

基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型

胡建平 赵军 潘浩然 刘伟 赵星升

(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对双轴旋耕机结构参数复杂、功耗高,受耕作时节限制,难以用田间试验的方法进行减阻降耗研究的问题。基于离散元法,构建双轴旋耕-秸秆-土壤耕作模型,研究了双轴配置参数对功耗的影响,通过响应面试验分析,建立了功耗的数学预测模型。模型优化的结果表明,当前后刀轴回转半径均为 195 mm,后轴相对于前轴垂直距离为 99.8 mm,前后轴回转圆水平距离为 100.6 mm,获得的功耗最小为 9.018 kW。为了验证功耗模型的准确性,在固定工作参数下,进行了原尺度整机仿真试验和田间试验。试验结果表明:真实原尺度旋耕机的田间试验功耗与整机仿真值误差均值为 9.5%,范围为 5.8%~13.4%,结合响应面分析说明功耗数学预测模型较为准确,表明旋耕机刀组在缩放过程中误差变化较小,模型能够准确反映双轴配置参数对双轴旋耕机在稻茬田地作业功耗的影响。

关键词: 双轴旋耕机; 功耗; 预测模型; 离散元; 配置参数

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0009-08

Prediction Model of Double Axis Rotary Power Consumption Based on Discrete Element Method

HU Jianping ZHAO Jun PAN Haoran LIU Wei ZHAO Xingsheng

(College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In view of the high power consumption of the double axis rotary cultivator, it is difficult to carry out research on drag reduction and consumption reduction only by the method of field trials because of the complex structural parameters and the high manufacturing cost of the equipment. Based on the discrete element method, a biaxial rotary tillage-straw-soil tillage model was constructed, the influence of biaxial configuration parameters on power consumption was studied, and a mathematical prediction model for power consumption through response surface test analysis was established. The optimization results of the model showed that the gyration radius of the front and rear tool shafts was 195 mm, the vertical distance of the rear shaft relative to the front shaft was 99.8 mm, the horizontal distance of the front and rear shaft gyration circle was 100.6 mm, and the minimum power consumption obtained was 9.018 kW. In order to verify the accuracy of the power consumption model, under fixed operating parameters, a full-scale simulation test and a field test were carried out. The test results showed that the field test power consumption of the real original scale rotary cultivator and the simulation value of the whole machine were 9.5%, and the range was 5.8%~13.4%. Combined with the response surface analysis, it was showed that the mathematical prediction model of power consumption was more accurate, indicating that the error of rotary cultivator model was small during the scaling process, and the model can accurately reflect the influence of the dual-axis configuration parameters on the power consumption of the double axis rotary tiller in the rice stubble field.

Key words: double axis rotary tillage; power consumption; prediction model; discrete element; configuration parameters

0 引言

江淮地区主要采用稻麦轮作种植模式^[1],小麦

播种时的土壤含水率高,前茬秸秆量大,普通单轴旋耕机难以适应覆有大量秸秆的湿黏土壤,耕作品质差。为解决这一问题,双轴旋耕机逐渐被研究应用。

国内学者对双轴旋耕机械进行了较多的设计研究。朱松^[2]基于双轴分层切土原理,设计出秸秆全量还田大耕深双轴旋耕机,两轴上下错位分布,均为正旋,通过改变侧板形状和侧边传动结构,达到大耕深要求。张银平等^[3]研制出正反转组合式灭茬播种机,采用前轴反转深旋、后轴正旋空旋的形式,工作过程中前刀轴深旋抛土、反旋灭茬,后刀轴清草防堵,通过正反配合旋耕提升种床碎土率。汪志祥^[4]设计了一款主要用于玉米茬地块的双轴式旋耕灭茬播种机,主要针对L型灭茬刀的结构进行了参数优化。

双轴旋耕比单轴旋耕在大耕深、秸秆旋埋、碎土方面有很大优势,但是高功耗问题也很明显^[5]。旋耕机的功耗主要是切土功耗、抛土功耗、前进功耗等^[6],双轴旋耕机的切、抛土过程与双轴的配置参数密切相关。现阶段对双轴配置参数研究较少,仅仅依靠经验决定参数取值。由于双轴配置参数较复杂,以及耕作时节限制等因素影响,仅通过田间试验实现双轴配置参数对功耗的影响研究比较困难,所以亟需构建功耗预测模型指导双轴配置参数的优选与分析。

