

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.004

山地果园自走式履带运输车抗侧翻设计与仿真*

朱余清 洪添胜 吴伟斌 宋淑然 李震 莫伟标

(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)

【摘要】 为适应山地果园路况环境的运输特点,根据履带式运输车的行走特性,提出了基于提高抗侧翻性能的山地果园履带式运输车总体设计要求。在完成各总成设计的基础上,以提高运输车抗侧翻性能为目标,完成了山地果园履带式运输车总体布局的抗侧翻设计。建立整车的三维实体模型并对其进行了仿真,结果满足设计要求,缩短了设计周期。

关键词: 山地果园 自走式履带运输车 总体设计 抗侧翻 仿真

中图分类号: S229+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0019-05

Design and Simulation of Side Rollover Resistant Capability of Tracked Vehicle for Mountain Orchard

Zhu Yuqing Hong Tiansheng Wu Weibin Song Shuran Li Zhen Mo Weibiao

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

To adapt to the environment of mountain orchard road transport characteristics, according to the tracked vehicle running characteristics, its general layout requirements were put forward based on the improvement of side rollover resistant capability of the tracked vehicle for mountain orchard. After the completion of all assembly designs, in order to improve side rollover resistant capability of the tracked vehicle for mountain orchards, the general layout of the system design was completed. The vehicle's 3-D model was established and carried on the simulation. The simulation results showed that the design met the design requirements, and shortened the period of design.

Key words Mountain orchard, Self-propelled tracked vehicle, General layout design, Side rollover resistant, Simulation

引言

水果在我国农业产值中的比重不断增加,但水果生产机械化显得明显滞后,其中果园运输尤为突出。例如我国水果中的柑橘有 90% 种植在地形复杂的丘陵和山地区域,但是在种植和采收过程中果品和农资物料运输仍然以人力运输为主,生产效率低、劳动强度大。而传统的轮式农用运输车缺乏地

形的针对性^[1-2]。

目前国外农用运输车产品基本可分为日韩型、意德型、英法型和美加型^[3]。日本、韩国两国的地理环境主要以山区为主,耕种规模不大,使得自走式履带、轮式小型运输车得以盛行。意大利与德国的地形特点是丘陵和山区占多数,但以农场经营管理为主,主要使用独立式农用运输车和农用拖拉机变形运输车。英国、法国等众多欧洲国家的地理环境

收稿日期: 2012-07-11 修回日期: 2012-07-17

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203016)和现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-27)

作者简介: 朱余清,副教授,博士生,主要从事农业工程、车辆工程、地面车辆与土壤力学机器系统力学研究,E-mail: yqzhu81@126.com

通讯作者: 洪添胜,教授,博士生导师,主要从事农业工程、机电一体化和信息技术应用研究,E-mail: tshong@scau.edu.cn

与农场经营规模与以上两种模式有较大差异,主要以中型农场为主,使用农用客货两用车和大型厢式农用货车作运输之用的同时又可满足日常生活的需要。以美国、加拿大和澳大利亚为代表的大农业国家,更多的是使用重型载货汽车和半挂牵引汽车作为农业运输用途的工具^[4]。

近年来我国山地果园田间运输技术已有所突破,主要技术有架空运输索道和轨道形式^[5-6]。这两种运输技术,为山地陡坡果园的农资和果品运输提供了解决方案,但存在机动性较差的缺点。为更好地提高山地缓坡地果园的运输效率,设计一种操作轻便而且适应性好的运输车很有必要。针对以山地为主的果园地理环境,在无路的粘性土壤路面,轮式车辆的附着力明显小于接地面积较大的履带式车辆^[7-8],后者对复杂地形的适应性也明显优于前者^[9]。履带式运输车无疑也是山地果园短途运输较好的选择。目前我国主要以引进国外机型为主,未能得到广泛推广和应用。因此,本文设计一种适应缓坡地形、操纵方便和行驶稳定性高的微型山地自走式履带运输车。

1 设计要求

鉴于履带式车辆适应山区无路地形的优势,自走式履带运输车是对现有果园运输方式的有益补充,能增强短途运输的适应性和机动性,更好地解决山地果园的运输问题^[10]。有别于传统微型履带运输车的设计方法,本设计结合山区复杂地形,车速较低,以刚性车辆准静态侧翻进行设计^[11-12]。提出以下设计要求:①履带式底盘结构的设计应有利于提高运输机在山地果园运行的通过性,即具有较好的转向性能、较强的爬坡能力和抗侧翻能力。②设计履带式运输车的转向及行走控制系统应有利于提高操纵轻便性,适应山地果园运输作业。③运输车的动力传动系统应有利于提高运输机的牵引力、承载能力、运输效率及燃油经济性。④车厢结构及整机布局应优化设计,提高运输机的通用性、适应性和降低使用成本。

