

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.018

牵引式 V 形折叠搂草翻晒机设计与试验*

罗金海 王振华 李志杰 杨 莉 郭喜燕 吴雅梅

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010)

摘要: 阐述了牵引式 V 形折叠搂草翻晒机的总体结构及工作原理, 对搂草机的主要工作部件指轮进行了结构设计, 对弹齿绝对运动轨迹进行了分析; 采用 ADAMS 软件对搂草指盘进行了仿真分析; 设计的双液压系统实现了自动化控制。试验结果表明, 该机结构合理, 工作性能良好, 草条密度变异系数为 15.8%, 漏搂率为 1.2%, 花叶损失率为 2.3%。该机可呈 V 字形折叠、展开, 搂幅可调, 运输便捷; 搂草指盘可整体自动升降, 且每个指盘单独可调, 仿形能力强; 可同时完成搂草、翻晒作业。

关键词: 搂草机 指轮 液压系统 设计 试验

中图分类号: S223.2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)S0-0107-06

引言

我国草原畜牧业装备技术落后, 目前国内搂草机具工作效率低、搂翻性能差、自动化程度低、地面仿形能力差、功能单一, 割后的鲜草不能形成整齐松散清洁的草条, 得不到良好的晾晒及翻晒, 导致草条干燥时间增长, 因此在收贮过程中由于落叶、氧化等原因严重造成草条营养损失, 使收贮牧草品质降低, 同时给捡拾、压捆等后续收贮工序带来困难^[1]。针对以上问题, 本文设计一种牵引式 V 形折叠搂草翻晒机。

1 整机结构及工作原理

1.1 整机结构

牵引式 V 形折叠搂草翻晒机主要由牵引梁、翻晒盘、二节铰接梁、三节铰接梁、四节铰接梁、连接板、横梁、幅宽调节器、浮动管架、链条、弹簧、搂草盘、油管 I、油管 II、折叠展臂、可调式制动器、钢丝绳、翻晒盘控制油缸、折叠展臂控制油缸、油缸固定架、调节杆机构、搂草盘控制油缸、竖梁、后行走轮、拉板、指盘定位管、指盘臂、支撑轮、翻晒盘耙杆、轮胎支架、前行走轮、翻晒盘吊架等组成^[2]。该机具主要采用正牵引方式作业, 其主要工作部件及结构如图 1 所示。

1.2 工作原理

牵引式 V 形折叠搂草翻晒机与拖拉机配套使用。工作时, 拖拉机液压系统与搂草机油管相连接,

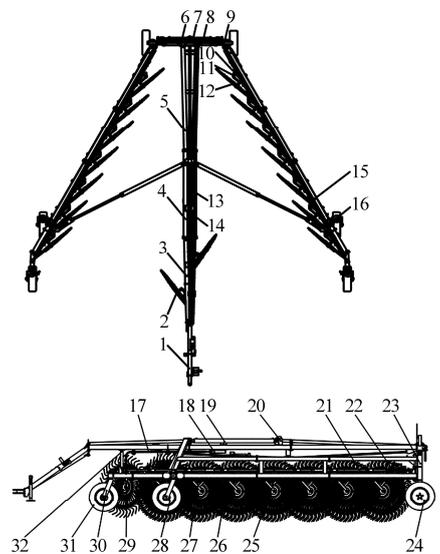


图 1 牵引式 V 形折叠搂草翻晒机结构示意图

Fig. 1 Composition of trail-type V-shape folding hay rake

1. 牵引梁 2. 翻晒盘 3. 二节铰接梁 4. 三节铰接梁 5. 四节铰接梁 6. 连接板 7. 横梁 8. 幅宽调节器 9. 浮动管架
10. 链条 11. 弹簧 12. 搂草盘 13. 油管 I 14. 油管 II
15. 折叠展臂 16. 可调式制动器 17. 钢丝绳 18. 翻晒盘控制油缸
19. 折叠展臂控制油缸 20. 油缸固定架 21. 调节杆机构
22. 搂草盘控制油缸 23. 竖梁 24. 后行走轮 25. 拉板 26. 指盘定位管
27. 指盘臂 28. 支撑轮 29. 翻晒盘耙杆 30. 轮胎支架
31. 前行走轮 32. 翻晒盘吊架

