

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.017

履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验

王德成 赵彦瑞 尤泳 张学宁 王天一 李思标

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对现有王草收获机作业时农艺匹配性差、配套动力不足等问题, 优化设计了一款履带自走式王草收获机专用底盘; 基于减少割茬碾压、低速平稳收割的作业要求, 设计了行走装置与无级变速驱动装置; 根据小地块、缓坡地的地形特征, 设计和选型了液压助力转向系统与车架。开展了整机的稳定性分析及性能试验, 结果显示: 王草收获机底盘的最高行驶速度为 9.02 km/h, 最小转弯半径为 1 349 mm, 最大爬坡度为 26°; 在横向倾角为 15°~16°的坡地等高线行驶时无侧滑、倾翻现象; 在坡度为 10°~12°的纵向坡道, 沿上、下坡方向可靠停驻时间均大于 5 min; 在坡度为 8°~9°的缓坡地作业时可实现速度 0~4.19 km/h 无级变速, 动力充足且运行平稳, 王草的平均割茬碾压率为 7.43%。研究表明, 设计的履带自走式王草收获机底盘能够满足小地块、缓坡地王草机械化收获作业要求。

关键词: 王草收获机; 底盘; 履带式; 缓坡地

中图分类号: S225.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)09-0178-10

OSID:



Design and Experiment of Self-propelled Tracked Chassis of King Grass Harvester for Gentle Sloping Fields

WANG Decheng ZHAO Yanrui YOU Yong ZHANG Xuening WANG Tianyi LI Sibiao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: King grass is a perennial hybrid pennisetum with cluster rooting and high stem. It has good feeding value, but it is difficult to harvest mechanization. Aiming at the problems of poor agronomic matching and insufficient supporting power in the operation of the existing king grass harvester, a self-propelled tracked chassis of the king grass harvester was designed. According to the work requirements of reducing stubble rolling and speed stable harvesting, the walking and stepless variable speed driving device were designed. The hydraulic power steering system and frame were designed and selected based on the terrain features of small plots and gentle slopes. The stability performance was analyzed, and the whole machine was tested. The results showed that the maximum driving speed of the chassis was 9.02 km/h. Its minimum turning radius was 1 349 mm, and the maximum climb was 26°. The whole machine had no side slip and tipping phenomenon when driving on the contour line of the lateral slope of 15°~16°. The time of reliable parking along the uphill and downhill directions on the longitudinal slope of 10°~12° was more than 5 min. When harvesting in the field with a slope of 8°~9°, the whole machine can achieve a stepless speed change of 0~4.19 km/h, which had sufficient power, and ran smoothly. And the average stubble rolling rate of king grass was 7.43%. The research result showed that the designed chassis can meet the mechanized harvesting requirements of king grass planting on small plots and gentle slopes.

Key words: king grass harvester; chassis; crawler; gentle sloping fields

收稿日期: 2023-01-19 修回日期: 2023-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001905)、山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020704-01)和山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1422)

作者简介: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械装备研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

通信作者: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事草业机械工程技术研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

0 引言

王草是一种簇生根、高茎秆的多年生杂交狼尾草,分蘖能力强、生长速度快、产量高、饲用营养丰富、适口性好,在我国广东、广西和海南等地区广泛种植。由于南方地区雨季长,且王草种植区域多为土壤疏松肥沃但地块小、地面起伏大的缓坡地带,王草机械化青贮收获的作业环境复杂,适宜作业期短,作业难度大^[1-5]。

国外对高茎秆饲草机械化收获技术的研究虽然比较成熟,但针对王草青贮收获机械的研究十分薄弱。John Deere、New Holland 和 Claas 等公司生产了多款用于青贮玉米、高丹草和甜高粱等高秆饲草的青贮收获机,其底盘轮距较大,适用于平原地区大地块作业^[6]。而国内针对王草机械化收获技术的研究主要集中于王草切割特性、切割装置和破碎装置的研究^[7-9],王草收获机专用底盘的研究相对薄弱。耿端阳等^[10]针对小地块玉米机械化收获作业设计了一款坡地玉米收获机伸缩式履带底盘,可适应不同种植行距的玉米收获作业,提高了整机的坡地作业稳定性。作为底盘的核心部件之一,静液压传动系统(Hydrostatic transmission, HST)具有调速范围广、无级变速等特点,在拖拉机、植保机和插秧机等农业机械领域得到了广泛应用^[11-13]。吴丽丽等^[14]根据甜高粱分蘖生长特性设计了一种液压驱动收获机械底盘,采用双联泵带动电机转动,可根据甜高粱植株疏密程度实现变速收获。上述研究对王草收获机专用底盘的设计具有借鉴意义。

本文基于王草饲用种植的生长特点,结合减少割茬碾压、低速平稳收割的机械化收获作业要求,设计履带自走式王草收获机专用底盘,并开展样机试制。

1 王草收获机底盘整体设计方案

1.1 作业要求与设计目标

王草种植株距通常为 500 mm,行距为 700 mm,簇状分蘖生长,每簇分蘖数为 20~80 个,刈割平面单簇平均直径实地测量结果为 200 mm;每年刈割 4~7 次,机收割茬高度为 80~200 mm^[15-16]。为避免机械化收获时割茬受到碾压破坏而影响下茬生长,收获机底盘轨距应设计合理,离地间隙应大于 200 mm。由于王草生物量大,且疏密不均,单簇最高分蘖数有时可达 190 个^[16],收割时瞬时喂入量大,极易引起堵塞;因此,为保证收获质量和作业效率,底盘应采用无级变速且动力充足,以便根据喂入情况即时调节整机前进速度。王草种植区

