

田间原位综合耕作试验台设计与应用

杨艳山 丁启朔 丁为民 薛金林 邱 威 何瑞银
(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 土壤耕作试验台是开展耕作与种植机具性能试验的关键装备,通常采用室内土槽的形式,但室内重塑的土壤难以反映田间土壤固有的结构性和耕性。本文在前期工作的基础上具体阐述了田间原位综合耕作试验台原理,所设计原位综合耕作试验台充分发挥室内土槽试验系统在控制精准、互换性强、测试对象及试验内容丰富等优势,为不同种类的牵引型与驱动型耕作部件的试验研究提供了专用的装备。试验台采用框架导轨的结构形式,整体吊装运输。在田间工作时4个立柱支撑在地面铺放的轨道上实现整体横向进位和纵向移动,兼顾长途运输、田间移位、以及在试验区测试过程精准定位的方便性。各种耕作部件都可挂接在多功能测试台车上完成测试,台车配有功能完备的传感器且设置动力驱动模块,提供驱动型耕作部件的驱动和信号测试功能。试验台的轨道提供测试台车的导向并通过电力拖动系统牵引测试台车,牵引速度在0~1 m/s范围内可调。试验台的升降由4个立柱上端的同步电机驱动,满足旋耕、犁耕、开沟器等测试过程的刀具入土及耕深控制要求。立柱的整体升降配合测试台车上的螺杆调节装置可以实现最大80 cm的深度调节。试验台配备完备的供电及控制系统,提高了田间试验的电气化程度。经检验所设计原位综合耕作试验台满足多因子多水平田间测试的要求,节约试验用地并提高了效率。

关键词: 土壤耕作试验台; 原位试验; 系统设计

中图分类号: S233.1; N945.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)01-0068-07

Design and Application of Multi-purpose In-situ Tillage Tool Testing Platform

Yang Yanshan Ding Qishuo Ding Weimin Xue Jinlin Qiu Wei He Ruiyin
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: A key facility for tillage and seeding implements testing is the experimental soil tillage platform, which is generally constructed in the indoor soil-bins. However, soil structure and workability of the field state soil is not attainable with laboratory remolding procedures. Based on the previous works, a multi-functional soil tillage testing platform for in-situ experiment was developed, serving as a specialized experimental equipment for various types of tractive or propelled tillage tools. This platform inherited the benefits of indoor soil bin systems, e.g. precision control, high interchangeability, adaptable to multiple testing tools and experimental plans. Being designed in a structure of supported frame and rail systems, the whole platform can be hoisted and loaded on a track for transportation. The four supporting beams sat on rails laid on soil surface, facilitating transversal and longitudinal movement, maneuvering from one field to another, as well as positioning for precision control for testing and measurement. Different tillage tools can be hooked on a multi-purpose testing cart, on which complete set of sensors and power supply unit were supplied for propelling the attached tools and data collection. Two guidings railed on the platform guided the multi-purpose testing cart, which was tracked by an electric driving mechanism. The forwarding speed was adjustable in a range of 0~1 m/s. The four synchronous electric motors situated on the four supporting beams facilitated overall elevating movement of the platform and adjusted the working depth of tillage tools. Total attainable vertical displacement from both the

收稿日期: 2015-07-29 修回日期: 2015-10-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371238)
作者简介: 杨艳山(1988—),男,博士生,主要从事农机现代设计理论与方法研究,E-mail: yang_yan_shan@163.com
通信作者: 丁启朔(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤耕作力学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

platform movement and the screw mechanism of the testing cart can be 80 cm, satisfying different experimental demands. A complete electrical power and control system was designed, which highly improved the degree of electrification. Trial test in field showed that the developed system was suitable for in-situ multi-factor and multi-level experimental test.

