

# 敞车自动定量装车智能感知系统的设计与应用研究

□余斐 高青松

1. 合肥市计量测试中心 2. 安徽拓维智信软件有限公司

**【摘要】**为解决大宗散货敞车装车环节效率低、成本高、安全性差等问题，本文设计并实现了一种敞车自动定量装车智能感知系统。该系统融合一码通智能称重、激光雷达扫描、PLC 控制、三维建模及智能算法等先进技术，实现了敞车装车全流程的信息化、自动化与智能化管控。文章从方案背景与需求、系统设计原则与依据、核心技术方案、软硬件架构、售后服务等方面展开研究，阐述系统在合同管理、车辆调度、自动称重、定量装车、数据追溯等环节的功能实现，分析其在提升装车效率、降低用工成本、保障作业安全、适配现代物流发展等方面的应用价值。该系统适用于煤炭、矿石、粮食等散料的敞车自动定量装车场景，为物流及制造业的数智化转型提供了可行的技术路径。实际应用表明，该系统可显著提升装车效率、降低人工成本，具有较好的推广价值。

**【关键词】**敞车装车；智能感知；自动定量；激光雷达；PLC 控制；智慧物流

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2026）06-0025-08

## Research on Design and Application of Intelligent Perception System for Automatic Quantitative Loading of Open-Top Wagons

**【Abstract】** To address issues such as low efficiency, high costs, and poor safety in the loading process of bulk open-top wagons, this paper proposes the design and implement of an intelligent perception system for automatic quantitative loading. The system integrates advanced technologies including one-code intelligent weighing, LiDAR scanning, PLC control, 3D modeling, and intelligent algorithms to achieve the informatization, automation, and intelligent management of the entire loading process of open-top wagons. This paper introduces the research conducted from aspects including project background and requirements, system design principles and bases, core technical schemes, hardware and software architecture, and after-sales service. It elaborates on the functional realization of the system in areas such as contract management, wagon scheduling, automatic weighing, quantitative loading, and data traceability, while analyzing its application value in improving loading efficiency, reducing labor costs, ensuring operational safety, and adapting to the development of modern logistics. The system is suitable for automatic quantitative loading scenarios of bulk materials such as coal, ore, and grain, providing a feasible technical path for the digital and intelligent transformation of logistics and manufacturing industries. Practical application indicates that the system can significantly improve loading efficiency and reduce labor costs, demonstrating high potential for promotion.

**【Keywords】** open-top wagon loading; intelligent perception; automatic quantitative; LiDAR; PLC control; smart logistics

### 引言

中国工业正处于深度数字化、智能化转型阶段，工业自动化成为智慧物流与工业4.0发展的核

心驱动力。物流业作为国民经济的基础性、战略性新兴产业，其智能化升级受到国家政策的大力扶持，《“十四五”智能制造发展规划》《“十四五”现代

物流发展规划》等政策文件明确提出，构建智慧绿色的现代物流体系，推动制造业与物流业的数智化融合。

在大宗散货物流运输环节，敞车装车是连接生产与运输的关键节点，目前国内矿石、煤炭、粮食等块粉状大宗散货的装车作业仍以人工操作为主，自动化水平偏低，成为制约行业高效发展的瓶颈。在此背景下，融合多技术的敞车自动定量装车智能感知系统应运而生，成为解决行业痛点、推动智慧物流落地的重要载体。

当前工业数字化、智能化转型加速，智慧物流成为国家“十四五”规划重点方向。国内外大宗散货装车领域逐步向无人化、精准化发展，但国内仍以人工操作为主，自动化感知与闭环控制水平偏低。本系统融合多源感知与智能控制技术，填补敞车自动定量装车全流程智能化短板，具备显著技术创新性与工程实用性。

