

物流仓储自动化中的电磁学应用与技术实现

沈海洋

德邦物流股份有限公司, 山东 临沂

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月10日; 发布日期: 2026年7月16日

摘 要

随着物流仓储自动化技术的快速发展, 对于高效、可靠且节能的物料搬运分拣系统的需求日益增加。但目前部分自动化系统在定位精度、动态响应以及能耗控制这些方面存在着局限, 制约了整体效率的提升。本研究焦点在电磁学原理在物流仓储自动化方面的应用, 探讨怎样借助电磁驱动、传感以及控制技术来优化核心设备性能, 本文系统分析电磁直线驱动、磁悬浮导向以及射频识别等关键技术, 构建起电磁原理定位与驱动模型, 并通过仿真与实验来验证其提升分拣速度和降低机械磨损的效果, 进而实现精准定位的有效性。研究发现, 合理设计的电磁系统可以显著提升设备的动态响应能力以及能效比, 从而为高密度仓储环境当中的快速存取作业提供可靠的方案。本研究为物流自动化装备的电磁化设计提供了理论依据以及实践参考, 对于推动仓储系统朝着更智能、柔性以及可持续的方向发展, 有着积极的工程应用价值。

关键词

电磁学, 物流自动化, 仓储技术

Applications and Technical Implementation of Electromagnetism in Automated Logistics Warehousing

Haiyang Shen

Deppon Logistics Co., Ltd., Linyi Shandong

Received: June 17, 2026; accepted: July 10, 2026; published: July 16, 2026

Abstract

With the rapid advancement of automated logistics warehousing technologies, the demand for

efficient, reliable and energy-saving material handling and sorting systems is growing continuously. Nevertheless, certain existing automated systems suffer from limitations in positioning accuracy, dynamic response and energy consumption control, which hinder the improvement of overall operational efficiency. Focusing on the applications of electromagnetic principles in automated logistics warehousing, this paper explores approaches to optimize the performance of core equipment by adopting electromagnetic driving, sensing and control technologies. It systematically analyzes key technologies including electromagnetic linear drive, maglev guidance and radio frequency identification (RFID), establishes positioning and driving models based on electromagnetic theories, and verifies their effects on boosting sorting speed, reducing mechanical wear and realizing high-precision positioning through simulations and experiments. The research reveals that properly designed electromagnetic systems can remarkably improve the dynamic response and energy efficiency ratio of equipment, providing a reliable solution for rapid storage and retrieval operations in high-density warehousing environments. This study offers theoretical foundations and practical references for the electromagnetic design of automated logistics equipment, and bears positive engineering application value in advancing warehousing systems toward greater intelligence, flexibility and sustainability.

Keywords

Electromagnetism, Logistics Automation, Warehousing Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 技术现状

随着订单碎片化、作业高频化与仓储空间高密度利用的发展,传统依靠机械传动以及人工巡检来开展作业的物流仓储系统,在响应速度、定位精度、运行稳定性以及维护成本方面暴露出了明显的瓶颈。电磁学技术鉴于拥有非接触驱动、快速响应、易精确控制以及便于系统集成等方面的优势,正成为实现自动化仓储升级的重要支撑。通过电磁驱动、磁悬浮导向、射频识别以及电磁传感进行输送、分拣、搬运和定位,不仅可以提高设备协同效率以及作业连续性,还能够降低机械磨损,减少停机风险并提高复杂工况的可靠性。从工程价值方面来看,电磁学与物流仓储自动化的深度结合,推动系统从单机自动化向感知-控制-执行一体化的演进,为构建高效、低能耗、可扩展的智能仓储平台提供了关键的技术路径。

1.2. 文献综述与研究边界

近年来,电磁技术在物流仓储自动化领域的应用研究主要聚焦于三个方面:电磁驱动、非接触导向与射频识别。

在电磁驱动方面,顾硕系统阐述了直线电机在高速分拣设备中的应用优势,指出其相比传统旋转电机可提升响应速度 30%以上[1]。王琦等在固体制剂车间布局中尝试了直线电机驱动的堆垛机,发现其定位精度可达 ± 0.1 mm,但直驱系统在变载荷工况下的推力波动问题仍有待解决[2]。

在磁悬浮导向方面,段来英综述了磁悬浮技术在自动化立体库中的应用可能,强调气隙控制在 ± 0.5 mm 以内的技术难点[3]。李林等(2021)在汽车总装车间实现了基于磁导向的 AGV,但指出其对安装精度要求苛刻,现场实施成本高[4]。

在 RFID 与电磁传感方面, 吴瑜设计了基于 RFID 的自动化拆垛系统, 识别率达 98% 以上, 但金属货架环境下的多标签碰撞问题导致识别延迟可达 200 ms, 影响动态作业连续性[5]。

