

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518056

基于超宽带技术的胎胚先进先出系统设计方法^{*}

梁紫涵 曲海鹏

(中国海洋大学信息科学与工程学部 青岛 266590)

摘要: 针对中小型轮胎制造企业胎胚物流管理中存在的出库效率低、误差率高等问题,设计了一种基于超宽带技术的轮胎胎胚先进先出系统。该系统通过构建UWB定位网络,结合多基站冗余协作技术、质心修正算法、先进先出算法动态确定胎胚出库优先级,并采用双模显示面板为操作人员提供实时可视化指引。通过对比实验验证,系统启用后胎胚平均出库时间由3.017 min降至1.009 min,缩短约66.6%;误差率由7.38%降至0.23%,显著提升了胎胚出库准确性,且各时段出库作业稳定性也有所提升。实验结果表明,该系统有效解决了传统人工模式下胎胚过期、出库耗时及操作误差等问题,为中小型轮胎企业仓储管理智能化提供了可行方案。

关键词: 轮胎胎胚;先进先出;仓储管理;超宽带;三边定位算法

中图分类号: TN925 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5030

UWB-based FIFO system design for green tire logistics

Liang Zihan Qu Haipeng

(Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266590, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency and high error rates in green tires logistics management for small and medium-sized tire manufacturing enterprises, this study designed an UWB-based FIFO system for green tires storage and retrieval. The system integrates a UWB positioning network with multi-base station redundancy collaboration, centroid correction algorithms, and FIFO prioritization to dynamically determine the retrieval sequence of green tires. A dual-mode display panel provides real-time visual guidance for operators. Comparative experiments demonstrated that after system implementation, the average retrieval time decreased significantly from 3.017 minutes to 1.009 minutes (a 66.6% reduction), while the error rate dropped from 7.38% to 0.23%, markedly enhancing retrieval accuracy. Operational stability across different time periods was also improved. The results indicate that the system effectively resolves challenges such as green tires expiration, time-consuming retrieval, and operational errors inherent in traditional manual workflows, offering a viable solution for intelligent warehouse management in small and medium-sized tire enterprises. This research provides a practical framework for optimizing logistics efficiency and precision in the manufacturing sector.

Keywords: green tires; first-in-first-out; warehouse management; ultra wide band; trilateration algorithm

0 引言

胎胚是轮胎的雏形,通过进一步的加工、组装等工艺,才能最终形成可以正常使用的轮胎。在传统的轮胎生产中,每班需多次重复运输胎胚,员工疲劳度增大,容易出现错误和延误,无法满足大规模生产的需求。又由于缺乏有效的管理系统,传统方式下很难确保胎胚按照生产时间的先后顺序进行使用,导致部分胎胚过期,影响产品质量^[1]。

随着智能制造技术的发展,轮胎生产领域开始引入智

能物流自动化系统,为胎胚的存储和运输提供了更高效、准确的解决方案。现行的胎胚物流方式主要有两类:自动化物流和人工物流^[2]。

自动化物流中的悬挂滑线机械手模式^[3]是基于气动平衡和逻辑控制,实现重物的轻松搬运和精确定位;电动单轨系统(electric monorail system, EMS)空中小车模式^[4]是通过供电系统为小车提供电能,小车沿架空轨道行驶,借助控制系统按预设路线运行,并依据实际需求在各站点进行胎胚装卸或人员输送等操作;双循环倍速链模式^[5]其上层循

收稿日期:2025-02-12

*基金项目:国家重大科研仪器研制项目(61827810)资助

环倍速链主要用于装满胎胚的托盘向库位输送,下层循环倍速链主要用于库位的空托盘向成型机返回;单循环倍速链或滚子链模式^[6]依靠倍速链独特的滚子与链条结构,通过电机驱动链条运行,使搭载胎胚的装置以不同速度在同一循环轨道上完成运输,以适配不同工位对胎胚的操作节奏需求。自动化物流模式虽然能够大幅提升轮胎胎胚运输效率、降低运输误差率,但建设自动化物流系统成本高昂^[7],例如,一套大型轮胎成型车间的自动化物流系统建设成本可能高达数千万元,此外还存在维护成本高,对专业技术人员要求高,灵活性不足等缺点。因此,自动化物流模式仅适用于年生产量大、成型车间空间大,资金实力雄厚的轮胎制造企业。

受车间规模、物流成本的限制,在年产量 100 万条以下的中小型轮胎制造企业中,人工物流模式依然存在,人工物流指司机驾驶地面胎胚车运输胎胚的模式,操作人员可依据现场实际状况,灵活改变运输路线与顺序,及时响应生产需求;此外,投资成本低,仅需购买像小车一样的简单运输工具,操作人员也可凭借经验搬运一些因特殊设计或工艺导致形状不规则的胎胚等。但该模式存在运输效率低、人工操作准确率低、数据记录与管理不便等缺点,尤其在胎胚出库过程中,胎胚车司机需要花费较长时间寻找最适宜的胎胚出库。

鉴于人工物流模式存在的问题,本文针对中小型轮胎制造企业进行了轮胎胎胚库先进先出系统的方案设计。基于超宽带(ultra wide band, UWB)技术^[8-9]搭建数据通信网络,该网络能够实现测距信息的实时上传功能。在此基础上,运用多基站冗余协作技术^[10]与质心修正算法^[11],精确计算胎胚在库存中的位置信息。同时,系统收集胎胚的入库时间、各类映射关系等关键数据,并借助先进先出(first in first out, FIFO)算法,科学确定各型号胎胚的优先出库顺序。最终,通过双模显示模式为司机提供明确指引,辅助其顺利完成胎胚的出库操作。

为进一步提升胎胚物流效率,解决因轮胎产量扩大而产生的瓶颈问题,特别设计了对比实验^[12]。该实验针对先进先出面板开启与关闭这两种不同状态,分别对司机的出库时长和作业准确率进行精确计算与分析,对出库时长的影响因素进行分析。通过对比实验结果,深入评估不同状态下对胎胚物流效率的影响,从而为优化物流流程、提高整体效率提供有力的数据支持和决策依据。

1 系统总体设计

1.1 功能与性能要求

本系统的目标用户群体主要分为两类:胎胚车物流操作员(以下简称“操作员”)与成型车间库存管理系统管理员(以下简称“管理员”)。

操作员的核心任务是执行胎胚的入库与出库作业。为实现作业效率的最大化,需对操作员的操作流程进行精简优化。具体而言,在胎胚入库环节,应构建便捷高效的胎胚信

息录入机制,使操作员能够以最简方式完成信息录入。录入完成后,胎胚可被灵活安置于库存区内的任意空闲库位。在胎胚出库环节,操作员需在最短时间内精准定位到优先出库的胎胚,实现直接拉运,避免额外操作,以提升作业效率。

管理员则负责对胎胚库存、胎胚车使用频次以及司机人员信息进行全面管理。具体工作内容涵盖信息查询与统计分析,旨在为车间的生产管理决策提供数据支持,确保库存管理的科学性和高效性。

1.2 系统构成

本系统主要由硬件通信网络和上位机软件两大部分组成。

硬件通信网络集成了基站、定位器、交换机、扫码枪、数据库服务器、终端计算机等多种设备。该网络承担着胎胚相关数据的采集、存储与显示任务,同时具备对胎胚车位置的精准检测能力,并能将检测结果及时上传。其中,基站与定位器协同工作,为胎胚车位置检测提供基础数据;扫码枪用于快速准确地采集胎胚的相关信息;交换机保障了各设备之间的数据通信顺畅;数据库服务器负责存储采集到的各类数据;终端计算机则作为数据显示与操作的界面,方便操作人员进行交互。