近年来,离散元法被广泛用于散粒结构的模拟研究。它能够有效解决耕作部件与土壤相互作用的非线性问题,获得田间试验不易测得的数据,从而对耕作部件性能做出判断,已经成为当前耕作机具研究的重要辅助手段。国内外学者对离散元耕作模型进行了大量研究,主要集中在耕作模型的构建及耕作力学指标评估方面^[7-13]。在模型构建方面,需要先对土壤特性进行分析,才能选择较为准确的模型。在对湿黏土壤的建模中,主要采用Hertz-Mindlin with Bonding模型和Hertz-Mindlin with JKR模型。在耕作力学研究方面,主要集中在工作参数对机具耕作性能影响以及土壤动态行为研究。

本文根据江淮地区稻茬田地土壤特性及双轴旋耕机作业特点,构建双轴旋耕机-秸秆-土壤耕作模型,旨在预估双轴旋耕机作业功耗,为双轴旋耕机的制造提供理论基础。

1 关键配置参数选择

现有双轴旋耕机机型主要有前轴正旋后轴反旋、前轴反旋后轴正旋、双轴正旋3类。双轴正旋主要是从功耗角度考虑,但是碎土率与抛土高度较低,会产生壅土现象;前轴反旋后轴正旋灭茬效果好,但在湿黏土地通过性差,功耗大。因此本文研究主要针对前轴正旋后轴反旋型双轴旋耕灭茬机,它能同时兼顾碎土率、埋茬率。

通过坐标系建立双轴的空间位置关系,如图1所示。对影响双轴旋耕功耗的关键配置参数进行初步分析。坐标原点为前刀轴中心 O_1 ,后刀轴中心为 O_2 ,机组的前进方向为 x 轴负向。 R_f 为前刀轴回转半径, R_b 为后刀轴回转半径, L_n 为后轴相对于前轴垂直距离, L_l 为前后轴回转圆水平距离, v_m 为机具前进速度, ω_1 与 ω_2 分别表示前、后刀轴角速度。

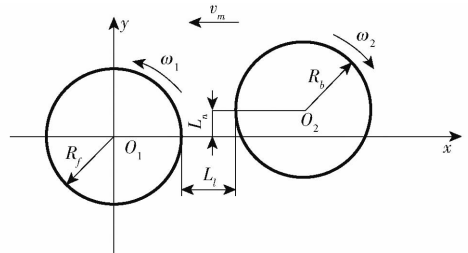


图1 双轴空间排布示意图

Fig. 1 Schematic of double axis spatial arrangement

研究表明,耕深一定,反转旋耕比正转旋耕功耗大^[14],因此在其他参数一定的条件下,当总耕深一定,前刀轴耕深大于后刀轴时,功耗较后刀轴耕深大于前刀轴时小。而前后刀轴中心之间的垂直距离 L_n 是决定前后刀轴组耕深比的关键参数之一,因此 L_n 对双轴旋耕机的功耗有影响。在工作参数确定条件下,前后刀轴回转半径 R_f 与 R_b 不仅会影响耕深比,而且会直接影响前、后旋耕刀所抛土粒的初速度。旋耕土粒初速度会随着回转半径的增大而增大,土粒速度大,碎土率高,但功耗也会随之增加,由此判断确定合理的双轴回转半径参数配置也至关重要^[15]。前后轴回转圆水平距离 L_l 的变化会对土粒流碰撞位置和抛撒距离产生影响,过小的前后间距会造成壅土,提高阻力,增加功耗;过大则会造成重耕土堆叠,降低工作效率,因此也是双轴旋耕机双轴空间配置的一个重要参数。

最终,确定前旋耕刀轴回转半径 R_f 、后旋耕刀轴回转半径 R_b 、后轴中心相对于前轴中心的垂直距离 L_n 及前后轴回转圆水平距离 L_l 这4个双轴配置的关键参数作为影响功耗的研究对象。

2 江淮稻茬田旋耕模型构建

2.1 颗粒接触模型的选取

土壤属性关系到土壤的力学性质,为了保证仿真的合理性,需要确定土壤属性。试验地点为镇江(稻麦)科技综合示范基地,故选择此地的土壤作为试验土壤,依据GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法》以及《江苏省阳山农场水稻土资源评价》,使用五点取样法对土壤取样,深度为23 cm,其中0~10 cm为耕土层,10~18 cm为犁底层,18~23 cm为心土层。采用筛分法进行质地试验,其原

理为采用不同孔径的标准筛对一定量的土壤进行粒径分级筛分。将试样土壤过大孔径筛,取大孔径筛下土,倒入由上至下、孔径由大至小叠好的标准筛的最上层筛中。筛分完成后,由最大孔径筛开始,将各筛取下,称量留在各筛上的土,精度为 0.1 g。通过测量各粒径范围内土壤质量进一步计算粒径占比,依据土壤粒径占比对试验土壤的土壤质地进行分类。最终测得砂粒的粒径含量占比为 53.8%,粉黏粒的粒径含量占比为 46.2%,根据国际制标准对试验土壤进行分类,确定为黏壤土。

