

基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试

陈黎卿 梁修天 曹成茂

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 针对目前秸秆还田机功耗测试难的问题,提出了利用虚拟测试平台评估还田机功耗的方法。首先建立秸秆还田机 Abaqus 动力学模型,并进行边界约束条件和载荷设置,分别模拟刀具在入土深度 120 mm 和 90 mm、机具前进速度 3 km/h 和 5 km/h、刀轴旋转速度 260 r/min 和 230 r/min 下的工况,对秸秆还田机的功率消耗进行了虚拟仿真;然后构建了田间功耗测试系统,通过对比仿真数据得知相对误差分别为 9.06% 和 8.02%,验证了该种测试方法的准确性和可行性。最后分别选取 3 种入土深度、2 种前进速度、3 种旋转速度因素组成 18 种工况,对其进行了仿真分析,结果表明:入土深度一定时,秸秆还田机功耗分别和前进速度、旋转速度呈线性递增关系;在入土深度和前进速度一定时,刀轴转速存在消耗功耗最低的转速,特别是在入土深度和前进速度较大时,刀轴转速对能耗影响明显。

关键词: 秸秆还田机; 虚拟测试; 多体动力学; 仿真

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0106-06

Virtual Simulation and Power Test of Straw Counters-field Based on Multi-body Dynamics

Chen Liqing Liang Xiutian Cao Chengmao

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming at the problem that the power consumption of straw counters-field is difficult to test, this paper proposes a virtual test platform evaluation counters-field set power consumption method. Firstly, the dynamic model of straw counters-field was established. The boundary conditions and loads were set up. The virtual simulation of power consumption in straw counters-field was carried out with the buried depth of 120 mm and 90 mm, forward speed of 3 km/h and 5 km/h, rotation speed of 260 r/min and 230 r/min, respectively. Then the field power test system was built and the relative errors were 9.06% and 8.02% respectively by comparing the simulation data. The accuracy and feasibility of the proposed method were verified. Finally, 18 conditions (three buried depths, two forward speeds, and three rotating speeds) were selected to carry out the simulation. The results show that, with a certain buried depth, the straw counters-field set power consumption has an increasing linear relationship with forward speed and rotation speed. With a certain buried depth and forward speed, the lowest power consumption appeared at the rotation speed of 230 r/min. Moreover, with a larger buried depth and forward speed, the effect of rotation speed on the power consumption is obvious.

Key words: smashed straw machine; virtual test; multi-body dynamics; simulation

引言

我国近年秸秆焚烧已经引起了严重的环境污染

问题,为此针对秸秆还田方面国内外诸多学者开展了大量研究。一些农业专家从秸秆还田对土壤影响和作物影响等方面开展了研究^[1-3]。农机专家针对

收稿日期: 2015-08-24 修回日期: 2015-09-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)和农业部现代农业装备重点实验室开放基金项目(201301002)

作者简介: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士,主要从事秸秆处理类机械设计研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

通信作者: 曹成茂(1964—),男,教授,博士,主要从事智能检测与控制技术及农业机械工程研究,E-mail: ccm@ahau.edu.cn

秸秆还田机械的设计开展了大量的研究,取得了丰硕的成果^[4-11]。此外不少学者针对不同作物开展了多种秸秆还田机械的设计、试验^[12-15]。综上所述,目前已经开发出多种针对不同作物的秸秆还田机,取得了大量的研究成果,但是针对还田机械的性能评估方面,例如还田机械的功耗方面主要是通过理论计算、样机试制后的田间试验等方式开展^[16-18]。这些方法均受到条件限制,往往测试结果的准确度受环境、设备精度等影响,因此在农业机械领域,对于研发中机械的性能测试缺乏有效的方法。

随着计算机技术的提高以及土壤、秸秆本构模型的日益完善,使得有限元分析方法日益成为分析农机具触土部件和土壤相互作用规律的有效工具^[18]。本文以某型秸秆还田机为研究对象,基于多体动力学理论,构建 Abaqus 软件平台下的仿真模型,进行秸秆还田机功耗测试并与试验数据对比验证,为农机产品在设计阶段的性能评估提供一种新的方法。

