



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Cyber Technology—Article

多模态网络环境理论框架

邬江兴, 李军飞*, 孙鹏浩, 胡宇翔, 李子勇

PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 July 2023

Revised 20 October 2023

Accepted 23 January 2024

Available online 28 February 2024

关键词

多模态网络环境

不可能三角

网络发展范式

未来网络

摘要

“全生命周期内是否存在具有全维可扩展性的理想网络”始终是网络体制或架构研究的第一性问题。迄今为止,所有单一网络体制都无法科学地践行理想网络的设计准则,难以在整个生命周期内做到既能适配应用场景清晰的预期业务又能支撑不断发展丰富的未来业务。研究证明,理论上任何单一网络体制都无法在服务质量承诺(S)、资源复用性(M)、业务多样性(V)三个维度上同时满足全生命周期内的可扩展性需求,存在“SMV不可能三角”困局,唯有变革当前网络发展范式,才能从思维视角、方法论和实践规范层面化解全维可扩展性与统一网络基础设施之间的矛盾。本文提出多模态网络环境(PNE)理论框架,其第一性原理就是将基础设施环境与应用网络体制分离或解耦,在给定资源条件下,基于网络基线的元素化、资源动态聚合及软硬件协同编排等核心技术生成“网络之网络”能力,从而在时空维度上用“生成式网络”形态建构为变化而设计、可共生共存的理想网络体制。原理验证环境测试表明,生成的多种有代表性的应用网络模态既能互不影响地共生共存,也能在技术经济指标约束下各自独立匹配定义清晰的多媒体业务或自定义服务。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

互联网经过20世纪90年代后期以来的加速度发展,取得人类网络通信技术和应用史上前所未有的成功,已经成为诸如人们日常社会活动中不可或缺的供水、供电、供气设施一样的信息通信基础设施。然而,网络体制的研究自有通信网以来一直沿袭“摸着石头过河”的发展路线,孜孜不倦地从工程技术层面探索“one for all”的理想网络体制。令人沮丧的是,迄今为止,无论是理论模型还是实用方案上均未发现何种单一网络体制,既能有效承载应用场景明确、有经济性和功能/性能保障的预期业务,又

能在整个生命周期内适配应用场景可不断丰富的未来业务。换言之,就是用可扩展的多样性应用场景去适配单一网络体制存在理论和实践层面的可行性问题,而用多种单一网络体制去匹配多样化应用场景则存在技术经济性问题。显然,在现有网络理论框架下“无论是业务适应网络还是网络匹配业务”都是一个无解难题。欲要突破之,首先要弄清“理想网络”体制的第一性问题,即存在性问题;其次要研究什么样的第一性技术原理才能将理论上的存在性转变为工程上的可实现性。

回顾网络体制的发展历史,可以追溯上述问题的根源。我们在文献[1]里将以往的网络体制发展范式归纳为3

* Corresponding author.

E-mail address: lijunfei_ndsc@163.com (J. Li).

个阶段（之前也许无人用范式的理论建构过），从最初网络与业务一体化阶段发展出的电话网、电报网、电视网等专网技术服务形态[2]，到针对语音、数据、视频、图像等主要传送多媒体业务建立的综合业务数字网阶段[3]，再到如今基于传输控制协议/互联网协议（TCP/IP）互联网[4]为代表的网络与业务分离阶段，不断逼近面向客户（toC）条件下，基于“端到端”一体化承载多媒体数据通信服务的目标。从各阶段网络体制演变历程不难看出，信息或数据传送网络的发展脉络始终围绕“给定技术经济条件下，如何用统一的网络基础设施和技术体制来支撑多样化或多元化业务需求”之问题展开。

当今数字化、智能化、网络化时代，面向商业（toB）、面向机器（toM）、面向新兴事物（toX）等垂直行业多元化应用场景或需求强劲崛起，为满足新兴应用场景的需求，网络运营商（ISP）和科技产业界不断增补各种协议或堆砌各种边缘技术，互联网工程任务组（IETF）或国际电信联盟（ITU）组织已经通过的请求评议（RFC）建议或相关技术标准已超过9000个[5]。然而，以网络与业务分离为模式的消费互联网仍然面临以下挑战：

（1）业务由网络边缘生成或提供，虚拟化（NFV）技术可以支持网络功能的实现，但无法保证相关承载性能[6-7]；

（2）“补丁摺补丁”的演进式发展路线使得网络控制复杂度高到濒临崩溃，广义功能安全威胁和破坏无处不在；

（3）仅以信息或数据的“端到端”传送为目标的管道化信息连接服务，已远远不能满足网络空间包含云计算、边缘计算、可信计算、内生安全和人工智能等在内的一系列新兴服务的需要。

针对当前互联网存在的固有缺陷，一批颇具特色的新型网络与应用发展迅速，如身份标识网络[8]、命名数据网络（NDN）[9]、移动优先网络（MF）[10]、时间敏感网络（TSN）[11]、智慧协同标识网络[12]等被相继提出，有些已在部分行业专网中应用并获得良好效果。然而，受限于单一网络体制和服务模式设计初衷的禁锢，传统互联网难以支撑各种新兴应用场景与服务的兼容并蓄、共生共存之时代进步要求，在现有网络基础设施和终端设备巨大存量资产掣肘下，任何创新的网络体制最多只能以虚拟化的“overlay”方式“矮化实现”，既无法充分体现新型网络体制和应用服务的功能性能优势，也难以规模化的、适时的部署应用。存量资产利用与新兴网络体制应用间存在日益尖锐的矛盾，特别是“人机物网”深度融合的数字经济时代，网络基础设施换代需要付出的社会成本更高，经

济效益的优先考量往往会本能的排斥任何变革性网络体制的规模化部署。

上述问题存在两个根本原因：一是单一网络体制无法保障多样化可扩展业务的承载性能；二是多元化网络体制应用需求与统一基础设施建设的矛盾。当前网络基础设施和应用网络体制采用强绑定或强黏连的紧耦合方式，如基于TCP/IP的互联网。这使得在已部署的信息通信基础设施上实施任何应用网络体制创新都可能付出代价不菲的升级改造成本，而在既有单一网络体制约束条件下仅近通过修修补补的技术演进方式，不可能在整个生命周期内以向后兼容方式适配不断发展丰富的未来应用场景及业务。即使采纳面向为变化而设计的未来网络准则[13]，也只是以一种网络样例去替换另一种网络样例的“one by one”发展模式，无法突破本文后续所提出的“不可能三角[服务质量承诺（S）、资源复用性（M）和业务多样性（V）]”困境。因此，我们认为，如何将基础设施环境与应用网络体制及业务解耦，是化解多样性与统一性矛盾的第一性问题。《控制论导论》一书作者、控制论学家威廉姆·罗斯·艾什比提出“在自然界，只有多样性才能摧毁多样性”，也称必要多样性原理[14]。理论生物学家罗伯特·梅（Robert May）指出“高度多样化的生态系统一定减少了复杂性，即更少或更弱的物种间相互作用”[15]。我们认为，任何推高复杂度的方法都不可能持续地支撑多样化发展需求，即全生命周期业务多样性需求只有网络体制多样化才能匹配，单一网络体制不可能为之。换言之，“理想网络”基础设施应在其生命周期内可支撑多样化的应用网络模态及业务的创建或部署，模态设计者可以按照预期的应用场景与期望的业务需求设计与之相匹配的网络体制，最大程度避免应用场景及业务可扩展性受制于刚化或固化的网络体制（架构）问题。

本文尝试从理论层面论证多模态网络环境（PNE）作为未来网络体制发展范式的充分必要性，创建的“不可能三角（SMV）”通用解构模型可以定性分析任何单一网络体制的局限性，通过抽象业务与资源的数学模型，分析揭示“生成式网络之网络”体制（即PNE）的第一性原理，以期创建网络体制发展新范式提供理论与方法层面的支撑。

2. 传统网络体制发展范式的理论困境

纵观人类社会的技术革命演进，从以蒸汽机为代表的第一次工业革命，实现了物质运输的便利化；到以电力为代表第二次工业革命，实现了能量传输的便捷化；然后到

现在以计算机为代表的信息技术革命，融合网络技术实现了信息网络服务的飞跃发展。我们认为，一个成功的、能够长久服务于人类的技术革命，需要兼顾以下三个要素：①经济性，人类总是预期以更低成本实现更高的性能，以利于技术的推广；②有效性，技术必须能够有效保证人类生产生活中的特定质量、指标或效率追求；③包容性，基于该技术的核心理念能够延展到多种多样的应用领域，满足不同生产生活场景需求。