因为 Hertz - Mindlin with Bonding 模型采用小颗粒粘结成大块物料,外力作用下颗粒间粘结力会发生破坏,且不会再次生成,从而产生碎裂及断裂效果,能够很好反映黏壤土的团聚与不连续特点,解决耕作部件与土壤相互作用的非线性问题,因此选择 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒模型。

本文设计的双轴旋耕灭茬机主要适用于江淮稻麦区,随着秸秆还田的推广,水稻收割后碎秸秆的秸秆量巨大,为了提高仿真的准确性,需要将秸秆的影响考虑在内。水稻秸秆具有特殊的弯曲及拉伸性能,对其的建模研究较多,在旋耕耕作方面,对于秸秆颗粒的离散元建模,通常采用颗粒拼接。颗粒接触模型选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,用颗粒拼接方法拼至合适长度,此方法能够提高仿真效率。

2.2 模型参数的标定与结果

模型仿真参数主要是由物料的本征参数(泊松比、密度、剪切模量)、物料接触参数(静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数)和接触模型参数组成。

材料的本征参数一般都有相应的手册和标准的测量方法。旋耕刀棍与秸秆的本征参数、土壤颗粒的泊松比和剪切模量均通过文献[16]获得,各层土壤密度通过环刀法取土称量计算获得。

土壤颗粒之间的接触参数是通过土壤颗粒堆积角仿真试验确定。将取样的碎土粒充满 50 mm × 30 mm 铝盒,碎土粒质量与铝盒容积之比即为堆积密度,最终确定耕土层、犁底层、心土层土壤的堆积密度分别为 0.89、0.91、0.91 g/cm³。用各层土壤的碎土粒自然填满 100 cm³ 的高度为 50 cm 的环刀,缓慢匀速提升环刀,待土粒坡面稳定后,用电子量角器量出碎土粒堆积角,测得耕土层堆积角为 32.62°,犁底层堆积角为 33.69°,心土层堆积角为 30.38°。

根据文献[5,17],结合 GEMM 数据库中给出的参考值,最终确定土壤接触参数的标定范围,如表 1 所示。

表 1 土壤材料接触参数

Tab.1 Range of soil material contact parameters

参数	数值
静摩擦因数	0.2 ~ 0.6
动摩擦因数	0.05 ~ 0.4
恢复系数	0.2 ~ 0.6

参考表 1 中的标定范围,用土壤颗粒堆积角仿真试验进行标定,如图 2 所示。经过反复试错,最终确定当耕土层静摩擦因数为 0.29,动摩擦因数为 0.1,恢复系数为 0.35 时,仿真堆积角为 32.25°,当犁底层静摩擦因数为 0.32,动摩擦因数为 0.18,恢复系数为 0.35 时,仿真堆积角为 33.42°;当心土层静摩擦因数为 0.25,动摩擦因数为 0.14,恢复系数为 0.4,仿真堆积角为 29.1°。各层土壤堆积角仿真结果最接近电子量角器测得的试验值。



图 2 土壤标定试验

Fig.2 Soil calibration test

Hertz Mindlin with Bonding 颗粒接触模型的粘结力普遍认为源于 2 个土壤颗粒之间存在水分。假定颗粒周围水分均匀分布,则水膜厚度加上土壤颗粒半径即为粘结半径^[11,18]。因此含水率计算公式为

$$W_t = \frac{\rho_s V_s}{\rho_w V_w} \times 100\% \quad (1)$$

其中
$$V_w = \frac{4}{3} \pi R_w^3 \quad (2)$$

$$V_s = \frac{4}{3} \pi R_1^3 - \frac{4}{3} \pi R_w^3 \quad (3)$$

式中 W_t ——含水率, %

ρ_s ——水密度, g/cm³

ρ_w ——土壤颗粒密度, g/cm³

V_s ——单粒土壤颗粒所含水分的体积, cm³

V_w ——单粒土壤颗粒体积, cm³

R_w ——土壤颗粒半径, cm

R_1 ——土壤颗粒粘结半径, cm

本文土壤颗粒半径设置为 10 mm,各层土壤含水率通过干燥法测得,按深度依次为 36.01%、34.65%、26.72%。土壤颗粒密度通过环刀法取土称量计算获得,试验测得依次为 1.60、1.83、1.92 g/cm³,水密度为 1 g/cm³,经过计算可得各层土壤粘结半径依

