

# 拖拉机防护装置自动静载试验系统设计

刘德营<sup>1</sup> 李和清<sup>1</sup> 卞兆娟<sup>2</sup> 闫一哲<sup>1</sup> 张华希<sup>1</sup> 於海明<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省农业机械试验鉴定站, 南京 210017)

**摘要:** 针对拖拉机防护装置静态试验设备调节繁琐、自动化程度和作业效率低等问题, 设计了拖拉机防护装置自动静载试验系统。该试验系统由机械加载及辅助系统、液压系统和测控系统等组成, 采用一次性夹持固定拖拉机防护装置, 通过三维移动加载立柱、压垮横梁以及手动/遥控调节、自动加载等方式, 实现拖拉机防护装置在不同工况下的静载试验。利用该试验系统对 WD1104 型轮式拖拉机驾驶室进行了水平纵向加载、侧向加载和 2 次垂直压垮试验, 试验结果表明, 系统性能稳定, 纵向加载和侧向加载下的能量控制误差分别为 0.55%、0.03%, 垂直后压垮和垂直前压垮试验压垮力控制误差分别为 0.63%、0.16%, 满足相关标准对试验设备的要求。

**关键词:** 拖拉机; 防护装置; 静载试验; 系统设计

中图分类号: TH122; S219.032.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0406-07 OSID: 

## Design of Automatic Static Load Test System of Tractor Roll-over Protective Structures

LIU Deying<sup>1</sup> LI Heqing<sup>1</sup> BIAN Zhaojuan<sup>2</sup> YAN Yizhe<sup>1</sup> ZHANG Huaxi<sup>1</sup> YU Haiming<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Jiangsu Agricultural Machinery Testing Station, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** Aiming to solve the problem of the cumbersome adjustment of the static test equipment of tractor roll-over protective structures, high labor intensity, the low degree of automation and efficiency of operation, a static load test system for tractor roll-over protective structures which can greatly reduce labor force, improve automation level and increase the utilization of site was developed. Based on the modular design of the test system, it was composed of mechanical loading and auxiliary system, hydraulic power source system, data acquisition and processing system, control system, etc. The tractor roll-over protective structure was fixed by disposable clamping, and the static load test of the tractor roll-over protective structures under different working conditions was realized by moving the loading column in different spatial locations, pressing the beam, manual or remote adjustment and automatic loading and so on. The test system established the communication between the industrial computer and the PLC, it had a wide range of applications, and it can not only test the four-post and six-post cabs of agricultural machinery, but also test the folding and non-folding safety frames. The horizontal longitudinal, lateral and two times vertical pressure tests of WD1104 wheeled tractor safety cab were carried out by using the test system. The results showed that the performance of the system was stable, the energy control error under longitudinal loading and lateral loading was 0.55% and 0.03%, the crushing force control error of vertical rear crushing and vertical front crushing tests was 0.63% and 0.16%, respectively. Therefore, the static load test system can meet the requirements of the relevant standards for test equipment.

**Key words:** tractor; protective structures; static load test; system design

## 0 引言

翻车防护装置 (Roll-over protective structures,

ROPS) 是指车辆发生倾翻事故时, 避免或减轻驾驶员受到伤害的一种保护性装置, 主要有驾驶室和安全架两种结构形式<sup>[1]</sup>。ROPS 能有效防止车辆发生

翻车后的连续翻滚,并可吸收一定的冲击载荷,从而降低事故对驾驶员的伤害<sup>[2-3]</sup>。随着计算机技术的发展,研究人员利用 AutoCAD、CAE 软件仿真模拟车辆发生翻车事故,进而改进设计和缩短开发周期,降低了研发成本<sup>[4-7]</sup>。根据 OECD 规则、ISO 标准以及我国行业标准,对安装 ROPS 的拖拉机,必须通过相关检测部门对防护装置的强度考核<sup>[8]</sup>。防护装置静载试验方法比动载试验方法复现性好、适用范围大,可精确测定驾驶室或安全架受载时的变形,尤其适用于新设计机型的试验考核<sup>[9]</sup>。因此,国内农机试验鉴定部门多采用静载试验方法对拖拉机的防护装置进行测试。

