



专题：新型网络技术

# 论网络技术体制发展范式的变革——网络之网络

邬江兴

(解放军战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450002)

**摘要：**多样性和多元性是宇宙发展的第一特征。当前网络技术发展始终未能脱离基于单一体制自我演进或更替换代发展的基本范式，极大地制约了以“人网物”为对象、计算/存储/传送一体化为手段的多元、多维融合新世界对网络技术体制与相关服务的创新需求。从思维视角和方法论层面出发，提出了网络技术体制与支撑环境相分离的多模态网络发展范式。结合云计算的场景，展望了多模态网络商业运作新模式和应用场景。

**关键词：**网络之网络；多模态智慧网络环境；新思维视角；新方法论；新实践规范；网络模态；多模态网络云计算平台；应用展望

**中图分类号：**TP393

**文献标志码：**A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2022140

## Revolution of the development paradigm of network technology system—network of networks

WU Jiangxing

PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** Polyphyly and diversity are the first criterion of the development of the universe. At present, the development of network technology has not been divorced from the basic paradigm of self-evolution based on a single system or self-replacement, which has greatly restricted the innovation demand of the network technology system and related services characterized with “human-network-thing” as the object, the integration of computing, storage and transmission as the means, and multi-dimensional and multi-dimensional integrated new world. From the perspective of thinking and methodology, a multimodal network development paradigm that separates the network technology system from the supporting environment was proposed. Combined with the scenarios of cloud computing, the new modes and application scenarios of polymorphic network business operation were prospected.

**Key words:** network of networks, polymorphic intelligent network environment, new thinking perspective, new methodology, new practice norm, network modality, polymorphic network cloud computing platform, application prospect

收稿日期：2022-05-06；修回日期：2022-06-11

基金项目：国家重点研发计划项目（No.2019YFB1802501）

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1802501)



## 1 多元性和多样化是宇宙发展的基本特征

迄今为止, 广袤的宇宙空间中能被科学界认定存在高级智慧生物的星球只有地球。已经发现构成这个星球无机和有机世界的化学元素有上百种之多, 其中天然存在的有 94 种, 科学家在实验室人工合成的有 24 种。到目前为止, 化学元素周期表中的 118 种元素通过排列组合, 已经形成了无法估量、多种多样的化合物。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 (polyphyly and diversity) 特征的支撑, 甚至有人将其称为宇宙发展的第一特征<sup>[1]</sup>。毫无疑问, 多元化、多样性既是自然界也是人类社会进步或变革的基本动力之一, 地球生物发展史表明, 通过物种间的互补与制衡构成一个和谐共存的生态发展格局, 没有竞争性的演进累积和推陈出新的变革延续, 自然界会因为物种同质化而无可避免地走向凋亡<sup>[2]</sup>。因此, 繁荣物种及生态圈多样性是自然界生命发展的必然使命与要求。

网络世界遵循自然界基本规律的演进与变革无疑是正确的发展道路, 而单一体制网络技术发展道路肯定无法支撑五彩缤纷的已知或未来服务需求, 必须构建开放、竞争、互补、多样性、多元化的网络技术生态环境, 才能充分释放网络体制与应用业务及商业模式的创新活力。

## 2 网络技术体制与应用服务领域特征强相关

回顾网络技术发展史, 既有的网络技术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技术体制及相关业务需求。理论上不可能有一种“超级网络技术体制”可以有效地支持现有或未来所有的应用服务领域, 这本来已是不争共识, 但消费互联网体制取得的巨大成功给人们

造成了一种普遍错觉, 似乎“50 多年前提出的互联网技术体制只要通过互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 或国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 组织不断丰富 RFC (request for comments) (目前总数已超过 9 000 个) 或相关技术标准, 继续沿袭自我演进方式就能很好地满足信息通信或相关领域不断提出的新业务发展需求”<sup>[3]</sup>。但是消费互联网的成功存在以下 4 个不容忽视的重要前提。

(1) 微电子技术的进步使得用户终端、服务器、网络设备数字化和软/硬件智能化水平不断提升, 同时网络基础设施建设和运营维护门槛在大幅度降低, 在计算机技术泛在化应用的基础上, 由同一网络基础设施通过虚拟化技术提供多业务融合服务, 实现了网络架构与业务的相对分离, 提高了业务开发灵活性。

(2) 相当一个历史时期以来, 网络服务的主体对象是社会人, 即提供 toC 服务, 社会人对通信服务的要求除了尚未解决的嗅觉、味觉、触觉等信息感知及跨地域传送与交互问题, 就是语音、视频、文本或图片等听、视觉类的多媒体业务, 共同的特征是对时延、相位、时延抖动、误码率不敏感或具有较高的容忍度, 在终端侧提供足够缓冲能力、网络侧具有平均 2 倍左右的交换与传送平均带宽条件下, 应用“尽力而为的分组转发方式”就能较好地满足用户体验质量 (quality of experience, QoE)<sup>[4]</sup>要求。