Key words: tillage testing platform; in-situ experiment; system design

引言

精准农业、保护性耕作等现代农业理念对耕作机具的研发提出了新要求^[1-5],揭示土壤和部件的性能关系对于耕作机具的改进及创新设计具有极其重要的意义^[6-8]。相关研究表明,土壤的物性(耕性)与耕作机械的设计及应用参数是两类相互独立的影响因子^[9-14],但共同影响到耕作用能和耕作质量,因此土壤-耕作机械系统的优化需要综合考虑土壤和机具两方面的属性^[8,15-16],为弄清二者间的关系需要进行丰富的因子控制试验。

耕作机械的性能检测离不开土槽或田间试验,鉴于土槽试验在可控性方面具有突出优势^[17],近年来国内外研发了各种类型和规模的土槽试验装置,如中国农业大学、江苏大学、黑龙江省农机院等单位相继建立了针对多种土壤及不同耕作部件的土槽试验台^[18]。与土槽试验相比,田间土壤物性表现十分复杂,土壤物性的变化影响到耕作部件的性能表现^[10,16,19]。因此考虑到田间土壤的结构及空间变异性的影响^[20],室内土槽试验并不能完全反映田间原位的土壤耕性及耕作机械的实际性能,Liu等^[21]分别在室内土槽和田间原位2种条件下对比了锄铲的作业性能,结果表明田间原位试验与土槽试验结果具有显著差异,田间原位耕作试验更能够表现耕作机具的真实性能。

田间试验能够最直接反映耕作机械的实际性能及土壤的状态响应^[22-23],然而,目前针对田间原位试验的专用装备相对较少。多数情况下田间测试装置仅限于针对耕作部件的性能参数测试及相应设备的研究与改进^[24-29],然而以拖拉机悬挂或牵引式的试验测试系统面临诸多限制,如试验参数较难精确控制、无法避免拖拉机碾压对土壤结构的破坏、多因子多水平试验所需耕地面积过大等弊端。如李永磊等^[30]对双辊秸秆还田旋耕机进行了3种作业速度工况下的田间测试试验,用地达9 600 m²。Kheiralla等^[31]采用拖拉机挂接方式对4种耕作机具、4个前进速度及3个耕深进行田间测试,用地面积更是高达48 000 m²。另外,田间地表不平度、拖拉机组的振动等因素也影响到试验的稳定性数据质量,因此,有效的解决方案是将室内土槽试验平台转换成可以

在田间应用的测试平台,并将试验测试区小型化或微型化,利用小区划的试验策略协调用地矛盾,但此类的试验测试策略鲜有报道。

为研发高性能的田间原位综合耕作试验台,本文探讨将室内土槽试验系统的开放性、控制精准性、参数多样化、数据准确性、试验高效性等优势特征引入原位综合耕作试验台的设计,构建以协调土壤物性、耕作机械性能和耕作质量3方面参数的土壤-机器系统优化为最终目的的原位综合耕作试验台。

1 总体设计

田间原位耕作试验与室内土槽试验的最大区别在于无需重复处理(重塑)试验用土,因此原位试验台一方面应避免常规拖拉机挂接测试过程因拖拉机的往复行驶造成的土壤结构破坏及对土壤物理力学属性的改变,另一方面应具有良好的移位功能。鉴于多因子多水平耕作试验的区划数量较多,而且试验区通常按规则并行排列,因此原位综合耕作试验台使用铺放在田间的轨道作横向移位,立柱的底脚装有滚轮沿轨道滚动。在完成了一排小区的耕作试验之后原位试验台切换使用纵向移位滚轮,并铺放纵向移位的轨道,向下一排小区工位移动。使用铺放轨道实现试验台支撑和移动可以避免拖拉机试验系统造成的土壤破坏。

原位综合耕作试验台(原位试验台)的整体结构如图1所示,由悬架导轨、升降系统、牵引系统、多功能台车、电控系统、数据采集系统等组成。耕作部件安装在多功能台车上,台车沿轨道移动,控制柜操控多路电动机以驱动平台升降、往复牵引台车等动作。

2 关键部件设计

2.1 悬架导轨与牵引系统

便于运输是原位试验台的一个基本要求,试验台主体长度6 m、导轨间距1.2 m,便于吊装,方便卡车运输。牵引电动机布置在试验台的前端,为便于耕作机具入土,试验台的末端拼装有2 m的斜置导轨。对于耕作深度较深的机具(如深松铲),测试过程前需要在水平导轨的起始端进行人工挖坑处理。

