doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.008

基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试

康建明[1,2]　李树君[1]　杨学军[1,3]　刘立晶[3,4]　王长伟[4]

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000;
3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 4. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 目前圆盘式开沟机功率消耗主要通过理论计算或样机试制后的田间试验等方法得出,测试结果受环境、设备精度影响较大,为此提出了利用虚拟测试平台评估圆盘式开沟机功率消耗的方法。首先建立圆盘式开沟机工作部件的 ANSYS 动力学模型,并进行边界约束条件和载荷设置,分别模拟圆盘式开沟机在开沟深度 400 mm、前进速度 0.8 km/h、刀盘转速 180 r/min 和开沟深度 500 mm、前进速度 1.5 km/h、刀盘转速 220 r/min 2 种工况下的功率消耗,仿真结果为 31.26 kW 和 32.67 kW;然后构建相同工况的田间功耗测试系统,测得的实际功耗为 33.57 kW 和 35.41 kW,仿真值与实测值相对误差分别为 6.88% 和 7.73%,验证了该种测试方法的准确性和可行性。最后分别选取 3 种开沟深度、2 种前进速度和 3 种刀盘转速因素组成 18 种开沟工况,对其进行仿真分析,结果表明:刀盘转速在 200 r/min 时,无论前进速度高低,圆盘式开沟机均具有最低的功耗。

关键词: 圆盘式开沟机; 虚拟测试; 多体动力学; 功耗

中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)01-0057-07

Virtual Simulation and Power Test of Disc Type Ditcher Based on Multi-body Dynamics

KANG Jianming[1,2]　LI Shujun[1]　YANG Xuejun[1,3]　LIU Lijing[3,4]　WANG Changwei[4]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Mechanical Equipment Research Institute*, *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science*, *Shihezi* 832000, *China*
3. *Collaborative Innovation Center for Southern Grain and Oil Crop*, *Changsha* 410128, *China*
4. *Modern Agricultural Equipment Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of that the power consumption of disc type ditcher is difficult to test, a virtual test platform evaluation disc type ditcher set power consumption method was proposed. Firstly, the dynamics model of disc type ditcher was established. In order to shorten the operation time, the secondary characteristics such as chamfer, fillet and connection were omitted. The boundary conditions and loads were set up. The virtual simulation of power consumption in disc type ditcher was carried out with trenching depths of 400 mm and 500 mm, forward speeds of 0.8 km/h and 1.5 km/h, rotation speeds of 180 r/min and 220 r/min, respectively. The power curve of ditch process showed that at the beginning of soil cutting, power consumption was increased quickly, the reason for which was a great deal of power consumption was needed during the process of soil deformation and broken. After that the power consumption was tended to be stable, for the reason of which was the binding force was tended to be less after the soil particle was destroyed. Then the field power test system was built and the relative errors were 6.88% and 7.73%, respectively, compared with simulation results. The accuracy and feasibility of the proposed method were verified. Finally, totally 18 conditions (three trenching depths, two forward speeds, and three rotating speeds) were selected to carry out the simulation. The results showed that with a certain trenching depth, the disc type ditcher had an increasing linear relationship with forward speed and rotation speed. With a certain ditching depth and forward speed, the lowest power consumption was appeared at rotation speed of 200 r/min. Moreover, with a large trenching depth and forward speed, the

收稿日期: 2016-05-19　修回日期: 2016-06-21

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFA71130)和北京市科技计划项目(D151100003715003)

作者简介: 康建明(1984—),男,博士生,新疆农垦科学院助理研究员,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: kjm531@sina.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: xylijj@sina.com

effect of rotation speed on power consumption was obvious. When the rotary speed was 200 r/min, both low and high speeds, disc type ditcher had the lowest power consumption value. According to comparison at rotary speed of 219 r/min in different ditching depths and forward speeds, the power consumption at rotary speed of 200 r/min was decreased by 8.5 kW, 9.6 kW and 4.6 kW, the results provided a theoretical basis for power consumption measurement of rotary ditcher.

