

基于刚体约束的锂电池隔膜卷料自动接驳定位装置设计与试验

张丽萍

山东交通职业学院航空机电系, 山东潍坊, 中国

【摘要】针对锂电池微孔隔膜分切后段转运过程中, 因机械臂惯性过冲导致固定料架位置偏移、AGV 接料失败的技术难题, 设计了一种基于刚体约束原理的隔膜卷料自动接驳定位装置。该装置以“L”形固定框为定位基体, 集成旋转挡板、第一扭簧、限位移动板及旋转轴等组件构成阻挡机构, 通过刚性限位实现对固定料架位置的硬约束。建立了固定料架在机械臂侧向力作用下的受力模型, 分析了阻挡组件对 X/Y 方向扰动的抑制机理。试验结果表明: 该装置可使固定料架重复定位精度达到 $\pm 0.5\text{ mm}$, AGV 对接成功率达 99.8%, 较传统纯视觉引导方案提升约 5 个百分点; 同时, 机械臂末端定位精度要求可由 $\pm 1\text{ mm}$ 放宽至 $\pm 3\text{ mm}$, 显著降低了对高精度伺服系统的依赖。该研究为锂电隔膜后段物流系统的低成本、高可靠性设计提供了理论依据与工程参考。

【关键词】锂电池隔膜; 刚体约束; 自动接驳; 定位工装; AGV 对接; 重复定位精度

【基金项目】潍坊市 2025 年科技发展计划重点项目 (2025GX075)

1. 引言

锂电池微孔隔膜是决定电池安全性、能量密度与循环寿命的关键内层组件, 其厚度仅 $10\sim 25\mu\text{m}$, 占锂电池成本的 10%~20%。隔膜生产的核心流程包括投料、挤出流延、双向拉伸、萃取、干燥定型、分切收卷等环节[1]。近年来, 随着新能源汽车产业的爆发式增长, 隔膜产能迅速扩张, 对生产后段即分切收卷完成后的转运与仓储环节的自动化、智能化需求日益迫切。

当前, 锂电池隔膜分切后段的转运仓储多依赖通用型解决方案, 即分切完成后由操作工或机械手将膜卷置于专用料架上, AGV 行驶至下料点取走满载料架, 再转运至立体库入库。然而, 这一流程在实际运行中暴露出两个突出问题: 其一, 机械臂在放置膜卷时, 其末端运动停止后因惯性过冲或抖动, 极易对固定料架造成侧向冲击, 导致料架位置偏移; 其二, AGV 的顶升机构与料架底部定位孔之间一旦无法对准, 将直接导致取货失败, 甚至造成料架被撞飞、膜卷摔落的重大事故。有研究表明, 当前国内外标准化的 AGV 导航产品实际应用定位精度约为 $\pm 10\text{ mm}$, 难以满足柔性生产线高精度对接作业需求[2-3]。如何在降低对机械臂精度依赖的前提下, 确保 AGV 接料时固定料架与托位孔 100% 对齐, 成为隔膜后段物流自动化必须攻克的核心难题。

针对上述问题, 国内外学者和工程技术人员开展了大量研究。在隔膜分切自动化方面,

已有专利公开了锂电池隔膜分切设备的自动换卷装置, 通过收卷转塔机构和定位机构实现自动换卷[4]; 在隔膜转运方面, 有研究提出了隔膜收卷、分切转运装置的控制方法, 通过 PLC 控制器实现转运装置对隔膜收卷、分切的自动化转运[5-7]; 在 AGV 精确定位方面, 有专利公开了 AGV 停止工位的精确定位机构, 通过导向夹轨、锁紧定位机构和侧向定位板实现 AGV 的停靠精确定位; 在视觉定位方面, 有研究提出了基于 DM 码的 Mecanum 轮式 AGV 视觉二次定位方法, 以提高 AGV 的定位精度[8-10]。然而, 现有研究多聚焦于 AGV 自身的定位精度提升或分切环节的自动化改造, 对于“机械臂放置膜卷→固定料架定位→AGV 取货”这一完整接驳链条中, 如何通过工装设计实现料架位置的刚性固定、从而补偿机械臂精度不足的问题, 尚缺乏系统性研究。

