

时空智能物联网：概念内涵、体系架构及实现路径

郭永安¹, 王密², 张首刚³, 朱少楠¹, 骆冰清¹, 杨立君¹, 倪艺洋¹, 刘涛³

(1.南京邮电大学, 江苏 南京 210003; 2.武汉大学, 湖北 武汉 430072; 3.中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710126)

摘要: 针对物理世界时空秩序与数字世界计算智能的结构性矛盾, 本文提出时空智能物联网 (Spatiotemporal Intelligent Internet of Things, ST-IoT)。其以天基服务构建时空基准, 以通感算智融合为功能内核, 以大规模物联网终端构成感知末梢, 由时空智能、世界模型与数字孪生实现智能生成。提出了由时空底座层、全域感知层、协同网络层、模型计算层、智能服务层构成的 ST-IoT 5S 体系架构, 以支撑感知、认知到行动的智能递进。探讨了低空经济、智慧交通、公共安全等场景应用路径, 并分析了技术、应用与安全可信等方面的挑战。时空智能物联网有望推动物联网由被动响应向主动预见跃迁, 为新质生产力发展提供重要的基础设施支撑。

关键词: 时空智能; 物联网; 通感算智融合; 数字孪生; 世界模型

中图分类号: TP393.09

文献标志码: A

Spatiotemporal Intelligent Internet of Things: Concept, Architecture, and Implementation Paths

GUO Yongan¹, WANG Mi², ZHANG Shougang³, ZHU Shaonan¹, LUO Bingqing¹, YANG Lijun¹, NI Yiyang¹, LIU Tao³

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China

3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710126, China

Abstract: To address the structural contradiction between physical spatiotemporal order and digital computational intelligence, this paper proposes Spatiotemporal Intelligent Internet of Things (ST-IoT), which builds a spatiotemporal benchmark with space-based services, integrates communication-sensing-computing-intelligence as its functional core, uses massive IoT terminals as sensing endpoints, and generates intelligence via spatiotemporal intelligence, world models, and digital twins. It proposes a 5S five-layer architecture—Spatiotemporal Foundation Layer, Synoptic Sensing Layer, Synergy Network Layer, Semantic Computing Layer, Smart Service Layer—supporting progression from sensing to cognition to action; explores application paths in the low-altitude economy, smart transportation, and public safety; and analyzes technological, application, and security-trustworthiness challenges, aiming to shift IoT from passive response to proactive foresight and provide infrastructure support for new quality productive forces.

Key words: Spatiotemporal Intelligence, IoT, integration of communication, sensing, computing, and intelligence, digital twin, world model

0 引言

随着智能时代的到来, 物联网正经历着由以设

备接入与信息交换为核心的万物互联, 向以自主感知、协同认知与闭环决策有机统一为目标的万物智联的范式转换。我国“十五五”规划纲要明确提出

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 郭永安, guo@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62571259)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62571259)

“推动移动物联网自主迭代”，为这一系统性演进确立了明确的国家战略导向。在物理世界中，对象、事件与过程皆内嵌于特定的时空关系之中，时空信息由此成为描述物质运动、状态演化及其交互作用的基础性表达框架^[1-3]。物联网终端所获取的观测数据普遍融合位置、时间、对象属性与环境等多维度信息，且呈现多源异构、持续涌入与动态演化等显著特征^[4-5]。然而，智慧城市、低空经济、工业生产及资源环境监测等复杂场景对精准定位、实时感知、关联分析提出了迫切需求，传统聚焦于设备连接与数据汇集的建设模式已暴露出结构性局限。为此，亟须将统一时空基准、空间关系表达与时序演化分析等核心能力系统性嵌入物联网的感知、通信、计算与控制全链路，将分散异构的数据流整合为可定位、可关联、可推演、可反馈的时空知识体系^[6-7]。时空信息与物联网的深度融合，已然成为推进数字中国建设、培育新质生产力及提升社会运行效能的内在要求^[8-10]。

从技术演进视角出发，时空智能物联网的形成，本质上是物联网、时空信息与人工智能三大技术体系持续渗透与深度融合的产物。发展初期，物联网以射频识别、无线传感器网络与机对机通信为核心技术载体，着力解决对象识别、状态采集与网络连接等基础设施层面的问题^[11-13]。与此同时，测绘、遥感、地理信息系统与卫星导航等时空信息技术的逐步成熟，系统性地构建了时空数据的获取、处理、管理与服务能力，为物联网对象的精准定位与场景化表达奠定了坚实的技术底座^[14]。随后，移动互联网、云计算、大数据与边缘计算的兴起，推动地理信息系统与物联网在城市管理、交通组织、农业生产及环境监测等行业的纵深融合，研究重心逐步转向时空数据管理、多源观测协同、实时空间分析与边云协同处理等方向^[15-16]。数字孪生技术通过构建物理实体与数据、模型、服务之间的双向映射与动态关联，显著增强了系统的状态同步精度、虚实交互能力^[17]。当前，世界模型则突破了对环境静态描述的限制，通过从多模态观测与历史经验中学习环境的内在状态表征，赋予系统状态预测、方案推演与行动规划等更高阶的认知能力^[18]。近年来，北斗高精度定位授时、5G/6G 通信、空天地海一体化网络、通信感知一体化以及生成式人工智能等技术的加速汇聚与交叉赋能，正牵引着系统

发展范式从静态信息展示、事后分析，向动态状态认知、未来过程推演、风险预警、自主调控的方向跃迁^[19-21]。

围绕时空智能物联网这一新兴交叉方向，国内外学术界与工业界已从时空数据建模、地理语义互操作、通感算智融合及世界模型等多个维度展开了积极探索。国际上，研究者较早关注到物联网数据时空属性对数据模型设计、查询处理、空间索引构建与实时分析性能的系统性影响，并明确提出应将空间与时间维度作为物联网数据系统架构的基本组成要素^[22-24]。在标准化与平台化方面，OGC SensorThings 等地理空间 Web 标准的提出与完善，为异构设备、多元观测对象及其时空属性的统一描述与跨系统服务互操作提供了规范性框架^[25-27]。智慧城市试验场、移动边缘计算架构与多源空间数据集成平台等研究实践，则有效拓展了时空智能物联网的应用边界^[28-30]。世界模型领域的研究则聚焦于表征学习、动态建模与具身交互等核心问题，旨在使智能系统具备理解环境结构、预测未来状态及支撑规划决策的综合能力^[31]。国内方面，依托北斗系统、实景三维中国、自然资源调查监测与低空经济等重大战略需求，相关研究在高精度时空基准建立、空天地海网协同感知、北斗与 5G 融合应用、低空智联网构建及智能时空计算等方面积累了较为扎实的技术储备^[32-33]。同时，时空图神经网络、时空大模型与云边端协同等前沿方法论的涌现，为复杂时空关联建模、演化趋势预测与智能化服务提供了新的技术路径^[34-36]。然而，现有研究多聚焦于感知、通信、计算、模型等单一环节，尚缺乏面向统一时空基准、多模态数据表征、跨域语义互操作、世界模型可信推演与闭环管控等全链条要素的体系化研究^[37]。

综上所述，本文提出时空智能物联网（Spatio-temporal Intelligent Internet of Things, ST-IoT）新概念，旨在以统一时空基准贯通并重构物联网的智能能力链，推动其由数据驱动的智能增强跃迁为物理世界约束下的可信闭环智能，实现从被动响应向主动预见的能力升级。本文以该体系架构为总体研究脉络，系统梳理统一时空基准、时空多维标识、时空智能计算等关键技术的理论内涵与内在关联，并结合智慧城市、低空经济等典型场景，深入探讨其落地模式、实践路径，以期为时空智能物联网的

