

果园运输机钢丝绳损伤试验平台设计与试验

欧阳玉平<sup>1</sup> 孙 晗<sup>1</sup> 洪添胜<sup>2</sup> 舒盛荣<sup>1</sup> 陈洞滨<sup>1</sup> 吴志强<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 在阐述山地果园牵引式双轨运输机用钢丝绳动力学与接触力学模型的基础上, 搭建了基于 PLC 模拟钢丝绳实际运行的绕卷试验平台, 设计了试验平台的变频调速系统与控制系统, 并安装和调试了张紧力自动调节装置; 搭建了一套基于漏磁法的钢丝绳断丝与磨损检测平台, 进行了钢丝绳探伤仪断丝与磨损可靠性试验。在拉力传感器标定与调节装置性能测试试验中, 推拉力计的拉力输出值与注水质量呈线性关系, 且试验张紧力偏差浮动范围为 -130 ~ 85 N, 结果满足试验要求。钢丝绳断丝与磨损检测试验结果表明, 在模拟断丝数依次为 10、20、30 根的情况下, 试验绳 10 次重复试验检测的断丝数与实际值相同, 说明检测平台可精确检测钢丝绳断丝数及断丝位置; 但是, 通过探伤仪检测的模拟磨损情况与实际值偏差较大, 无法对钢丝绳磨损进行准确的检测。

**关键词:** 钢丝绳; 果园运输机; 磨损; 试验平台

中图分类号: S229+.1      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2020)07-0118-11      OSID: 

Design and Test of Wire Rope Damage Test Platform for Orchard Transporter

OUYANG Yuping<sup>1</sup> SUN Han<sup>1</sup> HONG Tiansheng<sup>2</sup> SHU Shengrong<sup>1</sup> CHEN Dongbin<sup>1</sup> WU Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The mountain orchard conveyor is a type of transport machinery. The regularity of wire rope breakage is not clear yet, also there is no corresponding research on this kind of wire rope. A PLC-based wire rope simulation running platform was built, and the reliability of the platform was verified, which included the tensile force sensor test, the wire breakage and wear reliability detection based on the magnetic flux leakage (MFL) method. It was found that the core component of the simulation platform: the floating deviation of the tensile force sensor and the adjustment device test met the test requirements. Then, the number of broken wires in the test seemed to be as the same as the actual one, but the simulated wear and the actual gap were large. The conclusion was drawn that the built test platform can accurately detect the position and quantity of wire rope's broken wire, but the degree of wear can not be accurately detected. It can be considered by machine vision for further testing, which would be proved in subsequent research. The research result can provide a reference for optimizing the safety performance of conveyors in orchards, as well as for maintenance and care of wire ropes in other applications.

**Key words:** wire rope; orchard transporter; abrasion; test platform

0 引言

山地果园牵引式双轨运输机属新式农用运输机

械,其运载能力强、运行稳定<sup>[1-4]</sup>。近年来,中国果树种植业发展迅速,传统果园运输仅依靠人力,其劳动强度大,且效率低<sup>[5-6]</sup>,运输机极大地提高了生产

收稿日期: 2019-06-09 修回日期: 2020-01-12  
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27)、江西省重点研发计划项目(20171BBF60022)和江西省 2011 协同创新专项资金项目(赣财教指[2014]156 号)  
作者简介: 欧阳玉平(1986—),男,讲师,博士,主要从事果园机械化装备研发与应用研究,E-mail: ouyuping1987@163.com  
通信作者: 洪添胜(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事果园机械化装备研发与应用研究,E-mail: tshong@scau.edu.cn

效率,加快了我国果园机械化进程。该类运输机由钢丝绳牵引载物滑车沿轨道运行,工作环境较为特殊,钢丝绳的寿命会因滑轮、受力而产生交替变化<sup>[7-11]</sup>。目前,该运输机用钢丝绳的失效行为及失效规律尚不明确,钢丝绳断裂会引发严重的安全事故,因此研究运输机用钢丝绳的断丝规律具有重大意义。

绝大多数金属材料断裂均由损伤累积至一定程度造成的,当材料某部位存在裂纹时,裂纹尖端附近产生显著应力集中,使材料在远低于屈服应力时发生断裂<sup>[12-14]</sup>。对果园采集的服役钢丝绳样品进行观察与解剖发现,造成运输机用钢丝绳失效的主要原因是表层断丝、外层磨损和整绳变形。有学者认为,磨损是钢丝绳断裂的主因<sup>[15-17]</sup>。由于存在多种外界因素的影响,已有断裂力学理论不能完全解释运输机用钢丝绳的实际断裂过程,对断裂处裂纹扩展过程的预测和仿真模拟也与实际结果存在极大差异,钢丝绳在断裂过程中伴随材料的损耗,始终处于复杂交变的应力作用下,其断裂过程更为复杂<sup>[18-23]</sup>,难以通过理论分析得到运输机钢丝绳的断丝规律。

本文通过钢丝绳运动过程中的受力分析,建立运输机运行时钢丝绳的力学模型;搭建基于 PLC 的钢丝绳绕卷试验平台,设计变频调速控制系统和张紧力自动调节装置,探究运输机用钢丝绳的断丝规律;并进行钢丝绳无损探伤仪断丝与磨损检测可靠性试验,对探伤仪的可靠性进行分析。

1 接触动力学模型

1.1 运动过程中钢丝绳承载情况

运输机运动参数对钢丝绳损伤主要体现在对钢丝张紧力影响。运输机钢丝绳牵引过程如图 1 所示,可分为载物滑车启动瞬间(A 处)、上行过程(A-B 段)及载物滑车停止瞬间(B 处)3 个牵引阶段,C 点为钢丝绳由直转弯过渡点,D 点为由弯转直过渡点。在过渡段,钢丝绳中心轴线曲率由 0 突变为 1/R(R 为滑轮半径),使弯曲段附加了弯曲切应力,导致该处最危险。

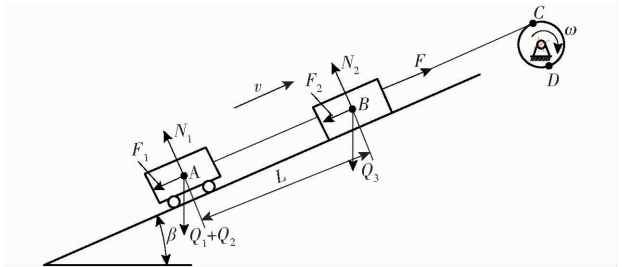


图 1 运输机钢丝绳工作原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of transport wire rope

当卷筒按顺时针方向牵引载物滑车上行时,位于轨道上方的钢丝绳长度不断减少,整个牵引系统等效质量和刚度随之变化,牵引系统振动频率和振幅不断变化。选取卷筒 C 点为钢丝绳与卷筒的切点,将钢丝绳 1/3 的质量计入载物滑车质量。钢丝绳在卷筒切点 C 处的张紧力 F 在加速启动阶段(T<sub>1</sub>)、匀速运行阶段(T<sub>2</sub>)及减速制动阶段(T<sub>3</sub>)3 个牵引阶段的微分方程可表示为<sup>[24]</sup>

$$F''_1 = \frac{EA_1(g\sin\beta + a_1) - \left(\frac{EA_1}{Q_1 + Q_2 + \rho L_1(t)/3} + a_1\right)F - 2a_1tF'}{L_1(t)} \tag{1}$$

$$F''_2 = \frac{EA_1g\sin\beta - \frac{EA_1F}{Q_1 + Q_2 + \rho L_2(t)/3} - 2vF'}{L_2(t)} \tag{2}$$

$$F''_3 = \frac{EA_1(g\sin\beta - a_2) - \left(\frac{E_1A_1}{Q_1 + Q_2 + \rho L_3(t)/3} - a_2\right)F - 2[v - a_2(t - t_2)]F'}{L_3(t)} \tag{3}$$