(3) “由网络边缘提供服务的商业模式”, 使得 toC 的多媒体服务发展不再只取决于网络运营商单方面的积极性或市场作为, “网络与业务分离”的商业模式创造了“互联网服务提供者 (Internet service provider, ISP)”和“互联网内容提供者 (Internet content provider, ICP)”等细分领域市场构架, 极大地释放了全社会应用服务创新激情并加速提升了行业信息化的积极性, 诞

生了不少专注互联网服务的龙头企业。

(4) 互联网的泛在化、同质化发展很大程度上源于经济全球化、网络化时代的强力推动作用, 商业和社会大环境的刚需影响远远高于网络技术本身的进步意义, 其实践规范就是如何解决网络规模化扩展、泛在化应用和承载经济性等带来的工程技术问题。

然而, 时至今日, 微电子和计算机软硬件技术进步正在放缓, 摩尔定律和登纳德缩放比例定律已触碰芯片制程工艺、功率密度、合格率等“天花板”问题, 既有的网络体制可能无法再指望通过微电子或 CPU 等核心器件性能的不断跃升, 满足各类基于虚拟化或硬件加速技术的承载业务性能要求; 源于数字电报分组交换的互联网“尽力而为”传送方式, 虽然以牺牲资源利用率和有效性为代价勉强满足 toC 多媒体服务的 QoE 要求, 但很难满足产业互联网时代低时延、确定性服务、算力网、传感网、物联网甚至车联网等 toX 业务在服务质量 (quality of service, QoS) 方面的严苛要求。特别是基于内容寻址、命名数据寻址、多标识寻址、地球空间坐标寻址、模糊需求寻址、算力资源寻址、高速移动寻址、低碳排放路径寻址等远超传统“五元组”编址/寻址和路由控制能力的新型寻址方式的提出, 使得 ISP 和 ICP 间技术与商业界限日趋模糊, “网络与业务分离”“业务由网络边缘提供”的消费互联网承载模式已无法适应可设想到但尚在清晰过程中的业务发展需要。

互联网无可争辩的贡献是用“端到端”的虚拟化和智能处理技术, 一体化地把原本要用多个物理专网才能提供的 toC 多媒体服务置于统一的网络构架下; 随着可重构网络<sup>[5]</sup>、软件定义网络 (software defined network, SDN)<sup>[6]</sup>、网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV)<sup>[7]</sup>等技术的提出, 互联网架构刚性化的缺陷得到一定程度弥补, 但不能解决从消费互联网向多样化垂直应用领域产业互联网转型的难题。

总之, 50 多年来基于 IP 互联网体制的技术与工程研究, 始终专注于 toC 领域的应用方面, 重点解决一体化的多媒体服务问题, 其成功的商业化运作至今仍然未超出给定目标领域服务特征的范畴。所以说, 即使是商业成就斐然的消费互联网, 在面对服务特征存在诸多不同的产业互联网时, 既有的发展范式 (paradigm) 正在遭遇前所未有的挑战<sup>[8]</sup>。与库恩的观点<sup>[9]</sup>不同, 笔者以为: 即使发生范式的变革也并不意味着原有范式彻底失去意义。事实上, 在人类科学进步历程中从未发生过新范式彻底否定旧范式的情景, 即便是在迎来基于大数据和人工智能的第四发展范式之际, 也不存在否定前 3 种范式的必要, 只是各自适应范畴不同。

### 3 数字化时代垂直行业应用推动网络发展范式新变革

范式的概念与理论由美国著名科学哲学家托马斯·库恩在 1962 年一篇长篇论文中首次提出, 并在随后出版的《科学革命的结构 (The Structure of Scientific Revolutions)》一书中得到系统阐述<sup>[9]</sup>。笔者认为, 最重要贡献之一在于: 把以往貌似堆积无序的科学进展历史“建构”出一个结构, 一个关于“范式”的结构, 从而发现了“科学革命的结构”。范式的变革往往发生在原有范式无法解决的难题时才会应运而生。数字化时代人类社会、网络世界、物理世界“人网物”三元万物互联, 人们不再满足局限于 toC 领域的多媒体服务, 个性化或分众化特征显著的垂直行业应用将成为网络世界的“应用蓝海”, 这意味着既有的网络技术体制自我演进或更新换代的发展范式, 必须从思维视角、方法论和实践规范层面进行彻底的变革。

