

农用拖拉机侧翻保护与防侧翻控制关键技术研究综述

尹成强¹, 高洁¹, 徐广飞², 宋健¹, 解福祥¹, 吴小进¹, 王凯¹

(1. 潍坊学院机械与自动化学院, 潍坊 261061; 2. 聊城大学机械与汽车工程学院, 聊城 252059)

摘要: 拖拉机在农业生产中已得到广泛应用, 但频发的拖拉机侧翻事故已成为农业安全生产的焦点问题之一。拖拉机侧翻具有突发性和快速性, 目前缺少关于拖拉机侧翻研究的可靠理论支撑和技术保障。该文重点综述了国内外与拖拉机侧翻动力学特征描述相关的研究成果, 回顾了拖拉机侧翻机理和侧翻影响因素的研究进展, 总结了侧翻保护装置研究基础与技术成果, 系统梳理了侧翻风险评价方法研究成果及防侧翻系统设计的研究进展, 总结了适用于侧翻机理分析和理论验证的试验方法。展望了拖拉机防侧翻及侧翻保护的研究重点和发展方向: 自适应侧翻动力学模型及侧翻风险评价模型构建; 多形式的主动防侧翻执行机构设计; 考虑不同驾驶模式的防侧翻多目标协同控制研究; 侧翻保护装置与主动防侧翻预警的融合发展。研究内容可为拖拉机侧翻基础研究和产品研发提供参考。

关键词: 拖拉机; 控制; 防侧翻; 侧翻风险评价; 侧翻保护装置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403121

中图分类号: S219

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0001-11

尹成强, 高洁, 徐广飞, 等. 农用拖拉机侧翻保护与防侧翻控制关键技术研究综述[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 1-11. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403121

<http://www.tcsae.org>

YIN Chengqiang, GAO Jie, XU Guangfei, et al. Key technologies on the rollover protection and anti-rollover control for agricultural tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 1-11. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403121 <http://www.tcsae.org>

0 引言

拖拉机作为农业生产中的核心动力机械, 其保有量持续增长。但受复杂多变的田间环境影响, 拖拉机的作业稳定性相对较差, 尤其是在斜坡行驶时, 侧翻风险较高^[1], 拖拉机侧翻事故已成为农业生产中的一大威胁。2002—2012年期间意大利发生的817起拖拉机事故中有25.1%是由翻车造成的^[2]。韩国2021年共发生44302起与农业机械相关的事故, 其中翻车和侧翻事故高达11683起^[3]。日本每年约有70名驾驶员死于拖拉机事故, 其中因拖拉机侧翻事故导致死亡的人数占比高达65%~80%^[4]。西班牙农业生产伤亡事故的70%与拖拉机侧翻有关^[5], 葡萄牙每年有一百多起因农用拖拉机倾覆而导致的死亡事故^[6-7]。美国农业生产事故中, 32%的死亡和6%的非致命伤害与拖拉机有关, 其中拖拉机侧翻是主要原因^[8]。中国作为多丘陵国家, 山区耕地约占全国耕地面积的三分之二^[9], 拖拉机侧翻事故的致残率同样不容忽视。

拖拉机侧翻是指车辆绕纵轴发生90°或更大旋转, 多种因素都可能导致侧翻事故, 例如地形变化(如雨水冲蚀, 啮齿动物大的洞穴等)、过快的作业速度, 甚至在相对安全的斜坡上, 驾驶员为避让障碍物而进行的转向操作都可能引发侧翻。侧翻发生的根本原因是拖拉机

重心在支撑平面上的投影落在其支撑多边形之外。如果安装防侧翻预警系统或主动防侧翻系统, 大多侧翻事故是可以避免的。但并非所有的侧翻都能被预防, 因此, 安装侧翻保护装置是提高拖拉机安全性能的重要措施。

1 拖拉机侧翻研究的关键问题

目前, 拖拉机侧翻研究包括拖拉机侧翻特性分析、侧翻预警和主动防侧翻控制的机理与方法, 以及侧翻保护装置设计的理论基础与技术。拖拉机侧翻问题相关研究内容的逻辑关系如图1所示。

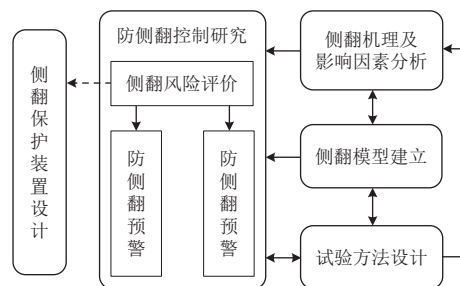


图1 农用拖拉机侧翻保护与防侧翻控制关键技术逻辑关系
Fig.1 Logical relationship of key technologies of rollover protection and anti-rollover control for agricultural tractors

本文对国内外关于拖拉机侧翻动力学特征描述的研究成果进行梳理, 回顾拖拉机侧翻机理和关键影响因素分析的研究进展, 总结侧翻保护装置的研究基础与技术成果, 系统梳理拖拉机侧翻风险评价方法的研究成果及防侧翻系统设计的研发进展, 综述拖拉机侧翻机理分析和理论验证的试验方法, 对侧翻风险评价、主动防侧翻

收稿日期: 2024-03-19 修订日期: 2024-07-13

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2023MF078)

作者简介: 尹成强, 博士, 副教授, 研究方向为农机导航及拖拉机稳定性控制。Email: shijycq@163.com

预警和控制的研究趋势进行展望, 以期为农用拖拉机稳定性基础研究和安全装置研发提供参考。

2 侧翻模型研究现状

侧翻模型是拖拉机侧翻机理、防侧翻预警和主动防侧翻控制的基础, 然而, 由于田间作业环境的多变性以及拖拉机侧翻过程的复杂性, 常规道路车辆动力学分析方法并不完全适用于拖拉机, 因此, 构建一个准确且实用的拖拉机模型是一项充满挑战的工作^[10]。

动力学理论是研究拖拉机侧翻特性的数学基础, 数值模拟是建立侧翻模型的基本手段^[11], 牛顿力学、拉格朗日方程、能量动力学方程是常用的分析和建模方法。DAVIS 等^[12-13] 较早建立了拖拉机侧翻预测数学模型, 并基于该模型验证外力和外力矩对防侧翻的控制效果。FENG 等^[14] 在斜坡、颠簸和转弯工况下, 采用牛顿定律和拉格朗日方程建立拖拉机侧翻模型并分析了侧翻过程的横向动力学特征。AZIMOV 等^[15] 建立了四轮拖拉机在棉田不规则路面行驶及转弯过程的广义数学模型。ZENG 等^[16] 使用微分方程和欧拉运动方程建立拖拉机侧翻模型, 并利用能量对称方法处理数学模型的不确定性。另外, 矢量方法也是描述车辆三维运动特征的常用方法, 如 FRANCESCHETTI 等^[17] 利用矢量方法建立了铰接式拖拉机侧翻模型, 将拖拉机视为由两个不同质量和几何形状的刚体组成, 通过假设虚拟支点构建拖拉机前后车身之间的旋转。

上述针对拖拉机侧翻过程的运动分析和建模方法大多将整个拖拉机视为一个刚体, 忽略了轮胎变形及内部受力的约束, 无法完全表征拖拉机的动态运动规律, 很难精确描述拖拉机侧翻过程的动力学特征和参数变化, 所描述的姿态变化和失稳机理不够全面, 并且对外部干扰、环境变化等不具有鲁棒性。