液动力使油缸带动折叠展臂呈 V 字形展开。搂草机牵引梁在拖拉机牵引力作用下使机具行进, 同时带动 14 个指轮转动将饲草向中央搂集, 与此同时

收稿日期: 2014-07-29 修回日期: 2014-08-22

* 内蒙古自治区科技重大专项资助项目

作者简介: 罗金海, 助理工程师, 主要从事畜牧业机械化工程技术研究, E-mail: richard2008ljh@163.com

位于机具前方的2个翻晒盘将饲草搂翻起来,实现搂草、翻晒联合作业。工作结束后,通过液压系统将展臂折叠,同时将指轮提升至地面一定高度使机具自动转为运输状态。

1.3 主要技术与性能参数

搂草机主要技术与性能参数见表1。

表1 主要技术与性能参数

Tab.1 Main technical specification and performance parameters

参数	数值
整体质量/kg	1 996
最大工作幅宽/m	8.5
运输宽度/m	2.5
平均作业速度/(km·h ⁻¹)	14
指轮直径/m	1.4
单个指轮搂齿数	40
配套动力/kW	30
纯工作小时生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	11.9
草条密度变异系数/%	15.8
漏搂率/%	1.2
花叶损失率/%	2.3

2 主要核心部件设计及参数分析

2.1 指轮弹性搂齿运动轨迹

指轮弹性搂齿(以下简称弹齿)运动轨迹如图2所示,指轮I弹齿A的绝对运动轨迹为ac,指轮I上所有弹齿的轨迹将形成一曲面。指轮II弹齿B的绝对运动轨迹为bf,指轮II上所有弹齿的轨迹将形成一曲面。指轮I的弹齿将牧草沿ε角方向拨动一距离后,由指轮II的另一弹齿继续拨动。M₁m为指轮I所有弹齿开始拨动牧草的线,N₁n为拨动终了线。同样E₁e为指轮II所有弹齿开始拨动线。K₁k为其拨动终了线。为了不产生漏搂,在异地限度E₁e

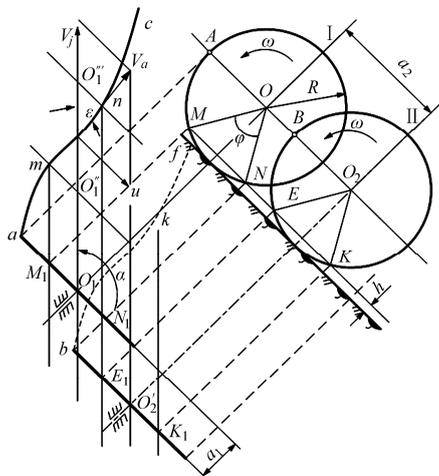


图2 指轮盘搂草过程轨迹示意图

Fig.2 Diagram of raking motion track

线必须与N₁n线相重合^[3]。

2.2 指轮参数设计

2.2.1 指轮直径D

指轮直径是指弹齿顶部的直径,一般为1.2~1.5m,该设计指轮直径取D=1.4m。

2.2.2 弹齿运动轨迹交线高度h

根据图2及其分析,为了降低牧草漏搂率,指轮I和指轮II所有弹齿端部的轨迹构成曲面的交线离地高度h,不应超过割草机的割茬高度,一般取h=40~60mm,本设计取h=52mm。

2.2.3 弹齿拨草角φ

弹齿拨草角即弹齿拨草到拨草终了的弹齿转角,它与交线高度h,指轮半径R的关系式为φ=2arccos(1-h/R),经计算本设计取φ=44.5°。

2.2.4 弹齿间角β

弹齿间角为两相邻弹齿端部与指轮中心连接线的夹角。为了防止漏搂,β角不能过大,同时为了更好地工作,β角与拨草角φ有如下关系

$$\beta = \varphi / m$$

式中 m——任一偶数

一般取β=7°~9°,经计算本设计取β=7.4°。

2.2.5 搂草指轮方向角α

指轮旋转平面与机器前进方向夹角为搂草指轮方向角α,由于该机两侧展臂在液压油缸压力作用下带动两侧指轮可实现折叠、展开动作,故α可调,搂草时常取α=125°~135°。

2.2.6 工作幅宽B

指轮式搂草机的工作幅宽主要由草地产量或所用动力来决定,同时也应适当考虑与割草机工作幅宽及后续作业机械的要求。本文所设计的搂草机具具有幅宽调节器装置,可以通过改变双列指轮盘组之间的距离来调节工作幅宽,该机最大工作幅宽可达8.5m,以适应不同的生产规模。