Key words: disc type ditcher; virtual test; multi-body dynamics; power consumption

引言

开沟施肥是果园栽培生产管理中工作量最大的环节,目前主要靠人工完成,劳动强度大,作业效率低。开沟机是一种开挖沟渠的专用机械,按工作原理不同可分为:铧式犁开沟机[1]、圆盘式开沟机[2]和链式开沟机[3]。圆盘式开沟机在工作过程中具有散土均匀、工作效率高等优点,在果园、葡萄园等农业生产领域得到了广泛的应用。美国、日本的圆盘式开沟机已形成系列产品,最大功率达 130 kW,可挖深 1.8 m、宽 2.0 m 的沟渠[4]。国内对圆盘式开沟机械开展了相关研究,苏子昊等[5]设计了开沟施肥机的定向施肥装置;叶强等[6]设计了一种驱动型葡萄园小型开沟机;朱继平等[7]对超大型圆盘开沟机工作时刀具的运动轨迹、速度特性进行了仿真分析;袁晓明等[8]对大耕深旋耕刀的制造工艺及耐磨性进行了研究;卢彩云等[9]运用 ANSYS/LS_DYNA 软件对平面刀切削土壤过程进行有限元分析;齐龙等[10]对松土刀在不同转速下的土壤切削过程进行了数值模拟,并对不同转速下松土刀的阻力和功耗进行分析。但对开沟机械功率性能评估方面的研究鲜有报道,例如目前圆盘式开沟机的功率消耗主要是通过理论计算[11]、样机试制后的田间试验[12]等方式获得。这些方法均受外界条件限制,测试结果受环境、设备精度的影响较大。

随着计算机技术的发展以及土壤本构模型的日益完善,有限元方法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[13]。本文以课题组研制的圆盘式开沟机为研究对象,基于多体动力学理论,构建 ANSYS 软件平台下的圆盘式开沟机功耗测试仿真模型,并与田间试验数据对比验证,为农机产品在设计阶段的性能评估提供一种新的方法。

1 圆盘式开沟机动力学模型建立

1.1 开沟刀盘有限元模型

由于圆盘式开沟机模型较为复杂,考虑到建模及仿真运行耗时长等问题,以课题组研制的圆盘式开沟机为研究对象时,对其结构部件进行简化:在开沟刀盘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;忽略壳体等对功耗影响较小的部件;省去占次要地位的倒角、圆角和螺栓连接等特征,利用 Solidworks 软件建立开沟刀盘实体模型,将模型导入 ANSYS 前处理界面中,对开沟刀盘采用拉格朗日算法进行网格划分。其主要参数为:密度 0.007 85 g/mm^3,弹性模量 2.06 MPa,泊松比 0.26[14-15]。

1.2 土壤模型

针对华北地区黄壤土的特性,土壤材料采用 LS-DYNA中的 MAT147(MAT_FHWA_SOIL)土壤材料模型,输入特定的参数,MAT_FHWA_SOIL 采用修正的 Mohr-Coulomb 屈服准则[16],其应力不变量等式表示为

$$-f\sin\varphi+\sqrt{J_2K(\theta)^2+A^2\sin^2\varphi}-c\cos\varphi=0 \quad (1)$$

其中

$$K(\theta)=\cos\theta+\frac{1}{\sqrt{3}}\sin\theta\sin\varphi \quad (2)$$

式中 f——压力,N

φ——内摩擦角,(°)

J_2——偏应力的第 2 不变量

θ——偏应力面中的极角,(°)

$K(\theta)$——应力罗德角函数

A——屈服面准则与标准 M-C 屈服面之间的相似因数

c——黏聚力,MPa

黄壤土模型[17-18]的主要参数取值如表 1 所示,其余参数参考 LS-DYNA971 中 MAT147 默认值,采用 g-mm-ms-N-MPa 单位制。

表 1 黄壤土材料参数

Tab.1 Parameters of yellow loam

参数	数值	参数	数值
土壤种类	黄壤土	剪切模量/MPa	21
土壤密度/(g·cm^{-3})	2.59	黏聚力/MPa	0.02
土粒密度/(g·cm^{-3})	2.79	内摩擦角/(°)	32.5
体积模量/MPa	28	含水率/%	24.3

