



综述

智能物联网 AIoT 研究综述

吴吉义¹, 李文娟², 曹健³, 钱诗友³, 张启飞⁴, BUYYA Rajkumar⁵

- (1. 浙江省人工智能学会, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州师范大学钱江学院, 浙江 杭州 310036;
3. 上海交通大学计算机科学与工程系, 上海 200240; 4. 浙江大学软件学院, 浙江 宁波 315048;
5. 墨尔本大学云计算与分布式系统 CLOUDS 实验室, 澳大利亚 墨尔本 VIC3010)

摘要: 智能物联网 (artificial intelligence of things, AIoT) 是人工智能与物联网技术相融合的产物, 这一新兴概念在智慧城市、智能家居、智慧制造、无人驾驶等领域得到了广泛应用。然而 AIoT 相关技术研究仍处于初级阶段, 存在大量问题和挑战。首先简述了 AIoT 技术产生的背景, 明晰其定义和应用场景。以此为契机, 构建了一个新型的面向智能信息处理的云边端融合 AIoT 架构。在给出 AIoT 研究体系的基础上, 详细探讨并比较了其各组成技术模块, 包括 AI 融合 IoT 数据采集、复杂事件处理及协同、云边端融合研究、AI 融合 IoT 安全及隐私保护和 AI 融合应用服务等方面的研究现状和解决方案。最后, 论述了 AIoT 未来的研究方向和发展趋势。

关键词: 智能物联网; 云边端混合计算框架; AI 融合 IoT 应用; 研究方向

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021204

AIoT: a taxonomy, review and future directions

WU Jiyi¹, LI Wenjuan², CAO Jian³, QIAN Shiyu³, ZHANG Qifei⁴, BUYYA Rajkumar⁵

1. Zhejiang Federation of Artificial Intelligence, Hangzhou 310027, China

2. Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

3. Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4. School of Software Technology, Ningbo 315048, China

5. Cloud Computing and Distributed Systems Lab, The University of Melbourne, Melbourne VIC3010, Australia

Abstract: AIoT (artificial intelligence of things) is an integrated product of artificial intelligence (AI) and internet of things (IoT). Currently, it has been widely used in smart cities, smart homes, smart manufacturing, and driverless. However, the research of AIoT is still in its infancy, facing with many problems and challenges. In order to clarify the concept and provide possible solutions, a comprehensive survey was carried out on AIoT. Firstly, a clear definition of AIoT was provided, along with the brief introduction on its background and application scenarios.

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-08-15

通信作者: 李文娟, liellie@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61702151, No.61702320, No.61772334); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1003800)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61702151, No.61702320, No.61772334), The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1003800)



And then a novel cloud-edge-end hybrid AIoT architecture for intelligent information processing was constructed. Based on the research framework of AIoT, the research status and solutions were discussed, including AI integrated IoT data acquisition, complex event processing and coordination, cloud-edge-end integration, AI-enhanced IoT security and privacy, and AI-based applications, etc. Finally, it identified the open challenges and offers future research directions.

Key words: AIoT, cloud-edge-end hybrid computing framework, AI integrated IoT application, research direction

1 引言

物联网 (internet of things, IoT) 指通过各种类型的传感器件, 并借助特定的信息传播媒介, 实现物物相连、信息交换和共享的新型智慧化网络模式^[1]。移动通信技术的发展将物联网的边界从传感器网络, 延伸到包括人、车、家用电器和公共基础设施等在内的泛在物体, 物联网已从最初的物物互联网络扩展到万物互联 (internet of everything) 时代。万物互联是人类科技史上的又一次重大革命, 对社会生产及生活产生了巨大而深远的影响。它在给人们带来更便捷、更智慧生活的同时, 也引发了大量新的技术和社会问题: 智能设备联网和数字化率提升、频繁的互操作, 将造成解决方案复杂性的不断提升, 如何在低时延的前提下, 确保操控、决策和协同的正确和有效性; 万物互联持续制造比以往任何时代更为巨量的数据, 对这些体量巨大而价值密度低的数据进行合理筛选、存储、加工和处理将成为难题, 数据累积、分析和应用将成为未来企业竞争的主战场, 数据价值挖掘得越好, 企业所获经济效益越大; 万物互联将互联网连接与共享的本质体现得淋漓尽致, 然而无处不在的连接将导致严峻的安全隐患、引发数据隐私保护危机, 安全策略、模型、平台和交互规则设计必须提上日程。

通信技术的升级仅解决了物联网在联网层面上的问题, 其普及和深度应用仍面临巨大挑战。从目前来看, 物联网需要重点突破的环节包括设备智能控制、数据智慧分析处理、语义理解和基

于内容的融合应用开发等。而人工智能恰恰是实现信息技术高层次智慧化应用 (如数据挖掘、语义理解、智能推理、智慧化决策) 的能手。因此, 人工智能成为解决 IoT 技术瓶颈的有效工具, 人工智能与物联网的深度融合将成为物联网技术进一步发展的驱动力。

2017 年 11 月 28 日, “万物智能新纪元 AIoT 未来峰会”上, 研究者首次公开提出了人工智能物联网 (artificial intelligence of things, AIoT) 的概念^[2]。AIoT 是人工智能和物联网的融合应用, 两种技术通过融合获益。一方面, 人工智能帮助物联网智慧化处理海量数据, 提升其决策流程的智慧化程度, 改善人机交互体验, 帮助开发出高层次应用, 提升物联网应用价值。另一方面, 物联网通过万物互联, 其无所不在的传感器和终端设备为人工智能提供了大量可分析的数据对象, 使得人工智能研究落地。简言之, AI 让 IoT 拥有了“大脑”, 使“物联”提升为“智联”, 而 IoT 则给予 AI 更广阔的研究“沃土”, 促使“人工智能”推向“应用智能”。

短短几年时间, 人工智能物联网已在多个应用领域实现了落地, 如智能家居、智慧化城市、智慧医疗、无人驾驶、智慧工业控制等。华为 GIV (全球产业愿景) 报告预测^[3], 到 2025 年全球连接的设备数将达到 1 000 亿台, 万物感知、万物互联带来的数据洪流将与各产业深度融合, 催生产业物联网的兴起, 提升行业效率, 推动产业升级。IDC 则预测: 到 2022 年, 将有超过 500 亿的终端与设备联网, 未来超过 75% 的数据需要在网络边缘侧分析、处理与存储^[4]。

2 AIoT 的基本概念

2.1 AIoT 定义

智能物联网 (AIoT) 属于比较新的名词, 业界对其定义并未达成一致。百度百科认为: $AIoT=AI+IoT$, 是 AI 和 IoT 两种技术相互融合的产物, IoT 是异构、海量数据的来源, 而 AI 用于实施大数据分析, 其最终目标是实现万物数据化、万物智能化^[5]。《2020 年中国智能物联网 (AIoT) 白皮书》中指出: AIoT 是人工智能与物联网的协同应用, 它通过 IoT 系统的传感器实现实时信息采集, 而在终端、边缘或云进行数据智能分析, 最终形成一个智能化生态体系^[6]。白皮书同时对 AIoT 在技术和商业层面的内涵做出了解释。

本文认为, AIoT 是一种人工智能与物联网融合研究模型, 属于一种新型的深度 IoT 研究和应用形态。其中, IoT 是 AIoT 的基础设施, 其无所不在的传感器和智能终端将实现人一机一物互联, 实时获取大量应用数据, 是数据来源和运行基石; AI 是 AIoT 的智慧化手段和工具, AI 帮助 IoT 实现智慧互联, 提升连接的广度、深度和有效性, 实现大数据智能分析, 增强 IoT 系统的感知、鉴别和决策能力, 提升融合应用解决复杂问题的能力 and 智慧化水平。

