

基于数字孪生的粮库可视化监控与管理系统的研发

Research and development of a visual monitoring and management system for grain depot based on digital twins

廖伟智^{1*}, 张彬¹, 徐国栋¹, 吴保茂¹, 徐进²

LIAO Wei-zhi^{1*}, ZHANG Bin¹, XU Guo-dong¹, WU Bao-mao¹, XU Jin²

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 611731;

2. 成都易联易通科技有限责任公司, 成都 610000)

摘要:为解决传统粮库管理中实时可视化程度低、粮情信息获取不及时、远程可视化控制难等问题,提出了基于数字孪生技术的粮库可视化监控与管理架构,设计了粮库孪生系统实现路径,对其中涉及的孪生体建模与轻量化、数据采集传输与处理、虚实映射以及可视化监控与管理四项关键技术进行了研究。在此基础上,围绕某粮库管理的具体需求,研发了粮库可视化监控与管理孪生系统,系统以物理实时数据驱动孪生粮库运行,支持物理粮库在数字化孪生场景中全方位、全要素、全流程进行实时监控;通过对采集的实时数据进行分析处理,实现对粮库通风、粮情、虫情、能耗等的实时可视化预警和通风控制,实现了孪生系统虚实映射,虚实双向映射。

关键词: 数字孪生; 粮库; 可视化监控; 虚实映射; 虚控实

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1009-0134(2023)11-0202-06

0 引言

作为粮食生产大国,我国的粮食安全储存问题一直备受关注,粮食储存技术直接影响储存过程中粮食的数量以及质量^[1]。据调查,全球粮食存储环节在粮食收获后损失中的占比高达55%^[2]。尽管我国每年在粮食储存处理的花费高达上千亿,但粮库储存环节遭受的损失仍高达总仓储粮的0.2%^[3]。储存的粮食极易受环境温度、湿度和虫害等的影响而导致霉变是损失的主要原因,因此,对粮食储存仓库的温度、湿度、虫害、通风和能耗等环境因素进行有效、及时的监控和管理成为解决问题的关键因素和迫切需求。

传统的粮库储存管理主要依靠人工定期到库区巡检粮情、虫情等以确保粮食仓储质量安全,常以采集报告或工作日志的形式上报负责人,负责人根据上报的数据主要凭经验进行判断和决策后,下达执行人员进行通风控制和虫害消杀等操作。其管理方式存在巡检路程远、间隔周期长、实时性差、反馈控制不及时等问题。为此,信息化和自动化技术在粮库监控和管理领域逐渐得到应用,基于物联网技术的粮库信息化管理平台逐渐被提出并得到应用。如吕等人^[4]提出了计算机网络和传感器网络结合的物联网粮储信息化管理平台。该类平台能够利用传感器与物联网技术对现场粮情、虫情等进行测控和自动检测,实现信息自动采集和反馈,在一定程度上解决了人工巡检耗时长、信息反馈慢的问题,但对远程可视化监控、信息实时同步分享,以及各测控信息点位与物理点位无差别对应分析、可视化同步控制等方面的支持不足。

数字孪生作为能够实现物理世界与信息世界交互融合的关键技术而受到广泛关注^[5],且由于其具有的高保真性^[6]、实时响应性^[7]、互连性^[8]等特点使其在诸多领域得到落地应用。其中,数字孪生具有的高保真性能将物理实体模型等比例构建为孪生虚拟数字模型,使其在几何尺寸、纹理特征等方面与物理模型保持高度仿真;孪生系统通过数据采集、传输与处理能快速感知物理世界的事件变化,如物理实体外观、位置、属性的变化,并将其实时映射在孪生虚拟数字模型上,可解决信息实时同步分享,以及各测控信息点位与物理点位无差别对应分析的问题。因此,通过在数字孪生虚拟环境中进行与真实物理环境同样的管理,可实时、沉浸式的代替人工现场巡检等任务,降低管理成本的同时可提高管理效率;此外,孪生系统利用数据纽带将物理世界和数字世界连接起来,实现数据的双向流通、双向映射,将模型、业务、数据、决策结果相互连接,实现物理世界与数字世界的动态交互,解决管理与决策分离的问题,将问题集中映射到数字孪生虚拟环境中进行一站式管理、分析和控制,可大大提升管理的效率和质量。

