AI城市：理论与模型架构

吴志强　甘　惟　刘朝晖　李舒然　周咪咪　赵　刚　张修宁

提　要　智慧城市的理论在中国经历了不同的发展阶段。随着真实城市中运行、管理的数据激增，过去以建设一个自上而下的管理系统为主要特征的智慧城市已难满足城市智能运行的需要。梳理智慧城市的理论发展及其建设热潮下的冷静反思，进而提出AI城市的概念，即在引入新一代人工智能技术后智慧城市将进入新的发展阶段。系统性地建构AI城市的理论，包括AI城市的本质特征，从核心体系、技术体系、场景体系等3个维度建构了AI城市理论架构，以及4个方面的发展动力。以AI城市理论为基础进一步论述其模型架构，包括众脑智能、自组织决策、多AI集成的人与空间交互等3个方面的关键突破，从而从AI城市理论视角提出新一代人工智能技术发展的方向，揭示AI城市理论对未来技术以及城市治理模式转型的深刻影响。

关键词　智慧城市；AI城市；城市大脑；新一代人工智能；城市模型

中图分类号　TU984　文献标志码 A
DOI　10.16361/j.upf.202205002
文 章 编 号　1000-3363(2022)05-0017-07

作者简介

吴志强，中国工程院院士，长三角城市群智能规划协同创新中心主任，同济大学教授，wus@tongji.edu.cn

甘　惟，同济大学建筑与城市规划学院，博士研究生，通信作者，849766347@qq.com

刘朝晖，鹏城实验室双聘研究员，中国城市科学研究会秘书长助理

李舒然，同济大学设计与创意学院博士研究生

周咪咪，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

赵　刚，同济大学上海自主智能无人系统科学中心博士研究生

张修宁，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生

The AI City: Theory and Structural Model

WU Zhiqiang, GAN Wei, LIU Zhaohui, LI Shuran, ZHOU Mimi, ZHAO Gang, ZHANG Xiuning

Abstract: The theory of smart cities in China has gone through different stages. As the operational and managerial data of real cities accumulate, the old smart city model characterized by a top-down management system is no longer adequate to accommodate intelligent operations. This paper reviews the theoretical development of the smart city, highlights the critiques and debates about theories developed during the construction boom, and explicates the concept of the AI city. The AI city represents a new paradigm of the smart city after a new generation of artificial intelligence technology has emerged. This paper systematically explains: 1) the AI city theory, including essential characteristics of the AI city; 2) a theoretical framework consisting of its systematic structure, technological system, and scenario system, and 3) the four driving forces of the AI city development. Based on the theoretical understanding, the structural model of the AI city is proposed, including the breakthroughs in brain intelligence, self-organized decision-making, and human-space interaction supported by integrated multiple AI systems. From a theoretical perspective of the AI city, the paper discusses the future direction of new artificial intelligence technology and illustrates the fundamental influence of the AI city theory on technology and the transformation of urban governance models.

Keywords: smart city; AI city, city brain; new generation of AI; urban model

智慧城市自2006年由同济大学与IBM联合提出“Smart City”，并由后者作为商业概念向全球发布[1]以来，在全球范围内得到大量实践[2–3]。从总体上看，城市的智慧化经历了由数字城市向智慧城市的转变，其关键技术突破在于通过信息通信技术（ICT）的导入，将地理信息数据与真实世界城市的数据关联起来，形成“物联网”。后与建筑信息模型（BIM）结合，衍生出城市级的智能模型系统（City Intelligent Model，CIM）。CIM的发展历经4代，在经历上海世博园区、北京城市副中心[4]、青岛中德未来城[5]等地的应用后，对CIM不断提升，形成了以“城市中枢（City Pivot）”①为核心技术群落的智慧城市整体框架。在CIM进入第五代的时候，我们不得不考虑人工智能技术对城市发展产生的预期影响，不仅仅是改进城市智能模型的数字底板，更重要的是一个历史性跨越的进步；在考虑了上海马桥、金桥等地3年探索经验的基础上，我们提出了人工智能城市（AI City），即AI城市的发展思路，以期解决过去智慧城市实践中显现出的由于缺少大规模机器学习和分布式感知、计算能力造成城市需求难以精准满足的现实问题。

1　智慧城市的发展变迁与新挑战

城市的智能化是伴随着计算机科学和通信技术的发展而逐步提升的。20世纪后期

城市开始大规模数字化转型的过程，将物质空间的地理信息以虚拟数字的形式进行存储、传输、表达，“数字城市”概念因此产生。“智慧城市”是对“数字城市”的提升，笔者在2006年策划智慧城市时，作为上海2010世博会的总规划师，提出了以“城市是一个生命体”为出发点架构的智慧城市原型，将智慧城市的核心特征概括为“可感知、可判断、可反应、可学习”，并构建了以“感知层、数据层、平台层、应用层”4个层次为主要特征的技术体系。尽管中国后来的智慧城市建设在不同时期、不同地区的实践存在差异，但其架构与运行的理论模式迄今为止仍遵循着上述设想[6]。与智慧城市相关的技术主要包括大数据、云计算、物联网等，在城市内的各行各业，特别是交通、能源、环境、安防以及综合治理等领域已经开展了大量的研究和实践[7-9]。智慧城市的发展重塑了政府、规划师以及城市中的市民对城市的认识，被认为是提升城市治理能力现代化的一个必然选择[10]。

