

智慧城市运营管控关键技术展望^①

范明月¹, 于皖豫², 席瑞², 张亮¹, 张弘³

¹(中建西安幸福林带建设投资有限公司, 西安 710075)

²(清华大学 软件学院, 北京 100084)

³(西安睿博智能股份有限公司, 西安 710018)

通信作者: 席瑞, E-mail: ruix.ryan@gmail.com



摘要: 智慧城市是社会空间、物理空间和信息系统三元有机融合的条件下城市智慧化转型的新型态, 运用新一代信息化技术优化城市系统, 提升城市品质和综合竞争力, 实现可持续发展. 近年来, 智慧城市建设的重视程度也在不断加强, 但其并未如其他领域智慧化转型那般顺利, 建设过程依然存在诸多问题, 也在一定程度上对城市的发展产生了制约作用. 本文以城区级规模的幸福林带建筑为例, 简要介绍了其智慧化运营管控平台, 并针对其在数字化、可视化、智能化和开放式开发框架等方面的需求, 凝练了一个智慧化平台的技术参考框架. 最后, 以此经验为基础, 对智慧城市运营管控平台的建设给出一些建议, 并提出了其潜在的关键技术需求.

关键词: 智慧城市; 数字化转型; 大数据; 数字孪生; 物联网

引用格式: 范明月, 于皖豫, 席瑞, 张亮, 张弘. 智慧城市运营管控关键技术展望. 计算机系统应用, 2022, 31(11): 91-99. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8796.html>

Prospects of Key Technologies for Smart City Operation Management and Control

FAN Ming-Yue¹, YU Wan-Yu², XI Rui², ZHANG Liang¹, ZHANG Hong³

¹(Xi'an XingFu Lindai Construction & Investment Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

²(School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

³(Xi'an Rainbow Intelligent Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Smart city is a new type of smart city transformation under the ternary organic integration of social space, physical space, and information system. It uses a new generation of information technology to optimize the city system, enhance the city's quality and comprehensive competitiveness, and achieve sustainable development. In recent years, although the construction of smart cities has also been attached increasing importance, it has not been as smooth as the smart transformation of other fields. The construction process is still faced with many problems, which restricts the city's development to a certain extent. This study takes the urban-scale Happiness Forest Belt building as an example, outlines a smart operation management and control platform developed for this building, and presents a condensed reference technical framework for a smart platform to meet its needs in aspects of digitization, visualization, smartness, and open development frameworks. Finally, some suggestions are proposed on the basis of this experience for constructing an intelligent city operation management and control platform, and its potential critical technical requirements are put forward.

Key words: smart city; digitizing; big data; digital twin; Internet of Things (IoT)

在国家新型城镇化大背景下, 十四五规划纲要强调“加快数字化发展, 建设数字中国”, 为智慧城市未来

10年的发展作出战略指引^[1,2]. 然而第4次科技革命即工业4.0时代, 信息技术革新促进了园区管理^[3-5]、建

① 基金项目: 国家自然科学基金(61772306); 中建股份科技研发基金(CSCEC-2020-Z-19)

收稿时间: 2022-02-14; 修改时间: 2022-03-16; 采用时间: 2022-04-13; csa 在线出版时间: 2022-07-15

筑业^[6,7]、交通^[8,9]、公共安全^[10]等垂直领域向智能制造的转型和落地。但在城市建设运营仍处于初级阶段,至今仍然没有一个比较成功方案建成智慧城市,因此,亟需在新型信息技术支撑下实现快速转型。

通过分析已有的城市智慧化建设方案和案例,主要存在以下几个问题:(1)信息化水平良莠不齐;(2)综合服务与管理效能有待提升;(3)信息孤岛林立、业务缺乏协同等。上述问题使得城市各个功能模块无法有机融合形成 one ICT 架构,导致功能子系统数量在不断增多,但没有质的改变,反而造成管理的混乱、低效,资源共享、业务协同更高级的智慧化特征更是无从谈起,亟待突破现有智慧化方案的不足之处和弊端。从信息化视角来看,如何在城市运转过程中产生的海量数据中发现问题并找到最优解决方案,并以此指导城市发展,将是城市智慧化转型的关键所在。

数字孪生(digital twin)技术充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映实体装备的全生命周期过程^[11]。随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的发展,其在电力、船舶、制造等行业领域得到了广泛应用,并得到了众多企业(如波音、西门子等)与组织(如德勤、中国科协智能制造协会)的高度重视,探索基于数字孪生的新型智能生产模式。这一技术的广泛落地应用为智慧城市建设提供了极有意义且可行的参考方案和技术路线。

基于数字孪生的智慧城市是指在信息系统中构建一个虚拟世界,通过信息收集、传输、处理等新一代信息技术实现与物理世界的同生共存,达到社会世界、物理世界和信息世界的有机融合和相互作用,并最终形成虚实结合、孪生互动的城市发展新形态。同时,借助于泛在感知、高速网络、智能计算,在虚拟世界不断持续迭代,指导物理世界有序运行,形成一个更加智慧化的新型城市。在赋予城市政府实时治理、全局规划能力的同时,给所有市民带来更加舒适、便捷的体验。

