

7-31-2020

Dynamic Simulation and Test of Mountain Orchard Double-track Transport Traction System

Yuping Ouyang

1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; ;2. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China; ;3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

Tiansheng Hong

1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; ;2. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China; ;3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

Yudong Ma

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Simulation and Test of Mountain Orchard Double-track Transport Traction System

Abstract

Abstract: *After the traction system virtual prototype model of mountain orchard transport was established, virtual simulation test was done to get the force of wire rope and the dynamic characteristics.* Compared with trapezoidal velocity, under S type velocity curve, vehicle vibration amplitude was decreased obviously in each stage, average maximum force and average force of four key points was respectively decreased by 9.2% and 12.7%. Average relative error between kinetic parameters calculation and simulation values was 4.8%. Average relative error between test and simulation values was 4.02 %. This research results have provided a simulation platform and reference to whole design and optimist the velocity control system of this machine.

Keywords

agricultural machinery, double-track transport, dynamics analysis, traction system, velocity curve

Recommended Citation

Ouyang Yuping, Hong Tiansheng, Ma Yudong. Dynamic Simulation and Test of Mountain Orchard Double-track Transport Traction System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1502-1510.

山地果园双轨运输机牵引系统动力学仿真与试验

欧阳玉平^{1,2,3}, 洪添胜^{1,2,3}, 马煜东³(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
2. 国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广州 510642; 3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 建立了果园运输机牵引系统虚拟样机, 研究了牵引系统动力学特性及钢丝绳受力特点。结果表明: 相对于梯形速度曲线, S 形速度曲线使载物滑车振幅明显降低、钢绳四关键点平均峰值力及受力均值分别减小了 9.2 % 和 12.7 %。牵引系统动力学计算与仿真值平均相对误差为 4.8 %, 试验与仿真值平均相对误差为 4.02 %, 证明仿真数据可靠。该文为山地果园牵引式双轨运输机的整机设计及速度控制系统优化提供依据。

关键词: 农业机械; 双轨运输机; 动力学分析; 牵引系统; 速度曲线

中图分类号: S229+.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 07-1502-09

Dynamic Simulation and Test of Mountain Orchard Double-track Transport Traction System

Ouyang Yuping^{1,2,3}, Hong Tiansheng^{1,2,3}, Ma Yudong³(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China;
3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: After the traction system virtual prototype model of mountain orchard transport was established, virtual simulation test was done to get the force of wire rope and the dynamic characteristics. Compared with trapezoidal velocity, under S type velocity curve, vehicle vibration amplitude was decreased obviously in each stage, average maximum force and average force of four key points was respectively decreased by 9.2% and 12.7%. Average relative error between kinetic parameters calculation and simulation values was 4.8%. Average relative error between test and simulation values was 4.02%. This research results have provided a simulation platform and reference to whole design and optimist the velocity control system of this machine.

Keywords: agricultural machinery; double-track transport; dynamics analysis; traction system; velocity curve

引言

近年来, 为加速中国山地果园的机械化运送进程, 缓解果农的劳动强度, 国内外已研制出多种山地果园轨道运输机械^[1-8], 洪添胜团队研发的山地

果园牵引式双轨运输机是其中一种代表机型^[9-11]。该运输机采用卷扬机牵引载物滑车沿坡地双轨道运行, 有效实现了果品及其他农资省力化运载需求^[11]。山地果园牵引式双轨运输机属于农业运载新式机械, 作业环境复杂^[10-11], 运载果品时若频繁振荡, 易造成果品品质损伤和钢丝绳振荡冲击损伤, 因此有必要对该类运输机的牵引系统的动力学进行研究, 寻找该类运输机载物滑车运行规律及钢丝绳受力情况。



收稿日期: 2014-10-27 修回日期: 2015-02-02;
作者简介: 欧阳玉平(1986-), 男, 江西吉安人, 博士生, 研究方向为机电一体化与仿真技术在山地果园运输机械中的应用; 洪添胜(1955-), 男, 广东梅县人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为机电一体化和信息技术在农业工程中的应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 1502 •

运输机牵引系统牵引性能取决于卷扬机启动速度曲线, 目前卷扬机类提升机械的设计主要从运行效率出发, 运行速度曲线多数采用梯形折线式速度曲线, 该类速度曲线的速度过度不平滑, 导致提升过程中钢丝绳动载损伤和绳系的弹性振荡过大, 尤其体现在启停及高低速度转换瞬间, 一定程度上影响了提升机的运行稳定性和激起提升机卷筒瞬间加速度突变和钢丝绳张力的激增, 易造成滑绳或断绳事故^[12-14]。

