

丘陵山地果园全液压遥控式履带动力底盘设计与试验

李善军^{1,2} 陈辉龙^{1,2} 彭际博^{1,2} 孟亮^{1,2} 张鑫^{1,2} 李明震^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对目前丘陵山地果园作业农用底盘整机体积大、行驶作业操作繁琐和通过性差等问题,结合丘陵山地果园开沟、除草和修剪等农艺管理环节的实际需求,设计了一款全液压遥控式履带动力底盘。首先,对动力底盘的整机结构和工作原理进行了阐述;其次,对前置挂载机构、行走系、变幅宽底盘、液压系统、遥控系统等关键部件进行设计和相应的匹配选型;最后,对整机进行了性能试验。试验结果表明:动力底盘在最小幅宽(1 220 mm)和最大幅宽(1 620 mm)的直线行驶偏移率分别为2.24%和2.2%,均满足相应国家标准($\leq 6\%$)要求。底盘的转向机动性能良好,最小幅宽原地转弯半径为905 mm,可适应丘陵山地果园相对狭窄的坡地作业环境。遥控操作上下斜坡、翻越田埂、跨越畦沟等过程平稳,满足丘陵山地果园非结构化地形行走要求。挂载链式开沟器进行开沟作业时,沟深稳定系数为88.5%,沟宽稳定系数为92.5%,满足国家标准($\geq 85\%$)要求。整机工作性能满足丘陵果园复杂坡度地形管理作业要求,可为丘陵山地果园田间管理作业的有效实施提供综合应用平台和技术支撑。

关键词: 丘陵山地果园; 全液压驱动; 变幅宽履带动力底盘

中图分类号: S224.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0119-09

OSID:



Design and Test of Hydraulic Remote Control Crawler Power Chassis for Hilly and Mountainous Orchards

LI Shanjun^{1,2} CHEN Huilong^{1,2} PENG Jibo^{1,2} MENG Liang^{1,2} ZHANG Xin^{1,2} LI Mingzhen^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problems of large size, cumbersome operational procedures, and poor maneuverability of agricultural chassis currently for hilly orchard, as well as the practical requirements of cultivation management tasks such as trenching, weeding, and pruning in hilly orchards, a hydraulic remote control crawler power chassis was designed. Firstly, the overall structure and working principle of the power chassis were described. Secondly, key components such as the front-mounted mechanism, walking system, variable-width chassis, hydraulic system, and remote control system were designed and appropriately matched. Finally, performance tests were conducted on the entire machine. The tests revealed that the deviation rates of the power chassis during straight-line travel at the minimum width (1 220 mm) and maximum width (1 620 mm) were 2.24% and 2.2% respectively, both satisfying the corresponding national standards ($\leq 6\%$) requirements. The chassis exhibited good steering maneuverability, with a minimum width turning radius of 905 mm, enabling it to adapt to the narrow slope working environment of hilly orchards. The remote control operation demonstrated smooth processes such as ascending and descending slopes, crossing field ridges, and traversing furrows, meeting the requirements of walking on unstructured terrain in hilly orchards. When equipped with a mounted chain-type ditcher for trenching operations, the stability coefficient of trench depth was 88.5%, and the stability coefficient of trench width was 92.5%, both meeting the national standards ($\geq 85\%$) requirements. The overall performance of the machine met the demands of managing complex sloped

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-27

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2021BBA091、2022BBA029)、国家柑橘产业技术体系项目(CARS-26)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662023GXPY007)

作者简介: 李善军(1977—),男,教授,博士,主要从事水果生产机械化技术与智能装备研究,E-mail: shanjunlee@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 李明震(1980—),男,讲师,博士,主要从事丘陵山地智能装备研究,E-mail: mingzhen_li@mail.hzau.edu.cn

terrains in hilly orchards, providing a comprehensive application platform and technical support for the effective implementation of field management operations in hilly mountainous orchards.

Key words: hilly and mountainous orchards; fully hydraulic drive; variable amplitude wide track chassis

0 引言

我国是水果生产世界第一大国,2021 年种植面积达 $1.29 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1-2],其中优质果园主要分布在川中、江南、两广、山东及陕甘等以丘陵山地为主的地区。但受立地条件和种植模式的影响,林果(含桑茶)生产机械化水平总体小于 20%^[3]。目前国内丘陵山地作业的主要机械为手扶拖拉机和微耕机,存在动力小、操作困难、功能单一等缺点^[4]。因此,亟需设计一款操作简单、动力强劲、功能多样的动力底盘。

动力底盘是果园机械的基础,集传动、行走、液压、转向、制动、机电液集成控制等技术于一体^[5],可稳定、高效、可靠承载、牵引、外挂其他功能性农机具,从而完成农业生产任务^[6]。国外对果园机械的研究较早,美国、加拿大等国家主要为位于地势平坦区的大规模果园,果园机械以大型综合性机具为主,动力底盘多采用轮式。意大利、日本等国家的果园种植环境与我国类似,果园机械以轻型化和小型化为主,动力底盘多采用小型履带式^[3]。英国 BOMFORD 公司的 Flailbot 系列履带动力底盘采用小型多缸柴油发动机为动力源,通过更换不同的前置作业机具可实现除草、开沟、推土、除雪、开荒等功能。意大利 ENERGREEN 公司所设计的 RoboEVO 系列履带动力平台也能通过更换不同的前置作业机具实现 24 种作业功能,以满足更多工况需求。