1 秸秆还田机动力学模型建立

以某秸秆还田机为研究对象,由于秸秆还田机模型较为复杂,考虑到建模及仿真运行耗时长等问题,根据研究目的对其结构部件进行简化:在刀轴上直接加载经传动比计算后的转速和前进速度,简化传动总成和牵引装置;壳体等部件对功耗影响较小,可忽略。利用三维软件 Catia 建立秸秆还田机刀轴装配部件和土壤的实体模型,该机刀轴安装有 42 片刀片。将模型导入 Abaqus 有限元分析软件,考虑到实际研究的问题,刀片根部、刀座和刀轴一律采用刚体约束,刚体参考点为旋转轴端面中心,装配效果如图 1 所示。秸秆还田机刀轴材料设置为铸钢,刀片为 65Mn,土壤模型采用延性金属损伤模型,断裂应变为 0.2,损伤演化中的破坏位移为 1,根据库伦-摩尔破坏理论,粘土用 Drucker Prager 模型体现,摩擦角为 35.8°,膨胀角由弹塑性法标定,Drucker Prager 硬化类型为压缩,土壤弹性阶段的泊松比取 0.22,其余土壤参数如表 1 所示^[19]。秸秆模型设置为塑性随动模型,具体参数如表 2 所示^[20]。

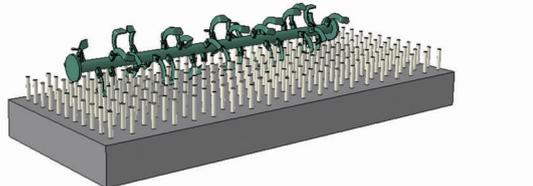


图1 装配效果图

Fig.1 Assembly rendering

表1 土壤参数

Tab.1 Soil parameters

参数	数值	参数	数值
土壤密度/(g·mm ⁻³)	2.35	内聚力/Pa	2.20 × 10 ⁴
孔隙度/%	39.2	内摩擦角/(°)	24.9
体积模量/Pa	3.50 × 10 ⁷	剪切模量/Pa	2.00 × 10 ⁷
土壤比重	2.68	含水率/%	21

表2 秸秆参数

Tab.2 Straw parameters

参数	数值	参数	数值
秸秆密度/(g·mm ⁻³)	1.07 × 10 ⁻³	屈服应力/MPa	11
弹性模量/MPa	480	切线模量/MPa	0.48
泊松比	0.4	硬化参数	0

1.1 网格单元类型的选取

为了尽可能模拟刀片粉碎秸秆以及切土的效果,使用线性减缩积分单元求解位移的结果比较精确,在网格存在扭曲变形时分析精度不会受太大影响,而且在承受弯曲载荷时减缩积分单元不容易发生剪切自锁,因此还田机刀片采用隐式单元库中的八节点零线性六面体单元(C3D8R)。同时针对刀片入土的接触问题,沿模型厚度方向划分4个单元以克服沙漏能,并选取增强型沙漏控制。由于在 Abaqus/Explicit 中小单元会限制增量步长,所以使用扫掠中的进阶算法对刀片进行网格划分,土壤形状结构简单,使用结构化网格技术。综上所述,共划分 1 236 742 个网格单元,1 366 221 个节点,其中 1 234 454 个六面体 C3D8R 单元,2 288 个四面体 C3D4 单元。