上位机软件是系统的核心控制与管理平台,其主要功能包括对库存区内胎胚车位置的精确计算、库存数据的可视化呈现,以及对各类数据的查询与统计分析。通过运用先进的算法和模型,上位机软件能够根据硬件通信网络采集的数据,实时、准确地计算出胎胚车的位置;借助直观的可视化界面,将库存数据以图表、报表等形式展示,便于管理人员快速掌握库存状态。

1.3 系统架构设计

本系统架构共划分为五层,具体结构如图 1 所示。

基础设施层由多种硬件设备组成,其作用是为系统上层提供数据获取、传输、存储以及处理所需的硬件资源和网络基础环境,涵盖了从底层硬件设施到网络通信链路的全方位支撑。

从数据采集层到数据应用层均属于面向用户的软件环境。数据采集层负责收集特定类型的数据,主要包括胎胚条形码、胎胚车条形码以及测距信息。这些原始数据是系统运行和业务处理的基础。

数据处理层则承担着关键的数据加工任务,在此层完成数据条形码的解析工作,同时运用特定算法进行胎胚车位置的精确计算以及优先出库胎胚的筛选计算等操作,将采集到的原始数据转化为具有实际业务价值的信息。

数据存储层的功能是将数据处理层所产生的处理结果持久化保存至数据库中,确保数据的安全性和可追溯性。并且,依据不同的业务需求,数据应用层通过调用存储在数据库中的数据,实现用户所需的各类应用功能,为用户提供便捷、高效的服务体验,从而完成整个系统从底层硬件支撑到最终用户应用的完整流程。

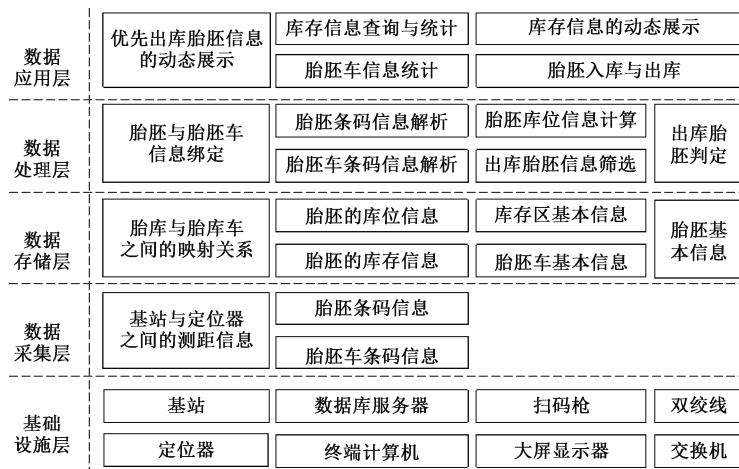


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

2 硬件通信网络设计

2.1 网络结构设计

以某一独立的库存区域为实例,通过综合运用有线与无线通信介质,将各类硬件设备相互连接,以此达成胎胚入库与出库信息的实时传输功能。图 2 展示的即为该网络结构的示意图。

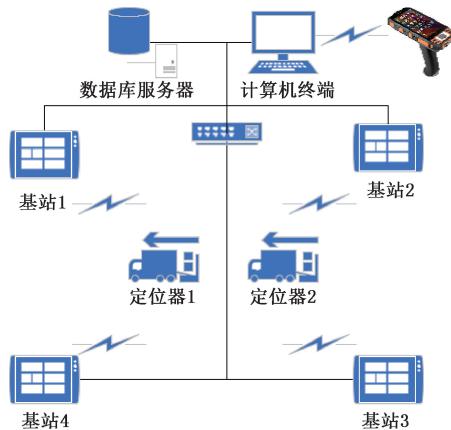


图 2 网络环境示意图

Fig. 2 Network environment diagram

在具体的网络搭建过程中,采用双绞线作为物理连接介质,实现交换机与数据库服务器、各个计算机终端以及各个基站之间的有线连接。同时,借助无线通信手段,完成扫码枪与计算机终端、定位器与基站之间的无线互联。如此一来,各类硬件设备相互协同,共同构建起一个能够实现数据实时传输的网络架构,确保库存区内胎胚相关信息的及时、准确传递,为高效的库存管理提供有力支撑。

2.2 轮胎胎胚的定位

在定位技术领域,常见的类型涵盖全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星导航系统、基

站定位、蓝牙定位、wifi 定位和 UWB 定位等。

前两种技术凭借其高精度及广泛的覆盖范围,在诸如车载导航、户外运动以及交通运输等室外场景中得到了广泛应用^[13]。然而,这两种卫星定位技术均存在一定局限性,其信号极易受到地形地貌、建筑物等遮挡物的影响,进而导致定位精度下降甚至无法定位,因此,在室内定位场景中,它们通常不作为首选技术。

基站定位技术主要服务于手机定位以及对价值较高且移动范围较大的资产进行追踪,该技术基于移动通信基站网络,具备广泛的覆盖特性,且实时性良好,能够快速响应定位请求,但基站定位的精度受基站分布密度以及信号干扰程度的显著影响(通常可达几十米)^[14]。

蓝牙定位与 Wi-Fi 定位技术则在大型商场、机场、博物馆等室内场所展现出独特的应用价值,主要用于人员与资产的定位管理。蓝牙定位技术依托蓝牙低功耗协议,具备高精度与灵活部署的优势,在室内环境下,其定位精度可达米级甚至亚米级,且蓝牙信标体积小巧、成本低廉,易于在各种室内场景中灵活布置^[15]。不过,蓝牙信号的传播距离有限,一般覆盖范围在 100 米以内,并且信号在传播过程中极易受到障碍物的阻挡而发生衰减,从而对定位精度产生不利影响。wifi 定位技术借助现有的 Wi-Fi 网络基础设施,无需额外大规模铺设定位硬件,具有部署成本低的特点。然而,其定位精度相对有限,一般在数米到数十米之间波动,尤其在环境复杂、信号干扰源众多的区域,精度下降更为明显。

UWB 定位技术凭借其独特的技术优势,在工厂车间等特定环境中得到了广泛应用。该技术能够对自动导引小车、机器人等自动化设备进行厘米级的高精度定位,进而实现对货物存储位置与搬运路径的精确管理^[16]。尽管 UWB 定位技术的部署成本相对较高,但其具备抗干扰能力強、数据传输实时性好的突出特点,相较于蓝牙技术,其

覆盖范围更大,定位精度也更为卓越。

综合考虑轮胎成型车间胎胚库存区库区分散、库位密集且存在大型仪器设备遮挡物的实际情况,UWB 室内测距技术因其厘米级定位精度、较强的抗遮挡能力以及在复杂环境下相对稳定的性能表现,成为实现胎胚精确定位的理想选择。

UWB 技术是一种使用 1GHz 以上频率带宽的无线载波通信技术。它利用纳秒级的非正弦波窄脉冲传输数据,所占的频谱范围大,数据传输速率可以达到几百兆比特每秒以上^[17]。其实现过程依托于软硬件的精密协作,硬件系统主要由基站和定位器构成,确保数据传输的实时性与准确性。基站用于接收定位器的测量距离请求,并将结果传送给服务器,为实现定位算法提供数据支持^[18]。实际使用中,根据库存区大小及基站功率(通信距离),确定基站的部署数量,一般会形成一个矩形覆盖区域。定位器主动向基站发送测距请求,基站被动接收测距请求,通过设计好的定位算法计算定位器的空间坐标。

基站与定位器分别选用大连浩如科技 HR-RTLS1 系列产品中的远距离定位基站 IGA01-EP 和定位模块 LD600。IGA01-EP 和 LD600 均采用 DecaWave 官方 DW1000 作为核心 UWB 芯片^[19],前者采用 ESP32 单片机作为主控 MCU,后者采用 STM32F103CBT6 单片机作为主控 MCU,它们均带有外壳,IGA01-EP 内置天线,支持 POE 供电和以太网通信,LD600 外置天线,内置可充电锂电池,二者均具有简单易用、高精度等特点。