CHISHOL 等^[18] 建立了侧翻过程中拖拉机与地面多点接触的力和位移方程, 分析了关键部件变形的动态特征。ARJUNKUMAR 等^[19] 建立了拖拉机非线性轮胎模型和系统动力学模型, 分析制动和不同载荷对稳定性的影响。FRANCESCHETTI 等^[11] 从能量角度建立了通用拖拉机侧翻模型, 用于预测碰撞时的能量交换方式。LYSYCH 等^[20] 针对前置和后置农具的使用工况, 分析了拖拉机-旋耕犁单元的倾角变化而引起的质量重分布特征及对横向稳定性的影响。考虑拖拉机动力学系统非线性特性, 及拖拉机与作业环境相互作用、相互耦合的动态特征, 采用动力学建模方法能够更客观描述拖拉机处于不同侧翻状态的运动特征和规律, 但由于引入了更多的时变参数, 导致侧翻模型使用过程中的计算量增加。

综上, 建立一个能够全面表征拖拉机侧翻特征的数学模型是一项艰巨的任务, 建模过程中往往需要假设一些前提条件, 例如建立用于结构参数优化的静态模型和运动学模型时, 忽略拖拉机前端旋转和轮胎变形、重心位移等。防侧翻控制系统设计时, 在考虑拖拉机动力学耦合因素的基础上进行适当假设和简化, 综合引入转向、

悬架、防侧翻执行机构、作业环境等因素, 根据牛顿定律和拉格朗日分析方法建立拖拉机侧翻动力学模型。

3 侧翻机理及影响因素研究现状

导致拖拉机侧翻的因素很多, 既包括拖拉机结构参数, 如宽度、质量或重心位置等, 又与拖拉机运动特征参数相关, 比如速度、转弯半径, 侧向加速度等, 还有与作业环境相关, 如路面坡度, 障碍物高度等, 引起拖拉机受力变化的自身或外部环境参数都是值得深入研究的影响因素。

LI 等^[21-23] 研究表明随着轮距比和轴距比的增大, 拖拉机侧翻的可能性显著降低, 前后轮轮胎、配重和后轮距对拖拉机稳定性的影响较大; 对拖拉机坡上车轮的地面反作用力的测量和分析表明, 前端配重对坡上前轮胎的接触面影响显著, 并且随着路面粗糙度的增加, 前轮胎类型的重要性逐渐增加; 对于履带拖拉机, 适当增加履刺高度、履刺数目或增大履带与地面的接触面积, 可以提高履带车辆的附着性能^[24-25]。

田间环境对拖拉机稳定作业产生重要的影响。QIN 等^[4] 对轮式模型车的试验结果表明, 路面坡度角对倾覆稳定性有明显影响, 并且坡度角和路面粗糙度的增加对后轴的影响大于前轴。张兴局等^[26] 的仿真和试验结果表明履带拖拉机在黏土、砂壤土、干沙土的最大爬坡角度依次减少, 验证了土质对拖拉机附着能力的影响。路面坡度是影响拖拉机侧翻的重要因素之一, 因为坡度角的大小直接影响拖拉机重心位置。尽管对路面的粗糙度和土质的检测存在一定难度, 但考虑这些因素对拖拉机横向稳定性的影响将促进防侧翻控制相关理论和技术的完善。

作业速度是影响拖拉机作业质量和横向稳定性的重要因素^[27-28], JANG 等^[3,29] 基于建立的拖拉机 3D 模型, 分别设计了 8 种斜坡坡度、3 种障碍物形状以及 4 种障碍物高度的组合仿真环境研究了拖拉机及拖拉机-农具在不同工况下的侧翻临界速度。HWANG 等^[30] 通过理论分析和计算得到拖拉机发生侧翻的临界作业速度。过快的作业速度将导致较大的离心力, 特别拖拉机在进行急转弯操作时, 合理控制速度是确保稳定和安全的 key 措施。

质心位置是导致拖拉机侧翻的一个重要因素, 尤其对于坡面作业的拖拉机其影响更大, 整车重心在支撑平面上的投影落在拖拉机支撑多边形之外时便会发生侧翻^[31]。负载和地面坡度会改变拖拉机的重心高度和位置, 当重心高度增加时, 即使产生小角度倾斜, 也将产生较大的侧倾力矩。KANG 等^[8] 采用 RecurDyn 软件确定不同负载下的临界侧倾角和横向稳定性。BAKER 等^[32] 研究了拖拉机前、后体质量对侧翻的影响, 仿真结果表明后体重心位置对拖拉机稳定性起决定性作用。CHOI 等^[33] 基于拖拉机-收获机数学模型分析了重心位置变化对侧翻稳定性的影响。

附带农具的拖拉机在斜坡作业过程中发生侧翻的可能性增加, NGUYEN 等^[34] 测试了 2 台拖拉机和 2 台旋耕机的侧翻扭矩, 稳定性分析表明旋耕机增大了侧翻第

一阶段的侧倾角而减少第二阶段的侧倾角。农机具的几何参数、动态特性以及与拖拉机的连接形式，会对拖拉机的侧翻特性产生不同的影响。此外，在作业过程中，农机具与田间的作用力关系更为复杂，因此，研究拖拉机-农具组合的建模和分析方法对深入探究侧翻机理和侧翻特性具有重要意义。

由以上研究结果可以看出，拖拉机稳定性受自身结构、运动状态和作业环境等多种因素的影响，这些因素间又相互作用，共同决定拖拉机的侧翻风险等级。上述研究成果为拖拉机结构设计和防侧翻控制提供了重要的理论参考，但对稳定性因素分析中未涉及驾驶员不当操作、碰撞和刮扯等，因为人工驾驶模式下的转向或作业速度对拖拉机瞬时动态特性产生直接影响，另外，拖拉机单侧后轮的碰撞或犁具受地下埋藏物的拉扯同样也会导致拖拉机重心失衡。

4 侧翻保护装置研究现状

拖拉机不同于道路车辆，其侧翻发生具有突发性和快速性，即使经验丰富的操作人员也很难在极短时间内做出正确的防侧翻操作。因此，完全避免拖拉机侧翻事故极为困难。为降低侧翻事故对人员造成的伤害，正确使用侧翻保护装置和安全带被视为最有效的保护和逃生方法。

侧翻保护装置能够在拖拉机发生倾覆时吸收与地面碰撞产生的能量，为驾驶员提供安全区域，也能够避免或减少因拖拉机侧翻和连续翻滚对驾驶员造成的伤害^[35]，通常，侧翻保护装置有支架型和驾驶室型^[36]，而保护装置的高度对保护效果具有决定性作用。SUN 等^[37]验证了侧翻保护装置临界高度对不同类型拖拉机的适用性，并开发了侧翻保护装置高度设计的应用程序^[38]。目前，基于侧翻保护装置的被动安全技术已形成国际标准，应用于不同类型拖拉机^[39-40]。FRANCESCHETTI 等^[41]对 22 辆不同参数的窄体拖拉机进行侧翻试验，分析了前置保护支架和驾驶室的防护效果，结果表明：驾驶室型保护装置降低了侧向稳定性，并且过大的驾驶室质量和惯性会产生更大的侧翻破坏能量。因此，通过采用新材料和新技术减轻驾驶室质量并降低其高度，可以有效改善拖拉机的侧向稳定性。

