

山地电动单轨运输机系统自主充电-制动设计与试验

李善军^{1,2} 何志强^{1,2} 钱震宇^{1,2} 易天^{1,2} 余勇华^{1,2} 江溢华^{1,2} 杨方^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对山地果园单轨运输中补能效率低与制动可靠性不足问题,本研究设计了一种集自主定位取电与高可靠制动于一体的电动单轨运输机系统。基于山地果园运输工况,提出系统总体结构方案,包含楔形取电装置、定位供电装置、双鼓刹制动装置与道岔等关键单元,并阐明其协同机理。为验证制动性能,建立双鼓刹与常用单鼓刹多体动力学 ADAMS 仿真模型,比较紧急制动响应;进行双鼓刹 ANSYS 热-结构耦合分析,模拟紧急与持续制动下温度场与应力场。仿真结果表明所设计双鼓刹在 1.3 s 内刹停,显著短于单鼓刹的 2.29 s,紧急工况表现优良,极限持续制动时长为 112 s。实际试验结果表明运输机在 45°坡度稳定停驻,道岔平均换轨时间为 9.327 s。自主充电粗定位误差 10~80 mm,精定位误差 0.5~2 mm,角度偏差小于 2°,可实现精准对接。供电站充电效率 92%,输出电流 18~22 A(±10%),设备表面温度不大于 60℃,适用于户外补能场景。补能操作平均耗时 60 s,优于人工充电器 25 min。在额定载重、行驶速度 0.53 m/s 下坡紧急制动时,制动距离 423 mm、制动时间 1.29 s,优于单鼓刹(803 mm、2.23 s)。研究结果表明系统关键指标达到设计要求,可有效提升补能效率与制动安全性,并为工程化提供参考。

关键词: 单轨运输机; 自主充电; ADAMS 仿真; ANSYS; 热-结构耦合; 双鼓刹

中图分类号: S224.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)08-0407-11

OSID:



Design and Experiment of Autonomous Charging – Braking for Mountain Electric Monorail Transport System

LI Shanjun^{1,2} HE Zhiqiang^{1,2} QIAN Zhenyu^{1,2} YI Tian^{1,2} YU Yonghua^{1,2} JIANG Yihua^{1,2} YANG Fang^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming to address the problems of low energy replenishment efficiency and insufficient braking reliability in monorail transport systems for mountainous orchards, an electric monorail transporter integrating autonomous power pickup and high-reliability braking was proposed. Based on typical orchard operating conditions, an overall system configuration was developed, including a wedge-type power pickup device, a positioning power supply unit, a dual drum brake, and a turnout mechanism. The cooperative working principles of the key components were analyzed. Multibody dynamic models of the dual drum brake and a conventional single drum brake were established in ADAMS to evaluate emergency braking performance, and a thermo – structural coupled analysis was conducted in ANSYS to investigate temperature and stress under emergency and continuous braking conditions. Simulation results indicated that the dual drum brake achieved a full stop within 1.3 s, significantly shorter than that of the single drum brake. Experimental results showed that the transporter can stably park on a 45° half-slope, with an average turnout switching time of 9.327 s. Autonomous charging achieved high positioning accuracy, with fine positioning errors below 2 mm. The charging station exhibited a charging efficiency of 92% and stable output performance. The proposed system effectively improved both energy replenishment efficiency and braking safety, providing technical support for practical applications.

Key words: monorail transporter; autonomous power collection; ADAMS simulation; ANSYS; thermal – structural coupling; dual-drum brake

收稿日期: 2025 – 08 – 20 修回日期: 2025 – 11 – 10

基金项目: 国家柑橘产业技术体系项目(CARS – Citrus)、湖北省重点研发计划项目(2021BBA091)和湖北省农机研发制造推广应用一体化项目(202504)

作者简介: 李善军(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事水果智能化生产技术与装备研究, E-mail: shanjunlee@mail.hzau.edu.cn

0 引言

长期以来果园运输是果园管理中劳动强度最高而机械化水平最低的环节之一^[1],尤其在 我国丘陵地带,柑橘果园受限 于复杂坡地和狭窄行间距,传统人工运输效率低,而现有轨道运输机在能源补充和制动安全方面的表现也远不够理想,直接影响“最后一公里”运输效率与安全性。

当前国内外果园轨道运输机研究主要分为单轨和双轨运输机。单轨运输机早期以遥控为主,文献[2-3]提出链传动并配防侧翻结构的遥控单轨运输机,随后围绕驱动架构与效率开展优化,张凯鑫等^[4-5]提出橡胶辊摩擦驱动以简化传动并降低成本,文献[6-8]提出蓄电池电驱的双路传动链以改进运输与制动效率;在智能化方向,文献[9-12]研发基于高频 RFID 的在轨状态感知与测速定位系统,并结合山地遮挡与弯道密集场景开展位置感知与调度协同研究。双轨运输机,更侧重承载能力与运行安全。文献[13-14]较早开展了面向大坡度果园的自走式双轨柴油运输机研究,提出整机结构并完成样机验证;欧阳玉平等^[15]提出牵引式双轨运输机断绳制动装置并经台架验证,提升了溜车等极端工况下的制动可靠性;总体上,研究脉络呈现出由“内燃→电动”、由“部件优化→系统集成”、由“人工操控→感知与调度协同”的演进趋势。

尽管在行走机构、避障控制、转弯半径与爬坡性能等方面研究已有进展,但在“补能方式的自动化与稳定性”以及“制动系统的热效应分析与可靠性设计”上仍存在明显不足。当前多数电动运输机仍以蓄电池或滑触式接触供电为主,尚未将道岔切换与在轨对位充电整合为稳定的一体化补能方案;制动研究也多停留于机械装置设计,缺乏基于多体动力学与热-结构耦合的系统性验证。

针对上述问题,本文提出一种集自主定位充电与双鼓刹制动于一体的电动单轨运输机系统,采用“道岔切换—供电副轨—在轨对位充电”策略实现多机协同背景下精准对位与连续通行。系统采用 ADAMS 建立鼓刹多体动力学仿真模型并开展 ANSYS 热-结构耦合仿真,比较紧急与持续工况下制动性能,并进行田间试验验证可靠性。

1 总体结构及工作原理

1.1 总体结构

整机由道岔、机头、货箱、供电站及其内部的定位供电装置组成,见图 1,其中道岔将主轨与副轨连接形成分岔轨道,驱动装置、双鼓刹制动装置、传动

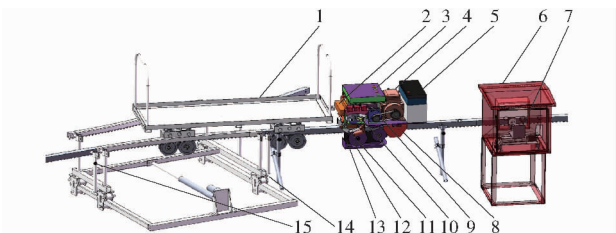


图 1 整机结构

Fig. 1 Overall machine structure

1. 货箱 2. 电机驱动器 3. 电控箱 4. 直流无刷电机 5. 48 V 锂电池 6. 供电站 7. 定位供电装置 8. 读卡器 9. 传动装置 10. 取电装置 11. 双鼓刹制动装置 12. 驱动装置 13. 机头 14. 道岔 15. RFID 标签

装置、电控箱、48 V 锂电池,通过这些部件拉动货箱,供电站与内部的定位供电装置配合机头上楔形取电装置构成充电系统。系统技术参数见表 1。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	700×400×300
驱动型式	齿条自走式
额定载重/kg	300
额定载重时制动距离/cm	≤50
配套动力	直流无刷电机
电机功率/kW	4
电机转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定行驶速度/(m·s ⁻¹)	0.53
控制方式	手动/遥控
最大遥控距离/m	300
电池容量/(A·h)	50