伴随着这种新型城市运营模式——社会世界、物理世界和信息世界的有机融合和相互作用,需要从新的视角来探讨智慧城市建设理念和技术。在此背景下,本文将以一个城区级建筑体——西安幸福林带建筑工程的智慧化运营管控(如图1)为例^[12],简要探讨

新型智慧城市运营管控的核心设计理念和建设需面临的关键难题、挑战以及潜在的研究内容。



图1 西安幸福林带工程透视图

1 智慧林带

1.1 简介

如图2所示,西安幸福林带集城市绿地、公园、旅游景点、公共交通载体、办公载体、商业综合体等多种属性于一身的地下工程建筑,其总长5.85 km,东西宽210 m,是全球最大的地下综合空间^[12]。幸福林带项目与目前主流建筑商业综合体、特色功能园区/社区相比,呈现出建筑面积大、人员流量大、业态种类丰富、建筑环境需求和机电系统运行关系复杂等特点,这也使得在幸福林带的运营管控阶段将面临着如下显著挑战和困难:

- (1) 设备管理负担重、效率低;
- (2) 信息孤岛林立、缺乏协作;
- (3) 信息化水平各异、安全不可控;
- (4) 服务业态杂、缺乏针对性。

幸福林带运营过程中体现的困难挑战也是城市运营存在的共性问题,如何应对这些挑战也将对智慧城市建设提供一些建设性意见和参考。

1.2 技术路线

为解决上述的管理困难、信息孤立缺乏协作、安全不可控等挑战,构建支持资源设备集成管理、信息融合共享、应用服务融合扩展的通用平台是关键核心。

借鉴数字孪生思想,智慧林带旨在实现物理空间、社会空间和信息系统“三元空间”的有机融合,构建基于数据驱动、虚实交互、先知先觉和共生共智的幸福林带建筑体信息模型,使得数字空间与现实空间同步规划、同步建设,实现全过程、全要素数字化。通过将幸福林带物理空间和社会空间中的信息实时采集汇聚,并在信息系统进行仿真、分析、决策,以保证建

筑体内状态实时化、可视化和管理决策与服务的协同化和智慧化^[13-15]。

从技术角度分析,其核心理念可概括为3句话:数字孪生可信可管,建立信息物理融合的管理平台;智能服务无缝覆盖,发展全时空覆盖智能化服务体系;知识发现智慧运营,支撑数据科学驱动智慧运营中心。

数字孪生可信可管:利用数字孪生技术,通过软件定义方式对林带进行数字化建模和信息聚合,实现物理世界与信息空间的紧密融合,具备幸福林带建筑体全生命周期监测交互能力。借助大数据、人工智能等技术,进一步提升客体在感知、反馈、分析、自主决策等方面性能,主动监测预判设备运行状态,有助于解决被动式运维效率低下的问题,延长设备运行寿命。此外,设备信息聚合在平台有助于挖掘设备间的运行关系,提供有效协作方案,提高运维人员在管理、应急等方面效率。

智能服务无缝覆盖:利用GPS、WiFi、Bluetooth等技术实现人在林带范围内的全时空域的感知追踪,形成人、物理世界、信息系统有机融合的三元系统。通过收集用户在幸福林带空间内的活动信息,不仅能够实现智能服务和用户体验的时间和空间全周期覆盖,提高用户体验。而且,用户在林带分布密度、时长等信息有助于主动动态调整运维方案,提高管理效率,同时为幸福林带运营、业态调整提供重要的支撑数据。

知识发现智慧运营:通过数字孪生、全时空域的感知追踪等技术形成的人、物理世界、信息空间有机融合的系统,在平台汇聚海量异构设备信息、用户信息、空间信息等,利用中台技术实现信息有机融合,打破底层系统间的信息壁垒。结合人工智能、大数据等技术辅助,从平台海量信息中挖掘知识,实现信息的精细化管理,为幸福林带的商业化运营提供针对性的辅助决策信息。

