

交通人工智能及其发展综述研究

□文 / 杨晓光, 马成元, 王一喆, 张振, 朱际宸, 刘麟玮, 时玉琦, 张梦雅

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 人工智能思想、方法、技术正在引领包括交通运输系统及其学科等诸多领域的革命性变化。交通运输系统的高度随机性、模糊性、不确定性、复杂性等特点催生了交通人工智能的提出和发展, 不仅能够为破解交通问题提供全新思路与科技支撑, 同时也为人工智能理论和方法的系统性创新提供重要载体。本文从人工智能本质及其发展脉络以及交通系统应用问题与需求出发, 概述了交通人工智能及其提出背景和专业内涵, 从交通感知与预测、交通系统诊断与决策、交通智能管控, 以及交通出行服务等方面综述了交通人工智能的研究现状, 并探讨了交通人工智能的发展方向与趋势。研究成果旨在促进交通系统工程与人工智能学科的交叉融合发展, 开辟交通人工智能创新研究领域, 具有重要的前瞻性与引领性。

关键词: 交通人工智能; 交通运输系统; 智能交通运输系统; 智能感知; 数据智能; 智能控制; 智能网联

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-5036(2022)04-0018-12

DOI: 10.16453/j.cnki.ISSN2096-5036.2022.04.002

0 引言

人工智能自提出历经了半个多世纪的发展。近年来, 人工智能伴随着相关的先进信息技术和软件工程等的快速发展极大地推动了诸多行业的变革。2016 年起, 国际上先后有 40 余个国家将发展人工智能上升到国家战略高度^[1]。人工智能的发展正在由单纯的理论与方法和技术研究迈向服务于行业的技术应用。

交通系统被认为是人类生存、生产、生活与发展中最为基础、庞大的具有高度随机性、动态性、模糊性、不确定性和复杂性的巨系统之一。以往的发展已表明, 仅依靠无节制地建设交通基础设施已无法适应不断增长的交通需求, 还易造成严重的土地资源消耗、环境污染等问题。面向交通安全可靠、便捷顺畅、经济高效、绿色集约、智能先进、公平持续等目标及高新技术的运用, 交通系统在挑战中不断地变革与重构。现阶段仍面临着复杂交通网络难刻画、系统难解析, 模型庞杂难求解等关键痛点。同时, 随着信息

基金项目: 国家重点研发计划项目“车路协同环境下车辆群体智能控制理论与测试验证”(2018YFB1600600); 国家自然科学基金面上项目“多模式车辆交通流多交叉口协同控制理论与实验研究”(61773293)

化、数字化、网联化、智能化交通系统建设与发展,交通系统科学与工程体系亦将重建。交通系统是天然的人工智能理论创新和技术创造的优质培养皿。因此,人工智能技术的数据、算法、算力三要素已成为新一代交通系统科学技术的发力点,交通人工智能体系的建立与发展方兴未艾。本文从人工智能的演进、交通系统智能化发展,以及人工智能技术应用等方面,对交通人工智能的内涵、基础理论、技术研究现状及其发展趋势等加以综述研究,其成果对于全面把握交通领域人工智能研究进展以及发展方向具有重要的理论意义及实用价值。

1 人工智能的演进与再认识

关于人工构建智能的思想古已有之。战国时期即记载有机机械构筑智能歌伶的故事,古希腊也有关于人工智能仆人的构想。智能的概念在古代《荀子》中提到“知有所合谓之智,智所以能之在人者谓之能,能有所合谓之能”,其对于智能的讨论完全基于现实世界,认为智能是能够正确地认知世界及合理改变世界。现代智能的讨论则起源于20世纪初对神经系统的解剖学^[2],而后随着机械自动化的发展和图灵测试^[3]的出现,人工构建智能体的想法逐渐受到关注。人工智能(Artificial Intelligent, AI)一词首次出现于1956年^[4]。之后近二十年间,随着包括贝尔曼公式等关键算法研究成果的诞生,人工智能迎来其第一次发展浪潮(1956—1973年)。直到1969—1973年间,包括M. Minsky, S. Papert和James Lighthill等多位重量级学者质疑人工智能的研究前景, AI研究陷入第一次低潮。十年后计算机算力的提升为人工智能带来了第二次发展浪潮(1980—1987年),直至1990年人工智能DARPA项目失败,宣告AI第二次步入低谷。而随着1997年IBM深蓝战胜卡斯帕罗夫、2006年深度学习算法的提出、2012年AlexNet在ImageNet训练集上图像识别精度取得重大突破等事件,以及各行业的信息化与数字化建设带来了海量的数据,人工智能又迎来持续至今的第三次发展浪潮(1997年至今),其相关技术已成为各行各业不可忽视的技术领域。