2.3 系统工作原理

胎胚转运车辆结构类似火车,由牵引车与多节车厢(即胎胚车)组成。每节胎胚车均配备一部定位器,且定位器与胎胚车均进行了独立编码,并完成绑定操作,即通过定位器编码能够精准关联到对应的胎胚车。每节胎胚车具备装载不同型号多条胎胚的能力,但在单次运输任务中,每节胎胚车最多仅允许装载 4 条型号相同的胎胚,这些同型号胎胚构成一组(或一车),后续的入库及出库作业均以组为单位进行。

胎胚入库流程:司机驾驶胎胚转运车辆抵达库存区入口后,使用扫码枪依次对各节胎胚车的胎胚条形码和胎胚车条形码进行扫描。计算机系统对扫描所得的条形码信息进行解析处理,从而实现多条胎胚与对应胎胚车信息的一一映射。随后,各映射关系以及入库时间等相关信息将通过网络上传至数据库服务器并进行存储。

胎胚库存位置信息更新机制:胎胚车上安装的定位器会按照预设的时间间隔,与 UWB 信号覆盖范围内的所有基站进行一次通信,获取各定位器与各基站之间的测距结果。主基站负责汇总这些测距结果,并通过有线网络将其实时上传至数据库服务器进行存储。计算机终端借助运行上位机软件,从数据库服务器中提取测距信息,并运用定位算法进行计算,以获取各定位器的坐标(即胎胚位置

信息),同时对数据库中的相关信息进行更新。

优先出库胎胚信息获取方式:系统通过显示大屏实时向司机展示基于先进先出算法的处理结果,主要呈现胎胚型号与库位号的映射信息。司机可根据自身需求,依据这些信息快速定位到相应的胎胚车。

胎胚出库判定规则:系统依据胎胚库位的最新更新信息,判断胎胚是否位于库存区域内,以此作为是否执行出库操作的依据。

3 上位机软件设计

3.1 功能设计

上位机软件作为本系统的关键构成要素,与硬件通信网络需达成精确协同,从而确保胎胚先进先出管理策略得以有效实施。上位机软件凭借精心设计的接口,为用户提供了涵盖胎胚入库、胎胚出库、数据查询以及数据统计等一系列功能,具体功能架构如图 3 所示。

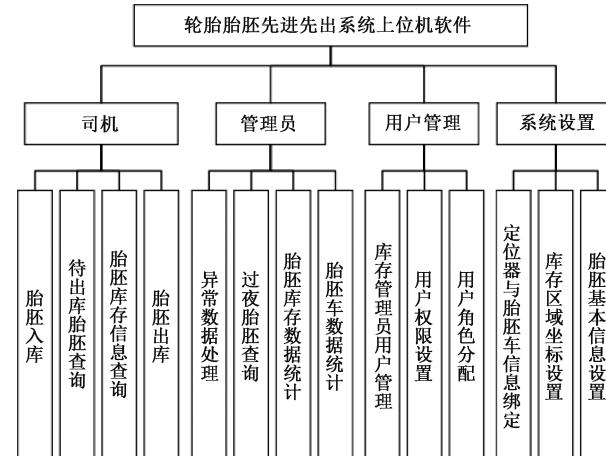


图 3 上位机软件功能框图

Fig. 3 Functional block diagram of host computer software

系统设置的核心任务是实现基础数据的初始化操作。所涉及的基础数据涵盖胎胚车条形码、定位器条形码、胎胚条形码、库区编码、库区范围、库位编码以及库位范围等,这些数据以高度整合且不可拆分的形式存在,构成了系统运行的基础数据单元。

在系统的实际运行过程中,建立上述基础数据之间的映射关系至关重要。例如,当库区编码和库位编码分别与对应的坐标范围完成绑定后,通过获取定位器的实时位置信息,系统能够精准推算出其所处的库区以及库位。

在胎胚入库环节,系统会进一步执行胎胚编码与胎胚车编码的信息绑定操作。与此同时,系统对定位器的位置信息进行实时动态更新,从而在库存区域内能够迅速、准确地定位到目标胎胚。相关的系统设置及数据映射关系如图 4 所示。

在本系统中,司机与管理员是面向应用的两类关键用户角色。司机在执行相关业务操作时,无需登录系统,便

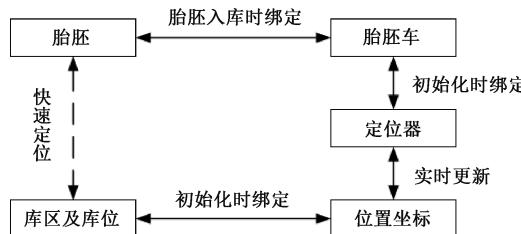


图 4 胎胚定位原理

Fig. 4 Positioning principle of green tires

可直接完成胎胚入库及出库等任务。而管理员则需由系统管理员为其分配专属账户，并赋予相应权限，同时系统管理员还负责维护管理员的基本信息。

胎胚入库作业是指胎胚自生产环节完成后，被运送至库存区内特定库位的全过程。胎胚出库作业则是指胎胚离开库区，进入下一生产工段的过程。

管理员的职责范畴不仅涵盖日常对库存数据以及胎胚车数据的查询与统计工作，还需处理异常胎胚数据。例如，若出现胎胚实际处于库区，但系统中却无相关记录的情况，管理员可依据胎胚库存状态信息的显示结果（如特殊颜色标识或警告提示），及时进行补充入库操作。此外，管理员还需定期查询并及时处理在库存中滞留时间较长的胎胚，以此降低胎胚因长时间存放而导致不可使用的概率，保障库存资源的有效利用。

3.2 数据库设计

1) 逻辑结构设计

本系统所涉及的实体包括胎胚、胎胚车、司机、定位器、库存区、库位、库存管理员以及系统管理员。各实体之间存在着特定的逻辑关联，其具体的逻辑关系如图 5 所示。

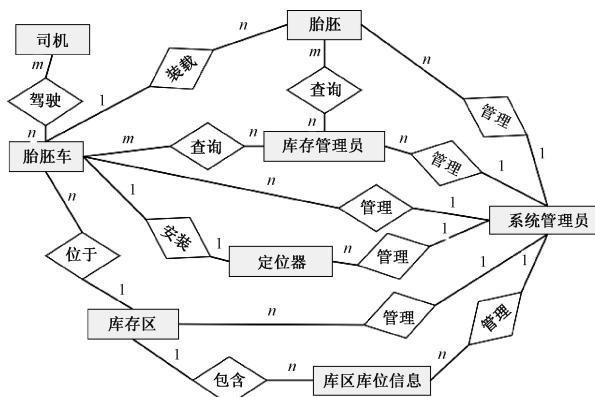


图 5 系统 ER 图

Fig. 5 System entity-relationship diagram

2) 实体属性设定

胎胚: 具备胎胚号、生产时间、所属班组以及条形码等属性，这些属性用于全面标识和追溯胎胚的相关信息。

胎胚车: 其属性包括车号、使用频次以及条形码，通过

这些属性可对胎胚车的使用状况和身份识别进行有效管理。

定位器: 拥有定位器号、X 坐标值、Y 坐标值以及条形码等属性，能够实现对其精确的空间定位和身份标识。

库区: 以库号、X 轴边界值 X1 和 X2、Y 轴边界值 Y1 和 Y2 为属性，明确了库区的范围和编号。

库位: 属性涵盖库号、地标号、X 轴边界值 X1 和 X2、Y 轴边界值 Y1 和 Y2 以及空闲状态，可精准反映库位的具体位置和使用情况。

库存管理员: 具有用户名、密码以及角色属性，用于系统对库存管理员的身份验证和权限管理。

系统管理员: 其属性为用户名和密码，主要用于系统对系统管理员的身份识别和登录控制。

先进先出数据存储架构: 先进先出数据表专门用于存储胎胚的入库和出库信息。借助 FIFO 算法对该数据表中的数据进行处理，能够从众多胎胚数据中筛选出具有优先出库资格的不同型号胎胚。具体的数据存储结构详情如表 1 所示。

