



XXXX

全时全域通信网体系架构、关键技术与实证应用释义

尹喜阳¹, 王忠钰¹, 岳顺民², 盆海波³

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300010;

2. 中国电力教育协会, 北京 100068;

3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 在数字化转型深度融合的时代背景下, 传统通信网络受限于地理环境与业务体制的割裂, 在全域覆盖、业务适配、资源全局优化等方面存在显著局限。为突破这一瓶颈, 本文系统性地提出了一种新型通信范式——全时全域通信网理论与技术。首先, 本文系统阐述了全时全域通信网(ATAZ)的基本概念, 并提出ATAZ多层级体系架构; 其次, 深入剖析了ATAZ所面临的核心瓶颈, 并在此基础上构建了各层级的关键技术体系及特征; 进而, 梳理了ATAZ在八大类典型场景的适用性, 并以能源电力系统为典型领域呈现了涵盖源网荷储全环节创新实践案例; 最后, 详细分析了ATAZ在未来通信体系中的关键地位与发展潜力, 为下一代通信网络的演进提供理论依据与技术路径。

关键词: 全时全域通信网; 基本概念; 体系架构; 通信范式

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

All-Time All-Zone Communication Networks: An Explication of Architecture, Key Technologies, and Empirical Applications

YIN Xiyang¹, WANG Zhongyu¹, YUE Shunmin², PEN Haibo³

1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China

2. China Association of Electric Power Education, Beijing 100068, China

3. Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: In the era characterized by the deep integration of digital transformation, traditional communication networks—constrained by the fragmentation of geographical environments and service architectures—exhibit significant limitations in ubiquitous coverage, service adaptation, and global resource optimization. To overcome these bottlenecks, this paper systematically proposes a novel communication paradigm: the theory and technology of the All-Time All-Zone Communication Network(ATAZ). First, the paper systematically elaborates on the fundamental con-

收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-06-08

通信作者: 盆海波, penhaibo@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62401389); 国网天津市电力公司科技项目 (信通-研发 2023-02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62401389), Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company (ICT-R&D 2023-02)



cepts of ATAZ and proposes its multi-layered architecture. Second, it conducts an in-depth analysis of the core bottlenecks confronting ATAZ, based upon which the key technological systems and their defining characteristics at each layer are constructed. Furthermore, the applicability of ATAZ across eight major categories of typical scenarios is outlined. By adopting the energy and power system as a representative domain, the paper presents innovative empirical cases encompassing the entire "generation-grid-load-storage" chain. Finally, the critical position and development potential of ATAZ within future communication systems are analyzed in detail, thereby providing a theoretical foundation and technological trajectory for the evolution of next-generation communication networks.

Key words: All-Time All-Zone Communication Network, Fundamental concepts, System architecture, Communication paradigm

1 引言

随着全球数字化、网络化、智能化转型持续深化, 智慧城市的广域调控^[1]、智能交通的泛在协同^[2]、远程医疗的超低延迟^[3]、现代军事的极致可靠^[4]等对通信网络的需求正在发生深刻变革。人类社会对通信网络的需求正在发生深刻变革: 不仅要求“连接可达”, 更追求“泛在、智能、可靠、实时”的高品质服务^[5]。与此同时, 关键基础设施对通信韧性的迫切需求, 以及人工智能与六大重点领域广泛深度融合都对通信网络的覆盖能力、抗毁能力和自愈能力提出了更高要求^{[6]-[8]}。通信网已然从单纯的“信息管道”向支撑经济社会数字化转型的“智能服务平台”演进^[9]。

面对上述转型需求与技术机遇, 传统以地面为中心的层级化网络架构暴露出根本性的系统性瓶颈, 具体体现在三大核心维度: 其一, 业务全域覆盖连续性方面: 在偏远新能源场站、输电走廊、海洋作业区等关键业务区域, 地面通信难以实现经济有效的全覆盖, 不同网络间的资源难以共享、数据难以互通, 形成“空间盲区”与“数据孤岛”的双重制约; 其二, 业务适配精准性方面: 卫星、蜂窝、专网等异构网络间缺乏协同机制, 跨域切换时延与中断概率直接影响工业控制、远程运维等关键业务的可行性; 其三, 资源全局优化方面: 频谱、计算、存储等多维资源分

属不同网络域, 呈“条块分割”状态, 动态调度能力缺失, 导致局部拥塞与全局闲置并存的资源错配困局。

为系统性解决上述瓶颈, 本文提出一种新型通信范式——全时全域通信网 (All-Time All-Zone Communication Network, ATAZ)。“全时全域”面向应用领域基础设施及其所涉及的业务相关地理与空间范围, 通过异构网络资源的深度融合, 实现业务相关节点在任何时间、任何条件下的可靠接入与服务质量保障^[10]。ATAZ并非对现有网络的简单叠加, 而是通过统一的资源抽象、智能的跨域协同与内生安全机制, 在可管理、可协同的边界内, 形成超越单一网络能力的、具有全时全域自主演化与弹性可塑特性的通信连接平台。本文旨在对 ATAZ 这一新兴范式进行系统性梳理, 具体分为以下四个部分内容: 第二章深入剖析并给出 ATAZ 的核心概念与体系架构; 第三章分层分级阐述其使能关键技术链; 第四章, 分析其适用范围和典型场景实际应用方案; 第五章, 结合应用前景论述展望其未来研究方向, 以期为推动未来通信网络创新发展, 提供坚实的理论基石与清晰的技术路径。

2 ATAZ的概念与体系架构

通信网络的发展历程遵循明确的代际演进规律, 其核心驱动力源于对传输速率、覆盖范围与服务质量的持续追求^{[11]-[15]}。根据技术范式与架

构特征, 本文将该演进过程划分为如图1所示的五个关键阶段: 第一阶段: 通信的萌芽与奠基。以鼓声、烽火、旗语等声光编码为标志, 这一阶段实现了人类历史上最朴素的信息传递, 确立了“编码-传输-解码”的原始通信雏形; 第二阶段: 连接构建与电气化。以电报和电话的发明为核心, 这一阶段完成了通信从“自然信号”到“人工编码”、从“物理传递”到“电气传输”的历史性跨越, 确立了电路交换的基本范式, 构建了点对点、确定性连接的专有网络雏形; 第三阶段: 无线突破与全球互联。以蜂窝移动通信和TCP/IP协议为标志, 通过频率复用、小区分裂、分组路由等技术创新, 实现了从“固定”到“移动”的空间解放与从“电路交换”到“分组交换”的范式迁移, 确立了“任何地点、任何设备”均可接入的开放网络架构; 第四阶段: 宽带泛在与万物互联。以正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、多输入多输出(Multi-input Multi-output, MIMO)等先进空口技术与物联网规模化部署为驱动, 实现了移动宽带能力的跃升与连接对象的指数级扩展, 带宽与时延性能逼近香农极限, 网络能力从

“人人互联”向“万物互联”演进; 第五阶段: 智能内生与全域覆盖。以人工智能、云计算与通信网络的深度融合为核心特征, 推动网络从单纯的“信息管道”演变为可编程、可自智、可感知的“通信服务平台”, 网络内生智能、通感算智融合、确定性服务保障成为技术主线^{[16]-[18]}。这一变革的核心愿景, 正是本文所要探讨的主题——全时全域通信网, 构建一个覆盖天、空、地等全域边界, 实现业务无缝连接与智慧按需服务的智能服务平台。

2.1 ATAZ定义

在当前通信网络向高速率、大容量、天空地、全场景一体化、AI智能化和内生安全化演进的背景下, 面对广域泛在连接的海量并发全时性需求、深空/深海/深地的无缝连接全域性要求、信息-物理-社会域的多元模态跨域融合、工业控制与远程手术的超低延迟实时性约束、以及金融能源等关键领域的开放互联安全性挑战, 传统网络架构在全域覆盖连续性、业务适配精准性与资源优化全局性方面面临根本性局限。难以满足应用领域关键业务对全域覆盖、高可靠性和确定性服务的综合需求。为系统解决这一多维矛盾, 本