图 1 对 AIoT 模型进行了诠释。由于融合 AI 的 IoT 应用通常要求物联网设备具备一定的算力, 因此也常常与云计算、边缘计算等 IT 基础设施平台进行融合。AIoT 平台通过语音、视频等更加友好的人机交互界面, 实现对物联网设备的智能操控、物联网信息的深度语义理解、价值提取、智能操控和其他高层衍生应用。目前 AIoT 已经在生物特征识别、智能家居、智慧农业、智慧工业及智慧城市下属的智慧物联网平台 (智能交通系统、智能社区、智慧医疗) 等领域展开了广泛研究。

AIoT 通过应用 AI 提高 IoT 应用的智慧化程

度, 提升应用层次, 因此通常按照智慧化级别对 AIoT 进行分级, 如图 2 所示。其中, 智慧级别分成从低到高 5 个层次, 包括传播智慧化、聚合智慧化、处理智慧化、识别智慧化和决策智慧化。嵌入人工智能的物体包括智慧个体、智慧物件和

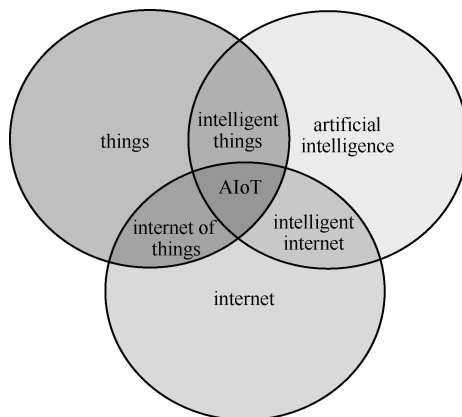


图1 AIoT 是 IoT 与 AI 的融合

智慧容器 3 个级别。而 AIoT 构建的智慧化系统按照复杂程度分为 3 个级别, 包括嵌入式智慧平台、一般智慧服务平台和分布式智慧服务平台。而网络基础设施层则按照覆盖面分成智慧局域网、智慧同构互联网和智慧跨域互联网。

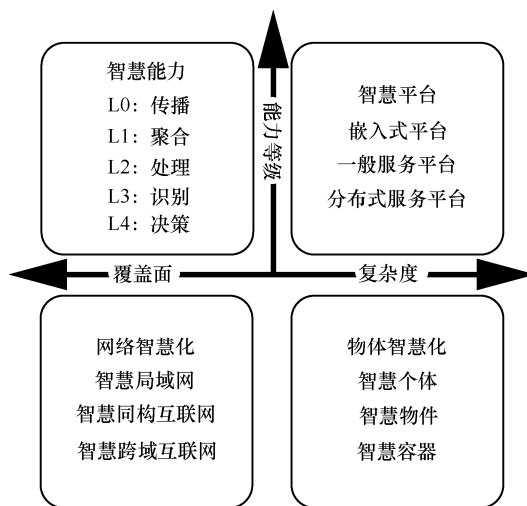


图2 以智慧级别对 IoT 进行分类

2.2 AIoT 技术架构

2.2.1 云边端融合 AIoT 架构

AIoT 技术架构不仅需要考虑传统物联网的

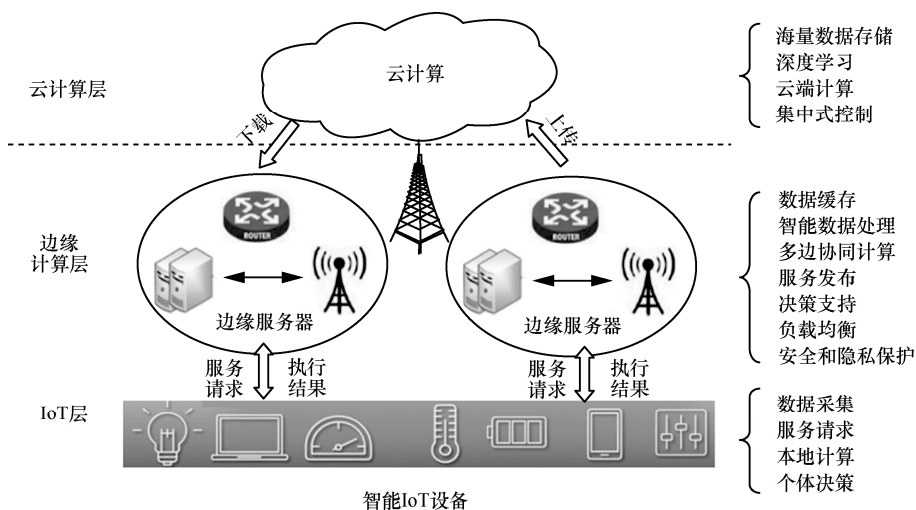


图3 云边端融合 AIoT 架构

技术模型，还需要解决注入 AI 后如何及时处理海量数据，进行语义理解、人机交互和智能控制等问题^[7]，是一种非常复杂的生态系统，将催生新的从边缘到云的混合计算服务。

基于云的海量处理能力，人工智能适合放在云端处理，但可能造成时延。不同应用的时延容忍性不同：比如语音助手回答天气问题出现时延是可容忍的，而智能自动驾驶/工业制造时出现时延则不可容忍。因此，为了适配不同应用对实时性和精确性的需求，同时平衡 AI 在各级网络层次的部署，本文提出一种云边端融合 AIoT 架构。在云边端融合 AIoT 架构中，当实时响应和低时延是关键因素时，主要依靠更靠近用户的边缘计算架构；当计算决策的精确性是关键因素时，主要依靠云服务器。通过 AI 在混合计算架构中的逐级布局，以平衡云计算所带来的规模经济与在边缘引入人工智能处理能力的性能需求之间的矛盾，该架构如图 3 所示。

云边端融合 AIoT 架构包含 3 层：IoT 层、边缘计算层和云计算层。IoT 层包含大量泛在感知的智能 IoT 设备，能够实现面向用户的数据采集、智能服务响应、本地计算、简单数据处理和决策。边缘计算层是 IoT 和云计算中心的中间件，用以扩展终端的计算和存储能力，其主要功能包括数

据/服务缓存、分布式数据处理和协同、分布式 AI 算法部署和计算、智能决策支持、负载均衡、安全和隐私保护等。云计算层即传统的云计算中心，包括海量的计算、存储和带宽能力，能够辅助 IoT 和边缘进行海量数据存储、深度学习、复杂计算、集中控制和决策等，是挖掘 AIoT 数据价值、创造增值服务的核心模块。

2.2.2 业务逻辑模型

对应于 AIoT 技术架构，图 4 给出了 AIoT 的业务逻辑模型。其主要包含 4 层：应用层（涵盖 AIoT 的主要应用领域）、操作系统服务层（包含各种服务资源调度、信息、位置及安全管理等服务）、基础设施层（包含对整个实现过程中涉及的宏观资源管理和抽象）以及接入层（包含接入媒介、信号感知识别等功能）。



图4 AIoT 业务逻辑模型

2.3 AIoT 的应用场景

目前 AIoT 已在多个应用领域实现了落地。

(1) 智慧安防

截至 2017 年 9 月,全国安装于公共服务的视频监控摄像机已经达到 3 000 万台,这些公共基础设施中捕获的视频图像的内容可以通过 AIoT 进行深入挖掘,从而构建智慧社会治安防线,实现对违法案件的提前预防和精准打击。

(2) 智慧交通

AIoT 通过视频图像分析交通的拥堵状态以及车流量、人流量等,在数据分析的基础上叠加红绿灯等实际手段,优化城市交通路径,改善拥堵状况。此外,通过车一路一边的配合, AIoT 有望打造无人驾驶系统。

(3) 智慧销售

AIoT 技术能够借助物联网获取的人脸数据、结合用户轨迹和购买数据,了解用户行为,充实用户画像,实现主动服务、智能服务推荐和增值服务,构建人一货一场生态,帮助企业实现精准化营销。

