



引用格式: 张彩波. 智慧系统及其在智慧城市应用的前沿技术分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 3877-3886.

Zhang Caibo. Smart system and its advanced technologies analysis in smart city application[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 3877-3886.

智慧系统及其在智慧城市应用的前沿技术分析

张彩波

(中国航天系统工程有限公司, 北京 100070)

摘 要 为解决城市“复杂巨系统”组织运行中的人-机-物协同融合等共性问题, 构建面向智慧城市应用服务的通用平台, 结合智慧系统基础理论研究, 通过对 IBM(International Business Machines Corporation)、阿里云计算有限公司、华为技术有限公司及北京易华录信息技术股份有限公司等中外企业智慧系统在智慧城市中的实际应用分析, 明确了智慧系统的基本内涵与特征, 提出了智慧系统的通用组成, 开展了智慧系统体系架构的设计, 并从感、传、智、用 4 个系统单元设计技术和一个系统总体设计技术角度, 全面阐述了智慧系统面向智慧城市应用的前沿技术体系构成及其应用方向, 为智慧系统的设计提供了技术指引和系统构建参考。

关键词 智慧系统; 智慧城市; 体系架构; 人-机-物协同; 云计算; 大数据; 人工智能; 智能决策

中图法分类号 TP303; **文献标志码** A

Smart System and Its Advanced Technologies Analysis in Smart City Application

ZHANG Cai-bo

(China Aerospace System Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China)

[Abstract] In order to solve the common problems of human-machine-things fusion for the "complex giant system" running of city, a universal platform for smart city service was constructed. Combining with the basic research of smart system theories, the practical applications of smart system in smart city, such as IBM, Alibaba cloud, HUAWEI & e · Hualu, were analyzed. The basic connotation and characteristics of smart system were clarified, and the general composition and system architecture of smart system was designed. From the four system units design technologies of sense, transmission, wisdom and application, and from the overall system design technology, the composition and application direction of advanced technologies in smart system for smart city application were comprehensively expounded, which provides technical guidance and system construction reference for the designing of smart system.

[Keywords] smart systems; smart city; system architecture; human-machine-things collaboration; cloud computing; big data; artificial intelligence; intelligent decision

如何借助新一代信息技术手段解决城市发展面临的社会治理、行业管理、社会民生等关键问题, 成为当前智慧城市发展面临的首要任务, 只有将数字智能从个体向城市管理的整个系统扩展才能使智慧城市变得更加智慧。

为此, 围绕面向智慧城市应用的智慧系统开发与设计, 尤其是智慧城市对数据的融合与挖掘、实时处理与分析及智能化的决策等方面, 中外学者及企业相继开展了一系列理论与实践探索。因此, 通过全面梳理智慧系统在智慧城市应用中的前沿技术体系和发展方向, 搭建面向智慧城市应用的智慧系统, 有助于解决智慧城市建设过程中面临的主动感知、信息传输、海量异构数据的处理与融合、跨领域信息资源的共享与交换, 以及人-机-物融合的智能决策应用等基础共性问题。

1 智慧城市与智慧系统

智慧城市建设需要通过面向不同行业、不同领域、不同应用对象的各类智慧系统的开发才能实现城市的智慧化管理, 提升城市管理的智能化水平和信息化关键能力。

1.1 智慧城市的信息化关键能力

智慧城市作为一项复杂的系统工程, 其必须赋能城市全面的信息主动感知能力、安全高效的网络传输能力、强大的数据计算能力和精准的智慧应用能力, 并将各个行业的应用系统集成大成于一体, 实现统一的智能化、智慧化应用, 为城市的生产、生活提供智慧服务。因此, 通过新一代信息技术的融合创新, 实现面向智慧城市行业应用服务的智慧系统的设计、开发、系统集成与应用, 成为当前智慧城市建设的重点方向。

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-10-24

作者简介: 张彩波(1977—), 男, 汉族, 河北丰南人, 博士, 工程师。研究方向: 智慧城市, 信息系统设计。E-mail: colo_wave@163.com。

投稿网址: www.staej.com.cn

1.2 智慧系统的理论基础与实践

1.2.1 智慧系统的理论基础

由于城市包含了生产、生活等若干个子系统,智慧城市则是名副其实的“系统的系统”。钱学森等^[1]从数字城市角度给出了智慧系统的原型,指出“作为一个人机共存、人网合一的人工开放型巨型系统,数字城市管理服务系统表现出很高的智能性、社会性,建立这个开放的巨型智能系统,一方面要从认知科学的理论出发,运用人工智能、计算机科学和信息技术的最新成果,同时采用从定性到定量的综合集成法”。朱新明等^[2]从城市的功能和发展前景出发,指出“数字城市的综合系统,特别是支持应变、决策和适时发展的系统,必须具备相应的学习功能,而且是有教师的学习,人-机结合的系统学习的功能”。

随着信息化与工业化的深度融合,信息物理系统(cyber-physical system, CPS)的提出为智慧系统的设计提供了关键技术与方法。CPS通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术,构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现了系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。其体系结构一般由决策层、网络层和物理层构成,核心技术则主要由CPS感知设计技术、CPS信息处理技术、CPS建模与认知技术、CPS决策与控制技术等分步骤设计技术和CPS集成设计技术、数字孪生技术和CPS安全性技术等系统整体设计技术构成^[3-4]。王辉等^[5]指出,智慧系统是指物与物通过各种系统互联、互通,以自动或半自动的方式实现更加迅速、正确、灵活、节约地交流和反应。通过系统使物体与物体之间直接对话,提高决策的速度和质量,使生产和生活更为便利。胡虎等^[6]从智能的定义入手,提出了三体智能理论,通过总结智能技术互动融合发展的若干基本规律,创造性地提出了物理实体、意识人体和数字虚体三体化一,指出两体数字化、两体认知化、三体互联化是人类社会走向智能最重要的前奏和大趋势,为构建人-机-物协同融合的智慧系统提供了理论指引。

