doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.064

拖拉机动量飞轮主动防侧翻控制与模型试验研究

秦嘉浩[1,2]　刘海帆[1,2]　SUH C S[3]　李　臻[1,2]　朱忠祥[1,2]　王国业[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;
3. 德克萨斯 A&M 大学机械工程系, 德克萨斯 77843-3123)

摘要: 针对拖拉机侧翻致死致伤事故仍时有发生的问题,基于旋转刚体加速时的反向施矩原理,以反作用动量飞轮为执行元件,提出了从主动安全角度解决拖拉机侧翻问题的研究方法。通过构建拖拉机动力学系统数学模型,解析了整机侧翻行为的动态演变机理。为保证拖拉机主体结构的完整性,将动量飞轮置于拖拉机前部,取代传统静态配重的同时可主动提供防侧翻力矩。应用 Matlab/Simulink 软件,对反作用飞轮的回稳过程进行了基于 PID 控制的有效性仿真分析,同时设计并搭建了比例模型试验平台,对主动施矩飞轮的回稳控制效果进行了试验验证。结果表明,装备飞轮的拖拉机与无控制组对比,在一次试验中可多次实现整机的防侧翻控制,使整机防侧翻性能得到明显改善,且不同行驶工况下的试验数据与仿真结果的相关性较强,充分验证了本文拖拉机侧翻动力学模型的有效性。

关键词: 拖拉机; 侧翻; 动量飞轮; 主动安全; 模型试验

中图分类号: S219.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)S2-0515-06

Tractor Active Anti-rollover Control Using Momentum Flywheel with Experimental Verification

QIN Jiahao[1,2]　LIU Haifan[1,2]　SUH C S[3]　LI Zhen[1,2]　ZHU Zhongxiang[1,2]　WANG Guoye[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*
3. *Department of Mechanical Engineering*, *Texas A&M University*, *Texas* 77843-3123, *USA*)

Abstract: As wheeled tractors are widely used as power machinery in agricultural activities, the lateral stability of a tractor directly affects the operation efficiency and machine safety with worldwide inevitable rollover-induced injuries and fatalities. From the perspective of active safety control, this article aims to apply the reverse moment of an accelerating momentum flywheel to the rolling tractor. In this study, we analyzed the evolution mechanism of the tractor dynamic overturning behavior by mathematical modeling. In order to keep the original configuration of the main structure of the tractor, the momentum flywheel was installed in the tractor front to replace the conventional static ballast, while it actively provided the anti-rollover torque in emergency cases. Using Matlab/Simulink, the simulation work on the effectiveness of the PID speed control was carried out. Furthermore, a scale-model experimental platform was designed to verify the flywheel-based tractor active stability control system. The results showed that the tractor equipped with a flywheel was able to regain lateral stability repeatedly in one experimental run. The test data under different driving conditions were compared with the uncontrolled group verifying the effectiveness and accuracy of the tractor dynamic model and the active control algorithm proposed in this paper. The proposed approach potentially provides theoretical basis and technical support for the extension of tractor active stability control technology.

Key words: tractor; rollover; momentum flywheel; active safety; scale-model experiment

收稿日期: 2020-08-08　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

0 引言

拖拉机是农业生产中的核心动力装备[1]。然而,由于拖拉机作业环境复杂开放,机体重心位置动态变化范围较大,易发生侧翻事故[2]。统计数据表明,美国每年拖拉机侧翻事故导致超 800 人死亡[3]。在以丘陵山地为主要耕作地形的国家,拖拉机侧翻问题更加严峻[4-6],亟待利用主动防侧翻控制手段进行干预。

拖拉机的侧翻过程具有冲击强和能量转移迅速等特点[7]。当前,相关研究工作多集中于被动安全领域,以侧翻保护装置(Rollover protective structure, ROPS)为主要代表,且近年来的研究重点聚焦于 ROPS 的自动部署及智能化设计等方面[8-9]。进一步深入探讨拖拉机侧翻机理,对拓展有效可靠的主动防侧翻手段、解决侧翻问题具有重要意义。

近年来,国内外关于侧翻机理的研究主要集中在拖拉机动力学行为特征描述与稳定性评价等方面[10-17]。其中,多数数学模型的限制条件较多,较难反映整机系统的全时动力学行为。与此同时,基于姿控飞轮的机械系统姿态测量与控制技术已在诸多领域得到推广应用[18],为车辆行驶姿态控制提供了一定技术基础。