为提高动力底盘的性能以及对不同果园的适应性,国内学者进行了一系列研究。对于通行性较好的果园,研究者对轮式动力底盘^[7-9]进行了相关研究,可以搭载不同的作业模块进行作业,但并不适宜在丘陵山地复杂环境下使用。丘陵山地作业需要具备良好的爬坡和越障能力、转场能力以及人机作业安全保障能力。王亚等^[10]、刘平义等^[11]对仿地形、可自动调平的仿形动力底盘进行了研究,适用于丘陵山地地形,但该研究仅完成了比例模型样机试制和作业模拟,并未进行实际作业验证。针对适用于南方丘陵山地的履带式动力底盘^[12-14],王锋等^[12]设计了一种三角履带式果园动力底盘,最大爬坡角度为 15°,能够跨越高度为 528 mm 的垂直障碍物;赵林亭等^[13]设计了一种自走式电动履带底盘,整机结构和电路采用模块化设计,便于更换不同模块,并

具备遥控和安全防护功能,保证作业安全;孙景彬等^[14]设计了一款遥控全向调平地拖拉机,能够在横向坡地 0°~15°和纵向坡地 0°~10°的条件下实现车身的横向和纵向调平,有效提高了拖拉机在坡地上的行驶和作业稳定性。但相较于国外,上述研究大部分处于理论分析和模型研究阶段。

本文结合丘陵山地非结构化果园田间管理作业需求,提出以全液压驱动、遥控作业操作、前置挂载机构、防侧翻相融合的履带动力底盘设计方案。对关键部分进行设计和匹配选项,完成整机研发,通过试验对整机性能进行验证,以期为丘陵山地果园田间管理提供装备支持。

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构

动力底盘三维结构如图 1 所示,前端为挂载机构,装配有液压快接头,为前端作业机具提供动力,动力底盘使用柴油发动机,发动机通过联轴器带动闭式三联柱塞泵为行走机构和作业机构提供动力,底盘为可变幅宽设计,车体内安装整车电源、液压油箱、柴油箱、液压阀座、散热器与整机控制系统。

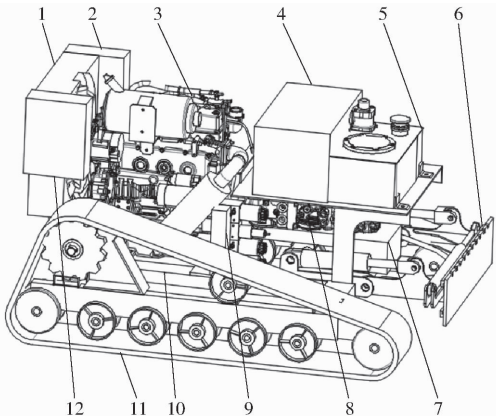


图 1 全液压遥控式履带动力底盘整机结构示意图

Fig.1 Schematic of structure of fully hydraulic remote control crawler power chassis

- 1. 散热器 2. 控制箱 3. 柴油发动机 4. 柴油箱 5. 液压油箱
- 6. 前置挂载机构 7. 电池 8. 三联泵 9. 液压阀座 10. 机架
- 11. 履带行走系 12. 遥控器接收端

1.2 工作原理

动力底盘为全液压驱动设计,即行走系、作业功能系、工作载具皆为液压驱动。工作过程即发动机带动闭式柱塞泵,提供压力油,将机械能转换为液压油的压力能。压力油带动液压马达旋转,从而驱动

履带行走机构;同时压力油经由液压阀座控制液压油缸伸缩,从而控制前置挂载机构的左右横移、上下摆动以及底盘的伸缩;最后低压液压油经散热器冷却后回至油箱。

动力底盘主要的工作场景为丘陵山地果园,需要具备一定的行驶稳定性和通过性^[15],整机通过性和稳定性主要影响参数有整机尺寸、重心高度、履带接地长度、最小离地间隙、接近角和离去角。综合考虑确定设计目标为:①整机结构紧凑,重心低,通过性高。②动力输出控制灵敏便捷,行驶作业灵活。③动力底盘提供前置作业机具快速更换系统,可搭载多种作业机具。④可遥控控制整机行驶作业,控制方式简单,延迟低。总体技术参数如表1所示。

表1 全液压遥控式履带动力底盘设计参数
Tab.1 Design parameters of fully hydraulic remote controll crawler power chassis

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 900×1 220×1 006
履带节距×宽度/(mm×mm)	230×180
履带节数	72
履带接地长度/mm	1 400
最小离地间隙/mm	180
接近角/(°)	35
离去角/(°)	30
最大爬坡角/(°)	≥25
整机质量/kg	1 100
发动机功率/kW	36.4
最大操控距离/m	100

2 关键部件设计

2.1 前置挂载机构

前置挂载机构结构图如图2所示,其基本功能为可快速更换载具,以及将载具稳定地固定在动力底盘上。为了应对丘陵山地不可预测的地理地形条件和提升前置作业平台的适应能力,在前置作业平台加装液压辅助提升装置,使其可进行上下转动。同时为进一步提升前置作业平台的灵活性、扩大左右作业范