尽管侧翻保护装置具有显著的防护效果，但未被广泛接受和使用，视野不开阔和高空障碍物的存在是用户不愿使用的主要原因之一^[42]。后置可折叠保护支架的出现解决了该问题。早期可折叠侧翻保护支架的研究主要是从理论和技术层面对机械结构进行改进^[36,43]，涉及增强保护机构的机械强度、改进对拖拉机稳定性产生影响的一些结构参数^[41,44]。然而，因可折叠保护支架失效导致的伤亡人数却急剧增加，主要原因在于，升起和降下保护架的过程既耗时又费力，导致操作人员在通过障碍物后，通常会将保护支架处于折叠状态^[45]。

为解决升降可折叠侧翻保护支架耗时费力问题，替代人工操作的自动升降方案相继被提出，如 OJADOS 等^[46]设计了可折叠侧翻保护支架自动控制系统，该系统具有

自动和手动两种控制模式，自动模式下控制系统能够根据拖拉机的侧翻风险自动升降保护架，并且在侧翻风险级别高时会将拖拉机作业位置信息发送给应急救援人员。POWERS 等^[47]开发了一种可自动部署的后置侧翻保护系统，能够根据估计的侧翻风险自动升降保护支架。BALLESTEROS 等^[48]开发了一种用于窄体拖拉机的可自动展开的前置保护装置，通过加装充气机来增加保护支架的高度和上端宽度。然而，有研究认为自动侧翻保护装置的成本高且不易安装，而为可折叠支架设计辅助装置不仅可行，并且代表了一种更为先进的技术^[40]。KHORSANDI 等^[45,49]认为确定保护支架的质量和质心位置对设计辅助装置至关重要，并且开展了保护支架升降所需扭矩的理论研究。AYERS 等^[40]采用气弹簧提供辅助动力，避免了操作可折叠侧翻保护装置时出现的俯仰风险，同时基于人机工程学原理，通过安装辅助弹簧和改变操作手柄位置提出了一种升力辅助结构方案^[50]。

由以上研究成果可以看出，拖拉机侧翻保护装置研发已取得了丰硕成果，固定安装的保护装置已十分成熟；而全自动支架的升降完全依赖于系统对侧翻风险的评估，如果基于侧翻风险评价设定的支架控制阈值不恰当，可能会导致保护支架频繁升降，影响驾驶员作业甚至会增加潜在的安全风险；针对可折叠支架辅助装置的研究，忽略了对可折叠支架使用模式的设计，自动与半自动技术的引入对山地拖拉机和果园拖拉机更具适用性，如果可折叠保护支架能够实现自动升起、手动按键降下功能，则可以在特殊作业环境下为驾驶员提供灵活的操作空间和宽阔的视野，并且能够充分发挥可折叠支架的保护功能。

5 防侧翻控制研究现状

拖拉机侧翻保护装置能够有效降低侧翻事故导致的伤亡率，但是它的设计思想仅是为驾驶员提供相对安全的逃生空间和减少对车辆的损害，而装置自身不足以防止拖拉机侧翻。根据安全工程理念，防止拖拉机侧翻或减少侧翻发生的概率对提高作业安全具有重要意义。因此，侧翻预警系统和主动防侧翻控制是解决侧翻问题的更有效方案，该研究主要涉及拖拉机侧翻风险评价指标设定、防侧翻预警系统设计和主动防侧翻系统设计等。

5.1 侧翻风险评价指标

侧翻风险评价指标是判断拖拉机姿态、评价侧翻风险程度的重要依据，也是实施侧翻预警和主动控制的基础，精确反映拖拉机实时状态是侧翻风险评价指标设计的基本要求^[51]。同时，与侧翻风险评价指标相对应的阈值设定，在侧翻预警和主动防侧翻控制中发挥着同等重要的作用，不当的阈值设定会导致侧翻预警和主动控制的频繁动作或完全失效。

侧翻风险评价指标分为静态指标和动态指标两大类，静态指标是纯几何指标，主要涉及拖拉机的结构参数，如轮距与质心高度之比，而不考虑车辆的动态特性、地形倾斜及受力变化，在侧翻预警和主动控制中该类指标经常被忽略。动态指标主要从拖拉机几何稳定裕度、能

量稳定裕度和接触力稳定裕度三个角度进行设定。目前,动态指标包含拖拉机的运动参数,如侧倾角、侧向加速度、质心位置等,但有些只根据与拖拉机完全侧倾相关的稳定性参数来定义^[52-53],仅适用于对拖拉机完全侧翻可能性的评价。

为评估斜坡作业条件下拖拉机的侧翻风险等级,LIU等^[54]提出了一种通用的侧翻风险评价指标,通过选择与稳定性相关的参数,来比较拖拉机实时状态与其设定阈值的大小关系。设定阈值通常作为防侧翻预警和主动控制介入时机的基本依据,侧翻阈值的设定可采用基于拖拉机模型的数值计算、仿真或估计等方法。LI等^[55]通过拖拉机侧翻试验,利用拖拉机横向加速度数据,根据鲁棒卡尔曼滤波和基于遗传算法的反向神经网络提出了拖拉机侧翻预警阈值的估计方法。LIU等^[56]认为离心力是造成拖拉机斜坡转弯失稳的关键因素,并分别设计了基于转弯速度的静态横向稳定性评价指标和基于车辆侧倾角和路面坡度的综合稳定性评价指标。

对于在斜坡地形上作业的拖拉机,其坡上轮胎比坡下轮胎更容易受到干扰,并且坡上轮胎与地面分离时极易发生侧翻,QIN等^[4]通过分析坡上前后轮轮胎实时垂直载荷与稳定状态垂直载荷的关系设计侧翻风险评价指标;HE等^[57]根据拖拉机处于失稳边界时的力矩变化特征设计了横向稳定性评价指标,该指标以拖拉机处于极限失稳位置时,平行于底盘方向的重力分力产生绕侧翻轴的力矩与垂直于底盘方向的分力产生的绕侧翻轴的力矩的大小关系定义拖拉机的侧翻风险。LIU等^[58]设计的拖拉机稳定性监测系统中,根据拖拉机侧倾角变化率、俯仰角变化率及转弯时速对侧翻风险进行综合评价。AHMADI^[59]基于拖拉机侧翻模型,设计了包含拖拉机质心高度、侧向加速度和车轮-地面摩擦系数的侧翻失稳性能指标。CASAZZA等^[60]利用侧倾角、俯仰角和转向速度设计了拖拉机稳定性评价指标,研究拖拉机-农具组合的重心、质量、转向角速率、速度等对稳定性的影响。

对自身和环境状态的精确感知是智能农机在复杂非结构化农田环境中安全可靠作业的根本^[61],也是对拖拉机侧翻风险进行评价的首要条件。由于侧翻风险评价指标中涉及一些不易测量或测量成本较高的动态参数,为改善动态侧翻指标可测量性差问题,神经网络、卡尔曼滤波和最小二乘法被用于在线估计关键状态变量^[62-63,55]。DENIS等^[64]基于横向荷载转移率提出了拖拉机侧翻风险评价方案,通过反步法估计拖拉机侧滑角和地形坡度,实时更新地形和拖拉机参数,并引入拖拉机质心高度和总质量变化。

