

本文引用格式：李波,易远飞,李文理,等.7ZDGS-300 型山地果园自走式电动单轨运输机的研制[J].自动化与信息工程,2024,45(6):20-28.

LI Bo, YI Yuanfei, LI Wenli, et al. Development of 7ZDGS-300 self-propelled electric monorail transport machine for mountain orchards[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(6):20-28.

# 7ZDGS-300 型山地果园自走式电动单轨运输机的研制\*

李波<sup>1,4</sup> 易远飞<sup>2</sup> 李文理<sup>3</sup> 李震<sup>3,4</sup>

(1.广东振声科技集团有限公司, 广东 梅州 540000

2.广西农业职业技术大学农业工程学院, 广西 南宁 530007

3.华南农业大学电子工程学院(人工智能学院), 广东 广州 510642

4.国家柑橘产业技术体系机械化研究室, 广东 广州 510642)

**摘要:** 针对传统的山地果园运输装备转向不灵活、结构复杂、稳定性差和传动效率低等问题, 研制了 7ZDGS-300 型山地果园自走式电动单轨运输机。首先, 对满载工况下的运输机爬坡进行受力分析, 得到满足运输机爬坡要求下的最小牵引力; 然后, 对运输机的电动机和蓄电池组进行选型; 接着, 设计运输机的齿轮传动装置、减振机构、限速保护装置、限位停车装置、防侧翻装置等关键部件; 最后, 对运输机的整体工作性能进行试验测试。测试结果表明, 该运输机的最大爬坡角度为 36.5°, 最大运载质量为 300 kg, 平地最大行驶速度为 0.94 m/s, 远程稳定遥控距离为 900 m, 各项技术指标均达到设计要求, 为山地果园运输机的设计提供理论参考。

**关键词:** 山地果园; 单轨运输机; 电动; 远程遥控

中图分类号: S225.99

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)06-0003-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.06.003

开放获取

## Development of 7ZDGS-300 Self-propelled Electric Monorail Transport Machine for Mountain Orchards

LI Bo<sup>1,4</sup> YI Yuanfei<sup>2</sup> LI Wenli<sup>3</sup> LI Zhen<sup>3,4</sup>

(1.Guangdong Zhensheng Technology Group Co., Ltd., Meizhou, Guangdong 540000, China

2.College of Agricultural Engineering, Guangxi Vocational University of Agriculture, Nanning, Guangxi, 530007, China

3.College of Electronic Engineering (College of Artificial Intelligence), South China Agricultural University,

Guangzhou 510642, China 4.Mechanization Research Laboratory of National Citrus Industry Technology

System, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In response to the problems of inflexible steering, complex structure, poor stability, and low transmission efficiency of traditional mountain orchard transportation equipment, the 7ZDGS-300 self-propelled electric monorail transport machine for mountain orchards has been developed. Firstly, the force analysis of the transport machine climbing under full load conditions is carried out to obtain the minimum traction force that meets the requirements of the transport machine climbing; Then, select the electric motor and battery pack for the transport machine; Next, design key components such as the gear transmission device, vibration reduction mechanism, speed limit protection device, limit parking device, and anti rollover device for the transport machine; Finally, conduct experimental tests on the overall performance of the transport machine. The test results show that when the climbing angle is 36.5° and the maximum carrying capacity is 300 kg, the maximum speed on flat ground is 0.94 m/s, and the remote stable control distance is 900 m. All technical indicators meet the design requirements, providing theoretical reference for the design of mountain orchard transport machine.

**Keywords:** mountain orchards; monorail transport machine; electric; remote control

20 \* 基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-26)

## 0 引言

中国南方果园多分布在丘陵山地中,机械化运输能够有效提高生产效率、降低劳动强度<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着水果产业的快速发展,我国山地果园面积不断扩大,对劳动力的需求也逐步增加。而劳动力成本的快速上升,已成为制约水果产业发展的重要因素。此外,劳动力老龄化、女性化,也使水果采摘运输下山较为困难。为此,相关专业人士研制了山地果园链式循环货运索道<sup>[4-6]</sup>、钢丝绳牵引式双轨运输机<sup>[7-9]</sup>、自走式双轨道山地果园运输机<sup>[10]</sup>、遥控单轨运输机<sup>[11-12]</sup>、履带式运输车<sup>[13]</sup>和轮式运输车<sup>[14]</sup>等适合我国山地果园作业的运输装备。这些运输装备除运送农资物料和果品外,还可以搭载植保喷雾机、果枝修剪机、挖穴机等作业机具进行联合作业,有效提高了我国山地果园运输和管理作业的机械化水平。其中,山地果园自走式单轨运输机因具有轨道铺设灵活、成本低、安装操