当前，国内大宗散货敞车装车作业存在诸多亟待解决的问题，主要体现在以下四个方面，如表1所示。

表1 人工装车存在的问题

| 序号 | 问题         | 具体表现                                          | 优化措施                                                      |
|----|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1  | 作业效率低下     | 受操作熟练度、疲劳度影响，作业节奏难以把控，且易出现货物装载不均              | 替代传统人工装车模式，实现装车全流程自动化，提升单车装载速度与整体作业效率，满足物流运输高效化需求         |
| 2  | 劳动成本高且招工难  | 装车作业环境艰苦、劳动强度大、重复性高，企业面临劳动力短缺与人力成本攀升的双重压力     | 通过自动化设备替代人工，显著降低劳动强度，减少人员配置，缓解招工难问题，同时减少货物浪费，降低综合运营成本     |
| 3  | 安全与成本隐患突出  | 人工操作易出现失误，导致货物损坏、遗撒浪费，同时存在人员作业安全风险，增加运输与生产成本  | 借助雷达感知、人工智能、物联网等先进技术，构建智能化、清洁化的安全装车作业新模式，实现作业流程数字化管控与技术革新 |
| 4  | 难以适配现代物流需求 | 无法实现作业数据的实时采集与追溯，难以适配客户对物流服务速度、准确性、可追溯性的高标准需求 | 实现装车作业数据的实时采集、传输与追溯，满足客户对物流服务精准化、可追溯化的需求，提升企业物流服务水平       |

本敞车自动定量装车智能感知系统以汽车衡一码通称重技术、PLC 控制技术、激光雷达技术与智能算法模型的深度融合为核心，旨在构建高效、精准的称重与装车管控体系。系统实现对车辆位姿参数及物理尺寸的实时高精度感知、称重数据的即时采集和自动定量装车控制，通过激光雷达等核心感知部件的应用，提升装卸车作业效率、保障作业安全、降低作业成本，最终实现敞车装车全流程的无人化、智能化、闭环化管控，为企业定制化的智能称重与装车解决方案。

1 系统设计

1.1 设计思想

系统秉持场景适配和需求驱动的核心设计理念，立足于客户实际装车作业场景，通过深入调研设备工况条件、作业空间约束及装卸流程特性，构

建需求适配性与场景应用性的双轮驱动模型。在方案设计中，兼顾技术先进性与功能完备性，同时注重操作便捷性、投资经济性和未来扩展性的多维价值平衡，确保解决方案既能精准响应当前企业的作业需求，又具备前瞻适配能力，可应对企业后续发展与技术升级的需求。

1.2 设计原则

为保障系统的实用性、稳定性与可持续性，系统设计遵循六大核心原则：

功能性：覆盖全业务流程，满足称重、感知、控制、追溯核心需求。

可靠性：设备稳定运行，数据准确无误，适应工业恶劣环境。

安全性：安全联锁、权限管控、防作弊，保障人与设备安全。

可维护性：自诊断、日志记录、故障报警，便于运维。

扩展性：标准接口、模块化设计，兼容现有系统并支持功能扩展。

### 1.3 设计依据

系统方案设计严格遵循国家相关法律法规、指导文件及行业规范性标准，核心设计依据包括《物流仓储配送中心货物装卸搬运技术要求》（GB/T 34367-2017）《称重传感器》（GB/T 7551-2008）《固定式电子衡器》（GB/T 7723-2008）《激光产品的安全》（GB/T 7247.13-2018）《智能传感器》（GB/T 33905-2017）等国家及行业标准，同时符合电磁兼容、设备防护、机械电气安全等相关规范要求，确保系统设计合规、专业。

## 2 系统应用场景

本系统为敞开式货车自动定量装车量身打造，融合一码通智能称重、PLC 控制、激光雷达扫描、三维建模及智能算法等技术，实现敞开式货车车厢的快速自动定量装运。系统功能覆盖合同计划管理、车辆派发管理、排队叫号管理、门禁管理、称重管理、装车管理等全流程，适用于高栏板车、低栏板车、平板车、高低板车和自卸车等非封闭式货箱货运车辆。