(4) 智慧园区

AIoT 能够实现社区档案、安全防护、轨迹定位、智慧物业和出入控制等智能化管理。

(5) 智慧制造物联

通过融合物联网、电子信息、人工智能与制造技术等实现对产品制造与服务过程全生命周期制造资源与信息资源的动态感知、智能处理与优化控制。

国内主要 IT 企业在 AIoT 方面的主要应用领域见表 1。

此外,传统的家电厂商(如美的、海尔等)也将战略重点放在 AI 和物联网的融合上。

3 AIoT 研究体系及研究现状

3.1 研究体系

AIoT 属于跨学科交叉、涵盖研究领域较广,涉及信息处理、互联网、移动通信、计算机等多种技术。通过对当前 AIoT 相关研究工作进行归类和梳理,同时按照 AI 辅助 IoT 实现各层智慧化为研究对象,结合 AIoT 的主流应用场景,形成如图 5 所示的 AIoT 的研究体系。

该体系包含四大 AI 与 IoT 融合研究主题,分别是 AI 与 IoT 感知层融合、AI 与 IoT 操控层融合、AI 与 IoT 应用场景融合,以及 AI 与 IoT 安全及隐私保护融合。其中,感知层和操控层是应用的基础设施。感知层融合研究主要包括数据采集、分

表 1 国内主要 IT 企业 AIoT 应用领域

数据来源时间	公司名称	战略重点	应用场景
2018 年 3 月	阿里巴巴	IoT 成为第 5 个主赛道	智能人居、智慧城市、工业物联网
2018 年 4 月	百度	与硬蛋签订 AIoT 合作协议	无人驾驶、智能家居
2018 年 5 月	腾讯	布局人联网、物联网和智联网	腾讯超级大脑
2018 年 11 月	小米	成为核心战略	智能家居、硬件平台研发
2018 年 12 月	华为	首次公布 AIoT 战略	全场景应用
2018 年 12 月	京东	退出“京鱼座”生态品牌	智能硬件、智能家居、智慧出行等
2019 年 1 月	云知声	公布多模态 AI 芯片战略	智慧城市、智慧家居、智慧出行等
2019 年 1 月	思必驰	发布首款 AI 芯片 TAIHANG	智能家居、智能车载、企业服务
2019 年 1 月	OPPO	成立新兴移动事业部、注重 AIoT 技术研发	智慧生活
2019 年 1 月	旷世	宣布打造 AIoT 操作系统	制造业、智慧物流等

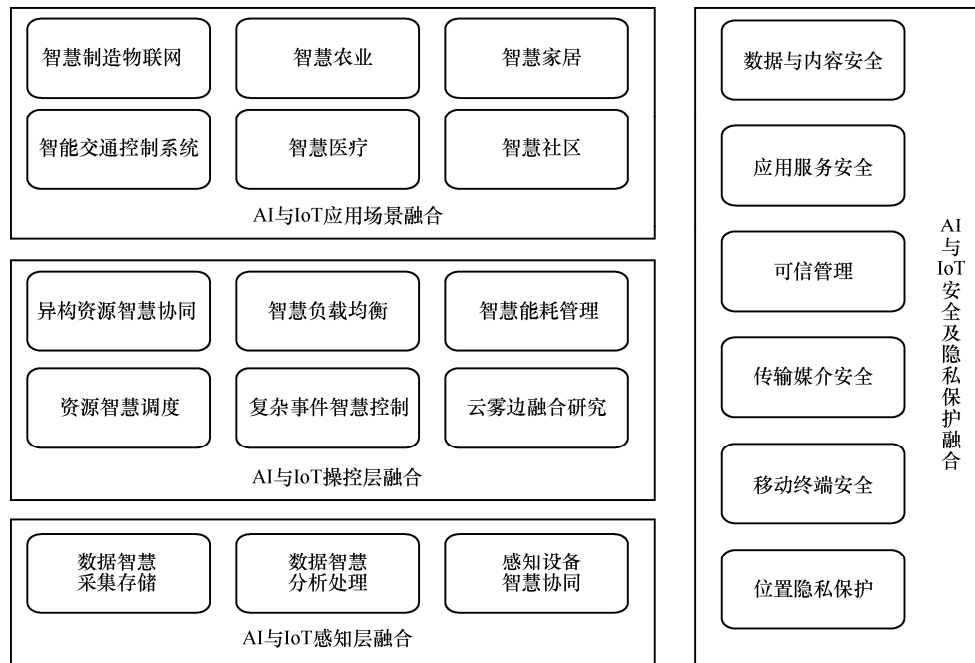


图5 AIoT 的研究体系

析、处理及存储智慧化、异构感知设备智慧协同，操控层融合主要包括资源智慧调度、异构资源智慧协同、智慧负载均衡、智慧能耗管理、复杂事件智慧控制以及与云雾边等计算范式的融合研究等内容。应用场景融合主要包括智慧制造物联网、智慧农业、智慧家居、智慧交通控制系统、智慧医疗、智慧社区等。安全及隐私保护融合主要涉及位置隐私保护、移动终端安全、传输媒介安全、可信管理、应用服务安全和数据与内容安全等主要内容。

3.2 研究现状

3.2.1 AI 融合 IoT 数据采集

传统物联网中，感知层的数据采集器仅能从点上获取物理世界信息，而构建二维乃至三维空间信息，需要透析数据语义，分析数据之间的深层次联系。因此，进行智慧化数据采集、实现大规模异构网元的高效互联、数据语义理解是突破数据感知的关键。

徐华伟^[8]针对传统物联网信息采集自动化程度较低的问题，提出了一种大数据环境下物联网信息智能采集方法。骆淑云^[9]提出了一种针对低

占空比无线传感器网络的最小延时数据收集机制和面向群智感知网络的多任务博弈激励机制，鼓励用户共享数据资源。祝幸辉^[10]则聚焦海量异构云物联数据的汇聚与存储方法，针对协议不一致而导致的多源数据汇聚问题，提出一种异构网络协议适配及数据汇聚方法；针对数据类型不一致而导致的异构数据存储问题，提出一种海量物联网数据混合存储体系结构和异构数据分类存储方法。

上述 AIoT 数据采集研究方案的比较见表 2。

3.2.2 AI 融合物联网复杂事件处理及协同

金彦龄^[11]结合生物机体模型和调节机制，提出了一系列实现物联网大规模异构网元交互、分布式动态自组织和服务协同监测策略。高恩池^[12]针对未来 5G 网络中 M2M 通信问题，提出了基于负载估计的自适应随机接入策略和基于遗传算法的小区负载均衡策略，以最大化系统吞吐量，降低设备接入时延，满足未来移动通信场景需求。王国智^[13]提出了以 Storm 流式框架和 Esper 为基础的分分布式复杂事件处理引擎，从而帮助企业从

表 2 AIoT 数据采集研究方案比较

文献	应用场景	主要贡献	性能检测
参考文献[8]	物联网智能数据采集	提出面向大数据环境、基于云平台的物联网体系架构和智能数据采集方法	使用车间环境现场采集, 验证采集准确率和安全性
参考文献[9]	无线传感器网络	提出最小延时数据采集策略	采用仿真实验验证时延和能耗
参考文献[10]	云物联平台	提出多源数据汇集方法和异构数据分类存储方法	开发云物联平台验证存储系统的可用性、合法性、可扩展性、稳健性、实时性和安全性

海量多源数据中准确获取与业务规则相匹配的内容, 同时提出了一种基于规则模板和规则关联设备集的流分组策略, 提高了引擎的事件处理性能。周柳慧^[14]以农业物联网环境为背景, 设计了一套基于 USB 技术实现识别视频监控、远程采集和控制的智能网关架构。该设计框架主要包含三大模块: 感知协调处理、智能管理系统和识别视频监控。