设计的技术参数为:最大爬坡度 20°,平地最大载量 250 kg,坡地最大载量 150 kg;前进挡 2 个,速度 1.4 ~ 3.5 km/h,倒挡 1 个,要求在各种载荷工况下均具有较好的抗侧翻性能。

2 整车总体布置的抗侧翻设计

山地果园自走式履带运输车除了要具有山地行驶能力外还需要在高载重情况下工作,因此对其总体设计应要求具有合理的布局和结构紧凑。在动力

性方面应保证其有足够的驱动力以获得较好的加速、爬坡与越障性能,同时提高履带式运输车的安全性和稳定性也极为重要^[13]。由于整车尺寸相对较小,履带底盘的尺寸也有限,因此在山区丘陵地带凹凸不平的路面行驶时比大中型履带车辆易侧翻,提高其各种负荷下的抗侧翻性能显得尤其重要。

根据设计要求,为提高自走式履带运输车的抗侧翻性能,对整车的总体布置采取如下设计原则:

(1) 采用精简化的行走系设计,行走系由整体式橡胶履带、驱动轮、支重轮、张紧轮和张紧机构组成^[14]。橡胶履带自重轻,行驶时履带上下方下垂量较小,可不配托带轮。因设计速度低,仅运载货物,设计时可省去大中型履带车辆所必须的悬架装置,以减轻整车质量,利于抗侧滑和侧翻。

(2) 采用超低速齿轮式传动系设计,由两轴式变速器配合中央齿轮主减速器,使履带式运输车具有足够大的驱动力和超低转速输出性能,有利于提高通过性,也有利于提高抗侧翻能力。

(3) 为使整车质量分布均匀合理,适于在山地起伏不平的复杂路面上行驶、提高抗侧翻性能,必须兼顾运输车的离地高度和整车重心位置。底盘车架采用 H 型结构,将发动机和变速器置于近驱动轮方位,即车架后方的同一平台。主减速器壳体固定在车架上并置于发动机和变速器的下方。发动机通过带传动将动力传递给变速器,变速器输出轴通过齿轮传动将动力传递给主减速器中央齿轮,再通过常啮合转向离合器,将动力传到半轴和履带驱动轮,实现履带式运输车的行驶。运输物品的车厢位于车架中前位,使满载时运输车的前、后配重更为均匀,有利于提高抗侧翻性能。

(4) 运输车扶手、换挡手柄、离合器和油门等则根据人体工程学布置设计使操纵更为舒适方便。车厢尺寸根据装运水果的标准箩筐尺寸进行设计。为了增加装载体积,车厢通过伸缩板的设计使左、右和前、后方向都有不同程度的尺寸扩展,以提高果品的装载量,同时在不同装载载荷下其质心位置均有利于提高抗侧翻性能。

自走式履带运输车的总体结构如图 1 所示。

3 整车模型的建立与仿真分析

利用 Pro/E 三维实体建模软件实现设计参数化,建立三维实体模型,并进行虚拟装配和仿真分析。完成总布置图的参数化绘制、整车布置校核和物理参数提取^[15-16]。

3.1 三维模型图建立

对整车底盘行走系、传动转向系、车厢和其他附

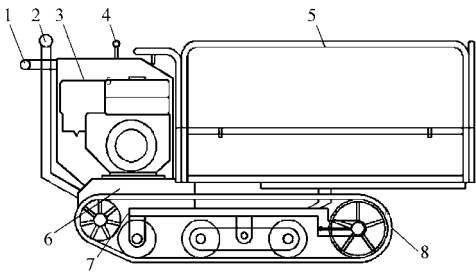


图1 自走式履带运输车的总体结构示意图
Fig.1 Overall structure diagram of self-propelled tracked vehicle