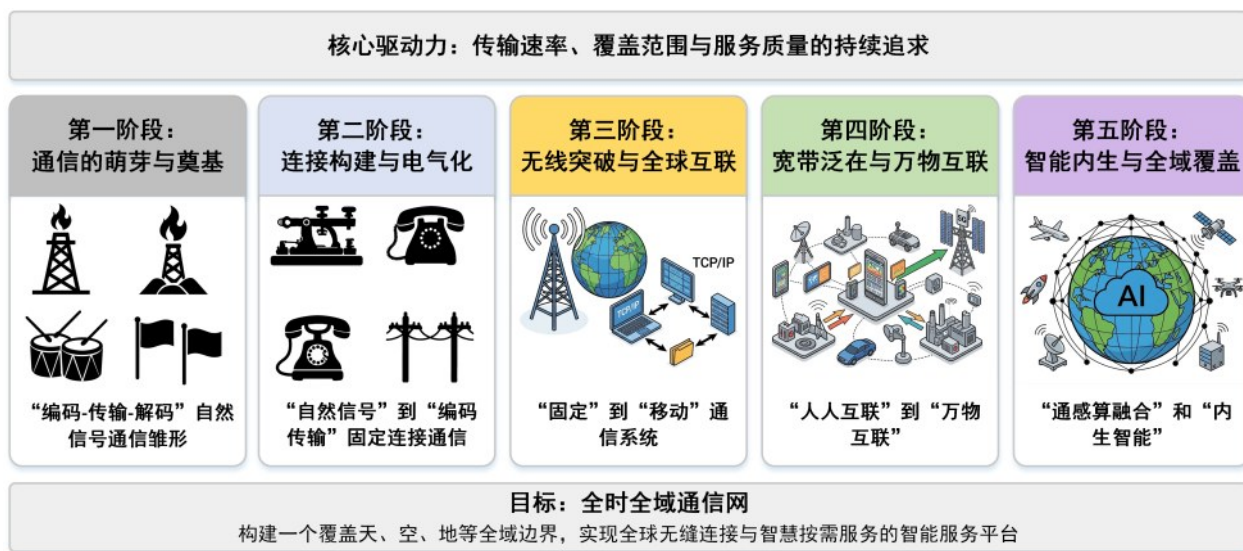


图1 通信网络代际演进图



文提出一种新型 ATAZ 网络范式释义，是面向未来关键基础设施的新型服务保障通信范式，其核心目标是在异构网络共存条件下实现业务驱动的资源协同、确定性服务保障和智能化运行控制。其定义如下。

定义： 全时全域通信网（ATAZ）是指面向应用领域基础设施及其所涉及的业务相关地理与空间范围，通过整合天基、空基和地基等多种通信资源，实现覆盖包括太空、低空、陆地、海洋（天、空、地、海）在内的所有区域的全时空、全连接的通信网络系统。ATAZ 基于控制论、网络演算等多种理论，通过融合星链通信、光通信、移动通信等多种技术，集成感知、采集、传输、处理等设备，实现广覆盖和 QoS 服务，确保了在任何时间、任何地点能提供连续稳定的信息传输和通信服务能力。ATAZ 具有广域连接大带

宽、低时延、高可靠、易接入、强安全等特点，是传统通信网的新概念。

2.2 ATAZ 体系架构

2.2.1 ATAZ 网络架构

基于 ATAZ 定义，通过对通信网络架构的探索和研究，本文设计出了一种 ATAZ 分层架构，自下而上分为硬件设备层、网络链路层、资源调控层、业务应用层，以及安全层。该架构可以实现在全时满足、全地域连接、全业务域服务各方面的功能和性能要求。分层设计不仅使得网络结构清晰、易于管理，同时还能够适应多样化的通信服务要求，进而保障不同层级的通信稳定性和可靠性。分层面的典型技术内涵与功能特征如图 2 所示。

硬件设备层为全时全域通信网提供物理基础与执行单元。在硬件设备层，通过部署天基



图2 全时全域通信网络架构

(GEO/MEO/LEO)、空基（高空平台、无人机）、地基（蜂窝基站、光纤接入、物联网网关）及海基（水面舰船节点、水下传感器）等多维物理设施，构建立体化的硬件资源池。该层的核心功能是信号的发射、接收、处理与转发，具体包括超宽带可重构射频前端、天空地一体化专用天线、全光通信节点以及高精度时间同步硬件等。硬件设备层的特点在于异构性与重构性：一方面，不同网络段的硬件形态差异显著，需通过统一的抽象接口兼容物理差异；另一方面，硬件需具备动态重构能力，可根据业务需求动态调度调整资源，实现功能按需加载、资源动态重组、参数实时调整，支撑多类业务场景、响应动态环境变化。

网络链路层应用排队论、虚拟化、图论、控制论等技术，实现通信网络连接的灵活功能扩展与多场景服务支持，如图3所示。该层打破卫星、蜂窝、Wi-Fi、光纤等不同制式网络之间的协议壁垒，构建统一的寻址机制、路由协议和移动性管理方案，将物理上分立的网络段整合为逻辑上的统一整体。网络链路层核心功能包括：业务流建模与拥塞控制，多业务并发时的服务质量，网络性能的动态优化^{[19]-[21]}。网络链路层的特点在于融合性与扩展性：一方面，它实现“多网合一”的逻辑互联；另一方面，通过引入数学工具实现对复杂网络行为的精准刻画与动态调控，为差异化业务场景提供可定制的路径服务能力。

资源调控层应用复杂网络理论、软件定义网

络、网络功能虚拟化、博弈论等技术，实现网络资源的灵活管理、跨层资源协同与路径调度、以及资源利用率优化提升，如图4所示。该层将频谱、算力、存储、覆盖等异质资源抽象为统一的“资源池”，通过智能算法实现资源的最优匹配与动态编排。资源调控层核心功能包括：网络资源的集中化编排与可编程调度，网络功能解耦与按需部署，以及资源竞争建模与优化调度策略，实现个体理性与全局最优的均衡^{[22]-[24]}。资源调控层的特点在于智能性与协同性：一方面，它以“提升资源利用率”为核心目标，推动网络从“静态配置”向“动态博弈”演进；另一方面，通过引入博弈论的激励相容策略，破解跨域资源调度中的利益冲突与协作壁垒，实现多主体参与下的资源高效协同。

业务应用层应用网络演算、深度强化学习、边云协同计算等技术，实现通信性能的实时优化和资源动态配置，确保业务的实时联通、稳定性、优化功能，如图5所示。业务应用层核心功能包括：满足业务端到端服务的性能边界的需求，支持动态环境下网络资源部署功能，实现业务的边云协同处理^{[25]-[27]}。业务应用层的特点在于开放性与自适应性：一方面，它使网络能力从“管道供给”走向“智能服务”；另一方面，通过持续学习与动态优化，实现对业务需求变化的快速响应与平滑适配。

安全层贯穿所有层次，应用身份认证、数据加密、网络空间零信任等技术，提供端到端的内

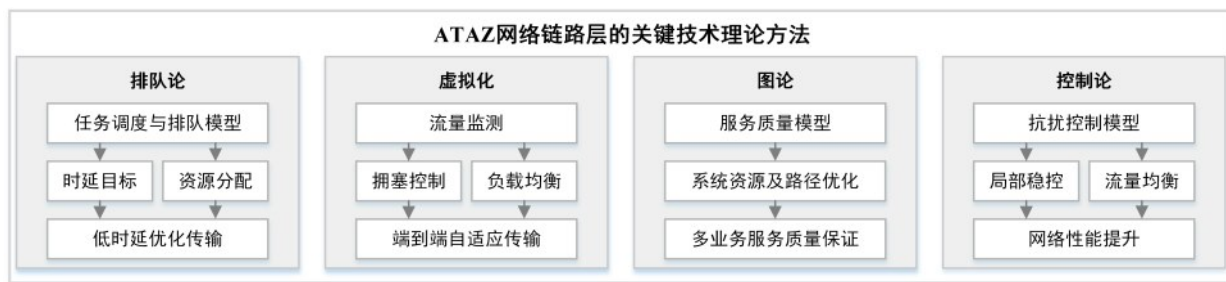


图3 ATAZ网络链路层的关键技术理论方法



图4 ATAZ资源调控层的关键技术理论方法



图5 ATAZ业务应用层的关键技术理论方法

生安全与可信保障。该层将安全设计从“外挂式”走向“内生式”，成为网络的原生属性，如图6所示。安全层核心功能包括：零信任架构实现“永不信任，始终验证”的访问控制；量子密钥分发为关键链路提供理论上的无条件安全传输保障；内生安全机制通过多路径传输、网络编码与自愈能力，确保网络在遭受攻击或破坏时仍能维持基本服务能力^{[28]-[31]}。安全层的特点在于体系化与主动性：一方面，它并非单一的安全技术堆叠，而是贯穿物理、网络、资源、应用各层的纵深防御体系；另一方面，从事后补救走向事前

