张国忠,左志,王洪昌,等.水田土壤黏附力测量仪设计与试验[J].华中农业大学学报,2020,39(4):169-174.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.04.023

水田土壤黏附力测量仪设计与试验

张国忠,左志,王洪昌,高原,韩宇航

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要　为快速准确原位获取水田土壤黏附特性,结合水田土壤环境特征与黏附力测量原理,设计了一种便携式水田土壤黏附力测量仪,其由黏附力测盘、水平驱动装置、拉拔装置、PLC 控制部分、机架及相关连接件构成,其控制系统采用 GX Works2 编程软件进行指令编辑。以法向拉拔速度 v_n、切向速度 v_τ、水田土壤空间深度为影响因素,利用该测量仪开展水田土壤黏附力单因素试验,初步获取了上述因素对水田土壤接触界面黏附力的影响机制。结果表明,在试验条件下,随法向拉拔速度 v_n、切向速度 v_τ 增加,土壤黏附力呈增大趋势;随水田土壤空间深度的增加,土壤黏附力呈先增后减小趋势。

关键词　水田土壤;土壤黏附力;黏附力测量;便携式测量仪;触土部件

中图分类号　S 233.1;TH 823　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2020)04-0169-06

土壤黏附是指黏湿土壤黏附于非土壤物体表面的性质,是土壤固有的一种机械物理特性[1]。土壤黏附性对触土作业机械工作质量与能源消耗有重要影响。研究表明,土壤黏附可使犁类工作部件阻力增加 30%以上[2]。快速准确获取其黏附特性可为触土部件减黏降阻优化设计提供重要理论依据[3]。Foutaine[4]在 1950 年代设计了一款金属测盘黏附力测量仪,利用其研究了土壤与异质表面之间的黏附机制。我国研究人员在 1970 年代设计了 SF-1 型土壤黏附力测量仪,以金属圆盘为测盘测量土壤法向黏附力[5]。任露泉等[6]设计了一款组合式测盘,解决了整体测盘无法测量外附力大于内聚力条件下的土壤黏附力的问题。杨志强[7]设计了 3 套面向不同测量对象的微小型土壤黏附力测试系统。近年来,Maruo 等[8]开发了 1 种光驱动的微型泵,用于研究旋转盘式微型电机的黏滞阻力。祝青等[9]设计了一种可用于固液界面微黏附力的测量装置,可研究固液界面特性。上述试验研究主要针对室内试验环境与条件设计。

为保证稻种或秧苗有松软、黏附力强、水肥充足的生长环境,按照农艺要求,水田土壤常由旋耕机带水旋耕或犁铧带水翻耕,随后进行耙整、适度沉淀等处理[10-11]。其中,旋耕刀辊、犁铧以及耙辊作业时,高速回转或移动的旋耕刀、犁铧、耙辊强烈冲击、挤压、破碎土壤,从而软化耕层土壤,促进土壤、水分、秸秆以及肥料均匀混合[12-13]。经历上述处理后,耕层土壤呈现一种“扰动饱和状态”,其特征是表层存在少量自由水,内部为混合有植物残茬的泥浆,其含水率趋于饱和,机械强度低,黏附性与流动性显著增强。目前市面上通用黏度仪采用测量转子在液体中扭矩的原理以获取被测对象黏附力,工作时工作转子在液体中转动,其黏滞阻力与转子扭矩成比例关系,测量转子扭矩即可测量液体的黏附力,其一般用于牛顿流体黏附力测量,对于水田土壤黏附力测量并不合适[14]。

针对上述研究现状,为满足快速准确原位获取水田土壤黏附特性的实际需要,本研究设计了一种便携式水田土壤黏附力测量仪,旨在为改进现有水田土壤黏附力测量仪提供新的解决方案。

1　材料与方法

1.1　水田土壤黏附力的测量

1)法向黏附力测量。基于扰动水田土壤含水率趋于饱和、机械强度低、黏附性与流动性显著增强的特点,理想黏附状态下,当土壤黏附力测量仪测盘只在法向运动时,其受力仅来源于 3 个部分,即拉拔装

收稿日期:2019-12-21
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51775220);中央高校基本科研业务费专项(2662018PY038);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201934)
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

