

# 增程式山地果园电动运输车动力系统设计与试验

吴伟斌<sup>1,2</sup> 杨晓彬<sup>2</sup> 张震邦<sup>2</sup> 刘佛良<sup>2</sup>  
李泽艺<sup>2</sup> 冯运琳<sup>2</sup> 陈理<sup>2</sup> 周钊杰<sup>2</sup>

1. 国家柑橘产业技术体系机械研究室/广东省山地果园机械创新工程技术研究中心/  
广州市农情信息监测工程技术研究中心/广东省农情信息获取与应用重点实验室, 广州 510642;  
2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642

**摘要** 在山地果园电动运输车基础上设计一套增程式动力系统, 并利用 Advisor 进行仿真。根据最大载荷 240 kg、最大爬坡度 15° 和最高速度 9 km/h 的设计要求, 为运输车选取容量为 120 A·h, 总电压为 60 V 的铅酸蓄电池组作为动力电池, 以 5 kW 增程器作为辅助动力源。增程模式下运输车载荷 240 kg 时的续航里程为 52.2 km, 相比纯电动模式的续航里程延长了 217.5%, 续航能力得到显著提高。

**关键词** 山地果园; 运输车; 增程式; 动力系统; 续航里程

**中图分类号** S 229<sup>+</sup>.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)04-0001-06

随着我国南方山地果园种植规模的扩大, 对山地果园运输车的续航能力提出了更高的要求。在纯电动运输车基础上设计一套增程式动力系统可以很好解决纯电动山地果园运输车在工作时因电量低而导致动力不足以及电池容量有限和续航里程短等问题<sup>[1-4]</sup>。增程式运输车采用附加汽油发电机作为辅助动力源, 其能量经过二次转化, 燃烧效率较低, 设计时应以蓄电池作为主动力源。该设计满足基本行驶要求的同时对增程器的控制进行优化, 使得增程器只在蓄电池 SOC 低于预设的下限值时运转, 保证整体最佳动力输出和最低的燃油消耗<sup>[5-10]</sup>。

目前, 增程式混合动力乘用车的参数检测和控制策略在理论上发展比较成熟, 但农用山地果园运输车和乘用车在价格和实际使用上存在较大差异, 使得运输车电池和轿车电池有较大差异, 两者电池的结构及工作原理不尽相同。电动轿车使用的蓄电池一般以能量密度高的锂电池为主, 价格昂贵, 需要一套复杂的电池保护装置, 因此, 对普通农户而言, 价格也很难接受。根据山地果园运输车的特殊工作条件, 设计一种山地果园电动运输车增程式动力系统, 保证山地果园运输车有足够的动力和续航里程, 同时能够尽量减少增程器的使用以及提高发

动机燃烧效率, 成为增程式山地果园运输车亟待解决的问题。本研究根据山地果园运输车的使用功耗和动力需求, 为山地果园运输车设计了一套能满足农户日常使用需求的增程式动力系统。该系统提高了运输车的动力性和续航能力, 为山地果园运输车的大规模应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 运输车结构参数确定

山地果园运输车主要在坡度为 0°~15° 且坑洼不平的山地环境工作。山地果园的运输环境要求运输车具备速度低、动力足和爬坡能力强的特点。本研究以华南农业大学与石家庄鑫农机械有限公司研发的山地果园运输车为研究对象(图 1), 样车参数为: 车速 0~9 km/h, 空载质量 960 kg, 最大载荷 240 kg, 长、宽、高分别为 1 690 mm×1 170 mm×300 mm, 最大爬坡度 15°, 最小转弯半径 2.74 m, 前、后轴距分别为 870、955 mm。

1) 纯电动模式续航里程估算。以惠州市龙门县益农果园为例, 该果园种植面积约为 6.67 hm<sup>2</sup>。果树的株距通常为 3~4 m。为方便计算, 假设 1 hm<sup>2</sup> 土地是一个 100 m×100 m 的方形地块。据果农介

