

本刊专稿

AI for Engineering: 驱动数字生态系统网络发展范式转型

邬江兴^{1,2}, 邹宏¹, 张帆^{1,2}, 刘勤让^{1,2}, 高彦钊², 尚玉婷^{1*}, 祁晓峰²

摘要 系统阐述了 AI for Engineering(AI4E)驱动数字生态系统网络发展范式的转型动因、机理与实践路径,指出传统数字生态系统网络发展范式面临“刚性架构与场景多样化”的根本矛盾,亟需以“超融合、高可信、一体化”为目标进行重构。介绍了 AI4E 驱动数字生态系统网络发展范式转型的重要基础、技术支撑、运作方式,从思维视角、方法论、实践规范、发展路径等方面阐述了新范式的主要特征;同时,介绍了 AI4E 赋能转型的实践探索,提出基于生成式 AI 的多模态网络环境(PINE),开辟网络技术体制“第二曲线”;提出晶上生成式变结构计算,打造智能算力“芯物种”;推动内生安全赋能数字系统网络弹性工程,提升人工智能应用系统内生安全能力;呼吁建设“超融合网络与智能计算实验床”大科学装置,验证“结构决定效能/安全/多样性”的科学猜想,为构建自主知识体系、推动科技自主创新、深化人才自主培养改革提供支撑。

关键词 数字生态系统;超融合网络;生成式变结构计算;内生安全;生成式人工智能

人工智能作为当今时代最具变革性的技术力量,正以前所未有的速度推动经济社会发展。人工智能不仅带来 AI for Science(AI4S)的科学研究新范式,更带来 AI4E 工程科技范式变革。但是 AI4S 与 AI4E 具有明显差异,AI4S 聚焦于通过 AI 加速自然规律发现及科学猜想推理实验;AI4E 则致力于创造高可用、高可靠、高可信、高经济性相统一的智能时代工程技术新范式,推动人类社会繁荣。AI4S 是“用 AI 助力发现世界”,而 AI4E 是“用 AI 加持改造世界”。

回顾工程科技发展历程,大致可以分为 4 阶段,第 1 阶段是前工业化阶段,以“手搓”制造为核心,依

赖匠人经验传承,技术演进速率低下且知识传递存在显著时空局限;第 2 阶段是工业化阶段,标准化、流水线、专业工具实现规模经济效益,工程经验知识体系化升华为工程理论;第 3 阶段是工业化信息化融合阶段,计算机、互联网技术推动数字化升级,实体工程与虚拟仿真开始交织;第 4 阶段是后工业阶段,AI 赋能工程科技全链条,技术系统具备自感知、自决策的类生命体特征。纵观发展历程,工程科技本质是如何应用既有工程科学知识解决“如何做”(How)的实际问题,不断优化技术方案,将给定知识转化为满足特定目标的结构化方案^[1],努力在不确定性问题空间中寻求约束条件下的最优解,创建可实现、可复制、可持续的技术发展范式。通过还原论及系统论解构复杂系统、提炼普适性规则、范式化构建可稳定复现的模板,不断推动工程科技生态系统驱动范式变革。

1. 复旦大学大数据研究院,上海 200433

2. 国家数字交换系统工程技术研究中心,郑州 450002

收稿日期: 2025-04-09; 修回日期: 2025-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4500900)

作者简介: 邬江兴,教授,中国工程院院士,研究方向为通信与信息系统、计算机与网络技术、网络空间安全技术,电子邮箱: ndscwjx@126.com; 尚玉婷(通信作者),助理研究员,研究方向为网络空间治理,电子邮箱: shangyuting@fudan.edu.cn

引用格式: 邬江兴, 邹宏, 张帆, 等. AI for Engineering: 驱动数字生态系统网络发展范式转型[J]. 科技导报, 2025, 43(12): 19-28; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.04.00041

第二,数字生态系统转型严重依赖网络发展范式变革。数字生态系统转型对网络范式变革的依赖,本质上反映了从“连接信息”到“连接智能”、从物理连接升级为认知协同的智能载体的跃迁需求^[9]。正如梅特卡夫定律(网络价值与节点平方成正比)在智能时代需要被重新定义为“网络价值=算力×数据×连接”,未来的网络将不仅是基础设施,更是数字生态系统的“中枢神经”——其进化速度直接决定转型成败。当下,传统网络发展范式已无法满足数字生态对实时性、智能性、协同性和安全性的高阶需求。一是消费互联网体制难以保障业务性能,现有网络架构在资源利用率、服务质量保障与业务多样性之间存在根本性矛盾。尽管网络功能可虚拟化,但业务承载性能无法同步提升,尤其在消费互联网向产业互联网转型中,“端到端尽力而为”的传输机制难以满足确定性时延、高带宽、高安全性等差异化需求。二是新兴应用场景突破网络规划边界,新型应用对网络提出超常规需求,涵盖大带宽、高安全性、时间敏感、位置敏感、长链路高动态等多元化场景,现行解决方案因架构刚性无法实现一体化适配,导致网络资源调度效率低下,难以支撑百业千行的数字化转型需求。三是复杂度失控颠覆“简单即美”原则,原始传输控制协议/网际协议(transmission control protocol/Internet protocol, TCP/IP)设计以简单性为核心,但为适配垂直行业需求,网络协议栈已演变为4层叠加体系(经典IP、内容分发服务(content delivery network, CDN)、移动互联网、边缘计算),RFC标准数量突破9000项,核心路由器代码量超亿行,这种堆砌式复杂度导致网络脆弱性加剧,协议冲突频发,运维成本指数级攀升,违背了控制论第一性原理。四是“网算存一体”需求倒逼架构革新,大数据与智能服务时代要求网络突破传统端到端传输定位,需兼具计算、存储、传输、感知等多重能力。当前消费互联网架构无法支撑通算、超算、智算一体化的大数据处理和云边端协同计算等算力协同、存储优化、数据共享应用场景需求。五是异构网络共生共存机制缺失,新型网络面临“非此即彼”或“无尽叠加”部署困境,要么强制适配现有网络基础设施牺牲业务承载性能,要么独立建网面临高昂成本;现行“one by one”网络体制升级模式,既无法满足不断发展的多样化应用场景“即插即用、共生共存、独立演