1.运输车扶手 2.转向操纵机构 3.发动机 4.变速器操纵机构 5.车厢 6.主减速器 7.车架 8.行走机构

件4部分建立三维实体模型。每个部分都由各自的零件组装成组件,然后再装配成整车,实现设计的模块化。在装配完成后再进行相关的仿真分析,检验设计是否符合设计要求。

基于 Pro/E 建立的三维实体模型如图 2 所示。

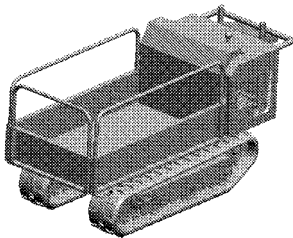


图2 整车总装三维模型
Fig.2 Tracked vehicle assembly 3-D model diagram

3.2 整车运动学仿真

山地果园自走式履带运输车的运动学仿真主要是传动系统及转向系统的运动仿真,它是建立在装配模型基础上的,通过定义静止部件、运动部件,并在各起始运动件上定义驱动发动机、选择连接轴和运动方向、设定运动条件或参数等一系列操作来实现的。经过 Pro/E 软件的运动学仿真模块的分析得出履带驱动轮各挡位的半轴角速度与相应的驱动轮线速度,仿真结果如图 3 和图 4 所示。

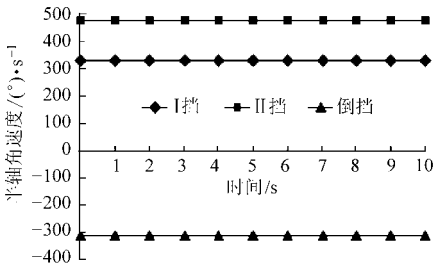


图3 驱动轮半轴角速度

Fig.3 Simulation diagram of driving wheel speed motion

由仿真可得各挡半轴的转速及驱动轮线速度：I 挡 54.94 r/min、2.02 km/h，II 挡 79.40 r/min、3.10 km/h,倒挡 - 52.19 r/min、- 1.89 km/h。因此,仿真结果符合了设计技术参数要求。

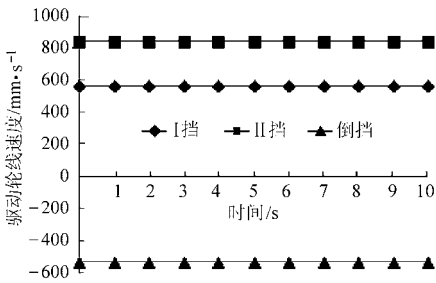


图4 驱动轮线速度

Fig.4 Simulation diagram of driving wheel line speed

3.3 整车静力学仿真

整车静力学仿真用 Pro/E 软件分析整车模型质心位置,利用履带车稳定性评价指标公式计算出履带车的极限坡度角。整个仿真过程也是建立在装配模型的基础上的,通过给各部件进行材料定义,建立相应的测量坐标系等一系列操作来实现。

模型图在完全装配好后,给模型中的每个零件定义材料,如表 1 所示。整车中未被定义材料的金属零件统一定义为普通钢材。

表 1 整车材料分配
Tab.1 Material allocation of tracked vehicle

零件	材料	密度 /kg·m ⁻³	泊松比	弹性模量/MPa
齿轮	40Cr	7.87 × 10 ³	0.277	2.11 × 10 ⁵
轴	45Cr	7.82 × 10 ³	0.290	2.06 × 10 ⁵
台车架	Q235B	7.83 × 10 ³	0.274	2.10 × 10 ⁵
箱体	HT150	7.00 × 10 ³	0.194	1.16 × 10 ⁵
履带	橡胶	1.00 × 10 ³	0.490	6.10
其他金属件	普通钢材	7.83 × 10 ³	0.270	2.00 × 10 ⁵

完成材料定义后,建立质心的测量坐标系。由于履带式运输车极限坡度角的计算需要求得整车质心的离地高度和距离履带首尾接地的距离,故以履带底平面、履带与地面的首尾接触点的铅垂面和整车的纵向平分面为基准平面建立两个测量坐标系。最后得出整车静力学仿真质心位置,并求得履带运输车行驶状态参数如表 2 所示,表中 h 为质心高度、 a 为质心至后支重轮轮心距离、 L 为履带的接地长度、 e 为车辆重心距纵向对称面的偏移距离。

表 2 履带运输车行驶状态参数
Tab.2 Tracked vehicle running state parameters

履带运输车 行驶状态	h /mm	a /mm	$L - a$ /mm	e 平均值 /mm
平地空载行驶	255.41	135.36	624.63	5.42
上坡满载行驶	385.63	308.39	451.60	3.13
平地满载行驶	424.72	359.94	400.06	2.44