收稿日期: 2017-08-31

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项合作研究任务(201403036); 广东省现代农业产业技术体系创新团队—茶叶产业创新团队设施与机械化岗位专家(2017LM1093); “十二五”农村领域国家科技计划课题研究子任务(2014BAD16B0103); “扬帆计划”引进创新创业团队专项(201312G06); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27); 广东省省级科技计划项目(2017A020208045)

吴伟斌, 博士, 教授。研究方向: 信息技术与机电一体化应用。E-mail: wuweibin@scau.edu.cn

绍,每公顷土地约种植 960 棵树。图 2 为运输车参考工作路线,以此估算运输车纯电动模式的续航里程。运输车在  $0.067 \text{ hm}^2$  果园中行驶距离  $S_1$  可估算为: $S_1=6 \times 3 \text{ m} + 7 \times 25.8 \text{ m}=198.6 \text{ m}$ 。若以每公顷果园行驶 3 000 m 计算,在  $6.67 \text{ hm}^2$  果园里工作,运输车总行驶距离  $S_2$  约为: $S_2=6.67 \times 3\ 000=20\ 000 \text{ m}$ 。考虑到运输途中的往返距离,在 20 000 m 的基础上增加 4 km 的来回距离,则可估算出运输车纯电动模式下的续航里程约为 24 km。



图 1 试验运输车

Fig.1 Transport cart for testing

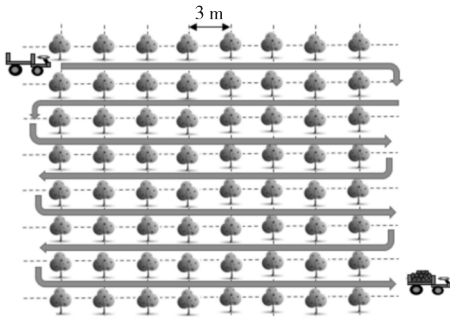


图 2 运输车工作路线示意图

Fig.2 Diagram of transporter's working route

2) 运输车行驶阻力分析。确定运输车的动力性,就是确定运输车沿行驶方向的动力学特性<sup>[14]</sup>。因此,需要对运输车运行时作用在运输车上的各种力进行分析,包括驱动运输车行驶的驱动力  $F_i$  和阻碍运输车的行驶阻力。行驶阻力通常包括加速阻力  $F_j$ 、爬坡阻力  $F_i$ 、空气阻力  $F_w$  和滚动阻力  $F_f$ 。由车辆行驶平衡方程式可知

$$F_i = F_f + F_j + F_w + F_i \quad (1)$$

由于运输车最高行驶速度 ( $v_{\max} < 10 \text{ km/h}$ ) 比较低,可以忽略空气阻力和加速阻力的影响。即运输车行驶所需驱动力约等于道路行驶阻力  $F_\psi$ :

$$F_\psi = F_i + F_f = mg \sin \alpha + mg f \cos \alpha \quad (2)$$

则电机所提供的驱动功率为:

$$P_e = F_\psi v / \eta_t \quad (3)$$

其中,  $F_i$  为行驶驱动力;  $F_\psi$  为道路阻力;  $F_i$  为

坡度阻力;  $F_f$  为滚动阻力;  $m$  为满载质量,取 1 200 kg;  $f$  为滚动阻力系数取 0.05;  $\alpha$  为坡度,平地取  $0^\circ$ ,最大坡度取  $15^\circ$ ;  $\eta_t$  为传动效率,取 0.86;  $v$  为行驶速度,  $15^\circ$  坡爬坡速度取 3.5 km/h,平地最高车速取 9 km/h。

由式(2)和(3)可得运输车在平地满载运行时,所需驱动力约为 588 N,所需电机驱动功率约为 1.7 kW;在满载爬  $15^\circ$  斜坡时,所需运输车的驱动力约为 3 611.68 N,所需电机提供功率约为 4.1 kW。

3) 电池和电机选型。对运输车在指定工况(满载,  $v=9 \text{ km/h}$ ) 下进行分析,由于运输车平地满载工况下所需驱动功率约为 1.7 kW,根据 24 km 行驶里程要求,持续工作时间约为 2.7 h,需要电池能量为 4.6 kW·h。

