

鲍秀兰, 孙培林, 胡成, 等. 一种并联缆绳牵引式山地果园运输机的建模与分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 121-127.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.06.017

一种并联缆绳牵引式山地果园运输机的建模与分析

鲍秀兰, 孙培林, 胡成, 李善军, 陈红, 杨安定

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 为进一步提高山地果园运输机的灵活性与可重构性, 设计一种缆绳牵引式无轨果园运输机, 通过在果山上设立桩点, 控制并联钢丝绳的运动来实现果园低空运输。在建立并联机构的三维空间路线模型基础上, 分析运输机工作过程中缆绳的运动与受力, 阐明运输过程中缆绳速度与牵引力的变化规律。仿真结果表明: 基于并联结构的缆绳牵引式果园运输机在不同的运输路径偏角下, 运输过程中的缆绳速度与牵引力的变化缓慢且均匀。并联机构保证了系统工作时的稳定性, 其可重构的特点进一步扩大了运输机的适用范围。

关键词 果园运输机; 山地果园; 并联机构; 缆绳牵引; 三维路径模型; 可重构性; 并联机器人

中图分类号 S 229.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)06-0121-07

我国作为世界最大的水果出产国之一, 水果产区主要分布在山地丘陵地带。丘陵山地地形复杂、坡度较大, 果园机械化生产难度极大, 随着丘陵山地水果产量的不断增加, 山地果园的机械化成为我国水果产业发展亟待解决的问题^[1-2]。随着山地果园运输问题的日益凸显, 研发运输高效、适用范围广、灵活性强的山地果园运输机对我国果品产业的进一步发展具有重要意义^[3]。

目前, 国内的山地果园运输机大多以轨道式^[4]、索道式^[5-6]为主, 轨道式又分为双轨道式^[7]和单轨道式^[8]2种。在此类设计中, 运输机均具有独立的牵引和定位系统, 对于精度要求较高的场合还引入了避障系统, 这使得轨道运输机的应用范围更为宽泛^[9-11]。但由于山地丘陵地区地形多变, 对轨道式运输机设施的实际铺设造成了一定程度的影响。

江西省赣州市拥有世界最大的脐橙种植基地, 其得天独厚的气候条件为脐橙品质提供了保障。赣州市地处群山之间, 山地丘陵覆盖率高达 80.98%, 全市平均海拔为 300~500 m, 山地坡度较陡, 达到了 16°~45°。多变的地形、独特的地势, 使得赣州地区的果园具有突出的山地果园特征。

在研究并联机器人结构的基础上^[12-14], 本研究

在参考赣州市实际地形的基础上, 提出了一种缆绳牵引式并联机构, 建立缆绳式运输机的系统模型, 旨在简化运输机结构, 进一步扩大山地果园运输机适用范围, 为并联缆绳牵引式山地果园运输机的研制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 缆绳式运输机的模型参数

赣州地区果园具有分垄的共性, 但山的高度、坡度以及山的形貌差异较大。以赣州市寻乌县为例, 其境内海拔标高 500~1 000 m, 相对标高 200~500 m, 最低标高为 180 m, 最高标高为 1 529.8 m, 河床标高为 272 m。系统模型采用的实际样本为: 位于两山山顶处的 2 个立柱之间的水平距离设定为 3 200 m, 山高设定为 240 m, 相邻果山间高度差 Δh 范围设定在 10~50 m。因果山坡度在 16°~45°, 为便于计算分析将果篮下山运输路线倾角设定为 $36.87^\circ(\arctan \frac{3}{4})$ 。装满采摘水果的果篮总质量设定为 100 kg。

1.2 运输机工作过程与控制规划

该运输机机构的主要运输过程为: 将装满采摘

收稿日期: 2020-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605181); 中央高校基本科研业务费专项(2662109PY063); 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS26)

鲍秀兰, 博士, 副教授. 研究方向: 农业智能装备. E-mail: orchidbaoxl@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 李善军, 博士, 副教授. 研究方向: 柑橘生产机械化装备. E-mail: shanjunlee@mail.hzau.edu.cn

水果的果篮置于山顶立桩平台,并悬于缆绳末端的吊钩上,每个吊钩连结 2~3 根缆线,每根缆线的另一末端连接 1 个卷筒,卷筒外接电动机与减速器。每根缆绳均由单独的电机控制牵引速度,通过电机的调速控制实现对缆绳牵引速度的调控,进而实现果篮以不同的路径和速度往山下运输。