式中 E——钢丝绳弹性模量,MPa  
A<sub>1</sub>——钢丝绳截面积,mm<sup>2</sup>  
g——重力加速度,取 9.8 m/s<sup>2</sup>  
β——轨道倾角,(°)  
a<sub>1</sub>——启动阶段加速度,m/s<sup>2</sup>  
a<sub>2</sub>——停止阶段减速度,m/s<sup>2</sup>  
Q<sub>1</sub>——载物滑车质量,kg  
Q<sub>2</sub>——载物滑车所载物资质量,kg  
ρ——钢丝绳质量,kg/m

L<sub>i</sub>(t)——第 i 牵引阶段钢丝绳有效长度,m  
t<sub>2</sub>——匀速运行阶段(T<sub>3</sub>)结束时间,s  
t——牵引时间,s  
v——最大牵引速度,m/s

1.2 钢丝绳动力学模型

钢丝绳在承受轴向拉力时表现为复杂的力学特性,主要体现在以下方面:钢丝绳承受拉力时,即使缓慢加载,拉力与变形间关系亦不服从胡克定律,即应力应变呈非线性力学特性;钢丝绳在拉伸过程中

有明显滞后现象;当钢丝绳承受恒拉力时,钢丝绳变形逐渐增加,钢丝绳的应变与应力具有不同规律,呈蠕变特性;钢丝绳拉力作用下变形不仅与拉力大小和拉力作用时间有关,还与拉力变化频率有关,具有显著的动态特性。

钢丝绳受轴向拉伸时应力、应变变化规律与诸多因素有关,单纯从理论角度,应力与应变关系需在无限缓慢的加载工况下测得,实际无法实现,再加上运输机钢丝绳实际工况为动态受力等原因,因此钢丝绳模型必须从动态角度考虑。将钢丝绳划分为  $n$  段,形成  $n$  个集中质量相同的有限单元,设单元  $i$  质量、作用于单元间的刚度及阻尼系数分别为  $m$ 、 $k$  和  $c$ ,建立图 2 所示钢丝绳单元力学模型,依据各单元间 Vogit 模型<sup>[25]</sup>,可得钢丝绳单元  $i$  质量的动力学方程为<sup>[26]</sup>

$$f_i(t) = m_i s_i'' + k_i (s_i - s_{i-1}) + k_{i+1} (s_i - s_{i+1}) + c_i (s_i' - s_{i-1}') + c_{i+1} (s_i' - s_{i+1}') \quad (4)$$

若考虑钢丝绳单元质量是变化的,可将钢丝绳进行离散处理,离散后钢丝绳单元的微分动力学方程为

$$f_i(t) = m_i s_i'' + k_i (s_i - s_{i-1}) + k_{i+1} (s_i - s_{i+1}) + \frac{dm}{dt} s_i' + c_i (s_i' - s_{i-1}') + c_{i+1} (s_i' - s_{i+1}') \quad (5)$$

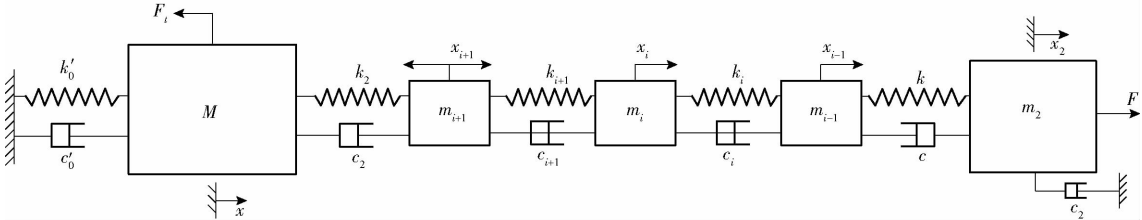


图 3 载物滑车自重拉紧装置动力学模型  
Fig. 3 Dynamics model of vehicle self-weight tension device

间、钢丝绳与驱动卷筒、滑轮及约束轮之间。将钢丝绳视为弹性圆柱体,其他可视为刚性圆柱座,两接触体在变形前半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ ,两接触体接触点为  $O$ ;以两接触体公切面为  $xy$  平面, $z$  轴为其公法线,建立直角坐标系;两接触体表面上距离公法线  $r$  的点为  $M_1$ 、 $M_2$ ,点  $M_1$ 、 $M_2$  与公切面距离为  $Z_1$ 、 $Z_2$ ,建立钢丝绳与圆柱构件间的接触模型,如图 4 所示。

由于运输机运行过程中钢丝绳承受轴向拉力过程中复杂的力学特性,仅依靠理论分析难以得出钢丝绳断丝规律,因此将建立钢丝绳损伤模拟试验平台,并验证其可靠性。

2 损伤模拟试验平台

2.1 自动往返试验平台搭建

运输机各部件与钢丝绳接触的部件主要包括滑轮、约束轮、托辊和卷筒等,影响钢丝绳损伤的

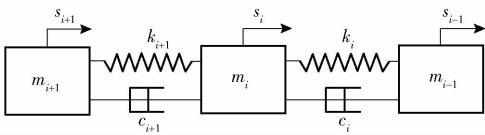


图 2 钢丝绳单元力学模型  
Fig. 2 Mechanical model of wire rope element

1.3 钢丝绳拉紧装置动力学模型

运输机为实现农资的有效运载,避免钢丝绳与卷筒及其他构件产生打滑现象,必须保证钢丝绳具备足够的张紧力。钢丝绳拉紧力主要来源于载物滑车及所载物资沿轨道倾斜方向分力,动力学模型如图 3 所示,动力学方程为

$$F_t = k'_0 x + c'_0 x + k_2 x + c_2 x + m_i x_i'' + k_i (x_i - x_{i-1}) + k_{i+1} (x_i - x_{i+1}) + c_i (x_i' - x_{i-1}') + c_{i+1} (x_i' - x_{i+1}') + k x_2 + c x_2 + F \quad (6)$$

- 式中
- $k'_0$ ——驱动装置前后移动时弹簧刚度,N/m

$c'_0$ ——驱动装置前后移动时弹簧阻尼系数,N/m

$x$ ——驱动装置位移,m

$x_2$ ——载物滑车位移,m

$c_2$ ——载物滑车移动时阻尼系数,N/m

1.4 钢丝绳接触力学模型

钢丝绳与运输机构件接触主要体现在钢丝绳之

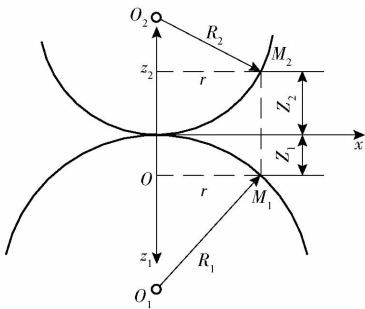


图 4 钢丝绳与圆柱体接触模型  
Fig. 4 Contact model between wire rope and cylinder

运行参数包括张紧力和运行速度。为此,结合上述仿真结果设计一套钢丝绳自动往返试验平台,图 5 为钢丝绳-滑轮架损伤试验装置,由卷扬机、钢丝绳自动张紧装置、线性导轨、滑轮组支架、试验台支撑架及限位装置等构成,用于模拟钢丝绳与滑轮的循环接触,滑轮架由 7 个滑轮及滑轮固定架构成。图 6 为钢丝绳-约束轮架损伤试验装