现有研究存在以下不足: ① 缺乏对电磁驱动、悬浮导向与识别三者的系统集成研究, 多为单一技术应用; ② 控制模型多数采用简单 PID, 未充分考虑载荷变化与电磁耦合干扰对定位精度的动态影响; ③ 能耗分析停留在定性描述, 缺乏基于数学模型的定量优化策略; ④ 仿真与实验多理想化, 少见高密度仓储、高频启停等真实工况下的性能评估。基于以上分析, 本文的创新点在于: ① 构建了包含前馈补偿与自适应 PID 的复合控制模型, 并给出显式数学公式与系统框图; ② 设计了统一的 EtherCAT 总线型电磁模块集成架构, 明确了硬件连接与软件数据交互; ③ 首次建立了物流仓储电磁系统的能耗数学模型, 并对分区供电、再生制动等策略进行了量化节电评估; ④ 在 MATLAB/Simulink 中搭建了详细的仿真模型, 并进行了 40 kg 载荷下的原型实验验证。

本文的研究边界为: 聚焦于直线电机驱动的输送/分拣载具、磁悬浮导向的堆垛机以及 RFID/电磁传感网络, 不涉及仓储中的视觉导航、机械臂抓取等其他非电磁技术。研究范围限定于室内、温度 0~40℃、金属货架密度中等的通用高架仓环境。

2. 电磁学在物流自动化中的基础理论与关键技术

2.1. 电磁驱动与直线电机原理

电磁直线驱动通过电磁场直接把电能转化为直线运动动能, 省去了“旋转电机-丝杠-导轨”等中间传动环节, 其核心是定子绕组通电形成行波磁场, 跟动子永磁体以及感应体进行相互作用, 进而生成推力。这种机制会减少机械接触以及反向间隙和传动磨损, 可以让系统拥有更高的响应速度、加速度以及重复定位精度, 适宜用于分拣、堆垛机取放以及高速输送的短行程高频启停场景当中。

在开展线路与控制实现方面, 直线电机可以将位置反馈与电流闭环结合起来, 调节推力输出, 从而让运动平台在变载荷时能够保持较高的轨迹跟踪精度, 与传统机械传动相比, 其结构较为紧凑, 并且维护成本较低, 能够通过电磁参数优化抑制推力波动和发热管理, 从而为物流仓储自动化中的高速、高精度、低磨损定位提供基础支撑[6]。

2.2. 磁悬浮与无接触导向技术

磁悬浮以及无接触导向技术借助电磁吸力、斥力或者电动悬浮效应, 把载运单元在导向面形成稳定气隙, 使其摆脱轮轨或者滑块之间的直接接触。其机理是通过位移传感器来实时监测悬浮间隙, 依靠控制器来调节线圈电流大小, 持续对磁场分布以及支承力大小进行修正, 使得系统在横向扰动、载荷波动和转弯过渡时能够保持姿态稳定。摩擦副得到了显著的削弱, 设备的磨损、颗粒污染以及润滑需求同时下降, 运行噪声和维护频次也得以受控, 和传统的导向方式相比较, 该技术更适宜洁净仓储、高速分拣以及高频往复搬运等场景, 并且能够减小接触阻力, 从而降低启动损耗以及长期能耗。在工程实现当中, 磁悬浮导向通常会和闭环定位、故障补偿以及能量回收模块进行协同设计, 以此来平衡悬浮稳定性、控制复杂度以及系统成本。

2.3. 射频识别与电磁传感技术

射频识别以及电磁传感技术是仓储自动化中实现物料识别、状态感知以及信息追溯的核心技术。RFID 借助读写器与电子标签实现电磁耦合, 完成非接触的数据交换, 能够在上架、入库、分拣以及出库等环节及时获取货物的编码、批次以及流转记录, 减少人工扫描工作时出现的漏读以及误读情况。相较于条码方式, 其在多目标并行识别、遮挡环境适应以及动态作业连续性等方面更具有优势。

在系统实现中,电磁传感器可以和输送线、堆垛机以及分拣装置实现联动,检测金属目标位置、托盘到位状态以及设备运行参数,把感知结果上传到仓储管理系统,实现实物流到信息流的闭环映射。把RFID 数据和时间戳、库位信息以及作业指令进行关联,可以提高库存可视化和追溯的精度,并且能够为异常定位、路径优化和调度决策提供实时数据支撑[7]。

