

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.037

拖拉机极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统设计与试验

王龙龙 蓝 鸿 周 胥 陈 度 何志祝 李 臻
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对拖拉机在斜坡行驶中受复杂路况扰动易引发的极限态侧翻失稳问题,基于单框架控制力矩陀螺设计了主动侧翻回稳控制系统。以单侧轮胎离地侧翻工况为主要研究对象,利用欧拉-拉格朗日方程构建了整机和力矩陀螺耦合系统的非线性侧倾动力学方程,并基于反步设计法推导了状态反馈控制律。该控制律可依据侧翻危险程度实时调整陀螺转子的进动角速度,定量输出侧翻回稳力矩。以环境障碍物和整机行驶速度为变量,开展了极限态侧翻失稳控制比例模型试验。结果表明,与无控制组相比,采用力矩陀螺主动侧翻回稳系统可显著调控拖拉机的侧倾过程,且在实际侧倾角大于静态临界侧倾角9.58%时仍能有效实现侧翻回稳。研究表明,提出的控制方法可适用于不同危险程度的极限侧翻工况,为拖拉机主动安全控制提供理论依据和技术参考。

关键词: 拖拉机; 控制力矩陀螺; 反步法; 主动安全; 防侧翻控制

中图分类号: S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0320-08

Design and Experiment of Active Rollover Control System Using Control Moment Gyroscope for Agricultural Wheeled Tractor

WANG Longlong LAN Hong ZHOU Xu CHEN Du HE Zhizhu LI Zhen
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: An active rollover stabilization control system was designed based on a single-frame control moment gyroscope for tractors susceptible to limit state rollover instability caused by complex road conditions in slope driving. The Euler – Lagrange equations were used to construct the non-linear sway dynamics equations for the coupled system of the whole machine and the control moment gyro using the single-side tire off the ground as the main object of study. Considering the different degrees of rollover hazards under random road conditions, a state feedback control law was derived based on the backstepping design method. To ensure the smooth control process, the control law was used to adjust angular speed and angular position of the gyroscope rotor. Through the precise movement of the gyroscope rotor, the active rollover control moment of agricultural wheeled tractor was output to change the rollover trend. Finally, scaled model tests of limit state rollover instability control with different obstacles and speeds were also carried out. The results showed that compared with the uncontrolled group, the use of the moment gyroscope control system can significantly reduce the ultimate roll angle of the tractor and can still effectively control the rollback when the roll angle was greater than the static critical roll angle of 9.58%. The proposed control strategy can adapt to the ultimate rollover conditions of different levels of risk and broaden the range of safe driving slope of the tractor. The active rollover control system can provide a theoretical basis and technical support for improving tractor slope adaptability.

Key words: tractor; control moment gyroscope; backstepping; active safety; anti-rollover control

0 引言

拖拉机作为农业生产中常用动力机械,在犁耕、播种、施药、运输等多种作业环节中发挥着至关重要作用。然而,在复杂崎岖、坡度交错、土质不一的丘陵山区耕作环境中,拖拉机易受到随机环境路况、交

变作业载荷等时变外界激励的往复叠加扰动作用,时常发生严重威胁装备和人员安全的极限态侧翻事故^[1-2],限制了其安全行驶坡度范围。

近年来,国内外学者针对拖拉机防侧翻控制展开了大量研究。其中,动力学分析和稳定性评价方法不断丰富^[3-6]。被动安全防护领域广泛应用的侧翻保护装置(ROPS),在结构创新设计^[7]、部署速度提升^[8]、测试方法改进^[9]等方面不断更新迭代。在主动安全控制领域,拖拉机姿态监测及预警^[10]、底盘调平机构设计^[11-12]、主动转向防侧翻控制^[13]等技术持续创新发展。但目前仍难以有效控制针对拖拉机单侧轮胎离地的极限侧翻工况。

另一方面,控制力矩陀螺技术在机器人平衡^[14-16]、航天器机动^[17-20]、船舶横向减摇^[21-23]等领域得到深度发展,为拖拉机侧翻控制提供了新的研究思路。同时,反步设计法因其在非线性控制系统设计过程中系统化、结构化的特点,在汽车悬架主动调节^[24]、倒立摆平衡^[25]、直流伺服电机自适应控制^[26]等方面受到广泛关注与深入研究。

基于此,本文将单框架控制力矩陀螺与拖拉机极限侧翻问题针对性结合,以单侧轮胎离地极限侧翻工况为主要研究对象,构建整机和力矩陀螺耦合系统非线性侧倾动力学方程,基于反步设计法推导状态反馈控制律,利用比例模型试验验证力矩陀螺系统主动防侧翻效果。

1 系统结构与总体设计

1.1 系统结构组成

如图 1 所示,单框架控制力矩陀螺主动侧翻回稳控制系统主要由高速转子机构、框架伺服机构、姿态传感器和控制单元组成。高速转子机构主要由转子电机和陀螺转子组成,通过转子电机驱动陀螺转子高速旋转产生供拖拉机侧倾回稳的角动量。框架伺服机构主要由伺服电机和支承框架组成,当拖拉机发生侧翻危险时,伺服电机驱动支承框架转动,迫使陀螺转子角动量进动,产生供拖拉机侧倾回稳的

