

大数据与数字孪生驱动的智慧校园集成设计研究

孟刚^{1,2}, 李昭昶², 郭慧⁴, 杨丹丹³, 胡斌^{4*}

(1.江苏开放大学 设计学院, 南京 210013; 2.南京工业大学 艺术设计学院, 南京 211816;
3.南京工业大学 建筑学院, 南京 211899; 4.澳门科技大学 人文艺术学院, 澳门 999078)

摘要: 目的 为解决智慧城市集成化设计中仍存在数据孤岛与智慧决策的相关问题, 因此设计了一套以智慧校园创新服务生态为导向的园区集成设计方案, 为大数据与数字孪生驱动的智慧城市构建提供建设新思路。方法 研究通过建立智慧校园数据的标准信息模型, 采用结构化数据为主的物联网传感器进行部署, 并利用大数据与深度学习实现校园的智慧大脑, 开发了基于 Web 3D 与数字孪生驱动的人机共融可视化平台, 从可操作性角度制定了可执行、可落地的智慧校园设计。结果 从大数据特点切入对智慧校园的构建状况进行分析, 建立智慧校园数据的标准化模型, 设计了基于 GRU-CNN 深度学习智慧大脑的 Web 3D 与数字孪生驱动可视化平台。实验表明该系统具有数据可视化与智能决策功能, 能提供给用户沉浸式、多维动态的人机共融交互体验。结论 利用大数据驱动的数字孪生可视化平台可以实现校区一体化运行, 增强校园结构的智能化、高效化和人性化, 提高使用效率。智慧校园集成平台设计同时可以推动现代化城市进一步完成数据互通互联、数据可视化、智慧服务管理新模式。为当前智慧城市的建设提供技术及理论参照。

关键词: 智慧校园; 集成设计; 数字孪生驱动; 大数据

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0458-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.054

Integrated Design and Research of Smart Campus Driven by Big Data and Digital Twins

MENG Gang^{1,2}, LI Zhao-chang², GUO Hui⁴, YANG Dan-dan³, HU Bin^{4*}

(1.School of Design, Jiangsu Open University, Nanjing 210013, China; 2.College of Art & Design,
Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. School of Architecture and Design,
Nanjing Tech University, Nanjing 211899, China; 4.Macau University of Science
and Technology, Macau 999078, China)

ABSTRACT: The work aims to design an integrated design scheme for campus-oriented innovation services, to offer new approaches to constructing a smart city driven by big data and digital twins and address the persistent issues of data silos and intelligent decision-making in smart city integration design. In this research, a standardized information model for smart campus data was established and Internet of Things (IoT) sensors primarily using structured data were deployed. By leveraging big data and deep learning methods, a smart campus brain was realized. Furthermore, a human-machine integrated visualization platform driven by Web 3D and digital twins was developed, and an operability perspective, feasible and implementable smart campus design was formulated. Starting from the characteristics of big data, the construction status of smart campuses was analyzed. A standardized model for smart campus data was established, and a Web 3D and digital twin-driven visualization platform based on GRU-CNN deep learning for the smart campus brain was designed.

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61961036, 62162054); 江苏省社会科学规划基金 (21YSD006); 江苏高等教育学会“大学素质教育与数字化课程建设”专项课题 (2020JDKT109); 江苏省高校哲学社会科学研究重大项目 (2023SJZD148); 江苏省高校哲学社会科学研究项目 (2023SJYB0201); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD20297148); 广西自然科学基金 (2020JJA170007); 江苏开放大学科研平台 (23-KYPT-H06); 苏州社会科学基金 (Y2023LX013)

Experimental results demonstrated that this system possessed data visualization and intelligent decision-making capabilities, offering users an immersive, multidimensional, and dynamic human-machine integrated interactive experience. The utilization of a big data-driven digital twin visualization platform enables the integrated operation of campus facilities, enhancing the intelligence, efficiency, and user-friendliness of the campus infrastructure, thereby improving overall utilization efficiency. The design of a smart campus integration platform also facilitates the advancement of modern cities by promoting new modes of data interconnection, data visualization, and intelligent service management. It provides technological and theoretical references for the current development of smart cities.

KEY WORDS: smart campus; integrated design; digital twins driven; big data

随着新一代信息技术的快速发展,以移动互联网、云计算、大数据、人工智能为代表的计算机技术不断趋于成熟,智慧校园的实现与智慧城市的部署成为必然。在中国,智能校园是一种新兴的趋势^[1],其建设仍处于前期阶段^[2]。校园发展模式正在从传统校园演变成智慧校园,现阶段校园中存在数据孤岛与缺少智慧决策机制,同时校园网络安全问题也较为突出。随着智慧校园一词吸引了来自多个学科的专业人士和学者的极大关注。Han 等^[2]提出利用数字孪生技术对物理校园场景进行数字化构建,表明虚拟现实校园系统能够提升学校管理和教学水平,为推动校园智能系统的开发和应用提供重要启示。钱小龙等^[3]构建包含智能感知层、网络通信层、平台能力层、应用服务层、用户交互层、规范标准与评价体系、信息与数据安全保障体系在内的五横两纵式沉浸式大学智慧校园架构模型,为沉浸式大学智慧校园的建设和发展提供实践抓手。Xie 等^[4]建立了基于大数据的智慧校园云服务平台,解决了以往在智慧校园云服务平台的建设方法存在响应速度慢、实时性差的问题,为用户带来高质量、快捷的数据服务。

在校园信息化建设过程中,多数复杂系统的设计仍存在系统集成设计主观性较强,而各子系统缺少系统集成大局观念的问题,因此学者们利用技术集成实现智慧校园的建设,Villegas-Ch 等^[5]将大学视为进行智慧城市实验环境,通过物联网获取数据,将数据集中在专有基础设施中,并使用大数据进行数据管理和分析,为实施可持续性的智慧城市找到可靠和有效的解决方案。Sneesl 等^[6]提出一种基于物联网的解决方案,以解决智慧校园缺乏合适的采集模型问题。高勇等^[7]通过大数据服务平台进行集群化部署,实现各类型数据的集中采集,充分实现数据的服务化、标准化和资产化。雒慧霞等^[8]以“大数据+云服务”为支撑,以资源整合、应用整合、数据整合为中心,通过应用服务的集成与融合,构建智能化校园综合服务平台,进一步推进教学、科研、管理、生活及服务智慧化。Deng 等^[9]提出了数字孪生城市的概念,利用数字孪生的特点、关键技术和应用场景,讨论了有关数字孪生城市的理论,可行性研究方向和框架。