#### 3.1 新思维视角

数字化时代随着 toB、toM、toX 等垂直行业多元化应用需求的出现, 现有消费互联网体制难以继续使用“打补丁”的演进方式来满足, 经典



的“业务与网络分离提供方式”也不再能满足相关领域的服务等级协定（service level agreement, SLA）要求<sup>[10]</sup>。例如，工业领域大量的传感器和执行部件需要给定时延、给定时延抖动、给定周期等确定性或时间敏感的网络服务；企业内部不同加工设备群、不同工艺流程、不同生产线组织需要由不同技术规范的工业控制网络支撑（尽管目前的现状是多数由工业系统数字化、网络化进程中缺乏全球性标准所致）；军事系统由于兵种间的特殊性不可能用一种网络体制满足各方面的用网需求；企事业单位内部因为业务关系也需要多样性网络提供专门化服务；由不同类型传感器和执行单元采用多种互联协议构成的物联网，也很难用单一的网络技术体制支撑；基于云和边缘计算技术的5G承载网络，即便采用同构切片方式也很难应对垂直行业多样性或多元化之需求等。

此外，信息通信基础设施向“云网算”融合、地球空间智联网络（6G）方向转型已成为产业界广泛共识。基于分布式异构计算架构和虚拟化等相关技术的云计算平台<sup>[11]</sup>，正在使传统计算机与信息通信网络技术朝着“一切皆为服务”的融合模式发展，除了回归网络即服务（network as a service, NaaS）外还引入了基础设施即服务（infrastructure as a service, IaaS）、平台即服务（platform as a service, PaaS）、软件即服务（software as a service, SaaS）等新应用体验，试图将广义计算能力（计算、存储、交换、传输等）通过互联网作为商品资源进行流通，必然会产生许多与当前大众或普遍服务类型和提供方式不同的新兴应用需求<sup>[12]</sup>。

必须强调指出，即使是数字时代，围绕人类社会经济活动之信息交互永远都是刚需，因而toC领域的传统多媒体服务不仅不可或缺，而且还需要加快发展包括嗅觉、味觉、触觉等人类其他感官信息传送和交互在内的更高级形态的智

能化服务。所以，新的思维视角只可能更为宽广，而不能也不应当再对多元化或多样性需求作“选择性无视”。

### 3.2 新方法论

回顾人类信息通信技术发展史不难看出，其经历了3个标志性阶段。一是面向规模化专业服务，独立建设和运营电报、电话、电视等专用网络<sup>[13]</sup>，基本特征是“网络即服务”，方法论是“围绕一类服务构建一个网络”<sup>[14]</sup>；二是面向大众普遍服务，建设和运营综合电报、电话、视频服务的广域网络<sup>[15]</sup>，基本特征是“一体化的网络与业务环境”，方法论是“基于标准化容器的业务封装”；三是在终端或业务系统计算机化、智能化前提下，网络提供“以智能用户终端为服务对象”的语音、文本、图像等多媒体数据文件传送与交互功能，基本特征是“业务与网络相对分离”、业务由网络边缘提供、网络完成多媒体文件数据包的“尽力而为传送”等，方法论是“基于路由表的分组交换”<sup>[16]</sup>。

数字经济、海陆空天多维万物智联或数字孪生、元宇宙时代必然会对网络技术体制提出更加多样性或多元化的需求，已有网络发展范式之方法论缺乏更高维度、更多应用领域的指导意义。新的方法论应当聚焦于“如何在一个技术物理环境中支持多元化或多样性的网络技术体制及业务的共生共存、演进与变革兼容并蓄”问题提供“方法之方法”，且无须涉及任何已有或潜在的应用网络总体架构、寻址方式、路由控制、传送模式、协议体系、业务形态乃至技术演进路线等实践规范层面的内容。面向全新的思维视角，新方法论是“构建一个多维多元共生的融合环境，支持多种网络技术体制的动态加载和自主演进”。这个融合环境与化学元素周期表拥有多种网络基线技术元素类似，用这些元素的“化合物”可以形成支撑多元化或多样性网络技术体制及相关业务的基础能力，满足不同网络应用场景对基线技术资源的组合需求。

这种网络模式非常类似当前以分布式异构计算“云平台”提供多样化商业服务，所不同的是如何为各种应用网络体制或服务提供规模化、高可利用率的路由计算、协议解析、传送制式、多模接入、安全隔离、计算存储等网络基础设施资源，需要解决的工程化问题与“云平台”十分相似，集中在网络基线资源的管理与调度方面。随之而来的商业化问题不仅是互联网服务提供商（ISP）或内容提供商（ICP），需要更名并定位于“多元网络业务提供商（network service provider, NSP）”或“多元网络内容提供商（network content provider, NCP）”，而且要重新赋予 ISP 新内涵，并将这一缩写名称赋予为所有 NSP 提供网络基础设施服务的新型运营商，即“基础设施服务提供商（infrastructure service provider, ISP）”。