2.1. “不可能三角”要素分析

网络体制作为数字时代的核心技术之一，无论是演进或变革发展，本质上也都是追求成功技术要素的最大化效益。因此，针对当前网络体制面临的种种问题，本文试图提取出理想网络三要素，创建网络体制“不可能三角”通用解构模型，以便能够定性分析过往及当今网络体制发展范式存在的理论困境。

一般而言，网络体制是通过传输、计算、存储、安全等特定软硬件资源的编排、调度、组合等算法表达，形成业务功能/性能的支撑能力。因而，不同网络体制可以抽象为物理/逻辑资源向所承载的业务功能/性能之不同映射方式，如图1所示。正如前文所述，经济性、有效性和包容性是一个技术能否成为革命性技术的必要特性，一个理想网络体制若要在整个生命周期内具有全局可扩展性，也需要具备三个要素：①S代表网络业务承载性能的质量保证；②M体现给定网络规模下的物理/逻辑资源利用度；③V代表可承载的网络业务种类，包括定义清晰的预期业务和未来可明确应用场景的扩展型业务。简称SMV要素。

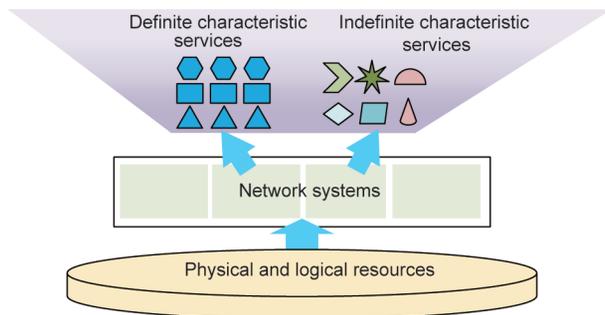


图1. 网络体制与物理/逻辑资源的映射关系。

然而，我们发现在既往任何实用化或商业化应用的单一网络体制全生命周期内，若要保证S、M、V都具有可扩展性（也称网络的全维/全局可扩展性），则SMV要素间存在无法调和的矛盾（详见2.2节）。为了便于对任意单一网络体制SMV要素相互关系进行定性分析，我们以全

生命周期内网络全维/全局扩展性要求为假设前提，创建了单一网络体制“不可能三角”通用解构模型，简称“SMV困境”，如图2所示。

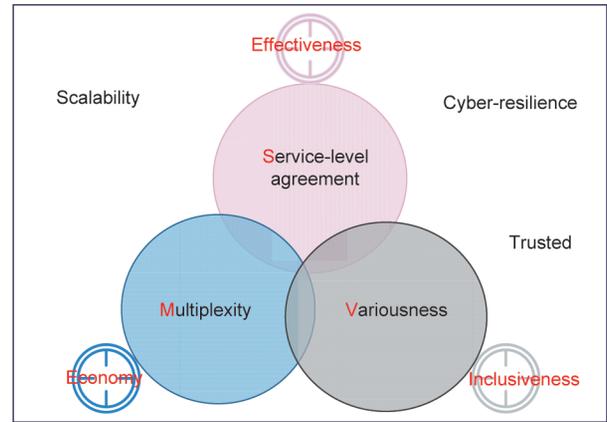


图2. 单一网络体制“不可能三角”解构模型。

2.2. “不可能三角”的解构分析

上文提出，在默认全维/全局可扩展性前提下，S、M与V是衡量网络能力的三个必要指标。本节将进一步指出并分析单一网络体制中上述三个指标的内在矛盾。

引理1：一个单一网络体制，若能够同时达到S与M的最优能力，则必然舍弃对于V最优的追求。

证明：M达到最优能力时，其基于确定物理资源平台的实际业务承载量达到最大，在可扩展性前提下，此时物理资源在动态业务场景需求和现有网络体制技术下达到饱和的使用状态。假设此时网络中存在的业务 $Ser = \{Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N\}$ （其中N是服务数量），则饱和的资源使用状态指不存在新的业务 Ser_{N+1} 使 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_{N+1}$ 同时得到承载。同时，S达到最优，表示 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 的服务质量都得到满足，即 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 所需求的物理资源都能在特定时间段、特定位置得到足量保证，亦即 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 对于物理资源的需求在时间和空间上能以复用的方式避免绝对的冲突。此时，要求 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 相互之间对于物理资源的需求在时间和空间上具有特定的分布间隔（否则将发生资源的冲突）。由于V的可扩展性要求使得 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 属性组合具有多样性和随机性，因此，此时S需求的 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 分布的规律性与V的可扩展性需求产生了天然矛盾。综上所述，满足M和S最优能力的情况下，无法同时保证V的最优能力。

引理2：一个单一网络体制，若能够同时达到S与V的最优能力，则M必然不能达到最优。

证明：将网络中存在的业务记为 $Ser =$

$\{Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N\}$ 。如果V达到最优能力，根据可扩展性要求，则此时网络需要适配各种业务属性组合，亦即业务 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 可以采取任意的业务属性组合。此时，要保证S达到最优，则根据可扩展性要求，各种 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 的需求类型组合都应得到服务质量的满足，即 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 所需求的物理资源都能在特定时间段、特定位置得到充分保证。由于 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ 业务属性可以呈现出多样化组合，即表示业务对于物理资源的需求在时间和空间分布上具有组合随机性，此时要保证各种场景下S达到最优，即需要物理资源在时间和空间节点的分布上都能够满足任意业务属性组合需求的上限，以 t 和 l 分别表示时刻和空间位置，此时的资源供给量上限记为 \hat{R}_l^t 。此时，对于特定的业务属性组合 $Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N$ ，必然存在时隙与位置 (t_i, l_j) 的集合 $\{(t_i, l_j)\}$ ，使资源的使用量 R_l^t 小于 \hat{R}_l^t 。此时，必然存在业务 Ser_{N+1} ，使 Ser_{N+1} 的资源需求量在时空范围 $\{(t_i, l_j)\}$ 上不超过 $\hat{R}_l^t - R_l^t$ 。因此， $Ser = \{Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N\}$ 不是网络资源承载的最大业务量，因此M没有达到最优能力。

引理3: 一个单一网络体制，若追求同时达到M与V的最优能力，则必然舍弃对于S最优的追求。

证明: M达到最优能力时，实际业务承载量达到最大，在可扩展性要求下，此时物理资源在动态业务场景需求和现有网络体制技术下达到饱和的使用状态。此时，对于业务的承载表示上述业务 $Ser = \{Ser_1, Ser_2, \dots, Ser_N\}$ 能够在网络中得到传输、不被丢弃。同时，网络的V达到最优能力，表示此时网络支持承载不同类型的业务属性组合，亦即需要适配所有业务属性组合，其中包含业务的突发性等。此时，由于任意业务属性组合所带来的业务突发性是未知的，若存在任意两个并发业务 $Ser_i, Ser_j (i \neq j)$ 需要占用相同位置、相同时隙的相同物理资源，则必然存在某一业务无法在预期位置、预期时隙内得到服务；同时，由于M达到最优状态下要求上述所有业务都得到有效承载，则 Ser_i, Ser_j 两者都不能被丢弃，只能择其一（如 Ser_j ）通过更换路径、缓存等手段改变其实际得到服务的位置和时隙。无法按照预期位置和时隙得到服务的业务（ Ser_j ），其服务质量无法保障，因此S无法实现最优。

综上所述，当在SM、SV或者MV两极组合中追求最优能力时，则无法满足第三极的能力最优。基于上述分析，本文提出以下定理1：

定理1（单一网络体制不可能三角定理）: 现实物理环境和满足全生命周期可扩展性前提下，任何单一网络体制不可能在S、M、V三极能力上同时达到最优。

3. 突破现有发展范式理论困境

3.1. 升维求解空间突破“不可能三角”困境

回顾互联网发展历史可以看到，既有的实用化网络体制总是与已知或可以设想到的服务领域应用特征强关联，不同服务领域既存在个性化也存在共性化的网络体制及相关业务需求。SMV困境证明在全生命周期全维/全局可扩展性前提下，任何单一的网络体制都无法达成为变化而设计的“理想网络”。因此，欲从根本上解决业务多样性（包括服务功能、性能/效能及技术经济性等）与网络基础设施统一性之间的矛盾，首先要突破这一理论困境。

单一网络体制的SMV困境，突出表现为其技术体制在满足全生命周期可扩展性（理论上还应包括网络弹性和服务可信等）前提下，只能静态地映射到SV、SM、MV等两两相交空间，而不可能在SMV空间内构成 $S \cap M \cap V$ 完全交集。已有的任何一种网络体制总是基于定义明确或边界清晰的应用领域、业务类型、承载模式和技术经济性指标等，设计相关网络基线和物理层、逻辑层和接口层协议，包括协议所涉及的数据格式以及网络协议与硬件设备之间的适配方式等。有限的可扩展性考虑也只是局限于想定的应用领域，超越预设场景或面向未来应用的设计至少在以往实现方案中是件“尽力而为”的事情。