1.3 土壤-开沟刀盘模型

在建立土壤-开沟刀盘模型时,考虑开沟刀盘切削方式及边界条件处理要求,土壤仿真模型设定为简单的长方体,其尺寸为 800 mm × 500 mm × 500 mm,土壤模型通过映射网格划分成六面体网格,根据开沟深度要求,土壤模型高度大于 500 mm。

为限制土壤切削模拟的总网格数量，本文将土壤网格略微粗大化，但土壤网格尺寸小于刀片网格尺寸，避免模拟过程中出现穿刺现象。图 1 为土壤和开沟刀盘在 ANSYS 软件中的初始模型。

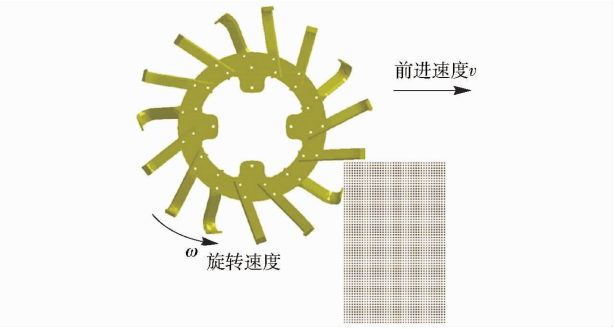


图 1　土壤-开沟刀盘初始模型

Fig. 1　Initial position model of soil－blade

1.4　边界约束条件与施加载荷

为了尽可能模拟圆盘式开沟机的工作状况，根据开沟刀盘转速确定旋转一周的时间步长，由于圆盘式开沟机开沟刀盘转速一般在 220 r/min 以内，故设置 0.27 s 为分析步长。模型中的土壤底面完全固定，对侧面采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。模型中的开沟刀盘除前进方向和旋转方向外都对其进行完全约束。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/s^2，定义开沟刀盘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。

2　开沟过程与仿真结果分析

应用 ANSYS/LS－DYNY 软件，采用时间分差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 0.8 km/h，开沟深度 400 mm，刀盘转速 180 r/min；工况 2：前进速度 1.5 km/h，开沟深度 500 mm，刀盘转速 220 r/min。由于 ANSYS/LS－DYNY 软件计算生成的数据并不能够完全被 LS－DYNA971 软件所接受，故需首先在 ANSYS 中生成相应的 K 文件，对 K 文件内容适当修改后再递交给 LS－DYNA971 软件求解，进而对开沟过程进行仿真研究。

2.1　开沟机理分析

开沟刀盘以工况 1 设置参数从左向右逆时针切削土壤，如图 2 所示（由于 2 种工况下的开沟机理相同，故本节以工况 1 为例进行阐述）。随着开沟刀盘转动，开沟刀顶端首先与土壤发生接触（图 2a），开沟刀的内侧面开始向斜上方挤压土壤（图 2b 和图 2c），受到挤压的土壤发生变形，当变形量足够大时，土壤被撕裂，在开沟刀的切削下，土壤在沿开沟刀前进方向最先被切割开来（图 2d）；随后，土壤在受到开沟刀内侧面挤压和刃口切削的双重作用下迅速破坏（图 2e 和图 2f），并被抛至沟外。从图 2e 可以看出，被开沟刀切下的土壤有沿向上运动的趋势，证明了开沟刀在实际作业中对土壤有纵向推送作用。当切削仿真运行至 32.4 ms 时，相邻的开沟刀开始入土，受土壤模型限制，开沟刀并没有扫过整个切削区间，但仍然可以看出前 1 把开沟刀的尾端未越过土壤正上方时，后 1 把开沟刀已经与土壤接触，表明相邻开沟刀有重叠切土时段，切削过程较平稳。

2.2　开沟过程功耗分析

利用 LS－DYNA971 软件可视化后处理模块，对开沟过程功率消耗进行分析，如图 3 所示。在开沟刀与土壤相互作用初期，工况 1 和工况 2 的功率消耗都随时间不断增加而迅速增大，这主要是因为土壤受挤压变形至破碎需要消耗大量能量；另一方