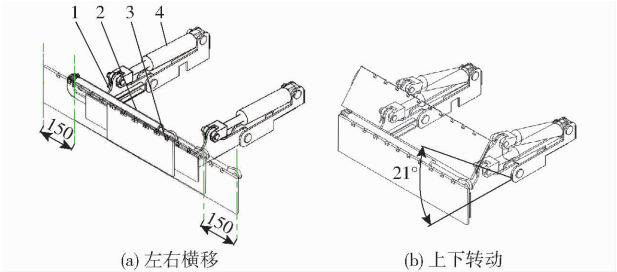


图2 前置挂载机构结构示意图

Fig.2 Schematics of front mounting mechanism

1. 举升臂 2. 横移油缸 3. 挂载横板 4. 举升油缸

围,增加了左右横移油缸,其结构如图2所示。

2.2 行走系

为了适应我国丘陵山地路面起伏、作业环境多变的情况,动力底盘的行走系必须具备较强的稳定性、越障性和灵活性^[16]。根据液压马达在底盘的安装位置,将驱动轮安放在履带承重轮上方,履带整体外形轮廓接近三角形,有效提高了履带底盘的离地间隙,缩小了整机尺寸,其结构如图3所示。

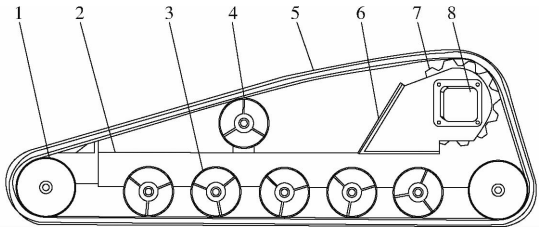


图3 行走系结构示意图

Fig.3 Schematic of walking system

1. 导向轮 2. 台车架 3. 承重轮 4. 拖带轮 5. 履带 6. 马达支撑架 7. 驱动轮 8. 行走液压马达

参照《拖拉机设计手册(上册)》^[17],履带接地长度经验计算公式为

$$L=1.07\sqrt[3]{10^{-3}G}\tag{1}$$

式中 L ——履带接地长度,mm

G ——整车重力,N

履带宽度和履带接地长度比值计算公式为

$$\frac{B}{L}=0.24\sim0.28\tag{2}$$

式中 B ——履带宽度,mm

履带节距经验计算公式为

$$P=(15\sim17.5)\sqrt[4]{G}\tag{3}$$

式中 P ——履带节距,mm

最后结合整机重力 G 和市场现有标准规格履带确定履带接地长度为1 400 mm,宽度为180 mm,节距为230 mm,节数为72。

2.3 变幅宽底盘

为解决坡地作业中易发生侧翻的问题,本研究采用了变幅宽底盘设计。这种设计能够扩大履带与地表接触所形成的重力安全变化区域,从而有效防止侧翻现象^[18-19]发生。变幅宽底盘主要由左行走梁、右行走梁、车架组成,通过套叠方管的方式实现左右行走梁与车架的相对平移运动。在车架横梁中安装4个液压油缸,其中2个固定在左行走梁,另2个固定在右行走梁,且分别在控制左右行走梁的液压油缸中安装同步阀,保证同一行走系前后伸缩量一致。其结构如图4所示。

动力底盘侧翻角度为

$$\alpha=\arctan\frac{L_0}{H}\tag{4}$$

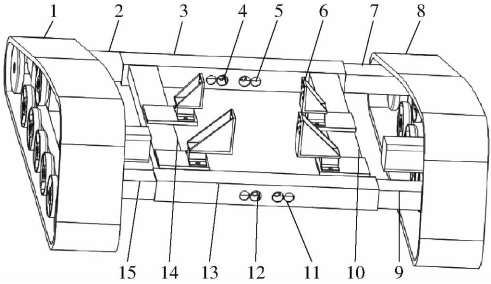


图 4 伸缩底盘结构示意图

Fig. 4 Schematic of telescopic chassis structure

1. 左行走系 2、15. 左行走梁 3、13. 车架横梁 4、5、11、12. 液压油缸 6. 发动机支撑架 7、9. 右行车梁 8. 右行走系 10、14. 车架纵梁

式中 α ——侧翻角度, (°)

L_0 ——履带间轮距, mm

H ——重心高度, mm

由式(4)可知^[19], 动力底盘的侧翻角度与整机的重心高度和两履带之间轮距有关, 当履带重心高度不变时, 两履带之间轮距越大, 侧翻角度越大。本机轮距初始值为 1 220 mm, 重心高度为 400 mm, 轮距最大值为 1 620 mm, 当轮距为 1 220 mm 时侧翻角度为 56. 7°, 当轮距为 1 620 mm 时侧翻角度为 63. 7°。侧翻角度越大其侧翻风险越小, 可伸缩底盘设计有效地提高了机器在山地丘陵果园作业的适应性。

2. 4 液压系统

动力底盘液压系统的设计目标为: 实现履带行走机构的行走转向功能、液压动力输出功能、底盘的伸缩功能以及作业机具的升降横移功能。按回路构成可将目前主流的液压回路系统分为开式回路和闭式回路两大类^[20]。本底盘为全液压驱动设计, 即动力底盘的行走系统、前置作业机具供油系统采用闭式液压回路; 前置作业机具平台举升、横移、底盘伸缩等间歇性动作系统采用开式液压回路, 液压系统总体设计如图 5 所示。

