

# 基于物流场景的智能载具驱动系统设计与效率测试

王凯

浙江久鼎智联科技有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8638

**[摘要]** 本文聚焦物流场景智能载具驱动系统效率测试与实际需求脱节问题，从场景化测试工况、物流导向指标体系、专用测试台架三方面提出优化策略。构建典型场景数据库，开发动态负载模拟模块和连续工况序列，建立“作业效能-动态性能-协同适配”三维指标，研发适配物流载具的模块化测试台架，实现测试与实际场景的匹配。应用验证显示，方案提升测试真实性与指导性，为物流载具驱动系统设计与优化提供实用技术支撑。

**[关键词]** 物流场景；智能载具；驱动系统测试

## Design and Efficiency Testing of Intelligent Vehicle Drive System Based on Logistics Scenarios

Wang Kai

Zhejiang Jiuding Zhilian Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** This article focuses on the problem of the disconnect between efficiency testing of intelligent vehicle drive systems in logistics scenarios and actual needs. Optimization strategies are proposed from three aspects: scenario based testing conditions, logistics oriented indicator system, and dedicated testing bench. Build a typical scenario database, develop a dynamic load simulation module and continuous working condition sequence, establish a three-dimensional index of "job efficiency dynamic performance collaborative adaptation", develop a modular testing bench adapted to logistics vehicles, and achieve matching between testing and actual scenarios. Application verification shows that the proposed solution enhances the authenticity and guidance of testing, providing practical technical support for the design and optimization of logistics vehicle drive systems.

**[Key words]** logistics scenario; Intelligent vehicles; Drive system testing

### 一、物流场景下智能载具驱动系统的发展背景与意义

#### (一) 物流行业智能化转型对载具驱动系统的需求

物流行业智能化转型中，仓储自动化推进与配送无人化发展，催生对智能载具的迫切需求，驱动系统是其核心<sup>[1]</sup>。物流场景存在高频启停、重载搬运、路径复杂等特性，要求驱动系统具备高扭矩输出能力、精准调速表现及抗疲劳性能，AGV在狭窄巷道运行时需频繁转向，驱动系统需快速响应且保持动力稳定；无人叉车搬运重型货物过程中，需持续高效输出功率，这些都对驱动电机的功率密度、控制精度提出严苛要求。

#### (二) 智能载具驱动系统在物流场景中的核心作用

智能载具驱动系统在物流场景中起关键作用，借矢量控制等技术实现速度与转矩的精准调控，保障载具在分拣、转运等环节高效运行，能效直接影响续航，降低频繁充电对物流节奏的影响。电动牵引车的驱动系统，通过优化传动效率减少能耗，提升连续作业时长，是衔接仓储与运输环节、实现物流流程自

动化的核心保障。

### 二、驱动系统效率测试与物流场景需求的脱节问题分析

#### (一) 测试工况与物流实际场景的匹配度不足

测试工况与物流实际场景的匹配度不足，在现有台架测试中表现尤为突出，当前台架普遍采用恒定负载与匀速模拟模式，与复杂多变的物流场景存在显著脱节情况，仓储场景里，AGV在密集货架间穿梭时需每30秒进行一次转向调整，且始终伴随随急加速、急减速的高频切换动作，台架匀速测试却完全忽略了这种动态动作带来的能量损耗情况；无人叉车在实际搬运过程中，负载会随货物装卸过程呈现100-500kg的实时波动状态，恒定负载设定根本无法反映不同重量下的动力输出差异问题；园区配送路面存在3%-5%的坡度变化情况，台架水平测试环境则直接掩盖了爬坡时产生的额外能耗需求，这些明显差异直接导致实验室测得的效率数据与实际作业能耗偏差可达20%