2.2.7 单个指轮弹齿数n

指轮式搂草机的单个指轮弹齿数为

$$n = \frac{B}{2R \sin \frac{\varphi}{2} \sin \alpha} \quad (1)$$

结合该机特点经计算取n=40。

2.2.8 指轮轴距a₂和指轮间距a₁为

$$a_2 = \frac{m_1 R \varphi}{2} + 2R \sin \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{m_1 \varphi}{2} R \tan \alpha \quad (3)$$

式中 m₁——任意整数,按机构尽量取最小值经计算a₂=787mm,a₁=315mm。

2.3 指轮的 ADAMS 仿真

由于机具在给定作业速度下工作时指轮弹齿端部的绝对运动速度会影响牧草的花叶损失率,因此对指轮的运动进行仿真模拟,分析弹齿端部的绝对速度,从而验证机具作业速度的选择是否合理。

指轮主要由弹齿、压板、中心盘、轮盘外圈组成,用 SolidWorks2014 建立指轮三维实体模型^[4]如图 3 所示。

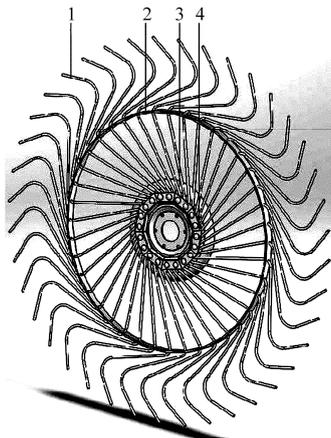


图 3 指轮三维模型

Fig. 3 Three dimensional model of finger wheel

1. 弹齿 2. 轮盘外圈 3. 中心盘 4. 压板

2.3.1 仿真模型的建立

将建立的指轮三维模型图用 ADAMS/Exchange (图形接口模块)将实体模型导入 ADAMS 中重新拾取实体模型的质量特性并用 ADAMS 建立完整的三维实体模型^[5]。由于该指轮有 40 根弹齿,每个弹齿的运动状况完全相同,为了提高仿真模拟计算速度,只对一根弹齿的端部进行仿真模拟,如图 4 所示。

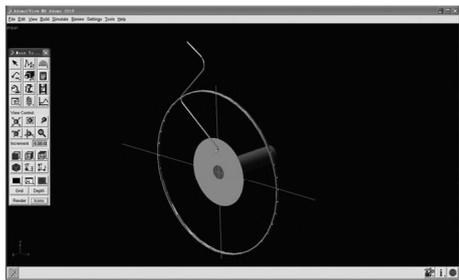


图 4 指轮仿真模型

Fig. 4 Simulation model of finger wheel

2.3.2 模型添加约束

在 ADAMSVIEW 模块软件中将指轮各个部件添加约束^[6-7],使各部件组合成一体,仿真时使其整体运动,如图 5 所示。机具作业时拖拉机沿前进方向的平均作业速度选为 14 km/h(3.9 m/s),经计算在其旋转副上创建旋转驱动 Motion-1,设置运动值 Function(time)为 158°/s,由于搂草指轮与前进方向的夹角约为 50°,在与旋转轴面呈 50°的方向上创建

移动驱动 Motion-2,设置运动值 Function(time) 3.9 m/s。

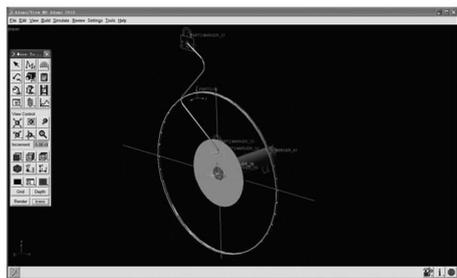


图 5 指轮仿真模型(添加约束副)

Fig. 5 Simulation model of finger wheel with constraints

2.3.3 添加材料属性

根据机具实际作业需要,指轮弹齿部件要选用弹性良好、耐磨、耐腐蚀的钢材,本设计中弹齿选用弹簧钢 60Si₂Mn,根据文献[8]查得其弹性模量 E 为 2.06×10^{11} Pa,泊松比为 0.26 ~ 0.32,密度为 7.85×10^3 kg/m³。