从宏观角度上来说，尽管单一网络体制存在“不可能三角SMV”困境，但一个理想网络必须在全生命周期内支撑或承载多样化的应用场景与业务，其设计的第一性原理将是追求全维/全局平滑演进（smooth update）的可扩展性，所以在特定的应用领域和业务场景中，SMV的完全相交并非总是充分必要条件。因此，在限定可扩展性为局部变量或折中SMV之间性能/效能条件下，服务需求的差异化聚类是工程实现的常见做法[如异步转移模式(ATM)]，尽管不同聚类组合对于SMV三个属性也有着不同程度的考量。换言之，特定的业务属性会为SMV某一要素指标赋予特定的边界，在此边界内，统一的软硬件资源与多样化业务之间的适配矛盾也能得到一定程度的缓解。

基于上述分析，我们推断采用不同的网络体制来承载不同的网络业务聚类（即满足控制论必要多样性原理），似乎是突破SMV困境唯一有效的途径（尚需理论层面的证明）。然而，除了专用网络等特殊或定制用网络场景外，就一般性而言，一种网络体制全生命周期内的业务种类和分布总是处于动态变化之中，当前阶段可以满足的业务适配性，下一阶段对新扩展的网络业务未必就能规避刚性网络体制带来的功能/性能失配问题。因此，当可扩展

性为给定网络体制全生命周期全维/全局变量时, SMV 三维空间内是否存在 S、M、V 完全相交的理想网络问题, 也是网络体制设计理论和工程技术必须解决的第一性问题。

数学家波恩哈德·黎曼将时间维度引入了几何学, 从而为后来的相对论等伟大科学理论奠定了数学基础[16]。受此启发, 本文拟以 S、M、V 三要素的空间维度为基础, 导入时间维度 T , 在全生命周期内动态地实现网络体制的 SMV 实例化过程, 即在不同时间段采用多种单一网络体制的组合形态来承载基于应用场景聚类的多样化业务, 从而有可能通过时空增维求解的方式突破三维 (3D) 空间上的 SMV 困境。

理论上, 某一运行阶段或历史时期设计的单一网络体制只能按照 SMV 间的某种折中方案支撑定义清晰的应用场景, 无法在全生命周期内有效承载满足时代要求的可扩展业务。但是, 如果能在 SMV 三维空间内同时实现多个不完全交集网络体制的映射, 则在 SMVT 时空维度上可等效获得 SMV 的完全交集。换言之, 理想网络体制在 SMV 三维空间不可能存在, 只有 SMVT 时空维度上才可能存在满足全生命周期内多样化应用场景与服务的可扩展性要求的理想网络体制。基于这个思路, 为变化而设计的未来网络准则需要给出时空维度扩展定义: 即未来网络不仅在空间维度上要能支持多种单一网络体制的共生共存, 而且在时间维度上 (全生命周期内) 也能支撑任何 SMV 不完全交集网络体制的演进与变革。

定理 2: 在 SMV 三维能力基础上, 添加时间维度 T , 则可以获得 SMV 完全交集。

证明: 首先, 在放松 M 与 V 的约束的条件下, 使网络实现服务质量 S 的最优能力, 即在任一时间段 $T_i \in T$ 内, 网络中存在的实际业务 $Ser^{T_i} = \{Ser_1^{T_i}, Ser_2^{T_i}, \dots, Ser_N^{T_i}\}$ 的服务质量都能够得到完全的满足。同时, 对于 V 最优能力, 要求网络能够适配各种业务属性的组合, 实质上是指在整个长时间周期 $\{T_1, T_2, \dots, T_i\} \in T$ 内, 网络能够适配任意时间段上出现的业务属性组合。但在每个具体时间段 $T_i \in T$ 内, 整体业务属性组合空间将坍塌为具体的业务集合 $Ser^{T_i} = \{Ser_1^{T_i}, Ser_2^{T_i}, \dots, Ser_N^{T_i}\}$, 此时, $Ser_1^{T_i}, Ser_2^{T_i}, \dots, Ser_N^{T_i}$ 将分别带有固定的业务属性, 其集合 Ser^{T_i} 也带有确定的业务属性。在此背景下, 由于每个业务 $Ser_j^{T_i}$ 属性的确定性, 其在空间和时隙上所需消耗的物理资源也随之确定。此时, 将物理资源在空间和时间上需要为业务 $Ser_1^{T_i}, Ser_2^{T_i}, \dots, Ser_N^{T_i}$ 预留的时空资源记为 M_n^t [t 表示 T_i 内的时隙, n 表示物理节点 (空间)], 则基于上述定义, 可以

建立最优化数学模型:

$$\begin{aligned} \min \sum_{t,n} M_n^t \\ \text{s.t. } \forall j, Q_j \leq \hat{Q}_j \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Q_j 表示业务 Ser_j 得到的实际服务质量; \hat{Q}_j 表示 Ser_j 的服务质量保障门限值。上述最优化模型的求解结果对应于当前时段内, 适配于当前实际业务的实际属性组合 (V)、且满足所有业务服务质量要求 (S) 下的最小物理资源开销, 亦即最大的物理资源利用率 (M)。此时, 网络可以在任意时间段 $T_i \in T$ 同时达到 SMV 三极能力的最优, 即实现了 SMV 完全交集。

推论 1 SMVT 时空维度上 SMV 交集的物理实现形态, 要能动态适配不同网络体制。

上述最优化求解方程中解的物理含义表示物理资源与上层业务的适配方法, 不同的适配方法在宏观上的聚类对应于不同的网络体制。随着 T_i 的改变, 由于 V 最优能力的可扩展性要求, 不同时间段内 $Ser_1^{T_i}, Ser_2^{T_i}, \dots, Ser_N^{T_i}$ 的属性将出现各种组合, 相应地, 最优化资源适配公式 (1) 也将有不同的求解分布, 对应于不同的物理资源与上层业务的适配方法, 亦即不同的网络体制。因此, 要在 SMVT 时空维度内实现 SMV 完全交集, 需要实际承载业务的网络架构具有全生命周期动态适配能力。

事实上, 不同的承载业务由于需求特性不同, 对于网络体制内生性的适配要求也不尽相同。若统一的物理资源向差异化的上层业务性能指标采用静态、固定的方式映射, 将不可避免地牺牲业务的服务性能或造成物理资源浪费。通过将已有的网络体制做元素化的功能解构, 加之在资源维度上的灵活切分或聚合, 使网络资源能以“元素与化合键”组合方式生成多样性的“化合物”网络体制, 在化合物形态的应用网络模态之上实现承载业务的最佳适配, 从而最大化地提升业务需求与网络资源效能的拟合度, 如图 3 所示。

增维求解的核心内涵包含两个方面: 网络资源的“元素化” (即分解为最小级别或元素) 与资源聚合的“动态化” (即灵活和动态分配)。

网络资源的元素化是多样性实现的基础条件。元素化保证了在统一的网络物理资源基础上, 能够通过资源组合重构的方式实现或生成多种多样的应用网络。正如地球环境内物理世界的统一性与物质世界的多样性矛盾, 是通过 97 种自然存在的化学元素及化合键排列组合方式达成对立统一关系的, 无论是有机物质还是无机物质、生命体还是非生命体都遵循统一的物质不灭定律和周而复始的演化

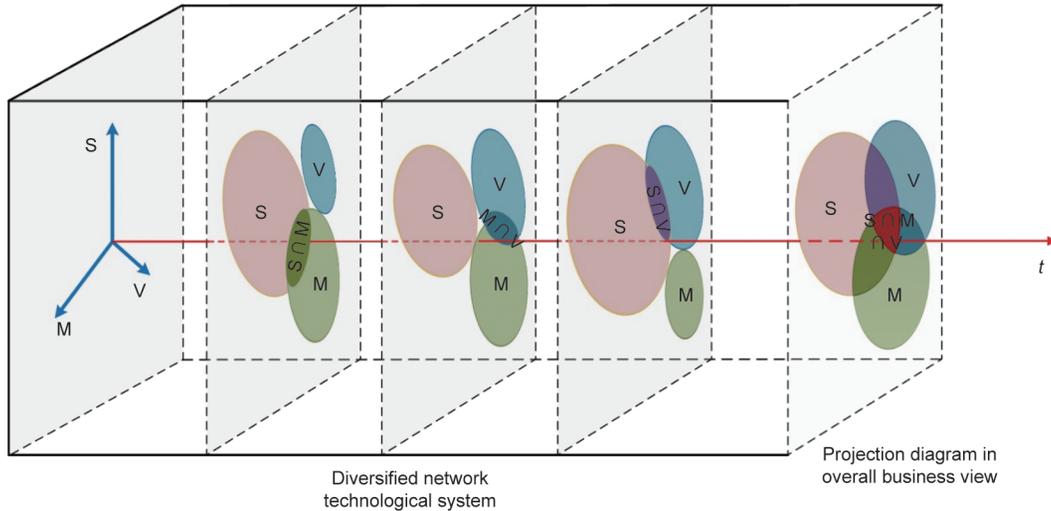


图3. 四维时空上SMV完全交集的图形化表达。

或突变规律。这说明宏观世界、介观世界或者微观世界的可持续发展都离不开多元化或多样性特征的支撑，甚至有人将其称之为“宇宙发展的第一性原理”。元素化的网络资源能够在给定硬件的基础上，按照业务功能/性能需求构建出多样化的应用网络模态，在同一技术物理环境中可支撑多种应用网络模态的共生共存，从而能在全生命周期内始终满足理想网络的要求。