人工智能理论研究发展至今主要分为逻辑主义、联结主义、自然主义等学派。逻辑主义主要是机器定理证明,包括专家系统、知识表示和知识图谱,理论基础是逻辑学及其核心计算机科学的延伸。联结主义主要包括神经网络和深度学习,以解决感知问题,例如语音、视觉,其理论基础是统计^[5]。自然主义主要包括细胞自动机、遗传算法、遗传编程和强化学习等。人工智能理论研究演进过程如图1所示。

相较于经典理论和方法,人工智能技术的关键优势在于其可通过海量数据,提取复杂随机非确定系统的运行机理与规律及功能要素,并快速做出较合理判断和决策。尽管人工智能发展已作为国家战略受到各界高度重视,但当前仍普遍面临理论缺乏充分的应用场景、技术方法可解释性差、无法验证技术的稳定性、研究成果多停留在实验室等严峻挑战^[1]。到目前为止,大多数进展都发生在所谓的“狭义人工智能(Artificial Narrow

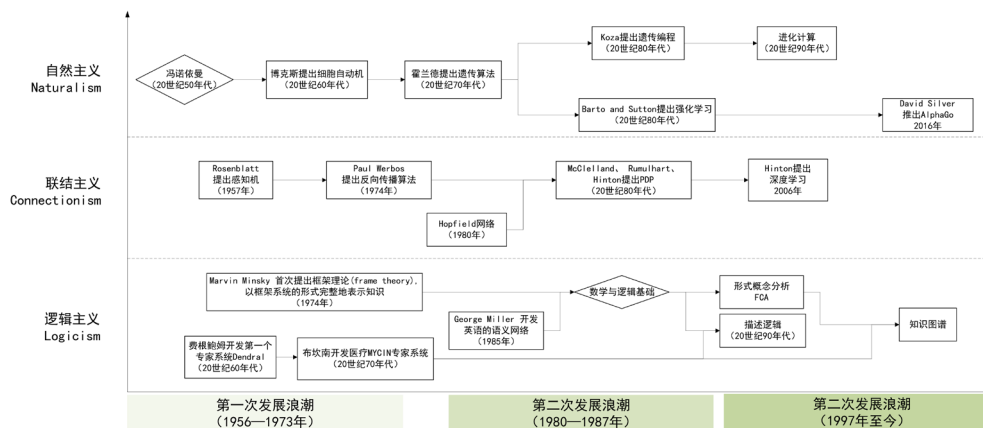


图 1 人工智能理论的发展

Intelligence, ANI) ”领域，即开发机器学习技术解决特定问题。更难的问题被称为“通用人工智能 (Artificial General Intelligence, AGI) ”，其挑战是如何开发出与人类相同的方式解决一般问题的人工智能。普遍认为，距离通用人工智能的实现还需要几十年。

2 交通人工智能及其发展需求

人工智能理论和技术发展迅速，行业应用领域已逐渐从单一的碎片化场景向一体化系统深度融合转型。尤其是与历次工业革命密切关联的交通运输系统，因其高度的复杂巨系统性、多目标性、物理与人因性、非完全工程性并存，以及其与时俱进性的本质特征，伴随着系统的不断数字化、网联化、信息化和智能化推进，多源异构海量数据的爆炸式增长，为人工智能应用提供了丰富且多元化的场景，同时进一步地促进了交通运输系统及其行业的数字化、自动化和智能化深入转型需求激增。

人工智能技术按其智能化条件可分为弱人工智能、强人工智能和超级人工智能^[6]。伴随着新一轮人工智能带来的技术革命，传统的半自动化和低智能化条件下的智能交通系统正在不断变革中^[7]。麦肯锡全球研究院发布的报告《人工智能时代的承诺与挑战》，对人工智能技术及其用途、局限性和影响的各种研究结果表明，人工智能相对于其他技术的潜在增量价值的主要领域包括交通出行、运输与物流。因此，交通人工智能的概念有其特别的内涵，也就是将更加成熟的智能技术应用于各交通系统中，使其具有一定的智能感知、推理、判断和决策能力，从而提高交通系统管理、控制、服务和决策的智能水平，形成一套人工智能科技体系。