反力矩。系统安装于拖拉机主机体前端,改善拖拉机侧倾趋势的同时,亦能行使传统配重作用。

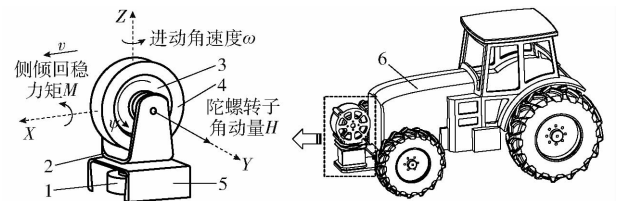


图 1 极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of limit state rollover moment gyroscope active control system

1. 伺服电机 2. 支承框架 3. 转子电机 4. 陀螺转子 5. 系统基座 6. 被控拖拉机

1.2 总体设计

拖拉机行驶至坡度较大斜坡时,控制力矩陀螺系统的转子电机驱动陀螺转子高速旋转,储备供侧翻回稳所需的角动量。控制单元读取来自姿态传感器的拖拉机主机体侧倾角位置、角速度,通过侧向稳定性评价指标(SI)判读侧翻危险程度,同时使用控制阈值判断是否需要力矩陀螺系统介入开展侧翻回稳控制。当超出控制阈值时,控制单元根据陀螺转子进动角速度控制律驱动伺服电机带动陀螺转子进动,改变角动量方向,产生供拖拉机回稳所需的输出力矩,实现拖拉机侧翻回稳主动控制。当未超出控制阈值时,力矩陀螺系统仅储备供侧翻回稳所需的角动量,不进行回稳力矩输出。系统总体设计如图 2 所示。

2 系统建模与控制器设计

2.1 数学模型

本文以拖拉机斜坡横向作业过程中遇到土块、凸丘等障碍,发生单侧轮胎离地极限侧翻工况为研究对象,重点探究单框架控制力矩陀螺对拖拉机极限侧翻回稳控制的有效性。为使问题简化,假设陀螺转子质量远大于支承框架,支承框架的转动惯量可以忽略;拖拉机轮胎与地面为刚性接触,忽略由载荷变化引起的轮胎特性变化;忽略车辆纵向动力学,

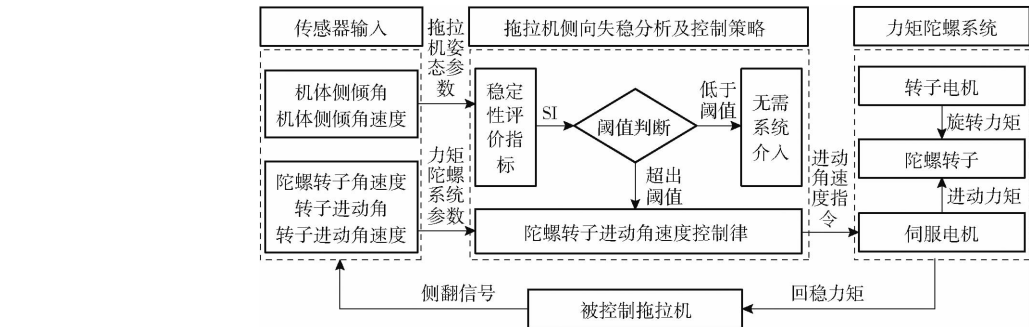


图 2 力矩陀螺主动侧翻回稳控制策略示意图

Fig. 2 Schematic of active rollover control strategy for control moment gyroscope

假设纵向速度为定值。考虑拖拉机侧向、侧倾旋转运动,以坡下侧两轮胎接地点连接为侧倾轴线,将坐标系 $oxyz$ 原点建立于侧倾轴线与质心所在纵向平面交点处,对整机进行受力分析,如图 3 所示。

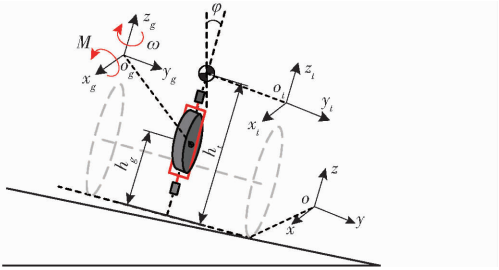


图 3 拖拉机单侧轮胎离地极限态侧倾受力分析

Fig. 3 Tractor single-side tire off-ground limit state rollover force analysis

考虑拖拉机-控制力矩陀螺耦合运动系统,利用欧拉-拉格朗日方程推导整机和力矩陀螺耦合系统非线性侧倾动力学方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = Q_i \tag{1}$$