Tang 等^[15-16]讨论了如何使用深度学习模型预测 SDN-IoT 中流量负载和进行信道分配。Milis 等^[17]利用语义 Web 技术, 设计了一种新颖的语义增强型物联网智能控制系统 (SEMIoTICS) 架构。

上述复杂事件处理领域研究方案的比较见表 3。

3.2.3 云雾边融合研究

(1) 5G+AIoT

目前 AIoT 的实现尤其商业实现大多基于 4G 技术。相对于 4G, 5G 将带来通信和数据交换层面的巨大变革, 其高速率、低时延有望进一步扩大和延伸 AIoT 的应用场景, 比如可应用于对带宽和时限要求更高的实时应用场景 (远程操控、远程智慧医疗、实时监控等)。然而, 5G 在 AIoT 应用还需解决能耗、多场景/跨域服务协同、互操作及面向用户的 UI 等问题。

Javaid 等^[18]探讨了基于 5G 网络架构的物联网中引入人工智能技术的必然性, 并分析引入 AI 之后对 5G 物联网动态频谱管理、大数据的结构化、异构设备的集成、互操作性和节能方面的影

表 3 AIoT 复杂事件处理领域研究方案比较

文献	应用场景	主要贡献	性能检测
参考文献[11]	物联网环境大规模异构网元互联、分布式自组织和动态协作	提出基于生物启发算法的物联网网元信息交互机制, 基于人体血糖调节模型的物联网动态自组织机制和物联网智能服务模型	通过仿真实验证明了算法的稳定性、目标跟踪能力和服务处理能力
参考文献[12]	5G 支持的 IoT 中的通信问题	提出基于遗传算法的小区负载均衡策略	采用仿真实验验证吞吐率、时延、接入成功率
参考文献[13]	制造物联云平台复杂事件处理	设计分布式复杂事件处理机制	通过两个案例对平台进行功能测试和性能评估
参考文献[14]	物联网智能网关	设计了包含视频监控、数据采集和智能控制的 IoT 网关	通过仿真系统对智能网关的功能进行测试, 同时在智慧农业平台进行了部署和识别视频检测
参考文献[15-16]	基于软件定义网络的 IoT 系统	提出基于深度学习的数据流量预测算法和信道分配算法提高传输质量	通过仿真验证了预测和信道分配算法的准确度和性能 (吞吐量和丢包率)
参考文献[17]	IoT 组件的智能集成、配置和监测	提出语义增强型智能控制系统 (SEMIoTICS) 架构, 支持 IoT 组件的语义建模及在线配置	以场景案例分析方式对架构的可用性进行了讨论



响。Wang 等^[19]提出一种称为 5G 智能物联网的下一代互联网连接框架。该架构充分利用最新的通信技术以及大数据挖掘、深度学习、强化学习等 AI 技术,帮助智能地处理物联大数据,并试图优化通信信道。Kravari 等^[20]提出应结合与 AI 及 IoT 相关的科学理论知识,并从工程应用角度出发构建符合现实需求的 AIoT 模型。

(2) 云雾边+IoT

传统 IoT 虽然能通过泛在的传感器获知数据,但无法存储和处理复杂业务,因此不少研究者提出结合共享基础设施平台(包括云计算、雾计算或边缘计算)的 IoT 模型。

针对边缘端算力受限无法很好部署 AI 模型,Zou 等^[21]研究了以雾计算为中间件架构的云-边混合计算框架,深入分析了机器学习算法在混合框架部署应用的最新研究进展,主要从智能算法、应用场景、能耗角度进行了比较。Liu 等^[22]针对以物联网构建的智慧城市中能源有效性问题,提出设计 IoT+边缘架构的能源基础设施,并应用深层强化学习来进行有效能源调度。Patel 等^[23]提出了一种云+雾+IoT 的混合框架,并提出根据动态条件和应用要求,实现边缘和云之间的自动

转换智能分析方法。Lin 等^[24]研究以雾计算+IoT 构建的车载网中基于内容的智能个性化推荐算法。Tao 等^[25]提出整合云和 IoT 的制造资源智慧分类和接入模型。该模型包括 5 层(资源层、感知层、网络层、服务层和应用层),并提出了基于物联网的资源智能感知和接入方法。Sun 等^[26]针对工业物联网的智能大数据处理需求,提出了云-边协同智能计算架构,通过一个 AI 增强的任务卸载模型,提高服务准确度,通过案例分析验证新策略的性能。

云雾边融合研究方案比较见表 4。

3.2.4 AI 融合 IoT 应用

目前, AI 融合 IoT 应用的主要场景包括工业物联网、智慧农业物联网、智能家居和智慧城市相关应用。其应用形态大多表现为单点式应用,业务融合性、深度和广度仍比较局限。

(1) 智慧工业物联网

El-Gendy^[27]对 AIoT 在工业领域的应用进行了综述,包括智慧工业物联网和智慧机器人,指出存在问题和研究方向。马靖^[28]以提高机械产品装配透明化与智能化为目标,研究了制造物联网环境下智能产品装配系统的建模、多源异构数据

表 4 云雾边融合研究方案比较

文献	应用场景	主要贡献	性能检测
参考文献[18]	基于 IoT 的 5G 网络数据决策	对 AI 技术在基于 IoT 的 5G 网络中应用现状进行了综述	对各种现存方案做了理论分析和比较
参考文献[19]	5G 支持的 IoT 网络中的通信和大数据挖掘	提出 5G 智能物联网范式以实现智慧大数据处理和信道优化	采用仿真实验验证系统性能
参考文献[20]	AIoT 支持的能源管理	提出 AIoT 进行智能能源管理的理论模型	理论分析和建模
参考文献[21]	融合边缘和雾计算的 AIoT 应用	对智能算法在云-雾-边混合框架的应用进行了综述	对各种现存方案做了理论分析和比较
参考文献[22]	智慧城市基于 IoT 的能源管理	提出具备深度学习能力的边缘辅助 IoT 能源管理模型	通过仿真验证了策略的性能(回报率及时延)
参考文献[23]	云边混合计算系统智能决策	提出云边智能框架的落地模型	理论分析和建模
参考文献[24]	车联网	提出车联网智能推荐算法	通过仿真实验验证了推荐算法的精确度和时间效率
参考文献[25]	智能制造	提出基于云的智能制造模型	构建了原型系统验证制造设备智能感知和获取方法的有效性
参考文献[26]	工业物联网	提出云-边协同工业物联网架构和智能任务卸载模型	通过仿真实验检测了模型的服务精确度和服务流量

感知、集成与交互、多层动态优化等问题,并设计了系统原型。赵江^[29]提出智能制造物联网的物性要素和协议要素概念,提出以数据交换服务器为核心的数据交换网关和基于数据库的数据交换模型。

工业物联网是 AIoT 在工业领域的主战场, AIoT 为工业生产注入了联通、共享和智能元素。目前, AIoT 与工业物联网的结合主要表现在以智能工业数据采集为代表的感知层面和以提供智慧化决策和执行控制为代表的操作系统和软件层面。工业智能化的终极目标是构建高度协同的数字化产能生态,帮助工业企业建立连接供需两端、集采产供销存为一体的现代化系统。然而,迄今为止,工业领域 AIoT 植入率仍比较低,已有解决方案偏单点和轻量级,需要研究者进一步探索 AIoT 对工业集成化全场景的支持,提升智能化决策的执行时效。

(2) 智慧农业物联网

智慧农业物联网将农业发展成为一个集信息管理、农田监控、智能作业的智慧化过程,是现代农业产业升级的新模式。Krishnan 等^[30]对结合 AI、IoT 和机器人技术的现代农业应用进行了综述,包括智慧精准农业生产、现代温室管理,智能机器人劳动力等新技术。刘军涛^[31]提出基于循环神经网络和物联网技术的智能农业水肥一体化云系统架构,设计了农田监测、数据汇聚与存储、水肥一体控制及农业数据分析等功能模块。郑婷婷^[32]应用物联网技术实现对农作物的生长状况的实时检测、数据分析、智能管理和设备远程控制。Yan-e^[33]针对提高农业产出和充分利用农业资源,提高农业信息化水平,提出基于 IoT 的智慧农业信息管理系统。