事实证明,智慧校园数字孪生集成平台是一种基

于人工智能、大数据、物联网等技术的集成系统,旨在帮助高校更好地管理校园,提高学生服务质量和校园安全等方面的能力。大数据与数字孪生驱动的智慧校园集成技术对实现以智慧校园创新服务生态为导向的园区集成设计的方案提供可行性,并为当前智慧城市的建设提供技术及理论参照作用。因此,本文就高校使用智慧校园数字孪生平台进行探讨。通过大数据对智慧校园的数据信息构建状况分析,建立智慧校园数据的标准化模型,搭建基于 Web 3D 与数字孪生驱动可视化平台,并根据智慧校园的具体建设,对信息化、数字化建设过程中的难点、痛点、疑难问题进行探索性的融合创新。旨在解决智慧城市集成化设计中数据孤岛与智慧决策问题,为大数据与数字孪生驱动的智慧城市构建提供建设思路。

1 大数据与数字孪生融合

数据是智慧校园的核心支撑,随着信息化的建设与推进,各信息化系统积累了大量数据,形成了丰富、多源、异构的数据资源。同时各应用系统数据之间存在着数据孤岛现象,有价值与可产生价值的价值未能相互贯通融合。随着大数据与数字孪生的融合,更好地提高了数字孪生技术的精度和效率。大数据技术为数字孪生模型提供海量、多样化、高速增长的实际数据,由此建立的数字孪生模型能够更好地反映实际物理对象的状态,并更好地预测、验证和改进实际物理对象的性能,从而提高数字孪生模型的精度。因此,本文建立智慧校园数据的标准信息模型,采用结构化数据为主进行数据的融合处理以提高系统的效率和准确性。

1.1 数字孪生技术

随着新一代信息技术的融合将进一步推动智慧校园建设的发展,由数字孪生技术创建物理对象的虚拟孪生体,通过建模、通信、计算、数据处理技术实现虚拟空间和物理空间的协同进化^[10]。在智慧校园中,利用数字孪生技术对校园建筑进行虚拟化创建,并将传统的教学内容与信息化数据进行融合,利用数字孪生技术对进行虚拟映射实现智慧校园的虚拟实体,见图 1。

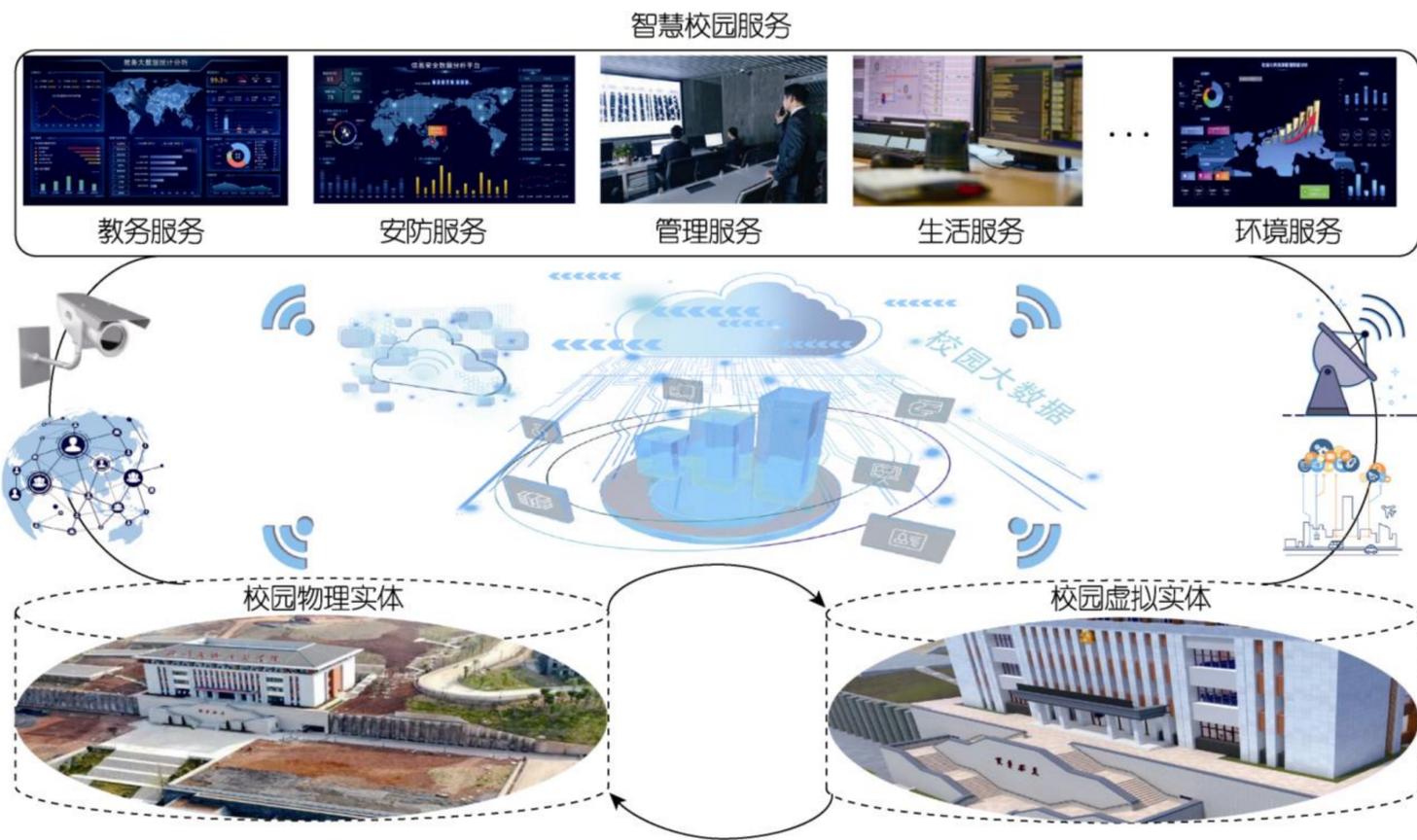


图1 智慧校园模型
Fig.1 Smart campus model

近年来,学者们经过在数字孪生领域的不断探索与应用,陶飞等^[11]提出将数字孪生在十大领域中的应用,为在智慧校园建设中对数字孪生的应用提供了理论依据与基础。卢世主等^[12]提出将数字孪生技术运用到革命旧址的监测预警系统中,构建基于数字孪生的革命旧址监测预警系统,实现革命旧址的智慧运营、科学管理,为智慧校园的建设提供参考依据。李联辉等^[13]提出了一种混单包装线物联网化能为智能制造的实时提供硬件支撑,基于数字孪生的多工位联动优化提供了智能化决策工具支持,该决策方案亦可用于实现智慧校园集成平台的智能决策。

1.2 数据的标准信息模型构建

标准信息模型的构建是将数据信息用常规表达

的方式进行展示,模型节点对象代表着大数据集成平台中不同的实体及实体之间数据流动的方向与方式,使管理者更好的通过数据了解校园各项数据指标。本文通过分析多种多源、复杂特征信息,在标准的数据类型基础上,建立了8种数据类型,并对每种数据类型进行编码与编写脚本,包括了 One-hot 等多种编码方式和对每种数据类型进行针对性的脚本编写,实现数据类型的特征数据的标准化处理、数据层次聚类、特征数据的自动化入库。经过编码后的数据与原始数据,其信息价值一致数据存储机制得到完善,实现了信息标准模型的构建,其技术逻辑见图2。

