

# 基于数字孪生的智能传感物流优化调度系统

李沐, 林泽楷, 刘瀚点, 张纯通, 李龙章, 肖嘉薇, 刘伟

(广东工业大学, 广东 广州 510006)

**摘要:** 本文提出了基于传感器和智能算法相结合的对自动化立体仓库系统进行存储优化的方式, 利用传感器实现数据联动与远程监控, 并搭建一数字孪生虚拟模型, 方便动作模拟仿真调试与虚实结合步骤的实现。采用灰狼算法和贪心算法想结合, 对货物摆放位置和穿梭车移动路径进行优化。实验结果表明, 传感器可以有效将数据传递到模型以进行动作联动, 并对仓库进行远程监控, 且在相同的订单要求条件下, 搭配传感器的四向穿梭车系统准时接单率相比双向提高了59%, 平均占用率提高了12%, 穿梭车使用率更均匀, 系统的鲁棒性更高, 效率更好, 体现了算法的优化性与传感器的可靠性。

**关键词:** 数字孪生;智能传感;物流

## Intelligent sensing logistics optimization scheduling system based on digital twins

Li Mu, Lin Zekai, Liu Handian, Zhang Chuntong, Li Longzhang,

Xiao Jiawei, Liu Wei

(Guangdong University of Technology)

**Abstract:** This paper presents a combination of sensors and intelligent algorithms for storage optimization of automated stereo warehouse systems, using sensors for data linkage and remote monitoring, and building a digital twins virtual model to facilitate motion simulation debugging and virtual reality integration steps. The combination of gray wolf algorithm and greedy algorithm is used to optimize the cargo placement and shuttle car movement path. The experimental results show that the sensor can effectively transfer data to the model for action linkage and remote monitoring of the warehouse, and the on-time order acceptance rate of the four-way shuttle system with the sensor increases by 59% compared with the two-way under the same order requirements, the average occupancy rate increases by 12%. The utilization rate of shuttle vehicle is more uniform, the robustness of the system is higher, reflecting the optimization of the algorithm and the Reliability of sensors

**Keywords:** digital twins;sensor; Four-way shuttle; automated storage and retrieval systems; gray wolf optimization algorithm;greedy algorithm

## 1 传感器设计背景和应用价值

### 1.1 设计背景

#### 1.1.1 工业背景

源于中国国家战略的推动，智能制造、电子商务、生物医药等产业快速发展，由此对国内供应链的产品运输过程中的成本、效率、质量和技术要求也不断提高。伴随着个性化需求和定制需求的兴起，物流系统中订单越来越多，同时订单的种类、尺寸和重量等属性也极大的差异。疫情常态化下，国内供应链的订单任务差异性大，这导致供应链物流系统的数字化程度不断提高，仓储系统作为产品从生产方到消费方的供应链中的关键环节，发挥着调度、储存、分类和包装等多方面的用途，连接着粗加工与精加工、制造与采购等各个环节，是物流中的重要节点，也是供应链中增加产品价值的核心环节。企业需要不断升级仓储物流中的自动化设备和数字化水平，降低完成任务需要的时间和运行、维护成本，提高生产效率。

仓储是物流中不可或缺的环节，但目前国内仓储系统仍存在许多可以改善的地方，例如人才缺口大、仓储布局设计不科学，仓储系统维护成本高，仓储系统柔性差，设备技术和管理方法不匹配，对比于日韩、欧美等发达国家，国内仓储行业总体水平有待提高。为达到日益增长的高频次、小批量、多种类、海量订单的运输要求，占地面积较小的智能化、数字化和自动化的密集型仓储系统被越来越多地运用在多场合。

目前仓储系统中所应用的多为双向穿梭车，其在移动上只有前后两个方向，造成仓储系统自身成本增加，与双向穿梭车不同，四向穿梭车可以前后左右四个方向移动，不借助堆垛机和提升机即可以在巷道之间移动，与双向穿梭车系统相比，四向穿梭车系统可以根据系统需求灵活设计穿梭车数量，也减少了堆垛机、提升机和穿梭车的使用。因为四向穿梭车可以在货架同一层内自由移动，到达任意货位，该系统的柔性和鲁棒性比现有的其他自动化立体仓库中都更高。四向穿梭车系统是目前自动化立体仓库系统中较为前沿的模式形态，相关的理论研究较少。若是利用传感器与四向穿梭车相结合，将极大的提高仓储效率。

### 1.1.2 数字孪生背景

在中国智能制造的背景下，数字孪生技术逐渐成为制造业企业进行数字化、智能化转型的一种新利器，数字孪生作为综合性集成融合技术，涉及跨学科知识综合应用，其核心是模型和数据基于高效数据采集和传输、多领域多尺度融合建模、数据驱动与物理模型融合、动态实时交互连接交互、数字孪生人机交互技术呈现等数字孪生基础支撑核心技术，在数字孪生技术的加持下，实现软硬件相结合，而在自动化仓储系统中，目前市场上行业多为实现硬件自动化，对于仓储数据并没有做到很好的处理，而传感器作为数据采集的重要组成部分，其作用在目前的仓储系统中的作用并不是完全体现出来，更是在面对故障时，检修困难，且在系统运行过程中，无法实时远程监控进行虚实互控。

目前数字孪生技术在物联网中应用也是十分广泛，一方面使用了数字孪生技术将实际的车间场景虚拟化，建立物理场景和虚拟场景的真实映射，另一方面通过 MQTT 协议建立了服务端和可视化前端界面，将两种技术融合在一起，对工业设备进行孪生建模的方式，将