次为 11.63、11.78、11.78 mm。

其余接触参数也是通过查阅文献[5,13,19]获得,最终确定各参数如表2所示。

表2 材料参数
Tab.2 Material parameters

接触参数		数值
土壤与耕作部件	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.05
秸秆与耕作部件	恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01
土壤与秸秆	恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.05
耕土层土壤	恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.29
	动摩擦因数	0.1
犁底层土壤	恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.32
	动摩擦因数	0.18
心土层土壤	恢复系数	0.4
	静摩擦因数	0.25
	动摩擦因数	0.14
不同土层	恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.3
秸秆与秸秆	恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01
耕土层土壤	粘结刚度/($N \cdot m^{-3}$)	5.00×10^7
	临界粘结应力/kPa	37.2
	粘结半径/mm	11.63
犁底层土壤	粘结刚度/($N \cdot m^{-3}$)	5.00×10^7
	临界粘结应力/kPa	42.1
	粘结半径/mm	11.78
心土层土壤	粘结刚度/($N \cdot m^{-3}$)	5.00×10^7
	临界粘结应力/kPa	47.3
	粘结半径/mm	11.78

2.3 稻茬田地双轴旋耕离散元仿真分析模型

土壤颗粒模型通过参照离散元耕作模型建模^[20],将颗粒粒径设置为 20 mm,形状为简单球体,能够大大提高计算效率和仿真效果。经过测量,水稻收获机留下的秸秆残茬长度基本一致,平均约为 6 cm。本文用 23 个半径为 2.5 mm 的球体颗粒填充成近似长圆柱体形状的秸秆仿真模型,如图 3、4 所示。

在土壤模型中,将土层分为 3 层,其中耕土层厚度设置为 10 cm,犁底层厚度设置为 8 cm,心土层厚度设置为 5 cm,土壤在旋耕机前进方向上的长度为

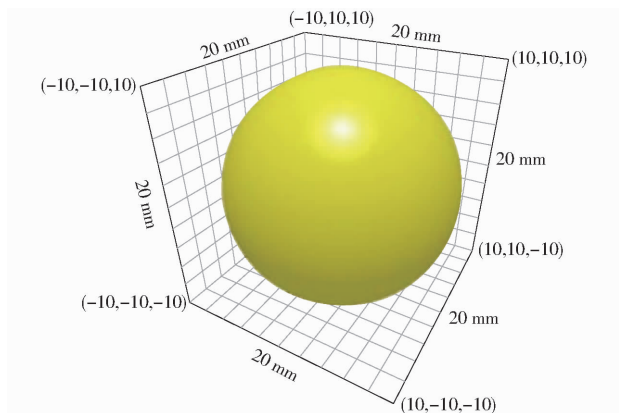


图3 仿真土壤颗粒模型

Fig.3 Simulated soil particle model

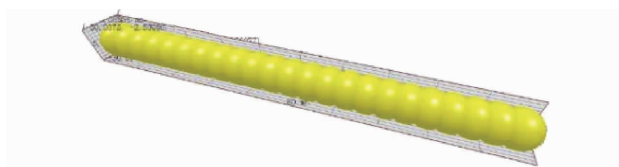


图4 秸秆离散元模型

Fig.4 Straw discrete element model

2 000 mm,宽度为 1 100 mm,各层之间采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型;秸秆层的宽度为 700 mm,厚度为 4.4 cm。待所有颗粒生成完毕直至静止,形成土壤粘结键。最终土壤模型如图 5 所示。

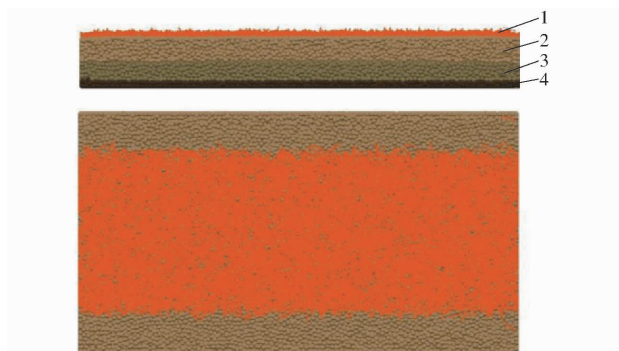


图5 仿真土壤秸秆耕作层

Fig.5 Simulation soil straw tillage layer

1. 秸秆层 2. 耕土层 3. 犁底层 4. 心土层

由于旋耕机在其他参数确定后,旋耕机功耗与旋耕机幅宽成正比,所以本文为了提高双轴旋耕的仿真模拟效率,在保证仿真品质的前提下,通过等效简化机组结构的方式建立仿真模型。

