

拖拉机姿控飞轮防侧翻系统卸载能量回收试验研究

秦嘉浩^{1,2} 宋战胜^{1,2} 刘海帆^{1,2} 何志祝^{1,2} 李臻^{1,2} 朱忠祥^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 拖拉机侧翻事故是农业生产过程中最严峻的安全问题之一, 现有主、被动安全手段均未能从根本上解决该问题。在前期利用飞轮—电机加速旋转时产生的反向力矩进行姿态调节实现失稳态拖拉机姿态回稳的基础上, 为进一步避免姿控飞轮卸载过程造成能量浪费, 本文基于 1:16 比例模型试验平台设计搭建了飞轮卸载能量回收电路, 并通过模型试验对其回收效果进行了验证。试验结果表明, 当模型拖拉机以 0.2 m/s 速度行驶于路面不平度较高的 G 级、H 级路面出现侧翻趋势并实现姿态回稳时, 整机侧向姿态角降至 10° 后能量回收系统可介入工作, 此时回收电压出现峰值 0.97 V (H-B 轨迹), 随后其数值变化趋势与姿控飞轮转速的降低趋势相似, 直至飞轮卸载完成后回收电压归零。试验过程中, 飞轮—电机系统在对不同的整机侧翻趋势做出响应时, 能量回收系统完成的电量回收不同, 但均完成了对飞轮卸载能量的部分回收, 提高了整机能源的利用效率。

关键词: 拖拉机; 侧翻; 姿控飞轮; 能量回收; 模型试验

中图分类号: S219.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0564-04

Energy Harvesting Module Design for Flywheel-based Tractor Anti-rollover System

QIN Jiahao^{1,2} SONG Zhansheng^{1,2} LIU Haifan^{1,2} HE Zhizhu^{1,2} LI Zhen^{1,2} ZHU Zhongxiang^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Tractor rollover is one of the most serious safety problems in the process of agricultural mechanization, which has not yet been essentially solved by current technical means. In previous study, an external flywheel-based stability control system was designed to realize attitude stabilization of an unstable tractor, basing on the principle that an accelerating flywheel can generate a reverse torque. To avoid energy waste during the unloading process of the decelerating flywheel after active attitude control, an energy harvesting circuit was proposed and tested on the 1:16 scaled model test platform. The testing results showed that the energy harvesting system effectively worked when the roll angle of the tractor was reduced to 10°. Correspondingly, the peak value of the harvesting voltage risen to 0.97 V (H-B trajectory) when the model tractor traveled at 0.2 m/s on the G-class and H-class roads. Similarly, the voltage responded to decrease to zero as the flywheel decelerated after the active attitude control of the tractor was accomplished. In all the tests, the system proved the ability of harvesting electric energy, which improved the energy utilization efficiency of the tractor attitude control system. The approach and the results of this work may help theoretical fundamentals for optimization of the energy efficiency in a flywheel-based tractor active stability control system.

Key words: tractor; rollover; flywheel; energy harvesting; model test

0 引言

轮式拖拉机重心高、工作环境复杂、行驶路面不

平度高等特点使其极易发生侧翻事故。CARLSON 等^[1] 研究显示, 超过 45% 的拖拉机致死事故是由侧翻事故引起, 2004—2009 年间土耳其共计 42 人死

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805535)

作者简介: 秦嘉浩(1990—), 男, 博士生, 主要从事农业装备智能化设计及控制研究, E-mail: qinjh@cau.edu.cn

通信作者: 李臻(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业装备智能化设计及控制研究, E-mail: zhenli@cau.edu.cn

于侧翻事故^[2]。另据美国劳工统计局统计,全美范围内拖拉机侧翻每年导致超过 400 人死亡^[3],而在世界范围内,拖拉机侧翻致死率可达 70%^[4-9]。由此可见,拖拉机侧翻已成为农业安全生产的首要威胁,至今尚未得到根本性解决。

目前,该领域研究多侧重侧翻动力学行为描述和被动安全。CHISHOLM^[10-12]通过数学建模、计算机仿真、实车验证性试验等手段对侧翻问题进行了系统研究。YISA 等^[13-16]通过数学建模、仿真分析与试验验证等手段对拖拉机侧向稳定性进行了研究。在被动安全领域,研究主要集中在侧翻保护装置(Rollover protective structure, ROPS)自动部署方面。GONZALEZ 等^[17]设计了基于液压动力的自动部署 HydraROPS。LINDHORST 等^[18]提出了使用落锤进行大质量拖拉机 ROPS 测试试验的方法。国内研究多集中在 ROPS 材料性能分

