

# 双螺旋旋耕埋草模型刀辊工作扭矩试验

张国忠 周 勇 卢元爽 查显涛

华中农业大学工学院/湖北省现代农业装备工程技术研究中心, 武汉 430070

**摘要** 为研究双螺旋旋耕埋草刀辊对水田土壤耕整时的工作性能,以相似原理为理论依据,基于 LabVIEW 搭建扭矩测试平台,制作与原型大小比例为 1:2 的模型刀辊,以工作扭矩为评价指标,以土壤含水率、前进速度、刀辊转速和耕深为试验因素,在室内土槽条件下对该模型刀辊的工作扭矩进行研究。单因素试验结果表明:在试验范围内,模型刀辊的工作扭矩随前进速度的增加而增大,随刀辊转速的增加而减小。选取  $L_{18}(3^7)$  正交表,开展上述 4 因素对模型刀辊工作扭矩影响的正交试验,极差结果显示,土壤含水率、耕深、前进速度及刀辊转速对模型刀辊的工作扭矩的影响程度依次降低,方差分析结果显示,土壤含水率、耕深、前进速度对工作扭矩有极显著的影响,刀辊转速对工作扭矩影响不显著。

**关键词** 螺旋刀辊; 扭矩测试; 旋耕机; 秸秆还田; 水稻  
**中图分类号** S 233.71 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)03-0101-06

双螺旋刀辊是一种适用于南方高茬水田秸秆翻埋的旋耕机具<sup>[1]</sup>。前期研究者对该刀辊与水田土壤间的切削过程进行了理论与试验研究,如周明等<sup>[2-3]</sup>研究了直线刀横刀对土壤切削的影响,并利用有限元法对横刀切削土壤过程进行了有限元模拟和优化。王志山<sup>[4]</sup>、姚兴林<sup>[5]</sup>测量了该刀辊在冬闲杂草田、油菜秸秆田、中稻秸秆田以及室内土槽土壤中的实际工作扭矩。余水生<sup>[6]</sup>则改进设计了可挂接于轮式水田拖拉机尾部的水田高茬秸秆还田耕整机,并采用有限元方法对该耕整机的工作过程进行了模拟。张居敏等<sup>[7-8]</sup>建立了双螺旋刀辊横刀刀背上焊接的立刀的刃口函数曲线,并利用 MATLAB 软件对其进行了运动学分析。张秀梅等<sup>[9]</sup>对螺旋横刀与常规旋耕刀组合的刀辊田间作业质量和作业功耗进行了测试。上述研究对双螺旋旋耕埋草刀辊结构参数、运动参数的优化具有重要指导作用,但由于田间土壤条件变化大、拖拉机前进速度不稳定等原因,对上述试验过程及试验结果均造成影响。此外,由于双螺旋刀辊外形尺寸较大,室外田间试验中土壤准备工作量较大,试验周期长、试验效率较低,亟需采用试验周期较短、条件稳定且便于重复、试验精度更高的方法对旋耕埋草刀辊工作性能开展研究。

相似法是将所要研究的样机或部件,根据相似原理缩小或放大为模型后进行试验,模型的材料和工作条件与原型相似,所受的载荷和运动特性也与原型相似,并对应地符合一定的比例,从而依照相似原理用模型试验结果推断原型部件的工作规律<sup>[10-11]</sup>。近年来,相似法在土壤工作部件动力学特性的研究中得到了广泛应用。如李因武等<sup>[12]</sup>利用模型铲刀对其表面的法向压力和土壤粘附进行了研究,江磊等<sup>[13]</sup>利用相似理论对月球车的牵引性能开展了模型试验研究,李杰等<sup>[14]</sup>对装备驼蹄仿生轮胎的整车牵引性能进行了模型和原型相似分析,龚立名<sup>[15]</sup>利用相似原理进行了垂直埋刮板机的设计。

基于上述研究以及相似原理,本研究以原型双螺旋刀辊为参照,制作 1/2 比例模型刀辊,在室内土槽条件下开展模型刀辊工作扭矩与刀辊运动参数、环境条件间关系的试验研究,以期为双螺旋旋耕埋草刀辊结构参数、运动参数的优化以及旋耕埋草机的动力匹配提供参考。