资源聚合的动态化是基于网络元素化实现多样化应用网络模态。动态化的资源编排或加卸载能力保证了多样化应用网络模态能够主动适配承载业务的资源需求变化。换言之，在有限的业务种类下，动态化能够随着不同业务量的动态变化灵活赋予不同网络模态的软硬件资源。在网络演进或变革趋势下，动态化能够保证统一的网络环境可灵活地支持应用网络模态的生成，以及适时回收/卸载不再活跃的网络模态的软硬件资源。

本文将这种通过网络资源元素化和资源聚合动态化方式生成或创建多元/多样应用网络模态的技术物理环境，称之为PNE。不难发现，PNE并不关注某种具体应用网络模态的报文格式、路由寻址技术、协议规范及运维管理问题，其实践规范主要是围绕如何用一体化技术和物理环境来生成或创建多元/多样化网络模态的工程化问题展开，即需要开发“网络之网络”的生成式技术，用一个类似云平台那样的网络基础设施为上层应用网络模态（如IPv4/IPv6、标识网络、命名数据网NDN、地球空间剖分网络等），提供池化的计算、存储、传送、交换、路由、接入等可商业化流通的软硬件与连接对象资源。基于此，多模态网络环境实现了软硬件基础设施与具体应用网络模态（包括业务）的分离，可在同一基础设施环境上支持多种应用网络模态的创建部署及共生共存。因此，有时PNE

也可称之为“底座网络（BON）”或“网络之网络（NON）”。

3.2. 多模态网络环境系统形态

控制论著名学者威廉姆·罗斯·艾什比在《控制论导论》中指出，“只有多样性才能摧毁多样性”，即随着系统的复杂度不断提高，控制系统只有通过增强自身多样性才能驾驭控制目标的多样性。网络技术发展至今所面临的多元化网络需求与统一基础设施之间的矛盾，使得一味增强单一网络体制复杂性方式来满足全生命周期可扩展性的技术路线已触碰“天花板问题”，越来越难以适应复杂多样的垂直行业应用。将网络发展范式从传统的单一网络架构转化为多维多元共生融合的网络环境，以期通过注入多样性来维系网络环境内生性增长需求。为此，PNE范式要达成的工程技术目标是构建一个能够支撑各类应用网络模态及相关业务快速创建、即插即用、独立运营的开放、透明、统一、弹性、智能、安全隔离的网络基础设施，以及一个可持续健康发展的技术与产业生态环境，其系统形态如图4所示。

与传统的网络发展范式研究坐标不同，PNE范式将研究坐标锁定在如何尽可能地为多种应用网络模态及承载业务提供统一的按需共享、灵活组合、安全隔离、与用户端可协同的网络基础资源环境的构建上，多模态网络环境应该能够支持各种应用网络模态以类似应用插件程序的形式进行快速部署或撤收，可有效地解决新兴网络理论技术及应用业务研究缺乏真实试验环境的难题，使得网络运营企业能够在不影响其商业化服务的条件下也能为创新网络技术提供规模化、真实的试验环境，降低新型应用网络模态及服务进入市场的门槛，以网络“平滑升级换代”的新模

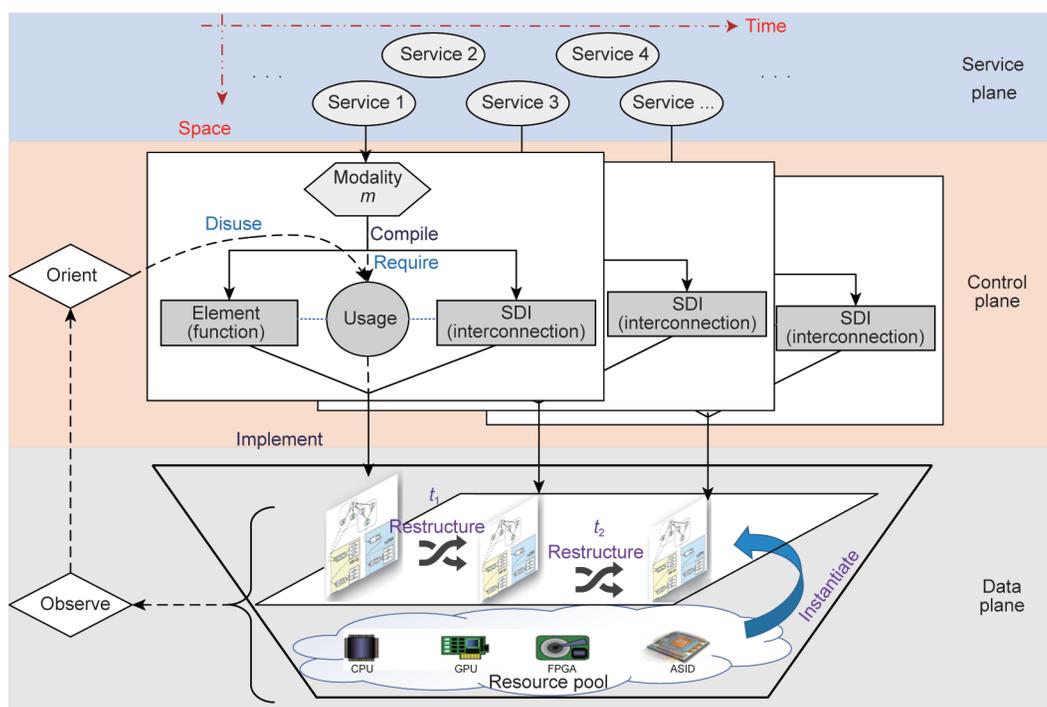


图4. 多模态网络发展范式的系统形态。SDI: 软件定义的互连; CPU: 中央处理器; GPU: 图形处理单元; FPGA: 现场可编程门阵列; ASIC: 专用集成电路。

式取代“one by one”的陈旧换代模式，打造存量资产利用、网络技术创新、产业发展与市场应用“四位一体”的和谐发展格局，营造网络模态、业务应用以及网络基础设施一体化增量发展的全新生态环境。

3.3. 全维可定义的网络基线技术

当前互联网采用“补丁摺补丁”的演进模式以适应承载业务发展的需求，这种堆砌和推高复杂度的方法必然导致协议臃肿、顾此失彼、复杂性失控，乃至无法适应网络弹性和韧性的新发展要求。而且这种工程技术努力显然违反控制论的第一性原理[14]，注定是不可持续的。考虑到“万物基于IP”模式，尽管在toC条件下，多媒体服务领域看似获得了一定程度上的技术成功，但在科学理论层面仍然无法跳出伪命题的桎梏。网络资源的元素化和软件定义互连（SDI）等编排方式实现了具体网络体制与底层物理支撑环境的分离，从而可在同一技术物理环境上实现面向不同应用场景的多种网络体制，可从根本上化解统一基础设施与可扩展业务功能性能之间的矛盾（倘若能证明“结构决定多样性”的推论在理论上成立，则PNE就属于这种“结构”的工程技术表达）。网络资源的元素化是将信息通信网络各层的功能进行重新抽象，并分解为更细粒度或合适粒度的网络基本元素，称之为网络基线技术。网络基线作为网络功能的基本单位，类似于具有功能分子结构中的元素，可组合成更为高级形态的多样化网络模态，

从而能用元素化、模块化的结构取代传统网络的分层结构，达成网络体制灵活创建或重塑的目的。PNE将网络基线与应用网络模态分离，提取网络体制的“公因子”元素并引入计算处理、数据存储、智能服务等功能元素构成网络基线元素池，将现有的或未来的多样化应用网络体制，以可扩展的网络基线元素和软件定义互连与编排的组合（化合物）方式构成各种期望的应用网络模态。