1.2.2 智慧系统在智慧城市中的典型应用与实践

当前,智慧城市所涉及的智慧系统的开发与应用主要聚焦在专项领域的大数据量业务处理、数据存储与分析、城市数据智能化与数据应用等方向。

(1) IBM(International Business Machines Corporation)“智慧系统”战略。2009年,IBM提出了“智慧系统”战略,解释了基于物联化、智能化、感知化、云架构的智慧系统。2010年,IBM正式发布其关键

性的三大策略,即为工作负载而优化、以“云”方式交付和创造绿色节能IT(information technology)经济。其中,针对智慧城市大数据量处理的挑战,提出了以优化负载为代表的整合系统,以满足用户从成本、安全性和扩展性等角度对应用同一系统处理不同类型的工作负载需求。为此,IBM发布了IBM pureScale应用系统和智慧分析系统两大负载优化系统,提升了业务分析解决方案的部署效率^[7]。

(2) 阿里云“ET(阿里人工智能技术)城市大脑”。为解决城市数据智能化问题,阿里云于2016年发布了ET城市大脑,其内核采用阿里云ET人工智能技术,对整个城市进行全局实时分析,自动调配公共资源,修正城市运行中的Bug(错误),最终将进化成能够治理城市的超级人工智能。ET城市大脑由超大规模计算平台、数据采集系统、数据交换中心、开放算法平台、数据应用平台五大系统组成,并在交通领域利用大规模数据开展了积极探索^[8]。

(3) 华为云“智慧城市神经系统”。在智慧城市领域,华为提出“新ICT(information communication technology),让城市更智慧”的口号,为智慧城市建设提供“一云二网三平台”的整体解决方案架构,打造智慧城市神经系统。“一云”即城市数据中心,整合、共享和利用各类城市信息资源。“二网”由联接人的城市通信网和联接物的城市物联网构成。“三平台”大数据服务支撑平台、ICT应用使能平台和城市运行管理平台^[9]。

(4) 易华录“城市数据湖”。为满足大数据时代数据存储和分析处理的需要,易华录在中国提出了城市数据湖的理念。数据湖作为一种新的数据架构,由于具备存储空间海量、兼容多种格式、数据处理高速等优点,通过“湖存贮,云计算”,既满足了海量大数据的低成本长期存贮要求,又满足了大数据运营开发需要的便利性,有效促进了“数据驱动、人机协同、跨界融合、共创分享”的智能经济形态发展^[10]。

1.2.3 智慧系统的内涵及特征

结合理论研究与应用实践,面向智慧城市应用的智慧系统可以理解为借助云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能、空间地理信息集成等新一代信息技术,面向城市复杂开放巨系统中人/机/物/环境/信息智能感知、智能互联、智能分析与智能决策的开放性智慧服务系统,是集空天地泛在感知、安全可信传输、数据治理、智能推理、科学决策、精准执行与自我学习等智慧功能于一体的基础理论体系和应用产品集合。其旨在通过搭建面向智慧城市应用的基础共性平台,解决城市组织运行中

的人-机-物协同融合等共性问题。其特征主要表现在以下方面。

全面感知——智慧系统借助实时数据采集可对人/事/物/时空/态势等城市信息进行全面的感知,包括对物理实体的自然属性、社会属性、状态及趋势的感知。**实时分析**——智慧系统利用大数据技术能够对采集的海量多源异构数据进行实时的处理与分析,实现由数据到知识的转换。**智能决策**——智慧系统通过将数据挖掘、深度学习、人工智能算法与专家体系相结合,能够根据实际需求实现自主的智能推理与科学决策。**精准执行**——智慧系统通过对数据的智能分析,获取对应用需求的精准判断,并针对不同的应用场景制定科学有效的执行方案。**自我学习**——智慧系统依靠强大的计算能力,结合人工智能技术或认知计算技术,通过对大数据的分析与处理实现行业应用、知识积累与知识创造并不断自我完善、学习提升。

2 智慧系统的组成及其体系架构

面向智慧城市应用的智慧系统主要包括“感、传、智、用”4个部分。“感”主要是指通过智能化感知终端和边缘终端,实现各类数据的实时采集;“传”主要是指借助先进的网络通信技术实现高可靠性的数据传输;“智”主要是指通过数据接入、云计算基础平台、基础工具、数据挖掘、知识生成、专家体系等,形成智慧系统的数据枢纽和智能中枢;“用”主要是指面向不同应用领域提供各类智慧服务。

2.1 智慧系统的组成

智慧系统的具体组成如图1所示。图1中,智能感知分系统通过对城市数据的采集形成海量多源异构数据;通信与网络分系统通过地基网络和天基网络实现数据的有效传输;数据处理分系统通过数据的存储、管理、融合、挖掘、分析和标准化,形成初级数据产品,为智能分析提供有效支撑;人工智能与专家分系统通过将数据转化为知识,形成通用数据产品,为上层应用提供更智能的分析、更精准的预测以及人-机-物协同的智能决策服务;网间网分系统根据上层应用数据需求提取通用数据产品,为应用平台层提供跨域多源异构数据的无障碍传输,实现不同平台间数据产品的交换;信息安全分系统通过大数据安全和端、网、云的安全技术手段,确保智慧系统运行的安全性与可靠性;环境支撑分系统通过应用开发环境、应用运行环境和基础资源设施服务,为智慧系统的开发提供必要



图1 智慧系统的组成

Fig. 1 The component of smart system

的环境支撑。专业应用分系统主要是从智慧城市行业应用需求的角度出发,通过行业大数据子平台、能力协同子平台和行业人工智能子平台等应用平台的搭建,面向具体行业领域开展智能决策与应用服务。

2.2 智慧系统的体系架构

从智慧系统的组成可以看出,其体系架构基本形成了自下而上的“五层两体系”,如图2所示。

“感知层”主要借助在城市中布置的感知基础设施收集城市各类数据参数;“网络层”主要通过网络基础设施实现传感器数据的传输与汇总;“数据层”主要实现对数据的存储、接入、交换、处理、决策分析与组织管理;“平台层”主要通过面向SOA(service-oriented architecture)的云服务架构,实现基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)、平台即服务(platform as a service, PaaS)及软件即服务(software as a service, SaaS)等功能服务;“应用层”主要由智慧城市各个专业应用领域构成,以实现各类智慧化应用服务。“安全保障体系”主要通过物理安全、网络安全、数据安全、云安全及应用安全构建智慧系统的安全技术防护体系;“标准规范体系”主要在通用标准、信息技术基础标准、面向业务的应用标准、管理标准,形成智慧系统统一的对内对外数据标准和接口规范。

