$ 为小的正常数, 用于表示自时刻 $t$ 开始的短暂时长, 在此期间业务与资源可以视为是稳态的。在全生命周期的SMV评估中, 表示“过去”的第1部分自时刻 $0 \sim t$ 的评估已经完成, 对 $t$ 时刻可以视为常数而不予考虑; 表示“现在”的第2部分用于评估自时刻 $t \sim t + \delta t$ 的区间内调整决策  $(X_t, Y_t)$  能否适应当前的业务与资源状况  $e(t)$ ; 表示“未来”的第3部分用于表示时刻 $t$ 之后的评估, 无法计算但可以根据历史数据进行合理的估计。受物理学及认知科学的启发<sup>[3]</sup>, 在 $t$ 时刻最大化全生命周期SMV综合评估等价于最小化当前的业务适配损失  $L(t)$  和未来动态适应性惩罚  $P(t)$  的加权和, 即最小化自由能  $J$ , 定义为

$$J_\pi(t) = L(t) + \eta \cdot P(t) \quad (3)$$

其中,  $L(t)$ 是 $t$ 时刻业务适配损失, 定义为

$$L_\pi(t) = - \int_t^{t+\delta t} (\alpha S_\tau + \beta M_\tau) d\tau \quad (4)$$

式(4)衡量了在 $t$ 时刻开始的短暂时间内多模态网络的服务质量指标与资源利用率指标状况, 若服务质量越高、资源经济性越高, 则适配损失  $L(t)$  越低。 $P(t)$ 是动态适应性惩罚, 定义为

$$P_\pi(t) = -\mathbf{E}_e \left[ \int_{t+\delta}^{t+\delta+T_0} (\alpha S_\tau + \beta M_\tau) d\tau \middle| \mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t \right] \quad (5)$$

式(5)指在当前时刻决策  $(\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t)$  作为初始条件时未来时长为 $T_0$ 的时间内业务涨落及底层资源变化导致当前决策不适配而引发的期望损失, 它主要衡量了多模态网络的包容性(即 $V$ 指标), 该惩罚性无法精确获得, 通常是在 $t$ 时刻通过模型预测得到的。 $L(t)$ 主要衡量当前时刻的损失, 而 $P(t)$ 主要衡量未来一段时间的损失, 为了权衡两者引入了温度系数  $\eta$ , 它主要与两方面因素有关。一方面, 若业务需求在时间上趋于恒定, 则温度系数  $\eta$  低, 自由能  $J$  主要体现在业务适配损失, 此时系统主要关注当

前时刻的业务; 反之, 若业务需求随时间大幅度涨落, 则温度系数 $\eta$ 高, 自由能 $J$ 主要体现在动态适应性惩罚, 此时系统应保留充分的资源裕量应对未来业务的动态性。另一方面, 网络生命周期 $T$ 通常是未知的, 温度系数 $\eta$ 用于平衡当前惩罚与未来惩罚。从工程实践上, 自由能 $J$ 本质上是对 $t$ 时刻及其后多模态网络SMV综合评估期望值的近似(两者差一个负号), 因而在时刻 $t$ 最小化自由能就等价于最大化SMV综合评价, 即多模态网络运行遵循着最小自由能原理(principle of minimum free energy), 其最优策略满足

$$\pi^* = \arg \min_{\pi} J_{\pi}(t) \quad (6)$$

在最小自由能原理的约束下, 网络模式的共生和演化可以建模为动力学系统模型, 决策变量在形式上遵循方程式(7)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= -\nabla_{\mathbf{X}} J_{\pi}(t) \\ \frac{d\mathbf{Y}}{dt} &= -\nabla_{\mathbf{Y}} J_{\pi}(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

该方程指出多模态网络的网络模式内和网络模式级决策变量的调整都应以自由能最小为目标方向。其中,  $\varepsilon$ 为很小的正常数, 表明在工程实践中网络模式内决策变量的调整(ms~s的级别)远快于网络模式级决策变量的调整(s~min的级别), 这是由全网加载、卸载、重配置网络模式的复杂性决定的。作为复杂的动力学系统, 多模态网络存在快慢变量分离的状况, 网络模式内决策变量是快变量, 网络模式间决策变量是慢变量。根据吉洪诺夫定理(Tikhonov's Theorem), 由于多模态网络动力学系统天然存在分离的快、慢时间尺度, 可基于奇异扰动理论将其分解为两个子系统:

(1)快时间尺度子系统: 对应于在网络模式与域间映射(即慢变量)固定的前提下, 系统内部的快速状态变化, 对应于网络模式的共生。在此尺度上, 系统执行的是业务流在给定网络模式内部的路由选择、资源分配与调度等, 快变量将迅速收敛到一个由当前慢变量所决定的准静态平衡, 即收敛到慢流形上。