预防，从被动防御走向主动免疫。

2.2.2 ATAZ跨层动态协同运行机理

基于设计的“硬件设备层—网络链路层—资源调控层—业务应用层—安全层”的ATAZ网络架构，本文设计如图7所示的面向业务跨层动态协同运行机理图。其中，硬件设备层负责全域感知与业务执行，通过传感器、工业设备、电力终端、车载终端及无人机等多类型设备实时采集业务状态和环境信息；网络链路层依托6G、TSN、DetNet、光纤通信、低轨卫星、高空平台以及无人机中继等异构网络构建多模态融合传输通道，

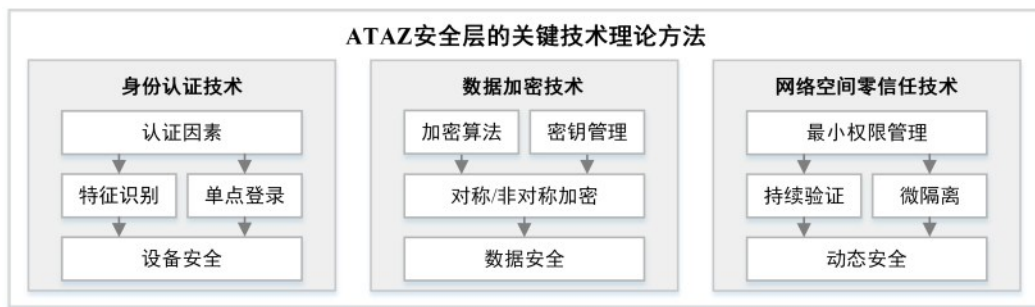


图6 ATAZ安全层的关键技术理论方法

实现业务数据的全域互联和确定性传输；资源调控层通过资源感知、资源抽象、资源优化、仿真推演和切片管理等功能模块，对通信资源、算力资源、存储资源、数据资源及能源资源进行统一建模和动态调度，实现多维资源协同优化；业务应用层根据能源电力、智能制造、智能交通、智慧城市等不同场景的服务需求生成业务请求和服务等级协议（SLA）约束，并驱动资源调控层实施差异化资源保障。

在运行过程中，业务数据流由硬件设备层经网络链路层逐级汇聚至资源调控层和业务应用层，形成全域业务感知能力；控制信令流由业务应用层和资源调控层向下传递至网络链路层和硬件设备层，实现业务驱动的闭环控制；资源协同流实现通信资源、算力资源与存储资源之间的动态匹配和联合优化。与此同时，AI智能体体系持续感知网络状态、资源状态和业务状态，通过“感知—预测—决策—优化”闭环实现网络运行策略的自适应调整；安全层则基于零信任架构，将身份认证、访问控制、威胁检测、安全策略与

安全响应等能力贯穿各层运行全过程，实现全链路、全生命周期的安全保障。可以看出，ATAZ的跨层协同本质上是一个以业务需求为驱动，以资源优化调度为核心，以网络状态反馈为调节依据的闭环控制系统。因此，本文引入反馈控制理论，ATAZ跨层动态协同过程如下：

设业务应用层在时刻 t 的服务需求表示为

$$S(t)=[B_{SLA}(t), L_{SLA}(t), R_{SLA}(t), \dots] \quad (1)$$

式中， B_{SLA} 、 L_{SLA} 和 R_{SLA} 分别表示业务的带宽需求、时延需求和可靠性需求以及其他需求，共同构成业务的服务等级协议（Service Level Agreement, SLA）。

资源调控层根据业务需求进行资源优化计算，并生成资源配置向量

$$U(t)=[b(t), c(t), p(t), \dots]=f(S(t)) \quad (2)$$

式中， $b(t)$ 、 $c(t)$ 和 $p(t)$ 分别为带宽资源、计算资源、业务优先级等资源分配。资源调控结果进一步映射至网络链路层，对链路资源和网络参数进行动态配置，其QoS参数表示为：

$$Q(t)=[q_b(t), q_p(t), q_r(t), \dots]=g(U(t)) \quad (3)$$



图7 ATAZ跨层动态协同运行机理



式中, $q_b(t)$ 、 $q_p(t)$ 和 $q_r(t)$ 分别为链路带宽、队列优先级、链路冗余等级等网络链路资源配置。

进一步建立SLA需求到QoS配置之间的跨层映射关系 $Q(t)=g(f(S(t)))$ 。

完成资源配置后,将实时监测网络运行状态,并形成性能反馈:

$$Y(t)=[W(t), T(t), P(t), \dots] \quad (4)$$

式中, $W(t)$ 、 $T(t)$ 和 $P(t)$ 分别为带宽、时延、业务成功传输率等网络运行状态。

依据业务目标与网络运行状态计算反馈误差

$$E(t)=S(t)-Y(t) \quad (5)$$

反馈控制器根据误差动态修正资源配置策略:

$$U(t+1)=U(t)+KE(t) \quad (6)$$

式中, K 表示反馈控制增益矩阵,其决定系统对网络状态变化的响应度。当业务需求发生变化或链路性能下降时,控制器能够依据实时反馈自动调整资源配置,使网络逐渐逼近期望运行状态,实现业务需求驱动的动态资源优化。

综上所述,ATAZ的跨层动态协同并非简单的信息传递,而是构建了“业务需求感知—资源优化调度—网络执行控制—性能反馈校正”的闭环反馈控制体系。业务应用层通过SLA描述业务目标,资源调控层完成资源优化与策略生成,网络链路层依据QoS参数实施资源配置,并将网络运行状态实时反馈至控制中心形成闭环调节机制。该模型实现了业务需求向网络资源的动态映射,使ATAZ各层之间形成可分析、可优化、可验证的跨层协同机制。

2.3 ATAZ系统特征

全时全域通信网(ATAZ)通过范式重构给出了系统性解决方案。其设计理念与架构创新集中体现为以下五大核心特征,这些特征相互关联、协同支撑,共同构成了ATAZ区别于传统通信网络的本质属性,旨在突破地理环境与业务体

制间的孤立性约束,实现全时空尺度下的按需服务保障与资源极致利用。

全时性:全时性要求ATAZ络能够在任何时间、任何条件下提供稳定的不同时间尺度通信服务,ATAZ都能确保不间断的通信。全时性的实现依赖于动态感知与预测能力——网络需实时监测状态变化,预判潜在中断风险,并在用户感知之前完成路径切换与资源调度。

全域性:全域性要求ATAZ络能够覆盖不同空间领域和不同业务领域,保证各业务领域之间的通信服务。全域性的核心挑战在于异构网络的融合——不同网络段的物理特性、协议体系、资源禀赋差异巨大,需要通过统一的抽象与调度机制,实现“任何地点即插即用”的泛在接入体验。

跨域性:跨域性意味着ATAZ络不仅能够实现不同区域的连接,还能够支持多领域间的协同工作和数据共享。跨域性的本质是破除“网络孤岛”与“行业壁垒”。

实时性:实时性要求ATAZ络具备低延迟、高带宽的特性,以满足工业控制、远程医疗等对实时性要求极高的场景。实时性的实现依赖于通感算智深度融合,将“传输响应”转化为“服务响应”。

安全性:安全性是ATAZ络从物理层到应用层提供全方位防护,具备自愈能力和智能监控,有效应对内外部威胁,保障数据的机密性、完整性与可用性。安全性具备实时感知威胁、动态调整策略、自动恢复服务功能,以有效应对内外部攻击。

3 ATAZ的关键技术

基于ATAZ的定义及其核心特征,ATAZ依托6G全场景统一硬件平台技术、服务质量控制关键技术、资源优化调控关键技术、延时边界计算关键技术与零信任安全防护关键技术的支撑,实

现了高效资源管理、动态性能保障、多层次安全防护和自适应通信能力。这些关键功能不仅解决了当前通信系统面临的性能瓶颈和安全挑战，也为未来的多场景应用提供了强有力的理论支撑和技术保障，展示出其在现代通信网络中的独特优势。确保通信网在复杂环境下的高效性、可靠性和适应性。

3.1 面向6G的全场景统一硬件平台技术

当前通信网络面临的核心问题在于硬件设备的“固化专用”。传统硬件受限于单一频段、固定参数、静态配置，导致需为不同场景配备多套独立设备，成本高昂、资源利用率低下，难以支撑新一代“天空地海一体化”与“全频段自适应利用”的目标。面向6G的全场景统一硬件平台技术以“软件定义、可重构、智能化”为核心，通过硬件资源虚拟化与功能解耦，将专用设备重构为“可编程”的通用平台：射频前端实现微波至太赫兹的多频段动态适配，基带处理支持不同波形与协议栈的按需加载，光电传输实现光层资源的灵活调度。该技术实现了从“固化专用”到“软件定义”的范式转变，使同一硬件平台能够动态适配多种网络制式、灵活调度多类频谱资源、实时响应环境变化，为远程控制、全息通信等差异化业务提供按需适配的硬件基础，奠定新一代“全域覆盖、全频利用、全场景适配”的硬件设备基座。