进”的需求,又使得网络换代付出的社会总成本或代价愈来愈难以承受;部署“烟囱式”业务应用系统不仅存在资源利用率低下问题,而且严重影响数据要素的共享流动,与数字经济可持续发展原则相违背。六是广义功能安全威胁叠加,“人-机-物-网”融合环境下,网络安全与功能安全问题深度交织,形成“未知的未知”攻击风险与失效隐患之新域新质安全威胁挑战。传统基于边界防御与补丁修复模式的安全防护体系,难以应对“存储程序控制基因缺陷”导致的泛在化内生安全威胁。

此外,网络发展范式还需实现从“中心化到去中心化”、从“尽力而为到确定性服务”、从“管道服务到智能体服务”、从“封闭孤岛到开放可编程”、从“附加安全到构造决定的内生安全”、从“人-机交互到机-机协同”等多维度的转变。

第三,AI助力数字生态系统网络发展范式转型。数字生态系统网络发展范式转型基本矛盾是“刚性网络基础设施与应用场景多样化的结构性矛盾”。人工智能技术的发展,使得基于自然语言描述的自定义需求输入,自动生成适配的计算架构、协作方式及控制策略,依托动态调优机制实现网络性能的持续改善,通过经验知识库的迭代进化形成网络自主决策能力等,这些为化解网络发展的基本矛盾提供了新机遇。例如,在网络基础设施架构设计维度,基于生成式AI的智能感知与自主决策机制实现多样化应用场景共生共存、演进与变革兼容并蓄,支持从需求解析到资源编排的自动化;在资源调度维度,以用户定义和体验一致性为目标的全局资源智能控制技术,突破海量终端接入与业务质量保障难题;在传输维度,突破传统多层协议限制,智能化地实现服务功能与性能的匹配,通过资源的快速拟合与结构性拥塞避免,实现传输效率指数级提升;在适配维度,时空维度变结构网络模型与情景拟合方法,使得信息通信基础设施具备跨场景动态重构能力;在运行维度,基于AI的持续学习机制,推动网络服务性能与用户体验的闭环优化。总之,AI发展使得数字生态系统能够充分借鉴不断丰富的人类知识数据集,拓展通用(包括专用)大模型在网络构建和运行中的应用深度和广度,提供“源于现实世界启迪,创造高于现实世界”的体验。

2 AI4E 驱动数字生态系统网络发展范式转型机理分析

AI4E 为解决数字生态系统弹性可塑演进提供了新的方法和路径,重新定义工程科技的运行规则,调和“网络基础设施的统一性”与“场景需求的多样性”基本矛盾,为多样化/分众化/个性化需求拉动的结构性升级提供了新动力。研究 AI4E 驱动数字生态系统网络发展范式转型,需要搞清一些基本问题。

第一,转型基础是什么? AI4E 之所以能够驱动数字生态系统网络发展范式转型,取决于 2 个重要基础,一是网络核心功能可以解构为再编程的模块化组件,二是相关基线技术和软硬件资源通过元素化的表

达和智能化的编排能够生成多样化的应用网络场景。例如,编址体系支持号码、地理空间参数、内容标识等多样化寻址模式,满足从传统端到端无状态的通信传输到有状态的代理服务等多多样性需求;交换模式融合电路、分组及混合交换技术,适配多样性应用服务功能和性能的强绑定要求;传输机制包含低时延、低抖动、确定性、弹性带宽及体验质量(quality of experience, QoE)、服务质量(quality of service, QoS)优化等策略;资源控制实现从集中式规则调度到基于分布式态势感知的智能控制演进,支持共享资源智能调度与高效使用;运维安全强调数据安全、内生安全与功能安全的一体化、智能化管理,以满足包括未知网络攻击在内的网络弹性要求(图 2)。