为降低地形因素对果篮降落路线的精度与落地点准确度的影响、降低缆绳因自身质量与运动造成的摆动偏差、消除系统的响应迟滞和临界抖动现象,对果篮设置独立的升降控制装置,通过在果篮上吊索末端安装按钮的方式实现唯一控制,保证果篮的临时升降不受缆绳运动的影响。

对于不同的果山,其垄道间距、宽度、数量等参数不尽相同。若要使控制系统能满足不同的场地需求,需要将上述参数输入自定义定位模块中,系统自动将垄道的位置信息换算为每条缆绳的长度信息,生成与各个垄道对应的独立定位子程序。同时将定位程序作为中断程序模块化封装,以便于后期的修改、移植、独立调用。中断程序由垄道上的人工信号触发,在实际应用中可以实时调用。当某条垄道上有临时升降的需求,便可通过触发相应垄道的定位模块中断程序,使得缆绳控制吊篮悬停在该垄道上,并为升降系统的运行做好准备。

1.3 并联机构路径模型的建立

对于大跨度的绳牵引并联机构,绳索的质量是不可忽略的因素,绳索在自身质量的影响下悬垂并伴随运动摇摆现象。为了便于模型的建立,计算中将实际的运输路线简化为直线^[15]。根据设定的参数绘制出运输机的路径模型(图 1)。

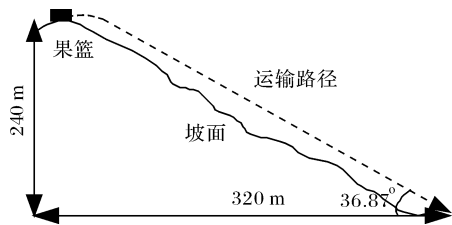


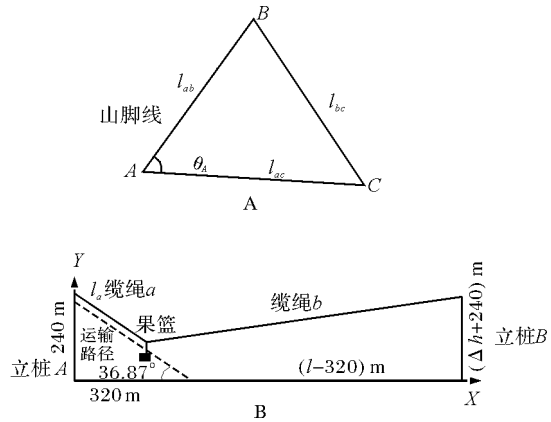
图 1 运输机运输路径简图

Fig.1 Transport path of transport machinery

对三维路径模型分别进行运动学和力学分析,并在数学模型的基础上建立运动模型和力学模型,分别用于研究缆绳运动速度及缆绳的受力情况。

1) 三维路径模型的建立。并联机构中包含 3 个立桩,设备工作范围为立桩所围成的三角形区域。为便于分析与计算,将模型中所有果篮运输路径均

近似为直线。三角形工作区域可能包含其他没有立桩的果山,为简化分析,针对工作区仅包含 3 座设立桩(A、B、C)的果山的情况进行研究,如图 2A 所示。当实际果园中只需要对 2 座果山进行运输时,可简化成二维模型,如图 2B 所示。



A: 果山路径三维模型 Three-dimensional route model of fruit mountains; B: 两座果山的二维路径模型 Two-dimensional route model of two fruit mountains.

图 2 果山路径模型示意图

Fig.2 Schematic of fruit mountains route model

令 3 座果山间的距离分别为 l_{ab} 、 l_{bc} 、 l_{ac} , 缆绳 a 、 b 、 c 的实时有效长度分别为 l_a 、 l_b 、 l_c , 缆绳 a 、 b 、 c 的速度分别为 V_a 、 V_b 、 V_c , 运输路径偏角分别为 θ_A 、 θ_B 、 θ_C 。由于 l_{ab} 、 l_{bc} 、 l_{ac} 可由实际情况修改设定, 运输路径偏角 θ_A 、 θ_B 、 θ_C 也会随之改变。以下将对立桩 A 和路径偏角 θ_A 进行分析, 另外 2 个立桩的路径偏角可由相同的方法得出。假设三维路径模型中每条路径的倾角均为 36.87° , 由于路径偏角是自由可变的, 当由立桩 A 所在果山向山底运输果篮时, 运输路径可能偏向于 AB 也可能偏向于 AC。设路径所在 ΔASA_0 平面与 ΔABB_0A_0 面的夹角为 α , S 点为运输时的果篮下降的末端位置点, 立桩 A 的工作路径如图 3 所示。