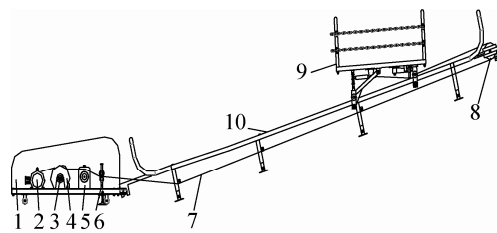
在速度曲线优化方面, 针对梯形速度曲线的上述缺陷, 卷扬机类提升机械多数通过控制系统的优化, 使牵引速度曲线变为类似 S 形的速度曲线^[14], 且在诸如电梯^[15]、有轨巷道堆垛机^[16]、数控机床^[17]等领域得到实现和广泛的应用, 大幅度提高了相关机械的运行平稳性、舒适性和安全性。

适合于山地果园轨道运输机的牵引速度曲线并未发现, 本文运用虚拟样机仿真及验证试验相结合的方法, 在探究运输机牵引系统动力学规律基础上, 初步探究适合该类运输机的牵引速度曲线, 为相应控制系统的进一步优化奠定基础。

1 运输机整机结构和工作原理

1.1 整机结构

山地果园牵引式双轨运输机主要由驱动装置、控制系统、轨道、约束轮、托辊、导向杆、载物滑车、钢丝绳和安全制动装置等组成。驱动装置内设置卷扬机和排绳装置等。载物滑车由车架、行走轮、防翻轮、导向杆和断绳保护装置等组成。轨道单元由 2 根外径为 48 mm 的钢管和若干横梁、支撑柱焊接而成。整机的结构简图如图 1 所示。实际应用时, 轨道依次沿果园设定的方向铺设, 约束轮设置于轨道转弯处, 托辊设置于轨道横梁上下, 上托辊防止钢丝绳与轨道横梁接触, 下托辊防止钢丝绳与地面接触, 驱动装置可固定于轨道上端或下端, 载物滑车置于轨道之上, 钢丝绳一端绕卷在驱动装置内卷筒上, 另一端与载物滑车导向杆相连。运输机的主要技术参数如表 1 所示。



1. 罩盖, 2. 电动机, 3. 卷筒轴, 4. 卷筒,
5. 排绳装置, 6. 钢丝绳张紧装置, 7. 钢丝绳,
8. 滑轮, 9. 载物滑车, 10. 轨道

图 1 山地果园牵引式双轨运输机结构示意图

表 1 运输机主要技术参数

参数名称及单位	数值
配套电机额定功率/kW	2.2
电动机转速/r.min ⁻¹	1 400
减速机总传动比	36.6
卷筒直径×长度/mm × mm	165×360
轨道宽度/m	0.6
载物滑车质量/kg	85.4
承重轮与防翻轮轮距/mm	108
前后承重轮轮距/mm	825
额定装载质量/kg	300

1.2 工作原理

运输机运行时, 电动机的驱动力依次经过联轴器、电磁制动器和减速机后传递至卷筒。钢丝绳在驱动卷筒的卷绕作用下牵引载物滑车运行, 且在排绳装置的作用下沿卷筒表面有序绕卷。当载物滑车需要转弯时, 钢丝绳在导向杆的辅助下, 顺利通过轨道转弯处的约束轮后嵌入约束轮凹槽内, 保证钢丝绳始终与轨道平齐。载物滑车运行可通过电控箱、无线遥控器和人机交互界面表面的运行按钮等操控方式实现运输机上、下和停止运行。

2 运输机牵引系统动力学建模

2.1 牵引系统动力学方程建立

山地果园双轨运输机牵引系统是一个复杂的机电系统, 载物滑车运行的驱动力由驱动装置提供, 载物滑车给钢丝绳提供拉紧力, 托辊用于避免钢丝绳与轨道横梁及地表产生滑动摩擦, 约束轮保证钢丝绳始终沿轨道变化方向运行, 滑轮改变钢丝绳运动方向。牵引系统运行过程中, 主要影响因素

包括：驱动装置的机械特性、钢丝绳运行阻尼与载物滑车负载状况等。建立牵引系统动力学方程时需做以下假设：钢丝绳轴向承载力均匀分布，钢丝绳运行阻力在重载及空载分布均匀，驱动卷筒、载物滑车及滑轮等视为刚体。

运输机运行时，电动机按控制系统预先设计的速度曲线，经联轴器、电磁制动器和减速箱后，驱动转动卷筒旋转，实现卷筒驱动钢丝绳绕卷。

驱动装置由电动机、联轴器、减速箱和驱动卷筒组成，联轴器安装于电动机与减速箱之间。运行过程中，驱动卷筒不移动，仅绕轴转动。联轴器传递的扭矩计算公式^[18-19]

$$M_S = a\varphi + b\varphi^3 + \tau(a + 3b\varphi^2)\varphi' \quad (1)$$

可得作用在电动机转子轴上的圆周力为：

$$F_D = \frac{1}{R_0}[a\varphi + b\varphi^3 + \tau(a + 3b\varphi^2)\varphi'] \quad (2)$$

