

山地果园轮式运输机动力稳定系统测试

吴伟斌^{1,2} 游展辉² 洪添胜^{1,2}
王玉兴² 王海林² 余耀烽² 冯灼峰²

1.南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室/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 510642;
2.华南农业大学工程学院,广州 510642

摘要 为提高山地果园轮式运输机在作业过程中动力控制的稳定性,对其动力控制系统进行系统构建与试验。根据动力独立控制的控制策略,结合山地果园轮式运输机的结构特征,搭建控制系统硬件并进行无改动原车空载试验以及动力稳定系统控制下的空载试验。结果表明,当节气门开度加大后,发动机输出功率增加,抵消了非陷坑车轮滚动的一部分阻力;在相同的行驶阻力条件下,节气门开度越大,车轮速度越大,最后受控后稳态车轮速度的绝对误差为 0.178 1~0.396 1 km/h,相对误差最大为 5.27%。试验表明,动力轮速度控制达到设计要求,在果园轮式运输机的某个动力轮陷坑之后,可以通过调节没陷坑的动力轮速度,使动力加大,从而有助于运输车在泥泞的道路行走或者有助于运输车具有足够的动力爬出陷坑。

关键词 山地果园; 运输机; 动力稳定系统; 节气门开度; 差速试验

中图分类号 S 229⁺.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)03-0086-07

国内外对丘陵山地果园运输技术的研究在于满足运输对象所处环境所需的运输性能要求,如运输机的动力性、动力装置参数的选定,并没有对运输机的经济性、制动性、操纵稳定性等进行重点研究^[1-7]。柑橘种植是我国南方山区的重要产业^[8]。柑橘一般种植在路况复杂且路面坑洼的丘陵山地上,需要专用的适用于丘陵山地果园的运输机进行运输。加装多功能的动力控制装置可大大提高山地果园运输机械的安全系数。目前国内丘陵山地果园运输机用户多为普通农户,加装市面现有的多功能动力控制装置会增加运输成本。因此,设计一种适用于丘陵山地果园轮式运输机的低成本的动力控制系统具有重要的现实意义。本研究基于南方山地果园的地理环境,在规定的范围内控制动力轮的滑移率,使车轮的地面附着力足够高,使得运输机可以安全通过复杂的路面^[9-12]。此外,本研究还对运输机原有的动力控制系统进行改良,设计一套适用于山地果园运输机的动力稳定系统,并根据试验数据中所体现的滑

移率,分析滑移率误差产生原因并提出新的优化策略,从而使山地果园运输机在多变的路况路面有更好的通过能力,进一步降低运输机行驶时因动力轮打滑失控而带来的危害,进一步完善在南方山地果园运输系统动力轮上的动力稳定性能,为农用运输机械的自动化运输提供相应的理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 动力稳定系统组成

两侧动力轮的制动由一个制动手柄通过压缩制动油泵使两侧制动钳在制动液压力增大的情况下,同时压紧两侧制动盘,使两侧动力轮同时制动。每侧制动控制同时加入由电推杆控制的制动油泵,并利用电磁阀实现制动手柄与电推杆的控制分离。其中,单片机经过分析处理检测数据后,对电推杆与电磁阀进行控制(图 1)。

1)主要检测模块。系统以 Atmel 公司生产的高性能微处理器 ATmega2560 为核心 MCU。本系

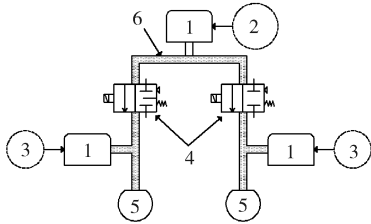
收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27); 公益性行业(农业)科研专项(201403036, 201203016); 广东省科技项目(2014A070713032)

吴伟斌,博士,教授,研究方向:农业工程、机电一体化和信息技术应用. E-mail: wuweibin@scau.edu.cn

通信作者: 洪添胜,博士,教授,研究方向:农业工程、机电一体化和信息技术应用. E-mail: tshong@scau.edu.cn

统需要检测转向把柄的转向角度与节气门打开的角度。利用 2 个 5 V 的电位器滑动产生的变化电压信号送至 ATmega2560, 计算出角度的大小。节气门开度检测硬件实物图如图 2 所示。



1.制动油泵 Brake oil pump; 2.制动手柄 Brake handle; 3.电推杆 Electric push rod; 4.电磁阀 The electromagnetic valve; 5.制动钳 Brake calipers; 6.油路 Oil current.