3.2 ATAZ 服务质量控制关键技术

当前通信网络面临的核心问题在于其静态或半静态的资源分配模式难以适应 ATAZ 所面临的极端动态环境，如卫星节点的高速移动、高空平台信道的大尺度衰落、以及业务需求的突发性，导致服务质量剧烈波动，无法为关键应用提供服务质量性能保障。需要 ATAZ 服务质量控制关键技术，该技术通过将整个网络视为一个动态系统，通过连续或准连续的反馈机制，实时感知网络状态（如链路质量、队列长度、业务优先级）

与外部干扰（如拓扑变化、突发流量），并与预设的 QoS 目标（如时延上界、丢包率阈值）进行比较，进而生成控制信号，动态调整路由路径及网络切片资源通信参数，实现从“尽力而为”到“按需保证”的范式转变，使得 ATAZ 网络在高度异构和时变的天、空、地环境中，依然能为远程控制、全息通信等差异化业务提供可控制的端到端服务质量。

3.3 ATAZ 资源优化调控关键技术

当前通信网络面临的挑战是地理域与业务域的双重割裂。天基、空基、地基网络资源分属不同物理空间，不同业务网络资源彼此隔离，数据难以互通、能力难以共享，难以实现全局意义上的协同，导致在应对广域突发流量或跨业务协同场景时，可能出现局部拥塞与局部闲置并存的低效局面。需要 ATAZ 资源优化调控关键技术。该技术通过复杂网络理论则从宏观层面，将不同域抽象为具有不同属性与连接关系的节点，通过分析其拓扑特性与动力学行为，设计最优的跨域资源流动与协同策略，实现信道、频谱、算力、存储等资源在全局范围内的“透视”与统一编排，并通过分布式感知机制实现对全网资源状态与业务需求的实时捕获，在集中式与分布式架构下求解资源调度的全局最优解或近似最优解，为各网络域内的实时资源分配提供决策。最终建立一个“全网一盘棋”的弹性资源池，实现资源利用效率的最大化，ATAZ 网络通过资源智能优化调控，提供无缝的服务体验。

3.4 ATAZ 延时边界计算关键技术

当前通信网络在性能保障上的瓶颈在于其基于经验统计的服务质量模式，无法为远程手术、自动驾驶等对时延有硬实时要求的任务提供严格的、可实现的性能边界。ATAZ 延时边界计算关键技术以网络演算理论为数学基础，为数据流定义到达曲线、为网络节点定义服务曲线，通过随机网络演算（Stochastic Network Calculus, SNC）



理论严格推导端到端时延上界、积压数据量上界等确定性性能边界，并结合网络资源优化调度策略，在网络演算给出的“硬”边界内进一步降低平均时延^[27]。其中，SNC作为NC理论的一个重要分支，建模过程如下：

定义1： 随机到达曲线：当某一累积输入数据流 $A(t)$ 对于任意的 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$ 满足：

$$P \left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} \{A(s, t) - \alpha(t-s)\} > x \right\} \leq f(x) \quad (7)$$

式中，到达累积量 $A(s, t) = A(t) - A(s)$ ， $\alpha(t)$ 为 $A(t)$ 的随机到达曲线， $f(x)$ 称作随机到达曲线的边界函数。

定义2： 随机服务曲线：当累积输出数据流 $A^*(t)$ 对于任意的 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$ 满足：

$$P \left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} \{A \otimes \beta(s) - A^*(s)\} > x \right\} \leq g(x) \quad (8)$$

式中， $\beta(t)$ 为随机服务曲线； $g(x)$ 称作随机服务曲线的边界函数。

通信网络的随机损失过程 $I(t)$ 对于任意的 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$ 满足：

$$P \left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} \{I(s, t) - \alpha^*(t-s)\} > x \right\} \leq f^*(x) \quad (9)$$

式中，通信网络的损失累积量为 $I(s, t) = I(t) - I(s)$ ， $\alpha^*(t) = \rho^* t$ 为随机损失过程的随机损失曲线， ρ^* 表示错误数据传输的速率， $f^*(x) = p e^{-qx}$ 为随机损失曲线的边界函数。

将引入损失过程的随机服务曲线称作严格随机服务曲线，对于任意的 $0 \leq s \leq t$ 及 $x \geq 0$ ，严格随机服务模型满足：

$$P \{ \beta(t-s) - S(s, t) > x \} \leq g(x) \quad (10)$$

式中， $S(s, t)$ 为服务累积量， $\beta(t)$ 为随机严格服务曲线； $g(x)$ 为随机严格服务曲线的边界函数。

在分析单服务器系统时，SNC含义是一条流量到达模型满足 $A(t) \sim \langle f, \alpha \rangle$ 的数据流进入了一个随机服务模型满足 $S(t) \sim \langle g, \beta \rangle$ 的系统，系统的输出数据流为 $A^*(t)$ 。

当通信网络中的某条实时业务流 $A_i(t, x) \sim_{vb} \langle f^i(x), \alpha^i(t) \rangle$ 经过包含 k 个服务节点的端到端链路到达目的节点时，在每个节点处有 m 条来自其他设备的竞争数据流与该数据流一同竞争节点提供的服务。于是问题就变成了在关键流量和竞争数据流量共享服务的基础上确保时间敏感型业务的可靠性传输。所以，基于SNC随机到达过程的流量模型为：

$$A_{c_j}(t, x) \sim_{vb} \langle f^j(x), \alpha^j(t) \rangle \quad (11)$$

式中， $\alpha^j(t) = rt + b$ 为随机到达曲线， r 为到达曲线的数据传输速率， b 为数据突发量。则边界函数为：

$$f^j(x) = 1 - \left(1 - \frac{\lambda l}{r} \right) \sum_{\theta=0}^{\frac{x}{l}} \left\{ e^{-\frac{\lambda l}{r} \left(\theta - \frac{x}{l} \right)} \frac{\left[\frac{\lambda l}{r} \left(\theta - \frac{x}{l} \right) \right]^\theta}{\theta!} \right\} \quad (12)$$

式中， λ 为竞争数据流的平均到达速率； l 为数据包大小。

对于单节点来说，第 i 个节点提供的严格随机服务模型。则该节点提供给传输的实时业务流 A_i 的剩余服务应满足

$$S_{t_i}(t) \sim_{SSC} \langle g_{t_i}(x), \beta_{t_i}(t) \rangle \quad (13)$$

式中，边界函数 $g_{t_i}(x)$ 和服务曲线 $\beta_{t_i}(t)$ 分别为

$$g_{t_i}(x) = g_i \otimes f_i^j(x) = g_i \otimes f_i^1(x) \otimes \cdots \otimes f_i^m(x) \\ \beta_{t_i}(t) = \beta_i(t) - \alpha_i^j(t) = R_{t_i} t - \alpha^*(t) - L_{\max} - \sum_{j=1}^m r_i^j t - \sum_{j=1}^m b_i^j \quad (14)$$

基于SNC理论可以实现了服务边界从“经验估计”到“数学可证”转变，结合各个领域的通信影响因素进行应用建模，使ATAZ网络在系统设计阶段即可量化评估任意端到端服务性能边界，为实时业务提供精准可控的确定性时延传输通道，确保远程医疗、智能交通等时间敏感型业务具有确定性的服务保障。

3.5 ATAZ 零信任安全防护关键技术

当前通信网络面临传统边界安全模型失效的严峻挑战。ATAZ 的开放性与异构性使得基于物理位置的“内网信任”假设不复存在，网络攻击面急剧扩大，静态防御策略难以应对持续演进的未知威胁。需要 ATAZ 零信任安全防护关键技术。该技术通过构建攻击者与防御者之间的收益矩阵与策略空间模型，能够预测攻击者的最优策略，并据此动态调整防御资源（如部署诱饵、切换路径、强化认证），实现主动、自适应的安全防护。这一决策能力嵌入到零信任架构的“永不信任，持续验证”核心机制中，通过综合用户信息、设备状态、行为属性、风险分析等信任特征，对每个访问请求进行基于上下文的动态信任评估，实施最小权限的细粒度访问控制。从而构建一个具备“认知智能”的内生安全免疫系统，使 ATAZ 网络在面对隐蔽、持续的高级可持续威胁时，能够实现从被动响应到主动预测、从静态防护到动态博弈的根本性转变，确保关键基础设施数据的安全与业务的连续性。