围绕智慧城市的理论研究较多，但各有侧重。主要包括3个视角：①关注智慧城市的技术因素[11]，认为技术迭代是驱动智慧城市建设发展的主要因素，科技公司作为技术供给方是推动智慧城市发展的主体；②关注智慧城市的社会因素[12]，认为智慧城市必须以人为本、综合协调实现城市发展中的“智慧”，解决城市痛点、满足人民的需求是推动智慧城市发展的动力；③关注智慧城市的综合评价方法[13]，认为智慧城市应建立多维度的目标和测度方法。2011年由中国工程院、德国工程院与瑞典皇家工程院联合提出了从社会治理智能化、经济创新智能化、生活环境智能化、基础设施智能化以及专业人才集聚度等5个维度架构的城市智商（CityIQ）评价体系[14]。

然而在实践中，智慧城市却往往与理论研究南辕北辙，引起近年来对智慧城市的反思潮。笔者将中国近15年的“智慧城市”的推进路线总结为3种模式[15]：以技术供给方为主导的T模式；以解决城市痛点问题和人民需求为导向的D模式；在上述两种模式之外出现的以展示厅形式推进但并没有落实到城市的真实运行系统中的形式主义模式，即E模式（该模式是在城市竞争中，为在城市智能化的过程中不落伍而将技术投入在展示需求上，缺乏问题导向，造成了大量的硬件资源浪费，因此受到了较多批判）。对智慧城市建设热潮的反思还体现在未能切入城市的真实需求、数字化基础仍然薄弱、建设成本巨大等在过去实践中客观存在的问题上[15-16]。在这一背景下，笔者提出智慧城市的发展应当建立以D模式为主带动T模式发展的创新模式。如何借助新一代智能技术真正解决城市人的需求，在智慧城市中建立技术供给与社会需求的动态平衡，是智慧城市发展突破瓶颈、创造价值的关键。这一对智慧城市发展未来的思考，为人工智能城市的理论框架奠定了基础。

2 从智慧城市到AI城市

2016年以来，AI技术在城市中的应用已有较多的探索，代表性的实践例如杭州城市大脑[17]、北京城市副中心CIM3.0[18]以及MIT Media Lab开发的City-Scope平台[19]等。在上述实践中，已将AI技术应用在城市数字化平台中，使其能够更有效地辅助城市决策及综合治理。然而，AI在城市领域的应用不仅限于此。随着图像识别技术的发展，在城市中开始广泛应用视觉传感设备对移动车辆、行人姿态等进行识别[20]，拓展了AI技术在城市交通、安防、环境、园区等领域的应用，也带动了AI技术企业的快速发展[21-27]。然而在这样的背景下，AI城市仍然是一个较为模糊的概念。艾瑞咨询2017年的一份报告提出了一种基于AI技术的城市定义“以数据驱动的城市决策机制，根据实时数据和各类型信息，综合调配城市公共资源，最终实现智能化达到效率最优的城市运行状态”[42]。然而遗憾的是，这一定义仍然未能揭示AI技术相比于过去智慧城市技术的本质性提升。笔者认为，对AI城市的理解不仅应关注智能技术在城市中的应用，即“AI in the City”，更应当建立一种“为城市服务的智能”概念，即“AI for the City”，从AI技术对城市需求的满足及其产生的治理模式转变的视角去定义AI城市。

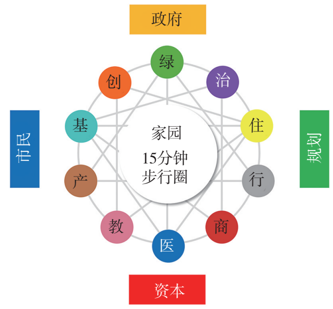
在人工智能发展进入2.0的时候，笔者正式提出了AI城市概念。2016年4月，中国工程院潘云鹤[28]提出人工智能2.0，其主要特征包括大数据智能、互联网群体智能、跨媒体智能、人机混合增强智能和自主智能系统。AI 2.0与30年前人工智能的概念相比，已经进入了一个崭新的发展阶段。从AI 1.0到AI 2.0的主要技术特征变化包括：①由只进行知识工程到以大数据为驱动的学习结合知识工程；②由研究个体智能到以互联网为基础建立群体智能服务；③由利用单一的结构化数据到整合多种非结构化数据；④由以机器为中心到重视人机和脑机的互动；⑤由优化单个的机器人到构建整体的自主智能系统；等等。上述技术特征演变，为以AI技术解决城市系统中的复杂问题奠定了基础，进而涌现出多项创新应用（表1）。2017年，中国工程院开展人工智能2.0的发展战略研究，为《新一代人工智能发展规划》②（以下简称“《规划》”）的落地提供了战略方向。笔者提出了应以城市发展需求和场景作为新一代AI技术发展的方向和动力，进而在《规划》中纳入了结合新一代AI技术“建设城市大数据平台，构建多元异构数据融合的城市运行管理体系……推进城市规划、建设、管理、运营全生命周期智能化”的相关内容，明确了应用AI为城市赋能的创新方向。2018年，笔者进一步发布了“AI城市”的概念及其关键场景，认为城市发展正在进入人工智能时代，应通过建构AI城市为新一代AI技术在城市中的应用场景创造开放的生态，推动AI技术在城市中的创新试验。