2.1 交通人工智能需求背景

交通系统是人类生存、生产、生活和发展的关键基础，其基本构成包括移动的主

体人和物、运载工具、交通设施、交通资源（空间、时间、能源等）、交通环境（物理、生态、心理等）、通行与运行规则（法规与政策等），以及要素间联系与交互的信息等“七要素”；通过与活动相关的需求网络、多模式运输网络、基础设施网络、能源网络、服务网络、管控网络、治理网络和信息网络（感知网+通信网+互联网）等“八网络”，实现系统要素及其与城市、社会和经济系统的有机联系；从而实现人与物移动的便利顺畅、经济高效、绿色集约、智能先进、安全可靠、公平持续发展、与城市融合、与社会融合，以及广义交通系统的整合等“九效能”。交通系统中的人扮演着交通的参与者、管理者、决策者等角色，是整个系统的核心主体，由此决定了交通系统具有高度的复杂性、动态性、随机性、难预测、弱可控、多目标性等特征，也决定了交通系统与人工智能技术的天然关联。

以智能化为特征的新工业革命带来了交通系统要素、空间资源利用与能耗、通行环境与条件、通行规则、信息交互，以及整个系统结构的巨大变革^[8]。以数理解析方法、集计统计模型等为代表的传统交通理论和技术已很难应对复杂大规模、实时性交通系统问题，亟需构建基于人工智能的交通系统智能感知、智能计算、智能驾驶、智能管理与控制、智能服务、智能决策等基础理论和关键技术体系。

交通人工智能的概念，不仅仅是人工智能理论与关键技术 in 交通领域的应用和拓展，更是以交通系统智能化重大理论和关键技术发展需求为牵引、交通问题破解为导向，基于交通运输系统和人工智能本质，融合新一代的交通（系统）工程（2.0）与人工智能、知识工程、专家系统、软件工程等于一体，研究、开发用于模拟、延伸和扩展交通系统中（出行者、规划与设计者、管理与服务者、决策者等）人的，智能理论、方法、技术及其应用的，一个全新的交通学科方向。因此，交通人工智能的核心问题是，如何利用人工智能基础理论和关键技术，描述并解构交通系统的复杂高维时空、供需特性及其影响要素有机关系，面向交通系统多目标以及实际中所面临的阻塞、事故、污染和资源消耗等问题，开展交通人工智能理论、方法与技术研究和应用，从而推动新一代交通系统学科与人工智能融合发展，并进一步丰富人工智能体系。

2.2 交通人工智能内涵与特征

随着新时代人工智能理论创新与技术变革，其内涵和外延已赋予新的内容^[3]。不同领域的人工智能发展如火如荼，呈现出丰富的新特征。面向交通系统特质和其智能化发展需求，基于人工智能的基本概念，可给出交通人工智能的内涵为：融合新一代交通（系统）工程（2.0），认知交通系统智能化机理和规律、交通状态智能感知与识别、智能诊断、交通系统语言处理与传输、智能计算、智能

表 1 交通（系统）工程 2.0 研究要素及对象变革

系统要素	信息 +
人 / 物	互联网 / 物联网 / 区块链
交通工具	智能车辆
交通设施	智能交通设施
交通资源	经济 + 生态驾驶
环境	全息感知
规则 / 政策	智能决策

管理与控制、智能服务、智能决策，以及交通知识工程等理论、方法和技术体系。新一代交通（系统）工程（2.0）是随着物联网、移动互联网、大数据、人工智能为特征的新一代科技而重构的交通系统科学与工程知识体系^[8]，其研究对象、研究内容等要旨分别归纳于表 1、表 2。

表 2 交通（系统）工程研究内容演变

研究阶段	研究内容					
	数据分析与建模方法	信息环境系统解析	主动智能管理	主动智能控制	主动与共享服务	多目标评价与智能决策
交通（系统）工程学 1.0	☆	☆	☆	☆	☆	☆
交通（系统）工程学 2.0	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆

注：☆表示研究领域的深广性。

相较于交通（系统）工程学 1.0 所研究的系统要素间作用和反作用关系及认识的有限性，新交通系统要素条件皆已发生质的变化，其有机联系性和相互作用与反作用性强、系统趋于透明化，具备充分的可认知性。

交通（系统）工程 2.0 的主要研究内容随着交通系统的数字化、网联化、信息化与智能化发展，主要包括：基于数据的交通运输系统分析与建模方法、网联与信息环境下交通系统解析、主动智能交通管理与控制、主动与共享服务，以及多目标评价与智能决策等。