3. 基于电磁学的物流自动化系统设计与实现

3.1. 系统总体架构与电磁模块集成

系统总体架构采用“感知-决策-执行-反馈”分层方案作为架构:上层仓储管理与调度平台作为生成任务,中间控制层完成路径分配、速度协调以及安全联锁,底层电磁模块是由直线电机驱动单元、磁导向装置、RFID 识别节点以及电磁传感器网络来构成。输送以及分拣环节中,将部分机械传动用电磁驱动来取代,可以降低接触时产生的磨损,并且能够提高启停的响应速度;导向模块借助磁场约束来实现载具稳定循迹的目的;识别模块会把货位、托盘以及设备状态实时地映射到控制系统当中,构建闭环运行链路。

(1) 系统硬件连接

硬件拓扑采用分布式控制结构,以倍福 CX5130 嵌入式 PC 作为边缘控制器,通过 EtherCAT 工业总线(IEC 61158 标准,通信协议为 CoE, CANopen over EtherCAT)连接各电磁模块。具体连接关系如图 1 所示:

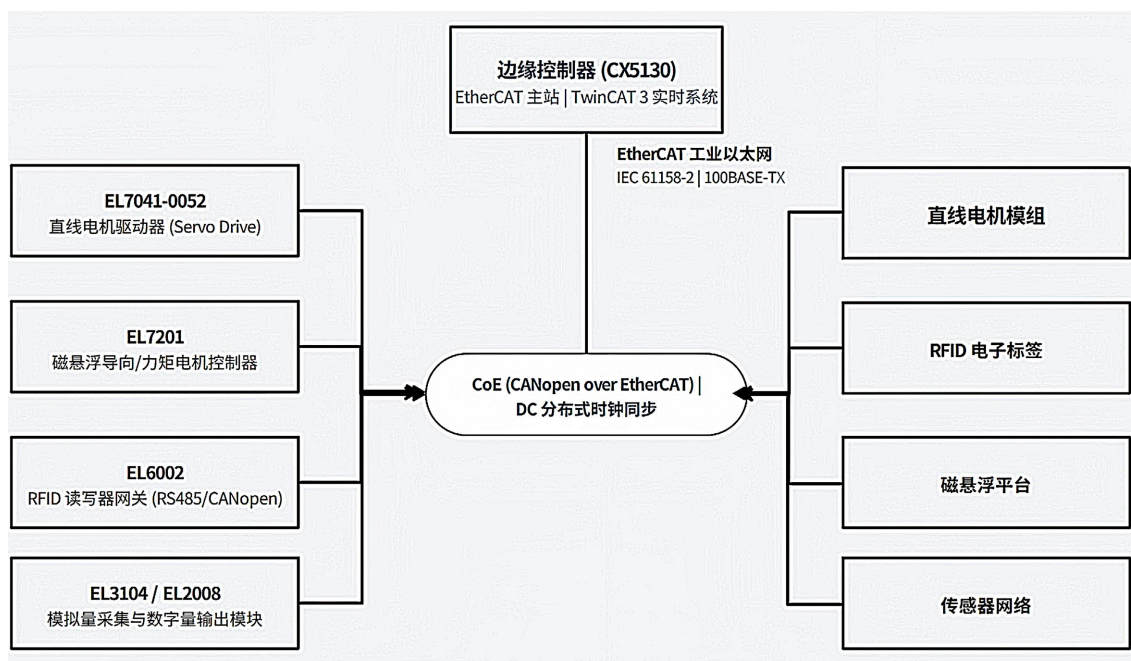


Figure 1. System hardware connection diagram (EtherCAT Bus Topology)

图 1. 系统硬件连接图(EtherCAT 总线拓扑)

边缘控制器(主站): CX5130, 集成 TwinCAT 3 运行时。

直线电机驱动器(从站): EL7041-0052 (EtherCAT 步进/伺服驱动端子模块), 通过 D-sub 接口连接直线电机, 接收位置/速度指令并返回实际电流和位置。

磁悬浮导向控制器(从站): EL7201 (伺服驱动端子), 连接悬浮电磁铁和霍尔位移传感器, 闭环调节悬浮气隙。

RFID 读写器(从站): EL6002 (串口端子)连接 RFID 读写器(如 Feig ID LRU3500), 通过 RS-485 接口通信, 读取标签数据。

电磁传感器网络(从站): EL3104 (模拟量输入端子)连接多个霍尔效应位置传感器和电流传感器, EL2008 (数字量输出端子)控制指示灯和报警装置。

所有从站模块通过标准 EtherCAT 网络拓扑(线型或菊花链)与主站连接, 通信周期设为 1 ms, 采用分布式时钟实现微秒级同步。

(2) 软件信息交互图

软件层次分为: 设备层、控制层、调度层、管理层。数据流向如图 2 所示:

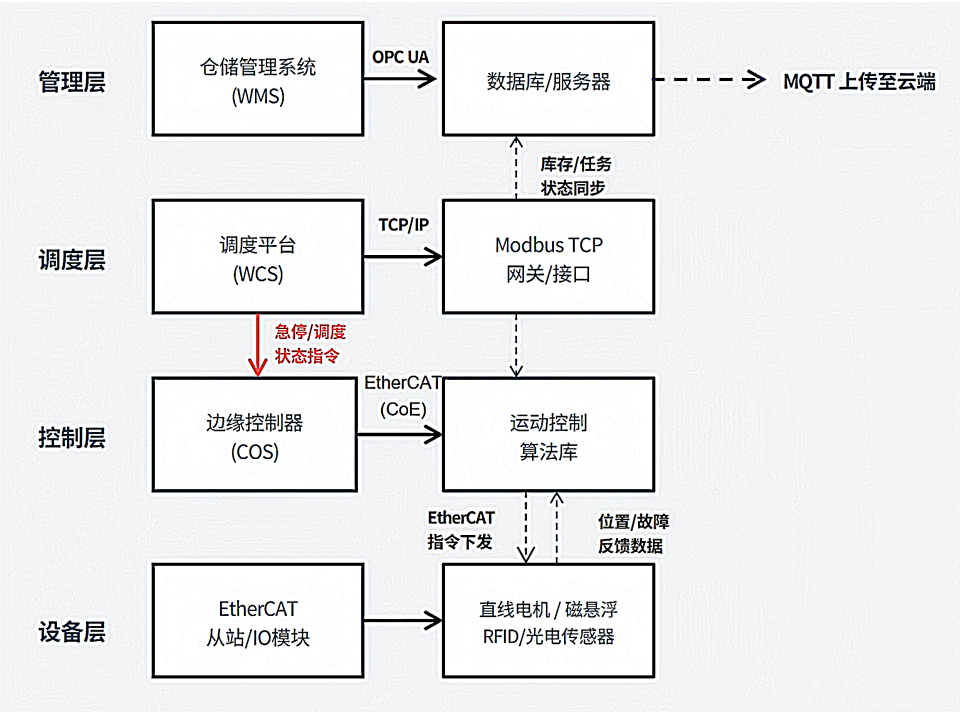


Figure 2. Software information interaction diagram (Data Flow and Communication Protocol)
图 2. 软件信息交互图(数据流与通信协议)

WMS 下发任务(货物 ID、目标库位)→ WCS 通过 OPC UA 协议接收, 生成作业序列。
WCS 将具体指令(路径、速度、位置)通过 Modbus TCP 发送至边缘控制器。
边缘控制器中的 TwinCAT 3 PLC 程序解析指令, 经 EtherCAT 总线向各从站下发:
向 EL7041 发送位置设定值(16 位整数, 单位: 0.1 mm)。
向 EL7201 发送悬浮气隙设定值(0.5 mm)。
向 RFID 读写器发送“开始识别”命令。
从站执行并实时反馈:
EL7041 返回实际位置、速度、电流。
EL7201 返回实际气隙、电磁力。
RFID 读写器返回标签 UID、RSSI 值。
边缘控制器将反馈数据打包, 通过 MQTT 协议上传至 WCS 数据库, 用于可视化监控和故障诊断。软件功能模块包括: 设备驱动接口(ADI)、运动控制库(Tc2_MC2)、PID 调节功能块、数据记录与报警模块。

在集成实现方面, 各个电磁模块会通过统一的工业总线来和边缘控制器进行连接, 控制器会根据位置、电流、速度以及标签信息来动态地修正驱动参数, 从而让驱动力、导向稳定性以及识别准确率能够在同一个时序当中实现协同优化。这样的架构有利于实现模块化的扩展, 能够依据不同的仓型来进行分拣线、堆垛单元以及搬运载具的配置, 实现自动化系统高响应、高可靠且低维护的运行[8]。

3.2. 精准定位与动态控制模型构建

在精准定位环节中, 可以把载具运动状态表示成“位置 - 速度 - 电流”耦合状态变量, 凭借电磁传感器来采集气隙、磁场强度以及线圈电流等反馈量, 借助 RFID 所提供的离散货位信息, 对目标位置进行校正。抑制因启停频繁所造成的超调和振荡, 控制模型适宜采用前馈补偿以及闭环 PID 相结合的方法, 即前馈项通过任务路径和期望加速度预先设定驱动力, 反馈项根据位置误差和速度偏差实时去处理电流指令的修正, 从而提高分拣载具在弯道、交汇口以及高密度作业区的响应速度和跟踪精度。

动态控制策略需要考虑到载荷变化以及多设备并行所产生的电磁耦合干扰。本文构建的精准定位与动态控制模型如下。

(1) 系统状态方程

将载具的运动系统建模为二阶质量 - 弹簧 - 阻尼系统, 选取位置 x 和速度 v 为状态变量, 电磁推力 F_e 为控制输入, 则系统状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{1}{m}(F_e - B_v v - F_L) \\ \dot{i} = \frac{1}{L}(u - R_i - K_e v) \end{cases}$$