多模态网络环境的适应性在微观上体现在网络基线元素是可以动态定义、添加和删除的。网络基线元素并不是一成不变的，根据技术发展阶段性和工程实践认知，可对网络基线元素做不同粒度的切分与组合。在具体的工程实现上，网络基线元素大致可分为两类：基本元素和扩展元素，基本元素可视作构成网络基本功能的软硬件组件，一般包括协议体系（包括物理/链路/网络等层次）、交换模式（电路/分组）、通信机制（点到点、点到多点、广播）和信令体制（共路/随路）等网络基线功能；扩展元素可由各种软件定义，支持用户根据不同用网场景及应用网络模态功能、性能需求灵活自定义，扩展元素除了包括网络基本元素（协议体系、交换模式、通信机制、信令机制等）的组合及变体，还包括计算/存储/转发机制、调度策略、服务质量及安全保障机制、运维管理等网络的方方面面。不难看出，基本元素更具有通用性、标准化属性，扩展元素具有个性化、针对性属性，基本元素和扩展元素并

不是严格划分的，随着某些扩展元素的普遍应用或成为共识，可由标准化组织予以规范并认定为基本元素。参照物理世界，网络基线元素化作为网络世界的统一性表达，网络基线及资源的动态聚合则是网络世界的多样化实现方式，而网络全维可定义技术则充当类似“化学键”的作用，是实现网络基线及资源动态聚合的工程技术手段。

网络全维可定义技术是指基于面向领域的软硬件协同编排（DSA）、软件定义硬件（SDH）等方法及手段，对包括协议体系、交换模式和控制机制在内的基线元素和扩展元素，进行计算、存储、交换与互连等技术物理资源的可定义配置。通过全维可定义技术和一组标准化的网络基线元素及软硬件接口，PNE可构建基于软件可定义的统一网络基础设施，来支撑全生命周期内可定义、有服务承诺的多样化应用网络模态及业务。可以预测，随着多模态网元设备的大规模部署，为了促进多样化应用网络模态的快速构建，网络基线元素和全维可定义技术实现方式将作为多模态网络环境及多模态网元设备的标准，成为在大规模覆盖网络（分区分域）中生成、创建多样化应用网络模态的实践规范。因此，如何将“化合物”级别的不同技术网络体制的功能分解为“元素”级别的网络基本元素，并能设计出合适的软硬件协同编排方式，进行类似化合键或分子级别的更高级组合，是多模态网络环境必须首先克服的工程技术难题。

全维可定义网络基线技术的研究路线就是将软件定义的思想应用到网络软硬件资源配置的各个层面，充分发掘网络基线元素，不断丰富网络基线技术元素池，并以软件定义互连和面向领域的软硬件协同编排方式（或标准接口）提供给应用网络模态开发者或运营者。这打破了传统互联网固化的网络设备和僵化的分层架构，开创了基于网络元素以及网络基线技术灵活组合来定制期望的应用网络模态与业务的新时代。

4. 多模态网络环境的充要性

4.1. 网络建模与数学描述

多模态网络环境提取各种应用网络的基本元素构成网络基线技术元素池，基于软件可定义互联方法以领域专用软硬件协同的方式构成动态可塑的网络环境基础架构，从而保证能够按需运行多样化的网络模态实例。记网络基线技术类别数为 K ，则网络基线技术库 Θ 可表示为 $\Theta = \{\Theta^1, \Theta^2, \dots, \Theta^K\}$ 。以 Ψ 表示网络模态， \otimes 表示不同基线技术之间的组合，则网络模态 Ψ_j 所使用的具体技术体制可表示为 $[\Psi_j] = \Theta_j^1 \otimes \Theta_j^2 \otimes \dots \otimes \Theta_j^K$ 。

未来网络技术将能够提供泛在信息服务，其所使用的物理资源将涉及广义信息技术中的各种资源类型。对此，不失一般性地，将网络中所涉及的物理资源分别表示为：计算资源 Φ ，存储资源 Ω ，带宽资源 Γ ，对应的每种资源总量记为 $\mathfrak{R}(\Phi)$ ， $\mathfrak{R}(\Omega)$ ， $\mathfrak{R}(\Gamma)$ 。

将网络中的 N 种服务表示为 $S_i \in S$ ($i=1, 2, \dots, N$)，服务的信息量记为 $P(S_i)$ 。假设网络中共存在 M 种模态，网络模态 j 平均承载每比特服务 S_i 消耗的物理资源分别记为 $\Psi_j^{S_i}(\Phi)$ 、 $\Psi_j^{S_i}(\Omega)$ 、 $\Psi_j^{S_i}(\Gamma)$ 。由于网络模态可看作物理资源向业务指标的映射方式，因此模态 j 承载服务 S_i 所消耗的物理资源由其基线技术组合方式决定，可分别记为 $F_i^\Phi([\Psi_j])$ 、 $F_i^\Omega([\Psi_j])$ 、 $F_i^\Gamma([\Psi_j])$ 。因此有：

$$\begin{cases} P(S_i)\Psi_j^{S_i}(\Omega) = F_i^\Omega([\Psi_j]) \\ P(S_i)\Psi_j^{S_i}(\Phi) = F_i^\Phi([\Psi_j]) \\ P(S_i)\Psi_j^{S_i}(\Gamma) = F_i^\Gamma([\Psi_j]) \end{cases} \quad (2)$$

4.2. 基于解空间关系的推理

引理4: 在多模态网络环境的稳定运行状态下，对于任意服务类型 $\forall S_i \in S$ ，不存在两种网络模态 Ψ_m 、 Ψ_n ($m \neq n$) 满足 $\forall X \in \{\Phi, \Omega, \Gamma\}$ ， $\Psi_m^{S_i}(X) \geq \Psi_n^{S_i}(X)$ 。

证明: 对于任意服务 $\forall S_i \in S$ ，若存在两种网络模态 Ψ_m 、 Ψ_n ($m \neq n$) 满足 $\forall X \in \{\Phi, \Omega, \Gamma\}$ ， $\Psi_m^{S_i}(X) \geq \Psi_n^{S_i}(X)$ ，则当：

(1) $\forall X \in \{\Phi, \Omega, \Gamma\}$ ， $\Psi_m^{S_i}(X) = \Psi_n^{S_i}(X)$ 时，模态 Ψ_m 与 Ψ_n 之间存在完全等效关系，考虑模态的开发和维护成本，模态 Ψ_m 与 Ψ_n 将仅有一个实际存在；

(2) $\forall X \in \{\Phi, \Omega, \Gamma\}$ ， $\Psi_m^{S_i}(X) \geq \Psi_n^{S_i}(X)$ 且模态 Ψ_m 与 Ψ_n 之间不为完全等效关系时，由于模态 Ψ_n 的资源利用率要优于模态 Ψ_m ，模态 Ψ_m 将被淘汰，网络仅存在模态 Ψ_n 。

以0-1的变量 $\delta_{j,i}$ 来表示模态 Ψ_j 和服务类型 S_i 的关系，当 $\delta_{j,i}=1$ 时，表示采用模态 Ψ_j 承载服务类型 S_i ；将服务类型 S_i 的优先级权重记为 w_i 。 $\sum_{j=1}^M \delta_{j,i} = 1$ 表示服务类型 S_i 在当前资源约束下得到有效承载（即其服务指标得到满足）。基于上述定义，采用单一模态 Ψ_j 承载网络全部服务 S 时，满足物理资源约束的网络最佳服务质量模型可以表示为：

$$\max \sum_{i=1}^N \delta_{j,i} w_i \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} \delta_{j,1}\Psi_j^{S_1}(\Omega) & \delta_{j,2}\Psi_j^{S_2}(\Omega) & \dots & \delta_{j,N}\Psi_j^{S_N}(\Omega) \\ \delta_{j,1}\Psi_j^{S_1}(\Phi) & \delta_{j,2}\Psi_j^{S_2}(\Phi) & \dots & \delta_{j,N}\Psi_j^{S_N}(\Phi) \\ \delta_{j,1}\Psi_j^{S_1}(\Gamma) & \delta_{j,2}\Psi_j^{S_2}(\Gamma) & \dots & \delta_{j,N}\Psi_j^{S_N}(\Gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(S_1) \\ P(S_2) \\ \dots \\ P(S_N) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \mathfrak{R}(\Omega) \\ \mathfrak{R}(\Phi) \\ \dots \\ \mathfrak{R}(\Gamma) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\forall S_i \in S, \sum_{j=1}^M \delta_{j,i} \leq 1 \quad (5)$$

而采用多种网络模态提供网络全部服务 S 时, 满足物理资源约束的网络最佳服务质量模型可以表示为:

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta_{j,i} w_i \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^M \delta_{j,1} \Psi_j^{S_1}(\Omega) & \sum_{j=1}^M \delta_{j,2} \Psi_j^{S_2}(\Omega) & \dots & \sum_{j=1}^M \delta_{j,N} \Psi_j^{S_N}(\Omega) \\ \sum_{j=1}^M \delta_{j,1} \Psi_j^{S_1}(\Phi) & \sum_{j=1}^M \delta_{j,2} \Psi_j^{S_2}(\Phi) & \dots & \sum_{j=1}^M \delta_{j,N} \Psi_j^{S_N}(\Phi) \\ \sum_{j=1}^M \delta_{j,1} \Psi_j^{S_1}(\Gamma) & \sum_{j=1}^M \delta_{j,2} \Psi_j^{S_2}(\Gamma) & \dots & \sum_{j=1}^M \delta_{j,N} \Psi_j^{S_N}(\Gamma) \end{cases} \begin{bmatrix} P(S_1) \\ P(S_2) \\ \dots \\ P(S_N) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \mathfrak{R}(\Omega) \\ \mathfrak{R}(\Phi) \\ \mathfrak{R}(\Gamma) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\forall S_i \in S, \sum_{j=1}^M \delta_{j,i} \leq 1 \quad (8)$$

由上述模型 (4) 和 (7) 可以看出, 在相同的物理资源约束条件下, 采用单一模态实现服务承载和提供的解空间为:

$$\delta = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \delta_{j,1} & \dots & \delta_{j,N} \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

采用 M 种模态实现服务承载和提供的解空间为:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{l,1} & \dots & \delta_{l,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \delta_{m,1} & \dots & \delta_{m,N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

显然, 单一模态的解空间属于多模态网络环境解空间的子集。进一步地, 上述优化方程可以分为以下三类情况:

(1) 单一模态和多模态都能够满足所有业务服务质量 (QoS) 需求时, $\max \sum_{i=1}^N \delta_{j,i} w_i = \max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta_{j,i} w_i$, 此时, 多模态网络环境的资源消耗将小于或等于单一网络模态。推理过程如下: 当多模态网络环境选择与单模态网络相同模态 (记此模态为 Ψ_j) 承载全部网络业务时, 二者资源消耗相同。在此基础上, 当 $\exists S_i \in S$, 有 $\exists X \in \{\Phi, \Omega, \Gamma\}$, $\Psi_j^{S_i}(X) > \Psi_n^{S_i}(X)$ 且 $\forall X \neq X, \Psi_j^{S_i}(X) \geq \Psi_n^{S_i}(X)$ 时, 则多模态网络环境将选择模态 Ψ_n 承载业务 S_i 、选择模态 Ψ_j 承载其他业务, 此时多模态网络环境消耗资源小于单一网络模态。

(2) 随着业务量的增长, 单一模态网络将在一类或更多的资源达到资源边界, 此时多模态网络环境将潜在地提升网络整体地业务服务质量。假设单一网络模态在资源 X^* 上达到资源限制条件 $\mathfrak{R}(X^*)$ 。此时, 若任何一种消耗资源 X^* 的业务 S_i 出现了增量业务, 则此时单一网络模态将无法全部业务的服务质量需求, 即单一网络模态的目标函数 $\max \sum_{i=1}^N \delta_{j,i} w_i$ 中存在至少一个 i 使 $\delta_{j,i} = 0$ 。不同网

络模态对于同一业务的资源消耗不同。以 IP 网络模态 Ψ_{IP} 与内容分发网络 (CDN) 模态 Ψ_{CDN} 对文件传输业务的资源消耗为例: 由于 Ψ_{CDN} 采用了分布式缓存策略减少了重复传输, 有 $\Psi_{IP}(\Phi) > \Psi_{CDN}(\Phi)$ 、 $\Psi_{IP}(\Omega) < \Psi_{CDN}(\Omega)$ 。若采用单一 Ψ_{IP} 模态承载全部网络业务时传输资源 Φ 的消耗达到了临界值, 此时多模态网络环境可以采用 Ψ_{CDN} 承载部分文件传输业务, 以存储资源 Ω 消耗替换传输资源 Φ 消耗, 此时多模态网络环境的业务服务总体质量大于单一网络模态, 即 $\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta_{j,i} w_i \geq \max \sum_{i=1}^N \delta_{j,i} w_i$ 。

(3) 在整体资源紧张, 多模态、单模态都无法满足全部业务地服务质量需求时, 多模态网络环境的整体业务量将大于等于单一网络模态。多模态网络环境选择与单模态网络相同模态 (记此模态为 Ψ_j) 承载全部网络业务时, 二者资源消耗相同、整体业务的服务质量相同。类似于情况 (2), 假设此时能够满足服务质量的最优业务子集为 $S' \in S$, 则 S' 所消耗的网络资源中, 假设资源 X^* 上达到资源限制条件 $\mathfrak{R}(X^*)$ 。类似情景 (2), 在特定业务 S_i 上, 多模态网络环境通过 Ψ_m 承载原本由 Ψ_j 承载的业务 S_i , 此时 Ψ_m 采用 $X \neq X^*$ 资源替换 X^* , 使资源 X^* 使用量降到门限以下, 此时物理资源达到非饱和状态, 因此可以有效承载更多业务量, 此时多模态网络环境的整体业务服务质量大于单一网络模态。

综上所述, 可以得出: ①在有限物理资源约束下的业务场景中, 若单一模态能够有效提供服务 (即存在可行解 δ), 则多模态网络环境必然存在可行解、且此时多模态网络环境最优解的资源利用效率大于等于单一模态的最优解, 因此, 多模态网络环境是资源充足场景下网络能够有效提供服务的**充分条件**; ②有限物理资源场景下, 对于特定业务场景, 若理论上存在可行解, 则多模态网络环境通过调整模态数量和模态种类, 则必然能够得到有效解, 而单一网络模态可行解空间能够适配的业务场景则大大减少, 即多模态网络环境在资源有限场景下将提供优于单一网络模态的业务服务质量, 是网络有效承载全部业务方案的**必要条件**。

5. 实验

多模态网络环境在其全生命周期的不同技术阶段可能会接纳多种新型的技术物理实现。本节将基于当下网络生态、工程技术、应用需求等因素, 探索多模态网络环境的工程实践。

5.1. 实验环境

基于我国十三五重点研发计划项目“多模态智慧网络核心技术原理平台”的研发成果，搭建由1个核心域和6个接入域组成的多模态网络环境，如图5所示。其中，核心域由4个I型多模态网元和域间控制器组成，网元间的链路带宽为100 Gbps；接入域由II型多模态网元、域内控制器、各类固定/移动终端等构成。更具体地说，I型和II型多模态网元是两种不同类型的路由设备，旨在支撑多态网络。与核心域的链路带宽为10 Gbps，域内各有线节点间的链路带宽为1000 Mbps或100 Mbps。在无拥塞情况下，单个网元的转发延迟低于0.1 ms，丢包率小于0.01%。I类网元的最大交换容量为12 Tbps，II类网元的最大交换容量为6 Tbps。上述两类网元均基于存储-计算-转发一体化的全维可编程的网络基线技术实现，能够自定义生成多种网络模态，支持多种网络模态的共存与独立运行，并通过带宽资源弹性隔离保障其各自的预设性能。控制器不仅能够根据网络拓扑和路由协议计算下发各网络模态的转发表，而且也能编译基于P4+编程语言设计的目标网络代码，实现相应网络模态在网元设备上的动态加载/卸载、全生命周期版本升级。

该实验分三部分递进式验证上述技术的可行性和理论的先进性：①验证PNE承载多种网络模态的透明性，确保每个网络模态的功能完整；②测量PNE上多种网络模态对多样化业务的适配性能；③测试网络模态之间的隔离性，即在发生资源冲突时，需要保障每个网络模态的预设带宽/性能。

5.2. 测试分析

5.2.1. 多样化网络模态的共存

该实验验证PNE能够支持多种应用网络体制的生成、共网承载和运行。图5所示PNE的网元中同时部署了IPv4、IPv6、地理标识[17]、MobilityFirst、PowerLink[18]和NDN这6种定义明确、边界清晰的应用网络模态，接入网中部署了相应的应用业务、行业设备（特殊终端）和测试仪等。在网络不出现拥塞的情况下，模拟每种网络模态的适用场景，并测试评估每种网络模态的基础服务能力，这里只讨论非IP模态的适用场景和测试结果：