(2)慢时间尺度子系统: 对应于网络模式本身的演化。在此尺度上, 系统根据长期业务趋势、全局效能优化目标或网络状态变化, 进行网络模式的加载、卸载、重配置操作以及调整域间映射如资源在网络模式间的分配等。这些慢变量的变化定义了快子系统所收敛的那个慢流形。

该分解使得网络优化问题得以简化: 在快时间尺度上, 可专注于解决业务流与网络模式的绑定以

及网络模式内部资源的实时调度等; 在慢时间尺度上, 可根据离线预测或在线学习, 对共存的网络模式集合进行优化调整, 例如加载新网络模式、卸载闲置网络模式或调整网络模式的资源配额。网络模式共生是相对的、瞬态的, 而网络模式演化是绝对的、长期的。针对多模态网络的SMV为目标, 以最小自由能为诱导, 上述快慢时间尺度子系统分解为网络模式的共生与演化提供了理论基础, 也为网络模式共生与演化的使能结构提供了框架指导。

## 4 网络模式共生与演化的使能架构

多模态网络中域的配置和域间的映射为SMV目标的达成提供了可能, 最小自由能原理为网络模式共生与演化提供了准则, 本节讨论在多模态网络中支持网络模式共生与演化的使能架构。

多模态网络的体系结构分为数据层、控制层和服务层。为了支持网络模式共生与演化, 针对网络中业务域、模式域、功能域、资源域自顶向下逐层进行需求抽象和逐层映射<sup>[10,14]</sup>, 根据前述业务与网络模式、网络模式与功能、功能与资源域间的灵活匹配机制及运行逻辑, 本文提出可柔性重构、可增量部署和可平滑演进的“网络模式共生与演化使能结构”, 具体归纳为网络模式“演化决策、生成控制、共生平台”3个切面, 以实现网络各层灵活细粒度柔性适配与系统优化, 如图3所示。

### 4.1 网络模式演化决策切面

网络模式演化决策切面实现业务驱动的网络模式适配与优化, 包括业务聚类、网络模式适配、网络模式竞争与协作、态势预测、新网络模式生成和网络模式动态扩增等功能, 该切面包含业务侧与演化决策子系统之间规定的各种应用协议。

态势预测模块深度融合历史业务流量、网络模式负载状态及网络模式服务质量日志, 利用时空特征分析并预判网络模式对业务承载效果。该模块输出关键指标包括网络模式服务质量预测及网络模式协作增益系数, 为网络模式匹配模块提供决策支撑。同时便于新业务出现时, 网络模式匹配功能做出最优的匹配决策。例如, 预测到视频会议业务在晚高峰将出现抖动激增, 提前触发网络模式间资源共享机制。

业务聚类模块根据业务特征进行聚类。可能的特征包括但不限于: 业务规模, 如并发连接数分级; 载荷内容, 如实时流媒体、交互应用等; 载荷大小及服务质量要求, 包括时延、抖动、丢包率构成的服务等级协议矩阵等。该模块采用无监督学习/有监督学习算法构建业务画像库, 为不同业务簇动态生成不同需求标签, 例如为工业控制流建立

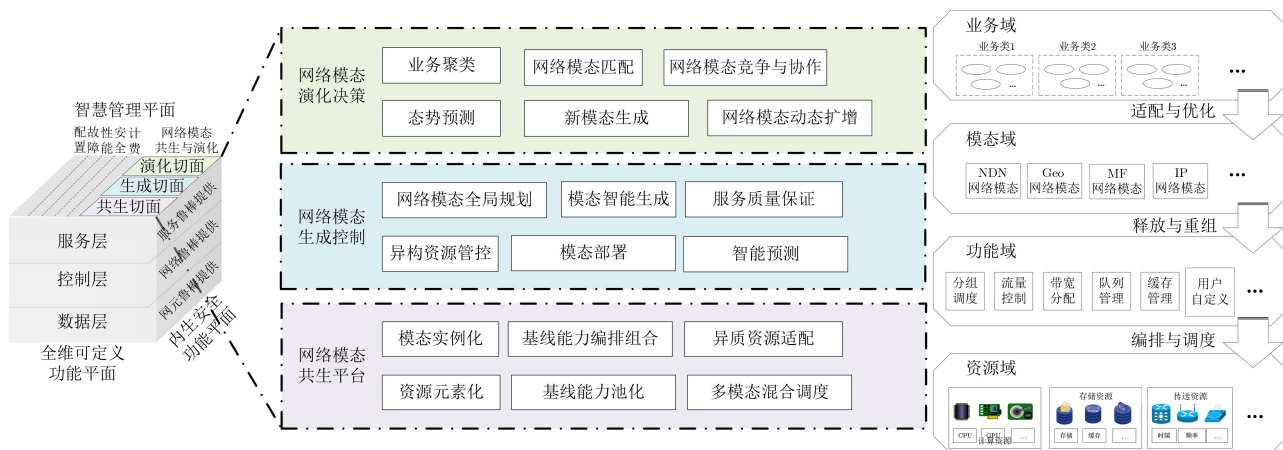


图3 支持网络模式共生与演化的体系结构

“高可靠低时延”类标签，为增强现实/虚拟现实（Augmented Reality/Virtual Reality, AR/VR）业务标注“超高带宽低抖动”属性，奠定业务与网络模式精准匹配的基础。