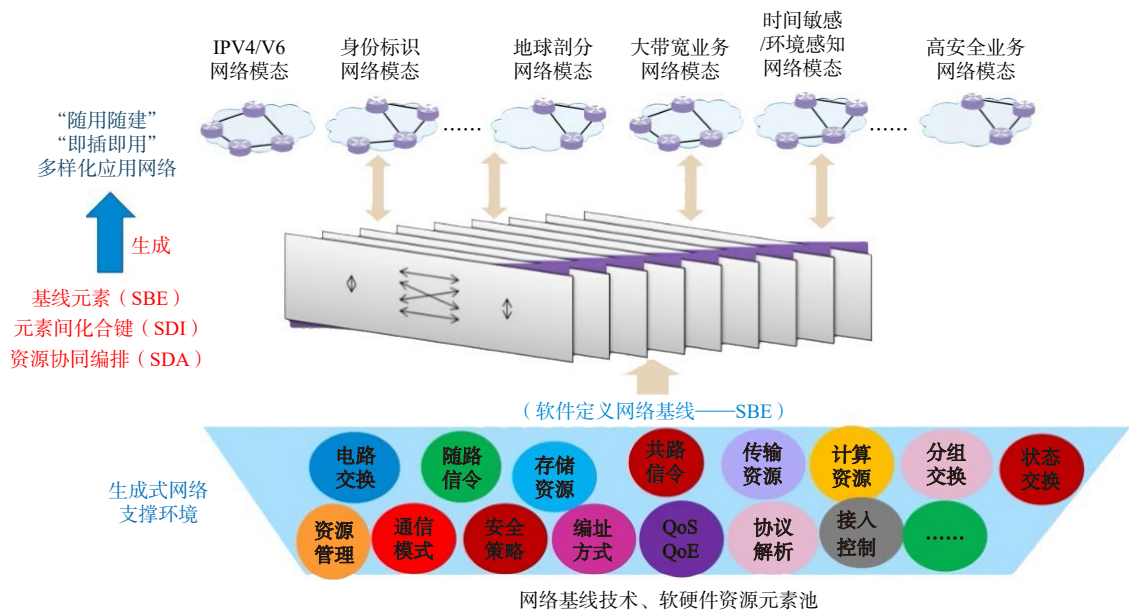


图 2 网络基线技术元素化示意

第二,技术支撑是什么? 数字生态系统网络基础设施可通过 5 大核心能力重构发展范式:一是共生共存的应用网络体制,依托云原生基础设施实现多种应用网络模式的并行运行,通过标准化接口支持 IP、确定性网络、内容标识网络、不同管控要求等异构/同构应用网络体制的即插即用或动态加卸载,突破传统层次化协议栈、虚拟化功能等编排模式;二是以计算/存储/网络资源池化和软件定义互连为基础的云原生基础设施,整合软件定义网络(software defined network, SDN)/网络功能虚拟化(network functions virtualization)、虚拟机、容器及微服务等技术架构,形成基于

云网融合的分布式资源调度和网络部署能力,支撑从边缘到核心的弹性扩展;三是支持面向领域的软硬件协同架构的全维可定义技术,对协议体系、交换模式、控制机制 3 大基线功能进行现场可编程定义,赋予物理网元动态适配垂直行业需求的能力;四是深度融合 AI 与网络运维的网络智慧化体系,构建“感知—决策—适配”闭环,利用通用或垂类大模型实现智能路由调度、资源编排和故障自愈,破解人工策略的非实时性优化瓶颈;五是以内生安全构造为基础设施网络弹性架构设计,通过动态异构冗余构造“感知、决策、行动一体化”效应,能将对抗或非对抗、“已知的

未知或未知的未知”广义不确定性扰动,变换为动态性、多样性、冗余性(dynamics, variety, redundancy, DVR)交集空间以差模或有感共模形态表达的局部安全事件,并能用经典的可靠性技术屏蔽或网络安全措施化解,形成兼具功能安全、网络安全、数据安全的弹性/韧性网络环境,既能从根本上扭转当前网络空间攻防严重失衡的格局,又能避免存在固有安全缺陷的AI技术导入带来的新域新质安全问题。这些技术突破共同构建了“共生共存、智慧编排、安全可信”的数字系统网络基座,推动网络从刚性管道向智能服务引擎的范式跃迁。

第三,运作方式是什么? AI4E驱动数字生态系统网络发展范式转型的基本原理是借鉴自然界统一性与多样性机理,基于通用或垂类大模型,便捷生成或部署具有功能/性能保障的、多样化网络场景构造及业务形态,摆脱网络体制发展既要前向进步又要后向兼容还要保证经济性之多重羁绊。在一系列新技术突破的支撑下,网络发展范式转型形成了完整的运作链条,以基线技术元素化为基石,通过解耦系统功能为模块化组件,构建可编程的协议栈、交换模式与控制机制的云化资源池;依托智能化编排引擎,利用生成式AI实现可泛化推理的智能编排,通过形式化语义建模与生成式工具链完成软硬资源的统一表征与迁移;基于结构功能性能的智能验证体系,构建多智能体协同学习框架,对应用网络模态或结构进行仿真与策略优化,确保功能、性能与内生安全的可靠实现;依托资源智能调度算法,实现计算、存储、带宽资源的动态分配与弹性伸缩,支撑多样化应用场景的实时适配需求;支持全生命周期演进或变革兼容并蓄机制,驱动支撑架构以较小边际成本持续升级,形成“模态生成—部署验证—策略优化—动态演进”的闭环能力。可以预见,日益强大的AI工具能够革新网络工程科技的基础能力,改变设计制造、基础设施建设等主要工程领域。这些变化将影响网络产品或系统的成本、性能、效率、可定制性和可持续性,推动“统一基线元素、智能化编排和部署,支撑多样性应用场景及服务”的智能化数字底座构建。