理论深化和工程化推进提供有益参考。

1 时空智能物联网体系架构

1.1 时空智能物联网概念内涵

时空信息是兼具时间语义与空间语义的信息载体,用以刻画物质世界中各类现象与事件何时何地发生及其随时空演化的动态规律。在此基础上发展而来的时空信息学,融合通导遥智能传感器、云计算与人工智能方法,对自然活动与人类活动进行感知与认知,进而支撑智能决策,已成为服务科学体系中的重要分支^[1]。时空智能学回答“何时、何地、何种目标、何种变换、何种机理、何种决策”等核心科学问题,目标为在正确的时间与地点,将正确的数据、信息与知识传递给正确的人。智能物联网(Artificial Intelligence of Things, AIoT)是人工智能与物联网在实际应用中的深度融合形态。其核心在于将AI技术贯穿物联网的感知、通信、计算与应用各环节,并呈现出泛在智能感知、群智感知计算以及云边端协同等新特征,推动感知—传输—控制从相互分离的传统设计走向以通感算智融合为内核的一体化范式^[38-40]。

时空信息学与智能物联网的交叉,催生了时空智能物联网,如图1所示。其以PNT(Positioning, Navigation, Timing, 定位、导航与授时)天基服务体系为时空基准来源、以通感算智融合为功能内核、以大规模物联网终端为感知末梢、以时空智能、世界模型与数字孪生为智能引擎,面向物理世界提供全时空、全链条、智能化的一体化服务,是将时空信息的精确性、物联网的泛在性与人工智能的认知力有机统一的新型信息基础设施。上述四个基本要素具备方可称为ST-IoT,仅具备部分条件者属于现有AIoT或时空信息体系的增强,而非ST-IoT。时空智能物联网以高精度时空基准为底层锚点,构建了通信、感知、计算与智能的内生闭环。基于此,其引入时空多维标识机制,将对象、联接、服务及其位置、时间、状态、能力和需求等属性统一关联,形成物理实体、网络资源与业务服务之间可解析、可关联、可计算的语义索引。该标识机制由此成为贯通时空感知、网络协同与智能认知的枢纽,为跨源数据关联、动态网络组织与智能决策提供统一信息入口。最终,时空智能物联网实现时空信息的精确性(知道在何时、于何地发生了什

么),物联网的泛在性(连接并感知物理世界中的每一个对象),人工智能的认知力(理解正在发生的事并预判将会发生什么),为低空经济、智慧城市和自动驾驶等战略性新兴产业提供统一的技术底座。

ST-IoT是用时空语义重新定义物联网,并非对AIoT、时空智能与通感算智融合等已有概念或技术的重新组织,属于体系层面的系统性重构。AIoT是人工智能向物联网各环节的能力叠加,时空信息仅是对象身上的一组属性;ST-IoT则是将时空由数据的属性提升为组织整个系统的坐标系。这一体系差异突出表现在研究对象、智能来源与闭环层级三个维度。就研究对象而言,AIoT以设备与对象为第一组织单元;ST-IoT以时空为第一组织单元,将对象视为时空坐标系中的实体,统一时空基准前移至数据产生端,实现源头标定而非事后对齐。就智能来源而言,AIoT的智能以数据驱动为主,通过统计学习从海量观测中提取关联规律;ST-IoT则强调在统一时空基准上进行物理约束下的推演,显式建模跨尺度、跨坐标系与跨时间的时空关系,兼顾物理一致性。就闭环层级而言,AIoT的闭环多为局部、反应式的行为闭环,而ST-IoT构成面向物理世界的推演式闭环,事前推演、事中溯源、事后复盘,并以状态反馈持续校正模型,实现由被动响应向主动预见的跃迁。ST-IoT实质不在于新技术的堆叠,而在于以统一时空基准为第一性原理,将成熟的感知、通信、计算与智能能力重新组织为一个可推演、可反馈的整体。

1.2 时空智能物联网五层架构

时空智能物联网的系统架构遵循“双逻辑融合”的设计理念,将物联网经典的“感知—网络—平台—应用”分层逻辑与时空智能领域的“基准—融合—计算—决策”技术逻辑深度耦合,凝练为“时空底座层—全域感知层—协同网络层—模型计算层—智能服务层”ST-IoT 5S五层体系架构,如图2所示。在纵向能力组织上,以统一时空基准建立跨层一致的时间、空间与坐标参考,以时空多维标识实现对象、联接与服务及其时空、状态、能力和需求等属性的统一表达与动态关联,从而将感知数据、网络资源、认知模型与智能服务贯通为有机整体。

(1) 时空底座层(Spatiotemporal Foundation

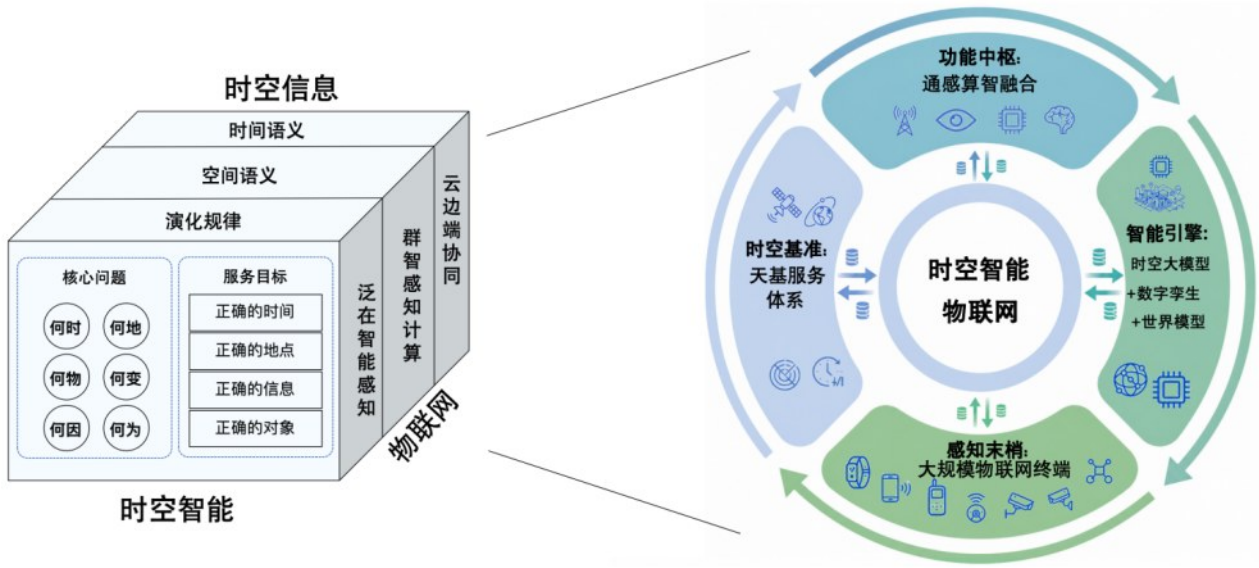


图1 时空智能物联网(ST-IoT)概念内涵



图2 时空智能物联网(ST-IoT)体系架构

Layer): 由高精度PNT、离散格网编码、高精度时间同步和标识时空锚定等构成。该层通过提供统一的时空参考基准、空间网格表达和时间同步能力,实现物理对象、网络节点与服务资源在时空维度上的统一定位、关联与组织;通过标识时空锚定,建立对象标识与时空位置、时间信息及相关属性之间的关联关系,为上层感知认知、智能决策、网络路由与协同控制提供一致、可信、可关联的时空基础,支撑感知—认知—决策—执行闭环运行。

(2) 全域感知层 (Synoptic Sensing Layer): 采用“天基—空基—地基”三级协同的多元感知体系

实现全域空间覆盖与无缝数据采集。天基负责大尺度宏观观测,空基通过无人机集群实现中尺度机动与精细化巡查,地基以传感器网络支撑小尺度微观监测;三者尺度与时效上互补融合,形成从宏观到微观、从静态到动态的全域时空数据入口。通过对象发现与时空多维标识关联,将不同感知源获得的观测数据映射至统一对象及其动态状态,实现跨设备、跨尺度观测的持续关联。