2.3.4 仿真分析

在 SIMULATION CONTROL 工具栏中 END TIME 项里输入 2.3,STEPS 输入 50,对弹齿端部进行 2.3 s,50 步长的仿真^[9-10],仿真轨迹如图 6 所示,仿真结果如图 7 所示。

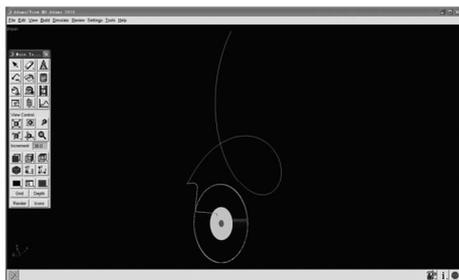


图 6 弹齿端运动轨迹

Fig. 6 Motion track of tooth end

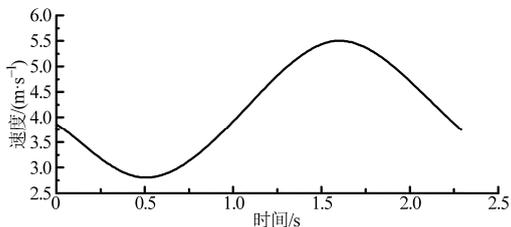


图 7 弹齿端绝对速度曲线

Fig. 7 Absolute velocity curve of tooth end

通过仿真结果可知弹齿端点运动轨迹呈余弦曲线,绝对速度平均值为 4.15 m/s,在机具作业速度不变的情况下,弹齿的绝对速度越小,弹齿对牧草的作用越柔和,可减少花叶损失率。根据文献[3]一般要求弹齿端部绝对速度 $v_a \leq 4.5$ m/s,由此可知该机具作业时弹齿端部绝对速度符合技术要求,机具的平均作业速度选择合理。

2.4 液压系统

该搂草机采用双液压系统,主要由搂草指盘控制油缸、折叠展臂控制油缸、翻晒盘控制油缸、液压控制阀 I、液压控制阀 II、三通管接头等组成,其液压系统结构简图如图 8 所示^[11-12]。工作时折叠展臂控制油缸的活塞推动双侧展臂呈 V 字形展开,根据不同的作业幅宽可调节展开幅度,该机最大工作幅宽可达 8.5 m。搂草指盘控制油缸可使两侧搂草指盘同时升降,根据不同的地表情况调节指轮盘弹齿端部与地面距离,以达到最佳的地面接触,实现仿形搂草。翻晒盘控制油缸可使位于机具前方的翻晒盘自由升降,根据不同的条铺形状调节翻晒盘高度,使其在牧草集搂作业的同时完成翻晒作业。停止工作时,液压系统可将机具折叠成仅为 2.5 m 的宽度,可将指盘最低点提升距地面 350 mm 的高度,达到最佳运输状态,图 8 为该机具运输状态俯视图。

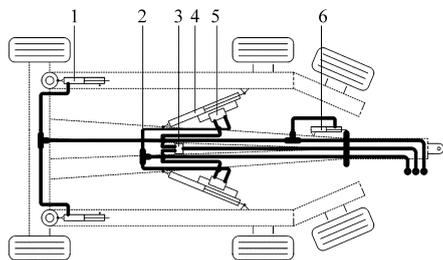


图 8 液压系统结构示意图

Fig.8 Structure schematic of hydraulic system

1. 搂草指盘控制油缸 2. 三通管接头 3. 液压控制阀 I 4. 折叠展臂控制油缸 5. 液压控制阀 II 6. 翻晒盘控制油缸

3 试验

3.1 试验条件

试验作物品种选用紫花苜蓿,搂前牧草含水率为 38%。试验场地的风速约为 5.6 m/s,土壤含水率为 20%,土壤坚实度为 1.2 MPa。试验条件满足试验要求。

3.2 性能试验和生产试验

试验前按照文献[13]规定选择试验区,对搂草机进行试运转和调试,使机器达到最佳工作状态。在机器正常工作状态下对草条密度变异系数、漏搂率、花叶损失率、纯工作小时生产率等参数进行测试,并对试验结果进行分析。