实际场景和虚拟场景进行数据联动。

## 1.2 应用价值

### 1.2.1 实现数据联动与反馈机制，使得仓储高效化

利用传感器能够实现对仓储系统货物、穿梭车及堆垛机的数据采集，传递给数字孪生模型，同时数字孪生技术为数据处理与反馈提供一个平台，进行可视化处理，将处理结果通过协议层反馈给仓储设备，由仓储设备接收后做出相应的反应机制，提高仓储效率。

### 1.2.2 实现远程监控与画面传输，使得仓储可视化

利用传感器可以将仓储运行画面传输到电脑端，实现远程监控与画面传输，远程监控则是利用报警传感器，若出现数据异常，则向电脑端发送信号并终止运动，另一方面将画面实时传输到电脑端数字孪生平台界面，实现可视化管理。利用算法优化，实现虚实互控与软硬结合

利用算法将货物摆放位置进行合理规划，减少出入库货物中因为不同种类货物堆叠而产生的“翻箱”现象，并对穿梭车在仓库中摆放货物的路径进行规划，并通过传感器处理数据反馈给软件端，处理结果再反馈给数字孪生平台，通过协议层进行控制仓储设备运行，从而实现虚实互控的效果。

## 2 创新点与优势

针对传统物流系统运作链短路、资源整合力度差和自动化水平低等问题，搭建了立体仓库、堆垛机和穿梭车的物理模型。借助堆垛机与穿梭车的运动配合，实现了模拟工业生产中高密度立体仓库的调度优化场景。在物理模型中，利用 PC 端串口数据交互控制堆垛机的空间运动，同时通过蓝牙指令控制穿梭车的运动，实现穿梭车和堆垛机在立体仓库环境中的调度配合，在模型上类比推导出在工业生产场景中的普遍规律。

在物理模型上部署传感器，借助红外测距和图像传感器检测穿梭车移动距离与货物摆放区域，同时对货道内穿梭车移动状态进行反馈，实时监测其环境数据和运行状态，解决货物堆叠碰撞问题。并且通过兼容性强的 MQTT 通信协议技术，将物理模型与虚拟模型进行数据联动，使物理模型和环境信息尽可能真实地通过孪生技术用虚拟模型的方式呈现出来。

针对立库系统中设计方案验证难、物理实体数据复杂和各模块间耦合程度高等问题，在数字孪生仿真软件中等比例搭建了与物理模型相对应的虚拟模型。基于通讯稳定性高、数据交互低功耗的 MQTT 协议，通过数字孪生技术建立物理模型的虚拟映射和三维可视化系统。在数字孪生技术建立的虚拟模型中对货物摆放位置、穿梭车和堆垛机的配合动作进行规划，设计一合理高效的调度系统。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

本文设计一种基于数字孪生的自动化立体仓库优化调度系统，该自动化立体库能提高仓储空间利用率，并且在设备工作过程中无人化程度高，搬运工作效率高，同时系统能实时记录仓储信息，反馈更新的数据至PC端，帮助企业模拟设计车间的物流存储情况，助力制造企业更早做出合理的产品生产规划，推动制造企业的发展。

该立体仓库系统分为物理模型、虚拟模型两个模块。物理模型包括高密度立体仓库、堆垛机、穿梭车、传感模块。基于单片机的蓝牙控制与PC端串口数据指令交互，其中立体仓库为其他硬件的运行搭建了场景，堆垛机与穿梭车相配合，以实现货物的垂直移动和在不同货架库之间的水平转移，并在指令控制下将货物运输指定位置。

基于数字孪生仿真技术，本文在数字孪生软件上搭建等比例大小的虚拟模型。数字孪生技术主要是由物理模型和虚拟模型构成，通过虚实间的数据联动进行动态连接。数字孪生的5个维度结构分别是物理模型、虚拟模型、数字孪生软件（服务系统）、孪生数据以及连接，如下图所示：

中国仪器仪表学会

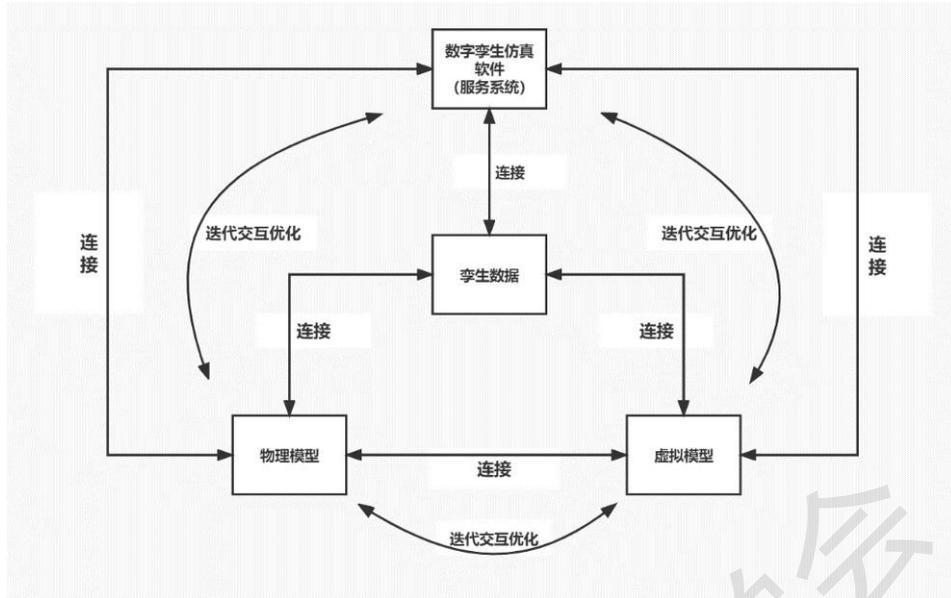


图1 数字孪生的五维结构模型

通过物理模型上部署的传感模块中的测距传感器和图像传感器，实时检测并收集穿梭车的工作状态信息、货物摆放位置信息等数据流，通过 MQTT 协议将从物理模型中获得的数据传送至服务系统与虚拟模型中，其中赋予虚拟模型实体的功能、实时状态及演变趋势等属性，并且进行仿真运动，而这三个维度的数据共同组成孪生数据，驱动数字孪生系统的运行。

