

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.013

丘陵山区坡地旋耕专用试验平台设计与性能试验

孙景彬¹ 吕明哲¹ 曾令坤¹ 任天翔¹ 郭增智¹ 郑航^{2,3} 应婧^{4,5}

(1. 聊城大学机械与汽车工程学院, 聊城 252000;

2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310021;

3. 浙江省农业科学院农业装备研究所, 杭州 310021; 4. 农业农村部丘陵山地农业装备技术重点实验室, 成都 610066;

5. 四川省农业机械科学研究院, 成都 610066)

摘要: 针对丘陵山地专用旋耕机械设计理论依据不足、坡地工况基础数据匮乏,以及在复杂地势作业时普遍存在耕深波动明显、振动剧烈、能耗过高等技术瓶颈,设计了一种适用于丘陵山区坡地工况的专用旋耕试验平台,可实现坡地倾角模拟与旋耕作业坡地仿形作业等功能。试验平台主要由旋耕行驶导向装置、旋耕行驶装置、旋耕升降调节装置、旋耕倾角模拟装置、旋耕作业装置和坡地倾角模拟装置等部分构成,集坡地倾角模拟、旋耕倾角协同、旋耕作业、耕深调节等功能于一体。对试验平台进行了性能试验,结果表明:旋耕倾角模拟装置与目标坡地(土槽倾角)可以在0°~20°范围内实现精准协同,旋耕行驶装置的电动叉车可实现0~3.64 km/h的前进行驶速度,旋耕刀轴可实现0~335 r/min的旋耕转速,旋耕升降调节装置可实现0~30 cm耕作深度的稳定无级调节,该试验平台满足丘陵山区坡地旋耕多因素多水平的测试需求,达到了坡地倾角随机模拟、旋耕刀轴自动仿形、耕作深度精准可控、前进速度无级可调的设计目标。本研究可为坡地旋耕作业理论的完善和专用旋耕刀具的创新设计提供平台支撑,为丘陵山区其他作业装备的试验平台研制提供方法借鉴。

关键词: 丘陵山区; 坡地旋耕; 试验平台; 坡地仿形; 性能试验

中图分类号: S219.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0137-09 OSID: 

Design and Performance Test of Special Test Platform for Rotary Tillage on Hilly and Mountainous Slopes

SUN Jingbin¹ LÜ Mingzhe¹ ZENG Lingkun¹ REN Tianxiang¹ GUO Zengzhi¹ ZHENG Hang^{2,3} YING Jing^{4,5}

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China
(Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China

3. Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China

4. Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology for Hilly and Mountainous Areas,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, China

5. Sichuan Academy of Agricultural Machinery Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: In view of the insufficient theoretical basis for the design of special rotary tiller machinery for hilly and mountainous areas, the lack of basic data on sloping land conditions, and the common technical bottlenecks such as significant fluctuations in tillage depth, intense vibration, and excessive energy consumption when operating in complex terrain, a special rotary tiller test platform suitable for sloping land conditions in hilly and mountainous areas was designed, which can realize functions such as slope angle simulation and slope profiling operation. The test platform was mainly composed of the rotary tillage driving guidance device, rotary tillage driving device, rotary tillage lifting adjustment device, rotary tillage angle simulation device, rotary tillage operation device and slope angle simulation device, etc. It integrated functions such as slope angle simulation, rotary tillage angle coordination, rotary tillage

收稿日期: 2025-05-04 修回日期: 2025-05-16

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023QC036)、农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)开放课题(QSKF2023003)、农业农村部丘陵山地农业装备技术重点实验室开放课题(2023KLOP04)和聊城大学博士科研启动基金项目(318052232)

作者简介: 孙景彬(1992—),男,讲师,博士,主要从事丘陵山地智能农业装备研究,E-mail: sunjingbin0208@163.com

operation and tillage depth adjustment. The performance test of the test platform was carried out. The results showed that the rotary tillage inclination angle simulation device can achieve precise coordination with the target slope (soil trough inclination angle) within the range of 0° to 20° . The electric sports car of the rotary tillage driving device can achieve a forward driving speed of $0 \sim 3.64$ km/h. The rotary tillage knife shaft can achieve a rotary tillage speed of $0 \sim 335$ r/min. The rotary tillage lifting adjustment device can achieve a stable and stepless adjustment of the tillage depth from $0 \sim 30$ cm. This test platform met the multi-factor and multi-level test requirements of rotary tillage on hilly and mountainous slopes. The design goals were achieved, including random simulation of the slope angle, automatic profiling of the rotary tillage knife shaft, precise and controllable tillage depth, and stepless adjustment of the forward speed. This research can provide platform support for the improvement of the theory of rotary tillage on sloping land and the innovative design of special rotary tillage tools, and offer methodological references for the development of test platforms for other operation equipment in hilly and mountainous areas.

Key words: hilly and mountainous areas; rotary tillage on sloping land; test platform; slope profiling; performance test

0 引言

我国丘陵山地面积辽阔,地块碎小分散,道路崎岖不平,是重要的粮油作物产区,但是农机化水平严重滞后,综合机械化率不足 50%^[1],其原因在于,丘陵山地农机研发的理論依据缺乏、参考数据不完善。例如,丘陵山区坡地耕作环节产生的耕作侵蚀严重,缺乏专用耕作机具的原因是耕作侵蚀理论不具备、基础数据不完善。例如旋耕作业,基本是靠改进平原地区常用旋耕机具来替代传统人力作业,与丘陵山区复杂的地势特点不适应^[2]。