置对测盘的拉力 F_1，水田土壤对测盘的法向黏附力 F_n，水田土壤对测盘侧壁的附着摩擦力 F_c。其受力简化模型如图1所示。

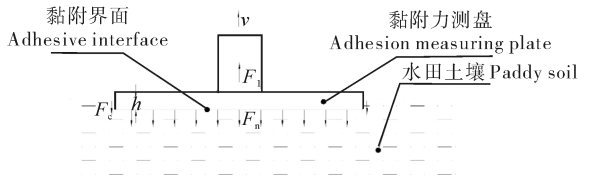


图1 测盘法向黏附模型

Fig.1 Test disk normal direction motion model

$$F_1 = F_n + F_c = p_n \cdot A_1 + F_c \tag{1}$$

式(1)中：F_1 表示拉拔力，N；F_n 表示法向黏附力，N；p_n 表示单位面积上的法向黏附比压，Pa；A_1 表示测盘底面积，m^2；F_c 表示土壤对黏附力测盘侧壁的附着摩擦力(土壤对测盘侧壁的黏附与摩擦的综合作用)，N。其中，土壤对黏附力测盘侧壁的附着摩擦力 F_c 可用式(2)表达[6]：

$$F_c = p_\tau \cdot A_2 + N_u \tag{2}$$

式(2)中：p_τ 表示切向黏附比压，Pa；A_2 表示测盘侧壁与土壤的接触界面面积，m^2；u 表示土壤与黏附力测盘间的摩擦系数；N_u 表示土壤与测盘侧壁之间的法向正压力，N。

由式(1)和(2)可得：

$$F_1 = p_n \cdot A_1 + p_\tau \cdot A_2 + N_u \tag{3}$$

可见，水田土壤与黏附力测盘界面单位面积法向黏附比压为：

$$p_n = (F_1 - N_u - p_\tau \cdot A_2)/A_1 \tag{4}$$

式(3)～(4)中：F_1、F_n、p_n、p_τ、A_1、A_2、F_c、u、N_u 物理意义及单位同公式(1)～(2)。

2)切向黏附力测量。水田土壤黏附力测量仪测盘在只有切向方向运动时，其受力来源于5个部分，即水平驱动装置对测盘的作用力 F_2、水田土壤对测盘的前行阻力 F_q、水田土壤对测盘的切向黏附力 F_τ、水田土壤对测盘侧壁的附着摩擦力 F_c，水田土壤对测盘底面的摩擦力 F_f、不考虑测盘自重及垂直方向所受载荷并忽略其受力力矩[7]，其受力简化模型如图2所示。

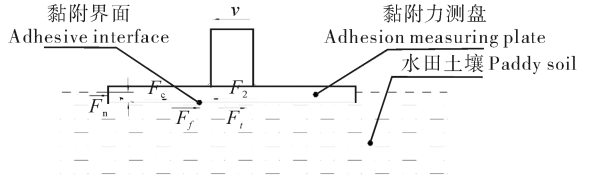


图2 测盘切向黏附模型

Fig.2 Test disc tangential direction model

①水田土壤对测盘前端面的阻力 F_q。受初始载荷影响，测盘在土壤表面有初始下陷量 h，当测盘存在切向运动，测盘前端面会受到阻力 F_q，根据水田土壤承压曲线，土壤抗压强度 q、测盘下陷深度 h 可由式(5)近似表示：

$$q = C h^k \tag{5}$$

式(5)中：q 为土壤抗压强度，Pa；C 为土壤变形模量；h 为测盘下陷深度，m；k 为土壤变形指数，$(kg \cdot f)/m^2$。

由于扰动后水田土壤含水率饱和，在黏附力测试深度层 h 内，可认为水田土壤各向同性，则根据公式(5)可以算出当测盘前端高度为 dh 处的一段侧壁上的阻力为 dF_N，其大小为：