图5为履带式运输车的极限上坡角 α_{lim} 和极限下坡角 α'_{lim} 示意图,其计算式为

$$\alpha_{lim} = \arctan \frac{a}{h} \tag{1}$$

$$\alpha'_{lim} = \arctan \frac{L-a}{h} \tag{2}$$

式中 L ——履带接地长度

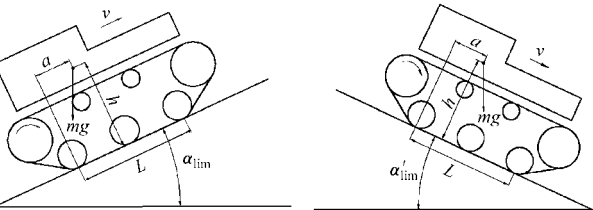


图5 履带式运输车极限上坡角、极限下坡角示意图
Fig.5 Maximum climb angle and maximum descent angle diagram of tracked vehicle

由式(1)和式(2)可求出所设计的履带式运输车的纵向极限上、下坡度角,如表3所示。

表3 各状态下的履带式运输车的纵向极限坡度角
Tab.3 Longitudinal ultimate slope angle of tracked vehicle in each state

履带运输车 行驶状态	极限上坡角 $\alpha_{lim}/(^{\circ})$	极限下坡角 $\alpha'_{lim}/(^{\circ})$
平地空载行驶	27.92	67.76
上坡满载行驶	38.65	49.50
平地满载行驶(理论值)	40.28	43.29

各状态下的横向极限坡度角表明履带式运输车的抗侧翻的能力,计算式为^[17]

$$\beta_{lim} = \arctan \frac{0.5(B+b)-e}{h} \tag{3}$$

式中 B ——履带式运输车辆轨距

b ——履带接地宽度

由式(3)计算得横向极限坡度角如表4所示。

表4 履带式运输车各状态下的横向极限坡度角
Tab.4 Lateral limit ultimate slope angle of tracked vehicle in each state

履带运输车行驶状态	横向极限坡度角 $\beta_{lim}/(^{\circ})$
平地空载行驶	50.93
上坡满载行驶	38.65
平地满载行驶	36.78

从仿真分析的结果与设计的要求可知,通过装配过程与各总成设计的目标参数化调整,使履带式运输车的整体布局符合了设计技术参数要求。静力学仿真的整车质心相对于纵向平分面距离的3个仿真结果均小于5.5 mm,基本上达到整车左右相同配重的原则,提高了整车抗侧翻的性能。

4 结论

(1) 根据山地果园的特点,为解决微型山地履带运输车抗侧翻性能较差的问题,对整车系统布局提出了可行的设计方案。

(2) 建立了整车三维实体模型,对模块化组件进行虚拟装配,并对其进行运动学和静力学仿真分析,通过分析优化,使设计满足技术参数要求,提高了整车抗侧翻性能。

(3) 与现有果园运输工具对比,履带式运输车对地形有较强的适应能力,在山区无路地形也具有更好的通过性和行驶稳定性。由于其行驶速度较低,较适合山地果园短途运输和小规模果园使用,解决了其他运输方式存在的不足。

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.
Hong Tiansheng, Yang Zhou, Song Shuran, et al. Mechanization of citrus production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12):105~110. (in Chinese)

2 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.
Li Shanjun, Xing Junjun, Zhang Yanlin, et al. 7YGS-45 type self-propelled dual-track mountain orchard transport[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):85~88. (in Chinese)

3 丁寒江. 国外农用运输车产品特征概述[J]. 拖拉机与农用运输车,2003(5):66~68.

4 杨洲,陈光南,王慰祖,等. 澳大利亚柑橘生产及其机械化[J]. 世界农业,2010(4):61~62.

5 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 Tiansheng, Su Jian, Zhu Yuqing, 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)

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.
Zhang Junfeng, Li Jingya, Zhang Yanlin, et al. Design of remote control monorail transporter for mountainous orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):90~95. (in Chinese)

7 Wong J Y, Huang W. "Wheels vs. tracks"—a fundamental evaluation from the traction perspective [J]. Journal of Terramechanics, 2006,43(1):27~42.

8 Grisso R, Perumpral J, Zoz F. An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils[J]. Journal of Terramechanics,2006,43(2):225 ~ 236.

9 Al-Milli S, Seneviratne L D, Althoefer K. Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain[J]. Journal of Terramechanics,2010,47(3):151 ~ 160.