作用在驱动卷筒上的圆周力为：

$$F_J = \frac{1}{R}[a\varphi + b\varphi^3 + \tau(a + 3b\varphi^2)\varphi']\eta \quad (3)$$

式中： M_S 为联轴器传递的扭矩，N·m； a 、 b 为联轴器转动常数； φ 为联轴器角速度，rad/s； τ 为联轴器转动阻尼特性滞后时间常数，s； φ' 为联轴器转动角加速度，rad/s²； F_D 为电动机转子上的圆周力，N； F_J 为驱动卷筒上的圆周力，N； R_0 为电动机转子圆周半径，m； R 为驱动卷筒圆周半径，m； η 为传动系统的效率。

将钢丝绳分为 n 个质量相同的单元，形成 n 个集中质量的有限单元，设单元 i 质量、位移、刚度及阻尼分别为 m 、 s 、 k 及 c ，如图 2 所示，钢丝绳单元的动力学方程为^[19]：

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

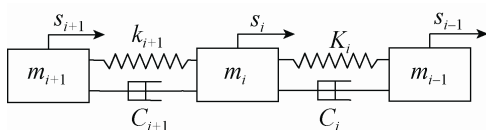


图 2 钢丝绳单元力学模型

综上可得，运输机牵引系统的动力学模型为：

$$F = F_J + f_i(t) \quad (5)$$

由式(1)~(5)可知，驱动卷筒是驱动钢丝绳及载物滑车运行直接动力源，运输机牵引系统受电动机及联轴器转动角速度 φ ，钢丝绳刚度 K 及阻尼 C 影响较大，而联轴器转动角速度由电动机速度曲线决定，故进行动力学仿真或计算前，需完全定义电动机速度曲线及钢丝绳刚度及阻尼系数。

2.2 钢丝绳接触力学模型建立

运输机用钢丝绳接触主要发生在钢丝绳之间、钢丝绳与驱动卷筒、滑轮及约束轮之间。钢丝绳视为弹性圆柱体，其他视为刚性圆柱座。令两接触体在变形前半径分别为 R_1 及 R_2 ，两接触体接触点为 O ；以两接触体公切面为 xy 平面建立直角坐标系， z 轴为公法线，两接触体表面上距离公法线为 r 的点为 M_1 及 M_2 ，点 M_1 及 M_2 距公切面距离分别为 Z_1 及 Z_2 ，建立钢丝绳与圆柱座接触模型，如图 3 所示。

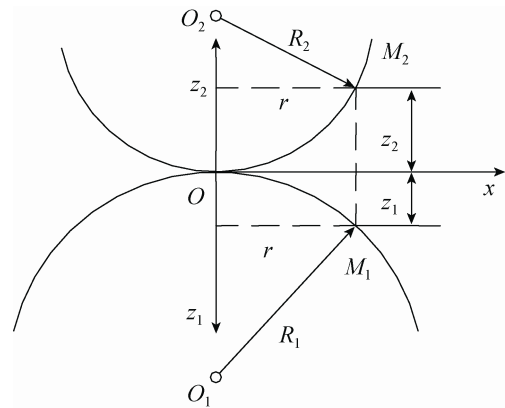


图 3 钢丝绳与圆柱体接触模型

运用赫兹接触理论，可知钢丝绳与圆柱座接触区域为椭圆形，且在椭圆接触区内，接触压力分布为^[20]：

$$p(x, y) = \frac{3P}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (6)$$

式中： $P(x, y)$ 为接触压力分布，N； P 为两圆柱体间的压力，N； a 、 b 为两圆柱体接触面椭圆短、长半轴长度，m。

若钢丝绳轴线相交接触，钢丝绳间的接触压力

按半椭球状分布, 最大接触压力 P_1 发生在接触面的中心点 O , 其值为:

$$P_1 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (7)$$

若钢丝绳轴线相互平行接触, 钢丝绳间接触面为宽度为 $2b$ 的长条, 接触压力沿接触面宽度方向按半椭圆分布, 令两钢丝绳平行接触段每单位长度上的外压力为 P' , 则接触面上的最大接触压力 P_2 为:

$$P_2 = \sqrt{\frac{P'E}{\pi R(1-\nu^2)}} \quad (8)$$

式中: P' 为钢丝绳接触段每单位长度外压力, N; R 为两钢丝绳直径, m; E 为钢丝绳弹性模量, MPa; ν 为钢丝绳弹性模量。

若钢丝绳与驱动卷筒、滑轮及约束轮等接触, 视为弹性圆柱体与圆柱座接触, 接触面上的最大接触压力 P_3 为:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P'(R_C - R)}{\pi(k_C + k)R_C R}} \quad (9)$$

式中: P' 为钢丝绳接触段每单位长度外压力, N; K_C 为滑轮、卷筒或约束轮的弹性特征系数; K 为钢丝绳的弹性特征系数; R 为钢丝绳直径, m; R_C 为卷筒、滑轮或约束轮半径, m。