$$dF_n = qB\,dh = C h^k B\,dh \tag{6}$$

式(6)中，B 为测盘直径，m。当测盘下陷深度为 h 时，土壤对测盘前端面的阻力 F_q 可以表示为：

$$F_q = \int_0^h C h^k B\,dh \tag{7}$$

式(7)中：F_q、C、k、B、h 物理意义及单位同公式(5)～(6)。

②水田土壤对测盘底面的切向黏附力 F_τ。切向黏附力可由式(8)表示：

$$F_\tau = p_\tau \cdot A_1 \tag{8}$$

③水田土壤对测盘侧壁的附着摩擦力 F_c。根据式(8)可得，附着摩擦力 F_c 可由式(9)表示：

$$F_c = p_\tau \cdot A_2 + N_u \tag{9}$$

④水田土壤对测盘底面的摩擦力 F_f。

$$F_f = N_n u \tag{10}$$

式(10)中：N_n 表示测盘对土壤的正压力，N；u 表示黏附力测盘与土壤间的摩擦系数，一般取0.118～0.140[13]。故水田土壤对测盘的切向黏附力 p_τ 可近似表示为：

$$F_2 = F_n + F_\tau + F_c + F_f \tag{11}$$

将以上公式(11)代入得：

$$F_2 = \int_0^h C h^k B\,dh + p_\tau \cdot A_1 + p_\tau \cdot A_2 + N_u + N_n u \tag{12}$$

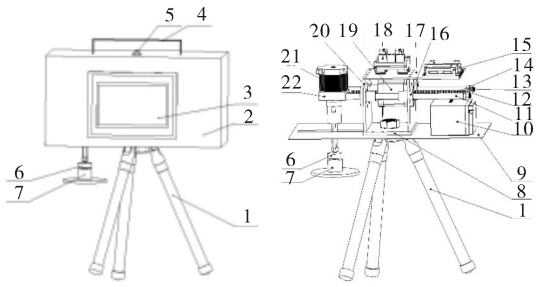
p_τ 可近似表示为：

$$p_\tau = (F_2 - \int_0^h C h^k B\,dh - N_u - N_n u)/(A_1 + A_2) \tag{13}$$

式(13)中：q、C、h、k、p_τ、A_1、A、u、N_u、N_n 等物理意义及单位同上面说明。

1.2 水田土壤黏附力测量仪设计

1)整体结构。本研究设计的水田土壤黏附力测量仪[15]整体结构主要组成包括：黏附力测盘、水平驱动电机、垂直驱动装置、三角支架、壳体及相关连接件(图3)。



1.三角支架 Triangular bracket；2.壳体 Shell；3.触摸显示屏 Touch-sensitive displays；4.提手 Handle；5.水平泡 Horizontal bubble；6.拉压力传感器 Tension-compression sensors；7.土壤黏附力测盘 Soil adhesion measuring plate；8.底座 Base；9.托板 Pallet；10.移动电源 Mobile power；11.光轴 Optical shaft；12.固定板 Fixed plate；13.限位开关 Limited switch；14.贯穿式步进电机丝杆 Through stepping motor screw；15.步进电机驱动器 Stepping motor driver；16.直线轴承 Linear bearing；17.隔板 Partition；18.PLC 控制器 PLC controller；19.贯穿式步进电机 Through stepping motor；20.支撑板 Supporting plate；21.固定轴式步进电机 Fixed shaft stepping motor；22.连接件 Connecting piece.

图 3　测量仪结构示意图

Fig.3　Adhesion force measuring instrument

水田土壤黏附力测量仪的工作原理为：三角支架固定于地面，通过调节三角支架的长度，使测量仪保持水平状态（通过水平气泡判断）；点击触摸显示屏“自动复位”按钮，程序开始初始化；通过 PLC 控制器内置程序，控制拉拔装置与水平驱动装置回到初始测量位置；点击触摸显示屏参数调节按钮，设置所需参数；点击触摸显示屏上开始测量按钮，驱动固定轴式步进电机与贯穿式步进电机按所设定的转速与转向转动，从而带动拉拔装置与水平驱动装置运动，牵引黏附力测盘按要求完成“下压加载—保持—拉拔卸载”运动[3]。在测量过程中，拉压传感器实时测量拉压力，并通过放大电路将其以电信号的方式输出到 PLC 扩展板上，再经过 PLC 控制系统的计算与处理分析，将所测拉压力值显示到显示屏上；其中，为防止水平驱动装置与外壳发生刚性碰撞，采用霍尔磁性开关作为限位开关，防止运动部件彼此之间发生碰撞，且触摸屏上设置有“自动停止”按钮，点击后，拉拔装置与水平驱动装置立刻停止运动。

