

高秆禾草履带收获机防倾翻预警系统研究

黄韶炯 刘 文 班 超 王中豪 尤 泳 赵建柱
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对高秆禾草收获机在南方山坡地带作业易发生倾翻的问题,设计了防倾翻预警系统。该系统主要由上位机、控制器和传感器组成,通过倾角传感器和压力传感器共同监测,实现防倾翻预警功能。对整机质心进行了测量,测得整机质心与驱动轮轴之间的水平距离为 944.5 mm、质心高度为 1 080.4 mm、质心与纵向中心平面的距离为 27.9 mm,确定了质心位置;利用软件 RecurDyn 对整机在 7.2 km/h 车速下进行了典型工况的动力学仿真分析,横向直行、转向和纵向上下坡的临界倾翻角分别为 24°、11°、33°和 31°,其中在转向工况下,临界倾翻横向载荷转移率为 0.49;对整机进行了静态倾翻试验,横向直行和纵向上下坡的临界倾翻角分别为 24.7°、34.2°和 31.8°;基于整机尺寸和质心位置搭建了比例模型,在固定转向路径下进行了动态倾翻试验,试验结果表明:转向临界倾翻角为 14°,临界倾翻横向载荷转移率为 0.54,为高秆禾草收获机应用于复杂工况的行驶作业提供了理论支持。

关键词: 牧草履带收获机; 山坡地; 动力学仿真; 倾翻预警

中图分类号: S225.5+9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0133-07 OSID: 

Early Warning System for Anti-tipping of High-stalk Grass Crawler Harvesting Machinery

HUANG Shaojiong LIU Wen BAN Chao WANG Zhonghao YOU Yong ZHAO Jianzhu
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of that the high-stalk grass harvester was prone to tipping when operating on the southern mountain slopes, an anti-tip warning system was designed. The system was mainly composed of a host computer, a controller and sensors. Through the joint monitoring of the inclination sensor and the pressure sensor, the anti-tip warning function was realized. The center of mass of the whole machine was tested. The horizontal distance between the center of mass of the whole machine and the drive wheel shaft was 944.5 mm. The height of the center of mass was 1 080.4 mm. The distance between the center of mass and the longitudinal center plane was 27.9 mm. The position of the center of mass was determined. The software RecurDyn was used to perform the dynamic simulation analysis of the whole machine under typical working conditions at a speed of 7.2 km/h. The critical tipping angles for horizontal straight, turning and longitudinal up and down slopes were 24°, 11°, 33° and 31°. Under the turning conditions, the critical tipping lateral load transfer ratio was 0.49. A static tipping test was performed on the whole machine. The critical tipping angles for horizontal straight and longitudinal up and down slopes were 24.7°, 34.2° and 31.8°. Based on the size of the whole machine and the position of the center of mass, a scale model was built. A dynamic tipping test was performed under a fixed steering path. The test results showed that the critical tipping angle of steering was 14° and the critical tipping lateral load transfer ratio was 0.54. The research can provide theoretical support for high-stalk grass harvesters applied to operations under complex working conditions.

Key words: forage grass crawler harvester; hillside; dynamic simulation; tipping warning

0 引言

高秆禾草泛指狼尾草属一类植株生长较高的牧草,这类牧草具有很强的适应性,是新型的高效经济作物和能源作物,可作为理想的畜牧饲草。其广泛种植在南方的山坡地带,由于地形崎岖不平和坡度较大,传统的农业机械在这类地形作业时常发生失稳倾翻等事故,同时山坡地作业也一直是农业机械领域的研究热点问题^[1-2],故对农业机械稳定性^[3-5]以及相应预警算法^[6]的研究十分重要。

国内外对防倾翻预警的研究主要是针对汽车^[7-8]、重型车辆^[9-10]、铰接工程车辆^[11-13]和轮式车辆^[14-16]。NALECZ等^[17]将能量储备这一因素作为评价车辆安全性的指标,定义了预防翻车能量储备(Rollover prevention energy reserved, RPER),并采用算法进行了实时预警;REKHEJA等^[18]提出将侧向加速度和倾角作为预警的指标,通过实时监测侧向加速度和倾角来判断车的姿态,进而判断是否报警,然而上述算法仅通过侧向加速度、倾角或者载荷转移不足来预测是否有倾翻危险,实际效果十分有限。