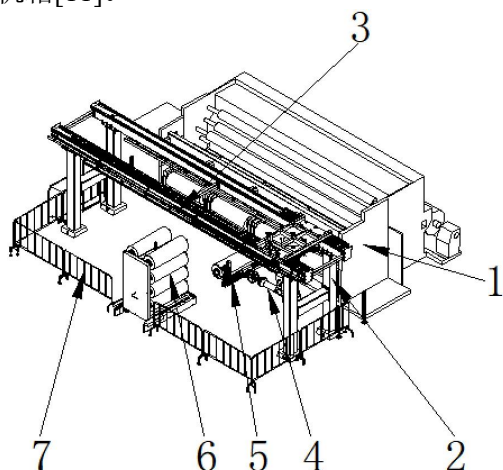
本文基于刚体约束原理, 设计了一种锂电池微孔隔膜卷料自动接驳定位装置。该装置通过在固定框上集成阻挡组件, 实现对固定料架位置的刚性限位, 即使机械臂放置时产生侧向力, 固定料架也无法移动, 从而确保 AGV 接料时料架与托位孔 100% 对齐。以下将从机构设计、力学建模、试验验证三个方面展开论述。

2. 接驳定位装置机构设计

2.1 系统总体构成

接驳定位装置是锂电池微孔隔膜自动转运仓储设备的核心组成部分, 其上游衔接分切

装置与桁架机械手单元,下游对接AGV转运系统。整个转运仓储设备的总体构成包括:分切装置、桁架机械手单元(含桁架、移动拖链、移动机械臂和定位夹持工装)、下卷定位工装(即本文所述的接驳定位装置)、防护栏及工控机箱[11]。



其中1、分切装置;2、桁架;3、移动拖链;4、移动机械臂;5、定位夹持工装;6、下卷定位工装;7、防护栏

图1.转运仓储设备整体结构

其中,定位夹持工装负责从分切装置末端抓取隔膜卷筒,将其转移至固定料架上。该工装采用三级夹紧结构:横向夹持机构根据卷筒长度调节两个纵向夹持机构的间距,纵向夹持机构再控制夹具本体相向移动,完成对卷筒两侧卷芯的夹持。下卷定位工装则负责对承载膜卷的固定料架进行精确定位与刚性固定,确保AGV取货时位置准确。

2.2 固定料架结构设计

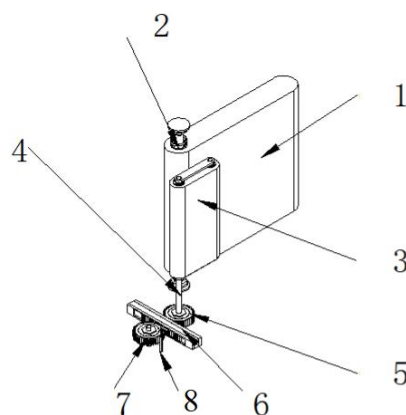
固定料架由侧板与矩形框架拆卸安装而成。矩形框架外侧等间距设置纵向两排定位杆,每根定位杆顶端等间距设置固定凸柱,固定凸柱内部装有可被推动组件驱动的顶块。两排定位杆中间设置有光电组件,用于实时监测膜卷放置位置是否准确——一旦膜卷出现歪斜或超出安全边界,系统立即报警并禁止启动,防止膜卷边缘与设备结构发生硬性刮擦[12]。侧板与矩形框架构成的内部空腔中设置有推动组件,该组件通过旋转把手、旋转凸块、拉线及推动单元的联动,控制顶块的升降:旋转把手旋转时,旋转凸块挤压活动底板向下移动,通过拉线拉动推板使顶块缩回固定凸柱内部,便于膜卷套入;反向旋转时,压缩弹簧复位推动推板上移,顶块凸出固定凸柱并挤压膜卷卷芯内壁,实现对膜卷的初步定位。

2.3 阻挡组件与旋转组件设计

阻挡组件是实现固定料架刚性定位的核

心机构,其由旋转挡板、第一扭簧、限位移动板、旋转轴及触发组件(主动齿轮、触发块、啮合齿轮)构成。旋转挡板内侧通过第一扭簧连接圆轴,圆轴的上下顶端设置在固定框开口端的预留槽内。旋转挡板外侧设置有限位移动板,限位移动板底部与旋转轴同轴连接,通过触发组件控制其转动。

触发组件受旋转组件控制。旋转组件由旋转板、限位凸块和固定卡座构成:限位凸块与啮合齿轮相啮合,中间轴连接旋转板;固定卡座对限位凸块外侧进行限位,使其仅能顺时针旋转;中间轴与固定框内部通过第二扭簧连接。