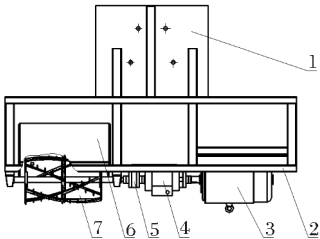
## 1 材料与方法

### 1.1 刀辊扭矩测试平台

设计并搭建如图 1 所示的双螺旋模型刀辊扭矩

收稿日期: 2016-10-10  
基金项目: 国家自然科学基金项目(50975115; 51275196); 国家公益性行业计划项目(201203059)  
张国忠, 博士, 教授, 研究方向: 农业机械化与自动化. E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

测试平台,其由 1/2 比例模型刀辊、扭矩传感器、电机、联轴器、轴承、挡泥罩等组成。该测试平台中,扭矩传感器置于电机与模型刀辊之间,采取直连方式对刀辊工作扭矩进行测量<sup>[5,16]</sup>。



1.联接板 Connecting plate; 2.机架 Frame; 3.电机 Motor; 4.扭矩传感器 Torque sensor; 5.联轴器 Shaft couplings; 6.挡泥罩 Fender; 7.模型刀辊 Model roller.

图 1 1/2 模型刀辊扭矩测试平台结构

Fig.1 Test platform structure of 1/2 model roller for torque

1.2 测试系统

刀辊性能分析要求测试系统能同时完成转矩、转速的数据采集和分析,因此,所设计的测试系统由硬件和软件两部分组成。硬件包括 JN338A 旋转式扭矩传感器、NI PCI-6024E 数据采集卡和装有 LabVIEW 软件的计算机。自主设计的软件包括驱动程序和数据采集程序两部分。整个测试系统结构和 workflow 如图 2 所示<sup>[17]</sup>。该测试系统程序前面板如图 3 所示。

测试系统工作时,传感器将刀辊主轴的转矩和转速转换成可测量的模拟电压信号,采集卡对电压信号进行模数转换,将转化后的数字信号送入由 LabVIEW 编写的数据采集程序中进行运算和处理。参考文献[5]中的方法对系统进行精度校验,结果表明其满足测试试验要求。

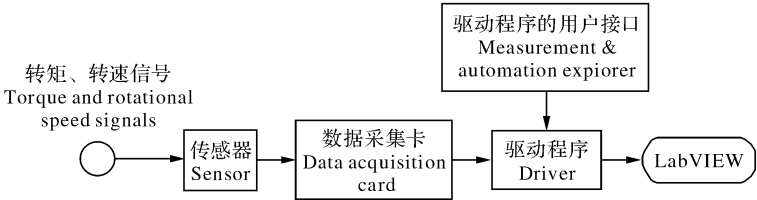


图 2 测试系统结构

Fig.2 Structure diagram of LabVIEW testing system

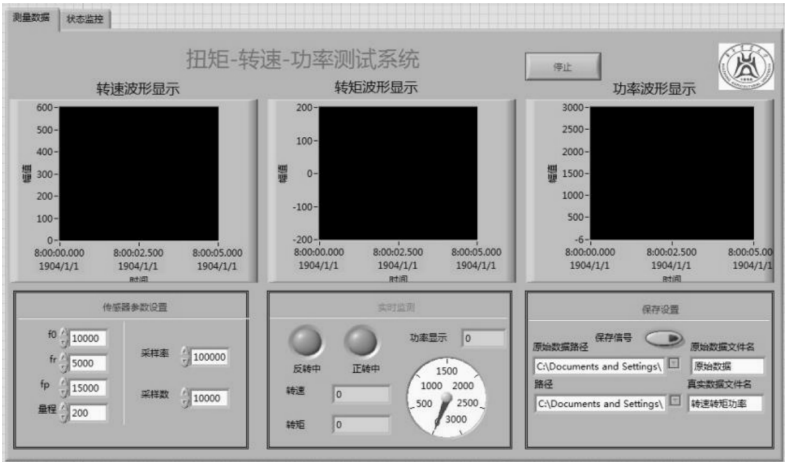


图 3 测试系统前面板

Fig.3 Front panel of testing system

1.3 试验条件

试验在湖北省现代农业装备技术研究中心土槽试验室进行。如图 4 所示,1/2 模型刀辊扭矩测试平台安装于试验土槽台车上,在钢缆牵引下,土槽台车前进速度可在 0~1.5 m/s 范围内无级调整。根