在数字孪生仿真软件上对虚拟模型的运动控制进行代码设计后，提前规划货物摆放位置和小车移动路径，模拟运动过程，寻找当前状态下的最优路径解，以使得每辆穿梭车的运输路径最优。最后，将传感模块收集得出的数据显示在监控屏上，以此判断最后穿梭车将货物摆放的位置是否在预期区域内，构建一套远程监控系统。

货物摆放位置的规划算法是通过灰狼算法设计的，灰狼算法模拟了狼群分工协助的狩猎过程，凭借其具备算法本身参数少，较易实现及受外界环境因素影响小的优势，渐渐在特征提取、预测系统等领域取得广泛应用。

传统灰狼优化算法通过模拟狼群的狩猎过程实现对最优解的获取，主要包括如下步骤：

- (1) 在初始阶段，算法根据适应度函数计算每头狼的初始适应值，并将最优的前3者记作  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ ，其余个体为  $\omega$ ，狼群等级示意图如下所示：

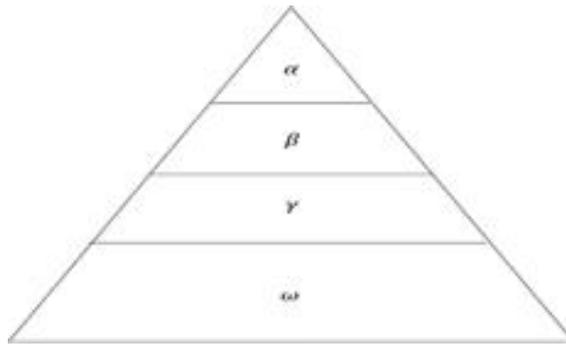


图 2 狼群等级示意图

(2) 在狩猎过程中，狼群根据距离猎物最近的  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  狼的位置，通过不断更新自己的坐标从而实

中国仪器仪表表学

现对猎物的包围。灰狼个体与猎物的距离如下式所示：

$$D = |x - p|$$

和 分别表示 次迭代时“虚拟猎物”的位置以及灰狼个体的位置，令 为算法摆动因子， 为[0,1]

1

之间的随机数。摆动因子用于处理货物的特殊性质。

$$A = 2 \times r_1$$

令  $x^{+1}$ 是算法在第  $t+1$ 次迭代时灰狼的位置， 是影响算法搜索能力的参数， 是收敛因子，  $r_2$ 是

[0,1]的随机数。

$$x^{+1} = x - A \times D \times r_2$$

(3) 在围攻阶段，每只灰狼会在自身周围区域内随机搜索，当迭代结束时，选出适应值排名前3的狼，由它们对猎物发起攻击， ， ， 狼跟踪猎物的表达式如下表表达式所示：

$$x_1^{+1} = x_1 - A_1 \times D_1 \times r_{21}$$

$$x_2^{+1} = x_2 - A_2 \times D_2 \times r_{22}$$

$$x_3^{+1} = x_3 - A_3 \times D_3 \times r_{23}$$

$x_1^{+1}$ 、  $x_2^{+1}$ 、  $x_3^{+1}$ 分别表示 ， ， 狼的位置，  $x^{+1}$ 表示灰狼将要攻击的猎物位置。

$$x^{+1} = \frac{x_1^{+1} + x_2^{+1} + x_3^{+1}}{3}$$

在本文中，对灰狼算法进行适当改进，传统算法是通过已知点确定未知点摆放位置，现在引入一收敛因子 和调整其迭代次数，使其应用于仓储系统中，预测货物摆放的最

优货道，并令同种货物摆放位置聚拢集中。收敛因子公式如下所示：

$$= \frac{2}{(1 + (8 \times -4))}$$

为需要进行迭代  
的总次数

而路径规划算法则是通过贪心算法进行设计寻优的，贪心算法是一种基于某种衡量条件约束下分级处理，从而得到系统最优解的计算模型。采用自上而下迭代方式，将所求的问题分解成局部求解的问题进行贪心选择。

## 3.2 设计方法

### 3.2.1 基于数字孪生的立体仓库优化调度系统整体模型的设计

该立体仓库优化调度系统包括实体模型，数字孪生，传感器应用三大部分。

### 3.2.2 实体模型部分

通过进入企业工厂考察，搭建出模型以模拟实际仓库中货物仓储的真实情况，包括立体仓库，堆垛机，四向穿梭机，其中立体仓库模拟真实仓库，提供货物存储的空间，为其他硬件的运行搭建了场

景，作为整个系统实验操作的基础；堆垛机与四向穿梭机相配合，作为整个实体模型中的运动组件，用以实现将货物在货架中位置的移动，同时也是以实现立库模型与数字孪生交互的重要部分。