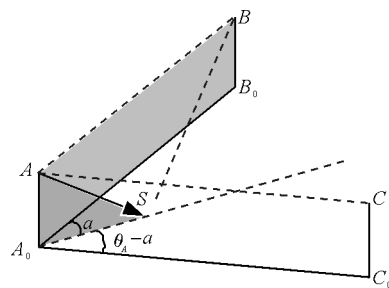


图 3 运输机运输轨迹图

Fig.3 Transportation trajectory of transportation machinery

图 3 中,AS 为运输路径,夹角 α 为路径 AS 的自由偏角,且 $\alpha \in [0, \theta_A]$,由此建立数学模型。

2)运动模型的建立。令立桩 BB_0 顶部到果篮吊钩位置点 S 的距离为 l_{BS} ,立桩 BB_0 底部到果篮吊钩位置点 S 的距离为 l_{B_0S} ,则有:

$$l_{BS} = \sqrt{l_{B_0S}^2 + (240 + \Delta h)^2} \quad (1)$$

$$= \sqrt{(320 \sin \alpha)^2 + (l_{ab} - 320 \cos \alpha)^2 + (240 + \Delta h)^2}$$

假设果篮从 A 点到达 S 点保持匀速,令速度为常数 k ,单位为 m/s,则缆绳 b 的长度 l_b 与时间 t 的函数关系为:

$$l_b = \sqrt{l_{ab}^2 + (kt)^2 - 2l_{ab}kt \frac{l_{ab}^2 + 400^2 - BS^2}{2l_{ab} \times 400}} \quad (2)$$

同理可得缆绳 c 的长度,通过对时间的求导,可得 3 条缆绳的运动数学模型为:

$$V_a = k \quad (3)$$

$$V_b = \frac{k^2 t - 0.8l_{ab}k \cos \alpha + 0.6k \Delta h}{\sqrt{l_{ab}^2 + (kt)^2 - 1.6l_{ab}kt \cos \alpha + 1.2kt \Delta h + \frac{\Delta h^2}{400}}} \quad (4)$$

$$V_c = \frac{k^2 t - 0.8l_{ac}k \cos \alpha (\theta_A - \alpha) + 0.6k \Delta h}{\sqrt{l_{ac}^2 + (kt)^2 - 1.6l_{ac}kt \cos (\theta_A - \alpha) + 1.2kt \Delta h + \frac{\Delta h^2}{400}}} \quad (5)$$

3 条缆绳的速度 V_a 、 V_b 、 V_c 分别由对应立桩处的电机控制调速,当 B、C 立桩分别独立作为主动吊索塔时可由同理推得对应的运动模型。

1.4 运输机系统力学模型的建立

果篮的运输路径为线段 AS, P 点为运输时的果篮实时位置点,假设 t 时刻果篮到达线段 AS 的 P 点处,根据三角函数关系,易得: $AP = kt \in [0, 400]$ 。a、b、c 3 根缆绳同时作用于吊钩,使得吊钩受到来自 3 个方向的牵引力,牵引力间的相互作用确定了果篮运输路径 AS 的自由偏角 α 。建立如图 4 所示力学模型,取过 P 点的水平面进行分析,