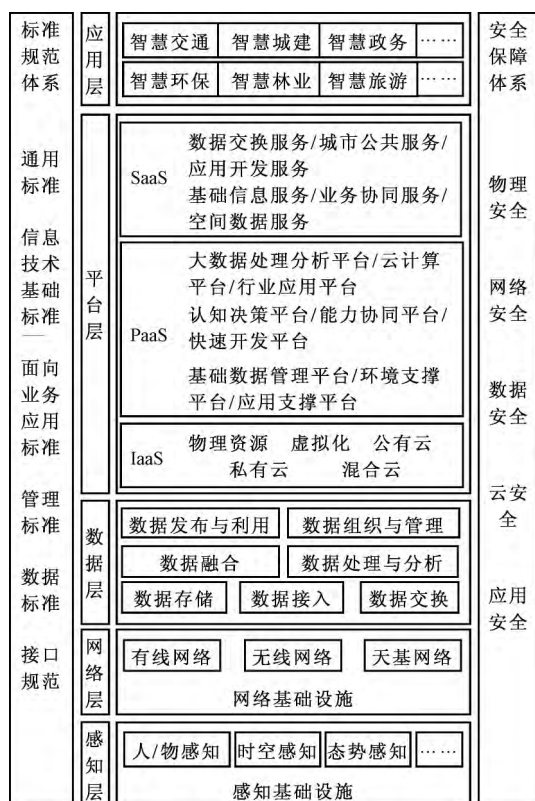


图2 智慧系统的体系架构

Fig. 2 The architecture of smart system

3 智慧系统的前沿技术体系

智慧系统的前沿技术体系主要由“感、传、智、用”4个系统单元设计技术和一个系统总体设计技术构成。

3.1 智慧系统的感知技术

目前,城市的数据采集范围已经扩展到包括物理实体空间、人类社会空间和虚拟网络空间的三元空间^[11]。尽管城市中布置了大量的感知设备和设施,但如何有效地集成利用,以应对城市感知中的“三多现状”(多观测耦合、多协议互联、多主题交互)和“三高需求”(高时空感知、高精度感知、高智能感知)一直是当前面临的巨大挑战^[12]。因此,只有从物联感知、智能感知和感知网络着手,才能有效加以解决。

在物联感知方面,为有效满足智慧城市多尺度、高时变和多样化的感知需求^[12],实现城市基础设施的感知化、智能化^[13],促进城市感知中心的建设,提升城市感知能力,以射频识别技术(RFID)、传感网络、嵌入式系统为代表的物联网技术^[14],多功能、多物理量且满足边缘计算节点需求的智能传感器小型化、集成化技术,多参数复合传感器技术,多功能物联网(internet of things, IoT)智能网关等前沿技术的开发成为热点,并不断在城市管网(廊)、智能路灯、智能家居等领域得到广泛应用;在智能感

知方面,为了提高智慧系统对城市感知的精度,丰富感知的手段和内容,泛在感知技术、智能感知边缘计算技术、小型化、低功耗智能传感技术、人机交互的主动感知技术,以及群智感知^[15]、交互感知^[16-17]等关键技术的开发与应用越来越多地得到重视,尤其在城市交通、应急救援、噪声检测^[18]、人脸识别^[19]、任务分配^[20-21],以及工业自动化生产过程的监视与优化、危险环境下替代人工服务等应用领域发挥了重要作用;在感知网络方面,通过构建空天地集成化传感网^[22-23],可实现智慧系统对城市的全面感知,有效提升感知的时效性,其相关技术主要包括:基于边缘计算的智能感知网络构建技术、海量传感器组网通信^[24]、异构传感器接入^[25]、传感网服务组合^[12]、流式数据挖掘分析^[12-26]和地理信息互操作^[12-27]等,以保障智慧系统对城市感知的信息能够实时、准确、安全地传送到用户,实现以数据为中心的传感器网络构建。

3.2 智慧系统的通信网络传输技术

面对智慧城市精细化管理中不断增加的设施物联化接入需求,跨协议异构网络的互联互通、智慧协同网络以及网络传输的实时性成为智慧系统数据网络传输的重要技术保障。其中,借助智能标识、软件定义网络^[28]、网络功能虚拟化^[29]、星联网+5G(第五代移动通信技术)等技术手段,构建基于空天地一体化的智能网络,可有效解决异构网络融合、异构终端智能互联及网络覆盖范围等问题^[30-32],实现智慧系统对高动态条件下城市时空信息的实时传输、协同处理和智能服务,促进信息资源的综合利用和统一管理;针对智慧系统空天地信息传输面临的网络多元化要求,智慧协同网络技术的开发与应用能够满足其在高移动、低延迟、高可靠、可扩展等条件下面向未来城市发展的下一代互联网体系结构设计的需求,解决现有“三重绑定”(身份与位置绑定、资源与位置绑定以及控制与转发绑定)对互联网用户及业务爆发式增长所造成的数据分发与控制弊端^[33-36],并在高铁通信、工业互联网等领域实现了应用部署,满足了行业应用需求^[37];通过窄带物联网(NB-IoT)、互联网协议(IPv6)、5G^[38]以及支持长距离、短距离、有线、无线等多种通信制式的极低功耗深度覆盖海量接入技术及动态全网通接入网关技术,可实现智慧系统在跨协议异构网络通信、高性能、高并发网络传输,以及信道通信质量时变性等条件下,信息传输过程中网络间协议的交换互通、地址规划与管理,解决信息传输控制的速度瓶颈问题,以提升信息传输的有效性和可靠性^[39-41],并在诸多领域实现了广泛应用,如隧道健康监测^[42]、智慧路灯^[43]、报警系统、工业监控,以及不