为此,本文围绕某粮库现有的管理系统存在大量人工统计和处理数据,粮情信息获取不及时、信息实时同步分享难、缺乏远程可视化同步监控等问题,提出了基于数字孪生技术的粮库可视化监控与管理系统的总体架构,设计了基于数字孪生的粮库可视化监控与管理系统的实现流程,对其中涉及的孪生体建模与轻量化、数据采集传输与处理、虚实映射以及可视化监控与

收稿日期: 2022-09-10

作者简介: 廖伟智(1978-),女,四川邛崃人,研究员,博士后,研究方向为网络协同制造、智能制造、大数据、人工智能、数字孪生平台,智能服务技术+农业、科技领域应用。

【202】 第45卷 第11期 2023-11

管理四项关键技术进行了研究。在此基础上,围绕某粮库管理的具体需求,针对其存在库区面积广、仓体多,现有的管理方式在对虫情、粮情等进行巡检并执行开窗和风机时耗时耗力,且受制于天气等客观因素,常常因巡检不及时、信息查看不完整、问题反馈速度慢而导致隐患未被发现,致使粮食发生霉变等损失等问题。研发了粮库可视化监控与管理孪生系统,在构建该粮库孪生体、孪生数据流通网络及虚实事件绑定的基础上,实现了粮情可视化监控、预警及远程控制等的应用。

1 粮库孪生系统总体架构

为了实现真实物理粮库与数字孪生粮库的动静态映射,并能将其运作过程中产生的业务数据进行迭代运行,实现对物理粮库全方位、全过程、全要素的精准复刻,支持库区工作人员在任意时间、任意地点远程可视化监控和管理。本文在参考数字孪生五维模型^[9]的基础上,构建了如图1所示的基于数字孪生的粮库可视化监控与管理系统总体架构,主要包括物理粮库、孪生粮库、孪生数据中心、信息服务中心四个部分。其中,物理粮库通过传感器等感知设备从其中采集关键温湿度、虫害等数据,并通过相应的通讯协议将数据传输至孪生数据中心,与业务数据融合后驱动孪生粮库运行,为信息服务中心提供支撑。

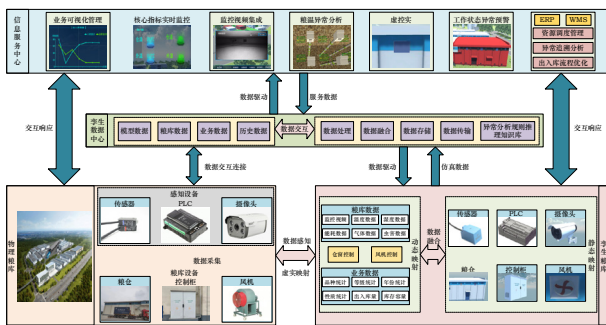


图1 粮库可视化监控与管理系统总体架构

1.1 物理粮库

物理粮库是整个系统的基础,是孪生粮库运行的动力来源。物理粮库整合平房仓、浅圆仓、油罐等各类粮仓实体资源,完成粮库库区的粮食储存与调度任务。物理粮库包括传感器、可编程逻辑控制器、摄像头等感知设备,粮库、控制柜、风机等粮库设备以及外部环境和工作人员等要素。其中,各类感知设备从粮库设备中采集温度、湿度、能耗、气体、虫害、监控视频等数据,通过OPC UA^[10]、Websocket^[11]等通用通讯协议传输至孪生数据中心,为其他服务提供基础支撑。同时,物理粮库还接收来自上层信息服务中心的控制指令,并通过物理设备完成虚控实任务。物理粮库实现了各生产要素的紧密连接及各设备间的相互配合,提升了生产要素之间的整体协作性,