网络模式匹配模块基于业务聚类与态势预测模块综合输出的业务特征向量(含业务类型、规模及服务等级协议（Service Level Agreement, SLA）要求)，与预置网络模式特征库(包括寻址方式、数据包格式、协议栈结构等)进行适应度计算。通过设计加权评分函数(如适应度=时延权重×时延+带宽权重×带宽+...)，动态地评估，例如：地理标识网络模式对位置敏感型业务、IPv6网络模式对广域连接业务的适配度，车联网应用具有低时延需求，优选TSN协议网络模式替代传统TCP/IP栈等。

网络模式生成决策模块在匹配失败率超过阈值(如>30%)或检测到新型业务特征(如全息通信的超低时延需求)时，启动新网络模式生成决策。该模块解析业务需求为资源约束条件(如“计算密集型+亚毫秒级时延”)，调用P4可编程<sup>[15]</sup>构建定制化网络模式原型，经验证QoS达标后，将新网络模式代码及数据格式注入网络环境。

网络模式增/删决策模块实时监控网络模式运行状态，基于多维度指标实施弹性调控，当网络模式资源利用率持续高于80%时，自动部署副本实现负载均衡；当利用率低于10%达24 h且存在替代网络模式时，启动下线网络模式流程回收资源。该模块通过健康度评估模型(融合QoS达成率、故障率、资源贡献度)动态维护网络模式生态，避免过期网络模式占用网络资源。

网络模式竞争与协作模块采用博弈论优化资源分配策略<sup>[16]</sup>，分析网络模式间的互补特性，资源类型互补(如GPU密集型AI网络模式与带宽密集型视频网络模式共享节点)、时间互补(日间优先保障实

时业务网络模式，夜间切换批处理网络模式)、空间互补(边缘网络模式本地化处理，核心网络模式跨域调度)，便于网络模式在竞争网络资源时，产生网络模式间协作策略。通过设计博弈机制，使网络模式按SLA提升效用竞价稀缺资源，实现网络模式运行时全局效率最优。

#### 4.2 网络模式生成控制切面

网络模式生成控制切面作为3切面体系的核心驱动层，承担网络模式全生命周期管理职能，通过全局规划-智能生成-资源管控-服务保障的闭环机制实现网络模式动态部署。该切面集成多样化寻址标识体系，支持SRv6, NDN等新兴网络模式协议栈的动态加载，构建了从网络模式部署需求到网络模式实例化部署的流水线。其核心价值在于突破传统网络静态架构限制，通过智能决策与资源协同实现网络模式的按需生成与弹性扩缩容。该切面包含各种已有或新兴网络模式对应的多样化寻址标识方式的路由协议和控制协议等。网络模式智能生成切面主要包含网络模式智能生成、全局规划、服务质量保证、异构资源管控、网络模式部署等功能模块。

网络模式全局规划模块依托全网资源状态感知<sup>[17]</sup>矩阵(涵盖拓扑连接度、网络节点资源分布、链路带宽利用率)，采用图神经网络(Graph Neural Network, GNN)建模多约束部署优化问题。该功能为异构网络模式制定差异化部署策略，规划网络模式部署的网络拓扑。网络模式生成控制器实时处理网络模式业务流请求，基于top-k方法统计热点网络模式，并实时感知当前活跃的资源利用率。

服务质量保证模块构建网络模式SLA实时监控-预警-决策3级响应机制，通过分布式探针<sup>[18]</sup>采集端到端时延、抖动、丢包率等性能指标，采用算法检测服务劣化趋势。当业务的服务质量无法保证时，做出网络模式调整部署的决策。例如，当工业

控制流时延波动超过阈值时, 触发网络模态迁移决策(如从通用IPv6网络模态切换至TSN确定性网络模态), 并结合增量部署技术实现业务无感切换。

异构资源管控模块对网络模态共生平台的网元内部异构的资源(例如FPGA, ASIC, PPK等转发资源)进行最优化分配和协同工作。基于细粒度感知的网络模态软件资源闭环管理机制, 引入本地和全局闭环反馈机制, 通过本地闭环反馈调节网络模态所处的软件资源, 本地调节失败时将启用全局闭环管理。根据流量导致的软件系统工作负载, 为网络模态分配大于其资源需求的配额, 解决不同网络模态共定位时的软件资源竞争问题。