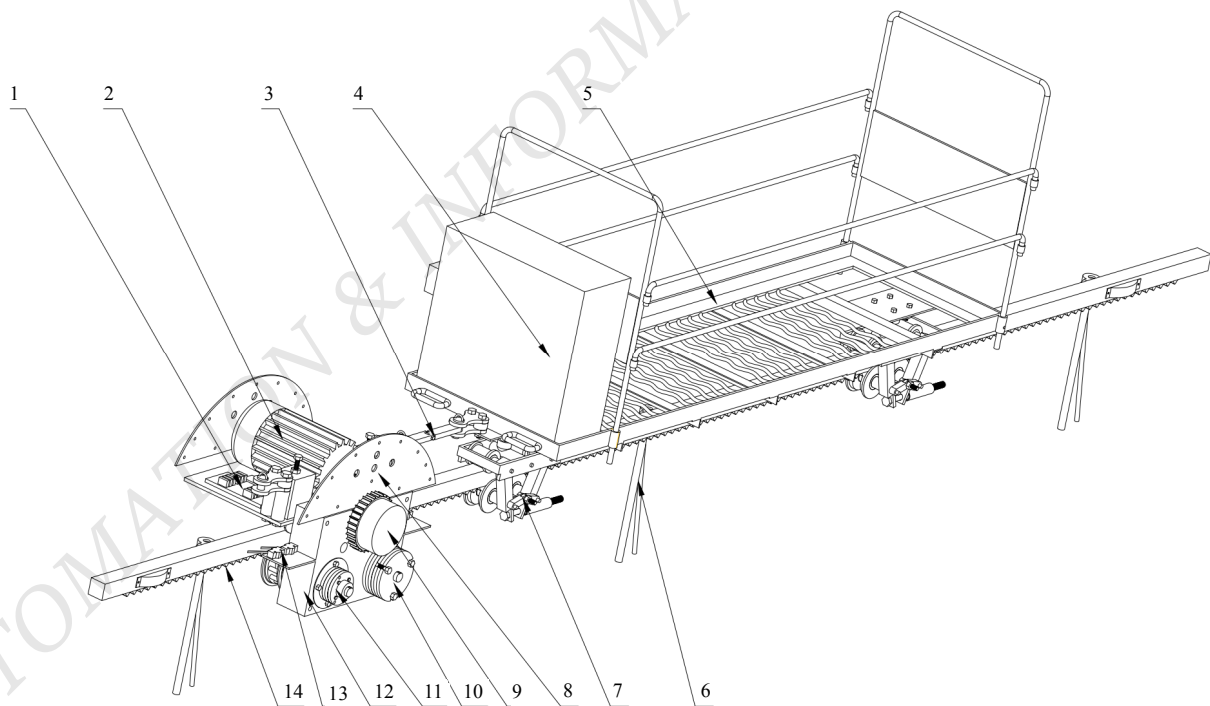
作简便、转弯半径小等特点而被广泛应用<sup>[15-17]</sup>。

现有的山地果园自走式单轨运输机主要以电动机或内燃机为动力源,传动系统主要利用蜗轮蜗杆减速机、链条或齿轮进行传动。采用蜗轮蜗杆减速机传动的山地果园自走式单轨运输机虽然可以实现下坡控速和自锁等功能,但在平地或上坡时,机械效率较低<sup>[15]</sup>。以内燃机为动力源的山地果园自走式单轨运输机对环境污染严重、运行噪声较大、自动控制设计与改造较复杂、维护难度大,难以推广应用。

为此,本文研制一款 7ZDGS-300 型山地果园自走式电动单轨运输机(以下简称单轨运输机),可实现无级调速、远程遥控、自动控制等功能,为山地果园运输装备的研制提供参考依据。

## 1 单轨运输机设计

单轨运输机主要由运输机、运输拖车和运输轨道等组成,其整体结构如图 1 所示。



1—控制器; 2—电动机; 3—连接机构; 4—电池箱; 5—运输拖车; 6—轨道支撑柱; 7—防侧翻装置; 8—手动控制面板;  
9—限速保护装置; 10—失电刹车器; 11—通电刹车器; 12—齿轮减速箱; 13—限位开关; 14—啮合齿节。

图 1 单轨运输机整体结构

运输机主要包括电动机、手动控制面板、控制

系统(见 2.3)、齿轮传动装置(见 2.4)、减振机

构（见 2.5）、限速保护装置（见 2.6）、限位停车装置（见 2.7）、失电刹车器、通电刹车器、限速器和驱动轮等，用于拖动或推动运输拖车。

运输拖车固定在防侧翻装置（见 2.8）的承重活动支架上，并通过连接机构与运输机连接。

运输轨道通过轨道支撑柱沿山坡架设，在运输轨道下侧面焊接啮合齿节。运输机和运输拖车通过驱动轮和夹紧轮等骑跨在运输轨道上方。

### 1.1 工作原理与设计目标

单轨运输机以蓄电池为动力源，通过控制系统控制其运行状态，电动机输出的动力通过齿轮传动装置传递给运输机的驱动轮，驱动轮与运输轨道齿节啮合带动运输机行驶。控制系统可接收手动控制面板和遥控器的远程控制信号，并根据接收的信号来控制电动机的启停、刹车器的制动和解除等操作。