为数字孪生粮库的构建提供基础支撑。

1.2 孪生数据中心

孪生数据中心是整个系统的核心枢纽,负责与物理粮库的数据连接与交互,是孪生粮库和信息服务中心的数据源。其基本原理是孪生数据中心感知并获取物理粮库设备采集的关键数据,并与业务系统中的粮食品种、等级、性质、出入库量、库存量、总容量等进行数据融合后,将多源异构数据进行处理、储存及传输至信息服务中心。其中,由于物理粮库涉及多厂商、多接口、多通讯协议的设备,且采集到的数据包括文本、视频等结构化和非结构化数据,所以需要借助OPC UA技术对数据标准进行统一,并形成对应粮温和工作状态的异常分析规则推理知识库,以支持各类分析与应用。同时,孪生数据中心还将处理后需要虚控实的信息反馈到物理粮库,支持虚控实操作的完成。孪生数据中心构建为一体化共享的数据平台,成为数据上下传输的桥梁,支持物理粮库、孪生粮库、信息服务中心之间的两两交互。

1.3 孪生粮库

孪生粮库是物理粮库的三维数字模型和粮库在虚拟环境下运行的载体,包括各类三维模型和数据的动静态映射,也是各类事件的执行主体。首先通过SolidWorks、3DMAX等三维建模软件对传感器、PLC设备、摄像头、仓房、控制柜、风机等实体设备进行精准三维模型构建,完成物理粮库的静态映射。然后基于孪生数据中心的粮库数据和业务数据,完成仓房中轴流风机、环流风机、仓窗等开关动作的双向动态映射。孪生粮库包含现实物理粮库的几何、行为和规则属性,可利用孪生数据对物理粮库的运作事件进行远程高精度同步和控制。孪生粮库还包含资源、人力、能耗、库存能力等业务信息,还可对库区进行多维度、多层次的分析,实现粮库三维可视化监控、异常预警和管理。

1.4 信息服务中心

信息服务中心是基于物理粮库、孪生粮库和孪生数据中心构建的用于服务各类用户需求的应用层,包括业务可视化、核心指标实时监控、粮温异常分析等应用。基于孪生数据实时驱动,结合虚拟三维空间和二维分析图表,用户可对仓温仓湿等核心指标、粮库异常情况、出入库量、物理现场进行实时监控,并能远程控制库区仓窗和风机。库区专家结合企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、仓储管理系统(Warehouse Management System, WMS)可以进行资源调度管理、异常追溯分析、出入库流程优化等工作,提升库区整体工作效率。通过信息服务中心,可实现各类用户对粮库多方面、各层次的监控、管理、分析与决策。

2 粮库孪生系统实现的关键技术

根据基于数字孪生的粮库可视化监控与管理系统的总体架构,本文设计了如图2所示的实现流程,并对其中的孪生体建模与轻量化,数据采集、传输与处理,虚实粮库同步映射,以及可视化监控与管理4个关键技术进行研究。

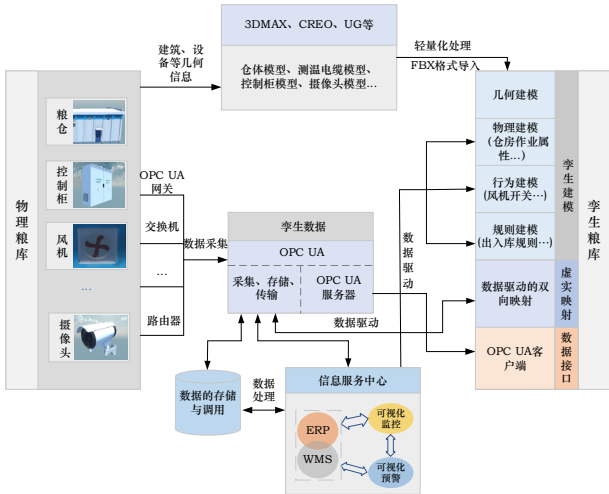


图2 粮库孪生系统的实现流程

2.1 孪生体建模与轻量化

孪生模型作为数字孪生系统的基础,其主要功能是将物理粮库中的各实体要素进行多维度、多时空尺度的描述,对粮食存储过程中的全要素、全流程进行数字化表征,从而实现对物理粮库的高度静态映射。粮库数字孪生模型可描述如下:

$$DVB = DVB^{ev} + DVB^{pe} \quad (1)$$

$$DVB^{pe} = \sum DVB_i^{pe} = DVB^{ar} + DVB^{eq} + \dots \quad (2)$$

$$DVB^{ar} = n \times DVB^{hw} + n \times DVB^{sl} + n \times DVB^{ot} + n \times DVB^{others} \quad (3)$$