域地形复杂,机械化收获作业对底盘的起伏地面通过性和缓坡地稳定性具有较高要求。结合已有文献报道和实地调研情况^[3-5],本文主要针对坡度为 8°及以下的王草种植区域开展王草收获机专用底盘设计。

综合以上作业要求,确定履带自走式王草收获机底盘的设计目标是:①复杂地形通过性好,采用倒梯形履带行走机构^[17],底盘轨距为 1 250 mm,最小离地间隙为 320 mm。②动力充足,采用无级变速驱动装置,最高车速达 9 km/h。③适应小地块作业,转弯半径小于 1 500 mm。④最大爬坡度大于 8°,在横向倾角为 8°的缓坡地上有较好的行驶稳定性和作业稳定性,且不会出现侧滑现象。

1.2 整机结构和工作原理

1.2.1 整机结构

履带自走式王草收获机底盘主要由车架、行走装置、无级变速驱动装置(发动机、静液压无级变速装置(HST)、机械变速箱)等组成;车架上安装有割台总成、喂入装置、破碎装置、抛送装置、集料箱、打捆装置等收获作业工作部件,如图 1 所示。

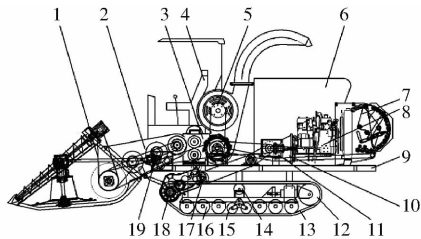


图 1 履带式王草收获机底盘示意图

Fig. 1 Schematic of tracked chassis for king grass harvester

- 1. 割台总成 2. 喂入装置 3. 破碎装置 4. 驾驶座 5. 抛送装置 6. 集料箱 7. 打捆装置 8. 发动机 9. 车架 10. 离合器 11. 分动箱 12. 导向轮 13. 履带 14. 拖带轮 15. 浮动轮 16. 支重轮 17. 静液压无级变速装置(HST) 18. 机械变速箱 19. 多级带轮、链轮以及齿轮箱

1.2.2 王草收获机工作原理

王草收获机可依次完成平茬刈割、挤压输送、切断破碎、抛送收集和青贮打捆工序。作业时,圆盘割台对王草进行整株平茬切割,割后植株由割台总成按顺序引向喂入装置,被挤压输送至破碎装置;破碎装置将王草茎叶与秸秆切碎到规定的长度;抛送装置将切碎后的王草送至集料箱,集料箱辅助运输碎草至打捆装置,完成王草的青贮打捆。

1.2.3 底盘工作原理

履带自走式王草收获机底盘配有机动力输出系统和液压动力输出系统,为王草收获机底盘及工作部件提供动力。

发动机提供的动力经过离合器与分动箱后分两

路输出:一路与 HST 连接,驱动履带底盘行走及转向;另一路由带轮、齿轮箱等将动力传递给割台总成、喂入装置、破碎装置、抛送装置、打捆装置等工作部件。液压系统主要实现以下功能:通过 HST、机械变速箱等驱动底盘行走;通过与发动机其中一个动力输出端连接的液压泵,分别控制破碎装置连接的液压马达和与割台、打捆装置连接的液压缸,实现各工作部件的功能动作,如图 2 所示。底盘主要技术参数如表 1 所示。

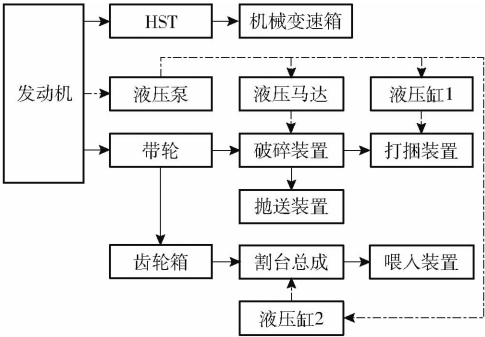


图 2 传动系统简图

Fig. 2 Transmission system diagram

表 1 履带自走式王草收获机底盘主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of self-propelled tracked chassis of king grass harvester

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 930×1 600×2 540
装载质量/kg	4 500
配套动力/kW	74.5
变速方式	HST 无级变速
转向方式	液压助力转向
履带宽度/mm	350
履带接地长度/mm	1 450
轨距/mm	1 250
最小离地间隙/mm	320
最大爬坡度/(°)	>8
最高行驶速度/(km·h ⁻¹)	9

2 底盘关键装置设计与选型

2.1 行走装置设计

与轮式底盘相比,履带式底盘在南方王草种植地区具有更好的稳定性、牵引附着性能和更小的接地比压^[18],故采用履带式行走装置,并对其主要结构参数进行设计。

2.1.1 轨距、接近角与离地间隙

轨距决定底盘的宽度,影响整机的稳定性和通过性。根据前文,王草种植株距 X 为 500 mm、行距 Y 为 700 mm 条件下,收获机的履带沿种植行间行走,避免对割茬产生碾压破坏,如图 3 所示,图中, B 为履带底盘轨距,mm; L 为履带接地长度,mm; b 为