2. 4. 1 行走液压马达选型

动力底盘所选用的液压马达需要满足在不同工况下的最大扭矩和最大行驶速度的要求。在山地丘陵果园作业时, 坡道运行阻力最大, 包括运行阻力、坡道阻力、惯性阻力^[21], 为

$$F_i = mgf + mgsin\alpha_0 + \delta ma \tag{5}$$

式中 F_i ——坡道运行阻力, N

m ——整机质量, 取 1 100 kg

g ——重力加速度, 取 9. 8 m/s²

f ——运行阻力系数, 为 0. 08 ~ 0. 12, 本文取 0. 12

α_0 ——最大爬坡角度, 取 25°

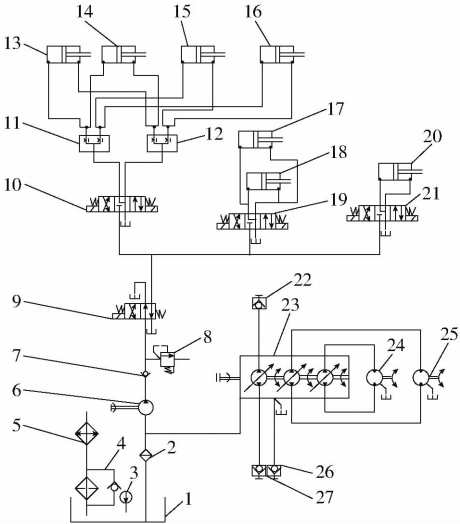


图 5 整机液压原理图

Fig. 5 Hydraulic schematic of machine

1. 液压油箱 2. 吸油过滤器 3. 液位器 4. 回油过滤器 5. 风冷冷却器 6. 齿轮泵 7. 单向阀 8. 溢流阀 9. 二位四通换向阀 10、19、21. 三位四通换向阀 11、12. 同步阀 13 ~ 18、20. 液压油缸 22、26、27. 液压快速插头 23. 三联泵 24、25. 液压马达

δ ——质量增加系数, 一般取值范围为 1. 14 ~ 1. 3, 本文取 1. 3

a ——行驶加速度, 取 0. 8 m/s²

行走液压马达所需扭矩为

$$M = \frac{F_i R}{n\eta_1} \tag{6}$$

式中 M ——单个行走液压马达所需扭矩, N·m

R ——驱动轮半径, 取 0. 13 m

n ——驱动轮个数, 取 2

η_1 ——履带传动效率, 取 0. 9

行走液压马达理论排量为

$$V_m = \frac{2\pi M}{p\eta_2} \tag{7}$$

式中 V_m ——行走液压马达理论排量, mL/r

p ——液压系统最大工作压力, 取 16 MPa

η_2 ——行走液压马达机械效率, 取 0. 9

液压马达应满足最大行驶速度的要求, 因此其最大转速为^[22]

$$n_{\max} = \frac{1\,000v_{\max}}{60 \times 2\pi r} \tag{8}$$

式中 $n_{\max}$ ——液压马达最大转速, r/min

$v_{\max}$ ——最大行驶速度, 取 6 km/h

r ——驱动轮半径, 取 13 cm

将设计参数代入式(5) ~ (8)得整机运行最大阻力为 6 994 N, 单个驱动轮最大扭矩为 505 N·m, 行走液压马达理论排量为 220 mL/r, 行走液压马达最大转速为 123 r/min。最终确定选择 BMV - 400 - 4 - A 型液压马达, 主要参数为: 最大排量 419 mL/r、

输出扭矩 1 180 N·m、最大输出转速500 r/min、工作最大压力 24 MPa、最大输入流量200 L/min。

2.4.2 液压泵选型

液压泵输出流量为

Q_p = \frac{KV_m n_{max}}{1\,000\eta_3} \tag{9}

式中 Q_p——液压泵输出流量,L/min
K——泄漏系数,取 1.1
η_3——行走液压马达容积效率,取 0.9
液压泵理论排量为

V_p = \frac{1\,000Q_p}{n_f\eta_4} \tag{10}

式中 V_p——液压泵理论排量,mL/r
n_f——液压泵转速,取 3 000 r/min
η_4——液压泵容积效率,取 0.9

将行走液压马达的参数代入式(9)、(10)可得,行走液压泵输出流量为 29.76 L/min,理论排量为 11 mL/r。选择行走液压泵为 1000TPV18 型闭式柱塞泵,主要参数为:最大排量 18 mL/r、最大压力 27 MPa、最大转速 3 600 r/min。使用 2 个柱塞泵作为行走泵,各为 1 个行走马达提供液压能。

由于本设计的作业载具也为液压驱动,要求在尽可能满足作业的前提下,选择最大排量的液压油泵,预留部分流量,以满足不同工作工况。以本课题组研究的常见果园作业机械^[23-25]为例,主要参数如表 2 所示。

表 2 果园常见作业机械主要参数

Tab.2 Main parameters of common operating machinery in orchard

名称	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW
开沟机械	500	12
喷药机械	600	10
除草机械	1 500	2.5

预留配套作业机构所需扭矩为

M_i = \frac{P_i}{n_i} \tag{11}

式中 M_i——预留作业机构所需扭矩,N·m
P_i——预留作业机构功率,kW
n_i——预留作业机构转速,r/min

式中 i = 1,2,3,分别对应开沟机械、喷药机械、除草机械。将表 2 中数据代入式(11)得:开沟扭矩 M_1 = 229.2 N·m,喷药扭矩 M_2 = 159.17 N·m,除草扭矩 M_3 = 15.92 N·m。代入式(7)得:液压马达排量分别为 V_{m1} = 100 mL/r, V_{m2} = 69.45 mL/r, V_{m3} = 6.95 mL/r。

将上述计算结果代入式(9)、(10)可得,作业机具液压泵所需理论输出流量为 Q_{p1} = 55 L/min, Q_{p2} = 45.84 L/min, Q_{p3} = 20.85 L/min;理论排量为 V_{p1} = 20.37 mL/r, V_{p2} = 16.98 mL/r, V_{p3} = 7.72 mL/r。考虑将 3 个闭式柱塞泵进行串联的安装方式,选择动力输出液压泵为 1500TPV21 型闭式变量柱塞泵,主要参数为:最大排量 21 mL/r、最大压力 30 MPa、最大转速 3 600 r/min。