$$DVB^{eq} = n \times DVB^{cam} + n \times DVB^{sen} + \dots \quad (4)$$

$$DVB_i^{pe} = \{GM + PM + BM + RM + CI\} \quad (5)$$

式中: DVB 表示所有孪生模型的集合, DVB^{ev} 表示环境要素孪生模型; DVB^{pe} 表示非环境实体孪生模型; DVB^{ar} 表示建筑类孪生模型; DVB^{eq} 表示设备类孪生模型; DVB^{hw} 表示平方仓孪生模型, DVB^{sl} 表示立筒仓孪生模型; DVB^{ot} 表示油罐孪生模型; DVB^{others} 表示其他功能房孪生模型; DVB^{cam} 表示摄像头孪生模型; DVB^{sen} 表示传感器孪生模型; GM 表示实体几何模型; PM 表示实体物理模型; BM 表示实体行为模型; RM 表示实体规则模型; CI 表示通信接口。

按照以上孪生模型描述公式在3DMAX、CEO、UG等三维建模软件中对实体、摄像头、控制柜等建筑和相关设备进行几何建模和渲染。

粮库作为一个大尺度的宏观模型,涉及模型种类多、

结构复杂,初步建立的数字孪生体三维模型的表面网格一般包含数量巨大的三角面片,这些庞大的数据量对网络传输以及基于WebGL的可视化等工作均会造成巨大压力^[12]。

为此,需要对构建的三维模型进行轻量化处理。本文首先通过3DMAX软件将模型中不必要的细节进行处理,将模型中不可见的面、边以及顶点删除,并将重复的顶点和边进行合并,形成轻量化后的FBX模型。然后将各项单体模型的FBX文件导入Unity 3D引擎平台搭建粮库场景,并采用视锥体剔除(Frustum Culling, FC)^[13]与多细节层次(Levels of Detail, LOD)^[14]技术进一步在系统运行时进行实时轻量化。FC技术通过判断模型是否在当前摄像机的视锥体内进行剔除操作,当模型不在视锥体内时则对其进行剔除,可以极大地节省渲染资源,提高系统运行流畅度,降低系统对硬件设备的依赖程度。而LOD技术则被认为是优化虚拟场景渲染速率最有效的手段之一。基于该技术,对场景中的同一个物体采用多种不同精度的模型进行展示,即在远处展示低精度模型,反之展示高精度模型。LOD技术不仅能节省高精度模型渲染的计算资源,同时能兼顾使用者的视觉效果。

2.2 数据采集、传输与处理

粮库数字孪生系统的数据集成与多源异构数据的融合是实现物理粮库与孪生粮库交互映射的连接渠道^[15]。本文提出基于OPC UA的粮库数字孪生物理信息融合系统架构,如图3所示。其中,数据采集层由粮库中的感知设备组成,如工作现场的PLC、温度传感器、湿度传感器、摄像头等数据采集和控制设备。OPC UA服务器可执行多个不同的协议驱动插件^[16],现有感知设备若集成了OPC UA服务器,则通过OPC UA通信与OPC UA服务器连接;若未集成OPC UA服务器则通过中间件或路由器与OPC UA服务器实现通信。将内外建立的OPC UA服务器和客户端服务层中内置的OPC UA服务器连接,形成OPC UA服务器/客户端(OPC UA S/C)的数据传输结构。

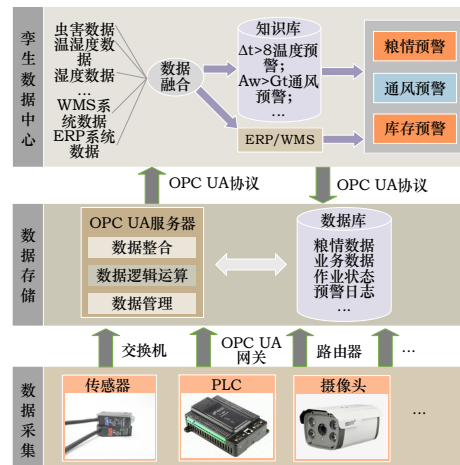


图3 粮库数字孪生物理信息融合系统架构

底层设备采集的信息在服务器中进行逻辑运算后转换为能够支持OPC UA协议的数据，并储存在数据库中。将存储的数据上传到孪生数据中心实现各系统的数据交互融合。

数据处理的核心是对粮情、设备等数据进行分析处理，以支持各类预警处理应用，为此，本文构建了如图4所示的粮库状态异常分析故障树，根据该故障树的异常规则推理知识库进行推理，可实现通风状态、温度状态、库存状态、虫情状况等可视化预警。