通过对现有拖拉机侧翻风险评价的研究成果可以看出,基于拖拉机侧倾角、速度和质心位置等关键状态参数构建的评价指标,能够对拖拉机的失稳状态实现比较准确的估计,并有效划分侧翻风险等级,这些评价指标在常规侧翻工况下表现出良好的适用性。然而,目前的侧翻风险评价体系对特殊工况或突发极限失稳状态,尚缺乏有效的监测手段和评价方法。

5.2 防侧翻预警系统

基于侧翻风险评价指标和预警控制阈值,主动防侧翻系统能够在拖拉机达到临界侧翻条件时,向操作人员发出提示或直接对拖拉机实施主动防侧翻控制,是降低或避免侧翻风险有效的解决方案,防侧翻系统包含预警系统和主动防侧翻控制系统。NICHOL等^[52]在拖拉机质心附近安装加速度计,根据准静态模型预测拖拉机的侧翻风险等级,并以条形图的形式提醒驾驶员。TARIGHI^[65]开发了一款拖拉机防侧翻预警系统,为驾驶员提供与路面倾角及牵引机稳定性相关的提示信息,以降低拖拉机产生侧翻与后倾的风险。LIU等^[58,66]采用智能手机内部传感器、陀螺仪和GPS(global positioning system)检测拖拉机运动状态参数,利用iphone和ipad处理并显示拖拉机侧倾角、俯仰角及整体稳定性指标,并在拖拉机处于危险状态时发出预警提示和救援信号。

防侧翻预警系统能够基于拖拉机的实时状态评估侧翻风险,并发出相应的预警信息。然而,目前对于预警阈值的设定以及驾驶员的响应机制尚缺乏深入研究。鉴于侧翻工况的多样性,驾驶员仅依赖接收到的预警信息,往往难以采取适当的防侧翻措施。

5.3 主动防侧翻系统控制

尽管拖拉机配备了防侧翻预警系统,但接近一半的侧翻事故仍然无法仅通过驾驶员的操作来预防^[67],因为侧翻发生的时间很短,即使经验丰富的驾驶员也很难在极短时间内发现预警信号并做出正确的防侧翻操作,且在特殊工况下通过驾驶员的操作不足以防止拖拉机侧翻。主动防侧翻系统(图2所示)能够根据拖拉机的实时状态,精准、快速地启动防侧翻功能,可进一步降低拖拉机侧翻概率。主动防侧翻系统不仅能够准确识别和判断拖拉机的状态,还具备提供抗侧倾扭矩的能力。作业过程中,田间环境和拖拉机的姿态参数通过传感器传至防侧翻控制器,防侧翻控制器进行数据处理并评估侧翻风险。根据预先设定的控制策略,控制器输出相应的控制信号调整防侧翻执行机构,防侧翻执行机构是提供抗侧倾扭矩的主要来源,防侧翻控制系统通过抗侧倾扭矩输出来改变拖拉机的侧翻趋势。

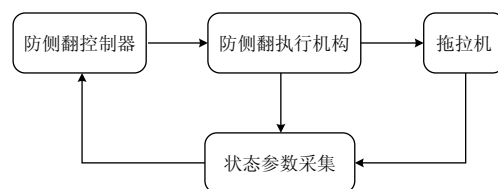


图2 拖拉机防侧翻系统架构

Fig.2 System architecture of rollover protection for tractors

目前主动防侧翻技术主要通过控制转向系统、附加动能装置、制动系统以及姿态调整装置等防侧翻执行机构改变拖拉机的侧翻趋势。不同防侧翻执行机构有其各自特点,各类防侧翻执行机构性能对比分析如表1所示。

转向控制作为农业机械自动导航的基础^[68],是发展比较成熟的自动驾驶技术之一,也是车辆防侧翻控制中

经常采用的方法。HE 等^[57] 基于滑模控制方法设计了前轮主动转向防侧翻控制系统，通过改变转向角来增加拖拉机的抗侧倾扭矩。秦嘉浩等^[69] 采用动量飞轮取代传统的拖拉机前端配重，基于旋转刚体加速时可提供防侧翻力矩的原理设计了拖拉机防侧翻控制系统。王龙龙等^[70] 基于单框架控制力矩陀螺设计了拖拉机主动侧翻回稳控制系统。基于建立的拖拉机侧倾角和胎压之间的数学关系，康杰等^[71] 通过 4 个车轮胎压值判断拖拉机侧翻风险，并通过转向和减速熄火操作降低侧翻风险。

表 1 防侧翻执行机构性能对比分析
Table 1 Performance comparative analysis of anti-rollover actuator

代表性机构 Typical actuator	优势 Superiority	劣势 Weakness
前轮转向 制动	易于安装，控制简单 控制简单	提供的抗侧倾扭矩有限 适合的工况少
附加动能 姿态调整	不需改装底盘，安装简单 稳定性好，对作业质量影响小	对控制技术要求高 成本较高，调整速度慢

另外，针对山地拖拉机的姿态优化与控制，也是提高拖拉机防侧翻能力的有效手段^[72]。WANG 等^[73] 设计了适用于微型履带拖拉机的液压差高机构，能够实现在不大于 23° 的坡地上对拖拉机姿态的自动调整；SUN 等^[74] 基于平行四杆机构和双车架机构，设计了具有遥控功能的全向姿态调整山地履带拖拉机，可实现对机身横向和纵向姿态的调整，并具备农具坡地自适应仿形作业功能。张锦辉等^[75] 利用左右偏心轮设计了丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统，基于神经网络 PID (proportional integral derivative) 方法设计了姿态调整控制器。刘平义等^[76] 设计了一种丘陵山区自适应调节底盘，通过调节悬架悬臂夹角实现对底盘的补偿调平，可实现对不同路面的仿行行走。彭贺等^[77] 针对轮式拖拉机设计了四点液压调平系统，采用模糊 PID 方法实现动态自调平控制。刘国辉等^[78] 建立半主动悬架拖拉机模型，基于 BP(back propagation) 神经网络设计了车身姿态控制器。REZA 等^[79] 设计了最优区间 2 型分数阶模糊 PID 控制器实现对拖拉机主动悬架的控制。张开兴等^[80] 研发了一种丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置，通过调整前后车身的相对转动提高对复杂环境的适应能力，试验结果表明该装置能够在 15° 的横向坡地上稳定行驶。

拖拉机侧翻的根本原因是质心在支撑平面上的投影落在其支撑多边形之外，主动防侧翻控制的基本原理是通过监测拖拉机的状态参数来调整防侧翻执行机构，产生抗侧倾扭矩进而改变质心位置。由以上研究成果可以看出，前轮转向、力矩陀螺、调平装置、扭腰装置等防侧翻执行机构在斜坡工况下都具有明显的抗侧倾效果。然而，在一些特殊工况下，拖拉机侧翻具有突发和快速性，并且拖拉机和防侧翻执行机构动态响应特性和静态响应特性存在极大差异。因此，有必要对执行机构的有效输出进行动态界定。另外，防侧翻执行机构的介入作用具有时效性，防侧翻控制过程是非线性控制问题，因此，鉴于不同防侧翻执行机构的响应特性以及拖拉机在