1.2 工作原理

轨道运输机由电机提供动力,经传动装置驱动机头与货箱沿轨运行。道岔用以切换主轨与副轨。充电时,道岔切换至供电副轨,机头由主轨进入副轨,基于 RFID 的站 位识别实现逐级减速与精准停靠(充电作业过程见图 2)。供电箱内的定位供电装置采用平移丝杠机构,并结合激光测距传感器与机头楔形取电装置自动对接;制动时,控制系统驱动制动电推杆,经三角杠杆带动可动转杆使双制动鼓作用于减速箱传动轴,实现快速高效制动,保障复杂工况下运行安全。

2 关键装置设计

2.1 充电装置设计

为实现轨道运输机的自主充电,按“轨道变轨—定点停车—定位平移—充电对接”的工作流程,采用 RFID 区段识别+分级速度控制+激光测距闭环的多阶段控制,见图 3。在供电站前沿轨道

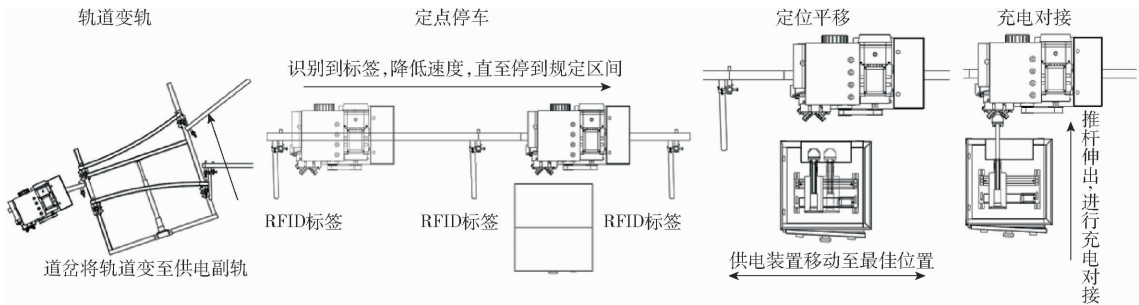


图 2 充电作业过程

Fig. 2 Power supply operation process

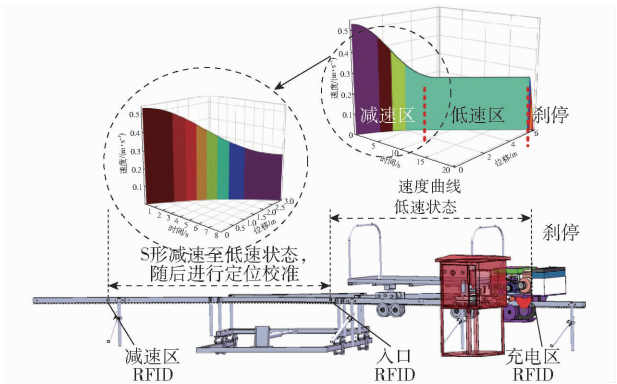


图 3 充电运动控制

Fig. 3 Power supply operation process

依次布设减速—入口—充电标签,机头上读卡器触发后按预设速度曲线由额定速度按 S 形减速至低速区并最终在充电区刹停,保证进站速度顺滑、并满足定位对接要求。机头刹停后,后续操作切换至供电站端;根据激光测距传感器扫描的距离—位置曲线,曲线中点为最佳对接点,驱动滚珠丝杆完成毫米级横向微调,然后推杆伸出,最终实现电气对接。

2.1.1 道岔设计

为了提高多台运输机协同作业的运输效率,设计一种适用于丘陵山地的轨道切换装置:运输机需充电时,最近道岔会切换弯曲变轨梁对接至供电副轨,使该机顺利驶入供电轨并停靠至供电站进行充电;同时站前的道岔复位至主轨,使后续运输机能够继续执行运输任务。综合顺畅度、结构简洁性、空间利用率与成本等指标,设计适用于山地单轨运输系统的平移式道岔。如图 4 所示,道岔由一体成型底座、2 段弯曲变轨梁、H 型轮组与电动推杆组成,并以预制混凝土固定;一端对接主轨,另一端分接 2 条分轨。上部组件在电动推杆驱动下沿滑行轨水平移动,实现轨道对位与通道切换。鉴于道岔直接关系行驶/充电切换的可靠性,设计阶段对电动推杆推力、轮轨接触与变轨梁刚度开展受力计算与极限工况校核^[16],确保结构稳定。

道岔完成换轨后,机头与货箱沿弯曲变轨梁行驶,牵引驱动力 F 在推杆方向产生水平分力,在满

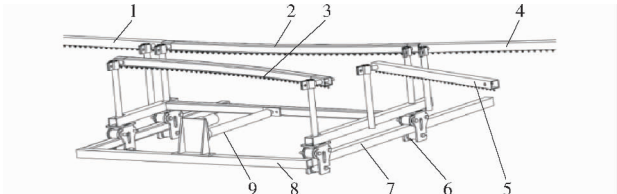


图 4 道岔整体结构

Fig. 4 Overall structure of turnout

1. 主轨 2. 弯曲变轨梁 1 3. 弯曲变轨梁 2 4. 运输主轨 5. 供电副轨 6. H 型轮组 7. 滑行轨 8. 底座 9. 电动推杆

载、机头位于道岔末端时达到最大值,为确保运行安全,电动推杆自锁力需大于该水平分力,图 5 为水平地面工况下牵引机头受力分析。

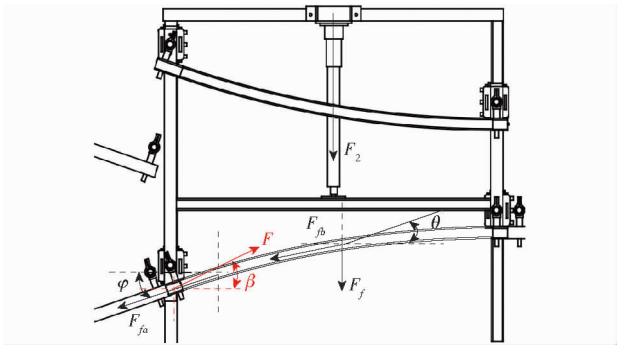


图 5 牵引机头位于装置末端时受力分析

Fig. 5 Force analysis when traction head was located at end of device

由图 5 可知,运输机满载行驶时产生的驱动力 F 为

$$F = \frac{F_{fa} \cos \varphi + F_{fb} (1 + \cos \theta)}{\cos \beta} \quad (1)$$

其中

$$F_{fa} = m_1 g f \quad (2)$$

$$F_{fb} = 0.5 g f (m_2 + m_3) \quad (3)$$

式中

F_{fa} ——机头受到摩擦力, N

F_{fb} ——货箱受到摩擦力, N

f ——运输机轮组与轨道综合摩擦因数,取 0.3

m_1 ——机头质量, kg

m_2 ——货箱质量, kg

m_3 ——货物质量, kg

g ——重力加速度, m/s^2

β ——货箱前轮组所受摩擦力与水平方向夹角, ($^{\circ}$)
 φ ——机头所受摩擦力与水平方向夹角, ($^{\circ}$)
 θ ——运输机牵引力与水平方向夹角, ($^{\circ}$)