(1) 地理标识：GeoNetworking架构是由欧洲电信标准协会（ETSI）制定的，基于节点的地理位置信息（而

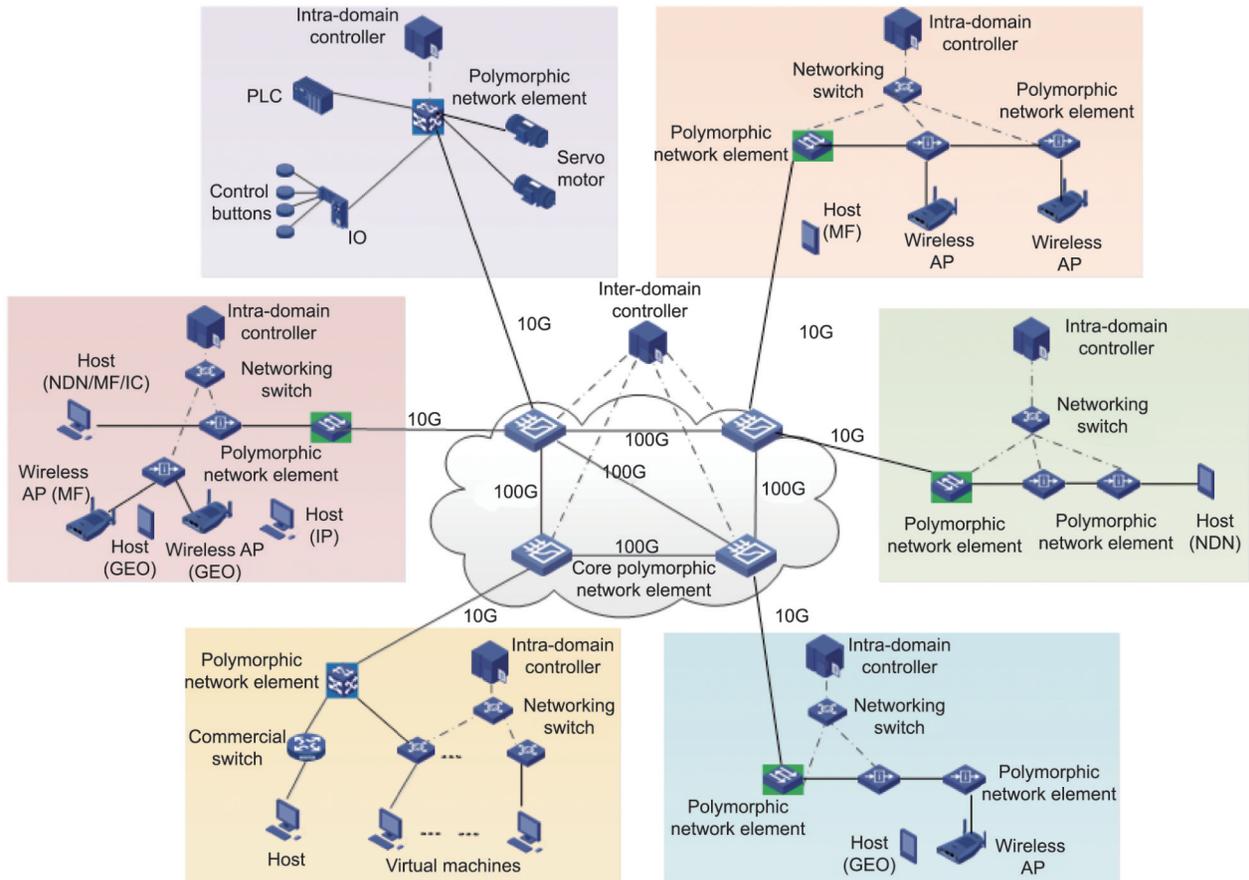


图5. PNE的基础平台。PLC：可编程逻辑控制器；IO：输入/输出；AP：接入点；GEO：地理网络。

非IP地址)进行路由,支持以地理位置寻址的点对点、点对多点、点到区域内任一点、点到区域等传输方式,适用于车联网、智慧交通、环境监控等通信业务场景。PNE支持基于地理标识信息直接进行报文的寻址路由,可在指定的地理区域内进行报文的精准推送和信息获取,相较于IP模式,在固定地理区域内消息广播的场景下(如车联网通信),具有更好的效率;

(2) NDN: 架构以内容为中心,其数据传输方式不关心内容数据存储的位置,而是对所有内容数据命名并通过命名匹配进行信息检索,以此建立一个分布式通信网络,适用于内容分发、热点内容推送等业务场景。PNE支持基于内容标识直接进行报文的寻址路由,支持内容文件的网络检索、消息传递、网络文件传输等功能,支持根据用户兴趣请求,将内容文件通过自定义报文推送到用户所在边缘网络,相较于IP模式,NDN能够减少用户的请求时延。

(3) MobilityFirst: 以移动为中心的网络MobilityFirst架构,为每个网络中的设备(及内容)分配了一个固定不变、全局唯一的身份标识(GUID),同时这些设备在网络中时会根据其所在位置被映射到相应的网络地址(NA),可实现设备标识与网络地址的分离,能够在设备移动过程中确定其位置。PNE支持基于身份标识直接进行报文的寻址路由,提供移动终端动态接入,支持移动终端动态接入下的消息传递、文件续传等,相较于IP模式,在终端移动切换接入网络的前后能保持端到端数据传输的连接状态,可以实现零丢包率。

(4) PowerLink: PowerLink架构基于工控设备标识符(ID)进行报文寻址转发,采用等时同步、轮询序列等技术解决工控数据的实时性传输问题,适用于工厂内伺服电机控制和工厂外远端控制等应用。PNE支持基于工控设备ID直接进行报文寻址转发,相较于IP模式,PowerLink模式具有更低的时延和确定性的抖动,满足工控设备高实时、精准操控的通信需求。

上述实验表明PNE不仅能支持各种应用网络体制(即网络模式)的生成、共网承载和运行,而且能保障每种网络模式的基础服务性能,允许网络业务选择不同的网络模式以适配其通信模式与服务质量需求。

5.2.2. 多样化业务的分类承载

该实验验证PNE的必要多样性原理,即多样化的网络业务需要多样化的网络模式,以使得相同物理资源的情况下,PNE能够提供整体更优的服务质量。以视频通话(点对点)、视频会议(点对多点)两类网络业务为例,选择适用于内容传输的IP、NDN两种网络模式来分别承载

这两类业务。两类业务的客户端分别部署在图5中PNE各个接入域的主机上,而视频会议的服务器端仅有一个,固定部署在服务器 C_0 上。实验分三类情况对比测试:①IP网络同时承载上述两类业务;②NDN网络同时承载上述两类业务;③PNE分类承载,IP网络模式承载视频通话,NDN网络模式承载视频会议。上述三类实验中,客户端注入的请求流量是相同的,设定视频会议业务客户端请求流量是链路 L_0 带宽的1.2倍。因此,在IP网络承载视频会议业务时,由于该业务的点对多点通信模式,往往会在链路 L_0 上产生链路拥塞。

从图6中可以看出,单一IP网络承载视频通话业务时具有较低的服务请求时延,而承载视频会议业务时由于链路 L_0 流量拥塞导致服务请求急剧增加。单一NDN网络承载视频会议业务时由于内容寻址和网内缓存避免了关键路径的流量拥塞,使其相比于IP网络下的视频会议具有较低的服务请求时延。然而,相对于IP网络承载视频通话业务,NDN承载视频通话业务的服务请求时延是更高的,这是由于视频通话无法利用NDN的缓存优势,且NDN的路由交换过程是复杂且耗时的。这也从侧面证明了单一网络体制难以在所有业务上均取得最佳性能。相较于单一IP网络或NDN网络承载,PNE的分类承载使得两类业务的服务请求时延均取得最优,这是因为PNE根据必要多样性原理,在统一的网络基础环境上可灵活生成多样化的网络模式来分别承载多样化的网络业务,保证了用户业务、网络模式、物理资源三者之间的优化适配,提供了更优的服务质量。

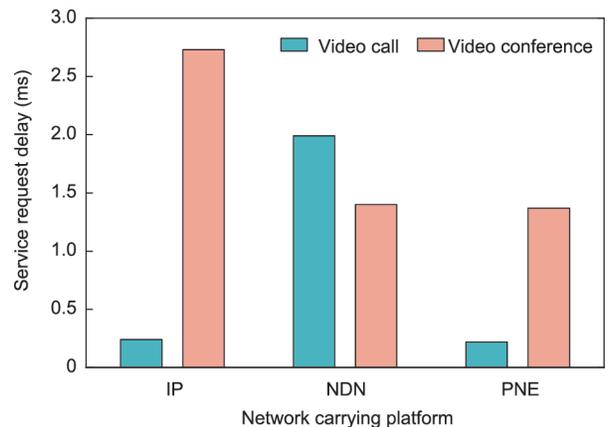


图6. 多样化业务的分类承载。

5.2.3. 网络模式之间的隔离性

多个网络模式同时运行存在带宽、队列、交叉开关等资源的竞争。因此,模式间的隔离性是PNE的重要评价指标,关系到各个网络模式独立运行时能否获得期望的服务质量承诺问题。当在PNE中部署一个网络模式时,它