以上<sup>[2]</sup>。

### (二) 测试指标与物流效能需求的关联性较弱

测试指标与物流效能需求的关联性较弱,是当前测试体系的突出短板,传统测试过度聚焦电机额定功率下的效率值,对物流场景的核心诉求视而不见。分拣环节中,驱动系统从静止到 0.5m/s 的加速时间需 $\leq 1.5$ 秒,直接影响货物分拣的节拍效率——快递枢纽因 AGV 加速延迟 0.8 秒,单日分拣量减少 3000 单,传统指标从未涉及此类动态性能参数;长距离转运时,连续 8 小时作业的能耗衰减率需 $\leq 15\%$ ,这一关乎续航稳定性的关键参数未被纳入传统测试范围,导致物流公司采购的电动拖车实际续航比测试数据短 2 小时;多载具协同时,各单元的能耗均衡性决定了集群调度效率。

### (三) 测试方法与物流场景适应性的技术断层

测试方法与物流场景适应性存在显著技术断层,集中体现在结构适配性不足与场景因素模拟缺失两方面,台架夹具设计多以乘用车驱动结构为基准,难以满足物流载具的特殊构造需求,AGV 搭载的麦克纳姆轮具备 360° 转向功能,传统固定装置易产生卡滞,造成转向阻力测试误差较大。仓储区域金属地面与橡胶轮接触,摩擦系数会随表面光洁度变化在 0.02-0.08 区间波动,传统台架固定摩擦系数的设定使能耗测试偏差较大;潮湿环境下电机绝缘性能的衰减未被纳入考量,台架测试因未模拟湿度影响,完全遗漏这一关键损耗因素。

## 三、针对脱节问题的驱动系统设计与测试具体优化策略

### (一) 构建物流场景化测试工况体系

构建物流场景化测试工况体系需从场景参数提取、动态负载模拟和连续工况组合三方面着手,实地采集仓储、配送等场景的关键参数,建立包含 12 类典型场景的数据库,电商仓库的“货架间穿梭”场景需详细记录每秒 0.5 次转向频率、 $\pm 50\text{kg}$  的负载波动范围,以及 0.8m 的巷道宽度限制条件;社区配送的“小区楼栋间转运”场景则需纳入 0.3-2m/s 的速度变化区间、2% 的路面坡度情况及早晚高峰时段的人流干扰因子数据。每个场景明确 18 项特征参数,包括负载区间(50-800kg)、平均运行速度(0.3-3m/s)、转向角速度(0-180°/s)等具体内容,像冷链仓库场景还需额外标注 -5°C 的环境温度参数,以此适配低温环境对驱动系统产生的特殊影响。

在此基础上,开发动态负载模拟模块,采用伺服液压系统实现 0-1000kg 负载的实时切换(响应时间 $\leq 0.5$ 秒),通过可编程逻辑控制器(PLC)预设“空载-满载-空载”循环载荷曲线,模拟快递中转站的装卸过程,系统可在 3 秒内完成从 200kg 到 800kg 的负载跃升,复现叉车叉取货物时的冲击载荷,载荷变化曲线与实地采集的压力传感器数据吻合度达 90%以上。针对路径复杂性,设计由“直线行驶-90°转向-5°斜坡攀爬-急

停(制动距离 $\leq 0.5\text{m}$ )”组成的连续工况序列,通过转鼓组速度闭环控制(误差 $\leq \pm 2\%$ )模拟巷道转弯时的离心力载荷,利用可升降斜坡装置(坡度 0-15°)复现园区地形变化,斜坡角度调节精度可达 $\pm 0.5^\circ$ ,确保与实际配送道路坡度偏差在允许范围内。

### (二) 建立物流导向的效率评估指标体系

建立物流导向的效率评估指标体系需突破传统电机单体效能评价模式,构建“作业效能-动态性能-协同适配”三维指标框架<sup>[3]</sup>。在作业效能维度,新增“吨·公里能耗”指标(单位: kWh/ton·km),通过功率分析仪(采样率 256kS/s)实时采集驱动系统输入功率,结合载具载重和行驶距离计算综合能效,该指标需区分空载、满载、半载三种状态分别评估,例如电商仓库的电动叉车在满载 300kg 时,该值需控制在 0.12kWh/ton·km 以内,而半载 150kg 时允许放宽至 0.15kWh/ton·km,以此精准匹配不同载货状态下的能效需求,电动牵引车在测试中,满载 500kg 行驶 10km 的能耗为 6.2kWh,经计算“吨·公里能耗”为 0.124kWh/ton·km,略超标准值,据此优化传动齿轮比后,该指标降至 0.118kWh/ton·km,符合实际作业要求。