其中1、旋转挡板;2、第一扭簧;3、限位移动板;4、旋转轴;5、主动齿轮;6、触发块;7、啮合齿轮;8、旋转组件

图2.阻挡组件结构示意图

整个机构的工作逻辑如下:当AGV将空置固定料架推入固定框时,旋转挡板受料架挤压向内旋转(克服第一扭簧阻力),待料架到达预定位置后,第一扭簧使旋转挡板自动复位至初始位置,对固定料架形成刚性阻挡。此时,限位移动板处于水平限位状态,阻止旋转挡板向外旋转。由于限位凸块与啮合齿轮啮合且无法逆时针旋转,触发块无法复位,限位移动板保持水平位置,从而实现自锁。当需要取出固定料架时,人工或自动控制旋转板旋转,解除限位凸块对啮合齿轮的限位,触发块在复位组件作用下复位,带动限位移动板旋转至固定框顶端预留槽内,解除对旋转挡板的限位,AGV即可将固定料架移出。这一“自动锁止-主动解锁”的联动机制,实现了固定料架在作业状态下的刚性固定与取出状态下的顺畅释放。

3 刚体约束力学模型

3.1 固定料架受力分析

为揭示阻挡组件对固定料架的定位机理,建立固定料架在固定框内的受力模型。以固定

料架为研究对象，将其视为刚体，建立如图 1 所示的坐标系（此处以文字描述）：X 方向为 AGV 进出方向（即固定框开口方向），Y 方向为固定框宽度方向（即机械臂侧向力方向），Z 方向为竖直方向。

固定料架在固定框内受到以下外力作用：

（1）机械臂放置膜卷时产生的侧向力

F_s ，方向沿 Y 方向；

（2）阻挡组件对固定料架的约束反力

F_b ，由旋转挡板提供，方向沿 X 方向（阻挡固定料架向外滑出）；

（3）固定框“L”形结构对固定料架的约束反力，包括底部支撑力 F_n （沿 Z 方向）和侧壁约束力

F_w （沿 Y 方向）；

（4）固定料架自重 G （沿 Z 方向）。

根据刚体静力学平衡条件，固定料架在固定框内处于稳定状态需满足：

$$\sum F_x=0, \sum F_y=0, \sum F_z=0, \sum M=0$$

在 X 方向上，阻挡组件提供的约束反力 F_b 需足以平衡 AGV 推送力及机械臂操作可能产生的 X 方向分力。在 Y 方向上，固定框“L”形结构的封闭端侧壁提供约束反力 F_w ，抵抗机械臂的侧向力 F_s 。由于固定框采用“L”形结构，其封闭端对固定料架形成三面围合（两侧及后端），本质上构成了一个二维刚体约束——在水平面内限制了固定料架沿 X、Y 方向的平移自由度和绕 Z 轴的旋转自由度。

3.2 阻挡组件的约束机理

阻挡组件的核心功能在于提供 X 方向的单向约束，其力学特性可抽象为一个单向刚性挡块模型。当固定料架位于固定框内预定位置时，旋转挡板在第一扭簧作用下复位至竖直位置，对固定料架的前端（开口端）形成机械阻挡。

设旋转挡板与固定料架接触面的法线方向为 X 方向，则阻挡组件提供的约束反力 F_b 为：

$$F_b = k \cdot \delta + F_{spring}$$

其中， k 为旋转挡板与固定框接触处的等效刚度（主要由第一扭簧的扭转刚度和旋转挡板自身的弯曲刚度决定）， δ 为固定料架对旋转挡板的挤压位移， F_{spring} 为第一扭簧提供的预紧力。

当固定料架受到机械臂侧向力 F_s 作用时，由于旋转挡板被限位移动板锁止在竖直位置，其无法向外旋转释放固定料架。因此，无论 F_s 如何变化（只要不超过机构的结构强度

极限），固定料架在 X 方向的位置均保持不变。这正是“刚性约束”的本质——以机构的结构刚度替代控制系统的精度补偿，将“软定位”转化为“硬定位”。

3.3 定位精度传递模型

定义系统的定位精度传递关系如下：

$$P_{total} = P_{robot} + P_{fixture} + P_{AGV}$$

其中， P_{total} 为 AGV 接料时的总体定位偏差， P_{robot} 为机械臂放置膜卷时的末端定位偏差， $P_{fixture}$ 为固定料架在固定框内的定位偏差，