网络模态部署模块通过标准化南向接口(P4 Runtime/NETCONF)将网络模态代码和数据包格式、路由协议栈及转发策略等下发到网络模态共生平台。根据网络模态处理逻辑的分解机理, 建立分解后的网络模态处理逻辑与异构资源之间的映射关系。支持对同一网络模态的处理逻辑进行异构部署。

网络模态智能生成模块基于带内网络遥测获取的性能参数(网络模态的运行状态、网络资源占用情况等), 结合人工智能方法对网络模态性能进行预测, 并根据预测结果进行网络模态资源的管理, 为全局规划功能提供建议和支撑。

#### 4.3 网络模态共生平台切面

网络模态共生平台切面实现基线能力按需编排与网络模态实例化, 包括网络模态实例化、基线能力编排组合、异质资源适配、资源元素化、基线能力池化和多模态混合调度等功能, 该切面包含各种已有或新兴网络模态对应的网络层协议、以太网协议等。

基线功能池化模块将构成各类网络模态的功能拆分成最基本功能单元, 从网络的根本功能和组成结构出发, 对网络的基线能力进行提炼并对全网资源进行统一抽象描述, 减少基线能力间的依赖、解除之间的耦合关系, 增加基线能力的灵活性, 生成基线功能池。

网络资源元素化模块根据基线能力变化对网络资源进行动态释放和重构, 解决现有平台结构固化, 通过资源组合重构的方式实现多样化的网络模态所需基线能力, 基于动态化的资源编排或卸载能力保障多样化网络模态能够主动适配承载业务的资源需求变化。

基线功能编排模块针对网络模态的运行逻辑对基线能力进行编排, 以及当网络模态下线时对基线能力进行释放和回收。网络基线作为网络功能的基本单位, 可组合成更为高级形态的多样化网络模

态。通过支持基线能力重构的网络资源动态聚合机制, 根据网络模态的服务需求, 将资源动态聚合、重构为可定义的基线能力, 实现异构软硬件资源的灵活组织和按需调度。同时根据网络模态驱动的网络基线能力重构优化算法, 快速生成各种定制的网络模态处理及运行逻辑。

网络模态实例化模块利用不同网络基线能力构造网络模态, 实现对整个共生平台中基线能力的编排和重构, 从而实现多样化网络模态的共生共存; 在网络模态共生平台, 综合利用不同网络基线构造多种多样的应用网络模态。

多模态混合调度模块通过监测网络模态共生状态, 动态调整不同网络模态所使用的网络基线能力以及占用的网络资源。将多个网络模态间的调度问题和单个网络模态内的调度问题统一到有限的队列资源表达上, 支持多种网络模态间的隔离及资源共享。根据网络模态共生策略, 采用不同网络模态需求的调度策略智能生成算法, 解决多个网络模态共生的动态队列管理方案, 实现网络模态共生策略与队列调度的“最优适配”。

#### 4.4 支持网络模态共生与演化的使能技术

支持网络模态共生与演化的使能技术如图4所示, 主要为业务聚类、多样化网络模态、基线功能池化、网络资源元素化。

业务聚类基于业务语义与需求特征的动态归并技术, 通过无监督学习(如谱聚类、深度嵌入聚类)对异构网络业务进行多维度特征提取与模式识别。该技术依据业务的服务质量需求(时延、带宽等)、资源依赖特征(计算强度、存储敏感度)及行为模式(突发性、周期性)构建多维特征空间, 将具有相似演化路径与资源诉求的业务动态聚合为逻辑业务簇。其核心价值在于为多模态网络提供需求侧的结构化抽象, 实现网络模态按需定制与资源精准供给。

多样化网络模态指基于统一物理基础设施动态生成的、具备独立资源调度策略与协议栈的逻辑网络实例, 其实现依托于网络功能解耦与软硬件资源虚拟化技术。每种网络模态通过软件定义方式定制其拓扑结构(如Mesh、树状)、转发机制(确定性转发、概率路由)及控制逻辑(集中式、分布式), 从而适配聚类后业务簇的差异化需求。网络模态的多样性为共生演化提供了基础生态单元。

基线功能池化是网络功能原子化与资源共享的核心使能技术, 通过将传统紧耦合的协议栈解耦为可复用功能组件(如路由计算、加密、拥塞控制), 并存储在分布式功能池中。该池采用微服务架构,