在作业场景方面，系统主要应用于煤炭、矿石、砂石骨料、粮食等散装货物的固定装车通道作业，可配合溜筒（溜槽）、带式输送机或移动伸缩臂等输送设备实现散料装载。支持单一下料口、多个下料口及移动下料口等多种下料场景，通过车辆自主移动或下料口位置调节，实现车厢不同区域的动态放料，确保散料均匀装载，无需二次整平。

### 3 核心技术方案设计

系统针对敞车自动定量装车的全流程需求，设计了一码通智能称重技术方案与散料货物装车感知方案两大核心方案，同时融入PLC控制技术，实现各设备的协同联动，形成“感知—控制—称重—管控”的一体化技术体系，实现装车作业的自动化与智能化。

#### 3.1 一码通智能称重技术方案

一码通智能称重管理系统是装车全流程的信息化管控核心，为企业 提供散装发运过程的完整信息管理平台，实现合同管理、计划派车、签到排队、

门禁管控、自动称重、装车控制、报表统计等业务的信息化和自动化，同时实现业务流程的闭环管理与防作弊管理，降低企业经营风险。

#### 3.1.1 核心功能模块

（1）客商管理平台：包含PC端与移动端，支持收货单位、发货单位、承运商、司机等多主体操作，价值体现在合同管理与计划派车管理。合同管理支持合同录入、修改、审核等功能，合同信息严格权限管控；计划派车管理由销售部根据合同制定发货计划，客户按需派车，系统自动核算预提量，防止超发，派车单审核通过后生成二维码推送至司机。

（2）签到与排队：司机可通过微信小程序在电子围栏内自助签到，或在门房签到一体机刷身份证完成签到，车辆按时间顺序排队，系统支持自动叫号与人工手动叫号；叫号信息通过LED大屏幕实时展示，特殊情况可由权限管理人员干预排队顺序。

（3）门禁管控：入厂时系统验证车辆是否为叫号车辆、核验厂区容量、客户余额，司机扫码+车牌识别双重验证，信息匹配则道闸开启。白名单车辆可直接车牌识别抬杆。出厂时系统验证车辆是否完成皮重、毛重称重及装车流程，验证通过方可放行。

（4）自动过磅：分为皮重过磅与毛重过磅，实现全程无人值守。车辆识别后自动上磅，系统通过红外检测车辆位置、判断数据波动情况，自动读数并抓拍视频图片，数据实时保存。系统设置皮重异常预警、标吨预警、余款余吨预警，异常预警信息推送至集控中心，由人工处理后车辆方可继续作业。

（5）库区自动装车：通过一码通验证、雷达检测与PLC控制的协同实现无人化装车。车辆到位后3D雷达检测停车位置，PLC控制放料，料位雷达实时检测料位高度，引导车辆自动连续装车，预装量接近目标值时提前关闸板，确保装料精准，装车后物料均匀分布于车厢。系统同时支持远程手动操作，应对自动功能异常情况。

（6）磅单管理：系统自动生成电子过磅单，司机可通过微信小程序查询。门禁出口处终端一体机支持热敏票据自动打印，保留纸质多联磅单打印功能，业务数据全程电子化，系统可自动生成统计报

表。

### 3.1.2 产品价值

该方案实现了装车发运全流程的信息化与自动化，核心价值体现在：实时掌握合同执行情况，实现数据精准化管理；通过三级权限控制保障数据安全；无人值守过磅实现防作弊，过磅时间从2分钟缩短至15~30秒，大幅提升效率；集控中心仅需少量人员处理异常信息，显著降低用工成本；实现自动下料、补料，防止溢料，减少货物浪费；业务数据全程电子化，实现数据可追溯性，满足现代物流管理需求。