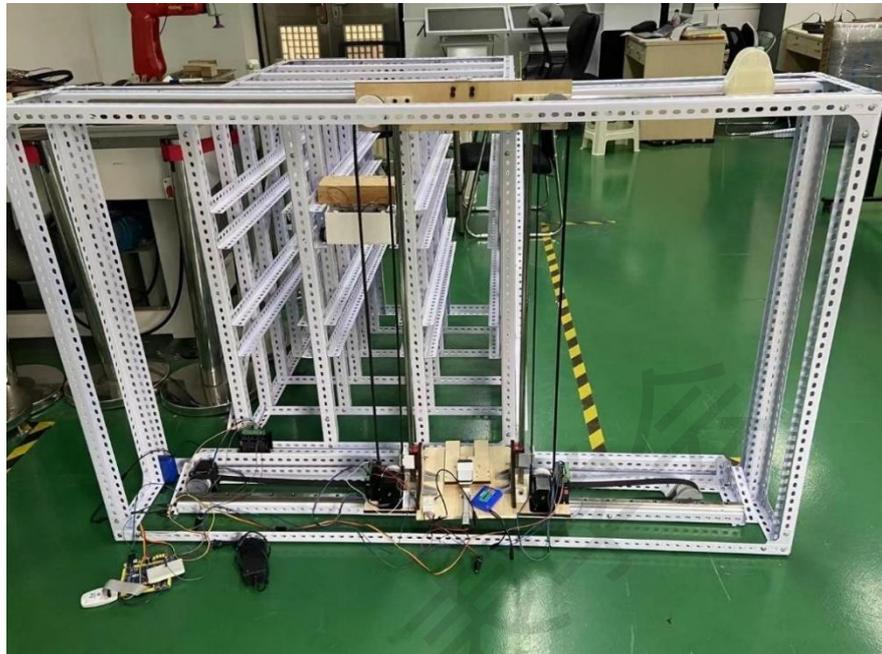


图3 堆垛机实体模型图

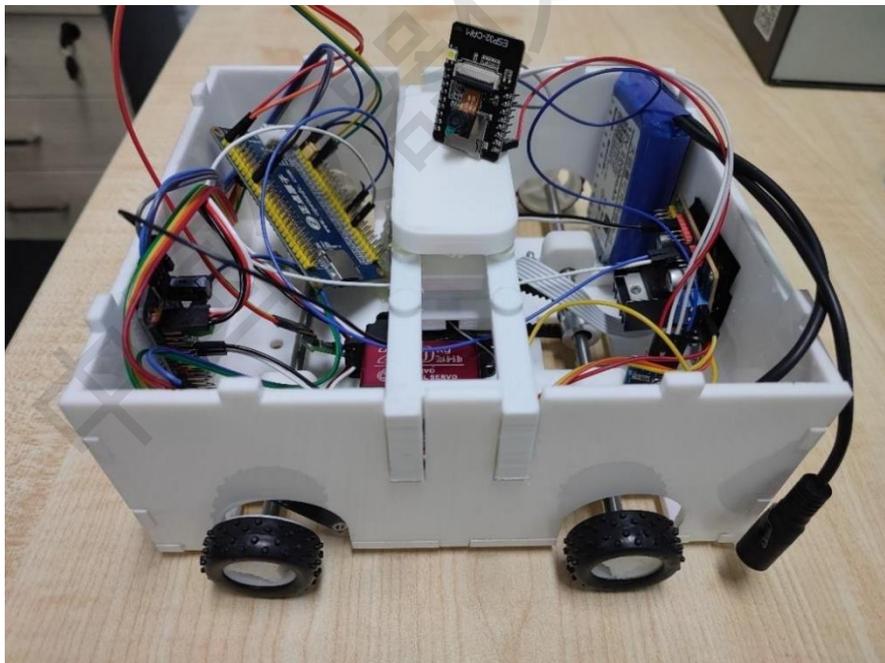


图4 穿梭车实体模型图

### 3.2.3 数字孪生部分

通过在数字孪生基础软件上搭建起与实体模型对应的数字模型，在软件上对堆垛机和穿梭车运动进行规划。

在整个系统运行中，通过传感器这个桥梁，了解货物存储状态和小车位置状态。通过基于灰狼算法设计的规划算法，对货物摆放位置进行提前规划，并通过基于贪心算法设计的规划算法，提前模拟运