CHEN等^[19]建立了一种新的基于倾翻时间(Time to rollover, TTR)的动态倾翻预警算法,不过对于一些质心变化较大的车辆,选取合适的临界倾翻角来计算TTR十分困难;朱天军^[20]针对TTR算法和横向载荷转移率(Lateral load transfer ratio, LTR)算法的优点和缺点,对TTR算法进行了优化,设计出使用卡尔曼滤波的预警系统,以动态LTR数

值作为评价指标,对未来时刻内的倾翻进行预测和报警;张硕等^[21]针对斜坡直线行驶工况,以斜坡上侧车轮-地面载荷为主要参考量,提出了针对拖拉机前、后轮的侧向稳定评价指标——拖拉机前、后轮的斜坡上侧车轮载荷分配系数,为拖拉机防倾翻预警控制提供了理论基础。

针对山坡地作业面临的倾翻问题,本文对履带收获机的防倾翻预警进行研究,设计防倾翻预警系统。通过多体动力学仿真与试验结果对比,验证该防倾翻预警系统的性能,以实现防倾翻预警功能。

1 整机参数及质心位置的测定

根据GB/T 3871.15—2006和GB/T 3871.2—2006《农业拖拉机试验规程》进行质心位置和整机参数的测定。收获机质心的位置主要由质心与驱动轮轴之间的水平距离 a 、质心与地面之间的距离 h 和质心与纵向中心平面的距离 e 表示,整机结构简图如图1所示。履带收获机测量及计算数据如表1所示。

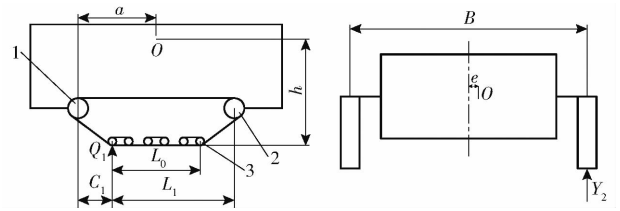


图1 整机结构参数示意图

Fig. 1 Schematic of whole machine structure parameters

1. 驱动轮 2. 导向轮 3. 支重轮

表1 履带收获机测量及计算数据

Tab. 1 Crawler harvester measurement and calculation data

测量参数	测量值			测量结果 平均值	计算值
	1	2	3		
驱动轮轴与最近支重轮轴的水平距离 C_1 /mm	210	220	200	210	
整机质量 m /kg	4 140	4 141	4 139	4 140	
导向轮轴与最远支重轮轴的水平距离 L_1 /mm	1 360	1 370	1 350	1 360	
履带接地长度 L_0 /mm	1 193	1 195	1 194	1 194	
整机水平时单个支重轮所受压力 Q_1 /N	19 040	19 047	19 033	19 040	
偏心侧履带所受压力 Y_2 /N	22 500	21 100	21 800	21 800	
轨距 B /mm	1 048	1 051	1 051	1 050	
质心与驱动轮轴之间的水平距离 a /mm					944. 5
整机质心高度 h /mm					1 080. 4
整机质心相对纵向中心平面偏移 e /mm					27. 9

2 整机稳定性仿真

2.1 模型及约束建立

为了更准确地展现整机的运动状态,采用RecurDyn软件进行动力学仿真^[22-23]。为减少计算

量,提高仿真效率,首先将整机的车身、车架和割台等部件合并简化成一个刚性整体并导入RecurDyn软件中,履带行驶系统采用软件的低速履带模块进行参数化建模,整机模型如图2所示。整机模型约束类型如表2所示。

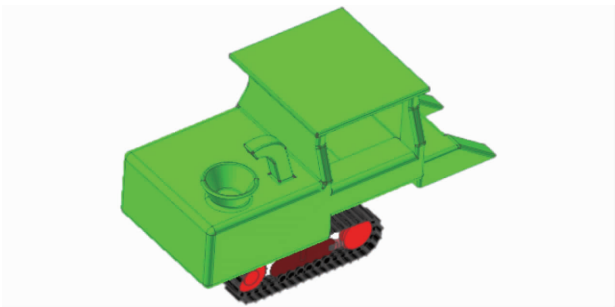


图 2 整机模型
Fig. 2 Model of harvester

表 2 履带收获机模型约束类型

Tab. 2 Constraint types and relations of crawler harvester model

部件 1	部件 2	约束类型	数目
驱动轮	车身总成	旋转副	2
支重轮	车身总成	旋转副	12
导向轮	车身总成	旋转副	2
托轮	车身总成	旋转副	2
履带板	车身总成	固定副	2
导向轮	张紧装置	滑动副	2