针对上述问题,国内外专家学者围绕丘陵山区耕地装备研发、坡地姿态调平与仿形作业技术攻关、土槽试验平台创制等方面开展了系列研究工作。丘陵山区耕地装备研发方面:重庆鑫源农机股份有限公司研究了丘陵山地多功能微耕机,在国内市场具有很高的占有率;重庆迎隆新能源科技有限公司在电动微耕机方面进行了初步的技术攻关和小批量试产。坡地姿态调平与仿形作业技术攻关方面:杨福增等^[3]针对山地履带拖拉机的等高线作业,设计了车身与农具姿态协同控制系统,可实现 $14^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 的坡地等高线作业。孙景彬等^[4-5]设计了基于“平行四杆机构”和“双车架结构”的全向调平地履带拖拉机,可实现 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 横向坡地和 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 纵向坡地的调平。耕作试验平台创制方面:曾荣等^[6]针对现有旋耕刀辊更换不便,以及田间试验土壤环境因素不可控等问题,提出了一种用于旋转耕作部件性能测试的专用智能化测试试验台;孙新城等^[7]设计了一种旋转式农机土槽试验台,并对其运行平稳性的控制方法进行了研究和试验验证;许洪斌等^[8]设计了一种微耕机旋转耕作部件土槽试验台,基于模块化设计方法可以实现旋耕、平整与土壤压实等功能。张超等^[9]设计了一种控制方便、测试精准的田间耕

作试验平台,有效解决了当前机具耕作试验多采用室内土槽和拖拉机挂接两种方式均存在不足、试验所需面积过大等问题。杨艳山等^[10]针对室内重塑的土壤难以反映田间土壤固有的结构性问题,设计了一种田间原位综合耕作试验台,经试验验证该平台满足多因子多水平田间测试的要求。曾百功等^[11]在功能微耕机的基础上,研制了微耕机土壤耕作部件田间测试平台,可在田间实际工况下对旋耕刀和起垄器进行性能测试。管春松等^[12]针对耕作试验台难以满足双轴耕作部件测试,设计了一种可实现前后刀轴相对位置实时调整的田间移动式试验台。姚忠志等^[13]针对农具耕作部件田间性能测试成本高、效率低等问题,设计了可实现无线遥控的简易室内土槽试验台。

综上所述,目前国内外学者主要针对平原地区旋耕作业装备进行研究,山地专用旋耕机与土壤互作的机理研究相对较少。丘陵山区专用旋耕作业的研发设计理论和基础数据完全参考平原旋耕机的理论是行不通的。并且在坡地实际工况去采集试验数据受环境(坡地角不可控、土壤物理参数不可控)影响较大,导致测量的数据不完整。本文针对以上问题,拟设计一种丘陵山区坡地旋耕专用试验平台,主要对试验平台的坡地倾角模拟装置、旋耕倾角模拟与旋耕作业装置、旋耕行驶与旋耕升降调节装置以及基于 STM32 单片机的测控系统进行设计,实现坡地倾角随机模拟、旋耕刀轴自动仿形、耕作深度精准可控、前进速度无级可调的功能,为坡地旋耕作业理论的完善和专用旋耕刀具的创新设计提供平台支撑。

1 试验平台整机结构与工作原理

1.1 整机结构

传统的旋耕机械适用于地势起伏不大的平原地

区,当在坡度较大的丘陵山区坡地作业时,机器与坡地的适应性较差、控制复杂、效率低、能耗大^[14]。针对上述问题,需要设计一种坡地地形适应性好、旋耕作业参数可调的专用试验平台。根据上述设计要求对试验台进行了总体设计。该试验平台主要由旋耕行驶导向装置、旋耕行驶装置、旋耕升降调节装置、旋耕作业仿形装置、旋耕作业装置和坡地倾角模拟装置等部分组成。旋耕行驶装置采用 380 V 三相异步电机驱动,在旋耕行驶导向装置横梁上驱动旋耕作业装置前进,通过旋耕升降调节装置来控制耕深,旋耕电机驱动旋耕刀轴回转完成旋耕作业。当坡地倾角模拟装置完成某一倾角的坡地模拟,旋耕作业仿形装置会调节刀轴与坡地倾角自动保持一致。其整机结构如图 1 所示,结构与工作参数如表 1 所示。

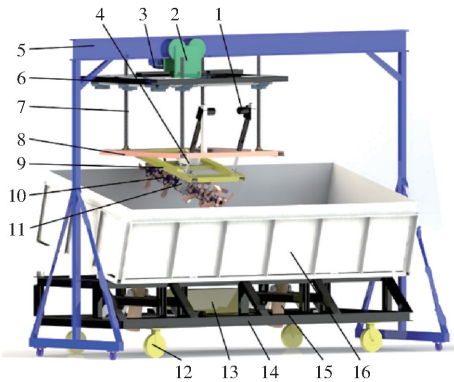


图 1 试验平台整体三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of test platform

1. 电动推杆 2. 旋耕行驶装置 3. 旋耕行驶装置电机 4. 旋耕电机 5. 旋耕行驶导向装置 6. 电动行车连接板 7. 旋耕升降调节装置 8. 旋耕升降板 9. 旋耕倾角板 10. 旋耕刀轴 11. 旋耕减速器 12. 万向尼龙轮 13. 液压油泵 14. 底部支架 15. 液压油缸 16. 土槽平台

表 1 整机参数

Tab. 1 Parameters of whole machine

参数	数值
整机质量/kg	800
电动推杆数/个	2
液压油缸数/个	2
长×宽×高/(mm×mm×mm)	4 000×1 200×2 500
万向轮数	4
可模拟最大倾角/(°)	20
旋耕前进速度/(km·h ⁻¹)	0~3(无级可调)
旋耕转速/(r·min ⁻¹)	0~300(无级可调)