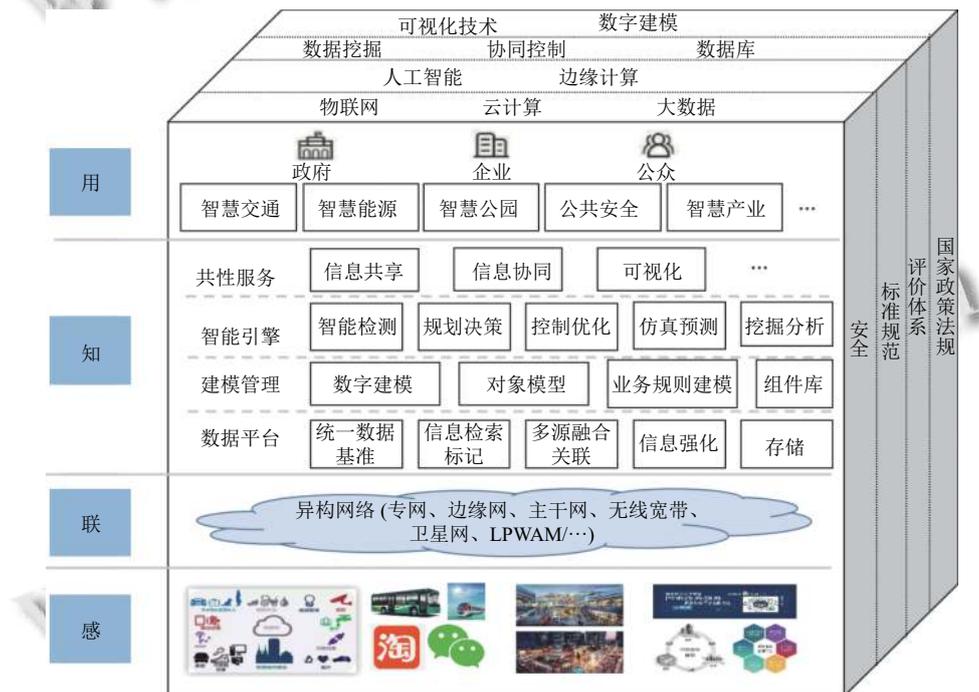


图2 面向智慧城市运营管控的技术框架示意图

2 智慧林带平台框架

基于上述的技术路线,借鉴物联网系统“感”“联”“知”“用”的体系结构,如图2所示为构建智慧林带运营管控平台的技术架构示意图。首先,依托于泛在立体感知网络获取实时数据,包括感知、监测建筑体内物理设备和人类活动。同时,在传输层屏蔽底层不同感知系

统的通讯协议差异性,为上层提供统一的消息机制,完成对底层各子系统的控制和管理。其次,在平台层,通过数据中台将海量、零散、无序、异构的城市大数据进行统一规整、关联融合和存储等,为各应用场景做好支撑;通过建模管理构建城市不同尺度、不同粒度的实体在信息系统中相同规模的数字孪生体;利用人

工智能技术对城市运行状态进行监测、模拟、分析发现问题,为城市管理、控制、运营、优化提供决策支撑,最大限度地挖掘信息的潜在价值,实现信息的价值化;通过共性服务提取共性技术需求构建统一运行框架、数据资源管理平台、地理信息服务平台、视频通用服务平台及统一通信服务平台,为智慧林带的各类应用系统提供公共服务,目的是整合需求和信息资源,通过统一的访问入口,实现跨应用、跨系统的无缝接入,和支持协作的集成化环境,促进定制化应用的快速

开发、资源共享、业务融合以及灵活部署等.最后,通过面向不同业务、不同用户群体的应用,实现对城市运营的自动化高效控制、个性化智慧服务,提升城市的运营效率.

3 对智慧城市平台建议

根据智慧林带平台架构及城市运营特点,可按如图3的方式设计智慧城市运营管控平台,以实现以下功能.