据室内土槽土壤条件,采用旋耕镇压以及喷水调湿沉淀等处理,配置了编号为 1、2、3 的 3 种土壤,各类土壤的含水率及坚实度如表 1 所示。

1.4 试验设计

研究表明,土壤含水率、前进速度、刀辊转速、耕

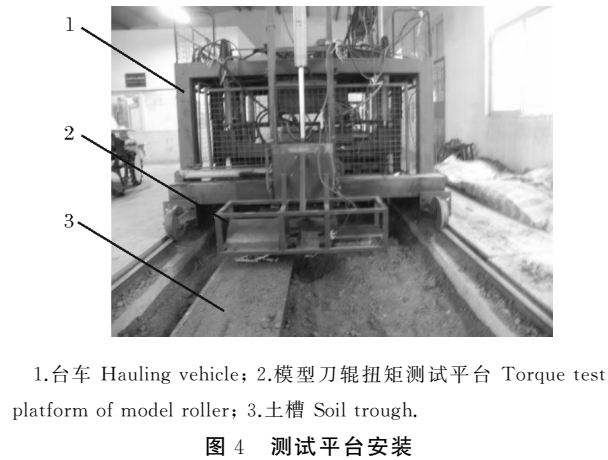


Fig.4 Installation diagram of test platform

深对刀辊工作扭矩及功率存在影响<sup>[4-6]</sup>。为此,对上述因素开展了单因素试验以及正交试验。

1)单因素试验设计。以上述编号为3、含水率

为 30.81% 的土壤为对象,分别选取 40、50、60、70、80 mm 等 5 种耕深,300、350、400、450、500 r/min 等 5 种刀辊转速,0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m/s 等 5 种前进速度为影响因素,分别以模型刀辊工作扭矩及功率为评价指标,进行单因素试验。

2)正交试验设计。不考虑交互作用,选取  $L_{18}(3^7)$  正交表,以土壤种类、耕深、刀辊转速、前进速度等 4 个因素对模型刀辊工作转矩影响的正交试验。根据单因素试验结果,确定各影响因素水平如表 2 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

在土壤含水率 30.81% 条件下,前进速度、刀辊转速、耕深的单因素试验结果如表 3 所示。各因素对工作扭矩及功率的影响趋势如图 5 所示。

表 1 土壤参数				
Table 1 Soil parameter				
土壤编号 Soil type	含水率/% Moisture content	不同深度土壤紧实度/kPa Soil compaction of different depth		
		0~40 mm	≥40~60 mm	≥60~80 mm
1	5.30	185.9	257.6	325.4
2	10.95	204.3	238.4	307.9
3	30.81	204.3	307.9	379.9

表 2 正交试验因素水平				
Table 2 Factors and levels of orthogonal test				
水平 Level	土壤含水率/% Moisture contentof soil	前进速度/(m/s) Forward speed	转速/(r/min) Rotated speed	耕深/mm Tilling depth
1	5.30	0.1	300	40
2	10.95	0.2	400	60
3	30.81	0.3	500	80

表 3 单因素试验结果				
Table 3 Results of single factor test				
试验号 Test No.	前进速度/(m/s) Forward speed	刀辊转速/(r/min) Rotated speed	耕深/mm Tilling depth	扭矩/(N·m) Torque
1	0.1	300	60	3.489
2	0.2	300	60	4.086
3	0.3	300	60	5.565
4	0.4	300	60	7.093
5	0.5	300	60	7.169
6	0.2	300	60	6.254
7	0.2	350	60	6.652
8	0.2	400	60	5.860
9	0.2	450	60	5.752
10	0.2	500	60	5.680
11	0.2	300	40	5.259
12	0.2	300	50	5.313
13	0.2	300	60	8.643
14	0.2	300	70	10.389
15	0.2	300	80	11.160

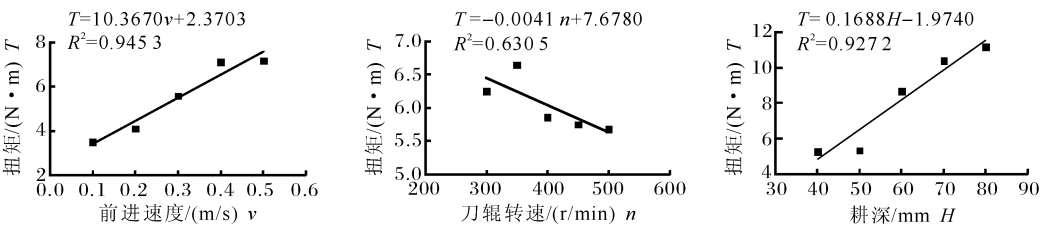


图 5 前进速度(A)、刀辊转速(B)、耕深(C)的单因素试验

Fig.5 Single factor experiment result of forward speed(A) ,roller rotation speed (B)and tillage depth(C)