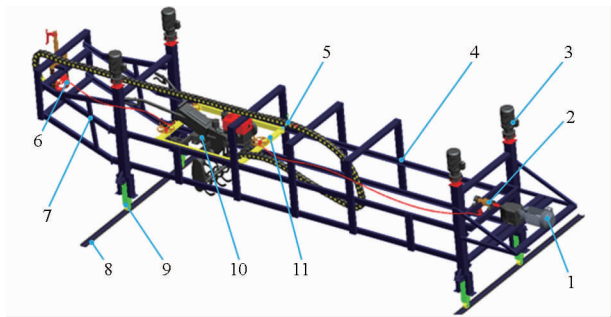


图 1 原位试验台结构示意图

Fig. 1 Schematic of in-situ experimental platform

1. 牵引电动机 2. 卷筒 3. 升降电动机 4. 悬架导轨
5. 拖链 6. 尾刹制动 7. 斜置导轨 8. 地面导轨
9. 伸缩立柱 10. 耕作机具 11. 台车

试验台最大有效测试距离达到 5 m。试验台的动力牵引由变频电动机、减速机、卷筒、钢丝绳、尾刹制动等部件组成(见图 1),针对旋耕机测试正旋切土试验条件产生的寄生牵引力^[32],试验台使用加装尾刹制动的方式平衡。根据前期原位耕作试验台设计应用的经验^[33-35],并且综合考虑到旋耕、犁耕、深松等耕作机具的牵引力、牵引速度等测试要求^[9,35-36],对牵引系统性能参数进行设计,具体参数如表 1 所示。

表 1 牵引系统性能参数

Tab. 1 Performance parameters of driving system

电动机 功率/kW	减速器 速比	输出扭矩 /(N·m)	卷筒 直径/m	输出牵 引力/kN	调速范围 /(m·s ⁻¹)
7.5	28.9	1 413.21	0.1	28.62	0.1~0.5
			0.2	14.31	0.2~1.0

2.2 多功能测试台车

所有耕作部件的测试都在多功能测试台车上完成,台车的矩形框架两侧装有滚轮,滚轮与原位试验台的导轨配合,保障台车的牵引稳定性,有效解决拖拉机悬挂测试系统因地表不平度、机组振动等带来的不良干扰。台车根据待测耕作部件的特征分别设计不同的挂接接口,不仅满足开沟器、深松铲等牵引式部件的挂接测试,也能满足旋耕机等驱动型部件的测试。台车配有完善的传感器及测试系统,数据信号通过拖链连到外部。多功能台车挂接如图 2、3 所示。