中国仪器仪表表学会

动过程，寻找当前状态下的最优路径解，以使得每辆穿梭车的运输路径最优，且避免车辆路径之间的干涉。

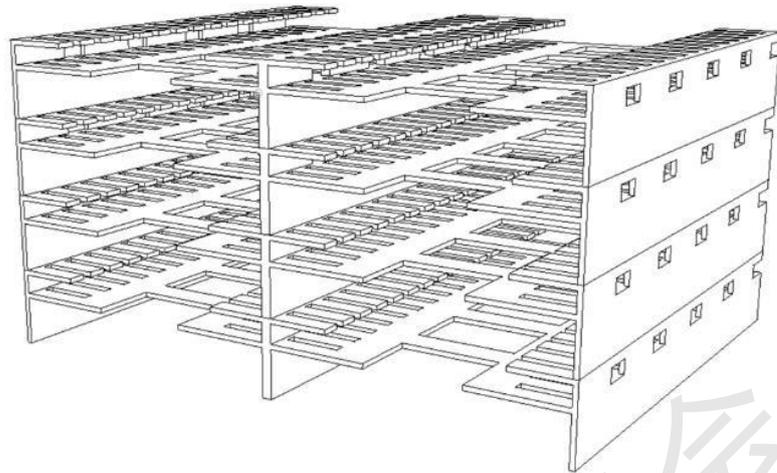


图5 立体仓库数字模型简图

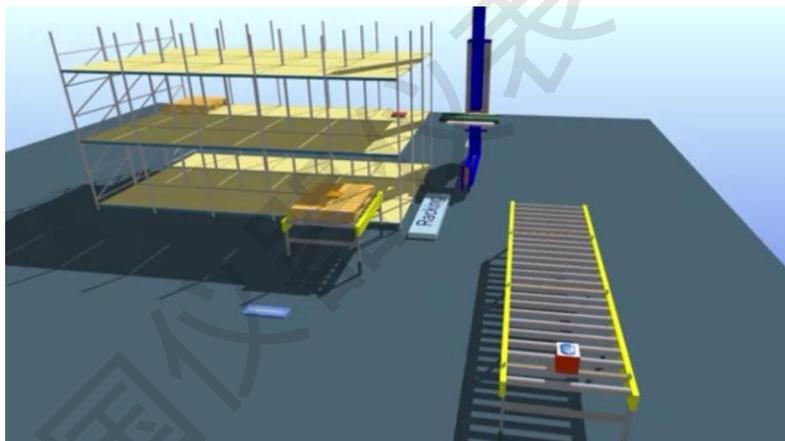


图6 立体仓库系统模型图

### 3.2.4 传感器部分

孪生数据是数字孪生最核心的要素，它源于物理实体、虚拟模型、服务系统，同时在融合处理后又融入到各部分中，为采集多元孪生数据，我们引入传感器，借助其搭建起实体立库与数字孪生系统实时交互的桥梁，通过测距传感器和图像传感器，能够实时检测穿梭车所在位置与运动状态，以及仓储中货物的情况，通过接口反馈到数字孪生系统中，以协助数字孪生系统明晰穿梭车情况和仓储容纳情况，还原仓储中的状态，构建一套能自主反应与协调的立体仓库系统。

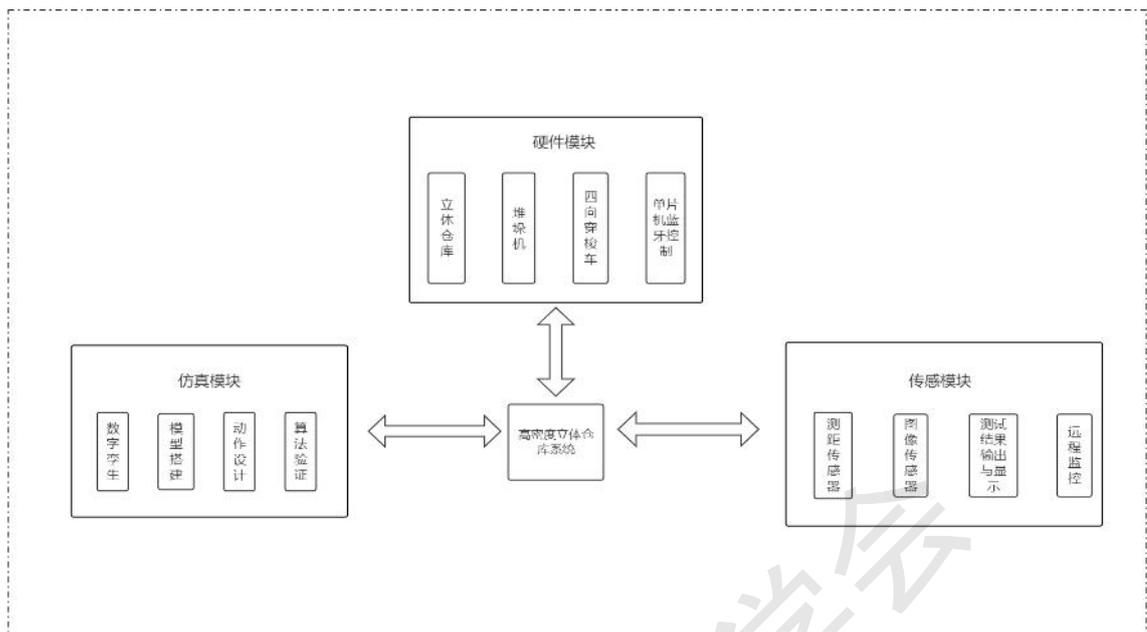


图7 立体仓库优化调度系统整体模型结构

### 3.2.5模型的应用

#### 3.2.5.1基于灰狼算法对订单货物出入库进行最优路径规划

收到入库指令后，首先通过灰狼算法确定货物要放置在货架的哪个位置。当有新增入库任务时，通过读取任务信息确定货位种类，灰狼算法通过确定仓储系统中同类货物的摆放位置，计算出当前入库任务的最优摆放位置，再由堆垛机与穿梭车按照规划路径进行货物的调度，货物入库完成后，堆垛机与穿梭车将按照规划路径返回起始位置。

收到出库指令后，穿梭车将运动至该类货物摆放区，同时利用传感器反馈货物位置数据进而利用灰狼算法确定该货物出库的最优路径，依据就近原则搬运货物，堆垛机依据指令到达指定货架层后取走货物。