图 5 中前进速度、刀辊转速、耕深对工作扭矩的影响符合如下线性回归拟合方程：

$T = 10.3670v + 2.3703, R^2 = 0.9453$  (1)

$T = -0.0041n + 7.6780, R^2 = 0.6305$  (2)

$T = 0.1688H - 1.9740, R^2 = 0.9272$  (3)

式中,  $T$  为工作扭矩,  $N \cdot m$ ;  $v$  为前进速度,  $m/s$ ;  $n$  为刀辊转速,  $r/min$ ;  $H$  为耕深,  $mm$ 。由上述结果可知,在试验范围内,模型刀辊工作扭矩随前进速度及耕深的增加而增大,随刀辊转速的增加而

减小;工作扭矩与前进速度以及耕深间的线性度较好,与刀辊转速间的线性度较差。此结论与姚兴林<sup>[5]</sup>研究结果一致。

2.2 正交试验

正交试验方案及试验结果如表 4 所示,表中工作扭矩为每次试验条件下 3 次试验的平均值。对表 4 中工作扭矩进行极差分析,结果显示,各因素极差  $R$  排列顺序为  $A > B > D > C$ ,表明对刀辊工作扭矩值的影响程度从大到小依次为土壤含水率、耕深、前

表 4 正交试验方案及试验结果

Table 4 Results of orthogonal test

试验号 Test No.	土壤含水率 A Moisture content of soil	前进速度 B Forward speed	刀辊转速 C Knife rolling speed	耕深 D Tilling depth	空列 Null	空列 Null	空列 Null	扭矩/(N·m) Torque
1	1	1	1	1	1	1	1	0.374
2	1	2	2	2	2	2	2	2.987
3	1	3	3	3	3	3	3	6.917
4	2	1	1	2	2	3	3	1.823
5	2	2	2	3	3	1	1	4.928
6	2	3	3	1	1	2	2	2.072
7	3	1	2	1	3	2	3	3.165
8	3	2	3	2	1	3	1	6.033
9	3	3	1	3	2	1	2	11.696
10	1	1	3	3	2	2	1	2.528
11	1	2	1	1	3	3	2	1.733
12	1	3	2	2	1	1	3	3.880
13	2	1	2	3	1	3	2	2.794
14	2	2	3	1	2	1	3	1.415
15	2	3	1	2	3	2	1	4.236
16	3	1	3	2	3	1	2	4.240
17	3	2	1	3	1	2	3	6.993
18	3	3	2	1	2	3	1	7.326
$K_1$	18.419	14.924	26.855	16.085	22.146	26.533	25.425	
$K_2$	17.268	24.089	25.080	23.199	27.775	21.981	25.522	
$K_3$	39.453	36.127	23.205	35.856	25.219	26.626	24.193	
$k_1$	3.070	2.487	4.476	2.681	3.691	4.422	4.238	
$k_2$	2.878	4.015	4.180	3.867	4.629	3.664	4.254	
$k_3$	6.576	6.021	3.868	5.976	4.203	4.438	4.032	
$R$	3.698	3.534	0.608	3.295	0.938	0.774	0.222	
因素排列 Arrangement	$A > B > D > C$							

进速度以及刀辊转速。  
对表 4 的正交试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示,  $F_A、F_B、F_C > F_{0.05}(2,11) = 3.98$ , 土壤种类(含水率)、耕深、前进速度 3 个因素对工作扭矩在

$\alpha=0.05$  条件下影响显著; $MS_c<MS_e$ ,故将刀辊转速归入残差项  $e^{\Delta}$ ,刀辊转速对工作扭矩影响不显著。

2.3 原、模型刀辊对比试验

在含水率为 5.30% 的土壤条件下,对原、模型刀辊工作扭矩进行了对比试验,试验条件及结果如表

表 5 方差分析  
Table 5 Variance analysis

变异源 Source	离均差平方和 SS Sum of squares of deviation from average	自由度 DF Degree of freedom	均方差 MS Mean square error	F 值 F Value	P
土壤含水率 A Soil moisture	51.996 0	2	25.998 0	35.814 9	<0.05
前进速度 B Forward speed	37.693 2	2	18.846 6	25.963 1	<0.05
耕深 D Tilling depth	33.427 8	2	16.713 9	23.025 1	<0.05
刀辊转速 C Knife rolling speed	1.110 4	2	0.555 2		
残差 e Error e	6.875 0	9	0.763 9		
残差 $e^{\Delta}$ Error $e^{\Delta}$	7.985 4	11	0.725 9		
总和 Sum	131.102 4	17			