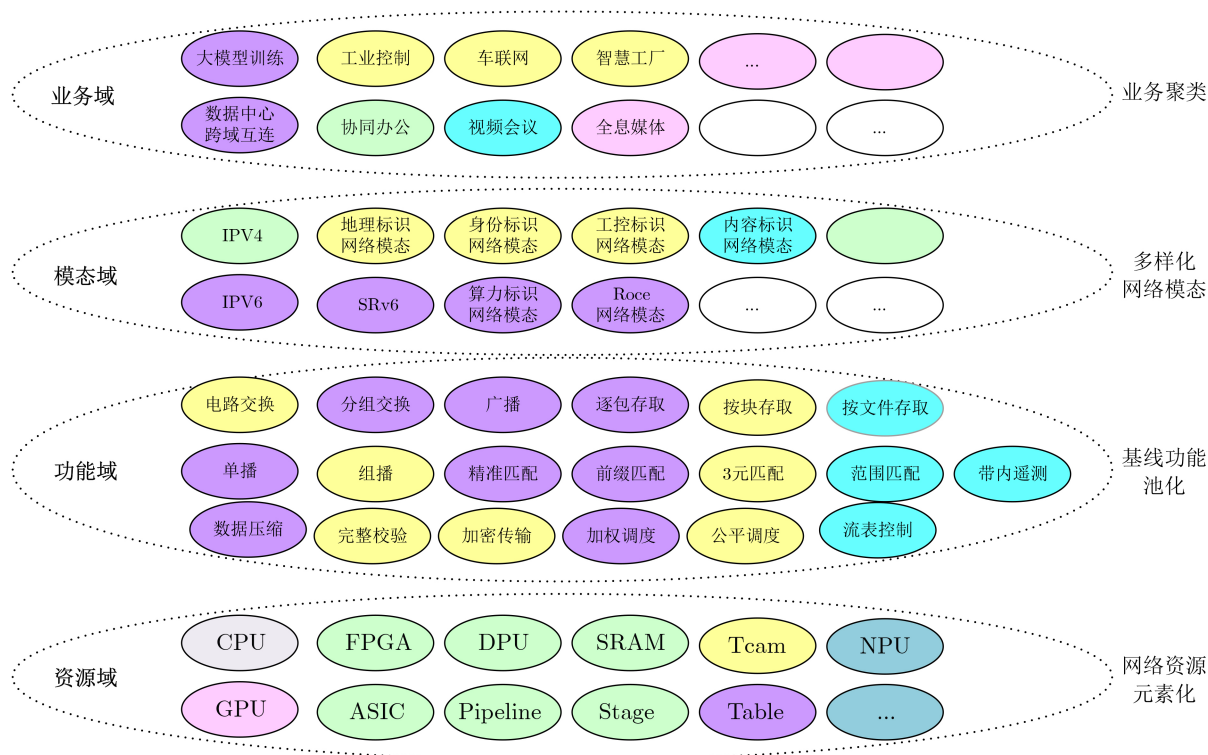


图4 支持网络模式共生与演化的使能技术

支持各网络模式按需调用、编排及动态组合,同时结合服务网络实现功能间的低开销通信。例如在生成高安全网络模式时,可动态组合池中的零信任认证、量子加密与入侵检测功能块。此机制显著提升网络功能复用率,降低网络模式生成开销,并为功能演进的升级提供基础。

网络资源元素化指将物理资源(带宽、算力、存储)与虚拟资源(流表项、会话标识符)分解为不可再分的标准计量单元(如资源原子),每个资源原子附带有全局唯一标识符(如哈希指针)及动态属性标签(实时利用率、物理位置),使跨网络模式资源调度可精确至原子级。该技术支撑共生平台构建资源贡献度量化模型(如以原子消耗量为单位的资源信用),进而实现网络模式间资源的互利与博弈均衡。

## 5 网络模式共生与演化的运行逻辑

网络模式共生与演化的运行逻辑从切面内与切面间展开分析,为更好地支持网络模式演化决策,引入知识库,对网络模式运行时的时许信息进行收集。首先分别介绍3个切面内部的运行逻辑。

在网络模式演化决策切面中,业务聚类功能根据业务需求和SMV诱导目标、网络模式占用资源情况,为业务匹配相应的网络模式,当业务需求发生变化或新业务出现时,业务聚类功能判断现有网

络模式是否满足业务需求,若满足,则匹配该网络模式,若不满足则产生生成新网络模式的决策。态势预测功能将网络模式对业务的支持性能作为指标传递为业务聚类的决策进行支撑;并根据业务的服务质量、网络模式占用资源和流量工程的情况,对网络模式竞争与协作功能进行支撑和建议,使其作出增加某些网络模式或下线某些网络模式的决策。例如当一种网络模式只占用部署该网络模式需要的资源并不占用带宽时,说明已经没有业务使用该网络模式,则需要下线该网络模式或对其进行演化。同时态势预测功能预测业务的变化,并按需产生生成新网络模式的决策。

在网络模式生成控制切面中,网络模式智能生成功能基于带内网络遥测获取的性能参数,结合机器学习等人工智能方法对网络模式性能进行预测,并根据预测结果进行网络模式资源的管理,为全局规划功能提供建议和支撑,基于全局状态感知对网络模式的部署位置进行全局规划。例如分别为地理位置网络模式、IPv6网络模式分配适合的部署网络拓扑。异构资源管理功能遵循资源可替换性原则,使得异构资源可以相互交换以达到等效的网络模式性能,从而保障网络模式的服务质量。