智慧校园中的大数据包含了教务、设备、安全、饮食等配套的数据,是教学活动、学生管理、智慧服务支持基础数据集,同时也可利用大数据集合进行目

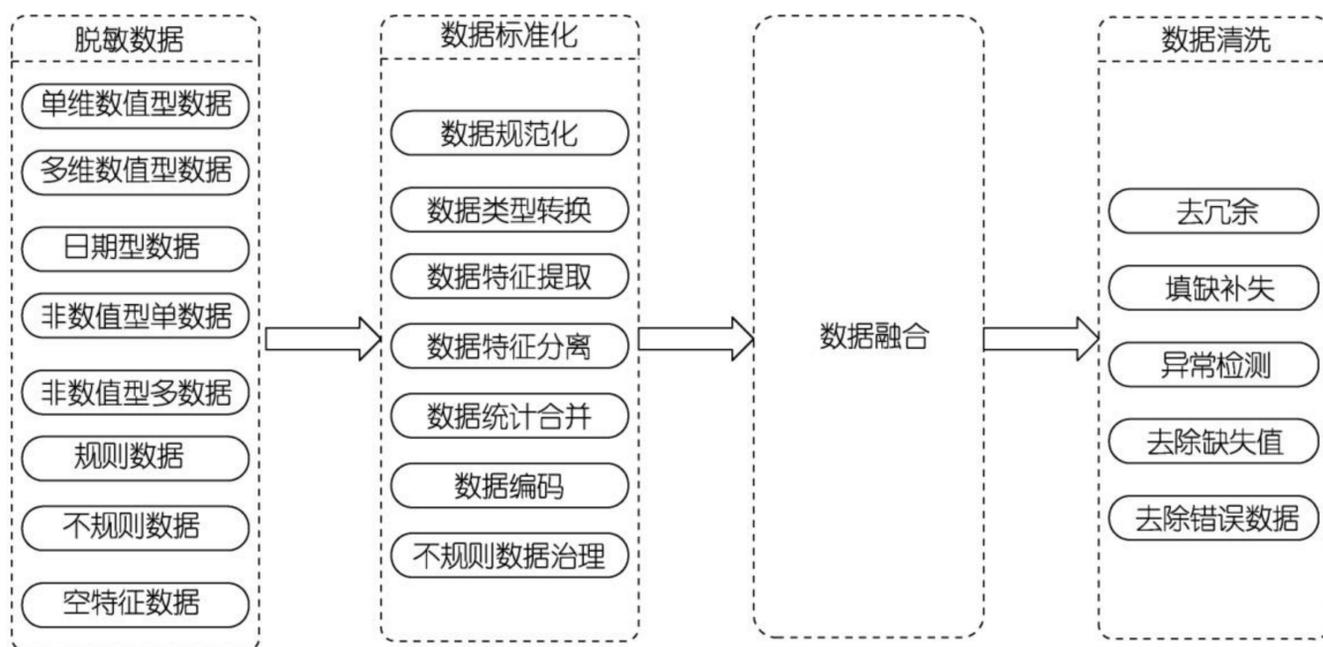


图2 数据联合技术逻辑
Fig.2 Data federation technology logic

标价值的创建。数据具有规模大、来源广泛、类型复杂、处理效率高、时效性高等特点。如何将大数据更加高效合理地运用起来,关键是要能将数据进行标准化处理,科学分析与深度挖掘数据价值。因此,本文构建的信息标准模型体系,见图 3。

通过大数据与数字孪生技术的融合,通过结合孪生数据进行虚实融合并进行实时交互的方式,解决高校信息化系统中存在的信息孤岛,实时性、智能服务、体验性差等问题,为各高校的智慧校园发展与管理方式提供了有效的技术支撑与实现智慧校园的智慧互动、智能管理提供了技术参考与全新的解决途径。

2 基于大数据与深度学习的智慧大脑

在信息化全面发展与大数据背景下,运用机器学习实现智慧大脑开展多维、实时、动态、可视化的校

园管理新模式,建立智能决策系统机制。它可以自动识别发生事件、预测未来发展趋势,并且根据当前数据和预测结果,为管理者提供决策建议。在进行大数据分析过程中,需要将系统数据集进行筛选、清洗、提取特性等处理,而在处理过程中存在着数据繁重、人工提取效率低、选择与分类精度不高等问题。因此,本文提出了一种基于卷积神经网络(CNN)深度学习智能决策系统,并结合门控循环单元(GRU)模型用于提升检测速度,保证检测精度(简称 GRU-CNN 方法),以帮助管理者做出数据驱动的决策,具体实施思路见图 4。

卷积神经网络(CNN)是日常在深度学习方向的会经常涉及的一种算法模型,该模型的基本构造机制就是要满足多层前馈的调节机制。其网络主要应用架构包括多个池化层和卷积计算层的模块,由输入层、卷积层、池化层、连接层、输出层组成,见图 5。