### 3.3 新实践规范

由于范式决定基础理论，基础理论决定具体理论，理论决定模型，模型决定模式。我国知名学者陈世清认为，“范式是学说的坐标，是开展科学研究、建立科学体系、运用科学思想的坐标、参照系与基本方式”<sup>[17]</sup>。既然网络体制发展范式的坐标转变为多维多元共生融合环境，那么新的实践规范必然围绕如何用一体化环境支持多元化

或多样性网络体制的工程化实现问题展开，即需要开发“网络之网络”技术，用一个诸如云平台的“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（named data networking, 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、接入等可商化流通的软/硬件与连接对象资源<sup>[18]</sup>。显然，“网络基础设施”与具体“应用网络模态”之间是弱相关甚至不相关的。换言之，新的实践规范欲要达成的工程技术目标是：建构一个能够支撑各类应用网络模态及相关业务“快速生长或部署”之上的“开放、透明、统一、弹性、智能、安全隔离”的网络基础设施，以及可健康持续发展的技术与产业生态环境。笔者将其命名为“多模态智慧网络环境（polymorphic intelligent network environment, PINE）”，简称多模态网络<sup>[19]</sup>，多模态智慧网络环境如图 1 所示。

综上所述，与传统的网络发展范式研究坐标不同，多模态网络发展范式将研究坐标锁定在“如何为各种类型应用网络模态提供一体化、可共享、安全的网络基础设施资源环境”上，因而能充分激发应用网络体制及关联服务的“自由”创新活力，加速应用网络模态多样性生态环境构建。值

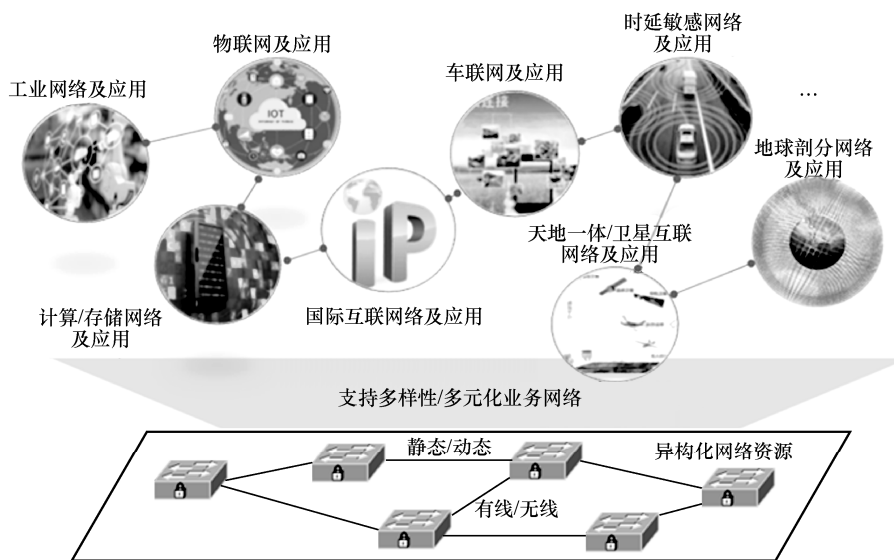


图 1 多模态智慧网络环境



得注意的是，多模态智慧网络环境支持静态/动态、有线/无线等各种接入或中继链路，支持天基、陆基、空基、海基等静止或机动部署的网络元素，支持多模态终端混合标识接入，支持多模态接口协议解析等。

多模态智慧网络环境与现有互联网的对比如图 2 所示，与现有互联网相比，多模态智慧网络环境支持各种网络模态（网络技术体制）以类似“应用插件”的形式进行快速部署（或撤收），可解决“目前单一技术体制商业运营网络固有性质，自然地排斥或拒绝新兴网络体制试验和示范，而专门建设的新型试验网又无法获得真实应用场景验证”的成熟度壁垒问题，极大地降低新兴网络技术及应用快速进入市场的门槛，促进形成网络技术创新、产业发展与市场应用“三位一体”协同发展格局。从而可从根本上改变拥有先发技术优势的网络体制和背负庞大先期投资包袱的运营商，无法避免地陷入封闭式自我演进或“穿衣戴帽封装承载”的同质发展模式，自觉或不自觉地排斥或“矮化”新兴应用网络模态的导入。更重要的是，以 PINE 为基础可以营造网络模态与业务应用和网络基础设施一体化发展的全新生态环境。