根据山地果园的实际运输需求，单轨运输机的总体设计目标如下：

1) 适应丘陵山地的地形条件，具有良好的稳定性和通用性，能够实现上/下坡、直线和转弯路况下，任意点的前进、后退和停止；

2) 整体结构紧凑、经济性好、绿色环保，具备手动控制和远程遥控功能，远程遥控距离大于 650 m；

3) 山地果园一般建在坡度小于 25°的坡面上<sup>[18]</sup>。为满足山地果园的运输要求，爬坡角度需达到 35°，爬坡运载质量需达到 300 kg，平地行驶速度应大于 0.6 m/s。

### 1.2 主要技术参数

根据丘陵山地的作业要求，运输机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 运输机的主要技术参数

参数名称	数值
额定工作电压/V	48
电池容量/A·h	220
电动机额定功率/kW	3
平地行驶速度/m·s <sup>-1</sup>	≥0.6
爬坡角度/(°)	≥35
整机装备质量/kg	150

续表

参数名称	数值
爬坡运载质量/kg	≤300
远程遥控距离/m	650~900

## 2 关键技术解决方案

### 2.1 电动机选型

运输机在爬坡时，需要克服自身重力与摩擦力的作用。因此，当运输机以爬坡角度 35°，运载 300 kg 货物爬坡行驶时，所需的功率最大。运输机以  $\theta$  爬坡角度满载匀速爬坡时的受力分析如图 2 所示。

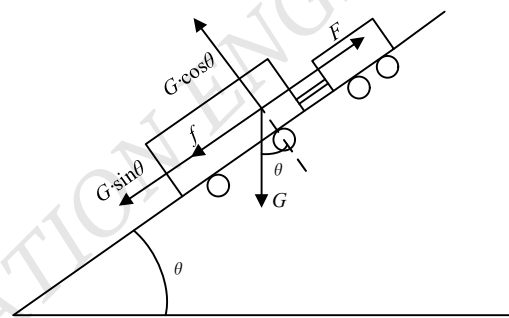


图 2 运输机以  $\theta$  爬坡角度满载匀速爬坡时的受力分析

运输机以  $\theta$  爬坡角度满载匀速爬坡时的牵引力为

$$F = \frac{Mg \cdot \sin \theta + \mu Mg \cdot \cos \theta}{k} \quad (1)$$

式中： $F$  为运输机爬坡时的牵引力，N； $M$  为运输机最大运载质量下的总质量，kg； $\theta$  为爬坡角度，(°)； $g$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $\mu$  为运输机与运输轨道之间的摩擦系数； $k$  为驱动轮的驱动效率。

设运输机最大运载质量下的总质量为 450 kg， $\theta$ 、 $g$ 、 $\mu$ 、 $k$  的值分别定义为 35°、9.8 m/s<sup>2</sup>、0.05、0.95。根据公式(1)，可计算出  $F = 2765$  N。

运输机匀速爬坡时所需的功率为

$$P = \frac{F \times v}{\eta} \quad (2)$$

式中： $P$  为电动机的输出功率，W； $v$  为运输机爬坡时的行驶速度，m/s，本文定义为 0.75 m/s； $\eta$  为 0.97。

根据公式(2)及  $F = 2765$  N，计算可得电动机的输

出功率  $P = 2\ 138\ \text{W}$ 。即当运输机以  $0.75\ \text{m/s}$  满载爬坡行驶时，电动机额定功率应大于  $2.138\ \text{kW}$ 。考虑到功率储备和极限工况的问题，最终选用额定功率为  $3\ \text{kW}$ 、额定工作电压为  $48\ \text{V}$ 、额定转速为  $1\ 500\ \text{r/min}$  的直流无刷电机作为运输机的动力驱动源。

### 2.2 蓄电池组选型

蓄电池组通过电池箱安装在运输拖车上。为满足运输机的供电需求，蓄电池组需具备高容量、大功率、大电流以及电池容量衰减减小等特性。通过理论计算，运输机爬坡行驶时的平均功耗约为  $2.1\ \text{kW}$ ，按照每天持续工作  $4\ \text{h}$  计算，所需的电能为  $8.4\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 。蓄电池的容量为  $8.4\ \text{kW}\cdot\text{h}/48\ \text{V} = 175\ \text{A}\cdot\text{h}$ 。综合考虑放电效率、电池容量衰减和电池重量等因素，本文选用两组额定电压为  $24\ \text{V}$ 、容量为  $220\ \text{A}\cdot\text{h}$  的锂电池串联组成运输机的供电电池。

### 2.3 控制系统

单轨运输机的控制系统由供电电路、限速保护电路和主控电路 3 大部分组成，主要包括  $48\ \text{V}$  锂电池组、电源转换模块、继电器控制执行模块、通电刹车