铅酸蓄电池价格低廉,可短时间大电流放电,适合应用在山地果园运输车上。因此,运输车采用 5 个铅酸蓄电池串联连接,电池的总电压为 60 V,电池的总容量为 120 A·h,总能量约为 7.2 kW·h。但考虑到铅酸蓄电池容易老化,导致真正能利用的化学能低于额定容量,同时为了保护电池,预计电池放电 70% 后启动增程器,则电池可利用能量约为 5.04 kW·h。

运输车满载平地行驶所需功率约为 1.7 kW,爬坡时最大功率约为 4.1 kW。与后者相比,电机的峰值功率约为额定功率的 2~3 倍,为了满足运输车负载爬坡的功率要求并确保电机的工作效率,同时考虑极端坡度  $15^\circ$  坡比较少,主要为  $4^\circ \sim 8^\circ$  坡,故选取额定功率为 2.2 kW/60 V 的电机<sup>[15]</sup>。

4) 传动系结构布置。山地果园运输车为农用车,要求制造成本低,并且结构简单易于维护,故本传动系选用串联式结构布置,选用最大功率为 5 kW 的化油器式增程器。动力系统如图 3 所示,增程器发动机工作不受传动系统影响,相对汽油运输车工作更稳定,燃烧效率相对较高。

## 1.2 Advisor 仿真测试设计参数

根据山地果园运输车的行驶需求,确定运输车最大行驶速度为 9 km/h,最大载荷为 240 kg,运输车满载质量为 1 200 kg。电机额定功率为 2.2 kW。基于 MATLAB/Simulink 模块中的 Advisor 模块,在 ECE-EUDC 工况下进行运输车的性能仿真<sup>[16]</sup>。

在爬坡工况下忽略加速阻力,行驶方程式可表示为

$$F_i = F_i - (F_f + F_w) \quad (4)$$

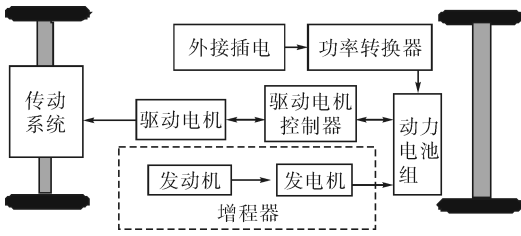


图 3 动力系统结构图

Fig.3 Structure diagram of driving system

$$mgs\sin\alpha = \frac{T_t}{r} - mgf\sin\alpha - \frac{CDA\rho u^2}{2} \quad (5)$$

由汽车理论可知,表征车辆动力性能的动力因数  $D$  可由下面公式求得:

$$D = \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} + i + f \quad (6)$$

平地测试时,由  $i = 0$ ,此时式(6)可表示为

$$D = \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} + f \quad (7)$$

爬坡能力测试时,由  $du/dt = 0$ ,此时式(6)可表示为

$$D = f \cos\alpha + \sin\alpha \quad (8)$$

由此得到关系式

$$\sin\alpha + f \cos\alpha = \frac{\delta}{g} \frac{du}{dt} + f \quad (9)$$

推导此公式(9),可得爬坡度  $\alpha$  的计算公式

$$\alpha = \frac{f + j \frac{\delta}{g} - f \sqrt{1 - 2f \frac{\delta}{g} - j \left(\frac{\delta}{g}\right)^2}}{1 + f^2} \quad (10)$$

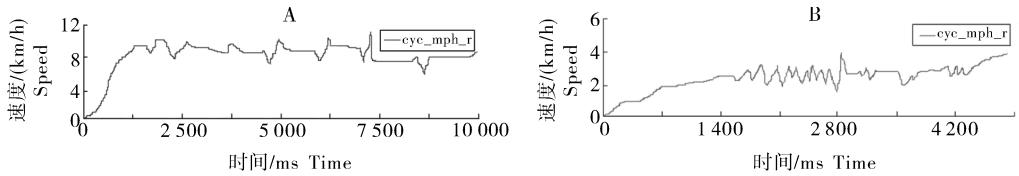
分别对 60、120、240 kg 3 种不同载荷进行理论爬坡度计算,结果如表 1。