相比于智慧城市，AI城市的依托新一代AI技术，在城市规划决策的智能辅助、城市空间场景的智能集成以及城市运行的智能组织方面的能力[18, 29-30]具有显著提升（表2）。城市借助AI技术精准地感知城市需求，因人的需求而不断产生与之匹配的技术方案，为新一代AI技术研发提供方向和动力。因此，笔者在城市和谐发展观[31]、生态理性[32]的思想理论基础上，提出AI城市的内涵：“在AI技术大量涌现的背景下，为解决城市痛点问题、满足人民需求而出现的以AI技术精准赋能城市生产、生活、生态的一种自组织、可学习、可迭代的高度智能化的城市发展形态。”

表1　新一代人工智能技术的城市应用

Tab.1　Urban application of the new generation of AI technology

类型	前沿问题	技术能力	已有应用领域
数智（大数据智能）	可泛化知识计算平台、因果推理、视觉推理	提升AI的数据理解、分析、发现和决策能力 从数据中获取更准确、更深层次的知识，挖掘数据背后的价值[36]	在新零售领域，可以提升人流识别的准确率，预测每月的销售情况[9] 在交通领域，实现自动驾驶[22-23]、智能交通流量预测、智能交通疏导，以及对整体交通网络的智能控制[37] 在健康领域，提供医疗影像分析、辅助诊疗、医疗机器人等更便捷、更智能的医疗服务[26-27] 在安防领域，与IoT联动加速智能应用[21]
群智（群体智能）	群体智能涌现与演化、群体智能动力学与熵度量	吸引、汇聚和管理大规模参与者 以竞争和合作等多种自主协同方式来共同应对挑战性任务 在复杂开放环境中的决策任务中涌现出来超越个体的智能	在互联网领域，基于群体开发的开源软件、基于众筹众智的万众创新、基于众问众答的知识共享、基于群体编辑的维基百科，以及基于众包众享的共享经济等[39] 在机器人和无人机领域，2017年中国已制造了1000架无人机组成的无人机群，展示了能自主应变和排除故障的能力
合智（跨媒体智能）	类脑计算、云脑平台、数字视网膜	通过视听感知、机器学习和语言计算等理论和方法，构建出实体世界的统一语义表达	在城市决策辅助方面，研究城市全维度智能感知推理引擎，可以解决城市发展过程中存在的感知碎片化、信息孤岛化等问题，建立以“大跨度、大视角、大信息和大服务”为特征的城市全维度智能感知推理引擎，实现对人、车、物、事件等的多维度、跨时空协同感知和综合推理
混智（混合增强智能）	机器推理决策、机器人自主学习、安全可信的人机协作	将人的作用或人的认知模型引入人工智能系统，形成混合增强智能的形态[41]	在产业风险管理、医疗诊断、刑事司法领域，引入人类监督，允许人参与验证，以最佳的方式利用人的知识和智慧，最优地平衡人的智力和计算机的计算能力[24, 38] 在自动驾驶领域，通过智能人机协同技术可以协调两个“驾驶员”以实现车辆的安全和舒适行驶[23] 在产业发展决策、在线智能学习、医疗与保健、人机共驾和云机器人等领域正加速落地
自智（自主智能系统）	复杂环境的自主智能感知决策、无人集群的智能协同	复杂多变环境中的感知、控制、决策和系统行动 适用于多平台分布式和多模态交互式协同决策的机器学习[34]	在无人载具领域，已经在包括无人车、无人机、无人船等新一代智能载具方面开展应用，通过自主智能技术可以增强载具的性能及可靠性[22-23] 在社会生产领域，包括智能车间、智能工厂、服务机器人等应用可以大幅提升生产效率，节约劳动成本[25-26] 在科学研究领域，通过自主智能系统研制空间机器人、海洋机器人