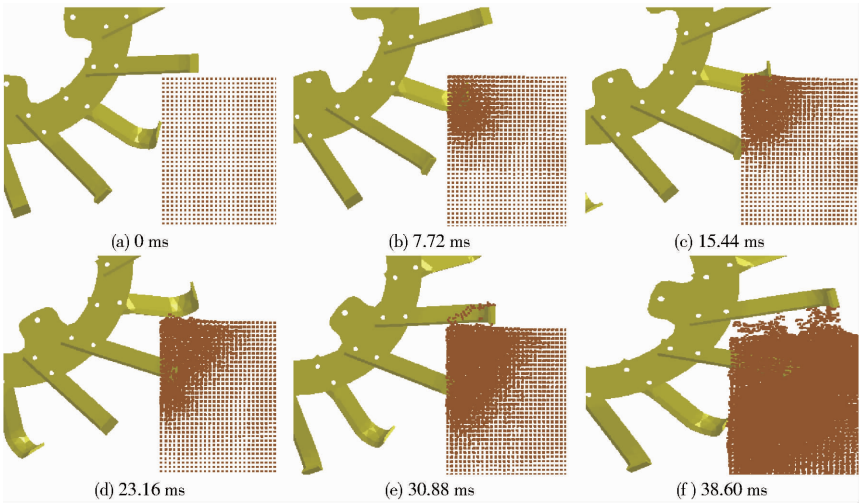


图 2　开沟刀盘与土壤切削过程仿真结果

Fig. 2　Group pictures of cutting process

面,开沟深度越大,土壤的坚实度越大,刀片的切削力使土壤的变形也就越来越大,总功耗变化速率较快,工况 1 在 0 ~ 15.44 ms 过程中,开沟功耗从 0 迅速上升至 33.68 kW,当仿真运行至 23.16 ms 时,开沟功耗达到最大值 35.26 kW,随着开沟过程的进行,功耗变化趋于稳定值 31.26 kW;工况 2 在 0 ~ 15.44 ms 过程中,开沟功耗从 0 上升至 36.68 kW,当仿真运行至 23.16 ms 时,开沟功耗达到最大值 37.26 kW,随着开沟的进行,功耗变化趋于稳定值 32.67 kW,这是由于土壤颗粒在被破坏后相互之间的结合力减小,切削力维持在一个稳定的状态,开沟功耗最终维持在一个稳定值附近。

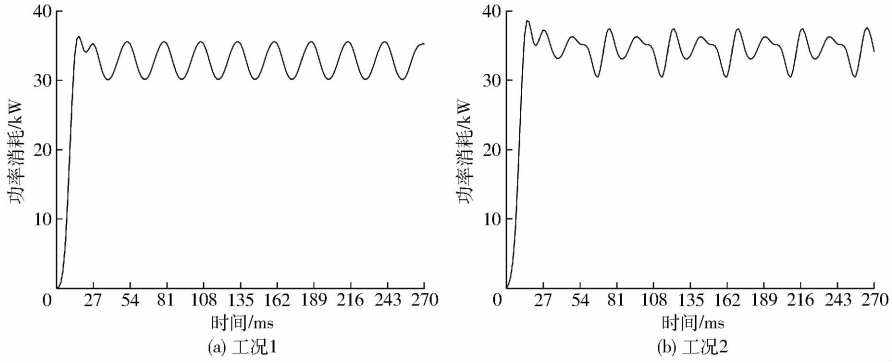


图 3 开沟过程作业功耗曲线

Fig. 3 Power consumption curves of ditch process

2.3 田间试验测试及仿真结果对比

2.3.1 试验设备与条件

为验证仿真模型的准确性,开发了圆盘式开沟机田间功耗测试系统,测试装置原理图如图 4 所示。试验设备包括:东方红 504 型拖拉机,圆盘式开沟机、12 V 直流电源、AKC-205B 型扭矩传感器(精度 ±0.1%,量程 0 ~ 1 500 N·m)以及数据采集卡(分辨率 12 Bit,采集频率 0 ~ 100 kHz)、数据处理终端等。试验地点为:北京市通州区澳香园农业科技园,土壤平均坚实度调整为 0.29 MPa,土壤含水率为 16.2%。