表 1 爬坡仿真参数

Table 1 Diagram of climbing simulation parameters

载荷/kg Load	旋转质量换算系数 Rotary mass conversion coefficient	滚动阻力系数 Coefficient of rolling resistance	爬坡度/(°) Slope
60	1.5	0.1	15.7
120	1.5	0.1	15.5
240	1.5	0.1	15.4

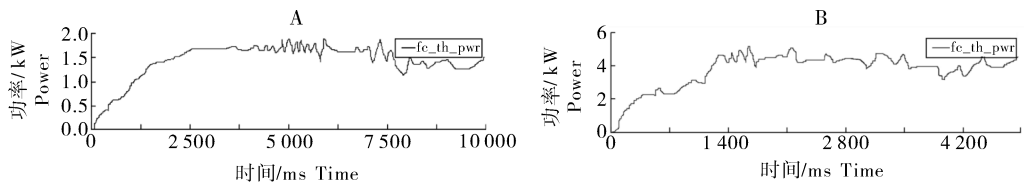
在  $0^\circ$  和  $15^\circ$  坡度以 60、120、240 kg 3 种不同载荷分别进行仿真测试。爬坡仿真、速度仿真和功率仿真分析结果如图 4 和图 5 所示。



A:  $0^\circ$  坡度速度仿真曲线图 Velocity simulation curve in  $0^\circ$ ; B:  $15^\circ$  坡度速度仿真曲线图 Velocity simulation curve in  $15^\circ$ 。

图 4 速度仿真曲线图

Fig.4 Curve photograph of speed simulation



A:  $0^\circ$  坡度功率仿真曲线图 Power simulation curve in  $0^\circ$ ; B:  $15^\circ$  坡度功率仿真曲线图 Power simulation curve in  $15^\circ$ 。

图 5 功率仿真曲线图

Fig.5 Curve photograph of power simulation

从图 4 可知,在纯电动模式下和平地满载工况下的最高速度为  $8 \sim 10$  km/h,这与设计目标基本一致。运输车在斜坡行驶速度为  $2 \sim 4$  km/h。从图 5 可知,运输车在平地时所需驱动功率为  $1.5 \sim 2$  kW,峰值主要出现在  $1.8$  kW,与理论计算值基本一致。运输车斜坡行驶时,功率为  $3.8 \sim 4.5$  kW。

## 2 结果与分析

### 2.1 爬坡能力测试

满载爬坡能力是运输车动力性能的一个重要评价指标。分别对运输车进行纯电动模式和增程模式下的爬坡测试,选择平地 and  $15^\circ$  坡进行 240 kg 载荷爬坡测试,如图 6 所示。电池组、电机和增程器工作时的电流电压参数可以直接反映运输车的性能,因

此,对电流电压进行实时测量。试验中使用上海小龙库仑仪 XL 测量电参数,该仪器可以实时记录运输车电流、电压、功率和能耗等,并且通过蓝牙发射给移动电话和计算机接收。通过双轴数显水平仪 DXL360 选取试验坡度。选取 15°坡作为试验地点,选取 30 kg 的水桶作为试验载荷,2 个为 60 kg,4 个为 120 kg,8 个为 240 kg。



图 6 斜坡测试现场图

Fig.6 Slope testing field

为了保证试验数据的精确性,对每组数据进行 6 次重复性试验,求出标准误,用于表示各数据间的差异程度,如式(11)计算所示:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - u)^2} \quad (11)$$

由表 2 可知,在纯电动模式下爬坡时,测得电流波动幅度为 0.4 A,电池平均输出电流为 70.5 A,与电机平均电流 70.3 A 接近;电压波动幅度为 0.8 V,电池平均电压为 55.6 V,可得爬坡时电池输出功率约为 3.92 kW。电机工作电流接近额定电流的 2 倍,处于极限工作,同时电池输出电流过大,对电池寿命有影响。但电机工作功率约为 3.88 kW。相比理论计算值 4.1 kW,降低了 5%,在正常工作范围。

在纯电动模式下平地行驶时,测得电池输出电流波动幅度为在 2.2 A,平均电流为 24.8 A,与电机电流 24.6 A 接近。电池端电压平均值为 62.4 V,波动幅度为 0.5 V。电池输出功率约为 1.55 kW,电机功率约为 1.53 kW,为原来理论值 1.7 kW 的 90%。电机功率略小于额定电流,故电机接近高效率工作点。通过试验可知,电机选型符合工作要求。