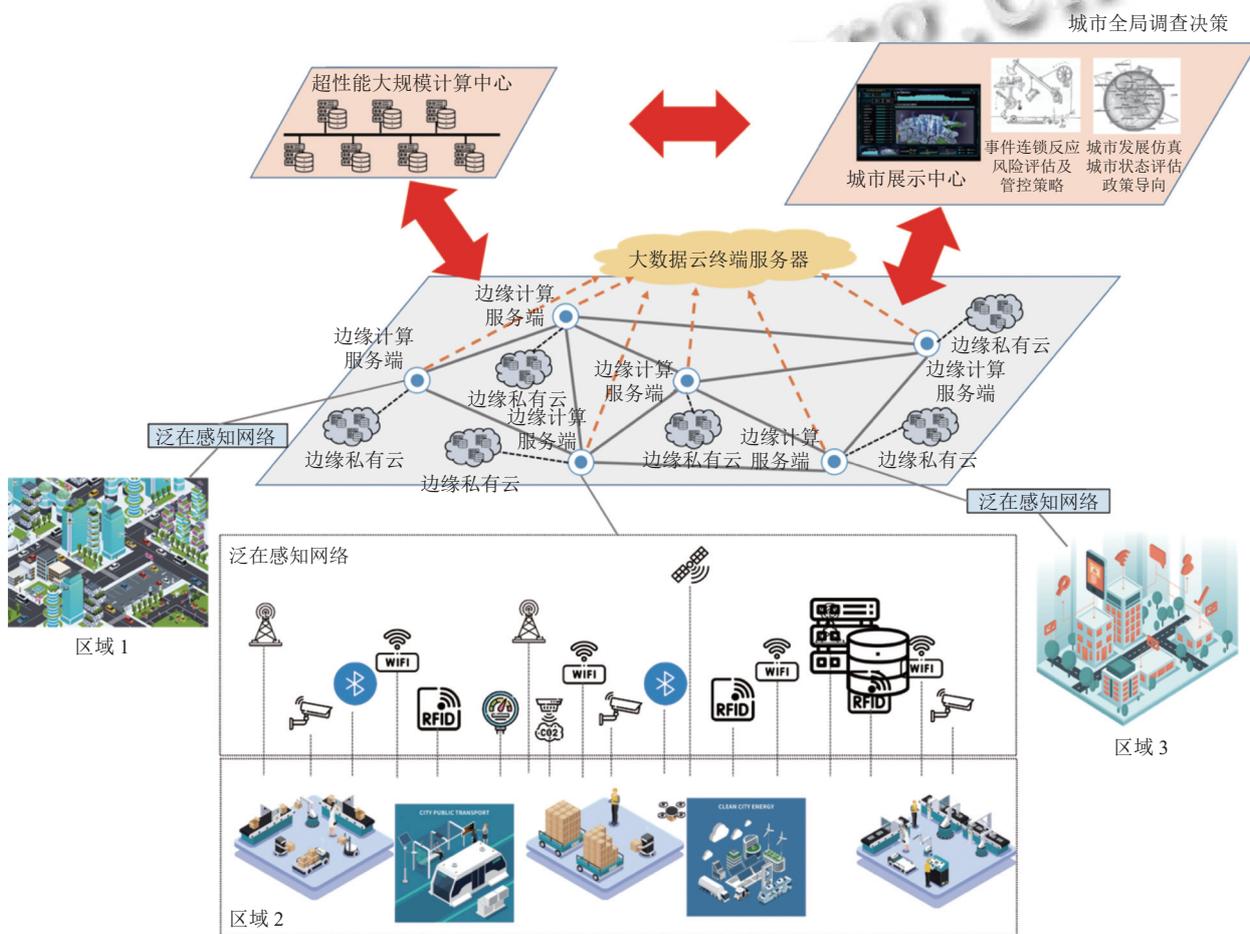


图3 智慧城市运营管控平台架构设计示意图

(1) 城市状态感知

泛在全面的感知城市运行状态信息是智慧城市建设的基础前提,其信息的可靠性也决定着平台模拟、诊断、决策的准确性、有效性.在充分依托现有基础设施感知设备基础之上,结合新型物联网感知技术,例如基于无线信号的、基于摄像头的、基于移动传感器的等等,构建泛在城市状态感知层,以实现城市信息实

时、多维接入.随着城市不断运行,感知层的数据会呈现爆炸式增长汇聚到平台,遗憾的是这些海量数据具有低质、异构等特点,给数据处理、存储带来灾难级挑战,甚至进一步对平台决策带来负面干扰.因此,如何保证数据实时快速感知的同时,具备有效信息的初步提炼、简单聚合的能力是信息感知层的亟需研究解决的重点与难点.

(2) 区域决策

为实现城市状态的泛在感知,在城市空间部署大量的感知设备是第一步,然而如何连接、管理这些设备势必会带来信息的挑战。

考虑到集中式管理具有敏捷性、实时性以及安全等问题,因此,本文建议采取边缘计算框架是一种比较合适的解决方案。该方案将信息数据处理、城市区域的运行监测和一些重要决策的执行,由城市指挥中心下放到以城市区域范围为单位的边缘计算服务中心能够在提高城市管理效率,同时一定程度上缓解城市指挥中心计算服务压力。边缘计算框架在边缘网络实现海量数据的就近处理,能够降低主干网络的吞吐量、缓解平台压力、减少运维成本,同时有利于边缘设备高效协作。

4 智慧城市运营管控平台关键技术展望

目前智慧化建设常用的解决方案是将部署的数个基础子系统进行简单的信息汇聚、数据归集和功能累加,显然这种方法在面对数字孪生城市建设的泛在感知、异构效联、智慧服务和智能挖掘等更高需求是行不通的。因此,为了更好地构建数字孪生智慧城市运营管控平台,下文将从感知、连接、数据处理、知识挖掘和安全5个方面简要阐述未来拟研究的关键技术。

4.1 泛在感知技术

智慧平台的核心是来源于城市中时时刻刻都在产生的数据,要想充分发挥数字孪生技术的潜能,如何全面、实时的感知城市各域的运行状态(包括物理世界和社会世界的信息)仍面临着极大地挑战。随着工业物联网的发展,已有大量的工作研究通过部署大量温、湿度传感器等感知设备来准确地感知设备状态。而人在城市环境下具备动态、范围大、目标多的特点,要实现精准定位、追踪、识别和行为理解同样面临着巨大挑战。

近年来,通过观察研究人的手势、姿态等动作对无线信号(例如包括WiFi^[16,17],RFID^[18,19],VLC^[20])传播过程的影响,研究人员实现了对动作的识别和追踪,并取得了较大的突破。例如,Qian等人^[21]和Zhou等人^[22]的工作中利用CSI信息实现了移动人员的被动式检测;WiVi^[23]则更进一步,利用MIMO和ISAR技术实现了对人位置和移动的“穿墙”监测;而LiSense则利用可见光通信技术实现人体3D模型重建和运动