1.2 边界约束条件与载荷施加

为了尽可能模拟还田机的工作状况,设置两个动力显式分析步:刀轴旋转下降阶段,根据动内能比,设置 0.026 s 为分析步时长,该分析步主要是考虑到拖拉机动力传递到刀轴上,刀轴开始下降工作阶段;刀轴旋转前进阶段,根据刀轴转速确定刀轴旋转一周的时间步长,由于粉碎还田机刀轴工作转速一般在 400 r/min 以内,设置 0.3 s 为分析步时长。模型中的土壤底面完全固定,两对侧面都用对称边界条件定义,模拟土壤真实环境,保证侧面侧向不会有位移。对刀轴的边界都加在刚体参考点上,分析步 1 仅允许还田机沿竖直方向下降、反转,限制横向以及除旋转外其它方向的旋转自由度;分析步 2 仅允许还田机反转、前进,不允许有横向以及纵向的位移。以上所有运动均采用速度加载,对以上运动状态加载预定义场,并设置光滑幅值曲线,对整个模型考虑重力作用,施加重力加速度 -9 800 mm/s²,边界约束效果图如图 2 所示。刀轴接触秸秆和土壤

时,有法向的接触和切向的滑移,定义刀片与土壤表面的接触属性切向行为为罚函数,摩擦因数 0.3,并采用有限滑移,法向为硬接触,接触为面-面接触。

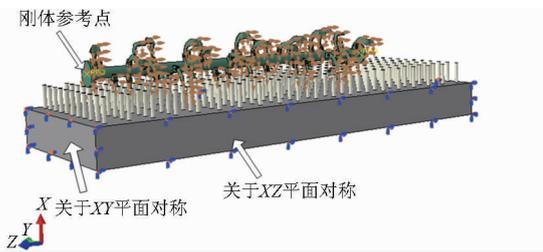


图2 边界效果图

Fig. 2 Effect of boundary

1.3 扭矩监测点选取

需要得到本次模拟工况下还田机切土灭茬消耗的功率,利用机械功率计算公式

$$P = Tn/9\ 550$$

式中 P ——功率, kW T ——扭矩, N·m

n ——转速, r/min

在导出扭矩分布曲线的情况下,可以计算出瞬时功率分布。根据右手定则,扭矩沿刀轴指向 $-Z$,扭矩监测点取图 2 中的刚体参考点。

表3 旋转中心线和监测点坐标

Tab. 3 Coordinates of rotating centerline and monitoring points

位置	X/mm	Y/mm	Z/mm
刀轴左端面中心	0	0	1 144.5
刀轴右端面中心	0	0	-1 144.5
扭矩监测点	0	0	1 144.5

2 结果与分析

应用 Abaqus/Explicit 软件,采用时间差分法对时间进行动力学显式积分,设置 2 种工作状态。工况 1:前进速度 3 km/h,入土深度 120 mm,刀轴旋转速度 260 r/min;工况 2:前进速度 5 km/h,入土深度 90 mm,刀轴旋转速度 230 r/min。为了提高运算速

度,设置 Single 运算,应用高性能工作站求解 inp 文件。工作站配置:双 CPU24 核 2.1 GHz,可用内存 (RAM)96 GB,一种工况平均耗时约 80 h。

2.1 能量分布情况

显式分析能量之间的比较,可以协助评估该分析是否得到了合理的响应。Abaqus 中沙漏能是评价仿真是否可靠的依据,沙漏能过大表明网格划分不精确从而导致计算偏差较大。图 3 是沙漏能 (ALLAE)与内能 (ALLIE)比值的仿真结果,当仿真结果小于 0.05,说明沙漏能可以控制,仿真结果可信。由图 3 得知:对于 0.026 ~ 0.3 s 时间段,沙漏能与内能比稳定在 0.04,在 0 ~ 0.026 s 因为处于刀轴旋转下降阶段,该阶段对于评估机械的功耗影响不大,可以忽略。