所以，关于交通人工智能的交通系统机理认知基础研究，即在交通（系统）工程 2.0 学理研究的基础上开展以下几方面工作：① 利用各层次复杂交通网络及其状态量，包括宏观层面交通需求时空分布及其影响因素，微观层面的移动体位置、速度、加速度等对交通系统运行规律的刻画和机理解析；② 交通感知与状态识别，指在人工智能技术赋能下，通过数字化、网联化、自动化、智能化的交通信息采集和感知设备，实现对交通系统的智能化感知，从而进一步智能识别交通系统的运行状态；③ 交通智能诊断，系基于数据、信息和智能技术对交通问题、交通病特征与病理进行知识处理，基于致因与征兆进行提取的人工智能方法和技术；④ 交通智能计算，是借助计算机辅助人类解析交通系统，处理并求解各式问题、经验化的算法和计算机思考性程序；⑤ 交通系统语言处理与传输，则是研究建立交通复杂巨系统各子系统之间互联传输的语言库，实现在同一数据源下的信号转化与信息传递；⑥ 交通知识工程，是通过研究建立一个交通系统的类人脑处理中心，实现对交通模式的表示，交通状态的获取，交通态势演化推理，以及交通系统优化管理、控制、服务和决策智能化。

交通运输系统的高度随机性、模糊性、不确定性和复杂巨系统性，决定了交通人工智能的新特征：一是基于多源异构的海量交通大数据驱动的知识学习性，根据丰富的数据源进行自主学习，并形成经验库和数据库能力；二是基于智能化处理对复杂交通系统的多态进行识别和研判；三是从个体智能转向基于互联网和大数据的群体智能性，也就

是能够将大量的个体智能集聚融合形成群体智能效果。

2.3 交通人工智能研究现状

2.3.1 面向感知预测的交通人工智能

人工智能技术在计算机视觉、语音识别、模式识别、自然语言处理等领域的研究突破,极大地促进了交通感知技术的进步。交通大数据具有多源、异构、模态复杂等特点,需要识别数据的类别特征,对数据进行有机融合,从而得到更加精准的交通感知数据。基于人工智能技术的多源异构交通数据融合方法^[9-11]已成为研究的热点——视频处理的人工智能技术通过构建图像背景与提取运动目标,已可以获得更加精细且精准的交通流量、速度、密度等宏观交通流参数;针对交通系统运行过程所产生的大量语音、文本数据,以深度学习为代表的人工智能方法能够完整地抽取关键词句,智能处理规模庞大的交通语音和文本数据,深度挖掘个性化需求、交通事故成因等数据^[12,13],极大地丰富了交通系统感知范围和感知深度。

基于交通系统感知数据和人工智能技术,预测未来交通系统的发展趋势,对于把握交通系统基本特征、分析复杂巨系统的演化规律、主动实施相应的交通管控策略具有重要意义。以深度学习为代表的人工智能方法,能够学习历史数据的演变规律,故被广泛地应用于交通流参数(流量、密度、速度)的预测。如深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)、递归神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)、长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)、门控循环单元(Gated Recurrent Unit, GRU)等,对于交通流的时间序列数据展现出了较好的预测效果。但是,由于交通流不仅仅是时序相关的数据,还具有复杂的空间相关特性,如卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、图神经网络(Graph Neural Network, GNN)、图卷积神经网络(Graph Convolutional Neural Network, GCNN)等,能够挖掘城市交通网络的空间关联特性。近年来,构建时间与空间结构上的联合学习模型,能够在提取交通流时间相关性的同时,捕捉路网拓扑结构的关联性,是当前研究的热点^[14]。

2.3.2 面向诊断决策的交通人工智能

城市道路交通系统是最为基础的门到门交通体系之一,具有多数量组成单元(Agents)与较为复杂的系统结构和层次,同时表现出明显的随机性、模糊性、复杂性、动态性和自组织性。其系统的不协调——系统失调,即表现出交通阻塞、事故、高能耗与排放等问题,亦即交通病——一方面是系统内部矛盾的表征,即受到系统内部因素的影响,且大多并非独立出现、影响因素之间同时可能具有较强的耦合性;另一方面,也是系统所处的环境等综合影响的结果。因此,要准确地寻找系统的问题并准确地做出致因解析,为治理城市交通病、改善交通问题奠定基础,亟须对交通系统进行体检与诊断。亦即在解析研究交通系统基础上,对系统及其运行状态和交通病若干关键指标进行体检、诊断其交通病致因,进一步形成交通健康诊断系统,为有效地进行交通病靶向治理,

保障交通系统可持续发展提供支撑。

决策支持系统(Decision Support System, DSS)能够为交通决策者提供分析问题、建立模型、模拟决策过程和方案的环境,及时有效地帮助决策者分析解决复杂的决策问题,为城市交通治理政策制定与评估提供有效的科学支撑。但传统的决策支持系统仅使用模型和数值计算的方法辅助决策,对于复杂的决策难以提供支持^[15]。因此,基于丰富数据的人工智能可为城市交通的仿真评估与智能决策支持提供有力支撑。早在 1981 年, Bonczek 等^[16]首次提出将决策支持系统与专家系统相结合,解决了不少实际领域的问题。发展至今,由 Agent 技术和理论,机器学习理论,自然语言理解等人工智能技术,与决策支持系统相结合形成的智能决策支持系统(Intelligent Decision Support System, IDSS),逐渐为交通治理提供有效支持^[17,18]。

