

果园多功能动力底盘设计与试验

郝朝会¹ 杨学军² 刘立晶² 尹素珍¹ 刘淑萍¹ 赵金辉³
(1. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
3. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:为解决果园作业机械适应性差、配套动力小、地隙高、转弯半径大、通过性差等问题,结合果园栽培模式和农艺等要求,设计了一种果园多功能动力底盘。对果园多功能动力底盘的整机结构和工作原理进行了阐述,设计了行走动力系统和后动力输出系统以及3路双作用液压快速挂接系统;对整机的转向性能、稳定性能、越埂性能进行了理论分析。对机架进行了有限元仿真分析,结果表明,在满载四轮着地状态下,车架最大变形发生在中间横梁部位,总变形量为5.08 mm,最大等效弹性应变为0.003 5,最大等效应力发生在前桥和车架铰接处,为390.52 MPa;在满载三轮着地状态下,车架最大变形发生在侧梁部位,总变形量为20.74 mm,最大等效弹性应变为0.005 8,最大等效应力发生在前桥和车架铰接处,为805.46 MPa。整机果园田间试验结果表明,果园多功能动力底盘行驶速度为0~35 km/h,田间作业速度为1~6 km/h,最小转弯半径为2 m,最大爬坡角为24°,最大越埂高度为235 mm,可挂接多种农具,能够满足果园的田间生产管理作业要求。

关键词: 果园; 底盘; 多功能; 设计; 试验

中图分类号: S224.9; S219.86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0066-08

Design and Experiment of Multifunctional Dynamic Chassis for Orchard

HAO Zhaohui¹ YANG Xuejun² LIU Lijing² YIN Suzhen¹ LIU Shuping¹ ZHAO Jinhui³
(1. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
3. State Key Laboratory of Soil Plant Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems such as poor adaptability, small supporting power, high ground clearance, large turning radius, poor pass-ability, etc. of the orchard operating machinery, combined with the orchard cultivation mode and agronomic requirements, a multifunctional dynamic chassis for orchard was designed. The structure and working principle of the multifunctional dynamic chassis for orchard were expounded, and the traveling power system and rear power output system and the three double-acting hydraulic quick-connecting output ports were designed. The theoretical of the steering performance, stability performance and crossing performance of the whole machine were analyzed theoretically. The finite element analysis of the frame was carried out to show that the maximum total deformation of the frame was 5.08 mm in the middle beam part, the maximum equivalent elastic strain of the frame was 0.003 5 and the maximum equivalent stress of the frame was 390.52 MPa at the hinge joint between the axle and the frame under the condition of full load four-wheel landing. The maximum total deformation was 20.74 mm at the side beam of the frame, the maximum equivalent elastic strain of the frame was 0.005 8 and the maximum equivalent stress of the frame was 805.46 MPa at the hinge joint between the axle and the frame under the condition of full load three-wheel landing. Field experiments were carried out in the orchard. The experiment results showed that the speed of multifunctional chassis for orchard was 0~35 km/h, field working speed was 1~6 km/h, minimum turning radius was 2 m, maximum climbing angle was 24° and maximum crossing height was 235 mm. Multifunctional chassis was able to connect a variety of agricultural tools as a multi-purpose machine, which can meet the

收稿日期: 2018-07-11 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701504)、国家创新方法工作专项(2016IM030200)和北京市科技计划项目(D151100003715003)

作者简介: 郝朝会(1984—),男,高级工程师,主要从事农业机械化装备与关键技术研究,E-mail: kkk-875@163.com

通信作者: 杨学军(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: camms@263.com

requirements of field production management operations in the orchard and improve the mechanized production management level of the orchard. The research result provided theoretical and experimental basis for the research of general-purpose dynamic chassis for orchard, and provided a basis for the improvement and lightweight design of the subsequent chassis.

Key words: orchard; chassis; multifunctional; design; experiment

0 引言

我国自 20 世纪 50 年代开始逐步推进果园机械化,由于地理环境、种植模式、经济水平等因素制约,果园机械化水平差异较大,总体机械化水平较低,主要依靠人工完成,生产效率低,劳动强度大。随着经济社会发展、城镇化建设、农业产业结构调整 and 供给侧改革的逐步推进,人口流失、劳动力短缺,生产成本逐年提高,已经制约了我国果品产业的良性有序发展;同时,传统种植模式果园逐步被淘汰,现代化的果园种植面积不断扩大,果园规模化发展和规范化管理的要求日趋强烈,果园机械化管理是果品产业发展的必然趋势^[1-3]。

国外的果园机械化发展较早,机械化程度较高,具备专用动力机械和作业机械及其配套机具,并改进适合机械化作业要求的果树栽培农艺,部分果园基本实现了田间管理、病虫害防治、收获等多项作业机械化。欧美等国家多采用大功率自走式跨行作业,作业效率较高,但机具成本较高;日、韩、意大利等国家以小型果园专用管理机械为主,整机小巧、结构紧凑,能更换多种工作部件,完成多项作业,但动力偏小。国内对果园机械化进行了研发,以悬挂式或牵引式配套果园专用农具,以及专用自走式作业机械,实现果园各环节的作业。但动力小、地隙高、转弯半径大、通用性差以及可配套农具少,无法满足现代化果园的生产需要^[1,3-4]。

针对上述问题,结合我国果园种植模式和农艺要求,本文对果园多功能底盘进行设计与试验研究,以解决果园生产和管理中存在的问题,提高我国果园机械化水平,提升果品产业的行业竞争力。