置,由卷扬机、钢丝绳自动张紧装置、线性导轨、约束轮组支架、试验台支撑架及限位装置等构成,用

于模拟钢丝绳与约束轮的循环接触;试验台支撑架与地面通过膨胀螺丝紧固。

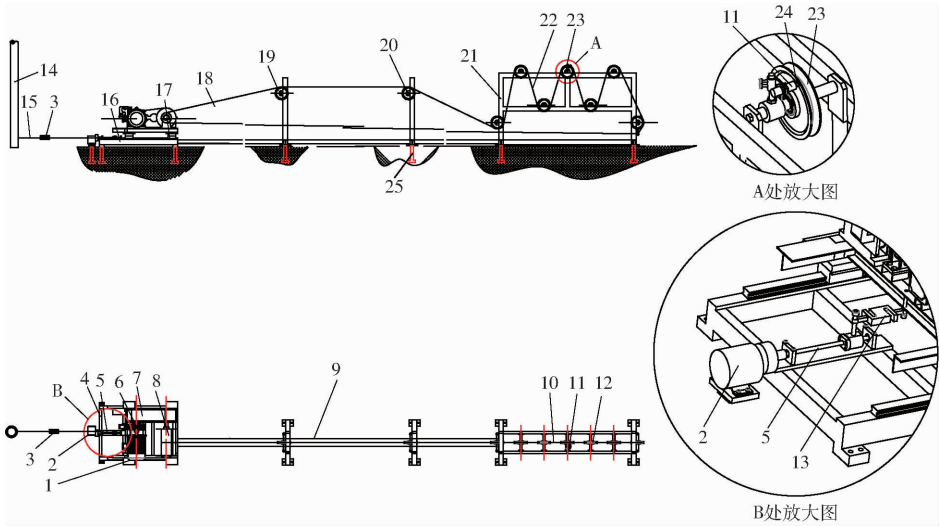


图 5 钢丝绳-滑轮组支架损伤试验装置

Fig. 5 Damage test device between wire rope and pulley group bracket

1. 三相异步交流电动机 2. 直流电机 3. 张紧器 4. 卷扬机支架 5. 滚珠丝杆 6. 电磁制动器 7. 减速箱 8. 卷筒 9. 试验台支架  
10、15、18、22. 钢丝绳 11. 接近开关 12、19、20、23. 滑轮 13. 推拉力计传感器 14. 钢丝绳支撑柱 16. 线性导轨 17. 导轨支座 21. 滑轮组支架 24. 磁铁 25. 膨胀螺丝

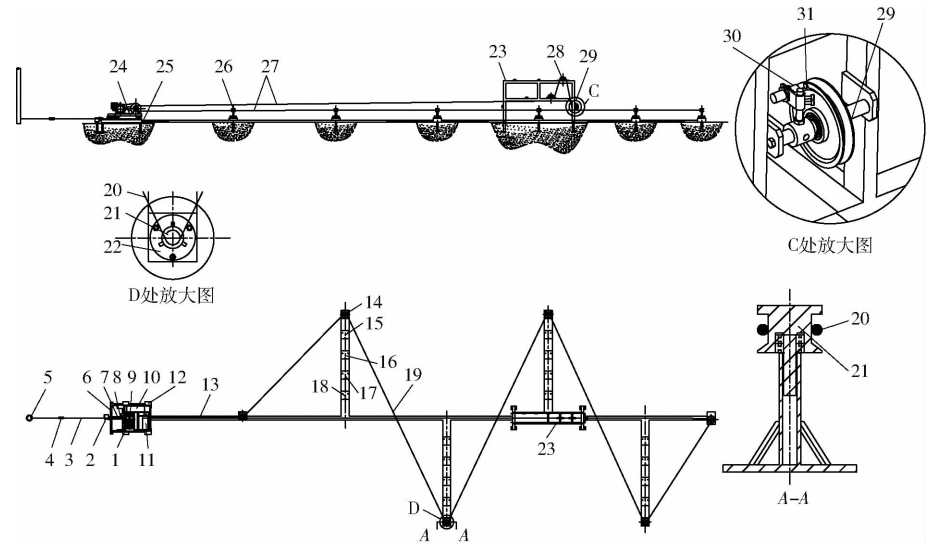


图 6 钢丝绳-约束轮组支架损伤试验装置

Fig. 6 Damage test device between wire rope and constraint wheel group bracket

1. 三相异步交流电动机 2. 直流电机 3、19、20、27. 钢丝绳 4. 张紧器 5. 钢丝绳支撑柱 6. 卷扬机支架 7. 滚珠丝杆 8. 推拉力计传感器  
9. 电磁制动器 10. 减速箱 11. 卷筒 12. 导轨支座 13. 试验台支架 14. 第一约束轮 15. 第二约束轮位 16. 第三约束轮位 17. 第四约束轮位 18. 第五约束轮位 21、26. 约束轮 22. 约束轮固定座 23. 滑轮组支架 24. 线性导轨 25. 膨胀螺丝 27. 钢丝绳 28、29. 滑轮  
30. 接近开关 31. 圆形磁铁

安装时,钢丝绳从卷筒的下方绕出,经滑轮组或约束轮组后从卷筒上方绕进,钢丝绳通过张紧装置实现有效张紧。卷筒转动时,钢丝绳与卷筒、滑轮组及约束轮组紧密接触运行,当钢丝绳绕卷长度达到设定距离时,试验平台停止设定时间后,立即开始反向卷绕,如此往复卷绕运行,直到达到设定的往返次数,电动机自动停止。

试验台基本参数如表 1 所示。试验台钢丝绳绕卷过程中,驱动力由三相交流电动机提供,模拟负载由钢丝绳自动张紧装置提供。钢丝绳与滑轮或约束轮支架缠绕后,钢丝绳两断口通过钢丝绳扣锁紧;自动张紧装置可将钢丝绳张紧力调节至待设值;控制系统中的限位功能,可将试验所需有效段钢丝绳设定在指定区域。

表 1 钢丝绳损伤行为试验平台基本参数

Tab.1 Main performance parameters of wire rope damage behavior test platform

| 参数                           | 数值    |
|------------------------------|-------|
| 配套电机额定功率/kW                  | 3     |
| 电动机转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 400 |
| 减速机总传动比                      | 36.6  |
| 卷筒转速/(r·min <sup>-1</sup> )  | 44.64 |
| 试验台尺寸/(m×m)                  | 18×8  |
| 滑轮架高度/m                      | 1.5   |
| 约束轮离地高度/mm                   | 400   |