通过本地网关而是直接将远程传感器连到云端的远距离射频链路等。

3.3 智慧系统的智能技术

智慧系统需要借助先进的智能技术处理复杂的数据分析、汇总和计算,以便整合和分析海量的跨地域、跨行业和职能部门的数据和信息,并将特定的知识应用到特定行业、特定场景、特定解决方案中,进而支持决策和应用^[44],其智能技术体系主要包括如下方面。

(1) 基于 3S [地理信息系统(geographic information system, GIS)、全球定位系统(global positioning system, GPS)、遥感(remote sensing, RS)]集成的城市空间信息技术。3S 技术作为数字城市和智慧城市的基本技术,它提供了与空间地理信息相关的城市数据库,使得智慧城市在专项领域的智能化应用成为现实,而基于 3S 集成的城市空间信息技术为智慧系统面向城市空间的信息处理提供了重要技术解决途径,其中 RS 和 GPS 通过向 GIS 提供或更新区域信息及空间定位(如复杂地形实时定位、高精度室内定位等),GIS 通过提供相应的信息查询和智能化空间分析等重要功能来实现对城市空间信息的采集、处理、管理、分析、表达、传播和应用^[45]。目前,基于 3S 集成的城市空间信息技术已在地质灾害应急管理^[46]、智慧水利^[47]、智能交通^[48]等领域得到了广泛应用。

(2) 城市信息模型(city information modeling, CIM) 技术。CIM 是对城市各要素及其时空状态信息的数字化描述和表达,其核心技术涉及物联网、GIS、BIM 及其集成技术。智慧系统可借助物联网技术的信息传感设备将城市和 CIM 模型相连接,形成一个权责范围内可更新且能够用于信息共享与传递的数据库,通过 GIS 和 BIM 的集成,形成一个可视化的信息存储、提取、交流平台,同时利用云计算、数据融合和空间信息网络等技术进行信息一体化的组织与处理,以支持城市运行管理过程中的各种需求和应用^[49-51],并通过精细+精准的管理方式,为城市经济、社会管理、城市交通、电商物流、环境保护等政府管理部门的规划决策提供有效数据信息,提升城市管理的服务水平和服务能力。

(3) 大数据与云计算技术。为实现海量多源异构数据的综合存储、管理、融合和分析,智慧系统需要充分借助以云计算、大数据为代表的新一代信息技术实现数据的处理分析、认知决策及行业间数据的融合应用,提升系统自身的运算能力。其中,分布式集群大数据动态存储技术^[52]、高时效可扩展的大数据计算模型和优化技术、基于知识定义的大数据主动处理技术、大数据分析与深度学习技术、空天地一体化数

据融合技术、多源异构数据交换和互联技术、数据的可视化技术等构成了智慧系统数据处理的核心技术,为“数据”到“知识”的双向转换和知识的决策应用提供数据源基础,以满足智慧系统在跨领域、跨应用、跨时空等条件下的数据处理要求。此外,为了实现智慧城市应用领域的智能决策服务,面向多源异构数据语义协同与数据深度挖掘的知识库构建技术、基于群智的人-机-物知识集成方法、行业间知识模型的融合技术与方法、领域知识管理和跨领域知识协同工作模型和方法、智能人机融合认知建模与交互技术、人-机-物协同决策与智能服务等关键技术的研究成为当前和未来智慧系统认知领域研究的重点,并将进一步在智慧系统面向数据的存储、计算、分析与融合等方面发挥关键作用。

面对海量信息的快速处理、智能挖掘与决策应用,智慧系统需通过以数据为中心的密集型计算模式,利用云计算 IaaS、PaaS 和 SaaS 层服务技术为其提供庞大的存储空间、强大的计算能力与智能决策支撑能力,以确保根据决策者的需求与偏好选择合适的资源进行服务^[53-54]。为此,虚拟化技术(虚拟机技术)^[55-56]、云计算环境下的资源分配技术^[57]与智能决策支持系统的构建^[53]、空天地一体化的时空信息服务云平台^[58-59]、海量决策信息的处理与融合方法及其实现技术^[53],可为实现智慧系统存储资源的充分整合与高效利用,快速获取决策信息,开展处理分析与智能决策提供关键技术支撑,以满足智慧系统面向各行业的智慧应用需求,保障智慧系统上层应用对数据的正确调取。

(4) 人工智能技术。新一代人工智能技术^[60](基于大数据智能、群体智能、人机混合智能、跨媒体推理、自主智能等)的快速发展,为智慧系统深入挖掘数据间隐藏的关系,预测未来发展趋势,实现系统的认知与建模、高性能计算、人机协同、智能决策支持以及知识的表达、推理与获取等提供了有效途径。随着智能服务从云端向边缘和终端的扩散,基于边缘网络和终端的 AI(人工智能)专用芯片等边缘智能技术^[61]的开发和应用为智慧系统智能终端的快速反应以及相互间的协同与实时性的智能服务创造了有效技术手段,目前英伟达、高通等都已陆续开展了用于边缘网络或终端的 AI 专用芯片研发,在就近提供网络、计算、存储、应用等核心能力的同时,开展实时性智慧服务,从而满足通信、业务、安全等各方面的应用需求;针对智慧系统中人、机、物、环境存在的连续、离散及复杂交互关系,以大数据、深度学习等方法为基础的复杂系统认知预测建模技术^[62-63],为智慧系统数据的智能分析与建模仿真提供了有力支撑,如在智能制造^[63]、城市绿波带交通控制^[64]等方面的应用;类

脑智能技术(类脑模型与类脑信息处理、类脑芯片与计算平台)的研究为提升智慧系统多模态协同感知、协同认知、复杂环境下的自适应、自主学习、自主决策及高性能计算能力,增强信息处理与数据分析的准确性提供了可靠方法,通过多尺度、多脑区、多认知功能融合的认知计算模型与类人学习相结合,可实现智慧系统的记忆、推理和认知功能和自适应演化^[65-66],从而对智慧系统的人机协同与智能决策形成有效的支持,以满足智慧系统在新事物、新环境下面向复杂应用的智能决策和智慧应用需求,进而实现通用智能,如基于数据理解和人机交互的智慧教育、智慧医疗、智能家居、智慧养老,以及基于大数据的情报分析、国家和公共安全监控与预警等领域的应用^[65]。