（a）模型博弈关系

（b）北京顺义机场周边地区推演应用

图1　“CityGo”城市推演平台

Fig.1　"CityGo" urban development prediction platform

3　AI城市的理论构建

3.1　AI城市的本质特征

AI技术与智慧城市的技术特征存在本质不同，两者并不冲突，在AI技术的赋能下智慧城市进一步出现3个新特征，进而演变成为以AI理论和技术为基础的AI城市模型。

本质特征之1：会学习。具备学习能力是AI城市最核心的特征。一方面，城市历史发展数据以及日常运行数据可以成为以机器学习和深度学习为主的AI算法的原料；另一方面，深度学习的使用能够发现大型数据集中的复杂结构进而优化系统[33]，因此可以在多源、异构的复杂城市数据中获得依靠人的观察难以感知的特征和规律，并可以在同类型城市的数据之间互相比较借鉴。

本质特征之2：区别于传统AI算法向生物体学习的模式。AI城市开始向城市（人类社会运行的规则）学习，通过学习可以迭代实现自主智能涌现。按照对城市发展规律的学习进行城市规则的制定并将其作为推演模型的目标，可以支撑城市模型围绕目标不断演进、修正，帮助决策者以最小的干预来制定最有效的规划。例如，笔者团队研制的人工智能推演平台CityGO[18]（图1），在学习以后还可以创造新的解决方案，在城市的未来生活设计中可以发挥作用，打破设计师的思维惯性，促进设计方案的涌现。

本质特征之3：通过训练过程实现城市运行的本能反应。基于AI的智能控制系统不再是根据固定逻辑运行，而是实现了自组织（self-organization），即在遇到具体问题时，可以由多个城市智能系统快速、精准地完成对信息的过滤、筛选和重新组合，按照合理理想愿景制定规则，并以此作为模型目标使城市实现非由大脑系统，而是在系统内部完成的自我修正、迭代[34-35]。例如笔者团队研制的针对城市功能自组织配置的AI优化程序（图2）。

3.2　AI城市的理论架构

在人工智能技术开始介入智慧城市的规划、建设、运营管理的纵向维度以及生产、生活、生态的横向维度时，人们对人工智能城市的认识初步建立，但是仍然缺少对其内涵、特征、要素、关键技术以及发展动力的系统性建构，在这个背景下迫切需要在总结过去智慧城市的发展过程、理论和实践成果的基础上，形成针对人工智能城市的理论架构，描述构成人工智能理论体系的组成部分、内容及其相互关系，进而论述人工智能技术对城市发展的革命性影响，为指导未来人工智能城市的研究与实践提供框架引导。