履带宽度,mm。考虑整机在小地块作业的灵活性和收获效率,确定轨距 B 为 1 250 mm。

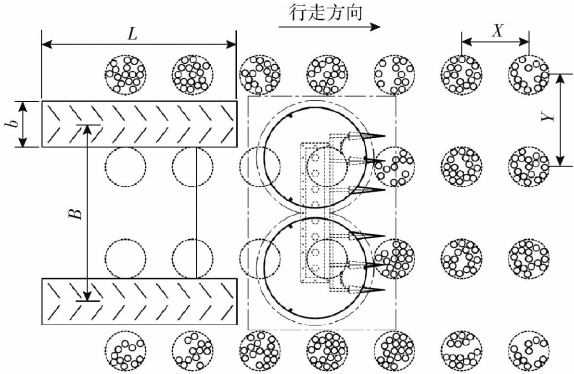


图 3 王草收获模式示意图

Fig. 3 Schematic of king grass harvest

履带式底盘的接近角即为驱动轮与其相近支重轮之间的履带和水平地面的夹角,直接影响整机的越障通过性,以及驱动轮与履带的平稳啮合,本文取接近角为 37.4°^[19]。

根据不同的饲喂对象,王草的刈割期有所差异,割茬高度为 80 ~ 200 mm 不等^[15-16],鉴于履带在松软地面作业时存在下陷情况,设置最小离地间隙为 320 mm,避免底盘触碰导致王草割茬断面受到破坏。

2.1.2 履带接地长度与宽度

由于橡胶履带具有行走阻力小、减振降噪能力强等优点,可对王草割茬起到缓冲保护作用,故采用橡胶履带。履带接地长度 L 与轨距 B 的比值对履带底盘的行驶性能有着重要影响, L/B 越大转向越困难, L/B 越小行驶稳定性越差^[20]。履带接地长度设计经验公式^[21]为

$$L = (1.15 \sim 1.39) B \tag{1}$$

履带宽度设计经验公式为

$$b = (0.18 \sim 0.24) L \tag{2}$$

在保证不对王草割茬造成碾压破坏的基础上,适当增加履带宽度有利于降低接地比压并提高牵引附着性能^[22]。综合考虑确定履带接地长度为 1 450 mm、履带宽度为 350 mm。

2.2 无级变速驱动装置设计

2.2.1 驱动装置工作原理

底盘驱动装置主要包括 HST、机械变速箱和半轴,采用机械变速箱和 HST 串联的动力传递形式。机械变速箱共设置 3 个挡位,通过改变不同的齿轮啮合实现整机高速、中速、低速切换。HST 由一个闭式变量泵-定量马达容积变速回路构成^[23],变量泵单向旋转输入,定量马达可双向旋转输出;整体结构紧凑,传动平稳,回路效率高,变速范围较大。通过调节柱塞变量泵的斜盘倾角,控制整机

的前进、后退、停止及在不同挡位内的无级变速，保证整机在松软地面和复杂地形的适应性和通过性。整机在低速挡位作业时可以实现无级变速，防止王草瞬时喂入量过大导致茎秆堵塞，原理如图 4 所示。

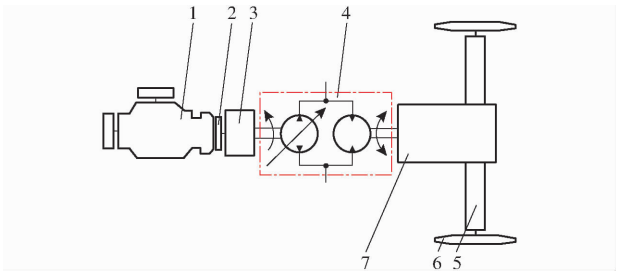


图 4 驱动系统原理图
Fig. 4 Schematic of drive system

1. 发动机 2. 离合器 3. 分动箱 4. HST 5. 半轴 6. 驱动轮
7. 机械变速箱

2.2.2 发动机选型

根据整机在工作过程中的最大输出功率进行发动机的选型。整机的功率消耗主要包括行驶功耗、液压系统功耗及其他工作部件功耗^[24]。

忽略空气阻力的影响，整机在满载匀速爬坡工况下行驶最大阻力为

$$F_{\alpha} = (m + m_z) g [(f_1 + f_2) \cos \alpha + \sin \alpha] \quad (3)$$

式中 F_{α} ——满载爬坡阻力，N

m ——整机质量，kg

m_z ——圆草捆单捆质量，kg

g ——重力加速度，取 9.8 m/s^2

f_1 ——滚动阻力系数，取 0.10

f_2 ——内摩擦阻力系数，取 0.05

α ——最大爬坡角度，取 20°

使用 SolidWorks 软件对整机进行建模，采用质量评估模块得到整机质量 m 约为 4 500 kg。经过前期研究^[7]，王草机械化青贮收获时草捆密度可达 780 kg/m^3 ，圆草捆直径为 1.04 m，宽度为 0.7 m，草捆质量 m_z 约为 465 kg。

爬坡功率为

$$P_{\alpha} = \frac{F_{\alpha} v_{\alpha}}{3\,600} \quad (4)$$

式中 P_{α} ——爬坡功率，kW

v_{α} ——最大爬坡度时整机最高行驶速度，取 4 km/h

液压工作系统主要控制完成整机割台升降、打捆装置开闭、部分带轮张紧和压紧装置动作，此部分功率消耗最大为

$$P_{\omega} = \frac{p_c Q}{60 \eta_v} \quad (5)$$

式中 P_{ω} ——液压系统功率，kW

p_c ——额定压力，取 20 MPa

Q ——液压系统最大流量，取 50 L/min

η_v ——液压系统容积效率，取 0.95

圆盘切割器收割簇生王草时功耗较大，约为 13.5 kW^[7]。依据文献[25]，圆盘切割器、螺旋输送机、切碎装置和打捆装置等部件工作时总功耗 P_L 约为 23.5 kW。因此，发动机额定功率需满足

$$P_e \geq P_{\alpha} + P_{\omega} + P_L \quad (6)$$

计算得到发动机额定功率 $P_e \geq 67.15 \text{ kW}$ ，考虑功率储备，选用常柴 4G33TC 型柴油发动机，其主要参数为：额定功率 74.5 kW、额定转速 2 300 ~ 2 600 r/min、总排量 3.261 L、最大扭矩 310 N·m、净质量 250 kg。