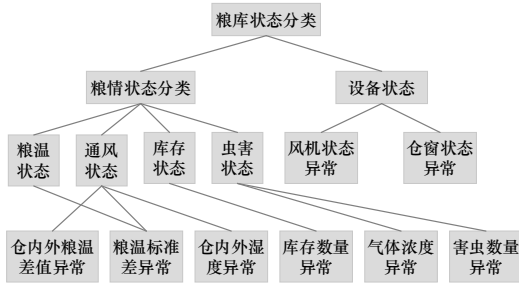


图4 粮库状态异常分析故障树

2.3 虚实粮库同步映射

虚实粮库的同步映射是粮库可视化监控与管理系统的核心内容，它将感知设备从物理粮库采集到的数据及业务系统数据通过变量绑定关系驱动孪生粮库同步运行。虚实同步映射包括模型的尺寸规格和纹理特征等要素的静态映射，行为属性和规则属性等方面的动态映射。可形式化描述为：

$$VRM = SM_i + DM_j \quad (6)$$

$$SM_i \Leftrightarrow \{DVB^{ev}, DVB^{ar}, DVB^{eg}\} \quad (7)$$

$$DM_j \Leftrightarrow \{BM, RM\} \quad (8)$$

$$BM \Leftrightarrow \{OC^{sw}, OC^{df}, OC^{cf}\} \quad (9)$$

$$RM \Leftrightarrow \{RU^{out}, RU^{in}, RU^{others}\} \quad (10)$$

$$VAR_m^p \Leftrightarrow VAR_n^t \quad (11)$$

式中： VRM 表示虚实粮库同步映射、 SM_i 表示静态映射集合、 DM_j 表示动态映射集合、 OC^{sw} 表示仓窗开关行为、 OC^{df} 表示轴流风机开关行为、 OC^{cf} 表示环流风机开关行为、 RU^{out} 表示出库规则、 RU^{in} 表示入库规则、 RU^{others} 表示其他运作规则、 VAR_m^p 表示物理粮库变量集合、 VAR_n^t 表示孪生粮库变量集合、 \Leftrightarrow 表示一对一映射关系、 \leftrightarrow 表示变量一对一绑定关系。

虚控实是虚实同步映射中的重要任务之一，是物理粮库与孪生粮库信息传递、控制与反馈的闭环过程，如图5所示为虚控实的实现流程。首先根据库区作业要求在信息服务中心的三维交互界面发起控制请求，触发控制脚本使目标动作数据传输至孪生粮库。然后控制脚本在虚拟动作层进行解析后通过通讯协议将控制命令发送给物理粮库中的

轴流风机、粮库仓窗等自动设备，并使其完成相应的通风开关动作，同时设备的控制器将其状态信号反馈至虚拟三维模型动作单元，设备状态数据驱动虚拟三维模型同步完成开关动作。

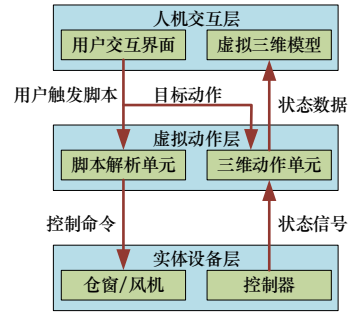


图5 虚控实流程

2.4 可视化监控与管理

可视化监控与管理是信息服务中心的核心内容，也是孪生系统构建的主要目的。基于孪生数据实时驱动，结合虚拟三维空间和二维分析图表，用户可对仓温仓湿等核心指标、粮库异常情况、出入库量、物理现场进行实时远程监控和管理。如图6所示为孪生系统可视化监控管理结构树，主要包括系统可视化模块和系统管理模块。其中，系统管理模块由专家系统、WMS与ERP三部分组成，主要用于将粮库现有的WMS、ERP系统集成到孪生系统中进行业务的可视化分析应用，库区专家还能结合业务数据和粮库现场数据优化资源并进行调度管理等。系统可视化模块包括静态可视化和动态可视化，主要实现孪生场景构建、在线视频同步和各类基于数据驱动的控制和分析应用。