3.2.1 草条密度变异系数

草条密度变异系数是衡量草条密度均匀性的重要指标。在试验现场对各测定点用断面测定仪测定 1 m 长草条 2 个端面的表面形状和底宽,求出平均断面面积和平均高,然后截取该段草条称量,计算草条密度、标准差及变异系数为

$$\rho_d = \frac{m_{gd}}{F_d} \quad (4)$$

$$S_{\rho} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_d} (\rho_d - \bar{\rho}_d)^2}{n_d - 1}} \quad (5)$$

$$V_{\rho} = \frac{S_{\rho}}{\bar{\rho}_d} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ρ_d ——各点草条密度, kg/m^3
 m_{gd} ——每 1 m 草条质量, kg/m
 F_d ——各点断面面积, m^2
 n_d ——测定点数
 S_{ρ} ——草条密度标准差, kg/m^3
 V_{ρ} ——草条密度变异系数, %
 测定结果如表 2 所示。

表 2 草条密度变异系数

Tab.2 Variation coefficient of windrow uniformity

测定次数	1 m 草条质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	各断面面积/ m^2	草条密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	草条密度标准差/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	草条密度变异系数/%
1	1.42	0.16	8.9		
2	1.21	0.10	12.1		
3	1.29	0.13	9.9	1.36	13.5
4	1.32	0.14	9.4		
平均值	1.31	0.13	10.1		

3.2.2 漏搂率

漏搂率是衡量搂草机搂草作业效率的一个指标。试验过程中分别在每一行选出 5 m 长的条铺,在搂草机通过的面积内分别捡拾未被搂起的且长度大于 7 cm 牧草进行称量,然后按照式(7)、(8)计算漏搂率 S ,测定结果及计算结果见表 3,由表 3 可知该机漏搂率为 1.2%,计算结果符合文献[14]中规定漏搂率小于等于 2% 的技术指标,从而说明指轮设计过程中对弹齿运动轨迹交线高度 h 的选择是合理的。

$$m_1 = \frac{m_2}{5n_{xc}A} \quad (7)$$

$$S = \frac{m_1}{m_{st}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 m_1 ——1 m^2 内平均漏搂牧草质量, kg/m^2
 m_2 ——所测各行程 5 m 内漏搂牧草质量之和, kg
 \bar{m}_{st} ——1 m^2 的草条平均质量, kg/m^2
 n_{xc} ——测定行程数 S ——漏搂率, %
 A ——搂草机平均搂幅, m

3.2.3 花叶损失率

花叶损失率反映牧草经搂翻作业后所形成条铺

表 3 漏搂率测定结果

Tab.3 Results of miss raking rate

参数	数值
测定行数	4
1 m ² 平均漏搂牧草质量/(kg·m ⁻²)	0.08
各行程 5 m 内漏搂牧草质量之和/kg	12.8
1 m ² 内草条平均质量/(kg·m ⁻²)	6.3
搂草机平均搂幅/m	8.5
漏搂率/%	1.2

的质量。试验前在牧草试验区取样,每点取约 100 g 牧草,并干燥前后分别称量,计算搂前牧草含水率为

$$H_c = \frac{m_{sc} - m_{gc}}{m_{sc}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 m_{sc} ——干燥前取样牧草质量, g

m_{gc} ——干燥后取样牧草质量, g

试验过程中在试验区内按对角线等距离取 9 点,每点取牧草 30 株,将茎与花叶分开。本试验选用紫花苜蓿属于豆科牧草,叶应包括小叶、小叶梗和叶托。将茎与叶分别称量,计算搂前牧草叶草比为

$$i_{lq} = \frac{m_{hy}}{m_{hy} - m_{hj}} \times 100\% \quad (10)$$

式中 m_{hy} ——干燥后花叶部分质量, g

m_{hj} ——干燥后茎干部分质量, g

然后在每行条铺取 5 点,在每点草条的上、中、下 3 层共取 30 株牧草按照搂前牧草叶草比的测定方法测定搂后牧草叶草比 i_{lh} , 计算花叶损失率为

$$S_{hy} = \frac{i_{lh} - i_{lq}}{i_{lq}} \times 100\% \quad (11)$$

由试验结果可知,该机搂草作业时,弹齿对牧草的作用柔和,花叶损失少,从而说明机具的平均作业速度选择合理。

3.2.4 生产试验

依据文献[15],分别对该搂草机纯工作小时生产率、班次小时生产率、使用可靠性及调整保养方便性进行考核并按相关公式计算。

表 4 花叶损失率测定结果

Tab.4 Measurement results of leaf loss rate

测定项目		干燥前取	干燥后取	含水率/	叶草比/
		样质量/g	样质量/g	%	%
搂前	花叶	98.5	32.3	67.2	56.4
	茎秆	97.8	38.6	60.5	
搂后	花叶	98.0	53.4	45.5	54.5
	茎秆	98.4	59.8	39.2	
花叶损失率/%				2.4	

