

# 智能城市操作系统

郑宇  
京东集团

关键词：城市计算 城市操作系统 数字基石 数字孪生

## 智慧城市建设面临的挑战

智慧城市经过多年的建设取得了阶段性的成果，解决了一部分城市中存在的问题，但在技术创新、商业模式和体制改革等方面仍然有很多难点需要攻克。其中，在技术相关领域的智慧城市建设正面临着以下6方面的挑战<sup>[1]</sup>：

**1. 城市状态感知**：城市地域广阔，场景复杂，城市的状态（如交通、人流、能耗、消费、环境、气象、灾难等）也瞬息万变，如何及时、准确地捕捉可以反映城市状态的数据是开展智能城市应用的基础，同样也是一大难题。数据源多、产生机理不一，数据接口多样，数据类型复杂等问题给城市状态感知带来了挑战。

**2. 城市数据管理**：城市中的数据多源异构，大致分为以下三类：以图像、语音和文本为代表的非结构化数据，以电子政务表格为代表的结构化数据，以地理信息和物联网数据为代表的时空数据（如交通流、人流、能耗、气象等）。这些数据体量巨大、更新快，且在一个智能城市的应用中往往要使用多类数据。因此，在城市状态感知之后，如何治理和管理好这些纷繁复杂的数据并有效支撑上层应用是一大挑战。

**3. 城市数据的分析和挖掘**：早年间的智慧城市建设依靠数据直接表达的信息来解决问题（如水、电、气的在线缴费和查询服务），数据背后更深层次的知识有待进一步发掘，不同数据的融合和知识协同还远远不足。也就是说，城市数据被利用的深度和广度还很不足。

**4. 数据共享和数据安全的矛盾**：当今大家都开始意识到数据的重要性，但也越来越不愿意分享自己的数据。此外，一些机密性高或者涉及到个人敏感信息的数据不能共享，政府部门之间、政府和企业之间，以及企业与企业之间的数据壁垒很难完全打破，数据不太可能（也没有必要）在物理层面集中存放。虽然一些城市的政府建立了政府部门之间的数据共享交换平台，但很多数据（如公安、税务部门等）无法实现完全的共享，更无法有效地利用互联网企业的数据。如何在确保数据安全的前提下做到知识的安全共享（而非原始数据的物理汇聚）是一大难题。

**5. 城市的展现**：智慧城市的应用经常会涉及到数据呈现和结果展示，但目前的信息展现往往是单向静态的大屏，展现端对现实物理世界数据的探查能力不足；此外，缺乏人机交互和人机智能融合的可视分析能力；同时，通过展现端对物理世界的反控能力更是不足，城市的展现和感知没有形成闭环。

**6. 智能城市生态**：智慧城市的业务涉及范围广、逻辑复杂、技术门槛高，很难依靠单一机构来完成。传统的“总集成商+分包商”的模式很容易造成各自为政、各自基于自有产品和技术来实施的格局，最终产生信息孤岛，无法解决该问题。普通的云计算平台并非为智能城市业务专门设计，缺乏有效的组件（如交通流量预测模块、充电桩选址模块、人流聚集预警模块等），在云平台上直接开发智能应用的难度大、门槛高、代价沉重，且比较封闭，可扩展性和复用性弱。很多常年服务于政府、深知政

府业务的信息化公司很难参与到高级智能城市应用的建设中来。

基于以上挑战,当今智慧城市建设急需一个开放、公共的数字底层来提供高效的、面向智能城市业务的组件化服务,以解决城市感知、数据管理、分析挖掘、数据共享和安全以及城市展现的问题。这个数字底层就是智能城市操作系统。它既可以服务于政府,提高政府的城市治理能力和效率,并具备优良的可扩展性,以应对不断涌现的城市业务;同时,它也可以赋能于智慧城市领域的生态伙伴,发挥它们了解城市业务的优势,降低研发成本,从而构建一个多方基于统一底层来共建智能城市的生态,让大家来共同解决城市中的问题。