第四,新范式的特征是什么? 数字生态系统网络发展范式转型过程中需要化解2大核心矛盾:“统一性与多样性的矛盾,单一网络架构难以满足分众化、

专业化需求”“经济性与复杂性的矛盾,堆砌式演进导致投入产出比失衡”。这些矛盾本质上反映了传统网络发展范式的局限性^[6-8],亟需突破“刚性架构+分层协议+overlay+虚拟化”的路径依赖,构建具备内生弹性、自主进化能力的新型网络发展范式。AI4E变革数字生态系统网络发展范式表现在:思维视角层面,突破机械论时代的还原论桎梏,从系统拆分式的求解转向复杂系统论的整体性认知,其多样性需求与供给能力的关系不再是非此即彼的零和博弈;方法论层面,跳出“网络与业务耦合、控制与转发”关系的思维定式,将“应用网络或业务与基础设施支撑环境相分离”,摒弃传统技术框架刚性约束,支持底层软硬件元素或池化资源在对上层服务功能/性能透明前提下可灵活编排或自由更新,使网络基础设施能够实现“按需生成应用网络、多样化应用场景即插即用、共生共存兼容并蓄”的工程技术目标;实践规范上,强调用功能等价的方法论破解已僵化了前提或约束条件的“协同优化、最优闭环”的思维惯性,根据不同应用需求,动态改变结构形态提升“结构适配应用”的系统整体效能;发展路径层面,能够形成转化或和解多样化与统一性矛盾的新路径,在一体化的“多模态智能网络环境”之上可灵活运行多种功能/性能有保障的、可共生共存、可各自演进与变革、能根据需求语义按需生成应用网络模态及业务;安全保证上,既能为网络科技发展提供开放资源和协作平台,也能为新一代信息基础设施提供高可信、高可用、高可靠三位一体、安全性可量化设计和可验证度量的广义功能安全保障。

3 AI4E 赋能数字生态系统网络发展范式转型的实践

数字生态系统网络范式转型的实践场景探索聚焦网络、算力、安全3大维度,网络层面实现基于云原生的超融合,算力层面实现基于生成式结构计算,安全层面实现基于“构造决定安全”的网络弹性/韧性。

1) 探索实践一:开辟网络技术体制“第二曲线”。网络环境是数字生态系统的基础支撑。当前,网络技术发展面临的核心问题是“统一性与多样性矛盾”,主要表现为5个方面:多元化网络需求与统一基础设施之间的矛盾、统一基础设施与多样化业务性能

之间的矛盾、网络存量资产与网络技术创新互为掣肘的矛盾、应用的开放性与统一基础设施安全性之间的矛盾、多元网络共生共存与演进变革兼容并蓄的矛盾。从问题导向出发,网络体制演进需要开辟“第二曲线”,通过“网络之网络”的创建,使得网络基础设施

不再受限于刚性化或定制化的业务系统束缚,解耦应用网络场景(业务)与基础支撑环境的强绑定关系,提高信息物理基础设施全生命周期的功能和性能及效率弹性,充分释放智能时代网络应用场景及业务不断拓展或创新的活力(图3)。

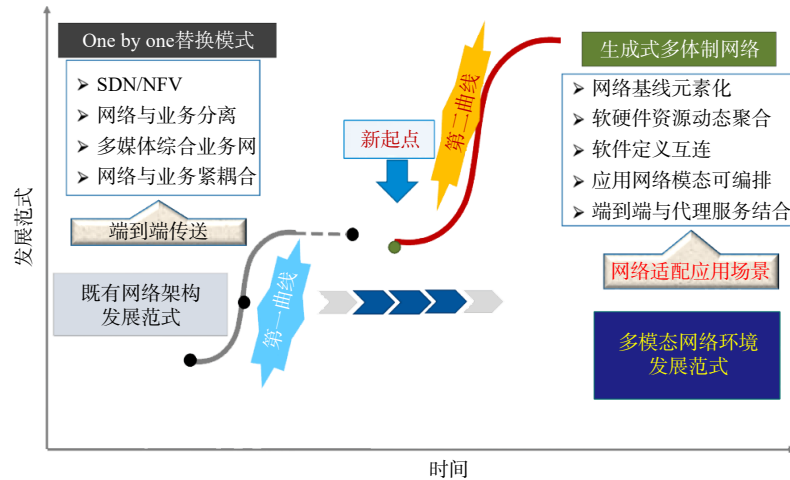


图3 网络技术发展示意

多模态网络环境(polymorphic intelligent network environment, PNE/PINE)是支持多种或多个网络模态共生运行的统一信息物理设施,网络模态可以理解为“关于业务 App 的应用场景”,也就是对既往的网络技术体制“抽取公因子”,形成可再定义、可扩展的网络基线元素池,再根据应用场景需求对软硬件资源、路由协议、交换方式、转发逻辑、业务特点、服务质量、运维规范等元素进行共享调用和编辑,使各种应用场景能够以网络模态的形式在多模态网络环境上动态加/卸载运行。多模态智能网络环境的核心是应用网络模态生成与部署能力,要在降低使用门槛、效益最优性、环境适应性、服务可用性间建立技术经济平衡。但是,基于固定规则与经验库驱动的模式生成机制面临效率瓶颈、白盒使用困境、不友好的扩展性等挑战问题,其中化解技术边界确定性与未来应用场景不确定性矛盾则是核心问题。