计算得到驱动力 F 约为 1 802.9 N, F_{fa} 约为 264.6 N, F_{fb} 约为 720.3 N, 结合受力平衡可知, 电动推杆的拉力和道岔自身摩擦力分别为

$$F_2 = F \sin \beta - F_{fa} \sin \varphi - F_{fb} \sin \theta - F_f \tag{4}$$

$$F_f = f g (m_1 + m_2 + 0.5 m_3 + 0.5 m_4) \tag{5}$$

式中 F_2 ——电动推杆拉力, N
 m_4 ——道岔质量, kg
 F_f ——道岔自身摩擦力, N

在水平布置工况 (图 4), 计算得到 F_f 约为 695.8 N, 而所需推杆拉力 F_2 约为 -208.6 N (自身摩擦力可自锁), 远小于 F_f , 所以机头能正常通过。

2.1.2 供电站设计

(1) 供电站硬件部分设计

图 6 为供电站结构, 由定位供电装置、外壳和硬件部分组成。硬件部分在输入端和输出端均配置空气开关, 并外接指示灯以显示电源接入状态, 如图 7 所示, 同时设有手动控制按键, 以便在自动控制失灵时仍能进行手动供电。

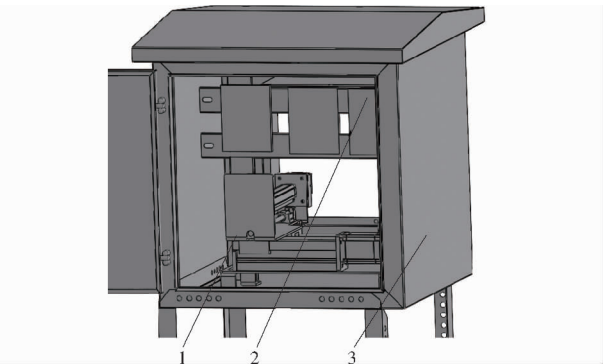


图 6 供电站结构
Fig. 6 Structure of power supply station
1. 定位供电装置 2. 硬件部分 3. 外壳

(2) 软件部分设计

供电站软件部分主要实现运输机充电过程的自动识别与安全控制, 流程如图 8 所示。充电时, 供电站控制充电模块接通电源, 进行自动充电; 在充电过程实时监测运行状态, 若出现异常则立即切断供电以确保安全。充电完成后, 系统断开供电并恢复待机状态。

2.1.3 楔形取电装置设计

楔形取电装置主要由凹形取电铜块、绝缘支架、弹簧、楔形取电支架及绝缘支架组成, 如图 9 所示。楔形取电支架固定于机头右侧, 支架两侧内侧分别安装有凹形取电铜块, 用于对接外部供电铜块; 铜块

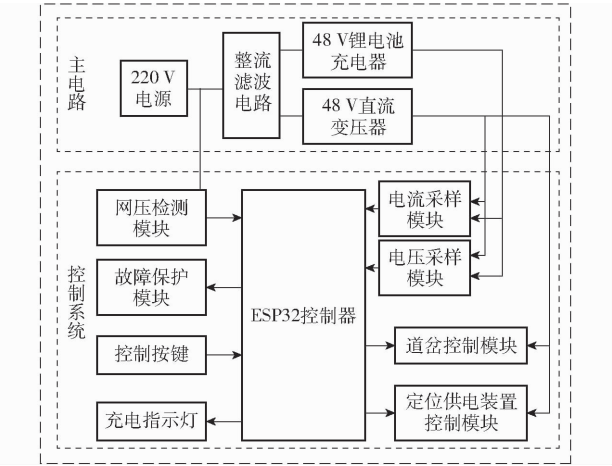


图 7 控制系统硬件组成
Fig. 7 Hardware architecture of control system

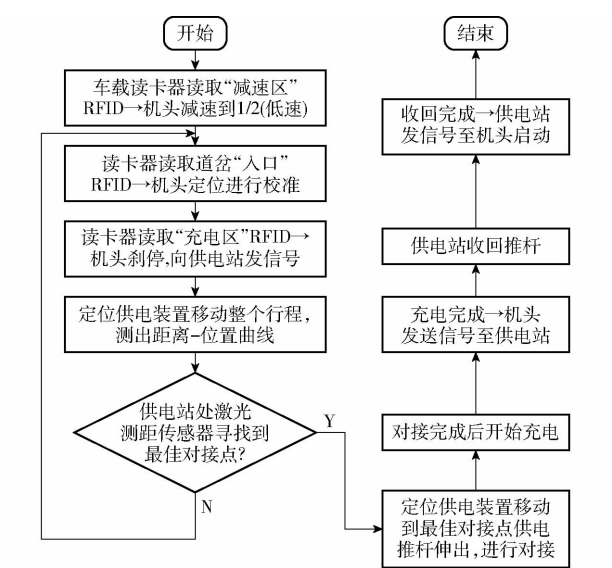


图 8 充电控制流程
Fig. 8 Power supply operation process

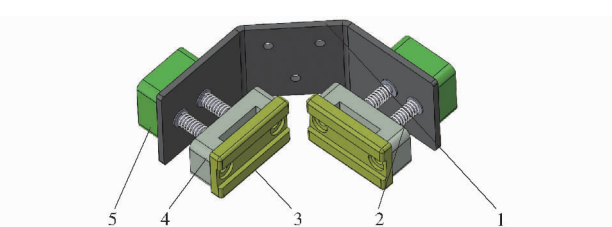


图 9 楔形取电装置
Fig. 9 Wedge-shaped power extraction device
1. 楔形取电支架 2. 弹簧 3. 凹形取电铜块 4. 绝缘支架 5. 绝缘支撑块

通过弹簧弹性连接在绝缘支架上。当供电站的电动推杆伸出并推动供电铜块与楔形取电装置接触时, 弹簧使凹形取电铜块自动适应对接时的偏差, 使其可靠接触。

2.1.4 定位供电装置设计

定位供电装置主要由丝杠平移机构、驱动电机、楔形绝缘架、底座、自润滑导轨、连接支架、电动推杆和激光测距传感器等组成 (图 10)。丝杠平移机构

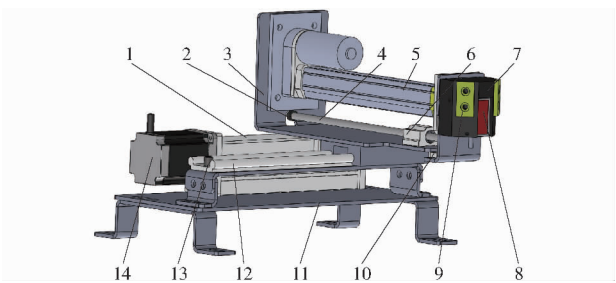


图 10 定位供电装置

Fig. 10 Positioning power supply device

1. 丝杆平移机构 2. 限位块 3. 连接支架 4. 光轴 5. 电动推杆 6. 光轴滑块 7. 楔形绝缘架 8. 激光测距传感器 9. 供电铜块 10. 光轴固定座 11. 底座 12. 自润滑导轨 13. 限位堵块 14. 驱动电机

驱动楔形绝缘架沿导轨横向运动,以实现供电铜块的精准对位。激光测距传感器布置于楔形绝缘架中心,实时检测绝缘架与机头楔形取电装置的距离。装置以恒速沿水平方向扫描,生成“距离-位置”曲线确定最佳对接点。受楔形取电装置结构特征影响,曲线在两侧区段从中心到外距离逐渐减小,进入对接窗口后距离突然增加约 45 mm 并保持不变。取该突然增加段中点作为最佳对接点,电动推杆驱动楔形绝缘架伸出,使供电铜块与取电装置凹形铜块可靠对接,从而完成定位与供电。