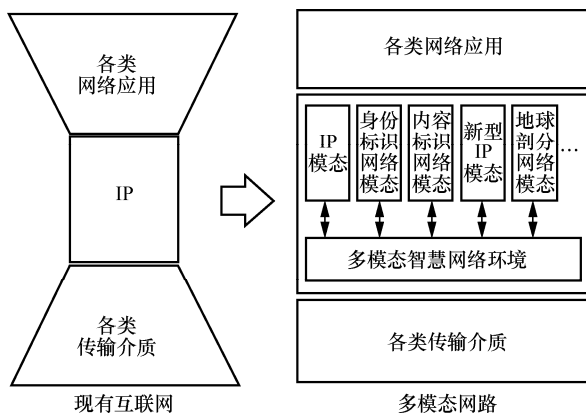


图 2 多模态智慧网络环境与现有互联网的对比

#### 4 基于多模态网络的云计算平台

云计算平台也称为云平台，无论是以数据存储为主的存储型云平台，或以数据处理为主的计

算型云平台，还是计算与数据存储兼顾的综合云平台，都是提供计算（包括必要支撑环境）、网络和存储等软/硬资源服务的平台<sup>[20]</sup>。作为一个技术物理实体，云计算平台通常以以太网或 FC-SAN、IB-SAN 等交换机组成的网络为核心，连接众多分布式的、向用户隐藏实现细节的异构（或同构）计算、存储或接入节点资源构成一个综合服务系统，采用虚拟化、动态可扩展、按需部署、异构冗余等技术措施，最终以整体形式呈现给用户，具有灵活性好、可用性强、可靠性高、性价比突出等特点<sup>[21]</sup>。

云计算平台在技术分类上属于分布式同构/异构计算系统，因而数据中心网络（data center network, DCN）或数据中心互联（data center inter-connect, DCI）网络的功能与性能，会直接影响系统内在的服务效能与质量。具体如下。

- 通信异常。网络本身的共享性质及不可靠性使每次通信和传送都可能伴随网络不可用的风险，既包括交换、传输、域名等设备的不确定故障，也包括误码率、丢包率、拥塞率等与业务无关或相关的性能问题。通信异常对性能的最大影响是，当一个计算任务分布在多个节点上并行或协同处理时，任何一个计算节点的通信异常都会严重影响整个任务的执行性能，通信异常时即使采用重传机制也只是保证了系统的可用性，而对任务处理性能的影响则是不可逆的<sup>[22]</sup>。因此云平台理论上要求其内在网络不仅具有很高的可靠性与可用性，还能通过业务端与网络端的联合优化保证传输流量拥塞可能导致的丢包率符合通信指标要求。
- 通信时延。网络通信时延的大小通常与云平台节点的规模、地域分散程度、网络拓扑级数、交换机/路由器性能、传输技术类型和节点侧-网络侧协议栈处理性能强关

联,其直接影响是造成协同度或并行度要求高的任务处理性能与算法设计间存在不可预测的偏差。此外,一些计算任务看起来流量或带宽要求不高的控制数据但却有着极强的实时性或及时性要求,假如无法置于节点内高速缓存或内存中时,仅通过网络支撑节点间传送机制而不考虑业务层与网络层的联合优化机制,则很难在规模化网络环境中获得低时延的预期效果,从而使得协同计算或处理性能不确定。

- 确定性时延。网络传输路径复杂度和协议栈处理效率除了影响节点间的通信时延外,还会导致严重的时延不确定性。在执行大规模并行或协同计算任务时,这种时延不确定性会给节点间任务或进程同步性能带来麻烦。因此,凡是分布计算系统,理论上期望能提供通信时延确定甚至精确的网络传送或传输功能,以便通过算法优化抵消时延不确定造成的影响<sup>[23]</sup>。
- 多样化通信模式。一个分布式系统的理想通信模式至少应同时包括点到点、点到多点、广播 3 类,否则节点间通信或数据分发开销会严重影响分布式计算性能。遗憾的是,目前云平台基于点到点“捆绑”机制等效的多播、广播通信模式与理想目标差距甚远。
- 可重构网络拓扑。分布式云计算系统互连或互联网络无论是局域型还是广域型通常是静态配置或刚性部署的。这对于同构型节点而言,如果说尚能满足基本使用要求,则对异构节点系统来说其效能很难精准优化。因此,近年来国际上对动态可重构网络发展十分重视,但尚未在云计算领域见到相关研究与应用报告。
- 软件定义互连<sup>[24]</sup>。理论上计算任务不同,系统内相关节点算法和连接关系也应有所

