

数字孪生展厅的物联网设备集成方案

鲍汤胤

杭州立众数字科技有限公司，浙江杭州，310000；

摘要：数字孪生技术作为虚实融合的关键引擎，正在赋能展览展示行业迈向智能化、可视化与可控化新阶段。通过将物理展厅的传感器、控制终端与虚拟空间一一映射，实现空间状态、设备行为与人流动态的实时同步与双向控制，是当前智慧展厅升级的重要路径。本文围绕数字孪生展厅构建中的物联网设备集成方案展开研究，系统分析了传感层设备的部署策略、边缘与云协同的数据汇聚机制、虚实交互中的模型绑定方法及平台集成架构。研究以实际展览场景为依托，提出集感知、控制、预测与可视化于一体的物联网系统集成路径，为展馆智能化、展项互动化与管理精细化提供系统化技术参考。

关键词：数字孪生；智慧展厅；物联网；系统集成；虚实融合；边缘计算

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.043

引言

在城市智能化、文化数字化及空间可视化的大背景下，数字孪生作为下一代信息系统的技术基座，正逐步从工业制造、智慧城市拓展至展览展示领域。数字孪生展厅以物联网感知网络为基础，将展厅内的物理对象与其虚拟模型在时空维度上进行双向耦合，使得场馆管理者可以通过虚拟空间实时监控、调度乃至优化物理空间资源。同时，参观者也可以在增强现实、虚拟交互中获得沉浸、定制、反馈式的多元体验。然而，要实现这一理想状态，必须首先建立起一套完整、高效、开放的物联网设备集成系统，涵盖传感器布设、通信协议转换、数据处理与平台对接等多环节。本文基于系统工程的视角，从底层设备感知、中层融合调度到高层平台集成三个维度，提出一种具有普适性、可移植性与可扩展性的数字孪生展厅物联网设备集成方案，并结合典型案例进行验证，期望为数字孪生理念在展览空间的工程化落地提供技术支撑。

1 感知层构建：多源物联设备的部署策略

1.1 设备分类与选型原则

数字孪生展厅的物联网设备需围绕“人、物、环境”三个感知维度展开。人员感知设备包括红外人流计数器、视觉识别摄像头、热成像仪与蓝牙定位标签，用于实现观众路径追踪、驻留时间监测与热力图构建；物体感知设备主要针对展品状态与互动装置，包括接近传感器、微动开关、RFID 标签、震动与开合检测装置等，用于感知用户触发行为与展品运行状态；环境感知设备则包括温湿度传感器、PM2.5、CO₂ 浓度监测器、光照传感器等，为展厅提供环境质量监测与自动调节依据。设备选

型需优先考虑其工业级稳定性、边缘处理能力、开放协议支持及组网灵活性。同时，为兼顾成本与拓展需求，建议采用模块化设计与多协议复合网关接入方式，确保后续系统可升级、易扩展。

1.2 空间部署与网络拓扑构建

物联网设备部署需综合考虑展厅的结构布局、流线走向与电源网络条件。在静态区域如常设展区，应按照空间分布与遮挡情况布设视频节点与传感器节点，确保感知范围无盲区；在动态区域如交互体验区与多媒体演示区，则需配置移动识别与行为捕捉设备，满足高频触发与用户特征识别需求。在通信拓扑上，系统应采用“主干传输+分布接入”的结构模式，传感器通过 Zigbee、LoRa 或蓝牙 Mesh 网络与边缘网关连接，主干通道通过以太网或 5G 公网与云平台交互。部署过程中应注意设备间的电磁兼容性与干扰规避问题，关键节点配置备用电源与断点续传机制，保障系统在高负载、高并发或临时断网状态下仍具备基本感知与缓存能力。

1.3 数据标准化与通信协议整合

由于展厅设备制造商不同、通信协议各异，需在集成阶段进行数据结构与通信接口标准化处理。平台应建立统一的物模型与数据字典，采用 OPC UA、MQTT 或 Modbus-TCP 等工业通用协议与设备进行对接，并通过协议网关完成非标设备的协议转换与封装。为提高数据传输效率与安全性，通信层应实现数据压缩、加密与签名处理，支持 QoS 等级控制与链路断点恢复。同时，在边缘节点配置轻量数据库与缓存机制，统一数据格式为 JSON 或 Protobuf 结构，以便于后续平台调用与可视化渲染。通过协议整合与数据标准化，系统实现了跨品牌、跨平