复杂作业环境中的稳定性需求，研究拖拉机和执行机构的耦合特性，提升执行机构的快速响应能力，仍然是主动防侧翻控制需要解决的问题之一。另外，随着智慧农业的深入和全面发展，自动驾驶技术将会得到推广和普及^[81-82]，提高拖拉机的机动性控制与稳定性以及舒适性^[83] 是防侧翻控制面临的新挑战。

6 试验方法研究现状

拖拉机侧翻问题的研究需要大量的数据支撑，机理分析、结构设计、方法验证等需要特定的试验工况和环境。综合国内外相关研究成果可以看出，计算机模拟、比例模型车、实车和模拟平台能够为问题研究提供必要的试验环境和数据，每种方法都有其独特性和适用场景，各种试验方法的特点和不足如表 2 所示。

表 2 常见拖拉机侧翻研究试验方法对比
Table 2 Comparison of common experimental method for tractor rollover research

试验方法 Method	优点 Superiority	不足 Weakness
计算机仿真	成本低，效率高，安全性高， 适合原理性验证	快速性与准确性不易兼得， 无法处理不确定性
模拟平台	安全性较高，可重复性强， 可进行一些极限模拟	难以实现动态模拟和作业环 境模拟
模型车	成本较低，适合危险工况下 的动态侧翻模拟	试验结果精度和可靠度低
实车	可考虑全要素影响，能够实 现侧翻的静动态试验	成本和危险性高，工况可重 复性低

比例模型车常用来研究拖拉机侧翻机理和分析侧翻影响因素^[4]，基于模型车的试验研究可以得出一些规律性的结论，但对实际拖拉机的稳定性研究量化指导作用有限。目前，在拖拉机侧翻研究领域，基于实车进行的试验受到一定限制。主要是因为试验成本较高，可能会对参与人员和设备造成损害。此外，在许多侧翻工况下，重复进行相同试验的难度也相当大。因此实车试验主要适用于特定工况下的测试，如 CHISHOLM^[84] 采用一台装有测试仪器和安全保护装置的拖拉机在约 2m 高的模拟河岸上进行静态侧翻试验，用来对比侧翻保护装置实际性能与计算机模拟效果。潘冠廷^[85] 利用山地履带拖拉机开展坡道直线行驶试验，研究拖拉机在不同行驶方向、带有悬挂机具条件下的极限倾翻角与极限下滑角。

计算机仿真技术被视为拖拉机稳定性和动力学分析研究比较可行和有效的方法^[59]，越来越多的研究方案采用仿真软件分析拖拉机的运动学特征。吴赛飞^[86] 利用 RecurDyn 软件建立拖拉机和深松机、旋耕机模型，分析跨越凸起、壕沟时的拖拉机状态和转向方式。张文华^[87] 基于虚拟样机技术研究了轮式拖拉机的侧倾特性，利用 UG 软件建立拖拉机模型，在 Adams 环境下模拟拖拉机静态侧翻试验和前轮踏空试验。肖魏魏^[24] 应用 Catia 软件建立丘陵山地拖拉机关键零部件和整车模型，设计不同倾角的纵向坡和横向坡分析拖拉机的作业稳定性。虚拟仿真技术能够完成一些在模型车和实车上难以实施的试验，然而，考虑到拖拉机的复杂作业环境，例如多变的地面坡度、粗糙度，以及由不同地形引起的轮胎和底

盘受力、位置的动态变化等,仿真过程中需要引入更多的可变参数,为精确模拟这些可变参数,将不可避免地导致非常复杂的计算过程。

拖拉机模拟平台利用机械动力装置、控制器和仿真软件来模拟特定的作业条件,不仅可以用于培训驾驶员在紧急或危险情况下的操作技能,还可以再现典型作业场景,可用于分析拖拉机的运动学特性和侧翻机理^[88]。模拟平台被认为是研究拖拉机侧翻问题的一个有效工具,然而,由于不同模拟平台在结构和功能上存在差异,能够完成的试验项目及试验效果也不尽相同。BIETRESATO等^[89]研发一种可重现拖拉机侧翻事故的测试平台,以铰接式拖拉机底盘为基础,能对拖拉机质心位置、负载分布和转移进行测量与分析。WATANABE等^[90]搭建的测试台架主要适用于拖拉机运动学的仿真演示,对于拖拉机侧翻过程以及侧翻机理的相关研究,其适用性有限。OCHOA LLERAS等^[91]开发了一种拖拉机稳定性试验平台来模拟拖拉机纵横向失稳的驾驶场景。该平台的关键结构为运动基座,由6自由度的机器人和滑块曲柄机构组成,机器人用于对运动基座的三维姿态调整,滑块曲柄机构能够驱动运动基座进行滚动操作。在国内,类似的试验平台已经被应用于乘用车稳定性的研究领域。虽然该平台的研制成本较高,并且无法实现车路相互作用、轮胎受力分析等试验功能,但在姿态调整、场景再现以及控制方法验证方面,可为拖拉机侧翻研究提供多样化的条件选择和设置选项,进而为深入探讨拖拉机侧翻问题提供有价值的验证和分析工具。

当前的拖拉机横向稳定性模拟平台普遍缺乏对作业环境的模拟功能,无法还原作业过程中外界环境和拖拉机自身动态变化的复杂性。由于不同的防侧翻执行机构在性能上存在显著差异,并且动态环境下拖拉机与防侧翻执行机构的耦合关联性强。因此,融合不同仿真软件,搭建具有仿真和数据处理功能、测控一体的硬件模拟平台,将对深入研究拖拉机侧翻问题起到积极的推动作用。

7 总结与展望

由综合梳理现有研究成果可发现,国外在拖拉机侧翻研究领域起步较早。国内外学者在侧翻机理分析、侧翻模型建立、侧翻保护与控制等方面进行了大量研究,积累了丰富的理论和技术成果,为拖拉机侧翻领域的进一步研究奠定了坚实的基础。

拖拉机侧翻模型是侧翻机理分析、防侧翻预警和主动防侧翻控制的基础,牛顿法、拉格朗日法是建立拖拉机侧翻模型的基本方法,基于这两种方法已经建立了多种拖拉机运动学和动力学侧翻模型。与运动学模型相比,动力学模型具有更好的泛化能力,能够在多种稳定工况下表征拖拉机的动态特性。拖拉机侧翻模型不仅在侧翻机理分析和侧翻保护装置性能测试中发挥重要作用,也是设计拖拉机侧翻风险评价指标的重要依据,因此,模型的精度和实用性至关重要。即使基于动力学建立的拖拉机侧翻模型也是以理想假设为前提,当作业工况复杂

度增加或拖拉机处于临界侧翻状态时这些假设条件并不成立,因此会导致模型误差增大,甚至导致防侧翻控制过程逆转。如果在构建模型时考虑过多的因素,复杂的动力学关系会增加模型的构建和应用难度,导致控制过程难以实现。因此,易于建立、精准度高且便于应用的侧翻模型仍然是拖拉机防侧翻研究的重要方向之一。随着机器学习技术的飞速发展,基于数据驱动的拖拉机侧翻模型的建立变得相对容易,同时,将基于动力学的侧翻模型与基于机器学习的模型相结合,可为拖拉机侧翻风险评价和主动防侧翻控制提供更丰富的研究方案。