笔者提出一个人工智能城市的理论架构（图3），在总体目标之下，由核心架构、场景体系、技术体系等3个部分组成。

3.3　各构成模块及其关联

（1）核心架构

众脑决策：AI城市不再是单脑结构，

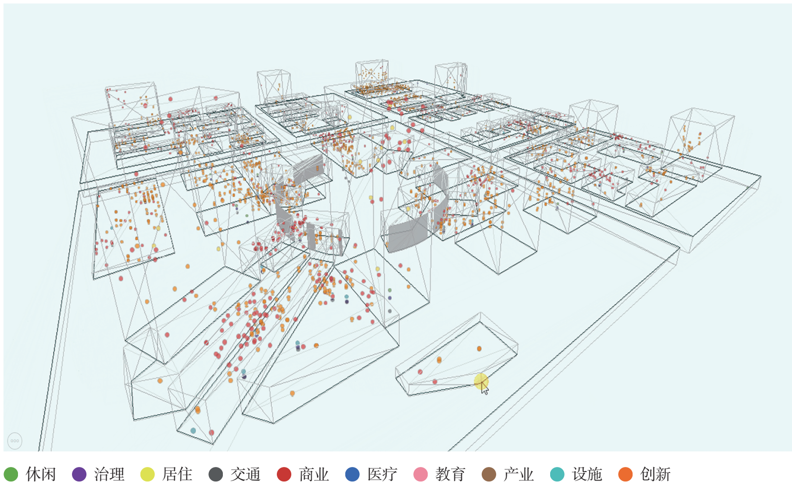


图2 城市1 km²街区十元功能AI迭代配置

Fig.2 Iterative configuration of 10 functions with AI in an 1 km² block

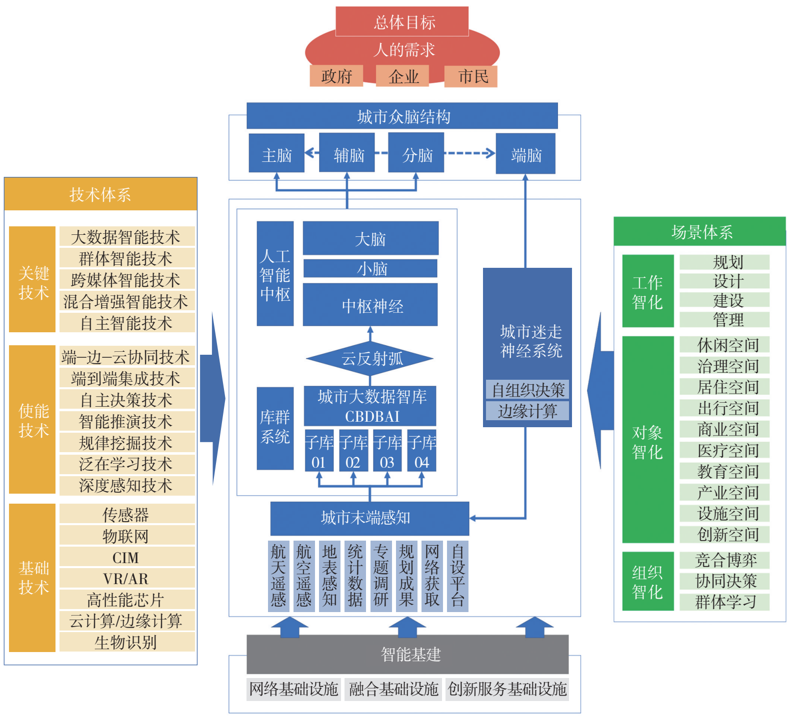


图3 AI城市的理论架构

Fig.3 Theoretical structure of the AI city

而是由主脑、辅脑、分脑、端脑构成的众脑系统共同完成群体学习和协同决策过程，各脑可以独立运行但又相互配合实现分布式协同决策。

人工智能中枢：由3级系统构成，分别为大脑——战略决策系统，小脑——城市指挥系统，神经系统——感知信息的汇集。借助AI、物联网、地理信息系统、BIM等技术，构建虚实相生的人工智能城市中枢，提升城市管理者的决策能力。

迷走神经系统：人工智能城市“迷走神经系统”③的构建是其关键技术，城市的海量信息将不必经过城市“大脑”而在系统内部自我调节。城市内部复杂的信息流，市民日常生活中繁琐、细致的需求，将不会也不必全部流入城市职能部门的管理系统，而是在城市管理以下的层面就可以得到解决，实现更加精准、高效、自我完善的局部智能反馈。

云反射弧：建立城市神经元（智能体）之间的信息传递和决策传递机制，依照事件复杂程度以最短链路完成决策响应，形成从城市事件到城市决策之间的城市云反射弧。

库群系统：汇集感知数据的城市大数据库CBDBAI，在AI城市中将采用分布式数据库的库群系统，满足众脑系统的数据挖掘需求。

城市末端感知：包括8大数据源的感知端，感知数据汇入库群系统。

智能基建：借助新型基础设施实现汇聚众智、流程再造、数据决策、信息对称、体验重塑，改善城市各方面决策和运营效能，提升人民幸福感和获得感，显著增强城市的安全、韧性和可持续发展能力。

（2）场景体系

工作智化：针对城市规划、设计、建设、管理等环节的智化场景，服务于城市全生命周期。

对象智化：针对人对于城市不同类型空间的需求的智化场景，其目的在于不仅人可以感知城市，城市也可以感知人，并主动为其空间的使用者提供精准服务。

组织智化：借助新一代人工智能技术，建立更加高效的城市内部要素的组织，包括竞合博弈、协同决策以及群体学习等高级、复杂的关系网络。

（3）技术体系

关键技术：新一代人工智能技术是AI城市的关键技术。例如，计算机视觉技术[20]的发展促进了城市末端感知，自主智能技术为建立城市决策模型提供技术条件[24]，大数据智能与混合增强智能技术创造了人机协同决策的更多可能[37]。

使能技术：主要包括可以解决端—边—云协同或是端到端集成的技术，以及解决AI城市决策过程中的深度感知、泛在学习、规律挖掘、智能推演、自主决策[18, 30]等问题的智能技术。通过这些技术建立“算法”与AI城市中的“任务”之间的桥梁，使AI城市得以运行。

基础技术：基础技术包括传感器、物联网、CIM、VR/AR、高性能芯片、云计算/边缘计算、生物识别等，单项技

术的发展已较成熟，作为构建AI城市的基础元件。

3.4　发展动力

动力之1：需求牵引力。AI城市的第一动力是人的需求迭代。例如依靠AI技术满足城市中政府、企业、市民对城市疫情预测走向等城市重大挑战的智慧决策的需求促生了大量解决方案和产品，形成城市中的AI涌现。另一方面，AI城市开始具备主动感知需求的能力，即AI城市开始捕捉其使用者的行为规律，以提供更精准的服务。AI城市的实现是以人本需求导向而非设备导向的，通过对人在空间中的需求的实时响应不断优化城市自身的系统。

动力之2：技术推进力。以AI为代表的新技术发展构成了智能化的推进力。人们在尝试使用新技术并体验其创造的便利的同时，其自身行为方式也产生了转变，进而引起了更深层的社会关系和社会组织方式的变革，城市系统因此发生与新技术相适应的流变。

动力之3：竞争驱动力。城市的竞争力体现在对人的吸引。城市之间的竞争促使城市的管理者期望借助新一代AI技术为城市的人创造更高品质的服务，进而在未来的竞争中取得优势。