2.4.3 发动机选型

液压泵驱动功率为

P_e = \frac{Q_p P_p}{60\eta_5} \tag{12}

式中 P_e——发动机功率,kW
P_p——液压泵工作压力,取 16 MPa
η_5——发动机机械效率,取 0.9

根据前文中计算结果可知,液压系统需要的最大流量为 114.52 L/min,根据式(12)计算得发动机功率 P_e 为 33.9 kW,考虑发动机体积和输出功率,选取 4TNV88 型柴油机,额定功率为 34.5 kW,额定转速为 3 000 r/min。

2.5 遥控系统集成

遥控系统主要由遥控发射器和信号接收器、信号处理器、驱动电路组成,如图 6 所示。

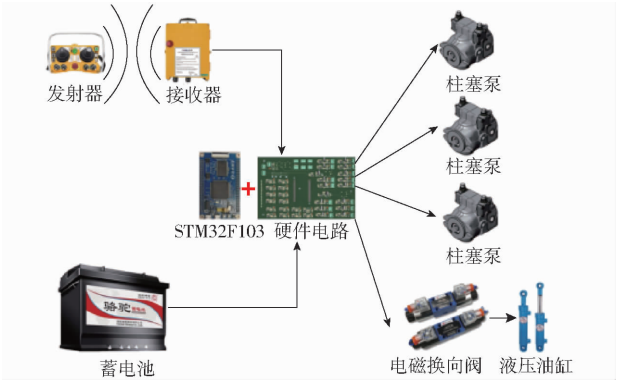


图 6 遥控系统示意图

Fig.6 Schematic of remote control system

遥控发射器和信号接收器选用 F20-60 型禹鼎遥感式遥控器,其频率范围为 310 ~ 331 MHz,控制距离为空旷环境下 100 m,控制器采用 STM32F103 核心版,驱动电路由 3.3 V 转 24 V 模块、比例放大电路、光耦隔离电路等组成。操作人员只需远程操作手柄即可实现动力底盘行走作业功能控制。

3 整机性能试验

3.1 接地比压

动力底盘接地比压使用 q 来表示,接地比压直接影响机器的通过性能^[26]。接地比压 q 计算公式为^[27]

$$q=\frac{G_s}{2BL}$$

(13)

式中 G_s ——动力底盘使用重力,N
取动力底盘挂载开沟机械时的重力 11 400 N, 此时 $q=0.018\text{ MPa}$ 。
车辆通过性评估指标^[27]如表 3 所示,根据上述结果和评估指标可得动力底盘在丘陵山地的松软地面具有良好的通过性。

表 3 根据最大接地比压 $q_{\max}$ 评定的车辆通过性指标
Tab.3 Vehicle passability index evaluated according to maximum ground specific pressure $q_{\max}$

地面条件	$q_{\max}$ /MPa	通过性
一般松软地面	<0.167	很好
	0.294	受到很大限制
泥炭沼泽地	<0.094	良好
浮动草垫	<0.009 8	良好

3.2 直线行驶偏移率试验

直线行驶偏移率是评价动力底盘操纵性能的一个重要指标,如果动力底盘的行驶偏移率高,则需频繁地对其行驶方向进行调整,增加驾驶人员劳动强度,加剧转向机构磨损;同时若行驶偏移率高,会使作业质量降低^[28]。因此本文对动力底盘进行行驶偏移率试验。

动力底盘的直线行驶偏移率试验在华中农业大学机电工程训练中心进行,选择一平整的硬质地面,标出 20 m 的边线及起始线和终点线,保持直行状态,中途不进行方向变换。记录初始点与边线的距离 l_1 、结束点与边线的距离 l_2 ,计算偏移量 l_1-l_2 。分别进行动力底盘在最大幅宽和最小幅宽的试验,重复 3 次试验,如图 7 所示。偏移率 p_1 计算公式为

$$p_1=\frac{|l_1-l_2|}{20}\times 100\%$$

(14)



图 7 动力底盘行驶偏移率试验

Fig.7 Power chassis driving deviation tests

偏移率结果如表 4 所示。由表 4 可知,该机在最小幅宽时偏移率为 2.24%,在最大幅宽时偏移率为 2.2%,均小于国家标准所规定的 6%。

表 4 直线行驶偏移率试验结果

Tab.4 Results of straight line driving deviation test

工况	序号	偏移位移/ mm	平均偏移 位移/mm	偏移率/ %	平均偏移 率/%
最小幅宽	1	485		2.43	
	2	412	447	2.06	2.24
	3	443		2.22	
最大幅宽	1	423		2.12	
	2	463	440	2.31	2.20
	3	435		2.18	

3.3 转向试验

动力底盘转弯性能通过转弯半径来表征^[29],在进行极限转向时,履带在地面划出的最大圆形半径就是转弯半径。本机支持原地转弯,即在转弯时两履带分别以相同速度不同方向进行运动。按照 GB/T 3871.5—2006《转向圆和通过圆直径》进行了最小转弯半径的测试,在华中农业大学机电工程训练中心选择可以明显显示履带轨迹的硬质地面分别进行最小幅宽和最大幅宽原地转向试验,在转向圆 0°、120°、240°、360°处测量其直径,计算其均值和最小转弯半径,试验如图 8 所示,测试结果如表 5 所示。