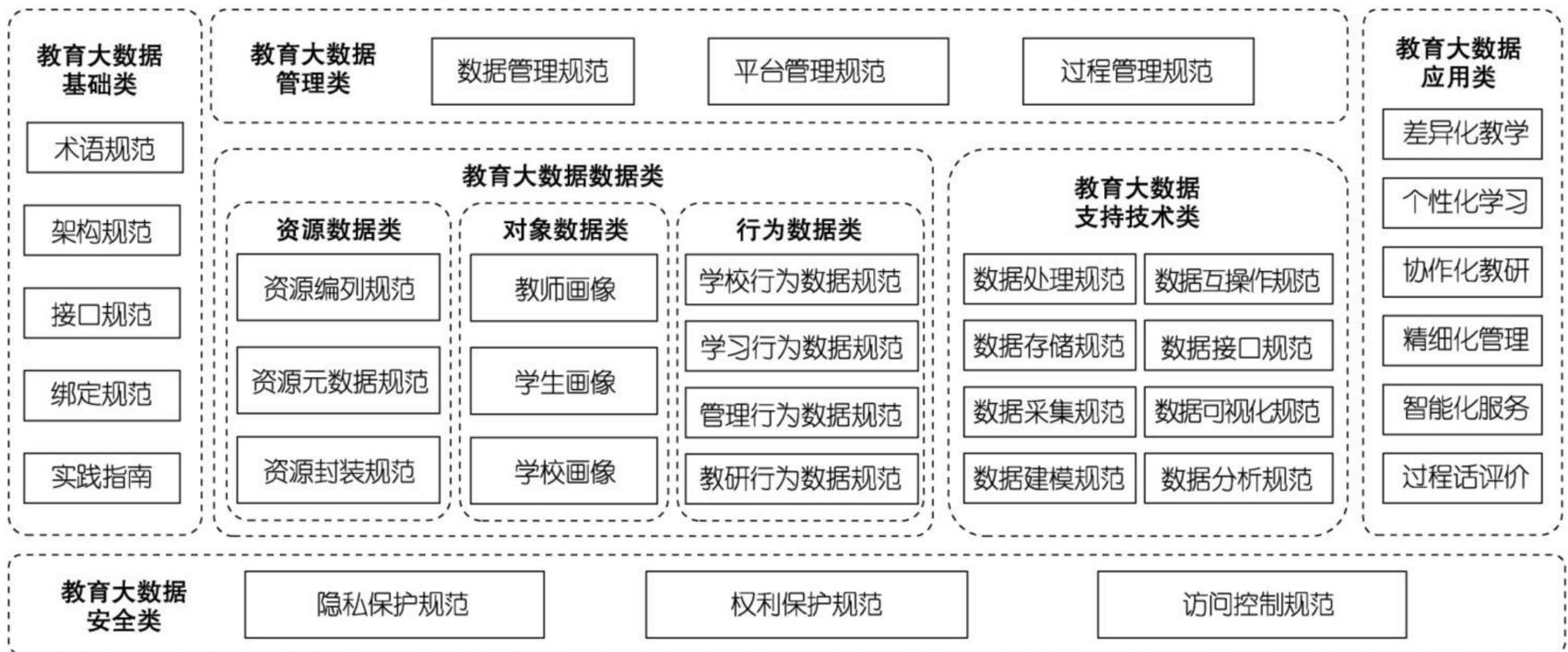


图 3 数据的标准信息模型
Fig.3 Standard information model for data

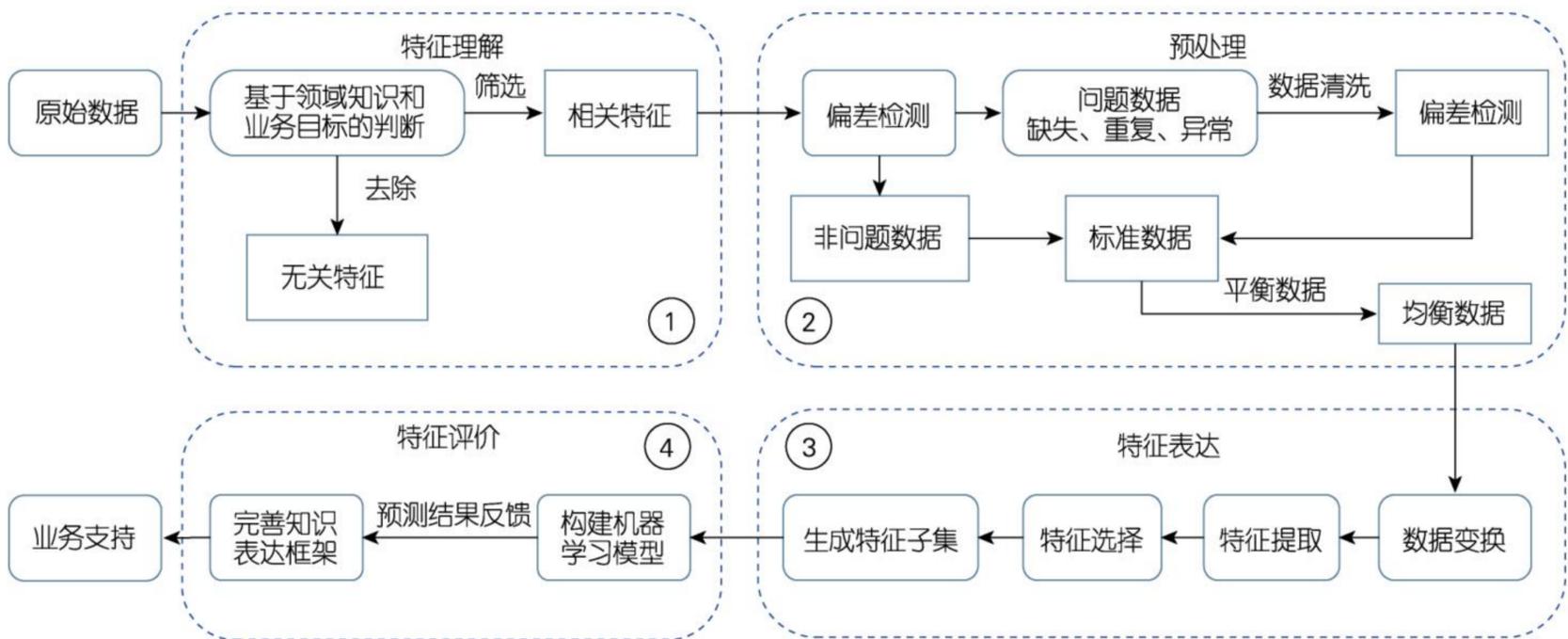


图 4 基于智慧大脑的智慧校园业务支持
Fig.4 Smart campus business support based on smart brain

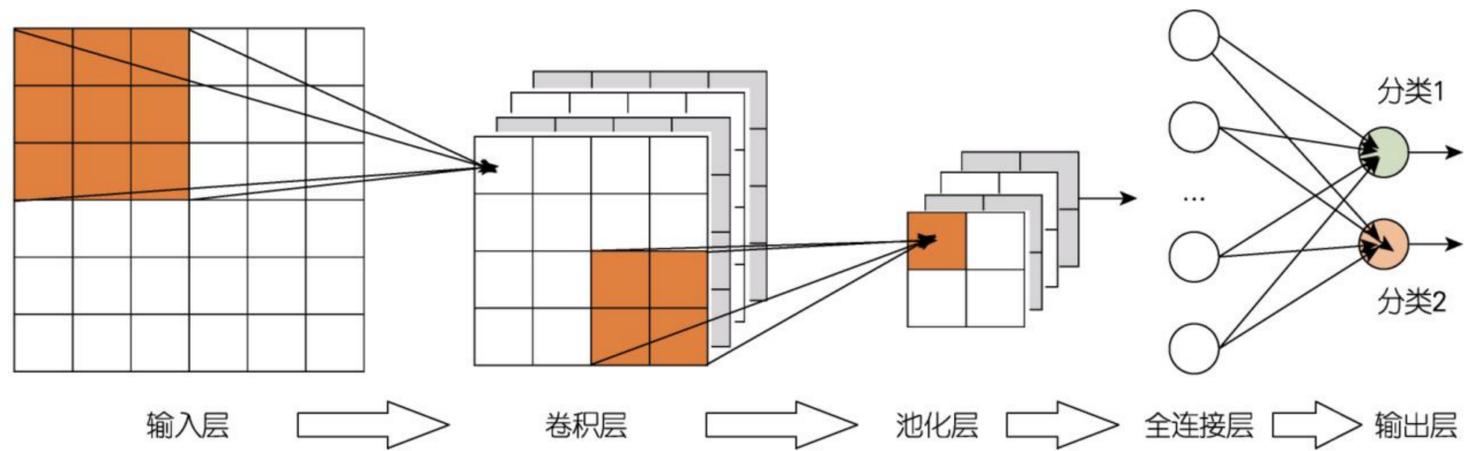


图5 卷积神经网络架构
Fig.5 Convolutional neural network architecture

3 智慧校园集成平台

建设智慧校园集成平台可以帮助高校解决前期信息化建设中存在的教育资源共享不便、服务系统体验不佳、设备利用率不足、信息的安全性存在风险等难点与痛点问题。并通过以校园信息化总体目标为指导，以智慧校园发展为方向，利用多源信息融合、跨平台互联互通及信息共享、多维可视化信息集成、BIM+GIS 数字孪生等关键技术，将信息化技术融合到教育行业中推动了教学的改革创新，实现多源异构数据融合智慧校园集成平台，为推动传统高校向智慧校园进行智能、互联、可视化全面发展。

3.1 集成平台架构设计

本文以校园各群体的服务创新生态为导向进行智慧校园自上而下的集成设计研究，利用大数据与机

器学习实现校园的智慧大脑，基于 web 3D 和数字孪生驱动的人机共融机制可视化平台研发。最后构建可执行、可落地的智慧校园集成平台架构，见图 6。以服务于校园各群体的创新生态，通过对数据采集系统、通信系统、数据中心平台、服务与创新生态应用进行集成实现智慧校园建设。

3.2 智慧校园数据互通互联

数据互通互联是数据实现通信的一种方式，它可以让不同的数据系统之间进行科学有效的互通互联。从而实现物理实体与虚拟实体、数采系统与数据中心、数据中心与应用模块等各集成模块之间的数据共享和交换更加便捷、高效，从而提高学校的整体效率。此外，通过各模块支持的传输方式、通信协议等实现不同模块之间的连接方式，智慧校园数据互通互联还可以改善学校的信息安全，防止数据泄露和滥用，各模块互通互联体系见图 7。