1.2 工作原理

手动液压油泵加压来实现液压油缸的动作,构建试验所需的坡度倾角。旋耕作业仿形装置通过电动推杆控制旋耕倾角板沿纵向旋耕升降板轴线转动,使其与土箱倾斜角度保持动态匹配;当倾角参数设定完成后,螺杆升降机构随即启动,驱动旋耕升降

板的旋耕升降调节装置基于丝杠传动原理进行垂直方向的高度调节;待旋耕刀轴下降到预定耕作深度时,旋耕电机通过减速器总成将动力传递至旋耕刀轴,驱动旋耕刀组进行旋耕作业。同步运行的旋耕行驶装置电机运转,驱动旋耕行驶装置前进,由于该行驶装置与连接板及刀具工作台构成刚性联动结构,促使整个耕作平台实现行进运动。上述过程完整复现坡地实际工况下的动态旋耕过程。工作流程如图 2 所示。

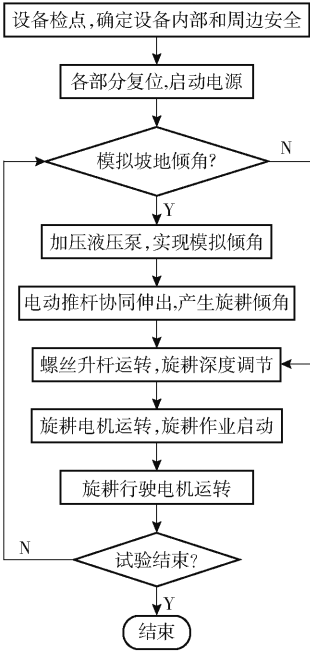


图 2 工作流程图

Fig. 2 Workflow diagram

2 关键部件设计

2.1 坡地倾角模拟装置

坡地倾角模拟装置可模拟丘陵山区不同倾角的农耕地,山区地势复杂,根据我国出台的《土地利用现状分类》,土地坡度在 15°以下,优先选作基本农田保护区;坡地角度在 15°~25°的土地可允许适度的耕作,但需要采取水土保持措施,25°以上的土地禁止开垦为耕地^[15];综合考虑上述要求,设计的坡地倾角模拟装置(图 3)可实现 0°~20°的坡地倾角模拟。

坡地倾角模拟装置可以确保倾角可调,土壤特性可控,试验环境稳定可控,有效降低室外试验成本,节约土地资源^[16]。土槽长×宽×深为 3 m×1.2 m×0.6 m,可以很好地满足旋耕机理的试验研究需求,每个液压油缸可提供 20 kN 的力;土槽外侧安装角钢框架,框架底部安装 4 个尼龙轮,用于试验平台的移动;液压油缸通过吊耳铰接安装在框架的横梁和土箱底部。当需要模拟坡地倾角时,手动加

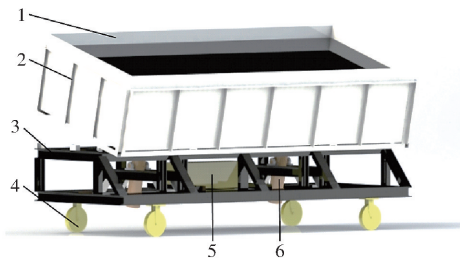


图3 坡地倾角模拟装置结构图

Fig.3 Structural diagram of slope inclination simulation device

1. 土槽 2. 角钢框架 3. 底部支架 4. 万向尼龙轮 5. 手动加压泵 6. 液压油缸

压油泵,液压油缸伸出驱动土箱倾斜一定的角度,此时土箱内部的土壤与水平地面形成一定的角度,实现对丘陵山区坡地倾角的模拟。

通过测量液压油缸杆的伸出量与土箱倾角之间的变化,得到伸出量与角度变化呈非线性关系,该拟合方程为

$$y = 0.0496x^2 + 5.408x + 80 \quad (1)$$

式中 y ——油缸杆伸出量,mm
 x ——土箱倾角变化量, (°)

根据边界条件,当伸出量为 80 mm 时,倾角为 0°,当伸出量为 208 mm 时,倾角为 20°,并综合考虑土槽的体积以及满载土时的重量,选取行程为 350 mm、缸径为 86 mm 的液压油缸 2 个。

2.2 旋耕倾角模拟与旋耕作业装置

试验台的核心部件为旋耕倾角模拟装置和作业装置,此部位的功能是将旋耕装置与坡地倾角模拟装置所模拟的倾角保持协同调节,以此保证旋耕的质量,其三维结构如图 4 所示,其也可实现 0°~20°的倾角变化。

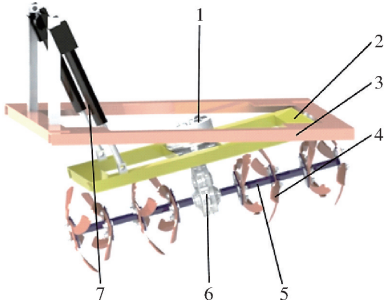


图4 旋耕倾角模拟和旋耕作业装置结构图

Fig.4 Simulation of rotary tillage inclination angle and structure diagram of rotary tillage operation device

1. 旋耕电机 2. 旋耕倾角板 3. 旋耕升降板 4. 旋耕刀 5. 旋耕刀轴 6. 旋耕减速器 7. 电动推杆

旋耕刀安装在旋耕刀轴上,旋耕刀轴和旋耕减速器连接,旋耕电机驱动旋耕减速器带动旋耕刀轴运转。旋耕刀轴长 450 mm,旋耕刀刀辊半径 210 mm,单个电动推杆最大伸出量为 350 mm,可提