测量仪采用一体化设计，将测量仪机械部分与控制部分封装于一体，并通过罩壳进行密封，提高测量仪的防水、防泥性能，同时在传感器与测盘之间加装延长杆配合伸缩三角支架，可测量不同泥脚深水田土壤黏附力。

2）黏附力测盘设计。黏附力测盘是水田土壤黏附力测量仪的核心和关键部件。前期研究发现，测盘侧壁倾角对水田土壤黏附存在影响，为此对测盘参数进行了优化，将侧壁设置为 45°倒角时可有效减小土壤对侧壁的黏附，从而消减对试验结果的影响[7-8]。

本测试仪黏附力测盘为光滑测盘，由联接体和金属测盘粘合而成。联接体为 ABS 塑料，3D 打印而成，厚度为 3 mm，直径 100 mm。不锈钢金属测盘厚度为 2 mm，直径 100 mm，通过激光切割而成。光滑测盘结构如图 4 所示，其中接口直径 a 为 30 mm。

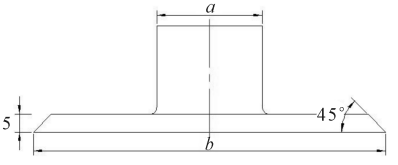


图 4　光滑测盘

Fig.4　Smooth surface measuring disk

1.3　测量系统总体方案

本研究要求测试仪能实时快速准确对土壤黏附力进行动态测量，且需携带方便、工作可靠、精度符合要求，因此选用拉力传感器作为黏附力值感应元件，通过 PLC 进行数据分析处理、触摸屏实时显示黏附力值，硬件模块如图 5 所示。

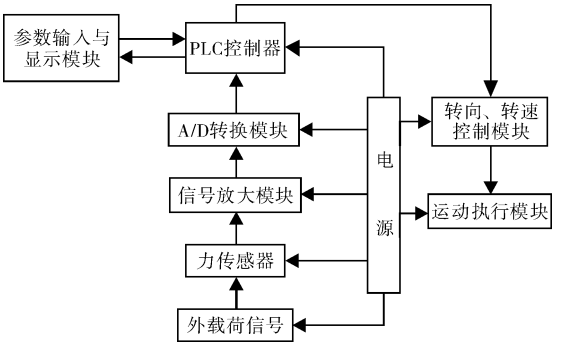


图 5　测量系统硬件模块图

Fig.5　Block diagram of hardware module of measurement system

1）拉压力传感器。拉压力传感器是利用内部弹性敏感元件在外载荷作用下产生弹性形变，使粘贴在它表面的电阻应变片随同产生形变，电阻应变片形变后，其自身的电阻值将产生变化，再经相应的电路将这一电阻变化转换为电压信号，从而完成“外载荷—形变—电信号”的转变过程[16]。本研究选用 DYMH-103 型柱式传感器，其外表采用不锈钢材质，并密封处理，具有防水性好、抗机械疲劳性好、耐腐蚀等优点，适合在水田恶劣的环境下进行测量作

业。此外该传感器采用高柔屏蔽线，信号稳定、抗干扰能力强，具有过载保护功能，可对田间土壤黏附力过大引起的短暂超量程情况进行保护，其具体技术参数见表2。

表2 DYMH-103型柱式传感器技术参数

Table 2 Technical parameters of DYMH-103 column sensor

技术指标 Technical parameters	数值 Value
黏附力量程/kg Range	0～10
灵敏度/(mV/V) Sensitivity	0.75
重复性误差 Repeatability error	±0.05%
综合精度 Comprehensive accuracy	±0.2%
推荐激励电压/V Recommended excitation voltage	10～12
激励电压/V Excitation voltage	5～15
输出电压/mV Output voltage	0～20
工作温度/℃ Operating temperature range	－30～＋70
安全过载 Safety overload	150%
极限过载 Ultimate overload	200%
蠕变 Creep	±0.2%
绝缘电阻/MΩ Insulation resistance	≥5 000
材质 Texture of material	不锈钢 Stainless steel
电缆 Cable	线长：2～6 m Length：2-6 m 直径：6 mm Diameter：6 mm
密封等级 Seal level	IP67

2)测量系统设计。采用GX Works 2编程软件对控制系统进行指令编辑，程序设计流程如图6所示。采用台湾威纶科技公司的触摸屏编辑组态软件Easy Bulider8000进行触摸屏界面的设计，建立触摸屏像素点与控制程序的参数对应关系，触摸屏操作界面如图7所示。