图 1 运输机动力稳定控制系统结构
Fig.1 Structure of the carrier dynamic stability control system

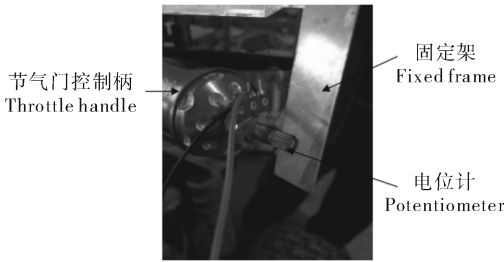


图 2 节气门开度检测

Fig.2 Opening detecting of the throttle valve

2) 电推杆控制模块。系统通过电推杆控制制动油管的油压大小来控制轮速。电推杆电源来源于运输机的直流 12 V 蓄电池, 利用稳压电路保证电推杆工作稳定性^[13-17]。电推杆推力由直流电机提供, 通过改变电机工作电流方向从而调节推杆的伸展与收缩, 而每个电机的工作电流方向由一组继电器控制。

3) 制动控制。该系统的设计通过调节制动车轮转速至目标值来实现控制目的, 控制运输机的盘式制动器来产生制动扭矩, 从而使车轮减速至目标值。当系统监测车况数据, 判断单个动力轮陷入泥坑时, 需要利用电推杆单独控制制动油泵, 对制动钳施加液压力^[18-21], 使得陷坑动力轮得到一个独立的制动扭矩, 降低轮速, 使滑移率降至目标值, 而没有处于陷坑状态的动力轮则无需施加制动扭矩。独立制动油泵实物图如图 3 所示。

同时, 为保证人力控制制动器与电推杆控制制动器两者控制相互独立, 系统利用电磁阀来改变油路回路令彼此控制独立不受影响^[22-25]。系统采用二

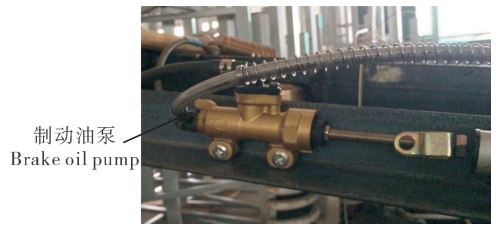


图 3 独立制动油泵

Fig.3 Independent brake pump

位二通电磁阀改变油路方向, 供电电压为直流 12 V, 可承受的最大液体压力为 7 MPa, 能承受制动液工作压力。系统由单片机向继电器发出控制信号, 继电器控制电磁阀电源的供应, 从而控制电磁阀两通道的切换。此外, 电磁阀闭合断开独立油泵与手柄控制油泵的油路, 能防止制动过程中制动钳回油而减少制动力的现象。

1.2 系统硬件控制策略

按照系统仿真分析得出, 当受控参数滑移率等于 14% 时, 能满足研究控制要求。因此, 系统控制策略如下: ①当左侧动力轮滑移率超过极限值 20% 时, 左侧电磁阀关闭, 切断左侧电控制动油泵与右侧制动钳的油路, 左侧制动钳的油压只受电控制动油泵控制。右侧电磁阀打开, 右侧制动钳只受制动手柄控制。②当右侧动力轮滑移率超过极限值 20% 时, 右侧电磁阀关闭, 切断右侧电控制动油泵与左侧制动钳的油路, 右侧制动钳的油压只受电控制动油泵控制。左侧电磁阀打开, 左侧制动钳只受制动手柄控制。

1.3 试验设计

本系统试验采用 Arduino 公司的 Mega2560 单片机进行数据采集与 I/O 输出控制, 通过 USB 接口与笔记本电脑连接, 采用 Arduino IDE 软件中的 Serial Monitor 采集数据并记录, 试验方案和原理如图 4 和图 5 所示。