供 6 000 N 的力,可以很好地为旋耕倾角的构建提供支撑力;旋耕倾角板的一侧与电动推杆铰接,另一侧与旋耕升降板铰接,电动推杆推动旋耕倾角板转动改变旋耕刀轴的倾角,同时,电动推杆停止动作就可以保证旋耕刀轴的固定,来稳定实现设定倾角下的旋耕作业;旋耕电机采用变频方式实现刀轴转速的调节,根据旋耕机国家标准的要求,要满足转速为 150 ~ 300 r/min。为实现多种刀辊的功能适应性^[17-18],使试验台满足不同类型土壤以及土壤复合体的碎土、碎茬、秸秆还田等需求;对于旋耕电机的选型,结合旋耕作业的力学模型^[19],考虑到阻力、扭矩、转速等因素,得到电机的选型计算公式

$$P_1 = \frac{NkbhRn}{\eta} \quad (2)$$

式中 P_1 ——旋耕电机功率,kW
 N ——刀具数量
 k ——土壤粘度系数,N/m²
 b ——刀片宽度,mm
 h ——耕深,mm
 R ——刀辊半径,m
 n ——刀轴转速,r/min
 η ——传动系统效率,取 0.8

根据上述公式与旋耕机国家标准的要求,刀轴转速为 150 ~ 350 r/min,综合考虑,选取旋耕电机功率为 2 kW 的驱动电机。

旋耕刀在旋耕作业时,会受到土壤阻力(切向力、法向力)、离心力、摩擦力、冲击力和重力等的综合作用。其中,土壤切向力计算公式为

$$G\cos\alpha = F_t \quad (3)$$

土壤法向力计算公式为

$$F_n = E\sigma A \quad (4)$$

其中

$$F_t = \tau A \sin\alpha \quad (5)$$

$$A = bh \quad (6)$$

$$\tau = C + \sigma \tan\varphi \quad (7)$$

式中 τ ——土壤剪切强度,Pa
 A ——接触面积,mm²
 α ——剪切角, (°)
 F_t ——切向力,N
 C ——粘聚力,N
 F_n ——法向力,N
 σ ——法向应力,N
 E ——土壤压缩模量,Pa
 φ ——内摩擦角, (°)

综上,上述静力学分析中的土壤参数以及旋耕刀的几何参数可以为本试验台后期进行坡地旋耕机理研究时耕作部件的选型、参数优化设计提供理论

依据^[20]。

2.3 旋耕行驶与旋耕升降调节装置

旋耕行驶装置是模拟实际工况下拖拉机的行驶情况,通过该部件实现旋耕作业的前进^[21],根据旋耕机国家标准规定,轻小型旋耕机作业速度为1~4 km/h,旱田耕深要大于8 cm。本文为了保证旋耕速度和旋耕深度的基本要求,选取高2.5 m、长3.5 m的龙门架式旋耕行驶导向装置,电动自行车最大载荷可达1 t,为旋耕前行运动提供动力,螺丝升杆最大升降调节距离可达80 cm,如图5所示,并对该结构进行加固处理,确保在旋耕作业时的稳定性。

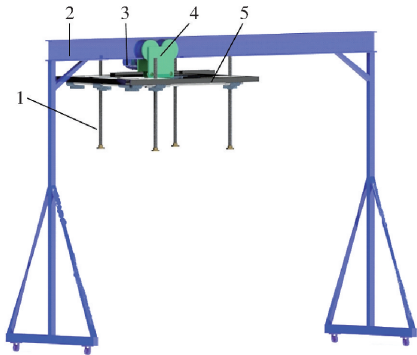


图5 旋耕行驶与旋耕升降调节装置结构图
Fig.5 Structural diagram of rotary tillage driving and rotary tillage lifting adjustment device

1. 旋耕升降调节装置 2. 旋耕行驶导向装置 3. 旋耕行驶电机
4. 旋耕行驶装置 5. 行车连接板

旋耕行驶装置与旋耕工作台之间采用分体式设计,实现两者之间的相对运动,从而实现旋耕刀辊的耕作深度调节。旋耕行驶装置在旋耕行驶导向装置的横梁上平移,带动旋耕工作台前行,模拟旋耕机在田间牵引作业的场景;旋耕升降装置的电机驱动升降机动作,使得螺丝杆转动来带动整个旋耕工作台的上下移动以实现耕深的调节。

为保证旋耕作业时具备足够的前进动力,并保证前进的连续性和稳定性,对旋耕行驶装置的驱动电机进行匹配选型。由于旋耕作业时牵引阻力非常小,尤其正向旋耕时,牵引阻力可以忽略不计,考虑到旋耕前进装置的行车电机需要克服行驶阻力、坡度阻力、加速阻力等因素,故推导出行车电机的功率 P_2 计算公式

$$P_2 = \frac{(fmg + mgsin\theta + F_q)v}{\eta} \tag{8}$$

式中 f ——滚动阻力系数(硬土为0.08~0.12)
 m ——旋耕装置总质量,kg
 θ ——坡度角,(°)
 F_q ——作业时其他附加力,N
 v ——旋耕作业速度,m/s
旋耕装置在前进时,受到旋耕刀切削土壤的阻

力和自身的惯性力作用,惯性力 F_I 为

$$F_I = ma \tag{9}$$

式中 a ——加速度,m/s²

旋耕时也要考虑到扭矩和功率对前进速度的影响,单个旋耕刀所承受的扭矩 T_b 为

$$T_b = F_t R \tag{10}$$

总扭矩 T_t 为

$$T_t = NT_b \tag{11}$$

所需总功率

$$P_2 = T_t \omega + F_1 v \tag{12}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \tag{13}$$