2.3.3 面向管理与控制的交通人工智能

交通管理与控制人工智能框架,包括基于交通系统状态通过交通大脑的智能化顶层决策,车路协同交通控制实现中层的交通系统控制,进一步实现局部的底层交通控制三个层

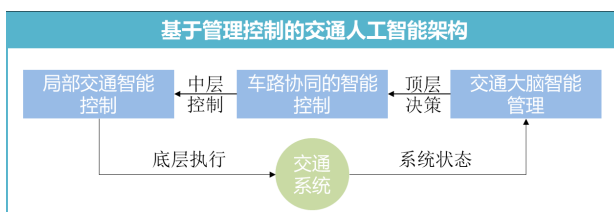


图 2 基于管理控制的交通人工智能架构

面功能;相关信息传递及分工协作,构成对交通系统认知理解并形成智能控制的闭环。图 2 即为交通人工智能的一种具象化结构。

2.3.3.1 局部交通智能管理与控制

通过智能控制技术实现局部道路网络的交通管控。近年来,以深度强化学习方法为代表的人工智能广泛应用于交通管控领域。其任务包括:① 创建局部路网智能体及其表征空间^[19,20];② 构建多策略的交通人工智能方法^[21];③ 训练并执行深度强化学习网络。局部交通智能管控可实现局部交通供需的最优匹配,减小交通拥堵概率。

2.3.3.2 车路协同与自动驾驶环境下的交通控制

车路协同交通智能控制旨在通过 V2X 通信技术,将交通参与者及其运载车辆与道路基础设施、通行环境等有机连接起来,实现全息交通感知及智能控制,极大地提升交通系统的安全与效能^[22]。随着研究深入,新型的车路协同系统开始向交通效率提升方向演进,并相应地衍生出基于车路协同的智能控制方法。研究发现,车路协同智能控制,可有效地减少驾驶员的反应时间及其随机性,进而缩短车辆间的车头时距,提高了道路利用率及通行能力。车路协同智能控制技术还能够提高路侧基础设施对交通参与者事件的及时响应能力^[23,24],从而有效、安全且精准地协调控制信号与交通供需之间的关系。

自动驾驶技术的出现进一步颠覆了传统的车辆驾驶和交通控制理念。自动驾驶汽车被预测在几年内将进入消费市场,并在 2050 年彻底改变道路交通运行环境。一方面,自动驾驶车辆自身集成了感知与图像及视频识别、数据融合、优化控制等核心技术,基

于对海量历史驾驶过程的学习,不断升级车辆自动驾驶水平,直至可以在各种道路场景中完全自动驾驶,不仅解放了驾驶人的在途时间,也将促进机动化出行向共享化、自动化转变;另一方面,由于能够对自动驾驶车辆进行直接而精准地控制,道路交通管理可以在非统计层面对个体车辆轨迹进行智能化控制,避免人类驾驶员操作的不确定性带来低效和安全隐患,实现系统层面的效益提升。

2.3.3.3 基于交通大脑智能管理

“交通大脑”系统以城市区域交通管理、控制、服务和决策高度智能化为主要功能。区域交通管理与控制问题具有高度的时空非线性特征,难以使用已有的线性方法。以强化学习为代表的人工智能方法具有很好的适用性。相关的人工智能方法分为一般人工智能学习方法^[25,26]和深度强化学习方法。其中,深度学习法可实现“状态-动作”端对端的充分挖掘^[27,28],进而弥补传统方法的技术缺陷。因此,深度强化学习网络是当前区域交通管理与控制领域的研究重点,普遍采用“分层优化、中心交互”的方式完成区域协作。其核心理念是——控制体系由中心交通大脑和多个分区智能体组成,交通大脑汇聚分区智能体数据,计算某些时段内的交通管理与控制有效程度,进而从宏观层面对分区智能体系统进行评判与优化。

2.3.4 面向出行服务的交通人工智能

随着人-车-路系统的数字化和网联化,居民出行信息实时感知条件逐渐升级,交通系统优化正在从供给端的盲目建设转为面向需求侧的服务升级。出行即服务(Mobility as a Service, MaaS)的发展方向受到广泛关注,由出行者、交通运营商、管理部门、信息服务方等多方组成服务体系,整合多源出行资源,提供从出发地到目的地的全过程“一站式”服务^[29]。