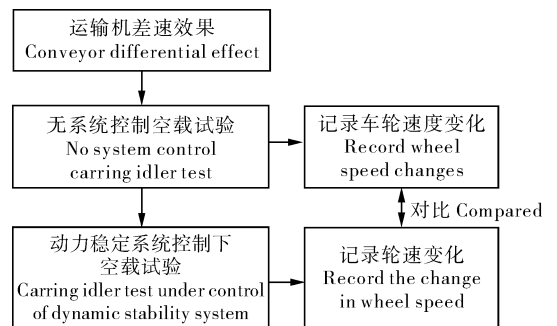


图 4 动力稳定控制系统试验方案

Fig.4 Test plan of the dynamic stabilization control system

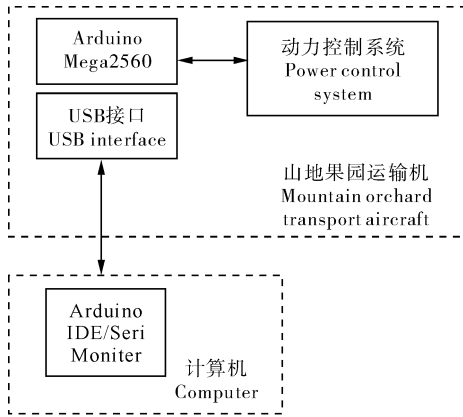


图 5 试验原理

Fig.5 Test principle of the stabilization system

1) 节气门开度的标定。节气门的开度利用旋扭电位器检测所得,节气门控制手柄扭动带动电位器旋转改变电压值,单片机接收电压信号通过计算得到节气门开度。

2) 转向角度的标定。转向的角度利用旋扭电位器检测所得,转动手柄转向时带动电位器旋转改变电压值,单片机接收到电压信号通过计算得到转向角度。运输机转向手柄转向范围为 $-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$,研究中选取了旋扭电位器的 $110^{\circ}\sim 190^{\circ}$ 作为转向角度测量量程。

3) 制动油泵活塞行程标定。制动油泵活塞行程为 40 mm,通过制动手柄来控制活塞压缩行程,利用游标卡尺测量活塞运动行程,试验中以行程的百分比形式作为数据。

4) 霍尔感应模块。试验中在各车轮法兰盘上等圆周角度共安装 4 组磁钢,霍尔传感器固定在制动钳上,则霍尔传感器每输出 4 次脉冲信号到单片机,车轮则转动 1 周,其中,单片机每 2 s 更新 1 次车轮速度数值。每组试验时间为 60 s,数据采集 30 次,制动力的大小由制动手柄来决定,节气门开度的大小同样由节气门控制手柄决定,怠速状态节气门开度为总开度的 5%。试验后将 Arduino IDE/Serial Monitor 的监控数据导入 Excel 中。

5) 试验台架。为了试验系统在实际应用中的可靠性^[15],本研究搭建了试验滚轮台架,实物如图 6 所示。试验过程中,运输机动力轮悬架于试验台架的滚轮上,如图 7 所示。

2 结果与分析

2.1 无系统控制下空载试验

为了验证运输机差速器动力输出效果,在运输



图 6 试验台架
Fig.6 Test bench



图 7 运输车轮速测试

Fig.7 Test of transport wheel speed

机悬空动力轮和转向角度为 0 的状态下,对单个动力轮施加不同的制动力,并调节节气门开度,观察 2 个动力轮速度数值变化。图 8 为左侧与右侧动力轮霍尔脉冲次数变化曲线。其中, X 轴上的 1~31 为无制动控制状态,32~62 为制动油泵活塞压缩 10%,63~93 为制动油泵活塞压缩 20%,94~124 为制动油泵活塞压缩 30%,125~155 为制动油泵活塞压缩 40%,156~186 为制动油泵活塞压缩 50%。