3.4 智慧系统的应用技术

智慧系统应用技术是以面向智慧城市专业领域实际应用为导向的技术应用与支撑服务平台开发。随着物联网、云计算、大数据等新一代信息技术融合应用时代的到来,其技术发展的重点已从IaaS层的信息基础设施开发及SaaS层的具体应用转向城市和区域系统下多源信息的实时融合、跨领域的信息共享,进而支撑跨行业、跨部门的业务协同、信息联动与城市的精细化管理和服务。因此,通过技术的融合创新与应用,打造智慧城市专业应用领域通用系统与应用服务平台,成为智慧城市建设以及智慧系统应用的重要方向。

3.5 智慧系统的总体技术

总体技术只要是为解决系统架构中人-机-物相互协调问题和基于模型化的系统架构方法而开展的相关技术研究。由于智慧系统包含了多个子系统,其从总体设计到智能决策应用的每一个环节还需要对系统集成技术、数字孪生技术、接口与标准体系建设及安全技术4个方面开展深入研究。其中:系统集成技术主要是通过对智慧系统所涉及的软硬件集成实现系统的稳定性与实用性;数字孪生技术通过明确城市空间的物理实体、信息虚体及二者间数据与信息的关系,为智慧系统实现物理实体与信息虚体之间的互操作提供关键技术支撑,并在城市大脑构建及城市规划、建设、运营、安全、民生等诸多领域管理决策的协同化与智能化^[67]方面发挥重要作用;接口与标准体系建设主要是通过统一智慧系统内部的存储管理与访问标准,定义数据接口调用和交互规范,实现智慧系统多渠道、通用化的数据采集以及算力、算法、数据等对外输出服务;安全技术主要是指通过加强多功能网络安全防护技术、数据隐私保护技术、大数据安全检测服务技术及网络安全态势感知等关键技术研究,建立系统受到攻击前中后的防护措施、攻击检测与响应机制,确保智慧系统正常运行的端网云安全。

具体智慧系统构建的前沿技术体系梳理如表1所示。

表1 智慧系统构建的前沿技术体系
Table 1 The advanced technologies of smart system construction

技术类别	技术方向	技术名称	应用条件及解决的主要问题
感知技术	物联感知	物联网技术、智能传感器小型化、集成化技术、多参数复合传感器技术、多功能IoT智能网关等	满足智慧城市多尺度、高时变和多样化的感知需求,实现城市基础设施的感知化、智能化以及城市大量感知设备设施的有效集成利用,提升城市感知能力
	智能感知	泛在感知技术、智能感知边缘计算技术、小型化低功耗智能传感技术、人机交互的主动感知技术、群智感知技术、交互感知技术等	提高对城市感知的精度,丰富感知的手段和内容
	感知网络	基于边缘计算的智能感知网络构建技术、海量传感器组网通信、异构传感器接入、传感网服务组合、流式数据挖掘分析、地理信息互操作等	实现智慧系统对城市的全面感知,有效提升感知的时效性
通信网络传输技术	基于空天地一体化的智能网络与信息传输	智能标识、软件定义网络、网络功能虚拟化、星联网+5G、智慧协同网络技术等	解决异构网络融合、异构终端智能互联及网络覆盖范围等问题,实现高动态条件下城市时空信息的实时传输、协同处理和智能服务,满足在高移动、低延迟、高可靠、可扩展等条件下面向未来城市发展的下一代互联网体系结构设计的需求
	跨协议异构网络通信	NB-IoT、IPv6、5G、极低功耗深度覆盖海量接入技术、动态全网通接入网关技术等	实现跨协议异构网络通信,高性能、高并发网络传输,以及信道通信质量时变性等条件下,信息传输过程中网络间协议的交换互通、地址规划与管理,解决信息传输控制的速度瓶颈,提升信息传输的有效性和可靠性

续表 1

技术类别	技术方向	技术名称	应用条件及解决的主要问题
智能技术	城市空间信息技术	GIS、GPS、RS 及 3S 集成技术	实现城市空间的信息处理,提供与空间地理信息相关的城市数据库,实现智慧城市在专项领域的智能化应用
	城市信息模型技术	物联网、GIS、BIM 及其集成技术	形成一个可视化的信息存储、提取、交流平台,支持城市运行管理过程中的各种需求和应用
	大数据	分布式集群大数据动态存储技术、高时效可扩展的大数据计算模型和优化技术、基于知识定义的大数据主动处理技术、大数据分析与深度学习技术、空天地一体化数据融合技术、多源异构数据交换和互联技术、数据的可视化技术等	实现海量多源异构数据的综合存储、管理、融合和分析,为“数据”到“知识”的双向转换和知识的决策应用提供数据源基础,以满足跨领域、跨应用、跨时空等条件下的数据处理要求
		面向多源异构数据语义协同与数据深度挖掘的知识库构建技术、基于群智的人-机-物知识集成方法、行业间知识模型的融合技术与方法、领域知识管理和跨领域知识协同工作模型和方法、智能人机融合认知建模与交互技术、人-机-物协同决策与智能服务系统等	在面向数据的存储、计算、分析与融合等方面发挥关键作用,为智慧城市应用领域的智能决策服务提供有效支撑
	云计算	虚拟化技术(虚拟机技术)、云计算环境下的资源分配技术、智能决策支持系统的构建、空天地一体化的时空信息服务云平台、海量决策信息的处理与融合方法及其实现技术等	为智慧系统提供庞大的存储空间、强大的计算能力与智能决策支撑能力,实现海量信息的快速处理、智能挖掘与决策应用,确保能够根据决策者的需求与偏好选择合适的资源进行服务
	人工智能	基于边缘网络和终端的 AI 专用芯片等边缘智能技术、复杂系统认知预测建模技术、类脑智能技术等	实现系统的认知与建模、高性能计算、人机协同、智能决策支持以及知识的表达、推理与获取等
应用技术	技术融合创新与应用	主要是指以面向智慧城市专业领域实际应用为导向的技术应用与支撑服务平台开发	实现多源信息的实时融合及跨领域的信息共享
总体技术	人-机-物相互协调及系统架构方法	系统集成技术、数字孪生技术、接口与标准体系、安全技术	解决系统架构中人-机-物相互协调问题,实现基于模型化的系统架构设计