3 运输机牵引系统虚拟模型建立

运用三维软件 SolidWorks 建立运输机三维模型(钢丝绳除外), 为缩短仿真时间, 模型省略了挡链、螺栓、螺母等零件^[21-23]。将建好的三维模型以 Parasolid 格式导入 ADAMS 中, 以 Material Type 定义模型中各构件的材料属性, 将相对静止的构件通过布尔运算进行合并, 完成 SolidWorks 和 ADAMS 间的图形转换^[22]。

钢丝绳建模采用圆柱-轴套力法, 钢丝绳内部应力通过定义相邻圆柱体的轴套力实现^[24-27]。轴套力通过“柔性连接”工具“阻尼器”实现, 阻尼器通过定义力和力矩实现构件间施加柔性力^[28-30]。

由式(4)可知, 刚性系数 K 和阻尼系数 C 是决定钢丝绳模型的关键参数。已知运输机用钢丝绳的

型号为 6×19+FC, 横截面外径为 7.7 mm, 试验测得钢丝绳弹性模量为 73 GPa。钢丝绳整绳通过宏命令进行建模, 宏命令包括小圆柱体的复制、移动、轴套力建立、钢丝绳与滑轮及卷筒的位置关系确立等。

据运输机牵引系统的实际应用工况, 在各构件间添加运动副, 选用冲击函数(Impact)法定义构件之间的接触力, 接触力由两构件间弹性力和阻尼力组成^[31]。Impact 函数表达式为^[32]:

$$\text{Impact}\{x, x, x_1, k, e, c_{\max}, d\} \quad (10)$$

式中: d 为穿透深度, mm, 取值 0.1 mm; e 为碰撞力非线性指数, 取值 1.5; C_{\max} 为最大阻尼系数, N·s/mm, 取值 10 N·s/mm; k 为碰撞力接触刚度, N/mm^{1.5}, 取值 1×10^4 N/mm^{1.5}。

牵引系统及钢丝绳模型建立后, 卷筒牵引轴转动副驱动是 If 函数通过定义卷筒牵引轴的转动角加速度变化函数进行施加, 使牵引轴按预设的速度曲线运行。

卷扬机牵引速度曲线一般采用梯形速度曲线, 但实际应用中, 梯形速度曲线在加减速时存在加速度变化不平滑等缺点^[13-14], 为此引入 S 形速度曲线与其进行比较^[15]。图 4 为两种速度曲线示意图, 图中 V_m 、 a_0 分别为梯形速度曲线匀速阶段的速度和加速度, 为便于对比, 假设两种速度曲线加速完成后的最大速度相等, 加减速阶段耗时相同, 则 S 形速度曲线的最大加速度为 $2a_0$ 。

根据牵引速度曲线及表 1, 可得运输机钢丝绳的运动参数。工程上以 r/min 为单位定义卷筒牵引轴转速, ADAMS 中定义的函数单位为 rad/s, 两者之间的换算公式:

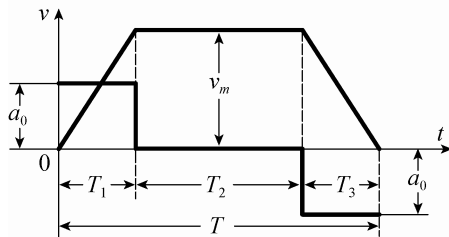
$$\text{函数单位} = (\text{工程单位} \times 360 \times \pi) / 10800 \quad (11)$$

设轨道倾角 15° , 钢丝绳有效长度 16.5 m, 可得卷筒牵引轴及卷筒的转速为 38.25 r/min, 由式(11)换算为函数单位为 4 rad/s。设加速时间 4 s、匀速时间 8 s、减速时间 4 s, 则卷筒角加速度 a_1 为 1 rad/s²; 设 s 为钢丝绳运动距离, m; a 为梯形速度曲线下

钢丝绳运动加速度, m/s^2 ; v 为钢丝绳运动速度, m/s ; 结合表 1 卷筒的尺寸可得各运动阶段钢丝绳的运动参数, 如表 2 所示。由表 2 可推出两速度曲线的 If 函数, 如下:

梯形速度曲线的 If 函数为:

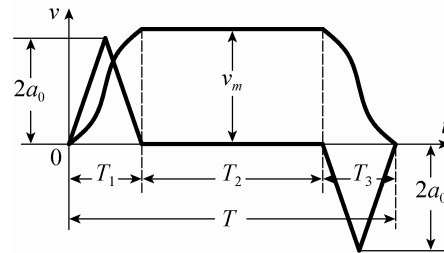
$$\text{If}(\text{time} - 4:1, 0, \text{If}(\text{time} - 12:0, 0, -1)) \quad (12)$$