析^[19]、优化及改造方面,主要以工程车辆为研究对象^[20-21]。

本文基于前期研究成果,为避免搭载飞轮防侧翻系统的拖拉机实现姿态回稳后造成的能量浪费,根据直流电机逆向发电原理设计搭建飞轮卸载能量回收系统,以提升能量利用率。

1 模型拖拉机能量回收模块设计

模型试验能够真实地重现拖拉机侧翻过程,且试验过程安全、可重复。因此,本文通过搭建 1:16 比例模型拖拉机试验平台对飞轮卸载能量回收的效果进行验证。

为进行能量回收,避免回收电流对中央控制模块和整机电路造成损伤,设计了图 1 所示搭载飞轮姿态控制系统的整机线路图。其中,紫色线路表示卸载能量回收模块。

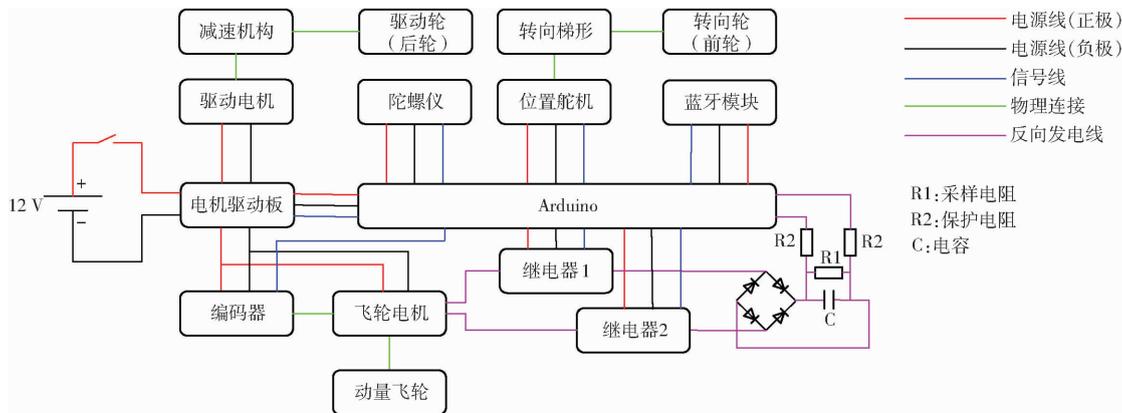


图 1 比例模型拖拉机试验平台整机接线设计图

Fig. 1 Wiring design of scale-model tractor

如图 1 所示,姿控飞轮在提供反向扭矩实现整机回稳的同时,经驱动电机加速达到一定转速。飞轮与电机转子之间经联轴器连接,卸载减速过程中可带动电机转子转动,切割磁感线产生电动势,实现永磁直流电机的逆向发电。根据法拉第定律,其瞬时产生的感应电动势为

$$E = BLv\sin\theta \quad (1)$$

式中 E ——感应电动势, V

B ——磁感应强度, T

L ——切割磁感线的铜圈长度, m

v ——铜圈切割磁感线的速度, m/s

θ ——切割速度与磁场的瞬时夹角, rad

因此,该回收模块的搭建使基于姿控飞轮的拖拉机防侧翻系统具备了回收飞轮卸载能量的条件。此外,由于田间路况复杂多变,拖拉机行驶过程中会发生方向不同的侧翻事故,而姿控飞轮针对不同侧翻方向做出的加速方向亦不同。因此,飞轮卸载减速时产生的回收电压正负极相反,将导致回收电容

中电荷相互抵消,丧失回收效果,且在电压回收的测量过程中正负极电压的切换现象存在对中央控制模块产生损伤的风险。为消除以上隐患,在电量回收电路中加入全桥式整流电路,实现对逆向发电输出电流的整流。

当行驶中的拖拉机处于稳定状态,即侧翻评价指标(拖拉机极限姿态评价指标, EP)小于 1 时,飞轮驱动电机处于非工作状态,继电器 1 和继电器 2 亦处于断开状态,不存在电能与机械能间的转换。当 EP 大于 1 时,姿控飞轮在控制系统的决策下加速旋转,为拖拉机提供与其侧翻方向相反的回稳力矩。此时,由于飞轮驱动电机仍需根据整机姿态判断是否继续加速与调整,其两极仍处于供电状态下,因此继电器 1 和继电器 2 仍处于断开状态,避免短路和损毁控制板等事故发生。待整机回稳控制结束后,为保证回收过程的安全性及可靠性,采用双重条件作为接通双继电器的判断依据,即 EP 大于 1 后随着车辆姿态的变化又出现小于 1 的情况且整机侧