目前,国外已有针对装载机、拖拉机的专用防护装置检测装备,其主要代表有德国农协和西班牙农业部研发的拖拉机静载试验台<sup>[10-12]</sup>。国内在引进和吸收国外研究成果的基础上,也有这方面的尝试。在拖拉机防护装置静态试验台机械加载系统结构方面,王永建等<sup>[13]</sup>研究了试验台的工作原理、结构和特点,确定了技术参数;文献<sup>[14-15]</sup>研究了拖拉机安全防翻架试验台机械支撑系统、液压系统、控制系统及测量系统。其中,机械支撑系统采用4根垂直支架组成框架结构,以满足不同工况的试验加载需求,但存在试验装置调节繁琐、占地面积大、无法实现纵向向前加载试验等问题。在测控系统方面,关晓梅等<sup>[9]</sup>设计了一种轮式拖拉机驾驶室静载试验台计算机测试系统,但试验数据采集和处理效率低,无法满足大型拖拉机防护装置的测试要求;杨洋等<sup>[16]</sup>利用 LabWindows/CVI 软件,使用多线程技术进行了试验台测试系统研发,提出一种提升能量计算精度的算法和一种检测标准评价方法,但在变形载荷试验采集过程中依赖于原始的手动操控方式,且无法实现超载试验判断,试验效率低。综上,国内针对拖拉机防护装置静态试验系统的研究成果不多,现有试验检测装备均采用框架固定式加载结构,造成装置调节繁琐、试验场地利用率低等问题,测控系统采用人工记录和手动控制方式,试验效率和测试精度均有待进一步提高。

本文在现有研究基础上,利用现代计算机技术、传感器技术、自动控制技术和机电一体化技术,设计一套拖拉机防护装置自动静载试验系统,以期达到较高的试验测控精度,满足拖拉机防护装置试验检测鉴定要求。

## 1 自动静载试验系统

### 1.1 总体结构

拖拉机防护装置自动静载试验系统如图1所

示,包括机械及辅助系统、液压系统和测控系统。机械系统主要由水平加载装置、垂直压垮装置及固定工装夹具组成,包括加载立柱及其底座、压垮横梁、液压缸及其调节装置、液压泵站、倾角传感器、位移传感器、压力传感器、拉力传感器、测控柜、外部显示大屏等部分。采用模块化结构,可以实现对拖拉机四柱、六柱式的驾驶室和折叠、非折叠式的安全架进行水平加载试验和垂直压垮试验。

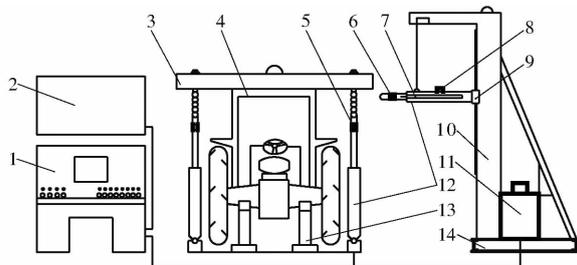


图1 拖拉机防护装置自动静载试验系统示意图

Fig. 1 Schematic of automatic static load test system

for tractor ROPS

1. 测控柜 2. 外部显示大屏 3. 压垮横梁 4. 防护装置 5. 拉力传感器 6. 压力传感器 7. 位移传感器 8. 倾角传感器 9. 液压缸调节装置 10. 加载立柱 11. 液压泵站 12. 液压缸 13. 固定工装夹具 14. 底座

### 1.2 系统方案设计

由于拖拉机防护装置静载考核时需分别进行纵向加载、垂直后压垮、侧向加载和垂直前压垮等试验<sup>[1]</sup>,各试验加载位置不同。因此,试验台采用一次性夹持固定防护装置于铸铁地平导轨上,通过三维移动可手动/遥控调节加载装置的加载立柱和压垮横梁,从而实现防护装置在不同加载位置的水平纵向、侧向加载和垂直压垮等试验,如图2所示。该试验系统较现有的框架固定式加载结构方案,装置调节灵活,操作方便,避免了试验中多次移动拖拉机防护装置带来的误差,能有效提高试验精度和场