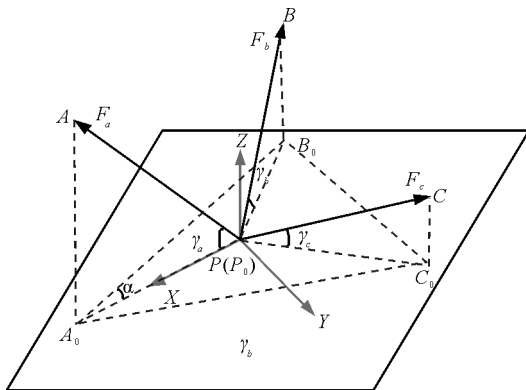


图 4 路径模型受力分析图

Fig.4 Stress analysis of route model

图 4 中, A_0 、 B_0 、 C_0 分别为 A、B、C 3 点在过 P 点的水平面上的投影,为便于受力分析,令 F_a 与 X 轴共线。

针对绳 c 的仰角 γ_c 与时间 t 的关系(仰角即缆绳与水平面的夹角)进行分析。设 t 时刻 P 点与果山顶部(果篮起点 A)的高度差为 ΔH ,则此时 A 点和 P 点水平面投影 $l_{A_0P_0} = \frac{4}{5}kt$, $\Delta H = \frac{3}{5}kt$,果山 C 山高 $l_{CC_0} = 240 + \Delta h$,如图 4 所示。可以计算得到 C 点和 P 点水平面投影 $l_{C_0P_0}$ 和缆绳 c 的仰角 γ_c 。

$$l_{P_0C_0} = \sqrt{\left(\frac{4kt}{5} \sin(\theta_A - \alpha)\right)^2 + \left(l_{ac} - \frac{4kt}{5} \cos(\theta_A - \alpha)\right)^2} \quad (6)$$

$$\gamma_c = \arctan\left(\frac{\Delta H + \Delta h}{l_{P_0C_0}}\right) \quad (7)$$

同理可得缆绳 b 的仰角 γ_b :

$$\gamma_b = \arctan\left(\frac{\Delta H + \Delta h}{P_0B_0}\right) \quad (8)$$

由于夹角 $\angle A_0P_0C_0$ 与 $\angle A_0P_0B_0$ 是随时间变化的,在 $\triangle A_0P_0C_0$ 和 $\triangle A_0P_0B_0$ 中有:

$$\frac{P_0C_0}{\sin(\theta_A - \alpha)} = \frac{A_0C_0}{\sin \angle A_0P_0C_0} \quad (9)$$

$$\frac{P_0B_0}{\sin \alpha} = \frac{A_0B_0}{\sin \angle A_0P_0B_0}$$

由公式 (7) 和 (9) 可推出 $\angle A_0P_0C_0$ 和 $\angle A_0P_0B_0$ 。

如图 4 所示, F_a 、 F_b 、 F_c 分别为缆绳 a、b、c 上的牵引力,令吊钩与果篮总质量为 G ,则缆绳 a、b、c 上的力学方程为:

$$\frac{4}{5}F_a + F_b \cos \gamma_b \cos \angle A_0P_0B_0 + F_c \cos \gamma_b \cos \angle A_0P_0C_0 = 0 \quad (10)$$

$$F_b \cos \gamma_b \sin \angle A_0P_0B_0 = F_c \cos \gamma_c \sin \angle A_0P_0C_0 \quad (11)$$

$$\frac{3}{5}F_a + F_b \sin \gamma_b + F_c \sin \gamma_c = G \quad (12)$$

由公式 (7)~(10) 可得缆绳 a、b、c 上的牵引力 F_a 、 F_b 、 F_c 变化规律。

$$F_a = \frac{4(kt + \frac{5}{3}\Delta h) \left(\frac{\sin(\theta_A - \alpha)}{l_{ab}} + \frac{\sin \alpha}{l_{ac}} \right)}{5 \sin \theta_A} G \quad (13)$$

$$F_b = \frac{\frac{3}{5} \left(\frac{24(kt + \frac{5}{3}\Delta h)}{25 \sin \theta_A} \left(\frac{\sin(\theta_A - \alpha)}{l_{ab}} + \frac{\sin \alpha}{l_{ac}} \right) - 3 \right) l_{ab} \sin \theta_A}{\left[\frac{24(kt + \frac{5}{3}\Delta h)}{5 \sin \theta_A} \left(\frac{\sin(\theta_A - \alpha)}{l_{ab}} + \frac{\sin \alpha}{l_{ac}} \right) - 3 \right] l_{ab} \sin \theta_A} G \quad (14)$$

$$F_c = \frac{4 \sin \alpha \sqrt{l_{ac}^2 + (kt)^2 - \frac{8}{5} l_{ac} kt \cos(\theta_A - \alpha) + \frac{6}{5} kt \Delta h + \Delta h^2}}{\left[\frac{24(kt + \frac{5}{3} \Delta h)}{5 \sin \theta_A} \left(\frac{\sin(\theta_A - \alpha)}{l_{ab}} + \frac{\sin \alpha}{l_{ac}} \right) - 3 \right] l_{ac} \sin \theta_A} G \quad (15)$$