### 3.2 散料货物装车感知方案

散料货物装车感知是实现定量装车的基础，方案分为车辆外廓感知与车辆定位跟踪两部分，通过激光雷达技术实现车辆尺寸的高精度测量与车辆位置的实时监控，为装车控制平台提供精准的基础数据支持。

#### 3.2.1 车辆外廓感知方案

方案基于激光点云建模技术，采用两台多线激光雷达、一台料位计和雷达应用单元的协同架构，对动态行驶或静态停放中的车辆进行实时扫描，无需装车管理平台下发指令，实现自动来车识别、无感检测。激光雷达采集点云数据后，雷达应用单元

通过内置智能算法重构车厢三维模型，精确计算整车长、宽、高及车厢内长、内宽、栏板高度等核心参数，测量精度最高可达 $\pm 30\text{mm}$ ，数据通过标准化接口实时回传至装车控制平台，为车辆规格符合性审查、装车通道分配、装车策略规划提供依据。

#### 3.2.2 车辆定位跟踪方案

方案通过料仓侧方或顶部安装的多线激光雷达，实现车厢尾部的精准定位与车厢长度检测，支持顶装与侧装两种部署方式，侧装方式可有效减少下料口粉尘对系统的影响。激光雷达自动识别来车并进行高精度扫描，实时分析车厢尾部与雷达的实时距离（精度 $\pm 100\text{mm}$ ），数据同步至装车控制平台或PLC，协助实时调整装车设备作业参数，实现车辆动态跟踪与精准装车。

### 3.3 PLC 控制技术方案

PLC 作为系统的核心控制中枢，负责协调整个装车流程的自动化、精准化和环保化运行，下位机采用西门子S7-1200 PLC，上位机采用WINCC 界面，通过PROFINET 总线技术，实现主从站数据同步交换。