1 果园多功能动力底盘整体设计

我国果园的种植模式多样,果园分户管理,规模化和规范化的程度偏低,果园地势和土壤呈多样性,要求动力底盘功率大,适应性好,利用率高,在作业的过程中,需满足地隙低、轮陷小、转弯半径小、方便越埂、一机多用等要求。结合标准化果园的种植模式、农艺要求,研究开发果园自走式通用型动力底盘,通用性强,可挂接多种作业设备,实现多种功能^[4-6],设计参数为:配套动力为 36.75~44.20 kW,驱动方式为四轮驱动,转向方式为四轮转向,轮胎外侧

宽度不大于 1.4 m。动力输出方式为机械后动力输出和 3 路液压快速挂接输出,转弯半径不大于 3 m,行驶速度为 0~35 km/h。

1.1 整机结构和工作原理

1.1.1 整机结构

果园多功能底盘主要由车架、发动机、行走动力系统、座椅、换挡器、方向盘、前后桥、助力转向和刹车系统、后动力输出系统等组成,如图 1 所示。变速箱上的支架平台可以更换为货筐、升降机、药箱等,后动力输出系统可挂接风送式喷药系统,如图 2~4 所示。

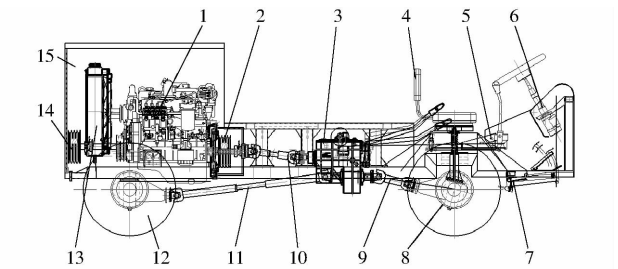


图 1 果园多功能动力底盘示意图

Fig. 1 Schematic of multifunctional dynamic chassis for orchard

- 1. 发动机 2. 行走离合器 3. 主变速箱 4. 座椅 5. 换挡器
- 6. 方向盘 7. 脚刹 8. 前轮 9. 前桥传动轴 10. 主传动轴
- 11. 后桥传动轴 12. 后轮 13. 散热器 14. 后动力输出轮
- 15. 后保护罩

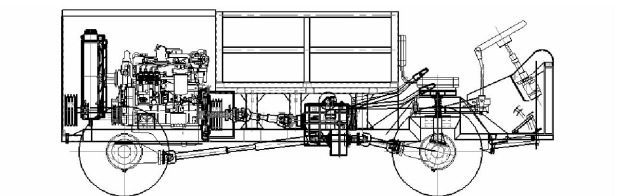


图 2 果园多功能动力底盘载货框示意图

Fig. 2 Schematic of cargo basket of multifunctional dynamic chassis for orchard

1.1.2 工作原理

果园多功能动力底盘的发动机产生的动力经行走离合器传递给主变速箱,通过换挡器实现换挡调速;并通过固定在发动机曲轴飞轮盘上的 V 型带轮传递给后动力输出系统,挂接多种作业农具;发动机自带的动力输出口接齿轮泵产生液压能,通过液压多路阀控制,传递给转向系统和 3 路双作用快速挂接输出装置,可快速插接各种液压作业农具。果园多功能动力底盘主要技术参数如表 1 所示。

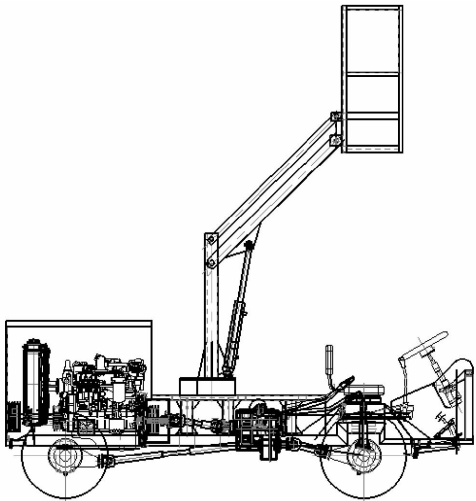


图 3 果园多功能动力底盘升降机示意图
Fig. 3 Schematic of elevator of multifunctional dynamic chassis for orchard

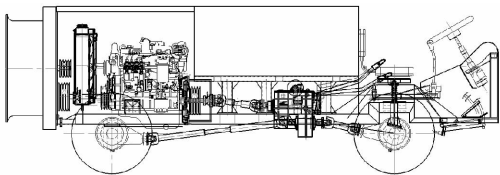


图 4 果园多功能动力底盘风送式喷雾机示意图
Fig. 4 Schematic of air-assisted sprayer of multifunctional dynamic chassis for orchard

表 1 果园多功能动力底盘主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of multifunctional dynamic chassis for orchard

参数	数值/方式
配套动力/kW	44. 2
驱动方式	四轮驱动
转向方式	四轮转向
轮胎外侧宽度/m	1. 4
最小转弯半径/m	2
最小离地间隙/mm	150
行驶速度/(km·h ⁻¹)	0 ~ 35
整车净质量/kg	1 560
载质量/kg	1 000
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 500×1 450×1 480

1. 2 动力系统设计

果园多功能底盘的动力系统主要包括行走动力系统和后动力输出系统,以及液压快速插接输出系统,液压系统动力来源于发动机取力口齿轮泵,通过单稳阀分配到转向系统和 3 路双作用快速插接口,实现液压负载快速插接作业。