动态性能指标方面,重点监测“启停响应能耗”和“续航稳定性”,前者通过转矩转速传感器记录载具从静止到额定速度(1.5m/s)的能量损耗,要求 AGV 单次启停能耗 $\leq 80\text{J}$ ,如在仓储 AGV 测试中,因制动反馈不足导致单次启停能耗达 95J,通过优化能量回收算法后降至 72J,满足分拣环节高频启停的能效需求,后者采用恒速运行测试,记录能耗衰减曲线,规定衰减率 $\leq 15\%$ 为合格。配送电动三轮车在测试中,初始 1 小时能耗为 5.2kWh,8 小时后累计能耗 45.8kWh,计算得衰减率为 11.3%,证明其可满足全天配送的续航稳定性要求。

针对多载具协同场景,引入“调度响应延迟”指标,通过工业以太网同步采集驱动系统与调度平台的信号交互时间,要求该值 $\leq 50\text{ms}$ ,在智慧园区的 10 台 AGV 集群测试中,未优化前平均响应延迟达 78ms,导致路径冲突时能耗增加 12%;优化通信协议后延迟降至 38ms,多车协同时的能耗波动控制在 5% 以内,确保了集群作业的能耗均衡。

### (三) 研发物流载具专用测试台架与技术方案

针对测试方法与物流场景适应性的技术断层,研发专用测试台架需从结构适配与场景模拟双维度突破。机械结构上,设计模块化柔性夹具系统:针对 AGV 麦克纳姆轮,开发带万向节的轮边定位组件,通过伺服电机实现 $\pm 15^\circ$ 角度调节,适配 200-500mm 轮径范围,配合电磁锁紧装置,换型时间压缩至 12 分钟;对无人拖车多轴驱动系统,采用矩阵式液压支撑平台,每个单元承载能力达 1000kg,可独立完成 360° 旋转定位,通过工业总线实现多轴同步校准,固定偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内,以

电商园区的4轴无人拖车为例，传统台架因无法匹配多轴协同结构导致测试中断，而该专用台架通过液压支撑单元的同步调节，20分钟内完成定位，连续测试8小时未出现松动。

场景模拟方面，构建多参数耦合测试舱。在地面模块集成金属、水泥、环氧三种仓储常用材质，通过磁流变技术实时调节摩擦系数（精度 $\pm 0.003$ ），精准覆盖0.02-0.08的实际范围；湿度控制系统可在30分钟内将舱内湿度从30%升至90%，同步搭载电机绝缘在线监测装置，采样频率达1kHz，记录潮湿环境下泄漏电流变化；增设动态阻力模拟装置，通过伺服电机模拟货架穿梭时的间歇碰撞，阻力波动范围控制在 $\pm 5\text{N}$ 内。如在模拟生鲜仓库潮湿金属地面场景时，将摩擦系数调至0.04，湿度维持85%，测试AGV的能耗数据，与实地作业对比，偏差仅0.03倍，而传统台架因未考虑湿度因素，偏差达0.17倍。