表 2 纯电动模式下的电压和电流

Table 2 Measurement of voltage and current in electric mode

编号 Number	斜坡 15° Slope 15°				平地 0° Flatland			
	电机 Electric motor		电池 Battery		电机 Electric motor		电池 Battery	
	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A
1	55.6	70.5	55.7	70.5	62.1	24.6	62.5	24.7
2	55.2	70.1	55.6	70.6	61.2	24.7	62.3	24.9
3	55.1	70.1	55.9	70.4	62.6	23.4	62.1	23.7
4	54.1	70.3	55.8	70.5	62.3	25.7	62.4	25.9
5	55.5	70.5	55.6	70.7	62.3	24.6	62.5	24.8
6	55.5	70.1	55.1	70.7	62.1	24.4	62.6	24.6
平均值 Average	55.2	70.3	55.6	70.3	62.2	24.6	62.4	24.8
标准差 Standard deviation	0.509	0.180	0.254	0.111	0.436	0.670	0.163	0.642

由表 3 可知,在增程器运转情况下,爬坡时电机平均电流为 68.6 A,平均电压为 60.3 V,功率约为 4.14 kW;增程器的平均电流为 43.7 A,平均电压为 60.9 V,功率约为 2.67 kW;蓄电池的平均电压为 60.6 V,平均电流为 24.9 A,功率约为 1.51 kW,相比平地时的  $U/I$  值 64.1 V/16.5 A 左右,电压降低了 4 V 左右,说明此时增程器输出的功率一部分用来驱动电机转动,另一部分为蓄电池充电。而电机电流为 68.6 A,蓄电池电流为 24.9 A,可见在爬坡时,蓄电池仅提供电机所需功率的 36%,这可以在需要大功率时降低对蓄电池容量的需求。在增程模式下,蓄电池和增程器的功率之和约为电机的功率,增程器提供了 64%的电机所需功率,蓄电池仅提供电机所需功率的 36%,这对运输车在爬坡时作

用尤为重要,可防止蓄电池因为电量不足而无法爬坡,或者因为放电电流过大而影响蓄电池寿命。

## 2.2 续航里程测试

对运输车在增程模式下的续航里程进行测试,选择平地满载 240 kg 工况下以最高车速行驶。试验通过非接触式光感五轮仪记录行驶距离和速度等。由库仑仪记录蓄电池和增程器电量变化过程,测试地点为华南农业大学。以增程器 0.5 L 汽油记录 1 次读数,直至油箱 5.0 L 汽油消耗完(表 4)。由表 4 可知,运输车在增程模式下消耗 5 L 油可行驶约 41.3 km,相比理论分析的 57 km,续航里程缩短了 27.5%,这主要是因为增程器发出的部分电量用于电池充电。由平地满载电机功率约为 1.55 kW,故电池在增程模式过程中的充电量可供运输车

表 3 增程模式下的电压和电流

Table 3 Measurement of voltage and current in extending mode

编号 Number	斜坡 15° Slope 15°						平地 0° Flatland					
	电池 Battery		电机 Electric motor		增程器 Range-extender		电池 Battery		电机 Electric motor		增程器 Range-extender	
	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A	U/V	I/A
1	60.7	25.3	60.4	68.6	60.9	43.3	63.9	-16.5	63.7	24.8	64.3	41.3
2	60.8	24.9	60.5	68.4	61.2	44.5	63.9	-16.3	63.6	24.4	64.3	40.7
3	60.6	24.4	60.3	68.5	60.8	44.1	64.3	-16.4	64.0	24.7	64.6	41.1
4	60.3	25.2	60.1	68.7	60.7	43.5	64.2	-16.6	63.9	24.6	64.6	41.2
5	60.6	24.5	60.3	68.7	60.9	44.2	64.1	-16.8	63.7	25.1	64.5	41.9
6	60.4	25.3	60.1	68.6	60.9	43.3	63.9	-16.1	63.6	25.4	64.2	41.5
平均值 Average	60.6	24.9	60.3	68.6	60.9	43.8	64.1	-16.5	63.8	24.8	64.4	41.3
标准差 Standard deviation	0.170	0.368	0.146	0.107	0.153	0.471	0.161	0.222	0.150	0.330	0.157	0.367