将双轴旋耕机模型进行简化,前后旋耕刀轴长度设置为 100 cm,只保留旋耕刀组、上盖板、后拖板以及左右侧板。旋耕机动力一般由牵引拖拉机的动力输出轴提供,拖拉机动力输出轴转速一般分为 3 挡:540、720、760 r/min。本文选用 720 r/min 作为双轴旋耕灭茬机的配套输入转速,同时拖拉机作业速度一般为 0.56 ~ 0.97 m/s。因此将仿真机组的前进速度设置为 0.97 m/s,并且根据传动比计算结果,前

轴正转且旋耕转速设置为 245 r/min,后轴反转且旋耕转速设置为 310 r/min,耕深设置为 10 cm。最终秸秆-土壤-双轴旋耕耕作离散元模型如图 6 所示。

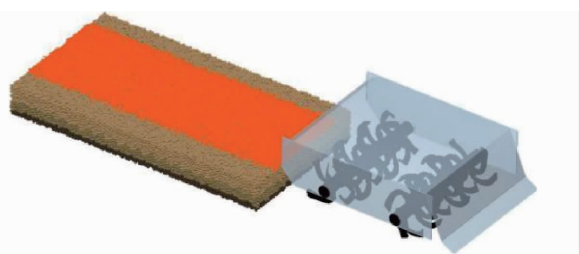


图 6 秸秆-土壤-双轴旋耕耕作离散元模型

Fig. 6 Straw - soil - biaxial rotary tillage discrete element model

时间步长选用 Rayleigh 时间步长,该时间步长是根据颗粒半径及密度等材料属性参数自动计算的。为了保证仿真结果的可靠性,时间步长设置为 Rayleigh 时间步长的 10%;为了保证计算效率与质量,本文计算网格单元的大小设置为最小颗粒半径的 3 倍。仿真计算参数设置完成后,开始仿真。

3 仿真试验设计与结果分析

试验选定前刀轴回转半径 R_f 、后刀轴回转半径 R_b 、后刀轴中心相对前刀轴中心竖直距离 L_n 、前后轴回转圆水平距离 L_l 4 个参数作为双轴配置关键参数,如表 3 所示,以功耗作为试验指标,运用 Design-Expert 软件,采用 Box-Behnken 方法进行试验设计。

表 3 双轴配置关键参数及水平

Tab. 3 Key parameters and levels of double axis configuration

编码	因素			
	前刀轴回	后刀轴回	后刀轴中心相对	前后轴回转
	转半径	转半径	前刀轴中心竖	圆水平距离
	R_f/mm	R_b/mm	直距离 L_n/mm	L_l/mm
-1	195	195	-100	100
0	210	210	0	150
1	225	225	100	200

表 4 为通过 EDEM2018 软件仿真双轴旋耕机的双轴配置参数,取不同水平组合时的功耗结果(表中 A、B、C、D 为编码值)。

使用 Design-Expert 软件对表 4 中双轴旋耕机功耗的仿真试验结果进行多元回归拟合。对功耗试验结果进行方差分析,用来验证所得功耗拟合方程的有效性,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,作业功耗响应面二次模型的 F 值为 49.44, $P < 0.0001$,说明该模型显著;失拟项为 0.213, $P > 0.05$,失拟项不显著,表明该模型具有很好的拟合度。其中 R_b 、 R_f^2 、 L_n^2 均 $P < 0.01$,说明对功

表 4 仿真试验与结果

Tab. 4 Simulation test and results

试验号	因素				功耗 P_h/kW
	前刀轴回	后刀轴回	后刀轴中心相	前后轴回	
	转半径	转半径	对前刀轴中心	转圆水平	
	A	B	竖直距离 C	距离 D	
1	0	0	0	0	15.09
2	0	0	-1	-1	11.45
3	1	0	0	-1	14.50
4	0	0	0	0	15.26
5	1	0	0	1	14.42
6	0	0	1	-1	11.02
7	1	0	0	-1	13.75
8	0	0	0	0	15.66
9	0	1	-1	0	11.95
10	0	-1	0	-1	13.24
11	0	0	0	0	15.70
12	1	1	0	0	15.81
13	1	-1	0	0	13.45
14	0	1	0	1	15.70
15	1	0	0	1	15.49
16	1	0	-1	0	10.85
17	1	0	-1	0	11.55
18	1	0	1	0	10.47
19	1	-1	0	0	13.82
20	0	1	1	0	11.27
21	0	-1	-1	0	11.12
22	0	0	1	1	11.61
23	0	0	0	0	15.67
24	0	0	-1	1	11.72
25	0	1	0	-1	15.03
26	1	0	1	0	11.01
27	0	-1	0	1	14.08
28	1	1	0	0	15.94
29	0	-1	1	0	10.26