选用基于激光三角测量的位移传感器 NA - W3420 型,用于实时测定供电站定位装置与机头楔形取电装置的相对距离,实现对接过程的闭环控制^[17],如图 11 所示。

2.1.5 充电对接时间

充电作业过程中对接所用时间由机头与定位供电装置的运动时间,以及机头与供电站之间的通信时间组成,如图 12 所示。

由图 12 可知,系统充电对接时间 t 为

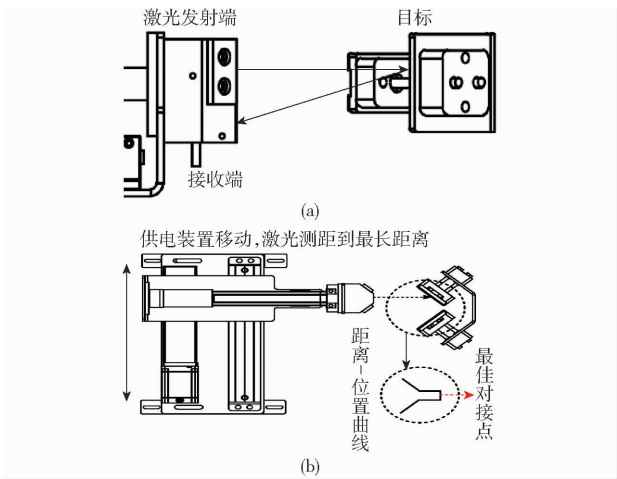


图 11 激光测距对接过程

Fig. 11 Laser ranging docking process

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \tag{6}$$

其中

$$t_2 = \frac{2L_1}{v_0 + \frac{v_0}{2}} + \frac{2L_2}{v_0} + \frac{v_0^2}{8L_3} \tag{7}$$

$$t_4 = \frac{3L_4}{2v_1} \tag{8}$$

$$t_5 = \frac{L_5}{v_2} \tag{9}$$

式中 t_1 ——机头识别与定位时间,s
 t_2 ——机头整体运动时间,s
 t_3 ——通信时间,s
 t_4 ——供电站识别与定位时间,s
 t_5 ——推杆对接时间,s
 L_1 ——减速区到入口 RFID 固定距离,m
 L_2 ——RFID 与充电区水平距离,m
 L_3 ——刹停距离,m
 L_4 ——定位供电装置最大行程,mm
 L_5 ——推杆对接伸出距离,mm

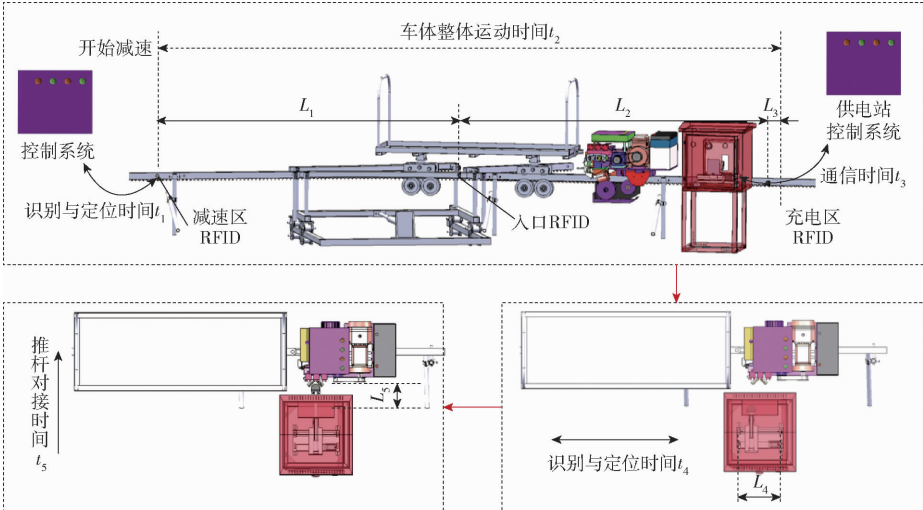


图 12 充电对接时间

Fig. 12 Charging time

- v_0 ——机头额定速度, m/s
- v_1 ——丝杆移动速度, mm/s
- v_2 ——推杆移动速度, mm/s

代入数据后可得 t 约为 41.92 s。

2.2 制动装置设计

如图 13 所示,制动装置由三角架、制动推杆、制动转杆、拉索、2 只同轴制动鼓组成,并在另一端配置离心刹。两鼓安装于减速箱传动轴两端:靠近减速箱一侧为大制动鼓,选用高锰钢材料以承担主要制动转矩并抵抗冲击与磨损;外侧为小制动鼓,采用灰铸铁以提升散热与热稳定性。制动时,推杆力经三角杠杆与制动转杆传递至拉索,驱动制动鼓抱紧传动轴实现摩擦制动;当轴速超过设定阈值时,离心刹自动触发,强制降速至设定阈值以下。

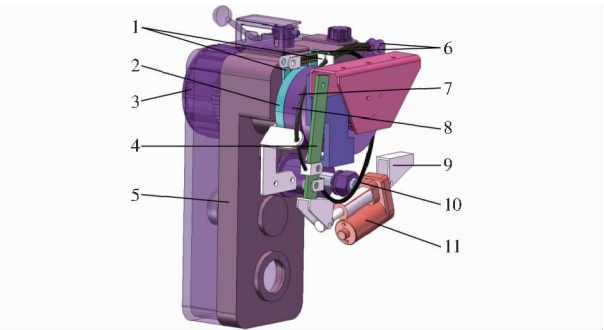


图 13 制动装置结构

Fig. 13 Structure of braking device

1. 固定柄 2. 大制动鼓 3. 离心刹 4. 制动转杆 5. 直齿轮减速箱 6. 转动柄 7. 小制动鼓 8. 双鼓刹制动装置 9. 三角架 10. 拉索 11. 制动推杆

2.2.1 半坡停驻制动力

对单轨运输机制动状态进行受力分析,满载下坡时运输机必须能在半坡停驻,意味着制动力必须克服重力分力^[3]。因此,当运输机驻停时,制动转

矩 T_N 和驱动转矩 T 分别为

$$T_N = 4f_1 p \pi r_1^2 l K N \tag{10}$$

$$T = r_2 g (\sin \gamma - f \cos \gamma) (m_1 + m_2 + m_3) \tag{11}$$

式中 f_1 ——刹车锅内部摩擦因数,取 0.76

K ——制动鼓包角系数,取 0.9

p ——制动鼓面压强, Pa

l ——制动鼓带宽, mm

N ——制动鼓到齿轮箱输出轴传动比,取 8.13

r_1 ——鼓刹半径, mm

r_2 ——承重轮半径, mm

γ ——山地坡度, (°)

代入数据得制动转矩 T_N 为 419.18 N·m,驱动转矩 T 为 100.72 N·m;制动转矩 T_N 大于驱动转矩 T ,因此可以实现半坡停驻。

2.3 控制系统设计

如图 14 所示,控制系统由运输机机头控制单元与供电站控制单元构成。机头控制单元可用于接收用户指令,同时配备按键实现本地控制。ESP 控制单元协同完成系统运行的无线通信、逻辑控制与命令发布。控制指令由 ESP 单片机发送至电机驱动器,驱动电机完成相对动作。继电器用于控制制动推杆与楔形取电装置,前者执行制动,后者用于实现充电。供电系统方面,主要由供电站内的定位供电装置与道岔组成,前者配合楔形取电装置为机头提供电能,后者则在轨道运行与供电模式间切换。