感知^[24]。尽管如此,这些已有工作仍存在感知范围有限、感知维度单一、场景依赖等问题,导致无法广泛应用。

在面向城市范围内人的感知需求下,大范围、多目标、位置动态是阻碍现有感知技术应用的主要因素。首先,针对基于商用无线信号感知的局限性:缺乏对感知能力的理论探索、环境依赖高、感知精度有限。亟需研究无线信号的通用感知模型,面向连续、多变环境下人体的无缝识别和交互技术,以及提高感知鲁棒性等技术。其次,面向复杂多变大范围的城市环境,仅仅依靠传统的WiFi和移动通信的方式难以满足智慧城市泛在感知层的全面覆盖、高效传输的需求,需要融合城市范围内感知的多模态信息(例如RF信号、移动通信、视频信号等),实现多模异构信息融合的跨场景协同感知技术。

4.2 异构效联通信技术

在发展城市信息智能感知技术同时,高效异联的网络通信技术也是必不可少的。城市中存在大量的弱电系统、控制系统等基础设备,这些设备中部署着各类传感器等器件时刻产生着城市数据,遗憾的是这些物理设备间常常结构各异、缺乏统一的标识,且通信技术和协议也不相同,导致实体互联而不互通,在城市系统中逐渐形成信息孤岛和数据烟囱,例如城市中各个工业系统,通常具有各自的数据格式和通信协议,且相互之间网络物理隔离。而随着规模增大、数量增多,在智慧城市实现高带宽、低时延、安全可靠的网络需求变得更加愈发不可能。因此,智慧城市需要研究异构设备之间高效互联通信技术,以实现城市不同实体(如“物-物”“物-机”“物-人”)之间的泛在通信组网。

为解决城市大规模异构终端的泛在联通问题,需从标识寻址和网络互联两方面为切入点展开研究。即研究设计一套城市级实体标识系统,能够有效管理标识并保证唯一性;研究跨协议的数据交互技术,屏蔽不同实体间的协议异构性。首先,如何构建一个能够为城市全部实体分配一个全局唯一且可寻址的标识管理系统,同时能够兼容已有系统,例如工业网络中常用的EPC、IPv6等,以将城市中各个孤离的网络有效融合是解决异构网络融合、实体互联的挑战之一。此外,基于此表示管理系统,需要设计高效的寻址算法。城市网络通常是一个复杂且多级的融合网络,且存在大量的局域内网,给基于标识符实现快速寻址和可靠通信带

来了极大的挑战和困难。例如,当城市网络边缘的两个异构网络内部需要通信时,在内部网络边缘如何进行包头转换、在城市核心网络如何寻址、路由转发、通信实体间数据格式不同时如何转换等。

除此之外,城市中存在大量设备采用互不兼容的无线网络通信标准,如基于 WLAN、ZigBee、蓝牙等组建的短距离无线网络,基于 NB IoT 或者 LoRa 构建的长距离无线网络,或者基于 4G 以至 5G 的运营商网络。如何融合异构的无线网络并实现数据的充分共享交换和融合分析利用^[25-27],是智慧城市实现互联互通方面须应对的突出难题。在许多场景下,不同的无线技术在共享频率介质中并存,物理空间。这种无线共存可能会导致严重的跨技术干扰 (cross-technology interference, CTI) 问题,例如信道竞争、信号冲突、吞吐量下降。与传统方法相比,如干扰避免、容忍、并发机制,信息交换直接及时因此,异构设备之间的基本要求是确保可用性、互操作性、物联网的可靠性和可靠性。在这种情况下,跨技术通信 (cross-technology communication, CTC) 技术应运而生^[28-38],成为学术和工业领域的热门话题,旨在直接交换数据遵循不同标准的异构设备。CTC 不仅为无线设备之间的互操作和数据交换创造了一种新的方式,而且增强了无线网络的管理能力。

4.3 城市大数据处理技术

智慧城市运营管控平台作为一个面向城市范围内提供实时的应用与服务的智能化系统,需要持续采集来自终端设备的源源不断的数据并加以处理、分析和利用。这些终端设备作为数据源,以高低不一的采样频率产生来自物理世界的的数据,终端众多因而数据体量非常可观,且包含从视频、图像、音频等非结构化数据到位置、环境指标、能耗等海量的结构化数据,总体上说是典型的流式大数据。如何对这些数据进行实时的传输、及时的清洗、高效的存储、合理的归纳整理,保证数据的时效性、准确性、一致性是智慧城市项目在数据管理层面须应对的主要挑战。

随着城市实体不断增多、网络规模不断发展,传统的智慧化系统所采用的集中式数据处理方式需要将网络边缘数据传入城市数据中心处理,再根据边缘设备功能需求返回数据,这种操作势必会带来严重的网络延迟,致使无法实时高效处理网络边缘的需求^[39,40]。同时也会产生较多的冗余网络流量,增加网络负载压力,影响网络稳定性和安全,显然集中式方法已不再适