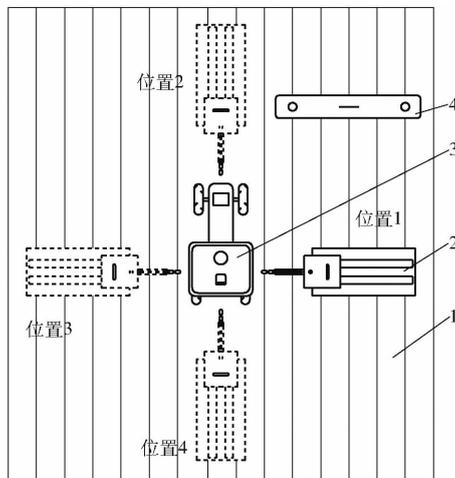


图2 拖拉机防护装置试验加载方案示意图

Fig. 2 Schematic of test loading scheme of tractor ROPS

1. 铸铁地平导轨 2. 加载立柱 3. 防护装置 4. 压垮横梁

地利用率,同时减少试验劳动强度。

### 1.3 主要技术参数

试验系统的相关参数如表1所示。

表1 拖拉机防护装置自动静载试验系统主要参数

Tab.1 Main parameters of automatic static load test system for tractor ROPS

参数	数值
液压泵额定压力/MPa	20
加载立柱高度/mm	4 500
Z向加载调整范围/mm	1 200 ~ 4 200
X向加载调整范围/mm	-175 ~ 175
水平加载力/kN	0 ~ 300
垂直压垮加载力/kN	0 ~ 240
水平油缸最大行程/mm	800
垂直压垮油缸最大行程/mm	600
油缸角度调整范围/(°)	-90 ~ 90
力测量精度/%	±1
位移测量精度/%	±0.5
角度测量精度/%	±1
液压油温度/°C	0 ~ 70
压垮横梁长×宽×高/(mm×mm×mm)	3 400×250×300
加载立柱底座长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 900×950×240
铸铁地平长×宽/(mm×mm)	10 000×10 000

## 2 液压系统

系统采用液力加载,液压系统由油箱、油表、过滤器、电机、油泵、溢流阀、调速阀、电磁换向阀、水平加载液压缸、压垮加载液压缸及连接油管等组成,如图3所示。

根据压力和流量需求<sup>[16]</sup>,并综合考虑功能要求和成本,选用PFE-31016型柱销式叶片泵,排量为16.5 mL/r,额定压力为20 MPa、驱动功率为10 kW,转速为800~2 800 r/min。电机带动油泵,产生液压油,液压油通过管路、溢流阀、调速阀、电磁换向阀等其他液压组件传送至水平加载液压缸或压垮加载液压缸,以实现有效加载。

## 3 测控系统

测控系统包括数据采集处理和控制系统2个模块,主要由PC工控机、测控软件、PLC、模拟量采集卡、倾角传感器、位移传感器、压力传感器和拉力传感器等组成,测控系统实现流程如图4所示。

数据采集处理模块主要实现对倾角、位移、压力、拉力传感器数据的实时采集,试验系统共有1个倾角传感器(SCA110T型,量程±60°)、1个位移传感器(KTC拉杆式,量程0~800 mm)、1个压力传感器(BK-1B型,量程0~250 kN)和2个拉力传感器(BK-1B型,量程0~250 kN),其分别用于检测水