S 形速度曲线的 If 函数为:

$$\text{If}(\text{time} - 2:\text{time}, \text{time}, \text{If}(\text{time} - 4:4 - \text{time}, 4 - \text{time}, \text{If}(\text{time} - 12:0, 0, \text{If}(\text{time} - 14:12 - \text{time}, 12 - \text{time}, \text{time} - 16)))) \quad (13)$$

通过上述步骤, 山地果园牵引式运输机的虚拟样机模型即完成创建, 如图 5 所示。



注: T_1 为加速时间, s ; T_2 为匀速时间, s ; T_3 为减速时间, s ; T 为运动总时间, s ; a_0 为梯形速度曲线的加速度, m/s^2 ; $2a_0$ 为 S 形速度曲线的加速度, m/s^2 ; v_m 为匀速阶段速度, m/s 。

(a) 梯形速度曲线

(b) S 形速度曲线

图 4 两种牵引速度曲线

表 2 钢丝绳运动参数

运动参数	运动阶段		
	加速阶段	匀速阶段	减速阶段
运动时间 t/s	0~4	4~12	12~16
匀速阶段卷筒速度 $v_m/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	t	4	$-t$
卷筒角加速度 $a_1/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	1	0	-1
匀速阶段钢丝绳速度 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$0.083t$	0.33	$-0.083t$
钢丝绳加速度 $a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.83	0	-0.83
钢丝绳运行距离 s/m	0.68	2.72	0.68



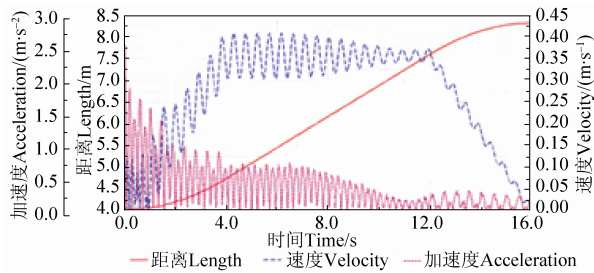
图 5 运输机虚拟样机模型

4 仿真与验证

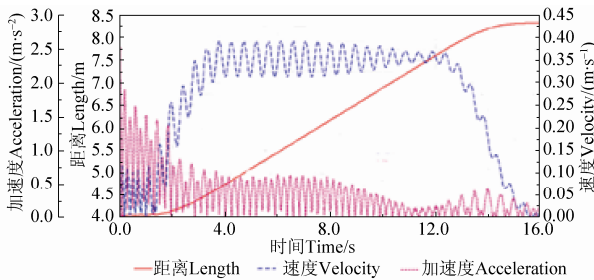
4.1 仿真和分析

选取钢丝绳的 4 个关键点进行分析: (1)钢丝绳与卷筒接触位置; (2)钢丝绳轴套力; (3)钢丝绳与滑轮接触位置; (4)钢丝绳与载物滑车铰接点。设驱动曲线分别为梯形、S 形速度曲线, 载物滑车的装载质量分别为 0 kg, 50 kg, 100 kg, 150 kg 及 200 kg 进行仿真。仿真结束后, 进入 ADAMS/Postprocessor 后处理模块, 获取运输机牵引系统动力学仿真结果。

(1) 载物滑车装载质量 100 kg, 梯形速度曲线工况下, 运动参数变化曲线如图 6 所示。由图 6(a) 知, 载物滑车运动为 3 阶段, 启动瞬间即加速阶段, 速度振幅最大, 位移为 0.69 m, 加速度在 0.78 m/s^2 上下波动; 匀速阶段, 位移为 2.85 m, 速度振幅在 0.35 m/s 上下波动, 加速度在 0.28 m/s^2 上下波动; 减速阶段, 位移为 0.72 m, 速度振幅最小, 加速度在 0.22 m/s^2 上下波动。将图 6(a)与 6(b)对比可知, 相对于梯形速度曲线, S 形速度曲线在一定程度上降低了载物滑车运行振动幅度。



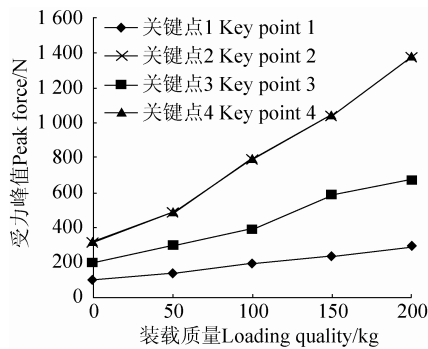
(a) 梯形速度曲线工况



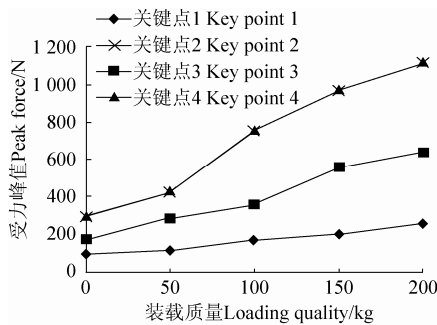
(b) S形速度曲线工况

图 6 载物滑车装载 100 kg 的运动参数变化曲线

(2) 钢丝绳四关键点受力峰值随装载质量的变化曲线如图 7 所示。对比图 7(a)和图 7(b)可知, 相对于梯形速度曲线, S 形速度曲线使四关键点受力峰值平均减少了 9.2%。