耕作深度由原位试验台通过立柱的上下运动调节(上下移动范围 40 cm),也可以由台车挂接部分

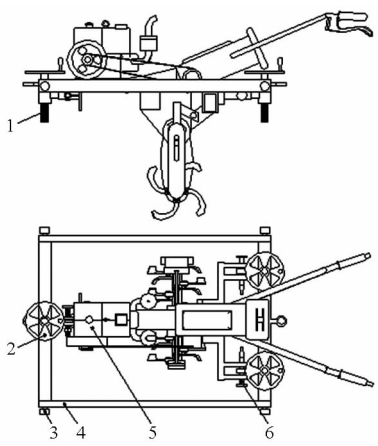


图 2 旋耕机挂接示意图

Fig. 2 Schematic of rotary tiller mounted on tool trolley

1. 丝杆 2. 转盘 3. 滚轮 4. 台车 5. 旋耕机 6. 销钉

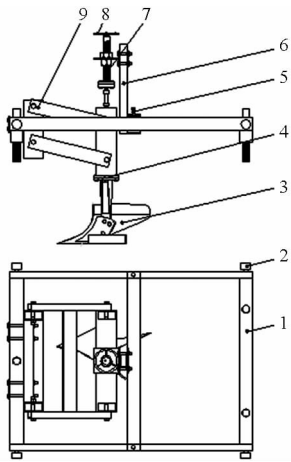


图 3 铧式犁挂接示意图

Fig. 3 Schematic of moldboard plow mounted on tool trolley

1. 台车 2. 滚轮 3. 铧式犁 4. 连接法兰 5. 紧固螺钉
6. 滑动支架 7. 丝杆 8. 转盘 9. 平行四杆机构

的螺旋副配合平行四杆机构调节(上下移动范围 40 cm),2 种调节方式可提供的最大深度调节达 80 cm,能够满足深松铲等耕作机具的测试要求^[36]。另外,为满足旋耕机耕作能耗、碎土、碎茬、埋秆等性能测试要求^[30,35],选择驱动功率为 6.3 kW、刀轴转速范围为 150~400 r/min 的旋耕机安装在台车上。多功能台车技术参数如表 2 所示。

2.3 电控与升降系统

多因子多水平田间试验的基本特征是频繁更换耕作部件、大量的小区试验,以及繁重的入土、耕作及抬升等动作要求,因此电气化操作是提高试验效

表 2 多功能台车技术参数

Tab. 2 Performance parameters of tool trolley

挂接测试机具类型	驱动功率 /kW	牵引功率 /kW	刀轴转速范围 /(r·min ⁻¹)	幅宽 /cm	耕深调节范围 /cm	牵引速度范围 /(m·s ⁻¹)
旋耕	6.3	7.5	150~400	80	0~20	0.1~1.0
犁耕、深松、开沟等		7.5			0~80	0.1~1.0

率、减轻劳动强度的必然选择。原位试验台使用发电机做动力源,通过控制柜操控各电动机进行正转、反转、联动、单动、急停等动作,控制柜电路如图4所示,升降电动机驱动原位试验台的升降,立柱设有行程限位开关限制极限升降位置。在测试过程伸缩立

柱收入导向套内部,立柱落在地面铺放的轨道上保障稳定测试。在完成一次牵引测试后原位试验台升起,滚轮落入轨道槽中支撑起原位试验台,实现横向移位,进入下一测试工位。升降电动机及滚珠丝杠参数如表3所示,立柱的结构设计如图5所示。

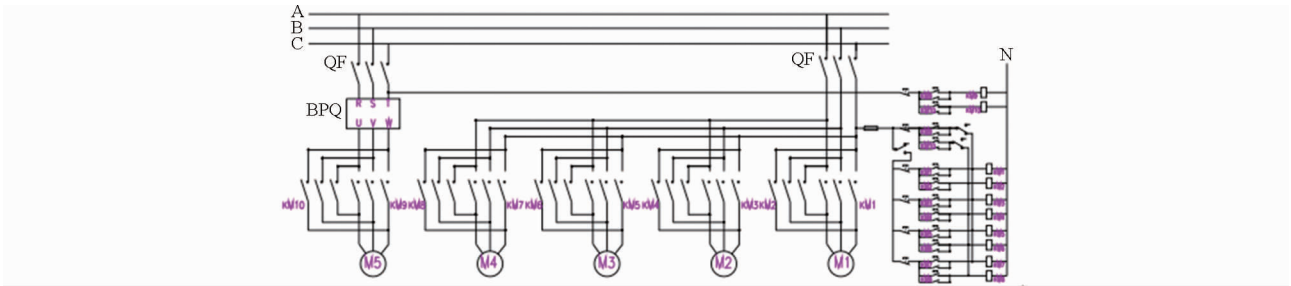


图4 控制柜电路图
Fig.4 Schematic of control circuit

表3 升降电动机及滚珠丝杠参数

Tab.3 Performance parameters of motor and ball screw								
电动机功率 /kW	减速器速比	输出转速 /(r·min ⁻¹)	输出扭矩 /(N·m)	滚珠丝杠公称 直径/mm	公称导程 /mm	升降行程 /cm	升降速度 /(m·min ⁻¹)	额定升力 /kN
0.75	1/14	101.78	0.36	32	4	40	0.41	5 100