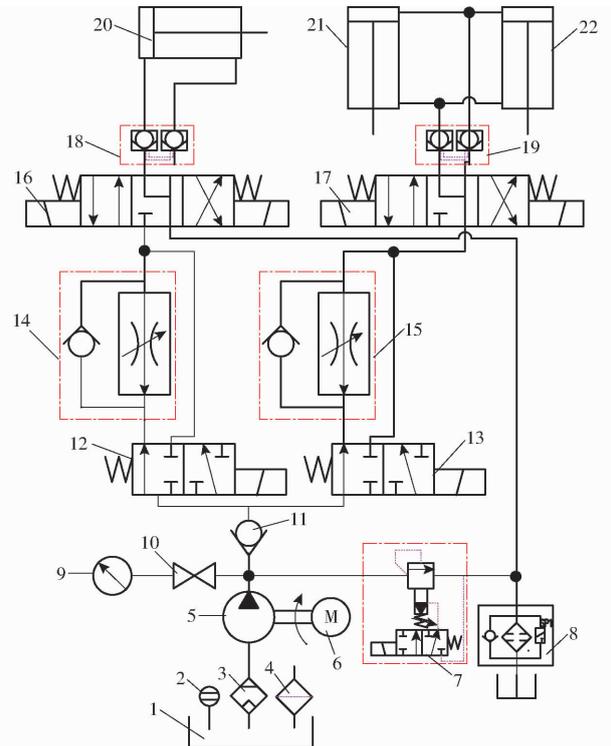


图3 液压加载系统原理图

Fig.3 Schematic of hydraulic loading system

1. 油箱 2. 液位计 3. 空气滤清器 4. 吸油过滤器 5. 油泵
6. 油泵电机 7. 电磁溢流阀 8. 回油滤油器 9. 压力表 10. 压力表开关 11. 单向阀 12、13. 两位三通电磁阀 14、15. 调速阀
- 16、17. 三位四通电磁阀 18、19. 液压锁 20. 水平加载液压缸 21、22. 压垮加载液压缸

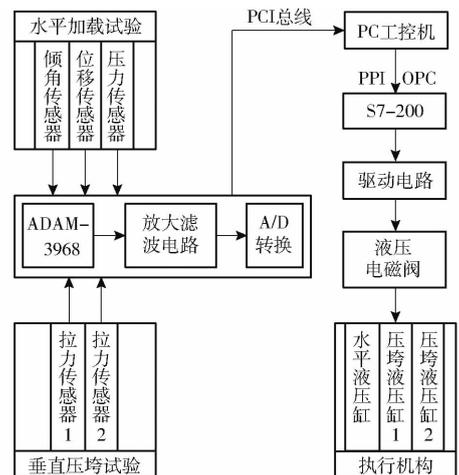


图4 测控系统流程框图

Fig.4 Flow chart of measurement and control system

平加载油缸角度、水平加载变形量、水平加载压力以及垂直压垮力。模拟量采集卡选用研华公司生产的16位PCI-1716L型多功能数据采集卡,采样频率可达20 kHz。由于传感器的输出信号微弱,同时测试现场存在干扰,因此传感器信号须经隔离放大器后进行滤波,处理后的信号送入采集卡实现A/D转换,经PCI总线传输至PC工控机。

控制系统模块主要实现对液压油缸的控制,主

要由 PLC、中间继电器、开关电源、急停按钮、无线遥控器和接收器等组成。系统选用西门子 S7-200 系列 PLC (CPU226) 作为主控制器, MY2NJ 型中间继电器为驱动元件, 设计有手动、自动控制 and 紧急停止功能。自动模式用于油缸按规定速度 ( $v \leq 5 \text{ mm/s}$ ) 加载<sup>[1]</sup>, 手动模式用于试验前期对装置的快速调节。电路中设计了无线接收器和遥控器, 通过遥控准确调节油缸至加载点, 以提高试验效率和测试精度。另外, 系统还设计了急停按钮, 当发生紧急情况时, 可快速按下以保障试验人员和系统安全。

测控系统基于 LabVIEW 虚拟仪器技术, 进行了图形化语言编程, 系统主界面如图 5 所示。软件主界面包括传感器标定校准、水平加载试验和压垮试验。试验前, 首先运行主程序, 进行传感器标定校准, 完成后选择“水平加载试验”或“压垮试验”, 将所需要的试验参数值输入相应文本框; 然后选择“文件存储位置”并保存; 最后点击“开始采集”开始试验。试验过程中, 系统会自动存储试验数据于 Excel 表格中。为了提高传感器信号采集的准确性, 程序采用滑动均值滤波算法对信号进行预处理, 尽可能消除现场干扰对数据的影响<sup>[17]</sup>。此外, 软件还设计了外部大屏显示界面, 支持试验数据内外屏同步显示, 以便于试验人员现场观察和调节, 如图 6 所示。