与工业物联网相似,目前 AIoT 在农业物联网的应用主要集中在泛在感知和集中控制两个层面, AIoT 的应用场景比较局限,研究的深度和广度仍有待提高。

(3) 智能家居

智能家居属于普适计算的子领域,利用通信网络将家居中的各类电子产品接入互联网,通过环境智能、远程控制等方式,为用户提供一个舒适、健康及安全的生活环境。胡书山^[34]针对家庭传感以及控制的需求,设计了一套家庭网络通信协议,并以此为基础设计了一个共享式家庭网络构建框架。Wang 等^[35]开发了一款可以用智能手机远程操控的家居机器人,该机器人提供家政服务,通过智能手机可实现远程视频搜索、家电控制和室内安全。Bhide 和 Vagh^[36]提出了智能家居环境监测和控制的智能 IoT 系统,通过基于贝叶斯分类器的数据挖掘方法预测智能设备可能出现的故障以及寻找最优解决方法。Adiono 等^[37]提出了一个基于物联网的智能家居软件应用程序,能够根据操作指令或行为对家用电器进行自动智能控制,并通过加密保护通信安全和隐私。Jian 等^[38]提出了家庭即服务(HaaS)的概念,并设计了一款基于云智能交换机的智能家居设备。

AIoT 提升人居体验,关键在于学习人的偏好,依据喜好适时自适应调整居住环境。因此,偏好学习和家居设备自适应调控是 AIoT 在智能家居中应用的关键技术。此外,人与家居产品、产品与平台、人与平台之间的交互也是需要重点关注的领域, AIoT 融合智能家居应逐渐从目前的环境感知、用户行为分析、单场景适应到多场景自主联动决策的升级,从而真正提高居住智能化和舒适度。

(4) 智慧城市应用

AIoT 是提升城市智慧化程度的重要方式,目前 AIoT 融合城市应用主要集中在智慧社区/小镇、智慧交通、安防和智慧医疗等领域。AIoT 城市级应用的关键技术主要包括智能识别、行为预测、决策控制、服务/资源调度和大数据挖掘等。

1) 智慧社区

智慧社区以物联网技术为核心,综合运用现



代计算机、卫星定位与导航、数据挖掘技术等,对社区中的人、事、物、资源和公共服务进行统筹管理,实现社区信息的有效获取和高效处理。参考文献[39]设计了基于 RFID、ZigBee 和视频监控技术实现的智慧社区管理系统,实现了 RFID 卡片管理、人员信息管理、物业收费管理和安防监控管理等功能。针对智慧城市中 IoT 应用的安全防护,Charkrabarty 等^[40]基于 Black Network 协议和 AI 技术设计了一个新型的抵御网络攻击的框架,该框架采用层次化模型,能够有效应对 IoT 通信中的单点故障和沙盒攻击。

2) 智能交通

魏赞^[41]针对以智慧物联网构建的智能交通系统,提出了车载自组网分层协议模型、车辆移动模型、车辆路由算法与路由协议以及安全解决方案。Ni 等^[42]将车内环境监控与应急管理机制相结合,提出了一种基于物联网的车辆智能生命监控系统,Rane 等^[43]提出针对有限泊车位、面向雇员的智能泊车系统,具体方案是通过人脸识别系统判别合法用户,自动提供可停泊号码,并通过手机 App 与用户交互。Bhate 等^[44]提出基于物联网的交通智能管理系统,帮助正确疏导车流、清理道路拥堵,并缩短应急车辆的行驶时间。Ren 等^[45]引入区块链技术,借助于合理设计的智能合约,在没有中心认证节点的情况下,帮助车辆进行通信和协作,从而实现路网车智能化。Pendor 和 Tasgaonkar^[46]基于 IoT 开发了一款低开销高可靠性的高速公路车辆行驶轨迹追踪框架。

3) 智慧医疗

智慧医疗是 AIoT 技术在医疗领域的应用。参考文献[47]以基于物联网技术的智慧医院为研究对象,提出了体系架构模型和具体设计方案。参考文献[48]设计了一套结合物联网与云计算的智能药盒系统,针对任务调度时效性,提出了一种基于改进粒子群算法的云任务调度模型。Srinivas 等^[49]也设计了一款基于 IoT 平台的智慧药盒,帮

助患者在家进行健康监测和诊断,同时通过安卓手机应用让医生和患者保持密切联系。马玉军^[50]提出云端融合、包含感知层、传输层和云服务层的健康物联网架构。Yang 等^[51]针对全球老龄化和慢性病问题,设计了一个包含智能药箱(iMedBox)、智能药品包装(iMedPack)和可穿戴生物医学传感设备(Bio-Patch)的智能家庭健康平台,帮助孤寡老人实时监测和分析生命体征,检查他们使用医嘱和用药情况,从而架构起完整的云一端、端一云看护体系。Affreen 和 Aftab^[52]提出如何对 IoT 采集到的数据进行集成、流分析和机器学习,提高糖尿病管理系统的智能化。

对于大多数城市而言,由于智慧化基础设施部署不足,AIoT 融合城市应用尚处在初级阶段。随着智能终端的增加、数字化设备联网率的提升,以及城市相关政策、标准的逐渐出台,AIoT 融合的智慧城市将不断升级。

3.2.5 AI 融合 IoT 安全及隐私保护

Zhang 等^[53]针对 IoT 数据采集时的计算开销和可信问题,提出了一个基于区块链的大规模数据采集智能框架,称为 MIDS,其中包含一个协作验证协议、智能信任管理模型、分层数据聚合策略和基于区块链的 IoT 数据管理方案,通过理论论证和仿真实验证明了新模型在大规模异构 WSN 环境下的性能。Guo 等^[54]针对 AI 支持的 IoT 数据采集中存在的安全问题,提出了通过移动车辆和无人机协作收集数据的智能信任合作网络系统 ITCN,其中包含了截止时间感知的数据协作收集框架,主动可验证的信任评估算法和基于信任的无人机航迹路线智能优化算法以提升数据采集量、降低数据采集成本,通过仿真实验证明新策略比传统方法在采集成本和时间上有大幅提升。Xiong 等^[55]针对 IoT 大数据分析和挖掘中的隐私问题,提出了一种基于 k -means 算法和差分隐私的隐私和可用性数据聚类(PADC)方案,它增强了初始中心点的选择和从其他点到中心点距离的

计算方法。

Cha 和 Yeh^[56]以区块链为底层架构设计了一个符合 ISO/IEC 15408-2 标准的安全审计系统,该系统能够满足 AIoT 应用的安全需求。Bagaa 等^[57]提出了一款基于机器学习的 IoT 安全框架,通过 SDN 和 NFV 的结合实现对安全威胁的转移,通过自主研发的入侵检测系统检验了新模型的性能。Xiao 等^[58]构建了 IoT 系统的攻击模型,并对 AI 增强的 IoT 安全策略进行了综述,重点分析了机器学习在 IoT 身份验证、访问控制、任务卸载、恶意软件检测及数据隐私保护方面的研究现状。参考文献[59]对应用边缘智能进行 IoT 数据使用、存储和处理过程中的安全和隐私问题进行了综述,并对可行的解决路线进行推荐。

AIoT 安全和隐私保护策略比较见表 5。目前, AI 融合 IoT 安全和隐私保护相关研究仍处于初级阶段,以模型和策略的构想为主,为数不多的解决方案也处于模拟和仿真阶段,并且局限于具体的应用场景。