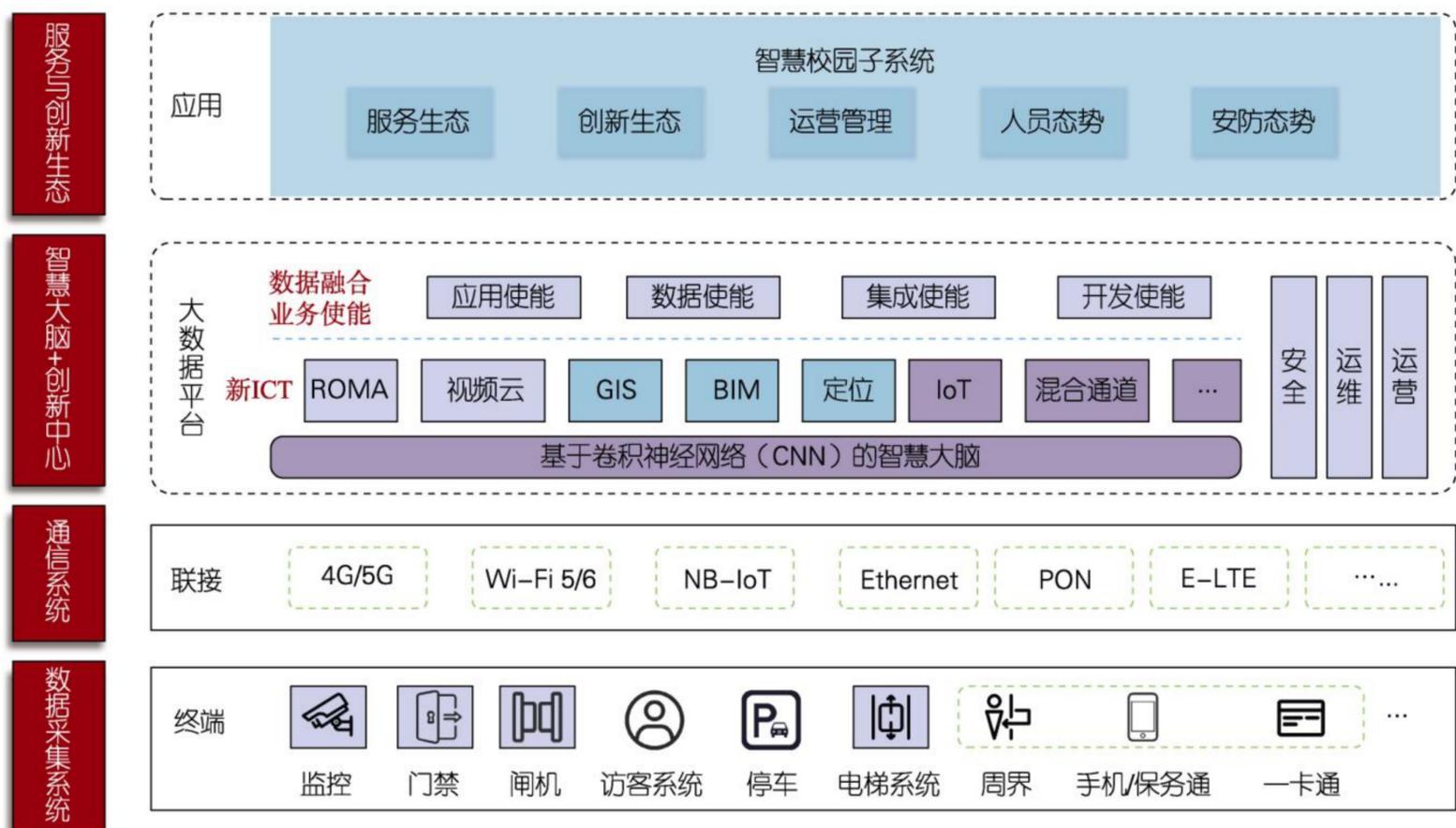


图6 智慧校园集成系统设计架构
Fig.6 Design architecture of smart campus integrated system

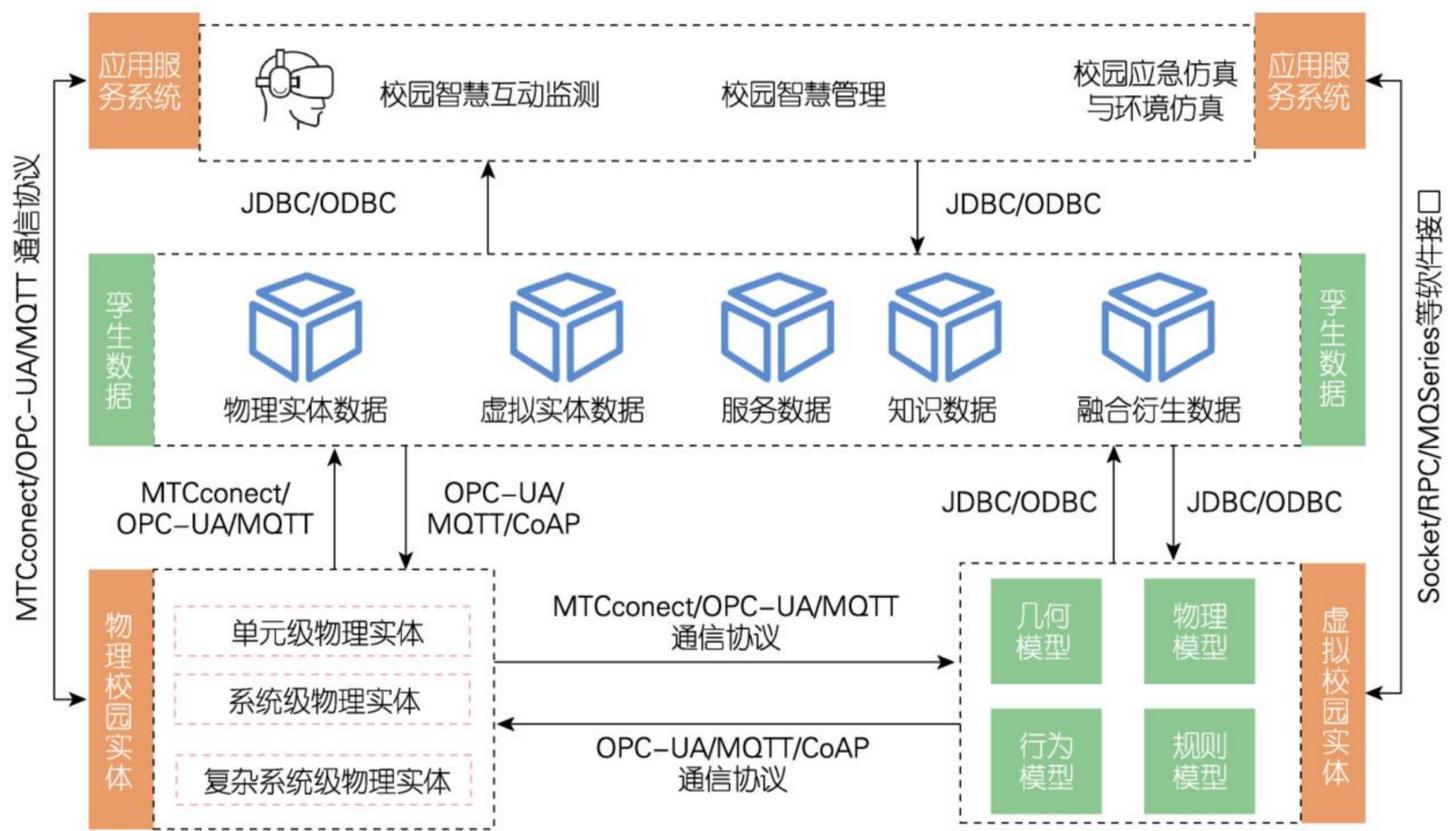


图 7 智慧校园数据互通互联体系

Fig.7 Smart campus data interworking and interconnection system

4 智慧校园集成应用

4.1 大数据与数字孪生驱动可视化平台

通过基于 Web 3D 与数字孪生驱动模式, 将整体校园内外的真实场景环境进行虚拟还原, 搭建大数据与数字孪生驱动可视化平台。选择四川某学院为监测对象, 构建具有大数据中心一体化大屏、智慧大脑智能决策、服务创新生态运营中心、资产数据管理的智慧校园集成平台, 实现沉浸式虚拟环境下对流场数据高效的组织和管理, 增强用户对流场空间信息的理解^[14], 见图 8。大数据中心一体化大屏是对高校的全方位数据进行可视化实时展示, 通过数字孪生层级化区分与

数据集管理, 管控中心人员可随时调取对应实体详细数据信息、内部设备运行状况、监测信息等数据。智慧大脑智能决策在系统中可以根据大数据中心进行数据清洗、数据分类、数据联动、学生管理、事件行为检测、突发事件检测预警等, 实现智慧校园的智能决策。同时, 在数字孪生可视化平台中进行数据的可视化展示, 利用可视化实时标记各类突发事件并产生告警信息与标识, 这一功能将会给设备维护与安保、应急、设备调度人员提供了有效科学依据。通过服务创新生态运营中心运行概况, 对各系统服务更新与服务优化调控起到了积极作用, 解决了以往需要经过长时间的事件与数据积累, 并需要人工进行实地勘查记录校验等情况, 也提升了各管理部门的工作质量与设备的可靠度。