10 巩青松,董阿忠,陈靖芯,等.履带式车辆关键机构分析与设计[J]. 农业装备与车辆工程,2008(4):10 ~ 14.
Gong Qingsong, Dong Azhong, Chen Jingxin, et al. Analysis and design for key mechanisms of a tracked vehicle [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2008(4):10 ~ 14. (in Chinese)

11 孙振杰,刘俊峰,李彩凤,等.微型农用履带式行走装置的设计方法[J]. 农机化研究, 2011(10):55 ~ 58.
Sun Zhenjie,Liu Junfeng,Li Caifeng, et al. The design method of mini agricultural crawler running device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2011(10): 55 ~ 58. (in Chinese)

12 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

13 Janarthanan B, Padmanabhan C, Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: simulation and experiment[J]. Journal of Terramechanics,2012,49(2):63 ~ 72.

14 孙运强. 橡胶履带底盘结构设计与实验仿真研究[D]. 大庆:东北石油学院,2010.
Sun Yunqiang. Rubber-tracked chassis structure design and experimental simulation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010. (in Chinese)

15 黄晓云,张国忠,张凤赐. 汽车总体设计专家系统的研制[J]. 中山大学学报,2003,42(3):31 ~ 34.
Huang Xiaoyun, Zhang Guozhong, Zhang Fengci. Development of expert system of overall vehicle design [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2003,42(3):31 ~ 34. (in Chinese)

16 黄晓云,张国忠,张凤赐. 基于参数化和专家系统技术的汽车总体设计 CAD 系统[J]. 东北大学学报,2003,24(8):806 ~ 809.
Huang Xiaoyun, Zhang Guozhong, Zhang Fengci. Vehicle overall design CAD system based on parametric technology and expert system[J]. Journal of Northeastern University,2003,24(8):806 ~ 809. (in Chinese)

17 巩青松. 履带式工作车辆设计及分析的关键技术研究[D]. 扬州:扬州大学,2008.

(上接第 18 页)

3 于林清,云锦凤. 中国牧草育种研究进展[J]. 中国草地, 2005, 27(3): 61 ~ 64.
Yu Linqing, Yun Jinfeng. Research progress of forage breeding in China [J]. Grassland of China, 2005, 27(3): 61 ~ 64. (in Chinese)

4 宋江腾,张淑敏. 小区播种机的研究现状及发展方向[J]. 农机化研究, 2004(4): 14 ~ 16.
Song Jiangteng, Zhang Shumin. Current situation and developmental orientation of plot seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 14 ~ 16. (in Chinese)

5 孙维恭,冯一兵,孙海波. 传动系优化及与发动机合理匹配研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2000 (4): 23 ~ 29.
Sun Weigong, Feng Yibing, Sun Haibo. Optimization of powertrain [J]. Tractor & Farm Transporter, 2000 (4): 23 ~ 29. (in Chinese)

6 王德成,高扬,王光辉,等. 一种自走式牧草小区作业机械: 中国,ZL201120286111.5[P]. 2012-05-23.

7 王德成,高扬,王光辉,等. 一种自走式牧草小区播种作业机械: 中国,ZL201120286067.8[P]. 2012-05-30.

8 王德成,高扬,王光辉,等. 一种自走式牧草小区耕整地作业机械: 中国,ZL201120286104.5[P]. 2012-04-11.

9 王德成,高扬,王光辉,等. 一种自走式牧草小区收获作业机械: 中国,ZL201120317707.7[P]. 2012-05-09.

10 王德成,高扬,王光辉,等. 一种自走式牧草小区运输作业机械: 中国,ZL201120285550.4[P]. 2012-04-11.

11 GB/T 18297—2001 发动机性能试验方法[S]. 2001.

12 刘惟信,戈平,李伟. 汽车发动机与传动系参数最优匹配的研究[J]. 汽车工程,1991(2): 65 ~ 72.
Liu Weixin, Ge Ping, Li Wei. Study of optimal matching between automobile engine and transmission parameters [J]. Automotive Engineering, 1991(2): 65 ~ 72. (in Chinese)

13 Peter Mizsey, Esmond Newson. Comparison of different vehicle power trains [J]. Journal of Power Sources, 2001, 102(1 ~ 2): 205 ~ 209.

14 宋宝玉,任秉银,于华波. 汽车传动系参数优化设计系统的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001, 33(2): 179 ~ 182.
Song Baoyu, Ren Bingying, Yu Huabo, et al. Optimization of automobile transmission parameters [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(2): 179 ~ 182. (in Chinese)