表 6 对比试验结果  
Table 6 Contrast test results data processing result table

影响因素 Factors			评价指标 Evaluation indicator		
前进速度/(m/s) Forward speed	刀辊转速/(r/min) Knife rolling speed	耕深/mm Tilling depth	原型刀辊工作扭矩/(N·m) Prototype torque	模型刀辊工作扭矩/(N·m) Model torque	原、模型比值 Ratio
0.2	300	100	27.028	3.656	7.393
0.2	400	100	40.795	5.684	7.177
0.4	300	100	53.811	9.879	5.447
0.4	400	100	62.404	12.218	5.108

6 所示。

3 讨 论

为研究双螺旋旋耕埋草刀辊对水田土壤耕整时的工作性能,以相似原理为理论依据,基于 LabVIEW 搭建了扭矩测试平台,制作了与原型比例为 1:2 的模型刀辊。在双螺旋旋耕埋草刀辊测试平台上对 1/2 比例模型刀辊工作扭矩进行了测试,单因素试验结果表明:模型刀辊工作扭矩呈现随土壤含水率、前进速度及耕深的增加而增大,随刀辊转速的增加而减小的趋势。不考虑交互作用,选取  $L_{18}(3^7)$  正交表,开展了上述 4 因素对模型刀辊工作扭矩影响的试验研究,极差分析结果表明:土壤含水率、前进速度、刀辊转速和耕深对模型刀辊工作扭矩的影响顺序为土壤含水率>耕深>前进速度>刀辊转速。方差分析结果表明:土壤含水率、耕深、前进速度对工作扭矩有极显著的影响,而刀辊转速对试验结果的影响不显著。该结果与已有研究相一致<sup>[5]</sup>,表明可以采用相似法开展双螺旋旋耕埋草刀辊工作性能研究,研究结果可为双螺旋旋耕埋草刀辊结构参数、运动参数的优化以及旋耕埋草机的动力匹配提供参考。

研究表明,普通旋耕刀辊工作扭矩可以用如下经验公式<sup>[18]</sup>计算: $T=\frac{30HBv}{\pi k_{\varphi}n}$ (1),式(1)中, $T$  为刀

辊工作扭矩, $N\cdot m$ ;  $H$  为刀辊工作耕深, $m$ ;  $B$  为刀辊工作幅宽, $m$ ;  $v$  为刀辊前进速度, $m/s$ ;  $n$  为刀辊转速, $r/min$ ;  $k_{\varphi}$  为系数,与刀齿形状、土壤种类以及刀齿分布有关,由实验测定,  $m^2/N$ 。因此,基于上述经验公式,在相同土壤条件下,原型刀辊与模型刀辊间工作扭矩比值近似满足如下关系<sup>[19]</sup>: $\xi=\frac{T}{T_m}=\frac{HBvn_m k_{\varphi m}}{H_mB_mv_mk_{\varphi n}}$ (2),式(2)中, $\xi$  为原型刀辊与模型刀辊工作扭矩比值;  $T_m$  为模型刀辊工作扭矩,  $N\cdot m$ ;  $H_m$  为模型刀辊工作耕深, $m$ ;  $B_m$  为模型刀辊工作幅宽, $m$ ;  $v_m$  为模型刀辊前进速度, $m/s$ ;  $n_m$  为模型刀辊转速, $r/min$ ;  $k_{\varphi m}$  为模型刀辊工作系数,与模型刀辊刀齿形状、土壤种类以及刀齿分布有关,由实验测定,  $m^2/N$ 。

在相同土壤条件下对比试验时,本模型刀辊采用与原型刀辊相同前进速度、相同耕深以及相同转速,模型刀辊耕幅是原型刀辊的 1/2,考虑到刀辊转速对工作扭矩影响不显著,认为原、模型刀辊工作系数  $k_{\varphi}$ 、 $k_{\varphi m}$  一致,因此,由  $\xi=\frac{T}{T_m}=\frac{HBvn_m k_{\varphi m}}{H_mB_mv_mk_{\varphi n}}$  式推导原型刀辊与模型刀辊间工作扭矩比值  $\zeta$  约为 8。由表 6 知,原、模型刀辊前进速度均为 0.2 m/s 时,两者间工作扭矩比值为 7.177~7.393,与式(2)计算结果接近;在原、模型刀辊前进速度为 0.4 m/s