3 制动装置多体动力学制动模拟与有限元分析

为评估制动装置性能与热安全性,利用 ADAMS 建立双鼓刹制动装置与灰铸铁单鼓刹的多体动力学模型,开展紧急制动虚拟仿真,输出角速度、制动所

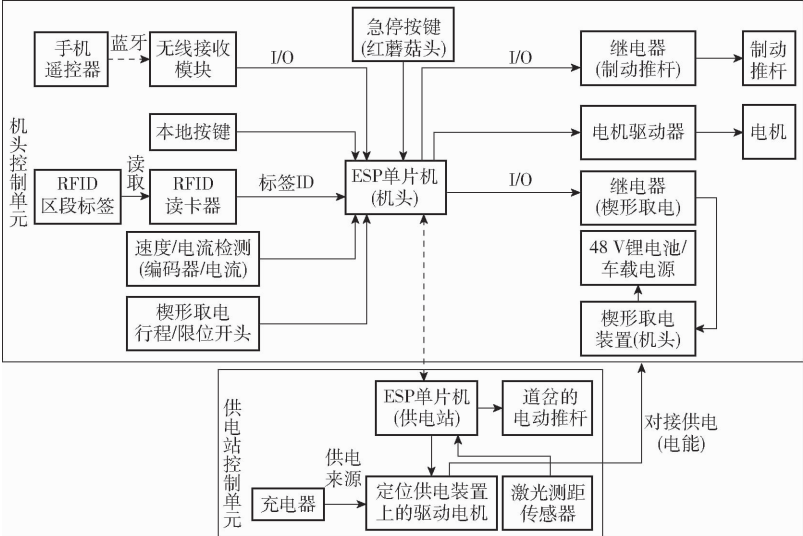


图 14 控制系统

Fig. 14 Control system

需转矩,以量化制动性能;在 ANSYS 上进行瞬态热-结构耦合分析,求解温度与应力演化。

3.1 制动装置三维建模及虚拟样机模型的建立

在双鼓刹制动装置三维模型建立前对其进行适当简化,保留制动蹄、制动鼓和摩擦衬片 3 个主要部分,采用 SW 建立三维模型如图 15a、15b 所示,将三维模型导入 ADAMS 中,添加相关约束和运动副,建立单鼓刹和双鼓刹制动装置虚拟样机模型,如图 15c、15d。

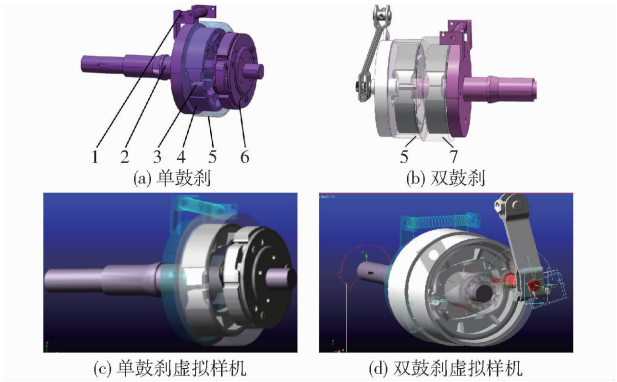


图 15 制动装置与样机模型

Fig. 15 Braking device and prototype model

1. 制动柄 2. 传动轴 3. 凸轮 4. 摩擦片 5. 制动鼓 6. 离心刹 7. 大制动鼓

3.2 紧急制动工况动力学仿真

假设机头以额定速度 0.53 m/s 运行,制动推杆迅速拉动制动柄至末端,触发紧急制动。将该力通过 ADAMS 中 S-Force 工具施加于制动蹄组件,开展动力学仿真,求解角速度、转矩等关键参数^[18-19],仿真结果如图 16 所示。

由图 16 可知,在相同制动条件下,装置在 2.5 s 时开始作用制动力,由于机械间隙,响应略有延迟;双鼓刹制动装置在 1.3 s 后刹停,所需转矩上升至 3.09 N·m 而后衰减;相比之下,单鼓刹转矩上升较陡峭、制动历时更长(2.29 s),所需转矩迅速升至 9.23 N·m 后缓慢衰减。整体而言,双鼓刹制动装置呈现更平缓的转矩变化趋势与更高效的制动特性。

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/K ⁻¹
小制动鼓	7 200	120	0.28	49	520	1.1 × 10 ⁻⁵
额定行驶速度		最大工作温度 300℃		对应极限应力	120 MPa	
				室温极限应力	250 MPa	
大制动鼓	7 800	190	0.28	17	525	2.1 × 10 ⁻⁵
最大遥控距离		最大工作温度 260℃		对应极限应力	700 MPa	
				室温极限应力	880 MPa	

3.4 有限元仿真结果及分析

3.4.1 紧急制动工况分析

对紧急制动,根据 ADAMS 动力学仿真结果,假

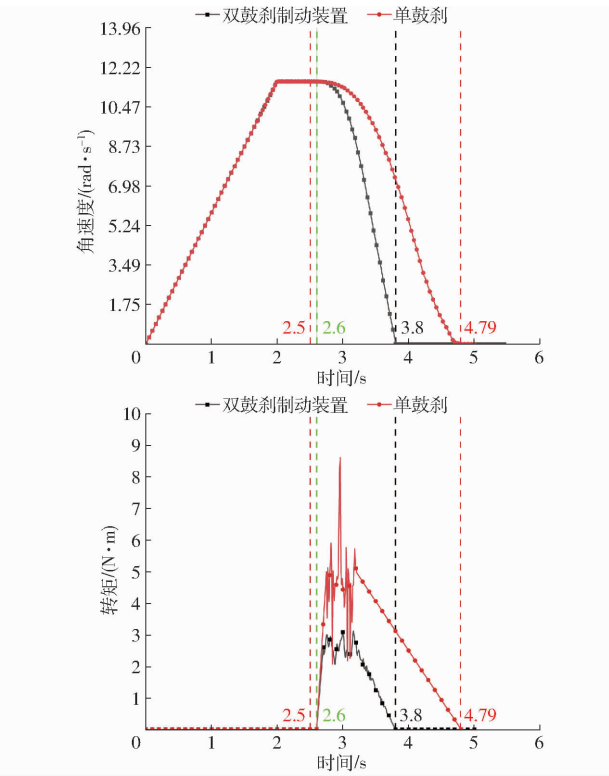


图 16 紧急制动工况制动性能

Fig. 16 Contact force of brake pads

3.3 有限元分析主要参数及边界条件

为评估双鼓刹制动装置在典型工况下的性能,采用有限元方法进行热-结构耦合分析^[20]。采用三维 10 节点热-结构耦合单元 Solid227,并采用多区域划分方法,共生成 21 193 个单元与 29 595 个节点。有限元模型如图 17 所示,模型中对应部件材料参数如表 2 所示。

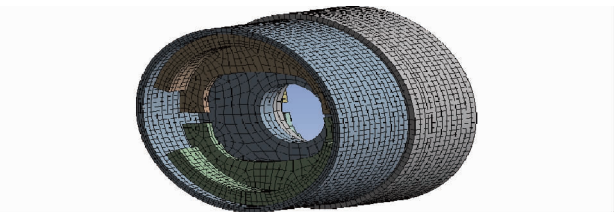


图 17 双鼓刹制动装置有限元模型

Fig. 17 Finite element model of braking device

设轨道运输机初始行驶速度为 0.53 m/s(对应制动装置轴角速度为 11.6 rad/s),并在约 1.2 s 匀减至零,开展有限元热-结构耦合分析,得到温度、应力云