#### 3.3.1 系统主要电气原理图

PLC 控制柜设计如图1 所示：



图1 PLC控制柜设计图

PLC 部分控制原理如图2 所示：

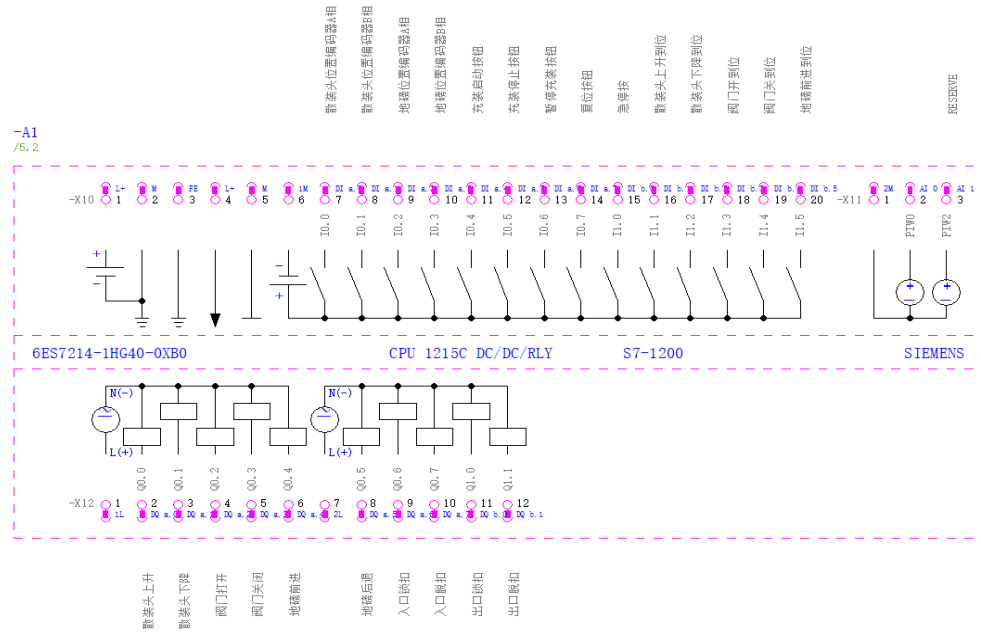


图2 PLC控制原理图

3.3.2 电机封装块及部分梯形图（见图3、图4）

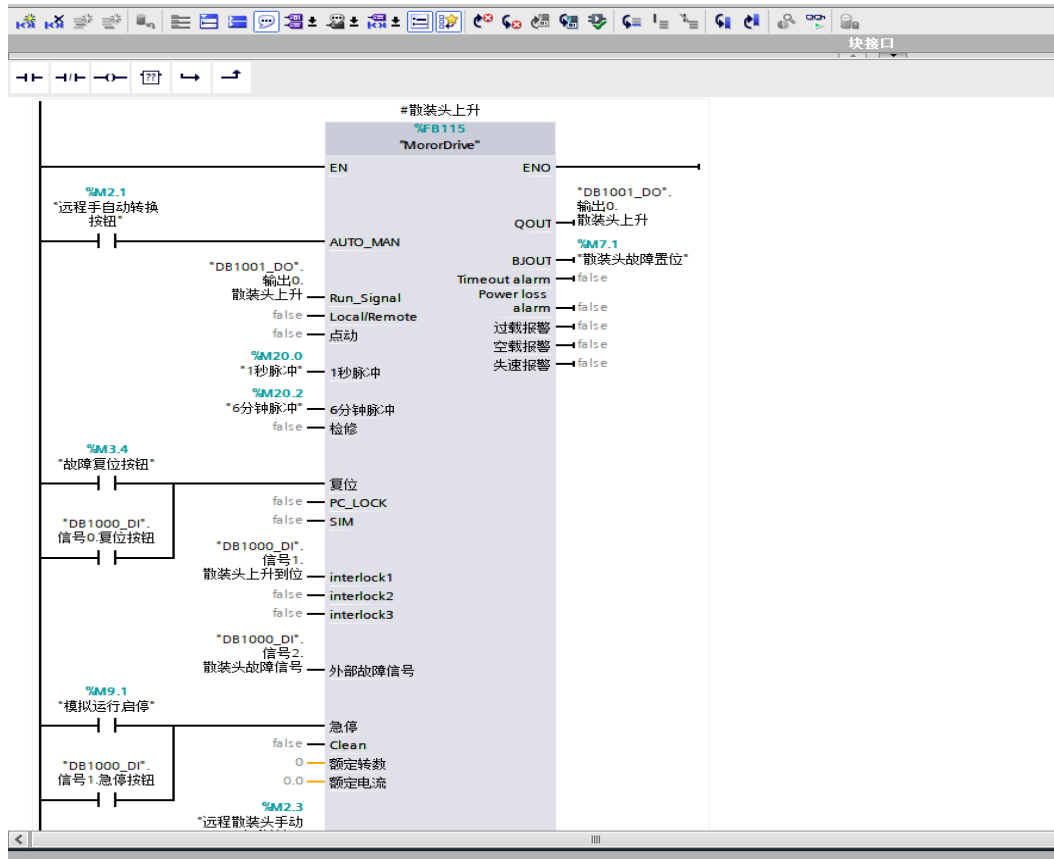


图3 电机封装块（部分）

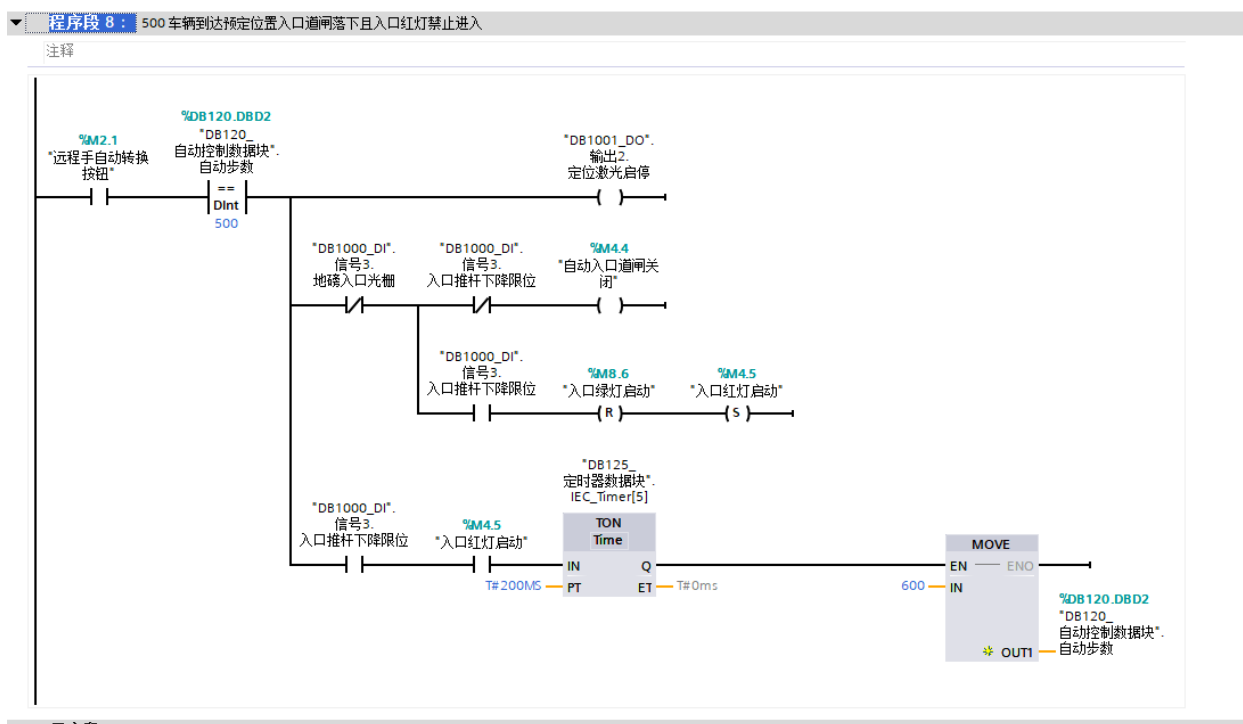


图4 程序段（部分）

### 3.3.3 PLC 核心作用

（1）逻辑控制中心：执行车辆到位、散装头下降、除尘启动、阀门开启、定量装载等预设装车流程逻辑；

（2）设备联动枢纽：通过I/O 模块直接控制阀门、散装头、收尘风机等设备的启停与动作。

（3）数据处理平台：实时采集称重传感器、料位计、车辆检测传感器等设备的信号，实时进行计算、判断并输出指令。

（4）安全监控中心：监控车辆到位、散装头密封、除尘系统运行等关键安全条件，执行安全联锁，杜绝违规操作。

### 3.3.4 核心功能实现

PLC 实现了车辆识别与定位引导、散装头自动定位与密封、收尘系统智能联动、骨料放料流量控制、精确定量装载、安全联锁与保护、人机交互与数据管理等功能。其中，收尘系统与装车动作严格联锁，放料前启动、装载中运行、放料后延迟关闭，最大程度减少粉尘作业排放。通过PID 控制调节下料速度，结合称重系统实现精确定量装载，避免超装或欠装，同时自动记录每车装载数据，实现数

据可追溯。

### 3.3.5 性能优势

PLC 的应用显著提升了系统的整体性能，实现了高效装载、高效粉尘控制、高可靠性与稳定性，同时提升了操作安全性与简便性，具备良好的灵活性，可适配不同车型、物料规格与装载量要求，减少作业中物料浪费与破损，符合工业现场的作业需求。