## 城市操作系统的概念和框架

### 概念

城市操作系统是物理世界与数字世界的连接器,是智能城市的数字基石,是城市数据获取、管理、分析、展现的中枢,也是沉淀城市中数据相关应用的公共组件的容器。城市操作系统搭载在云计算基础设施之上、智能城市应用之下,向下通过云基础设施来管理底层数据,并且连接和调度城市中的硬件设备;向上提供公共组件和接口,支持各类智能城市应用的开发、运行和协调联动,是各个智能城

市应用和业务系统的底座。城市操作系统通过数字网关相互连接,实现数据在不同领域中的安全共享和协同计算。

图1利用个人电脑(PC机)作了一个简单类比,来说明城市操作系统的定位和概念。最下面是硬件基础设施,当前的云基础设施就好比PC机,提供计算、存储和网络连接单元。在PC机之上,我们需要安装一个操作系统(如微软的Windows操作系统),作为硬件和应用软件之间的管理、协调层,向下管理和调度硬件设备和数据,向上为应用程序开发提供组件和接口,并协调不同应用程序对数据和硬件的访问。有了Windows之后,我们才可以在上面安装各种应用软件(如Word、PPT等)。同理,在云基础设施之上也需要一个专门为智慧城市设计的智能城市操作系统(相当于PC机上的Windows),来连接底层的云和上层的各种智能城市应用。只有安装了智能城市操作系统,我们才可以支持各种不同的智能城市应用,如交通大脑、环境大脑、市域社会治理、数字城管等,并确保这些应用可以复用功能组件和数据。若直接在云上开发智能城市应用,就好比直接在没有Windows的PC机上开发应用,其难度大、代价高、扩展性差,而且智能城市的应用是互相孤立的,无法协同。

### 框架

图2给出了城市操作系统的基本框架,包括数据采集、数据(结构)、数据管理引擎、人工智能(AI)引擎、联邦数字网关和展示引擎等6层。

数据采集层通过数据直通车提供各类数据的采集接口,对接城市中包括政务系统、传感器、移动设备和人群等数据源,实现城市状态的全域感知,完成政务数据、时空数据、视频、图像、语音和文本数据的全量、高实时、稳定、安全的采集和汇聚。数据直通车具备以下3个特点:

1. 普适:针对物联网(IoT)、视

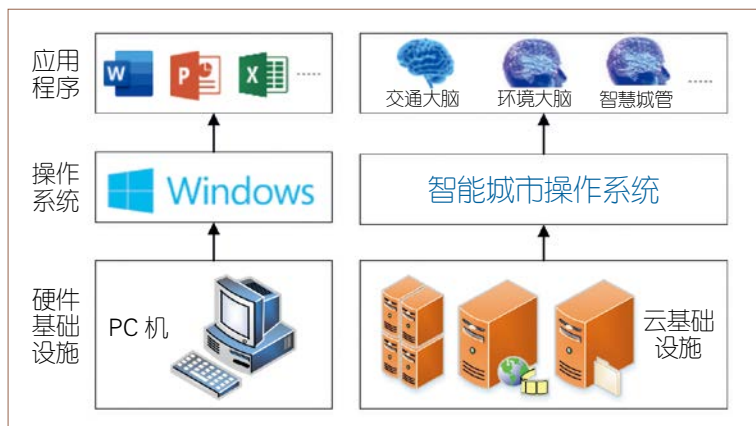


图1 智能城市操作系统的定位

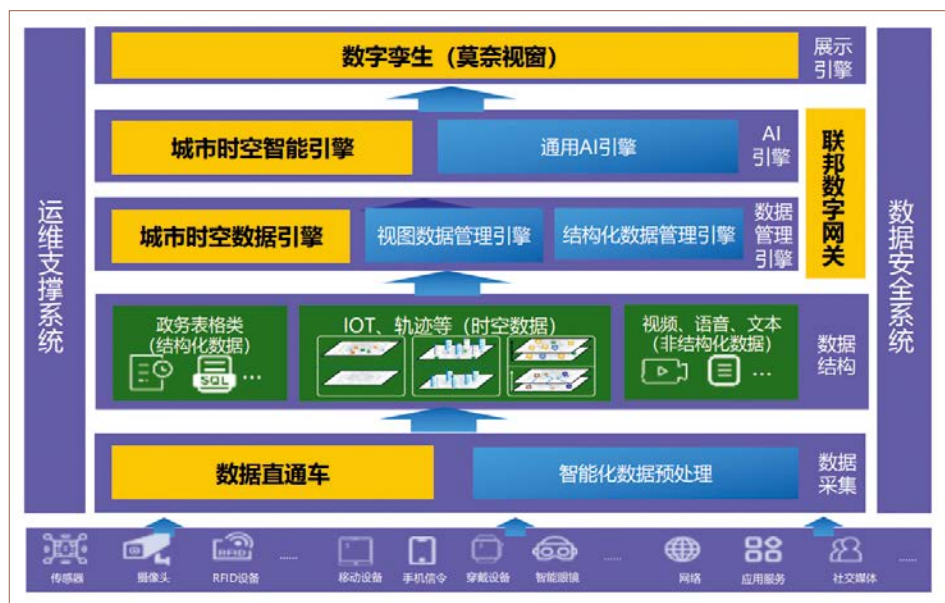


图2 智能城市操作系统的基本框架

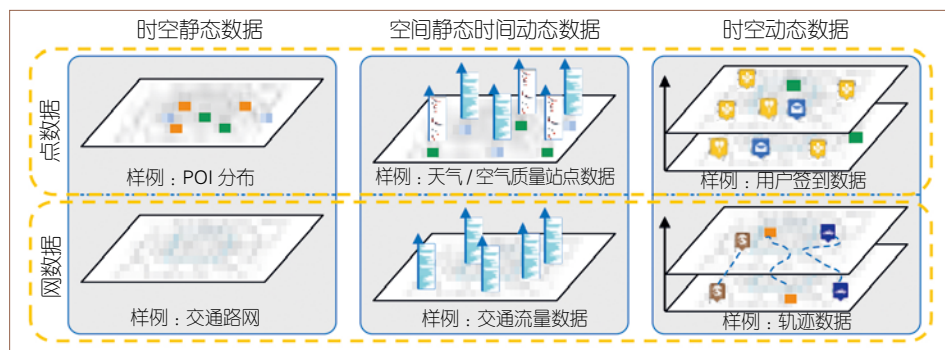


图3 时空数据分类

频等设备源提供统一接入网关，适配不同协议，实现快速高效的接入；同时，通过开发者模式接口，支持自定义接入方式，保证灵活适配的同时降低接入成本。

2. 便捷：提供即插即用的数据管道，支持插拔各种数据预处理或稽核组件，丰富接入拓展能力。

3. 安全：预制多种加解密算法、脱敏算法来保障数据传输安全稳定。

**数据结构层**把城市中纷繁复杂的数据归为三大类，针对每一类数据设计了相应的数据存储模型，确保了城市操作系统的扩展性和一致性。这三类数据包括：

1. 结构化数据：以电子政务类表格数据为代表，通常以人或者机构的ID为锚点来聚合不同的信息，如名称、职业、收入等；后续会演变出基础库、主题库、专题库等一系列组织形式。

2. 非结构化数据：以视频、图像、语音和文本为代表，后续大多需要经过分析处理变成结构化数据才能被使用。

3. 时空数据：以地理信息、IoT、轨迹数据为代表。如图3所示，时空数据按照数据结构可分为点数据和网数据（对应于图中的两行）；按照时空信息是否动态变化可分为三类（对应于图中的三列）：

空间静态时间静态、空间静态时间动态和时空动态。因此总共为6种数据。

如图3左上角所示，兴趣点(POI)数据(如车站、大楼等)通常用一个坐标点来描述，一旦建成，其地理位置和相关信息(如面积、楼层等)都不会随着时间的变化而变化，因此属于空间静态时间静态的点数据。