基于孪生数据的实时驱动能实现粮库中环境要素、实体模型、现场粮情、仓房工作状态等的远程可视化漫游巡检，仓窗、风机等的控制，以及各类异常预警管理。

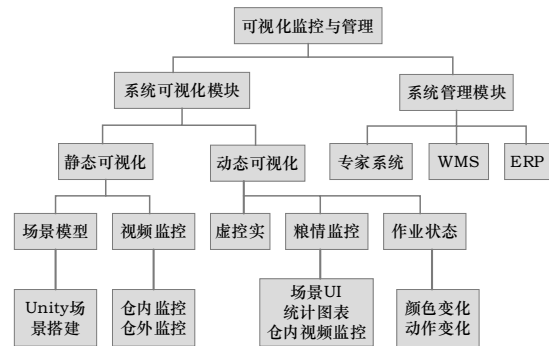


图6 孪生系统可视化监控管理结构树

3 粮库孪生系统的应用验证

本文面向某粮库库区管理需求，对粮库孪生系统进行了应用验证。该库区包含26个仓体、多个功能性建筑用房和各类传感器、自动控制设备等设施设备，库区管理主要由

粮油检验员、电子测温员、仓储统计员等完成人工巡检并上报，再由质检监管科、业务科相关管理人员分析并做出决策，最后安排对应人员实施具体操作。由于库区涉及面积广、仓体多，现有的管理方式在对虫情、粮情等进行巡检并执行开关窗、开关风机时往往需要耗费大量的人员和时长，且易受天气等环境因素的影响，经常因巡检不及时、问题反馈迟缓、信息获取不全面而导致潜在危险未被察觉，致使粮食发生霉变等损失，严重制约了库区的高效运作和管理。对基于数字孪生的粮库可视化监控与管理系统的提出迫切的需求，根据本文的研究，首先建立了该粮库的孪生体，构建了物理粮库与孪生体之间的数据流通网络，在此基础上，完成了虚实事件绑定，实现了具体的应用。

3.1 孪生体搭建

该库区包含10栋平房仓房、6个浅圆仓房、4个立筒仓房、6个油罐、3个地磅房以及其他功能性建筑和环境、粮食管控相关要素等。首先通过3DMAX建模软件对整个库区的实体进行等比例建模，并根据库区CAD图纸进行等比例布局。基于模型轻量化方法将模型进行轻量化后导入Unity 3D引擎平台，并为虚拟模型添加与实体模型相匹配的材质特征和纹理特征，在此基础上完成粮库的虚实静态映射。如图7所示为物理现场实体与其静态映射孪生体的对比情况。



图7 现场实体与静态映射孪生体对比

3.2 数据流通网络构建

孪生体的构建完成了粮库的静态映射，静态映射形成的虚拟体的运作需要动态数据作为动力进行驱动，因此需要构建数据流通网络。物理实体设备、传感器、通信接口、通讯协议以及各类可视化界面的相互联接构成整个粮库孪生系统的数据流通网络。首先通过传感器感知物理粮库以采集设备相关运行数据，并通过OPC UA通讯协议进行数据传输，经融合处理后被用于支持三维可视化展示。然后通过虚控实技术将控制指令传到物理粮库，实现数据在粮库孪生系统的双向流通。其中，粮温数据采集与可视化过程如图8所示。



图8 粮温数据采集与可视化过程

3.3 虚实事件绑定

在模型静态映射和数据流通网络构建完成的基础上，需要对粮库各类虚实事件进行绑定。利用C#开发语言编写事件脚本，实现对各类粮仓的粮情温湿度变化、虫害变化、气体变化及仓窗、风机开关和摄像头监控视频等事件与粮库孪生体中对应的孪生模型的绑定。虚实事件绑定流程如图9所示，当物理粮库的某些事件发生变化时，通过数据传输和处理同步到孪生体，完成虚实粮库同步映射。