发动机飞轮盘上固定有主离合器,主离合器主轴的动力可以进行离合控制主变速箱的动力输入,实现行走动力的换挡操作。主离合器的外壳和发动机曲轴飞轮盘固定,主离合器外壳为 V 型带轮,动力通过 V 型带传递给副变速箱,通过万向传动轴实

现后动力的输出,挂接外置机具作业。动力系统原理如图 5 所示。

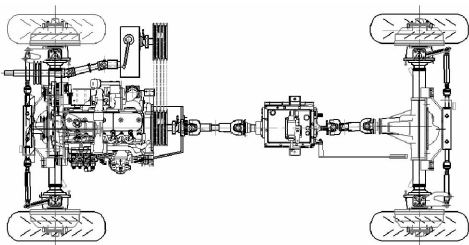


图 5 果园多功能动力底盘动力系统原理图
Fig. 5 Schematic of dynamic system of multifunctional dynamic chassis for orchard

1. 2. 1 行走动力系统

行走动力系统的设计采用传统常规原则进行设计,根据整车质量以及田间作业工况,采用摩擦片式离合器,可实现对主变速箱的动力保护,为使整车结构紧凑,减少刚性连接对主轴的损伤,采用万向节传动轴;考虑作业和转运速度,选取主变速箱为高低挡两级一体式变速箱,每一级有 3 个前进挡和 1 个倒挡,共 8 个挡位,主变速箱各级传动比如表 2 所示。

表 2 主变速箱各级传动比

Tab. 2 Transmission ratio of main gearbox at all levels

	I 挡	Ⅱ挡	Ⅲ挡	R 挡
高档	7. 03	3. 02	1. 5	6. 47
低挡	20. 91	8. 99	4. 46	19. 26

传动系统总传动比等于各部分传动比的乘积,即

$$i_z = i_1 i_2 i_3 \tag{1}$$

式中 i_1 ——发动机和主变速箱传动比

i_2 ——主变速箱挡位传动比

i_3 ——车桥传动比

整机的行走速度与发动机转速、总传动比和轮胎直径有关,即

$$v_z = 60 \pi v_1 i_z D \tag{2}$$

式中 v_1 ——发动机转速

v_z ——整机行走速度

D ——轮胎直径

考虑果园作业时整车地隙和轮陷等因素,选择 6. 00-12 型人字花纹轮胎,充气后外直径为 640 mm,发动机各转速下不同挡位速度如表 3 所示。

1. 2. 2 后动力输出系统和液压动力系统

后动力输出系统的动力来源于主离合器 V 型带轮外壳,通过 V 型带 1:1 将动力传递到副变速箱,考虑果园作业机械动力和配套转速等因素,设计输出转速为 1 000 r/min,选用 1:2 直齿轮减速箱,减速箱动力通过万向节传动轴传递给作业机具。

表 3 发动机各转速下挡位速度

Tab.3 Speed of chassis corresponding to gear at each speed of engine km/h

发动机转速/ (r·min ⁻¹)	高低挡	挡位			
		I 挡	Ⅱ 挡	Ⅲ 挡	R 挡
1 000	低	1.07	2.50	5.03	1.17
	高	3.19	7.43	14.96	3.47
1 500	低	1.61	3.74	7.55	1.75
	高	4.79	11.15	22.44	5.20
2 000	低	2.15	4.99	10.06	2.33
	高	6.39	14.86	29.93	6.94
2 400	低	2.58	5.99	12.08	2.80
	高	7.66	17.84	35.91	8.33

液压动力系统由发动机取力口连接齿轮油泵，将发动机机械能转换为齿轮油泵的液压能，通过单稳阀将液压能分给转向系统和后动力输出系统，根据发动机取力口的性能参数和挂接机具功率核算等因素，选择 16 mL/r 的齿轮油泵，额定压力 20 MPa，最高压力 25 MPa。

2 底盘车架结构设计及底盘性能分析

2.1 底盘车架结构设计

车架结构、整体质量的布局、动静载荷的分布等影响底盘整机性能^[7-9]。借鉴现有果园自走式作业机械底盘结构，设计果园多功能动力底盘车架为矩形框架式架构，为减少发动机振动、散热及噪声对驾驶员的影响，发动机后置；为保证底盘整机性能，后桥和车架刚性连接，前桥与车架铰接，减少了田间地形变化对车架的冲击，更好地适应田间作业。驾驶员位置在车架前方，视野开阔，并在驾驶台右侧设有操作平台，方便操控，驾驶安全性好。为保证整机重心平衡，主变速箱传动系统在车架中部，主变速箱上方是多功能操作平台，固定药箱、升降机等机具；药箱在底盘中部位置，可以在喷雾作用中保证整机重心不会因药液的减少而发生较大的改变。车架尾部挂接喷雾装置等农具。为保证车架强度和减少整机质量，车架主梁选用 65Mn 截面为 80 mm × 60 mm × 5 mm 矩形管，驾驶室平台支撑梁选用 65Mn 截面为 60 mm × 40 mm × 3 mm 矩形管，车架结构示意图如图 6 所示。

2.2 底盘性能理论分析

2.2.1 转向性能

果园多功能底盘为四轮驱动转向，当转向时，前后桥上转向油缸同时伸缩运动，使前后桥上轮胎相反方向转动，从而达到减小转弯半径的效果。当底盘处于平稳转向时，转向示意图如图 7 所示。