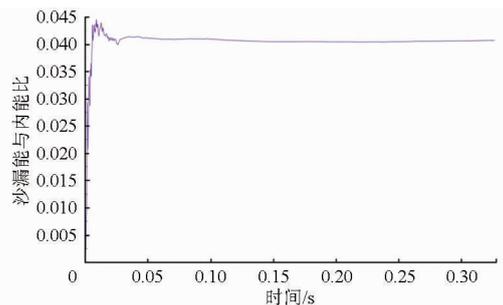


图3 沙漏能与内能比曲线

Fig. 3 Ratio between hourglass energy and internal energy

2.2 灭茬效果及功耗计算

利用 Abaqus 可视化后处理模块,对模型打土灭茬效果以及消耗功率进行分析。设定刀轴旋转 1 周为 1 个时间周期 T ,不同时刻的仿真情况如图 4 所示。由图 4 可知:在 0 时刻,前期准备使刀具完成竖直进土;在 $0.3T$ 时刻,刀具被拖拉机牵引,灭茬效果明显;在 $0.5T$ 时刻,刀具继续前进,秸秆被大量打断,碎土效果明显,刀轴的瞬时扭矩如图 5 所示。

由图 5 可知:在 0.026 s 时刻,刀具停止下降进入前进灭茬阶段。还田机处于灭茬和切土时,输入

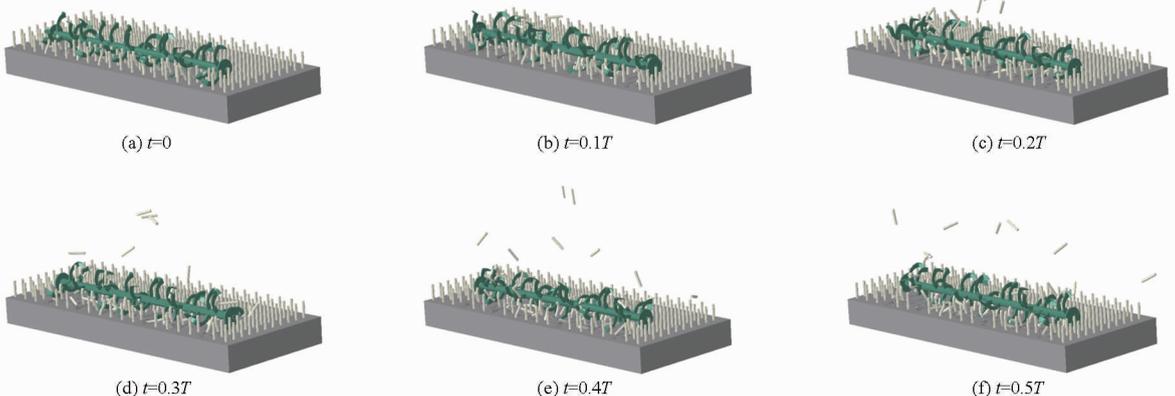


图4 不同时刻刀具耕地效果图

Fig. 4 Tool farmland rendering at different time

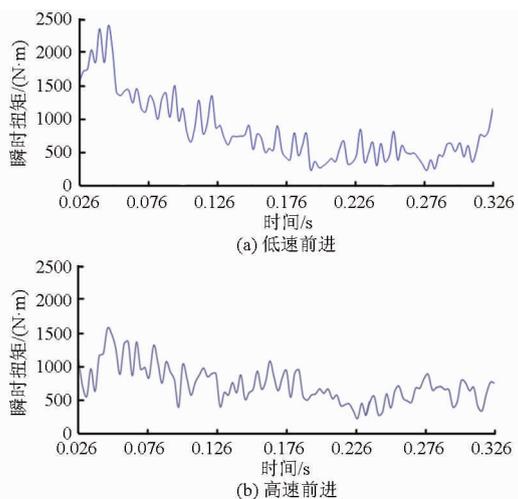


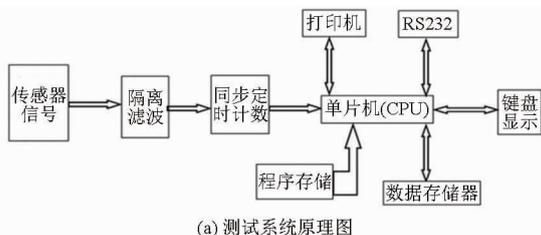
图 5 瞬时扭矩曲线

Fig.5 Instantaneous torque curve

扭矩数值较大。起步阶段还田机刀片周围土壤板结,输入扭矩偏大;随着还田机前进,刀轴后方被刀片耕过的土壤变得松软,两种工况输入扭矩分别在 0.201 s 和 0.176 s 趋于平缓。工作过程扭矩进行均方根处理,得到工况 1 平均消耗功率为 26.775 kW,工况 2 平均消耗功率为 19.379 kW。