拖拉机侧翻影响因素众多,涵盖拖拉机结构参数、运动状态参数和作业环境因素。然而,在众多关于侧翻影响因素的研究中,针对驾驶员不当操作对拖拉机稳定性影响的分析和评价相对较少。而在实际发生的拖拉机侧翻事故中,由于驾驶员失误或不良驾驶习惯引发的侧翻事故占有很大比例,此外,通过侧翻机理分析对侧翻原因进行分类,并根据影响程度大小提取各类侧翻原因的典型表征因素,对拖拉机侧翻风险评价指标设计、防侧翻主动控制介入机制设定具有重要参考意义。

目前侧翻预警系统或主动防侧翻控制系统主要采用基于信号和拖拉机模型的侧翻风险等级评价。在确定评价指标的阈值时,通常涉及一个或多个拖拉机运动状态参数。通过传感器检测并获取状态参数是比较普遍的方法,但成本较高并且传感器采集的数据容易受外界环境干扰,导致测量精度无法得到保证。随着计算机技术和电子技术的持续发展以及低成本或专用检测模块的推出,与拖拉机相关的智能组件,例如智能轮胎等会不断出现,将显著提高拖拉机对姿态和环境的感知能力。与此同时,状态估计研究领域和机器学习理论的进一步发展,有望减少或取代部分传感器的功能,为获取拖拉机状态参数提供新的解决方案。

主动转向、附加动能、制动熄火和姿态调整是目前实现主动防侧翻控制的主要执行方式。拖拉机不同于道路车辆,其侧翻发生具有突发性和快速性,大多数侧翻工况下,改变拖拉机侧翻趋势需要很大的抗侧倾力或扭矩。主动转向控制相对简单、且易于实现,但目前大多数拖拉机采用前轮转向形式,而通过改变前轮转角增加的防侧翻扭矩有限。随着四轮转向拖拉机的不断推广,转向控制有望成为主动防侧翻控制的基础。制动熄火能够在特定工况下改变侧翻趋势,但采用差压制动或智能调速技术更有利于拖拉机稳定性的动态控制。就拖拉机侧翻回稳控制而言,动量飞轮或力矩陀螺安装方便且实用性较高,但会造成能源浪费,并且对控制技术的要求也较高。姿态调整技术不仅有利于提升拖拉机稳定性,而且能够减少对拖拉机作业质量的影响,但易受负载和机械阻力的影响。姿态调整结构的优化和先进控制技术的不断涌现将促进姿态调整拖拉机的发展和应用。此外,随着拖拉机底盘技术的发展,一些结构和功能性的改进也必将为主动稳定性控制提供更有效的执行方式。单一执行机构所能提供的抗侧倾扭矩是有限的,多机构联合

的防侧翻控制不仅能够增强主动防侧翻能力,也能够提高拖拉机多目标控制的可行性。除此这外,安装高性价比摄像头和雷达,利用它们对作业环境的预先感知能力,可以避免主动防侧翻控制在特殊工况下的回稳能力不足,如对障碍物、地形突变等的预先判断。

智慧农业是现代农业的发展方向,自动驾驶技术是智慧农业领域中的关键技术之一,随着土地规模化经营规模不断扩大,对自动驾驶拖拉机的需求日益增加。然而,目前关于拖拉机主动防侧翻控制的研究主要涉及控制原理、控制方法和效果验证,尚未充分考虑拖拉机在不同驾驶模式下的具体需求。当前面临的关键问题在于,在不同驾驶模式下,防侧翻控制需求与作业控制需求往往存在互斥情况,例如拖拉机作业于自动驾驶模式下,导航控制系统会根据实际位置与预设路径的偏差来调整转向角,以实现精确的路径跟踪。因此,如果要兼顾路径跟踪精度,主动防侧翻控制系统则需要考虑不同控制形式对路径跟踪精度可能产生的影响,并从防侧翻执行机构选择、多目标协同控制策略等方面考虑,制定以防侧翻为主导的控制方案。与此同时,拖拉机研制和使用正日益兼顾舒适性,人工驾驶模式下,合理协调驾驶员意图和舒适性成为研究的关键点。提取和引入驾驶员操作行为特征、制定科学的主动防侧翻介入机制和控制策略,将成为拖拉机主动防侧翻控制研究的问题之一。

侧翻保护装置的设计、性能分析、测试流程及标准已十分成熟,也积累了固定支架、可折叠支架、全自动支架等相关的设计理论和技术成果。尽管如此,考虑到驾驶员的驾驶习惯和作业环境,并不是所有拖拉机用户都愿意安装和正确使用这些装置。然而,作为拖拉机侧翻事故中的最后一道安全防线,侧翻保护装置的防护功能至关重要,不可忽视。辅助力结构的发明和创新必将会推动可折叠保护支架的发展和应用,基于侧翻预警系统中风险等级评价方法设计的手自一体可折叠保护装置更具实用性。将其作为姿态调整或主动防侧翻控制系统中可预先调控的执行机构,也可能成为侧翻保护装置使用的一种方式。

【参 考 文 献】

- [1] 邵明玺, 辛喆, 江秋博, 等. 拖拉机后悬挂横向位姿调整的模糊 PID 控制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 34-42. SHAO Mingxi, XIN Zhe, JIANG Qiubo, et al. Fuzzy PID control for lateral pose adjustment of tractor rear suspension[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(21): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [2] RONDELLI V, CASAZZA C, MARTELLI R. Tractor rollover fatalities, analyzing accident scenario[J]. *Journal of Safety Research*, 2018, 67: 99-106.
- [3] JANG M K, HWANG S J, KIM J H, et al. Overturning and rollover characteristics of a tractor through dynamic simulations: Effect of slope angle and obstacles on a hard surface[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 219: 11-24.
- [4] QIN J H, ZHU Z X, MITSUOKA M, et al. Coupled effect of slope angle and terrain roughness on tractor stability[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2018, 63(2): 355-360.
- [5] ARANA I, MANGADO J, ARNAL P, et al. Evaluation of risk factors in fatal accidents in agriculture[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2010, 8(2): 592-598.
- [6] FACCHINETTI D, SANTORO S, GALLI L, et al. Agricultural tractor roll-over related fatalities in Italy: Results from a 12 years analysis[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4536.
- [7] ZAMBON I, PIERGENTILI A, SALVATI L, et al. Applied research for a safer future: exploring recent job accidents in agriculture, Italy (2012–2017)[J]. *Processes*, 2018, 6(7): 87.
- [8] KANG S, KIM Y, PARK H, et al. Rollover safety and workable boundary suggestion of an agricultural platform with different attachments[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1-14.
- [9] 蒋俞, 孙泽宇, 汪若尘, 等. 丘陵山区履带式作业机全向调平系统设计及性能试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(18): 64-73. JIANG Yu, SUN Zeyu, WANG Ruochen, et al. Design and performance test of the omnidirectional leveling system for crawler work machine in hilly areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(18): 64-73. (in Chinese with English abstract)
- [10] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 1-14. SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [11] FRANCESCHETTI B, LENAIN R, RONDELLI V. Comparison between a rollover tractor dynamic model and actual lateral tests[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 127: 79-91.
- [12] DAVIS D C, REHKUGLER G E. Agricultural wheel tractor overturns. Part I: Mathematical model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(3): 477-483.
- [13] DAVIS D C, REHKUGLER G E. Agricultural wheel tractor overturns, Part II: Mathematical model verification by scale model study[J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(3): 484-488.
- [14] FENG Y, REHKUGLER G E. A mathematical model for simulation of tractor sideways overturns on slopes[J]. *ASAE Paper*, 1986, 86: 1063.
- [15] AZIMOV B M, SULYUKOVA L F, AKHMEDOV S A, et al. Mathematical modeling of tractor movement of the slope[J]. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2020, 10(3): 4953-4962.
- [16] ZENG D C, ZHU Y H, ZHOU Y M. A mathematical model for sideways overturning performance of tractor and trailer combinations[J]. *Journal of Terramechanics*, 1989, 26(3): 193-200.
- [17] FRANCESCHETTI B, RONDELLI V, CAPACCI E. Lateral stability performance of articulated narrow-track tractors[J]. *Agronomy*, 2021, 11: 2512.
- [18] CHISHOLM C J. A mathematical model of tractor overturning and impact behaviour[J]. *Journal of Agricultural Engineering*