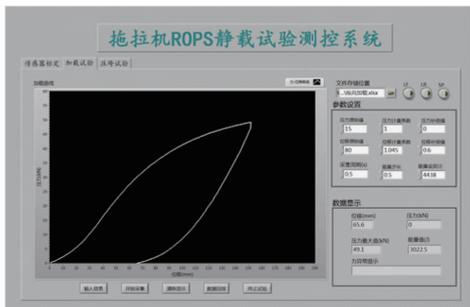


图 5 测控系统软件主界面

Fig. 5 Main interface of measurement and control system software

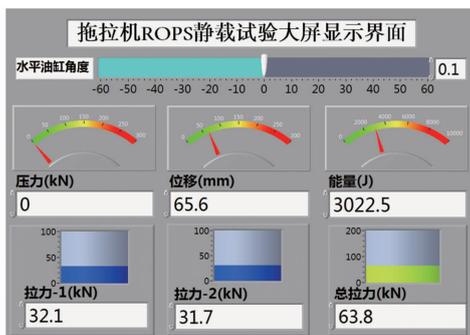


图 6 测控系统软件大屏显示界面

Fig. 6 Measurement and control system software screen display interface

台油缸角度、压力、位移信号, 绘制力-变形量曲线, 计算被测防护装置实时吸收能量, 采用文献[9, 18]中的矩形积分算法进行能量计算, 计算式为

$$E = \int_0^{L'} F dx \quad (1)$$

式中  $E$ ——水平加载试验时防护装置所吸收的能量, J

$F$ ——试验中所施加的静载力, N

$L'$ ——能量到达设定值时防护装置的水平变形量, mm

当防护装置吸收能量达到初始设定基本能量值时, 系统会自动判断是否进行超载试验, 超载试验判断条件如图 7 所示。

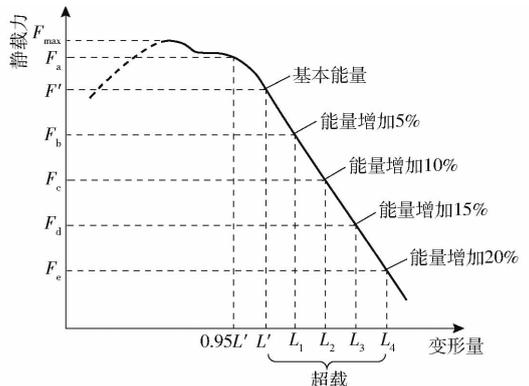


图 7 超载试验判断曲线

Fig. 7 Overload test judgment curve

参照文献[1], 防护装置吸收基本能量后, 若最后 5% 变形时的加载力满足条件: ①  $F_a > 1.03F'$ , 进行第 1 次超载试验, 能量增加 5%。②  $F_b < 0.97F'$ , 进行第 2 次超载试验, 能量增加 10%。③  $F_c < 0.97F_b$ , 进行第 3 次超载试验, 能量增加 15%。④  $F_d < 0.97F_c$ , 进行第 4 次超载试验, 能量增加 20%, 需进行超载试验。反之, 停止试验。

当进行垂直压垮试验时, 软件操作步骤同水平加载试验, 系统实时采集拉力 1、拉力 2 信号, 绘制压垮力-时间曲线并计算总压垮力。当压垮力达到初始设定值后, 停止试验。

## 4 系统试验验证

### 4.1 试验条件与方法

以江苏沃得农业机械有限公司提供的 WD1104 型轮式拖拉机安全驾驶室为试验对象, 其用于计算驾驶室静载试验水平加载基本能量和垂直压垮力的质量为 3 170 kg。将驾驶室固定在试验台上, 将车门、天窗锁和窗户等拆下或全部打开, 仅留下防护装置, 以便试验时不增加防护装置的强度, 消除非结构件对试验结果的影响。全部试验在同一驾驶室上进行, 且试验期间不得对驾驶室进行维修和加固<sup>[1, 19]</sup>。

当进行水平加载试验时, 系统会自动采集试验

试验方法参照 GB/T 19498—2017《农林拖拉机防护装置静态试验方法和验收技术条件》和 GB/T 6236—2008《农林拖拉机和机械驾驶座标志点》的要求<sup>[1,20]</sup>。