如图3第1行第2列所示，一般的传感器大多安装在固定位置，但其产生的读数(如温度、湿度等信息)却随时间不断变化。因此，此类数据属于空间静态时间动态的点数据。

图3右上角展示的是时间和空间都随时间变化



的点数据。例如,不同用户在不同时间、不同地点呼叫出租车的记录和使用共享单车时的扫码记录都是此类数据。与右下角的时空动态网数据不同,两个时空动态点数据之间没有关联,没有边的存在。

图3第2行展示了网数据,其中,左下角第1列展示了时空都静态的网络数据。例如,路网可以用一个网络来表达,一旦一个城市的路网修建完毕,其空间结构和各条道路的参数就不会随时间动态变化。城市的管廊、通信骨干网、铁路等基础信息均属于此类数据。

如图3第2行第2列所示,虽然路网是空间静态的数据结构,但一旦在其上叠加动态的交通流量信息,就变成了空间静态时间动态的网络结构数据。叠加了动态流量信息的河道、管网也就变成了此类数据。

图3右下角展示的是时空都动态的网络结构数据,主要包括轨迹数据和车联网数据。以轨迹数据为例,人和车辆在不同时间经过不同地点,体现出不同的状态(如速度、方向和油耗等),不同的时空点按照时间顺序连接成链式结构(最简单的网络结构)<sup>[2]</sup>。在车联网里,车辆的位置不停移动,车辆的状态在不停改变,车与车之间的通信也在不断产生和消失,整个网络的节点和边都在不断变化,是最为复杂的时空动态网络。

**数据管理引擎层**包含结构化数据管理引擎、视图管理引擎和时空数据引擎。其中时空数据引擎是智能城市操作系统的亮点,它将时空索引技术与分布式计算环境相结合,提供针对6类时空数据的多种查询算法,包括时空范围查询、最近邻查询、ID时间点查询、可达区域查询等一系列查询方式,支持对时空数据的高效检索,向上支撑各种AI算法模型的高效分析。其对时空数据的查询效率比行业水平快10~100倍<sup>[3]</sup>。

此外,时空数据引擎也满足了城市治理中对多源数据按照时空维度来聚合的需求。例如,在治理一个社区时,我们需要根据这个社区的空间范围来聚合在某个时间段(如最近1个月)出入该社区的人流和车辆数据,以及这个社区内产生的消费和视

频等多源数据。

**AI引擎层**包括通用人工智能引擎和时空AI引擎。前者包含图像识别、语音识别和自然语言处理等常用的AI算法模型;后者则是专门针对时空数据设计的AI算法模块,如交通流量预测、充电桩选址、人流聚集预警<sup>[4]</sup>等。与通用AI模型不同,这些AI模型要重点考虑时空数据的空间临近性、空间层次和空间距离,以及时间的临近性、周期性和趋势性,共六大属性<sup>[5]</sup>。

此外,在智能城市的一项具体业务中,通常需要利用不同数据背后蕴含的知识<sup>[6]</sup>,例如,预测空气质量需要同时考虑气象、交通流量和地理信息等多种因素<sup>[7]</sup>。针对此问题,时空AI引擎提供多源数据(知识)融合的能力,通过有机融合不同数据背后蕴藏的知识来深挖数据价值,强力支撑智能城市的应用。

**联邦数字网关**可以实现不同城市操作系统之间数据的安全互联和共享<sup>[8]</sup>。联邦数字网关跟随城市操作系统部署到不同的部门,在原始数据“不出门”的前提下,各部门内部将数据进行不可逆的粗加工,然后再融合计算,最终的计算结果可以支撑不同的应用。如果把不同机构比作麦田,机构中的数据比作小麦,联邦数字网关就是磨麦机。我们用磨麦机在各自的麦田里把小麦磨成了面粉,我们无法从面粉反推出原来小麦的样子。之后把各个麦田里磨成的面粉拿出来,加上水和成面团做成包子,这个包子就是有价值的应用,但我们并没有泄露任何原始数据和可读信息。这个不可逆的粗加工过程并不是加密,也不是简单的匿名化处理,更不是特征值提取。