由文献[10]可知，最小转向半径 R_{min} 为

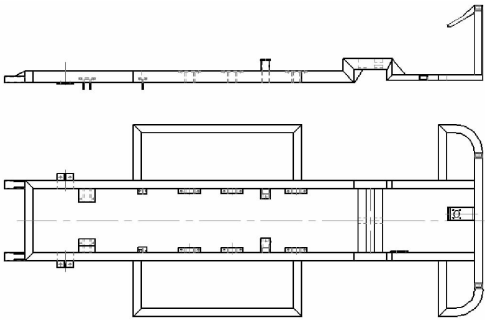


图 6 果园多功能动力底盘车架示意图
Fig.6 Schematic of frame of multifunctional dynamic chassis for orchard

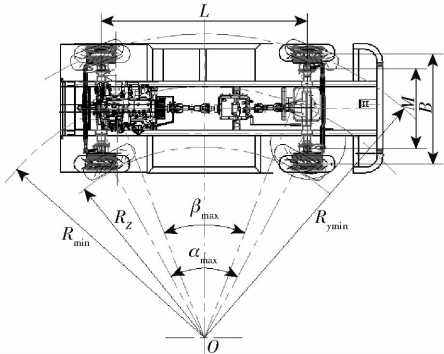


图 7 果园多功能动力底盘转向示意图
Fig.7 Schematic of steering of multifunctional dynamic chassis for orchard

$$R_{min} = \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 + \left(\frac{L \cot \alpha_{max}}{2} + \frac{M}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

最小转向圆半径 R_{ymin} 为

$$R_{ymin} = \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 + \left(\frac{L \cot \alpha_{max}}{2} + M \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{B - M}{2} \tag{4}$$

- 式中 L ——果园多功能底盘轴距
 M ——左右转向节主销中心线与地面交点间距离
 B ——果园多功能底盘轮距
 α_{max} ——内轮最大偏转角

果园多功能底盘在田间作业过程中，转向通过性与转向内侧轮的转弯半径有关，设定最小转弯半径为内侧转向轮内侧轨迹圆半径，即

$$R_z = R_{ymin} - B + \frac{b}{2} \tag{5}$$

式中 b ——轮胎宽度

果园多功能动力底盘的轴距 L 为 2 230 mm，左右转向节主销中心线与地面交点间距离 M 为 865 mm，轮距 B 为 1 120 mm，最大偏转角 α_{max} 为 28.82°，轮胎宽度 b 为 165 mm，代入式(5)，求得最小转弯半径 R_z 为 2.11 m。

2.2.2 稳性能

果园多功能底盘在田间作业时，田间地况较复

杂,需考虑整机的行驶稳定性。以纵向稳定性来衡量整机的行驶稳定性能。当果园多功能底盘在制动状态下停放在坡道上时,以不致产生翻倾、滑移的最大坡度角来评价果园多功能底盘的稳定性^[11]。当果园多功能底盘匀速上坡行驶时,忽略空气阻力,上坡速度小,以轮胎为刚性体,如图 8a 所示,建立力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_{t1} + F_{t2} = G\sin\alpha_{lim} \\ F_{n1} + F_{n2} = G\cos\alpha_{lim} \\ Gh\sin\alpha_{lim} + F_{n1}L = GL_1\cos\alpha_{lim} \end{cases} \quad (6)$$

- 式中
- F_{t1} ——土壤对前轮切向作用力

F_{t2} ——土壤对后轮切向作用力

G ——果园多功能底盘重力

α_{lim} ——上坡极限翻倾角

F_{n1} ——土壤对前轮法向作用力

F_{n2} ——土壤对后轮法向作用力

h ——重心到地面的垂直高度

L_1 ——重心到后桥轴心水平距离

当果园多功能底盘的前轮刚好不受土壤的反作用力时,即为上坡极限翻倾临界状态,则前轮的切向作用力 $F_{t1} = 0$,可得上坡极限翻倾角为

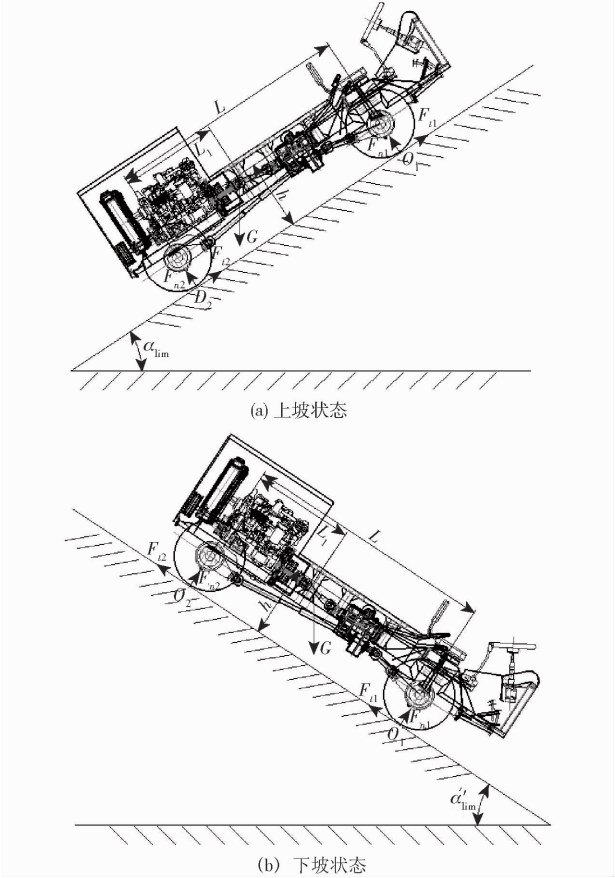


图 8 果园多功能动力底盘纵向极限翻倾受力分析
Fig.8 Force analysis of longitudinal limiting overturn of multifunctional dynamic chassis for orchard