2.2.3 HST 选型

进行 HST 的选型时，首先需要确定液压马达参数。角功率是传动装置设计过程中极为重要的参数，故采用角功率方法^[21]确定液压马达转速和排量。

液压马达角功率为

$$P_{mj} = \frac{F_{T_{\max}} u_{k_{\max}}}{3\,600 \eta_Z} \quad (7)$$

式中 P_{mj} ——液压马达角功率，kW

$F_{T_{\max}}$ ——最大切线牵引力，近似为 F_{α} ，kN

$u_{k_{\max}}$ ——最大理论速度，取 9 km/h

η ——液压马达与驱动轮之间的传动效率，取 0.95

Z ——液压马达数量，取 1

由式(7)计算得液压马达的角功率为 $P_{mj} = 61.84 \text{ kW}$ 。

液压马达排量需要满足

$$P_{mj} \leq \frac{0.95 p_{\max} V_{m_{\max}} n_{m_{\max}}}{60\,000} \quad (8)$$

式中 $p_{\max}$ ——液压系统最高匹配压力，取 38 MPa

$V_{m_{\max}}$ ——液压马达最大排量，mL/r

$n_{m_{\max}}$ ——液压马达最高匹配转速，r/min

液压系统最高匹配压力由溢流阀限定，参考液压系统压力设定方面的经验，最高匹配压力定为 38 MPa，液压马达最高匹配转速取 3 000 r/min，得液压马达排量大于 34.26 mL/r。选取无锡威孚公司生产的 HCT50C 型 HST，其主要技术参数如表 2 所示。

2.2.4 变速箱选型

整机理论行驶速度等于驱动轮圆周速度，为

$$v_t = 0.12 \pi n_e r_d / (i_m i_p) \quad (9)$$

式中 v_t ——理论行驶速度，km/h

n_e ——发动机额定转速，r/min

表2 HCT50C型HST主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of HCT50C HST	
参数	数值
变量泵排量/(mL·r ⁻¹)	0~50
定量马达排量/(mL·r ⁻¹)	50
补油泵排量/(mL·r ⁻¹)	11.2
输入转速/(r·min ⁻¹)	600~3 200
输出转速/(r·min ⁻¹)	0~3 000
最高压力/MPa	39.2
额定压力/MPa	31
总效率/%	≥75

r_d ——驱动轮节圆半径,m
 i_m ——液压马达到驱动轮之间的传动比
 i_p ——分动箱传动比,取0.8125

考虑履带与地面之间的滑转以及闭式液压驱动系统的压力和流量损失,实际行驶速度^[21]为

$$v=\frac{0.12\pi r_d n_e q_p \eta_{pv} \eta_{mv} (1-\delta)}{q_m i_m i_p}$$

(10)

式中 v ——实际行驶速度,km/h
 q_p ——变量泵排量,mL/r
 q_m ——液压马达排量,mL/r
 η_{pv} ——变量泵容积效率
 η_{mv} ——液压马达容积效率
 δ ——履带相对地面的滑转率,参照常见的履带式农用机械,取0.07

已知收获机最大行驶速度为9 km/h,发动机额定转速为2 600 r/min,驱动轮半径为0.13 m;由上文得,变量泵排量为50 mL/r,液压马达排量为50 mL/r,变量泵的容积效率取0.95,液压马达容积效率取0.95,滑转率取0.07,得到 $i_m i_p \approx 11.88$ 。

由于变量泵输入转速为600~3 200 r/min,为使得HST与发动机转速匹配,取分动箱传动比为0.8125。计算得液压马达到驱动轮之间的传动比最小为14.622。据此选取浙江云洲科技公司的YZ-95B型机械变速箱总成,其主要技术参数为:输入转速0~3 000 r/min、Ⅰ挡速比30.502、Ⅱ挡速比22.419、Ⅲ挡速比15.347。

2.3 转向系统设计

2.3.1 液压助力转向原理

转向系统决定履带底盘的整体操纵性能^[26]。本文选取具有结构简单、操纵方便、转向平稳且灵活等优点的液压助力转向系统。液压助力转向系统的工作原理如图5所示,通过液压系统控制转向油缸阀芯动作,进而控制变速箱转向拨叉动作来实现转向。

转向油缸左侧阀芯通油时,左侧阀芯顶住左侧转向拨叉,变速箱左侧半轴切断动力,履带底盘向左

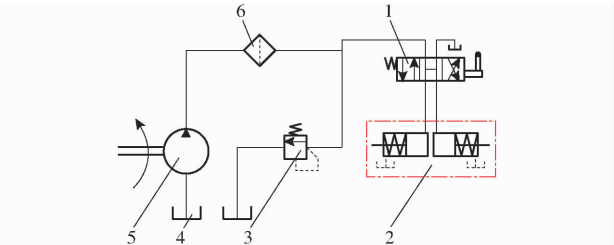


图5 液压助力转向系统原理图

Fig.5 Schematic of hydraulic power steering system
1. 三位四通换向阀 2. 液压转向油缸 3. 溢流阀 4. 液压油箱
5. 液压泵 6. 过滤器

转向;通油结束后转向油缸左侧阀芯在弹簧作用下复位,左侧转向拨叉同时复位,左转向结束。同理,转向油缸右侧阀芯通油可实现履带底盘右转向。三位四通换向阀阀芯的位置决定转向油缸左(右)侧阀芯的动作以及转弯半径。