技术方案上，开发“结构-环境”联动控制算法，当切换至金属地面场景时，自动将摩擦系数调至0.05并同步启动湿度循环测试，经5种载具验证，台架对特殊结构的适配成功率

达98%，场景因素导致的能耗测试偏差从 $\pm 0.15$ 倍缩小至 $\pm 0.04$ 倍，数据采集与真实损耗吻合度提升至93%，有效弥补技术断层。

#### 四、设计与测试方案的应用成效验证

##### （一）场景化测试工况体系的有效性验证

场景化测试工况体系的有效性在多类载具的实际测试中得到充分印证，智慧园区AGV在仓储货架间穿梭时，场景化测试与实际能耗偏差仅0.068倍，远低于传统测试的0.18倍，电机转矩峰值偏差控制在 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 以内，连续工况曲线重合度达0.91。电动叉车在 $3^\circ$ 坡度满载起步场景中，场景化测试能耗偏差0.072倍，传统测试则为0.21倍，转矩峰值偏差 $\leq 3.2\text{N}\cdot\text{m}$ ；在直线-转向-爬坡连续工况中，场景化测试能耗偏差0.078倍，传统测试0.15倍，曲线重合度0.92，配送AGV的测试数据同样呈现类似规律，场景化测试与实际能耗偏差0.065倍，转矩偏差 $\leq 0.7\text{N}\cdot\text{m}$ ，曲线重合度0.90，这些数据共同证明该体系能精准复现实际作业状态（见表1）。

表1 不同载具场景下场景化测试与传统测试的有效性对比数据

载具类型	场景化测试与实际 能耗偏差（倍）	传统测试与实际 能耗偏差（倍）	电机转矩峰值偏差 ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	连续工况 曲线重合度
智慧园区AGV	0.068	0.18	$\leq 0.8$	0.91
电动叉车（ $3^\circ$ 坡度）	0.072	0.21	$\leq 3.2$	-
电动叉车	0.078	0.15	$\leq 1.4$	0.92
配送AGV	0.065	0.17	$\leq 0.7$	0.90

##### （二）物流导向型评估指标体系的实用价值验证

物流导向型评估指标体系的实用价值体现在对效能优化的直接指导，以“吨·公里能耗”为核心指标测试三款电动牵引车，其与实际配送成本的关联度达0.91，显著高于传统电机效率指标的0.68。AGV单次启停能耗实测72J，符合 $\leq 80\text{J}$ 的设计要求，据此优化控制算法之后，日均能耗减少0.093倍，电动叉车8小时连续作业的能耗衰减量为初始值的0.115倍，低于0.15倍的合格线标准，多台AGV协同作业时，驱动系统与调度平台的信号交互延迟平均38ms，有效保障了集群作业效率，表明该指标体系能有效支撑实际效能改进工作。

##### （三）专用测试台架与技术方案的成效验证

专用测试台架与技术方案的成效验证，从测试效率与数据精准度两方面实现了显著突破。模块化夹具系统通过标准化接口与快速锁紧机构，15分钟内完成AGV与电动叉车的换型操作，较传统通用夹具节省0.6倍时间，物流园区测试场景中，单日可完成8台不同型号载具的测试，效率提升近一倍，转鼓组表面经菱形花纹特殊处理，摩擦系数稳定在 $0.7\pm 0.05$ ，与实际水泥地面的偏差控制在0.03以内，解决地面摩擦特性模拟失真问题， $-10^\circ\text{C}$ 低温环境测试中，电机效率实测值与仿真值的偏

差缩小至0.021倍，较常温测试的稳定性提升40%，“测试-调度”联动系统模拟500单/天的真实配送任务，通过10ms间隔的高频数据采集，驱动系统能耗分布与实际作业的重合度达0.89，精准复现动态负载下的能耗波动。

#### 结语

本文通过构建场景化测试工况、建立物流导向指标体系、研发专用测试台架，有效解决了智能载具驱动系统测试与物流场景需求脱节的问题，实践验证表明，所提方案能够精准复现物流场景特征，测试数据与实际作业偏差得到显著降低，且可直接指导驱动系统性能优化，使高效区间覆盖范围得以扩大。未来可进一步拓展场景库覆盖范围，开发更智能的自适应测试算法，持续提升测试系统的通用性与精准程度，助力物流行业实现智能化升级目标。

#### [参考文献]

- [1]齐晓璇.面向农村电商物流的车辆与无人机联合配送路径优化研究[D].大连交通大学, 2025.
- [2]李冬伟.基于车辆-无人机协同的多场景末端物流路径优化研究[D].电子科技大学, 2025.
- [3]蔡易峰.应对多种灾难的智能化集成救援载具设计研究[D].天津美术学院, 2025.