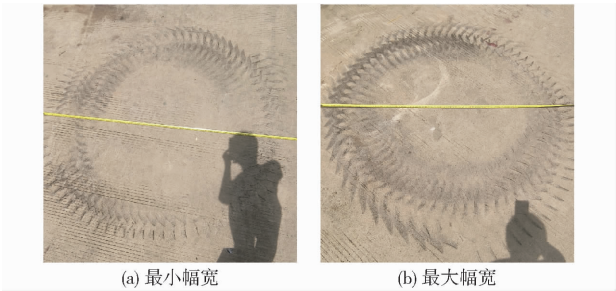


图 8 转弯半径测试试验

Fig.8 Turning radius test experiment

表 5 最小转弯半径测试结果

Tab.5 Minimum turning radius test results mm

转向	转弯半径					最小	最小转
						转弯	弯半径
	0°	120°	240°	360°	均值	半径	均值
最小幅宽左转	1 800	1 750	1 840	1 835	1 806	903	905
最小幅宽右转	1 820	1 825	1 800	1 815	1 814	907	
最大幅宽左转	2 150	2 200	2 240	2 235	2 206	1 103	1 105
最大幅宽右转	2 200	2 215	2 230	2 210	2 214	1 107	

3.4 坡道试验

动力底盘主要工作场景为丘陵山地,存在上坡、下坡、坡道转弯动作。为检验底盘在各种路面的爬坡适应性,以华中农业大学 8°、16°软质地面坡道和硬质地面坡道进行前进上下坡、倒退上下坡、坡道转弯试验,观察其姿态的稳定性,如图 9 所示。

在坡道行驶时为保证其稳定性,一般选择最低



图9 上下坡试验
Fig.9 Uphill and downhill tests

速度进行。进行前进上坡时首先将动力底盘停在坡道起点处,履带前端距离坡道起点 200 mm,然后以最低速度上坡,到达坡顶后再调节履带前端距离坡道起点 200 mm 下坡。以同样方法进行倒退下坡。在坡道中间进行原地左转和原地右转动作。结果表明,4 种类型坡道中的 6 种姿态下动力底盘行驶稳定,未发生滑移、剧烈抖动等现象。

3.5 越障试验

以垂直阶梯、果园田埂、畦沟等为翻越对象,通过观察动力底盘是否平稳通过,观察其越障性能,如图 10 所示。



图10 越障试验
Fig.10 Obstacle tests

路面越障时,选择华中农业大学机电工程训练中心 3 种高度的路面阶梯分别进行不挂载作业机具、挂载除草机具、挂载开沟机具的越障试验,测量得路面阶梯高度分别为 98、142、170 mm。翻越时履带前端距离阶梯 200 mm,保持发动机额定转速并低速前进,底盘翻越垂直阶梯恢复水平后即停止。结果显示,3 种工况下底盘均可以轻松翻越地面高度差最高为 170 mm 的阶梯,但翻越过程中存在整车

翘起现象,恢复水平时机具存在轻微冲击感。
田间越障时,在华中农业大学果园全程机械化研究所试验基地选择 3 条田埂分别进行不挂载作业机具、挂载除草机具、挂载开沟机具的越障试验。测量得 3 条田埂的平均高度分别为 224、255、270 mm,平均宽度分别为 1 700、1 940、2 100 mm。当底盘正向低速通过田埂后恢复水平姿态即完成越障过程,结果表明,3 种工况下底盘均可顺利翻越 3 种田埂,满足丘陵山地作业行驶要求。

在丘陵山地果园作业时,动力底盘会有跨越畦沟的动作。匀速跨越畦沟时,应保证动力底盘不坠入畦沟内,当底盘前支重轮触碰到畦沟的另一侧时其重心应未越过近侧畦沟边界线;当底盘后支重轮离开畦沟边界线时,其重心应已越过畦沟的近侧边界线,否则认定跨越畦沟失败^[30]。为测量动力底盘在 3 种情况下能通过的最大畦沟宽度,选择一具有明显高度差的路面,动力底盘以最低速度前进和后退,当底盘出现前倾动作时停止动作,测量履带最前端支重轮与地面边界的距离,其中较小的距离即是底盘跨越最大畦沟宽度。3 种工况能跨越的最大畦沟宽度如表 6 所示。同时为反映实际工况,在华中农业大学果园全程机械化研究所试验基地进行实际田间畦沟跨越试验。经测量,畦沟平均宽度为 400 mm,平均深度为 300 mm。分别进行挂载开沟机具、挂载除草机具、不挂载机具的跨越试验。试验结果表明,在 3 种工况下动力底盘均可以平稳跨越宽度为 400 mm 的畦沟。

表 6 跨越最大畦沟宽度			
Tab.6 Results of crossing maximum ditch width			
	mm		
工况	前进距离	后退距离	最大畦沟宽度
未挂载机具	620	510	510
挂载开沟机具	480	710	480
挂载除草机具	680	650	650

3.6 前置作业平台挂载试验

动力底盘的前置挂载平台具有左右横移和上下举升的功能,使得在不同地形作业时有更好的适应性。如图 11 所示,在前置作业平台上挂载除草装置,测量作业平台左右横移范围,以及上下举升角度范围,同时观察运动时是否稳定。

试验结果表明,前置挂载平台可以向左移动 150 mm,向右移动 150 mm,举升角度范围为 0° ~ 21°。在挂载除草装置时,动作稳定、不发生滑移,符合挂载作业机具需求。