为有效降低拖拉机侧翻的发生几率,本文通过建立拖拉机侧翻动力学模型,基于姿控动量飞轮的主动安全控制策略开展仿真分析和模型试验研究,旨在实现拖拉机在极限侧倾工况下的紧急姿态矫正,避免恶性侧翻事故的发生。

1 系统建模与稳定性评价

拖拉机可摇摆式前桥作为独立于主机体的机构,起提升整机稳定性、提高整机越障能力的作用,在建模过程中因其自由摆动自由度的存在,前桥和主机体具有纵向、侧向、垂向以及侧倾、俯仰和横摆旋转 6 个自由度。前桥的六自由度运动除侧倾运动与机体独立外,其他运动均受到机体的运动制约,因此,7 个自由度即可描述除轮胎以外的拖拉机动力学行为状态。对整机进行受力分析,如图 1 所示。运用牛顿—欧拉定律和达朗贝尔原理建立拖拉机动力学系统模型。

拖拉机沿斜坡等高线 X 轴方向匀速行驶,其主机体沿 Y、Z 轴方向的平移运动方程为

$$m_2\ddot{y} = m_2 g\sin\alpha + F_{py} - F_{y3} - F_{y4} \tag{1}$$

$$m_2\ddot{z} = F_{pz} + F_{z3} + F_{z4} - m_2 g\cos\alpha \tag{2}$$

机体绕 X、Y、Z 轴的侧倾、俯仰及横摆运动方程分别为

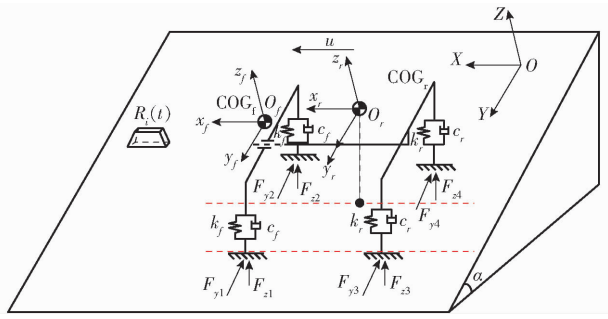


图 1 斜坡行驶拖拉机受力分析

Fig. 1 Schematic of driving tractor on slope

$$I_{xr}\ddot{\varphi}_r = (F_{z3} - F_{z4})\frac{B_r}{2} + (F_{y3} + F_{y4})H_r - F_{py}e_{rz} \tag{3}$$

$$I_{yr}\ddot{\theta}_r = F_{pz}l_{r1} - (F_{z3} + F_{z4})l_{r2} \tag{4}$$

$$I_{zr}\ddot{\gamma}_r = (F_{y1} + F_{y2})L_f - (F_{y3} + F_{y4})L_r \tag{5}$$

前桥绕 X 轴的独立侧倾运动方程为

$$I_{xf}\ddot{\theta}_f = M_{xf} \tag{6}$$

式中 B_r——后轮轮距,m

e_{rz}——机体重心(COG_r)与前桥轴枢的垂向距离,m

F_{py}——前桥铰接点侧向受力,N

F_{pz}——前桥铰接点垂向受力,N

F_{yi}——车轮侧向力,N,$i = 1 \sim 4$

F_{zi}——车轮垂向力,N,$i = 1 \sim 4$

I_{xf}——前桥绕 x 轴转动惯量,kg·m^2

I_{xr}——主机体绕 x 轴转动惯量,kg·m^2

I_{yr}——主机体绕 y 轴转动惯量,kg·m^2

I_{zr}——主机体绕 z 轴转动惯量,kg·m^2

L_f——COG_r与前轴水平距离,m

L_r——COG_r与后轴水平距离,m

l_{r1}——COG_r与前桥铰接点水平距离,m

l_{r2}——COG_r与后轮水平距离,m

m_2——主机体质量,kg

M_{xf}——前桥所受绕 x_f 轴合力矩,N·m

α——侧向斜坡角,rad

γ_r——主机体横摆角,rad

θ_f——前桥俯仰角,rad

θ_r——主机体俯仰角,rad

g——重力加速度,m/s^2

H_r——COG_r 距离地面的高度,m

在拖拉机行驶过程中,机体受到的所有外力(忽略空气阻力)均来自于轮胎与地面间的接触,因此建立相对准确的轮胎模型是整机动力学模型反映真实拖拉机状态的基础[19]。本文选用 Fiala 轮胎模型[20],轮胎垂向力可表示为

$$F_{zi} = -k_{f/r}\Delta z_{f/r} - c_{f/r}\Delta\dot{z}_{f/r} \quad (i = 1 \sim 4) \tag{7}$$