表 5 响应面二次模型方差分析结果

Tab. 5 Response surface quadratic model variance analysis results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	108.67	14	7.76	49.44	<0.0001
R_f	1.06	1	1.06	6.72	0.0213
R_b	7.9	1	7.9	50.29	<0.0001
L_n	0.76	1	0.76	4.82	0.0455
L_l	1.35	1	1.35	8.58	0.011
$R_f R_b$	0.014	1	0.014	0.09	0.7687
$R_f L_n$	5.88×10^{-3}	1	5.88×10^{-3}	0.037	0.8493
$R_f L_l$	0.026	1	0.026	0.16	0.6924
$R_b L_n$	8.33×10^{-3}	1	8.33×10^{-3}	0.053	0.8211
$R_b L_l$	7.35×10^{-3}	1	7.35×10^{-3}	0.047	0.8318
$L_n L_l$	2.40×10^{-2}	1	2.40×10^{-2}	1.50×10^{-1}	0.704
R_f^2	1.63	1	1.63	10.4	0.0061
R_b^2	1.18	1	1.18	7.54	0.0158
L_n^2	96.17	1	96.17	612.59	<0.0001
L_l^2	0.95	1	0.95	6.05	0.0275
残差	2.2	14	0.16		
失拟项	1.88	10	0.19	2.35	0.213
纯误差	0.32	4	0.08		
总和	110.87	28			

耗有极显著影响; R_f 、 L_n 、 L_l 、 R_b^2 、 L_l^2 均为 $0.01 < P < 0.05$, 表明该因素对功耗有显著影响;所有的交互项 $R_f R_b$ 、 $R_f L_n$ 、 $R_f L_l$ 、 $R_b L_n$ 、 $R_b L_l$ 、 $L_n L_l$ 的 $P > 0.05$, 表明其对功耗没有显著影响。去除不显著项, 得到各参数对功耗 P_h 的二次多元回归方程为

$$P_h = -171.76739 + 0.87749R_f + 0.80453R_b - 0.016574L_n + 0.087033L_l - 2.23022 \times 10^{-3}R_f^2 - 1.89840 \times 10^{-3}R_b^2 - 3.85054 \times 10^{-4}L_n^2 - 1.53077 \times 10^{-4}L_l^2 \quad (4)$$

表6中决定系数 R^2 为 0.9802, 表明预测值与仿真实际值高度相关, 试验误差小。标准差系数为 2.97, 表明该功耗试验具备较高的精确度及可信度; 精密度为 19.929, 表示所建功耗响应面二次模型准确。

表6 功耗面二次模型误差统计分析结果

Tab.6 Error statistical analysis results of power response surface quadratic model

参数	数值	参数	数值
标准差	0.4	决定系数	0.9802
平均值	13.34	修正决定系数	0.9604
标准差系数	2.97	预测决定系数	0.8979
误差平方和	11.32	精密度	19.929

利用 Design-Expert 软件的响应优化器, 对建立的二次回归方程进行优化求解。目标函数为

$$\begin{aligned} & \min P_h(R_f, R_b, L_n, L_l) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} 195 \text{ mm} \leq R_f \leq 225 \text{ mm} \\ 195 \text{ mm} \leq R_b \leq 225 \text{ mm} \\ -100 \text{ mm} \leq L_n \leq 100 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \leq L_l \leq 200 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned}$$

最终通过 Design-Expert 软件获得的最优参数为: 前旋耕刀轴回转半径为 195 mm, 后旋耕刀轴回转半径 195 mm, 后轴相对于前轴垂直距离为 99.8 mm, 前后轴回转圆水平距离为 100.6 mm, 同时对应的功耗指标预测值为 9.018 kW。

由于现有旋耕机幅宽均大于 1 m, 且仿真模型缺少侧边传动等结构, 因此需要对功耗数学模型进行修正, 根据旋耕机功耗半经验公式

$$N = \frac{1}{\eta} B \frac{h}{100} v_m \left(p_0 + \frac{v_d^2}{2} \delta \right) \quad (5)$$