2.2 基于 PLC 的变频调速控制系统

PLC 使用集中采样、集中输出的方式运行,可减少外界的干扰对系统产生影响,且模块简单,运行速度较快。在添加各种模块后,可编程逻辑控制器完全适用于本试验所需求。本文在前期研究的基础上,改进和增加部分模块,设计适合本次试验的 PLC

系统<sup>[27-31]</sup>。

将控制系统设计为主控、输入控制、信号输入、输出控制、警示以及显示 6 个模块。主控模块以 PLC 为主控制器,执行控制命令的接收及输出等任务。输入控制模块包括手动控制、遥控、限位设置及安全保护装置,分别执行控制命令输入、有效段钢丝绳首尾端限位设定、故障保护等功能。信号输入模块包括接近开关等,实现卷筒或滑轮转动角位移信号输入。输出控制模块包括变频器、交流接触器及电动机 3 部分,实现电动机正、反转、停止以及调速等功能。警示模块包括警报灯及蜂鸣器,当出现过压、欠压以及电流超出额度电流一定范围等异常情况,警报灯立即工作,提示操作者系统出现异常。显示模块以触摸显示屏为主,执行电机启停和变频器频率调节,上下限位置和往返次数设置,当前运行参数显示等功能。PLC 控制电路接线如图 7 所示,控制系统原理如图 8 所示。

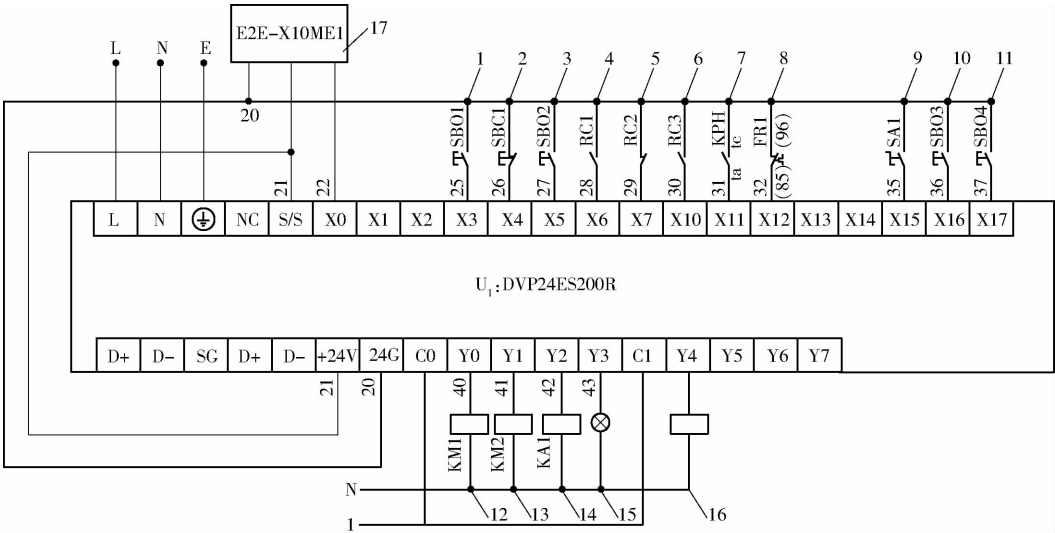


图 7 试验台 PLC 控制电路接线图

Fig.7 Control circuit wiring diagram of PLC test platform

1. 上行按钮 2. 停止按钮 3. 下行按钮 4. 遥控上行 5. 遥控停止 6. 遥控下行 7. 相序保护 8. 电机过载保护 9. 位置校正开关  
10. 下限限位按钮 11. 上限限位按钮 12. 电机上行按钮 13. 电机下行按钮 14. 刹车线圈按钮 15. 警示灯 16. 蜂鸣器 17. 接近开关

2.2.1 硬件系统设计

选用台达 DVP-ES2 型控制系统 PLC,16 个输入点,8 个输出点;选用台达 DOP-B07S411 系列触摸屏,支持自动通讯侦测,高速 DVP Q-LINK 通信协议。选用台达 VFD-M 型变频器,功率为 5 kW,与 PLC 通信采用 RS485 协议。选用欧姆龙 E2E-X10ME1 型接近开关读取转动脉冲,有效检测距离为 10 mm 以内,工作温度 -20~60℃,在本试验台中采集部位为钢丝绳有效段首末端停止位置对应的滑轮角位移信号,以数字信号传输至 PLC,PLC 据首末端位置对应数字信号,比较钢丝绳有效段在运行时接近开关实时采集的角位移信号,实现钢丝绳有

效段始终在设定的范围内运行,到达自动定位停止目的,试验台硬件控制流程如图 9 所示。

钢丝绳线速度是试验平台的关键运行参数,试验平台钢丝绳的线速度通过安装在滑轮轴上的接近开关及相应 PLC 控制程序实现,接近开关安装如图 10 所示,接近开关将转动的脉冲信号送入 PLC,钢丝绳线速度计算式为