而在实际中,面向海量出行者的个性化出行需求,在有限的时空交通资源条件下必然产生相互耦合的冲突关系。如何系统性优化交通资源分配应对复杂多变的出行需求,已是迫切需要解决的难题。主动智能化交通管理服务(Active & Intelligent Traffic Management as a Service, AI-TMaaS)模式将成为未来交通系统管理和服务的重点发展方向——即利用大数据及人工智能新技术,基于出行者完整出行链信息,包括出行需求、出发前、出发过程中,以及到达目的地等要素,并整合出行服务链和相关的交通管理链,协同交通信号、事故、拥堵状况和交通引导等交通管控措施,提供一站式、个性化出行服务、全链条主动智能化交通管理服务,实现基于系统和用户最佳协同管理的主动智能化出行服务^[30]。AI-TMaaS模式不同于以往的MaaS,需要基于人工智能技术为每个出行个体提供个性化、品质化和交通管理保障的服务。通过对用户历史记录和其他相关信息的协同过滤与逻辑关联,可对用户出行需求进行主动预测,并辅以最佳的管理措施,提供个性化出行服务和智能化精准偏好推荐,真正实现“人享其行”。

在推进AI-TMaaS实现过程中,仍存在诸多未解决的理论和技术难题。在交通时空资源分配决策和个性化出行服务时,将面临高维度泛随机的优化问题、多主体不确定博

弈问题、异质化群体协同问题等。这些问题难以通过经典理论模型解析，几乎不可能求得理论最优解^[31]。如何利用人工智能技术手段，通过部分先验信息和海量数据解析复杂机理，将成为交通人工智能领域的重要研究任务。另外，面对多维高复杂度模型，如何利用有限的算力，快速获得鲁棒性强的近优解，也是交通人工智能需要关注的研究任务。

3 交通人工智能应用与发展

3.1 交通人工智能应用

交通系统已进入大数据、人工智能时代，交通网联与信息化可谓覆盖了全领域。其核心技术包括智能感知、云计算、大数据、智能网联、深度学习算法、机器视觉、自然语言理解、生物特征识别，以及知识图谱等。当下，各级政府正在如火如荼地推进智能交通系统建设，实践表明，其中最大的痛点、瓶颈和难点是对数据的整合与挖掘应用的片面性，整体上数据的应用浮于表面，更多的是以数据展示为主，难以发挥大数据真正的应用价值，导致智能交通系统建设“有设施无网联、有数据无智慧”，其主要原因是“重硬（件）不重软（件）”，软件的核心价值几乎被忽视。数据是“资源”和基础，专业知识是其灵魂，快速发展的智能交通系统不但要靠海量的大数据“喂”出来，还要靠专业的知识工程使其充分发挥价值，尤其对于交通这一专业性要求极强的领域，必须依靠专业能力加以支撑。交通领域所应用的人工智能技术极其丰富，包括智能感知、智能计算、智能分析、智能诊断、智能决策、智能管理、智能控制、智能调度、智能服务，以及智能驾驶等。特别要强调的是，人工智能不仅是其本身，还包括知识工程、专家系统、系统工程、软件工程等。因此，也有将人工智能的概念，进一步扩展为包括如前所述的先进的软件工程（Advanced Software Engineering, ASE）。所以，基于新一代的交通（系统）工程 2.0 与先进的软件工程高度融合的交通人工智能，具有广阔的发展前景。

3.2 交通人工智能发展

人工智能、智能技术、先进的软件工程是交通系统智能化的关键技术，可为实现交通系统态势全要素全息感知、风险监测预警、趋势智能研判、资源统筹智能调度等提供强力支撑。例如，交通控制系统，可分别从基础的周期、绿信比和干线协调相位差三个交通信号控制关键参数，面向复杂随机动态的网络交通流构筑一整套基于人工智能的分层递阶控制算法，对现状交通信号配时方案进行优化与改善。交通控制理论和关键技术被称为交通（系统）工程的“王冠”，仍是世界性的难题。这是因为，影响交通控制的因素高度复杂且随机性强，目前已经成熟的人工智能类的算法仍难以直接复用在交通信号配时优化中。只有将人工智能型算法与交通工程专业知识高度有机结合，才可以将交通供给与交通需求进行最佳匹配，使得交通系统的资源最大程度地发挥。此外，交通人工智能未来的主要应用场景还包括交通专家系统与知识工程、智能交通知识图谱、交通状