式中 ω ——角速度,rad/s

F_1 ——牵引力,N

当旋耕装置匀速前进时,牵引力需要平衡所有阻力,即

$$F_1 = N(F_t + F_n) + F_r \tag{14}$$

式中 F_r ——其余阻力,N

综合上述公式,以及考虑丘陵山区土壤的实际紧实度,选用行驶驱动电机功率为1.5 kW,可使旋耕行驶装速度控制在0~3.6 km/h。根据旋耕机国家标准的要求,耕深调节要在8 cm以上,并考虑到实际试验中旋耕倾角模拟装置运动的影响,故选取旋耕升降调节装置螺丝升杆调节范围为0~30 cm。

3 测控系统设计

测控系统是该旋耕试验台运转和参数测定的关键系统^[22],其中控制系统主要实现各项工作参数的调节,测试系统主要用于性能参数的数据采集与处理。

控制系统部分主要完成土箱倾角与旋耕倾角调节装置之间的匹配协同,旨在实现倾角模拟装置模拟0°~20°任意坡度工况时旋耕部件仿形作业。控制系统流程如图6所示,控制系统的硬件部分主要由4个STM32控制器、2个倾角传感器、2个转速传感器、1个位移速度传感器、1个正逆开关、1个变频器、2个电动推杆、1个24 V电源、1个TTL转RS485模块等部分组成。

3.1 旋耕行驶装置控制

旋耕行驶装置的电机选取功率为1.5 kW的三相异步电机,其可实现的行驶速度为45 m/min,通过变频器的控制,可实现速度范围为0~3.6 km/h,符合旋耕机国家标准^[23]要求。旋耕行驶装置速度控制流程如图7所示。

选取变频器型号为AE200(三相380 V、功率0.5 kW),可实现过压保护、欠压保护、过流保护,同

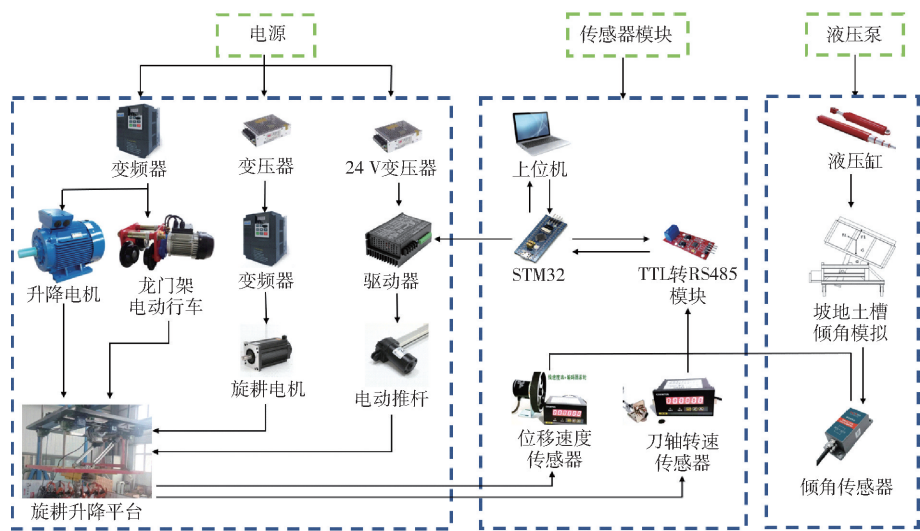


图 6 控制系统流程图
Fig.6 Process of control system

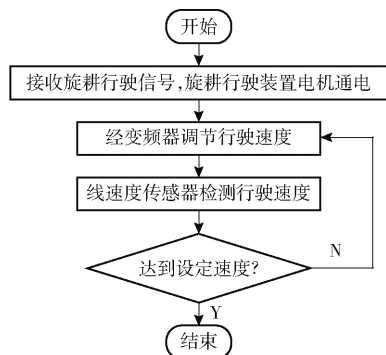


图 7 变频控制旋耕行驶速度流程图
Fig.7 Flowchart of frequency conversion control rotary tillage driving speed

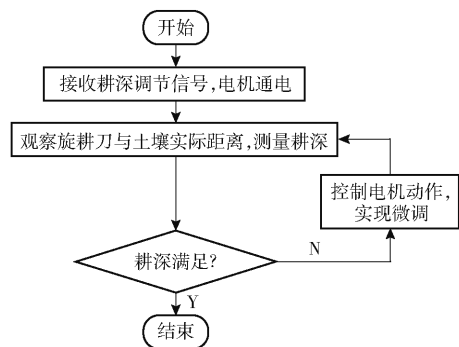


图 8 耕深调节系统控制流程图
Fig.8 Control flowchart of tillage depth adjustment system

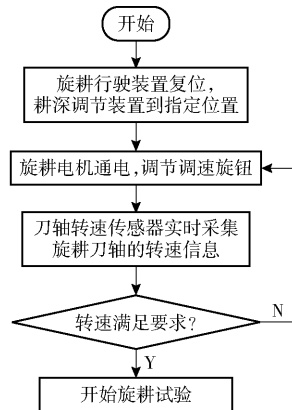


图 9 旋耕刀轴转速控制流程图
Fig.9 Flowchart of rotational speed control for rotary tiller shaft

时该变频器可控制旋耕行驶装置电机的正反转,进而控制旋耕行驶装置的正向行驶和反向行驶。在旋耕行驶导向装置上安装限位开关,当旋耕行驶装置到达指定位置时,触发限位开关,根据实际工作要求,实现旋耕行驶装置的急停或者反向行驶。

3.2 耕深调节系统控制

根据实际试验对耕深的要求,所设计的耕深调节装置可实现 0 ~ 30 cm 的耕深调节。旋耕升降调节装置的电机选取三相异步电机,承载可达 1 t,通过正逆开关完成升降电机的正反转调节,从而升降机带动螺丝升杆正反转,实现耕深的上下调节。耕深调节系统控制流程如图 8 所示。