#### 4.2 试验结果与分析

按照 GB/T 19498—2017《农林拖拉机防护装置静态试验方法和验收技术条件》对 WD1104 型轮式拖拉机安全驾驶室依次进行了纵向加载、垂直后压垮、侧向加载和垂直前压垮试验,图 8 为水平侧向加载和垂直后压垮试验状态图,拖拉机驾驶室连接部位形变细节如图 9 所示,各试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,能量和压垮力控制误差均不大于 0.63%,准确率不低于 99.37%,说明系统具有较高的测控精度,满足拖拉机防护装置静载试验要求。

通过拖拉机防护装置自动静载试验台测得拖拉机安全驾驶室水平侧向、纵向加载和垂直后压垮、前

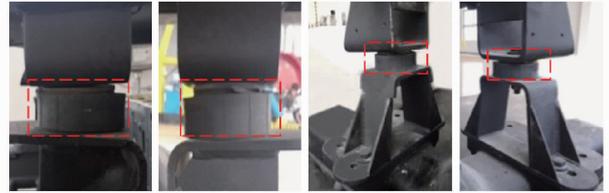


(a) 水平侧向加载试验

(b) 垂直后压垮试验

图 8 拖拉机驾驶室静载强度试验现场

Fig. 8 Tractor cab static load strength test site



(a) 左前连接处

(b) 右前连接处

(c) 左后连接处

(d) 右后连接处

图 9 拖拉机驾驶室连接部位形变细节

Fig. 9 Deformation details of connection position of tractor cab

表 2 拖拉机驾驶室静载试验结果

Tab. 2 Test results of static load of tractor cab

试验项目	标准要求		试验结果				能量控制 误差/%	压垮力控制 误差/%
	能量/J	压垮力/ kN	能量/J	压垮力/ kN	最大 静载力/kN	最大位移/ mm		
纵向加载试验	4 438.0		4 462.4		49.1	151.6	0.55	
垂直后压垮试验		63.4		63.8				0.63
侧向加载试验	5 547.5		5 549.3		49.3	190.9	0.03	
垂直前压垮试验		63.4		63.5				0.16

压垮的静载力曲线。由于测试软件只能记录单次试验曲线,为了便于直观分析,运用 Excel 软件将同类型试验结果绘制于同一图中,如图 10、11 所示。

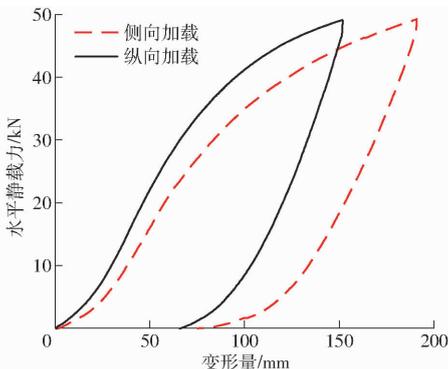


图 10 水平静载力-变形量曲线

Fig. 10 Horizontal load test force - deformation curve

由图 10、11 及表 2 可知,当进行水平侧向、纵向加载、第 1 次压垮(后压垮)和第 2 次压垮(前压垮)试验时,拖拉机驾驶室均发生弹性变形和塑性变形;纵向和侧向加载点最大位移分别为 151.6、190.9 mm,最大静载力为 49.1、49.3 kN;卸载后,加载点分别发生 65.6、75.5 mm 的永久变形;第 1 次压垮和第 2 次

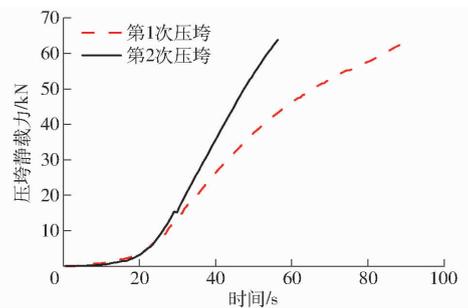


图 11 压垮静载力-时间曲线

Fig. 11 Pressure - time curve of under compression test

压垮试验加载点最大压垮力分别为 63.8、63.5 kN;另外,通过曲线可看出,试验时驾驶室受到的静载力与位移、压垮力与时间是非线性变化,驾驶室的部分骨架承受的应力超过了屈服极限,进入了塑性变形,这与文献[13-16]中得到的结果一致。