式中 E_K ——拖拉机-力矩陀螺系统总动能, J
 E_p ——拖拉机-力矩陀螺系统总势能, J
 q_i ——广义坐标 Q_i ——广义力

拖拉机-力矩陀螺系统总动能为

$$E_K = E_{Kt} + E_{Kg} \tag{2}$$

式中 E_{Kt} ——拖拉机总动能, J
 E_{Kg} ——力矩陀螺系统总动能, J

其中,拖拉机总动能由侧向、纵向平动动能和侧倾转动动能组成,即

$$E_{Kt} = \frac{1}{2} m_t v_x^2 + \frac{1}{2} m_t v_{y-l}^2 + \frac{1}{2} I_t \dot{\varphi}^2 \tag{3}$$

其中 $v_{y-l} = l_t \dot{\varphi}$ (4)

$$l_t = \sqrt{\left(\frac{B}{2} \right)^2 + h_t^2} \tag{5}$$

式中 m_t ——拖拉机整机质量, kg
 v_x ——拖拉机纵向速度, m/s
 v_{y-l} ——拖拉机侧向速度, m/s
 l_t ——拖拉机质心至侧倾轴线距离, m
 φ ——拖拉机侧倾角, rad
 I_t ——拖拉机沿 x_t 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 B ——拖拉机轮距, m
 h_t ——拖拉机质心高度, m

力矩陀螺系统总动能由陀螺系统自身旋转运动动能和相对于大地坐标系下的运动动能组成,即

$$E_{Kg} = \frac{1}{2} m_g v_x^2 + \frac{1}{2} m_g v_{y-g}^2 + \frac{1}{2} I_{x-g} (\dot{\varphi} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} I_{y-g} (\dot{\varphi} \sin \theta)^2 + \frac{1}{2} I_{z-g} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{y-g} \omega^2 \tag{6}$$

其中 $v_{y-g} = l_g \dot{\varphi}$ (7)

$$l_g = \sqrt{\left(\frac{B}{2} \right)^2 + h_g^2} \tag{8}$$

式中 m_g ——陀螺转子质量, kg
 v_{y-g} ——陀螺系统侧向速度, m/s
 l_g ——转子质心至侧倾轴线距离, m
 I_{x-g} ——转子沿 x_g 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 I_{y-g} ——转子沿 y_g 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 I_{z-g} ——转子沿 z_g 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 θ ——转子沿 z_g 轴进动角, rad
 ω ——转子沿 z_g 轴进动角速度, rad/s
 h_g ——陀螺系统质心高度, m

根据转子质量分布方式,陀螺转子沿 x 轴和 z 轴转动惯量数值相等,因此

$$I_{x-g} = I_{z-g} \tag{9}$$

拖拉机-力矩陀螺系统总势能为

$$E_p = E_{pt} + E_{pg} \tag{10}$$

其中 $E_{pt} = m_t l_t g \cos \left(\varphi + \arctan \frac{2h_t}{B} \right)$ (11)

$$E_{pg} = m_g l_g g \cos \left(\varphi + \arctan \frac{2h_g}{B} \right) \tag{12}$$

式中 E_{pt} ——拖拉机总势能, J
 E_{pg} ——力矩陀螺系统总势能, J
 g ——重力加速度, m/s^2

拖拉机-控制力矩陀螺耦合系统沿侧倾方向广义力矩为

$$Q_1 = I_{y-g} \psi \omega \cos \theta \tag{13}$$

式中 ψ ——陀螺转子自旋角速度, rad/s

基于以上公式,忽略陀螺转子进动和自旋运动的摩擦,以及拖拉机回稳过程中的耗散力,可得到拖拉机-力矩陀螺系统侧倾动力学方程

$$\begin{aligned} & (m_t l_t^2 + m_g l_g^2 + I_t + I_{x-g} \cos^2 \theta + I_{y-g} \sin^2 \theta) \ddot{\varphi} = \\ & -2(I_{y-g} - I_{x-g}) \dot{\varphi} \omega \sin \theta \cos \theta + I_{gy} \psi \omega \cos \theta + \\ & (m_t l_t + m_g l_g) g \sin \left(\varphi + \arctan \frac{2h_t}{B} \right) \end{aligned} \tag{14}$$

2.2 侧向稳定性评价指标

侧向稳定性评价指标是判读车辆姿态、分析侧翻危险程度的重要依据。鉴于拖拉机主机体侧倾角和角速度是反映整机姿态的重要参数,本文选用包含两参数的拖拉机动态侧向稳定性评价指标 (SI)^[27],其计算公式为

$$SI = 100 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{cri}} \right) \left(1 - \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_{cri}} \right)^2 \right) \tag{15}$$

式中 φ_{cri} ——拖拉机临界侧倾角, rad

SI 取 100 时,拖拉机侧倾角速度、侧倾角均为 0,保持水平行驶状态。由 100 逐渐趋近 0 时,拖拉

机侧向稳定性逐渐降低。在 0 值时,达到临界侧倾角或角速度,开始侧翻。为保证控制的有效性,并留出充足的控制余量,本文将 SI 取值 20 作为控制阈值,当 SI 小于 20 时启动单框架控制力矩陀螺,产生相应回稳力矩进行拖拉机侧翻主动控制。