2.3.2 试验因素与性能指标

试验时选用工况 1 和工况 2 设定的工作参数值,根据理论力学原理可知,开沟刀盘扭矩的变化即可反映功率消耗的差异,开沟过程的功率消耗[19]为

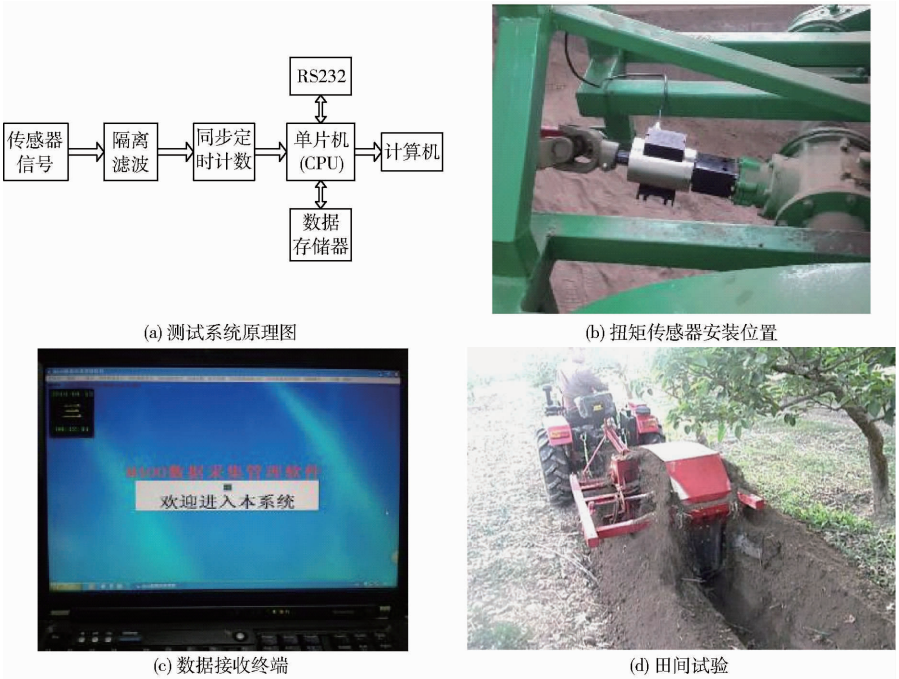
$$P = \frac{nM}{9\,550} \tag{3}$$

式中 P——开沟过程的功率消耗,kW

n——开沟刀盘转速,r/min

M——开沟刀盘扭矩,N·m

因此,在开沟过程中只要测得动力输出轴上的转矩和转速,乘以传递效率,即可计算出开沟过程中



(a) 测试系统原理图

(b) 扭矩传感器安装位置

(c) 数据接收终端

(d) 田间试验

图 4 测试装置图

Fig. 4 Pictures of test device

的功率消耗。试验借助于扭矩、转速测量仪和传感器组成的测试系统来测量作业过程中的扭矩和转速，实时记录功耗数据。

试验时，在 2 种工况下每隔 2 m 取 1 个测试点，共取 10 个，测试数据如表 2 所示。经计算工况 1 的平均功率消耗为 33.57 kW，仿真结果（31.26 kW）与其相比，误差为 6.88%，工况 2 的平均功率消耗为 35.41 kW，仿真结果（32.67 kW）与其相比，误差为 7.73%，验证了该种测试方法的准确性和可行性。

表 2　不同测试点功率消耗

Tab.2　Power consumption values at different time

序号	工况 1		工况 2	
	扭矩/(N·m)	功耗/kW	扭矩/(N·m)	功耗/kW
1	1 659.0	31.27	1 531.5	35.28
2	1 832.5	34.54	1 500.7	34.57
3	1 868.6	35.22	1 617.0	37.25
4	1 682.4	31.71	1 537.1	35.41
5	2 041.0	38.47	1 507.6	34.73
6	1 860.7	35.07	1 581.4	36.43
7	1 672.3	31.52	1 450.3	33.41
8	1 707.9	32.19	1 584.9	36.51
9	1 818.7	34.28	1 574.9	36.28
10	1 665.4	31.39	1 486.3	34.24
均值	1 780.9	33.57	1 537.2	35.41