表 1 先进先出数据表

Table 1 FIFO_table

字段名称	字段类型	字段长度	主键	注释
ID	int	11	是	
CarrierNo	varchar	5		车号
TireType	varchar	150		胎胚号
ZoneNo	varchar	2		库号
SlotNo	varchar	3		地标号
StorageTime	datetime		默认	入库时间
RetrieTime	datetime		默认	出库时间
State	int	1		状态

3.3 胎胚定位算法设计

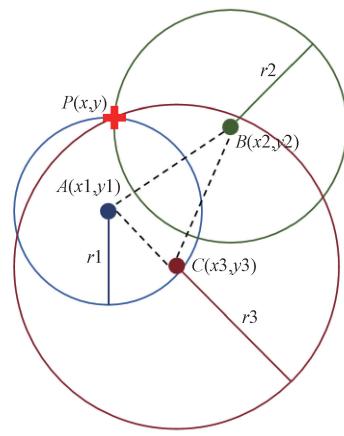
为有效协助司机快速且准确地找到具有优先出库资格的胎胚，实现对胎胚在库存区域内的精确位置定位至关重要。由于库存区域属于室内空间环境，采用诸如北斗卫星导航系统、GPS 这类主要适用于室外场景的定位技术，无法满足室内环境下对于定位精度的严格要求。

基于 UWB 测距的原理机制，主基站（基站 1）会将自身以及其他各个基站与定位器之间经过实际测量所得的距离数据，实时上传至上位机。上位机通过运行三边定位算法，对这些上传的距离数据进行深入处理与分析，从而能够精确计算并获取胎胚在库存区域内的具体位置信息，以满足实际应用中对胎胚位置精准定位的需求。

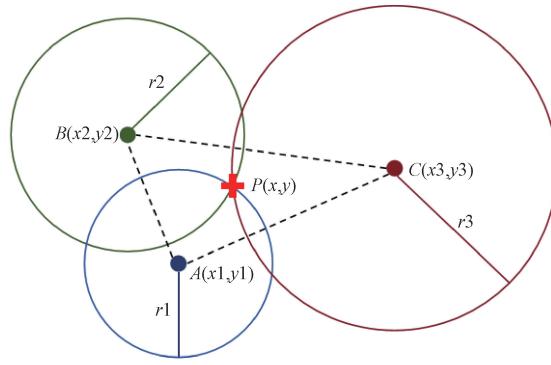
1) 传统三边定位算法^[20]

根据实际应用环境，定位算法只需要计算定位器的平面坐标 $p(x, y)$ ，而不需要考虑其三维空间坐标。以 3 个基站位置为圆心（设为 $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3,$

y3)), 基站与定位器之间的距离为半径分别绘制圆, 理论上, 3 个圆必相交于一点, 交点 p 即是定位器的位置, 如图 6 所示。



(a) P 位于 ΔABC 外部
(a) P is located outside ΔABC



(b) P 位于 ΔABC 内部
(b) P is located inside ΔABC

图 6 传统三边定位法原理模型

Fig. 6 Principle model of traditional trilateration method

根据基站部署原则(4 个基站构成一个矩形区域), 定位器应位于矩形区域内, 因此图 6(a) 的情况一般不会发生。

建立方程组, 如式(1), 必有唯一解, 如式(2), 其中 S 为 ΔABC 的面积。

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = r_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = r_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = ((r_2 - r_1)x_1 + (r_3 - r_1)x_2 + (r_2 - r_3)x_3)/(2S) \\ y = ((r_2 - r_1)y_1 + (r_3 - r_1)y_2 + (r_2 - r_3)y_3)/(2S) \\ S = 1/2 | x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1 - x_1y_3 - x_2y_1 - x_3y_2 | \end{cases} \quad (2)$$

2) 改进的三边定位算法

障碍物、噪声干扰^[21]和多径效应^[22]等现象的存在, 会影响定位精度, 将导致图 6 中 3 个圆无法相交于一点, 如图 7 所示, 3 个圆有 6 个交点($p_1 \sim p_6$), 甚至有圆彼此相离的情况, 因此, 需要对传统三边定位算法进行改进。

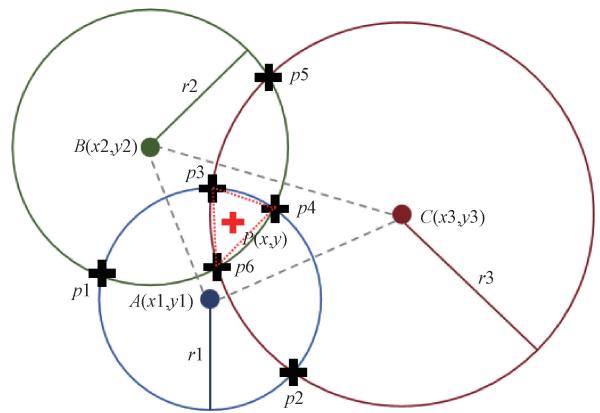


图 7 改进的三边定位算法模型

Fig. 7 Improved trilateration algorithm model

改进的三边定位算法步骤如下:

(1) 定位器与基站之间距离的确定: 计算定位器与基站之间在 30 min 内历史距离的平均值, 以及每个历史距离与平均值的差值, 进而得到标准差, 并筛选出平均值 ± 0.5 个标准差范围内的数据点, 根据算术平均数法确定中心点, 进而确定定位器与基站之间的距离。

± 0.5 个标准差的确定: 通过对选用定位产品在距离 150 m 范围内多次实测, 统计结果显示定位精度介于 $\pm 0.04 \sim \pm 5.93$ m, 标准差均值为 0.66, 为了满足 ± 0.3 m 定位精度要求, 根据式(3)得到系数 m 约为 0.5。

$$\text{均值 } m \times \text{标准差} \leqslant \text{实际距离 } \pm 0.3 \quad (3)$$

(2) 定位器坐标的确定: 在图 7 中, 已知 ΔABC 各点坐标, 可计算得到 $p_1 \sim p_6$ 六个交点坐标, 再求两两交点之间的距离, 从中选择能够构成三角形的最短 3 个距离对应的交点, 如图 7 中的交点 $p_3(x_{p3}, y_{p3})$ 、 $p_4(x_{p4}, y_{p4})$ 、 $p_6(x_{p6}, y_{p6})$, $\Delta p_4 p_3 p_6$ 的质心 $p(\frac{x_{p3} + x_{p4} + x_{p6}}{3}, \frac{y_{p3} + y_{p4} + y_{p6}}{3})$ 为定位器的坐标。

(3) 特殊情况处理:

若 3 个圆无交点, 即它们彼此相离, 则放弃此次定位, 等待下一时刻测距信息再重新定位; 若两圆相离, 则在一定范围内($\pm 5\%$, 项目对定位精度的要求 ± 0.3 m/定位器最低定位精度 ± 5.93 m ≈ 0.051)修正该圆半径, 直至重新变成三个圆两两相交的情况, 可以继续采用三角质心算法进行定位, 如图 8(a)中的圆 C, 虚线为修正后的圆; 若无法修正, 则使用基站 4 测距信息, 如图 8(b)所示, 随机放弃 B 或 C 的距离, 返回步骤 2 继续处理; 引入基站 4 后, 若依然出现任意 3 个圆即使修正后也无法相交于 6 个交点, 则放弃此次定位, 等待下一时刻测距信息收到后再重新定位。