对整机添加动态驱动力,根据收获机实际工作速度约为 7.2 km/h,为两侧的驱动轮添加运动约束函数 STEP(TIME,0.1,0,1,298 d)。

2.2 仿真结果与分析

首先建立满足宽度和加速距离要求的坡道,整个坡道由横向坡道和纵向坡道组成,查阅收获机的工作环境,设置仿真附着条件为常见的黏土地。整个坡道模型如图 3 所示。

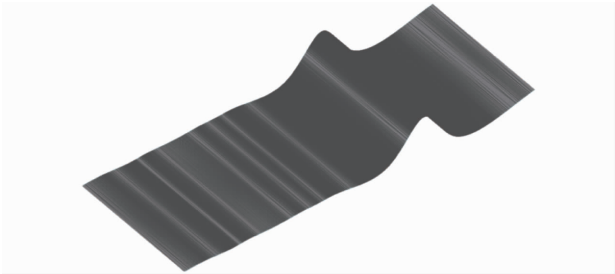


图 3 坡道模型
Fig. 3 Model of ramp

2.2.1 横向坡道行驶稳定性分析

履带收获机在横向坡道行驶时,上侧履带所受压力相对于在平地上会减小,且坡度越大上侧压力越小,发生倾翻失稳的风险也就越高^[24]。

在仿真软件中设置整机在横向坡道等高线行驶,速度为 7.2 km/h,从 0°开始逐渐增加横向坡度角,通过履带收获机的侧倾角、两侧履带压力的变化和仿真状况可以反映出是否发生倾翻。实际的仿真情况如图 4 所示。

当横向坡度增加至 11°时,整机在转向工况下侧倾

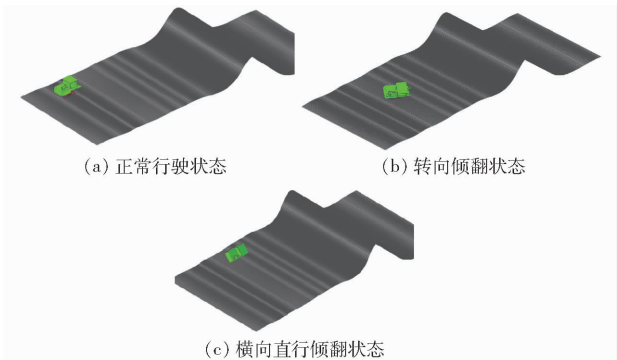


图 4 横向坡道行驶仿真

Fig. 4 Simulations of cross-slope driving

角随时间变化曲线如图 5 所示,结果显示整机前 2 s 行驶平稳,当 2 s 后开始转向时,侧倾角逐渐增大,曲线发散不收敛,实际显示发生倾翻失稳现象直至倒地。

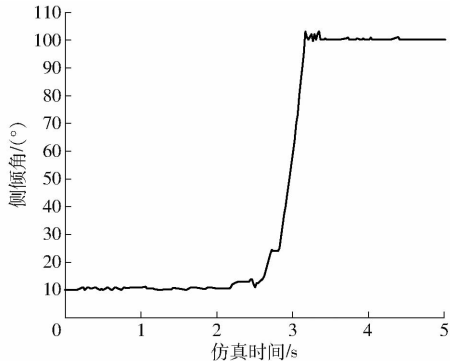


图 5 坡度为 11°转向时侧倾角变化曲线
Fig. 5 Change curve of roll angle when turning at slope of 11°

两侧履带压力变化曲线如图 6 所示,在仿真开始后,坡道上侧履带压力会达到稳态值 10.4 kN 附近,下侧履带压力会达到稳态值 30.23 kN 附近,在 2 s 后开始转向时,两侧履带的压力会发生剧烈波动,上侧履带对地压力会先减小至 0,然后出现整机倾翻,下侧履带也会因倾翻使压力呈减小趋势,直到压力减小为 0,结果显示两侧履带压力差在 19.83 kN 时,即横向载荷转移率为 0.49 时,会发生倾翻。故整机在转向工况下临界倾翻角为 11°。