图及相应曲线,如图 18 所示。

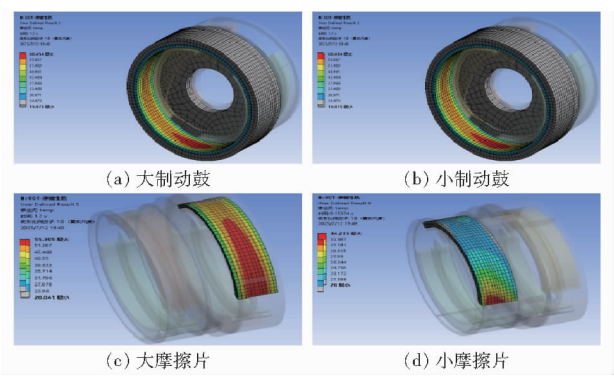


图 18 紧急制动结束时制动鼓各部件温度云图
Fig. 18 Temperature cloud diagrams of each component of brake drum at end of emergency braking

如图 18 所示,双鼓刹制动装置各部件在制动过程中温度分布较均匀,仅在摩擦接触区域出现局部温升,最高温度集中在摩擦片与制动鼓的接触面。温度峰值约为 60℃,远低于材料极限温度,表明双鼓刹制动装置满足安全使用要求。

3.4.2 持续制动工况分析

通常情况下,紧急制动作为确保安全的关键措施,是制动性能的主要考察对象。然而,针对轨道运输机在长坡载重行驶时特殊工况,还需对持续制动工况进行深入分析。参考《公路路线设计规范》,假设行驶速度为 0.7 m/s (对应制动鼓角速度 15.32 rad/s),道路坡度为 45°,对制动鼓进行长达 722 s 的有限元热-结构耦合仿真,制动结束时温度分布云图如图 19 所示。

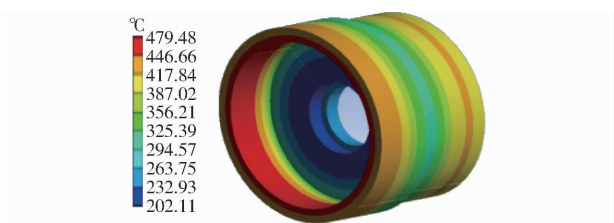


图 19 持续制动制动锅温度分布云图
Fig. 19 Continuous braking temperature distribution cloud diagram of brake pot

由图 20 可知,两者轴向温度场均呈现摩擦接触区高温集中特征,中部接触区在 121 s 内迅速攀升,与两侧非接触区形成超 60℃ 的梯度差,其中小制动鼓在 121 s 时温度已达极限温度 300℃。因此,单次制动时间应严格控制在 112 s 以内,以确保安全与性能稳定。

由图 21 可知,在热-力耦合作用下,大制动鼓内壁节点 N6188 应力迅速升至 113 MPa 后趋于稳定,小制动鼓整体应力平缓(除接触区节点稍有集中,其余节点均低于 50 MPa)。在持续 722 s 制动工况下,两者关键节点应力均未超过材料极限值。

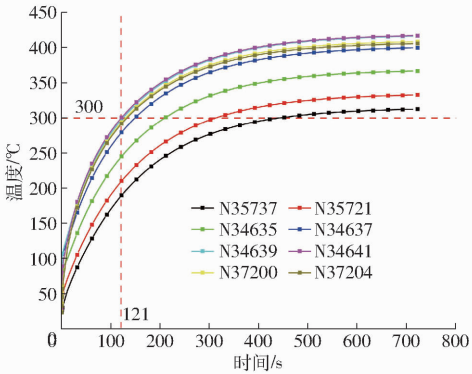
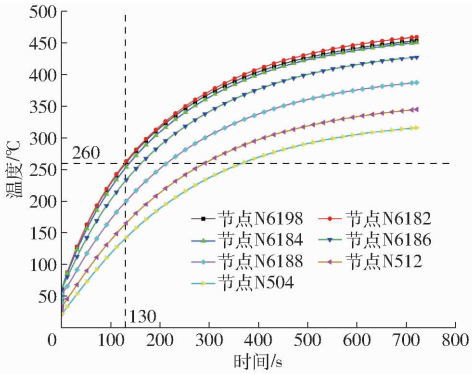


图 20 轴向节点温度曲线
Fig. 20 Axial node temperature curves

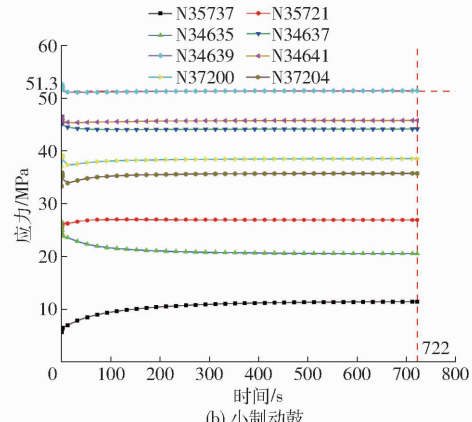
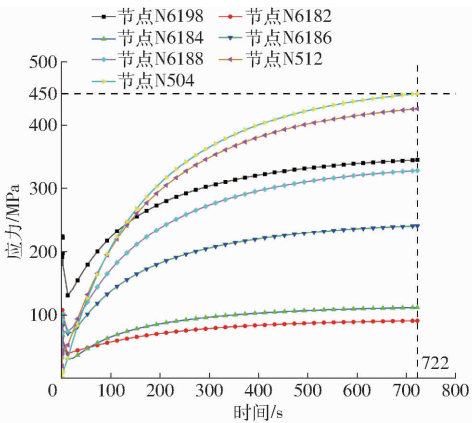


图 21 轴向节点应力
Fig. 21 Axial joint stress

综上,基于 ADAMS 的多体动力学对比与 ANSYS 热-结构耦合分析表明:所设计双鼓刹制动

装置在制动性能上优于单鼓刹,且在紧急与持续制动工况下温度场与应力场均满足使用要求,持续制动的极限制动时长为 112 s。山地果园单段连续下坡多为30~60 m,双鼓刹制动时间在 42~85 s 范围内,由此可判定该装置在轨道运输机复杂工况下具备充分的制动安全性与可靠性,满足工程应用要求。

4 性能试验

4.1 充电性能测试

4.1.1 道岔变轨试验

控制箱驱动道岔,从固定初始位置连续切换 10 次,如图 22 所示,秒表计时并配合直尺检查对接偏差;对接标准为接口错位 <1 mm 且机头顺畅通过。10 次试验平均换轨时间为 9.327 s、接口错位 0~0.8 mm,推杆运行稳定;全部试验达标,道岔对接可靠、换轨速度满足需求。



图 22 道岔变轨试验
Fig. 22 Turnout track change test

4.1.2 定位精度试验

运输机由固定起点驶向供电站,进行定点停车对接,如图 23 所示。每次对接完成后,通过直尺和数显倾角仪测定粗定位、精定位精度及角度偏差,进行 10 次操作,用秒表记录从启动定位至