动力之4：组织代谢力。AI城市通过学习，不断发现新的需求，促进新技术产品的发展而淘汰难以应对需求变化的旧产品，通过城市内生代谢实现AI城市的技术、场景持续不断地自我修复、完善。

4　AI城市的模型架构

AI城市的理论结果促进了城市治理模式的转型，并通过AI向城市学习实现AI模型架构的提升。笔者认为，AI城市的发展将在以下3个方面引起AI技术的重大变革。

4.1　从群体智能到众脑智能

城市社会的复杂性超越了一般意义上的群体智能研究范畴[38]，相比于经典研究中以蜂群、蚁群等同质低等智能生物的群体现象作为学习对象，AI城市的主体具有更加复杂的特征。众脑智能技术的核心问题，是在城市内部多个异质决策主体之间建立协同机制，使每一个智能系统都能够独立完成感知、判断、反应、学习以及迭代过程，满足系统之间复杂协作网络的要求，并在有限范围内共享目标。AI城市不再依赖一个决策指挥中心，众脑智能技术需要更高性能的群体智能技术突破，在传统的群体快速一致性[39]、分布式计算以及安全协议[40]的基础上建立适应城市社会众脑决策模式的智能治理模型（图4），保障多个城市智能系统之间的协同。

4.2　从自主决策到自组织决策

AI技术促进了社会生活中间微观群体之间的联动，例如社交网络和虚拟社群、大量出现的用户点对点的手机App智能应用，以及针对用户数据可以精准推送的智能服务[26]等，使诸多需求的满足不需经过城市管理层面就可以得到解决。这种在社会群体内部围绕特定问题完成资源重构和分配的自组织现象，依靠经典自主智能中的决策模型依然难以完成，需要在不同空间尺度、不同社会群体之间建立一个整合模糊推理、分级响应机制的动态自适应系统[35]，实现自发地以需求为依据进行技术遴选、优化资源配置，进而赋予智能系统以多资源自组织、自优化的生命力。这一转变将有效推动城市建立“自上而下”与“自下而上”结合的分层治理体系。

4.3　从跨媒体学习到多AI集成的人与空间交互

在AI城市中，人不仅是智能系统的服务对象，也是感知、学习的对象。因此除了用计算机模拟人的智能行为以外，还要用一个信息群落去创建新的能够与人合作的智能系统。这项任务对跨媒体智能技术提出了更高要求，即智能体必须从高维、多元的感官输入中获得环境的有效表征，并利用这些表征将过去的经验归纳为新的目标，这是一项艰巨的任务[41]。将多AI技术集成在特定城市空间中，人的决策偏好、行为习惯本身是AI的学习对象，通过AI的感知、判断、反应、学习、推演、迭代为人创造更好的空间体验，实现在一个空间中的人机混合增强（图5）。多AI集成的人与城市空间的交互将促进城市治理的精准化。

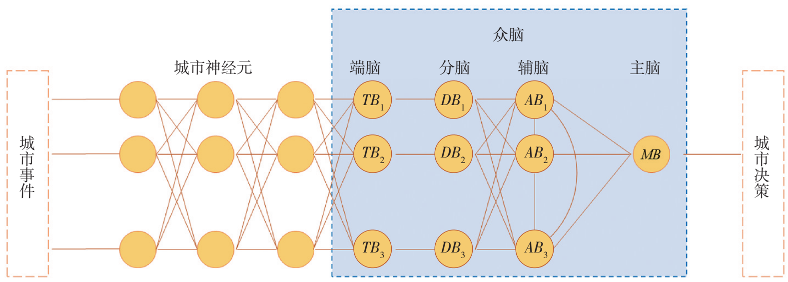


图4　众脑决策模型
Fig.4　Crowd decision-making model

图5　城市广场多AI交互场景示意图
Fig.5　Scenario of multi-AI interaction in a city square

5 结语

相比于AI的发展，城市的智能化是一个相对年轻的领域。然而，城市的发展却是历史悠久的，城市在其长期发展演化过程中逐步形成极为复杂的生命系统，在AI研究中却被忽视了。向城市学习是AI发展的重要方向。衡量AI城市发展的基本价值观的标准是判断AI技术的应用对美好生活是产生有益的贡献还是破坏性的作用。AI城市的价值在于：①以人的需求为导向牵引AI技术的发展，将AI技术的应用精准服务于个体需求；②实现了城市为人提供更美好的生活而不断学习和迭代的自组织进化过程；③突破了传统智慧城市单一系统难以完成的、将自上而下与自下而上相结合的治理模式，提升了社会组织的效率。在城市各系统已经逐步完成数字化转型的今天，建构AI城市的理论架构意义重大，将新一代AI技术导入市民的生活、生产、生态以及城市的安全运行等方面具有广阔的前景，需要未来更多的研究及社会主体的参与。