$$\alpha_{lim} = \arctan \frac{L_1}{h} \quad (7)$$

当果园多功能底盘匀速下坡行驶时,忽略空气阻力,下坡速度小,以轮胎为刚性体,如图 8b 所示,建立力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_{t1} + F_{t2} = G\sin\alpha'_{lim} \\ F_{n1} + F_{n2} = G\cos\alpha'_{lim} \\ Gh\sin\alpha'_{lim} + F_{n2}L = G(L - L_1)\cos\alpha'_{lim} \end{cases} \quad (8)$$

式中 α'_{lim} ——下坡极限翻倾角

当果园多功能底盘的后轮刚好不受土壤的反作用力时,即为下坡极限翻倾临界状态,则后轮的切向作用力 $F_{t2} = 0$,可得下坡极限翻倾角为

$$\alpha'_{lim} = \arctan \frac{L - L_1}{h} \quad (9)$$

由式(7)、(9)可知,果园多功能动力底盘纵向极限翻倾角与重心位置有关,当重力作用线位于较低轮着地点上方时,果园多功能动力底盘可稳定于坡上,不致发生翻倾。将果园多功能动力底盘的三维模型导入 SolidWorks,得到重心到地面垂直高度 $h = 643 \text{ mm}$,重心到后桥轴线水平距离 $L_1 = 896 \text{ mm}$,代入式(7)、(9)可得上、下坡极限翻倾角为 54.33° 、 64.27° ,可以看出,果园多功能动力底盘具有较好的稳定性。

2.2.3 越埂性能

果园多功能底盘在田间作业时需要克服障碍越埂,此时速度较慢,可作为静力学问题研究。假设轮胎为刚形体,当前轮越埂时受力分析如图 9 所示。

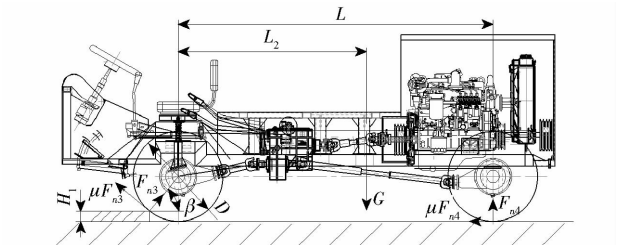


图 9 果园多功能动力前轮越埂受力分析
Fig.9 Force analysis of front wheel crossing of multifunctional dynamic chassis for orchard

建立前轮越埂力学平衡方程为

$$\begin{cases} \mu F_{n3} \sin\beta + \mu F_{n4} = F_{n3} \cos\beta \\ F_{n3} \sin\beta + F_{n4} + \mu F_{n3} \cos\beta = G \\ \mu F_{n3} \frac{D}{2} + GL_2 + \mu F_{n4} \frac{D}{2} = F_{n4}L \\ \sin\beta = 1 - \frac{2H_1}{D} \end{cases} \quad (10)$$

- 式中
- F_{n3} ——土壤对前轮法向作用力

F_{n4} ——土壤对后轮法向作用力

μ ——附着系数

β ——前轮与障碍夹角
 L_2 ——前桥轴线到重心距离
 H_1 ——前轮越埂高度

化简式(10)得前轮越障高度为

$$H_1 = \frac{D}{2} \left[1 - \sin \left(\arctan \frac{L - (L - L_2)(1 + \mu^2)}{\mu L} \right) \right] \tag{11}$$

后轮越埂时受力分析如图 10 所示。

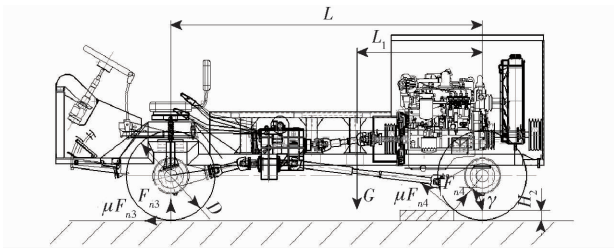


图 10 果园多功能动力底盘后轮越埂受力分析
Fig. 10 Force analysis of back wheel crossing of multifunctional dynamic chassis for orchard

建立后轮越埂力学平衡方程为

$$\begin{cases} \mu F_{n4} \sin \gamma + \mu F_{n3} = F_{n4} \cos \gamma \\ F_{n4} \sin \gamma + F_{n3} + \mu F_{n4} \cos \gamma = G \\ \mu F_{n4} \frac{D}{2} + F_{n3} L + \mu F_{n3} \frac{D}{2} = G(L - L_1) \\ \sin \gamma = 1 - \frac{2H_2}{D} \end{cases} \tag{12}$$

式中 γ ——后轮与障碍夹角

H_2 ——后轮越埂高度

化简式(12)得前轮越障高度为

$$H_2 = \frac{D}{2} \left[1 - \sin \left(\arctan \frac{L - L_1(1 + \mu^2)}{\mu L} \right) \right] \tag{13}$$