不同,节点间如果没有时延、传输带宽、传送协议、通信模式、连接拓扑、接入方式等软件可定义或可调节的参数和功能支持,欲要提供更高效能计算服务也存在不容小觑的挑战。

总而言之,造成上述问题的本质原因之一是,单一构造或同质化的网络无法同时满足分布式异构计算架构所需要的多样化的网络通信或数据传送服务。多模态智慧网络环境具有“网络之网络”的构造属性,可以以“网络基础设施”方式提供多样化的网络技术体制,基于多模态网络的云计算平台如图 3 所示,为云计算系统内相关节点同时提供尽力而为、时延敏感、确定性时延、单播/多播/广播通信模式、高可靠通信、安全隔离、软件定义互连、可重构交换及可定制化连接协议等多种应用网络模态和服务,能显著改善分布计算系统的功能和性能,为云计算或边缘计算等技术增添新的发展内涵与外延<sup>[25]</sup>。

## 5 多模态网络应用展望

正如本文前面已提到的那样,多模态网络的应用场景与云计算使用场景十分类似,对“生长”其上的“应用网络模态”隐藏了“网络基础设施”软/硬件资源的技术实现细节,并最终整体形式呈现给具体应用网络模态。其技术与商业形态与移动通信领域铁塔服务公司非常相似,后者可以为多个运营商提供所需要的站址、铁塔、杆路、管道、光缆、供电、管理甚至传输控制、“白盒交换”与“白盒基站”等软/硬件资源,既不用关心各运营商究竟采用 3G、4G、5G 或者其他技术制式,也无须关注服务对象各自采用的网络体制,应用网络运营商自行管理分享或共享网络基础设施基线技术资源,根据来自应用网络模态的资源需求,“网络基础设施”运营商调整或提升支撑环境的服务质量或能力,并确保网络模态间具有可预期的安全隔离度<sup>[26]</sup>。

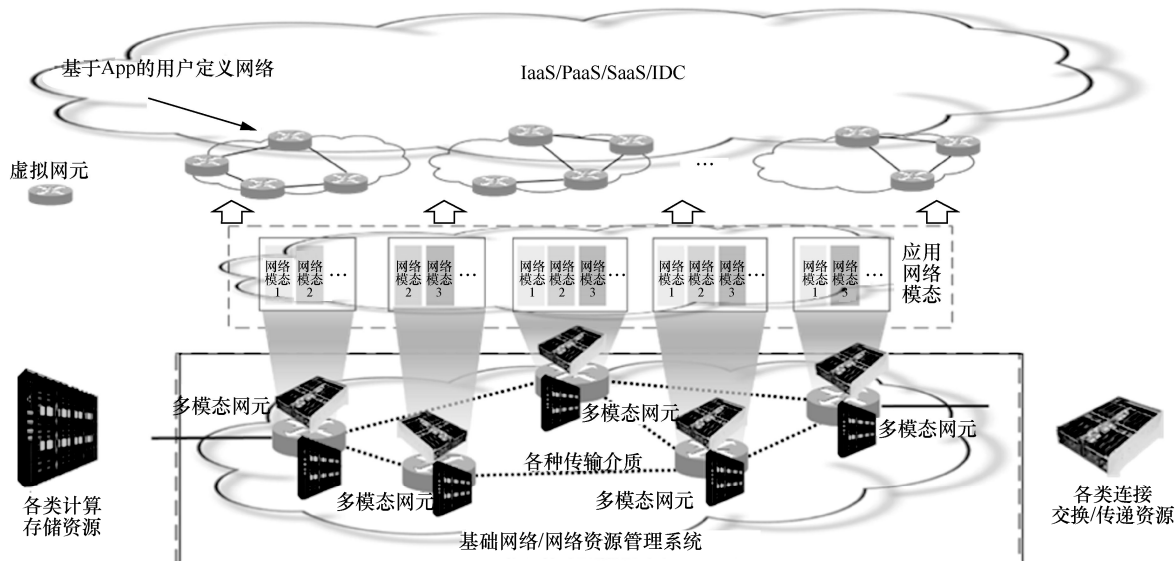


图3 基于多模态网络的云计算平台

多模态网络的商业应用模式可分为两种方式，如图4所示。大中型企事业单位可以独立建设私有的多模态网络，将原先基于“局域网+服务器”形式的多个或多种垂直业务网络迁移到“多模态网络+云服务平台”上（如图4（a）所示），也可以由NSP通过收取服务费的方式合作建设用户级程控交换机（private branch exchange, PBX）形态的多模态网络云服务平台（如图4（b）所示）。小微企业则可以采用支付服务费或租用费的方式