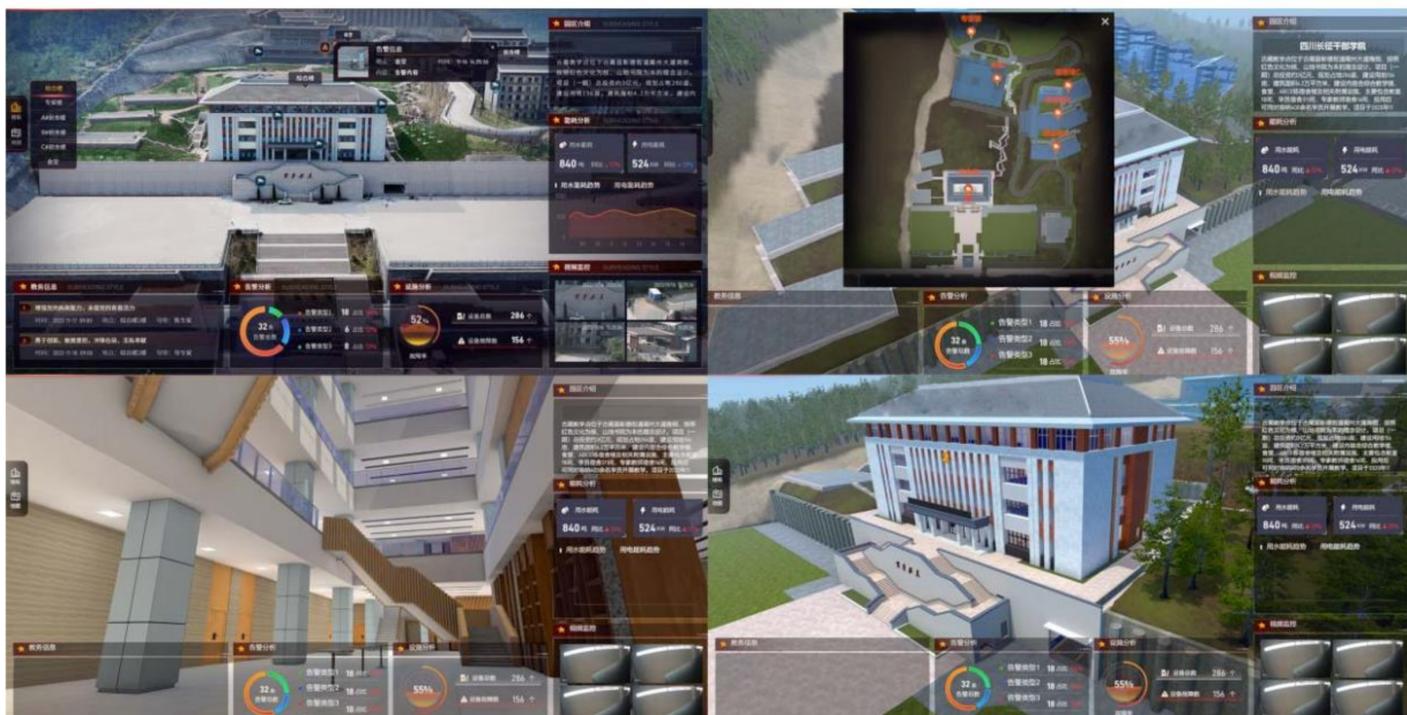


图 8 智慧校园数字孪生可视化平台

Fig.8 Smart campus digital twin visualization platform

使用平台前学校教务数据、学生管理、校园的安保巡检的排查等，均采用的是人工汇总、分析、并通过文档撰写简报、人工巡查等方式，每天数据量繁重，同时采用人工进行采样汇总分析会存在较大数据错漏等情况，因此造成了数据错乱不能及时反馈出校园真实的运行情况。通过应用智慧校园集成平台后，校园各项运行数据实现了智能分析、智慧决策、精准标识，极大地提升了校园的管理效率。同时基于 GRU-CNN 的智能决策大脑，通过对数据分析与图像视频进行行为识别检测判断可快速采集到存在的教务、科研、设备运行状况等不良数据与安全隐患。对检测到的不良数据进行预警，并显示在大屏数据可视化面板，同时根据识别到的存在安全隐患行为的图像画面进行隐患程度、地点、时间与类别，进行自动分级分类，提高了事件响应效率，见图 9。

4.2 数据融合分析与智能决策

智慧校园集成平台通过对融合各时期建设的信息化系统数据打通了数据屏障，将各系统服务进行

业务关联与场景协同，解决了应用系统孤立、业务流程断裂的矛盾，使各校园系统服务变得更加方便、快捷、智能。数据融合与分析将多源数据进行集成与分析，旨在将多源异构数据集成一组完整数据，便于更好地理解数据之间的关系和趋势，并在此基础上做出更优的决策。

为了验证基于 GRU-CNN 网络深度学习智能决策系统的可靠性，在数字孪生可视化集成平台中进行了仿真实验。将从某校园监控子系统数据集中获取了不良数据与正常数据总计 40 000 条，分为 40 组进行实验，每组 1 000 条。将 CNN、RNN、LSTM 深度学习算法进行对比，验证其检索准确度与优缺点，对比结果见表 1。

由表 1 可知，在几种传统的深度学习算法中，CNN 算法模型在应用于校园的图像处理和计算机视觉领域中表现优异，准确率与综合评价较高，将 GRU 替换为 Faster R 与 LSTM 分别进行两组实验，Faster R-CNN 是一种目标检测算法，可提升检测速度。LSTM-CNN 是一种通过在 CNN 的最后一层添加 LSTM 层来



图 9 综合管理大屏数据可视化面板

Fig.9 Comprehensive management large-screen data visualization panel

表 1 深度学习算法优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of deep learning algorithms

| 序号 | 算法 | 优点 | 缺点 | 平均准确率/% |
|----|------|----------------------------------|----------------------------|---------|
| 1 | CNN | 共享卷积核、较好的处理高维数据，更接近于实际的生物神经网络 | 需要调参，需要大样本量、物理含义不明确 | 94.38 |
| 2 | RNN | 具有了短期记忆性 处理任意长度的输入 权重随时间共享 | 出现梯度消失梯 度爆炸的弊端 计算速度慢 | 90.15 |
| 3 | LSTM | 改善了 RNN 中存在的长期依赖问题 | 计算量大、耗时偏多 | 89.63 |

提高模型的时序建模能力,从而适用于时间序列数据的建模和预测任务。因此,根据应用场景与资源分配情况对 3 种融合算法进行有效性和优越性的实验对比,并从准确率、训练效率、预测速率和模型训练参数量 4 个方面展开对比,其对比见表 2。

表 2 深度学习算法融合实验对比
Tab.2 Comparison of fusion experiments of deep learning algorithms

| 序号 | 算法模型 | 识别准确率/% | 训练时间/s | 速率 per/s | 参数量 |
|----|--------------|---------|--------|----------|-----------|
| 1 | GRU-CNN | 99.8 | 8 859 | 2.21 | 1 788 162 |
| 2 | LSTM-CNN | 99.29 | 10 711 | 2.27 | 2 552 802 |
| 3 | Faster R-CNN | 99.6 | 25 698 | 2.08 | 3 365 963 |

由表 2 可得进行融合替换实验分析后的实验对比结果,GRU-CNN 在精准度更优的前提下训练时间也较短,同时参数量更低适用于对可提供计算能力较低的场景,由此可知,基于 GRU-CNN 的智能决策系统在精确度、时间损耗等方面占据绝对优势,解决了在学生行为识别、人脸识别、交通管理、环境监测等精确度不高实时更新速度慢等问题,提高了智慧决策的精确度与实时性。因此,基于 GRU-CNN 的智慧大脑在智慧校园中提升了校园管理的智能化水平,提高校园管理效率和学生学习质量。适合运用于国内各大高校的智能识别、安全行为分析、智能检索等应用。

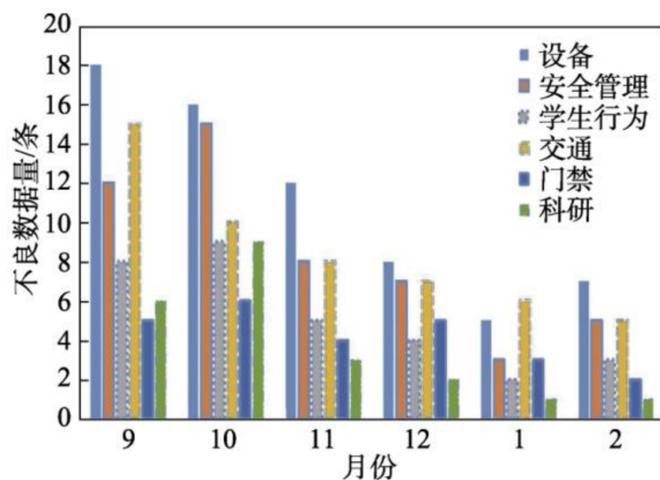


图 10 高校数据统计图

Fig.10 Statistics of colleges and universities

经过使用该数字孪生可视化集成平台一段时间后,该高校的某一校区的不良数据分别见图 10。存在的不良突发事件响应度与未处理的隐患问题都呈现出了较为严重的状态。由图 10 可知,该校区 9—10 月的突发事件响应效率各类未处理隐患问题还比较严重,处理响应时间过长,11—2 月,各类未处理隐患逐渐呈递减趋势,从而有效的帮助高校提高管理效率、校园安全、学生服务质量和教学质量。