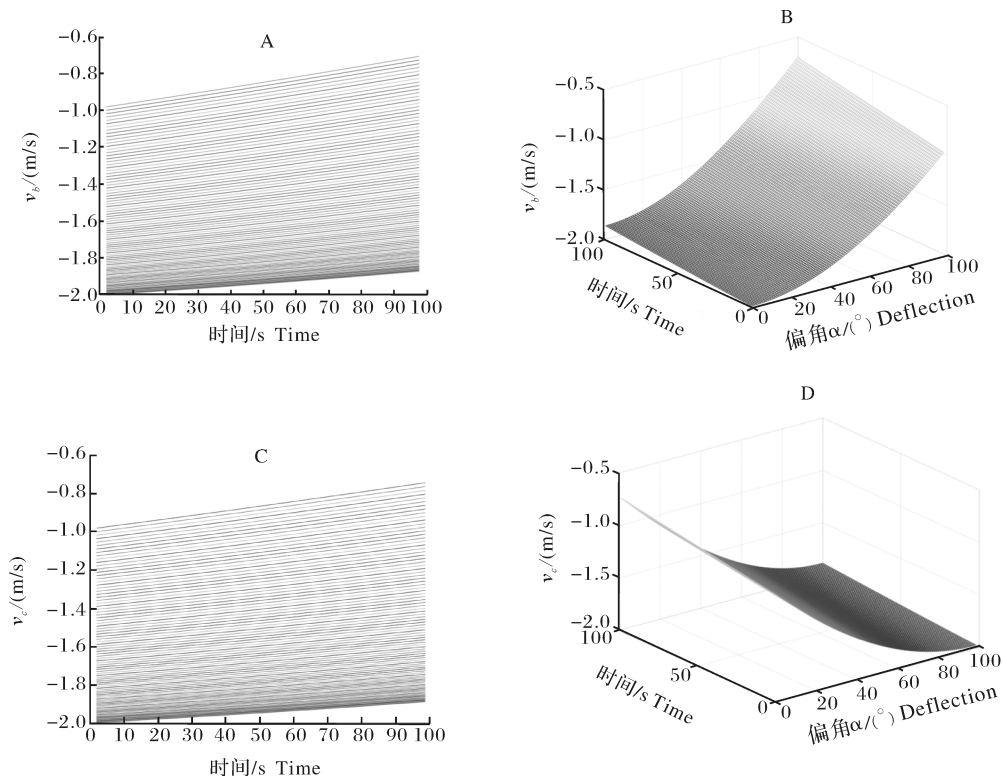
由式(13)~(15)可知,绳缆上的牵引力是关于时间 t 与偏角 α 的二元函数。3 个立桩之间的水平距离 l_{ab} 、 l_{bc} 、 l_{ac} 是可灵活设定的参数,偏角 α 会随着三边长度的改变而改变,运动速度常数 k 可以根据实际应用情况控制电机来调整的参数。

2 结果与分析

利用 Matlab 软件对模型仿真处理,仿真过程中所设置的参数为 $l_{ab} = 3\ 200\ \text{m}$ 、 $l_{bc} = 3\ 500\ \text{m}$ 、 $l_{ac} = 3\ 700\ \text{m}$ 、 $k = 2.5\ \text{m/s}$ 、 $\Delta h \in (0, 50)\ \text{m}$ 、 $\theta_A \in (0^\circ, 180^\circ)$ 、 $\alpha \in (0^\circ, 60^\circ)$, 仿真所得的曲面图如图 5、图 6 所示。图 5 为绳缆 b 、 c 的速度变化图谱,图 6 为 3 条绳缆上的牵引力变化图谱(以下所有图谱中时间均是对 160 s 的时间长度进行 100 次等分采样;图