2.3 反步法控制器设计

考虑到式(14)中含有非线性项,以及为在极限工况下使陀螺转子根据拖拉机侧翻危险程度实时、定量调整进动角速度,保证整机侧翻回稳过程平稳且迅速,本文运用反步设计法,设计状态反馈控制律,根据拖拉机侧倾角和角速度,确定陀螺转子进动角速度。

针对拖拉机侧倾旋转运动非线性模型,选择状态变量 $x_1 = \varphi, x_2 = \dot{\varphi}$,控制输入 $u = \omega$,建立状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{b_1}{a_1} \sin(x_1 + b_2) + \left(-\frac{b_3}{a_1} x_2 + \frac{c_1}{a_1} \right) u \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} a_1 &= m_t l_t^2 + m_g l_g^2 + I_t + I_{x-g} \cos^2 \theta + I_{y-g} \sin^2 \theta \\ b_1 &= (m_t l_t + m_g l_g) g \\ b_2 &= \arctan \frac{2h_t}{B} \\ b_3 &= 2(I_{y-g} - I_{x-g}) \sin \theta \cos \theta \\ c_1 &= I_{gy} \psi \cos \theta \end{aligned}$$

首先,期望整机侧倾角处于安全位置范围,引入侧倾角跟踪误差函数

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (17)$$

式中 e ——侧倾角偏差,rad

x_{1d} ——期望侧倾角,rad

其微分方程为

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (18)$$

选定第一个李雅普诺夫函数

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2 \quad (19)$$

微分方程为

$$\dot{V}_1 = \frac{\partial V_1}{\partial e} \frac{de}{dt} = e \dot{e} = e(\dot{x}_{1d} - x_2) \quad (20)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理, e 趋近于 0 时,须确保 $\dot{V}_1$ 负定,可设 $\dot{x}_{1d} - x_2 = -k_1 e, k_1 > 0$,选取

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} + k_1 e \quad (21)$$

式中 k_1 ——控制增益

x_{2d} ——期望侧倾角速度,rad/s

定义侧倾角速度误差函数

$$\sigma = x_{2d} - x_2 \quad (22)$$

式中 σ ——侧倾角速度偏差,rad/s

联合式(16)、(21)、(22),侧倾角速度误差函数微分方程为

$$\dot{\sigma} = \dot{x}_{1d} + k_1 \dot{e} - \left[\frac{b_1}{a_1} \sin(x_1 + b_2) + \left(\frac{c_1}{a_1} - \frac{b_3}{a_1} x_2 \right) u \right] \quad (23)$$

将式(22)代入式(20)得

$$\dot{V}_1 = e[\dot{x}_{1d} - (x_{2d} - \sigma)] = -k_1 e^2 + e\sigma \quad (24)$$

为保证误差函数 e 趋近于 0 时, σ 同时趋近于 0,选定第二个李雅普诺夫函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (25)$$

则

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \sigma \dot{\sigma} \quad (26)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理,若使系统渐进稳定,则需满足 $V_2(e, \sigma)$ 正定, $\dot{V}_2(e, \sigma)$ 负定,即

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \sigma \dot{\sigma} = -k_1 e^2 + \sigma(e + \dot{\sigma}) \quad (27)$$

可以选取 $e + \dot{\sigma} = -k_2 \sigma$,增益 $k_2 > 0$,将式(23)代入式(27)得

$$\begin{aligned} e + \dot{x}_{1d} + k_1(\dot{x}_{1d} - x_2) - \frac{b_1}{a_1} \sin(x_1 + b_2) - \\ \left(\frac{c_1}{a_1} - \frac{b_3}{a_1} x_2 \right) u = -k_2 \sigma \end{aligned} \quad (28)$$

因此,反步法控制器可以设计为

$$u = \frac{a_1[e + \dot{x}_{1d} + k_1(\dot{x}_{1d} - x_2) + k_2 \sigma] - b_1 \sin(x_1 + b_2) - b_3 x_2 + c_1}{-b_3 x_2 + c_1} \quad (29)$$

3 试验平台搭建与方案设计

3.1 比例模型试验设计

鉴于实际拖拉机在斜坡上单侧轮胎离地极限态侧翻工况试验时具有较高危险性,而比例模型试验方法自上世纪 80 年代就被公认为研究拖拉机动态侧翻特性的有效手段^[28]。因此,本文基于相似理论设计了 1:5.5 比例模型试验系统,用于开展基于单框架控制力矩陀螺系统的拖拉机主动侧翻控制试验研究。比例模型拖拉机及力矩陀螺系统核心部件结构方案如图 4 所示。

硬件部分主要由模型车驱动模块和控制力矩陀螺传感驱动模块组成。控制单元以 STM32F103ZET6 作为主要控制芯片实现信号综合处理。采用朗宇 V4008/KV600 型无刷电机作为转子驱动电机,其转速信息由 HKT30-301 型光电编码器获取。利用飞特 SM40BL 型串口舵机驱动陀螺