查相关资料取 $\mu = 0.6$, 果园多功能底盘结构参数为 $L = 2\,230\text{ mm}$ 、 $L_1 = 896\text{ mm}$ 、 $L_2 = 1\,334\text{ mm}$ 、 $D = 640\text{ mm}$, 代入式(11)、(13)中, 计算得 $H_1 = H_2 = 115.57\text{ mm}$ 。果园多功能底盘为四轮驱动, 前、后轮的越埂高度基本相同, 在田间作业时, 越埂时车轮缓慢爬行, 越埂高度与车体中间位置的最低离地间隙等因素有关, 可在后续田间试验中测得。

3 车架有限元仿真分析

基于 SolidWorks 对车架进行三维建模, 运用 Workbench 软件对车架整体刚度及强度进行仿真分析, 以指导样机生产, 保证车架具有承受多种工况下冲击载荷的能力。为提高仿真的精度, 更好地指导生产, 对果园多功能底盘的车架进行了简化处理, 处理焊缝和机架主梁一体, 不考虑焊接对车架材料的影响, 忽略部分焊接件^[12-15]。果园多功能动力底盘车架三维模型如图 11 所示。

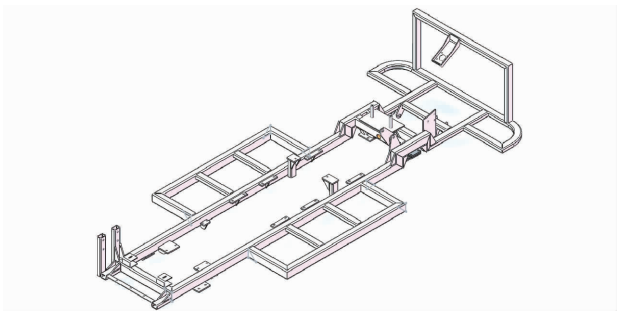


图 11 果园多功能动力底盘车架三维模型示意图
Fig. 11 Schematic of 3D model of frame of multifunctional dynamic chassis for orchard

导入 Workbench 软件, 按 65Mn 材料特性进行设置, 设定弹性模量 210 GPa, 屈服强度为 785 MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7 810 kg/m³, 并进行网格划分; 根据车架上的发动机、主变速箱、燃油箱、液压油箱、散热器、驾驶员等实际位置上载荷以面载荷方式施加相应载荷力, 以满载荷(药箱满药)状态极限工况设置加速度为 10 g, 对满载四轮着地状态和满载三轮着地状态进行分析, 满载四轮着地应变和受力分析如图 12 所示。

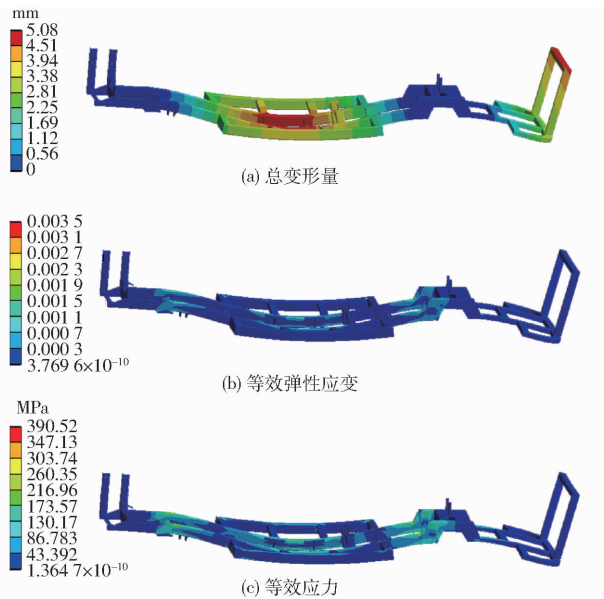


图 12 车架满载四轮着地应变和受力分析
Fig. 12 Strain and force analysis of frame with four-wheel landing

由图 12 可以看出, 在满载四轮着地状态下, 车架的最大变形发生在中间横梁部位, 总变形量为 5.08 mm, 车架的最大等效弹性应变为 0.003 5, 车架的最大等效应力发生在前桥和车架铰接处, 为 390.52 MPa; 从结果可以看出, 满载四轮着地时, 车架能够满足果园的田间作业要求。