其中　$\Delta z_{f/r}=R_i-(z_i-f_i(t))+\Delta z_{i_ini}$　　(8)

式中　$c_{f/r}$——轮胎垂向阻尼，N/m

$k_{f/r}$——轮胎垂向刚度，N/m

$\Delta z_{f/r}$——轮胎垂向形变，m

R_i——轮胎半径，m　　z_i——垂向坐标

$f_i(t)$——输入激励

Δz_{i_ini}——轮胎初始静态形变，m

其中下角标 f 表示前轮，r 表示后轮。

考虑拖拉机-动量飞轮系统，忽略飞轮绕电机轴转动时的摩擦和拖拉机回稳过程中的耗散力，运用拉格朗日法可得

$$(I_x^*+I_w)\ddot{\varphi}-\frac{B}{2}(m+m_w)g\sin\varphi=-I_w\ddot{\zeta}\quad(9)$$

式中　I_w——飞轮转动惯量，kg·m^2

I_x^*——整机绕 x 轴转动惯量，kg·m^2

m——整机质量，kg　　B——轮距，m

m_w——飞轮质量，kg　　ζ——飞轮转角，rad

φ——整机侧倾角，rad

侧向稳定性评价指标是反映整机稳定性的重要标志和控制依据[21-23]。拖拉机侧翻历程中存在失稳边界，由整机重心在竖直方向的投影是否越过侧倾轴线进行判定。因此，本文引入基于侧翻历程中极限姿态位置的侧向稳定性评价指标 EP，其计算公式为

$$EP=\frac{2H_{COG}mg\sin(|\varphi+\alpha|)}{Bmg\cos(|\varphi+\alpha|)}\quad(10)$$

式中　H_{COG}——整机重心高度，m

以 1 为失稳阈值，当拖拉机处于稳定状态时，重力的侧向分力较小，此时 EP 小于 1。随着整机侧倾角的增大，EP 持续增大，直至重心处于侧倾轴线正上方时 EP 达到 1，整机处于临界失稳状态。当整机重心越过侧倾轴时，EP 大于 1，若没有外界干预将发生侧翻事故。该指标即为整机侧向稳定性的动态评价监测与主动控制依据。图 2 为基于动量飞轮的拖拉机主动防侧翻控制策略。