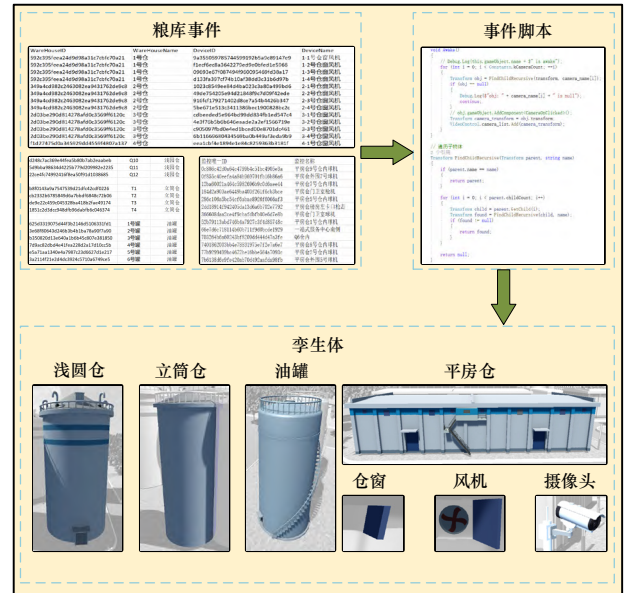


图9 虚实事件绑定流程

3.4 系统应用展示

实现虚实事件绑定后，本文根据该库区的具体应用需求，完成了该库区粮库孪生系统的应用研发，如图10所示为该系统的首页，主要包括孪生场景、底部系统功能导航菜单栏、两侧业务数据分析图表等，如图11和图12分别为系统中展示的粮情可视化监控和粮情可视化预警的情况，其中，粮情可视化监控部分可实时可视化监控虫害、气体、粮情、能耗、库存以及仓房信息等；粮情可视化预警主要由仓房作业状态预警、通风预警、温度预警、大屏数据分析以及视频监控五大核心部分组成。通过这五大部分，粮库管理人员可实现对库区各类事件的实时可视化预警和远程控制。由图12可见，孪生体仓房不同颜色代表不同工作状态，其中红色代表预警；当仓房温湿度数据异常时仓窗颜色由蓝色变化成醒目的黄色，便于管理人员及时发现并迅速作出反应，同时可通过点击孪生体中指定窗户或风机控制其开关状态，从而实现物理粮库的通风操作；当仓内粮油点位温度超过阈值温度时，对应点位颜色变为红色，警示异常发生。

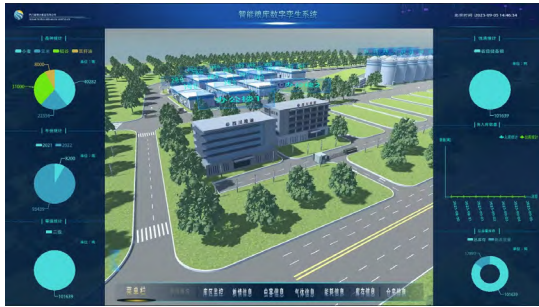


图10 粮库孪生系统首页

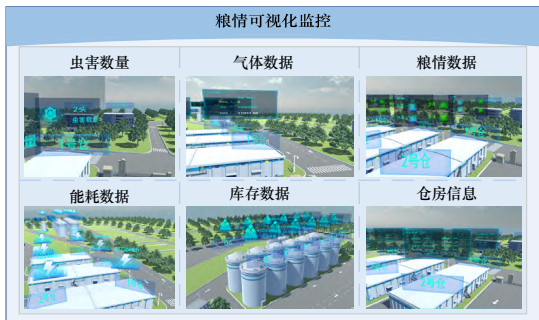


图11 粮情可视化监控的系统展示

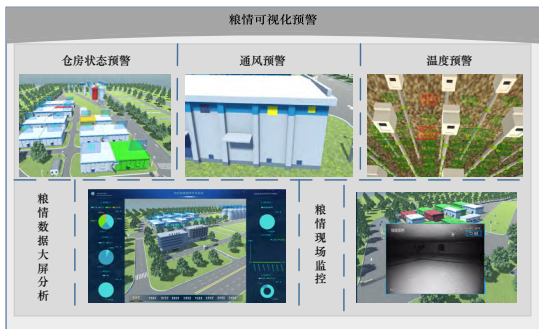


图12 粮情可视化预警的系统展示

此外，集成粮库现有的ERP和WMS云服务平台到孪生系统，为用户提供一体化粮情数据统计分析，包括粮食的品种统计、年份统计、等级统计、性质统计、近日出入库统计以及容量库存等，数据分析效果直观、可视化程度高，极大提高粮库管理工作效率。