- Research, 1979, 24(4): 375-394.
- [19] ARJUNKUMAR, RISHAVKUMAR P, SAKTHIVEL P. Yaw stability analysis of a tractor semitrailer using yaw plane model[J]. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 2022, 14(2): 226-235.
 - [20] 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): 042033.
 - [21] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Effect of geometric configuration on tractor stability characteristics[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2016, 61(1): 153-156.
 - [22] 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.
 - [23] LI Z, ZHU Z X, QIN J H, et al. Factorial significance on tractor stability under variation of terrain roughness employing the Taguchi method[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2018, 11(5): 88-94.
 - [24] 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 with English abstract)
 - [25] 张季琴, 杨福增, 刘世. 微型履带拖拉机牵引附着性能研究: 基于正交试验[J]. *农机化研究*, 2013, 35(10): 190-193.
ZHANG Jiqin, YANG Fuzeng, LIU Shi. Research of the micro-crawler tractor adhesion performance: Based on orthogonal experiment[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(10): 190-193. (in Chinese with English abstract)
 - [26] 张兴局, 倪伟强, 江庆, 等. 履带拖拉机旋耕机组稳定性仿真分析与试验[J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(2): 324-330.
ZHANG Xingju, NI Weiqiang, JIANG Qing, et al. Simulation analysis and test on stability of tracked tractor rotary tillage unit[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(2): 324-330. (in Chinese with English abstract)
 - [27] 吴才聪, 高星宇, 吴思贤, 等. 基于 DEM 的无人驾驶拖拉机前馈稳速控制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(10): 24-31.
WU Caicong, GAO Xingyu, WU Sixian, et al. Feedforward stabilized speed control of driverless tractor based on DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(10): 24-31. (in Chinese with English abstract)
 - [28] 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.
 - [29] JANG M K, HWANG S J, NAM J S. Simulation study for overturning and rollover characteristics of a tractor with an implement on a hard surface[J]. *Agronomy*, 2022, 12(12): 3093.
 - [30] HWANG S J, JANG M K, NAM J S. Application of lateral overturning and backward rollover analysis in a multi-purpose agricultural machine developed in South Korea[J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 297.
 - [31] VIDONI R, BIETRESATO M, GASPARETTO A, et al. Evaluation and stability comparison of different vehicle configurations for robotic agricultural operations on side-slopes[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 197-211.
 - [32] BAKER V, GUZZOMI A L. A model and comparison of 4-wheel-drive fixed-chassis tractor rollover during phase I[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 116: 179-189.
 - [33] CHOI K H, KIM S M, HONG S. Analysis of static stability by modified mathematical model for asymmetric tractor-harvester system: Changes in lateral overturning angle by movement of center of gravity coordinates[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2017, 42(3): 127-135.
 - [34] NGUYEN N V, TAKIMOTO H, SHIMOMOTO K. 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.
 - [35] VIGOROSO L, CAFFARO F, MICHELETTI M, et al. Improving tractor safety: A comparison between the usability of a conventional and enhanced rear-mounted foldable ROPS (FROPS)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 10195.
 - [36] FARGNOLI M, LOMBARDI M. Safety vision of agricultural tractors: An engineering perspective based on recent studies (2009–2019)[J]. *Safety*, 2020, 6(1): 1-20.
 - [37] SUN C R, NAKASHIMA H, SHIMIZU H, et al. Physics engine application to overturning dynamics analysis on banks and uniform slopes for an agricultural tractor with a rollover protective structure[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 185: 150-160.
 - [38] SUN C R, NAKASHIMA H, TSUKAMOTO S, et al. Numerical analysis of overturning of a three-wheeled agricultural carrier with a safety frame on a slope[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2017, 10(4): 249-258.
 - [39] LATORRE B 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.
 - [40] AYERS P, KHORSANDI F, WANG X, et al. ROPS designs to protect operators during agricultural tractor rollovers[J]. *Journal of Terramechanics*, 2018, 75(SI): 49-55.
 - [41] FRANCESHETTI B, RONDELLI V, CIUFFOLI A. Comparing the influence of roll-over protective structure type on tractor lateral stability[J]. *Safety Science*, 2019, 115: 42-50.
 - [42] SPIELHOLZ P, SJOSTROM T, CLARK R E, et al. A survey of tractors and rollover protective structures in Washington State[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2006, 12(4): 325-333.
 - [43] DU X, WANG G. Analysis of operating safety of tractor-trailer under crosswind in cold mountainous areas[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(24): 12755.
 - [44] KUMAR A, MAHAJAN A, PRASANTH S, et al. Agricultural tractor cabin structure design for durability and rollover protective structure Test[J]. *SAE Technical Paper*, 2015, 26: 0163.
 - [45] KHORSANDI F, AYERS P. The effect of friction on actuation torques of foldable rollover protective structures[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2018, 24(4): 227-242.
 - [46] OJADOS G, MARTIN G, IBARRA B, 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.
- [47] POWERS J R, HARRIS J R, ETHELTON 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.
- [48] BALLESTEROS T, ARANA I, EZCURDIA A, et al. Development and validation of automatically deployable ROPS based on airbag inflator technology[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 130: 92-105.
- [49] AYERS P, KHORSANDI F, JOHN Y, et al. Development and evaluation of a computer-based ROPS design program[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2016, 22: 247-260.
- [50] AYERS P, FARZANEH K, MATTHEW J, et al. Foldable rollover protective structures: Universal lift-assist design[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 185: 116-125.
- [51] MASHADI B, MOSTAGHIMI H. Vehicle lift-off modelling and a new rollover detection criterion[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2017, 55(5): 704-724.
- [52] NICHOL C, SOMMER H, MURPHY. Simplified overturn stability monitoring of agricultural tractors[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2005, 11(1): 99-108.
- [53] 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.
- [54] LIU J, AYERS P D. Control strategies and system for tractor protective structure deployment[C]// Conference of the National Institute for Farm Safety, Ocean City, Maryland, USA, 1999: 9-11.
- [55] LI H X, LIU L S, ZHEN L X, et al. Rollover prediction and control strategy based on experiment for tractor semitrailer fitted with hydraulically interconnected suspension[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2023, 21(1): 221-230.
- [56] LIU J H, AYERS P. Application of a tractor stability index for protective structure deployment[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 1998, 4(5): 171-181.
- [57] HE Z Z, SONG Z S, WANG L L, et al. Fasting the stabilization response for prevention of tractor rollover using active steering: Controller parameter optimization and real-vehicle dynamic tests[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107525.
- [58] LIU B, KOC A B. Field tests of a tractor rollover detection and emergency notification system[J]. *Journal of Agricultural Safety & Health*, 2015, 21(2): 113-127.
- [59] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development)[J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, 48: 339-346.
- [60] CASAZZA C, MARTELLI R, RONDELLI V. Evaluation of a commercial tractor safety monitoring system using a reverse engineering procedure[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2016, 22(4): 215-225.
- [61] 万欢, 欧媛珍, 管宪鲁, 等. 无人农机作业环境感知技术综述[J]. *农业工程学报*, 2024, 40 (8): 1-18.
WAN Huan, OU Yuanzhen, GUAN Xianlu, et al. Review of the perception technologies for unmanned agricultural machinery operating environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40-8: 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [62] 陈凤, 丁俊杰, 罗志涛, 等. 设施园艺移动平台分布式驱动自适应防滑控制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(10): 85-96.
CHEN Feng, DING Junjie, LUO Zhitao, et al. Distributed drive adaptive skid control of facility horticulture mobile platform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(10): 85-96. (in Chinese with English abstract)
- [63] 陈云, 何艳. 基于 GNSS 姿态与电机编码器的农机转向角度测量系统研制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 10-17.
CHEN Yun, HE Yan. Development of agricultural machinery steering wheel angle measuring system based on GNSS attitude and motor encoder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [64] DENIS D, THUÏLOT B, LENAIN R. Online adaptive observer for rollover avoidance of reconfigurable agricultural vehicles[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 126(C): 32-43.
- [65] TARIGHI J. Design and fabrication of an alarm system to prevent tractor overturning[J]. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2019, 27(2): 647-658.
- [66] LIU B, KOC A B. SafeDriving: A mobile application for tractor rollover detection and emergency reporting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 98: 117-120.
- [67] TAN V V, SENAME O, GASPARD P. Improving roll stability of tractor semi-trailer vehicles by using active anti-roll bar control system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: J Automobile Engineering*, 2021, 235(14): 3509-3520.
- [68] 张智刚, 黄海翔, 罗锡文, 等. 基于电动方向盘的拖拉机自动导航转向控制方法[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(1): 48-57.
ZHANG Zhigang, HUANG Haixiang, LUO Xiwen, et al. Steering control system for a tractor using electric steering wheel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 48-57. (in Chinese with English abstract)
- [69] 秦嘉浩, 刘海帆, SUH C S, 等. 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(S2): 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(S2): 515-520. (in Chinese with English abstract)
- [70] 王龙龙, 周胥, 陈度, 等. 拖拉机极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(S2): 320-327.
WANG Longlong, ZHOU Hong, CHEN Du, et al. Design and experiment of active rollover control system using control moment gyroscope for agricultural wheeled tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(S2): 320-327. (in Chinese with English abstract)
- [71] 康杰, 聂友红, 何培祥. 轮式拖拉机主动防侧翻系统的设计[J]. *农机化研究*, 2023, 45(2): 236-240.
KANG Jie, NIE Youhong, HE Peixiang. Design of active anti-rollover system for wheeled tractor[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(2): 236-240. (in Chinese with English abstract)