注释

① 类比生物中枢，城市中枢指智慧城市系统应包括负责决策指挥的城市“大脑”、负责城市各职能部门之间协调运营的“小脑”，以及借助物联网设备感知城市信息的“中枢神经”系统等3个技术群落的集成。

② 中国《新一代人工智能发展规划》于2017年7月由国务院颁布。

③ “迷走神经系统”在生理学上指支配呼吸、消化、循环等系统的绝大部分器官的感觉、运动以及腺体分泌的混合神经，其主要特征是信息的传递与反馈不用经过中枢系统就可以完成。笔者从2015年开始认识到智慧城市不应当只依靠中枢系统，而应采用分级数据治理的模式对城市复杂信息进行分流和在地处理，以避免城市中枢信息的冗余，由此在中国率先提出了建构城市“迷走神经系统”的设想。这一设想是在充分观察智慧城市实践中由于单一脑结构出现的多部门决策压力、信息爆炸、传递困难以及数据库容量限制等问题的基础上提出的，在两个方面得到改进：一是以人工智能技术提升大规模分布式城市智能模型的计算能力；二是架构数据边缘计算模块以完善城市局部空间二级感知和决策。

参考文献（References）

[1] IBM Institute for Business Value. A vision of smarter cities: how cities can lead the way into a prosperous and sustainable future[R]. 2010.

[2] 吴志强, 柏旸. 欧洲智慧城市的最新实践[J]. 城市规划学刊, 2014(5): 15−22. (WU Zhiqiang, BAI Yang. A review of recent practice of smart cities in EU[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 15−22.)

[3] LONG Y, ZHANG Y, ZHANG J, et al. The recent achievement and future prospect of China´s smart city[J]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2022, 2(1): 12−21.

[4] 吴志强, 李欣. 北京城市副中心规划工作思路创新[J]. 城市规划学刊, 2019(S1): 138−141. (WU Zhiqiang, LI Xin. Design thinking innovation in planning of Beijing city sub−center[J]. Urban Planning Forum, 2019(S1): 138−141.)

[5] 吴志强, 甘惟. 转型时期的城市智能规划技术实践[J]. 城市建筑, 2018(3): 26−29. (WU Zhiqiang, GAN Wei. Urban intelligent planning technology practice in transitional period[J]. Urbanism and Architecture, 2018(3): 26−29.)

[6] LIU Z. Review and prospect of smart cities [J]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2022, 2(1): 48−54.

[7] 黄沣爵, 杨滔, 张晔珵. 国内外智慧城市研究热点及趋势(2010—2019年): 基于CiteSpace的图谱量化分析[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 56−63. (HUANG Fengjue, YANG Tao, TANG Yecheng. Hotspots and trends in smart cities researches (2010−2019) quantitative analysis of graphs based on CiteSpace[J]. Urban Planning Forum, 2020(2): 56−63.)

[8] 甄峰, 孔宇. “人—技术—空间”一体的智慧城市规划框架[J]. 城市规划学刊, 2021(6): 45−52. (ZHEN Feng, KONG Yu. An integrated “human−technology−space” framework of smart city planning[J]. Urban Planning Forum, 2021(6): 45−52.)

[9] 吴志强, 仇勇懿, 干靓, 等. 中国城镇化的科学理性支撑关键: 科技部“十一五”科技支撑项目“城镇化与村镇建设动态监测关键技术”综述[J]. 城市规划学刊, 2011(4): 1−9. (WU Zhiqiang, QIU Yongyi, GAN Jing, et al. The supporting technologies for rational urbanization in China: introduction of “technologies for dynamic monitoring of urbanization and rural development” sponsored by the 11th Five−Year national science & technology supporting program[J]. Urban Planning Forum, 2011(4): 1−9.)

[10] 汪光焘, 李芬, 高楠楠. 信息化对城市现代化的预期影响[J]. 城市规划学刊, 2020(3): 15−23. (WANG Guangtao, LI Fen, GAO Nannan. The expected impact of informatization on urban modernization[J]. Urban Planning Forum, 2020(3): 15−23.)

[11] NIU X, LIN S, QIN S, et al. The technical approach of using mobile positioning data to support urban population size monitoring[J]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2022, 2(1): 39−47.

[12] PEDRO M. E−participation in smart cities: technologies and models of governance for citizen engagement[M]. Springer, 2019.

[13] CHOURABI H, NAM T, WALKER S, et al. Understanding smart cities: an integrative framework[J]. IEEE Computer Society, 2012.

[14] 吴志强, 李翔, 周新刚, 等. 基于智能城市评价指标体系的城市诊断[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 12−18. (WU Zhiqiang, LI Xiang, ZHOU Xingang, et al. City diagnosis with the city intelligence quotient (City IQ)evaluation system[J]. Urban Planning Forum, 2020(2): 12−18.)

[15] 吴志强, 王坚, 李德仁, 等. 智慧城市热潮下的“冷”思考学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2022(2): 1−11. (WU Zhiqiang, WANG Jian, LI Deren, et al. Academic essays on rethinking the development of smart city[J]. Urban Planning Forum, 2022(2): 1−11.)