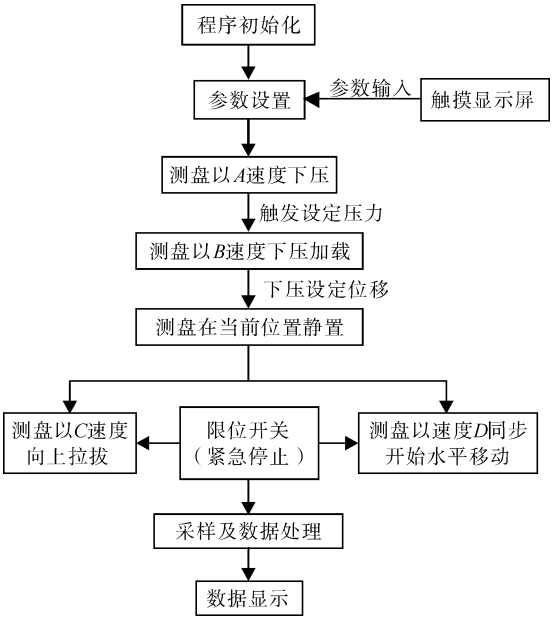


图6 程序设计流程图

Fig.6 Programming flow chart

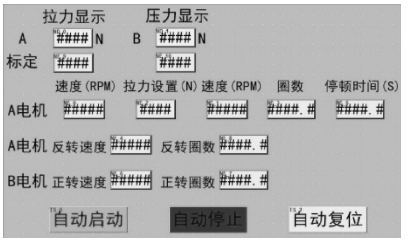


图7 触摸显示屏界面

Fig.7 Parameter input and display interface of touch display screen

2 结果与分析

室外试验在华中农业大学试验田进行，试验田块为施加有机绿肥田块，田间残留大量植物残茬，翻整后加水浸泡并旋耕整地，静置48 h，试验前将表层残留水排除。

2.1 法向拉拔速度对黏附力影响

在测盘直径100 mm、切向速度 v_τ 为0条件下，法向拉拔速度 v_n 分别取100、200、300、400、500、600、700、800 mm/min等8个水平，测得法向黏附力变化曲线如图8所示，结果显示土壤黏附力随拉拔速度增加呈上升趋势。其原因可能是随着拉拔速度的增大，受水田土壤自身黏性以及测盘与土壤黏附界面间空气负压影响，其在试验范围内近似呈现出一种线性增大的关系。但在实际环境条件下，土壤含水率以及土壤自身机械组成等均对黏附特性存在影响。

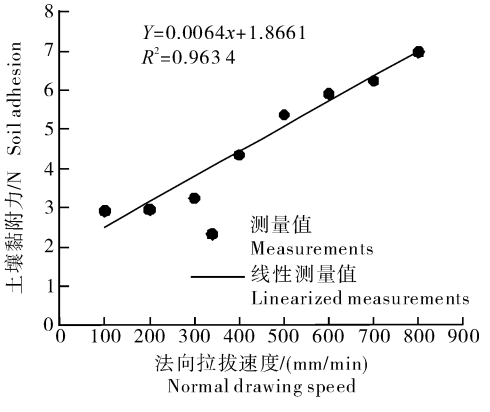


图8 不同法向拉拔速度下的土壤黏附力

Fig.8 Soil adhesion force under different normal velocities

2.2 切向水平速度对黏附力影响

在测盘直径100 mm、法向拉拔速度 v_n 条件

下，水平速度 v_τ 分别选取为 100、200、300、400、500、600、700、800 mm/min 等 8 个水平，测得法向黏附力变化曲线如图 9 所示，结果显示其随着切向速度增加呈上升趋势。结合法向黏附力测试结果，显示水田土壤法向黏附力与切向速度 v_τ 存在密切关联，其与水田土壤的流变特性有关。切向速度下土壤黏附测盘上表面及侧壁情况见图 10。