(3) 协同网络层 (Synergy Network Layer): 构建“云—边—端”协同的分布式智能闭环,并依托天地一体化组网打通物理世界与数字世界之间的

高可靠信息通路,支撑海量时空数据的高效流转与实时交互。在天地一体化与云边端协同基础上,引入面向对象、联接与服务的标识解析与资源关联机制,将异构通信、感知与计算资源映射为统一可发现、可关联和可调度的网络能力,为跨域协同提供统一资源语义。

(4) 模型计算层 (Semantic Computing Layer): 以时空大数据基础处理为起点,完成时空关联建模与知识图谱构建,并逐步递进至基础大模型与智能体驱动,形成自主化、递进式的时空智能中枢。该层承担时空数据的融合计算、模式识别与趋势预测,将原始观测转化为可理解、可推理、可决策的时空知识,为上层智能服务提供认知能力支撑。在时空关联建模过程中,以时空多维标识作为对象和关系的统一索引,将对象、联接与服务及其动态属性组织为随时间演化的标识状态图,并结合时空图神经网络、知识图谱、大模型与智能体,实现从状态关联、演化预测到知识推理的递进式认知。

(5) 智能服务层 (Smart Service Layer): 以数字孪生与世界模型为核心引擎,实现从虚拟推演到物理闭环的自适应精准管控。该层面向场景集成前四层能力,通过孪生映射实现实时态势表征与仿真推演,借助世界模型完成态势预测与决策优化,并将决策反馈至物理世界以形成持续闭环。智能决策结果通过对象标识、联接标识与服务标识映射为物理对象控制、网络资源调度和服务调用等可执行动作,并结合状态反馈持续更新标识状态和认知模型,形成面向物理世界的闭环智能。

综上,五层架构中时空底座为根、全域感知为入口、协同网络为脉络、模型计算为大脑、智能服务为出口,构成虚实联动的完整闭环,并形成由感知智能、认知智能与行动智能递进支撑的系统能力体系。表1从核心功能、主要输入、主要输出等维

度归纳了各层的功能与层间接口,明确了五层之间的数据流与依赖关系。

1.3 时空多维标识机制

时空多维标识 (Spatiotemporal Multi-dimensional Identifier, SMI) 是时空智能物联网中统一关联对象、联接与服务信息的语义机制。其以对象标识 (EID)、联接标识 (NID) 和服务标识 (SID) 为核心,在统一时空基准下关联对象的位置、时间、状态、能力、需求及关系等多维属性,形成面向对象识别、关系关联、服务发现与网络寻址的统一信息模型。其逻辑表达式为:

$$SMI = \{ EID, NID, SID, A_{(t,s)}, V \}$$

其中, EID 用于识别物理或虚拟对象, NID 用于描述对象之间的连接、会话或拓扑关系, SID 用于识别服务类型、服务实例或业务需求; $A_{(t,s)}$ 表示与时间和空间相关联的属性集合,包括位置、时间、状态、能力及需求等信息; V 表示标识信息模型及其关联映射的版本信息。上述表达式为逻辑信息模型,具体实现可根据应用场景采用不同的编码与承载方式。

在信息组织上, EID、NID 和 SID 承担不同的语义职责。EID 在规定的命名空间内保持唯一,用于建立对象身份与其属性记录之间的关联; NID 根据连接关系及其生命周期进行分配和管理; SID 依据服务类型或服务实例的标识规则进行组织。位置、状态等动态属性与核心标识关联存储,并通过时间戳、有效时间窗及版本信息描述其时效性。由此,对象的位置和状态变化可通过属性更新反映,网络拓扑变化可通过连接关系更新反映,而不必因动态属性变化而重新生成对象身份标识。

在运行过程中,标识注册与解析机制维护标识、属性和网络资源之间的关联关系。跨域访问时,根据标识命名空间及所属管理域进行解析与转介,并结合属性有效期、模型版本和解析映射版本

表1 ST-IoT 五层架构的功能与层间关系

架构层	核心功能	主要输入	主要输出	定位
智能服务层	数字孪生、世界模型推演	认知模型与实时状态	决策、控制指令与状态反馈	行动智能
模型计算层	时空关联建模与知识推理	时空数据	时空知识、预测与认知模型	认知智能
协同网络层	高可靠传输、标识解析与寻址	带标识的观测数据流	按需路由与调度的数据	传输承载
全域感知层	天空地协同采集、源头时空标定	原始观测	带时空标识的可信观测	感知智能
时空底座层	统一时空基准与时空多维标识	PNT 天基服务	统一时空参考框架	贯穿各层的公共基础

校验结果的有效性。在此基础上,将对象身份、时空状态、连接关系与服务需求转化为可用于地址解析、路径选择、资源匹配和服务调用的信息,从而实现对象、网络与服务之间的协同。

时空多维标识与现有定位授时技术、空间索引和物联网对象标识具有互补关系。定位、导航与授时(PNT)技术为时空信息提供参考基础,GeoSOT、H3等空间索引可用于空间单元编码,现有物联网对象标识可作为对象身份识别的基础。时空多维标识进一步关联对象、联接和服务语义及其动态属性,并通过解析映射机制支撑网络层面的寻址、路由和资源协同。其核心价值在于将分散的多维语义信息统一组织与关联。

2 时空智能物联网关键技术

时空智能物联网的体系架构侧重于系统构成,而关键技术则是回答支撑万物智联的能力究竟如何形成的问题。与智能物联网相比,时空智能物联网的关键技术差异如表2所示,集中体现在研究主线、时空角色、推演能力、可验证性与能力递进五个维度。在此差异之下,其核心在于构建一条可贯通、可验证、可评估的完整能力链:首先,依托统一时空基准实现跨设备、跨尺度数据的时空语义一致,从源头确保可验证的时空对齐,并通过时空多维标识实现对象、联接与服务及其动态属性的统一表达与关联;随后,利用通感算智融合的传输与计算,让多源异构观测在同一时空坐标与统一语义框架下完成推理与生成;最终,以数字孪生与世界模型进行预测推演与优化,并通过决策反馈回物理世界形成内生闭环。据此,参考时空智能学提出的感知、认知与行为三级能力思想^[1-2],本文将关键技术按感知智能、认知智能与行动智能三级递进展开,分别回答“看得见”“看得懂、预测准”以及“能决策、会执行”三类能力的形成机理。

2.1 感知智能的实现

感知走向智能的关键在于可信、可对齐的观测,而非单纯追求海量数据。任一观测若无法回答“在何时、于何地、由何而生”,便无从进入后续的关联与推演。为此,本文对感知智能的设计围绕两条主线展开:其一,依托统一时空基准完成观测的时空标定,使每一次观测获得可验证的时空坐标;其二,通过时空多维标识建立观测数据与其来源对

象、感知设备及相关事件之间的稳定关联,从而使异构观测具备可定位、可识别、可关联和可追溯的统一语义。

(1) 以统一基准确定时空坐标

时空基准底座是感知智能的根基,其使命是为体系内每个实体、每次观测赋予可溯源、可验证的时空一致性。首先,PNT天基服务体系是时空基准的首要来源,正经历从PNT智能到智能PNT的双向演进:前者以人工智能提升PNT的精度与可用性,后者使PNT系统具备环境感知、自主学习与自适应调节能力^[41]。在具体实现路径上,多星座融合显著增加可见卫星数量,在区域增强网络覆盖与多频接收条件下,PPP-RTK可实现分钟级快速收敛与厘米级定位精度,室内外无缝定位以惯性导航为骨架融合视觉、UWB、Wi-Fi与5G信号实现广域空间覆盖^[42-43];“北斗+5G”综合时空网将广域覆盖与深度渗透相结合,为高动态场景提供通导遥一体服务^[33]。其次,全球离散格网编码为每个感知节点与数据单元赋予全球唯一、多尺度自适应的空间标识,以GeoSOT、H3、HEALPix为代表的方案经“剖分—编码—索引—存储”链条,使带有时戳的感知数据与其空间位置一一映射,成为跨源、跨尺度数据关联的空间组织基础^[44]。此外,高精度授时与坐标一致性保障分布式节点协同:卫星授时、光纤授时与网络授时形成“卫星—光纤—网络”三层互补格局,纳秒级时间同步支撑感知层打时戳、网络层确定性传输与计算层分布式训练;而WGS-84与CGCS2000、投影坐标与工程坐标多参考系共存,要求建立统一时空参考框架,方能使天基影像、空基点云与地基读数精确叠加^[45]。