从表 1 中可以看出运输机的差速效果明显,当 2 个动力轮的行驶阻力不相等并且差值不断增大时,轮速差值也相应增大,而轮速上限约为两倍于无制动控制状态时的轮速。而当节气门开度加大后,发动机相等值为最终控制目标,验证系统可行性。从动轮的速度在系统程序中编写设定,试验中节气门开度为怠速至 40% 之间,转向角度为 0,车轮速度稳定后开始对车轮速度进行控制^[26]。受控后车轮速度误差分析如表 2 所示,不同节气门开度的左侧与右侧动力轮速度变化曲线如图 9 如示。按照控制策略,以两侧动力轮中速度最小的作为系统控制下速度的标定值,另一侧为测量值。

2.2 动力稳定系统控制下空载试验

以空载单轮制动试验为基础,加入动力稳定系

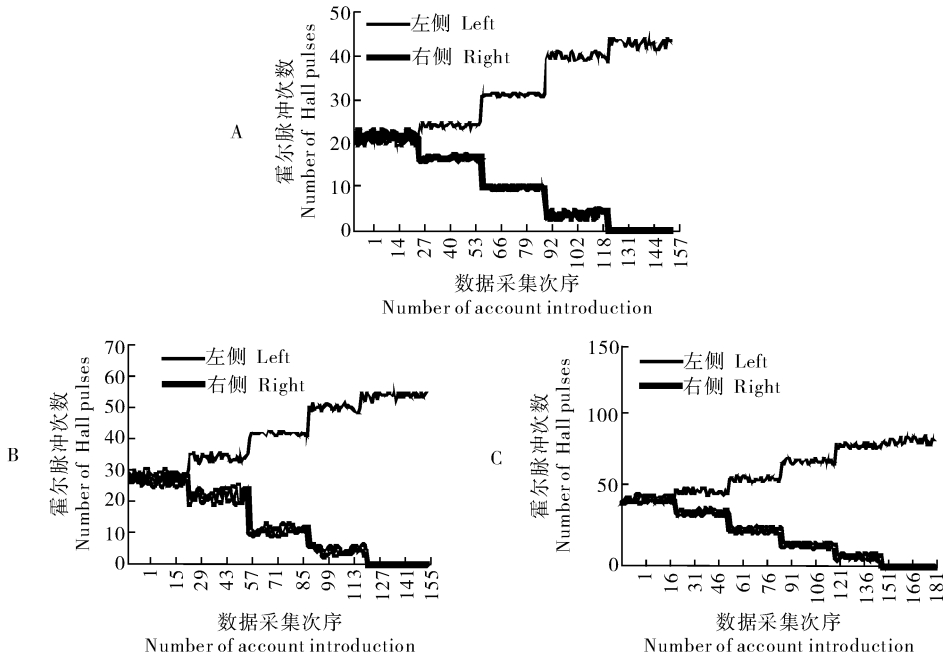


图 8 怠速工况下(A)及节气门开度 20%(B)和 40%(C)工况下的动力霍尔脉冲次数变化曲线

Fig.8 The idle condition(A) and the throttle valve opening 20% (B), 40% (C) of curve power wheel Hall pulse frequency