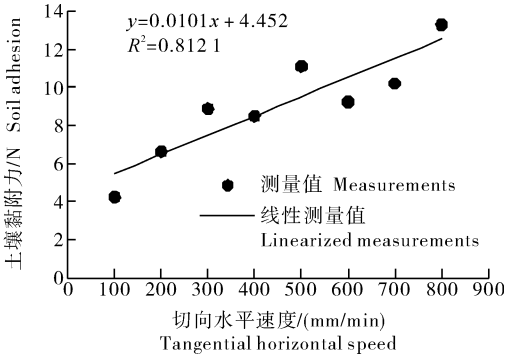


图 9　不同切向水平速度下的土壤黏附力

Fig.9　Soil adhesion force under different tangential velocities

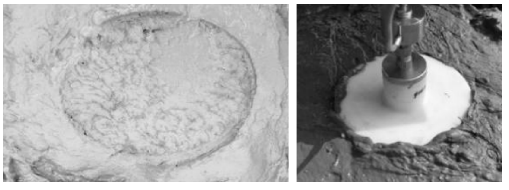


图 10　切向速度下土壤黏附测盘上表面及侧壁

Fig.10　Surface and side wall of soil adhesion disk at tangential velocity

2.3　水田土壤空间深度对黏附力影响

在测盘直径为 100 mm、法向拉拔速 v_n 为 100 mm/min、切向水平速度 v_τ 为 0 的条件下，土壤深度 L 分别选取 0、100、200 mm 3 个水平，测得不同深度土壤黏附力变化曲线如图 11 所示。结果表明，黏附力随深度增加呈先升后降的趋势，并在深度 100 mm 达到最大。原因可能是扰动饱和水田土壤

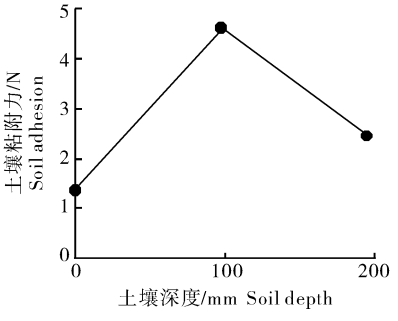


图 11　不同深度下的土壤黏附力

Fig.11　Soil adhesion at different spatial depths

表面存在一层自由水，可形成一个特殊的泥水混合界面层，而在 100 mm 土壤层内土壤含水率依旧很高，但不存在自由水层，从而使黏附性增强，然而随土壤深度增加，耕层底层土壤含水率下降，土壤流变特性变化，流动性降低，从而导致黏附力下降。

3　讨　论

本研究设计了一款便携式水田土壤黏附力测量仪，以法向拉拔速度 v_n、切向速度 v_τ、水田土壤空间深度为试验因素设计了多水平单因素试验，考察了接触界面黏附力的影响因素及相关规律。室外田间试验结果表明，随法向拉拔速度 v_n、切向速度 v_τ 增加，土壤黏附力呈增大的趋势；随水田土壤空间深度 L 的增加，土壤黏附呈先增后减的趋势。本研究设计的便携式水田土壤黏附力测量仪可实时快速测量法向运动和切向运动组合运动条件下的水田土壤黏附力，该测量系统界面简洁、操作简单、性能稳定、灵敏度高、准确性好，可用于对水田土壤的压缩流变特性进行研究与测量。后续还可以利用该仪器对不同条件下的扰动饱和水田土壤特性开展研究。

参考文献 References

[1]　张毅.耕作机具部件仿生设计与研究[D].武汉：武汉理工大学，2002. ZHANG Y.Bionic design and research on tillage components[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002 (in Chinese with English abstract).

[2]　贾洪雷，王万鹏，陈志，等.农业机械触土部件优化研究现状与展望[J].农业机械学报，2017，48(7)：1-13. JIA H L, WANG W P, CHEN Z, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(7): 1-13 (in Chinese with English abstract).

[3]　冯竞祥，赵新，马健军.土壤机械阻力测定研究进展[J].农业工程，2013，3(2)：1-4. FENG J X, ZHAO X, MA J J. Advance on measurement of soil mechanical resistance[J]. Agricultural engineering, 2013, 3(2): 1-4 (in Chinese with English abstract).

[4]　FOUNTAINE E R. Investigations into the mechanism of soil adhesion[J]. European journal of soil science, 1954, 5(2): 251-263.