态与事件智能检测、交通健康体检与智能诊断和智能决策等。

除此之外,人工智能已在运载工具识别、自动驾驶、交通系统态势预测/预报/预警、系统优化控制等领域显示出卓越的适用性。展望未来的人工智能发展趋势,将以全息感知、大数据为基础,以新一代交通系统科学与工程和算法创新为核心,以强大的计算能力为支撑,通过感知智能、分析计算智能、管理智能、控制智能、服务智能、决策智能等,进一步实现交通系统的可视化、可验证、可诊断、可预测、可学习、可决策、可交互,乃至自主化,从而改变人类面对交通复杂巨系统曾经的“盲人摸象”“束手无策”为“运筹帷幄”“胸有成竹”,彻底改变以往关于交通学科“虚、软、无共识”认识,基于交通人工智能的“实、硬、科学”的交通学科与交通系统将更聪明、更智慧,真正地支撑“人享其行,物优其流”。同时也要注意的,人工智能也带来了交通系统领域诸如人文、社会、法律等方面的研究课题,亟须我们深入研究与探讨。

当前,诸多交通人工智能研究及应用所遇到的主要瓶颈,是数据样本量不足、质量不高而导致不能充足的学习和训练。充分高品质的数据对于人工智能算法和应用平台建设无疑是至关重要的,如果数据出现缺失和失真等问题,则算法犹如空中楼阁一样华而不实。与此同时,建立于以往条件下的交通系统理论和技术,已难以适应新交通科技与发展之需,正趋于变革和重构。因此,亟须面向发展中的交通系统,依托丰富的交通感知、网联与交互条件,建立新一代交通(系统)工程学和交通人工智能体系,以适应认知与改善交通的巨大需求,并发展基于人工智能技术的智能交通相关产业,相关成果将为我国引领未来的交通学科和交通人工智能系统发展发挥关键的作用,产生深远的影响。

4 结束语

智能化是新工业革命的主要特征,包括人工智能在内的信息技术迭代发展,正在全面地变革人类社会。《易经》云:“天地交而万物通也”。因此,支撑人类生存、生产、生活,以及发展的交通运输系统,具有极强的复杂巨系统性、多目标性、物理与人因性、非完全工程性,并与时俱进,是典型的人工智能应用和产生原问题的领域。伴随着交通系统的不断数字化、信息化、网联化和智能化快速进步,综合交通系统相关理论和关键技术正面临着重构,已成为人工智能创新性理论研究和规模化产业应用的重要载体。本文在此背景下提出了交通人工智能的基本概念,并进行了相关综述研究,希望能为促进交通(系统)工程与人工智能学科高度交叉融合发展提供新思想和新方向。不难发现,交通人工智能是一个方兴未艾、亟待开辟且充满巨大创新、创造的科技领域,不断丰富研究成果定将全面赋能“人享其行,物优其流”目标的实现。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 人工智能白皮书 (2022 年) [R]. 中国信息通信研究院, 2022.
- [2] Thorndike E L. The fundamentals of learning [M]. New York: Columbia University Teacher College, 1932.
- [3] Turing A M. Computing machinery and intelligence [J]. Mind, 1950, 59(236): 29-56.
- [4] Brunette E S, Flemmer R C, Flemmer C L. A review of artificial intelligence [C] // 2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents. IEEE, 2009: 385-392.
- [5] Rumelhart D, Hinton G, Williams R. Learning representations by back-propagating errors [J]. Nature, 1986, 323: 533-536.
- [6] 张海生, 吴朝平. 人工智能与出版融合发展: 内在机理、现实问题与路径选择 [J]. 中国科技期刊研究, 2019, 30(3): 225-231.
- [7] 陆化普, 李瑞敏. 城市智能交通系统的发展现状与趋势 [J]. 工程研究: 跨学科视野中的工程, 2014, 6(1): 6-19.
- [8] 杨晓光, 朱际宸, 王一磊, 等. 汽车变革发展中的城市交通系统重构与研究综述 [J]. 交通运输研究, 2022, 8(3): 2-20.
- [9] Du S, Li T, Gong X, et al. A Hybrid Method for Traffic Flow Forecasting Using Multimodal Deep Learning [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2018, 13(1): 85.
- [10] 陆百川, 舒芹, 马广露. 基于多源交通数据融合的短时交通流预测 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38(05): 13-19+56.
- [11] Mcallister R, Gal Y, Kendall A, et al. Concrete Problems for Autonomous Vehicle Safety: Advantages of Bayesian Deep Learning [C] // Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Melbourne: IJCAI, 2017.
- [12] 郭正. 基于交通出行的语音识别系统的设计与实现 [D]. 北京邮电大学, 2021.
- [13] 周冀雪, 马伟峰, 龚一飞, 等. 基于深度学习的交通事故文本因果关系抽取 [J]. 浙江科技学院学报, 2022, 34(01): 42-51.
- [14] Zhao L, Song Y, Zhang C, et al. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(9): 3848-3858.
- [15] 赵宇. 浅谈人工智能在决策支持系统中的应用与发展 [J]. 物流工程与管理, 2009, 31(1): 85-86.
- [16] Bonczek R H, Holsapple C W, Whinston A B. INTRODUCTION TO INFORMATION PROCESSING, DECISION MAKING, AND DECISION SUPPORT [M]. Elsevier, 1981: 3-25.
- [17] Kim J, Wang G. Diagnosis and Prediction of Traffic Congestion on Urban Road Networks Using Bayesian Networks [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2595: 108-118.
- [18] 江泽浩. 基于数据的城市道路信号控制交叉口健康诊断理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2020.
- [19] Mousavi S S, Schukat M, Howley E. Traffic Light Control Using Deep Policy-Gradient and Value-Function Based Reinforcement Learning [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(7): 417-423.
- [20] Li L, Lv Y, Wang F Y. Traffic signal timing via deep reinforcement learning [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 247-54.
- [21] Watkins C J C H. Learning From Delayed Rewards [D]. Kings College University of Cambridge, 1989.
- [22] 姚佼. 基于车辆行驶数据的交叉口交通控制机制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [23] Nekoui M, Pishro-Nik H. The effect of VII market penetration on safety and efficiency of transportation networks [C] // 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2009: 1-5.
- [24] Kandarpa R, Chenza M, Dorfman M, et al. Vehicle infrastructure integration (vii) proof of concept (poc) test-executive summary [R]. United States Department of Transportation. Research and Innovative Technology Administration, 2009.
- [25] Metropolis N, Ulam S. The monte carlo method [J]. Journal of the American statistical association, 1949, 44(247): 335-341.
- [26] Sutton R S. Learning to predict by the methods of temporal differences [J]. Machine learning, 1988, 3(1): 9-44.
- [27] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Playing atari with deep reinforcement learning [J]. arXiv preprint arXiv:1312.5602, 2013.
- [28] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning [J]. Nature, 2015, 518(7540): 529-533.
- [29] 李晔, 王密, 舒寒玉. 出行即服务 (MaaS) 系统研究综述 [J]. 综合运输, 2018, 40(9): 56-65.
- [30] 杨晓光, 郝正博, 杨正, 等. 智能交通主动管理与服务系统 (ATMaaS) 框架体系 [C] // 交通治理与空间重塑——2020 年中国城市交通规划年会论文集. 中国建筑工业出版社, 2020: 2055-2063. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.032271.
- [31] Kacprzyk J, Pedrycz W. Springer handbook of computational intelligence [M]. Springer, 2015.