表 1 不同制动力下两侧车轮速度数值

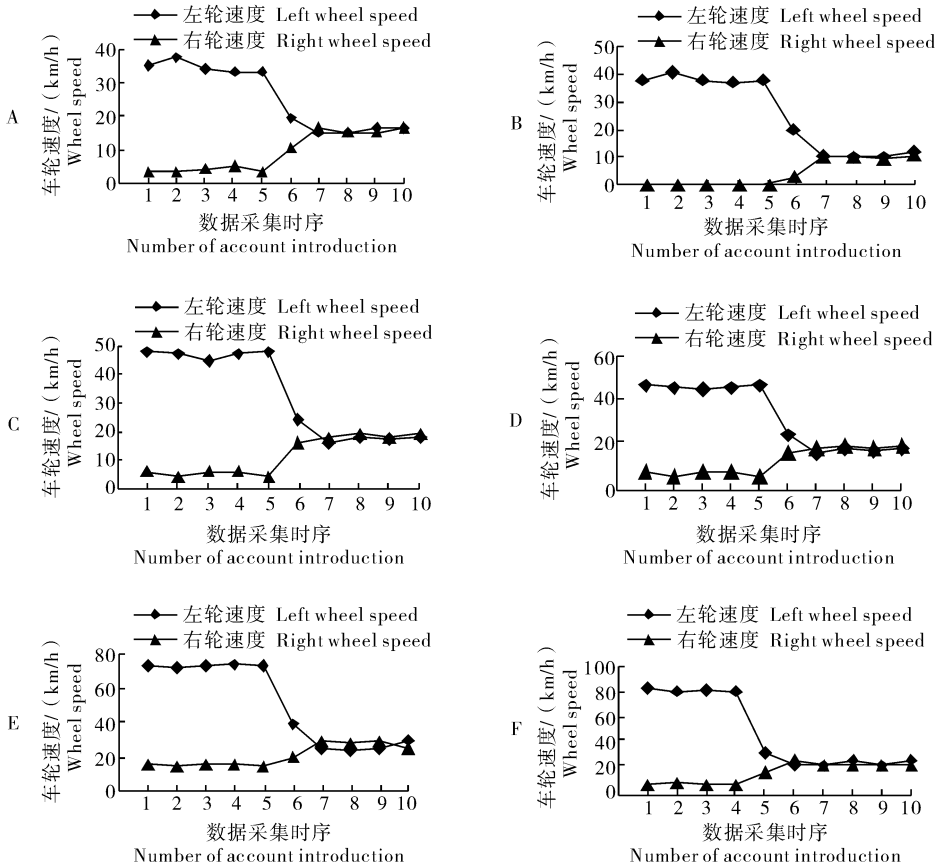
Table 1 Speed value under different braking forces on both sides of the wheel

T/%	S/mm	V _L /(km/h)	V _R /(km/h)
怠速 Idle	10	21.175 3	15.636 1
怠速 Idle	20	27.167 0	7.850 9
怠速 Idle	30	34.401 9	2.785 3
怠速 Idle	40	37.424 9	0
20	0	24.593 9	24.609 1
20	10	29.554 7	20.195 5
20	20	37.406 7	10.458 4
20	30	45.053 8	4.271 1
20	40	49.108 0	0
40	10	50.966 0	36.721 8
40	20	61.075 9	26.815 5
40	30	72.865 0	14.804 6
40	40	82.142 8	5.748 6
40	50	87.977 9	0

注 Note: T:节气门开度 Throttle opening; S:右制动油泵活塞行程 Right brake oil pump piston stroke; V_L:左动力轮速度 Left power wheel speed; V_R:右动力轮速度 Right power wheel speed.

统后再次进行试验。以两个动力轮速度中的最小值为目标速度，控制非陷坑的动力轮达到目标速度，陷坑的动力轮出坑后系统不再加以控制，两动力轮速

度达到输出功率增加，抵消了非陷坑车轮滚动的一部分阻力，在相同的行驶阻力条件下，节气门开度越大，车轮速度越大。



A:怠速时活塞压缩 30% Piston compression 30% at idle; B:怠速时活塞压缩 40% Piston compression 40% at idle; C:节气门开度 20%时活塞压缩 30% Piston compression 30% at throttle opening 20%; D:节气门开度 20%时活塞压缩 40% Piston compression 40% at throttle opening 20%; E:节气门开度 40%时活塞压缩 30% Piston compression 30% at throttle opening 40%; F:节气门开度 40%时活塞压缩 40% Piston compression 40% at throttle opening 40%.

图 9 不同节气门开度工况下的轮速度变化曲线

Fig.9 The change curve of the wheels speed change under the different condition of the throttle valve opening

表 2 受控后车轮速度误差分析

Table 2 Error analysis of wheel speed

T/%	S/mm	$V_L/(km/h)$	$V_R/(km/h)$	$U_L(\text{测量值})/(km/h)$	$U_R(\text{标定值})/(km/h)$	AE/(km/h)	RE/%
怠速 Idle	30	34.205 9	2.911 4	5.632 2	5.365 7	0.266 5	4.97
怠速 Idle	40	37.697 5	0	9.005 7	9.315 2	0.309 5	3.32
怠速 Idle	50	37.453 0	0	11.654 3	11.882 4	0.228 1	1.96
20	30	45.083 7	4.186 7	15.816 5	15.998 5	0.182 0	1.15
20	40	48.981 2	0	12.194 0	12.541 1	0.347 1	2.77
20	50	49.029 6	0	7.117 2	7.513 3	0.396 1	5.27
40	30	72.801 2	14.718 1	28.442 2	28.645 8	0.203 6	0.71
40	40	82.073 1	5.637 6	21.807 3	22.149 7	0.342 4	1.55
40	50	87.826 4	0	13.414 5	13.236 4	0.178 1	1.35