4 ATAZ 的实证应用

ATAZ 的体系架构与关键技术，为其在垂直行业的深度融合与创新应用奠定了坚实基础。其全时性、全域性、跨域性、实时性与安全性等核心特征，有效破解了传统行业在数字化转型过程

中面临的通信瓶颈。本章首先系统梳理 ATAZ 的典型应用领域，揭示其技术能力向业务价值转化的基本路径；随后，以能源电力系统为代表性实证场景，深入剖析 ATAZ 关键技术如何从“源、网、荷、储”全环节赋能新型电力系统的构建；最后，对 ATAZ 的实证应用价值进行总结，阐明其在关键基础设施数字化转型中的核心支撑作用。

4.1 ATAZ 的典型应用领域

ATAZ 的核心优势在于打破传统通信网络的地域和时空限制，实现不同区域、不同业务需求之间的无缝连接。基于其五大核心特征，为国民经济与社会生活的多个关键领域提供了理论和技术支撑，可系统概括为八大核心领域：智慧城市、智能制造、智能交通、智能家居、远程医疗、精准农业、数智教育、现代军事。表 1 展示了这八大应用领域及其与 ATAZ 核心特征的对应关系，揭示了技术能力向业务价值转化的基本路径。各领域对 ATAZ 核心特征的需求强度与技术融合路径如下所述。

在智慧城市领域^[32]，ATAZ 作为智慧城市的核心能力之一，保证了其跨域性与实时性。ATAZ 通过跨域资源调控打破交通、安防与能源的数据壁垒，将通信能力从“单域尽力而为”升级为“全域确定性保障”。依托网络演算与深度强化学习，系统可支撑百万级终端数据的秒级汇

表 1 全时全域通信网八大应用领域与核心特征映射表

应用领域	全时性	全域性	跨域性	实时性	安全性	典型应用场景
智慧城市	●	●	○	●	●	城市级感知神经中枢、百万级终端数据秒级汇聚分析
智能制造	●	○	●	●	●	云端 PLC 控制、设备数字孪生、全域产能实时调度
智能交通	●	●	●	●	●	车联网 V2X、北斗高精定位、人车路全要素实时交互
智能家居	●	○	○	●	●	全时家庭物联网、云端智能中控、毫秒级家电响应
远程医疗	●	●	●	●	●	5G 会诊系统、可穿戴监测仪、跨地域实时诊疗
精准农业	●	●	○	○	○	卫星遥感监测、5G 农技传输、无人化农业生产
数智教育	●	●	●	○	●	教育专网、云端教研大脑、卫星直播教学
现代军事	●	●	●	●	●	天基侦察链、抗干扰量子通信、战场态势全时感知

●表示强相关，○表示相关



聚与跨部门协同调度,构建具备实时响应能力的城市运营大脑。

在智能制造领域^[33],ATAZ的全时性、实时性与安全性是构建智能工厂的核心支柱。ATAZ以工业级全时通信基座替代传统现场总线,为云端PLC控制与设备数字孪生提供微秒级确定性时延。通过零信任安全机制严格校验每一台工业终端,构建跨时区、高可靠的全域产能实时调度体系。

在智能交通领域^[34],ATAZ的全域性与实时性特征得到极致体现。智能交通依托ATAZ全域协同网络,打通人、车、路、云的时空阻隔。基于车联网V2X与北斗高精定位,结合资源优化调控技术,在高速移动场景下实现近零时延的立体化交通治理与碰撞预警。

在智能家居领域^[35],ATAZ的全时性与实时性保障了无缝的智慧生活体验。智能家居依托全时家庭物联网,服务质量控制技术通过优先级队列管理,确保安防告警、紧急呼叫等关键数据的毫秒级优先传输。结合边云协同调度,构建24小时无缝衔接的智慧生活空间。

在远程医疗领域^[36],ATAZ的全时性、全域性和实时性是跨越医疗资源鸿沟的关键。ATAZ通过融合5G与卫星链路,为远程手术提供有界抖动的视频与控制流传输。结合零信任动态认证与端到端加密,构建覆盖城乡、全天候的健康守护体系,确保诊疗指令的不可篡改性。

在精准农业领域^[37],ATAZ的全域性与全时性有效弥补了农村及偏远地区的通信盲区。精准农业依托ATAZ天空地一体化监测网络,实现广袤农田墒情、苗情的实时回传。基于服务质量控制技术智能调度频谱资源,为无人化播种、施肥、收割农机提供稳定连接与精准指令下发。

在数智教育领域^[38],ATAZ的全域性与跨域性为促进教育公平提供了新路径。ATAZ突破地理空间限制,依托全域覆盖的教育专网与卫星直播技术,实现高清互动课堂的流畅体验。通过边云协同调度,将优质教育资源下沉,构建无时差、无边界的智慧教育生态。

在现代军事领域^[39],ATAZ的全域性、实时性、安全性是决定战场态势感知与协同能力的关键。ATAZ构建全域通信作战系统,融合天基侦察链与抗干扰量子通信。通过“永不信任,始终验证”的动态防御体系,确保在强电磁干扰环境下,指挥指令与战场态势数据仍能瞬时响应与跨域协同。

在上述应用领域中,ATAZ延时边界理论通过到达曲线和服务曲线描述网络业务流特性,可为不同业务提供端到端时延上界分析。然而,ATAZ所面向上述典型应用场景具有明显异构特征,不同业务在业务到达模式、网络拓扑、节点移动性及实时性需求等方面存在较大差异,八类典型应用领域下模型参数配置特点^{[40][41]},如表2所示。

表2 典型应用领域下ATAZ延时边界理论参数适配分析

应用领域	数据包大小	竞争流到达速率	主要影响因素	SNC参数修正
智慧城市	中	高	海量终端接入	提高到达曲线的平均到达率与突发参数
智能制造	小	中	工业实时控制	提高服务曲线最小保证服务率
智能交通	小	高	高速移动、多普勒频移	引入信道时变修正因子
智能家居	小	中	局域业务	标准到达曲线与服务曲线模型
远程医疗	大	中	视频流和控制流异构耦合	多优先级服务曲线
精准农业	中	低	广域覆盖	降低到达曲线平均到达率
数智教育	大	中	高清视频业务	增大到达曲线突发参数
现代军事	小	高	强干扰环境	多路径并行复合服务曲线

综上所述, ATAZ 在八大典型应用领域中, 并非简单提供“连接可达”的基础能力, 而是通过其五大核心特征与关键技术的深度融合, 实现了从“信息管道”向“智能服务平台”的范式跃迁。无论是智慧城市对跨域数据协同的需求、智能制造对确定性时延的苛求, 还是远程医疗对安全可靠的极致追求, ATAZ 均能以其架构优势与理论技术, 为相关领域提供了从底层原理到方法构建再到技术应用的系统支撑, 其范式价值与应用价值在不同场景中得到了充分验证与体现。

4.2 重点应用领域: 能源电力系统的全时全域赋能

在众多应用场景中, 能源电力系统因其国家战略、运行连续性和环境复杂性, 成为 ATAZ 最具代表性的实证应用领域。在“双碳”目标驱动下, 传统电力系统正演变为源网荷储高度协同、随机波动性显著增强的新型电力系统, 对通信网络的覆盖、可靠、实时及安全能力提出了前所未有的挑战^[42]。ATAZ 的理论与技术, 恰好为破解这一困局提供了系统化解决方案, 其关键技术贯穿于新型电力系统“源、网、荷、储”的全环节。

4.2.1 源: 新能源的广域协同与精准调控

“源”侧以风电、光伏为代表的新能源, 具有地理分散、出力波动、地处偏远等特点, 对通信的“全域性”与“全时性”提出基础要求。

全域数据采集与可靠性保障: 针对广袤风电场、荒漠光伏电站等偏远场景, 传统地面通信难以实现全覆盖。ATAZ 通过融合天基、空基与地基网络, 构建天空地一体化的立体覆盖体系。基于图论的强 QoS 路由算法在此基础上, 为每个发电单元动态规划多路径冗余传输链路, 确保在恶劣天气或局部链路中断时, 关键状态数据(如风机振动、逆变器温度)仍能通过备用路径实时回传, 实现发电单元的全域覆盖与高可靠监控。国网长沙供电公司在电力通信接入网侧开展将天