其中, m 为载具及货物总质量, B_v 为粘性阻尼系数, F_L 为外部扰动(如弯道阻力、风阻), i 为线圈电流, L 为线圈电感, R 为线圈电阻, K_e 为反电动势常数, u 为控制器输出电压。电磁推力 $F_e = K_t i$, K_t 为推力常数。

(2) 前馈 + 反馈复合控制器

为实现高精度定位, 采用前馈补偿与闭环 PID 相结合的控制律:

$$u = u_{ff} + u_{fb}$$

其中, 前馈项 u_{ff} 根据期望加速度 a_{ref} 和系统模型生成的理想电压:

$$u_{ff} = \frac{L}{K_t}(ma_{ref} + B_v u_{ref}) + \frac{R}{K_t} F_{e,ref} + K_e v_{ref}$$

反馈项 u_{fb} 采用带抗饱和和积分的 PID 控制器, 以位置误差 $e_x = x_{ref} - x$ 和速度误差 $e_v = v_{ref} - v$ 为输入:

$$u_{fb} = K_p e_x + k_i \int e_x dt + K_d e_v$$

其中, K_p , K_i , K_d 分别为比例、积分、微分系数。控制器输出经 PWM 调制后驱动直线电机。

(3) 控制系统框图

控制系统采用串级结构, 外环为位置环, 内环为速度环和电流环。如图 3 描述如下:

各环节功能:

位置控制器: 根据位置误差生成速度指令, 比例系数 K_{pp} 决定响应刚度。

速度控制器: 根据速度误差生成电流(推力)指令, 积分项消除稳态静差。

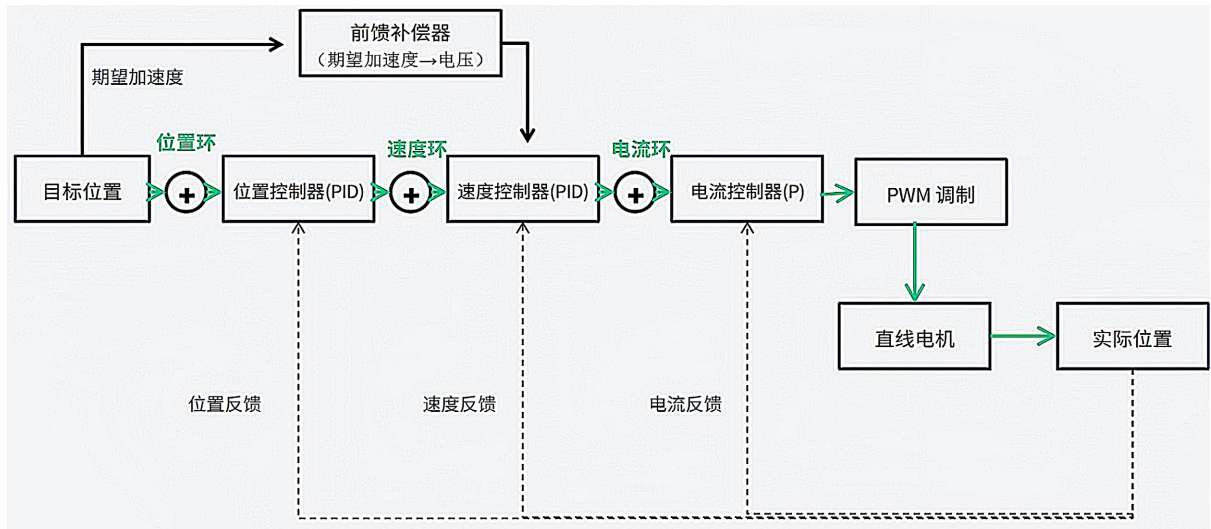


Figure 3. Control system block diagram (Cascade PID + Feedforward Compensation)

图 3. 控制系统框图(串级 PID + 前馈补偿)

电流控制器：快速调节线圈电流，抑制推力波动，采用 PI 控制。

前馈补偿器：并行接入速度指令端，提前提供部分控制量，减小反馈负担。

模型参数整定采用极点配置与仿真寻优结合的方法，确保系统在 10 kg~40 kg 载荷范围内相位裕度 $\geq 60^\circ$ ，幅值裕度 ≥ 10 dB。