[5]　佚名.SF-1 型水田土壤外附力内聚力测定仪简介[J].农业机械资料，1976(Z1)：34. Anno. Brief introduction of SF-1 type soil external force cohesion force tester[J]. Agricultural machinery information, 1976(Z1): 34 (in Chinese).

[6]　任露泉，张书军，杨文志，等.土壤粘附仪组合测盘测力原理的试验研究[J].试验技术与试验机，1990(1)：18-21. REN L Q, ZHANG S J, YANG W Z, et al. Experimental research on the principle of measuring force of combined measuring disk of soil adhesion instrument[J]. Test technology and testing machine,

1990(1):18-21(in Chinese with English abstract).

[7] 杨志强.三套微小土壤粘附力测试系统的研究[D].长春:吉林大学,2006.YANG Z Q.Study on three set of test systems for tiny soil adhesion[D].Changchun:Jilin University,2006(in Chinese with English abstract).

[8] MARUO S,INOUE H.Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk[J/OL].Applied physics letters,2007,91(8):P084101[2019-12-20].http://doi.org/10.1063/1.2768631.

[9] 祝青,肖才伟,郑保辉,等.一种测试非浸润固-液界面微粘附力的装置和方法[P].中国专利:CN107966403A,2018-04-27.ZHU Q,XIAO C W,ZHENG B H,et al.A device and method for measuring the micro adhesion force of non wetting solid-liquid interface[P].Chinese patent:CN107966403A,2018-04-27(in Chinese).

[10] 陈青春,石勇,丁启朔,等.正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J].农业工程学报,2015,31(9):13-18.CHEN Q C,SHI Y,DING Q S,et al.Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2015,31(9):13-18(in Chinese with English abstract).

[11] 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):214-217. ZHANG G Z,XU Q C,XIA J F,et al. Design of 1GMC-70 type boat-type rotary tillage and burying machine[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2008,39(10):214-217(in Chinese with English abstract).

[12] 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. ZHANG X M,XIA J F,ZHANG J M,et al.Working performance experiment of combination blade roller for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2016,32(9):9-15(in Chinese with English abstract).

[13] 朱德泉,熊玮,蒋锐,等.2ZGK-6型可调宽窄行高速水稻插秧机设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(21):37-45.ZHU D Q,XIONG W,JIANG R,et al. Design and experiment of 2ZGK-6 type spacing-adjustable wide-narrow row high speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2016,32(21):37-45(in Chinese with English abstract).

[14] 赖小强.智能旋转式粘度仪设计[D].长沙:湖南师范大学,2017.LAI X Q.Intelligent rotary viscometer design[D].Changsha:Hunan Normal University,2017(in Chinese with English abstract).

[15] 张国忠,左志,周勇,等.一种水田土壤黏附力测量仪[P].中国专利:CN109765177A,2019-05-17.ZHANG G Z,ZUO Z,ZHOU Y,et al.A paddy soil adhesion tester[P].Chinese patent:CN109765177A,2019-05-17(in Chinese).

[16] 孙辉,韩玉龙,姚星星.电阻应变式传感器原理及其应用举例[J].物理通报,2017(5):82-84.SUN H,HAN Y L,YAO X X.Principle and application example of resistance strain sensor[J]. Physics bulletin,2017(5):82-84(in Chinese with English abstract).

Design and testing of soil adhesion measuring instrument for paddy fields

ZHANG Guozhong,ZUO Zhi,WANG Hongchang, GAO Yuan,HAN Yuhang

College of Engineering,Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River,Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070,*China*

Abstract Because of the existence of soil adhesion characteristics,it often causes soil to adhere to the surface of working parts,which increases the energy consumption of equipment and even prevents normal operation. With the improvement of modern agricultural mechanization and the increasing variety of soil-engaging components,researchers put forward higher requirements for designing and optimizing soil-engaging components. In this study,a paddy field soil adhesion measuring instrument was designed. The single factor experiment was carried out with normal pull-out velocity v_n,tangential velocity v_τ and paddy field soil spatial depth as influencing factors. The factors affecting the contact interface adhesion were preliminarily obtained. The results showed that the soil adhesion increased with the increase of normal drawing speed v_n and tangential velocity v_τ,and first increased and then decreased with the increase of spatial depth of paddy field soil.

Keywords paddy soil; soil adhesion; adhesion measurement; portable measuring instrument; soil-engaging components

(责任编辑:陆文昌)