台设备的统一识别与调度控制,为后续构建孪生模型奠定坚实基础

2 融合层设计:边缘协同与数据处理体系

2.1 边缘计算节点的部署与功能划分

数字孪生展厅这样的环境当中,存在着各式各样的感知设备,同时数据也处于高速流动的状态。要是完全依靠中心服务器去处理所有相关事务的话,那么一方面会给带宽造成不小的压力,另一方面还很有可能对实时性以及交互体验产生不利的影响。所以呢,在感知层和平台层之间去布置边缘计算节点,这可是解决系统可能出现瓶颈问题的一个行之有效的策略。边缘节点的部署得依照展厅的物理空间来进行合理划分,比如说展馆入口区、有着互动展项的区域、能够提供沉浸式体验的区域等等,基本上在每个区域设置一到两个节点就行,这样做的目的就是要保证处理任务不管是从地理层面还是逻辑层面来讲,都能更加靠近所需处理的源头。这些节点运行的是那种相对轻量的操作系统,像 Ubuntu Core 或者 Yocto 之类的,并且搭载着如 EdgeX Foundry、KubeEdge 等这样的边缘计算框架,它们具备对容器进行管理的能力,同时也拥有适配多种协议的能力。边缘节点所具备的功能可不仅仅局限于对数据进行中转这么简单,它还承担着诸如实时预处理、对事件进行检测、在边缘进行 AI 推理、对历史数据进行缓存以及实施本地控制等一系列的任务。就好比说,当某一个互动投影设备察觉到有观众靠近的动作时,边缘节点就能够直接完成图像识别、姿态判断以及内容的预加载等工作,根本不需要去等待云端给出反馈,这样就能够大幅度地降低响应所需要的时延,进而让互动的流畅度得到显著提高。除此之外,各个节点相互之间还能够构建起分布式的协同网络,通过这种方式来实现负载的均衡、数据的冗余以及算法的共享,从而为展厅营造一个具有高度弹性而且能够实现自我管理的基础智能运算环境。

2.2 数据融合与时空对齐机制

数字孪生系统要对物理环境实现真实映射,这可不单单要求数据得全面些,还得切实保证不同设备数据在时间上能同步起来,并且在空间方面也得保持一致。毕竟感知设备的采样频率各有不同,通信路径也是各式各样的,所以常常就会出现数据错位、时序漂移以及语义冲突这些个问题。针对这一情况,系统专门构建了‘时空融合引擎’,用它来对多源数据流做对齐处理。从时间这个维度来讲,融合引擎会依靠 NTP 协议去给各个节点统一进行时钟校准,同时结合滑动时间窗口技术去处理那些数据片段,好让它们能在毫秒级的粒度上达成对

齐;而对于那些没办法即时获取到的模态呢,系统就会采用时序插值算法来把时间给补全了,进而形成完整且连续的事件序列。

在空间这个维度之上,系统凭借数字地图以及孪生场景里的三维坐标系,把各传感器所收集到的数据紧紧绑定于物理空间当中那些有着精确定位的对象节点上,像展柜呀、照明灯具呀、互动终端等等这类。并且还借助空间矩阵映射的方式,将其转化成为虚拟空间坐标,以此达成从“真实点位”朝着“虚拟体块”的同步更新这一情况。与此同时,系统会给各类数据添加上事件标签以及上下文属性(诸如“进入区域A”“触发展项B”“温度升高”),让它们拥有能够被识别、能够被分析、能够被推理的语义根基,从而在很大程度上提升后续进行 AI 建模的效率,保证平台接收到的是逻辑清晰明了、语义能够自洽的那种结构化信息流。

2.3 本地控制策略与弹性响应逻辑

为了确保展厅在出现断网、超负荷这类极端状况时也能够稳定运行,系统专门规划设计了一套带有冗余以及弹性特点的本地控制逻辑,并且将其部署安排在了边缘计算层,进而构建形成了“自治感知—自主响应—云端同步”这样的闭环控制体系。边缘节点会依据设备自身属性以及具体的应用场景来预先加载控制策略,就好比对于环境调节方面的设备,像空调、新风、照明这些,主要是以阈值触发的方式来运作;而安防类设备,诸如摄像、门禁、报警等,则是以事件驱动并且结合置信度评估的方式为主;至于互动展项设备呢,它会把人流密度、用户行为以及系统状态等多方面因素综合起来进行多条件的组合判断。

当温湿度超出所设定的范围之际,边缘节点能够自主地对局部环境系统展开调控操作。要是在夜间出现人流感知方面的异常情况,那么它便会自动开启局部警告机制,并且与此同时临时将相关情况记录到日志当中,等到后续恢复联网之时再统一进行上传。为了让控制系统的灵活性以及稳定性得以强化,把状态机控制逻辑还有置信度加权机制引入其中,以此来防止因为传感器出现波动而引发诸如误判、频繁启停之类的一系列问题。另外,通过对容错机制以及响应延迟策略加以设定,从而避免在不同设备之间产生控制冲突或者出现超频操作的现象。整套机制能够确保系统即便是处在平台中心发生故障又或者是网络不够稳定的情形之下,依旧可以具备基本的环境适配、展项联动以及安全保障等方面的能力,进而为数字孪生展厅构建起从真正意义上讲的那种“局部自治与全局联控”相结合的能力结构。