3.3 旋耕刀轴转速控制

旋耕刀轴转速不仅要满足国家标准要求,也要根据丘陵山区复杂地势的实际情况选取,旋耕电机选取 2 kW 的电机,通过转速传感器测量旋耕刀轴的转速,控制流程如图 9 所示。

3.4 旋耕作业坡地仿形控制

土槽倾角驱动液压缸缸伸出一定的行程来实现坡地倾角的模拟,此时倾角传感器检测到倾角信号,

经单片机控制器自动控制旋耕仿形装置电动推杆的伸出量,实现旋耕刀轴与土槽坡面相互平行的目的。实现精准控制,首先要推导出电动推杆伸出量与旋耕仿形装置实现倾角的函数关系,故通过实测得到相应的试验数据。基于 Origin 软件对试验数据进行拟合求解,得到拟合函数如图 10 所示。

得到电动推杆伸出量与旋耕刀轴倾角之间的数学模型为

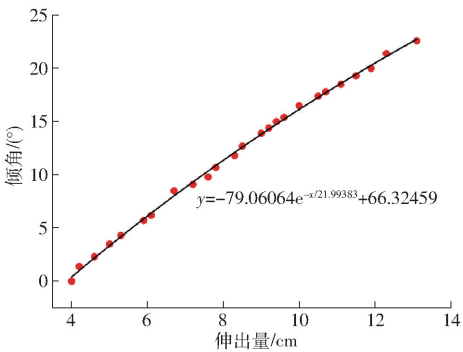


图 10 推杆伸出量与仿形装置的旋耕刀轴倾角关系曲线
Fig. 10 Curve of relationship between extension of push rod and inclination angle of profiling device

$$y = -79.06064e^{-\frac{x}{21.99383}} + 66.32459 \quad (15)$$

式中 y ——旋耕刀轴倾角, (°)
 x ——电动推杆伸出量, cm

4 试验平台性能试验

4.1 试验目的与条件

为了验证试验台实际工作性能,按照国家标准相关要求在聊城大学农机装备实验室进行坡地模拟调节、旋耕前进速度、耕深调节、旋耕倾角协同控制以及旋耕刀轴转速等方面的性能试验,试验台实物如图 11 所示。性能试验所采用的仪器设备包括坡地旋耕试验台、倾角传感器、测速传感器、转速表、米尺等。

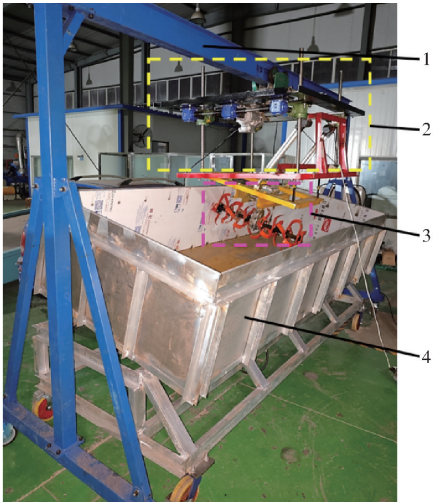


图 11 试验平台性能试验
Fig. 11 Performance test of test platform
1. 旋耕行驶导向装置 2. 旋耕前进与升降调节装置 3. 旋耕作业与倾角调节装置 4. 坡地倾角模拟装置

4.2 试验过程与结果分析

(1) 旋耕作业前进速度测试
对旋耕前进作业速度测量时,设置 3 种旋耕作业工况(平地工况、10°坡地工况、20°坡地工况),首先将电动行车置于起点,然后将不同工况下的耕

深均调整至 5 cm,最后手动操纵电机变频器来控制电动行车的速度,经线速度传感器测量各个工况下的行驶速度。每种作业工况测量 3 次取平均值,试验结果如表 2 所示。

表 2 旋耕作业行驶速度测试结果

Tab. 2 Test results of traveling speed for rotary tillage operations

工况	序号	旋耕最大行驶速度	平均值
0°	1	3.55	3.64
	2	3.62	
	3	3.74	
10°	1	3.48	3.51
	2	3.59	
	3	3.46	
20°	1	3.45	3.46
	2	3.51	
	3	3.41	

由试验结果可得,统一设定耕深为 5 cm,在平地工况、10°坡地工况、20°坡地工况下的旋耕行驶速度平均值分别为 3.64、3.51、3.46 km/h,基本符合旋耕国家标准中对作业速度的要求。小坡度工况下的旋耕作业前进速度比大坡度工况下大,原因在于当仿形旋耕作业时,坡度越大,旋耕过程所产生的耕作侵蚀越大^[24],即坡高侧的土壤会往坡低侧迁移的程度大,导致行车迁移过程中的负载不均匀。

(2) 旋耕作业倾角协同控制效果测试
对于旋耕倾角调节装置能否与倾角模拟装置实现协同,通过试验对相关的控制系统加以验证。手动加液压泵,使土槽与水平面间形成 0°~20°的随机倾角,用角度仪测量土箱实时倾角,然后用另一倾角仪实时测量倾角模拟装置的倾角,对比两个倾角的大小。每种坡度测量 3 次,试验结果如表 3 所示。

由试验结果可得,土槽设定倾角与倾角模拟装置经控制所实现的倾角平均偏差稳定在 ±0.1°以内,最大偏差为 0.26°。基本可以满足坡地仿形作业的精度要求。由试验结果还可以看出随着坡度的增大,协同控制的误差会增大,原因在于试验平台本身具有一定的加工误差,当坡度较大时,误差的积累越大^[25],导致推杆推出的距离所实现的倾角出现一定的偏差,该偏差在允许范围之内。