倾角减小至 10° 安全范围之内时,两继电器接通,经过全桥式整流电路的整流作用后将该部分电能储存于电容中。

图2为飞轮卸载能量回收电路在1:16比例模型拖拉机中的设计布置。为了能够对回收的电能进行量化,接线过程中在电容两端并联阻值为 $50\text{ m}\Omega$ 的采样电阻,并在其与Arduino DUE之间串联阻值为 $2\text{ 000 }\Omega$ 的保护电阻,以保护电路安全。

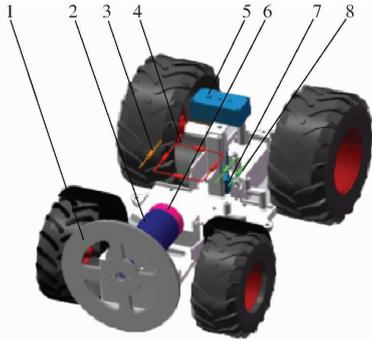


图2 电能回收模块

Fig.2 Power harvesting module

1. 姿控飞轮 2. 飞轮驱动电机 3. 采样电阻 4. 全桥式整流电路 5. 双路继电器 6. 编码器 7. 电容 8. 保护电阻

2 试验路面搭建

为对多种、多类路面环境工况下飞轮卸载能量回收理论的有效性进行验证,要求试验路面平台可重现田间多种路况环境。

首先,利用硬木板与松软网布结合的方式搭建如图3所示规则障碍路面,该路面由3个不同尺寸的规则障碍(A、B、C)和斜坡路面组成。

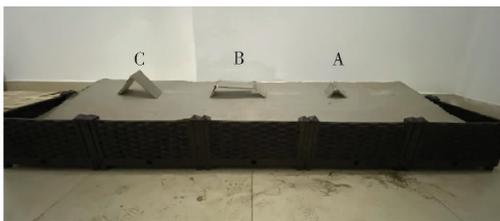


图3 试验斜坡路面

Fig.3 Testing slope

此外,全级随机路面可较完整地覆盖拖拉机田间工作环境路况,能够实现多种田间路面的真实再现。目前,基于国标 GB/T 7031—1987 划分的不同等级路面具有较高的通用性和代表性。基于此,根据位移功率谱密度(PSD)和空间频率的关系将粗糙度不同的路面划分为8个等级,计算式为

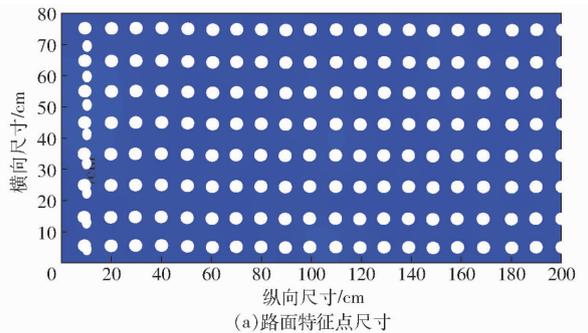
$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (2)$$

式中 $G_q(n_0)$ ——路面不平度系数, m^2/m^{-1}
 n ——空间频率, m^{-1}

n_0 ——参考空间频率,取 0.1 m^{-1}

W ——频率指数

利用上述关系,在 Matlab 2018a 中生成 160 个高度位点,并将如图4所示土槽均分为 160 个位点,通过对每个位点的高度界定手工搭建试验路面。



(a) 路面特征点尺寸



(b) 土槽划分

图4 试验土槽高程位点分布

Fig.4 Distribution points of test soil bin

3 结果与分析

3.1 规则障碍路面试验验证

将图3中斜坡坡度设置为中等坡度 20° ,开展飞轮卸载能量回收试验验证。得到的主动防侧翻飞轮响应和回收电压如图5所示。

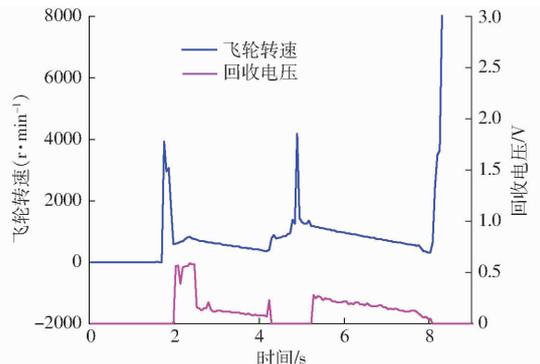


图5 姿控飞轮防侧翻飞轮转速和回收电压变化曲线

Fig.5 Flywheel speed and harvesting voltage curve of flywheel-motor module

由图5可知,飞轮转速和回收电压二者变化趋势相似度较高。在试验过程中,当模型拖拉机出现侧翻趋势时,姿控飞轮在驱动电机的加速下实现加速,并为拖拉机整机提供反向回稳力矩实现整机回稳。此后,当整机侧向姿态角恢复至安全范围内时,中央控制单元做出电压回收指令,接通双继电器,对飞轮卸载能量进行回收,并将整流后的电能暂时储