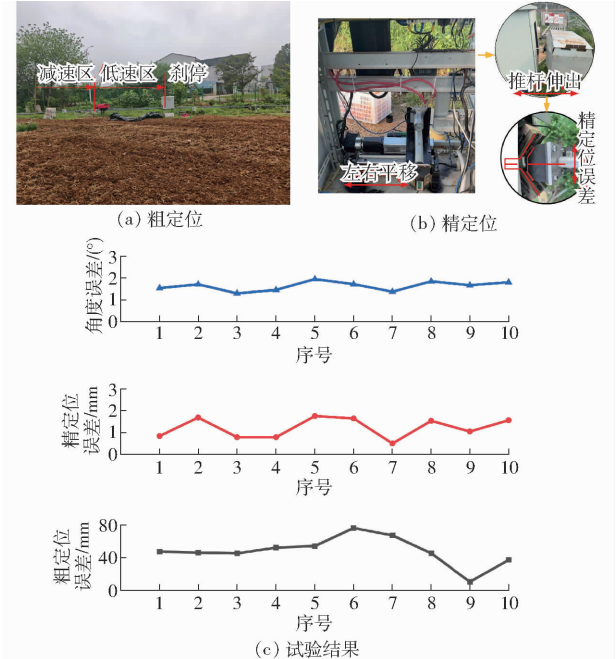


图 23 定位精度试验
Fig. 23 Positioning accuracy test result

触头接触完成的耗时。由图 23c 可知,单次粗定位误差 10~80 mm,精定位误差 0.5~2 mm,角度偏差均小于 2°;10 次操作均能良好对接,满足工程应用需求。

4.1.3 充电效率试验

依据 T/CDQ 001—2023 锂电池充电器标准,在室温 (23℃ ± 2℃) 环境条件下,对比供电站充电和充电器充电 2 种方式的充电效率。电池均从统一起始电荷状态 (20% SOC) 充电,并在终止状态 (80% SOC) 停止,完成 10 次操作,通过功率检测仪记录供电端与电池端电压/电流/功率及总充电耗时。测试现场及结果如图 24 所示,供电站充电方式输入电量 2 989.13 W·h,输出电量 2 750 W·h,耗时 2.67 h,充电效率 92%,满足充电器特级品标准。针对电源适应性,两者输入端均接入电网,在输入端电压正常波动 (AC198 V~AC242 V) 的情况下,监测两者充电时输出电流,均稳定在 18~22 A (±10%),未出现欠充或过充等情况;设备表面温度不大于 60℃,故供电站电气方案在效率、抗电压波动与散热性方面表现可靠,适用于户外补能场景。

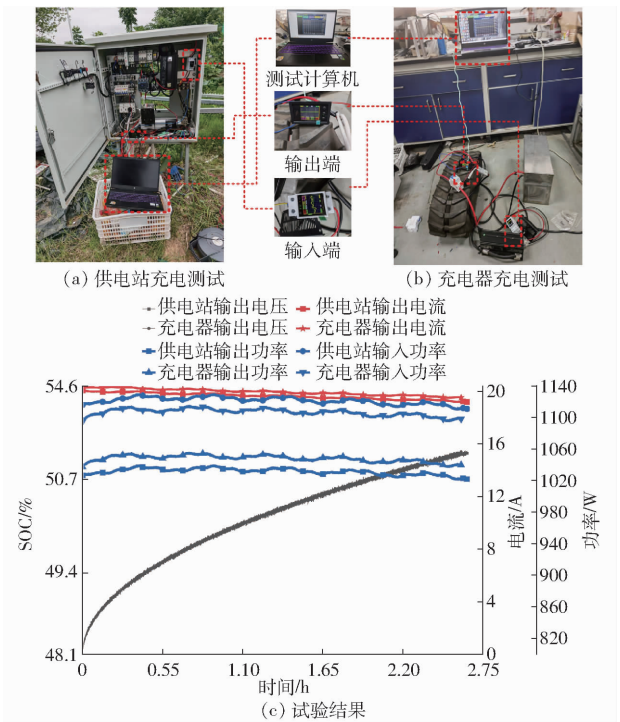


图 24 充电效率试验
Fig. 24 Charging efficiency test result

4.1.4 补能效率试验

以供电站供电与充电器充电 2 种方式进行补能效率,各施行 3 次操作,供电站供电方式记录从启动对接到断开连接的总耗时,人工充电器方式记录包括取出电池、往返运输、归位全过程所用时间。测试现场如图 25 所示,结果表明供电站充电方式平均补



图 25 补能效率试验

Fig. 25 Replenishment efficiency test result

能操作耗时 60 s,充电器方式平均耗时 25 min,效率显著低于供电站供电方式,体现了供电站供电方式在时间成本与操作便捷性方面的优势。

4.2 制动性能测试

4.2.1 停驻试验

运输机额定载重工况下爬坡至预设半坡位置,关闭动力源并制动静止,如图 26 所示,试验使用标准袋装水泥(50 kg/袋)模拟载荷,并采用秒表计时。保持至少静止 5 min,观察无滑移即视为停驻良好。重复 3 次试验,结果表明,运输机在该轨道条件下均能稳定停驻。停驻性能良好,满足使用需求。



图 26 停驻试验

Fig. 26 Stationing test

4.2.2 制动性能试验

依据 GB/T 3871.6《农业车辆制动测试》,在 6 m 平轨与 45°轨道条件下,分别在空载与满载状态下各重复 3 次制动测试,用秒表记录发出制动指令到机头彻底停止所用时间、卷尺测出整个制动行程机头驶出的距离,见图 27a。以初始速度 0.53 m/s 启动紧急制动,分别测试双鼓刹与灰铸铁单鼓刹制动装置,并记录平均制动距离、平均制动时间,结果如图 27b、27c 所示,满载紧急制动工况下,双鼓刹制动装置制动距离 423 mm 少于单鼓刹的 803 mm,制动时间 1.29 s 少于单鼓刹(2.23 s)。结合仿真与试

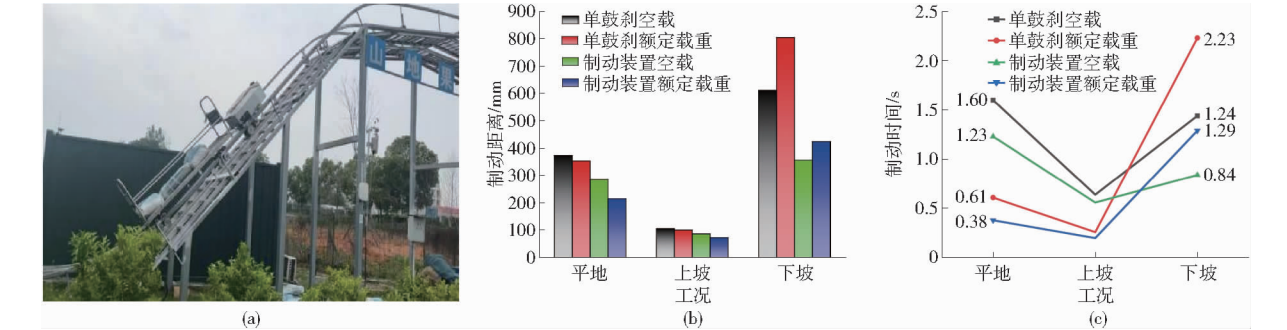


图 27 制动距离试验

Fig. 27 Braking distance test result

验结果,证明制动系统在制动性能方面优于单鼓刹,满足设计要求。

5 结论

(1)针对山地果园运输机存在补能效率低与制动不可靠的问题,本文提出了一种电动单轨运输机总体方案,包括楔形取电装置、定位供电装置,双鼓刹制动装置等。

(2)针对自走式轨道运输机的制动多物理场联合仿真,通过 ADAMS 进行多体动力学仿真,与普通单鼓刹对比紧急制动工况下的制动性能,采用 ANSYS 开展双鼓刹制动装置在紧急与持续工况的热-结构耦合分析。仿真结果显示,双鼓刹制动装置在 1.3 s 后刹停,相比普通单鼓刹的 2.29 s,制动性能更优;紧急工况下双鼓刹制动装置具有充足安全裕度,持续工况下双鼓刹制动装置的极限制动时长