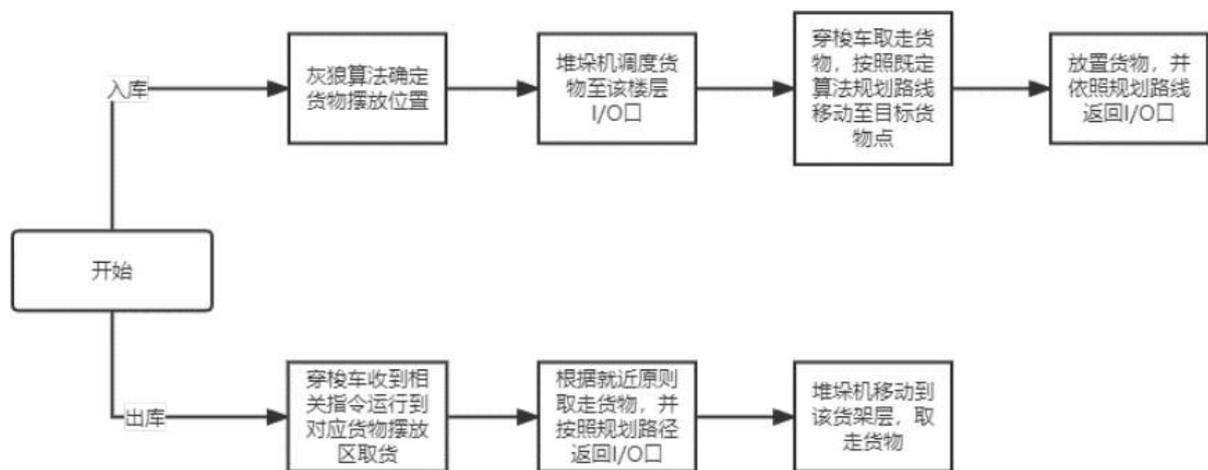


图8 货物出入库流程图

中国仪器仪表学会

### 3.2.5.2 基于数字孪生技术实现全局控制及监控

一个大型仓储系统的管理是错综复杂的，对于这样一个系统势必需要一个中枢控制系统，其控制策略的正确性及控制功能的完善度，将直接影响到整个仓储系统的工作性能，再加上人机交互的必要性，将对于仓储管理具有可视化的需求。本项目将立足于上述问题，引入数字孪生技术，以此为基础，在虚拟环境中搭建与实际仓储同步的数字模型，从而实现虚实互控和监控功能。

在仿真软件中建立仓储的虚拟数字模型，通过编程代码、参数化设计与泛化封装技术，对实际模型的动作进行封装，再通过串口通讯建立虚拟模型与物理模型主控器之间的联系，实现由仿真软件中的虚拟模型执行发送命令控制实际物理模型的过程并全程自动化控制，实现同步运行与虚实互控，无需人工干预，且在实际物理模型每执行完一个动作逻辑后反馈信息给远端仿真软件，实现远程监控，更进一步可以实时监控货物数量与状态，实现改进后的仓储系统集成自动化水平与更具高效性。

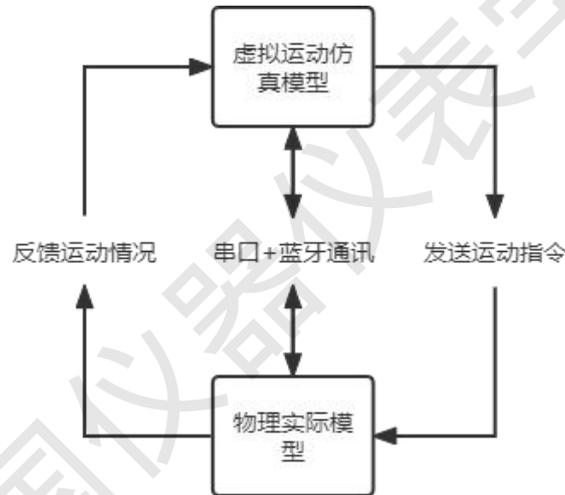


图9 虚实互控流程图

### 3.2.5.3 基于传感网络对仓储监控及报警

传感网络之于数字孪生系统，相当于感官之于人体，是数字孪生系统感受现实、获取信息的直接载体。本项目通过在模型中布置传感器形成整体传感器网络，建立起虚与实的联系，上层数字孪生系统对系统的监控，和系统中使用的各种规划算法的实现，都离不开传感网络的支持。

测距传感器和图像传感器能够实时检测小车移动的距离和移动状态，并显示在监控屏上，以此判断最后穿梭车将货物摆放的位置是否在预期区域内，构建一套远程监控系统。除此之外，将与数字孪生系统建立连接，在数字孪生系统中配置实体模型违规条件，当传感网络所测得的数据在传入系统，判断为触发越界条件时，数字孪生系统将发出报警，并触发保护条款，发送指令紧急制停实际模型，并进行一系列的保护操作。