在网络模式共生平台切面中,网络资源元素化功能将网络模式共生平台的网络资源进行元素化拆分,基线能力编排功能在基线能力池化中选取地理

标识网络模态、IPv6网络模态等需要的基线能力，例如：单播、组播、范围匹配、网络层协议、逐包存储、加权调度等，网络模态实例化功能按照网络模态处理逻辑顺序，将对应基线能力映射到相应的资源位置，同时，多模态混合调度功能针对网络模态共生平台上网络资源的情况，对多种网络模态进行调度，以保证各个网络模态的服务质量。

3切面之间的运行逻辑如图5所示，网络模态演化决策子系统根据业务需求(时延、抖动、丢包率等)，确定与业务需求匹配的网络模态，并分析整个系统网络模态运行的状态、占用资源状态、业务支持情况，若系统中现有的网络模态无法满足业务需求，则产生网络模态是否需要演化的决策，并对网络中现有的网络模态进行优化调整，产生新的网络模态。网络模态智能生成子系统基于所确定的网

络模态，对网络模态进行全局规划，确定部署拓扑与部署位置，并监测网络模态的服务质量，服务质量包括时延、抖动、丢包率等。网络模态共生平台子系统根据确定的网络模态的部署拓扑，将网络模态部署在网络资源(CPU, FPGA, NPU、多核处理卡、SRAM, stage, table size)上，编排网络模态需要的网络基线能力和映射到基线能力需要的网络资源，并执行多个网络模态的混合调度。其中，网络模态演化决策子系统为网络模态演化生成子系统提供网络模态决策，网络模态智能生成子系统为网络模态共生平台提供网络模态部署策略，网络模态共生平台为网络模态智能生成子系统提供资源状态和网络模态运行状态等，网络模态智能生成子系统为网络模态演化决策子系统提供资源状态和业务服务质量，网络模态对业务支撑状态的反馈。

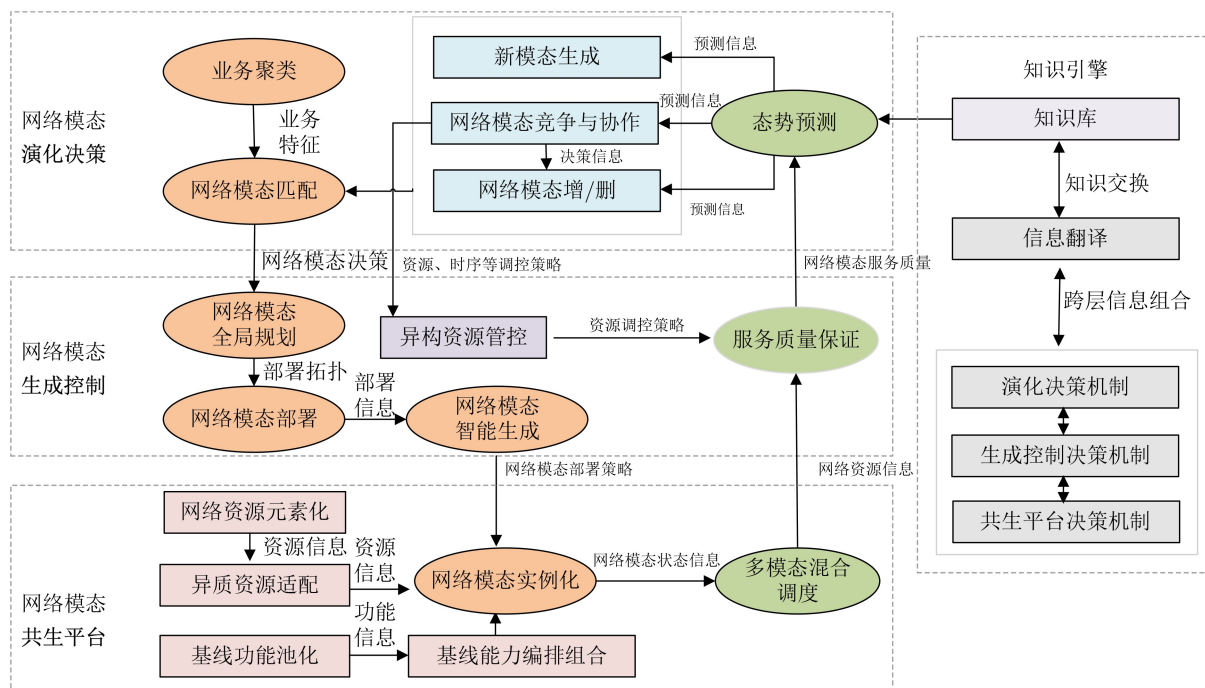


图5 网络模态共生与演化的运行逻辑

## 6 结束语

本文提出支持网络多网络模态共生与演化的理论模型与3切面体系结构，通过解耦业务域、模态域、功能域与资源域，实现“动态决策-智能生成-共生协同”的闭环机制，从根本上解决了多模态网络动态共生与演化的核心挑战。该架构以业务驱动为牵引，在演化决策切面实现网络模态的智能适配与竞争协作优化；在智能生成切面依托全局规划与资源智能调控技术，支持网络模态的按需生成与敏捷部署；在共生平台切面通过基线能力池化与多网络模态混合调度，实现异构资源的动态编排与网络