从 AI4E 的视角看,生成式网络技术将快速推动多模态网络环境从理论到实践的落地,为达成计算/存储/感知和网络基线技术元素化、资源动态聚合/编排、生成式应用网络模态等网络愿景目标,提供可工程化实践的路径。生成式网络能够根据网络场景的应用需求对网络模态进行定义、描述和划分;能够利

用人工智能大模型的泛化能力,自动生成和验证符合特定应用需求的网络模态,极大降低了自定义技术的实现门槛;能够通过统一的工具链进行处理,生成与支撑平台相关的模态代码并实现共生共存运行。AI4E 在多模态网络环境部署中的核心作用,在于通过生成式技术实现应用网络创建与全生命周期演进或变革控制(图4)。

2) 探索实践二: 打造智能算力“芯物种”。目前的计算架构一直沿用运算器、控制器、内存储器、输入输出设备几大件组成的“冯·诺依曼”结构。这种刚性架构在面对 AI 计算需求时,源于“大规模、低时延、高带宽”三角关系的本质互斥性。通俗地说,就是存在“不可能三角问题”,需要牺牲一项来满足另外两项的需求;在平面视角上无法实现三者的正交关系,换言之,无法让你同时站在我的左边、右边和对岸。大规模计算需分布式资源协同,但跨节点调度必然会带来时延不确定问题;追求低时延不仅要压缩协议栈层级还要尽可能地提高处理速度,但受限于单点算力规模与带宽瓶颈;而高带宽传输与数据处理的实时性响应部署于同一技术范畴,换句话说,高带宽是指数据流的传输速率,实时性响应是指完成一次操作等待数据的时间,因此,高带宽不等于低时延,反之亦然;

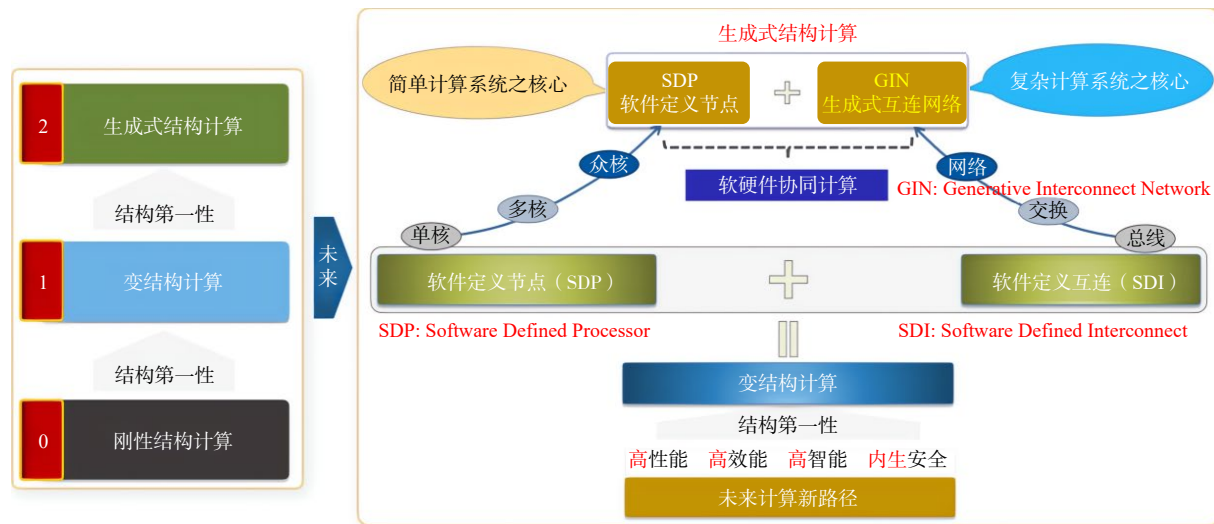


图4 生成式变结构计算示意

据统计,通用处理器仅 10% 晶体管参与神经网络运算处理,计算密度不足致使简单堆砌算力规模难以实现计算效能提升;中央处理器(central processing unit, CPU)平均 60% 时间在等待数据搬运,图形处理单元(graphics processing unit, GPU)卡 30% 以上的能耗用在板卡间互连上,如同在“碎石赛道”举办 F1 赛事,再先进的跑车也难以竞技。

跳出“不可能三角”桎梏的基本方法就是变革传统刚性计算架构及其工程实现范式,通过导入物理学的“增维求解定律”突破原有维度空间无解的困局,将问题重置到更高维度空间。换言之,单一性算力与多样化算法间的结构性矛盾,只有导入“多样化计算架构匹配多样化应用算法”的创新元素才可能使其化解。10 多年前,中国科技工作者在世界上首次提出领域专用软硬件协同变结构计算新概念——拟态计算,就是将专用领域多样化计算结构的处理、存储、互连等多种基线技术元素化,再通过软件定义互连和软硬件动态协同编排技术,使计算结构能实时匹配应用算法要求实现变结构运算。2018 年,计算机体系结构大师、图灵奖得主大卫·帕特森(David Patterson)和约翰·轩尼诗(John LeRoy Hennessy)共同论文预言:“基于软硬件协同计算语言的领域专用软硬件协同计算架构(domain specific architecture, DSA),将成为今后 10 年计算机体系架构黄金发展期的主流发展方向之一^[9]。”