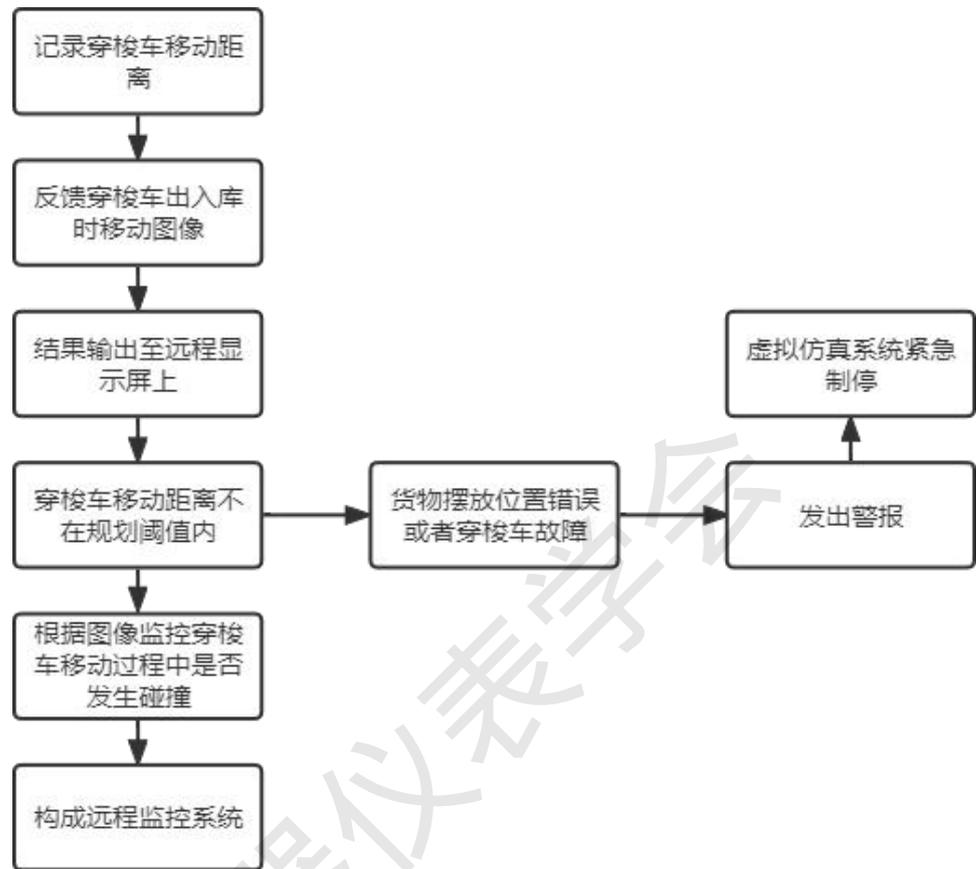
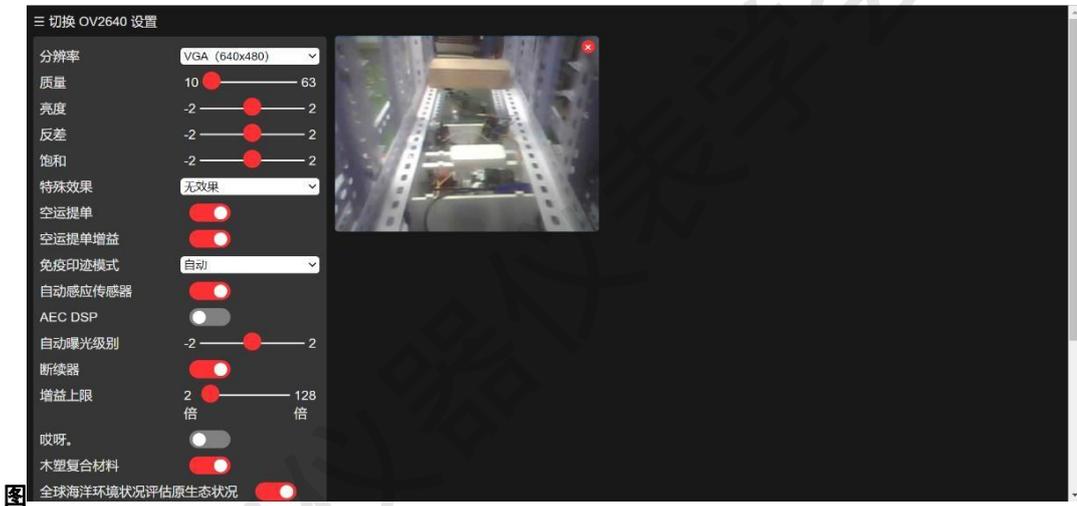
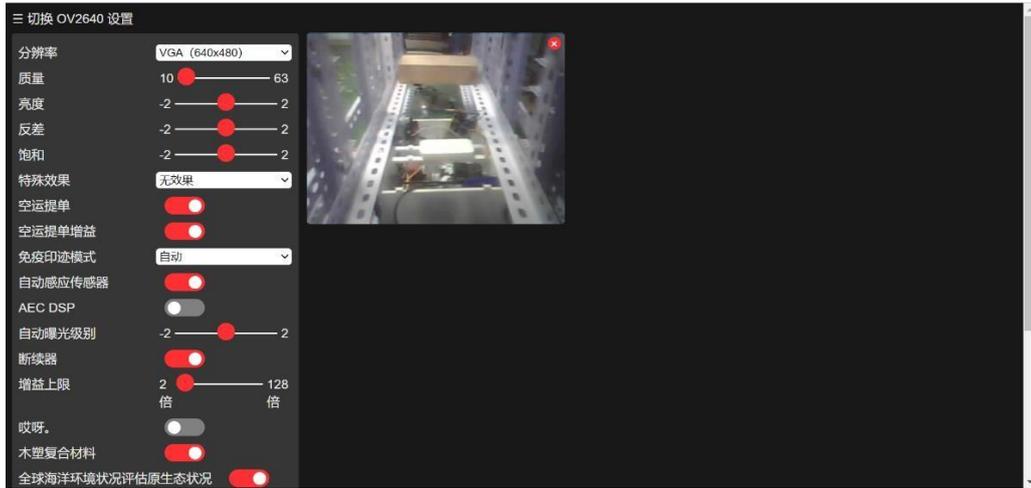