## 5 结论

(1) 设计了拖拉机防护装置自动静载试验系统,该系统可以实现一次性安装固定防护装置,通过三维移动可手动/遥控调节加载装置的加载立柱和压垮横梁,实现不同加载点的静载试验。该系统调

节灵活、操作方便,能提高试验场地利用率和试验效率,降低试验劳动强度。

(2) 试验台测控系统由工控机、PLC、采集卡和控制软件等组成,整个测控过程能实现手动/遥控调节、自动加载、大屏显示和紧急停止等功能,既可采集油缸倾角、防护装置形变、加载压力、压垮力等信号,还能自动进行数据处理和超载试验判断,提高了

拖拉机防护装置静载试验系统的自动化水平。

(3) 对拖拉机防护装置进行了水平纵向加载、侧向加载和垂直第1次压垮、第2次压垮试验,4次试验中能量控制误差和压垮力控制误差分别为0.55%、0.03%、0.63%和0.16%。试验表明,该试验系统能开展拖拉机防护装置静载试验,满足相关标准对试验设备的要求。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 19498—2017 农林拖拉机防护装置静态试验方法和验收技术条件[S]. 2017.
- [2] 陈小玲. 拖拉机防护装置强度试验台的设计研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.  
CHEN Xiaoling. Design and research of strength test bench for tractor protection device [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [3] 陈光阔,李永武,薛明,等. 拖拉机翻车防护装置强度试验分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2014,41(5):23-26.  
CHEN Guangkuo, LI Yongwu, XUE Ming, et al. Strength test analysis of protective device for turning over tractor [J]. Tractor & Farm Transporter, 2014,41(5):23-26. (in Chinese)
- [4] 陈龙,王锦雯,薛念文,等. 拖拉机驾驶室安全强度设计方法[J]. 农业机械学报,1993,24(1):19-24.  
CHEN Long, WANG Jinwen, XUE Nianwen, et al. Design method of safety strength of tractor cab[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1993,24(1):19-24. (in Chinese)
- [5] 聂兆霖. 矿用自卸车落物和翻滚保护装置试验台设计及结构分析[D]. 长春:吉林大学,2016.  
NIE Zhaolin. Design and structural analysis of the test bench for falling and rolling protection devices for mining dump trucks [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [6] 王振伟. 拖拉机驾驶室强度分析及结构优化[D]. 长春:吉林大学,2016.  
WANG Zhenwei. Strength analysis and structure optimization of tractor cab [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [7] 贺亮,史庆春,朱思洪,等. 拖拉机安全驾驶室强度非线性有限元分析[J]. 农业工程学报,2009,25(9):100-104.  
HE Liang, SHI Qingchun, ZHU Sihong, et al. Nonlinear finite element analysis of tractor safety cab strength[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):100-104. (in Chinese)
- [8] 孙震东,任越光,关朋,等. OECD拖拉机试验规则及其发展动向简介[J]. 拖拉机与农用运输车,2012,39(3):1-6.  
SUN Zhendong, REN Yueguang, GUAN Peng, et al. Introduction to OECD tractor test rules and their development trends[J]. Tractor & Farm Transporter, 2012,39(3):1-6. (in Chinese)
- [9] 关晓梅,郑缤遂. 轮式拖拉机驾驶室静载试验台计算机测试系统[J]. 拖拉机与农用运输车,1990,17(5):23-28.  
GUAN Xiaomei, ZHENG Binsui. Computer test system for wheel tractor cab static load test bed [J]. Tractor & Farm Transporter, 1990,17(5):23-28. (in Chinese)
- [10] JUAN-IGNACIO L B, TOMAS B, IGNACIO A, et al. Development of an inexpensive rollover energy dissipation device to improve safety provided by ROPS[J]. Biosystems Engineering, 2019,185:88-102.
- [11] AYERS P, KHORSANDI F, WANG X, et al. ROPS designs to protect operators during agricultural tractor rollovers[J]. Journal of Terramechanics, 2017,75:49-55.
- [12] KHORSANDI F, AYERS P D, TRUSTER T J. Developing and evaluating a finite element model for predicting the two-posts rollover protective structure nonlinear behaviour using SAE J2194 static test[J]. Biosystems Engineering, 2017,156:96-107.
- [13] 王永建,胡波,张建军,等. 拖拉机防护装置强度静态试验台的研究设计[J]. 农业装备与车辆工程,2009,47(12):49-50.  
WANG Yongjian, HU Bo, ZHANG Jianjun, et al. Research and design of static test bench for tractor protection device[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009,47(12):49-50. (in Chinese)
- [14] 宋中界,杨安杰,成梁,等. 拖拉机安全架强度试验台机械系统的研究分析[J]. 农业装备与车辆工程,2015,53(9):37-41.  
SONG Zhongjie, YANG Anjie, CHENG Liang, et al. Research and analysis of mechanical system of tractor safety frame strength test bench[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015,53(9):37-41. (in Chinese)
- [15] 马宗正,刘豫喜,马建辉,等. 拖拉机防翻架静态强度试验台开发[J]. 中国农机化学报,2016,37(8):116-120.  
MA Zongzheng, LIU Yuxi, MA Jianhui, et al. Development of static strength test bench for tractor anti-flanging[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2016,37(8):116-120. (in Chinese)
- [16] 杨洋,汪广赞,郑霄峰,等. 工程车辆翻车保护结构试验台测试系统研发[J]. 北京石油化工学院学报,2015,23(3):50-53.  
YANG Yang, WANG Guangyan, ZHENG Xiaofeng, et al. Research and development of testing system for engineering vehicle rollover protection structure test bench [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2015,23(3):50-53. (in Chinese)