2.3.2 转向性能分析

当液压助力转向系统不工作时,发动机的动力经过HST和变速箱分别传递至两侧驱动轮,履带底盘沿直线行驶;转向系统工作时,履带底盘两侧履带差速行走,王草收获机按一定的转弯半径向低速侧转向。图6为差速转向示意图。

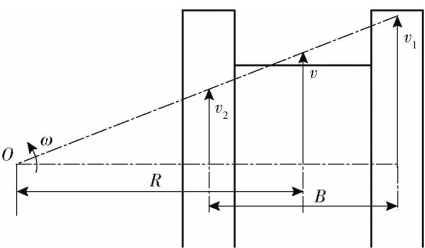


图6 履带底盘差速左转向示意图

Fig.6 Schematic of track chassis differential left steering

在不考虑履带的滑转、滑移的条件下,转弯半径^[27]为

$$R=\frac{B(v_1+v_2)}{2(v_1-v_2)}$$

(11)

式中 R ——转弯半径,mm
 v_1 ——右侧履带线速度,m/s
 v_2 ——左侧履带线速度,m/s

当左侧履带制动时,右侧履带绕着左侧履带中心处转动,此时转弯半径最小,与履带底盘轨距相等^[21],为1 250 mm。

2.4 车架结构设计

车架的质量分布、静态载荷特性等影响着底盘的性能和可靠性^[28-29]。车架由材料为Q235结构钢的矩形管和方形管焊接而成,整体尺寸(长×宽×高)为3 168 mm×1 560 mm×1 040 mm,呈上、中、下3层结构,底部纵梁与行走装置连接支撑整机质量,中部主梁承载发动机、破碎装置、抛送装置和

其它部件,顶部支撑梁上装有驾驶室和液压油箱,结构如图 7 所示。

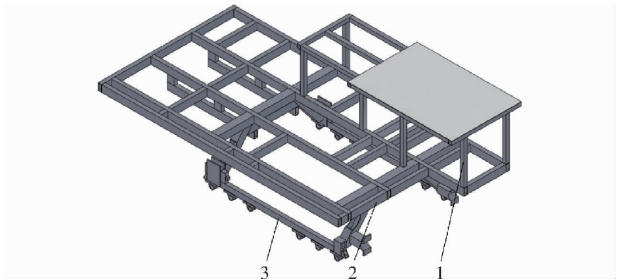


图 7 车架结构图

Fig. 7 Structure diagram of frame

1. 顶部支撑梁 2. 中部主梁 3. 底部纵梁

圆盘割台及相关配件,通过支座和液压缸与车架前端连接。为保证王草收获机的流畅作业,根据收获工艺要求将其它主要工作部件按顺序依次安装在车架右侧。驾驶座布置在车架左前段,与前置驱动匹配性好,视野开阔;液压油箱布置在驾驶座后方,在车架主梁中段。为减少发动机振动、噪声等在作业时的影响,发动机后置,在车架的左后段,同时考虑整机的质量分布均衡,将散热器布置在发动机后面,燃油箱在发动机右侧。整机各部件布置如图 8 所示。

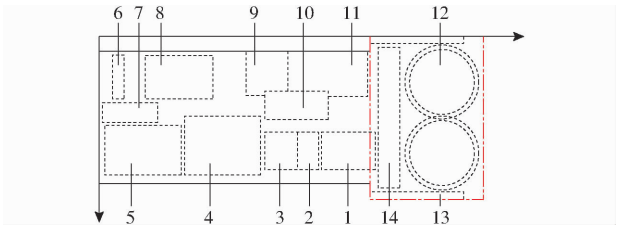


图 8 整机部件布置示意图

Fig. 8 Schematic of component layout of whole machine

1. 喂入装置 2. 破碎装置 3. 抛送装置 4. 集料箱 5. 打捆装置 6. 散热器 7. 燃油箱 8. 发动机总成 9. 液压油箱 10. HST 11. 驾驶座 12. 圆盘割台 13. 拨禾轮 14. 螺旋输送机

3 整机稳定性分析

稳定性对王草收获机的行驶安全性能和操纵性能有重要影响^[25],包括横向稳定性和纵向稳定性。本文采用极限倾翻角和极限滑移角对整机横向稳定性、纵向稳定性进行评价。

3.1 横向稳定性分析

空载时,王草收获机在横向坡道静止或等速直线行驶时的受力情况如图 9 所示。

由整机受力平衡和对点 C 取力矩的力矩平衡得

$$\begin{cases} N_1 + N_2 = G \cos \alpha_m \\ N_1 (B + 0.5b) + Gh \sin \alpha_m = G [0.5(B + b) - e] \cos \alpha_m \end{cases} \quad (12)$$

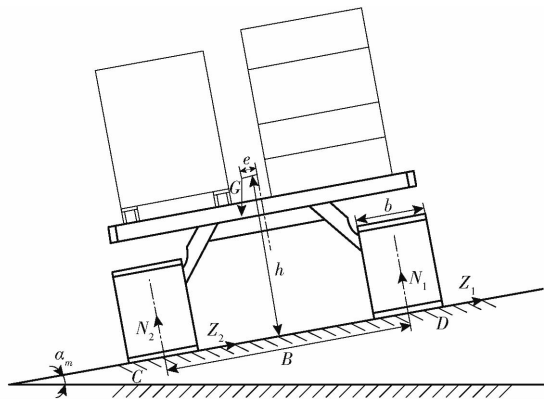


图 9 王草收获机履带底盘横向受力分析图

Fig. 9 Analysis diagram of transverse force of tracked chassis for king grass harvester

式中 N_1 ——地面对上侧履带的法向作用力, N
 N_2 ——地面对下侧履带的法向作用力, N
 G ——整机重力, N
 α_m ——横向极限倾翻角, ($^\circ$)
 h ——重心到地面的垂直高度, mm
 e ——重心离开纵向中心平面的偏移距离, mm