图10 传感网络系统工作流程图

## 4 实验验证方法

通过传感器我们能够得到穿梭车在立库中的位置信息和行动状态，如图 9 所示，我们可以直观的在远程得知实体立库中设备的运行情况，并且将获得的数据传入数字孪生系统中，使用系统中规划算法和自主规则将数据进行处理，得到的结果再由上位机通过串口与立库主控进行反馈，使系统具有一定的自我决策和适应能力。



11 图像传感器远程显示图

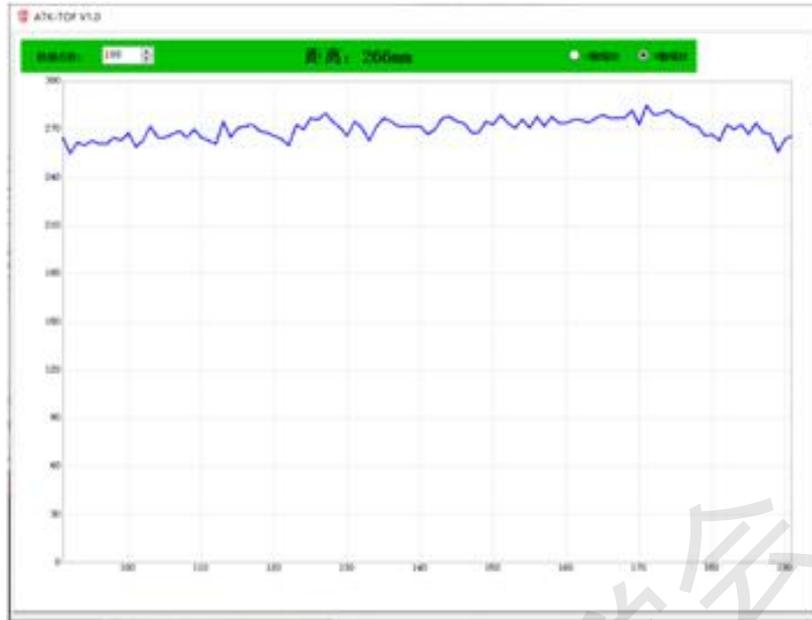


图12 距离串口输出图

仓储系统中有引入的传感系统作为基础，便能够更好的兼容额外算法模块的植入。对于本项目已引入的规划算法，我们也对其货物调度的效率问题，进行了实验，来验证其方案对于系统的运行效率能力。本项目所用于研究的实体立库设计为3层货架，每层有8条货道，每条货道有20个货位。设置在一个物流供应链中，共有24种货物类型，仓储系统遵循先进后出的调度规则。为了尽可能测试系统的运行效果，检验系统的鲁棒性，通过去企业走访，模型在企业采集得到的一个小时内的出入库任务数据下仿真，并模拟工厂内立体仓库的建设，设置四向穿梭车立体仓库每层两辆穿梭车，双向穿梭车总共六辆，不分层摆放。

利用MATLAB对双向和四向穿梭车系统分别进行了仿真建模。算法的仿真效果通过穿梭车的作业时间和堆垛机的运行数据来反映。

表2 双向穿梭车仿真数据

双向穿梭车作业时间			堆垛机运行数据	
穿梭车序号	作业总时间	设备占用率	堆垛机序号	1号堆垛机
一号车	367s	9.51%	作业总时间 (s)	3499
二号车	339s	8.79%	设备占用率 (%)	90.74
三号车	297s	7.70%	垂直方向移动距离	1403m
四号车	339s	8.79%	水平方向移动距离	284m
五号车	409s	10.61%		
六号车	935s	24.25%		

表3 四向穿梭车仿真数据

载具	1号车	2号车	3号车	2号堆垛机	3号堆垛机
作业总时间 (s)	843	832	84	136	64
设备占用率(%)	23.42	23.11	23.42	3.78	1.78

在双向穿梭车立库仿真模型中，在1小时100个出入库任务的测试压力下，系统总运行时间为3856秒。系统延迟订单次数为64次。从双向穿梭车仿真数据表格中可看出：系统中的穿梭车的总作业时间分布较为均衡，除了六号车，其余穿梭车的使用率仅占系统总作业时间的8%-10%左右，但堆垛机的设备占用率达到90.74%，远高于6号穿梭车的24.25%使用率，因此，如何更好的发挥穿梭车的潜力，打破堆垛机的运输瓶颈，是改进优化的主要问题。

将相同的出入库任务和仿真模型应用在四向穿梭车立库中，并规定系统内的四向穿梭车遵循同层内逆时针移动原则，在1小时100个出入库任务的测试压力下，系统总运行时间为3600秒，延迟接单次数为5次。穿梭车的使用率均占系统总作业时间的23%左右，堆垛机使用率明显降低。

从数据对比可知，在相同条件下，从双向穿梭车的64次延误，到四向穿梭车系统的5次延误，系统的准时接单率提高了59%；且相比于双向穿梭车立库系统，四向穿梭车使用率大大提高，平均占用率提高了12%，堆垛机占用率明显减少，穿梭车作用距离远高于双向，四向穿梭车立体仓库工作效率显著提高，鲁棒性更强。

由此我们可以得知，所引入的仓储设计方案和规划算法对仓储运行能力，相对于传统

方案有很好的提升，且在数字孪生建立模型的基础中，可以更加方便的对模型的动作进行调试，以满足不同企业对于立体仓库设计的要求，方便物流仓储系统朝着更智能化、更便捷化、更高效化的方向发展。

中国仪器仪表学会