$$v_1 = \pi Dn/t_1 \tag{7}$$

第  $n$  次采集线速度下钢丝绳总行程为

$$S_n = N\pi D \tag{8}$$

式中  $v_1$ ——钢丝绳线速度,m/s  
 $D$ ——滑轮直径,m

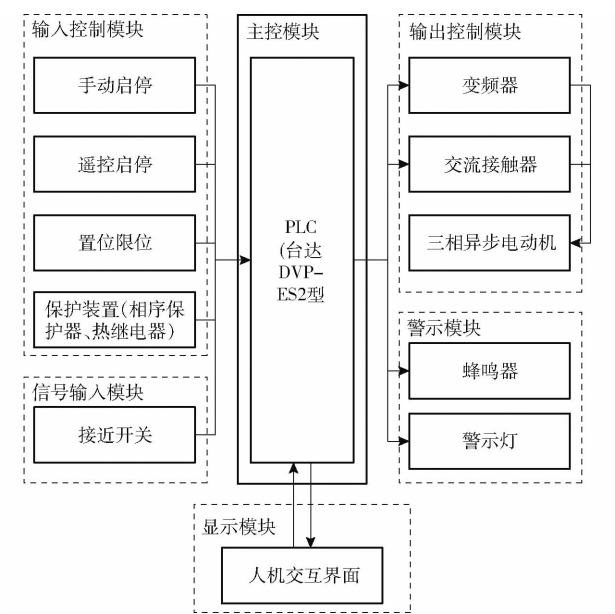


图 8 试验台控制系统原理图

Fig. 8 Control system principle diagram of test platform

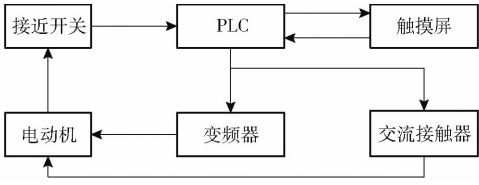


图 9 试验台硬件控制流程图

Fig. 9 Hardware control flow chart of test platform



图 10 试验台接近开关安装现场图

Fig. 10 Proximity switch installation site of test platform

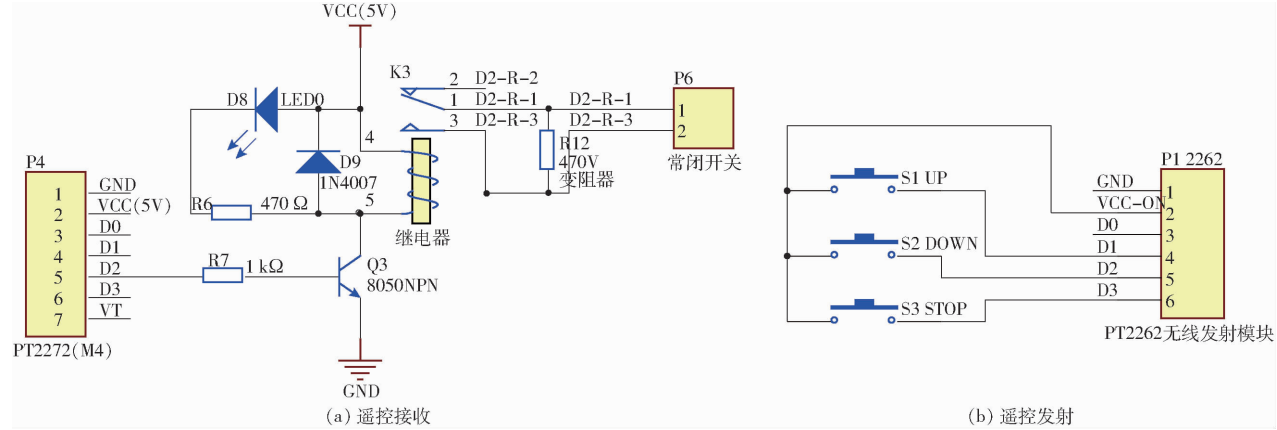


图 11 遥控接收及发射装置控制电路图

Fig. 11 Remote control receiving and transmitting circuit diagrams

$n$ ——运行时间内的脉冲数  
 $t_1$ ——运行时间, s  
 $N$ ——脉冲总数

遥控接收装置控制电路如图 11a 所示,主要由 PT2272(普城公司,中国台湾)无线接收模块、继电器以及二极管、三极管等元件组成。当 PT2272 模块接收到控制信号,给三极管 8050 一高电平,三极管导通,继电器线圈吸合,控制端口导通,以开关量信号给 PLC 发送控制命令。遥控发射装置电路图如图 11b 所示,由 PT2262(普城公司,中国台湾)无线发射模块以及按键组成,当上行、下行、停止对应的按键被触发时,PT2262 无线发射模块根据对应的触发信号给 PT2272 模块发射控制指令。实际应用时,PT2262/PT2272 的载波频率为 315 MHz,工作电压为 5 V,调制方式为 ASK,通过焊接地址编码引脚使两个模块具有相同的地址码。

控制系统输入电压为 220 V,在遥控接收装置内部需加入电源转换电路,将交流 220 V 的电压转换为直流 5 V 电压,通过降压变压器 T1 降压,然后经过整流以及滤波电路,将交流变成直流,最后通过 LM2596 芯片将电压稳压为 5 V,电源转换电路如图 12 所示。

2.2.2 软件设计

数字量信号输出部分为变频器通信端口 D +、D - 以及对应控制输出的端口等。控制系统软件程序在 WPL Soft 2.30 中编写,主控制流程如图 13 所示。系统启动初始化后,PLC 首先判断是否成功接收控制信号,若有,变频器及电动机进入启用模式;电动机运行时,PLC 实时比较接近开关脉冲信号与设置信号,若输入脉冲数介于上、下限位置脉冲数之间,变频器和电动机继续运行;若输入脉冲数与下限位置脉冲数相等,变频器及电动机停止,停止预设时

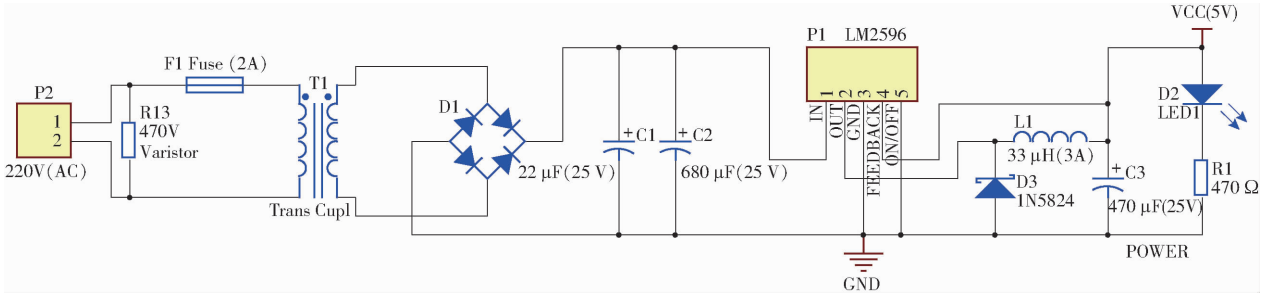


图 12 遥控电源转换电路图

Fig. 12 Remote power conversion circuit diagram

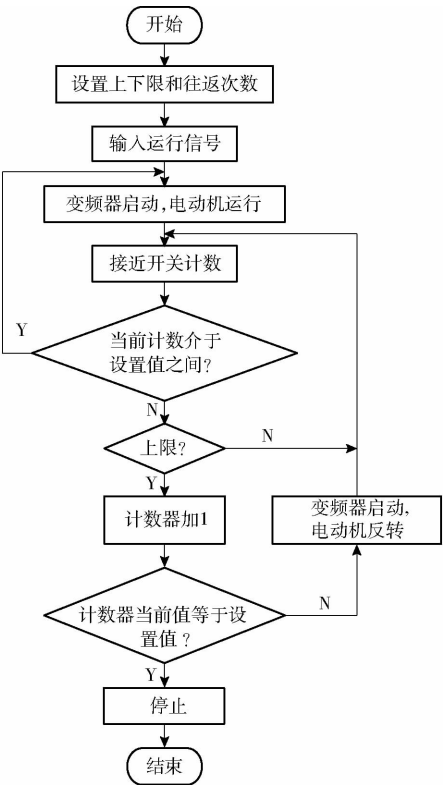


图 13 试验台控制系统主程序流程图

Fig. 13 Main control system flow chart of test platform

间后,变频器重新启动,电动机反转运行;若输入脉冲数等于上限位置脉冲数,变频器及电动机停止运

行,计数器加 1;若计数器所计的实时数值小于设置往返次数,变频器启动,电动机反转运行;若计数器所计实时数值等于设置往返次数,则程序运行结束并停机。

3 张紧力自动调节装置设计与试验

3.1 张紧力自动调节装置设计

钢丝绳具有较大的弹塑性,使用过程中长度实时变化,若仅依靠张紧器无法实时将钢绳的张紧力维持在试验所需张紧力水平,需在张紧器粗调基础上进行精确自动调节,为此设计钢丝绳张紧力自动调节控制装置。

张紧力自动调节控制装置由直流电机、线性导轨、滚珠丝杆和数显推拉力计组成。钢丝绳张紧力自动调节机构控制单元采用 24 V 直流电源进行供电,控制单元采用 STC89C52 单片机,实时采集数显推拉力计输出的拉力信号通过 RS232 串口输入至微控制器。微控制器经运算,输出 PWM 控制信号至光电耦合器。光电耦合器控制 H 桥电路正反向导通,达到控制直流电机转速及转向目的。直流电机旋转带动滚珠螺杆旋转,进而拖动卷扬机沿滚珠丝杆轴向移动,实现钢绳张紧力调节。钢绳张紧力自动调节装置如图 14 所示。