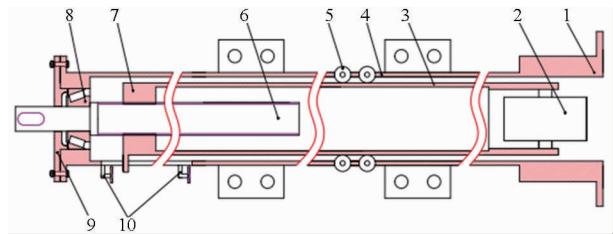


图5 立柱结构图
Fig.5 Schematic of lifting column

1. 柱脚 2. 滚轮 3. 伸缩立柱 4. 导向套 5. 导向轮
6. 螺杆 7. 螺母 8. 轴承 9. 轴承盖 10. 限位开关

表4 测试系统性能参数

测试仪器	型号	性能参数			
		量程	灵敏度(系数)	输入(出)特性	采样频率/kHz
拉压力传感器	LKL-101/1T	1 t	(2.0±0.005)mV/V	0~10 V	0~2
拉压力传感器	LKL-102/1T	1 t	(2.0±0.005)mV/V	0~10 V	0~2
动态扭矩传感器	BX120-3AA	1 000 N·m	0.5	0~10 V	0~2
动态电阻应变仪	YD-28	-0.1ε~0.1ε	0.5 V(100 με)	-10~10 V(负载5 kΩ) -50~50 mA(负载200 Ω)	
数据采集卡	USB-4704			0~10 V	0~2

旋耕机刀轴扭矩测试采用应变式扭矩传感器,沿驱动轴的轴向±45°方向分别粘贴4个应变片,组成全桥电路的4个桥臂,用以感受同向的最大正应变^[37]。这4个应变片通过集流环接线盒接与外界原件连接(见图6)。在进行牵引型耕作机具测试时分别在水平和垂直2个方向使用独立的拉压力传感器监测作用在牵引型耕作机具上的土壤阻力,分别

3 数据采集系统

试验平台配有完善的计算机测试系统,多功能台车配有拉压力传感器、动态电阻应变仪、放大器、数据采集卡和计算机,可实现旋耕机、铧式犁、深松铲等耕作机具的输出轴扭矩、转速、拉压力等动力学参数的测试,输出信号由数据采集卡采集。采用LabView软件编制数据采集主程序,在程序执行过程中,可灵活方便地进行采集控制、实时显示以及数据文件存储。测试系统性能参数如表4所示。