杨晓光

同济大学长聘教授、博士生导师、同济大学智能交通运输系统 (ITS) 研究中心主任。主要研究方向为智能交通系统工程。国家重点学科“交通运输工程”、“城市交通交叉学科”主要带头人之一; 主持国家自然科学基金重点等项目 9 项、国家研发计划 10 余项。兼任中国智能交通协会道路交通优化与控制专业委员会主任、中国人工智能学会智能交通专业委员会副主任等。2021 年中国智能交通年度人物。



马成元

同济大学交通运输工程学院博士生在读。2017 年获同济大学学士学位。主要研究方向为车路协同城市道路交通控制及城市交通大数据挖掘, 已发表学术论文 10 余篇。

**王一喆**

同济大学交通运输工程学院博士后，中共党员。主要研究方向为智能车路联网与协同、多源数据分析及应用、基于人工智能技术的交通优化控制等。入选上海市 2021 年“超级博士后”激励计划，已发表学术论文 20 余篇，获得 12 项软件著作权。曾获得上海市优秀毕业生、同济大学优秀学生干部标兵等荣誉。

**张 振**

同济大学交通运输工程学院博士研究生在读。2018 年获得长安大学学士学位。研究方向为智能交通、群体协同、交通决策优化与控制。

**朱际宸**

同济大学交通运输工程学院博士生在读。2020 年获得中南大学学士学位。主要研究方向为城市区域信号协同控制、城市道路交通系统分布式建模与优化、车路协同交通控制。

**刘麟玮**

同济大学城市交通交叉学科研究院博士生在读。2020 年获得北京交通大学学士学位。研究方向为城市道路交通运行体检和效率计算解析理论与方法。

**时玉琦**

同济大学交通运输工程学院博士生在读。2018 年获得中国矿业大学学士学位，2021 年获得上海交通大学硕士学位。研究方向为数据驱动路交叉口健康诊断和时空资源约束条件下交叉口包容性设计。

**张梦雅**

同济大学交通运输工程学院博士生在读。2015 年获得合肥工业大学工学硕士学位。研究方向为网联环境下运行状态感知和风险研究。



在线阅读(节选)