3.7 果园开沟试验

为检验动力底盘的作业性能,于 2023 年 3 月



图 11 前置作业平台挂载试验

Fig. 11 Mounting tests of front-end operation platform

25 日在湖北省当阳市宇宙村柑橘果园进行开沟试验(图 12)。动力底盘挂载自研链式开沟器,使用 68 号液压油,进行开沟作业时环境气温 12℃,土壤类型为黄棕壤,平均土壤含水率为 13.49%,15 cm 土壤紧实度为 61.6 N/cm²。



图 12 果园环境和果园开沟试验

Fig. 12 Orchard environment and orchard trenching experiment

按照当地果园开沟要求,开沟深度为 15 cm,宽度为 30 cm。动力底盘以速度 0.8 m/s 进行开沟作业,连续工作时长为 2 h。开沟作业前后对液压油温进行测量,开沟结束后,选择同一沟间距为 1 m 的 10 个点测量其开沟深度和宽度,计算其平均值,按照国家标准(≥85%)计算沟深稳定系数和沟宽稳

定系数,结果如表 7 所示。

表 7 开沟试验结果

Tab. 7 Ditching test results

参数	数值	参数	数值
沟深均值/cm	15.2	沟深稳定系数/%	88.5
沟宽均值/cm	30.7	沟宽稳定系数/%	92.5
开沟前液压油温/℃	20.2	开沟后液压油温/℃	86.5

试验结果表明,在进行开沟作业时,动力底盘作业效果较好。然而,由于液压油温度升高,导致液压油的粘度降低,从而引发动机明显减小的现象,但该机仍能继续进行开沟作业,说明动力底盘能够满足在丘陵山地果园中的作业需求。

4 结论

(1)结合山地丘陵果园果树种植模式和农艺要求,设计了一种全液压遥控式履带动力底盘,阐述分析了整机结构和工作原理。整机最小尺寸(长×宽×高)为 1 900 mm×1 220 mm×1 006 mm、重心低、抗倾覆能力强,满足山地丘陵果园作业中通过性好、稳定性高和操作灵活等要求。

(2)对动力底盘的前置挂载机构、行走系、变幅宽底盘、液压系统、遥控系统等关键部件进行设计和相应的匹配选型,并进行了性能试验。

(3)试验结果表明,动力底盘在最小幅宽(1 220 mm)和最大幅宽(1 620 mm)的直线行驶偏移率分别为 2.24%、2.2%,原地转弯半径分别为 905、1 105 mm,上下斜坡、翻越田埂、跨越畦沟过程较为平稳,沟深稳定系数为 88.5%,沟宽稳定系数为 92.5%,整机工作性能满足田间管理作业要求。

参 考 文 献

[1] 罗锡文. 对发展丘陵山区农业机械化的思考[J]. 农机科技推广, 2011(2): 17–20.

[2] 中华人民共和国农业农村部“十四五”全国农业机械化发展规划[EB/OL]. [2023–02–13] http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202201/t20220105_6386316.htm.

[3] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1–20.

ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1–20. (in Chinese)

[4] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1–18.

SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1–18. (in Chinese)

[5] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1–17.

XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1–17. (in Chinese)

[6] 王韦韦, 陈黎卿, 杨洋, 等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 1–15.

WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1–15. (in Chinese)

[7] 曾北红. 果园动力底盘机组配套研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.

ZENG Beihong. Research on the dynamic chassis unit supporting the orchard[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei,

2012. (in Chinese)
- [8] 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等. 低矮型自走式果园喷雾机动力底盘设计[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):100-106.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design of power chassis for low self-propelled orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 100-106. (in Chinese)
- [9] 郝朝会,杨学军,刘立晶,等. 果园多功能动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):66-73,92.
HAO Zhaohui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of multifunctional dynamic chassis for orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 66-73, 92. (in Chinese)
- [10] 王亚,陈思忠,李海涛,等. 高地面仿形性动力底盘的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(25):39-44.
WANG Ya, CHEN Sizhong, LI Haitao, et al. Design and experiment of high performance profiling terrain chassis with power train[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(25): 39-44. (in Chinese)
- [11] 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]. 农业机械学报,2018,49(2):74-81.
LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 74-81. (in Chinese)
- [12] 王锋,杨玲,谢守勇,等. 一种三角履带式果园动力底盘的设计与研究[J]. 农机化研究,2019,41(5):91-96.
WANG Feng, YANG Ling, XIE Shouyong, et al. Design and research of a triangular track orchard power chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5):91-96. (in Chinese)
- [13] 赵林亭,邱绪云,宋裕民,等. 果园自走式电动底盘控制系统设计与试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(2):120-126.
ZHAO Linting, QIU Xuyun, SONG Yumin, et al. Design and test of control system for orchard self-propelled electric chassis [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2):120-126. (in Chinese)
- [14] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等. 遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):358-369.
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358-369. (in Chinese)
- [15] 高巧明,潘栋,张星,等. 全履带模块化无人农用动力底盘设计与仿真[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):561-570.
GAO Qiaoming, PAN Dong, ZHANG Xing, et al. Design and simulation of entire track modular unmanned agricultural power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 561-570. (in Chinese)
- [16] GRIGORE L Ș, ONCIOIU I, PRIESCU I, et al. Development and evaluation of the traction characteristics of a crawler EOD robot[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 37571.
- [17] 洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [18] 朱余清,洪添胜,吴伟斌,等. 山地果园自走式履带运输车抗侧翻设计与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):19-23.
ZHU Yuqing, HONG Tiansheng, WU Weibin, et al. Design and simulation of side rollover resistant capability of tracked vehicle for mountain orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 19-23. (in Chinese)
- [19] 耿端阳,孙延成,李华彪,等. 履带式坡地玉米收获机设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(13):11-19.
GENG Duanyang, SUN Yancheng, LI Huabiao, et al. Design and experiment of crawler corn harvester for sloping fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 11-19. (in Chinese)
- [20] YANG S, BAO Y, FAN C. Study on characteristics of hydro-mechanical transmission in full power shift[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(7): 1687814018790668.
- [21] 杜小强,宁晨,杨振华,等. 跨式油茶收获机履带底盘行走液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):139-147.
DU Xiaoqiang, NING Chen, YANG Zhenhua, et al. Design and experiment of hydraulic system for crawler chassis of straddle type *Camellia oleifera* fruit harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 139-147. (in Chinese)
- [22] 曾山,黄登攀,杨文武,等. 三角履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(8):1943-1950.
ZENG Shan, HUANG Dengpan, YANG Wenwu, et al. Design and test of the chassis of triangular crawler reclaiming rice harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(8):1943-1950. (in Chinese)
- [23] 张强. 大棚作业多功能农业机器人研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
ZHANG Qiang. Research on multi-functional agricultural robot for greenhouse[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 施展. 升降可折叠双侧圆盘式果园开沟机的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
SHI Zhan. Research on lifting and folding double-sided disc orchard ditching machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 鲍秀兰,严煜,毛金城,等. 果园割草机器人甩刀设计与分析[J]. 华中农业大学学报,2020,39(6):136-143.
BAO Xiulan, YAN Yu, MAO Jincheng, et al. Design and analyses of swinging blade for orchard mowing robot[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 136-143. (in Chinese)
- [26] 洛阳拖拉机研究所. 机械工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,1978.