用,亟需采用新的方式来应对智慧城市对数据不同的实时、安全等需求。为保证城市大数据的时效性,需解决如下两方面的挑战:(1)快速的数据汇聚,在城市实际运行过程中,面对着实时不断产生的海量城市大数据,平台可利用的资源(网络带宽、处理能力等)是十分有限的;(2)高效的传算协调模式。面对着海量数据的时效性挑战,“先传再算”的数据处理模式显然是行不通的,也难以同时保证数据处理的实时性与实效性。针对上述挑战,需要研究面向城市网络的动态传算技术,充分利用网络边缘设备的资源,实现与城市多级计算中心的协作,动态进行任务解耦和分发,保证城市大数据的实时实效。同时,考虑到城市边缘网络数据的时空冗余度大、类型复杂,研究数据的关联关系,以保证有效可靠;研究计算开销、传输开销与数据实效性的量化关系,以实现汇聚数据的实效性保障需求。

最后,数据融合问题。城市大数据包含着多不同模型的数据信息,例如城市空间 BIM 模型、物联网实时感知数据、音频、视频、文本等,这些数据的来源不同且结构各异,平台需要对其进行数字化表达、统一数据格式,以用于知识中台挖掘、分析有效信息和产生决策。因此,面对海量的多源异构多模态数据,如何高效地集成、规整、融合和统一管理是亟需解决的核心关键之一^[41-44]。

4.4 知识中台

从海量感知数据中挖掘知识,指导城市的自动化、智能化管理运营,是基于数字孪生智慧城市运营管理平台的核心思想。平台以知识库为基础,通过知识中台挖掘分析数据,并有序、统一的管理以支撑城市各种定制的智能服务需求。如图 4 所示,平台采集到的政务数据、社会数据等各种类型数据,利用大数据处理技术转换成规范化格式数据,城市知识中台则基于知识库推理、归纳、决策以分析城市态势、产生面向城市运营发展的辅助性决策信息。同时,中台的模型库(即知识网络)则根据网络边缘层采集到的数据信息,生成面向城市智慧化应用需求的信息。

基于物联网大数据的知识生成是智慧城市之所以最终能够实现城市可持续发展迭代的根本源泉。城市运营需要哪些知识、这些知识蕴藏在哪些数据中、怎样获得这些需要的知识、如何辨别获得的知识的真伪和质量,做到去粗取精、去伪存真,这客观上要求知识中台将各个领域的已有知识经验和运营需求,与数据

科学技术紧密结合,挖掘需要的知识,进而支持决策、判断、运营等。因此,从海量低信息量的数据中提炼有用知识是知识中台面临和需解决的首要难题。

云边端协同管理能力,支持模型的端与边缘侧服务部署,具有边缘节点的统一管理、模型的批量分发与更新、节点运行状态的实时上报。在城市范围实现对物理资源及业务请求的情况监测,实现资源的弹性伸缩、动态分流等能力,进一步提升 AI 部署运行的质

量及效率。

考虑到业务子系统间的业务不同以及数据壁垒的存在,使得无法在同一业务流程中实现数据流的闭环。例如,在应急处理中,终端感知的应急数据、人员实时位置信息、资源数据等相关流程的数据之间无法打通且数据不关联。此外,数据的多模、低信息率、海量的特点也给数据挖掘、知识管理、分析决策带来了极大的挑战。

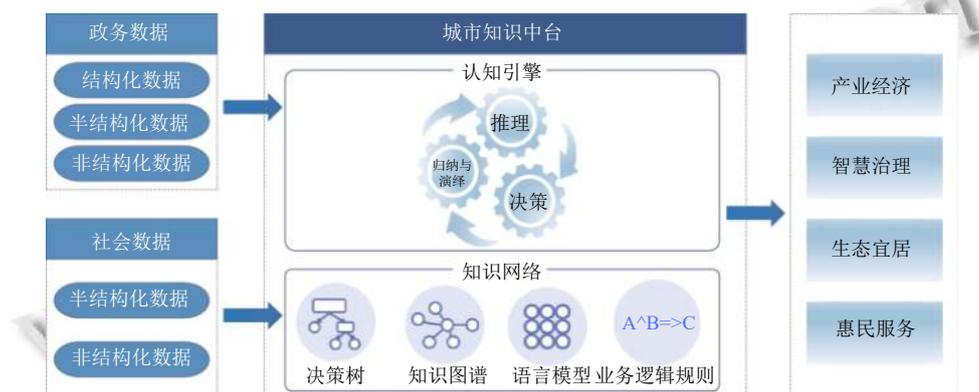


图4 智慧城市知识中台功能示意图

在实际应用中,基础知识库的发展较为滞后,给 AI 技术在不同行业应用带来了众多问题和挑战。例如,没有统一的知识库和模型标准,且模型互操作难;大量历史数据的缺失无法进行回溯等。自动机器学习技术聚焦数据处理、自动特征工程、模型构建 3 方面,通过将模型构建与训练过程自动化,加速 AI 技术与行业融合,大幅缓解了行业应用工程化落地问题。同时,基于强化学习方式下的决策类 AI 研发自动化,可以增强对环境的理解,有助于大范围广泛部署。