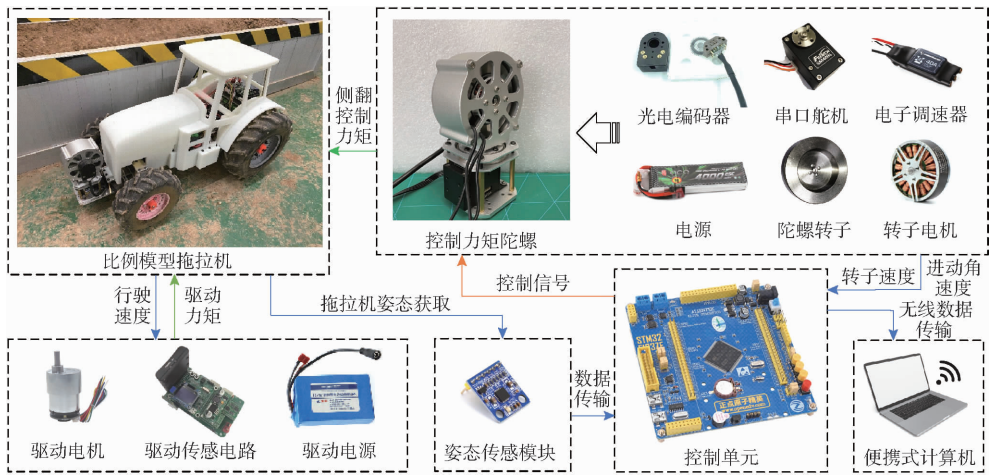


图 4 1:5.5 比例模型拖拉机与力矩陀螺系统核心部件结构方案

Fig.4 Schematic of core components of 1:5.5 scale model tractor and control moment gyroscope system

转子进动,同时采用其内置磁编码器获取进动角及角速度信息。MPU6050 型陀螺仪作为姿态传感模块获取整车侧倾角和角速度信息,每个控制循环相关数据由 HC-05 蓝牙模块传输至便携式计算机终端。

3.2 试验方案

为模拟拖拉机在斜坡行驶过程中遇到凸丘、土块等障碍物影响机体横向稳定性的作业工况,验证提出的单框架控制力矩陀螺对拖拉机极限侧翻控制的有效性,搭建了如图 5 所示的设有规则障碍物的斜坡路面。

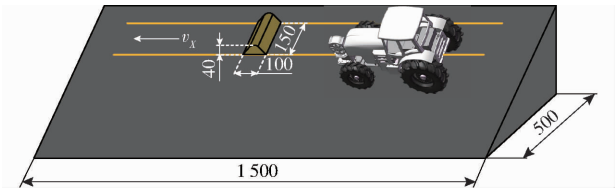


图 5 斜坡试验场景设计

Fig.5 Scenario design of slope experiment

为验证提出的状态反馈控制律在拖拉机处于不同侧翻危险程度时的实时、定量调节陀螺转子进动角速度能力,增加了不同行驶速度对比试验,为试验拖拉机提供不同程度的侧翻工况。同时,为进一步验证极端工况下侧翻控制有效性,开展了较高障碍下侧翻控制试验。实际试验现场如图 6 所示。



图 6 实际试验现场

Fig.6 Test platform for moment gyro active control system

4 试验与结果分析

4.1 力矩陀螺系统防侧翻控制有效性验证

为验证单框架控制力矩陀螺系统在极端危险侧翻工况下对拖拉机主动侧翻控制的有效性,试验在 28°左右的斜坡上开展,设置行驶速度 0.18 m/s,障碍物高度 0.04 m,陀螺转子转速 8 300 r/min。同时,为避免控制系统对陀螺转子的进动角速度指令超出串口舵机实际运行能力,确保对期望角速度的跟踪性能,通过前期试验确定了状态反馈控制律的增益 $k_1=0.5,k_2=0.5$ 。

如图 7a 所示,无力矩陀螺主动控制系统作用时,拖拉机遇到障碍物后侧倾角逐渐增加,但其曲线并不沿同一斜率上升。这是由于拖拉机前摇摆桥的存在,导致侧翻过程中侧倾轴线逐渐由摇摆桥铰接点和坡下侧后轮接地点的连接线转移至坡下侧前后轮胎接地点的连接线,引起整机侧倾角和角速度发生变化,符合拖拉机实际侧翻规律。而在有力矩陀螺主动侧翻控制时,由于陀螺系统输出力矩和重力的共同作用,侧倾角上升缓慢,直至路面起伏导致的侧翻能量消耗殆尽,侧倾角开始迅速下降,轮胎与地面重新接触,整机恢复稳定。由图 7c 可知,无力矩陀螺控制时,整机遇到障碍后 SI 呈发散趋势,拖拉机发生侧翻,主要侧翻历程如图 8 所示。有力矩陀螺主动控制时,在 SI 小于控制阈值 20 时,陀螺转子开始进动,产生供拖拉机侧翻回稳的输出力矩,SI 逐渐上升直至拖拉机到达稳定状态,主要侧翻回稳历程如图 9 所示。试验表明,提出的基于单框架控制力矩陀螺的拖拉机主动侧翻控制系统可有效实现拖拉机侧翻回稳。