存于电容内。此外,回收过程中,回收电压出现零值状态,这是由于此时整机再次出现侧翻趋势,中央控制单元做出停止回收指令导致的。

3.2 全级随机路面试验验证

为充分验证本文设计的飞轮卸载能量回收电路的有效性,结合位移功率谱密度和空间频率关系生成的全级随机路面,开展全级路面下的姿控飞轮卸载能量回收验证。为客观反映其回收效果,在每一等级路面环境下均进行两次试验,试验结果如图 6 所示。

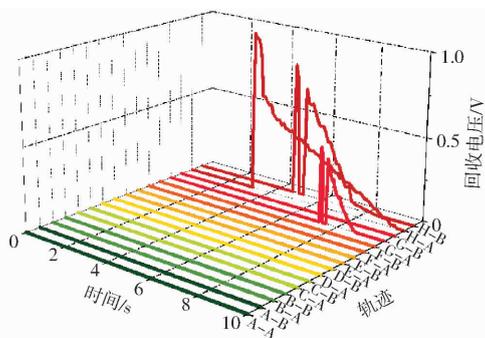


图 6 全级路面环境下的回收电压

Fig. 6 Recovery voltage response under tests of full-level road environment

图 6 为全级随机路面环境下的回收电压变化趋势,由图可知,在路面等级较低的 A~F 级路面上进行试验时,整机并未出现侧翻趋势,飞轮并未进行加速,即无卸载能量回收过程。而当模型拖拉机以 0.2 m/s 速度行驶于路面不平度较高的 G 级和 H 级

路面时,整机出现侧翻趋势,而后能量回收模块对飞轮卸载能量进行回收转换,转换为可暂时储存的电能。由图 6 可知,回收电压出现峰值 0.97 V(H-B 轨迹),随飞轮减速过程呈降低趋势,直至姿控飞轮卸载结束时完成回收。此过程中出现回收电压置零的情况,为设计的电路保护功能,即当整机再次出现侧翻趋势时停止回收,继续加速飞轮,为整机提供侧倾回稳力矩。

4 结束语

轮式拖拉机在诸多农业生产环节中起着重要作用,但其潜在的侧翻风险对驾驶员和机体自身存在巨大威胁。本文在前期研究基础上,为避免搭载飞轮主动回稳系统的拖拉机实现姿态回稳后在卸载过程中造成的能量浪费,利用飞轮卸载时带动电机转子旋转可实现永磁直流电机逆向发电原理,设计搭建了飞轮卸载能量回收模块,实现了对飞轮卸载能量进行回收。试验结果表明,该模块能够将飞轮卸载机械能转换为电能进行回收。在此过程中,回收电压表现出与飞轮转速相同的下降趋势。当模型拖拉机以 0.2 m/s 速度行驶于路面不平度较高的路面时,回收电压出现峰值 0.97 V(H-B 轨迹),说明该部分卸载能量可观,可作为车载低功耗电子元器件,如陀螺仪、蓝牙模块等的备用电能来源。本文的能量回收电路设计可为姿控飞轮主动防侧翻控制方法提供能量回收方法,提升整机系统的能量利用效率。