3.4 先进先出算法设计

不同型号的胎胚信息涵盖丰富内容, 主要有胎胚车车号、胎胚编号、库区编号、库位地标号、入库时间以及库存

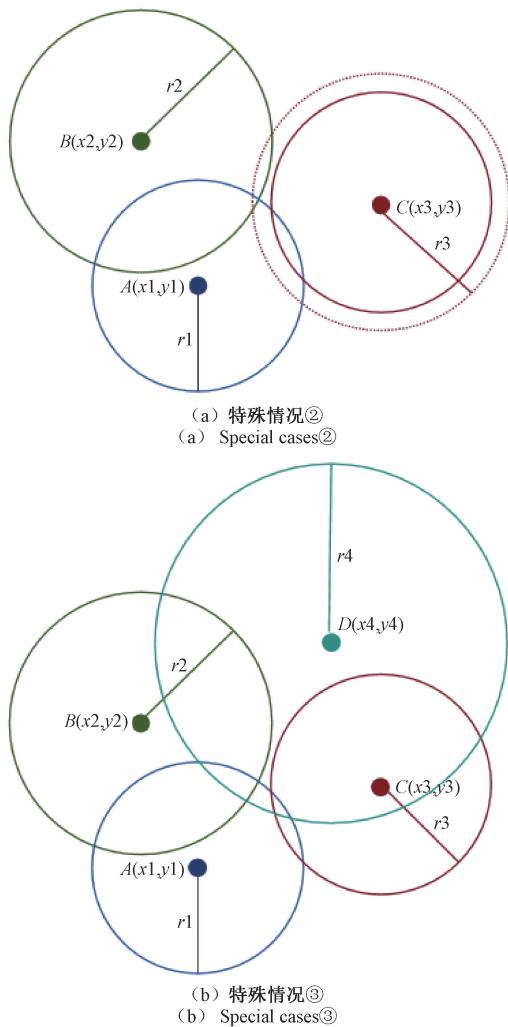


图 8 定位器位置判定示意图

Fig. 8 Schematic diagram of locator positioning

状态等关键数据项。通过设计的 FIFO 算法,对胎胚的出入库流程进行有效管理,严格遵循先入库的胎胚优先出库的原则,以此充分保障胎胚在使用过程中的时效性,避免因长时间存放导致胎胚性能下降或失效等问题。

与此同时,为进一步提高胎胚的定位精准度和出库操作效率,在满足胎胚使用时效性要求的合理范围内,系统赋予用户一定的自主选择权。用户可以从最多 3 个同一型号的胎胚中,根据实际需求和操作便利性,灵活选择其中一个进行出库操作。FIFO 算法的具体执行流程如图 9 所示,该流程详细展示了从胎胚入库信息记录、库存状态监控到出库决策制定等一系列关键步骤。

3.5 双模显示面板设计

先进先出面板运用双模显示模式进行设计,该面板涵盖两个功能各异的区域,具体情况如图 10 所示。其中,图形化显示区域主要用于直观呈现胎胚在库存空间内的实际位置分布。依据实际的应用场景特点,此图形化显示区域进一步细分为 A 区、B 区和 C 区,以便更精准地定位和

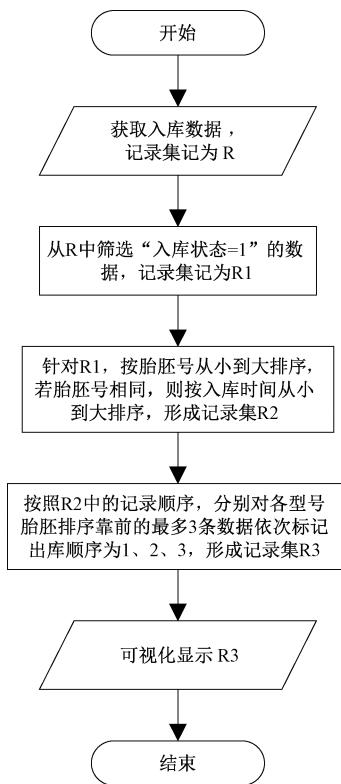


图 9 FIFO 算法流程图

Fig. 9 Flowchart of the FIFO algorithm

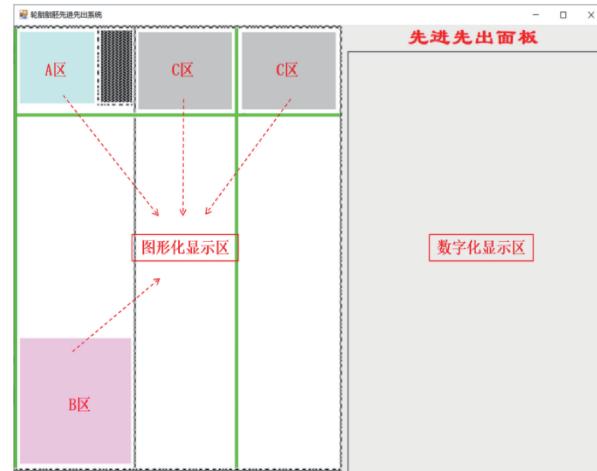


图 10 先进先出双模显示面板

Fig. 10 FIFO dual-mode display panel

展示不同位置的胎胚信息。而数字化显示区域则采用列表的形式,清晰罗列优先出库胎胚的具体型号以及精确位置信息,为司机人员提供详细且便于查阅的数据支持。

4 实验

4.1 系统部署

在 A 区、B 区和 C 区,分别部署了 4 个基站、1 台计算机以及 1 块显示大屏。这些设备通过交换机进行连接,共

同构建起一个数据通信网络,以实现设备之间的数据交互与传输。

每辆胎胚车均配备了一个定位器以及一个移动电源。其中,定位器内置有充电电池,该电池能够支持定位器连续工作约 20 h。当借助所配置的容量为 60 000 mAh 的移动电源为定位器持续充电时,定位器可实现约 1 个月的连续稳定工作。一旦移动电源电量不足,管理人员仅需对其进行备用移动电源的更换操作,即可确保定位器的正常运行。系统的具体部署情况如图 11 所示,该示意图详细展示了各区域设备的分布以及连接方式。

定位器与移动电源需安装在胎胚车的侧下部。在安装过程中,应专门设计一款固定缓冲装置。该装置一方面用于将定位器及移动电源稳固地固定于胎胚车侧下部,避免因车辆行驶过程中的震动、颠簸等因素导致设备位移、脱落;另一方面,其缓冲功能可有效减轻车辆行驶过程中产生的机械冲击力对定位器及移动电源的影响,防止设备因受到过度冲击而损坏,确保设备在车辆运行过程中能够稳定工作。

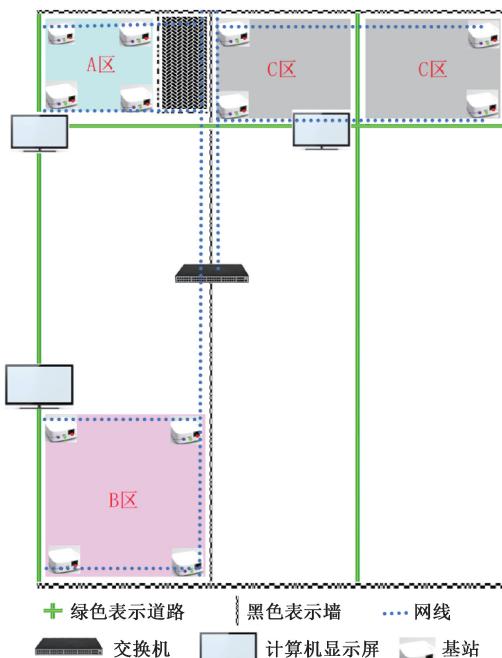


图 11 系统部署示意图

Fig. 11 Schematic diagram of system deployment

4.2 实验设计

1) 实验环境

在某轮胎制造企业内,为切实保障实验进程不会对企业的正常生产运营秩序产生干扰,特意在维持企业常规生产节奏的基础上开展相关实验工作。该企业在日常生产中,轮胎产量稳定维持在约 600 车/日,经换算,对应的胎胚数量约为 2 400 条/日。其成型车间配备有 160 辆胎胚车,设有 3 个库区,3 个库区共用单一通道节点作为出入口,该