将被分配一定数额的带宽资源，若其实际业务流量在不超过预分配带宽时始终能得到保障且不受其他模态影响，则这个网络模态会获得近似于独占网络资源的隔离效果。实验中，测试仪连接 S_0 、 S_1 、 S_2 上的10G端口，从 S_1 、 S_2 向 S_0 发送上述6种网络模态的混合模拟流量。调整不同网络模态的注入流量，使其在链路 L_1 上产生带宽冲突，测试仪从 S_0 的端口处统计分析IPv4模态报文的时延和丢包率。这里，将IPv4模态的注入流量记为“IPv4 Traffic”，设定其预留带宽为4 Gbps，而其余网络模态的注入流量总和记为“Other Traffic”，与IPv4流量共享了链路 L_1 上的10 Gbps物理链路带宽。

IPv4的丢包率和平均时延能够反映其是否受到其他共存网络模态的干扰，实验数据如图7所示：

(1) IPv4的流量在小于4 Gbps时，其丢包率趋于0、平均时延接近0.25 ms，即使其余网络模态的流量超过了6 Gbps。这说明PNE能够确保网络模态间的隔离性，使其获得等效于独占预留网络资源的运行效果；

(2) IPv4的流量在大于4 Gbps时，若PNE中的总流量不超过10 Gbps，其丢包率也趋于零，平均时延接近0.25 ms。这说明PNE并不局限于预留带宽的设定，在有剩余物理带宽的情况下可以超额提供给某一网络模态使用，可以实现统一基础设施条件下的资源弹性共享；

(3) 在IPv4的流量大于4 Gbps且PNE中的总流量超过10 Gbps时，IPv4的丢包率明显变大，且平均时延接近2.7 ms。由此可知，PNE具有模态隔离和资源弹性共享的双重属性。换言之，PNE既能创建一个独立运行的应用网络模态，又能提供其超越物理专网的资源上限。

6. 总结与展望

本文回顾了现行的网络发展范式，首次揭示出在满足

全生命周期全维/全局可扩展性前提下，网络业务及应用场景多样性与单一的、刚性构造的网络体制之间存在SMV困境问题，创建的“不可能三角”通用解构模型可以回答“为什么既有的实用化网络体制无法突破SMV困境”的问题，进而指出，凡是不满足控制论必要多样性原理的工程技术路线都不可能实现理想网络的目标。受物理世界统一性与物质世界多样性的启迪，将既有的单一网络体制基线和计算、存储、互连等软硬件资源做元素化的功能解构，通过软件定义互连的“化合键”作用构成更高级形态的功能模块，再基于领域专用软硬件协同编排方法形成多样化的应用网络模态，既能承载应用场景清楚、定义明确的预期服务，也可支撑未来应用场景清晰的扩展型业务。首次基于SMVT时空维度提出的应用网络体制与支撑环境分离或解耦的多模态网络发展范式，可突破当前互联网业务与网络分离发展模式存在的SMV困境，能用统一的网络基础设施环境支撑多种应用网络模态及业务的共生共存、演进与变革兼容并蓄的技术发展模式。

其次，本文阐述了多模态网络环境的核心思想和理论框架，建立了PNE数学模型，论证了发展多模态网络环境技术体制的必要性，详细介绍了PNE原理验证环境的实验情况及结果分析。初步测试表明，原型网络环境目前可同时支持6种以上应用场景清晰、定义明确的应用网络模态与业务的部署，理论预期和实验结果高度吻合，证明PNE具有工程实践层面的技术经济性。下一步，我们将从理论层面证明“结构决定多样性”推论的正确性，给出相关工程技术的边界条件，研究多种应用网络体制的元素化提取方法、软硬件资源的弹性调度、可信服务与安全保障等关键技术，以及开发生成式应用网络模态元素库和编译环境、网络部署、性能评估、运维支撑等工具包或工具链。

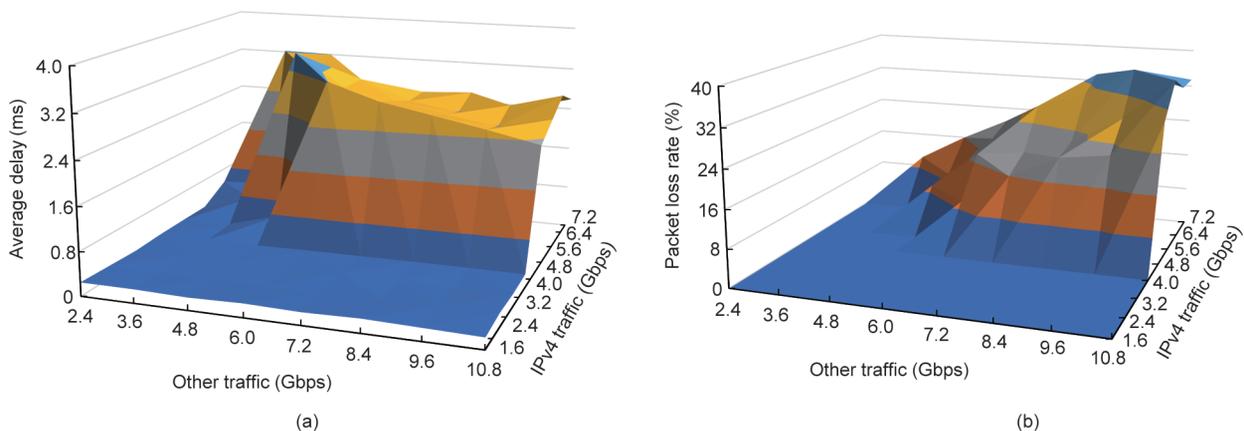


图7. 网络模态的隔离性。(a) 平均时延；(b) 网络丢包率。

致谢

本研究得到国家重点研发计划(2022YFB2901403)和嵩山实验室项目(221100210900-02)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Jiangxing Wu, Junfei Li, Penghao Sun, Yuxiang Hu, and Ziyong Li declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Wu J. On the revolution of the information network development paradigm. *Sci China Inf Sci* 2022;65(11):213301.
- [2] Dai M. Research on networking technology of digital terrestrial television single frequency network. In: *Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*; 2020 Jun 15–19; Limassol, Cyprus; 2020.
- [3] Acampora AS, Naghshineh M. An architecture and methodology for mobile-executed handoff in cellular ATM networks. *IEEE J Sel Areas Comm* 1994; 12(8):1365–75.
- [4] Yuksel H, Altunay Ö. Host-to-host TCP/IP connection over serial ports using visible light communication. *Phys Commun* 2020;43:101222.
- [5] Wu J. Thoughts on the development of novel network technology. *Sci China Inf Sci* 2018;61(10):101301.
- [6] Naik P, Shaw DK, Vutukuru M. NFVPerf: online performance monitoring and bottleneck detection for NFV. In: *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*. 2016 Nov 7–10; AltoPalo, CA, USA; 2016.
- [7] Fei X, Liu F, Zhang Q, Jin H, Hu H. Paving the way for NFV acceleration: a taxonomy, survey and future directions. *ACM Comput Surv* 2020;53(4):73.
- [8] Zhang H, Quan W, Chao H, Qiao C. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet. *IEEE Netw* 2016;30(3):46–51.
- [9] Zhang L, Afanasyev A, Burke J, Jacobson V, Claffy K, Crowley P, et al. Named data networking. *Comput Commun Rev* 2014;44(3):66–73.
- [10] Raychaudhuri D, Nagaraja K, Venkataramani A. MobilityFirst: a robust and trustworthy mobility-centric architecture for the future internet. *Mob Comput Commun Rev* 2012;16(3):2–13.
- [11] Farkas J, Bello LL, Gunther C. Time-sensitive networking standards. *IEEE Commun Stand Mag* 2018;2(2):20–1.
- [12] Zhang H, Su W, Quan W. Smart collaborative identifier network: a promising design for future Internet. Berlin: Springer; 2016.
- [13] Li R, Makhijani K, Dong L. New IP: a data packet framework to evolve the Internet. In: *Proceedings of IEEE 21st International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. 2020 May 11–14; Newark, NJ, USA; 2020.
- [14] Ashby WR. An introduction to cybernetics. London: Chapman & Hall; 1956.
- [15] May RM. Will a large complex system be stability? *Nature* 1972;238(5364): 413–4.
- [16] Petersen P. Riemannian geometry. New York City: Springer; 2006.
- [17] Cadger F, Curran K, Santos J, Moffett S. A survey of geographical routing in wireless ad-hoc networks. *IEEE Commun Surv Tutor* 2013;15(2):621–53.
- [18] Seno L, Vitturi S, Zunino C. Analysis of Ethernet PowerLink wireless extensions based on the IEEE 802.11 WLAN. *IEEE Trans Industr Inform* 2009; 5(2):86–98.