4.2 控制算法有效性验证

由于拖拉机斜坡行驶环境的多样性、复杂性,车

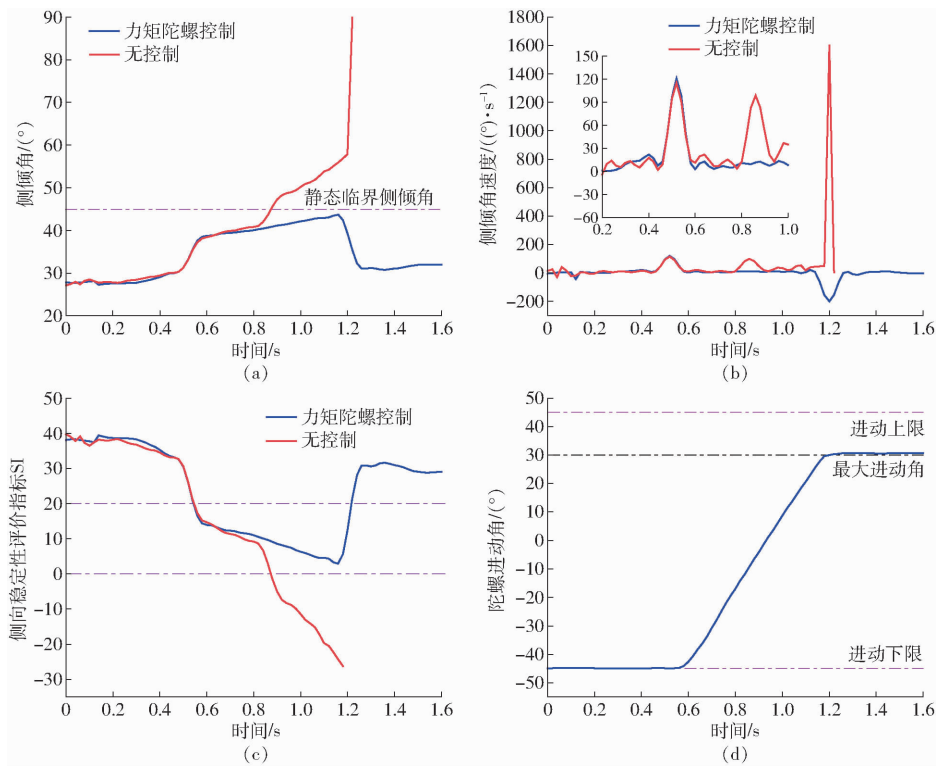


图 7 力矩陀螺主动控制系统极限态侧翻回稳效果

Fig. 7 Limit state rollover control effect of moment gyroscope active control system

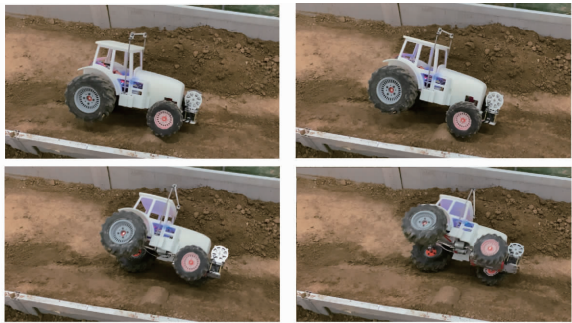


图 8 无控制组拖拉机侧翻主要历程

Fig. 8 Main course of tractor rollover of uncontrolled group



图 9 力矩陀螺控制组拖拉机侧翻回稳主要历程

Fig. 9 Main course of control moment gyroscope controlling tractor rollback stabilization

速、障碍物形状、高度等不同工况，导致侧翻风险程度不一。为验证提出的反步法控制器在不同侧翻危险程度下的控制效果，在高 0.03 m 半圆弧障碍路况下开展了行驶速度为 0.13、0.28、0.38 m/s 的侧翻控制试验。

如图 10a 所示，拖拉机在经过障碍物时，SI 出现了两次不同程度起伏，分别表示前、后轮通过障碍物时的侧翻过程。同一坡度和障碍条件，低速行驶工况下，前轮通过障碍时，由于摇摆桥的作用，SI 未达到控制阈值，陀螺转子未开展侧翻控制动作。而后轮经过障碍物时，SI 超出侧翻阈值，存在一定侧翻风险，因此陀螺转子进行了短期缓慢进动，使得稳定性评价指标较无控制组更高，说明主动控制系统减轻了侧翻风险。

在行驶速度增加后，后轮经过障碍物引起拖拉机侧倾角、角速度迅速增加。如图 10b 所示，无控制组 SI 迅速降低至负值，说明拖拉机发生了侧翻事故。而有力矩陀螺系统主动侧翻控制时，可改变 SI 降低趋势，促使其增加至安全范围内，说明力矩陀螺主动侧翻回稳系统可以改变拖拉机侧翻趋势，保障装备及人员安全。

如图 10c 所示，进一步增加拖拉机速度，拖拉机前后轮越过障碍时，SI 均达到了控制阈值，整机存在侧翻风险。与无控制组相比，力矩陀螺控制组拖拉机前轮通过障碍时，陀螺转子进行了小角度、低速度进动，使得 SI 大于无控制组，整机稳定性更高。在后轮通过障碍物时，由于没有摇摆桥的作用，侧翻风险程度更高，因此力矩陀螺系统展开了大角度、高速度进动，实现了整机侧翻回稳。