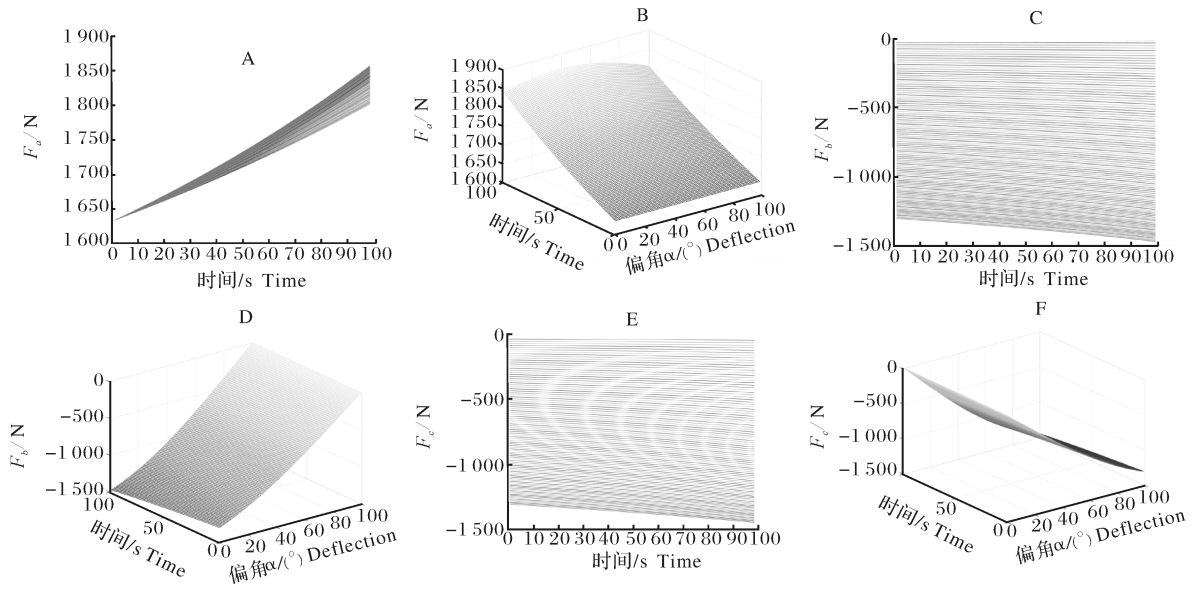
谱中偏角 α 均是对 α 变化范围进行 100 次等分采样)。

由以上仿真结果得知,对于三立桩式的并联运输机构,在运动方面:当绳缆 a 以 2.5 m/s 匀速运动时,绳缆 b 、 c 的起始速度将在 1~2 m/s 内变化且会随着时间的增加而逐渐减小。随着运输路径偏角 α 的增大,绳缆的初始速度会逐渐减小。在受力方面:在果篮匀速下降的运输过程中,绳缆 a 、 b 、 c 上的牵引力随时间的增加逐渐增大,绳缆 a 的增幅速率最大, b 、 c 的增幅速率基本一致但均小于 a 。在偏角 α 的变化范围内,当偏角为中间值时绳缆 a 上牵引力最大,为两侧极限值时绳缆 a 上的牵引力则最小;绳缆 b 上的力随着偏角的增大而逐渐减小,力与偏角负相关;绳缆 c 上的力随着偏角的增大而逐渐增大,力与偏角正相关。通过建模得到的仿真数据与数学模型相符合,充分证明了模型的正确性与可靠性。



A,C: v_b 、 v_c 随时间变化曲线 Time-varying curve of v_b 、 v_c ; B,D: v_b 、 v_c 随时间和偏角变化 Variation curve with time and declination of v_b 、 v_c .

图 5 绳缆 b 、 c 速度变化图谱
Fig.5 Speed change map of cable b 、 c



A,C,E: F_a, F_b, F_c 随时间变化曲线 Time-varying curve of F_a, F_b, F_c ; B,D,F: F_a, F_b, F_c 随时间和偏角变化曲线 Variation curve with time and declination of F_a, F_b, F_c .