测量耕作过程中土壤作用在机具上的水平和垂直分力,如图7所示。

4 应用

前期的原位耕作试验台分别针对犁耕^[33]、开沟^[34]等田间试验研究进行了专门的开发设计,充分体现了其在开展田间多因子多水平控制试验的优

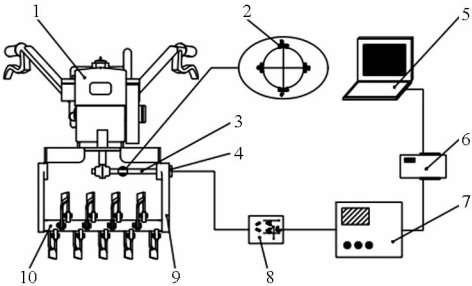


图 6 旋耕扭矩测试系统示意图

Fig. 6 Measurement system for tillage torque

1. 旋耕机 2. 应变片 3. 驱动轴 4. 集流环 5. 计算机 6. 数据采集卡 7. 动态电阻应变仪 8. 电桥 9. 链条盒 10. 刀轴

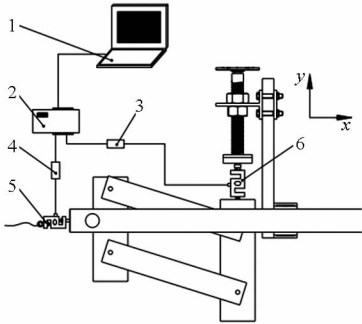


图 7 犁耕与深松等阻力测试系统示意图

Fig. 7 Measurement system for tillage resistance

1. 计算机 2. 数据采集卡 3、4. 放大器 5、6. 拉压力传感器

势,获得了良好的试验应用效果。本文进一步进行了系统集成和升级,并进行了电气化改造。

为检验原位耕作机械试验台的实用性能,于2014年11月8日—11月19日在江苏省南京市六合区八百桥试验田,进行了2种前进速度(0.1、0.15 m/s),3种刀轴转速(170、200、240 r/min),共计6种切土节距(12.5、14.58、17.52、18.75、21.87、26.25 mm)的旋耕试验,同时采用铧式犁对不同层土壤(0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm)的耕性进行测试。

共进行了18个小区的旋耕测试和9个小区的犁耕测试,总试验区面积不超过600 m²,试验现场照片如图8所示。较好地解决了多因子多水平试验所需耕地面积过大等弊端。



图 8 试验现场照片

Fig. 8 Photo of in-situ experimental tests

水稻土的分层犁耕试验结果表明,因0~5 cm土层内作物根系富集造成耕作阻力较大,5~10 cm土层根系相对较少且该层仍然是常规耕作扰动层,因此耕作阻力最小,10~15 cm土层处于耕层之下,土壤紧实造成耕作阻力变大(见图9)。田间原位综合耕作试验台的应用,有效地解决了室内试验无法模拟田间土壤条件的弊端。从图10、11中可以看出本试验台可以对旋耕机前进速度及刀轴转速加以准确控制(6种切土节距),并且能够准确测量出刀轴扭矩随切土节距的变化情况,能够反映旋耕机的田间耕作质量。为旋耕机进行多种工况下全面深入的田间耕作测试、性能优化研究提供基础的试验条件。陈青春等^[35]利用本试验台进行了旋耕机正反旋秸秆混埋试验,为机具优化及秸秆还田效果的评价提供了重要指标。

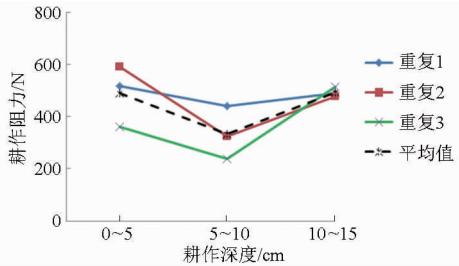


图 9 犁耕不同层阻力变化曲线

Fig. 9 Effects of different layers on draughts

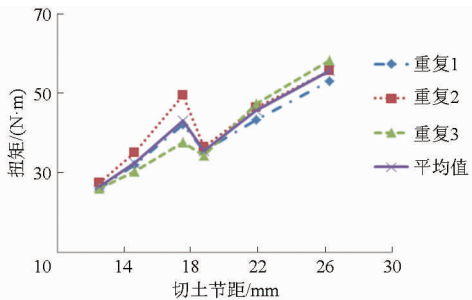


图 10 旋耕扭矩随切土节距的变化曲线

Fig. 10 Effects of different LBs on tillage torque

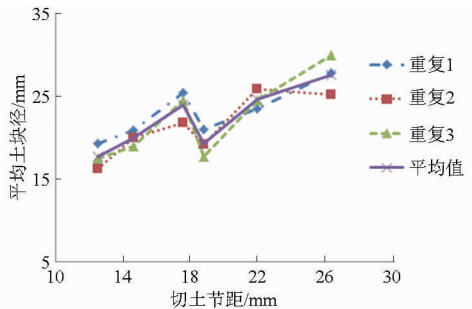


图 11 平均土块径随切土节距的变化曲线

Fig. 11 Effects of different LBs on clods mean diameters

5 结束语

田间原位综合耕作试验台在试验过程中运行平

稳、安全可靠,牵引速度可在 0 ~ 1 m/s 范围内无级调速,耕作深度调节范围达 80 cm。互换性强,能够满足旋耕、犁耕、深松、开沟等耕作机具的田间测试要求。