4.5 信息安全

面对着智慧城市如此大规模的系统,部署设备多,网络结构复杂,数据通信频繁,业务共享复杂,且大量设备运行于实际应用环境之中,给系统的安全性(主要包括应用安全、设备安全、网络安全、信息安全)保障提出了很高的要求和挑战。同时,随着对个人敏感数据(特别是高隐私的数据)的关注和重视,人们越发不愿意分享自己的数据,以及不同部分、企业等之间的数据壁垒,在物理层面进行数据集中式管理显得更加难以实现。给智慧城市平台在安全方面带来了极大的阻力^[45-47]。

为满足城市安全需求,需从底端基础设备层到上

层应用构建一套完整的安全服务体系和防护机制,具体应包含以下几个方面:首先,在终端设备研究嵌入式安全操作系统,保证嵌入式应用软件的安全,同时研究实现设备端指纹感知和身份保护技术以及海量异构终端动态安全管理方法。其次,为保证人、物的安全互联,需要研究面向业务特征的安全协议,同时可利用区块链技术实现跨区的多方交互。最后,在数据安全方面,研究数据访问控制技术和防护体系,以支持数据的跨域共享和访问控制。

5 结束语

智慧城市是在新一代信息技术支撑下,基于泛在感知、广泛互联、智能处理等基础需要,实现的物理世界、人类社会和信息系统“三元空间”有机融合的城市新型态。面对这样一个复杂巨系统,本文基于智慧林带工作经验,给出了一个云边端融合的智慧城市体系结构以及平台建设的一些建议。同时,从感知、连接、数据处理、知识发现和安全体系 5 个方面阐述了构建智慧城市平台拟解决的困难挑战,以推动城市的智慧化转型和科学持续运营。

我们相信,未来随着物联网核心技术、人工智

能、大数据等新技术取得新突破,智慧城市将凝聚企业界和学术界的群体智慧,逐步成熟推广到各地。网络化、数字化、智能化的生活管理模式深入到人们的衣、食、住、行等方面给人类生活、安全管理、城市运营带来极大便利。

参考文献

- 1 IBM. Smarter planet. <https://www.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/smarterplanet/>.
- 2 国家发展改革委,工业和信息化部,科学技术部,等.关于促进智慧城市健康发展的指导意见. http://www.cac.gov.cn/2014-08/27/c_1112850680.htm. (2014-08-27).
- 3 杜新忠,徐松岩. 园区信息化管理与智慧园区建设. 城市建设理论研究(电子版), 2020, (13): 119.
- 4 刘超洋. 智慧园区集成系统及架构的顶层设计. 智能建筑与智慧城市, 2020, (6): 22–24. [doi: 10.3969/j.issn.1671-9506.2020.06.005]
- 5 梁影君. 智慧城市视角下智慧园区规划建设策略与探索. 智能建筑与智慧城市, 2018, (6): 81–82. [doi: 10.3969/j.issn.1671-9506.2018.06.031]
- 6 吴寿良. 浅读 GB 50314-2015《智能建筑设计标准》后的几点认识. 智能建筑, 2016, (6): 16–17.
- 7 王化君. 绿色建筑中楼宇自控系统的应用及前景分析. 智能建筑与智慧城市, 2017, (11): 24–25. [doi: 10.3969/j.issn.1671-9506.2017.11.014]
- 8 魏奋. “城市大脑”下一步工作计划: 预防交通事故. http://zzhz.zjol.com.cn/xww/lskb/hz13179/201710/t20171023_5433973.shtml. (2017-10-23).
- 9 北京经信委. 智能机器人助力智慧城市建设. <https://www.163.com/dy/article/CQEGFTJM0511FCD0.html>. (2017-07-18).
- 10 王汇. 浅谈智慧安防管理平台的研发与应用. 智能建筑与智慧城市, 2021, (1): 91–93.
- 11 Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11: 939–948. [doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198]
- 12 范明月, 张武林. 城市更新视角下西安幸福林带综合开发运营模式研究. *工程管理学报*, 2021, 35(2): 80–84.
- 13 Piascik R, Vickers J, Lowry D, *et al.* Technology area 12: Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map. NASA Office of Chief Technologist, 2010.
- 14 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1–18.
- 15 中国电子技术标准化研究院, 树根互联技术有限公司. 数字孪生应用白皮书 2020 版. 中国电子技术标准化研究院, 2020.
- 16 Pu QF, Gupta S, Gollakota S, *et al.* Whole-home gesture recognition using wireless signals. *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking (MobiCom'13)*. Miami: ACM, 2013. 27–38.
- 17 陶志勇, 郭京, 刘影. 基于多天线判决的 CSI 高效人体行为识别方法. *计算机科学与探索*, 2021, 15(6): 1122–1132. [doi: 10.3778/j.issn.1673-9418.2005021]
- 18 Guo JC, Wang T, Jin M, *et al.* TagLeak: Non-intrusive and battery-free liquid leakage detection with backscattered signals. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*. Seattle: IEEE, 2018. 40–48.
- 19 Ding H, Shangguan LF, Yang Z, *et al.* FEMO: A platform for free-weight exercise monitoring with RFIDs. *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'15)*. Seoul: ACM, 2015. 141–154.
- 20 Li TX, An CK, Tian Z, *et al.* Human sensing using visible light communication. *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'15)*. Paris: ACM, 2015. 331–344.
- 21 Qian K, Wu CS, Yang Z, *et al.* PADS: Passive detection of moving targets with dynamic speed using PHY layer information. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'14)*. Hsinchu: IEEE, 2014. 1–8.
- 22 Zhou ZM, Yang Z, Wu CS, *et al.* Towards omnidirectional passive human detection. *Proceedings of 2013 IEEE INFOCOM*. Turin: IEEE, 2013. 3057–3065.
- 23 Adib F, Katabi D. See through walls with WiFi! *Proceedings of ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM*. Hong Kong: ACM, 2013. 75–86.
- 24 Zhang C, Tabor J, Zhang JL, *et al.* Extending mobile interaction through near-field visible light sensing. *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Paris: ACM, 2015. 345–357.
- 25 段林侠, 孙晓艳, 王稚慧. 面向安全应用消息传输的异构网络选择算法. *计算机科学与探索*, 2018, 12(4): 595–607. [doi: 10.3778/j.issn.1673-9418.1704048]
- 26 Guo XZ. Cross technology communication in heterogeneous wireless networks. *Proceedings of 2019 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*. Beijing: Junction Publishing, 2019. 312–313.
- 27 Zheng X, He Y, Guo X. StripComm: Interference-resilient cross-technology communication in coexisting environments.