3.3 存在问题

(1) 研究碎片化、单点式,业务融合性差,缺少面向一般应用的统一解决方案

目前 AIoT 策略大多针对某个具体应用场

景,缺少统一标准,缺少可大面积推广的统一解决方案。随着 AIoT 技术的发展,需要政府、企业和学术机构共同制定统一的技术规范和标准,探索面向复杂融合应用的解决方案。

(2) 研究成果多局限于模型和框架,缺少落地应用

大多数 AIoT 模型采用理论论证、案例分析和仿真实验验证策略的有效性,缺少原型系统和真实运行环境的检测,普遍缺少融入新策略的落地应用。

(3) 终端算力无法支持 AI 算法部署

IoT 系统中终端设备的算力和资源受限,而 AI 算法尤其是数据挖掘和深度学习算法通常需要强大的算力支持,因此面临着部署 AI 模型的困难以及基于 AI 的数据挖掘和智能决策的时延问题,导致在即时交互场景中应用效果不佳。面向终端有限算力的 AI 模型拆解和并行化实现是可行的解决路径之一,同时,可以探索结合云边缘融合智能的协同 AI 策略,增加 AIoT 应用的可伸缩性。

(4) 无法保证复杂事务处理的效率

加入边缘和雾服务器的云—边—端混合计算框架可以缓解 AI 在边缘部署的资源问题,但是当

表 5 AIoT 安全与隐私保护研究方案比较

文献	应用场景	主要贡献	性能检测
参考文献[53]	无线传感器网络	提出基于区块链的海量 IoT 数据采集框架以提高数据采集的安全、可信和有效性	通过仿真验证了数据采集的时延、信任模型的准确性和数据聚合的计算开销
参考文献[54]	车载无线网	提出可信智能协同网络框架以提高数据采集的安全性和准确性	通过仿真验证了协同数据采集方法的成本、时间和准确度
参考文献[55]	基于 IoT 的智能电力服务系统隐私保护	提出基于 <i>k-means</i> 和差分隐私的隐私和可用性数据聚类方案	通过理论分析了策略的安全性,通过仿真验证了聚类算法的效率
参考文献[56]	安全审计系统	提出基于区块链架构、符合 ISO 标准的安全审计系统,提升 AIoT 应用的安全性	通过理论论证了方案的可行性(性能和隐私保护能力)
参考文献[57]	物联网安全防护	提出基于机器学习的安全框架,实现对安全威胁的快速诊断和预防	构建了安全框架的理论模型,通过仿真实验验证了模型的性能
参考文献[58]	物联网安全及隐私保护	设计 IoT 攻击模型,对基于机器学习的 IoT 安全策略进行了综述	采用理论分析和仿真对比了不同策略的有效性
参考文献[59]	数字交易市场	分析了边缘智能在 IoT 数字交易中应用的安全和隐私问题	对存在问题及可行处理方案进行了理论分析



边缘催生复杂应用或产生复杂服务需求时,任务的多边和分层卸载仍未有特别理想的策略,能够确保协同的效率和安全性,以及实现负载均衡。未来可结合调度历史数据,通过 AI 中的机器学习算法构建任务和需求模型,通过资源预分配降低服务时延,也可以通过构建边一边、云一边服务联盟形成相对稳定的服务供应链,提升服务协同效率。

(5) 无法平衡 AIoT 参与各方利益

AIoT 在多个领域的探索性实践,提升了城市、工农业生产和现代交通的智慧化。然而其实施过程中产生的能耗开销,如何在参与者之间进行成本分摊;其所带来的附加价值,包括数据的附加价值、催生的增值业务、获取的行业趋势报告等,如何在参与者之间进行利益分配。这些问题尚未有合理有效的解决方案。未来,可探索基于博弈论、供需理论等经济社会学理论的 AIoT 模型,实现 AIoT 在跨领域、跨场景下实现的多方利益均衡。

(6) 面临安全和隐私保护瓶颈

AI 驱动的 IoT 应用,需要对采集到的数据进行分析挖掘或集成,这需要将原本分布式和自主 IoT 设备中的数据进行集成,即使在本地或加入边缘服务器的云一边混合处理,也可能侵犯数据所有者的隐私,存在数据窃取、误用和滥用的风险。未来,可结合区块链技术探索构建去中心信任管理,提升 AIoT 系统的安全等级,通过数据和行为溯源,确保数据一致性和可靠性,保护数据隐私。此外,由于不同用户或数据对安全和隐私保护需求的强度不同,可探索分级多粒度隐私保护策略。

4 研究方向

人工智能物联网相关研究目前尚处于起步阶段,存在大量的开放性问题有待进一步研究和探索,研究机会、意义和价值非常明显。本文梳理了 AIoT 未来值得重点关注的研究领域,如图 6 所示。

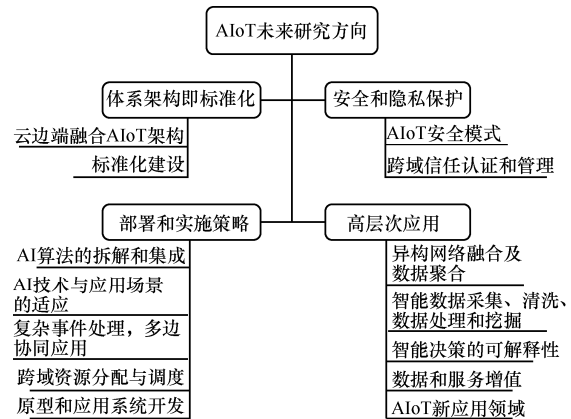


图6 AIoT 未来研究方向

4.1 AIoT 体系架构及标准化

(1) 云边端融合 AIoT 架构

云边端融合物联网架构能够兼顾传统 IoT 泛在感知和处理特性,也能解决加入 AI 之后对存储与算力的要求。然而,如何实现基于内容的动态部署;如何改进现有的计算框架使之更好地处理异构和关系稀疏型 AIoT 任务,实现弹性可伸缩管理;如何确保数据一致性、降低新架构带来的额外管理能耗,如何实现成本分摊和利益均衡等是需要重点关注的问题。

(2) 标准化建设

统一的行业标准、统一的规范和协议是推动技术发展和应用落地的关键环节。然而 AIoT 两大核心技术 AI 和 IoT 本身的标准化工作仍不十分完善,因此作为融合物, AIoT 的标准化工作显然面临诸多问题和挑战。

需要解决的问题包括:如何统一人工智能物联网涉及的概念、内涵和应用模式;如何实现数据和应用的跨平台互操作,如何建立评估 AIoT 解决方案的分类标准,如何正确评价 IoT 的智能化水准等。AIoT 的标准化问题,不单是技术问题,还涉及伦理道德及法律法规等,这些都是需要逐步研究解决的方面。

4.2 AIoT 部署和实施策略

(1) AI 算法的拆解和集成

AI 算法需要大量算力支撑,构建基于 AI

的智能终端、实施数据处理和深度分析,需要研究 AI 模型、尤其是深度学习模型在边缘侧的拆解和简化。若采用云边混合架构,还需要研究算法在多边协同或并行实现方式的集成问题。

(2) AI 技术与应用场景的适配

AIoT 可应用于智慧工农业、城市、人居等不同应用场景,由 AI 帮助实现智能控制、学习和交互。然而,不同应用场景、不同问题追求的目标不同,应选择与之相匹配的 AI 技术。

偏好学习、用户黏性分析、业务行为预测等需要对历史数据进行分析 and 挖掘的场景,适合使用 AI 中的机器学习算法;自然语言处理需要大规模前期训练,适合强化学习或深度学习,比如卷积神经网络、递归神经网络或基于神经网络的深度学习算法等;身份识别和认证适合使用生物认证方式,在终端上搭载生物识别模块。未来,不仅需要关注 AI 技术本身的发展,也依据 AIoT 应用场景的需求、目标和技术框架特点选择合适的 AI 算法。