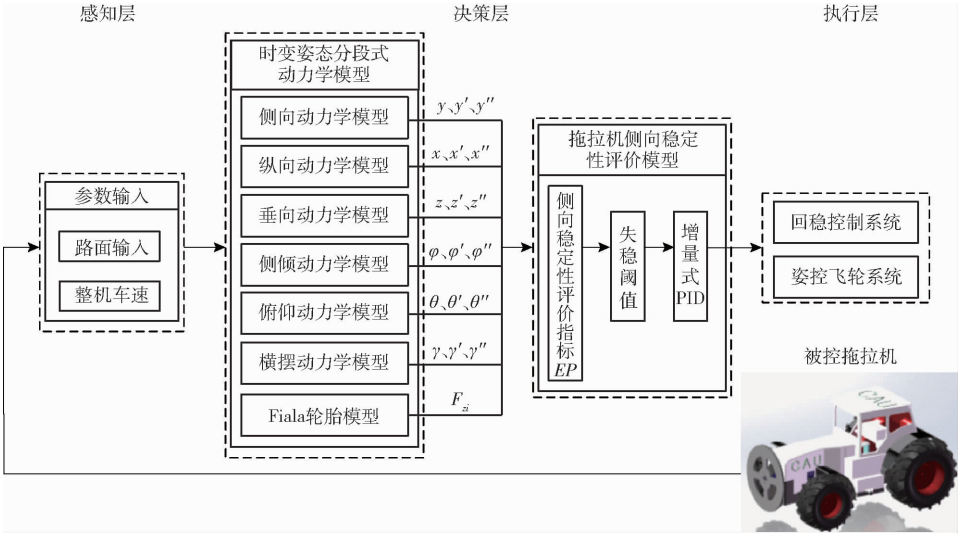


图 2　主动防侧翻控制策略

Fig. 2　Active anti-rollover control strategy diagram

2　比例模型试验平台搭建

2.1　模型拖拉机

考虑到使用实车进行侧翻试验的高危险性，本文通过 1∶16 比例模型拖拉机对上文拖拉机动力学系统模型及控制策略进行验证。

考虑到模型拖拉机需要具备的试验功能，该模型拖拉机主要由控制单元、驱动单元、飞轮-电机单元、机身壳体、底盘和前桥组成。其中，控制单元由图 3 中的 Arduino DUE 控制模块、HC－05 蓝牙数据传输模块、MPU 6050 型六轴陀螺仪以及 12 V 锂电池组成。

驱动单元由 ZS－H1B 型双路 H 桥直流电机驱动模块、永磁直流驱动电机、齿轮减速器以及人字花纹模型轮胎组成，如图 4 所示。

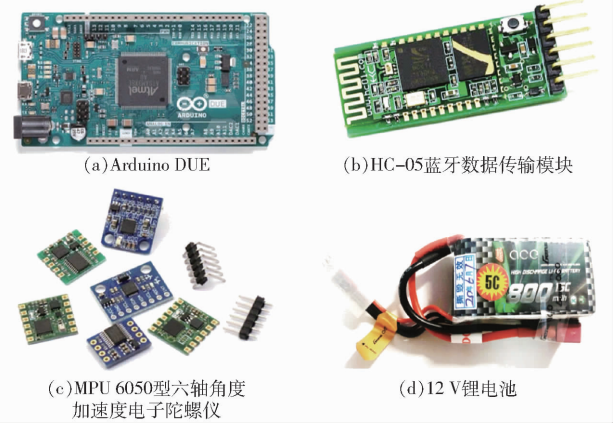
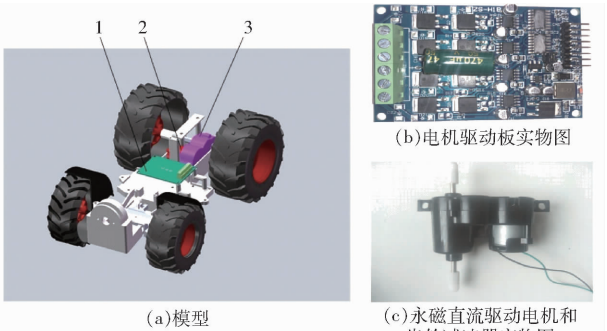


图 3　控制单元

Fig. 3　Control module

飞轮-电机单元由反作用施矩飞轮、驱动电机及霍尔编码器等组成,其整机位置布置如图 5 所示。



(a)模型

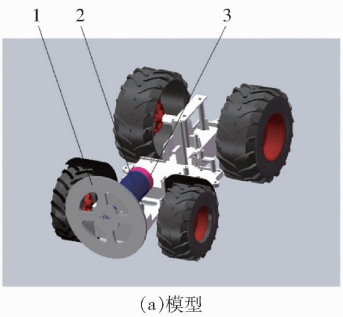
(b)电机驱动板实物图

(c)永磁直流驱动电机和齿轮减速器实物图

图 4 驱动单元

Fig. 4 Drive module

1. 双路 H 桥直流电机驱动模块(ZS-H1B 型) 2. 永磁直流驱动电机 3. 齿轮减速器



(a)模型



(b)飞轮实物图



(c)高速永磁直流有刷电机和霍尔编码器实物图

图 5 飞轮-电机单元

Fig. 5 Flywheel - motor module

1. 飞轮 2. 高速永磁直流有刷电机 3. 霍尔编码器

将动量飞轮置于拖拉机前部,取代传统静态配重的同时可主动提供防侧翻力矩,搭建完成的 1∶16 比例模型拖拉机如图 6 所示。



图 6 1∶16 比例模型拖拉机

Fig. 6 1∶16 scale-model tractor

2.2 试验路面

为验证本文建立的拖拉机动力学系统模型的有效性,搭建如图 7 所示的设有规则障碍物的斜坡路面,并在仿真环境中搭建相同路面条件。

为进一步在复杂路面条件下验证动量飞轮系统主动防侧翻控制的有效性和普适性,根据国标GB/T 7031—2005[24]对路面不平度的等级划分原则,结合式(11)位移功率谱密度(PSD)和空间频率的关系[25]将路面粗糙度划分为 8 个等级(图 8),为全级路面下的主动控制系统仿真验证提供系统激励。