通道节点同时具备入口与出口的双重功能。整个成型车间共计拥有 114 个库位,且配备 4 辆牵引车,由 12 名胎胚车司机承担作业任务。此外,为确保实验数据能够得到准确记录与收集,专门安排了 12 名实验数据记录人员。本次实验持续时间约为 720 h,在实验期间,始终保持车间内的温度、湿度、照明等环境条件恒定不变,每日的轮胎产量也相对稳定,所使用的胎胚车、牵引车等物流设备均保持一致,并且参与实验的操作人员亦维持固定,未作更换。

2) 对比实验

(1) 实验目的

在轮胎生产流程中,针对胎胚出库环节,旨在精准辨析启用先进先出系统与未启用该系统两种情形下,在胎胚出库耗时以及出库精准度这两个关键维度所呈现的差异。

(2) 确定实验变量

自变量:是否开启先进先出系统显示大屏,分为“使用系统”和“不使用系统”两个水平。

因变量 1 出库时间:以牵引车自唯一的库口驶入库区,挂载胎胚车后,再次返回至该库口这一完整运输流程所耗费的时间衡量。

因变量 2 胎胚出库误差率:通过实时检查应出库胎胚与实际出库胎胚的误差率体现。

(3) 选择实验对象与样本量

实验对象:160 辆胎胚车、3 个库区、114 个库位、4 辆牵引车以及 12 名胎胚车司机。

样本量确定:考虑到车间的日常产量和出库作业的重复性,以连续记录 30 个自然日内的物流数据作为样本。

(4) 设计实验组与对照组

对照组:选择车间正常生产且关闭先进先出系统显示大屏的时间段(奇数日期)作为对照情况。在此期间,出库作业按照现有的人工经验和常规流程进行,人工记录胎胚出库信息。

实验组:在车间正常生产的另一时间段(偶数日期)开启先进先出系统显示大屏。该大屏显示了各型号胎胚优先出库的库存位置信息,司机按照系统提示进行出库作业。

(5) 确定实验步骤与流程

实验前准备:对先进先出系统进行安装、调试,确保其正常运行,并对司机进行系统使用培训,使其熟练掌握系统操作方法。对所有参与实验的胎胚车进行全面检查和维护,保证其性能良好且处于相同初始状态。建立统一的数据记录标准和表格,培训数据记录人员,使其明确记录的内容、时间节点和方法。

对照组运行:在未开启显示大屏的时间段,司机按照传统方式进行胎胚出库。数据记录人员实时记录每次胎胚运输的起始时间、到达时间、出库胎胚正确性情况。每班次工作结束后,统计当前班次出库记录总数及正确出库记录数,计算各条出库记录出库时间。

实验组运行:在开启显示大屏的时间段,司机依据信息指引进行出库作业。数据记录人员的工作与对照组相同。

实验后整理:实验结束后,对收集到的数据进行整理和汇总,确保数据的完整性和准确性。

(6) 数据收集与分析方法

数据收集:数据记录人员的记录结果。

描述性统计分析:分别计算实验组和对照组的胎胚平均出库时长、胎胚出库误差率均值,直观了解两组数据的集中趋势。

4.3 实验数据分析

共收集胎胚出库记录数据 18 037 条,不同班次数据统计结果如表 2 所示。

表 2 班次特征描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of shift characteristics

变量	总出库量		平均出库时间		错误出库量	
	/车	对照组	/min	对照组	实验组	/车
班次	出库时长 t/min	对照组	实验组	对照组	实验组	对照组
	$t \leq 0.5$	17	141			1
	$0.5 < t \leq 1.5$	52	2 638			3
	$1.5 < t \leq 2.5$	290	80	3.023	0.997	12
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 015	9			101
	$3.5 < t \leq 4.5$	304	0			13
早班	$t > 4.5$	83	0			3
	$t \leq 0.5$	33	230			1
	$0.5 < t \leq 1.5$	92	3 092			1
	$1.5 < t \leq 2.5$	403	49	2.905	0.973	11
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 509	0			53
	$3.5 < t \leq 4.5$	198	0			5
白班	$t > 4.5$	66	0			0
	$t \leq 0.5$	0	96			0
	$0.5 < t \leq 1.5$	32	2 654			2
	$1.5 < t \leq 2.5$	289	87	3.138	1.063	12
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 078	55			7
	$3.5 < t \leq 4.5$	368	12			54
晚班	$t > 4.5$	155	0			2
	$t \leq 0.5$	0	96			0
	$0.5 < t \leq 1.5$	32	2 654			1
	$1.5 < t \leq 2.5$	289	87	3.138	1.063	54
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 078	55			1
	$3.5 < t \leq 4.5$	368	12			317
对照组	$t > 4.5$	155	0			0
	$t \leq 0.5$	0	96			0
	$0.5 < t \leq 1.5$	32	2 654			0
	$1.5 < t \leq 2.5$	289	87	3.138	1.063	57
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 078	55			0
	$3.5 < t \leq 4.5$	368	12			16
实验组	$t > 4.5$	155	0			0
	$t \leq 0.5$	0	96			0
	$0.5 < t \leq 1.5$	32	2 654			0
	$1.5 < t \leq 2.5$	289	87	3.138	1.063	0
	$2.5 < t \leq 3.5$	2 078	55			0
	$3.5 < t \leq 4.5$	368	12			0

1) 胎胚平均出库时长



图 12 胎胚平均出库时长

Fig. 12 Average retrieval time of green tires

图 12 给出的两组不同情形下各班次的平均出库时长,对对照组和实验组的胎胚平均出库时长也进行了总体统计与分析。对照组共记录了 8 984 次胎胚出库事件,其

平均出库时长为 3.017 min,标准差为 0.797。实验组共记录了 9 143 次胎胚出库事件,其平均出库时长为 1.009 min,标准差为 0.405。结果表明,系统使用后,缩短了约 66.6% 的平均出库时长,且胎胚出库作业更为稳定,出库时间受班次干扰的程度相对较低。

2) 各班次的出库误差率

图 13 表明,系统使用前,班次的胎胚出库误差率波动明显,且晚班误差率尤为严重,约为 15.61%,可能存在晚班工作人员疲劳度较高、操作流程执行不严格的情况;根据表 2,系统使用前后的总体(不区分班次)出库误差率分别为 7.38% 和 0.23%。整体来看,先进先出系统对控制胎胚出库误差率方面作用明显,且出库作业稳定性增强,在提升出库准确性(99.8%)方面效果显著。

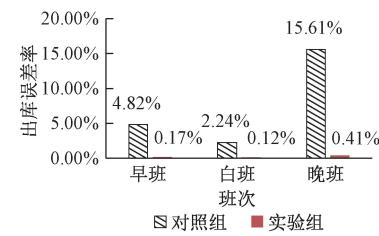


图 13 各班次的胎胚出库误差率

Fig. 13 Error rate of green tire retrieval per shift

3) 不同出库时长与出库误差率的关系

图 14 表明,在系统投入使用之前,当胎胚出库时长处于 2.5~3.5 min 区间时,出库误差率呈现较高水平,达到 71.04%。而在引入系统之后,出库误差率较高的情况则出现在出库时长为 0.5~1.5 min 的区间内,该区间出库误差率为 61.90%。经分析,造成这两种情形下出库误差率相对较高的主要因素是,在各自对应的出库时长范围内,胎胚的出库数量相对其他时长区间为最多。此现象表明,出库数量与出库误差率之间可能存在某种关联,系统的应用虽对出库误差率产生了影响,但出库数量这一因素在出库误差率的变化中仍起着重要作用。