### 3.4 数据输出

系统支持与用户装车平台的无缝对接，可实现用户装车平台坐标系与检测输出数据坐标系的自动匹配对准，通过TCP 协议+JSON 格式或Modbus-TCP 协议将检测数据实时上传至装车平台，保障数据传输的实时性与准确性，为企业后续的生产管理与数据分析提供数据支撑。

## 4 产品技术架构与运行环境

### 4.1 技术架构

系统采用前后端分离的整体架构设计，同时配备WinForm 客户端，实现设备本地管控，各层架构分工明确、协同联动，保障系统高效稳定与可扩展性，如表2 所示。

表2 系统各部分技术架构信息表

| 系统部分        | 技术详情                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 后端服务        | 基于.NET Framework 4.6.2 平台构建，采用ASP.NET Web API 2.0 提供RESTful 接口服务，实现数据接入；数据持久层通过Entity Framework 6.2 实现与SQL Server 数据库的对象关系映射，兼容SQL Server 2008 R2 及更高版本，采用参数化查询防范SQL 注入；实现基于角色的细粒度权限控制，用户密码高强度加密，本地缓存基于MemoryCache 实现 |
| 前端应用        | 采用Vue.js 3 框架构建单页面应用，搭配Element Plus/Ant Design Vue 组件库；通过Vite 构建工具实现快速编译，TypeScript 保障代码质量；实施前后端协同验证，敏感数据通过HTTPS 加密传输，CSRF 令牌同步验证防御跨站请求伪造                                                                             |
| WinForm 客户端 | 采用分层架构设计，展示层基于Windows Forms 构建操作界面，业务逻辑层通过C# 类库封装设备监控、报警处理等核心流程，数据访问层运用NHibernate ORM 框架实现数据库访问；设备通信层通过西门子S7 系列通信协议与PLC 实现实时数据交互，完成寄存器读写操作                                                                            |

4.2 产品安全设计

系统充分考虑工业信息化场景下的安全需求，针对自然力损坏、操作人员无意失误、外部与内部恶意攻击等安全威胁，构建多维度的安全防护体系：通过数据库安全性、系统数据安全性、应用服务器

安全性、传输安全性、身份确认等多层防护，保障系统数据的完整性与保密性。采用高强度加密、权限管控、数据备份等措施，杜绝人为作弊与数据泄露，确保系统7×24 小时安全稳定运行，如表3 所示。

表3 安全类型及对应措施表

| 安全类型 | 对应措施                   |
|------|------------------------|
| 网络安全 | 部署防火墙、划分工控安全区、端口限制     |
| 传输安全 | HTTPS 加密、敏感数据 AES 加密传输 |
| 访问安全 | 角色权限分级、强密码策略、操作日志全记录   |
| 数据安全 | 自动备份、防篡改、异常操作告警        |
| 工控安全 | 安全联锁、紧急停止、故障自保护        |

4.3 产品运行环境

系统对服务器端与客户端的硬件、软件均制定了明确的配置要求，兼顾实用性与经济性，核心配置要求如下：

（1）硬件配置：服务器端要求CPU ≥4 核、内存 ≥16GB、硬盘 ≥500GB、千兆网卡；客户端要求 CPU ≥I5、内存 ≥8GB、500GB 硬盘、百兆/ 千兆网卡。

（2）软件配置：服务器端操作系统为中文 Windows Server2008/2012，搭载SQL Server 数据库、支持J2EE 标准的Tomcat 应用服务器；客户端操作系统为Windows7/10/11，浏览器要求IE6.0 及以上版本；同时需安装.NET Framework 4.6.2 运行库、Microsoft