图 6 缆绳 a、b、c 牵引力变化图谱

Fig.6 Traction change of cable a, b, c

3 讨 论

本研究针对山地果园运输的要求，提出了一种以钢丝绳缆牵引为基础的无轨式缆绳运输机，通过桩点处电机控制果篮上钢丝绳线的运动来实现货物低空运输工作，再由吊索上的独立升降系统控制果篮的升降，使得整个运输过程精简高效。在模拟实际赣州果园地形的基础上，建立了运输机的力学模型并进行数值仿真分析，仿真结果表明在不同的运输路径偏角下，运输过程中缆绳上速度与牵引力缓慢且均匀的变化，验证了并联机构在模拟运输过程中能保证系统的稳定性，也满足了山地果园机械化运输的基本要求。并联机构三维路径模型的分析方法，还可用于模拟两座果山及多座果山之间的运输情况，充分发挥了并联机构工作空间大、结构简单、灵活性等特点，机构的可重构性也进一步扩大了运输机的适用范围。

参考文献 References

[1] 陈猛, 张衍林, 李善军, 等. 山地果园手扶式单履带运输车设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(1): 125-132. CHEN M, ZHANG Y L, LI S J, et al. Design and experiment of the walking transport vehicle with single crawler for mountain orchard[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(1): 125-132 (in Chinese with English abstract).

[2] 宋月鹏, 张红梅, 高东升, 等. 国内丘陵山地果园运输机械发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 50-67. SONG Y P, ZHANG H G, GAO D S, et al. Study on the integration of agricultural machinery and agronomy in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2019, 40(1): 50-67 (in Chinese with English abstract).

[3] 湛小梅, 曹中华, 周玉华, 等. 丘陵山区农机与农艺融合问题研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(8): 112-114. ZHAN X M, CAO Z G, ZHOU Y H, et al. Study on the integration of agricultural machinery and agronomy in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2018, 39(8): 112-114 (in Chinese with English abstract).

[4] 刘辉, 李善军, 张衍林, 等. 自走式单轨道山地果园运输机力学仿真与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(2): 114-122. LIU H, LI S J, ZHANG Y L, et al. Mechanical simulation and experiment of self-propelled monorail-mountain orchard transporter under different racks [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(2): 114-122 (in Chinese with English abstract).

[5] 吴伟斌, 许棚搏, 朱余清, 等. 山地果园链式索道货运机链条拉力检测系统[J]. 广东农业科学, 2015, 42(21): 161-165. WU W B, XU P B, ZHU Y Q, et al. Test system of pulling force for chain ropeway cargo transporter in hill orchard[J]. Guangdong agricultural sciences, 2015, 42(21): 161-165 (in Chinese with English abstract).

[6] 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. HONG T S, SU J, ZHU Y Q, et al. Circular chain ropeway for cargo transportation in mountain citrus orchard[J]. Transactions of the Chinese

- society for agricultural machinery, 2011, 42(6): 108-111 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 Y P, HONG T S, SU J, et al. Design and experiment for rope brake device of mountain orchard traction double-track transporter[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(18): 22-29 (in Chinese with English abstract).
- [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 S J, LIU H, ZHANG Y L, et al. Optimization of rack tooth forms of monorail mountain orchard transporter[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(6): 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴伟斌, 张成, 洪添胜, 等. 基于模糊 PID 的山地果园运输机动力稳定系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 443-450. WU W B, ZHANG C, HONG T S, et al. Design and experimental of dynamic stability system for mountain orchard transporter based on the self-tuning fuzzy PID controller[J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural science edition), 2017, 43(4): 443-450 (in Chinese with English abstract).
- [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(S2): 69-74. JIA C, LI J N, HONG T S, et al. Design and test of ultrasonic obstacle avoidance system for mountain orchard monorail conveyor[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(S2): 69-74 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张成, 吴伟斌, 杨晓彬, 等. 山地果园运输机试验台研究进展[J]. 现代农业装备, 2017(3): 34-58. ZHANG C, WU W B, YANG X B, et al. Review of test-bed for mountain orchard conveyor [J]. Modern agricultural equipments, 2017(3): 34-58 (in Chinese with English abstract).
- [12] 韩雪, 晷斌, 孙辉辉. 可缠绕式混合驱动柔索并联机器人可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 155-162. HAN X, ZI B, SUN H H. The reliability analysis of the winding hybrid-driven cable parallel manipulator[J]. Machinery design & manufacture, 2015(4): 155-162 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李巍, 赵志刚, 石广田, 等. 多机器人并联绳牵引系统的运动学及动力学解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(10): 1916-1923. LI W, ZHAO Z G, SHI G T, et al. Solutions of kinematics and dynamics for parallel cable-driven system with multi-robots[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science edition), 2015, 49(10): 1916-1923 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈桥, 晷斌, 孙智, 等. 柔索驱动并联腰部康复机器人设计、分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 126-134. CHEN Q, ZI B, SUN Z, et al. Design, analysis and experimental study of a cable-driven parallel waist rehabilitation robot[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(13): 126-134 (in Chinese with English abstract).
- [15] 苏宇, 仇原鹰, 韦慧玲. 考虑绳索质量和惯性力影响的绳牵引并联机器人动力学建模和张力优化求解[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 231-248. SU Y, QIU Y Y, WEI H L. Dynamic modeling and tension optimal distribution of cable-driven parallel robots considering cable mass and inertia force effects[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(11): 231-248 (in Chinese with English abstract).