3　影响因素仿真分析

为进一步研究圆盘式开沟机前进速度、开沟深度和刀盘转速对功率消耗的影响，根据果园开沟施肥深度在 300～500 mm 的农艺要求，确定仿真试验时开沟深度为 300、400、500 mm；前进速度小于 1.0 km/h 生产率达不到设计要求，大于 1.5 km/h 时开沟深度不稳定，结合拖拉机挡位，确定前进速度为 1.0 km/h 和 1.5 km/h；根据文献[20]及前期预试验，确定刀盘转速为 180、200、220 r/min，设计了 3 种因素下的 18 种工况分析，仿真试验安排及结果如表 3 所示。

由表 3 可知，在开沟深度一定时，刀盘转速越大，功率消耗越大，转速变化与功率消耗存在着递增的线性关系，其中开沟深度 300 mm 并在高速前进下，刀盘转速为 200 r/min 时，功率消耗最低。在开沟深度为 300 mm 和 400 mm 时，前进速度越高，功率消耗越大，但在开沟较深的 500 mm 工况下，1.5 km/h 的前进速度使得功率消耗在 200 r/min 工况下发生突降。在 300 mm 和 500 mm 开沟深度下，200 r/min 的刀盘转速在 2 种前进速度中功率消耗最低，当开沟深度为 500 mm 时，功率消耗最小出现在刀盘转速为 200 r/min、前进速度 1.5 km/h 的情况下，值得注意的是，虽然在 1.0 km/h、200 r/min 的工况下，功率消耗发生了激增，但在 200 r/min 工况下仍然具有低功耗的特性，此时圆盘式开沟机仍可以高速前进。因此，无论开沟深浅，刀盘转速 200 r/min 为圆盘式开沟机高速或低速前进下的最优转速。

表 3　各因素时的功率消耗

Tab.3　Power consumption of various factors

开沟深度/mm	前进速度/(km·h^{-1})	刀盘转速/(r·min^{-1})	功耗/kW
300	1.0	180	33.5
		200	33.2
		220	37.5
	1.5	180	34.2
		200	33.8
		220	36.4
400	1.0	180	35.0
		200	34.8
		220	27.6
	1.5	180	36.4
		200	36.6
		220	39.3
500	1.0	180	37.6
		200	41.8
		220	38.5
	1.5	180	37.2
		200	36.9
		220	39.4

4　开沟刀盘最优转速试验

4.1　试验方案及结果

为验证上述结论，本次试验将目前圆盘式开沟机大多采用的刀盘转速 220 r/min[21] 与本研究结果 200 r/min 进行功耗对比试验，试验方案及结果如表 4 所示。

4.2　结果分析

由表 4 可知，作业功耗的试验值略高于理论值，

表 4　不同转速下功耗对比试验结果

Tab.4　Power consumption contrast test result at different rotary speeds

开沟深度/mm	前进速度/(km·h^{-1})	刀盘转速/(r·min^{-1})	功耗/kW
300	1.0	200	35.6
		220	39.4
	1.5	200	36.4
		220	41.0
400	1.0	200	36.9
		220	44.6
	1.5	200	37.2
		220	46.8
500	1.0	200	43.2
		220	51.4
	1.5	200	44.5
		220	53.0

这是由于土壤含水率、作业过程中不可避免的摩擦及磨损而导致额外功率消耗,开沟深度 500 mm 时,功率消耗最高可降低 8.5 kW;开沟深度 400 mm 时,功率消耗最高可降低 9.6 kW;开沟深度 300 mm 时,功率消耗最高可降低 4.6 kW。由此可见,开沟深度越大,刀盘转速在 200 r/min 时的功率消耗减小越明显。