以上试验结果表明，本文提出的控制算法可根

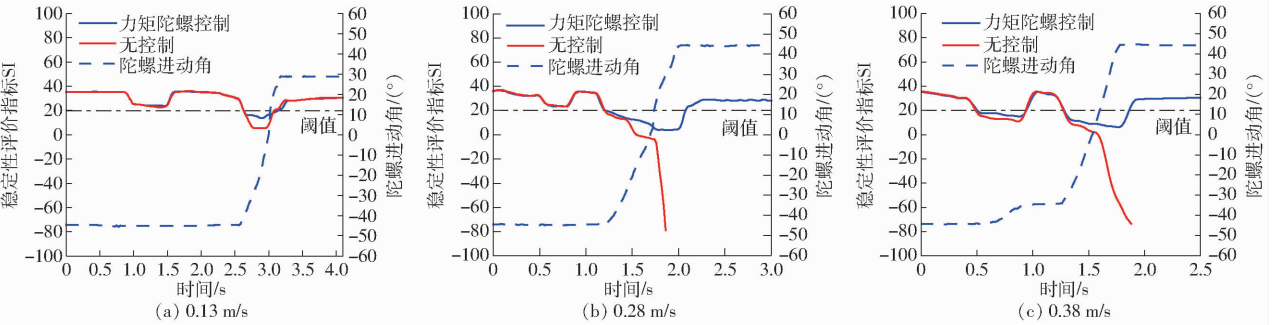


图 10 不同行驶速度下力矩陀螺系统侧翻回稳控制效果

Fig. 10 Effectiveness of rollover control with moment gyroscope system at different driving speeds

据侧翻危险程度,定时、定量供给主动侧翻回稳所需控制力矩,有效完成主动侧翻回稳控制。

4.3 极端工况下侧翻控制有效性验证

为进一步验证主动控制系统的有效性,针对侧翻过程中整机质心垂向投影越过侧倾轴线的极端工况,在高 0.05 m 三角障碍路面上开展了行驶速度为 0.30 m/s 的控制试验,试验结果如图 11 所示。

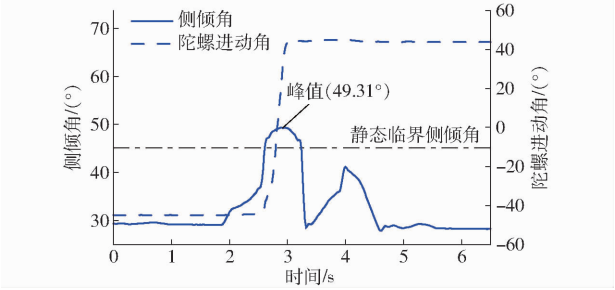


图 11 质心垂向投影越过侧倾轴线后的侧翻控制效果

Fig. 11 Effectiveness of rollover control after center of gravity crossed lateral tilt axis

此工况下,拖拉机坡上侧前轮经过障碍时,摇摆桥不能以理想速度及时运动至极限位置,阻挡了轮胎向前滚动,主机体受到侧倾力矩开始发生侧翻。在此过程中主机体侧倾角峰值达到 49.31°,较静态临界侧倾角增大了 9.58%,这说明提出的基于力矩

陀螺的拖拉机主动侧翻控制系统在质心越过侧倾轴线,重力无法为侧翻回稳作正功时,依然可以达到侧倾回稳控制目的。试验结果再一次证明了本文提出的控制系统可在极端危险工况下开展侧翻回稳控制,拓宽拖拉机安全行驶坡度范围。

5 结论

(1)利用欧拉-拉格朗日方程构建了拖拉机单侧轮胎离地侧翻过程的侧倾方向动力学模型,提出了基于单框架控制力矩陀螺的拖拉机主动侧翻回稳系统,可为拖拉机极限侧翻回稳提供输出力矩。

(2)针对力矩陀螺主动侧翻回稳系统陀螺转子进动角速度控制需要,基于反步设计法推导了状态反馈控制律。试验结果表明,提出的控制方法可根据拖拉机侧翻危险程度定量调整进动角速度,有效完成不同工况下的主动侧翻回稳控制。

(3)开展了当拖拉机质心垂向投影越过整机侧翻轴线,重力为侧翻回稳作负功工况下的侧翻控制试验。结果表明,提出的力矩陀螺主动侧翻控制系统可在质心垂向投影越过侧倾轴线的极端工况下进行回稳控制,拓宽拖拉机安全行驶坡度范围,理论上可有效保障装备和人员安全。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] RONDELLI V, CASAZZA C, MARTELLI R. Tractor rollover fatalities, analyzing accident scenario[J]. Journal of Safety Research, 2018,67:99–106.

[3] FRANCESCHETTI B, RONDELLI V, CAPACCI E. Lateral stability performance of articulated narrow-track tractors[J]. Agronomy, 2021,11(12):2512.