式中 N ——旋耕机总功耗, kW

η ——传动效率, 取 0.8

B ——幅宽, m

h ——耕深, cm

p_0 ——旋耕切土比阻, Pa

v_d ——刀辊外圆周线速度, m/s

δ ——土壤耕前密度, kg/m^3

当耕深 h 、机具速度 v_m 、刀片排列、刀片类型等参数确定时, 功耗 N 与幅宽 B 成正比, 与传动效率成反比。

因此最终功耗数学模型表达式为

$$P = \frac{1}{\eta} (-171.76739 + 0.87749R_f + 0.80453R_b - 0.016574L_n + 0.087033L_l - 2.23022 \times 10^{-3}R_f^2 - 1.89840 \times 10^{-3}R_b^2 - 3.85054 \times 10^{-4}L_n^2 - 1.53077 \times 10^{-4}L_l^2) B \quad (6)$$

式中 P ——修正后的旋耕机总功耗

4 模型验证

为了验证该功耗数学预测模型是否适用原尺度机型、真实田间作业等情况。本文根据优选参数 R_f 、 R_b 、 L_n 、 L_l 研制出幅宽为 2.3 m 的双轴旋耕灭茬机样机, 如图 7 所示。于镇江(稻麦)科技综合示范基地进行试验, 并建立其离散元整机验证模型(图 8), 进行仿真试验。



图7 幅宽 2.3 m 双轴旋耕机

Fig.7 Double shaft rotary tiller of 2.3 m wide

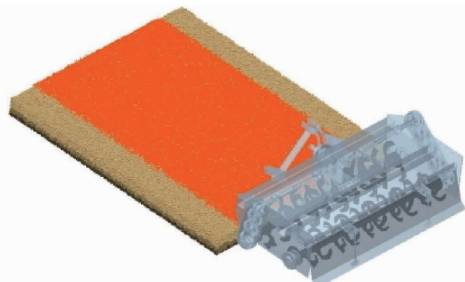


图8 原尺度整机验证模型

Fig.8 Original scale whole machine verification model

功耗测定包括扭矩和转速的测定, 均在全程内进行。试验功耗计算式为

$$P_h = \frac{Tn}{9550} \quad (7)$$

式中 P_h ——功率消耗, kW

T ——扭矩, N·m

n ——转速, r/min

其中, 扭矩采用 DH5905 型无线扭矩测试分析系统测得。该系统分为无线测量总成、无线路由器、计算机及 DHDAS 型动态信号采集分析系统组成,

其中无线测量总成包括无线扭矩测量模块、无线扭矩电源模块以及电阻应变片,如图 9 所示,DH5905 型无线扭矩测试分析系统无线测量总成实际如图 10 所示。

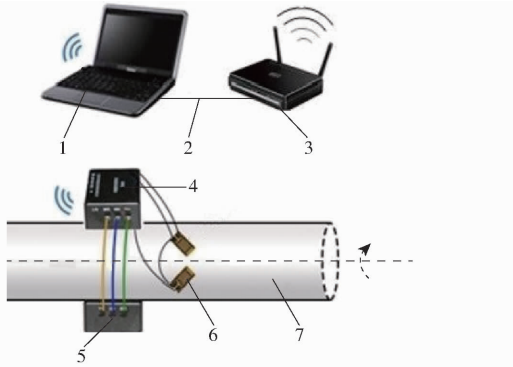


图 9 扭矩采集原理示意图

Fig.9 Schematic of torque acquisition principle

1. 计算机 2. 网线 3. 无线路由器 4. DH5905 型无线扭矩测试系统 5. 扭矩测试系统电源模块 6. 应变片 7. 转轴



图 10 DH5905 型无线扭矩测试分析系统实际布置情况

Fig. 10 Actual layout of DH5905 wireless torque test and analysis system

转速的测量通过使用霍尔式转速传感器获得。转轴上磁铁通过霍尔传感器时产生一个脉冲,通过检测单位时间的脉冲数来获得被测转轴的转速,如图 11 所示。

选取 5 个行程进行功耗测量,每个行程沿机组前进方向选择 3 个时长为 3 s 的时段进行数据采集,测量结果如表 7 所示。

田间试验与整机仿真值误差均值为 9.5%,范围在 5.8% ~ 13.4% 之间,主要是由于田块不均匀、极具操控不稳定等因素影响所致,理论功耗预测值与仿真值误差为 2%,说明旋耕机刀组在缩放过程中误差变化较小,模型能够准确反映双轴配置参数对双轴旋耕机在稻茬田地作业功耗的影响,可为后



图 11 转速测量部件及安装位置

Fig. 11 Rotational speed measuring components and installation positions

表 7 原尺度样机田间试验功耗测量结果

Tab.7 Field test power consumption measurement results of original scale prototype kW

功耗测量区位	实测值	仿真值	预测值
行程 1 平均值	30.54		
行程 2 平均值	28.08		
行程 3 平均值	29.38		
行程 4 平均值	28.74	26.45	25.93
行程 5 平均值	29.54		
工况平均值	29.26		