注 Note: T:节气门开度 Throttle opening; S:右制动油泵活塞行程 Right brake oil pump piston stroke; V_L :左动力轮速度 Left power wheel speed; V_R :Right power wheel speed; U_L :稳态左动力轮速度 Steady-state left power wheel speed; U_R :稳态右动力轮速度 Stead-state right power wheel speed; AE:绝对误差 Absolute error; RE:相对误差 Relative error.

3 讨论

本研究依照动力独立控制的控制策略并结合运输机实物的结构,搭建控制系统硬件台架。系统硬件台架以 ATmega2560 为核心 MCU,以 Arduino Mega2560 为开发平台,利用 NJK-5002C M12 霍尔传感器采集轮速数据,利用优利德 UT371/372 转速表采集角度数据,控制电推杆形成独立制动力。硬件系统平台搭建完成后,进行了动力轮悬空差速试验和动力独立控制试验。从试验结果可以看出,本研究所设计的控制系统能有效地降低陷坑后两侧动力轮之间的速度差,并逐渐趋于相等。电推杆控制制动泵产生独立制动力来使两侧动力轮所受到的行驶阻力相等,在以上试验中控制时间在 1~2 s 之间,符合该试验的目标值。运输机在安装差速器的差速效果明显,当 2 个动力轮的行驶阻力不相等并且差值不断增大时候,轮速差值也相应增大,而轮速上限约为 2 倍于无制动控制状态时的轮速。而当节气门开度加大后,发动机输出功率增加,抵消了非陷坑车轮滚动的一部分阻力,在相同的行驶阻力条件下,节气门开度越大,车轮速度越大。该试验结果符合运输机功率、牵引力和转速的运动原理,也跟本研究设计目标要求一致,得到了不同行驶阻力下的差速效果。在动力独立控制试验中,以控制动力轮速度达到相等为目标,依据试验结果分析了系统的控制误差,受控后稳态车轮速度的绝对误差范围为 0.178 1~0.396 1 km/h,相对误差范围为 0.71%~5.27%。从设计方法分析,在以下方面还需要进行改进:本控制系统所采用的电推杆伸缩速度为 0.5 mm/s,额定载荷为 6 000 N,在试验过程中,电推杆控制从响应到车轮速度稳态的时间约为 1~2 s。因此,可以重新定做快速伸缩的电推杆来减少到达稳态的时间,但同时必须保证额定载荷。其次,在运输机两侧动力轮同时悬空进行动力独立控制试验,车体纵向速度为 0,而在实际动力轮陷坑当中,车体速度并非为 0。因此,可以将运输机运到山地中进行试验,使得试验结果更能得到实际应用。