5 结论

(1)通过理论分析,建立圆盘式开沟机动力学虚拟功耗测试平台,在开沟深度为 400 mm、前进速度为 0.8 km/h、刀盘转速为 180 r/min 工况下,功耗仿真值为 31.26 kW;在开沟深度为 500 mm、前进速度为 1.5 km/h、刀盘转速为 220 r/min 工况下,功耗仿真值为 32.67 kW,田间功耗仿真值与实测值误差分别为 6.88% 和 7.73%,验证了圆盘式开沟机虚拟功耗测试平台的准确性。

(2)开展了圆盘式开沟机开沟深度、前进速度以及刀盘转速 3 因素下的 18 种工况仿真分析,由仿真结果得知:开沟深度一定时,圆盘式开沟机功率消耗分别与前进速度、刀盘转速呈线性递增关系;在开土深度和前进速度一定时,可以认为 200 r/min 在 3 种转速中功率消耗最低。

(3)在不同开沟深度和不同前进速度下,对功耗最低的刀盘转速 200 r/min 和目前普遍采用的 220 r/min 进行开沟功耗对比试验,结果表明,在开沟深度 500、400、300 mm 时,刀盘转速 200 r/min 比 220 r/min 节省功耗 8.5、9.6、4.6 kW,开沟深度越大,刀盘转速在 200 r/min 时的功率消耗减小程度越明显。

参 考 文 献

1 杨有刚,刘迎春,刘迎洲,等. 仿生式开沟机出土过程的运动学分析[J]. 农业机械学报,2004,35(2):55 - 59.
YANG Yougang, LIU Yingchun, LIU Yingzhou, et al. Kinematic analysis of a bionic trench digger during out of soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 55 - 59. (in Chinese)

2 张佩,万俸臣. 1K - 500 自走式果园施肥开沟管理机的研制[J]. 农业装备技术,2014,43(2):25 - 26.
ZHANG Pei, WAN Fengchen. Research and manufacture of 1K - 500 orchard fertilization management of furrowing machine[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2014, 43(2): 25 - 26. (in Chinese)

3 马爱丽,廖庆喜,田波平,等. 螺旋式果园开沟装置的设计及土槽试验[J]. 湖北农业科学,2009,48(7):1747 - 1750.
MA Aili, LIAO Qingxi, TIAN Boping, et al. Design on spiral orchard ditching equipments and test in the soil bin[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(7): 1747 - 1750. (in Chinese)

4 张琦,王伟,廖结安. 国内外果园施肥开沟机的研究现状[J]. 农机化研究,2016(5):264 - 268.
ZHANG Qi, WANG Wei, LIAO Jiean. Study status of fertilizing and ditching machine in orchard at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(5): 264 - 268. (in Chinese)

5 苏子昊,兰峰,黎子明,等. 果园定向施肥机施肥系统结构设计[J]. 农业工程,2014,4(4):116 - 120.
SU Zihao, LAN Feng, LI Ziming, et al. Structure design on fertilization system of directional fertilization machine for orchard [J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(4): 116 - 120. (in Chinese)

6 叶强,谢方平,孙松林,等. 葡萄园反转双旋耕轮开沟机的研制[J/OL]. 农业工程学报,2013,29(3):9 - 15. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130302&journal_id = nygcxb = 1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.002.
YE Qiang, XIE Fangping, SUN Songlin, et al. Development of vineyard ditcher with reversal twin rotary tillage wheel[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 9 - 15. (in Chinese)

7 朱继平,袁栋,丁艳,等. 超大圆盘开沟机抛土特性的研究及参数选择[J]. 农机化研究,2012(4):46 - 50.
ZHU Jiping, YUAN Dong, DING Yan, et al. Study on the throwing soil characteristics of the super large disc ditcher and its parameters optimization[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(4): 46 - 50. (in Chinese)

8 袁晓明,王宏宇,赵玉凤,等. 大耕深旋耕刀的制造工艺及其耐磨性[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2012,15(1):33 - 36.
YUAN Xiaoming, WANG Hongyu, ZHAO Yufeng, et al. Manufacture process and wear resistance of deep tillage rotary blade[J]. Journal of Yangzhou University: Nature Science Edition, 2012, 15(1): 33 - 36. (in Chinese)