当多功能底盘在田间作业时, 会出现一轮悬空三轮着地的工况, 因为前桥和车架是铰接方式, 所以前轮始终着地, 后桥和车架是刚性连接, 所以有一轮

悬空状态。当满载状态,对后桥一轮悬空状态进行分析,满载三轮着地应变和受力分析如图 13 所示。

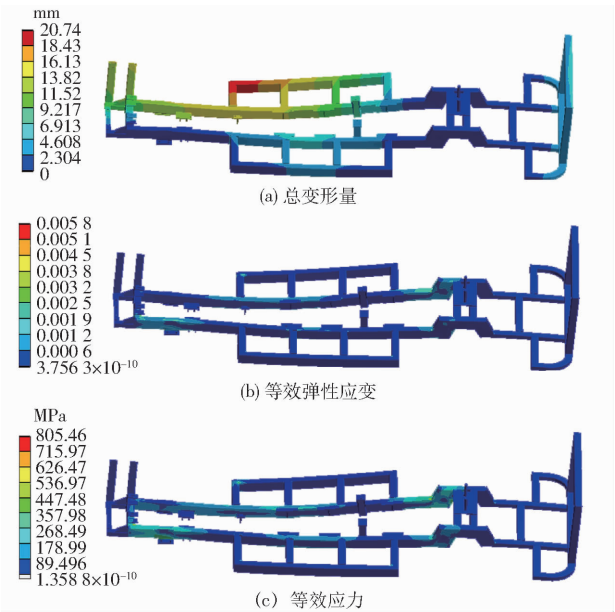


图 13 车架满载三轮着地应变和受力分析

Fig. 13 Strain and force analysis of frame with three-wheel landing

由图 13 可看出,在满载三轮着地状态下,车架的最大变形发生在侧梁部位,总变形量为 20.74 mm,车架最大等效弹性应变为 0.005 8,车架的最大等效应力发生在前桥和车架铰接处,为 805.46 MPa;满载三轮着地极限工况下,车架处于扭曲状态,车架侧梁位移较大,但从车架实际尺寸以及材料属性看,车架不会失效。最大等效应力发生在前桥铰接处,前桥铰接的横梁为两段横梁,并有石墨铜套润滑固定,铰接轴直径 30 mm,所以铰接强度足够,不会发生失效。

基于 Workbench 分析结果,在极限满载荷工况下,整车运行速度较快,加速度设置较大,得到的应变和应力分析图,而田间正常作业时,多功能底盘工作速度较小,对于车架的冲击会相对减小。仿真的结果分析对薄弱部位进行加固或改进设计,以及后续车架的优化和轻量化研究等具有指导作用^[16]。

4 田间试验

2018 年 5 月在北京市通州区于家务乡西堡村樱桃园试验基地进行田间性能试验,如图 14 所示。

试验时,环境温度和试验用液体的温度在 20 ~ 35℃之间。试验仪器设备:卷尺、电子秤、台秤、量杯、秒表、压力计等。试验介质:常温下不含固体悬浮物的清水。

整机性能试验按照 Q/CP XDNZ0001—2018《ZN—604 型果园自走式通用型动力底盘》试验方法和果园通用型底盘作业装备试验大纲进行^[17-20]。



图 14 田间作业场景

Fig. 14 Field experiment

对多功能动力底盘样机行驶速度、转弯半径、最大爬坡角和越埂高度等指标进行检测。

(1)行驶速度:在干燥平坦的混凝土或沥青路面测试,进行 3 次,每次行走 50 m,调节调速旋钮至速度最高,计算速度为

$$v = \frac{3.6s}{t}$$

(14)

式中 s ——行走路程 t ——行走时间

(2)转弯半径:在干燥平坦的混凝土或沥青路面测试,进行 3 次,以最低前进挡平稳行驶,转向盘处于左转或右转的极限位置时保持不变,行驶 360°后驶出测试区,量取内侧转向轮胎内侧轨迹圆半径。

(3)越埂坡度:对果园田间道路、田埂坡度、田埂高度等进行试验,以最低前进挡行驶平稳翻越田埂,进行测量,采集越过的田埂数据。

对各项指标进行重复试验 3 次,对数据进行人工处理取平均值,试验结果如表 4 所示。

表 4 田间试验结果

Tab.4 Results of field experiment

参数	检测结果	技术要求
行驶速度/(km·h ⁻¹)	0 ~ 35	0 ~ 35
作业速度/(km·h ⁻¹)	1 ~ 6	1 ~ 6
最小转弯半径/m	2	≤3
最大爬坡角/(°)	24	≥20
最大越埂高度/mm	235	≥150

试验结果表明,果园多功能动力底盘行驶速度为 0 ~ 35 km/h,田间作业速度为 1 ~ 6 km/h,最小转弯半径为 2 m,最大爬坡角为 24°,最大越埂高度为 235 mm,田间试验结果均能满足设计要求,能够挂

接多种农具,能够满足果园的田间生产管理作业要求,提升了果园机械化生产管理作业水平。转弯半径试验值较理论值小一些,误差原因可能为人工调整轮胎转向推杆误差和轮胎转向时向内侧滑移。越埂高度与多功能底盘下传动轴的高度有关,当前轮越过田埂,使传动轴不碰到田埂为最大越埂高度。

5 结论

(1)结合标准化果园的种植模式和农艺要求,设计了一种果园多功能动力底盘,对底盘整机结构、工作原理和动力系统进行了设计。

(2)对车架结构进行了设计,对底盘性能进行了理论分析,理论分析结果表明:最小转弯半径约为 2.11 m;上、下坡极限翻倾角分别为 54.33°、64.27°;前、后轮的越埂高度为 115.57 mm。

(3)对车架进行三维建模,利用 Workbench 软件进行应变和应力分析。车架有限元仿真分析结果表明,在满载四轮着地状态下,车架的最大变形发生在中间横梁部位,总变形量为 5.08 mm,最大等效弹性应变为 0.003 5,最大等效应力发生在前桥和车架铰接处,为 390.52 MPa;在满载三轮着地状态下,车架的最大变形发生在侧梁部位,总变形量为 20.74 mm,最大等效弹性应变为 0.005 8,最大等效应力发生在前桥和车架铰接处,为 805.46 MPa。

(4)多功能动力底盘田间性能试验结果表明,果园多功能动力底盘行驶速度为 0 ~ 35 km/h,田间作业速度为 1 ~ 6 km/h,最小转弯半径为 2 m,最大爬坡角为 24°,最大越埂高度为 235 mm,可挂接多种农具,能够满足果园的田间生产管理作业要求。