器、失电刹车器、限速器、离心开关、手动控制模块和远程控制模块等，其整体电气框图如图 3 所示。

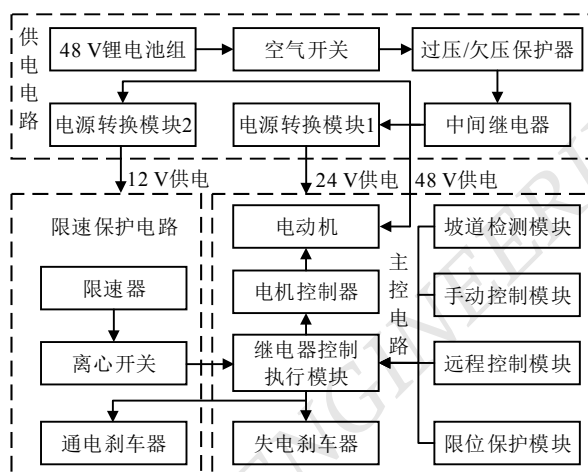


图 3 单轨运输机控制系统电气框图

控制系统采用模块化设计，除了通过手动控制模块和远程控制模块实现手动/远程遥控运输机的前进、后退和停止等基础功能外，还具有坡道检测、紧急制动、限速保护和限位自动停车保护等功能，控制系统流程图如图 4 所示。

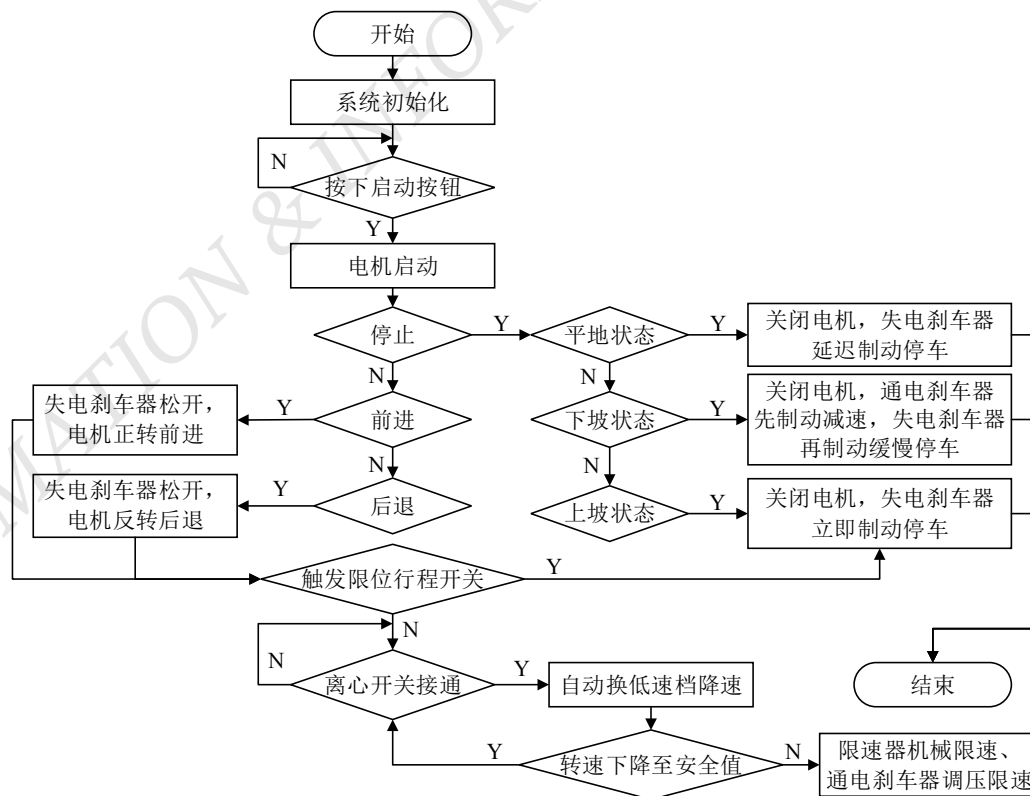
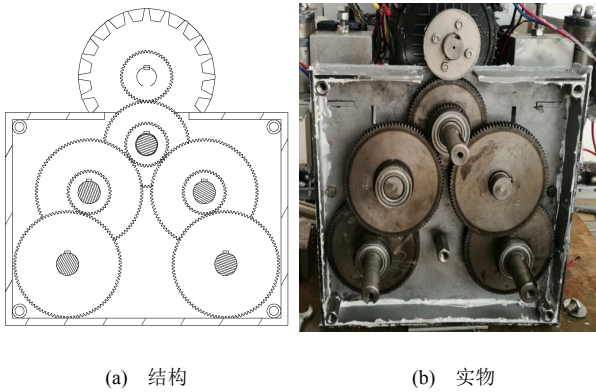


图 4 控制系统流程图

## 2.4 齿轮传动装置

针对传统蜗轮蜗杆减速机传动结构复杂、运行噪声大、稳定性差等问题,单轨运输机的齿轮传动装置采用华南农业大学自主研发的三级传动双轴输出设计,可有效增强驱动轮与运输轨道齿节啮合,使运输机在行驶过程中更加稳定。齿轮传动装置的结构和实物如图5所示。