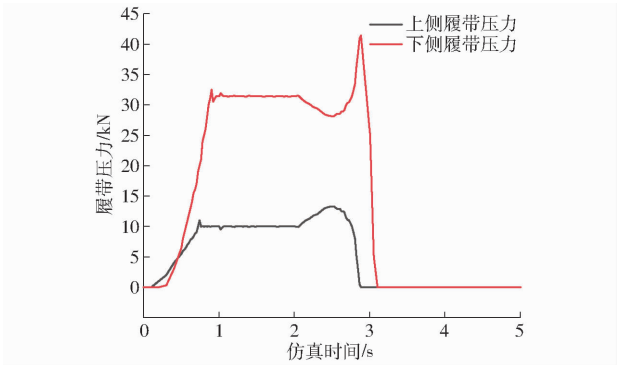


图 6 两侧履带压力变化曲线
Fig. 6 Change curves of track pressure on both sides

当横向坡度增加至 24°时,如图 7 所示,整机在

直行时,侧倾角变化曲线在 24°附近短时波动,最后无法收敛,实际显示发生倾翻,直至倒地。故整机直行的横向临界倾翻角为 24°。

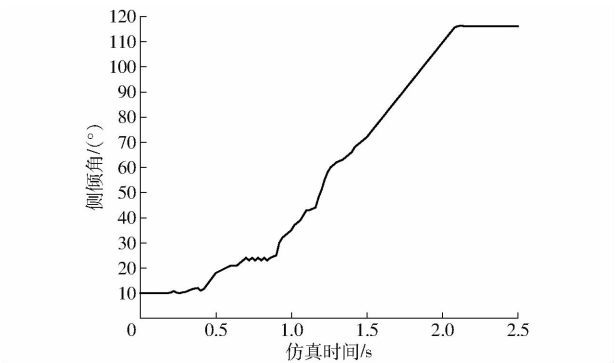


图 7 横向坡度为 24°直行时侧倾角变化曲线
Fig. 7 Change curve of roll angle when going straight at lateral slope of 24°

2.2.2 纵向坡道行驶稳定性分析

履带收获机在纵向坡道行驶时,如果速度控制不当,上坡时会有机头上扬的危险,下坡时会有机尾上扬的危险。在仿真环境中逐渐增加纵向坡度,观察仿真情况。结果显示:当纵向坡度增加至 31°时,整机在上坡时无风险,但在下坡时,如图 8 所示,会发生倾翻失稳,俯仰角变化曲线如图 9 所示;当纵向坡度增加至 33°时,如图 10 所示,整机在纵向上坡时会倾翻,俯仰角变化曲线如图 11 所示。

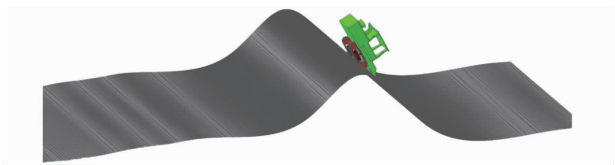


图 8 纵向下坡行驶仿真
Fig. 8 Simulation of longitudinal downward driving

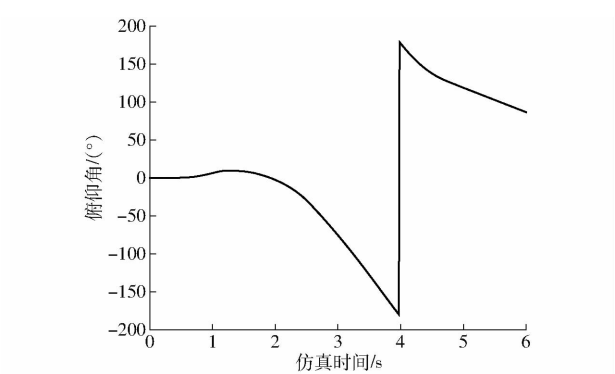


图 9 纵向坡度为 31°下坡时整机俯仰角变化曲线
Fig. 9 Change curve of pitch angle when angle was 31° for longitudinal downward slope