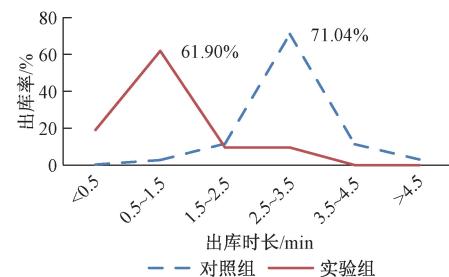


图 14 不同出库时长与出库误差率的关系

Fig. 14 Relationship between retrieval time and error rate

4) 不同出库时长与出库率的关系

图 15 表明,在未启用该系统时,胎胚于出库时长处于 2.5~3.5 区间内,其出库率达到相对较高水平,为 73.49%。而在引入并应用该系统后,出库率的相对峰值出现在出库

时长处于 0.5~1.5 区间,此区间内胎胚出库率高达 91.7%。这一数据变化直观反映出系统使用前后,较高出库率所对应的出库时长区间发生了明显转移,说明该系统对胎胚出库过程的时间效率及分布规律产生了实质性影响。

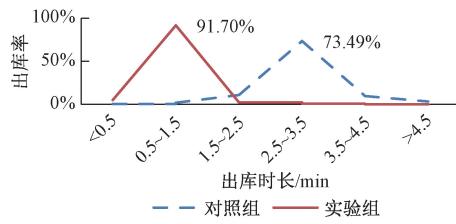


图 15 不同出库时长与出库率的关系

Fig. 15 Relationship between retrieval time and retrieval rate

4.4 系统运行结果

在某一特定时刻,先进先出数据表中的部分数据内容呈现情况如表 3 所示。在位置信息中,对于那些 *_Z 值为 -100 的数据,其代表着在该数据记录情境下,仅对各定位器在水平平面内的二维坐标状况予以考量。

依据胎胚入库时间所遵循的先进先出原则,先进先出

面板所呈现的显示结果如图 16 所示。在图形化显示区域(面板左半幅),运用半径各异的实心圆来直观标示胎胚的优先出库顺序,其中,实心圆半径越大,则该胎胚的出库优先级越高,这种表示方式有助于司机迅速判定胎胚的具体位置。

以型号为 T44 的胎胚为例,在优先出库序列中,最先出库的 3 个胎胚均处于 B 区。从图中可以清晰地观察到,这 3 个胎胚所对应的实心圆半径各不相同,而那些未作特殊注释的实心圆,则表明其所代表的胎胚并不在最先出库的序列当中。

与此同时,在数字化显示区域,以列表的形式详细展示了优先出库胎胚所在的库区信息。仍以 T44 型号胎胚为例,其最优先出库的 3 个胎胚均明确显示位于 B 区,为操作人员提供了精确且直观的信息指引。

5 结 论

尽管系统取得了显著成效,但实际应用中仍存在部分司机出库作业操作不规范、定位器偶发断电等问题,未来可通过加强人员培训、优化设备供电方案进一步提升系统

表 3 某一特定时刻先进先出数据表中的部分数据内容

Table 3 Partial data snapshot of FIFO_table at a specific time

工装号	胎胚号	入库时间	A_X	A_Y	A_Z	B_X	B_Y	B_Z	C_X	C_Y	C_Z	位置状态	库存状态
A1138	T44	2025/2/8 19:36:08	161	160	-100	161	160	-100	161	160	-100	A	1
A1131	T47	2025/2/8 19:35:58	61	108	-100	61	108	-100	61	108	-100	A	1
A1111	T45	2025/2/8 19:36:32	116	20	-100	116	20	-100	116	20	-100	A	1
A1101	T19	2025/2/8 19:36:08	117	125	-100	117	125	-100	117	125	-100	A	1
A1087	T21	2025/2/8 19:36:01	94	55	-100	94	55	-100	94	55	-100	A	1
A1071	T32	2025/2/8 19:36:05	172	142	-100	172	142	-100	172	142	-100	A	1
A1057	T47	2025/2/8 19:35:59	149	73	-100	149	73	-100	149	73	-100	A	1
A1047	T36	2025/2/8 19:36:23	837	105	-100	837	105	-100	837	105	-100	A	1
A1033	T7	2025/2/8 19:36:06	128	108	-100	128	108	-100	128	108	-100	A	1
A1158	T31	2025/2/8 19:36:08	170	657	-100	170	657	-100	170	657	-100	B	1
A1142	T47	2025/2/8 19:36:01	249	744	-100	249	744	-100	249	744	-100	B	1
A1128	T44	2025/2/8 19:36:05	226	675	-100	226	675	-100	226	675	-100	B	1
A1124	T9	2025/2/8 19:36:02	149	797	-100	149	797	-100	149	797	-100	B	1
A1104	T48	2025/2/8 19:36:23	204	709	-100	204	709	-100	204	709	-100	B	1
A1094	T22	2025/2/8 19:35:59	205	814	-100	205	814	-100	205	814	-100	B	1
A1050	T46	2025/2/8 19:36:02	238	762	-100	238	762	-100	238	762	-100	B	1
A1037	T10	2025/2/8 19:35:59	215	692	-100	215	692	-100	215	692	-100	B	1
A1030	T9	2025/2/8 19:36:01	303	381	-100	303	381	-100	303	381	-100	B	1
A1026	T24	2025/2/8 19:35:58	216	797	-100	216	797	-100	216	797	-100	B	1
A1013	T40	2025/2/8 19:36:38	193	727	-100	193	727	-100	193	727	-100	B	1
A1136	T20	2025/2/8 19:36:27	560	55	-100	560	55	-100	560	55	-100	C	1
A1133	T46	2025/2/8 19:36:01	537	881	-100	537	881	-100	537	881	-100	C	1
A1130	T12	2025/2/8 19:35:57	638	38	-100	638	38	-100	638	38	-100	C	1