(2) 多源异构观测的时空一致性对齐

时空基准解决的是单点观测是否可信的问题,全域协同感知要解决的是多源异构数据怎么融合的问题。“天基—空基—地基”三级感知体系分别提供大尺度宏观观测、中尺度机动巡查与小尺度微观监测,三者各具优势,但米级遥感影像、厘米级LiDAR点云与毫秒级传感时序处于截然不同的时空维度,融合的关键在于四步:时间对齐以统一时戳与跨源同步,将异采样率观测归入同一时间参考;空间对齐以时空栅格化将三维空间剖分为多层级时空体素,使所有数据投影至同一格网^[37];语义对齐以多模态协同推理和知识图谱实现跨域语义

互操作^[46-48]; 不确定性建模则显式刻画定位误差、设备漂移、观测缺失与异常值, 以位置精化、异常检测与缺失补全抑制数据质量风险^[30,49]。融合结果能否满足特定场景的精度与一致性要求, 是感知从采集走向可信数据入口的关键。基于此, 时空多维标识把完成时间、空间和语义对齐后的观测映射到对应对象、联接与服务实体, 使不同来源、不同尺度和不同网络域中的数据能够围绕统一标识建立持续关联, 为后续时空关联建模与跨域知识推理提供稳定的实体索引。

2.2 认知智能的实现

感知回答“发生了什么”, 认知回答“为何发生、将发生什么”。前者依赖于数据的广度和精度, 后者则依赖于协同网络来保障数据的高效流转。时空智能计算将原始观测转化为可理解、可推理、可预测的知识。通信-感知融合使每座基站成为隐式雷达, 赋予网络环境感知能力; 通信-计算融合将推理下沉至边缘, 在边缘算力就近部署, 当任务规模与网络条件匹配时, 可将时延敏感任务的端到端时延降至十毫秒量级^[50]; 感知-计算融合在边缘实时提取点云、轨迹等结构化结果, 减轻云端负担; 智能融合以强化学习、联邦学习等范式赋予网络意图驱动的自适应能力^[51]。以此为基础, “低轨卫星+高空平台+地面蜂窝”的天地一体化覆盖与云边端协同, 构成分层智能体系^[52-54]。通感算智融合为认知智能提供了传得快、算得动、用得活的运行底座。

(1) 时空关联建模

时空数据的本质在于时、空、因三重约束的耦合: 时序演化约束刻画状态随时间的演化趋势、周期与突变; 空间邻近约束体现地理学第一定律的空间自相关; 因果/交互约束刻画对象间的相互影响与传导机制。传统统计方法依赖人工构造时空特征, 难以刻画空间自相关、多尺度依赖与非平稳性^[55-57]。以时空图神经网络为代表的端到端表征学习, 将传感器、设备或网格单元抽象为图节点, 按空间邻近、功能相似或业务依赖构建图边, 以图卷积/图注意力学习空间依赖、以门控循环单元或 Transformer 刻画时间演化, 从而将三重约束统一编码为可计算图结构, 已成为交通流预测、环境监测、能源负荷估计等拓扑-时间耦合任务的主流范式^[34,58]。

(2) 时空知识推理

当认知对象从单指标预测升级为复杂系统理解, 需要更具语义理解能力的时空知识图谱。其以四元结构显式建模物理世界, 对象对应物理实体, 关系对应空间、时间与因果联系, 时间戳锚定有效时段, 演化边刻画关系随时间的建立、强化与消亡。兼具图计算的结构化推理能力与时空数据的动态语义, 既支持“某区域近一个月哪些设备异常与交通拥堵时空共现”式关联检索, 也支持“何种干预最可能阻断风险传播”式因果推断^[46]; 同时以地理本体与元数据体系实现跨域语义互操作^[47-48], 构成从原始观测到统一语义模型的贯通通道。

(3) 时空大模型与智能体

时空图与知识图谱提供结构化认知底座, 时空大模型与时空智能体则将认知推向自主化。时空基础模型在大规模、多类型、多区域数据上预训练, 通过微调、提示学习或参数高效适配服务预测、插值、检测与生成等多样化任务, 推动时空智能从单任务单模型走向“预训练+多任务适配”的新范式^[59-61], 其技术路线涵盖语言模型迁移、原生时空预训练与多模态融合。时空计算智能体以大模型为认知与规划核心, 将理解、预测、策略串接为完整服务链。意图理解识别空间范围、时间尺度与分析目标, 任务规划将复杂需求分解为依赖子任务, 工具调用连接空间数据库与 GIS 算子库, 结果验证对输出进行约束检查与解释。例如, 面对“分析某区域近五年植被覆盖变化趋势”的需求, 智能体可自主完成影像检索、指数计算、变化检测与可视化输出, 将原本依赖人工编排的经验工具链转化为可自主编排的计算服务。由此, 认知智能从“看得懂、预测准”转向“会规划、能建议”, 为行动智能提供可推演、可校验的认知基础。

2.3 行动智能的实现

行动智能是时空智能物联网向物理世界的输出端口, 其使命是将认知结果转化为面向物理世界的可执行决策, 并持续反哺模型。其实现依赖“数字孪生—世界模型—闭环管控”三维架构: 数字孪生回答物理世界“现在长什么样”, 世界模型回答“将如何演化、何种方案最优”, 闭环管控回答“决策如何落地、模型如何校正”。

数字孪生为物理实体构建多尺度、多物理场、多时间粒度的高保真镜像, 其区别于传统仿真的本

质在于“虚实共生、实时同步、双向交互”：物理状态实时驱动数字模型更新，数字推演经执行器反馈物理世界^[17,62]。多尺度数据与模型融合被视为当前核心挑战之一，在 ST-IoT 语境下，建模须跨越建筑构件级、城市级到区域级的尺度鸿沟^[63]。BIM-IoT-GIS 三级融合展示了可行路径：BIM 提供构件级模型，IoT 注入实时状态流，GIS 提供宏观参照，三者统一时空基准下无缝流转^[64]；面向大规模场景的开放地球引擎则为从全球到街区尺度的孪生快速构建与动态更新提供了平台级基础设施^[65]。在虚实同步方面，地理空间数字孪生以高精度时空基准为纽带，沿数据驱动、模型驱动与知识驱动三条路径实现物理空间到数字空间的统一映射^[45]。总体上，多尺度孪生正从单实体静态建模走向全系统动态共生，其成熟度直接决定上层决策的真实性与可靠性。

世界模型通过学习环境状态、动作与未来结果间的内在关系，在虚拟空间构建物理世界的内部模拟器，其能力不仅涵盖未来状态预测，还支持对备选方案的模拟、比较与反事实推理^[18,66]。其核心在于学习环境状态转移函数与奖励函数的紧凑内部表示；大模型在海量文本与视觉数据中习得的物理常识、时空因果先验，正显著加速世界模型从专用领域走向通用场景^[36]。按功能可分为理解当下机理（侧重表征学习）与预测未来状态（侧重动态仿真）两类^[18,31]。目前，世界模型在机器人、自动驾驶、视频生成等场景已取得进展，但仍面临长时域预测误差累积、物理一致性评估标准缺失与实时推理效率不足等瓶颈。在 ST-IoT 中，世界模型对位置、距离、方向、拓扑关系的理解能力，与系统在何时、于何地、发生何事、如何演化的核心追问高度契合^[67]。下一阶段，需将世界模型从相对受控环境迁移至开放动态的真实世界，并实现其与数字孪生的有效耦合。