3 倾翻试验与防倾翻预警系统设计

3.1 整机静态倾翻试验

如图 12 所示,在河北省石家庄市无极县对收获

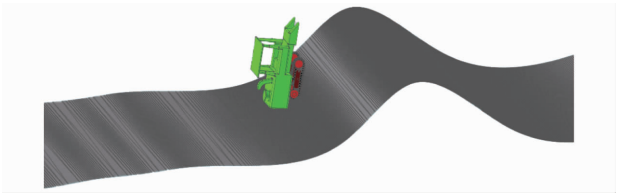


图 10 纵向上坡行驶仿真
Fig. 10 Simulation of longitudinal upward driving

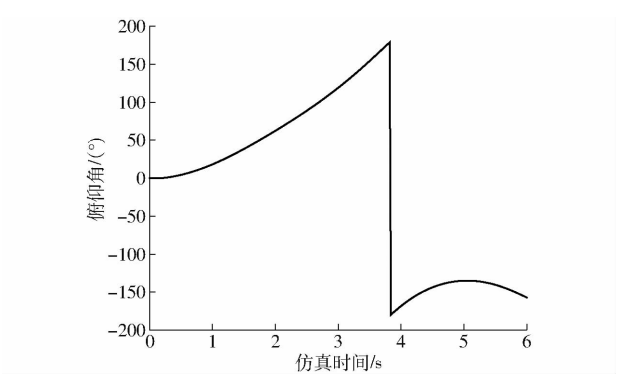


图 11 纵向坡度为 33°上坡时整机俯仰角变化曲线
Fig. 11 Changes of pitch angle when angle was 33° for longitudinal upward slope



图 12 整机静态倾翻试验
Fig. 12 Static tipping tests of whole machine

机进行横向和纵向的小角度静态倾翻试验,来近似模拟收获机在山坡地的侧倾状态,本次试验采用杭州均泰称重设备制造有限公司的拉力传感器来测量向上的拉力,准确度等级Ⅲ级,额定称量 5 000 kg,额定分度值 2 kg,试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果 Tab. 3 Test results						
试验 序号	横向倾翻		向前倾翻		向后倾翻	
	拉力/ N	倾角/ (°)	拉力/ N	倾角/ (°)	拉力/ N	倾角/ (°)
1	17 240	4.3	9 760	8.5	15 020	3.2
2	17 000	5.7	9 600	9.7	13 660	7.2
3	16 860	6.7	9 440	10.9	13 160	10.4
4	16 740	7.2	9 000	15.1	12 800	12.3
5	16 450	8.5	8 920	15.7	12 640	13.2

由试验结果推导可得,收获机横向临界倾翻角为 24.7°,纵向上坡临界倾翻角为 34.2°,纵向下坡临界倾翻角为 31.8°,仿真与试验相比,误差分别为 2.83%、3.51% 和 2.52%,误差均在合理范围内,验证了仿真模型的正确性。