4 结论与展望

面向智慧城市应用的智慧系统是一个多元信息技术开发与融合的系统,如何开发通用的智慧系统,以解决智慧城市应用领域普遍存在的交互感知、网络通信传输、数据分析、知识生成、智能决策等基础共性问题,以及如何开发面向智慧城市专业应用领域的个性化智能平台,以解决行业专业领域的智慧化应用,成为发展智慧系统的关键。其中,尤其是以智能化技术为代表的前沿技术研究成为智慧系统未来开发与应用的核心因此,通过对智慧系统的理论与应用实践研究及其架构组成分析,揭示了智慧系统构建的前沿技术体系构成,进一步明确了相应技术所要解决的问题以及应用条件和环境,从而为新型智慧城市建设的智能化发展提供了技术指引和系统构建参考。

参 考 文 献

[1] 钱学森,戴汝为. 论信息空间的大成智慧: 思维科学、文学艺术与信息网络的交融[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.

Qian Xuesen, Dai Ruwei. Emergence of metasynthetic wisdom in cyberspace [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.

[2] 朱新明,李亦菲. 架设人与计算机的桥梁[M]. 武汉: 湖北教育出版社, 2000.

Zhu Xinming, Li Yifei. Build a bridge between man and computer [M]. Wuhan: Hubei Education Press, 2000.

[3] 李洪阳,魏慕恒,黄 洁,等. 信息物理系统技术综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 37-50.

Li Hongyang, Wei Muheng, Huang Jie, et al. Survey on cyber-physical systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 37-50.

[4] 黎作鹏,张天驰,张 菁. 信息物理融合系统(CPS) 研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 25-31.

Li Zuopeng, Zhang Tianchi, Zhang Jing. Survey on the research of cyber-physical systems(CPS) [J]. Computer Science, 2011, 38(9): 25-31.

[5] 王 辉,吴 越,章建强,等. 智慧城市[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

Wang Hui, Wu Yue, Zhang Jianqiang, et al. Smart city[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[6] 胡 虎,赵 敏,宁振波,等. 三体智能革命[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

Hu Hu, Zhao Min, Ning Zhenbo, et al. Three-body intelligence

- revolution[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [7] 张 鹏. IBM“硬件+软件+服务”深化智慧系统战略[J]. 通信世界, 2010, 12(30): 30-30.
Zhang Peng. IBM “hardware + software + services” deepen the strategy of smart systems [J]. Communications World, 2010, 12 (30): 30-30.
- [8] 耿晓军. 阿里城市大脑 1.0 发布 献礼世界城市发展[J]. 物联网技术, 2017, 7(10): 6-8.
Geng Xiaojun. Ali city brain 1.0 released, a tribute to world city development[J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(10): 6-8.
- [9] 黄海峰. 华为企业业务开启 5 年新征程: 联手合作伙伴, 共赢“新 ICT”时代[J]. 通信世界, 2016, 18(7): 40-42.
Huang Haifeng. Huawei's enterprise business has embarked on a new five-year journey: Join hands with partners to achieve win-win results in the “new ICT” era [J]. Communications World, 2016, 18(7): 40-42.
- [10] 林拥军. 数据湖: 新时代数字经济基础设施[M]. 北京: 中共中央党校出版社, 2019.
Lin Yongjun. Data lake: digital economy infrastructure in the new era[M]. Beijing: Party School Press of the Central Committee of C. P. C., 2019.
- [11] 杨 靖, 张祖伟, 姚道远, 等. 新型智慧城市全面感知体系 [J]. 物联网学报, 2018, 2(3): 91-97.
Yang Jing, Zhang Zuwei, Yao Daoyuan, et al. Comprehensive sensing system of new smart city [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(3): 91-97.
- [12] 龚健雅, 张 翔, 向隆刚, 等. 智慧城市综合感知与智能决策的进展及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1482-1497.
Gong Jianya, Zhang Xiang, Xiang Longgang, et al. Progress and applications for integrated sensing and intelligent decision in smart city [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48 (12): 1482-1497.
- [13] 党安荣, 甄茂成, 王 丹, 等. 中国新型智慧城市发展进程与趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(18): 16-29.
Dang Anrong, Zhen Maocheng, Wang Dan, et al. Current situation and trends of the new smart city development in China [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(18): 16-29.
- [14] 王兆庆, 贺 勇. 基于智慧城市建设关键技术的应用研究 [J]. 物联网技术, 2016, 6(11): 69-73.
Wang Zhaoqing, He Yong. Application research based on key technologies of smart city construction [J]. Internet of Things Technologies, 2016, 6(11): 69-73.
- [15] 谢树云, 冉 婕, 杨雪松. 基于群智感知的智慧城市交通系统研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(20): 49-51.
Xie Shuyun, Ran Jie, Yang Xuesong. The research of smart urban transport system based on the PCW [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(20): 49-51.
- [16] 谢小军, 芦翰晨, 施若馨. 分布式电力应急救援感知与协同信息交互技术 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3082-3091.
Xie Xiaojun, Lu Hanchen, Shi Ruoxin. Distributed power emergency rescue perception and cooperative information interaction technology [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3082-3091.
- [17] 杨鲁义. 基于大数据的虚拟实验室手势交互感知仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 169-172, 193.
Yang Luyi. Virtual laboratory gesture interaction perception simulation based on big data [J]. Computer Simulation, 2019, 36(10): 169-172, 193.
- [18] 吴文乐, 郭 斌, 於志文. 基于群智感知的城市噪声检测与时空规律分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4): 638-643.
Wu Wenle, Guo Bin, Yu Zhiwen. Crowdsensing based urban noise map and temporal-spatial feature analysis [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(4): 638-643.
- [19] 赵伟峰, 杨秋松, 李 梅, 等. 交互感知应用微云服务框架 [J]. 计算机系统应用, 2016, 25(10): 180-185.
Zhao Weifeng, Yang Qiusong, Li Mei, et al. Service framework for interactive perception applications on cloudlets [J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(10): 180-185.
- [20] Zhu W, Guo W, Yu Z, et al. Multitask allocation to heterogeneous participants in mobile crowd sensing [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018(1): 1-10.
- [21] 袁 姝, 周朝荣, 杨正清, 等. 群智感知系统中基于鲸鱼优化算法的任务分配 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(7): 2031-2037.
Yuan Shu, Zhou Zhaorong, Yang Zhengqing, et al. Task allocation based on whale optimization algorithm in crowdsensing systems [J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(7): 2031-2037.
- [22] 陈能成, 张良培. 空天地一体化对地观测传感网的概念与特征[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(5): 4-7, 12.
Chen Nengcheng, Zhang Liangpei. Concept and characteristics of integrated earth observation sensor web [J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(5): 4-7, 12.
- [23] Zhang X, Chen N C, Chen Z Q, et al. Geospatial sensor web: a cyber-physical infrastructure for geosciences research and application [J]. Earth-Science Reviews, 2018(185): 684-703.
- [24] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
Li Jianzhong, Li Jinbao, Shi Shengfei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [25] 谢贤鸽, 刘学锋. 传感器观测服务中异构感知数据的接入与管理[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 154-159.
Xie Xiangge, Liu Xuefeng. Heterogeneous sensor data access and management in sensor observation service [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 154-159.
- [26] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘 [J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1211-1216.
Li Deren, Zhang Liangpei, Xia Guisong. Automatic analysis and mining of remote sensing big data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1211-1216.
- [27] Yang C, Chen N C, Di L P. RESTful based heterogeneous geoprocessing workflow interoperation for sensor web service [J]. Computers & Geosciences, 2012(47): 102-110.
- [28] Kreutz D, Ramos F, Verissimo P, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey [J]. Proceedings of IEEE, 2014, 103(1): 10-13.
- [29] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, et al. Network function virtu-