可求得点 D 的支反力为

$$N_1 = \frac{G [0.5(B + b) - e] \cos \alpha_m - Gh \sin \alpha_m}{B + 0.5b} \quad (13)$$

为了避免王草收获机发生倾翻,需满足 $N_1 \geq 0$; 由于 $B > 0$,故可推导得整机不产生倾翻的横向极限倾翻角 α_m 为

$$\alpha_m = \arctan \frac{0.5(B + b) - e}{h} \quad (14)$$

在横向坡道行驶时,还可能发生滑移现象,为避免产生侧滑,整机横向极限滑移角 α'_m 为

$$\alpha'_m = \arctan \mu \quad (15)$$

式中 μ ——地面附着系数

由式(14)、(15)可知,整机横向稳定性主要与重心位置、轨距、履带宽度及地面情况有关。为获得良好的横向稳定性,履带底盘的重心高度和重心偏移距离应尽量取较小值,轨距和履带宽度应尽量取较大值。运用 SolidWorks 软件对整机的重心位置进行测定,得整机重心到地面的垂直距离 h 为 950 mm,重心离开纵向中心平面的偏移距离 e 为 25 mm。依据文献[25],王草种植地的地面附着系数取 0.67,代入上文所述参数得横向极限倾翻角 α_m 为 39.2° ,横向极限滑移角 α'_m 为 33.7° 。

3.2 纵向稳定性分析

纵向倾翻是指在上坡或下坡时,王草收获机两侧履带绕后支重轮或前支重轮的倾翻。

履带底盘匀速上坡时,由于速度较慢,空气阻力可忽略不计,此时整机可视作在纵向坡地上静止,其

受力处于平衡状态,如图 10a 所示。

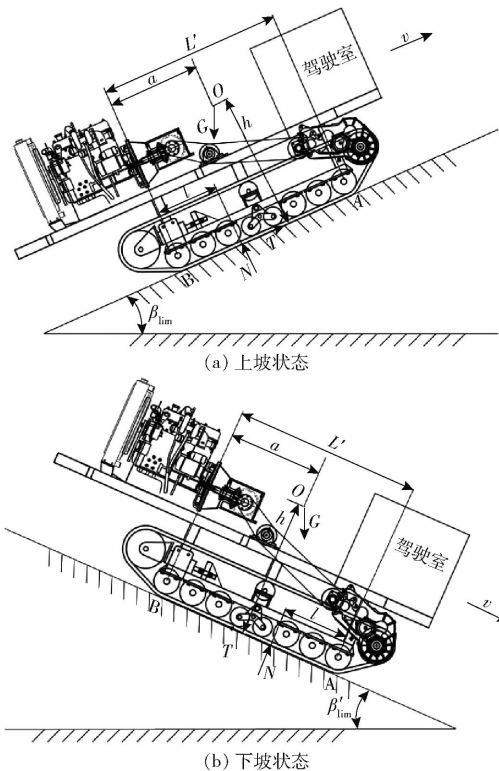


图 10 王草收获机履带底盘纵向极限倾翻受力分析图
Fig. 10 Analysis diagrams of longitudinal limit overturning force of tracked chassis for king grass harvester

对支重轮 B 取矩,建立力学平衡方程为

$$\begin{cases} N = G \cos \beta_{\text{lim}} \\ Nl + Gh \sin \beta_{\text{lim}} - G a \cos \beta_{\text{lim}} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中 N ——地面对整机的垂直支反力, N
 β_{lim} ——上坡极限倾翻角, ($^{\circ}$)
 l ——支重轮 B 轴线与垂直支反力之间的距离, mm
 a ——重心与支重轮 B 轴线之间的距离, mm
可求得

$$l = \frac{a \cos \beta_{\text{lim}} - h \sin \beta_{\text{lim}}}{\cos \beta_{\text{lim}}} \quad (17)$$

为使王草收获机上坡时不发生倾翻,地面对整机的垂直支反力 N 作用线应落在支重轮 B 之前,即 $l \geq 0$,推导出上坡极限倾翻角 β_{lim} 为

$$\beta_{\text{lim}} = \arctan \frac{a}{h} \quad (18)$$

同理,履带底盘下坡极限倾翻临界状态如图 10b 所示,下坡极限倾翻角 β'_{lim} 为

$$\beta'_{\text{lim}} = \arctan \frac{L' - a}{h} \quad (19)$$

式中 β'_{lim} ——下坡极限倾翻角, ($^{\circ}$)
 L' ——支重轮 A、B 轴线间的距离, mm
由式(18)、(19)可知,在上坡或下坡时,整机纵向稳定性与重心高度、重心至支重轮轴线的距离有

关;重心高度 h 越小,重心与对应支重轮轴线(下坡时为支重轮 A)的距离越大,整机就越不容易发生倾翻,纵向稳定性越好。由上文知, L' 为 1 450 mm、 h 为 950 mm;运用 SolidWorks 软件对整机的重心位置进行测定,得重心至支重轮 B 轴线的距离 a 为 700 mm,将所述参数代入式(18)、(19),得到上、下坡极限倾翻角分别为 36.4° 和 38.3° ,均大于 8° ,能够满足在缓坡地行驶时王草收获机的稳定性要求。

4 整机性能试验

4.1 试验条件

在石家庄鑫农机械有限公司完成王草收获机专用底盘的加工试制,搭载其它工作部件。2022 年 4 月,在河北省无极县北苏工业园区进行了整机性能试验。试验仪器设备包括皮尺、卷尺、秒表、土壤坚实度测试仪和角度测量仪等。参照 GB/T 5262—2008《农业机械 试验条件测定方法的一般规定》,测试田间的环境参数。