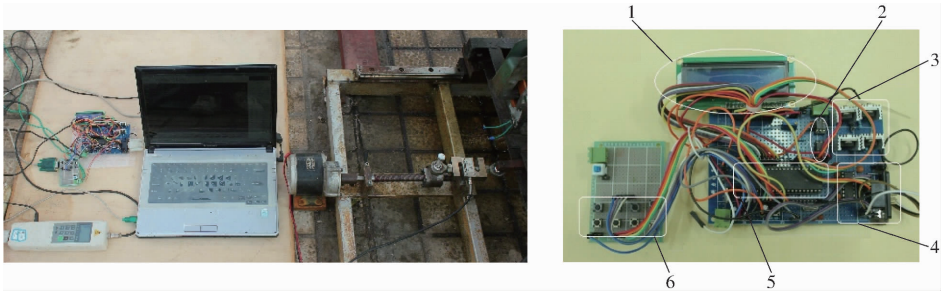


图 14 钢绳张紧力自动调节装置示意图

Fig. 14 Sketch of wire rope tension automatic adjustment device

1. LCD1602 2. 光耦模块 3. 驱动模块 4. 串口模块 5. STC89C52 单片机 6. 独立按键

工作时,推拉力计与控制系统通过 RS232 串口进行通信,当串口接收到数据后,进入中断。在中断服务程序中,将握手信号序列与接收数据

序列进行比较。若序列相同,则计算拉力并存储;若序列不相同,则退出中断,继续等待下一次数据。

3.2 拉力传感器标定试验

首先对推拉力计进行动态标定试验,将传感器与悬垂放置水桶连接,试验前水桶为空载,然后向桶内倒入定量水,待传感器数值稳定后读取拉力,累计倒入 14 次,记录每次注水质量与拉力传感器的拉力。

将记录的数值绘制推拉力计的动态标定方程,由图 15 可知,推拉力计的拉力输出值与注水质量呈线性关系,可满足试验台采集钢绳张紧力的实时运行变化需求。

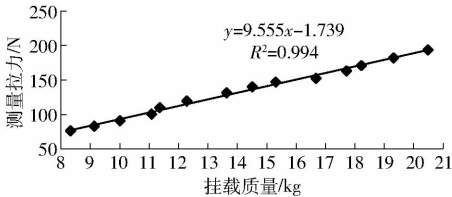


图 15 推拉力计动态标定曲线

Fig. 15 Push pull meter dynamic calibration curve

3.3 张紧力自动调节性能测试试验

将钢绳张力目标值设为 2 000 N,运行距离设为 4.5 m,通过改变钢绳运行速度,测试钢绳在有无自动张紧系统下张力的实时变化情况,依次设置电机的工作频率为 30、40、50 Hz。钢绳张紧力的变化情况如图 16 所示,钢绳有比例控制条件的实时张紧力基本控制在 1 900 ~ 2 100 N 范围,且变化趋势趋于直线,显然有比例控制较无控制系统更优。

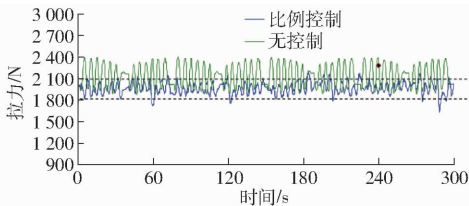


图 16 钢绳在有无比例控制下张紧力波动变化曲线

Fig. 16 Tension fluctuation curves of wire rope under no control and proportional control

张紧力控制偏差随时间的变化曲线如图 17 所示。由图 17 可知,系统的最大跟踪误差为 276 N,平均误差为 40.073 N;钢绳往返运行时,其张紧力存在明显的周期性控制偏差振荡,且主要发生在周期转换瞬间。多次试验得到目标控制浮动范围

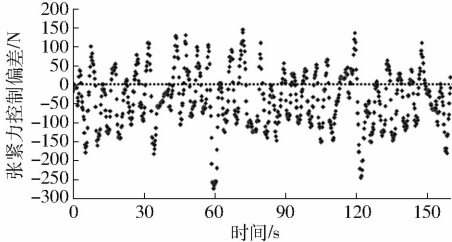


图 17 钢绳张紧力控制偏差跟踪结果

Fig. 17 Tension force control deviation tracking results of wire rope

- 130 ~ 85 N,可满足试验需求。

4 钢丝绳检测可靠性试验

4.1 钢丝绳无损探伤仪

根据国家标准 GB/T 5972—2009《起重机 钢丝绳 保养、维护、安装、检验和报废》,钢丝绳损伤包括以下方面:局部损伤,即钢丝绳中钢丝不连续,如断丝、钢丝蚀坑、深度磨损等;金属横截面积缺失,即钢丝绳在轴向较长范围内有效金属截面积的缓慢减少,如磨损、长时间锈蚀、绳径缩短等,特点是钢丝绳金属截面积在较长范围内普遍减少。

果园双轨运输机试验示范应用效果表明,断丝、磨损、锈蚀与腐蚀是钢丝绳损伤的主要表现形式,其中断丝最明显。传统的钢丝绳损伤检测是依靠人工目视检测,由专职检测人员定期对服役钢丝绳通过手摸或肉眼寻找断丝,该方式只能发现钢丝绳表层钢丝的断丝或较严重的磨损,对于内部损伤则只能通过解剖的方式进行观测,受人为因素影响较大,报告可信度低。钢丝绳无损检测是目前用于检测钢丝绳损伤的主要方式,克服了人为检测误差,且无需解剖钢丝绳即可对钢丝绳的内外钢丝的损伤情况进行判断<sup>[32-35]</sup>。经过综合对比,选用测定漏磁法作为本试验钢丝绳无损检测方式。

选用上海且华虚拟仪器有限公司生产的 MTC 钢丝绳探伤仪作为试验台钢丝绳损伤无损检测设备,其硬件部分应用 MTC 磁传感器与自主研发的采集模块,通过 R232 总线驱动,可将检测数据存储至计算机;软件部分是基于小波变换原理,实现数据采集、系统控制、数据分析、数据显示与存储,连续动态检测并输出检测结果和发出断丝报警信号等功能。MTC 钢丝绳探伤仪实物及探伤原理如图 18、19 所示。



图 18 MTC 钢丝绳探伤仪

Fig. 18 MTC wire rope flaw detector



图 19 MTC 钢丝绳探伤仪检测原理

Fig. 19 Detection principle of MTC wire rope flaw detector

钢丝绳快速通过传感器,传感器中的永久磁快速且深度磁化钢丝绳至饱和状态。断丝、磨损等缺陷使钢丝绳产生漏磁场和磁通变化,向空间扩散的

磁信号经聚磁环集聚后,由阵列广角霍尔元件组转换成电压变化值,通过 AD 接口,进行模数转换后,将数字信号压缩后输入计算机,判断有无断丝。基于三维数学模型的软件实时解压处理,以明确的定量数值显示钢丝绳内外断丝、锈蚀、磨损、金属截面面积变化,并通过光电编码器确定相应损伤的位置,按现行标准生成钢丝绳安全性和使用寿命的诊断评估报告。