联邦数字网关支持双方和多方计算,属于数据共享的第3个代际。数据共享发展的3个时代如下:

1. 矿石时代:前期直接提供原始数据的交换和查询,不对数据进行任何处理,数据就像矿石一样被直接拿去使用。后期有人采用基于沙箱的联合建模技术,双方把数据接入到一个安全、干净的沙箱里,数据进入后不能被复制和传输,数据使用完毕之后,销毁沙箱。虽然沙箱销毁后数据不复存在,但原始数据终究还是离开了原来的机构。

2. 原油时代：多方安全计算通过密码学技术实现密文共享，在无可信第三方的前提下，通过数学理论保证参与计算的各方成员输入的信息不暴露，并且能够同时获得准确的运算结果。虽然数据经过了加密（从“矿石”变成了“原油”），但还是有解密的可逆恢复过程，实际上数据还是离开了原来的机构。

3. 天然气时代：利用联邦学习技术，实现原始数据不出库，数据处理之后不可逆，无法从传递的信息中推断出原始数据，就像看不见摸不着的天然气一样。

数字孪生层通过莫奈视窗等组件来实现对数据及分析结果的展现，实现人和机器之间的动态交互以及人机智能的深度融合<sup>[9]</sup>。数字孪生系统包括以下4个环节：

1. 为物理世界与虚拟世界提供非常逼真的数字建模和镜像。例如，物理世界里有一座桥，虚拟世界里就会有这座桥详细的数字建模，关联的信息具体到每个桥墩，每一块砖的体积、材质，生产商和建设日期等。这些都属于静态信息。

2. 将物理世界的动态信息（如车流、人流、气象、能耗等）叠加到数字世界模型上，实现更加逼真的展现。

3. 利用 AI 和大数据模型，对获取的数据进行处理和分析，产生相应的决策。如，根据人流、事件和气象来预警某一地区的人流聚集异常情况，并建议疏导方案和路径。

4. 通过数字孪生系统将决策作用于物理世界，指导人们的行为和方案实施。例如，通过数字孪生系统直接给某个具体的民警下派任务，并能实时、清晰地看到民警执行任务的状态。

## 应用案例

城市中危化品的管理涵盖生产、经营、存储、运输、使用和处置六大环节，关联企业、设备、人员、车辆、船舶、品类、事件七大要素，涉及到应急办、运输局、环卫、公安等9个政府部门，业务逻辑非



图4 基于城市操作系统的危化品监测预警

常复杂，监管十分困难。图4说明了如何利用城市操作系统来实现对危化品的监测预警。

首先，城市操作系统利用数据直通车提供的各种接口，实时采集、汇聚政府相关部门的数据以及企业生产经营和运输的数据。政务数据（如企业的工商注册信息、年检信息、产量信息、处罚信息等）被存储到结构化数据模型中；仓库的传感器，运输车辆的GPS轨迹，工厂用水、用电的信息被存储到时空数据模型中；工厂和街道摄像头采集的视频数据则以非结构化数据模型存储起来。

利用城市操作系统中的时空数据引擎，我们为这三类数据都做好索引，并提供高效的查询算法。例如，对于危化品运输车辆不断产生的轨迹数据，我们可以计算其驻留点，并通过将计算出的驻留点与危化品企业进行高效的匹配来发现问题。如果危化品车辆多次停靠某个关停的危化品企业，则说明这个企业存在非法复工生产的可能性，这时应该及时通报相关部门进行调查。因为在不具备合格生产条件下生产危化品是导致危化品事件的主要原因之一。此外，如果车辆多次停靠的地点附近没有任何在册的危化品企业，也没有饭店和加油站一类的兴趣点，则有很大概率说明这些车辆在给黑工厂和小作坊运送货物，这也是非常危险的。