闭环管控是将推演转化为行动的最后一环，其本质是“决策指令流—控制执行流—状态反馈与模型校正流”的循环。决策经执行器作用于物理世界，传感器将执行效果实时回传，系统据此修正数字孪生状态并更新世界模型参数，形成持续自校正的感知、认知、行动闭环。在低空物联网等场景中，数字孪生与强化学习相结合可实现协同干扰、路径规划等任务的在线决策优化^[68]；数字孪生驱动的自智管控架构在典型网络配置与算力支撑下，可将状态同步时延从秒级压缩至毫秒级，从而提升管控的实时性与保真度^[69]；面向大规模异构智能体的群智协同决策，通过“人-机-物”协同框架聚合社会计算智慧、数据算法智能与物理执行反馈，在保持个体自主性的前提下实现群体智能涌现^[70]。闭环的可靠性取决于三个环节：决策执行的可信性、状态回传的实时性与模型校正的持续有效性，三者共同构成行动智能从能决策走向善执行的保障。

由此可见，时空智能物联网的技术体系并非各层能力的机械叠加，而是一个以能力递进为内在逻辑、以闭环反馈为运行机制的整体系统。感知智能解决“看得见”的数据可信问题，认知智能实现“看得懂、预测准”的知识生成，行动智能完成“能决策、会执行”的价值闭环。三者层层递进、环环相扣，其整体效能显著超越各单项技术效能之和，这正是时空智能物联网作为系统性架构创新的核心要义所在。

3 时空智能物联网应用场景

传统物联网解决万物连接与数据采集，智能物联网实现万物智联的感知、通信与分布式学习，但二者均缺乏统一的时空语义基准与面向物理世界的推演闭环。时空智能物联网则从“看得懂、预测准”推进到“会推演、能反作用于物理世界”。本

表 2 智能物联网与时空智能物联网关键技术差异

对比维度	智能物联网（AIoT）	时空智能物联网（ST-IoT）
研究主线	以设备连接与数据流为主线	统一时空基准下的多维标识与动态关联
时空角色	时空作为数据的一种属性	时空作为贯穿全链的组织要素
推演能力	以数据驱动预测为主	物理约束下的时空推演与闭环
可验证性	侧重身份认知与隐私保护	侧重时空可溯源、可验证一致性
能力递进	感知—计算—控制	感知—认知—行动闭环

节在低空经济、智慧交通、工业互联网、公共安全与智慧医疗五个场景中说明其落地路径。各场景将物理实体抽象为对象、将通信链路抽象为联接、将业务能力抽象为服务,并以时空多维标识建立三者间的动态关联;在此基础上,通过统一时空基准在数据产生端完成源头标定,依托边缘与云端协同完成时空融合与推演,最终以决策反馈回物理世界形成闭环。

(1) 低空经济

低空经济面临空域管控难、频谱干扰重等挑战,症结在于多型飞行器与低空基础设施之间缺乏统一的时空语义,难以实现可验证标定与安全推演^[71-72]。低空是通信感知一体化与通感算智融合的典型场景。时空智能物联网通过“北斗+5G”通导遥一体标定、通信感知一体化的探测—通信—定位协同、天空地全域感知四重对齐与数字孪生自智管控闭环^[69,73-74],为异构飞行器提供统一的时空参考与可验证的标定能力。

面向低空场景,统一时空基准前移至数据产生端,如图3所示。北斗/GNSS为异构飞行器提供统一时空参考,机载数据在采集时即绑定飞行器标识、时戳与三维位置,并经全球离散格网编码赋予多尺度空间标识,使异构装备数据在源头具备一致时空语义。携带统一时空信息的飞行数据经5G-A/6G与天地一体化网络传输,边缘节点完成局部态势分析,云端将飞行器、航迹与环境等多元信息映射至统一时空框架,经四重对齐后支撑轨迹预测、冲突检测与空域评估。

基于统一时空框架,时空计算贯穿低空装备

“维护—运行—服务”全过程:维护阶段支撑故障预警与预测性维护,运行阶段支撑航路规划、冲突预警与动态改航,服务阶段支撑物流配送、巡检作业与应急救援的多机协同。决策结果经网络下发至飞行器与保障设施,执行状态持续回传用于模型更新与策略校正。现阶段,无人机城市配送试点与低空智联网建设正推动上述能力由单机智能走向体系智能。

(2) 智慧交通

智慧交通的短板在于车路数据“对不齐”与推演能力弱:车端、路侧与云端的数据在时间、空间与对象维度上缺乏统一语义,跨尺度交通态势难以贯通推演。车路云一体化是通感算智融合的另一主战场,时空智能物联网通过统一时空基准与时空多维标识,将车辆、信号灯、路侧单元、摄像头与气象站等对象及其交通流预测、信号优化与应急调度等服务能力贯通为同一语义框架。

面向车联网场景,统一时空基准与全球离散格网编码前移至数据产生端,如图4所示。北斗/GNSS提供高精度定位与标准时间,车辆、路侧单元、摄像头等终端在采集车辆状态、交通流与环境信息的同时,绑定对象标识、时戳与位置坐标,使异源数据在源头即具备一致时空语义,将采集后再对齐转化为源头标定。携带统一时空标识的数据经4G/5G、C-V2X链路传输,其中C-V2X支撑车路间位置、速度与行驶意图的实时交互,4G/5G支撑数据向边缘与云端汇聚;边缘节点完成预处理与快速响应,云端完成多源数据融合,以时空图神经网络实现交通流预测,以数字孪生与世界模型完成跨尺



图3 基于时空智能物联网的低空经济应用场景

度态势推演。

云端形成的态势、预测与优化方案经云控平台综合展示,支撑路线优化、信号优化与应急调度等应用;决策结果反馈至车辆与路侧设备,向车辆下发路线优化与出行诱导,向信号设备下发配时优化,经RSU发布协同调度,执行状态持续回传用于模型更新与策略调整。车路云一体化示范区与C-V2X相关标准的推进,正加速这一跨尺度态势推演与闭环调控能力的规模化落地。

(3) 工业互联网

工业互联网受制于传统感传控分离架构^[75-77]。时空智能物联网通过统一时空基准对齐车间数据、通感算智融合边缘低时延控制、数字孪生与具身智能世界模型闭环^[51,78],能实现虚实共生、闭环控制的工业数字孪生。其中,基站机房作为通信网络自

身的重要物理节点,数量庞大、分布广泛,传统人工巡检面临周期长、异常发现滞后与维护成本高等问题,机房环境、状态在空间与时间上相互耦合,是时空智能运维的典型场景。

面向机房运维场景,系统以“站点—机房—设备”分层空间标识组织机房环境与动力设施,统一采集温湿度、烟雾、漏水等运行数据,并按统一时间基准完成跨设备对齐;边缘网关完成协议适配、时间戳处理与本地缓存,云端结合机房空间布局、设备拓扑与运维事件构建时空状态表征,开展异常检测、趋势分析与事件关联诊断,沿市电、蓄电池、发电机的状态变化序列刻画供电演化链,结合漏水或烟雾告警位置识别潜在影响区域,如图5所示。