3.2 基于压力传感器和倾角传感器的预警算法与评判标准

针对常见的基于倾角传感器的预警方式容错率

低和误差大等问题,提出一种适用于山坡地履带收获机的防倾翻预警方法。具体算法流程如图 13 所示。

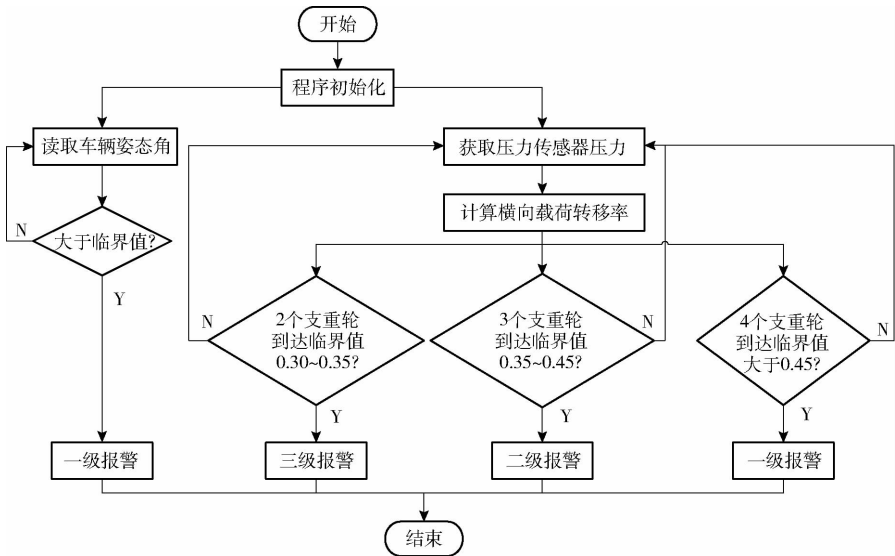


图 13 算法流程图
Fig. 13 Flow chart of algorithm

利用倾角传感器预警的临界值,设置横向坡度达到 23°或纵向坡度达到 30°时发出一级报警。压力传感器的预警方法为采用横向载荷转移率^[25]来判断,计算表达式为

$$L_{TR} = \left| \frac{F_R - F_L}{F_R + F_L} \right|$$

式中 F_L ——左坡道履带垂直载荷
 F_R ——右坡道履带垂直载荷

L_{TR} 在 0 ~ 1 之间不断变化,按前文仿真的临界条件,倾翻时 L_{TR} 为 0.5,将 L_{TR} 为 0.45 设置为一级警报, L_{TR} 为 0.35 和 0.3 分别为二级和三级警报。

无论是倾角传感器还是压力传感器的算法,只要是有一个达到报警条件便会直接报警,增加了系统的容错性。同时该预警算法引入了测量前侧支重轮压力的方法,提高了系统的准确性,对防倾翻预警有积极作用。

3.3 模型机预警系统构建

预警系统的硬件部分包含 MPU6050 型三轴传感器、高精度薄膜压力传感器、信号转换模块、Arduino 单片机、警示灯以及蜂鸣器等,硬件系统结构框图如图 14 所示。预警系统的软件部分主要采用 Arduino 编程软件根据预警算法逻辑对预警程序进行编写。

为保证比例模型的合理性和可靠性,以高秆禾草履带收获机为原型,依照模型理论按 1:140 的比例搭建了收获机模型,如图 15 所示。其中,以质量块作为模型机配重布置在前部,电池和驱动模块安

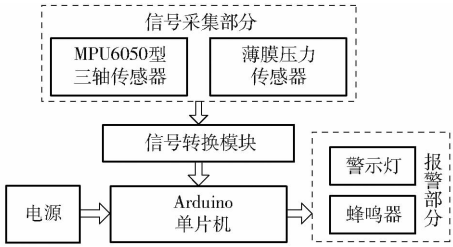


图 14 硬件系统结构框图
Fig. 14 Block diagram of hardware system

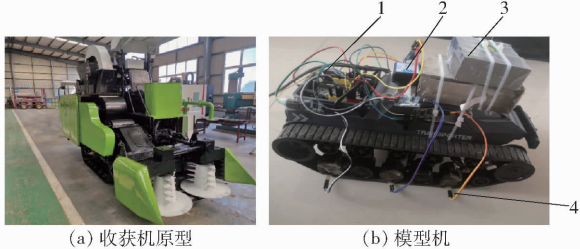


图 15 收获机原型及其比例模型

Fig. 15 Crawler harvester and its scale model

1. 单片机 2. 三轴传感器 3. 质量块 4. 压力传感器

装在中后部,压力传感器安装在支重轮的外圈,三轴传感器安装在车架靠近质心的位置。

试验前调试好系统的软件和硬件,放平整机,对陀螺仪进行校准,消除零飘。模拟收获机作业时的实际环境搭建试验台并覆土,为了确保试验的准确性,规划固定的行驶路径,标注合适的转向点。试验中单片机实时计算整机的横向载荷转移率,遇到危险工况会发出分级警报,采集倾角传感器数据的上位机同样会在临界时发出警报。试验结束后处理传感器采集的信息。

3.4 模型机固定转向路径试验

根据前文仿真结果,调整横向坡度分别为 10°、12°和 14°,进行转向工况的试验,每个坡度进行 10 组试验,每次试验时长为 4.5 s,前 3 s 为整机启动、加速和稳定直行阶段,后 1.5 s 为转向阶段,如图 16 所示,横向坡度为 10°和 12°时,模型机在 2.8 s 和 3.6 s 分别达到正向和反向的最大侧倾角,接着分别达到稳态侧倾角 11.5°左右。当横向坡度为 14°时,正常直行时侧倾角在 15°附近波动,在达到 3 s 时侧倾角不收敛,结果显示模型机在横向坡度为 14°转向时会发生倾翻。该试验对整机防倾翻预警系统的实时性和准确性进行了验证。