参 考 文 献

- [1] CARLSON K F, GERBERICH S G, CHURCH T R, et al. Tractor-related injuries: a population-based study of a five-state region in the Midwest[J]. American Journal of Industrial Medicine, 2005, 47(3): 254-264.
- [2] ÖZDEŞ T, BERBER G, ÇELİK S. Death cases related to tractor overturns[J]. Türkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences, 2011, 31(1): 133-141.
- [3] United States Department of Labor. Census of fatal occupational injuries[R]. Washington DC: Bureau of Labor Statistics, 2015.
- [4] OWEN G M, HUNTER A G M. A survey of tractor overturning accidents in the United Kingdom[J]. Journal of Occupational Accidents, 1983, 5(3): 185-193.
- [5] LUNDQVIST P, GUSTAFSSON B. Accidents and accident prevention in agriculture a review of selected studies [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1992, 10(4): 311-319.
- [6] ARNDT J F. Roll-over protective structures for farm and construction tractors—a 50-year review [C] // 22nd Annual Earthmoving Industry Conference, 1971.
- [7] HUNTER A G M. A physical model for demonstrating tractor accidents on slopes[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(2): 163-168.
- [8] HUNTER A G M, OWEN G M. Tractor overturning accidents on slopes[J]. Journal of Occupational Accidents, 1983, 5(3): 195-210.
- [9] MYERS M, KELSEY T, TINC P, et al. Rollover protective structures, worker safety, and cost-effectiveness: New York, 2011—2017[J]. American Journal of Public Health, 2018, 108(11): 1517-1522.
- [10] CHISHOLM C J. A mathematical model of tractor overturning and impact behaviour[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(4): 375-394.
- [11] CHISHOLM C J. Analysis of rigid-body motion from cine film measurements [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(4): 441-446.

- Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 126 - 131. (in Chinese)
- [14] ROEBER J B W, PITLA S K, KOCHER M F, et al. Tractor hydraulic power data acquisition system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 1 - 14.
- [15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 97 - 102. (in Chinese)
- [16] ROHRER R A, PITLA S K, LUCK J D. Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104847.
- [17] 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 基于虚拟仪器的后悬挂农具田间测试系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 98 - 103. QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 98 - 103. (in Chinese)
- [18] 祝青园, 王书茂, 康峰, 等. 虚拟仪器技术在农业装备测控中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6): 1333 - 1338. ZHU Qingyuan, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Application of virtual instrument technology in agricultural equipment measurement and control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(6): 1333 - 1338. (in Chinese)
- [19] 尹彦鑫. 少免耕播种机信息流远程监测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. YIN Yanxin. Monitor method research for information flow of no-tillage seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [20] 张成涛, 谭彧, 吴刚, 等. 基于无线传输方式的农业装备共性参数测控系统研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 257 - 262. ZHANG Chengtao, TAN Yu, WU Gang, et al. Parameters measurement and control systems of agricultural equipment similarity based on various wireless transmission modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 257 - 262. (in Chinese)
- [21] 尹彦鑫, 郑永军, 成智华, 等. 少免耕播种机牵引阻力远程监测系统[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 1 - 8. YIN Yanxin, ZHENG Yongjun, CHENG Zhihua, et al. Tractive resistance remote monitor system for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 1 - 8. (in Chinese)
- [22] 李导, 张志刚, 王在满, 等. 拖拉机滑转率无线测试系统的研制[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 241 - 244. LI Dao, ZHANG Zhigang, WANG Zaiman, et al. A research of wireless slip rate test system on tractors [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 241 - 244. (in Chinese)

(上接第 567 页)

- [12] CHISHOLM C J. Experimental validation of a tractor overturning simulation[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(4): 395 - 415.
- [13] YISA M G, TERA O H. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part I): state-of-the-art review[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1995, 66(2): 240 - 262.
- [14] YISA M G, TERA O H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part II): computer simulation of directional dynamics[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1995, 66(2): 263 - 275.
- [15] YISA M G, TERA O H, NOGUCHI N. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part III): stability regions and optimum design parameters[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1998, 68(1): 1 - 16.
- [16] YISA M G, TERA O H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part IV): experimental validation of simulation mode[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1998, 68(1): 17 - 31.
- [17] GONZALEZ D O, GORRIZ B M, BERROCAL I I, et al. Development of an automatically deployable roll over protective structure for agricultural tractors based on hydraulic power: prototype and first tests [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016(124): 46 - 54.
- [18] LINDHORST C M, HOY R M, PITLA S K, et al. Dynamic ROPS test for tractors over 6,000 kilogram[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(1): 53 - 62.
- [19] 司俊德, 王国强, 闫振华, 等. 翻车保护结构及其吸能构件设计与性能仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 20 - 24. SI Junde, WANG Guoqiang, YAN Zhenhua, et al. Design and performance simulation of ROPS and energy-absorbing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 20 - 24. (in Chinese)
- [20] 陈光阔, 李永武, 薛明. 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(5): 23 - 26. CHEN Guangkuo, LI Yongwu, XUE Ming. Test analysis of tractor roll-over protective structure strength[J]. Tractor & Farm Transporter, 2014(5): 23 - 26. (in Chinese)
- [21] 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, 2016. CHEN Xiaoling. Research on strength test of tractor[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)