根据测量条件设置第一和第二门限。第一门限指获取局部损伤引起信号异常的定性阈值,是检测钢丝绳损伤的关键参数,数值应设置略小于单根钢丝绳漏磁信号的输出值,将第一门限设置为 VPP 两峰值中较小值的 85% 左右,经前期试验将第一门限值设置为 21;第二门限是判定局部缺陷程度的定量设定阈值,系统将根据该阈值量化缺陷,如断丝值完全取决于该阈值。第二门限值取为第一门限值的 80% 左右为宜,经过前期试验将第二门限值设置为 16。

截面基准值为新钢丝绳截面积实际值,经重复测试取平均值,将该值设为 14 896。截面灵敏度为横梁传感器的性能参数,需要人为经过多次重复试验获取,使检测信号最稳定,经测试设为 10。波形放大率用于评估局部缺陷时,放大或缩小检测信号波形的幅度比例,对真实数据分析无影响,该值为实数值,可任意输入,越大表示波形幅度越大,反之则越小。

4.2 断丝可靠性检测试验

截取 3 段长度为 1.5 m、直径为 8 mm 钢丝绳,用尖嘴钳和剪刀制造断丝,断丝数依次为 10、20、30 根,模拟钢丝绳的断丝状况,并记录断丝的实际位置和断丝位置的断丝数;用 MTC 探伤仪依次检测试验绳,每组试验进行 10 次检测,获取探伤仪断丝测试值与实际误差。试验结果表明每根试验绳 10 次重复试验检测的断丝数与实际值一样,证明 MTC 探伤仪对钢丝绳断丝损伤检测的数据可靠,且具备良好的重复性。3 组重复验证试验结果如表 2 所示。

表 2 验证试验断丝位置

Tab. 2 Broken root wires repeated test result

| 序号 | 断丝位置/m | 序号 | 断丝位置/m |
|----|--------|----|--------|
| 1  | 0.188  | 6  | 0.948  |
| 2  | 0.346  | 7  | 1.102  |
| 3  | 0.495  | 8  | 1.248  |
| 4  | 0.641  | 9  | 1.398  |
| 5  | 0.791  | 10 | 1.544  |

断丝波形图如图 20 所示,波形出现红点代表该

处有断丝,红点处波形幅度代表断丝数量,幅度越大表示断丝数量越多。

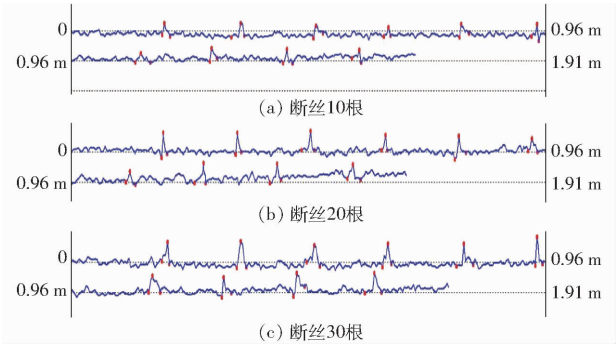


图 20 钢丝绳断丝验证试验波形图  
Fig. 20 Verification test waveforms of broken wires

4.3 磨损可靠性检测试验

截取 1 条长度为 1.5 m、直径为 8 mm 钢丝绳,用角磨机在中部区域制造 1 处磨损,模拟钢丝绳的磨损状况,最后将试验绳依次通过 MTC 探伤仪,试验重复 10 次,获取探伤仪磨损量。

10 组重复验证试验的最大磨损结果如图 21 所示。由图可知,10 次重复试验磨损量检测值与平均值相比,每次检测的偏差均较大,且偏差不稳定。

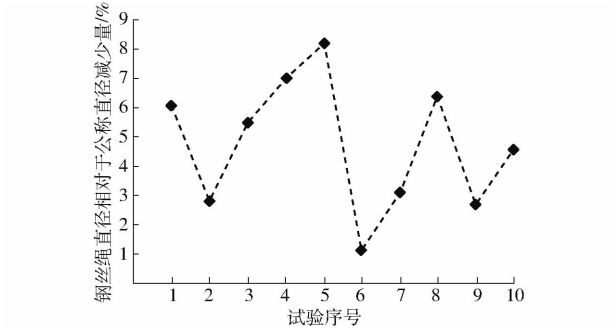


图 21 钢丝绳磨损验证试验结果  
Fig. 21 Wear testing results of wire rope

5 结论

(1)对山地果园运输机用钢丝绳结构和运行时的受力进行分析,建立了钢丝绳的动力学模型和接触力学模型,由于钢丝绳受力复杂,仅依靠理论分析不能很好地解释钢丝绳的损伤机理。

(2)搭建了一套山地果园运输机用钢丝绳损伤行为模拟试验平台,有效实现了钢丝绳自动往返,以及运行时间、运行速度、运行距离、往返次数等参数的实时监控,滑轮组架用于模拟钢丝绳与滑轮接触,约束轮组架用于模拟钢丝绳与约束轮接触。在此基础上构建了平台变频调速与无线遥控系统,进行了硬件及控制系统设计。

(3)建立了张紧力自动调节装置,该装置可对作用在钢丝绳上的张紧力精准调节。进行了拉力

传感器标定及性能测试试验,拉力计得到的拉力输出值与注水质量呈线性关系,有比例控制可以将拉力限定在更小的范围,且偏差在 $-130 \sim 85 \text{ N}$ 之间,结果表明设计的张紧力自动调节装置满足试验需求。

(4)基于已完成的模拟试验平台,搭建了一套

基于漏磁法的 MTC 钢绳断丝检测平台,并进行了断丝检测试验。在断丝数分别为 10、20、30 根的情况下,试验绳 10 次重复试验检测的断丝数与实际值相同,验证试验表明,检测平台可准确检测钢丝绳断丝数及断丝精确位置。但在磨损可靠性试验中,检测的磨损量与实际值偏差较大。