3 平台层集成：虚实映射与统一管控系统

3.1 数字孪生模型构建与数据绑定机制

平台层是以三维建模作为基础来开展相关工作的，借助BIM数据、点云建模以及SLAM扫描等多种手段，去构建出展厅空间具备高精度特性的三维可视模型。在孪生模型当中，每一个物理对象，像是展柜、投影机、展品、观众通道之类的，都有其独一无二的ID，同时还有明确的三维空间定位，并且这些物理对象都和传感器、控制设备逐个地进行绑定操作。系统会利用物模型映射表把数据流和虚拟场景紧密地绑定到一起，以此达成虚实能够同步、状态可以实时发生变更以及交互能够及时响应这样一系列的效果。在平台的前端部分，用户能够凭借孪生界面十分直观地去查看设备的状态、热力图以及事件流等内容，而且还能够展开点击式的控制操作、进行巡检路线的设定工作以及开展模拟调度方面的相关事宜，进而实现那种所谓‘看得见、点得动、管得住’的数字化展厅运维模式。

3.2 统一管理平台与多系统对接接口

平台得具备统一管理方面的能力，像设备接入这一项，要能有序处理；状态监控也得跟上，随时掌握相关情况；数据分析工作不能少，要对各类数据加以剖析；权限分配得合理安排好，确保各环节有序开展；日志追踪同样重要，对相关记录做到有效追溯等诸多功能。系统在设计的时候，是依照微服务架构搭建的集成平台，其模块有设备管理中心，负责设备相关的统筹管理；还有数据中台，承担数据整合等任务；权限系统要把权限相关事宜处理妥当；AI推理引擎则用于相关的智能推理工作；以及多终端可视化界面，方便在多个终端进行直观展示等。并且这个平台支持凭借API、WebSocket这类接口去和票务系统、灯光音响控制平台、安全监控平台等第三方系统进行对接，以此达成数据共享的目的，同时实现操作上的联动配合。为了保证系统能在高并发的情况下正常运行，且具备高可用性，平台后端运用了负载均衡加上服务集群这样的架构。在数据库方面，分成了时序数据库（就好比InfluxDB），主要用来存储环境以及传感数据；还有关系型数据库，它的作用是存储设备信息以及交互记录。

3.3 运维支持与AI辅助决策功能拓展

平台集成了故障预测以及状态诊断这两个模块，借助机器学习模型来剖析设备的运行趋向还有用户的行为模式，进而对设备可能出现的异常情况加以预测，同

时给出检修方面的相关建议。与此同时，平台能够去设定那种自定义规则的模型，就好比把异常热力变化同环境突变相互关联起来，以此联动安保系统，通过AI策略引擎来达成预案级别的触发响应操作。除此之外，凭借构建运维看板以及KPI指标体系的方式，能够实现将展项运行效率、观众活跃度、能耗变化等一系列关键数据进行可视化的展示，从而辅助管理者去做出有关运营优化的决策。在未来，平台还可以和AIGC内容生成系统实现对接，达成内容更新的自动化以及展项演绎的实时生成，以此推动展厅管理以及内容策展朝着智能化的方向去迈进。

4 结语

数字孪生展厅是物理空间智慧化升级的重要实践形态，其核心在于以高效、稳定、灵活的物联网设备集成为基础，构建一个感知、分析、响应、控制的虚实融合系统。本文从感知层设备部署与网络构建、融合层边缘协同与数据对齐，到平台层模型绑定与统一管理，系统梳理了数字孪生展厅的物联网集成路径，并强调了本地自主响应、数据语义融合与平台开放对接等关键机制。未来，随着AIGC、XR与5G-A等技术的引入，数字孪生展厅将朝着更加沉浸、动态与智能的方向发展，成为连接人、空间与信息文化交互新基座。

参考文献

- [1]王丹华.基于LoRa物联网的科技馆展厅智能控制系统设计[J].信息与电脑(理论版),2023,35(15):85-87.
- [2]王文渊.物联网技术在空调机房水浸监测中应用的探讨——以中国科学技术馆为例[C]//北京数字科普协会,北京博物馆学会,中央美术学院城市设计学院,中国农业博物馆.博物馆之城建设中的数字化转型-2023年北京数字博物馆研讨会论文集.中国科学技术馆;,2023:138-143. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.103293.
- [3]梁颖瑜.基于智慧时代博物馆藏品管理中物联网技术的运用实践[J].文物鉴定与鉴赏,2021,(10):120-122.
- [4]杨超.物联网在智慧博物馆藏品管理中的应用探讨[J].中国文物科学研究,2020,(02):31-34.
- [5]平衡.基于物联网的博物馆展厅空气中有害气体监测模型分析研究[J].环境科学与管理,2019,44(04):135-139.