5 结语

校园安全的问题是长期制约着高校高质量发展

的重要因素,而传统校园安防巡检方式及人工巡查都难以满足实时、精准定位和及时反馈的要求。同时各信息化系统间数据存在孤岛现象信息无法及时下达。文中提出了依靠物联网、深度学习、大数据、Web3D 数字孪生技术等新兴技术,实现“数据全融合、环境可视、业务系统互通、设备全可控”的智慧校园管理。利用大数据驱动的数字孪生可视化平台实现校区一体化运行结合服务创新生态运营中心可以使高校更加智能化、高效化和人性化,从而更好地服务于学生和教职员工的需求,帮助学校更好地规划资源和设施,提高使用效率。智慧校园集成平台在未来的应用方向将会更加多元化和智能化,在未来或将推出个性化教育服务实现课程内容创新达到智能监控与智能辅助决策安全管理。智慧校园集成平台实现的同时也为实现智慧城市建设提供解决方案与执行思路,帮助现代化城市逐步完成数据互通互联、数据可视化、智慧服务管理新模式。

参考文献:

[1] MIN-ALLAH N, ALRASHED S. Smart campus-A sketch [J]. Sustain Cities Soc, 2020, 59: 102231.

[2] HAN Xu; YU Hua; YOU Wen-hao, et al. Intelligent Campus System Design Based on Digital Twin[J]. Electronics, 2022, 11(21): 3437-3437.

[3] 钱小龙, 宋子昀, 黄蓓蓓. 沉浸式大学智慧校园的整体实现: 理论构建与实践探析[J]. 重庆高教研究, 2023, 11(5): 49-61.

QIAN Xiao-long, SONG Zi-yun, HUANG Bei-bei. Overall Implementation of Immersive University Smart Campus: Theoretical Construction and Practical Analysis[J]. Research on Higher Education in Chongqing, 2023, 11(5): 49-61.

[4] XIE Chao-man. Construction of Smart Campus Cloud Service Platform Based on Big Data Computer System[J]. Procedia Computer Science, 2022, 208: 583-589.

[5] VILLEGAS-CH W, PALACIOS-PACHECO X, LUJÁN-MORA S. Application of a Smart City Model to a Traditional University Campus with a Big Data Architecture: A Sustainable Smart Campus[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2857.

[6] SNEESL R, JUSOH Y Y, JABAR M A, et al. Revising Technology Adoption Factors for IoT-Based Smart Campuses: A Systematic Review[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4840.

[7] 高勇, 于艳华, 赫玲河, 等. 构建大数据智慧校园应用系统新生态研究与实践——以白城医学高等专科学校为例[J]. 职业技术教育, 2020, 41(32): 66-69.

GAO Yong, YU Yan-hua, HE Ling-he, et al. Research and Practice on Building a New Ecosystem of Big Data Smart Campus Application System—A Case Study of Baicheng Medical College[J]. Vocational and Technical

- Education, 2020, 41(32): 66-69.
- [8] 雒慧霞, 李广. 大数据下的智慧校园建设研究——以“智慧甘农”为例[J]. 科技促进发展, 2018, 14(6): 548-553.
LUO Hui-xia, LI Guang. The Research of Smart Campus Construction under Big Data—Taking the Smart Gansu Agricultural University for Example[J]. Science & Technology for Development, 2018, 14(6): 548-553.
- [9] DENG T, ZHANG K, SHEN Z-J. A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 6(2): 125-34.
- [10] WU Y, ZHANG K, ZHANG Y. "Digital Twin Networks: A Survey[J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(18): 13789-13804.
- [11] 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 Wei-ran, ZHANG Meng, et al. Five-Dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [12] 卢世主, 郭雨晴. 基于数字孪生的革命旧址监测与预警系统研究[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 47-55.
LU Shi-zhu, GUO Yu-qing. Monitoring and Precaution System of Revolutionary Sites Based on Digital Twin[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(14): 47-55.
- [13] 李联辉, 毛春雷, 雷冰冰. 数字孪生驱动的物联型混单包装线多工位联动优化[J]. 包装工程, 2021, 42(1): 163-170.
LI Lian-hui, MAO Chun-lei, LEI Bing-bing. Multi-Station Synchronized Optimization of IoT-Enabled Mixed-Order Packaging Line Driven by Digital Twin[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(1): 163-170.
- [14] 洪韬濮, 杨超, 吴亚东等. 面向沉浸式流场可视化的多视图数据管理方法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(4): 312-319.
HONG Tao-pu, YANG Chao, WU Ya-dong, et al. Multi-View Data Management Method for Immersive Flow Field Visualization[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(4): 312-319.

责任编辑: 陈作

(上接第 457 页)

- [26] ROCHA C S, ANTUNES P, PARTIDÁRIO P. Design for Sustainability Models: A Multiperspective Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 1428-1445.
- [27] 王国胜. 服务设计与创新[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
WANG Guo-sheng. Service Design & Innovation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [28] 赵玉. 论文化产品的跨媒介符号生产[J]. 江南大学学报(人文社会科学版), 2021, 20(6): 81-87.
ZHAO Yu. On the Cross-Media Symbol Production of Cultural Products[J]. Journal of Jiangnan University (Humanities & Social Sciences), 2021, 20(6): 81-87.
- [29] 胡玥, 胡伟峰. 企业职工健康体检车产品服务系统的概念设计[J]. 包装工程, 2023, 44(6): 94-105.
HU Yue, HU Wei-feng. Conceptual Design on Product Service System of Physical Examination Vehicles for Employees[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(6): 94-105.
- [30] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
ZHANG Bing-jiang. Analytic Hierarchy Process and Its Application Case[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [31] 于明玖, 叶军, 陆长德. 中国成年人尺寸标准在产品中的应用方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(S1): 64-66.
YU Ming-jiu, YE Jun, LU Chang-de. Application of Chinese Adults Anthropometric Dimensions Standard in Product Design[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(S1): 64-66.
- [32] 冯亚娟, 赵占西. 增材制造常用塑料的材质感性意象研究[J]. 包装工程, 2021, 42(16): 29-35.
FENG Ya-juan, ZHAO Zhan-xi. Perceptual Image of Representative Plastic Materials in Additive Manufacturing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(16): 29-35.
- [33] PRESCOTT A R. The Barometer of Sustainability: A Method of Assessing Progress towards Sustainable Societies[R]. Victoria: International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources and PA-DATA, 1995.

责任编辑: 陈作