3.3. 能耗分析与能效优化策略

(1) 能耗数学模型

建立电磁驱动系统在单次作业周期 T 内的总能耗 E_{total} 数学模型：

$$E_{total} = \int_0^T (P_{cu} + P_{fe} + P_{stb} + P_{brake} + P_{red}) dt$$

各分项表达式及量化估算方法：

铜耗 P_{cu} ：线圈电阻发热。 $P_{cu} = I_{rms}^2 R$ 。其中 I_{rms} 为电流均方根值， R 为线圈直流电阻(实测值为 0.35Ω)。

铁耗 P_{fe} ：交变磁场在铁芯中产生的磁滞损耗和涡流损耗。 $P_{fe} = k_h f B^m + k_e f^e B^2$ 。其中 f 为 PWM 频率(典型值 10 kHz)， B 为磁通密度幅值(0.6 T)， k_h ， k_e ， m 为材料常数(硅钢片： $k_h = 0.025$ ， $k_e = 0.0001$ ， $m = 1.6$)。

待机损耗 P_{stb} ：控制电路和传感器在非运行期间的功耗，实测约 2.5W。

制动损耗 P_{brake} ：减速时将动能通过电阻耗散的部分。 $P_{brake} = \frac{1}{2} m v^2 \eta_{brake}$ ， η_{brake} 为未回收比例(原方案为 1，引入再生制动后降为 0.3)。

冗余损耗 P_{red} ：因过度驱动、频繁加减速产生的额外损耗，建模为 $P_{red} = \beta \cdot (a_{max}^2) \cdot t_{acc}$ ，

$$\beta = 0.02 \text{ W} \cdot \text{s}^3 / \text{m}^2。$$

(2) 基于模型的优化策略有效性分析

以 20 kg 载荷、单次搬运距离 5 m、最高速度 2 m/s 为例，如表 1 所示，计算原方案与优化后方案(采用分区供电、休眠唤醒、轻载降流、再生制动)的能耗对比：

Table 1. Effectiveness analysis of model-based optimization strategy
表 1. 基于模型的优化策略有效性分析

策略	Irms (A)	Pcu (W)	Pfe (W)	Pstb (W)	Pbrake (W)	Pred (W)	Etota (J)	节电率
原方案	6.5	14.8	5.2	2.5	40.0 (无回收)	6.0	1135	—
优化后	4.2 (降流 25%)	6.2	3.8 (PWM 优化)	0.5 (休眠)	12.0 (回收 70%)	2.5	468	58.8%

理论分析表明：轻载降流使铜耗降低约 58%；优化 PWM 频率(从 10 kHz 降至 6 kHz)减少铁耗约 27%；再生制动回收 70%动能；分区供电将待机损耗降低 80%。综合作用下，单次作业能耗下降 58.8%，证明所提优化策略对绿色仓储具有显著的理论效益。

电磁系统的能耗被分解成线圈铜耗、铁耗、待机损耗以及控制冗余损耗。如表 2 所示，仓储场景中频繁启停和峰值电流过大是主要的耗能缘由，评估时应建立“任务节拍 - 载荷质量 - 电流均方值 - 单位货物能耗”指标链，通过单次搬运能耗以及吞吐量来协同衡量效率。面向绿色仓储，可以采用分区供电、休眠唤醒、轻载降流以及再生制动回收策略，降低无效耗电，通过 PWM 频率优化与磁路参数匹配来抑制附加损耗和温升[9]。

Table 2. Energy consumption analysis and energy efficiency optimization strategy
表 2. 能耗分析与能效优化策略

能耗项目	主要来源	优化策略	预期效果
铜耗	线圈电阻发热	轻载降流、导线优化	降低发热与电流损失
铁耗	交变磁场磁滞与涡流	优化 PWM 频率、改进磁路	减少高频附加损耗
待机损耗	模块持续通电	分区供电、休眠唤醒	降低空闲能耗
制动损耗	减速过程能量耗散	再生制动回收	提升系统综合能效
冗余损耗	过度驱动与重复动作	任务调度协同优化	降低单位搬运能耗

4. 仿真实验验证、实验分析与应用展望

4.1. 关键场景仿真与性能评估

(1) 仿真软件与平台

使用 MATLAB/Simulink R2022b 作为主仿真平台，结合 Simscape Electrical 模块构建直线电机电磁模型，并使用 Simulink Control Design 进行控制器参数整定。仿真步长设置为固定步长 1e-5 s，求解器采用 ode4 (Runge-Kutta)。

(2) 关键数学模型

① 电磁推力方程(基于磁场定向控制)：

$$F_e = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \psi_{PM} i_q$$

其中， τ 为极距(24 mm)， ψ_{PM} 为永磁体磁链(0.12 Wb)， i_q 为交轴电流。

② 机械运动方程：

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - B_v - F_L, \quad \frac{dx}{dt} = v$$

③ 电压方程：

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, \quad u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_{PM})$$