基于上述时空状态与分析结果,系统支撑异常

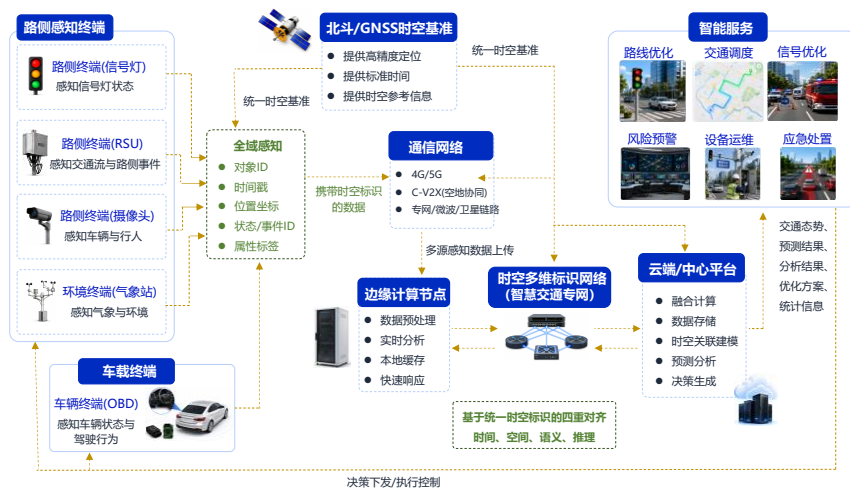


图4 基于时空智能物联网的智慧交通应用场景



图5 基于时空智能物联网的工业互联网应用场景

告警、工单调度与运行评估等运维服务, 处置结果与环境、设备状态持续回传并纳入后续分析, 形成“状态感知—时空关联—异常分析—运维处置—状态反馈”的闭环, 推动基站机房运维由分散监测走向时空协同的智能运维。

(4) 公共安全

公共安全对可验证、可溯源、可推演要求最严苛, 现有安防体系多停留在单点监测与事后发现。时空智能物联网通过统一时空基准可信底座、融合时空特征的入侵检测与社会遥感地理计算^[79-81], 实现事前推演、事中溯源、事后复盘的全过程闭环。

以大型活动重点区域人员异常监测为例, 如图 6 所示。系统依托 5G-A/6G 开展全域人员态势感知, 持续获取人群分布、密度变化与流动方向; 当局部区域出现人员密度快速增加、异常聚集或流动状态突变时, 动态调度视频监控、Wi-Fi 感知与毫米波雷达等局部感知资源开展精细观测。全域与局部观测在统一时间基准与时空多维标识约束下关联, 云端结合时空关联分析与预测模型对异常闯入、持续滞留与人员聚集等事件开展识别与风险研判, 按风险等级触发分级预警与现场处置, 并将处置结果回传用于更新感知资源配置与研判策略。

(5) 智慧医疗

智慧医疗对象多元、数据异构、诊疗活动强时空关联, 既有建设多停留在生命体征采集与单点分析^[82]。时空智能物联网通过统一时空标识建立“人员—设备—资源—事件—服务”的动态关联, 贯通院前急救与院内救治的时空链条。

以国家紧急医学救援基地东部中心相关重大灾害医学救援场景为例, 如图 7 所示。现场终端与车

载设备采集伤员位置、生命体征与检伤分类结果, 卫星遥感与无人机获取灾情与道路信息, 形成天空地协同感知; 应急平台汇聚医院床位、ICU、血液与救治能力等资源状态。时空知识图谱关联伤员状态、转运过程与医疗资源, 综合伤情等级与预计转运时间确定转运优先级; 数字孪生与世界模型对分流与救治方案进行动态推演, 决策提前推送至接诊医院, 形成院前转运与院内救治的连续协同闭环, 实现伤员状态与医疗资源的动态匹配。

4 现存挑战与展望

(1) 技术体系层面

时空智能物联网的技术体系仍面临数据融合与可信推演两大瓶颈。前者源于天基遥感、空基 LiDAR 与地基时序分处米级、厘米级与毫秒级时空维度, 跨尺度数据与模型的语义对齐、质量保障尚不成熟, 观测误差易沿融合、预测、推演的链路传播累积^[64]; 后者源于世界模型的长时域误差累积、物理一致性评估标准缺失与实时推理效率不足, 数字孪生的虚实同步保真度亦有待提升。下一步需构建统一时空参考框架与语义本体、实现自动化对齐与不确定性量化, 并发展具备物理一致性评估的高效世界模型, 推动数字孪生与世界模型的有效耦合。

(2) 应用策略层面

时空智能物联网的规模化落地仍受制于跨域协同与算力资源的双重约束。一方面, 低空经济、智慧交通、工业互联网等领域对通感算智一体化融合提出差异化需求, 动态资源的协同调度尚难满足海量异构终端的高并发接入; 另一方面, 面向大规模

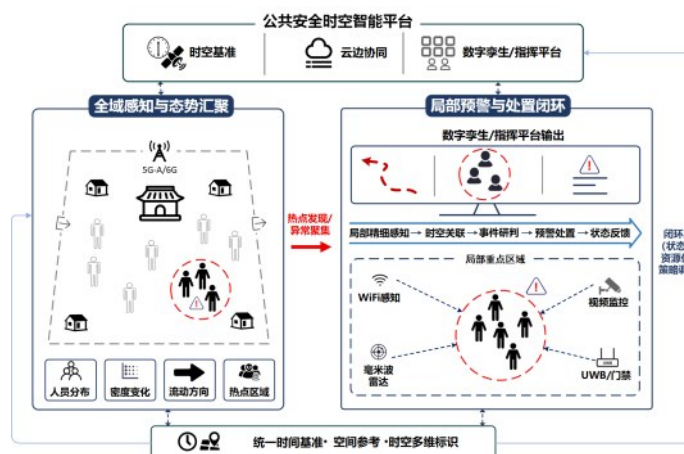


图6 基于时空智能物联网的公共安全应用场景



图7 基于时空智能物联网的医学救援应用场景

异构智能体的群智协同与算力互联网的跨域编排尚处于起步阶段，云边端协同的资源受限问题突出^[83-84]。未来应构建面向通感算智融合的资源管控与算力网络体系，探索人机物群智协同的规模化运营模式，推动低空经济等场景从示范走向普及^[85]。

(3) 安全可信层面

时空智能物联网以统一时空基准为可信根基，其安全可信与标准治理仍存在显著短板。安全方面，关键信息基础设施物联网面临系统性安全风险，时空基准自身亦需抵御GNSS欺骗与压制干扰攻击，位置与轨迹数据的广泛采集还带来突出的隐私泄露风险，传统云管边端防护难以应对具身智能等新兴威胁^[79,86-87]。标准方面，跨源跨域的时空语义、元数据与格网编码互操作标准尚未统一，跨平台模型与数字孪生体之间亦缺乏统一的互操作规范，制约数据可信流转与跨部门协同^[25,88]。下一步应发展融合时空特征的内生安全检测与通域统一、专域增强防护体系，并加快时空基准、语义本体与元数据标准的统一，构建覆盖全域的可信治理生态。

5 结束语

本文提出时空智能物联网（ST-IoT）概念，旨在回答如何以统一时空基准贯通并重构物联网智能

能力链这一科学问题，推动物联网由被动响应迈向主动预见。围绕这一目标，本文界定了时空智能物联网的概念内涵，构建了以统一时空基准为底座、通感算智融合为内核，以“感知—认知—行动”能力递进为骨架的体系架构，并结合低空经济、智慧交通等典型场景论证其应用价值。随着北斗、5G/6G与人工智能深度融合，时空智能物联网将有力支撑低空经济、智慧城市等新质生产力场景，为数字中国建设提供基础设施保障。



王军 (1974—)，男，博士，武汉大学网络空间安全学院教授，主要研究方向为网络空间安全、网络攻防、网络协议、网络性能、网络可靠性、网络韧性、网络智能化、网络可信、网络治理、网络标准、网络政策、网络法规、网络伦理、网络文化、网络教育、网络新闻、网络艺术、网络体育、网络旅游、网络商业、网络金融、网络法律、网络道德、网络责任、网络权利、网络自由、网络平等、网络正义、网络公平、网络和谐、网络文明、网络进步、网络发展、网络繁荣、网络强盛、网络辉煌、网络永恒。