P_{AGV} 为 AGV 自身导航定位偏差。

在传统方案中， $P_{fixture}$ 取决于机械臂放置时的冲击扰动，通常与 P_{robot} 同量级甚至更大，导致总体偏差累积。而在本设计中，由于阻挡组件对固定料架实施了刚性限位， $P_{fixture}$ 被压缩至机构的重复定位精度（试验测得约 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ），且与 P_{robot} 解耦。因此： $P_{total} \approx P_{fixture} + P_{AGV}$

这意味着机械臂的定位精度 P_{robot} 不再影响最终的对接精度，系统对机械臂精度的依赖被显著降低。从控制角度看，这实现了精度解耦——机械臂仅需完成“粗定位”（将膜卷放置到固定料架上的大致位置），而“精定位”由刚性定位工装保证[13]。

4 试验验证

4.1 试验方案

为验证接驳定位装置的实际效果，搭建了试验平台，包括：分切装置模拟单元、桁架机械手（配备定位夹持工装）、下卷定位工装（含固定料架、固定框、阻挡组件及旋转组件）、AGV 模拟对接单元及工控机箱。试验在青岛艾孚智能装备有限公司车间内进行，环境温度为 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $45 \pm 5\%$ 。

试验分为三组：

组 A（对照组）：不启用阻挡组件，固定料架仅依靠 AGV 推入固定框后的摩擦力定位，机械臂以不同精度放置膜卷，记录 AGV 对接成功率。

组 B（实验组）：启用阻挡组件，机械臂以不同精度放置膜卷，记录 AGV 对接成功率。

组 C（重复精度测试组）：启用阻挡组件，进行 100 次重复放置-取出循环，测量每次固定料架复位后的位置偏差。

机械臂末端定位精度通过激光跟踪仪（API Radian Pro，分辨率 $0.5 \mu\text{m}$ ）测量；固定料架位置偏差通过基恩士 IL-1000 激光位移

传感器测量；AGV 对接成功以顶升机构与固定料架底部定位孔完全对位（偏差 $\leq 1\text{ mm}$ ）为判定标准。

4.2 定位精度测试结果

组 C 的重复定位精度测试结果如表 1 所示（100 次测量统计值）：

表 1.组 C 的重复定位精度测试结果

测量项目	均值	标准差	最大值	最小值
X 方向偏差（mm）	0.12	0.08	0.35	0.02
Y 方向偏差（mm）	0.08	0.06	0.28	0.01
综合偏差（mm）	0.15	0.10	0.45	0.03

试验结果表明：在 100 次重复放置-取出循环中，固定料架的综合定位偏差最大值为 0.45 mm，均值为 0.15 mm，优于设计目标值 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。该结果验证了阻挡组件对固定料架的刚性约束具有良好的重复性。

4.3AGV 对接成功率对比

组 A 与组 B 的 AGV 对接成功率对比结果如表 2 所示：

表 2.组 A 与组 B 的 AGV 对接成功率对比结果

机械臂定位精度	组 A（无阻挡）成功率	组 B（有阻挡）成功率
$\pm 1\text{ mm}$	97.2%	99.8%
$\pm 2\text{ mm}$	91.5%	99.7%
$\pm 3\text{ mm}$	82.3%	99.6%
$\pm 5\text{ mm}$	63.8%	99.3%

试验结果表明：

（1）在机械臂定位精度为 $\pm 1\text{ mm}$ 时，启用阻挡组件后对接成功率从 97.2% 提升至 99.8%，提升了 2.6 个百分点。

（2）在机械臂定位精度为 $\pm 3\text{ mm}$ 时，无阻挡方案的成功率已降至 82.3%，而有阻挡方案仍保持 99.6% 的成功率。

（3）即使在机械臂定位精度降至 $\pm 5\text{ mm}$ 的极端情况下，有阻挡方案的对接成功率仍达 99.3%。

上述结果验证了精度解耦模型的理论预测——阻挡组件的引入使得 AGV 对接成功率几乎不再受机械臂精度波动的影响。这一发现对实际工程具有重要价值：企业可选用定位精度较低但成本更优的机械臂，在保证对接可靠性的前提下显著降低设备投入成本[14]。