表 4 增程模式下的续航里程

Table 4 Cruising mileage measurement of extending mode

编号 Number	汽油量/L Residual gasoline	续航里程/m Extension mileage	汽油量差值/L Gasoline consumption	电机电量/(W·h) Motor consumption power	增程器电量/(W·h) Output power of the extender	电池容量/ (W·h) SOC
1	5.0	0	0	0	0	0
2	4.5	4 192	0.5	705.2	1 062.1	282.4
3	4.0	4 156	0.5	703.5	1 059.8	281.6
4	3.5	4 221	0.5	704.3	1 061.1	281.9
5	3.0	4 173	0.5	704.8	1 058.6	282.1
6	2.5	4 204	0.5	705.9	1 060.7	282.7
7	2.0	4 139	0.5	703.0	1 057.8	281.2
8	1.5	4 006	0.5	703.7	1 058.9	281.7
9	1.0	4 074	0.5	701.4	1 055.5	278.4
10	0.5	4 042	0.5	702.7	1 057.3	280.8
11	0.0	4 107	0.5	703.5	1 058.5	281.4
合计 Total		41 314		7 038	10 590.3	2 814.2

行驶 10.9 km。故增程模式下,增程器 5 L 汽油可提供运输车约 52.2 km 续航里程,与目标值 57 km 相比,续航里程缩短了 8.4%。与纯电动模式相比,增程模式下的续航里程延长了 217.5%,实现了使续航里程增加 2 倍的目标。

### 3 讨论

本研究首先根据山地果园的实际种植情况,初步计算运输车纯电动模式的续航里程为 24 km;其次根据运输车最大载荷 240 kg、最大爬坡度 15°和最高车速 9 km/h 的运输需求,设计一套增程式动力系统,匹配参数为 120 A·h/60 V 的铅酸蓄电池组,通过 MATLAB 的 Advisor 模块进行动力仿真,选择 2.2 kW 的电机,并且选用最大功率为 5 kW 增程器,保证运输车有充足的动力爬坡和足够的续航里程。测试结果表明,在满载爬坡时,增程器可以提供 2.67 kW 的功率,占电机爬坡功率的 64%,从而可以防止运输车爬坡时因为电量不足而无法爬坡和蓄电池放电电流过大而影响蓄电池寿命。续航里程测试表明运输车行驶里程达到 52.2 km,相比纯电动模

式,续航里程增加了 217.5%,实现了续航里程增加两倍的目标,可以满足果园行驶需求。

增程模式下,运输车油耗约为 10 km/L。以目前 93# 汽油的价格约 6 元/L 计算,运输车行驶 1 km 费用约为 0.6 元。在纯电动模式下,运输车行驶 1 km 消耗电能约为 0.18 kW·h,行驶 1 公里费用约为 0.1 元。增程器动力系统相对汽油运输车油耗较高,但是由于运输车以蓄电池组为主要动力,电能占运输车日常工作能耗 80%以上,甚至工作量低时,达到 100%,而增程器仅作为辅助动力,所以增程式运输车相比汽油运输车更加经济和清洁;相比纯电动运输车,动力更强、续航里程更长,更加适合山地果园运输推广使用。

考虑到农用运输车制造成本,选用价格便宜的化油器式发动机,燃烧效率较低,故需要进一步优化增程式动力系统的控制策略,使增程器动力系统能够根据运输车运输功率需求而调节增程器发动机输出功率,从而降低油耗和增加网电使用率。由于农用运输车增程器价格便宜,采用的发动机以化油器为主,故油耗大和排放污染严重。为了降低运输车

油耗和污染排放同时又尽量采用价格便宜的农用增程器,需要对增程器工作策略作进一步优化。通过模糊 PID 等控制策略,使得增程式运输车实现功率跟随(增程器发出的电刚好满足运输车瞬时功耗需求,从而降低油耗)同时,防止瞬时功率跟随调节时出现突变调节而使发动机燃烧不充分导致污染排放上升。