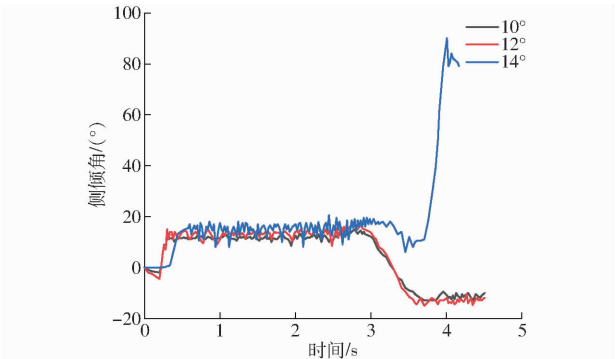


图 16 临界倾翻角试验曲线
Fig. 16 Changes of critical tipping angle test

其中设置的坡度略小于实际用传感器测出的侧倾角,主要由于传感器误差和坡度测量误差所导致。动态转向临界倾翻角为 14°,略大于整机仿真时的情况,这主要是因为模型制作误差以及附着条件差异。

试验过程中同时记录左右两侧履带的垂直载荷变化,并计算横向载荷转移率。如图 17 所示,整机的横向载荷转移率最大值为 0.96,此时试验结果显示已经发生倾翻,在发生倾翻前最大横向载荷转移

率为 0.54。

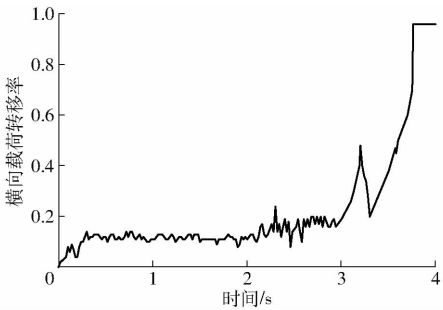


图 17 横向载荷转移率变化曲线
Fig. 17 Change curve of lateral load transfer ratio

4 结论

(1)按照国家标准,计算得整机质心与驱动轮轴之间的水平距离 a 为 944.5 mm、质心高度 h 为 1 080.4 mm、质心与纵向中心平面距离 e 为 27.9 mm,为后续仿真和试验提供了数据。

(2)根据测得的参数,建立了整机仿真模型,并进行了仿真分析和倾翻试验。在横向坡道直行工况下,仿真和试验的临界倾翻角分别为 24°和 24.7°,相对误差为 2.83%;在转向工况下,仿真和试验的临界倾翻角分别为 11°和 14°,临界倾翻横向载荷转移率分别为 0.49 和 0.54,相对误差分别为 21.4%和 9.2%;在纵向上坡工况下,仿真和试验的临界倾翻角分别为 33°和 34.2°,相对误差为 3.51%;在纵向下坡工况下,仿真和试验的临界倾翻角分别为 31°和 31.8°,相对误差为 2.52%。

(3)提出了一种适用于山坡地带收获机作业的防倾翻预警算法,参考仿真分析及倾翻试验的数据,设置了评价整机倾翻危险性的指标及评判标准,通过压力传感器和倾角传感器共同监测实现预警功能,提升了预警系统的可靠性。

参 考 文 献

[1] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(11):1-20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1-20. (in Chinese)

[2] 王伟,陈黎卿,杨洋,等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(8):1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1-15. (in Chinese)

[3] 潘冠廷. 山地履带拖拉机坡地转向动态稳定性理论研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
PAN Guanting. Research on dynamic steering stability theory of a hillside crawler tractor on slope [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[4] 张文华,张维强,鲁植雄,等. 基于虚拟样机技术的轮式拖拉机侧倾稳定性研究[J]. 机械强度,2017,39(1):138-142.
ZHANG Wenhua, ZHANG Weiqiang, LU Zhixiong, et al. Research of wheeled tractor roll stability based on virtual prototyping technology [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(1): 138-142. (in Chinese)

[5] 肖魏魏. 35 马力丘陵山地拖拉机稳定性研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
XIAO Weiwei. Study on stability of 35 horsepower hilly tractor [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[6] 张昊,樊桂菊,李钊,等. 果园作业平台倾翻失稳预警系统设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(4):164-168.
ZHANG Hao, FAN Guiju, LI Zhao, et al. Design and experiment of early warning system for orchard operation platform tipping instability [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 164-168. (in Chinese)