(a) 结构 (b) 实物

图5 齿轮传动装置的结构和实物图

齿轮传动装置的传动比<sup>[19]</sup>为

$$i_1 = \frac{z_2}{z_1} \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{z_4}{z_3} \quad (4)$$

$$i_3 = \frac{z_6}{z_5} \quad (5)$$

$$i = i_1 \times i_2 \times i_3 \quad (6)$$

式中:  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  分别为一级、二级、三级齿轮组之间的传动比;  $i$  为总传动比;  $z_1=48$  为齿轮 1 的齿数,  $z_2=80$  为齿轮 2 的齿数,  $z_3=40$  为齿轮 3 的齿数,  $z_4=100$  为齿轮 4 的齿数,  $z_5=40$  为齿轮 5 的齿数,  $z_6=100$  为齿轮 6 的齿数。

将各级齿轮齿数  $z_1 \sim z_6$  代入公式(3)~(6), 计算得到  $i_1=1.667$ ,  $i_2=2.500$ ,  $i_3=2.500$ ,  $i=10.419$ 。

由运输轨道齿节的间距及驱动轮有效直径  $R=0.135$  m, 可得驱动轮的转速为

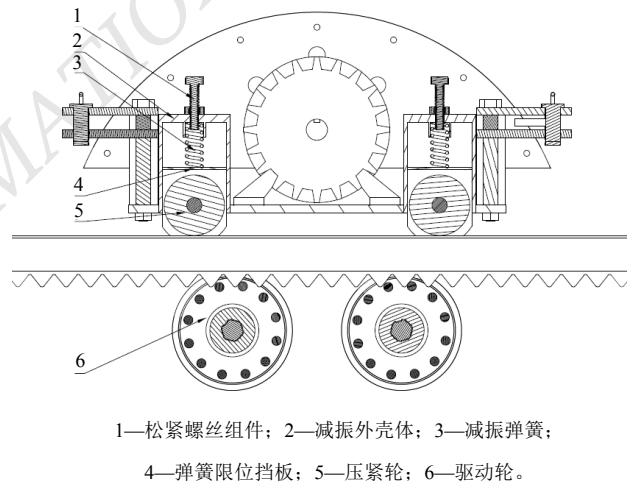
$$v = \frac{N \times \pi \times R}{60 \times i} \quad (7)$$

式中:  $N$  为电动机的额定转速,  $N=1500$  r/min。

根据公式(7)计算可得运输机驱动轮的转速约为 1 m/s, 即运输机的理论设计最高行驶速度为 1 m/s。

## 2.5 减振机构

运输机在运输轨道上行驶时, 受轮轨结构、啮合误差以及受载弹性变形等影响, 在轮轨啮合的过程中会产生啮合冲击振动<sup>[20]</sup>, 影响运输机的平稳性。为了减少啮合冲击导致的运输机振动, 本文设计了一款可根据实际需求装配不同减振弹簧的减振机构。减振机构主要由松紧螺丝组件、减振外壳体、减振弹簧、弹簧限位挡板、压紧轮和驱动轮等组成, 结构示意图如图6所示。



1—松紧螺丝组件; 2—减振外壳体; 3—减振弹簧;  
4—弹簧限位挡板; 5—压紧轮; 6—驱动轮。

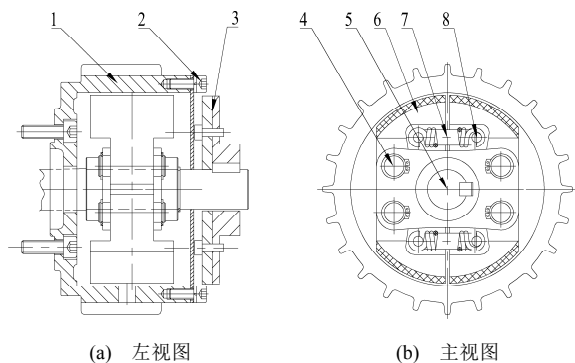
图6 减振机构结构示意图

减振外壳体与运输机底部的支撑钢板焊接固定, 压紧轮与驱动轮在减振弹簧的作用下, 将运输机夹紧并安装在运输轨道上方。该减振机构不仅有效降低了运输机在行驶过程中的振动, 还利用了压紧轮与驱动轮两侧轮缘的凸缘设计, 使其具有防侧翻功能。

## 2.6 限速保护装置

运输机在坡面行驶的过程中, 除了受电动机输出的动力和摩擦力作用外, 还受重力在坡面方向上的分力作用<sup>[19-20]</sup>。当运输机下坡行驶时, 由于齿轮传动装置没有自锁功能, 重力在坡面方向上的分力会使其加

速运行。为此,本文设计了限速保护装置,主要包括限速金属外壳体、固定螺柱、离心开关、刹车蹄块固定卡柱、限速器固定轴、刹车蹄块、离心弹簧、弹簧卡柱等,其结构示意图如图7所示。