- Proceedings of 2018 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Honolulu: IEEE, 2018. 171–179.
- 28 Li ZJ, He T. WEBee: Physical-layer cross-technology communication via emulation. Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom). Snowbird: ACM, 2017. 2–14.
- 29 Cho HW, Shin KG. BlueFi: Bluetooth over WiFi. Proceedings of ACM SIGCOMM 2021 Conference. ACM, 2021. 475–487.
- 30 Liu RF, Yin ZM, Jiang WC, *et al.* WiBeacon: Expanding BLE location-based services via WiFi. Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom). New Orleans: ACM, 2021. 83–96.
- 31 Guo XZ, Zheng XL, He Y. WiZig: Cross-technology energy communication over a noisy channel. Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Atlanta: IEEE, 2017. 1–9.
- 32 Iqbal H, Hamad Alizai M, Ayyub Qazi I, *et al.* Scylla: Interleaving multiple IoT stacks on a single radio. Proceedings of the 14th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. Heraklion: ACM, 2018. 346–352.
- 33 Hofmann R, Alberto Boano C, Römer K. X-burst: Enabling multi-platform cross-technology communication between constrained IoT devices. Proceedings of the 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking. Boston: IEEE, 2019. 1–9.
- 34 Li LG, Chen YR, Li ZJ. Poster abstract: Physical-layer cross-technology communication with narrow-band decoding. Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Network Protocols. Chicago: IEEE, 2019. 1–2.
- 35 Wang S, Jeong W, Jung J, *et al.* X-MIMO: Cross-technology multi-user MIMO. Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2020. 218–231.
- 36 Xia XJ, Li SN, Zhang Y, *et al.* ToneSense: Communication across technologies through power-channel: Poster. Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2016. 447–449.
- 37 Xia D, Zheng XL, Yu F, *et al.* WiRa: Enabling cross-technology communication from WiFi to LoRa with IEEE 802.11ax. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2022.
- 38 Yao JM, Zheng XL, Xu J, *et al.* Cross-technology communication through symbol-Level energy modulation for commercial wireless networks. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Austin: IEEE, 2020. 1–10.
- 39 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907–924. [doi: 10.7544/issn1000-1239.2017.20160941]
- 40 Shi WS, Cao J, Zhang Q, *et al.* Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637–646. [doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198]
- 41 樊华. 面向物联网的 RFID 不确定数据清洗与存储技术研究 [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- 42 Alam F, Mehmood R, Katib I, *et al.* Data fusion and IoT for smart ubiquitous environments: A survey. IEEE Access, 2017, 5: 9533–9554.
- 43 Zhang LL, Xie YX, Luan XD, *et al.* Multi-source heterogeneous data fusion. Proceedings of 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data. Chengdu: IEEE, 2018. 47–51.
- 44 Dai WY, Qiu MK, Qiu LF, *et al.* Who moved my data? Privacy protection in smartphones. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(1): 20–25. [doi: 10.1109/MCOM.2017.1600349CM]
- 45 Binjubeir M, Ahmed AA, Ismail MAB, *et al.* Comprehensive survey on big data privacy protection. IEEE Access, 2019, 8: 20067–20079.
- 46 李欣. 智慧城市建设中个人信息安全风险与对策. 智慧城市, 2018, 4(15): 49.
- 47 李贵鹏, 李思艺, 徐冰清. 智慧城市信息安全运营平台研究. 信息安全研究, 2019, 5(5): 420–429.

(校对责编: 牛欣悦)