- [7] 金智林, 张鸿生, 马翠贞. 基于动态稳定性的汽车侧翻预警[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 128 – 133.
JIN Zhilin, ZHANG Hongsheng, MA Cuizhen. Vehicle rollover warning based on dynamic stability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 128 – 133. (in Chinese)
- [8] 吴新烨, 葛晓宏, 罗树友, 等. 汽车侧翻稳定性研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2010, 49(6): 815 – 818.
WU Xinye, GE Xiaohong, LUO Shuyou, et al. Study on stability of rollover of vehicle[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2010, 49(6): 815 – 818. (in Chinese)
- [9] GASPAR P, SZASZI I, BOKOR J. Reconfigurable control structure to prevent the rollover of heavy vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(6): 699 – 711.
- [10] 张洺溪. 重型车辆动力学建模及侧翻预警仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
ZHANG Mingxi. Heavy vehicle dynamics modeling and rollover warning simulation[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [11] 张玉新. 铰接式工程车辆倾翻稳定性与防倾翻预警策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
ZHANG Yuxin. Research on articulated engineering vehicles overturning stability and anti-roll warning strategy [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [12] 曲俊娜. 铰接式工程车辆动态侧翻稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
QU Junna. Research on dynamic rollover stability of articulated engineering vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [13] 刘会凯. 铰接式非公路车辆主动防倾翻控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
LIU Huikai. Study on active anti-rollover control technique for articulated off-road vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [14] 王健, 余贵珍, 张为, 等. 基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 1 – 6.
WANG Jian, YU Guizhen, ZHANG Wei, et al. Real-time rollover prediction for vehicle based on principles of sliding mode and fuzzy inference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 1 – 6. (in Chinese)
- [15] 秦嘉浩, 刘海帆, SUH C S, 等. 拖拉机动量飞轮主动防侧翻控制与模型试验研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 515 – 520.
QIN Jiahao, LIU Haifan, SUH C S, et al. Tractor active anti-rollover control using momentum flywheel with experimental verification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 2): 515 – 520. (in Chinese)
- [16] 秦嘉浩, 宋战胜, 刘海帆, 等. 拖拉机姿控飞轮防侧翻系统卸载能量回收试验研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 564 – 567, 575.
QIN Jiahao, SONG Zhansheng, LIU Haifan, et al. Energy harvesting module design for flywheel-based tractor anti-rollover system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 564 – 567, 575. (in Chinese)
- [17] NALECZ A G, LU Z, D'ENTREMONT K L. 车辆侧翻倾向动态测试的研究(一)[J]. 传动技术, 2014, 28(2): 38 – 48.
- [18] RAKHEJA S, PICHE A. Development of directional stability criteria for an early warning safety device[J]. SAE International Journal of Engines, 1990, 99(2): 877 – 889.
- [19] CHEN B, PENG H. Rollover warning for articulated heavy vehicles based on a time-to-rollover metric[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 127(3): 406 – 414.
- [20] 朱天军. 基于改进 TTR 重型车辆侧翻预警及多目标稳定性控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
ZHU Tianjun. Research on improved TTR rollover warning and multi-objective stability control algorithm of heavy duty vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [21] 张硕, 李臻, 朱忠祥, 等. 多因素影响下拖拉机侧向稳定性模型实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 358 – 363.
ZHANG Shuo, LI Zhen, ZHU Zhongxiang, et al. Scale model experiment on lateral stability of tractor affected by multi-factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 358 – 363. (in Chinese)
- [22] 于龙飞. 微型履带山地拖拉机坡地通过性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
YU Longfei. Research on the trafficability performance of micro-hillside caterpillar tractor on sloping field [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [23] 刘虹玉. 微型履带山地拖拉机性能分析与仿真[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
LIU Hongyu. Analysis and simulation of micro-crawler hillside tractor performance [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [24] 马丽娜, 杜岳峰, 宋正河, 等. 玉米收获机准静态横向稳定性数学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 89 – 95.
MA Li'na, DU Yuefeng, SONG Zhenghe, et al. Mathematical modeling and experiment of corn harvester quasi-static lateral stability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 89 – 95. (in Chinese)
- [25] 余希胜. 高地隙喷雾机侧倾稳定性控制研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
YU Xisheng. Research on roll stability control of high clearance sprayer [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)