时,两者间工作扭矩比值为  $5.108 \sim 5.447$ , 与  $\xi = \frac{T}{T_m} = \frac{HBv_n k_{\varphi m}}{H_m B_m v_m k_{\varphi n}}$  计算结果存在误差,推测其原因可能在于受土壤力学特性影响以及双螺旋旋耕埋草刀辊前进速度与耕深间存在交互作用,随刀辊前进速度增加,该交互作用增强所致,对此,后续还需继续开展研究。

### 参 考 文 献

- [1] 张国忠,许绮川,夏俊芳,等.1GMC-70 型船式旋耕埋草机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10):214-218.
- [2] 周明,张国忠,姚兴林.有限元法在土壤切削过程模拟中的应用[J].农机化研究,2009(9):190-193.
- [3] 周明.基于有限元法的螺旋型旋耕埋草刀辊横刀工作机理研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [4] 王志山.基于 LabVIEW 的船式旋耕埋草机功耗检测研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [5] 姚兴林.基于虚拟仪器的螺旋型旋耕埋草刀辊转矩测试系统研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [6] 余水生.水田高茬秸秆还田耕整机的研制[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [7] 张居敏,周勇,夏俊芳,等.旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J].农业工程学报,2013,29(1):18-25.
- [8] 张居敏,夏俊芳,贺小伟,等.旋耕埋草机立刀设计功能实现程度的分析[J].华中农业大学学报,2014,33(3):122-127.
- [9] 张秀梅,夏俊芳,张居敏,等.水旱两用秸秆还田组合刀辊作业性能试验[J].农业工程学报,2016,32(9):9-15.
- [10] 江守一郎.模型实验的理论和应用[M].北京:科学出版社,1984.
- [11] 卢元爽,张国忠,周勇,等.双螺旋旋耕埋草模型刀辊横刀刀口螺旋线的逆向重构研究[J].华中农业大学学报,2014,33(3):115-121.
- [12] 李因武,李建桥,任露泉,等.模型铲刀表面的法向压力及其土壤粘附[J].农业机械学报,2002,33(6):100-102.
- [13] 江磊,郭建娟,陈传海.基于相似理论的月球车牵引性能模型试验[J].中国机械工程,2009(23):2828-2831.
- [14] 李杰,庄继德,魏东.驼蹄仿生轮胎对整车牵引性能影响的相似模拟研究[J].农业机械学报,2004,35(3):1-4.
- [15] 龚立名.相似模拟理论在垂直埋刮板机设计计算中的应用[J].水运科学研究所学报,2003(2):26-32.
- [16] 孟臣,李敏.JN338 智能数字式转矩转速传感器及其应用[J].国外电子元器件,2003(1):56-58.
- [17] 刘君华.基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [18] 北京农业工程大学.农业机械学[M].北京:农业出版社,1994.
- [19] 北京农机化学院.农机测试技术[M].北京:农业出版社,1983.

## Torque experiment of model rotary knife roller of double spiral rotary tillage and stubble-mulch machine

ZHANG Guozhong ZHOU Yong LU Yuanshuang ZHA Xiantao

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Hubei Province Research Center of Engineering Technology for Modern Agricultural Equipment, Wuhan 430070, China

**Abstract** A model rotary knife roller based on similitude method was designed with 1/2 real size to study the performance of the double spiral rotary tillage and stubble-mulch roller machine while it till in paddy soil. A test platform of 1/2 size model roller for torque based on LabVIEW was designed. The indoor soil bin test of the 1/2 size model roller was conducted and its working torque was chosen as evaluation indicator while moisture content of soil, forward speed, rolling speed and tilling depth were selected as influential factors. The results of single factor tests showed that torque increased with the increase of forward speed and tilling depth, and decreased with the increase of knife rolling speed in experiment range. The result of  $L_{18}(3^7)$  orthogonal test showed that the influencing sequence on the knife roller torque from significant to common was soil moisture content, tilling depth, forward speed of the test platform and knife rolling speed. Soil moisture content, tilling depth and forward speed of the test platform affected significantly, while knife-rolling speed did not. It will provide a reference for the optimizing structure parameters, motion parameters and power choice of double spiral rotary tillage and stubble-mulch roller.

**Keywords** double helical roller; torque experiment; rotary tiller; straw returning; rice

(责任编辑:陆文昌)