4.2 性能试验

试验场地有平整地面,也可找到随机坡度的干硬坡面,土壤坚实度平均为 463.5 kPa。根据王草收获机专用底盘设计目标,分别对最高行驶速度、最小转弯半径、爬坡性能、坡地稳定性、驻车制动安全性等指标进行测试。

4.2.1 最高行驶速度测试

整机有 3 个速度挡位,且可在每个挡位内实现无级变速。如图 11a 所示,按照 GB/T 10394.3—2002《饲料收获机 第 3 部分:试验方法》进行了最高行驶速度测试。选取长度大于 50 m 的田间平整路面,驾驶员操作调速手柄,使用秒表分别测量整机以不同挡位最高速度直线行驶 50 m 所需时间,每个挡位重复 3 次测量并取平均值,计算出不同挡位内最高行驶速度,试验结果如表 3 所示。



图 11 行驶性能测试

Fig. 11 Tests of driving performance

由表 3 可知,王草收获机行驶动力充足, I、II、III 挡实际最高行驶速度分别为 4.19、6.07、9.02 km/h,均与各挡位的理论最高行驶速度接近;整机能够以中高速在田间或道路行驶。由于整机的功率损失、

表 3 最高行驶速度测试结果

Tab.3 Maximum driving speed test results					
挡位	序号	时间/ s	平均 时间/s	实际速度/ (km·h ⁻¹)	理论速度/ (km·h ⁻¹)
Ⅰ挡	1	46.04			
	2	40.31	42.96	4.19	4.82
	3	42.53			
Ⅱ挡	1	28.26			
	2	27.57	29.65	6.07	6.56
	3	33.12			
Ⅲ挡	1	21.82			
	2	19.15	19.96	9.02	9.58
	3	18.91			

人为操作误差和履带底盘在田间路面的滑转,整机实际行驶速度低于理论行驶速度。

4.2.2 最小转弯半径测量

参照 GB/T 3871.5—2022《转向圆和通过圆直径》,进行最小转弯半径测量。整机以速度 1 km/h 在田间平稳行驶后,通过液压装置控制底盘的一侧履带制动,另一侧履带前进;行驶 360°后驶出测试区,用卷尺分别在车辙轨迹圆的 3 个等分点处测量所留轨迹圆直径,并计算其平均值,试验如图 11b 所示。最小转弯半径的试验结果如表 4 所示。

表 4 最小转弯半径测试结果

Tab.4 Minimum turning radius test results					mm
转向	序号	直径	直径均值	最小转弯半径	
左转	1	2 700			
	2	2 750	2 703		
	3	2 660			
右转	1	2 710			1 349
	2	2 675	2 692		
	3	2 690			

由表 4 可知,整机最小转弯半径为 1 349 mm,满足南方地区小地块作业需要和设计要求;与理论值(1 250 mm)相比,实测值更大一些,主要是因为整机较重,且转弯时履带存在滑移、滑转的现象。

4.2.3 爬坡试验

在试验现场随机选取坡度 8°~30°坡面进行试验,如图 12 所示。

整机以速度 1 km/h 平稳驶向坡面,当通过坡面后使用角度测量仪测量对应爬坡度。试验结果显示整机可顺利通过 8°的坡面,最大爬坡度为 26°,满足缓坡地王草收获要求。

4.2.4 坡地稳定性试验

在试验现场选取坡度为 15°~16°的坡地,整机以速度 1 km/h 在横向坡地等高线行驶,并观察有无侧滑、倾翻倾向,如图 13 所示。



图 12 爬坡试验

Fig.12 Test of hill climbing crossing



图 13 坡地稳定性试验

Fig.13 Stability test on slope land

结果表明,王草收获机在横向倾角为 15°~16°的坡地等高线行驶时稳定性良好,无侧滑、倾翻现象,满足标准要求^[30],亦满足缓坡地(8°)行驶稳定性要求。

4.2.5 驻车制动试验

为保证驻车制动安全性,参照 GB/T 10394.4—2009《饲料收获机 第 4 部分:安全和作业性能要求》,基于王草收获实际作业条件,在试验现场选取坡度为 10°~12°、总长为 11.4 m 的干硬坡道,开展上坡、下坡驻车制动试验,如图 14 所示。整机在规定的坡道上停住,按要求将变速箱置于空挡、发动机熄火后,以规定外力施加在制动踏板上,能够可靠停驻 5 min 以上,满足国家标准要求。



图 14 驻车制动试验

Fig.14 Parking brake test

4.3 田间收获试验

为进一步验证底盘的农艺匹配性,于 2022 年 5 月在河北省无极县北苏工业园区王草试验田进行田

间收获试验,如图 15 所示。选取坡度为 $8^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 的试验田,测得王草株、行距平均约为 500、700 mm,株高为 1.5 ~ 2.1 m,单簇分蘖数达 20 个以上。整机以 I 挡无级变速作业,使前进速度保持在 2.88 km/h 左右^[8];预留行走长度 10 m,收割长度 20 m,重复 3 次试验。观察收获过程中整机运行情况,计算 3 次试验的割茬碾压率,计算公式为

$$K = n/n_z \times 100\% \quad (20)$$

式中 K ——割茬碾压率, %

n ——单次试验中割茬碾压数量, 株

n_z ——单次试验收割长度内割茬总数, 株



图 15 田间收获试验

Fig. 15 Field harvesting test

结果表明,田间收获时底盘可在速度 0 ~ 4.19 km/h 之间及时平稳变速,动力充足;3 次试验的割茬碾压率分别为 8.25%、6.98% 和 7.06%,平均割茬碾压率为 7.43%,割茬碾压较少,底盘的农