使用NSP自建的多模态云平台服务，并可由需求决定使用和管理多少种或多少个应用网络模式以及加/卸载相关服务等。毫无疑问，传统互联网服务提供商可以通过增量部署方式将现有基础设施升级到多模态网络形态，使之同时具有NSP、新内涵ISP甚至NCP，从而获得基于多样性应用网络体制的业务发展优势。

总之，凡是有多样化网络和业务需求的应用场景，都可以基于多模态网络构成统一网络基础

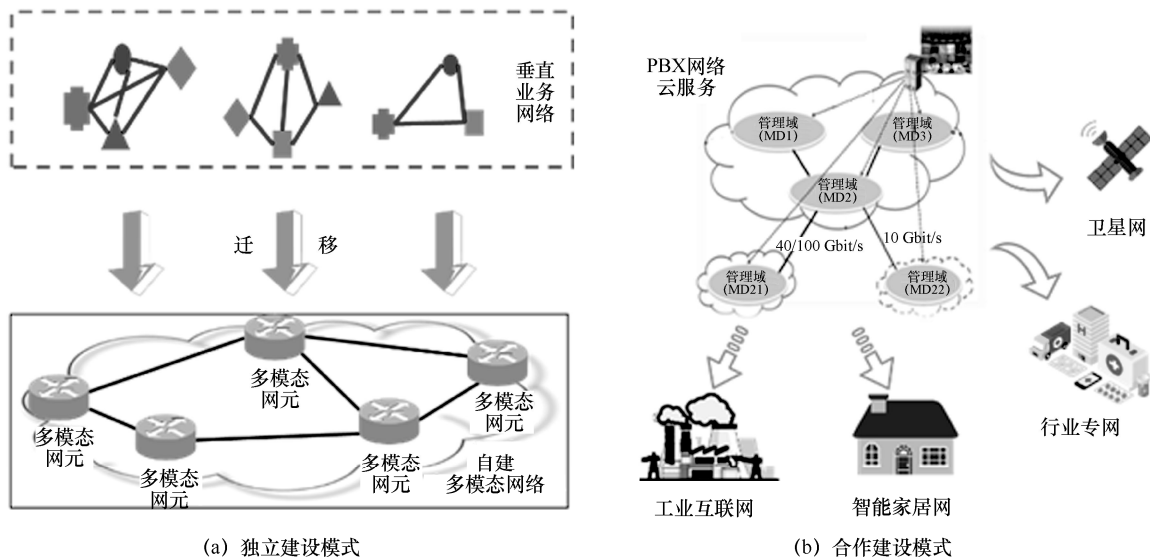


图4 多模态网络的商业应用模式

设施形态的信息物理系统。显然,多模态网络解决了长期以来在垂直应用个性化与基础设施建设统一化方面存在的严重对立问题,适应了网络技术演进与变革兼容并蓄多样化、可持续发展之要求,不仅颠覆了现有网络体制发展范式,更是开创了新的网络基础设施技术物理形态,促进了上下游产业和市场游戏规则的重大转变。

## 6 结束语

网络世界演进与变革本应遵循多元化和多样性的宇宙基本发展规律,但受到过往科学技术和生产力以及经济社会发展阶段性等诸多主、客观因素影响。网络科技界不得不在“受限条件下寻求最优解”,加之某种网络发展范式一旦成为业界普遍共识且存在似乎足够大的技术演进空间,人们习惯上倾向于选择“戴着锁链的舞者”角色。特别是 50 多年来,基于 IP 的消费互联网技术与工程研究在“屡屡唱衰”之中似乎总能“逢凶化吉”取得出乎意料的成功,使得人们很难跳出既有网络发展范式前行动力是否真正枯竭的“思维桎梏”。

进入 21 世纪第 3 个 10 年以来,在面对服务特征存在诸多差异化需求的产业互联网时,消费互联网技术演进不可避免地会触碰难以逾越的发展壁垒。本文从思维视角、方法论和实践规范层面讨论网络技术体制发展的新范式,试图摒弃“新桃换旧符”的传统模式,彻底打破网络龙头企业和相关标准化组织至高无上的“制技术与标准权”,严格约束后者的作用和责任仅在“为多样性网络制订标准”的范畴内,让市场和用户自主选择或创造适用的应用网络体制。作为一种自然支持各种应用网络和业务在“网络之网络”上“共生共存、演进与变革兼容并蓄”的新发展范式,PINE 不仅能为多种应用网络模态提供“基线技术”实现所需要的软/硬件资源,而且可以支撑建设运营管理与应用网络模态及业务创立、技术演进与换代弱相关甚至无关的变革性目标的达成。