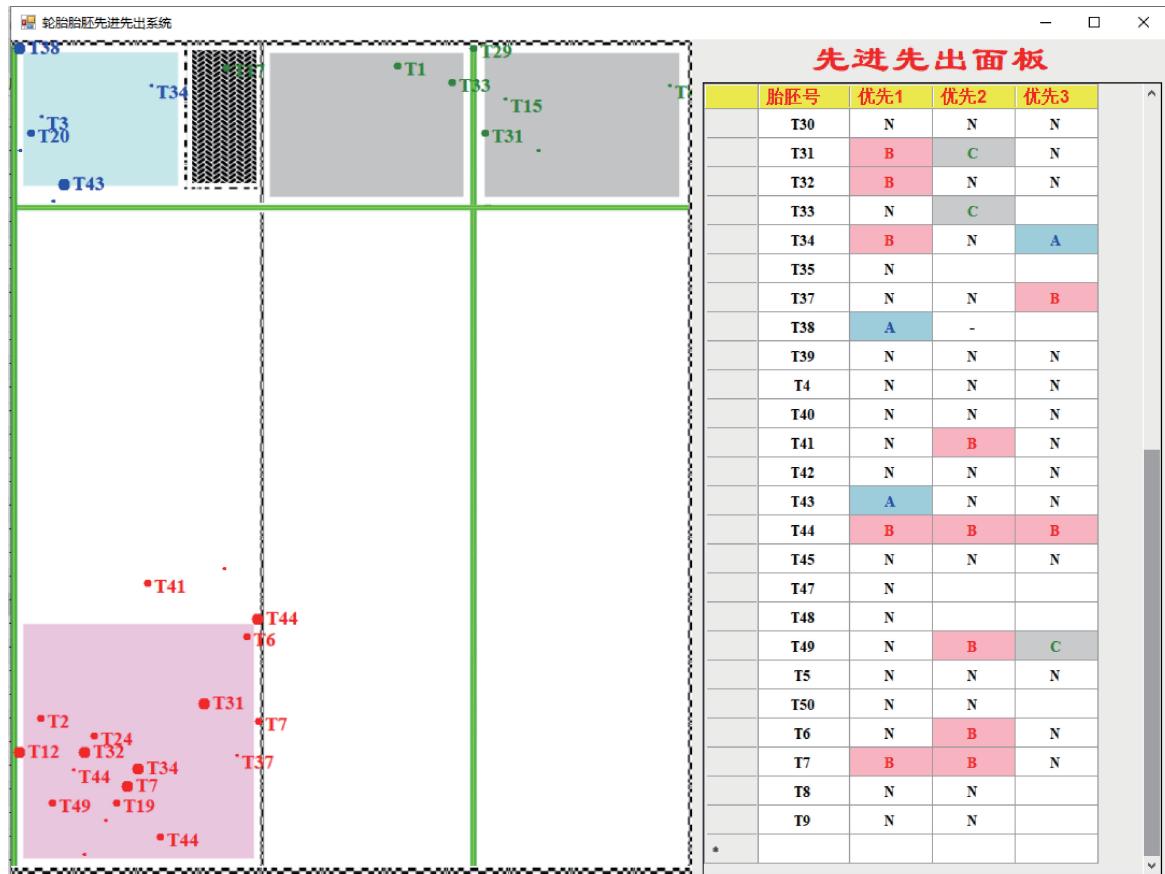


图 16 系统运行界面

Fig. 16 System operation interface

稳定性。此外,结合人工智能技术实现动态路径规划、自动化调度及多基站自适应冗余将是系统功能扩展的重要方向。本研究成果为轮胎制造行业仓储管理智能化转型提供了可行方案,具有较高的推广价值与应用前景。

参考文献

- [1] 孙明武,崔伟光,陈浩,等. PCR 成型机尾座锁紧改造及效果分析[J]. 橡塑技术与装备, 2023, 49(5): 45-48.
- SUN M W, CUI W G, CHEN H, et al. PCR molding machine tailstock locking modification and effect analysis[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2023, 49(5): 45-48.
- [2] 董青迅,涂彦明,胡祥胜,等. 数字化智能仓储机器人[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 145-152.
- DONG Q X, TU Y M, HU X SH, et al. Digital intelligent warehouse robot [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 145-152.
- [3] CHOI Y B, LEE S H, JUNG D H. Controller design based on a synchronous error compensator for wheeled cross-coupled systems[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2024, 22(5): 1728-1738.
- KIRAWANICH P, DEY P, SUMPAVAKUP C.

System-level magnetic interference modeling in electrified monorail system for track-side safety design[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 4571-4582.

- [5] 谢国强,张宝进,任雷. 基于 PLC 的工业机器人自动上下料控制系统设计[J]. 电工技术, 2021, 1(14): 20-22.
- XIE G Q, ZHANG B J, REN L. Design of industrial robot automatic loading and unloading control system based on PLC[J]. Electric Engineering, 2021, 1(14): 20-22.
- [6] QI J Y, CHEN ZH Y, UHLMANN Y, et al. Sensorless robust anomaly detection of roller chain systems based on motor driver data and deep weighted KNN[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-13.
- 吴定泽,任彬,赵增旭. 基于视觉识别的无线通信物流机器人设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 46-50.
- WU D Z, REN B, ZHAO Z X. Design of WiFi logistics robot based on visual recognition [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 46-50.
- [7] 王鹏,侯忠生. UWB 与 IMU 融合的室内动态定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(10): 76-83.

- WANG P, HOU ZH SH. Indoor dynamic positioning algorithm fused with UWB and IMU[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(10): 76-83.
- [9] YANG ZH, TIAN H W, WEN J L, et al. Structural design of high-precision positioning system in weak signal environment based on UWB and IMU fusion [J]. Instrumentation, 2023, 10(2): 30-39.
- [10] 钟映春,田志豪. 大型封闭空间中 UWB 定位基站拓扑的通用设计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 231-240.
- ZHONG Y CH, TIAN ZH H. Universal design approach for UWB localization base station topology in large enclosed spaces [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 231-240.
- [11] 肖小汀,李怡,葛亮,等. 埋地非金属管道雷达探测成像定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 223-233.
- XIAO X T, LI Y, GE L, et al. Research on imaging and positioning method of buried non-metallic pipeline radar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 223-233.
- [12] 潘晓华,金泳,高扬华,等. 面向复杂数据审计需求的数据血缘构建方法[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(1): 76-82.
- PAN X H, JIN Y, GAO Y H, et al. Data lineage construction method for complex data audit requirement[J]. Application Research of Computer, 2024, 41(1): 76-82.
- [13] 吴竹君,潘树国,孙健恺,等. 基于超表面反射的北斗信号质量与定位分析[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 206-214.
- WU ZH J, PAN SH G, SUN J K, et al. Analysis of Beidou signal quality and positioning based on meta surface reflection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 206-214.
- [14] 许迪,张淑卿,葛超. 面向复杂环境的YOLOv8 安全装备检测[J]. 电子测量技术, 2024, 47(7): 121-129.
- XU D, ZHANG SH Q, GE CH. YOLOv8 security equipment inspection for complex environment [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 121-129.
- [15] 米伟娟,李娜. 基于变分自编码器的 WLAN 定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 101-108.
- MI W J, LI N. Variational auto encoder based WLAN positioning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 101-108.
- [16] 侯华,李峻辉,代超娜,等. 井下人员超宽带精确定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 35-40.
- HOU H, LI J H, DAI CH N, et al. Ultra-wideband precise positioning method for downhole personnel[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 35-40.
- [17] 曹波朱,万洁,姜春霞,等. 基于 VBKF-CPA-TSA 算法的 UWB 定位技术[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 120-129.
- CAO B ZH, WAN J, JIANG CH X, et al. A UWB localization technique based on the VBKF-CPA-TSA algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 120-129.
- [18] 宁恒,刘冉,郭林,等. 基于 UWB 方位的机器人间相对定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 58-66.
- NING H, LIU R, GUO L, et al. Relative localization between robots based on UWB bearing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 58-66.
- [19] 李文扬,龚兴兴,徐子阳,等. 基于 DS-TWR 面向车间非视距环境定位算法优化研究[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(1): 6-10.
- LI W Y, GONG X X, XU Z Y, et al. Research on the optimization of DS-TWR-oriented positioning algorithm for non-line-of-sight environments in workshops [J]. Automation & Instrumentation, 2025, 40(1): 6-10.
- [20] 杨秀建,皇甫尚昆,敖鹏,等. 基于改进全质心-Taylor 的 UWB 定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 284-294.
- YANG X J, HUANGPU SH K, AO P, et al. Improved full-centroid-Taylor based UWB localization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 284-294.
- [21] 曹波,王世博,鲁程. 基于 UWB 系统的采煤工作面端头采煤机自主定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 108-117.
- CAO B, WANG SH B, LU CH. Research on the shearer autonomous localization method based on UWB system at the end of coal mining working face[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 108-117.
- [22] 杨承志,张晓明,张鹤. 基于 WLS-KF 的 UWB 室内定位滤波算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 25-33.
- YANG CH ZH, ZHANG X M, ZHANG G. Research on UWB indoor localization filtering algorithm based on WLS-KF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 25-33.

作者简介

梁紫涵,本科,主要研究方向为信息处理技术。

E-mail:116585916@qq.com

曲海鹏(通信作者),副教授,主要研究方向为人工智能技术。

E-mail:quhaipeng@ouc.edu.cn