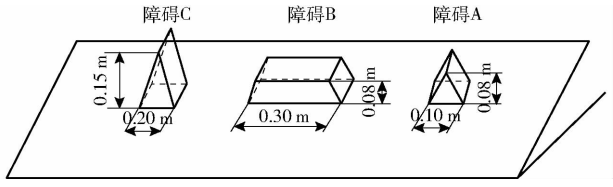


图 7 试验斜坡路面

Fig. 7 Testing slope with obstacles of various shapes

$$G_q(n) = G_q(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W} \tag{11}$$

式中 $G_q(n)$——位移功率谱密度

$G_q(n_0)$——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

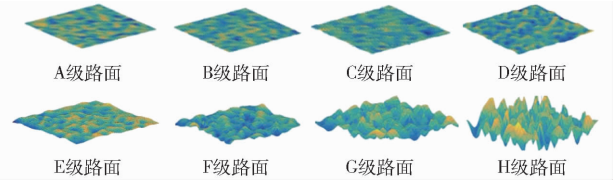


图 8 全级随机路面

Fig. 8 Full-class random road surfaces for simulation analysis

3 结果与讨论

3.1 确定障碍物下主动回稳系统试验验证

图 9 为不同速度下模型拖拉机越障过程中的整机侧倾角变化趋势,应用 Matlab/Simulink 软件,对反作用飞轮的回稳过程进行基于 PID 控制的有效性仿真分析。

根据图 9 中整机两次越障过程的时域界定,模型拖拉机在越过障碍 A 的过程中,整机侧向姿态出现两次不同程度的起伏,这是由于前桥可实现一定角度内的自由摆动,致使前轮越障引起的整机侧向姿态变化小于后轮越障的影响,符合拖拉机的实际工作情况。当模型拖拉机翻越梯形障碍 B 时,整机侧倾角短暂稳定在 35°附近,说明此时整机一侧轮胎均与障碍物实际接触,表现为短暂的整机稳定状态。两种不同行驶速度工况下的测试数据和仿真结果吻合度较高,验证了拖拉机侧翻动力学系统模型及动量飞轮主动回稳系统的有效性和可靠性。