[4] LYSYCH M N. A study of the static lateral stability of a tillage machine-tractor unit on a virtual stand[J]. Journal of Physics. Conference Series, 2020,1515(4):42033.

[5] NGUYEN N V, HARADA Y, TAKIMOTO H, et al. Measurement of static lateral stability angle and roll moment of inertia for agricultural tractors with attached implements[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2020,26(1):15–29.

[6] WATANABE M, SAKAI K. Numerical analysis of steering instability in an agricultural tractor induced by bouncing and sliding[J]. Biosystems Engineering, 2020,192:108–116.

[7] LATORRE-BIEL J, BALLESTEROS T, ARANA I, et al. Development of an inexpensive rollover energy dissipation device to improve safety provided by ROPS[J]. Biosystems Engineering, 2019,185:88–102.

- [8] AYERS P D, KHORSANDI F K, POLAND M J, et al. Foldable rollover protective structures: universal lift-assist design[J]. *Biosystems Engineering*, 2019,185:116 – 125.
- [9] GUZZOMI A L, RONDELLI V, CAPACCI E. Operator protection in rollover events of articulated narrow track tractors[J]. *Biosystems Engineering*, 2019,185:103 – 115.
- [10] LIU B, KOC A B. Safe driving: a mobile application for tractor rollover detection and emergency reporting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013,98:117 – 120.
- [11] 杨福增, 牛瀚麟, 孙景彬, 等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1):414 – 422.
YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022,53(1):414 – 422. (in Chinese)
- [12] SUN J, MENG C, ZHANG Y, et al. Design and physical model experiment of an attitude adjustment device for a crawler tractor in hilly and mountainous regions[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2020,7(3):466 – 478.
- [13] SONG Z, WANG L, LIU Y, et al. Actively steering a wheeled tractor against potential rollover using a sliding-mode control algorithm: scaled physical test[J]. *Biosystems Engineering*, 2022,213:13 – 29.
- [14] KIM H W, JUNG S. Design and control of a sphere robot using a control moment gyroscope actuator for navigation[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020,18(12):3112 – 3120.
- [15] THORNTON B, URA T, NOSE Y, et al. Zero-G class underwater robots: unrestricted attitude control using control moment gyros[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007,32(3):565 – 583.
- [16] ZHU Y, GAO Y, XU C, et al. Adaptive control of a gyroscopically stabilized pendulum and its application to a single-wheel pendulum robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015,20(5):2095 – 2106.
- [17] 王璐, 郭毓, 吴益飞. SGCMGs 驱动的挠性航天器有限时间自适应鲁棒控制[J]. *自动化学报*, 2021,47(3):641 – 651.
WANG Lu, GUO Yu, WU Yifei. Finite-time adaptive robust control for SGCMGs-based flexible spacecraft[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021,47(3):641 – 651. (in Chinese)
- [18] 雷拥军, 袁利, 王淑一, 等. SGCMG 系统的力矩指令调节及动态分配操纵方法[J]. *宇航学报*, 2019,40(7):794 – 802.
LEI Yongjun, YUAN Li, WANG Shuyi, et al. A steering method with torque command adjustment and dynamic distribution for single-gimbal control moment gyro systems[J]. *Journal of Astronautics*, 2019,40(7):794 – 802. (in Chinese)
- [19] ZHANG Y, MU C, LU M. Data-based feedback relearning algorithm for robust control of SGCMG gimbal servo system with multi-source disturbance[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(2):225 – 236.
- [20] LI H, ZHENG S, NING X. Precise control for gimbal system of double gimbal control moment gyro based on cascade extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017,64(6):4653 – 4661.
- [21] PALRAJ M, RAJAMANICKAM P. Motion control of a barge for offshore wind turbine (OWT) using gyrostabilizer[J]. *Ocean Engineering*, 2020,209:107500.
- [22] LI B, ZHANG X, WANG J, et al. Anti-roll characteristics of marine gyrostabilizer based on adaptive control and hydrodynamic simulation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022,10(1):83.
- [23] TOWNSEND N C, SHENOI R A. Control strategies for marine gyrostabilizers[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014,39(2):243 – 255.
- [24] ZHENG X, ZHANG H, YAN H, et al. Active full-vehicle suspension control via cloud-aided adaptive backstepping approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020,50(7):3113 – 3124.
- [25] CUI R, GUO J, MAO Z. Adaptive backstepping control of wheeled inverted pendulums models[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015,79(1):501 – 511.
- [26] WANG X, WANG W, LI L, et al. Adaptive control of DC motor servo system with application to vehicle active steering[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019,24(3):1054 – 1063.
- [27] LIU J. Development of stability index for tractors and its application in protective structure deployment[D]. Colorado: Colorado State University, 1998.
- [28] 朱勇华, 侯建勋, 周一鸣. 研究拖拉机动态翻倾特性的模型试验法[J]. *农业机械学报*, 1986,17(3):17 – 23.
ZHU Yonghua, HOU Jianxun, ZHOU Yiming. A model test method in dynamic performance of tractor overturning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1986,17(3):17 – 23. (in Chinese)