为了考核搂草机的性能,在生产试验中,拖拉机以 14 km/h 平均速度对该机进行了 60 h 纯工作时间的生产考核,搂草面积达 714 hm²。记录及计算结果见表 5。

表 5 生产试验结果

Tab.5 Results of production test

测定项目	数值
纯工作时间生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	11.9
班次时间生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	9.52
使用可靠性/%	98.4
调整保养方便性/%	98.9

4 结论

(1) 该机结构合理,作业效率高,通过双液压系统自动实现 V 形折叠、展开,运输便捷,仿形能力强,可同时实现搂草、翻晒作业。

(2) 通过 ADAMS 对指轮盘仿真分析可知,弹齿端部轨迹呈余弦曲线,绝对运动速度为 4.15 m/s,搂草动作柔和,花叶损失少,机具作业速度合理。

(3) 通过该机性能试验研究表明该机搂草质量高,损失少,草条密度变异系数为 13.5%,漏搂率为 1.2%,花叶损失率为 2.4%,通过生产试验表明,该播种机纯工作时间生产率为 11.9 hm²/h,班次时间生产率为 9.52 hm²/h,使用可靠性为 98.4%,调整保养方便性为 98.9%,可见该机性能良好,使用可靠,操作安全,各项指标均达到设计要求。

参 考 文 献

- 1 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009:164-166.
- 2 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院. 牵引式 V 形折叠搂草翻晒机:ZL 201410016662.3[P]. 2014-06-24.
- 3 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1155-1156.
- 4 张忠江. Solidworks2010 机械设计从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- 5 杨莉. 马铃薯挖掘摆动分离筛的仿真与参数优化[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009:17-18.
- 6 Yang Li. Simulation and optimization on parameters of separation of potato digger[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology,2009:17-18. (in Chinese)
- 7 李军. ADAMS 实例教程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:36-46.
- 8 郑建荣. 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- 9 机械设计手册编委会. 机械设计手册:第 2 卷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

- 9 杨莉,王春光.基于虚拟样机技术的4SW-130型马铃薯挖掘机分离筛的仿真优化[J].农业机械,2009(6A):90.
- 10 翟改霞,刘贵林,贺刚,等.水平旋转搂草机设计与试验[J].农机化研究,2014(7):172.
Zhai Gaixia, Liu Guilin, He Gang, et al. Design and experiment on the horizontal rotary rake [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(7):172. (in Chinese)
- 11 左健民. 液压与气压传动[M]. 北京:机械工业出版社,2007:91-109.
- 12 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- 13 GB/T14247—1993 搂草机试验方法[S]. 1993.
GB/T14247—1993 Testing methods for rake[S]. 1993. (in Chinese)
- 14 JB/T7766—2011 指轮式搂草机[S]. 2011.
JB/T7766—2011 Finger wheel rakes[S]. 2011. (in Chinese)
- 15 GB/T5667—2008 农业机械 生产试验方法[S]. 2008.
GB/T5667—2008 Productive testing methods for agricultural machinery[S]. 2008. (in Chinese)

Design and Experiment of Trail-type V-shape Folding Hay Rake

Luo Jinhai Wang Zhenhua Li Zhijie Yang Li Guo Xiyan Wu Yamei
(Huhhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China)

Abstract: The basic structure and work principal of trail-type V-shape folding hay rake were introduced. The structure of the finger wheel which was the main working part of the machine was designed and the motion trail of the tooth was analyzed. The finger wheel of the machine was studied with simulation analysis by the ADAMS software. The double-hydraulic system was designed to realize automation control. Experiment results indicated that the hay rake had good performance and reasonable structure, the variation coefficient of uniformity of windrow was 15.8%, miss raking rate was 1.2% and leaf loss rate was 2.3%. The hay rake could fold or unfold into a V-shape, so the working raking width could be changed, it could be transported without any difficulties. The whole finger wheels could be risen and fallen automatically and its single finger wheel was adjustable, so it had a good profile modeling ability. The hay rake could perform rake and tedding simultaneously.

Key words: Hay rake Finger wheel Hydraulic system Design Experiment