最后,本文展望了多模态网络商业运作新模式和应用场景。

## 参考文献:

- [1] CRESSMAN R, GARAY J. Stability in N-species coevolutionary systems[J]. Theoretical Population Biology, 2003, 64(4): 519-533.
- [2] 袁纯清. 共生理论: 兼论小型经济[M]. 北京: 经济科学出版社, 1998.  
YUAN C Y. Symbiosis theory: also on small economy [M]. Beijing: Economic Science Press, 1998.
- [3] 郭江兴, 兰巨龙, 程东年. 新型网络体系结构[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.  
WU J X, LAN J L, CHENG D N, et al. New network architecture[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.
- [4] 郭江兴, 胡宇翔. 网络技术体系与支撑环境分离的发展范式[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(8): 1-11.  
WU J X, HU Y X. The development paradigm of separation between network technical system and supporting environment[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(8): 1-11.
- [5] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 128-139.  
LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 128-139.
- [6] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [7] HAN B, GOPALAKRISHNAN V, JI L S, et al. Network function virtualization: challenges and opportunities for innovations[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 90-97.
- [8] 黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述[J]. 通信学报, 2014, 35(8): 184-197.  
HUANG T, LIU J, HUO R, et al. Survey of research on future network architectures[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8): 184-197.
- [9] KUHN T S. The structure of scientific revolutions[M]. International Encyclopedia of Unified Science, University of Chicago Press, 1962.
- [10] 吕平, 刘勤让, 郭江兴, 等. 新一代软件定义体系结构[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(3): 315-328.  
LV P, LIU Q R, WU J X, et al. New generation software-defined architecture[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(3): 315-328.
- [11] ALAM T. Cloud computing and its role in the information technology[J]. IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI), 2020, 1(2): 108-115.
- [12] BAHRAMI M. Cloud computing for emerging mobile cloud



- apps[C]//Proceedings of 2015 3rd IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2015: 4-5.
- [13] SONDHI M M, BERKLEY D A. Silencing echoes on the telephone network[J]. Proceedings of the IEEE, 1980, 68(8): 948-963.
- [14] DAI M. Research on networking technology of digital terrestrial television single frequency network[C]//Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2020:525-529.
- [15] ACAMPORA A S, NAGHSHINEH M. An architecture and methodology for mobile-executed handoff in cellular ATM networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(8): 1365-1375.
- [16] YUKSEL H, ALTUNAY Ö. Host-to-host TCP/IP connection over serial ports using visible light communication[J]. Physical Communication, 2020, 43: 101222.
- [17] 陈世清:中国经济学范式必然代替西方经济学范式[EB]. 2014. CHEN S Q. The Chinese economic paradigm will inevitably replace the western economic paradigm [EB]. 2014
- [18] WU J X. Thoughts on the development of novel network technology[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(10): 1-11.
- [19] HU Y X, LI D, SUN P H, et al. Polymorphic smart network: an open, flexible and universal architecture for future heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(4): 2515-2525.
- [20] CUSUMANO M. Cloud computing and SaaS as new computing platforms[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 27-29.
- [21] CHEN Y, PAXSON V, KATZ R H. What's new about cloud computing security[R]. Report No. UCB/EECS-2010-5, University of California, Berkeley, 2010.
- [22] SHORO S, RAJPER S, BALOCH B. Cloud computing security[J]. International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI), 2011, 3(4):52-66.
- [23] ABEBE A T, KANG C G. MIMO-based reliable grant-free massive access with QoS differentiation for 5G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(3): 773-787.
- [24] 李沛杰, 沈剑良, 苑红晓, 等. 一种应用于软件定义互连系统的多协议 SerDes 电路[J]. 电子学报, 2021, 49(4): 817-823. LI P J, SHEN J L, YUAN H X, et al. A multi-protocol SerDes circuit for the applications in software defined interconnection system[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(4): 817-823.
- [25] 李军飞, 胡宇翔, 伊鹏, 等. 面向 2035 的多模态智慧网络技术发展路线图[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 141-147. LI J F, HU Y X, YI P, et al. Development roadmap of polymorphic intelligence network technology toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 141-147.
- [26] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 1-12. HU Y X, YI P, SUN P H, et al. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 1-12.

## [作者简介]



邬江兴 (1953- ), 男, 解放军战略支援部队信息工程大学教授、博士生导师, 中国工程院院士, 国家数字交换系统工程技术研究中心主任, 长期从事计算技术、网络安全、通信网络等领域的科学技术研究工作, 曾获国家科学技术进步奖创新团队奖 1 项、一等奖 3 项、二等奖 4 项, 2018 年以来出版中英文专著 4 种。