3.2 随机路面激励下动量飞轮系统有效性仿真验证

应用前文验证的拖拉机动力学系统模型和全级

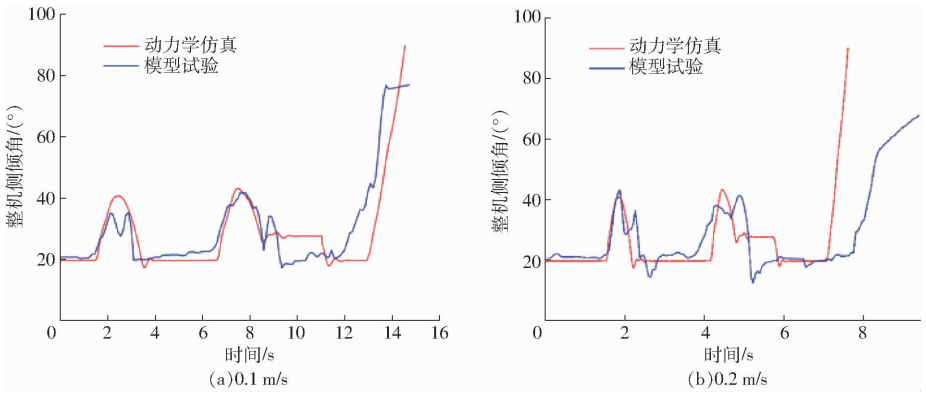


图 9　不同行驶速度下整机侧倾角的变化曲线

Fig. 9　Variation curves of lateral inclination at different driving speeds

随机路面开展动量飞轮系统防侧翻验证，得到如图 10 所示的全级路面下整机侧向稳定性评价指标变化规律。

当拖拉机在较平整路面（A ~ E 级）上行驶时，其整机侧向稳定性评价指标 *EP* 始终小于 1，整机并未出现侧翻趋势，这与实际情况中拖拉机行驶于路面起伏较小、粗糙度较低路面时稳定性相对较好的实际情况吻合。当路面粗糙度进入 F ~ H 级时，在没有任何主动防侧翻控制的条件下，评价指标 *EP* 大于 1 后呈发散趋势，仿真计算均因整机侧翻的发生而终止。在实施主动控制的条件下，尽管拖拉机出现不同方向的侧翻趋势，但均在动量飞轮系统的主动干预下实现了回稳，可使拖拉机在起伏较大、粗糙度较高的路面安全平稳行驶。由此可见，本文提

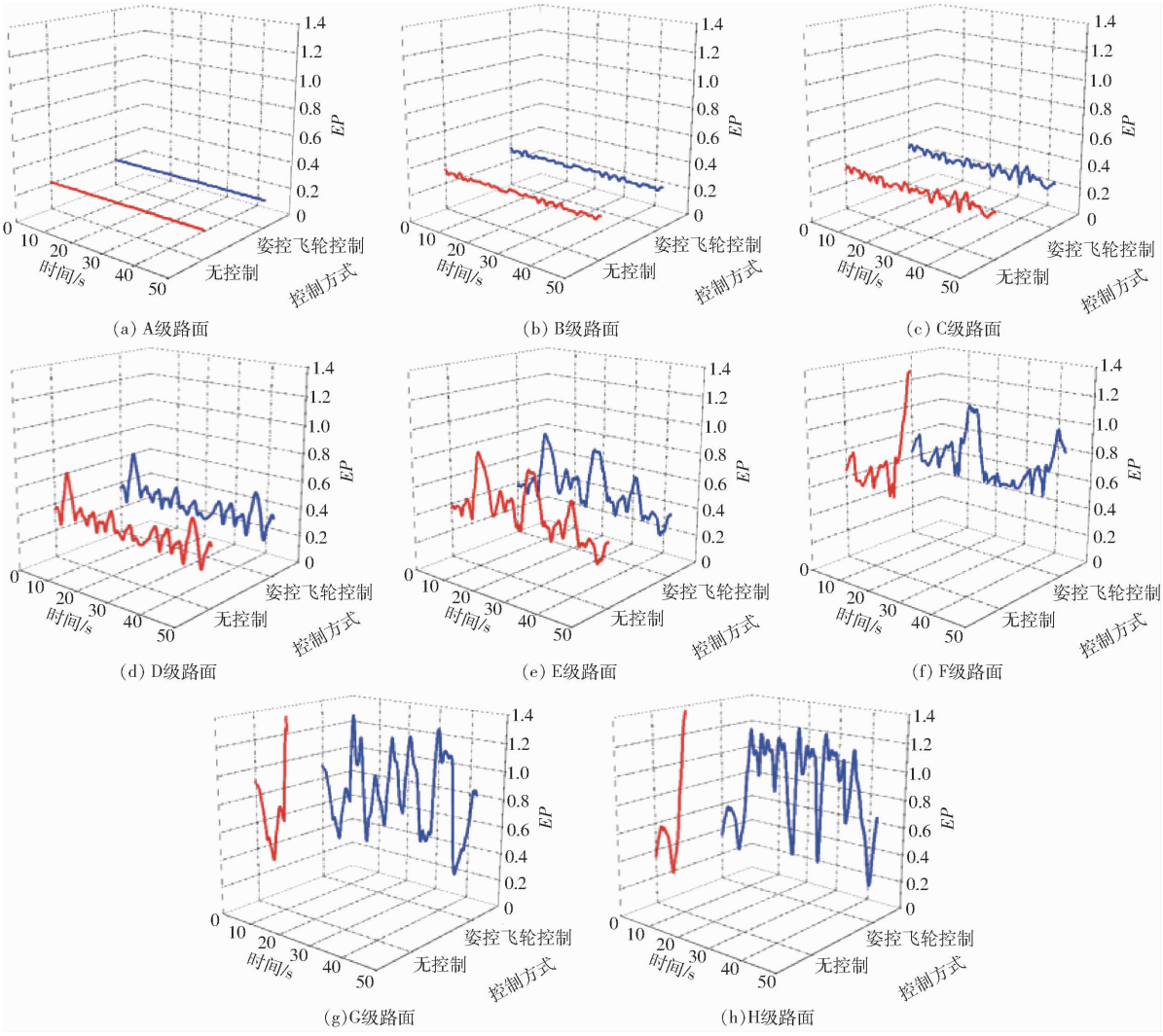


图 10　全级随机路面下的动量飞轮系统防侧翻效果

Fig. 10　Effects of active anti-rollover control of momentum flywheel system on full-class random road surfaces