基、空基与地基整合的工程实践^[43]。其中, 终端站点以有线 EPON 光纤专网承载涉控类业务, 在光纤难以延伸或末端区段辅以 230MHz 电力无线专网通道。针对原有模式主备切换依赖人工干预, 两套接入方式并未真正互联互通, 通信自愈能力不足之处, 国网长沙供电公司提出基于双向转发检测链路双向监测的自动切换方案: 由双向转发检测机制实时判定光纤主路可达性, 检测到失效/劣化后通过单刀双掷隔离+Bypass 旁路+隧道封装完成业务从光纤到无线专网备份的无感迁移, 并满足电力通信所要求的物理隔离与业务传输时延约束。方案经实物仿真环境搭建验证, 故障切换以及故障回切均在毫秒级实现正常接收数据包, Bypass 功能实现了从 10 分钟级到毫秒级快速切换, 表明该机制可适用于复杂配网通信拓扑, 提升网络自愈能力, 使“有线主用+无线备份”从两张网变成同一张可管控的承载面, 有效解决“通信孤岛”问题。

精准功率控制与响应时延: 调度中心对新能源场站的功率控制指令要求严格的“实时性”与确定性。基于控制论的服务质量控制方法将发电单元与通信网络视为一个闭环控制系统, 利用李雅普诺夫稳定性理论, 动态调整控制周期、设备功率与调制编码策略, 确保调节指令的快速、精准下发, 将控制时延控制在毫秒级以内, 有效平抑新能源波动性对主网的冲击, 保障电网频率稳定。

4.2.2 网: 电力网络的立体感知与韧性防御

电力网络作为覆盖地域极广、承载设备极多、产生数据量极大的关键基础设施, 其拓扑结构复杂、运行环境恶劣、业务响应要求高, 对通信网络的“全域”覆盖能力与“主动”防御韧性提出了极致需求。

脆弱点识别与网络韧性提升: 通信网节点众多、链路冗长, 传统规划方式难以应对复杂故障场景。基于复杂网络理论的解析方法通过对网络



拓扑结构（如度数、介数、聚类系数）进行量化分析，精准识别出影响全网连通性的关键“枢纽节点”与“脆弱链路”，可指导冗余链路部署、关键节点加固与差异化保护策略制定，从规划层面提升通信网络的抗毁韧性自愈能力。国网天津信通公司开展了通信系统脆弱性分析和韧性提升工程实践，归纳行成了如图8所示的基于边缘协作的电力通信网数字孪生模型构建框架^[44]。针对电力通信网故障恢复速度慢、资源配置僵化的问题，首先构建电力通信网的数字孪生体，通过虚实映射与边缘协作机制，实现对链路时延、带宽及设备状态的分钟级实时感知与故障精准定位；在此基础上，应用改进遗传算法对可变等价多路径模型进行求解，在路由重构中综合考虑链路物理约束与电力业务优先级，实现了约束驱动的迂回路径动态优选。结果表明相较于传统静态策略，该方案能有效降低网络最大链路利用率（实际业务场景下降幅可达6.15个百分点），将网络承载能力提升约26%（由3.8倍提升至4.8倍标准业务量），并显著改善负载均衡性（链路利用率方差降低约0.33个百分点）。

灾害下的资源博弈与业务保障：当电网遭遇

台风、山火、冰灾等极端自然灾害时，故障隔离、状态监测、保护指令等多项关键业务将瞬时涌入，竞争有限的通信资源。基于博弈论的调控方法通过建立多业务间的非合作博弈模型，分析不同业务在资源竞争中的博弈演化过程，在资源受限条件下动态求解纳什均衡，实现信道、带宽与优先级的最优动态匹配，优先保障故障隔离与保护指令的可靠传递，防止事故扩大与连锁故障。北京邮电大学以精准负荷控制、配电自动化、巡检控制3类典型多业务资源竞争场景为例，通过动态更新终端的优先级来调度信道资源^[45]。然后，引入基于定价机制与非合作博弈的功率分配算法和基于调度时延要求的改进比例公平算法动态调度信道资源，通过理论证明了功率分配博弈 $G_m = [N, \{P_m\}, \{U_m\}]$ 存在纳什均衡点以及博弈 G_m 的纳什均衡解唯一性，在7个基站、Urban Macro模型、小区资源块数量90、各小区终端数量100到140的场景下验证了博弈优化调度方法保证一定传输可靠性和公平性的条件下降低电力终端调度时延，满足不同业务等级的QoS需求。

关键业务时延的确定性保证：在覆盖输电与配电的全网范围内，线路差动保护、安稳控制、

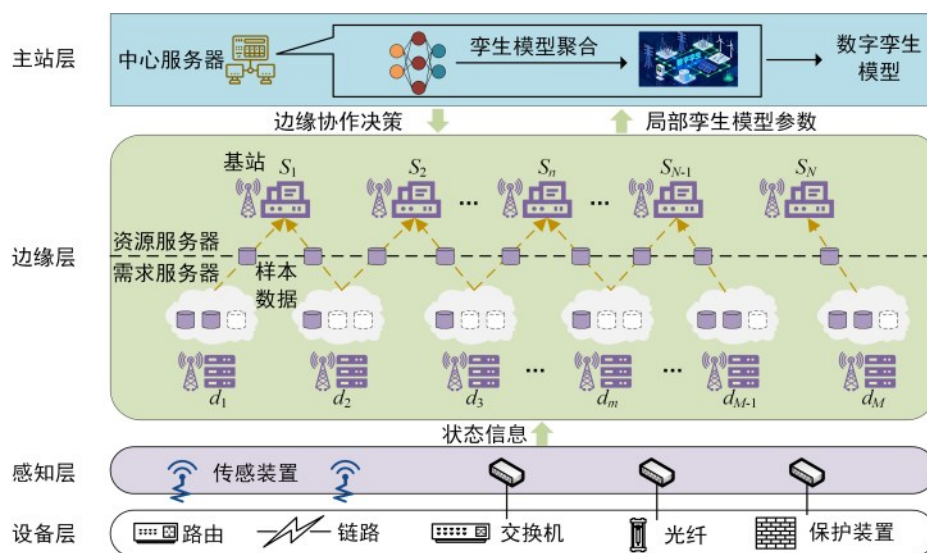


图8 基于边缘协作的电力通信网数字孪生模型构建框架

馈线自动化等安全稳定控制业务，其指令传输时延需被严格限定在亚毫秒至毫秒级。传统统计时延保障方法难以应对全网动态业务流的不确定性。ATAZ 采用基于网络演算的延时边界计算关键技术，通过精确建模业务流与网络节点服务能力，可数学严格地推导出全网关键业务端到端时延的确定性上界，为电力系统安全稳定运行提供可证明、可规划的确定性通信通道。以欧洲可再生能源电力系统数据集 RE-Europe_Set 验证分布式能源调控时延性能，其中 RE-Europe_Set 涵盖了电力通信传输网络流量数据子集，包括常规发电机以及可再生能源发电设备的状态量数据库以及业务生成和电力需求信号数据集等，且各数据子集间存在电气耦合关系。提取 RE-Europe_Set 与分布式能源系统通信流量相关的连续 3 年共 26304 条流量记录，应用随机网络演算理论得出即使在链路故障场景下，准确得出该场景下时延的确定性上界为 5.93ms，验证了 ATAZ 在混合组网故障场景情况下仍为关键电力业务提供确定性时延保障的能力。

4.2.3 荷：多元负荷的灵活接入与主动响应

“荷”侧随着分布式光伏、电动汽车、智能家电的普及，正从被动的电力消费者转变为主动的、具备双向互动能力的灵活负荷，对通信网络的“跨域性”、“实时性”与“安全性”提出了新要求。

有源配网全景感知与实时控制：为解决分布式能源出力间歇性导致的电压波动、潮流逆转等问题，基于控制论的服务质量控制和延时边界计算关键技术被核心应用。该技术构建“监视-控制”闭环，为分布式光伏逆功率控制、电压无功调节（AVC）等关键指令提供可承诺的确定性低时延通道，实现对配网状态的秒级感知与毫秒级控制，快速平抑功率波动，保障有源配网稳定运行。

海量柔性负荷资源聚合与优化调度：为将海

量、分散的分布式能源（DER）聚合为虚拟电厂等可控资源，基于资源优化调控和博弈论的关键技术发挥关键作用。该技术将海量异构终端抽象为可统一调度的资源池，并通过博弈论方法协调多元主体（用户、聚合商、电网）利益，在需求侧响应、削峰填谷等场景中生成最优调度策略，显著提升电网对分布式能源的协同消纳能力与运行弹性。