参 考 文 献

- 1 常有宏,吕晓兰,蒯经,等.我国果园机械化现状与发展思路[J].中国农机化学报,2013,34(6):21-26.
CHANG Youhong, LÜ Xiaolan, LIN Jing, et al. Present state and thinking about development of orchard mechanization in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 21-26. (in Chinese)
- 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.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)
- 3 傅锡敏,吕晓兰,丁为民,等.我国果园植保机械现状与技术需求[J].中国农机化,2009,30(6):10-13,17.
FU Ximin, LÜ Xiaolan, DING Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009, 30(6): 10-13, 17. (in Chinese)
- 4 邱威.自走式果园风送定向喷雾机的研制和试验[D].南京:南京农业大学,2012.
QIU Wei. Development and experimental research of self-propelled air assisted orchard sprayer [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 5 沈红光.高地隙折腰式水田动力底盘设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
SHEN Hongguang. Design and experiment of high-clearance roll-waist power chassis for paddy field [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 6 王金武,唐汉,沈红光,等.高地隙折腰式水田多功能动力底盘设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(16):32-40.
WANG Jinwu, TANG Han, SHEN Hongguang, et al. Design and experiment of high clearance roll-waist multifunctional power chassis for paddy field [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 32-40. (in Chinese)
- 7 刘大为,谢方平,李旭,等.小型果园升降作业平台的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):113-121.
LIU Dawei, XIE Fangping, LI Xu, et al. Design and experiment of small lifting platform in orchard [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 113-121. (in Chinese)
- 8 吴伟斌,廖劲威,洪添胜.山地果园运输机车架结构分析与优化[J].农业工程学报,2016,32(11):39-47.
WU Weibin, LIAO Jinwei, HONG Tiansheng. Analysis and optimization of frame structure for wheeled transporter in hill orchard [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 39-47. (in Chinese)
- 9 张娜娜,赵匀,刘宏新.高速水稻插秧机车架的轻量化设计[J].农业工程学报,2012,28(3):55-59.
ZHANG Nana, ZHAO Yun, LIU Hongxin. Light design of frame for self-propelled chassis rice trans planter [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 55-59. (in Chinese)
- 10 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上下册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 11 邱威,丁为民,申宝营.3WZ-700型果园喷雾机通过性能分析[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):63-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120612&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.012.
QIU Wei, DING Weimin, SHEN Baoying. Analysis on traffic ability of 3WZ-700 orchard sprayer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 63-67. (in Chinese)
- 12 邱白晶,何耀杰,盛云辉.喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):112-116,105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140818&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.018.
QIU Baijing, HE Yaojie, SHENG Yunhui. Finite element model analysis and structure optimization of spray boom [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 112-116, 105. (in Chinese)

- 69-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170308&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.008.
- YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Buffer device of transplanting mechanism for plug seedlings based on transmission with incomplete non-circular gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 69-75. (in Chinese)
- 20 左彦军, 曹鹏, 赵匀, 等. B样条非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构的设计与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 10-17.
- ZUO Yanjun, CAO Peng, ZHAO Yun, et al. Design and optimization of transplanting mechanism with B-spline non-circular planet gear train for rice pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 10-17. (in Chinese)
- 21 SLEESONGSOM S, BUREERAT S. Four-bar linkage path generation through self-adaptive population size teaching-learning based optimization[J]. Knowledge Based Systems, 2017, 135: 180-191.
- 22 叶秉良, 吴国环, 俞高红, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构移栽臂设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 45-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150707&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.007.
- YE Bingliang, WU Guohuan, YU Gaohong, et al. Design and test on transplanting arm of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 45-52. (in Chinese)
- 23 赵匀, 赵雄, 张玮炜, 等. 水稻插秧机现代设计理论及方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 65-69.
- ZHAO Yun, ZHAO Xiong, ZHANG Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 65-69. (in Chinese)
- 24 叶秉良, 朱浩, 俞高红, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 53-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160508&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008.
- YE Bingliang, ZHU Hao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 53-61. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 73 页)

- 13 SEUNG H, DAE-GYUN A, SEONG-JONG K, et al. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48(2): 170-177.
- 14 HELMUT D, CHRISTIAN G, KLAUS H. Fatigue analysis of welding seams and spot joints in automotive structures[C]. SAE Paper 2005011323, 2005.
- 15 AO K, NIYAMA J, MATSUUI T, et al. Analysis of torsional stiffness share rate of truck frame[C]. SAE Paper 912627, 1991.
- 16 陈志, 周林, 赵博, 等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 19-25.
- CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 19-25. (in Chinese)
- 17 闻德生, 商旭东, 潘为圆, 等. 齿轮型多泵多马达传动系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 399-406. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170653&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170653&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.053.
- WEN Desheng, SHANG Xudong, PAN Weiyan, et al. Design and experiment on gear multi-pump and multi-motor driving system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 399-406. (in Chinese)
- 18 王金峰, 王金武, 闫东伟, 等. 3SCJ-2型水田行间除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 71-78, 202. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170609&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170609&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.009.
- WANG Jinfeng, WANG Jinwu, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of 3SCJ-2 type row weeding machine for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 71-78, 202. (in Chinese)
- 19 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 38-46.
- FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 38-46. (in Chinese)
- 20 刘平义, 王春燕, 李海涛, 等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 74-81. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180210&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180210&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.010.
- LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 74-81. (in Chinese)