[16] ZHAO P, ZHU J. The development and challenges of smart transportation[J]. Frontiers of Urban and Rural Planning, 2022, 2(1): 55−60.

[17] 华先胜, 黄建强, 沈旭, 等. 城市大脑: 云边协同城市视觉计算[J]. 人工智能, 2019(5): 77−91. (HUA Xiansheng, HUANG Jianqiang, SHEN Xu, et al. City brain: cloud−edge collaborative urban visual computing[J]. Artificial Intelligence, 2019(5): 77−91.)

[18] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. 时代建筑, 2018(1): 6−11. (WU Zhiqiang. Artificial intelligence assisted urban planning [J]. Time + Architecture, 2018(1): 6−11.)

[19] ZHANG Y, LARSON K. CityScope: application of tangible interface, augmented reality, and artificial intelligence in the urban decision support system[J]. Time + Architecture, 2018(1): 44−49.

[20] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 39(4): 640−651.

[21] XIAO L, WAN X, LU X, 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.

[22] MA Y, WANG Z, YANG H, et al. Artificial intelligence applications in the development of autonomous vehicles: a survey [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(2): 315−329.

[23] BIONDI F, ALVAREZ I, JEONG K A. Human−vehicle cooperation in automated driving: a multidisciplinary review and appraisal[J]. International Journal of Human−Computer Interaction, 2019, 35(11): 932−946.

[24] AZIZ S, DOWLING M. Machine learning and AI for risk management[M]// AZIZ S, DOWLING M. Disrupting finance. Palgrave Pivot, Cham, 2019.

[25] BÜCHI G, CUGNO M, CASTAGNOLI R. Smart factory performance and industry 4.0[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 150: 119790.

[26] BELANCHE D, CASALÓ L V, FLAVIÁN C, et al. Service robot implementation: a theoretical framework and research agenda[J]. The Service Industries Journal, 2020, 40(3−4): 203−225.

[27] DAS S, BISWAS S, PAUL A, et al. AI doctor: an intelligent approach for medical diagnosis[M]//DAS S, BISWAS S, PAUL A, et al. Industry interactive innovations in science, engineering and technology. Springer, Singapore, 2018.

[28] 潘云鹤. 人工智能走向2.0[J]. 中国工程院院刊, 2016, 2(4): 51−61. (PAN Yunhe. Heading toward artificial intelligence 2.0 [J]. Engineering, 2016, 2(4): 51−61.)

[29] 张庭伟. 复杂性理论及人工智能在规划中的应用[J]. 城市规划学刊, 2017(6): 9−15. (ZHANG Tingwei. Complexity theory and the application of artificial intelligence in planning[J]. Urban Planning Forum, 2017(6): 9−15.)

[30] 吴志强, 黄晓春, 李栋, 等. “人工智能对城市规划的影响”学术笔谈会[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 1−10. (WU Zhiqiang, HUANG Xiaochun, LI Dong, et al. Academic essays on the impact of artificial intelligence on urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 1−10.)

[31] 吴志强, 刘朝晖. “和谐城市”规划理论模型[J]. 城市规划学刊, 2014(3): 12−19. (WU Zhiqiang, LIU Zhaohui. “Harmonious city”: a general urban planning theory model[J]. Urban Planning Forum, 2014(3): 12−19.)

[32] 吴志强. 论新时代城市规划及其生态理性内核[J]. 城市规划学刊, 2018(3): 19−23. (WU Zhiqiang. Urban planning in new era and the core of ecological rationality[J]. Urban Planning Forum, 2018(3): 19−23.)

[33] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521 (7553): 436.

[34] OLFATI−SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi−agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215−233.

[35] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient−based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998(11): 2278−2324.

[36] ROH Y, HEO G, WHANG S E. A survey on data collection for machine learning: a big data−AI integration perspective [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2019, 33(4): 1328−1347.

[37] ABBAS S, KHAN M A, ATHAR A, et al. Enabling smart city with intelligent congestion control using hops with a hybrid computational approach[J]. The Computer Journal, 2022, 65(3): 484−494.

[38] AL−TASHI Q, RAIS H, ABDULKADIR S J. Hybrid swarm intelligence algorithms with ensemble machine learning for medical diagnosis[C]//The 4th International Conference on Computer and Information Sciences(ICCOINS). IEEE, 2018: 1−6.

[39] CHRISTIDIS K, DEVETSIKIOTIS M. Blockchains and smart contracts for the Internet of Things[J]. IEEE Access, 2016, 4: 2292−2303.

[40] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504−507.

[41] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human−level control through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529−533.

[42] 中国人工智能城市展望研究报告2017年[R]. 艾瑞咨询系列研究报告, 2018(1): 174−215. (China artificial intelligence city outlook research report 2017[R]. iResearch Series Research Report, 2018(1): 174−215.

修回：2022−09