模态实例化。其创新性在于突破传统网络的刚性架构约束，赋予网络“动态重构、自主演化”的内生能力，为垂直行业提供柔性化、定制化的服务支撑。当前研究在跨域协同实时性、复杂网络模态部署开销及安全验证深度方面仍存在优化空间，未来将聚焦轻量化网络模态生成、空天地一体化扩展及AI原生(AI-Native)安全增强，推动多模态网络向更开放、智能、可靠的方向演进。

## 参考文献

[1] XIE Kun, WANG Lele, WANG Xin, et al. Accurate recovery of internet traffic data: A sequential tensor

- completion approach[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(2): 793–806. doi: [10.1109/TNET.2018.2797094](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2797094).
- [2] LI Rongpeng, ZHAO Zhifeng, ZHENG Jianchao, *et al.* The learning and prediction of application-level traffic data in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3899–3912. doi: [10.1109/TWC.2017.2689772](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2689772).
- [3] ZHANG Lixia, AFANASYEV A, BURKE J, *et al.* Nameddata networking[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(3): 66–73. doi: [10.1145/2656877.2656887](https://doi.org/10.1145/2656877.2656887).
- [4] WU Jiangxing, LI Junfei, SUN Penghao, *et al.* Theoretical framework for a polymorphic network environment[J]. *Engineering*, 2024, 39: 222–234. doi: [10.1016/j.eng.2024.01.018](https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.018).
- [5] HU Yuxiang, LI Dan, SUN Penghao, *et al.* Polymorphicsmart network: An open, flexible and universal architecture for future heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020, 7(4): 2515–2525. doi: [10.1109/TNSE.2020.3006249](https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.3006249).
- [6] 胡宇翔, 崔子熙, 李子勇, 等. 基于领域专用软硬件协同的多模态网络环境构造技术[J]. *通信学报*, 2022, 43(4): 3–13. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022086](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022086).  
HU Yuxiang, CUI Zixi, LI Ziyong, *et al.* Construction technologies of polymorphic network environment based on codesign of domain-specific software/hardware[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(4): 3–13. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022086](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022086).
- [7] 涂化清, 方徐鑫, 朱俊, 等. 面向多模态网络的SONiC网元控制通道容器设计[J]. *电信科学*, 2025, 41(3): 128–141. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2025026](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2025026).  
TU Huaqing, FANG Xuxin, ZHU Jun, *et al.* Design of SONiC network element control channel container for polymorphic network[J]. *Telecommunications Science*, 2025, 41(3): 128–141. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2025026](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2025026).
- [8] 余宏志. 多模态网络智能流量控制方法研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2024. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003018](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003018).  
YU Hongzhi. Research on intelligent traffic control methods for PINet[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2024. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003018](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003018).
- [9] 李梦龙, 田乐, 申涓, 等. 一种多模态智慧网络仿真器架构及仿真测试方法[P]. 中国, 202211186728.9, 2023.  
LI Menglong, TIAN Le, SHEN Juan, *et al.* Multi-mode intelligent network simulator architecture and simulation test method[P]. CN, 202211186728.9, 2023.
- [10] 张慧峰, 华梓强, 骆汉光, 等. 一种支持网络多模态共生演化的系统及方法[P]. 中国, 202411290331.3, 2024.  
ZHANG Huifeng, HUA Ziqiang, LUO Hanguang, *et al.* System and method for supporting multi-mode symbiotic evolution of network[P]. CN, 202411290331.3, 2024.
- [11] 中国通信学会. T/ZGTXXH 029-2022 多模态网元技术要求[S]. 中国通信学会, 2022.  
China Institute of Communications. T/ZGTXXH 029-2022 Technical specification for polymorphic network element[S]. China Institute of Communications, 2022.
- [12] 中国通信学会. T/ZGTXXH 102-2025 多模态网络术语[S]. 中国通信学会, 2025.  
China Institute of Communications. T/ZGTXXH 102-2025 Multimodal network terminology[S]. China Institute of Communications, 2025.
- [13] JOSE S T and SIMEONE O. Free energy minimization: A unified framework for modeling, inference, learning, and optimization [lecture notes][J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2021, 38(2): 120–125. doi: [10.1109/MSP.2020.3041414](https://doi.org/10.1109/MSP.2020.3041414).
- [14] 中国通信学会. T/ZGTXXH 103-2025 多模态网络多模态试验网的网络模态部署技术要求[S]. 中国通信学会, 2025.  
China Institute of Communications. T/ZGTXXH 103-2025 Multimodal networks technical requirements for network modality deployment of multimodal test networks[S]. China Institute of Communications, 2025.
- [15] XIE Junfeng, YU F R, HUANG Tao, *et al.* A survey of machine learning techniques applied to software defined networking (SDN): Research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 393–430. doi: [10.1109/COMST.2018.2866942](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2866942).
- [16] JAURO F, CHIROMA H, GITAL A Y, *et al.* Deep learning architectures in emerging cloud computing architectures: Recent development, challenges and next research trend[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 96: 106582. doi: [10.1016/j.asoc.2020.106582](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106582).
- [17] MIJUMBI R, HASIJA S, DAVY S, *et al.* Topology-aware prediction of virtual network function resource requirements[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, 14(1): 106–120. doi: [10.1109/TNSM.2017.2666781](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2666781).
- [18] ZHU Rui, LIU Bang, NIU Di, *et al.* Network latency estimation for personal devices: A matrix completion approach[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(2): 724–737. doi: [10.1109/TNET.2016.2612695](https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2612695).
- 张慧峰: 女, 高级工程师, 研究方向为新型网络体系架构、智算中心网络。  
胡宇翔: 男, 教授, 研究方向为新型网络架构、网络空间安全、智能路由与可编程转发等。  
朱俊: 男, 高级工程师, 研究方向为新型网络体系结构、网络(资源)管理与控制技术、网络协议设计优化、卫星互联网。  
邹涛: 男, 研究员, 研究方向为智算中心网络架构、高性能网络协议、网内计算。