用户侧开放接入的安全可信保障：针对海量用户侧设备开放接入带来的网络攻击面扩张风险，零信任安全防护关键技术构建了内生安全体系。该技术对每一个 DER 终端和交互指令执行动态认证与细粒度访问控制，确保在分布式能源即插即用、参与电力市场交易等场景中，终端身份可信、数据完整、指令不可篡改，防止恶意接入导致局部电网运行事故。

4.2.4 储：储能系统的实时调度与协同优化

“储”侧作为新型电力系统的关键调节资源，包括电化学储能、抽水蓄能等多种形式，具有“充放电”双向特性，是实现能量时移、平抑波动、提升韧性的核心节点，对通信的“实时性”、“跨域性”要求极为突出。

储能电站的远程监控与快速响应：储能电站对“充放电”指令的响应速度直接影响其在调频、备用等场景中的应用价值。基于控制论的服务质量控制方法构建从调度中心到储能变流器的端到端控制闭环，确保充放电功率指令的超低时延传输与精准执行，使储能系统能够快速响应电网频率波动，发挥其快速调节优势。

分布式储能的协同优化：随着户用储能、社区储能等分布式储能的普及，如何实现其与电网、新能源及负荷的协同优化成为关键。基于边云协同的资源调度方法在储能聚合调度中发挥重要作用：边缘节点实时处理本地储能状态数据，执行本地充放电策略；云端基于全局视角对多个边缘节点进行协同调度，实现跨区域的能量平衡



与削峰填谷优化,构建“分散部署、集中调度”的储能协同管理体系。

储能参与电力市场的通信保障: 储能系统作为灵活性资源参与电力市场交易,对通信的“安全性”与“实时性”提出双重挑战。零信任安全防护关键技术通过动态信任评估与细粒度访问控制,确保交易指令、计量数据与结算信息的机密性与完整性,防止恶意攻击篡改交易数据,保障储能系统参与市场交易的安全可信。针对储能等终端通信场景下面临网络攻击等安全威胁,基于零信任理论^{[46][47]},天津大学提出基于区块链的虚拟电厂接入终端轻量级信任评价方法^[48]。该信任评价方法综合考虑终端通信行为、数据质量和传输速率3种信任特征,以风电场、光伏、储能以及各类异构终端的10kV虚拟电厂为算例,当终端数达到1000时,所提方法的对正常终端的信任评价准确率为78.6%,较现有算法评价准确率至少提高了7.9%,实现了从安全性、准确性和轻量性等多维度验证了终端设备的动态可信认证。

综上所述,能源电力系统作为ATAZ最具代表性的实证应用领域,完整验证了ATAZ在关键基础设施数字化转型中的核心价值。从“源”侧的新能源广域协同,到“网”侧的立体感知与韧性防御,再到“荷”侧的灵活接入与主动响应,直至“储”侧的实时调度与协同优化,ATAZ的五大核心特征(全时性、全域性、跨域性、实时性、安全性)与关键使能技术(服务质量控制、资源优化调控、延时边界计算、零信任安全等)贯穿始终、深度融合。这一实证不仅证明了ATAZ在复杂环境下的技术可行性与工程适用性,更为交通、水务、燃气等其他关键基础设施的数字化转型提供了可借鉴、可复制的范式路径。

5 总结与展望

5.1 总结

本文系统性地确立了ATAZ的通信范式。通

过给出ATAZ定义和多层级体系架构,建立了覆盖全时间、全空间、全业务领域的指导理论体系;构建了涵盖硬件设备层、网络链路层、资源调控层、业务应用层和安全层的多层次实现架构;搭建了全场景统一硬件平台、服务质量控制、资源优化调控、延时边界计算、零信任安全防护等关键技术体系。所提出的ATAZ对空地一体化网络工程实践提供了可实施的技术路径,推进了通信网络从理论到工程的转化进程。典型领域实证应用表明,ATAZ能够有效突破传统通信网络在覆盖范围、业务协同、资源调度以及服务质量保障等方面的限制,在提升全域通信覆盖能力、网络资源利用效率及关键业务确定性服务能力方面具有显著优势,为新一代通信网络的发展提供了新的理论支撑与技术范式。

5.2 展望

ATAZ作为通信领域全新的通信范式,当前仍面临诸多关键问题亟待解决。这些问题集中体现在技术和应用的多重维度,包括通信网络理论与技术体系深度迭代挑战、规模效应下的性能瓶颈挑战以及人工智能的发展对通信带来的体系化变革挑战,具体如下:

1 通信网络理论与技术体系深度迭代挑战

随着ATAZ将网络边界从地面延伸至空天地海全域,基于静态同质假设和经典香农定律的传统通信理论亟待突破。在理论维度,需从单纯追求“信道容量最大化”向“语义通信”与“任务导向”的新型信息论跃迁,实现多维异构资源(通信、计算、感知)的深度耦合与全局最优优化;在技术维度,需加速推进星地融合组网、可重构智能表面等颠覆性底层技术的突破与融合,构建支持高动态、强干扰环境下的柔性拓扑路由与确定性传输机制,从而打破空间与时间的壁垒,实现全时全域通信。

2 规模效应下的性能瓶颈挑战

在 ATAZ 的物理与业务适用边界方面, 其仍存在规模效应下的性能瓶颈。一方面, 当 ATAZ 面临如跨行业乃至跨国互联等业务相关空间范围极大扩展场景时, 网络节点数量、异构设备规模以及跨域链路数量将快速增长, 全局资源优化、跨域协同控制及控制信令同步等问题将导致系统控制开销不断增加, 不同运营主体之间网络管理策略、资源分配机制和安全策略的不一致, 进一步增加了跨域协同复杂度, 影响网络整体调度效率。另一方面, 随着工业控制、高清视频、数字孪生、人工智能等多种复杂业务在同一网络中协同运行, 不同业务之间对带宽、时延、可靠性及计算资源的需求存在明显差异。当关键控制业务与大带宽业务同时竞争有限网络资源时, 可能出现资源竞争冲突, 难以高效精准兼顾通信实时性、公平性和资源利用效率。

3 人工智能的发展对通信带来的体系化变革挑战

人工智能技术的爆发式演进正推动通信网络从传统的“外挂式辅助管理”向深度融合的“内生智能”发生根本性的体系化变革, 赋予 ATAZ 网络前所未有的生命力与自适应性。在全时全域复杂多变的通信环境与日益严峻的安全防御需求下, AI 大模型与分布式机器学习将被深度嵌入到网络的各个层级与边缘节点, 使网络具备自感知、自决策、自优化和自愈合的全生命周期闭环能力。这种变革不仅能够实现超大规模算网资源的毫秒级动态切片与最优调度, 大幅缓解网络容量压力, 更能通过主动式威胁预测构建起坚韧的内生安全免疫系统, 最终将 ATAZ 网络演进为一个高度智能化的全息通信服务平台。

参考文献:

- [1] Xia Z, Xue S, Wu J, et al. Deep reinforcement learning for smart city communication networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(6): 4188-4196.
- [2] 赵军辉, 张丹阳, 贺林. 智慧城轨交通通信技术的分析与展望[J]. 电信科学, 2021, 37(4): 1-13.
Zhao Junhui, Zhang Danyang, He Lin. Analysis and prospect of communication technology in smart urban rail[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(4): 1-13.
- [3] Alenoghena C O, Ohize H O, Adejo A O, et al. Telemedicine: a survey of telecommunication technologies, developments, and challenges[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2023, 12(2): 20.
- [4] Velastegui N, Pavon E, Jacome H, et al. Technological advances in military communications systems and equipment[J]. Multidisciplinaria de Investigación Científica, 2022, 3(8): 61-73.
- [5] 张晟, 戎伟. 未来通信网络架构及演进方案[J]. 电信科学, 2018, 34(7): 148-156.
Zhang, Sheng Rong Wei. Future architecture and evolution of communication network[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(7): 148-156.
- [6] 王辰, 白雪茜, 魏彬等. 面向实时通信的边缘智能关键技术研究[J]. 电信科学, 2025, 41(11): 14-30.
Wang Chen, Bai Xueqian, Wei Bin, et al. Research on the key technologies of edge intelligent for real-time communication[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(11): 14-30.
- [7] 杨震, 赵建军, 黄勇军, 等. 基于网络演进的人工智能技术方向研究[J]. 电信科学, 2022, 38(12): 27-34.
Yang Zhen, Zhao Jianjun, Huang Yongjun, et al. Study on the direction of artificial intelligence technology based on network evolution[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(12): 27-34.
- [8] 杨挺, 耿毅男, 郭经红, 等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 19-29.
Yang Ting, Geng Yinan, Guo Jinghong, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 19-29.
- [9] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(01): 130-150.
Huang Tao, Liu Jiang, Wang Shuo, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications,