1—限速金属外壳体; 2—固定螺柱; 3—离心开关; 4—刹车蹄块固定卡柱; 5—限速器固定轴; 6—刹车蹄块; 7—离心弹簧; 8—弹簧卡柱。

图7 限速保护装置结构示意图

当运输机下坡行驶速度超过设定的安全值时,安装在运输机输出轴上的离心开关会在离心力的作用下甩开接通,并向控制系统发送限速信号,启动限速保护装置。限速保护装置通过调节电动机驱动器自动切换低速挡来减速;若速度仍然持续加快,限速器则通过刹车蹄块和限速金属外壳体进行机械摩擦限速,并接通通电刹车器来调压限速,确保运输机在满载下坡的过程中能够稳定控制速度。当运输机行驶速度恢复到安全范围后,解除上述限速保护措施,运输机恢复正常的行驶状态,从而解决了单轨运输机下坡行驶时的飞车问题。

## 2.7 限位停车装置

为防止运输机在运输轨道始末端脱轨<sup>[13]</sup>,本文设计了一款限位停车装置。该装置主要包括限位行程开关、限位触板等,结构示意图如图8所示。

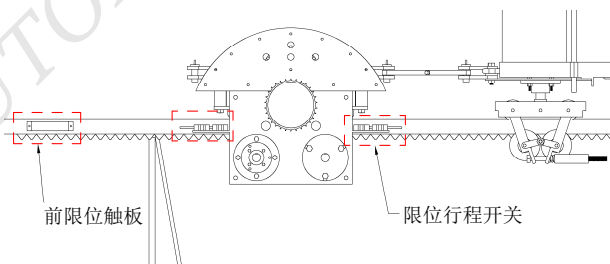
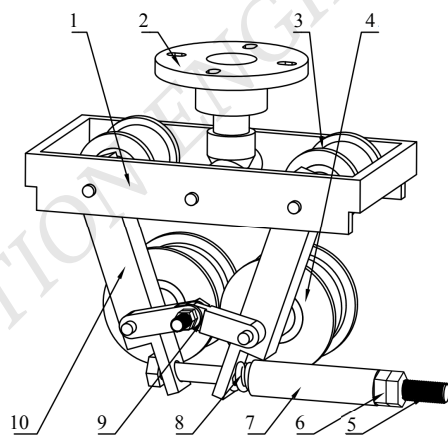


图8 限位停车装置结构示意图

当运输机行驶到运输轨道始末端时,限位行程开关触碰到限位触板,限位行程开关闭合并向控制系统发送停车信号;控制系统控制限位行程开关继电器自锁,运输机停止行驶且不能再次启动前行,只允许反方向行驶,以防止运输机在始末两端冲出运输轨道,从而实现自动停车功能。

## 2.8 防侧翻装置

防侧翻装置由行走支架、承重活动支架、承重轮、夹紧轮、调节螺杆、弹簧安装筒、张紧弹簧、限位活动连杆和自由连杆等组成,结构示意图如图9所示。



1—行走支架; 2—承重活动支架; 3—承重轮; 4—夹紧轮;  
5—调节螺杆; 6—调节螺母; 7—弹簧安装筒; 8—张紧弹簧;  
9—限位活动连杆; 10—自由连杆。

图9 防侧翻装置结构示意图

承重轮通过对应的支撑轴与行走支架连接,支撑轴上铰接2个自由连杆;2个夹紧轮分别通过支撑轴对应连接在自由连杆的下端部;限位活动连杆通过自由连杆连接2个夹紧轮,用于限制2个夹紧轮间的最大张开距离,防止承重轮和夹紧轮在夹紧运输轨道时因间隙过大而发生侧翻。张紧弹簧安装在弹簧安装筒内,调节螺杆串接穿过张紧弹簧和弹簧安装筒,利用调节螺母将张紧弹簧和弹簧安装筒装配在一起,通过调节螺母调整弹簧安装筒内张紧弹簧的伸缩量,以实现弹簧弹力的调节,进而根据实际需求调整承重轮和夹紧轮夹紧运输轨道的间隙。

夹紧轮贴合在运输轨道下端,并沿着运输轨道滚动行驶。承重轮和夹紧轮两侧轮缘均采用凸缘设计,

可防止运输机因受力不均或超重而发生侧翻。此外，运输拖车固定安装在承重活动支架上，该支架能够前后摆动和沿水平面旋转，从而增加运输拖车的灵活性，有效地解决了运输机转向不灵活的问题。

### 3 单轨运输机试验与分析

#### 3.1 试验条件和设备

在华南农业大学的山地果园运输装备试验场进行单轨运输机的整机性能测试。该试验场设有果园平地、转弯和上下坡等代表性运输轨道，轨道总长度约为 135 m，测试坡段的长度约为 18 m，最大坡度为 36.5°，如图 10 所示。



图 10 山地果园运送装备试验场

利用标准砝码进行运载质量试验，单个砝码质量为 25 kg，运输机的运载质量范围为 0~300 kg。试验按照每次 50 kg 递增（0、50、100、150、200、250 和 300 kg，0 kg 时定义为空载，300 kg 时定义为满载），测试了 7 种运载质量下运输机的性能。每次试验时确保蓄电池组充满电量。测试设备包括运输机、数显倾角仪、库仑计、电子秒表、卷尺、砝码等。