AI4E 范式的一般规律揭示, AI 对计算任务的动态感知与建模,能够实现变结构计算向生成式结构计算的演进,并催生出信息物理系统的新载体或“芯物

种”——晶上生成式变结构计算系统。AI4E 范式需要智能算力“芯物种”,通过软硬件深度融合消除刚性载体与柔性计算的“本源错位”,变革“芯粒、芯片、模组、机匣、机架、系统”的“逐级插损式”工程技术路线,通过软件定义晶上系统(software defined system on wafer, SDSoW)技术路径,获得“软件定义体系结构与大规模高密度资源集成”的连乘效应^[10]。“芯物种”可在晶圆级范畴突破“大规模、高算力、低时延”不可能三角禁锢,可将晶上系统带宽提升 1 个数量级,延迟降低 1 个数量级,功耗降低 1 个数量级,整体性能可提升 3 个数量级左右,为解决算法模型与硬件载体的错配难题、促进智能算力转化为真实生产力提供了新技术路径。

3) 探索实践三:内生安全赋能数字系统网络弹性工程。安全是数字生态系统的底线,但是“存储程序控制”机理存在先天性缺陷,使得网络空间存在泛在化的内生安全问题,凡是包含数字元素的系统或产品在全生命周期内难以避免不可预知的脆弱性^[11]。经典的基于漏洞后门清零、补丁叠加、加密认证的防御范式受限于人类认知能力,无法突破“先验知识依赖”与“线性防御思维”的双重困境。相关研究表明,系统的本质安全很大程度上取决于内在构造的鲁棒性而非外部防护的有效性^[12],简而言之,需要“结构决定安全”的创新要素赋能网络弹性工程。中国科技工作者通过 10 多年的研究探索证明,功能等价条件下的动态异构冗余构造(dynamic heterogenous redundancy, DHR),可在“只知其然不知所以然”状态下,将独立个

体的复杂不确定安全问题变换为多元化群体层面以差模形态表达的概率事件,从而为当前数字生态系统驱动范式安全性不能量化设计与验证度量的世界难题找到了有效解决方案。

AI4E 能助力完善 DHR 构造的工程化生态。一是通过生成式 AI 等技术动态扩展异构执行体的多样性,突破异构执行体生成的局限性,在架构层实现攻击面的非对称持续演化。二是基于优化算法构建动态防御机制,通过异构冗余环境感知差模性质扰动并自主迭代当前防御结构实时阻断攻击链,形成具有结构编码/环境加密特性的网络弹性基座。三是深度融合加密认证、动态混淆、零信任、纵深防御等安全工具,形成具有“钢筋混凝土”般构造性增益的网络弹性体系,显著降低网络攻击的成功概率。四是通过算法抽象降低异构体构建与策略配置的工程复杂度^[13],在保证防御效能前提下大幅压缩部署成本与运维负担。

AI4E 与内生安全范式的有机结合,不但能够强化数字生态系统网络弹性/韧性工程的综合效益,同时能够为破解 AI 应用系统安全问题提供新路径,达成 AI4E“双螺旋效应”。在 AI 系统的全生命周期视角下,模型数据输入、训练和模型推理等阶段均已被证实存在泛在化的安全挑战。针对这些问题,AI 应用系统传统安全防护方案多采用“外部加固”“问题清零”策略,即通过附加安全机制和先验知识提升系统安全性,这类方法无法适应 AI 系统的动态演进和深度学习模型的复杂特性,难以破解系统构造性缺陷引发的本源性问题。基于 DHR 的人工智能内生安全防护框架,能将数据投毒、预留后门、无法彻查的漏洞等安全威胁在系统构造层面转化为可屏蔽可纠错问

题,从而使构造安全可信的 AI 应用系统成为可能。

4 AI4E 亟需建设超融合网络与智能计算实验床

AI4E 范式为中国在全球数字生态系统网络技术版图重构中抢占发展定义权提供了“换道超车”的难得机遇,可以看到 4 个方面的范式创新,一是建立演进与变革模式兼容并蓄,能灵活适配人机物网、海陆空天多元多维融合世界互联需求的多模态网络环境发展新范式;二是突破现有“冯·诺依曼”体系架构束缚,实现从单纯追求“通用算力”向获得多元高效“智能算力”转变的领域专用软硬件协同计算技术发展新范式;三是开辟一条不依赖先验知识、可防范已知或未知安全威胁、能广泛赋能网络与功能一体化安全的内生安全发展新范式;四是创建能从根本上改变 IT/ICT/IOT(信息技术/信息与通信技术/物联网)等领域现有工程技术与物理构成形态,建立基于软件可定义体系架构与晶圆级多维异质集成的微电子/光电子技术发展等新范式(图 5)。

工欲善其事,必先利其器。抢抓 AI4E 重构全球数字生态系统变革的宝贵机遇,加快中国新型工业化步伐、实现引领性创新,需要建设新型工程科学大装置。从科学发展的角度看,生物学因为显微镜的出现而实现了大的发展,天文学因为有了望远镜而获得了长足进步,粒子物理因为有了粒子加速器而实现重大突破^[14]。如同研究“可控核聚变”需要托卡马克装置一样,推动 AI4E 范式创新亟需体现数字生态系统全要素交互的“智能反应堆”,通过建设“超融合网络与智能计算实验床”,推动工程科学研究、技术分析和突