Visual C++ 2015–2022 可再发行组件包等基础组件。

5 核心硬件产品

系统的硬件支撑体系涵盖称重、验证、控制、感知等多个环节，核心硬件产品包括：

（1）轨道移动汽车衡：作为称重核心设备，实现车辆皮重、毛重的精准测量，为定量装车提供重量依据。

（2）户外验证终端/ 户外验证打印终端：实现厂区门口的车辆扫码、身份验证，户外验证同时支持现场磅单打印，适配工业户外作业环境。

（3）AI 智能称重控制终端：实现车辆自动识别、称重数据自动采集与控制，是无人值守过磅的核心设备。

(4) 室内签到打印终端：部署于门房等室内区域，支持司机身份证签到与票据打印，完成车辆排队信息录入。

(5) 多线激光雷达：作为系统的核心感知设备，实现车辆外廓测量、定位跟踪及料位检测，为装车感知与控制提供核心空间数据。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本系统已在华东地区某大型散货物流园完成连续6个月工业试点应用，选取煤炭、砂石骨料两条装车线为测试对象，以传统人工装车模式为对照组，通过现场统计、设备日志、财务台账获取真实运行数据，量化效果如下：

#### 6.1.1 作业效率提升

过磅效率：人工过磅单辆车平均120秒，系统无人值守过磅仅需15~20秒，较人工模式单辆车过磅效率提升约83%。

装车效率：人工单辆车装车平均15分钟，系统自动定量装车仅需3~5分钟，单车装车效率提升约70%。

日作业能力：单条装车线日作业车辆由80车提升至160~180车，整体场站作业能力提升100%以上。

#### 6.1.2 人工成本显著降低

岗位配置：传统模式每条线需配置称重员2人、装车操作员2人、现场调度1人，共5人/线。系统模式仅需1名集控员远程监控异常，单条线减少80%用工。

成本降幅：按人均年用工成本8万元计算，单条线年节约人工成本 $\geq 32$ 万元，人工综合成本降低65%以上。

#### 6.1.3 装车精度与物料损耗改善

定量精度：装车重量误差控制在 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$ 以内，远优于人工 $\pm 2\% \sim \pm 3\%$ 的误差水平。

物料损耗：溢料、遗撒、超装/欠装导致的损耗由3%~5%降至0.5%以下，年减少物料损失15万~25万元/线。

#### 6.1.4 安全与管理效益

安全事故：试点期间实现人员安全零事故，设备故障停机率 $< 0.3\%$ 。

数据追溯：合同、车辆、称重、装车、磅单全流程电子化，数据准确率接近100%，有效杜绝人为作弊与数据丢失风险。

## 6.2 未来展望

随着人工智能、物联网、5G、数字孪生等技术的不断发展，敞车自动定量装车智能感知系统将向更智能、更精准、更协同的方向升级。未来可通过融入数字孪生技术，构建装车作业的虚拟仿真场景，实现作业流程的提前模拟与优化；结合5G技术实现设备间的高速数据传输，提升系统的实时响应能力。引入更先进的智能算法，实现装车策略的自学习与自适应优化，进一步提升装车效率与精准度。

同时，系统可与企业的ERP、WMS等生产管理系统深度融合，实现物流与生产的一体化管控，助力构建全链条的数字化物流体系，为企业的智能化生产与经营决策提供更全面的数据支撑，推动智慧物流行业高质量持续发展。

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委等. “十四五”现代物流发展规划[Z]. 2021.
- [2] 工业和信息化部等. “十四五”智能制造发展规划[Z]. 2021.
- [3] GB/T 34367-2017, 物流仓储配送中心货物装卸搬运技术要求[S].
- [4] GB/T 7247.13-2018, 激光产品的安全[S].
- [5] 中国物流与采购联合会. 中国智慧物流发展报告[R]. 2024.

## 作者简介

余斐，男，安徽合肥人，大学本科，工程师，电气工程与自动化专业，从事计量与衡器检测研究。

高青松，男，安徽凤台人，大学本科，淮南市第十六届人大代表，安徽省企业“创新达人”，安徽省百优CIO，淮南市“3361行业名家”，凤台县优秀人才，凤台县经济开发区科学技术协会副秘书长。