#### 3.2 行驶速度测试

利用卷尺测量运输轨道的长度，电子秒表测量运输机行驶的时间，根据公式  $v=s/t$  计算运输机的行驶速度。运输机搭载不同质量的砝码在平地、上坡和下坡等路况下行驶，在不同运载质量下分别测试 10 次，由公式  $v_0=\sum v/n$  计算其平均速度，取 10 次测试数据的平均值作为最终测试结果。运输机在不同运载质量

下的行驶速度测试数据如表 2 所示。

表 2 运输机在不同运载质量下的行驶速度测试数据

运载质量/kg	行驶速度/m·s <sup>-1</sup>		
	平地	上坡	下坡
0	0.94	0.85	0.94
50	0.94	0.84	0.95
100	0.94	0.82	0.97
150	0.93	0.80	0.99
200	0.93	0.79	1.06
250	0.93	0.77	1.13
300	0.92	0.73	1.18
$R^2$	0.844 6	0.964 3	0.921 6

由表 2 可知：运输机运载质量为 0~300 kg，且在平地（爬坡角度为 1.8°~2.9°）行驶时，行驶速度基本稳定在 0.93 m/s， $R^2$  为 0.844 6，表明运输机平地行驶速度受运载质量的影响较小；运输机运载质量为 0~300 kg，且爬坡行驶时，行驶速度在 0.73~0.85 m/s， $R^2$  为 0.964 3，表明运输机爬坡行驶速度受运载质量的影响较大；运输机下坡行驶时，随着运载质量的增加，运输机行驶速度逐渐加快，但在限速保护装置的作用下，其行驶速度能够确保在安全范围内。

#### 3.3 远程遥控性能测试

在从化某柑橘园对运输机的远程遥控性能进行测试，包括远程遥控距离测试和通信稳定性测试。其中，通信稳定性测试是在远程遥控距离测试的过程中同步完成的，即通过在不同远程遥控距离条件下的通信成功率，评估遥控器的通信稳定性。遥控器通信成功率计算公式为

$$K = \frac{\sum T_i}{\sum T_i + \sum T_f} \quad (8)$$

式中： $K$  为遥控器的通信成功率，%； $\sum T_i$  为遥控器通信成功的次数； $\sum T_f$  为遥控器通信失败的次数。

本文对大功率无线遥控器 KGS-D24-4000 进行测试，如图 11 所示。当遥控器发出信号后，若接收器对应的指示灯闪烁，则表示其成功接收到控制信号。远程遥控有效距离通过手机卫星地图进行定位测量，

定位精度为 3~5 m<sup>[21]</sup>。



图 11 大功率无线遥控器 KGS-D24-4000 测试

影响远程遥控距离的主要因素包括果园的植被密度、植被高度、山体坡度和遥控天线是否拔出等。从化某柑橘园每公顷柑橘树的种植量为 1 000~1 100 株，果园坡度为 10°~15°，柑橘树的平均高度约为 3 m。参照运输轨道铺设的高度和运输机的安装高度，遥控器的接收器安装高度约为 1 m。在有无山体遮挡和遥控器天线是否拔出的状态下进行远程遥控距离测试和通信稳定性测试，每个测试点的直线距离为 25 m，通信次数为 10 次，测试结果如表 3 所示。

表 3 运输机远程遥控距离和通信稳定性测试结果

有无 山体 遮挡	植被密度/ (株/公顷)	接收 器高 度/m	天线 是否 拔出	有效 距离/m	通信 成功 次数	通信 失败 次数
无	1 000~1 100	1	否	650	10	0
				675	6	4
			是	900	10	0
				925	8	2
有	1 000~1 100	1	否	300	10	0
				325	2	8
			是	425	10	0
				450	9	1

由表 3 可知：当无山体遮挡且遥控器天线未拔出时，遥控器的远程稳定遥控距离可达到 650 m，当遥控距离增加到 675 m 时，遥控器的通信成功率下降至 60%；当无山体遮挡且遥控器天线已拔出时，遥控器的远程稳定遥控距离可达到 900 m，当遥控距离增加到 925 m 时，遥控器的通信成功率下降至 80%，

表明在无山体遮挡情况下，遥控器天线是否拔出时的遥控距离相差约 250 m，远程遥控距离受遥控天线是否拔出影响较大。

当有山体遮挡且遥控器天线未拔出时，遥控器的远程稳定遥控距离仅为 300 m，当遥控距离增加到 325 m 时，遥控器的通信成功率下降至 20%；当有山体遮挡且遥控器天线已拔出时，遥控器的远程稳定遥控距离可达到 425 m，当遥控距离增加到 450 m 时，遥控器的通信成功率下降至 90%，表明在遥控器天线拔出的情况下，有无山体遮挡的遥控距离相差约 475 m，山体遮挡严重影响了遥控器的遥控距离。