另外，时空数据引擎通过把危化品车辆产生的实际运行轨迹和车辆提报的规定路线进行对比，一旦发现危化品车辆偏离规定路线，可以在第一时间预警。同时，利用时空数据引擎的可达区域查询功能，可提前预判该车辆5分钟内可能到达的区域，



图5 基于数字孪生的紧急事件研判和处置

并通知这些区域内的交警在适当的位置进行拦截。

利用城市操作系统中的时空 AI 引擎,融合危化品车辆的运输轨迹、危化品企业的地域分布、生产经营数据、仓库管理数据和城市各区域的人口密度,并结合之前出现的危化品事故,我们可以预测各地区的危化品风险指数,对于高潜在风险的区域提供预警信息,防患于未然。由于部分数据(如企业的经营数据)并不一定都在政府部门,我们可以利用联邦数字网关来实现企业和政府数据的知识共享,在保证双方原始数据不离开各自服务器的前提下,实现危化品的监测预警。

最后,利用城市操作系统的数字孪生系统(见图5)我们可以清晰地看到预警车辆当前的状态和位置以及未来可能到达的区域。然后,我们可以在地图上直接查找到周边的警力信息,通过鼠标直接点击某个具体的警员,下发具体任务(包括车辆信息、当前线路以及未来可能要经过的路口等信息)。之后,可以通过在数字孪生系统中调取的摄像头信息来查看交警的拦截和处罚过程。这些过程都在虚实交互中完成,把人的智能和数据智能深入地融合在一起。

## 结束语

智能城市已经进入高速发展的新阶段,需要一个数字底座来解决城市数据的采集、汇聚、共享、分析和展示问题,也需要一个数字基地来支撑众多的城市应用,并让众多企业一起参与智能城市的建

设,共同构建数字产业。城市操作系统作为雄安新区的数字基石已经投入使用,汇聚了全域数据,支撑了雄安新区上层应用系统的建设和运行,填补了智能城市发展的空白。同时,城市操作系统还在南通国家级市域治理现代化标杆项目、“智慧大藤峡”国家级水利工程标杆项目、“新国门”大兴机场等一系列重大项目和场景中得到应用,将成为智能城市发展的主引擎。 ■



郑宇

CCF 杰出会员, CCCF 原专题栏目编委。京东集团副总裁、京东城市总裁、京东数字科技首席数据科学家。上海交通大学讲座教授、香港科技大学客座教授。IEEE Fellow。主要研究方向为城市计算。msyuzheng@outlook.com

## 参考文献

- [1] Zheng Y, Licia, et al. Urban Computing: Concepts, Methodologies, and Applications[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems & Technology Special*, 2014.
- [2] Zheng Y. Trajectory Data Mining[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems & Technology*, 2015, 6(3):1-41.
- [3] Li R, He H, Wang R, et al. JUST: JD Urban Spatio-Temporal Data Engine[C]// *2020 IEEE 36th International Conference on Data Engineering (ICDE)*. IEEE, 2020.
- [4] Sun J, Zhang J, et al. Predicting Citywide Crowd Flows in Irregular Regions Using Multi-View Graph Convolutional Networks[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2020, PP(99):1-1.
- [5] Zhang, J, Zheng Y, Qi, D. Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction[J]. *Proceedings of the 31st AAAI Conference (AAAI 2017)*, 2017:1655-1661.
- [6] Zheng Y. Methodologies for Cross-Domain Data Fusion: An Overview[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2015, 1(1):16-34.
- [7] Zheng Y, Yi X, et al. Forecasting Fine-Grained Air Quality Based on Big Data[C]// *Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2015.
- [8] Liu Y, Liu Y, Liu Z, et al. Federated Forest[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, PP(99):1-1.
- [9] Deng Z, Weng D, Chen J, et al. AirVis: Visual Analytics of Air Pollution Propagation[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, PP(99):1-1.