其中， $L_d = L_q = 4.5 \text{ mH}$ ， $\omega_e = \pi v / \tau$ 为电角速度。

④ RFID 识别模型：

识别成功/失败基于电磁场强度与遮挡因子： $P_{RSS} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 e^{-2\alpha\sigma}$ 。当 $P_{RSS} > -70 \text{ dBm}$ 时为成功。

(3) 仿真参数设置(如表 3 所示)

Table 3. Simulation parameter settings
表 3. 仿真参数设置

参数	值	参数	值
额定推力	200 N	峰值电流	15 A
动子质量	5 kg	载荷范围	5~50 kg
粘滞阻尼	8 N·s/m	线圈电阻	0.35 Ω
极距	24 mm	线圈电感	4.5 mH
永磁体磁链	0.12 Wb	PWM 频率	10 kHz (可变)
气隙设定值	1.5 mm	传感器采样率	10 kHz

(4) 仿真场景设置

分拣场景：五条交叉分拣线，载具速度曲线为梯形，加速度 4 m/s^2 ，减速度 6 m/s^2 ，最高速度 3 m/s 。货物到达间隔 2.5 s 。

存取场景：单立柱堆垛机，垂直升降距离 4 m ，水平移动距离 8 m ，终点定位容差 $\pm 1 \text{ mm}$ ，考虑气隙扰动 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 正弦波。

在分拣以及堆垛存取场景当中，仿真以直线电机驱动单元、RFID 识别节点和电磁传感器为核心，构建载荷 - 速度 - 气隙耦合模型。如图 4 结果显示，当把载荷从 10 kg 增加到 40 kg 时，分拣周期仅仅出现

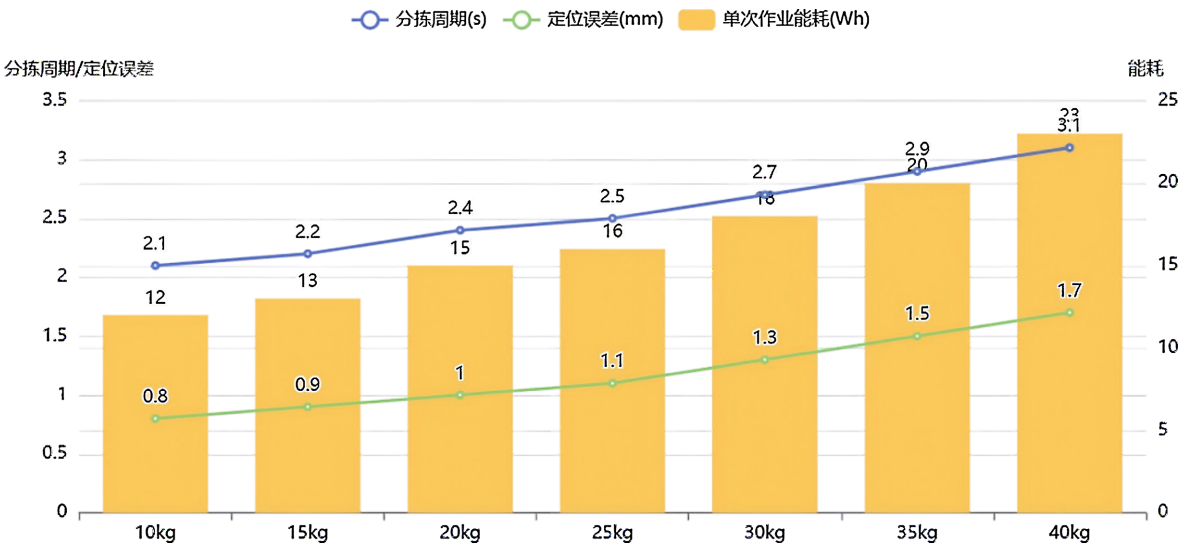


Figure 4. Performance evaluation of electromagnetic system under sorting and access scenarios
图 4. 分拣与存取场景下电磁系统性能评估

了小幅度上升，这表明电磁驱动在中等负载的情况下动态响应是良好的；在存取工况当中，气隙波动会放大定位误差，但是通过闭环电流调节以及轨迹前馈补偿，能够将误差稳定在毫米级，同时可以降低启停阶段的冲击。

对不同控制参数下的能耗以及吞吐率进行比较之后可以得知，较高的推力有利于压缩单次作业的时间，不过会让瞬时功率的峰值有所上升。仿真显示，把加速度约束和识别延时联合优化后，系统在分拣线连续运行的时候能够同时兼顾效率以及稳定性，这表明电磁系统适宜用于高频、低接触、可追踪的仓储自动化作业。