[26] MYSTERY J, MOE R J S H. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops—a mini-review[J]. *Scientia Horticulturae*, 1995, 62(4): 205–215.

[27] STUERZ S, ASCH F. Responses of rice growth to day and night temperature and relative air humidity-dry matter, leaf area, and partitioning[J]. *Plants*, 2019, 8(11):521.

[28] WANG Z, ZHENG C, LI T, et al. Analyzing the preference for pesticide spray to be deposited at leaf tips[J]. *Biosystems Engineering*, 2021,204:247–256

[29] CONKLIN P A, STRABLE J, LI S, et al. On the mechanisms of development in monocot and eudicot leaves[J]. *New Phytologist Foundation*, 2019, 221(2):706–724

[30] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(2): 151–173.

[31] WAL R L V, BERGER G M, MOZES S D. The splash/non-splash boundary upon a dry surface and thin fluid film[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 40(1): 53–59.

[32] YOON S S, DESJARDIN P E, PRESSER C, et al. Numerical modeling and experimental measurements of water spray impact and transport over a cylinder[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(1): 132–157.

[33] FORSTER W A, MERCER G N, SCHOU W C. Process-driven models for spray droplet shatter, adhesion or bounce[C]//9th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals,The Netherlands,2010.

[34] 高荣,黄路生,文晟,等. 农药液滴在玉米叶片表面铺展面积的影响因素[J]. *农业工程学报*,2022,38(20):41–48.
GAO Rong, HUANG Lusheng, WEN Sheng, et al. Factors influencing the spreading areas of pesticide droplets on the surface of maize leaves[J]. *Transactions of the CASE*,2022,38(20):41–48. (in Chinese)

[35] DORR G J, KEMPTHORNE D M, MAYO L C, et al. Towards a model of spray-canopy interactions: interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 290: 94–101.

[36] YARIN A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing…[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38(1): 159–192.

[37] WHITE F M. Fluid mechanics[M]. Kingston:University of Rhode Island Press, 2009:293–346.

[38] 庞红宇,张现峰,张红艳,等. 农药助剂溶液在靶标表面的动态润湿性[J]. *农药学学报*,2006,8(2):157–161.
PANG Hongyu,ZHANG Xianfeng,ZHANG Hongyan et al. Dynamic wettability of pesticide additive solution on target[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*,2006,8(2):157–161. (in Chinese)

[39] 刘兴华,苑进,李扬,等. 采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型[J]. *农业工程学报*,2021, 37(5):68–76.
LIU Xinghua,YUAN Jin,LI Yang, et al. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method[J]. *Transactions of the CASE*,2021,37(5):68–76. (in Chinese)

[40] LIU Y, ANDREW M, LI J, et al. Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1):10034.

[41] GILET T, BOUROUIBA L. Rain-induced ejection of pathogens from leaves: revisiting the hypothesis of splash-on-film using high-speed visualization[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2014, 54(6): 974–984.

[42] GINEBRA-SOLANELLAS R M, HOLDER C D, LAUDERBAUGH L K, et al. The influence of changes in leaf inclination angle and leaf traits during the rainfall interception process[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020,285:107924.

(上接第 127 页)

[27] 刘彤,许纯新. 橡胶履带车辆接地压力分布[J]. *工程机械*,1995(2):1–18,40.
LIU Tong, XU Chunxin. Ground pressure distribution of rubber tracked vehicle[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 1995(2): 1–18,40. (in Chinese)

[28] 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. *农业工程学报*,2012,28(22):23–29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controll edelectric tractor for greenhouses[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 23–29. (in Chinese)

[29] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. *农业机械学报*,2022,53(9):109–121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground elearence crawler[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 109–121. (in Chinese)

[30] 孙术发,任春龙,李涛,等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 61–67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao,et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(17): 61–67. (in Chinese)