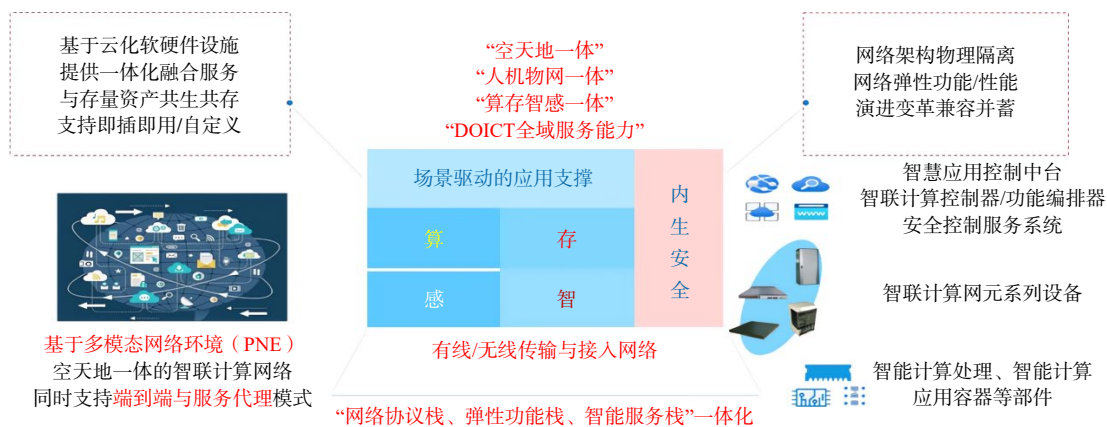


图 5 超融合网络架构示意

破,这就是建设新型国家级工程科学大装置的逻辑起点和整体定位。

“超融合网络与智能计算实验床”的战略意义在于抢占全球数字生态系统重构的战略制高点和发展定义权,其核心价值表现为5个方面:第一,验证“结构决定效能、结构决定安全、结构决定多样性、结构决定智能涌现”这一理论猜想,为数字生态系统的底层驱动规律探索提供科学基座;第二,着力破解“有限数字资源生成多样化结构”与“复杂系统中生成结构的功能性能一体化评测”两大基础科学难题,打通“必要多样性”原理工程落地的“根节”;第三,重点突破制约数字技术进化的“制程工艺茧房”“先验知识茧房”“代际复用茧房”,解放算力对制程工艺的路径依赖,化解网络安全/网络弹性与攻击者经验知识的强绑定关系,破解网络代际更迭的“沉没成本”困局;第四,深度推进人机物智多主体协同、空天地海多维度接入、云网算存多资源整合、量超通智多类型算力的四维融合,实现人类专家、智能体、网联设备、物理世界的实时认知协同,搭建多种网络异构接入、云网算存资源全栈池化以及量子计算、超算、通算、智算协同融合的新型基础设施形态;第五,实现“引领技术发展、激活开源协同、推动智能普惠、保证安全可控、达成绿色高效”的五位一体发展目标,摆脱相关领域被“卡脖子、牵鼻子”的困局,助力科技高水平自立自强、更有力服务自主知识体系建设和人才自主培养改革,重新定义智能时代的竞争规则与发展道路。

5 展望与思考

近期,诺贝尔物理学奖得主杰弗里·辛顿(Geoffrey Hinton)提出的“凡人计算”备受关注,这种新型计算范式希望颠覆传统软硬件分离模式,将存储与计算功能集成在同一物理单元中;利用硬件的物理特性、采用模拟信号直接实现复杂运算;不追求精确计算,允许一定程度的误差^[15]。自由能原理提出者英国伦敦大学学院卡尔·弗里斯顿(Karl Friston)指出,“凡人计算”为人工智能下一阶段研究提供了可能的催化剂,摩尔定律在超出某一点后将不再适用,类似生物智能、依赖特定硬件、动态适应环境并通过降低能耗效率将走出AI发展路径^[16]。面对扑面而来的AI4E

浪潮,未来充满了无限的期待。但无论AI4E范式如何演进,人类重构数字生态系统网络发展范式的目标十分清晰,即构建像人脑一样具有对新环境与新挑战的自适应能力、新信息与新技能的自动获取能力、在复杂环境下进行有效决策并稳定工作能力的高阶智能系统,探索智能产生、智能涌现的本质。未来,“超融合网络与智能计算实验床”大科学装置如同一个“数字孪生脑”,通过模仿类似人脑复杂结构与运行机理,开启走向通用人工智能的大门。

在AI4E范式跃迁的临界点、数字生态系统转型的关键阶段,需要敢于提出新理论、开辟新领域、探索新路径,在独创独有上下功夫。第一,要有在范式变革窗口期建立开辟非对称赛道的创新自信,DeepSeek的成功足以证明,在工程智能领域中国完全可能走通自主创新之路,技术后发者通过架构革命一定能够实现代际跨越。第二,要有主动挑战传统技术前提的勇气和胆识,突破工程科学长期固化的学科边界与确定性假设,敢于破除“技术天花板”的自我设限,敢于在“正确”与“可行”的共识之外探寻新可能。第三,要建立包容多样性创新的制度和环境,支持包容性边缘创新的环境氛围,重视非共识技术、重视非主流团队,允许科研资源投向高风险领域形成“鲶鱼效应”,培育颠覆性创新的制度土壤;第四,要构建自主知识体系从根子上终结跟随者困局,构建中国话语体系主导下的AI4E范式,推动科技自主创新和人才自主培养良性互动。形成中国式数字生态系统建设与发展的自主架构,打破50年来对西方信息技术领域的“课本依赖”“方法依赖”“工具依赖”。第五,要以Π型人才重塑教育范式,打破“流水线式”教育同质化、实现个性化知识供给,让每个学生都能获得量身定制的学习路径^[17];构建“深度×广度”的复合能力培养模式,让学生具备跨学科视野和独立的价值判断力;推行“在做中学”的场景化教育,让学生在解决实际问题中锤炼创新能力。