### 参 考 文 献

- [1] 盛玲玲,宋淑然,洪添胜,等.广东省山地果园机械化现状与发展思考[J].农机化研究,2017,39(11):257-262.
- [2] 林川,邹宝玲,郭晓燕,等.广东丘陵山地果园机械化现状与发展思路—以龙门县为例[J].广东农业科学,2015,42(15):135-141.
- [3] 刘杰,张衍林,张闻宇,等.山地果园无动力运输机设计[J].华中农业大学学报,2017,36(1):117-122.
- [4] 郭晓燕,冯运琳,高锐涛,等.山地果园运输车的防侧翻设计与水果抗损研究[J].广东农业科学,2015,42(19):144-150.
- [5] 陈汉玉,左承基,俞小莉.增程式低速电动轿车参数匹配与仿真[J].汽车工程,2014,36(5):522-526,541.
- [6] 罗玉涛,姜翠娜,梁伟强,等.一种新型的增程式电动汽车驱动系统[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(9):107-113.
- [7] 宋传学,王达,宋世欣,等.基于动力分布设计的增程式电动汽车[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(3):681-688.
- [8] 徐立友,刘孟楠,周志立.串联式混合动力拖拉机驱动系统设计[J].农业工程学报,2014,30(9):11-18.
- [9] 冯运琳.山地果园电动轮式运输机增程式动力系统设计与分析[D].广州:华南农业大学,2017.
- [10] ANDALORO L, NOPALI G, SERGI F. Design of a hybrid electric fuel cell power train for an urban bus[J]. International journal of hydrogen energy, 2013, 38(18): 7725-7732.
- [11] JENSEN H, SCHALTZ E, KOUSTRUP P. Evaluation of fuel-cell range extender impact on hybrid electrical vehicle performance[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2013, 62(1): 50-60.
- [12] 赵景波,贝绍轶,冯俊萍.增程式电动汽车电驱动系统多模式切换控制[J].上海交通大学学报,2015,49(11):1726-1730.
- [13] 袁守利,高寒.带增程器的电动车控制系统设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(6):1347-1350.
- [14] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 龚贤武,吴德军,马建,等.增程式电动汽车动力系统参数匹配与仿真研究[J].机械科学与技术,2014,33(6):929-933.
- [16] 高辉松,张莹,朱思洪.基于 ADVISOR 的电动拖拉机仿真系统开发与应用[J].计算机仿真,2009,26(2):282-285.

## Design and experiment of range-extender system of mountainous transport cart

WU Weibin<sup>1,2</sup> YANG Xiaobin<sup>2</sup> ZHANG Zhenbang<sup>2</sup> LIU Foliang<sup>2</sup>  
LI Zeyi<sup>2</sup> FENG Yunlin<sup>2</sup> CHEN Li<sup>2</sup> ZHOU Zhaojie<sup>2</sup>

1. Division of Citrus Machinery, China Agriculrure Research System/Guangzhou E&T Research Center for Mountainous Orchard/Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information/Gungzhou Key Laboratory of Information Acquisition and Application in Agriculture, Guangzhou 510642, China;
2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

**Abstract** At present, the most widely used petrol-type mountainous orchard transporter adopts the low-cost carburetor-type engine with low combustion efficiency and poor emissions. Pure electric transporter is difficult to promote in mountainous orchards due to the limited capacity and inferior cruising mileage. A range-extender system based on the existing electric mountainous orchard wheel transporter was designed with the Advisor simulation instrument. A range-extender system with a total capacity of 120 A·h and voltage of 60 V lead-acid battery as the major power and 5 kW range extender device as assistant power was proposed to satisfy the design requirements of the maximum load of 240 kg, the maximum climbing slope of 15° and the maximum speed of 9 km/h. In the extended mode, the running distance of the transporter is 52.2 km when the load is 240 kg, 217.5% longer than that of the pure electricity mode. The mileage is improved significantly.

**Keywords** mountainous orchard; transporter; range-extender; power system; cruising mileage  
(责任编辑:陆文昌)