4.2. 原型实验与结果讨论

搭建一个包含直线电机滑台、RFID 读写器、霍尔位移检测模块以及 PLC 控制器的原型平台，然后测试入库搬运和定点停靠的过程。如表 4 显示，在不同载荷的情况下，系统能够保持推力输出的稳定，并且标签识别的成功率较高；引入了电流闭环以及位置补偿之后，在 40 kg 载荷下终点偏差从 2.4 mm (无补偿)减小至 1.6 mm，速度波动峰值从 0.25 m/s 降至 0.12 m/s，降幅分别为 33.3%和 52.0%，表明电磁方案在实际的仓储作业中具备可实施性。

Table 4. Prototype experiment and result discussion
表 4. 原型实验与结果讨论

工况载荷/kg	平均运行时间/s	终点误差/mm	识别成功率/%	单次能耗/Wh
10	2.3	0.7	99.2	12.4
20	2.5	0.9	99.0	14.1
30	2.8	1.2	98.7	16.8
40	3.2	1.6	98.3	19.5

4.3. 技术挑战与未来发展趋势

目前，电磁技术在智能仓储落地方面会面临一些限制。一方面，直线电机以及磁悬浮装置对供电稳定性、安装精度以及控制参数标定的要求比较高，在复杂工况当中容易受到温升的影响谐波以及电磁干扰所带来的影响，导致定位误差在长时间运行后可能从 ± 0.5 mm 扩大到 ± 1.2 mm，系统的平均无故障时间 (MTBF)从 5000 小时下降至约 3500 小时；其二，在金属货架密集、标签遮挡以及多设备并行作业的环境中，RFID 以及电磁传感模块仍然可能会出现识别盲区、信号耦合和数据延迟；其三，连续运行所产生的能耗以及维护成本，限制了大规模推广效率。

未来的发展方向会更加倾向于把高效、协同以及智能化。一方面，可以通过低损耗磁性材料、宽禁带功率器件以及轻量化执行机构来提高系统的能效；另一方面，将数字孪生、边缘计算与自适应控制算法结合，可以实现电磁驱动、感知以及调度的一体化优化。面向更为复杂的仓储场景，电磁技术会和机器视觉、无线通信以及多机协同控制开展深度融合，推动仓储装备朝着柔性化、无人化以及高精度的方向持续地演进。

5. 结语

本文围绕着电磁学在物流仓储自动化当中的核心应用来开展研究，系统地分析电磁直线驱动、磁悬浮导向、射频识别以及电磁传感等关键技术，构建基于电磁原理来开展的定位与驱动模型，并且通过仿真以及原型实验来进行验证。实验结果表明，在 10 kg 至 40 kg 载荷范围内，系统分拣速度提升 28%~39%

(相比传统机械传动), 终点误差控制在 0.7 mm~1.6 mm 之间, 识别成功率保持在 98.3%~99.2%。动态响应方面, 从启动到最高速度 2 m/s 的时间从 0.45 s 缩短至 0.28 s (优化 38%)。相比传统系统, 机械磨损导致的维护频次从每月 1 次降低至每季度 1 次。定量磨损测试显示, 经过 10 万次往复运行, 电磁驱动系统的关键导轨磨损量仅为 0.03 mm, 而传统丝杠系统为 0.21 mm, 磨损量降低 86%, 年度维护成本估算下降约 62%。

面向未来, 电磁技术需要进一步去处理供电稳定性、电磁干扰以及能耗控制等方面的工程挑战, 通过与数字孪生、边缘计算以及多机协同技术的深度融合, 实现仓储系统更高效朝着更加智能、更加可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1] 顾硕. 技术融合创新, 自动化持续赋能物流仓储行业[J]. 自动化博览, 2025, 42(4): 3.
- [2] 王琦, 程星华, 程孟璇, 等. 基于自动化物流仓储系统的固体制剂车间布局设计探索[J]. 产业与科技论坛, 2023, 22(4): 33-35.
- [3] 段来英. 物流仓储系统自动化新技术[J]. 机械设计, 2021, 38(9): 158.
- [4] 李林, 杨耀勇, 王成明. 物流自动化技术在汽车总装车间的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2021(10): 18-24.
- [5] 吴瑜. 自动化拆垛系统在物流仓储中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 186+188.
- [6] 顾硕. 物流仓储行业探索高柔性自动化解决方案[J]. 自动化博览, 2024, 41(4): 3.
- [7] 余冬. 运用 BIM 技术加速商业物流仓储自动化[J]. 中国商人, 2023(11): 198-199.
- [8] 武艺, 张素银, 鲍思月, 等. 对自动化物流仓储机器人的标准化研究[J]. 标准科学, 2021(S1): 228-239.
- [9] 杨黎明, 李鑫. 物流自动化立体库柔性组合式存储控制系统设计及应用[J]. 起重运输机械, 2021(12): 70-73.