- alization: state-of-the-art and research challengers [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 236-262.
- [30] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合 SDN 控制的新一代空地一体化网络架构. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 450-454, 459.
- Chen Chen, Xie Shanshan, Zhang Xiaoxiao, et al. A new space and terrestrial integrated network architecture aggregated SDN [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 450-454, 459.
- [31] 田鹏伟, 张 娴, 胡正银, 等. 异构信息网络融合方法研究综述 [J]. 图书情报工作, 2017, 61(7): 137-144.
- Tian Pengwei, Zhang Xian, Hu Zhengyin, et al. Review of studies on heterogeneous information network fusion methods [J]. Library and Information Service, 2017, 61(7): 137-144.
- [32] 李德仁, 沈 欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715, 766.
- Li Deren, Shen Xin, Gong Jianya, et al. On construction of China's space information network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715, 766.
- [33] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249-1254.
- Zhang Hongke, Luo Hongbin. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249-1254.
- [34] 苏 伟, 陈 佳, 周华春, 等. 智慧协同网络中的服务机理研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1255-1260.
- Su Wei, Chen Jia, Zhou Huachun, et al. Research on the service mechanisms in smart and cooperative networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1255-1260.
- [35] 冯博昊, 周华春, 张宏科, 等. 智慧协同网络服务内容在传输路径上的缓存分配策略 [J]. 通信学报, 2016, 37(3): 129-138.
- Feng Bohao, Zhou Huachun, Zhang Hongke, et al. Cache allocation policy of service contents along delivery paths for the smart collaborative network [J]. Journal on Communications, 2016, 37(3): 129-138.
- [36] Zhang H, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future internet [J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46-51.
- [37] 靳明双, 郜 帅, 张宏科. 智慧协同网络研究进展 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(1): 22-32.
- Jin Mingshuang, Gao Shuai, Zhang Hongke. Research progress of smart collaborative identifier networks [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018, 30(1): 22-32.
- [38] 吴大鹏, 闫俊杰, 杨 鹏. 面向 5G 移动通信系统的智慧城市汇聚及接入网络 [J]. 电信科学, 2016, 32(6): 52-57.
- Wu Dapeng, Yan Junjie, Yang Peng. Smart city converged and accessed network based on 5G mobile communication system [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 52-57.
- [39] 吴伟男, 刘建明. 面向低功耗无线传感器网络的动态重传算法 [J]. 计算机科学, 2018, 45(6): 96-99, 123.
- Wu Weinan, Liu Jianming. Dynamic retransmission algorithm in low-power wireless sensor networks [J]. Computer Science, 2018, 45(6): 96-99, 123.
- [40] Lin X, Liu X, Lei D, et al. RRM-B: Reliable retransmission mechanism for wireless sensor networks [C]//IEEE International Conference on Online Analysis and Computing Science. New York: IEEE, 2016: 206-213.
- [41] Ying B. An adaptive compression algorithm for energy-efficient wireless sensor networks [C]//International Conference on Advanced Communication Technology. New York: IEEE, 2017: 861-868.
- [42] 王大涛, 滕德贵, 李 超. 基于低功耗无线传感网络的隧道健康监测系统 [J]. 测绘通报, 2018, 66(S1): 273-277.
- Wang Datao, Teng Degui, Li Chao. Tunnel health-monitoring system based on low-power wireless sensor networks [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, 66(S1): 273-277.
- [43] 黄祖成, 袁 峰, 李 引. 基于使用 IPv6 的低功耗无线个人局域网的无线传感网在智慧路灯中的应用 [J]. 计算机应用, 2014, 34(10): 3029-3033.
- Huang Zucheng, Yuan Feng, Li Yin. Implementation of IPv6 over low power wireless personal area network based on wireless sensor network in smart lighting [J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(10): 3029-3033.
- [44] 徐 静. 智慧城市关键技术与实现路径研究 [J]. 电信科学, 2013, 29(8): 123-126.
- Xu Jing. Key techniques of smart city and path to realization [J]. Telecommunications Science, 2013, 29(8): 123-126.
- [45] 齐 雄, 曹茂春. 智慧城市的核心技术及其在智慧城市中的应用 [J]. 智能建筑, 2013, 11(9): 45-47.
- Qi Xiong, Cao Maochun. The core technology of smart city and its application in smart city [J]. Intelligent Building, 2013, 11(9): 45-47.
- [46] 黄 露, 谢 忠, 罗显刚. 3S 技术在突发地质灾害应急管理中的应用 [J]. 测绘科学, 2016, 41(11): 56-60.
- Huang Lu, Xie Zhong, Luo Xiangang. Application of 3S technology in emergency management of sudden geological disasters [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(11): 56-60.
- [47] 王仁礼, 陈 波, 杨 阳, 等. 3S 技术在数字水利中的应用 [J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 210-212.
- Wang Renli, Chen Bo, Yang Yang, et al. Application of 3S technology to digital water conservancy [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(3): 210-212.
- [48] 吴锡昭, 周龙君, 陈晓芬. 智能交通中 3S、物联网技术集成应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 43(7): 155-157.
- Wu Xizhao, Zhou Longjun, Chen Xiaofen. 3S, internet of things technology integration in the application of intelligent transportation [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 43(7): 155-157.
- [49] 孙园园. 从 BIM 到 CIM——探索智慧城市建设新模式 [J]. 价值工程, 2019, 38(35): 30-31.
- Sun Yuanyuan. From BIM to CIM: exploring a new model of smart city construction [J]. Value Engineering, 2019, 38(35): 30-31.
- [50] 包 胜, 杨湔钦, 欧阳笛帆. 基于城市信息模型的新型智慧城市管理平台 [J]. 城市发展研究, 2018, 25(11): 50-57.
- Bao Sheng, Yang Haoqin, Ouyang Difan. A new smart city management platform based on CIM [J]. Urban Development Studies, 2018, 25(11): 50-57.
- [51] 耿 丹, 李丹彤. 智慧城市背景下城市信息模型相关技术发展综述 [J]. 中国建设信息化, 2017, 23(15): 72-73.