(3) 复杂事件处理与协同

AIoT 所构建的网络信息系统其泛在性和复杂性已远远超过传统互联网,大规模异质网元接入、异构网络的动态不稳定性、底层资源受限、海量数据交换、无集中式中心控制结构等极大增加了事件处理的难度,另一方面,多层次异质网元之间又存在连接和交互需求,异源数据也存在聚合和整体分析需求,使得 AIoT 事件处理还需要关注资源和服务协同问题。

(4) 高效跨域资源调度策略

引入 AI 方法设计动态资源管理策略,可提高 IoT 系统的工作效率,降低资源成本和消耗,但同时也增加了算法设计的复杂性并需要提供智能负载均衡,以及分布式和自组织操作。大多数现有资源调度方案不适用于 AIoT 系统,因此,提出针对 AIoT 特点的高性能跨域跨层统一资源调度策

略是 AIoT 系统高效运作的关键。

(5) 原型和应用系统开发

目前 AIoT 原型和平台还比较匮乏。为了更好地检测 AIoT 模型和策略的有效性,从而最终实现大规模应用,需要研究原型和应用系统开发。

4.3 安全和隐私保护

(1) AIoT 安全模型

随着物联网的普及,少量未经严格认证、存在安全隐患的设备加入网络,这威胁到联网其他设备的安全。安全和可靠性认证是限制 IoT 全部优势的两大问题,也是 IoT 领域需长期关注的重点问题^[60]。同时, AIoT 在传统 IoT 中融入了 AI 技术,使得数据聚合和语义理解成为可能,这些经过加工处理后凸显价值的数据倘若被非法使用,将对安全和隐私带来巨大威胁。

另一方面, AIoT 属于异构多层次融合的多元复杂体系,不同结构层面的安全性需相互拟合,互相促进,使得 AIoT 中有效安全防护及可靠性认证工作比传统 IoT 更加复杂。因此,需研究如何升级传统安全模型以适应 AIoT 领域应用,研究 AIoT 从感知层到应用层的各级安全防护机制,构建统一的安全体系架构。

(2) 跨域信任认证和管理

AIoT 的底层架构在泛在感知的物联网环境下,其高度分散、随机加入退出的特性和分布式环境很难实施传统集中式信任认证。因此,需研究分布式去中心信任管理以提升 AIoT 交互的可靠性,同时研究如何进行跨域和跨组织认证以提高云一边和多边协同的安全性。

4.4 高层次应用

(1) 异构网络融合和数据聚合

AIoT 系统整合了不同类型的网络(无线传感器网络、边缘服务器、雾服务器和集中式云服务器等),而不同类型的网络存在不同的特点和约束(数据传输速率、能量消费、服务质量等),



需要研究有效的异网融合方案,以保证当任务卸载及跨网、跨层协作时的质量稳定。另一方面,由于 AIoT 在不同应用场景中落地,不同层面的感知设备必然产生异源异构数据,必须研究如何提取和准确理解这些异构数据语义,进一步实现数据聚合,以挖掘数据价值,实现 AIoT 高层次应用。

(2) 智能数据采集、清洗、处理和挖掘

目前大数据处理技术的研究主要面向应用层数据,而物联网中绝大部分数据产生于网络边缘,这些来自终端或网络边缘的数据往往具有异构粗糙、噪声多、数据联系稀疏等特点,使得数据的加工处理变得异常困难。与此同时,终端应用通常对数据处理的实时性要求又比较高,这使现有技术很难满足 AIoT 应用的数据处理要求。因此应将 AIoT 数据处理研究的重心放在底层数据处理技术上(如感知层的数据处理技术),从而保障 IoT 信息感知、采集、分析和处理的及时准确和高效。

(3) 智能决策的可解释性

AI 扩大了 IoT 的领域,提升了 IoT 的应用层次。然而基于 AI 的智慧决策,需要向使用者证明其有效性和合理性,这不仅是 AI 技术本身需要解决的问题。在 AI 与 IoT 融合之后,在面向具体应用落地时,更需要结合实际应用场景,有针对性地为目标用户解释决策的合法性。

(4) 数据和服务增值

通过基于 AI 的数据处理和挖掘,AIoT 将赋能实际应用,并产生附加价值,比如获得服务偏好、个性化行为特点、领域的发展趋势等,帮助服务提供者开发出新的增值业务。

(5) AIoT 新应用领域

AIoT 目前已在多个领域实现落地,包括工业、农业、交通和智慧城市等,未来将进一步渗透到社会生活的其他领域。研究者可关注 AIoT 的新应用领域,并解决落地时的技术问题。

5 结束语

人工智能物联网涉及信息处理、人工智能、物联网、雾计算、边缘计算、云计算等诸多技术,是多学科交叉融合的产物,目前已广泛应用在智慧城市、智能家居、智慧医疗、智能交通、智能制造等多个场景,是 IT 领域极富应用前景的新兴领域。然而,智能物联网的发展仍处于初级阶段,面临诸多问题和挑战急需解决,比如体系架构、安全和信任管理、异构数据融合处理、异构网络融合、复杂事件处理协同等。

然而,来自工业界和学术界的广泛关注、参与和支持,使得我们对智能物联网未来的发展充满信心。相信在不远的将来,智能物联网领域必将诞生具有较强创新性和影响力的标志性成果,创新型的应用模式和崭新的相关技术解决方案等,推动人工智能物联网不断走向成熟。

参考文献:

- [1] AFZAL M K, ZIKRIA Y B, MUMTAZ S, et al. Unlocking 5G spectrum potential for intelligent IoT: opportunities, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(10): 92-93.
- [2] 百度宣布和小米达成深度合作联手布局物联网、人工智能[EB]. 2019.
- [3] 华为. 华为 GIV(全球产业愿景)报告[R]. 2021.
- [4] IDC. IDC 行业数据深度调研分析与发展战略规划报告[R]. 2021.
- [5] AIoT 百度百科[EB]. 2021.
- [6] 艾瑞咨询. 中国智能物联网(AIoT)白皮书[R]. 2021.
- [7] BOULAALAM A. Internet of Things: new classification model of intelligence[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(7): 2731-2744.
- [8] 徐华伟. 大数据环境下物联网信息智能采集方法研究[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(4): 64-67.
XU H W. Research on intelligence acquisition method of Internet of Things under big data environment[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(4): 64-67.
- [9] 骆淑云. 面向物联网应用的数据收集和激励机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
LUO S Y. Research on the data collection and incentive mechanisms for applications of the Internet of Things[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.