皇甫伟：男，教授，研究方向为新一代网络理论与技术、无线通信与边缘计算。

络理论与技术、无线移动通信、网络新业务与安全。

隆克平：男，教授，研究方向为光互联网络及交换技术、新一代网

责任编辑：余蓉

## Architecture and Operational Dynamics for Enabling Symbiosis and Evolution of Network Modalities

ZHANG Huifeng<sup>①</sup> HU Yuxiang<sup>③</sup> ZHU Jun<sup>①</sup> ZOU Tao<sup>①</sup>  
HUANGFU Wei<sup>②</sup> LONG Keping<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China)

<sup>②</sup>(University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

<sup>③</sup>(Information Engineering University, ZhengZhou 450002, China)

### Abstract:

**Objective** The paradigm shift toward polymorphic networks enables dynamic deployment of diverse network modalities on shared infrastructure but introduces two fundamental challenges. First, symbiosis complexity arises from the absence of formal mechanisms to orchestrate coexistence conditions, intermodal collaboration, and resource efficiency gains among heterogeneous network modalities, which results in inefficient resource use and performance degradation. Second, evolutionary uncertainty stems from the lack of lifecycle-oriented frameworks to govern triggering conditions (e.g., abrupt traffic surges), optimization objectives (service-level agreement compliance and energy efficiency), and transition paths (e.g., seamless migration from IPv6 to GEO-based modalities) during network modality evolution, which constrains adaptive responses to vertical industry demands such as vehicular networks and smart manufacturing. This study aims to establish a theoretical and architectural foundation to address these gaps by proposing a three-plane architecture that supports dynamic coexistence and evolution of polymorphic networks with deterministic service-level agreement guarantees.

**Methods** The architecture decouples network operation into four domains: (1) The business domain dynamically clusters services using machine learning according to quality-of-service requirements. (2) The modal domain generates specialized network modalities through software-defined interfaces. (3) The function domain enables baseline capability pooling by atomizing network functions into reusable components. (4) The resource domain supports fine-grained resource scheduling through elementization techniques.

The core innovation lies in three synergistic planes: (1) The evolutionary decision plane applies predictive analytics for adaptive selection and optimization of network modalities. (2) The intelligent generation plane orchestrates modality deployment with global resource awareness. (3) The symbiosis platform plane dynamically composes baseline capabilities to support modality coexistence.

**Results and Discussions** The proposed architecture advances beyond conventional approaches by avoiding virtualization overhead through native deployment of network modalities directly on polymorphic network elements. Resource elementization and capability pooling jointly support efficient cross-modality resource sharing. Closed-loop interactions among the decision, generation, and symbiosis planes enable autonomous network evolution that adapts to time-varying service demands under unified control objectives.

**Conclusions** A theoretically grounded framework is presented to support dynamic symbiosis of heterogeneous network modalities on shared infrastructure through business-driven decision mechanisms and autonomous evolution. The architecture provides a scalable foundation for future systems that integrate artificial intelligence. Future work will extend this paradigm to integrated 6G satellite-terrestrial scenarios, where spatial-temporal resource complementarity is expected to play a central role.

**Key words:** Polymorphic network; Architecture; Operational dynamics; Network modality symbiosis; Network modality evolution