4 结语

本文围绕某粮库现有的管理系统存在大量人工统计分析数据，粮情信息获取不及时、信息实时同步分享难、缺乏远程可视化同步监控等问题，提出了基于数字孪生的粮库可视化监控与管理架构，设计了粮库孪生系统实现路径，重点研究了其中涉及的孪生体建模与轻量化、数据采集传输与处理、虚实映射以及可视化监控与管理四项关键技术。基于总体架构和实现路径，结合某粮库管理的具体需求，针对其存在库区占地面积大、仓体众多，现有的管理方式在对粮情、气体浓度等进行巡检并执行开关窗和风

机时需耗费大量的人员和时间，且易受制于天气等客观因素，常常因巡检不及时、问题反馈迟缓、信息获取不全面而导致隐患未被发现，致使粮食发生霉变等损失等问题。研发了粮库可视化监控与管理孪生系统，在构建该粮库孪生体、孪生数据流通网络及虚实事件绑定的基础上，实现了粮情可视化监控、预警及远程控制等的应用。

通过本文的研究，实现了基于物理实时数据运行的粮库孪生系统的研发。本系统实现了在三维虚拟数字空间中完成对物理粮库全方位、全要素、全流程的实时监控和管理；通过对实时数据的深度分析和融合处理，实现了对粮情、虫情、气体浓度、能耗、粮库通风等的实时可视化预警和通风控制，实现了孪生系统虚实映射，虚实映射的双向映射。下一步将在本文研究的基础上，进一步研究基于数字孪生的粮库智能管理，结合人工智能算法如通过图像识别算法快速检测仓房虫害情况，通过循环神经网络相关算法预测仓内温度，从而实现孪生系统的智能化预警，进一步提高粮库的智能化水平。

参考文献:

- [1] 彭音音, 李江涛, 林亲录. 物联网技术在粮食仓储中粮情监测方面的应用[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(5):66-67+95.
- [2] BANGA K S, KOTWALI WALE N, MOHAPATRA D, et al. Techniques for Insect Detection in Stored Food Grains: an Overview[J]. Food Control, 2018, 94:167-176.
- [3] 邓壮来. 基于深度卷积神经网络的粮仓虫害监测系统实现[D]. 江苏大学, 2021.
- [4] 吕宗旺, 吴建军, 孙福艳, 等. 现代智慧粮库系统的设计与研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(5):79-82.
- [5] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8):1603-1611.
- [6] 聂蓉梅, 周满雅, 肖进, 等. 数字孪生技术综述分析与展望[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1):1-6.
- [7] 方荣辉, 杨淑群, 兰宁. 基于数字孪生的无人机巡检系统[J]. 制造业自动化, 2022, 44(11):98-101.
- [8] 周尔民, 程度钧, 马畅, 等. 基于数字孪生的车间调度扰动事件预测[J]. 制造业自动化, 2022, 44(9):77-82.
- [9] 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.
- [10] 熊伟杰, 郭宇, 黄少华, 等. 基于OPC UA的数字孪生车间实时数据融合与建模研究[J]. 机械设计与制造, 2022, (7):143-148.
- [11] 王宇顺. 基于数字孪生的设备运行状态远程监测技术研究[D]. 华中科技大学, 2022.
- [12] 方洛. 数字孪生生产线模型的轻量化技术研究[D]. 广东工业大学, 2023.
- [13] 舒亮, 张洁, 陈璇, 等. 面向大规模场景的数字孪生模型快速渲染方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11):3664-3672.
- [14] 丁田妹, 徐发达. 三维模型中多层次细节LOD技术研究[J]. 电子制作, 2021, (18):35-37.
- [15] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1):1-10.
- [16] 王剑, 王好臣, 李学伟, 等. 基于OPC UA的数字孪生车间信息物理融合系统[J]. 现代制造工程, 2023, (4):43-50.