- Geng Dan, Li Dantong. Review on the technology development of CIM in the context of smart city[J]. Informatization of China Construction, 2017, 23(15): 72-73.
- [52] 陈磊, 吴晓晖. 基于Hadoop的分布式集群大数据动态存储系统设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(6): 593-598.
- Chen Lei, Wu Xiaohui. Design of distributed cluster big data dynamic storage system based on Hadoop[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(6): 593-598.
- [53] 罗贺, 杨善林, 丁帅. 云计算环境下的智能决策研究综述[J]. 系统工程学报, 2013, 28(1): 134-142.
- Luo He, Yang Shanlin, Ding Shuai. A survey of intelligent decisions in cloud computing[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(1): 134-142.
- [54] 熊枫. 云计算时代的智慧城市建设研究[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2015, 17(4): 120-125.
- Xiong Feng. Research on construction of intelligent cities in the era of cloud computing[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2015, 17(4): 120-125.
- [55] 徐保民, 倪旭光. 云计算发展态势与关键技术进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(2): 170-180.
- Xu Baomin, Ni Xuguang. Development trend and key technical progress of cloud computing[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(2): 170-180.
- [56] 杨青峰. 云计算时代关键技术预测与战略选择[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(2): 148-161.
- Yang Qingfeng. Key Technology forecast and strategic choice for cloud computing[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(2): 148-161.
- [57] 姜栋瀚, 林海涛. 云计算环境下的资源分配关键技术研究综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(3): 308-314.
- Jiang Donghan, Lin Haitao. A summary of key techniques research on resource allocation in cloud computing environment[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(3): 308-314.
- [58] 陈能成, 刘迎冰, 盛浩, 等. 智慧城市时空信息综合决策关键技术与系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2278-2286.
- Chen Nengcheng, Liu Yingbing, Sheng Hao, et al. Key techniques and system for comprehensive decision-making of spatio-temporal information in smart city[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2278-2286.
- [59] 王庆光. 智慧城市及其关键技术研究[J]. 科技资讯, 2017, 15(20): 25-27.
- Wang Qingguang. Research on smart city and its key technologies[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(20): 25-27.
- [60] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349-362.
- Li Bohu, Chai Xudong, Zhang Lin. Preliminary study of modeling and simulation technology oriented to neo-type artificial intelligent systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349-362.
- [61] 何宝宏, 徐贵宝. 人工智能前沿技术应用趋势与发展展望[J]. 中国工业和信息化, 2019, 5(4): 24-28.
- He Baohong, Xu Guibao. Application trend and development prospect of advanced technologies for artificial intelligence[J]. China Industry and Information Technology, 2019, 5(4): 24-28.
- [62] Tao F, Zhang L, Laili Y J. Configurable intelligent optimization algorithm: design and practice in manufacturing[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [63] 范帅, 李伯虎, 柴旭东, 等. 复杂系统中定性定量集成建模技术研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(10): 2227-2233.
- Fan Shuai, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Studies on complex system qualitative and quantitative synthetically modeling technologies[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(10): 2227-2233.
- [64] 胡霆, 王景成, 赵广磊, 等. 城市交通干线绿波带全局优化方法[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(10): 1211-1215.
- Hu Ting, Wang Jingcheng, Zhao Guanglei, et al. A global optimizing method in green wave control of urban arterial traffic[J]. Computers and Applied Chemistry, 2012, 29(10): 1211-1215.
- [65] 曾毅, 刘成林, 谭铁牛. 类脑智能研究的回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(1): 212-222.
- Zeng Yi, Liu Chenglin, Tan Tieniu. Retrospect and outlook of brain-inspired intelligence research[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(1): 212-222.
- [66] 徐波, 刘成林, 曾毅. 类脑智能研究现状与发展思考[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(7): 793-802.
- Xu Bo, Liu Chenglin, Zeng Yi. Research status and developments of brain-inspired intelligence[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(7): 793-802.
- [67] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.