- 2021, 42(01): 130-150.
- [10] 杨岭才. 关于快速形成我国天地一体通信运营能力的思考[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 1-10.
Yang Lingcai. Thoughts on the rapid formation of China's space-ground integrated communication operation capability[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 1-10.
- [11] Schwartz M, Bennett W R, Stein S. Communication systems and techniques[M]. John Wiley & Sons, 1995.
- [12] Asadi A, Wang Q, Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [13] Liu J, Kato N, Ma J, et al. Device-to-device communication in LTE-advanced networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(4): 1923-1940.
- [14] Islam M, Jin S. An overview research on wireless communication network[J]. Networks, 2019, 5(1): 19-28.
- [15] Ahmed Solym A, Yahya H. Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective[J]. International journal of electrical and computer engineering, 2022, 12(4): 3943-3950.
- [16] Boateng G O, Sami H, Alagha A, et al. A survey on large language models for communication, network, and service management: Application insights, challenges, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 28: 527-566.
- [17] Chaccour C, Saad W, Debbah M, et al. Less data, more knowledge: Building next-generation semantic communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 27(1): 37-76.
- [18] Liang C, Du H, Sun Y, et al. Generative AI-driven semantic communication networks: Architecture, technologies, and applications[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024, 11(1): 27-47.
- [19] Escheikh M, Taktak W. Online QoS/QoE-driven SFC orchestration leveraging a DRL approach in SDN/NFV enabled networks[J]. Wireless Personal Communications, 2024, 137(3): 1511-1538.
- [20] Gharbaoui M, Martini B, Castoldi P. A WAN infrastructure manager prototype for QoS-based multi-site SDN-enabled NFV orchestration[J]. Journal of Network and Systems Management, 2025, 33(3): 54.
- [21] 天津大学. 一种面向城市配电通信网的全局孪生数据控制方法及装置: 202510215544.8[P]. 2025-05-30.
- [22] Xia C, Jin Z, Su J, et al. Mobility-Aware offloading and resource allocation strategies in MEC network based on game theory[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2023, 2023(1): 5216943.
- [23] Haq S A U, Imran M, Shah N, et al. SDN-based edge computing in vehicular communication networks: A survey of existing approaches[J]. IEEE Access, 2025, 13: 74252-74287.
- [24] 韩雨阳, 于洁潇, 卢和平, 等. 基于变分图自编码器增强的配电网通信一体化网络跨域路由算法[J]. 电网技术, 2025, 49(10): 4267-4276.
Han Yuyang, Yu Jiexiao, Lu Heping. Cross-domain routing algorithm for distribution communication integration network based on enhanced VGAE[J]. Power System Technology, 2025, 49(10): 4267-4276.
- [25] Wang Z, Zhou Z, Zhang H, et al. AI-based cloud-edge-device collaboration in 6G space-air-ground integrated power IoT[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(1): 16-23.
- [26] Liu Y, Yan J, Zhao X. Deep reinforcement learning based latency minimization for mobile edge computing with virtualization in maritime UAV communication network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 4225-4236.
- [27] 孟广雨, 于洁潇, 杨挺. 基于随机网络演算的分布式能源调控系统时延上界计算[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2360-2371.
Meng Guangyu, Yu Jiexiao, Yang Ting. Upper bound calculation of delay of distributed energy resource coordinated-control system based on stochastic network calculus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2360-2371.
- [28] 杨挺, 李昕洪, 孙炜, 等. 基于量子子格密码的轻量级配电自动化身份认证方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2026-06-08].
Yang Ting, Li Xinhong, Sun Wei, et al. Lightweight identity authentication method based on anti quantum lattice cryptography[J]. Proceedings of the CSEE, 1-14[2026-06-08].
- [29] Manasrah A, Yaseen Q, Al-Aqrabi H, et al. Identity-based authentication in vanets: A review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(4): 4260-4282.
- [30] Que X. The Role of Data encryption in securing network communications[J]. Journal of Frontiers in Science and Engineering, 2026, 2(3): 80-85.
- [31] Gambo M L, Almulhem A. Zero Trust Architecture: A systematic literature review[J]. Journal of Network and Systems Management, 2026, 34(1): 25.
- [32] Demiroglou V, Skaperas S, Mamatas L, et al. Adaptive multi-protocol communication in smart city networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(11): 20499-20513.
- [33] Chi H R, Wu C K, Huang N F, et al. A survey of network automation for industrial internet-of-things toward industry 5.0[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(2): 2065-

- 2077.
- [34] Yu M. Construction of regional intelligent transportation system in smart city road network via 5G network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(2): 2208-2216.
- [35] Orfanos V A, Kaminaris S D, Papageorgas P, et al. A comprehensive review of IoT networking technologies for smart home automation applications[J]. Journal of sensor and actuator networks, 2023, 12(2): 30.
- [36] Lu Y, Zhao G, Chakraborty C, et al. Time-sensitive networking-driven deterministic low-latency communication for real-time telemedicine and e-health services[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2023, 69(4): 734-744.
- [37] Polymeni S, Plastras S, Skoutas D N, et al. The impact of 6G-IoT technologies on the development of agriculture 5.0: A review[J]. Electronics, 2023, 12(12): 2651.
- [38] Marginson S. What is global higher education?[J]. Oxford Review of Education, 2022, 48(4): 492-517.
- [39] Park G, Jeon H, Lee G M, et al. A Study on implementation and improvement of triple-metric based QoS for military networks[J]. Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2022, 47(7): 1025-1035.
- [40] Cui P, Han S, Xu X, Zhang J, et al. End-to-end delay performance analysis of industrial internet of things: A stochastic network calculus perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(3): 5374-87.
- [41] 胡文学, 孙雷, 王健全, 等. 基于网络演算的时间敏感网络时延上界分析模型研究[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2297-2310.
- Hu Wenxue, Sun Lei, Wang Jianquan, et al. Research on a latency upper-bound analysis model based on network calculus in time-sensitive networking[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2297-2310.
- [42] Liu Q, Sun S, Rong B, et al. Intelligent reflective surface based 6G communications for sustainable energy infrastructure[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 28(6): 49-55.
- [43] 徐韬, 许圣, 全汉滨, 等. 一种提高配电网通信可靠性的智能切换方案[J]. 电信科学, 2024, 40(7): 134-143.
- Xu Tao, Xu Sheng, Quan Hanbin, et al. An intelligent switching scheme to improve the reliability of power distribution network communication[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(7): 134-143.
- [44] 王林, 孟兆娜, 王伟, 等. 基于数字孪生的电力通信网通道迂回路由自动重构技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 677-684.
- Wang Lin, Meng Zhaona, Wang Wei, et al. Automatic reconfiguration of detour routes in power communication network channels based on digital twin[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 677-684.
- [45] 丰雷, 谢坤宜, 朱亮, 等. 面向电网业务质量保障的5G高可靠低时延通信资源调度方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12): 3418-3426.
- Feng Lei Xie Kunyi Zhu Liang, et al. 5G Ultra-Reliable and Low Latency Communication Resource Scheduling for Power Business Quality Assurance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(12): 3418-3426.
- [46] Azad M, Abdullah S, Arshad J, et al. Verify and trust: A multidimensional survey of zero-trust security in the age of IoT[J]. Internet of Things, 2024, 27: 101227.
- [47] Dhiman P, Saini N, Gulzar Y, et al. A review and comparative analysis of relevant approaches of zero trust network model[J]. Sensors, 2024, 24(4): 1328.
- [48] 蔡绍堂. 面向虚拟电厂的多层级网络安全防护关键技术研究[D]. 天津大学, 2023.
- Cai Shaotang. Research on Key Technologies of Multi-level Cyber Security Protection for Virtual Power Plants[D]. Tianjin University, 2023.

[作者简介]



尹喜阳, 1978年生, 男, 高级工程师, 主要研究方向电力通信系统运行规划。



王忠钰, 1995年生, 男, 工程师, 主要研究方向电力通信建设与运维。



岳顺民, 1966年生, 男, 正高级工程师。主要研究方向能源大数据技术与仿真。

盆海波, 1989年生, 男, 副教授。主要研究方向电力通信系统优化运行。