2.3 田间试验测试与仿真结果对比

为了验证仿真结果的准确性,开发了秸秆还田机田间功耗测试系统,测试装置原理图如图 6 所示,试验设备包括:东方红 lx-904 型拖拉机、秸秆还田机、12 V 直流电源、1 500 N·m 量程扭矩传感器以及



(a) 测试系统原理图



(b) 扭矩传感器安装位置



(c) 无线发射PAD数据接收



(d) 田间试验

图 6 测试装置图

Fig.6 Test device

数据储存接收装置,测试地点为安徽农业大学郭河现代农业示范园区试验田,试验时入土深度 120 mm,行驶速度 3 km/h,刀轴转速稳定在 260 r/min 时测得数据如表 4 所示,经计算工况 1 平均消耗功率为 29.443 kW,和仿真结果的 26.775 kW 相比,误差为 9.06%。同理,工况 2 平均消耗功率为 21.065 kW,误差为 8.02%。

表 4 不同时刻功率

Tab.4 Power values at different time

序号	拖拉机动力输出轴扭矩/(N·m)	消耗功率/kW
1	549.91	29.084
2	615.93	27.364
3	672.29	27.135
4	701.65	27.941
5	433.65	30.197
6	459.57	29.097
7	509.84	30.009
8	638.88	29.593
9	563.43	29.631
10	570.93	29.305

3 影响功耗的因素讨论

为了进一步研究秸秆还田机入土深度、前进速度以及刀具旋转速度对消耗功耗的影响,设计了 3 种因素下的 18 种工况分析,表 5 为 3 种因素的具体参数以及不同因素下消耗的功率结果。

由表 5 可知:在切土量一定时,刀轴转速越大,功耗越大,转速变化与功耗存在着递增的线性关系,

表 5 各因素与消耗功率关系

Tab.5 Relation between factors and consumed power

入土深度/mm	前进速度/(km·h ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)	功耗/kW
90	3	200	17.684
		230	17.505
		260	19.421
	5	200	19.379
		230	19.021
		260	21.340
120	3	200	23.117
		230	23.715
		260	26.775
	5	200	26.432
		230	26.123
		260	28.237
150	3	200	27.219
		230	34.416
		260	33.907
	5	200	34.456
		230	30.123
		260	35.711

其中 90 mm 入土深度高速前进下,功耗在转速为 230 r/min 时最低。在 90 mm 和 120 mm 入土深度下,前进速度越高,功耗越大,但在入土较深的 150 mm 工况下,5 km/h 的前进速度使得功耗在 230 r/min 工况下发生突降。在 90 mm 和 150 mm 入土深度时,230 r/min 的转速在 3 种前进速度中功耗最低,150 mm 时功耗最小出现在转速 230 r/min、前进速度 5 km/h 情况下,值得注意的是,虽然在 3 km/h、230 r/min 工况下出现了功耗突变,但在 230 r/min 工况下仍然具有低功耗的特性,此时还田机以高速前进。

4 结论

(1)通过理论分析,建立秸秆还田机动力学虚

拟功耗测试平台,在 3 km/h、入土深度 120 mm、转速 260 r/min 工况下仿真得到功耗为 26.775 kW;通过田间对比试验测得实际功耗为 29.443 kW,相对误差 9.06%;在 5 km/h、入土深度 90 mm、转速 230 r/min 工况下相对误差 8.02%。验证了虚拟平台测试秸秆还田机械功耗的可行性。

(2)开展了秸秆还田机入土深度、前进速度以及刀轴旋转速度 3 因素下的 18 种工况仿真分析,由仿真结果得知:入土深度一定时,秸秆还田机功耗分别和前进速度、旋转速度呈线性递增关系;在入土深度和前进速度一定时,可以认为 230 r/min 在 3 种转速中功耗最低。