- [10] 祝幸辉. 云物联平台的数据汇聚与存储方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
ZHU X H. Research on aggregation and storage method of cloud IOT platform[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [11] 金彦龄. 基于生物智能的物联网协同自治机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
JIN Y L. Study on cooperative autonomous mechanisms of the Internet of Things based on biological intelligence[D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [12] 高恩池. 面向 IoT 超密集场景的接入及负载均衡技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
GAO E C. Research on access and load balancing technology for IoT ultra-dense scenarios[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [13] 王国智. 面向制造物联云服务的复杂事件处理引擎研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
WANG G Z. Research of complex event processing engine for manufacturing IoT cloud[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [14] 周柳慧. 物联网智能网关的开发及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
ZHOU L H. Development of intelligent gateway of IOTs and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [15] TANG F X, FADLULLAH Z M, MAO B M, et al. An intelligent traffic load prediction-based adaptive channel assignment algorithm in SDN-IoT: a deep learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 5141-5154.
- [16] TANG F X, MAO B M, FADLULLAH Z M, et al. On a novel deep-learning-based intelligent partially overlapping channel assignment in SDN-IoT[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 80-86.
- [17] MILIS G M, PANAYIOTOU C G, POLYCARPOU M M. SEMIoTICS: semantically enhanced IoT-enabled intelligent control systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 1257-1266.
- [18] JAVAID N, SHER A, NASIR H, et al. Intelligence in IoT-based 5G networks: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(10): 94-100.
- [19] WANG D, CHEN D, SONG B, et al. From IoT to 5G I-IoT: the next generation IoT-based intelligent[Z]. 2020.
- [20] KRAVARI K, KOSMANIS T, PAPADIMOPOULOS A N. Towards an IOT-enabled intelligent energy management system[C]//Proceedings of 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [21] ZOU Z, JIN Y, NEVALAINEN P, et al. Edge and fog computing enabled AI for IoT-an overview[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 51-56.
- [22] LIU Y, YANG C, JIANG L, et al. Intelligent edge computing for IoT-based energy management in smart cities[J]. IEEE Network, 2019, 33(2): 111-117.
- [23] PATEL P, INTIZAR ALI M, SHETH A. On using the intelligent edge for IoT analytics[J]. IEEE Intelligent Systems, 2017, 32(5): 64-69.
- [24] LIN F H, ZHOU Y T, YOU I, et al. Content recommendation algorithm for intelligent navigator in fog computing based IoT environment[J]. IEEE Access, 2019(7): 53677-53686.
- [25] TAO F, ZUO Y, XU L D, et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1547-1557.
- [26] SUN W, LIU J J, YUE Y L. AI-enhanced offloading in edge computing: when machine learning meets industrial IoT[J]. IEEE Network, 2019, 33(5): 68-74.
- [27] EL-GENDY S. IoT based AI and its implementations in industries[C]//Proceedings of 2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [28] 马靖. 制造业物联网环境下的机械产品智能装配系统建模及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
MA J. Research on system modeling and key technology of intelligent assembly system for mechanical products based on manufacturing Internet of Things[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [29] 赵江. 智能制造物联网的构成及数据交换模型的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
ZHAO J. Research on the composition and data exchange model of intelligent manufacturing Internet of Things[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [30] KRISHNAN A, SWARNA S, S B H. Robotics, IoT, and AI in the automation of agricultural industry: a review[C]//Proceedings of 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [31] 刘军涛. 基于深度学习与物联网的水肥一体化云系统研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
LIU J T. Research and realization of integrated cloud system based on deep learning and Internet of Things[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [32] 郑婷婷. 基于物联网的智慧农业控制管理系统[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
ZHENG T T. Intelligent internet control and management system based on internet of things[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [33] DUAN Y E. Design of intelligent agriculture management information system based on IoT[C]//Proceedings of 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1045-1049.
- [34] 胡书山. 基于物联网的智慧家庭架构及其关键技术研究[D].



- 武汉: 武汉大学, 2014.
- HU S S. Research on key technologies of smart home architecture based on the Internet of Things[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [35] WANG S Z, ZHAO H L, HAO X Y. Design of an intelligent housekeeping robot based on IOT[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS). Piscataway: IEEE Press, 2015: 197-200.
- [36] BHIDE V H, WAGH S. I-learning IoT: an intelligent self learning system for home automation using IoT[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1763-1767.
- [37] ADIONO T, MANANGKALANGI B A, MUTTAQIN R, et al. Intelligent and secured software application for IoT based smart home[C]//Proceedings of 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [38] JIAN M S, WU J Y, CHEN J Y, et al. IOT base smart home appliances by using Cloud Intelligent Tetris Switch[C]//Proceedings of 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 589-592.
- [39] 乔俞豪. 基于物联网的智慧社区管理系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- QIAO Y H. Research on smart community management system based on Internet of Things[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [40] CHAKRABARTY S, ENGELS D W. Secure smart cities framework using IoT and AI[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [41] 魏赟. 基于物联网的智能交通系统中车辆自组织网络建模与仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- WEI Y. Modeling and simulation research on vehicular ad hoc networks of intelligent transportation system based on internet of things[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [42] NI F, WEI J X, SHEN J H. An Internet of Things (IoTs) based intelligent life monitoring system for vehicles[C]//Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 532-535.
- [43] RANE S, DUBEY A, PARIDA T. Design of IoT based intelligent parking system using image processing algorithms[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1049-1053.
- [44] BHATE S V, KULKARNI P V, LAGAD S D, et al. IoT based intelligent traffic signal system for emergency vehicles[C]//Proceedings of 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Piscataway: IEEE Press, 2018: 788-793.
- [45] REN Q L, MAN K L, LI M Q, et al. Using blockchain to enhance and optimize IoT-based intelligent traffic system[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [46] PENDOR R B, TASGAONKAR P P. An IoT framework for intelligent vehicle monitoring system[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1694-1696.
- [47] 俞磊. 基于物联网技术的智慧医院架构及服务访问研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- YU L. Architecture and service access of smart hospital based on Internet of Things[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [48] 刘钙. 物联网平台下基于云计算的智能药盒系统[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- LIU G. Intelligent drug box system based on cloud computing under the internet of things platform[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [49] SRINIVAS M, DURGA PRASADARAO P, RAJ V N P. Intelligent medicine box for medication management using IoT[C]//Proceedings of 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 32-34.
- [50] 马玉军. 云端融合的健康物联网系统设计与实现方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- MA Y J. Research on the system design and realization methods for cloud-end fusion based health Internet of Things[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [51] YANG G, XIE L, MÄNTYSAALO M, et al. A health-IoT platform based on the integration of intelligent packaging, unobtrusive bio-sensor, and intelligent medicine box[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2180-2191.
- [52] ARA A. Case study: integrating IoT, streaming analytics and machine learning to improve intelligent diabetes management system[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 3179-3182.
- [53] ZHANG L P, LI F Q, WANG P C, et al. A blockchain-assisted massive IoT data collection intelligent framework[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021(99): 1.
- [54] GUO J L, LIU A F, OTA K, et al. ITCN: an intelligent trust collaboration network system in IoT[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021(99): 1.
- [55] XIONG J B, REN J, CHEN L, et al. Enhancing privacy and availability for data clustering in intelligent electrical service of IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1530-1540.
- [56] CHA S C, YE H K H. An ISO/IEC 15408-2 compliant security auditing system with blockchain technology[C]//Proceedings of 2018 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.

- [57] BAGAA M, TALEB T, BERNABE J B, et al. A machine learning security framework for iot systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 114066-114077.
- [58] XIAO L, WAN X Y, LU X Z, et al. IoT security techniques based on machine learning: how do IoT devices use AI to enhance security?[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 41-49.
- [59] SACHDEV R. Towards security and privacy for edge AI in IoT/IoE based digital marketing environments[C]//Proceedings of 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 341-346.
- [60] BOUBICHE D E, PATHAN A S K, LLORET J, et al. Advanced industrial wireless sensor networks and intelligent IoT[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(2): 14-15.

[作者简介]



吴吉义（1979-），男，博士，浙江省人工智能学会秘书长、高级工程师，主要研究方向为服务计算、人工智能。



李文娟（1978-），女，博士，杭州师范大学副教授，主要研究方向为云计算、边缘计算、服务信任管理。



曹健（1972-），男，博士，上海交通大学计算机科学与工程系长聘教授，服务与云计算及协同智能技术实验室主任，主要研究方向为智能数据分析与决策支持、服务与网络计算、协同与社会计算。



钱诗友（1977-），男，博士，上海交通大学计算机科学与工程系副研究员，主要研究方向为云计算、发布与订阅系统、智能调度算法。



张启飞（1984-），男，博士，浙江大学软件学院副研究员，浙江大学软件学院物联网与智能制造研究中心副主任，主要研究方向为工业互联网、物联网应用、嵌入式系统应用、安全操作系统。



BUYYA Rajkumar（1970-），男，博士，墨尔本大学 Redmond Barry 教授，云计算与分布式系统 CLOUDS 实验室负责人，云计算公司 Manjrasoft 创始人和 CEO，主要研究方向为云计算、边缘计算和雾计算。