(3) 旋耕刀轴转速与耕深测试
测量旋耕刀轴转速时,塑造土壤含水量 15% ± 1%,耕深 5 cm,将双向霍尔传感器对旋耕刀轴的转速进行测量,构建了 3 种坡地工况(平地、10°坡地、

表 3 旋耕作业倾角协同控制测试结果

Tab.3 Test results of collaborative control of inclination angle in rotary tillage operations (°)

土箱设定 倾角	序号	旋耕倾角模拟装置倾角		平均偏差
		测试值	平均值	
0	1	-0.15		
	2	0.07	0.02	0.02
	3	0.14		
5	1	5.11		
	2	4.85	5.03	0.03
	3	5.14		
10	1	10.20		
	2	9.94	10.04	0.04
	3	9.97		
15	1	14.91		
	2	15.00	15.06	0.06
	3	15.26		
20	1	20.18		
	2	20.15	20.08	0.08
	3	19.92		

20°坡地),旋耕作业装置也协同 3 种工况下倾角,分别进行试验,记录传感器所采集到的转速最大值,试验结果如表 4 所示。

表 4 旋耕刀轴转速测试结果

Tab.4 Test results of rotational speed of rotary tiller shaft r/min

工况	序号	旋耕刀轴最大转速	平均转速
0°	1	335	
	2	328	335
	3	341	
10°	1	322	
	2	315	321
	3	327	
20°	1	311	
	2	305	311
	3	317	

刀轴转速试验结果表明,在 3 种坡度下,旋耕刀轴的转速均能达到 300 r/min 以上,基本满足国家标准和进行旋耕机理研究的要求。分析数据可得,随着坡度的增大,导致刀轴的最大转速降低,原因在于旋耕侵蚀现象的存在使得旋耕过程中出现不均布载荷,从而增大了旋耕的负载。这一结论为后续继续开展坡地旋耕机理的深入研究奠定了基础。

对于耕深可调范围的测定,当旋耕升降调节装置的丝杆处于高位时,测得丝杠顶部到传动转换器之间的距离为 29.5 cm,即旋耕深度可调的最大范围,远大于国家标准规定的数值,达到设计的要求。

5 结论

(1)对丘陵山区坡地旋耕专用试验平台的整机结构和工作原理进行了详细阐述,主要包括旋耕行驶导向装置、旋耕行驶装置、旋耕升降调节装置、旋耕倾角模拟装置、旋耕作业装置和坡地倾角模拟装置等部分,集坡地倾角模拟、旋耕倾角协同、旋耕作业、耕深调节等功能于一体,其结构紧凑,占地空间小,模块化设计大大提高了操纵便捷性。

(2)对试验平台的关键部件(旋耕行驶导向装置、旋耕行驶装置、旋耕升降调节装置、旋耕倾角模拟装置、旋耕作业装置和坡地倾角模拟装置)进行结构和参数设计,相关装置的电机进行匹配选型,对整机的测控系统进行搭建,完成整机的加工试制。

(3)对试验平台进行试验性能测试,来验证其功能的可行性和稳定性。结果表明:旋耕倾角模拟装置与目标坡地(土槽倾角)可以在 0°~20°范围内实现精准协同,协同控制的倾角最大偏差为 0.26°,旋耕行驶装置的电动行车可实现 0~3.64 km/h 的前行驶速度,旋耕刀轴可实现 0~335 r/min 的旋耕转速,旋耕升降调节装置可实现 0~30 cm 耕作深度的稳定无级调节。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等. 基于高质高效的西南丘陵山区机械化生产模式评价[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):140-149.
LIU Pengwei, YANG Minli, ZHANG Xiaojun, et al. Evaluation of mechanized production model based on high quality and high efficiency in southwest hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1):140-149. (in Chinese)

[3] 杨福增,牛瀚麟,孙景彬,等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):414-422.
YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):414-422. (in