陈彦彦 (1987—)，女，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为网络空间安全、网络攻防、网络协议、网络性能、网络可靠性、网络韧性、网络智能化、网络可信、网络治理、网络标准、网络政策、网络法规、网络伦理、网络文化、网络教育、网络新闻、网络艺术、网络体育、网络旅游、网络商业、网络金融、网络法律、网络道德、网络责任、网络权利、网络自由、网络平等、网络正义、网络公平、网络和谐、网络文明、网络进步、网络发展、网络繁荣、网络强盛、网络辉煌、网络永恒。



陈彦彦 (1987—)，女，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为网络空间安全、网络攻防、网络协议、网络性能、网络可靠性、网络韧性、网络智能化、网络可信、网络治理、网络标准、网络政策、网络法规、网络伦理、网络文化、网络教育、网络新闻、网络艺术、网络体育、网络旅游、网络商业、网络金融、网络法律、网络道德、网络责任、网络权利、网络自由、网络平等、网络正义、网络公平、网络和谐、网络文明、网络进步、网络发展、网络繁荣、网络强盛、网络辉煌、网络永恒。



陈彦彦 (1987—)，女，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为网络空间安全、网络攻防、网络协议、网络性能、网络可靠性、网络韧性、网络智能化、网络可信、网络治理、网络标准、网络政策、网络法规、网络伦理、网络文化、网络教育、网络新闻、网络艺术、网络体育、网络旅游、网络商业、网络金融、网络法律、网络道德、网络责任、网络权利、网络自由、网络平等、网络正义、网络公平、网络和谐、网络文明、网络进步、网络发展、网络繁荣、网络强盛、网络辉煌、网络永恒。



陈彦彦 (1987—)，女，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为网络空间安全、网络攻防、网络协议、网络性能、网络可靠性、网络韧性、网络智能化、网络可信、网络治理、网络标准、网络政策、网络法规、网络伦理、网络文化、网络教育、网络新闻、网络艺术、网络体育、网络旅游、网络商业、网络金融、网络法律、网络道德、网络责任、网络权利、网络自由、网络平等、网络正义、网络公平、网络和谐、网络文明、网络进步、网络发展、网络繁荣、网络强盛、网络辉煌、网络永恒。

参考文献:

- [1] 李德仁, 王密, 肖晶, 等. 论无所不在的时空智能[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1388-1398.
- [2] 李德仁, 郭昊南, 金文杰. 时空智能学: 理论与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(9): 1755-1764.
- [3] 刘万增, 陈军. 时空信息的基本内涵与赋能机理[J]. 地理学报, 2024, 79(5): 1099-1114.
- [4] SARWAT M. Spatial Data Systems Support for the Internet of Things: Challenges and Opportunities[J]. ACM SIGSPATIAL Special, 2020, 12(2): 42-47.
- [5] SILVA D S, HOLANDA M. Applications of geospatial big data in the Internet of Things[J]. Transactions in GIS, 2022, 26: 41-71.
- [6] 王军, 崔云辉, 张宇航. 世界模型研究综述[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56(5): 1-12.
- [7] 钱振兴, 甘振良. 人工智能中世界模型的起源与研究路径[J]. 热带地理, 2026, 46(1): 67-82.
- [8] 高帅和, 郑福, 龚学文. 智能网联卫星的新质时空服务[J]. 无线电通信技术, 2025, 51(6): 1189-1191.
- [9] 陈军, 王艳慧, 武昊, 等. 时空信息赋能高质量发展的基本问题与发展方向[J]. 时空信息学报, 2023, 30(1): 1-11.
- [10] 李德仁, 郭昊南. 时空智能助推新质生产力发展[J]. 科技导报, 2025, 43(24): 27-34.
- [11] 刘强, 崔莉, 陈海明. 物联网关键技术与应用[J]. 计算机科学, 2010, 37(6): 1-4, 10.
- [12] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.
- [13] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: A survey [J]. Computer Networks, 2010, 54: 2787-2805.
- [14] 李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧地球时代测绘地理信息学的新使命[J]. 测绘科学, 2012, 37(6): 5-8.
- [15] 李凯, 李峰, 张建民, 等. 物联网时代地球空间信息学的应用与发展趋势研究[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(5): 78-83.
- [16] ZHOU Z, CHEN X, LI E, et al. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(8): 1738-1762.
- [17] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [18] DING J, ZHANG Y, SHANG Y, et al. Understanding World or Predicting Future? A Comprehensive Survey of World Models[J]. ACM Computing Surveys, 2025, 58(3): 1-38.
- [19] 李德仁. 展望 5G/6G 时代的地球空间信息技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1475-1481.
- [20] 田洛, 田璐宁. 面向 6G 的通感算一体化关键技术综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2025, 37(4): 453-470.
- [21] 张新, 李子申, 潘洁, 等. 时空具身智能: 北斗导航与高分遥感融合发展新方向[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9): 1733-1754.
- [22] KAMILARIS A, OSTERMANN F O. Geospatial Analysis and the Internet of Things[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(7): 269.
- [23] BURHAN M, REHMAN R A, KHAN B, et al. IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2796.
- [24] DI MARTINO B, RAK M, FICCO M, et al. Internet of things reference architectures, security and interoperability: A survey[J]. Internet of Things, 2018, 1-2: 99-112.
- [25] Open Geospatial Consortium. OGC SensorThings API Part 1: Sensing Version 1.1: OGC 18-088[S/OL]. 2021[2026-09-30]. <https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html>.
- [26] International Organization for Standardization. Geographic information—Observations, measurements and samples: ISO 19156:2023[S/OL]. 2023[2026-09-30]. <https://www.iso.org/standard/82463.html>.
- [27] Open Geospatial Consortium. OGC Abstract Specification Topic 20: Observations, measurements and samples: OGC 20-082r4 Version 3.0.0[S/OL]. 2023[2026-09-30]. <http://www.opengis.net/doc/as/om/3.0>.
- [28] SANCHEZ L, MUÑOZ L, GALACHE J A, et al. SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed[J]. Computer Networks, 2014, 61: 217-238.
- [29] MACH P, BECVAR Z. Mobile Edge Computing: A Survey on Architecture and Computation Offloading[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1628-1656.
- [30] NOARDO F. Multisource spatial data integration for use cases applications[J]. Transactions in GIS, 2022, 26(7): 2874-2913.
- [31] SHANG Y, LI Z, MA Y, et al. Worldarena: A unified benchmark for evaluating perception and functional utility of embodied world models [J]. AI Open, 2026, 7: 208-226.
- [32] 陈军, 武昊, 张继贤, 等. 自然资源调查监测技术体系构建的方向与任务[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1041-1055.
- [33] 施闯, 李坤雷, 王家乐, 等. 北斗+5G 综合时空网赋能低空经济: 技术架构、应用实践与未来展望[J]. 航空学报, 2026, 47(14): 533591.
- [34] 张建伟, 陈旭, 王叔洋, 等. 时空图神经网络在物联网中的应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(5): 43-54.
- [35] 沈妙, 陈露元, 李然, 等. 大模型技术赋能时空计算服务的思路与实践[J]. 时空信息学报, 2025, 32(6): 620-629.
- [36] 赵翔, 黑梦哲, 李家旭, 等. 基于大模型的世界模型研究综述(特邀)[J]. 计算机工程, 2026, 52(6): 1-16.
- [37] 董超, 崔灿, 贾子晔, 等. 面向低空智能网的多维信息统一表征技术综述[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(5): 1215-1229.
- [38] 莫青琳. 面向物联网应用的人工智能技术发展综述[J]. 智能物联技术, 2026, 58(3): 6-10.
- [39] 王新奕, 费泽松, 周一青, 等. 面向物联网的通感算智融合: 关键技术与未来展望[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(4): 888-908.
- [40] SARHADDI F, NGUYEN N T, ZUNIGA A, et al. LLMs and IoT: A Comprehensive Survey on Large Language Models and the Internet of Things[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2026, 7: 3585-3616.
- [41] 刘经南, 罗亚荣, 郭迟, 等. PNT 智能与智能 PNT[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 811-828.
- [42] 陈沛宇, 袁勤政, 戴鹏飞, 等. 多技术融合的室内无线定位方法发展综述[J]. 导航定位学报, 2022, 10(3): 9-13.
- [43] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [44] SU Y, ZHU D, XIAO B, et al. Geospatial grid management: A comprehensive framework and systematic review of subdivision, encoding, indexing and storage[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 144: 104860.
- [45] 杨元喜. 地理空间数字孪生与时空智能[J]. 测绘学报, 2025, 54(2):