参 考 文 献

- [1] 李亮,贾钢,宋健,等.汽车动力学稳定性控制研究进展[J].机械工程学报,2013,49(24):96-106.
- [2] 王睿.客车主动侧倾控制及操纵稳定性数据管理平台研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [3] 王治中,于良耀,宋健.基于制动系统的汽车车轮滑移率控制研究现状[J].汽车工程,2014,36(1):82-87.
- [4] 王昕灿,郑燕萍,吕立亚.基于 LabVIEW 的林业车辆制动试验台检测系统研发[J].林业工程学报,2016,1(3):103-108.
- [5] 吴伟斌,冯玉琳,朱余清,等.山地果园轮式运输机自装卸装置的设计与分析[J].华中农业大学学报,2016,35(4):113-120.
- [6] 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):128-137.
- [7] 孟亮,张衍林,张闻宇,等.遥控牵引式无轨山地果园运输机的设计[J].华中农业大学学报,2015,34(4):125-129.
- [8] 李新广,杨绍荣.山地果园机械的现状与展望[J].湖北农机化,2012(3):20-21.
- [9] 贺焕利.车辆稳定性控制系统设计与分析[J].重庆理工大学学报,2014,28(6):25-31.
- [10] 付燕荣,王国业,关志伟.汽车 ABS/ASR/ESP 集成控制策略研究[J].机械设计与制造工程,2014,43(2):35-40.
- [11] 龙少雄.汽车 ESP 控制策略及基于 ESP/ABS 集成控制研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [12] 石智卫.基于 ABS 和 ESP 的汽车制动集成控制策略仿真研究[D].重庆:重庆理工大学,2012.
- [13] 赵轩.纯电动客车动力总成控制策略研究[D].西安:长安大学,2012.
- [14] 赵晓冬.经济型纯电动汽车动力系统仿真及应用[D].成都:电子科技大学,2014.
- [15] 李文礼,石晓辉,施全,等.车辆动力总成试验台动态模拟控制方法[J].中国机械工程,2015,26(2):278-283.
- [16] ANTIPOVA N A. The use of an electromagnetic brake to improve the dynamic stability of a power systems [J]. Power technology and engineering, 2012, 46(1): 75-80.
- [17] HE X F, TANG X H, ZHANG Q M. Stability criteria for linear Hamiltonian dynamic systems on time scales [J]. Advances in difference equations, 2011(1): 1-11.
- [18] 刘涛.爆胎汽车差动制动控制研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [19] 肖焱曦.无人驾驶智能车制动控制系统研究[D].西安:长安大学,2013.
- [20] ZHANG H W, YU F S, WANG X H. Condition monitoring of rope-less elevator braking system based on wavelet denoising [J]. Journal of computers, 2013, 8(3): 741-748.
- [21] ZHANG H W, YU F S, WANG X H. Parity space-based fault diagnosis of CCBII braking system [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(10): 2922-2928.
- [22] CHOUINARD A, LECUYER J F. A study of the effectiveness of electronic stability control in Canada [J]. Accident analysis & prevention, 2011, 43(1): 451-460.
- [23] YIN D, HU J S. Active approach to electronic stability control for front-wheel drive in-wheel motor electric vehicles [J]. International journal of automotive technology, 2014, 15(6): 979-987.
- [24] CHEN B C, KUO C C. Electronic stability control for electric vehicle with four in-wheel motors [J]. International journal of

automotive technology,2014,15(2):573-580.

[25] CHU L,GAO X,GUO J,et al.Coordinated control of electronic stability program and active front steering[J].Procedia environmental sciences,2012,12(2):1379-1386.

[26] DOUMIATI M,SENAME O,DUGARD L,et al.Integrated vehicle dynamics control via coordination of active front steering and rear braking[J].European journal of control,2013,19(2):121-143.

Test of dynamic stability system for mountain orchard wheeled transport

WU Weibin^{1,2} YOU Zhanhui² HONG Tiansheng^{1,2}

WANG Yuxing² WANG Hailin² YU Yaofeng² FENG Zhuofeng²

1.Key Laboratory of Key Technology on South Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University/Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System/Guangdong Engineering Technology Research Center for Creative Mountain Orchard Machinery, Guangzhou 510642, China;

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

Abstract To study the wheel vehicle in mountain orchard and improve the stability of the transport operation, the power control of a target system was constructed and tested. A control system hardware was built in accordance with independent power control strategy and control combined transport physical structure. After completing the system hardware, no-load test without system control and load test under the control system dynamic stability control was conducted. Results showed that the engine output power increases and offsetting the non-pit part of the wheel rolling resistance when the throttle opening increases. In the same driving resistance conditions, with the greater the throttle opening, the greater the wheel speed. At last, the absolute error range of the steady state wheel speed was between 0.178 1 km/h and 0.396 1 km/h with the relative error range of 0.71% to 5.27%. The experimental results show that the power wheel speed control achieves the target setting. After one pit in the power wheel of the transport vehicle, the speed of power wheel without pits can be adjusted to increase the power, which helps the truck to walk or trap in the muddy road. Of the situation there is enough power to climb out.

Keywords mountain orchard; wheeled vehicle; the power stability system; throttle opening; differential test

(责任编辑:陆文昌)