艺匹配性良好。当单簇王草分蘖数较多时,驾驶员通过操作调速手柄调节 HST 无级变速装置,及时降低整机前进速度,可有效避免瞬时喂入量过大引起茎秆堵塞现象的发生,满足王草机械化青贮收获作业要求。

5 结论

(1) 针对小地块、缓坡地种植的王草机械化收获困难的问题,基于减少割茬碾压、低速平稳收割的作业要求,提出了履带自走式王草收获机底盘的设计目标,开展了底盘设计与关键装置的选型,并试制样机。

(2) 采用倒梯形、橡胶履带式行走装置,底盘轨距 1 250 mm,最小离地间隙 320 mm,履带宽度 350 mm,履带接地长度 1 450 mm;配套动力 74.5 kW,采用 HST 无级变速驱动装置和液压助力转向。

(3) 田间性能试验结果表明:王草收获机底盘最高行驶速度为 9.02 km/h,最小转弯半径为 1 349 mm,最大爬坡度为 26° ;在横向倾角为 $15^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 的坡地等高线行驶时无侧滑、倾翻现象;在坡度为 $10^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的纵向坡道,沿上、下坡方向可靠停放时间均大于 5 min;田间收获时整机运行平稳,动力充足,能够实现速度 0 ~ 4.19 km/h 无级变速,平均割茬碾压率为 7.43%,对王草收获适应性强,能够满足作业要求,为整机研发提供了借鉴。

参 考 文 献

- [1] 吴能义,王兰,陈福海,等. 3 种热带牧草品种比较研究初报[J]. 中国热带农业,2019(6):74-76.
- [2] ELIANA C, JORGE R, JUAN P, et al. King grass: a very promising material for the production of second generation ethanol in tropical countries[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 95: 206-213.
- [3] 丁迪云,孙浩,陈卫东,等. 华南地区优良牧草种植模式调整[J]. 广东农业科学,2020,47(4):114-121.
DING Diyun, SUN Hao, CHEN Weidong, et al. Adjustment of forage planting pattern in south China[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2020,47(4):114-121. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等. 基于高质高效的西南丘陵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)
- [6] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(8):1-25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):1-25. (in Chinese)
- [7] 叶炳南. 王草收获关键技术与装置的试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2020.
YE Bingnan. Experimental research on key techniques and devices of *Pennisetum sinense* roxb harvester[D]. Beijing: China Agricultural University,2020. (in Chinese)
- [8] 郇晓龙,尤泳,王德成,等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):112-124.
HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):112-124. (in Chinese)
- [9] 尤泳,王红达,郇晓龙,等. 王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):134-142.
YOU Yong, WANG Hongda, HUAN Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of king grass harvester

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 134–142. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 赵春江, 魏传省, 付卫强, 等. 静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 359–365.
ZHAO Chunjiang, WEI Chuansheng, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of cruise control system for hydrostatic transmission tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 359–365. (in Chinese)
- [12] 陈黎卿, 许鸣, 柏仁贵, 等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 25–32.
CHEN Liqing, XU Ming, BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 25–32. (in Chinese)
- [13] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17–24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17–24. (in Chinese)
- [14] 吴丽丽, 董世平, 刘天舒, 等. 自走式甜高粱收割铺条机设计和试验[J]. 农业工程, 2018, 8(10): 90–94.
WU Lili, DONG Shiping, LIU Tianshu, et al. Design and test of self-propelled sweet sorghum harvester windrower[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(10): 90–94. (in Chinese)
- [15] 侯冠璇, 王东劲, 周汗林. 热研4号王草利用概述[J]. 热带农业科学, 2009, 29(3): 71–74.
- [16] 郭太雷, 刘皆惠. 热研4号王草的生物学特性及独特栽培研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 34–36, 39.
- [17] 刘好, 张拓, 谢铤, 等. 小型农用履带底盘多体动力学建模及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 39–46.
LIU Yu, ZHANG Tuo, XIE Ni, et al. Multi-body dynamic modeling and verification of small agricultural crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 39–46. (in Chinese)
- [18] 丁肇, 李耀明, 唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 10–18.
DING Zhao, LI Yaoming, TANG Zhong. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 10–18. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 陈泽宇, 郭秀红, 张承宁. 接地长宽比的设计对履带车辆行驶性能的影响[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 112–114.
CHEN Zeyu, GUO Xiuhong, ZHANG Chengning. Effects of L/B value to tracked vehicles steering characteristic[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 112–114. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 杨聪彬. 高速履带与软地面附着特性与优化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
YANG Congbin. Research on the adhesion property of high-speed track on soft ground and optimization of track shoe[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 姚怀新. 行走机械液压传动与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [24] 朱晨辉. 履带式烟叶采收机液压行驶系统设计与控制方法研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
ZHU Chenhui. Research on design and control method of hydraulic driving system of crawler tobacco harvester[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 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)
- [27] 王猛, 赵博, 王长伟, 等. 基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 557–563.
WANG Meng, ZHAO Bo, WANG Changwei, et al. Method for controlling turning radius of crawler-type tractors based on GMM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 557–563. (in Chinese)
- [28] 吴伟斌, 廖劲威, 洪添胜, 等. 山地果园轮式运输车车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 39–47.
WU Weibin, LIAO Jingwei, HONG Tiansheng, et al. Analysis and optimization of frame structure for wheeled transporter in hill orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 39–47. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] T/NJ 1118—2022/T/CAAMM 139—2022. 山地履带拖拉机 通用技术条件[S]. 2022.