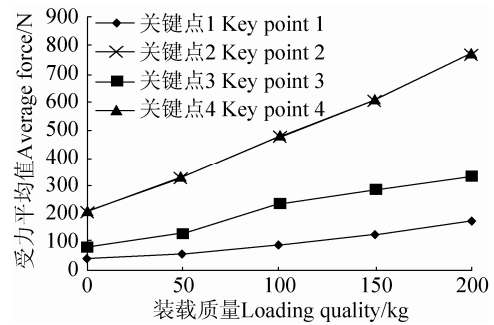
(a) 梯形速度曲线下钢丝绳受力峰值



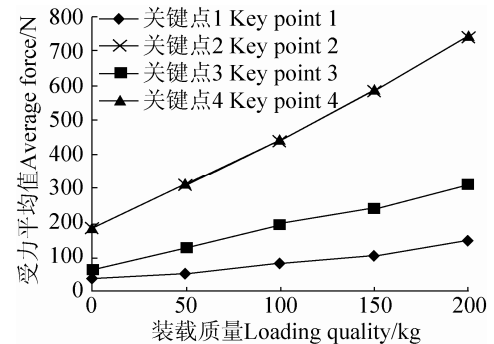
(b) S形速度曲线下钢丝绳受力峰值

图 7 钢丝绳关键点受力峰值

(3) 钢丝绳四关键点平均受力值随装载质量的变化曲线如图 8 所示。对比图 8(a)和图 8(b)可知, 相对于梯形速度曲线, S 形速度曲线使各关键点受力均值平均减少了 12.7%。



(a) 梯形速度曲线下钢丝绳受力平均值



(b) S形速度曲线下钢丝绳受力平均值

图 8 钢丝绳关键点受力平均值

(4) 牵引系统运行时, 卷筒的旋转力矩主要用于克服系统的静阻力矩和惯性力矩^[33]:

$$M = M_j + \sum M_g \quad (14)$$

$$F = F_j + \sum ma \quad (15)$$

式中: M 为卷筒轴上的旋转力矩, N·m; M_j 为作用在卷筒轴上的静阻力矩, N·m; $\sum M_g$ 为卷筒牵引轴上的惯性力矩之和, N·m; F 为卷筒圆周上的作用力, N; F_j 为卷筒圆周上的静阻力, N; $\sum m$ 为载物滑车及所载物资的总质量, kg; a 为卷筒圆周上的线加速度, m/s^2 。

钢丝绳的静阻力主要由载物滑车及所载物资自身重量, 轨道与载物滑车的摩擦, 钢丝绳自身重量以及钢丝绳与托辊、约束轮及滑轮之间的摩擦产生, 其表达式为:

$$F_j = (Q + Q_r)(\sin \theta + \mu_1 \cos \theta) + pL(\sin \theta + \mu_2 \cos \theta) \quad (16)$$

式中： F_j 为静阻力，N； Q 为载物滑车所载物资重量，N； Q_r 为载物滑车自身重量，N； μ_1 为载物滑车行走轮与轨道的摩擦系数，取 0.05^[34]； μ_2 为钢丝绳与托辊、约束轮及滑轮的摩擦系数，取 0.1^[34]； θ 为轨道倾角，°； p 为钢丝绳每 m 的重量，取 2.16 N/m； L 为钢丝绳牵引的有效长度，m。

将式(16)带入式(15)中，得卷筒受力方程：

$$F = (Q + Q_r)(\sin \theta + \mu_1 \cos \theta) + pL(\sin \theta + \mu_2 \cos \theta) + \sum ma \quad (17)$$

据式(17)及表 2 已知参数，可求得在梯形速度曲线下牵引系统的各动力学参数的计算值，将仿真结果与分析计算结果进行比较，结果如表 3 所示；由表可知，载物滑车各动力学参数仿真平均值与计算值的平均相对误差为 4.8%。

表 3 牵引系统仿真结果与计算结果比较

运动阶段	动力学参数				
		位移/m	速度/m·s ⁻¹	加速度/m·s ⁻²	钢丝绳轴套力平均值/N
加速阶段	计算值	0.68	-	0.83	728
	仿真平均值	0.69	-	0.78	720
匀速阶段	计算值	2.72	0.33	0	575
	仿真平均值	2.85	0.35	0.28	580
减速阶段	计算值	0.68	-	0.83	422
	仿真平均值	0.72	-	0.22	430
相对误差/%		4.38	6.06	-	3.86
平均相对误差/%			4.8		