续旋耕刀具减阻降耗的优化研究提供支持。

5 结论

(1) 分析了江淮地区小麦播种时的土壤特性,确定为黏壤土,符合 Hertz - Mindlin with Bonding 颗粒接触模型的模拟要求,建立了双轴旋耕机耕作模型,为后续参数的研究分析奠定基础。

(2) 对影响双轴旋耕机功耗的双轴配置参数进行初步分析,运用 Box-Behnken 法对仿真试验进行设计,采用响应面分析法对仿真试验结果进行优化分析,当前旋耕刀轴回转半径为 195 mm,后旋耕刀轴回转半径 195 mm,后轴相对于前轴垂直距离为 99.8 mm,前后轴回转圆水平距离为 100.6 mm,获得的功耗最小为 9.018 kW。

(3) 通过原尺度双轴旋耕机田间试验与仿真试验结果,及模型预测结果对比,说明预测模型适用于双轴配置参数对旋耕机在实际稻茬地旋耕作业功耗的预测。

参 考 文 献

- [1] 曹卫华. 江苏省稻麦两熟区机械化生产模式及其效率研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
CAO Weihua. Study on the mechanized production mode and efficiency of the rice-wheat cropping area in Jiangsu Province[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [2] 朱松. 秸秆全量还田大耕深双轴分层切土旋耕机的设计与性能试验[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
ZHU Song. Design and performance test of a dual-axis layered soil-cutting rotary cultivator with large tillage depth and full return of straw to the field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. (in Chinese)

- [3] 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 7-13.
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of a combined forward and reversed rice wide seedling belt stubble planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 7-13. (in Chinese)
- [4] 汪志祥. 双轴式旋耕灭茬播种机的灭茬刀辊优化设计与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2018.
WANG Zhixiang. Optimal design and experimental study of the stubble cutter roll of the dual-axis rotary tillage stubble planter [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [5] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报 2020,51(10):42-50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Research on power consumption prediction model of paddy field rotary tillage based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.006. (in Chinese)
- [6] 章慧全. 潜土逆旋旋耕机刀片运动及功耗分析[J]. 农业科技与装备, 2012(7):38-40.
ZHANG Huiquan. Analysis of blade motion and power consumption of submerged soil reverse-rotating rotary tiller [J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2012(7):38-40. (in Chinese)
- [7] MOMOZU M, OIDA A, YAMAZAKI M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(4): 207-220.
- [8] CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 34-41.
- [9] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- [10] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.
- [11] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011.
ZHANG Yongliang. Simulation and experimental research on throwing soil performance of reverse rotary tillage fertilizer planter based on discrete element[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- [12] 翟力欣,姬长英. 基于离散单元法的土壤力学接触模型的建立[J]. 江西农业学报, 2008, 20(9): 108-111.
ZHAI Lixin, JI Changying. Establishment of soil mechanical contact model based on discrete element method[J]. Jiangxi Journal of Agriculture, 2008, 20(9): 108-111. (in Chinese)
- [13] 张俊. 基于离散元法的秸秆还田机仿真优化与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2018.
ZHANG Jun. Simulation optimization and experimental research of straw returning machine based on discrete element method [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [14] 申屠留芳,邵鹏. 正反旋耕灭茬机刀片的功耗分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(11):87-89.
SHENTU Liufang, SHAO Peng. Power consumption analysis of the blades of the rotary tillage and stubble cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(11):87-89. (in Chinese)
- [15] 田华. 影响旋耕机作业质量和功耗的主要因素[J]. 当代农机, 2010(5):74-75.
TIAN Hua. The main factors affecting the operation quality and power consumption of rotary tillers[J]. Modern Agricultural Machinery, 2010(5):74-75. (in Chinese)
- [16] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary knife interaction mechanism based on discrete element method [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [17] 王学振,岳斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124-136.
WANG Xuezen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Simulation and experiment on soil disturbance behavior of subsoil shovel with different wing shovel installation heights [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.014. (in Chinese)
- [18] 丁启朔,葛双洋,任骏,等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 47-56, 63.
DING Qishuo, GE Shuangyang, REN Jun, et al. Research on the resistance of paddy soil to subsoiling and soil disturbance effect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 47-56, 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.007. (in Chinese)
- [19] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69-77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment on spatial distribution effect of straw rotary burial after returning to field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69-77. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.008. (in Chinese)
- [20] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
ZHENG Kan. Research on a combined operation machine with adjustable subsoil rotary tillage operation sequence [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)