## 参 考 文 献

- [1] 洪添胜. 一种钢丝绳牵引式山地果园货运机: CN202294798U[P]. 2012-06-20.
- [2] 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. Optimization of rack tooth forms of monorail mountain orchard transporter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 52-57. (in Chinese)
- [3] 刘孟楠,周志立,徐立友,等. 基于多性能目标的拖拉机运输机组优化设计[J]. 农业工程学报,2017,33(8):62-68.  
LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Multi-objective optimization and design of tractor trailer systems[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 62-68. (in Chinese)
- [4] 龚志远,李轶凡,刘燕德,等. 山地果园轨道运输机的研究及其应用进展[J]. 食品与机械,2016,32(1):202-206.  
GONG Zhiyuan, LI Yifan, LIU Yande, et al. Research and application progress of the mountain orchard rail transport[J]. Food and Machinery, 2016, 32(1): 202-206. (in Chinese)
- [5] 欧阳玉平,洪添胜,黄志平,等. 山地果园拆装牵引式双轨运输机控制系统的设计[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):215-221,234.  
OUYANG Yuping, HONG Tiansheng, HUANG Zhiping, et al. Design of detachable traction double-track transport control system for mountain orchards[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016,44(5): 215-221,234. (in Chinese)
- [6] 吕石磊,梁尹聪,李震,等. 基于超高频 RFID 双天线双标签对照的果园单轨运输机定位[J]. 农业工程学报,2018,34(4):71-79.  
LÜ Shilei, LIANG Yincong, LI Zhen, et al. Orchard monorail conveyer location based on ultra high frequency RFID dual antennas and dual tags[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 71-79. (in Chinese)
- [7] 吴伟斌,廖劲威,洪添胜,等. 山地果园轮式运输机车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报,2016,32(11):39-47.  
WU Weibin, LIAO Jinwei, HONG Tiansheng, et al. Analysis and optimization of frame structure for wheeled transporter in hill orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 39-47. (in Chinese)
- [8] 王新,赵斯琪,王力扬,等. 果园作业车稳定性控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):13-19.  
WANG Xin, ZHAO Siqi, WANG Liyang, et al. Stability control method for orchard vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 13-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150503&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150503&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.003. (in Chinese)
- [9] 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 drive system for battery-drive monorail transporter for mountainous orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 34-40. (in Chinese)
- [10] GUO Y, ZHANG D, YANG X, et al. Experimental research on effect of wire rope transverse vibration on friction transmission stability in a friction hoisting system[J]. Tribology International, 2017, 115: 233-245.
- [11] 欧阳玉平,洪添胜,苏建,等. 山地果园牵引式双轨运输机排绳装置的设计[J]. 华中农业大学学报,2014,33(5):123-129.  
OUYANG Yuping, HONG Tiansheng, SU Jian, et al. Design of wire rope ranging device for mountain orchard traction double-track cargo vehicle[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5): 123-129. (in Chinese)
- [12] 徐宁,欧阳玉平,洪添胜,等. 山地果园单向牵引式双轨运输机摩擦制动装置设计与试验[J]. 广东农业科学,2015,42(5):127-132.  
XU Ning, OUYANG Yuping, HONG Tiansheng, et al. Design and test for friction braking device of mountainous orchard one-way traction double-track transport[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(5): 127-132. (in Chinese)
- [13] LIU R, SUN X, DONG W. Dynamics modeling and control of a transport aircraft for ultra-low altitude airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 478-487.
- [14] URANGA A, DRELA M, HALL D K, et al. Analysis of the aerodynamic benefit from boundary layer ingestion for transport aircraft[J]. AIAA Journal, 2018, 56(11): 4271-4281.
- [15] 赵凯,何玉怀,刘新灵. 钢丝绳开裂原因分析[J]. 失效分析与预防,2018,13(2):113-118.  
ZHAO Kai, HE Yuhuai, LIU Xinling. Failure analysis of steel cables[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(2): 113-118. (in Chinese)
- [16] 杜文正,马保珠,曹大志,等. 钢丝绳应力分析与疲劳寿命研究[J]. 煤炭工程,2017,49(8):134-137.  
DU Wenzheng, MA Baozhu, CAO Dazhi, et al. Research on stress and fatigue life of steel wire rope[J]. Coal Engineering, 2017, 49(8): 134-137. (in Chinese)
- [17] 彭玉兴,孙士生,朱真才,等. 缠绕提升钢丝绳绕入冲击摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报,2017,37(1):90-98.  
PENG Yuxing, SUN Shisheng, ZHU Zhencai, et al. Winding-in impact friction characteristics of wire rope in winding hoist[J]. Tribology, 2017, 37(1): 90-98. (in Chinese)
- [18] CHANG S Y, LIAO C C. Single-blade-double-edged steel wire rope shears: U. S. Patent Application 15/638, 272[P].

2018-04-19.

- [19] LEE L S H, JIM C Y. Subtropical summer thermal effects of wire rope climber green walls with different air-gap depths[J]. Building and Environment, 2017, 126: 1-12.
- [20] PAL U, MUKHOPADHYAY G, SHARMA A, et al. Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 116: 149-155.
- [21] MA W, LUBRECHT A A. Detailed contact pressure between wire rope and friction lining[J]. Tribology International, 2017, 109: 238-245.
- [22] FENG C, ZHANG D, CHEN K, et al. Study on viscoelastic friction and wear between friction linings and wire rope[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 142: 140-152.
- [23] 欧阳玉平, 洪添胜, 苏建, 等. 山地果园双轨运输机自动停车系统设计-基于 PLC[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 237-241. OUYANG Yuping, HONG Tiansheng, SU Jian, et al. Design of mountainous orchard double-track transport automatic parking system-based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 237-241. (in Chinese)
- [24] 王大刚. 钢丝的微动损伤行为及其微动疲劳寿命预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [25] 陆兴华. 带式输送机系统离散动态模型[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2): 56-59. LU Xinghua. Belt conveyor scattering system dynamic model[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(2): 56-59. (in Chinese)
- [26] 宋伟刚, 柳洪义, 王鹰. 带式输送机动力学及其计算机仿真的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 133-138. SONG Weigang, LIU Hongyi, WANG Ying. Research on dynamic and computer simulation of the belt conveyor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 133-138. (in Chinese)
- [27] 郭建斌, 牛红林, 韩玉花, 等. 基于 PLC 的养殖场氨气生物氧化装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 310-316. GUO Jianbin, NIU Honglin, HAN Yuhua, et al. Design and experiment of farm ammonia bio-oxidation device based on PLC [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 310-316. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170339&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170339&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.039. (in Chinese)
- [28] 马年拾, 余淑荣, 李凌云, 等. 基于 PLC 的硅铁配料自动控制系统的设计[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(2): 61-64. MA Nianshi, YU Shurong, LI Lingyun, et al. Development of the ferrosilicon batching automatic control system based on PLC [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(2): 61-64. (in Chinese)
- [29] 吴刚, 陈晓琳, 谢驾宇, 等. 玉米果穗自动考种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 433-441. WU Gang, CHEN Xiaolin, XIE Jiayu, et al. Design and experiment of automatic variety test system for corn ear[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 433-441. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s066&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s066&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.066. (in Chinese)
- [30] 魏新华, 包盛, 刘晓凯, 等. 穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 1-7. WEI Xinhua, BAO Sheng, LIU Xiaokai, et al. Design and experiment on potted-seedling automatic transplanter control system for motion coordinating[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 1-7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161201&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161201&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.001. (in Chinese)
- [31] 赵金辉, 刘立晶, 杨学军, 等. 基于 PLC 的苜蓿播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 84-89. ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of tef seeder based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 84-89. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s013&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.013. (in Chinese)
- [32] 孙佳胜. 基于 DSP 的提升机钢丝绳损伤检测装置研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [33] 吴澎, 花虎跃. 钢丝绳无损检测中存在问题的探讨[J]. 无损检测, 2017, 39(6): 65-68. WU Peng, HUA Huyue. Discussion on the existing problems of steel wire rope nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(6): 65-68. (in Chinese)
- [34] 李辉, 孙立功, 孙向文, 等. 钢丝绳在线探伤工程系统的设计应用[J]. 煤矿机械, 2015, 36(12): 219-221. LI Hui, SUN Ligong, SUN Xiangwen, et al. Application of online flaw detection system for wire ropes[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(12): 219-221. (in Chinese)
- [35] 张操, 朱承建, 刘健康. 基于漏磁原理的钢丝绳探伤仪影响因素研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(5): 52-54. ZHANG Cao, ZHU Chengjian, LIU Jiankang. Research of impact factors of wire rope flaw detector based on principle of magnetic flux leakage[J]. Industry and Automation, 2015, 41(5): 52-54. (in Chinese)