- [17] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机试验台开发[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6):160-164.  
GAO Huisong, ZHU Sihong. Development of electric tractor test bench[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(6): 160-164. (in Chinese)
- [18] 刘安民, 冯吾初, 吕俊. 拖拉机安全防护装置设计中若干问题分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 1992,19(1):15-20.  
LIU Anmin, FENG Wuchu, LÜ Jun. Analysis of some problems in the design of tractor safety protection device[J]. Tractor & Farm Transporter, 1992,19(1):15-20. (in Chinese)
- [19] 陈光阔, 李先鹏, 吴孟, 等. 对 GB/T 19498—2017《农林拖拉机防护装置静态试验方法和验收技术条件》的解读[J]. 中国标准化, 2018,61(17):136-140.  
CHEN Guangkuo, LI Xianpeng, WU Meng, et al. Interpretation of GB/T 19498—2017 “static test methods and acceptance technical conditions for agricultural and forestry tractor protection devices” [J]. China Standardization, 2018, 61(17):136-140. (in Chinese)
- [20] GB/T 6236—2008 农林拖拉机和机械驾驶座标志点[S]. 2008.
- [21] 张小龙, 井梅, 刘鹏飞, 等. 拖拉机电性能虚拟综合测试系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(4):97-102.  
ZHANG Xiaolong, JING Mei, LIU Pengfei, et al. Design and field test of integrated virtual test system for tractor electrical performance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4):97-102. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170412&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170412&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.012. (in Chinese)
- [22] 徐立友, 赵一荣, 赵学平, 等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(1):355-363.  
XU Liyou, ZHAO Yirong, ZHAO Xueping, et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):355-363. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200139&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200139&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.039. (in Chinese)
- [23] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(8):1-17.  
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):1-17. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180801&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180801&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [24] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(5):84-92.  
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):84-92. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180510&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180510&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)
- [25] 杨利坡, 于华鑫, 张永顺, 等. 冷轧带钢虚拟仪器板形测控系统及其应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14):1-7.  
YANG Lipo, YU Huaxin, ZHANG Yongshun, et al. Shape detection and control system of cold rolling strip based on the virtual instrument and its industrial application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14):1-7. (in Chinese)
- [26] 许顺, 佟金, 李默. 基于 LabVIEW 的蔬菜切碎机性能测试及工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2017,33(3):250-256.  
XU Shun, TONG Jin, LI Mo. Performance testing of vegetable chopping machine based on LabVIEW and operation parameter optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(3):250-256. (in Chinese)