4.2 验证试验

为进一步验证虚拟样机的正确性，在研制的山地果园牵引式双轨运输机样机上进行了钢丝绳承载力验证试验，试验台安装于华南农业大学工程学院国家柑橘体系机械研究室试验园内，轨道有效行程：16.5 m，轨道坡度为 15°，驱动装载位于轨道下方，试验牵引绳：6×19+FC，直径 7.7 mm；速度曲线沿用卷扬机出厂的梯形速度曲线进行试验。

测试系统组成为：温州山度仪器有限公司生产的 SH-5K 型数显式推拉式力计，量程 5 KN，分度值 0.001 N，示值误差±0.5%以内，传感器一端与载物滑车相连，另一端与钢丝绳相连，该连接方式用于模拟钢丝绳与载物滑车铰接方式。

试验方法：依据 PLC 定位停车控制系统，设定梯形速度曲线各阶段运行时间为：加速阶段 4 s，匀速阶段 8 s，减速阶段 4 s。载物滑车装载质量 0 kg，50 kg 及 100 kg，测试钢丝绳与载物滑车铰接处拉力随时间变化情况，试验重复进行 3 次，取其平均值作为最终试验值。试验现场如图 9 所示，仿真与试验值比较结果如表 4 所示。



1. 数字显示仪 2. 拉力传感器 3. 钢丝绳
4. 计算机 5. 载物滑车

图 9 试验现场

表 4 钢丝绳轴套力仿真与试验值对比

运动阶段	装载质量/kg	仿真平均值/N	试验平均值/N	相对误差/%	平均相对误差/%
加速阶段	0	265	261	1.53	4.02
	50	425	397	7.05	
	100	720	712	1.12	
匀速阶段	0	198	192	3.13	
	50	345	329	4.86	
	100	580	533	8.82	
减速阶段	0	182	175	4.00	
	50	302	298	1.34	
	100	430	412	4.37	

由表 4 可知, 钢丝绳轴套力试验平均值与仿真平均值的平均相对误差为 4.02 %。

5 结论

(1) 利用建模软件 SolidWorks 建立山地果园双轨运输机牵引系统的三维模型, 在 Adams 中应用轴套力法建立了钢丝绳及运输机的虚拟样机模型, 在载物滑车负重情况下对牵引系统进行了动力学仿真研究。据仿真数据可知, 牵引系统在传统梯形速度曲线驱动下, 载物滑车振动幅度较大, 钢丝绳的峰值力出现在钢丝绳轴套力及钢丝绳与载物滑车的铰接处; 相对于梯形速度曲线, S 形速度曲线驱动下, 载物滑车在振动幅度明显减少、钢丝绳四关键点的峰值力及均值平均分别减小了 9.2 % 和 12.7 %, 证明 S 形速度曲线, 在提高载物滑车运行稳定性及降低钢丝绳的冲击损伤方面, 优于梯形速度曲线。

(2) 将牵引系统的动力学参数仿真值与计算值进行比较, 得到平均相对误差为 4.8 %, 证明虚拟样机模型与理论计算模型相符。

(3) 利用研制的试验台进行牵引试验, 并与仿真数据进行了对比分析。结果表明, 钢丝绳轴套力试验平均值与仿真平均值的平均相对误差为 4.02 %, 证明虚拟样机模型与实际运输机牵引系统相符合, 仿真数据可靠, 能替代试验数据作为参考依据, 为运输机整机的研发提供了一种设计参考。

(4) 本文在阐述运输机牵引系统动力学方程基础上, 对梯形速度曲线驱动工况进行了仿真和验证试验, 而 S 形速度曲线在文中仅为虚拟试验。通过本文可知通过改变电动机启动速度曲线确实可改变牵引系统的牵引性能, 为后续指导运输机控制系统优化, 进一步研究适用于不同坡型运输机启动速度曲线奠定基础。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 洪添胜, 苏建, 朱余清, 等. 山地橘园链式循环货运索道设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 108-111.
- [3] 杨洲, 李雪平, 李君, 等. 果园钢索牵引悬挂式货运系统关键部件设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 18-24.
- [4] 李善军, 邢军军, 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.
- [5] 朱余清, 洪添胜, 吴伟斌, 等. 山地果园自走式履带运输车抗侧翻设计与方针[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊 1): 19-23.
- [6] 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.
- [7] 陈银清, 洪添胜, 孙同彪, 等. 山地果园单轨运输机的最小转弯半径及最大承载量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 50-56.
- [8] 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.
- [9] 李震, 卢加纳, 洪添胜, 等. 山地果园钢丝绳牵引运输机超声波壁障系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 116-120.
- [10] 洪添胜, 张衍林, 杨洲, 等. 果园机械与设施[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 103-119.
- [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.
- [12] 张维民. 矿井提升机理想给定速度曲线研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(2): 47-48.
- [13] 彭佑多, 张永忠, 刘德顺, 等. 矿井提升机驱动系统合理加速度曲线的确定[J]. 湘潭矿业学院学报, 2001, 16(3): 59-64.
- [14] 范狄庆, 吴子岳. 矿井提升机理想 S 形速度曲线的模型研究[J]. 煤矿机械, 2006, 27(2): 241-243.
- [15] 张汝成, 王广生, 聂玉同. 电梯系统的高精度 S 形速度曲线的生成和实现[J]. 起重运输机械, 2009, 9(4): 6-10.
- [16] 薛晖. S 形速度曲线在有轨巷道堆垛机速度控制中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013: 20-21.
- [17] 王允航. 连续轨迹的 S 形速度规划的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 37-42.
- [18] 宋伟刚, 柳洪义. 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.
- [19] 陈秋虹. 大型带式输送机动力学建模与软件开发[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010: 8-27.
- [20] 胡志辉. 双折线式多层卷绕钢丝绳失效行为及损伤机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 38-42.