- 213-220.
- [46] JI S, PAN S, CAMBRIA E, et al. A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition, and Applications[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(2): 494-514.
- [47] NOGUERAS-ISO J, ZARAZAGA-SORIA F J, LACASTA J, et al. Metadata standard interoperability: application in the geographic information domain[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2004, 28: 611-634.
- [48] SUN K, ZHU Y, PAN P, et al. Geospatial data ontology: the semantic foundation of geospatial data integration and sharing[J]. *Big Earth Data*, 2019, 3(3): 269-296.
- [49] LI H, LU H, JENSEN C S, et al. Spatial Data Quality in the Internet of Things: Management, Exploitation, and Prospects[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(3): 1-41.
- [50] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [51] 刘壮, 吴宇赫, 陈雨然, 等. 通信-感知-计算融合: 关键技术、挑战与未来趋势[J]. *计算机科学与探索*, 2025, 19(9): 2273-2301.
- [52] 李应龙, 李润泽, 丁璠, 等. 卫星物联网关键技术综述[J]. *物联网技术*, 2025, 15(13): 111-115+118.
- [53] KONG L, TAN J, HUANG J, et al. Edge-computing-driven Internet of Things: A Survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(8): 174.
- [54] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(1): 69-89.
- [55] HAMD I A, SHABAN K, ERRADI A, et al. Spatiotemporal data mining: a survey on challenges and open problems[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2022, 55: 1441-1488.
- [56] ATLURI G, KARPATNE A, KUMAR V. Spatio-Temporal Data Mining: A Survey of Problems and Methods[J]. *ACM Computing Surveys*, 2018, 51(4): 1-41.
- [57] 宋轩, 高云君, 李勇, 等. 空间数据智能: 概念、技术与挑战[J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(2): 255-263.
- [58] 程涛, 张洋, HAWORTH J. 基于网络和图的时空智能: 概念、方法 and 应用[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1629-1639.
- [59] JIN M, KONG Y, LIANG Y, et al. Large Models for Time Series and Spatio-Temporal Data: A Survey and Outlook[J]. *ACM Computing Surveys*, 2026, 58(14): 1-38.
- [60] FANG Y, MIAO H, LIANG Y, et al. Unraveling Spatio-Temporal Foundation Models via the Pipeline Lens: A Comprehensive Review[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2026, 38(3): 2040-2063.
- [61] 杨必胜, 陈一平, 邹勤. 从大模型看测绘时空信息智能处理的机遇和挑战[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(11): 1756-1768.
- [62] TAO F, XIAO B, QI Q, et al. Digital twin modeling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 64: 372-389.
- [63] LEI B, JANSSEN P, STOTER J, et al. Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey[J]. *Automation in Construction*, 2023, 147: 104716.
- [64] LIU X, ANTWI-AFARI M F, LI J, et al. BIM, IoT, and GIS integration in construction resource monitoring[J]. *Automation in Construction*, 2025, 174: 106149.
- [65] 龚健雅, 乐鹏, 向隆刚, 等. 开放地球引擎 OGE 设计与研制[J]. *测绘学报*, 2025, 54(4): 587-602.
- [66] MATSUO Y, LECUN Y, SAHANI D, et al. Deep learning, reinforcement learning, and world models[J]. *Neural Networks*, 2022, 152: 267-275.
- [67] 白辰甲, 许华哲, 李学龙. 大模型驱动的具身智能: 发展与挑战[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(9): 2035-2082.
- [68] 沈高青, 蔡圣所, 雷磊, 等. 基于数字孪生和强化学习的低空物联网协同认知干扰[J]. *数据采集与处理*, 2024, 39(1): 15-30.
- [69] 喻鹏, 谭灿, 李文璟, 等. 数字孪生驱动的低空物联网自智管控架构及关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55(10): 2449-2470.
- [70] 罗子哲, 李玲, 侯朋朋, 等. 面向 AIoT 的协同智能综述[J]. *计算机研究与发展*, 2025, 62(1): 179-206.
- [71] 吴启晖, 董超, 贾子晔, 等. 低空物联网组网与控制理论方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(3): 028809.
- [72] 董超, 经宇骞, 屈毓铨, 等. 面向低空物联网频谱认知与决策的云边缘融合体系架构[J]. *通信学报*, 2023, 44(11): 1-12.
- [73] 运若宇, 贾铭禹, 王业康, 等. 低空智联网网络架构及其关键技术[J]. *无线电通信技术*, 2026, 52(2): 328-338.
- [74] 武燕燕, 吴松. 低轨卫星辅助的低空智联网架构分析及设计[J]. *电信科学*, 2025, 41(3): 27-37.
- [75] 张明强, 马晓聪, 杨雅娟, 等. 工业物联网智能感知-传输-控制融合: 关键技术与未来展望[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(10): 3410-3425.
- [76] 王健全, 马彰超, 孙雷, 等. 工业网络体系架构的演进、关键技术及未来展望[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(8): 1376-1389.
- [77] 王飞跃, 张军, 张俊, 等. 工业智联网: 基本概念、关键技术与核心应用[J]. *自动化学报*, 2018, 44(9): 1606-1617.
- [78] 任磊, 董家宝, 曾宪超, 等. 数字族谱: 驱动工业具身智能世界模型[J]. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55(7): 1748-1765.
- [79] 徐文渊, 程雨诗, 陈艳姣, 等. 关键信息基础设施物联网安全发展态势及展望[J]. *中国工程科学*, 2026, 28(2): 125-136.
- [80] 李德仁, 秦昆, 张过, 等. 社会遥感地理计算的研究进展与创新[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2026, 51(1): 1-21.
- [81] 翁铜铜, 矫桂娥, 张文俊. 一种融合时空特征的物联网入侵检测方法[J]. *信息安全研究*, 2025, 11(3): 241-248.
- [82] 倪明选, 张黔, 谭浩宇, 等. 智慧医疗: 从物联网到云计算[J]. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43(4): 515-528.
- [83] 郭斌, 刘思聪, 刘琰, 等. 智能物联网: 概念、体系架构与关键技术[J]. *计算机学报*, 2023, 46(11): 2259-2278.
- [84] 易昕昕, 张乃喆, 刘雅承, 等. 算力智联网关键技术研究[J]. *中兴通讯技术*, 2025, 31(2): 31-38.
- [85] 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空智联网与无人机产业应用[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1441-1450.
- [86] SELIEM M, ELGAZZAR K, KHALIL K. Towards Privacy Preserving IoT Environments: A Survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 2018: 1-15.
- [87] BRAUN T, FUNG B C M, IQBAL F, et al. Security and privacy challenges in smart cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39: 499-507.
- [88] SJOUKEMA J W, SAMIA J, BREGT A K, et al. Governance interactions of spatial data infrastructures: an agent-based modelling approach[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14(6): 696-713