参考文献(References)

- [1] Simon H A. The Sciences of the Artificial[M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1996.
- [2] Harari Y N. Homo Deus: A brief history of tomorrow[M]. New York: HarperCollins, 2016.
- [3] Ashby W R. Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine[M]. London: Chapman & Hall,

- 1956.
- [4] Prohaska T, Irrgeher J, Benefield J, et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 2022, 94(5): 573-600.
- [5] Castells M. The rise of the network society[M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010.
- [6] Zorzi M, Zanella A, Testolin A, et al. Cognition-based networks: A new perspective on network optimization using learning and distributed intelligence[J]. IEEE Access, 2015, 3: 1512-1530.
- [7] Xiao S H, He D D, Gong Z B. Deep-Q: Traffic-driven QoS inference using deep generative network[C]//Proceedings of the 2018 Workshop on Network Meets AI & ML. New York: Association for Computing Machinery, 2018.
- [8] Wang L Y, Jajodia S, Singhal A, et al. k-zero day safety: A network security metric for measuring the risk of unknown vulnerabilities[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2014, 11(1): 30-44.
- [9] Hennessy J L, Patterson D A. A new golden age for computer architecture[J]. Communications of the ACM, 2019, 62(2): 48-60.
- [10] Software Defined System on Wafer. 2024 Annual development report on software-defined system-on-wafer (SDSoW) [R]. Tianjin: Software Defined System on Wafer, 2024.
- [11] 邹宏, 张帆, 尚玉婷, 等. 全球数字生态系统底层驱动范式转型特征及研究启示[J]. 中国工程科学, 2025, 27(1): 98-110.
- [12] 钱学森. 论系统工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [13] 邹江兴, 邹宏, 薛向阳, 等. 内生安全赋能网络弹性的构想、方法与策略[J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 106-115.
- [14] ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J]. Physics Letters B, 2012, 716(1): 1-29.
- [15] Geoff H. Will digital intelligence replace biological intelligence?[R]. Toronto: Vector Institute for Artificial Intelligence, 2024.
- [16] Friston K J, Ramstead M J, Kiefer A B, et al. Designing ecosystems of intelligence from first principles[J]. Collective Intelligence, 2024, 3(1): 1-19.
- [17] 邹江兴, 邹宏, 陆杰青. 新兴发展学科高层次人才培养探究: 以网络空间安全学科为例[J]. 学位与研究生教育, 2018(4): 38-44.

AI for Engineering: Driving a new paradigm for digital ecosystem network development

WU Jiangxing^{1,2}, ZOU Hong¹, ZHANG Fan^{1,2}, LIU Qinrang^{1,2}, GAO Yanzhao², SHANG Yuting^{1*}, QI Xiaofeng²

1. Institute of Big Data, Fudan University, Shanghai 200433, China

2. National Digital Switching System Engineering & Technological R & D Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract Artificial Intelligence (AI), as a core driver propelling socioeconomic development, is triggering a dual paradigm shift in scientific research (AI for Science, AI4S) and engineering technology (AI for Engineering, AI4E). This paper systematically elaborates on the driving forces, mechanisms, and practical pathways for the paradigm shift in digital ecosystem network development driven by AI4E. It points out that the traditional development paradigm of digital ecosystem networks faces a fundamental conflict between "rigid architectures and diversified scenarios", necessitating reconstruction with the goals of being "hyper-converged, highly trustworthy, and integrated". The paper introduces the critical foundations, technological underpinnings, and operational mechanisms for this AI4E-driven paradigm shift in digital ecosystem networks. It delineates the main characteristics of the new paradigm from perspectives including mindset, methodology, practical norms, and developmental pathways. Furthermore, it presents practical explorations of AI4E-empowered transformation: proposing the Polymorphic Intelligent Network Environment (PINE) based on Generative AI to forge the "second curve" of network technology systems; introducing On-Wafer Generative Vari-Structure Computing to foster new "chip species" of intelligent computing power; promoting endogenous safety and security (ESS) to empower the resilience engineering of digital system networks, thereby enhancing the endogenous security of AI application systems; and advocating for the construction of the "Hyper-Converged Networks and Intelligent Computing Testbed" as a major scientific facility. This testbed will validate the scientific conjecture that "structure determines efficiency/security/diversity", providing support for building an independent knowledge system, advancing independent sci-tech innovation, and deepening reforms in self-reliant talent training. The study provides both a theoretical framework and technological pathways for the paradigm evolution of digital ecosystem networks in the AI era.

Keywords digital ecosystem; hyper-converged networks; generative vari-structure computing; endogenous safety and security; Generative AI ●



(责任编辑 王微)