参 考 文 献

- 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
PAN Jianling, DAI Wan'an, SHANG Zhanhuan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526-535. (in Chinese)
- 沈学善,李金才,屈会娟,等. 砂姜黑土区小麦玉米秸秆全量还田对玉米抗倒性能的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2005-2012.
SHEN Xueshan, LI Jincai, QU Huijuan, et al. Effects of wheat and maize straw returned to the field on lodging resistance of maize in lime concretion black soil region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(10): 2005-2012. (in Chinese)
- HIMANSHU Pathak, RAMANDEEP Singh, ARTI Bhatia, et al. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. Paddy and Water Environment, 2006, 4(2): 111-117.
- 戴飞,张锋伟,赵春花,等. 快速腐熟秸秆还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(4):47-51.
DAI Fei, ZHANG Fengwei, ZHAO Chunhua, et al. Design and experiment on straw returning machine with fast decomposing inoculant spray equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 47-51. (in Chinese)
- 王世学,高焕文,李洪文. 1JGHY-140 型玉米秸秆带状切碎灭茬机的试验研究[J]. 农机化研究,2003(4):175-177.
WANG Shixue, GAO Huanwen, LI Hongwen. Experimental research on 1JGHY-140 narrow belt-shearing stalk and stubble chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003(4): 175-177. (in Chinese)
- 高焕文,李洪文,李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报,2008,39(9):43-48.
GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43-48. (in Chinese)
- 卢彩云,何进,李洪文,等. 基于有支撑切割原理的免耕防堵装置有限元分析[J]. 农业机械学报,2013,44(1):61-66.
LU Caiyun, HE Jin, LI Hongwen, et al. Finite element analysis and experiment on anti-blocking device based on support cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 61-66. (in Chinese)
- 吴子岳,高焕文,陈君达. 秸秆切碎灭茬机的设计与试验[J]. 上海水产大学学报,2001,10(1):60-64.
WU Ziyue, GAO Huanwen, CHEN Junda. Design and test of chopper of stalk and stubble[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2001, 10(1): 60-64. (in Chinese)
- 郭志军,佟金,任露泉,等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报,2001,32(4):102-112.
GUO Zhijun, TONG Jin, REN Luquan, et al. Research method on the interacting problem of tillage tool-soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102-112. (in Chinese)
- 马爱丽,廖庆喜,田平波,等. 基于 ANSYS/LS_DYNA 的螺旋刀具土壤切削的数值模拟[J]. 华中农业大学学报,2009,28(2):248-252.
MA Aili, LIAO Qingxi, TIAN Pingbo, et al. Numerical simulation of soil cutting by spiral otter on the basis of ANSYS/LS_DYNA[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(2): 248-252. (in Chinese)
- CHERYLL CLaunio, CONSTANCIO A Asis, ROWENA G Manalili, et al. Economic analysis of rice straw management alternatives and understanding farmers'choices [M] // James D, Francisco H A. Cost-Benefit Studies of Natural Resource Management in Southeast Asia, Berlin Heidelberg: Springer, 2015: 93-111.
- 李永磊,宋建农,康小军,等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报,2013,44(6):45-49.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):45-49. (in Chinese)
- 13 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(8):46-50.
ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):46-50. (in Chinese)
 - 14 孟海波,韩鲁佳,刘向阳. 秸秆揉切机用刀片断裂失效分析[J]. 农业机械学报,2004,35(4):51-54.
MENG Haibo, HAN Lujia, LIU Xiangyang. Study on fracture failure of cutters used in a 9RZ-60 model rubbing and cutting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(4):51-54. (in Chinese)
 - 15 乔晓东,王小燕,颜华,等. 基于虚拟仪器的后悬挂农具田间测试系统[J]. 农业机械学报,2013,44(10):100-103.
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Field test system of rear suspension tools based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):100-103. (in Chinese)