出的动量飞轮主动防侧翻控制方法能够有效抑制极端工况下的拖拉机侧翻行为。

4 结束语

长期以来,轮式拖拉机的行驶安全问题严重影响着驾驶员生命和财产安全。本文在拖拉机动力学建模的基础上,提出了基于动量飞轮系统的主动防侧翻控制方法,并搭建了 1∶16 比例模型拖拉机和路面试验平台,对动力学模型和主动控制系统的有效性进行了分析和验证。结果表明,本文建立的拖拉机动力学系统模型能够较准确地反映拖拉机越障和侧翻行为历程,且主动回稳系统有效、可靠。在全级路面下拖拉机动态行驶过程的仿真分析中,本文所提出的动量飞轮系统能够有效抑制危险工况下拖拉机的侧翻趋势,说明该主动防侧翻方法具有一定普适性。本文研究方法可为深入揭示拖拉机侧翻机理及整机主动安全控制提供理论基础与方法支撑。

参 考 文 献

[1] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1 - 17. (in Chinese)

[2] 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 thchnology[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(1): 138 - 142. (in Chinese)

[3] United States Department of Labor. Census of fatal occupational injuries[R]. Washington DC: Bureau of Labor Statistics, 2005.

[4] PAUL A, FARZANEH K. Reducing tractor rollover fatalities[J]. Resource Engineering & Technology for Sustainable World, 2017, 24(6): 6 - 7.

[5] SHAH S M, HAGEL L, LIM H, et al. Trends in farm fatalities, Saskatchewan, Canada: 1990—2004[J]. Canadian Journal of Public Health, 2011, 102(1): 51.

[6] JONES C B, DAY L, STAINES C. Trends in tractor related fatalities among adults working on farms in Victoria, Australia, 1985—2010[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 50: 110 - 114.

[7] 李学飞. 铰接转向车辆侧倾失稳机理及主动防倾翻控制方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2014.
LI Xuefei. Study on rollover instability mechanism and active anti-rollover control method for articulated steer vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[8] POWERS J R, HARRIS J R, ETHERTON J R, et al. Performance of an automatically deployable ROPS on ASAE tests[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2001, 7(1): 51 - 61.

[9] MCKENZIE E A, ETHERTON J R, HARRIS J R, et al. NIOSH auto ROPS research to practice: zero turn commercial mowers [C]// The ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA, 2005.

[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.

[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, TERAO 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, TERAO 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, TERAO 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, TERAO H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part Ⅳ): experimental validation of simulation models[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1998,68(1): 17 - 31.

[17] 王宪宇. 汽车侧翻双飞轮控制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
WANG Xianyu. Research on vehicle anti-roll control by double flywheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[18] TYC G, WHITEHEAD W R, PRADHAN S N, et al. An innovative new actuator\sensor for 3-axis spacecraft attitude control [C]// The 13th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, USA, 1999.

[19] QIN J, ZHU Z, JI H, et al. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 135 - 149.

[20] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Development of stability indicators for dynamic phase Ⅰ overturn of conventional farm tractors with front axle pivot[J]. Biosystems Engineering, 2015, 134: 55 - 67.

[21] 杨益. 车辆侧翻预警及半主动悬架防侧翻优化控制研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
YANG Yi. Optimal control allocation of semi-active suspension for vehicle rollover prevention[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[22] MASHADI B, NASROLAHI H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(6): 299 - 311.

[23] MASHADI B, MOSTAGHIMI H. Vehicle lift-off modelling and a new rollover detection criterion[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 704 - 724.

[24] 中国国家标准化管理委员会. 机械振动 道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.

[25] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Parameter sensitivity for tractor lateral stability against phase Ⅰ overturn on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150: 10 - 23.