9 卢彩云,何进,李洪文,等. 基于 SPH 算法的平面刀土壤切削过程模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):134 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140822&journal_id = jcsam = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.022.
LU Caiyun, HE Jin, LI Hongwen, et al. Simulation of soil cutting process by plane blade based on SPH method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 134 - 139. (in Chinese)

10 齐龙,张岩,梁仲维,等. 基于 LS - DYNA 的松土刀切削土壤有限元仿真[J]. 农机化研究,2015(7):48 - 52.
QI Long, ZHANG Yan, LIANG Zhongwei, et al. Finite element simulation on soil cutting based on ANSYS/LS - DYNA[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(7): 48 - 52. (in Chinese)

11 MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(4): 329 - 340.

12 JOHANSENA C, HAQUEB M E, BELLC R W, et al. Conservation agriculture for small holder rainfed farming: opportunities and constraints of new mechanized seeding systems[J]. Field Crops Research, 2012, 132(14): 18 - 32.

13 陈黎卿,梁修天,曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):106 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160315&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.015.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 106 - 111. (in Chinese)

14 夏俊芳,贺小伟,余水生,等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J/OL]. 农业工程学报,2013,29(10):34 - 41. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131005&journal_id=nygcxb=1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.005.
XIA Junfang, HE Xiaowei, YU Shuisheng, et al. Finite element simulation of soil cutting rotary knife roller based on ANSYS/LS - DYNA software[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 34 - 41. (in Chinese)

15 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊 1):33 - 38.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 33 - 38. (in Chinese)

16 LEWIS B A. Manual for LS - DYNA soil material model 147(FHWA - HRT - 04 - 095)[R]. Department of Transportation. Federal Highway Administration, U. S. A., 2004.

17 翟立欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数和工作参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):57 - 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130810&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 57 - 62. (in Chinese)

18 钟江,蒋建东,姜涛,等. 基于光滑粒子流体动力学仿真的板结土壤深旋耕技术[J/OL]. 机械工程学报,2010,46(19):63 - 69. http://www.cjmenet.com.cn/CN/abstract/abstract1505.shtml=1. DOI: 10.3901/JME.2010.19.063.
ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 63 - 69. (in Chinese)

19 汲文峰,贾洪雷,佟金,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):35 - 41.
JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 35 - 41. (in Chinese)

20 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.

21 何义川,汤智辉,孟祥金,等. 2FK - 40 型果园开沟施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2015(12):201 - 204.
HE Yichuan, TANG Zhihui, MENG Xiangjin, et al. Design and experiment of 2FK - 40 orchard ditching fertilizer combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(12): 201 - 204. (in Chinese)

(上接第 56 页)

45 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011,42(6): 47 - 52.
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47 - 52. (in Chinese)

46 SPOOR G, FRY R K. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1983, 28(3): 217 - 234.

47 ALUKO O B, SEIG D A. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 57(3): 143 - 157.

48 GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22(3): 213 - 228.

49 MCKYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades[J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(2): 43 - 58.

50 GODWIN R J, SPOOR G, LEEDS-HARRISON P. An experimental investigation into the force mechanics and resulting soil disturbance of mole ploughs[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(6): 477 - 497.

51 LISOWSKI A, KLONOWSKI J, GREEN O, et al. Duckfoot tools connected with flexible and stiff tines: three components of resistances and soil disturbance[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 76 - 90.

52 丁启朔,丁为民,潘根兴,等. 土壤宏观力学结构与精准耕作[J/OL]. 中国农业科学, 2012,45(1): 26 - 33. http://www.chinaagrisci.com/CN/article/searchArticleResultByKeyword. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2012.01.004.
DING Qishuo, DING Weimin, PAN Genxing, et al. Soil macro-structure and precision tillage[J/OL]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1): 26 - 33. (in Chinese)

53 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报, 2009,40(3): 108 - 111.
MENG Fengying, DING Qishuo, LU Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108 - 111. (in Chinese)

54 韩秋萍. 水稻土条件的旋耕机性能测试及小麦响应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
HAN Qiuping. Measurement of rotary tillor performance in paddy soil condition and wheat response research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)