室内试验无法展示田间原位土壤物性的局限、多因子多水平田间试验的用地矛盾、拖拉机挂接测试系统对土壤结构的破坏、田间试验系统的高度自动化及信息化要求、试验效率及代价等方面的矛盾。

该系统设计协调了各方面的性能要求,解决了

参 考 文 献

- 1 杨印生,吴才聪,冯传平. 日本精确农业的研究现状[J]. 农业机械学报,2001,32(2):107-110.
Yang Yinsheng, Wu Caicong, Feng Chuanping. The status of precision agriculture in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,32(2):107-110. (in Chinese)
- 2 赵春江,薛绪掌,王秀,等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2003,19(4):7-12.
Zhao Chunjiang, Xue Xuzhang, Wang Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4):7-12. (in Chinese)
- 3 高焕文,何明,尚书旗,等. 保护性耕作高产高效体系[J]. 农业机械学报,2013,44(6):35-38.
Gao Huanwen, He Ming, Shang Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):35-38. (in Chinese)
- 4 李安宁,范学民,吴传云,等. 保护性耕作现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2006,37(10):177-180,111.
Li Anning, Fan Xuemin, Wu Chuanyun, et al. Situation and development trends of conservation tillage in the world[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(10):177-180,111. (in Chinese)
- 5 王长生,王遵义,苏成贵,等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报,2004,35(1):167-169.
Wang Changsheng, Wang Zunyi, Su Chenggui, et al. Development and application of protective farming technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(1):167-169. (in Chinese)
- 6 高建民,周鹏,张兵,等. 基于光滑粒子流体动力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验[J]. 农业工程学报,2007,23(8):20-26.
Gao Jianmin, Zhou Peng, Zhang Bing, et al. Development and test of high speed soil-cutting simulation system based on smooth particle hydrodynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(8):20-26. (in Chinese)
- 7 何宪章. 土壤机器系统力学研究[J]. 农业工程技术·温室园艺,1980(3):20-28.
- 8 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):102-104,112.
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):102-104,112. (in Chinese)
- 9 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反转旋耕不同耕作性能的比较[J]. 南京农业大学学报,2003,26(3):106-109.
Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi. Comparison on performances of up-cut and down-cut rotary tillage[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2003,26(3):106-109. (in Chinese)
- 10 李霞,张东兴,张瑞,等. 土壤物理特性对深松阻力影响的试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2014,35(1):34-39.
Li Xia, Zhang Dongxing, Zhang Rui, et al. Experiment of subsoling draught under different soil physical properties[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2014,35(1):34-39. (in Chinese)
- 11 Johan Arvidsson, Thomas Keller, Karin Gustafsson. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents[J]. Soil & Tillage Research,2004,79(2):221-231.
- 12 Jesús H Camacho-Tamayo, Gonzalo A Rodríguez B. Evaluation of tillage tools at different working speeds and soil water contents [J]. Agricultura Técnica,2007,67(1):60-67.
- 13 Jafar Habibi Asl, Surendra Singh. Optimization and evaluation of rotary tiller blades: computer solution of mathematical relations [J]. Soil & Tillage Research,2009,106(1):1-7.
- 14 Matin Md A, John M Fielke, Jacky M A Desbiolles. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering,2014,118:7-15.
- 15 王路,王成武,戈振扬. 土壤-耕作部件相互作用的研究进展[J]. 农机化研究,2012(12):7-11,20.
Wang Lu, Wang Chengwu, Ge Zhenyang. Review of the interaction between soil and tillage parts[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012(12):7-11,20. (in Chinese)
- 16 李汝莘,高焕文,苏元升. 土壤容重和含水量对耕作阻力的影响[J]. 农业工程学报,1998,14(1):81-85.
Li Ruxin, Gao Huanwen, Su Yuansheng. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance[J]. Transactions of the CSAE, 1998,14(1):81-85. (in Chinese)
- 17 乔晓东,王晓燕,颜华,等. 后悬挂农具田间试验平台[J]. 农业机械学报,2013,44(8):63-68.
Qiao Xiaodong, Wang Xiaoyan, Yan Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8):63-68. (in Chinese)
- 18 颜华,吴俭敏,林金天. 环形土槽微耕机试验平台设计[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):68-72.