- [21] 谢斌, 李静静, 鲁倩倩, 等. 联合收割机制动系统虚拟样机仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 18-24.
- [22] 张杨, 区颖刚, 牟向伟, 等. 基于 ADAMS 的拔指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 88-93.
- [23] 贾晶霞, 张东兴, 郝新明, 等. 马铃薯收获机参数化造型与虚拟样机关键部件仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 64-67.
- [24] 许军辉, 宁炜, 朱邦河, 等. 基于 ADAMS 的缠绕类绳索建模方法研究[J]. 机械与自动化, 2014(1): 109-110.
- [25] 李海军, 杨兆建. ADMAS 中钢丝绳索类物体建模方法研究[J]. 机械管理开发, 2007(4): 4-7.
- [26] 陈清胜, 晋民杰, 刘华伟, 等. 基于虚拟样机技术的矿井提升系统仿真分析[J]. 矿山机械, 2012, 40(10): 17-21.
- [27] 张红英, 童明波, 王跃全, 等. 基于 ADAMS 的伞绳断裂仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(10): 25-32.
- [28] 董达善, 孙友刚, 刘龙, 等. 基于虚拟样机技术的钢丝绳张力仿真研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(17): 156-162.
- [29] 晋民杰, 刘华伟, 裴培, 等. 基于 ADAMS 宏命程序的矿井提升机钢丝绳建模研究[J]. 矿山机械, 2011, 39(12): 46-49.
- [30] 郑世山, 张亮有, 符敢为, 等. 基于虚拟样机 ADAMS 的钢丝绳建模及仿真[J]. 机械工程与自动化, 2012, (4): 26-28.
- [31] 斐未迟, 李耀刚, 李运红, 等. 基于虚拟样机技术—ADAMS 的冲击力模型[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 59-63.
- [32] 李俊文, 卜长根, 王龙, 等. ADAMS 宏命令在钢丝绳式冲击钻机虚拟样机建模中的应用[J]. 机床与液压, 2011, 39(23): 150-152.
- [33] 李海军. 矿井提升机缠绕系统虚拟样机与动力学仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 51-56.
- [34] 欧阳玉平, 洪添胜, 焦富江, 等. 山地果园拆装单向牵引式双轨运输机的设计[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(1): 128-135.

(上接第 1495 页)

参考文献:

- [1] Wei Y, Shi Z L, Yu H B. Wavelet analysis based detection algorithm for infrared image small target in background of sea and sky [J]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2003, 1(18): 23-28.
- [2] 杨杰, 杨磊. 基于红外背景复杂程度描述的小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 382-386.
- [3] 张翔, 张建奇, 秦翰林. 基于对偶树复小波变换的红外弱小目标背景抑制[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1672-1677.
- [4] 罗晓清, 吴小俊. 利用小波变换与 Gabor 滤波检测红外小目标[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1819-1823.
- [5] Victor T T, Tamar Peli, May Leung, *et al.* Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]// Proceedings of SPIE. USA: SPIE, 1993, 1954: 2-11.
- [6] 王玲玲, 辛云宏. 基于形态学与遗传粒子滤波器的红外小目标检测与跟踪算法[J]. 光子学报, 2012, 42(7): 849-856.
- [7] 彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 47-51.
- [8] 余小英, 李凡生, 邵晓鹏. 基于背景抑制的 4 种红外小目标检测算法比较[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 287-381.
- [9] 莫金花, 郝润平, 张艳宁, 等. 全局-局部联合滤波的红外小目标背景抑制方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2011, 16(3): 223-231.
- [10] 陈炳文, 王文伟, 秦前清. aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1252-1260.
- [11] 吕雁, 苏新主. 一种基于背景预测的红外杂波抑制新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1270-1273.
- [12] 张焱, 沈振康, 王平. 基于 BP 神经网络的红外小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1901-1904.
- [13] 焦建斌, 杨舒, 刘峰. 基于人工神经网络的红外小目标检测[J]. 控制工程, 2010, 17(5): 611-613.