 - 16 申屠留芳,邵鹏. 正反转旋耕灭茬机刀片的功耗分析[J]. 农机化研究,2007(11):87-89.
SHENTU Liufang, SHAO Peng. Analyzing the energy consumption of the blade of rotary tillage and stubble cutting machine when turning forward direction or reversible[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(11):87-89. (in Chinese)
 - 17 韩光伟,貌建华,汤志军,等. 新型玉米秸秆切碎灭茬机功耗的试验[J]. 农机化研究,2007(3):131-133.
HAN Guangwei, MAO Jianhua, TANG Zhijun, et al. Experimental on power consumption of a new chopper of corn straw and stubble[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(3):131-133. (in Chinese)
 - 18 陈松涛,周学建,师清翔,等. 小麦秸秆还田机粉碎装置性能影响因素试验与优化[J]. 农业机械学报,2007,38(9):67-70.
CHEN Songtao, ZHOU Xuejian, SHI Qingxiang, et al. Experiment and optimization on factors affecting the performance of wheat stalk macerator smashing devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(9):67-70. (in Chinese)
 - 19 佟金,张智泓,陈东辉,等. 凸齿镇压器与土壤相互作用的三维动态有限元分析[J]. 农业工程学报,2014,30(10):48-58.
TONG Jin, ZHANG Zhihong, CHEN Donghui, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of interaction between toothed wheel and soil[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(10):48-58. (in Chinese)
 - 20 王丽娟,石林榕,杨国军,等. 玉米秸秆切割过程的非线性数值模拟与仿真试验[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):252-256.
WANG Lijuan, SHI Linrong, YANG Guojun, et al. Nonlinear numerical simulation and simulation test on the cutting process of corn stalk[J]. Agricultural Research in the Arid Area,2013,31(6):252-256. (in Chinese)

~~~~~

(上接第97页)

- 6 王文明,王春光. 捡拾弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(10):82-89.  
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(10):82-89. (in Chinese)
- 7 关萌,沈永哲,高连兴,等. 花生起挖晾晒后的果柄机械特性[J]. 农业工程学报,2014,30(2):87-93.  
GUAN Meng, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Mechanical properties of peanut peg after digging and drying [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(2):87-93. (in Chinese)
- 8 GUAN Meng, ZHAO Baoquan, GAO Lianxing, et al. Effect of curing time on moisture content and mechanical properties of peanut pods[J]. International Agriculture Engineering Journal,2015,24(2):1-8.
- 9 高连兴,李献奇,关萌,等. 双吸气口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):110-117.  
GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):110-117. (in Chinese)
- 10 于玉真,高连兴,李心平,等. 链齿式农田土壤捡石机栅条齿动力学分析[J]. 农机化研究,2007,29(5):49-51.  
YU Yuzhen, GAO Lianxing, LI Xinpeng, et al. Kinematics analysis on chain tooth rock picker in the farmland soil[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(5):49-51. (in Chinese)
- 11 盛凯,曾南宏. 弹齿滚筒捡拾器的机构特性及其运动数学模型[J]. 农业机械学报,1991,22(1):51-57.  
SHENG Kai, ZENG Nanhong. The mechanical feature and motional math model of spring-finger cylinder pick-ups [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1991,22(1):51-57. (in Chinese)
- 12 刘涛,苏成利,李平. 基于外点惩罚函数与 NSGA-II 算法的气体分馏装置多目标优化[J]. 江南大学学报,2013,12(6):658-665.  
LIU Tao, SU Chengli, LI Ping. Multi-objective optimization of gas fractionation unit based on SUMT and NSGA-II algorithm [J]. Journal of Jiangnan University,2013,12(6):658-665. (in Chinese)
- 13 NY/T 2204—2012. 花生收获机械 质量评价作业规范[S]. 2012.
- 14 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert,SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 15 关萌,陈中玉,高连兴,等. 多功能组合式全喂入花生摘果试验装置研究[J]. 农业机械学报,2015,46(11):88-94.  
GUAN Meng, CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, et al. Multifunctional modular full-feeding peanut picking testing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(11):88-94. (in Chinese)