Modeling and analysis of a parallel cable-towed transporter for hilly orchard

BAO Xiulan, SUN Peilin, HU Cheng, LI Shanjun, CHEN Hong, YANG Anding

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China

Abstract In order to further improve the flexibility of mountain orchard transport, this paper proposes a cable-towed trackless transporter for hilly orchard. The low-altitude transportation in orchard is realized by setting up the pile point on the hilly orchard, controlling the movement of paralleled steel cable. According to the actual terrain situation in Ganzhou, the actual standard used by the system model is that the horizontal distance between two piles located at the top of two mountains is set at 3 200 m, the mountain height is set at 240 m, and the height difference between adjacent mountains is set within 10-50 m. According to the actual situation of the slope angle, the inclination angle of the transportation route down the mountain was set as 36.87° . The total weight of the fruit basket filled with fruit picked was set

at 100 kg. The main transportation process of the transporter is as follows: the fruit basket filled with fruit picked is placed on the pile platform at the top of the hill and suspended on the hook at the end of the cable. Each hook is connected to 2-3 cables, and the other end of each cable is connected to a drum connected to the motor and the reducer. Each cable is controlled by a separate motor, and the speed of the cable is controlled by motor speed control, so that the fruit basket can be transported downhill in different paths and speeds. In order to reduce the swing deviation caused by the own mass and motion of cable and eliminate the response hysteresis and critical jitter of system, an independent lifting control device is set up for the fruit basket. The only control is realized by installing the button at the end of the sling to ensure the temporary lifting of the fruit basket not be affected by the movement of cable. Based on three-dimensional route model, the parallel mechanism consists of three piles, and the working scope of the equipment is the triangular area enclosed by the piles. For the convenience of analysis and calculation, the transportation routes of all fruit baskets in the model are approximated as straight lines. By analyzing the motion model of the device, the relation of the motion speed between the three cables is obtained to provide a theoretical basis for regulating motor speed. By a transport mechanics model the traction on the cable is about time with the dual function of the angle. The horizontal distance is flexible to set parameters, the angle and subject to change with the change of the three-dimensional length, velocity can be obtained to adjust the parameters according to the practical application of control motor. The results of simulating the model with Matlab software showed that the initial speeds of cable b and c changed within 1-2 m/s and gradually decreased with the increase of time when cable a kept moving at 2.5 m/s for the three-pile parallel mechanism of transportation. The initial velocity of the cable decreased as the deflection angle increased. In the process of transportation with a uniform drop of the fruit basket, the traction force on cable a , b and c gradually increased with the increase of time. The increase rate of cable a is the largest, while the increase rates of cable b and c are the same basically but less than that of cable a . Within the scope of the changing the angle α , when the angle is the median cable on a traction, the limit value is the biggest when the cable on both sides of a traction is the smallest. The cable force on b decreases gradually with the increase of angle, and is negatively correlated with the angle. The cable force on the c increases with the increase of angle. The simulation data obtained by modeling fits with the mathematical model, indicating that the model is correct and reliable. The independent lifting sling system controlling the rise and fall of fruit basket make the whole transport process streamlined. Orchard topographic simulation is based on establishing a transporter mechanics model and numerical simulation analysis. The results of simulation showed that the speed and traction on the cable changed slowly and evenly during transportation under the different transportation path angle. The method of analyzing the parallel mechanism with three-dimensional route model can be used to simulate the transportation between two and several hilly orchard. The parallel mechanism guarantees the stability of the system during operation and its flexibility will expand the scope of applying the transporter further.

Keywords transporter for hilly orchard; hilly orchard; parallel mechanism; cable-towed; three-dimensional route model; flexibility; parallel robot

(责任编辑:陆文昌)