- Yan Hua, Wu Jianmin, Lin Jintian. Design of micro-cultivator testing platform with annular soil bin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 68–72. (in Chinese)
- 19 李艳洁, 徐泳, 赵东. 微型土壤动力学试验土槽装置的研制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 65–70.
Li Yanjie, Xu Yong, Zhao Dong. Development and manufacture of a mini-soil-bin device for soil dynamics experiments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 65–70. (in Chinese)
- 20 丁启朔, 丁为民, 潘根兴. 多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理及其应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 132–136.
Ding Qishuo, Ding Weimin, Pan Genxing. Theory and application of multi-scale and multi-resolution fragmentation method for soil structure evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 132–136. (in Chinese)
- 21 Liu J, Chen Y, Lobbs D A, et al. Soil-straw-tillage tool interaction: field and soil bin study[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2007, 49: 2.1–2.6.
- 22 廖庆喜, 高焕文, 王世学, 等. 免耕播种机新型锯切防堵装置的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 91–95.
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Wang Shixue, et al. Experimental study on sawtooth anti-blocking mechanism for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 91–95. (in Chinese)
- 23 Takashi Kataoka, Sakae Shibusawa. Soil-blade dynamics in reverse-rotational rotary tillage blades[J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(2): 95–113.
- 24 马明建, 汪遵元, 尹凤福, 等. 移动式土壤工作部件性能参数测试系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 35–38.
Ma Mingjian, Wang Zunyuan, Yin Fengfu, et al. Studies on the working components under soil performance-parameter testing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 35–38. (in Chinese)
- 25 杨然兵, 石超, 尚书旗. 花生收获机械土壤阻力测试装置试验与设计[J]. 农机化研究, 2014(10): 170–173.
Yang Ranbing, Shi Chao, Shang Shuqi. Design and experiment of soil resistance testing device of peanut harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(10): 170–173. (in Chinese)
- 26 赵新, 罗锡文, Wells L G. 土壤阻力连续测试设备研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 67–71.
Zhao Xin, Luo Xiwen, Wells L G. Development of continuous measurement system for soil resistance[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 67–71. (in Chinese)
- 27 赵占军, 韩长杰, 郭辉, 等. 土壤机械阻力测量方法研究现状及趋势[J]. 农业工程, 2014, 4(4): 10–13.
Zhao Zhanjun, Han Changjie, Guo Hui, et al. Research status and trend of soil mechanical resistance measurement method[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(4): 10–13. (in Chinese)
- 28 Bentaher H, Hamza E, Kantchev G. Three-point hitch-mechanism instrumentation for tillage power optimization[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(1): 24–30.
- 29 Al-Jalil H F, Khair A, Mukahal W. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 62(2–4): 153–156.
- 30 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)
- 31 Kheiralla A F, Azmi Yahya, Zohadie M, et al. Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 78(1): 21–34.
- 32 时玲, 张海东, 翟兆斌, 等. 我国微耕机技术现状与发展方向[J]. 农机化研究, 2004(5): 1–3.
Shi Ling, Zhang Haidong, Zhai Zhaobin, et al. Present situation and development of two-wheel tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(5): 1–3. (in Chinese)
- 33 Farid Eltom A E, Ding Weimin, Ding Qishuo, et al. Effect of trash board on moldboard plough performance at low speed and under two straw conditions[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 59: 27–34.
- 34 Ahmad Fiaz, Ding Weimin, Ding Qishuo, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. Plos One, 2015, 10(3): e0119648.
- 35 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 Qingchun, Shi Yong, Ding Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13–18. (in Chinese)
- 36 李霞, 付俊峰, 张东兴, 等. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 32–36.
Li Xia, Fu Junfeng, Zhang Dongxing, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 32–36. (in Chinese)
- 37 Sirisak Chertkiattipol, Tanya Niyamapa. Variations of torque and specific tilling energy for different rotary[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2010, 19(3): 1–14.