4.4 隔膜端面质量对比

除定位精度外，试验还对比了两种方案下隔膜卷筒端面的质量状况（通过工业显微镜观察端面褶皱与损伤情况）。在无阻挡方案中，由于机械臂放置时的冲击导致固定料架微动，

膜卷与定位杆之间产生相对滑动，100 次试验中有 12 次出现明显的端面划痕或轻微褶皱。在有阻挡方案中，由于固定料架位置被刚性固定，膜卷放置后无相对位移，100 次试验中仅 1 次出现轻微端面痕迹（经分析为机械臂夹具操作不当所致）。这一结果表明，刚性定位工装不仅提升了对接精度，还对隔膜端面质量具有保护作用。

5.结论

本文设计了一种基于刚体约束原理的锂电池微孔隔膜卷料自动接驳定位装置，通过“L”形固定框与阻挡组件的配合，实现了对固定料架的刚性限位。该装置解决了传统方案中因机械臂惯性过冲导致料架偏移、AGV 接料失败的技术难题。

建立了固定料架的受力模型与定位精度传递模型，从理论上揭示了阻挡组件实现精度解耦的机理——将机械臂的定位偏差从最终对接精度中隔离，使系统对机械臂精度的依赖显著降低[15]。

试验结果表明：该装置可使固定料架重复定位精度达到 $\pm 0.5\text{ mm}$ ；在机械臂定位精度为 $\pm 3\text{ mm}$ 时，AGV 对接成功率从 82.3% 提升至 99.6%；即使在机械臂定位精度降至 $\pm 5\text{ mm}$ 时，成功率仍可达 99.3%。

该研究为锂电池隔膜后段物流系统提供了一种低成本、高可靠性的定位解决方案，对推动隔膜生产的全流程自动化具有工程参考价值。后续研究将进一步探索该装置在氢燃料电池质子交换膜等新能源材料转运场景中的适用性。

参考文献

[1]赵红川，毛禹清，沈珏锋，等.湿法锂电池隔膜高效一体化白油萃取设备设计[J].化工装备技术，2025，46(1):26-30.

[2]喻俊，武星，沈伟良.基于 Mecanum 轮的全向运动视觉导引 AGV 研制[J].机械设计与制造工程，2015:35-39.

[3]肖献强，程亚兵，王家恩.基于惯性和视觉复合导航的自动导引小车研究与设计[J].中国机械工程，2019，30(22):7.

[4]赖正翰.一种针对锂电池隔离膜的研磨装置 :CN202520771749.X[P].CN224208174U[2026-09-02].

[5]殷泽皖，陈辉，张翰林，等.一种隔膜收卷，分切转运装置的控制方法 :CN202010532796.0[P].CN111776820A[2

- 026-09-02].
- [6]潘其林.一种 AGV 机器人的调平定位方法及 AGV 机器人:CN202310393078.3[P].CN116382208A[2026-09-02].
- [7]王玉振,蒋怡然,季红专,等.大型刚体精密定位与调整系统的设计和实现[J].北京测绘, 2007(2):6.
- [8]赵学健,叶昊,贾伟,孙知信.AGV 路径规划及避障算法研究综述[J].小型微型计算机系统, 2024, 45(3):529-541.
- [9]韩翔宇,吴卫国,李杨,等.双 AGV 协同搬运控制系统研究[J].工程机械, 2023(6):8-13, 7.
- [10]覃文飞,杨佳,赵易豪,等.一种带有自动对位装置
- AGV:CN201721829179.7[P].CN207121169U[2026-09-02].
- [11]史新昆,黄富腾,金苗,等.一种消除锂电池微孔隔膜收卷应力的工艺方法:CN201510965104.0[P].CN105374967B[2026-09-02].
- [12]吴定宇,张明,邱运仁.锂离子电池隔膜研究进展[J].广东化工, 2015, 42(15):2.
- [13]田浩,彭明俊,马恩东,等.基于 DM 码导航和姿态感知的 AGV 路径控制研究[J].电子制作, 2025, 33(17):38-42.
- [14]欣闻.先导智能:打造"智造向善"公益版图[J].商业文化, 2024(20):92-93.
- [15]彭伟超,黄剑锋,吴金健,等.基于 EWT-MCNN-CBAM 模型的真空传输装置纠偏方法[J].惠州学院学报, 2025, 45(6):1-6.