- Chinese)
- [4] 孙景彬,孟宪哲,曾令坤,等. 丘陵山地农机底盘重心全向调控实验平台设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2025,56(2):511–522.
SUN Jingbin, MENG Xianzhe, ZENG Lingkun, et al. Design and performance test of experimental platform for omnidirectional control of agricultural chassis center of gravity in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):511–522. (in Chinese)
- [5] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等. 遥控全向调平山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)
- [6] 曾荣,李东东,祝英豪,等. 旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2020,51(5):88–97.
ZENG Rong, LI Dongdong, ZHU Yinghao, et al. Design and application of performance test bench for rotary tiller components [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(5):88–97. (in Chinese)
- [7] 孙新城,叶军,严江军,等. 旋转式农机土槽试验台运行平稳性控制方法及试验验证[J]. 农业工程学报,2015,31(13):46–52.
SUN Xincheng, YE Jun, YAN Jiangjun, et al. Running stability control method and test verification of soil groove test rig for rotary agricultural machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 46–52. (in Chinese)
- [8] 许洪斌,梁举科,徐涛金,等. 微耕机旋转耕作部件土槽试验台设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(9):1–5,19.
XU Hongbin, LIANG Juke, XU Taojin, et al. Design on soil bin test rig for rotary tillage tool components of mini tiller cultivator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(9):1–5,19. (in Chinese)
- [9] 张超,张翼夫,陈金楚,等. 基于田间耕作试验台的犁体耕阻效果仿真及验证[J]. 农机化研究,2023,45(3):182–189,196.
ZHANG Chao, ZHANG Yifu, CHEN Jinchu, et al. Simulation and verification of plow body cultivation resistance effects based on field cultivation test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(3):182–189,196. (in Chinese)
- [10] 杨艳山,丁启朔,丁为民,等. 田间原位综合耕作试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2016,47(1):68–74.
YANG Yanshan, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Design and application of multi-purpose in-situ tillage tool testing platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):68–74. (in Chinese)
- [11] 曾百功,叶进,杨仕,等. 微耕机土壤耕作部件田间测试平台的研制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(4):456–459.
ZENG Baigong, YE Jin, YANG Shi, et al. Development of field test platform for tillage components of micro-cultivator[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2017,43(4):456–459. (in Chinese)
- [12] 管春松,崔志超,高庆生,等. 双轴旋耕碎土试验台设计与分层耕作试验[J]. 农业工程学报,2021,37(10):28–37.
GUAN Chunsong, CUI Zhichao, GAO Qingsheng, et al. Design of biaxial rotary tillage soil test bench and layered tillage test [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 28–37. (in Chinese)
- [13] 姚忠志,沈东华,皮灵杰,等. 简易土槽试验台的设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(8):39–45,102.
YAO Zhongzhi, SHEN Donghua, PI Lingjie, et al. Design and experiment of simple soil bin test bench [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 39–45,102. (in Chinese)
- [14] 王元俊,李明生,谢守勇,等. 丘陵山地耕作装备发展现状及展望[J]. 农业工程,2023,13(9):12–19.
WANG Yuanjun, LI Mingsheng, XIE Shouyong, et al. Development status and prospect of tillage equipment in hilly and mountainous areas[J]. Agricultural Engineering,2023,13(9):12–19. (in Chinese)
- [15] 全国国土资源标准化技术委员会(SAC/TC 93). 土地利用现状分类:GB/T 21010—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [16] 李军,金嗣淳,王桂英,等. 土槽试验台研究综述[J]. 湖北理工学院学报,2015,31(5):1–5.
LI Jun, JIN Sichun, WANG Guiying, et al. Department of mechanical engineering, academy of armored force engineering[J]. Journal of Hubei Polytechnic University,2015,31(5):1–5. (in Chinese)
- [17] 张居敏,夏俊芳,贺小伟,等. 旋耕埋草机立刀设计功能实现程度的分析[J]. 华中农业大学学报,2014,33(3):124–127.
ZHANG Jumin, XIA Junfang, HE Xiaowei, et al. Analysis on design functions realization degree of vertical blade for stubble burying rotary tiller[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2014,33(3):124–127. (in Chinese)
- [18] 张居敏,周勇,夏俊芳,等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. 农业工程学报,2013,29(1):18–25.
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(1):18–25. (in Chinese)
- [19] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):49–57,273.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):49–57,273. (in Chinese)
- [20] SUN J B, MENG C, ZHANG Y Z, et al. Design and physical model experiment of attitude adjustment device for crawler tractor in hilly and mountains region[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(3):466–478.

[22] LI Yang, LI Shangping, WEN Chunming, et al. Design of an electrically driven sugarcane seeding system based on GNSS – RTK receiver and SAPSO – LADRC algorithm[J]. Sugar Tech. ,2025,27(3) :1 – 12.

[23] 张闻宇. 基于 BDS(北斗)的油菜直播机组作业导航技术研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
ZHANG Wenyu. Automatic navigation technology for direct seeding planter for rapeseed based on BDS [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[24] 孙佳泽. 精密播种机弯道播种定位补偿技术研究[D]. 保定:河北农业大学,2023.
SUN Jiaze. Curve seeding position compensation of precision planter [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[25] 程方平,赵帮泰,梅林森,等. 玉米变量播种技术研究现状及趋势[J]. 中国农机化学报,2024,45(12) :41 – 46.
CHENG Fangping, ZHAO Bangtai, MEI Linsen, et al. Current status and trends of research on variable seeding technology for corn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization Society, 2024, 45(12) : 41 – 46. (in Chinese)

[26] SUN Jiaze, ZHANG Yan, ZHANG Yuting, et al. Precision seeding compensation and positioning based on multisensors[J]. Sensors, 2022,22(19) :7228.

[27] 张晓龙,朱平安,胡春生. 基于经纬度的弹目距离和方位角简易算法[J]. 兵工自动化,2019,38(10) :7 – 9.
ZHANG Xiaolong, ZHU Pingan, HU Chunsheng. A simple algorithm for distance and azimuth of missile-to-target based on longitude and latitude[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(10) : 7 – 9. (in Chinese)

[28] 黄鑫光,王宪良,孟志军,等. 玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统研究[J]. 农业机械学报,2025,56(4) :61 – 71.
HUANG Xinguang, WANG Xianliang, MENG Zhijun, et al. Corn electric drive precision seeder operating condition parameter detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4) : 61 – 71. (in Chinese)

[29] 衣淑娟,张清朋,戴智博,等. 玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(2) :261 – 274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize detail-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2) : 261 – 274. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 145 页)

[21] 张静,刘昱,郑德聪,等. 丘陵山地拖拉机机身自平衡机构稳定性分析[J]. 中国农机化学报,2022,43(9) :102 – 108.  
ZHANG Jing, LIU Yu, ZHENG Decong, et al. Stability analysis of self-balancing mechanism for the body of hily tractors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(9) :102 – 108. (in Chinese)

[22] YANG H T, XIA C G, HAN J Y, et al. Analysis of stability and dynamic model simulation of mountain tractor rollover[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 512(1) : 012151.

[23] 全国农业机械标准化技术委员会(SAC/TC 201). 旋耕机: GB/T 5668—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.

[24] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9) : 374 – 383.  
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9) : 374 – 383. (in Chinese)

[25] 彭贺,马文星,王忠山,等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1) : 157 – 165.  
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1) :157 – 165. (in Chinese)