在通信稳定性测试过程中，若 10 次通信中有失败的情况出现，则判定为通信不稳定。通过测试可知，该遥控器在无山体遮挡且遥控器天线拔出时，远程稳定遥控距离可达 900 m，满足运输机遥控器无线通信的需求。

### 3.4 续航能力测试

为了尽可能地模拟运输机在丘陵山地行驶的真实状态，在山地果园运输装备试验场选择运输轨道长度为 15 m（上坡和下坡各 7.5 m），坡度为 36.5° 的坡段进行续航能力测试。

试验使用的蓄电池组为 48V/220 A·h。试验前先将蓄电池组充满电量，电池容量记为 100%，再将 300 kg 的砝码装载在运输机上，让其不间断地在测试坡段来回行驶，直到电池容量降至 20%。运输机能耗测试结果如表 4 所示。

表 4 运输机能耗测试结果

参数名称	数值
第 1~10 次运行能耗/W·h	78.40
第 11~20 次运行能耗/W·h	78.60
第 21~30 次运行能耗/W·h	78.90
第 31~40 次运行能耗/W·h	78.60
第 41~50 次运行能耗/W·h	78.50
第 51~60 次运行能耗/W·h	78.70
每运行 10 次平均能耗/W·h	78.62
续航总时长/h	5.20

由表 4 可知，蓄电池组在满电的状态下续航时间可达 5 h 以上，能够满足无电网覆盖下山地果园的运



输需求。

## 4 结论

本文研制了单轨运输机,并对其主要技术参数进行试验,得出以下结论:

1) 运输机操作简单、控制灵活,具备手动和遥控 2 种控制方式,可实现前进、后退、停止 3 种状态的任意切换;

2) 运输机的最大爬坡角度为  $36.5^\circ$ ,平地最大行驶速度为  $0.94\text{ m/s}$ ,最大爬坡运载质量为  $300\text{ kg}$ ,遥控器的有效遥控距离可达  $900\text{ m}$ ,均满足设计要求;

3) 运输机在运载质量为  $0\sim 300\text{ kg}$ ,且平地 and 爬坡行驶时, $R^2$  分别为  $0.844\ 6$  和  $0.964\ 3$ ,说明运输机在平地行驶时,速度受运载质量的影响较小,而在爬坡行驶时,速度受运载质量的影响较大;

4) 运输机使用蓄电池组供电,续航时间可达  $5\text{ h}$  以上,能够满足山地果园的实际应用需求,解决了无电网覆盖山地果园的稳定运输问题。

针对山地果园无电网覆盖情况下运输机长期稳定运行的难题,可进一步研究运输机在下坡行驶过程中的稳定控速技术和动能回收系统,以提升运输机的续航时间和能源效率。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## 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.
- [2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
- [3] 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.

## 作者简介:

李波,男,1980年生,大专,工程师,主要研究方向:丘陵山地农业机械与装备。E-mail: gd4011b@163.com

易远飞,男,1994年生,硕士研究生,助教,主要研究方向:丘陵山地农机装备及智能信息化。E-mail: 582472405@qq.com

李文理,男,1999年生,硕士研究生,主要研究方向:山地果园机械。E-mail: 2547827317@qq.com

李震(通信作者),男,1981年生,博士研究生,教授,博导,主要研究方向:智能农机装备。E-mail: lizhen@scau.edu.cn

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 文韬,洪添胜,朱余清,等.山地果园索道张紧调节自动控制装置的设计[J].农业工程学报,2011,27(6):128-131.
- [7] 李震,卢加纳,洪添胜,等.山地果园钢丝绳牵引货运机超声波避障系统[J].农业机械学报,2011,42(10):116-120.
- [8] 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.
- [9] 胡文武,吴帆,蒋蕻,等.果园电动双轨运输机启停控制的研究与试验[J].河南农业大学学报,2021,55(1):73-79.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘易,池旭彬,颜少华,等.山地果园电动单轨运输机远程遥控系统设计[J].现代农业装备,2018,39(4):43-49.
- [13] 刘佛良,张震邦,杨晓彬,等.山地果园双履带微型运输车的设计、仿真与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(4):15-23.
- [14] 吴伟斌,韩重阳,梁荣轩,等.基于轮毂电机驱动的山地林果茶园轮式运输车设计与试验[J].华中农业大学学报,2021,40(3):286-294.
- [15] 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.
- [16] 李震,洪添胜,吕石磊,等.山地果园自走式电动单轨运输装备的研究进展[J].现代农业装备,2020,41(4):2-9.
- [17] 陈银清,洪添胜,孙同彪.山地果园单轨货运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(S1):50-56.
- [18] 吴伟斌,赵奔,朱余清,等.丘陵山地果园运输机的研究进展[J].华中农业大学学报,2013,32(4):135-142.
- [19] 林传华,廖俊必,严霜,等.一种高效自锁双传动链机构设计[J].起重运输机械,2009(9):28-30.
- [20] 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.
- [21] 孙梦飞.基于智能手机的GPS/Galileo双频定位研究[D].长春:吉林大学,2020.