为 112 s,满足山地运输机单段连续下坡的需求。

(3)实际试验结果表明,运输机在 45°坡停驻过程稳定、无明显滑移;道岔平均变轨时间 9.327 s。供电站方式的输入能量 2 989.13 W·h、输出能量 2 750 W·h、耗时 2.67 h,综合效率约 92%,达到特级品充电器的标准,输出电流稳定在 18 ~ 22 A (±10%),未见欠充或过充现象;设备表面温度不大于 60℃,说明供电站在充电效率、抗电压波动和散热方面表现可靠,适用于户外补能场景。供电站补能的平均操作时长 60 s,显著优于人工充电器 25 min。在额定载重下坡紧急制动时,制动距离为 423 mm、制动时间为 1.29 s,明显优于传统单鼓刹(803 mm、2.23 s);证明制动系统在制动性能方面优于单鼓刹。综上,本研究所设计的电动单轨运输系统在补能效率与制动安全性等关键指标上均达到设计要求,适用于山地果园复杂工况的运输作业。

参 考 文 献

- [1] 洪添胜,杨洲,宋淑然,等.柑橘生产机械化研究[J].农业机械学报,2010,41(12):105-110.
HONG Tiansheng, YANG Zhou, SONG Shuran, et al. Mechanization of citrus production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):105-110. (in Chinese)
- [2] 张俊峰,李敬亚,张衍林,等.山地果园遥控单轨运输机设计[J].农业机械学报,2012,43(2):90-95.
ZHANG Junfeng, LI Jingya, ZHANG Yanlin, et al. Design of a remote-controlled monorail transporter for hillside orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):90-95. (in Chinese)
- [3] 李学杰,张衍林,张闻宇,等.自走式山地果园遥控单轨运输机的设计与改进[J].华中农业大学学报,2014,33(5):117-122.
LI Xuejie, ZHANG Yanlin, ZHANG Wenyu, et al. Design and improvement of a self-propelled remote-controlled monorail transporter for hillside orchards[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5):117-122. (in Chinese)
- [4] 张凯鑫,张衍林,周波,等.果园运输机单轨道橡胶辊驱动装置驱动性能研究[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):111-116.
ZHANG Kaixin, ZHANG Yanlin, ZHOU Bo, et al. Research on the driving performance of a rubberroller drive mechanism for monorail orchard transporters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):111-116. (in Chinese)
- [5] 张凯鑫,张衍林,梁秀英,等.基于Abaqus的果园运输机橡胶辊滚动过程仿真[J].华中农业大学学报,2014,33(4):124-129.
ZHANG Kaixin, ZHANG Yanlin, LIANG Xiuying, et al. Simulation of the rolling process of rubber rollers in orchard transporters using Abaqus[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4):124-129. (in Chinese)
- [6] 李震,洪添胜,孙同彪,等.山地果园蓄电池驱动单轨运输机的设计[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(6):221-227,234.
LI Zhen, HONG Tiansheng, SUN Tongbiao, et al. Design of a battery-driven monorail transporter for mountain orchards[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(6):221-227,234. (in Chinese)
- [7] 刘岳,李震,洪添胜,等.山地果园蓄电池驱动单轨运输机传动系统设计[J].农业工程学报,2017,33(19):34-40.
LIU Yue, LI Zhen, HONG Tiansheng, et al. Design of the transmission system for a batterydriven monorail transporter for mountain orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19):34-40. (in Chinese)
- [8] 李善军,刘辉,张衍林,等.单轨道山地果园运输机齿条齿形优选[J].农业工程学报,2018,34(6):52-57.
LI Shanjun, LIU Hui, ZHANG Yanlin, et al. Optimal rack-tooth profile selection for monorail mountain-orchard transporters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6):52-57. (in Chinese)
- [9] 吕石磊,魏志威,吴奔雷,等.果园单轨运输机在轨状态感知系统研制[J].农业工程学报,2020,36(15):56-64.
LÜ Shilei, WEI Zhiwei, WU Benlei, et al. Development of an on-track status sensing system for monorail transporters in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15):56-64. (in Chinese)
- [10] 贾闯,李加念,洪添胜,等.山地果园单轨运输机超声波避障系统的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):69-74.
JIA Chuang, LI Jianian, HONG Tiansheng, et al. Design and testing of an ultrasonic obstacle avoidance system for monorail transporters in mountain orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2):69-74. (in Chinese)
- [11] 杨方,周敏,江溢华,等.丘陵山地环形单轨运输系统静态调度优化方法[J].农业工程学报,2023,39(4):37-46.
YANG Fang, ZHOU Min, JIANG Yihua, et al. Static scheduling optimization method for circular monorail transportation systems in hilly-mountainous areas[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(4):37-46. (in Chinese)
- [12] WANG R, GUAN H, LAN J. Home services-track transport robot control system design[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 341-342(1):646-649.
- [13] 李善军,邢建军,张衍林,等.7YGS-45型自走式双轨道山地果园运输机[J].农业机械学报,2011,42(8):85-88.
LI Shanjun, XING Junjun, ZHANG Yanlin, et al. 7YGS45 type selfpropelled dualtrack mountain orchard transporter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8):85-88. (in Chinese)
- [14] 汪小名,陈明,吴伟斌,等.山地自走式电动双轨运输机设计与试验[J].华中农业大学学报,2020,39(6):96-104.
WANG Xiaoming, CHEN Ming, WU Weibin, et al. Design and testing of a self-propelled electric dual-track transporter for mountain orchards[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6):96-104. (in Chinese)
- [15] 欧阳玉平,洪添胜,苏建,等.山地果园牵引式双轨运输机断绳制动装置设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(18):22-29.
OUYANG Yuping, HONG Tiansheng, SU Jian, et al. Design and experiment of a ropebreak braking device for traction-type dualtrack transporters in mountain orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18):22-29. (in Chinese)
- [16] 周诣,马贺,闫硕,等.变轨距高速列车轮-轴-轨多体接触分析[J].科学技术与工程,2024,24(34):14821-14829.
ZHOU Yi, MA He, YAN Shuo, et al. Multibody contact analysis of wheel-axle-rail system for variable-gauge high-speed trains[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(34):14821-14829. (in Chinese)
- [17] 张传清,陈恳,邵君奕,等.基于激光测距传感器的机器人末端定位扫描装置设计[J].机械设计与制造,2011(11):1-3.
ZHANG Chuanqing, CHEN Ken, SHAO Junyi, et al. Design of a robot end-effector positioning and scanning device based on a laser rangefinder sensor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(11):1-3. (in Chinese)
- [18] 王庭义,吕彭民,兰吉光,等.鼓式制动器制动过程动力学仿真[J].中国公路学报,2010,23(6):115-120.
WANG Tingyi, LÜ Pengmin, LAN Jiguang, et al. Dynamic simulation of the braking process of drum brakes[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 23(6):115-120. (in Chinese)
- [19] 穆鑫.铁路货车基础制动装置制动性能动态仿真方法研究[J].铁道学报,2023,45(11):38-45.
MU Xin. Study on dynamic performance simulation method for base braking devices of railway freight cars[J]. Journal of Railway Engineering, 2023, 45(11):38-45. (in Chinese)
- [20] 张方宇,桂良进,范子杰.鼓式制动器热-应力-磨损耦合行为的研究[J].汽车工程,2016,38(4):466-472.
ZHANG Fangyu, GUI Liangjin, FAN Zijie. Study on the thermo-stress-wear coupling behavior of drum brakes[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4):466-472. (in Chinese)