- [72] 姜惠, 唐小虎, 张旭峰, 等. 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机运动控制研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 392-403. JIANG Hui, TANG Xiaohu, ZHANG Xufeng, et al. Motion control of attitude adjustment wheeled tractor in hilly and mountain areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6): 392-403. (in Chinese with English abstract)
- [73] WANG Y J, YANG F Z, PAN G T, et al. Design and testing of a small remote-control hillside tractor[J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57(2): 363-370.
- [74] SUN J B, MENG C, ZHANG Y Z, et al. Design and physical model experiment of attitude adjustment device for crawler tractor in hilly and mountains region[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2020, 7(3): 466-478.
- [75] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 356-366. ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 356-366. (in Chinese with English abstract)
- [76] 刘平义, 柯呈鹏, 柯婷, 等. 丘陵山区农用预检测主动调平底盘设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 371-378. LIU Pingyi, KE Chengpeng, KE Ting, et al. Design and experiment of pre-detection active leveling agricultural chassis for hilly area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 371-378. (in Chinese with English abstract)
- [77] 彭贺, 马文星, 赵恩鹏, 等. 丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 36-44. PENG He, MA Wenxing, ZHAO Enpeng, et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(14): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [78] 刘国辉, 郝称意, 李民赞, 等. 半主动悬架山地拖拉机姿态控制系统设计与仿真[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(S2): 338-348. LIU Guohui, HAO Chenyi, LI Minzan, et al. Attitude control simulation of mountain tractor based on semi-active suspension[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(S2): 338-348. (in Chinese with English abstract)
- [79] REZA M, MORTAZA A. Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167: 105049.
- [80] 张开兴, 张澜, 李政平, 等. 轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 425-433. ZHANG Kaixing, ZHANG Lan, LI Zhengping, et al. Design and test of twisting and swinging attitude adjustment device of wheel hilly tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 425-433. (in Chinese with English abstract)
- [81] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与实践[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(1): 1-6. LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [82] 全力, 刘诗龙, 朱孝勇, 等. 基于 sigmoid 滤波器的永磁轮毂电机自抗扰控制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(10): 14-23. QUAN Li, LIU Shilong, ZHU Xiaoyong, et al. Active disturbance rejection control of permanent magnet hub motor based on sigmoid filter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(10): 14-23. (in Chinese with English abstract)
- [83] 徐红梅, 王启超, 张文杰, 等. 基于驾驶员生物力学特性的拖拉机座椅位置参数优化[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 32-40. XU Hongmei, WANG Qichao, ZHANG Wenjie, et al. Optimization of tractor seat position parameters based on biomechanical characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(22): 32-40. (in Chinese with English abstract)
- [84] CHISHOLM C J. Experimental validation of a tractor overturning simulation[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1979, 24(4): 395-415.
- [85] 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 Hillside[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [86] 吴赛飞. 大功率履带拖拉机耕作机组稳定性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021. WU Saifei. High-Power Crawler Tractor Farming Unit Stability Study[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [87] 张文华. 基于虚拟样机技术的轮式拖拉机侧倾稳定性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015. ZHANG Wenhua. Research of Roll Stability of Wheeled Tractor Based on Virtual Prototyping Technology[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [88] GONZALEZ, O, GORRIZ B, BERROCAL I, et al. Development and assessment of a tractor driving simulator with immersive virtual reality for training to avoid occupational hazards[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 143(C): 111-118.
- [89] BIETRESATO M, MAZZETTO F. Increasing the safety of agricultural machinery operating on sloping grounds by performing static and dynamic tests of stability on a new-concept facility[J]. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2018, 8(1): 77-89.
- [90] WATANABE M, SAKAI K. Identifying tractor overturning scenarios using a driving simulator with a motion system[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 210: 261-270.
- [91] OCHOA LLERAS N, BRENNAN S, MURPHY D, et al. Development of an open-source tractor driving simulator for tractor stability tests[J]. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2016, 22(4): 227-246.

Key technologies on the rollover protection and anti-rollover control for agricultural tractors

YIN Chengqiang¹, GAO Jie¹, XU Guangfei², SONG Jian¹, XIE Fuxiang¹, WU Xiaojin¹, WANG Kai¹

(1. School of Machinery and Automation, Weifang University, Weifang 261061, China; 2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: Tractors have been widely used for production in modern agriculture. But the tractor rollover can be a frequent accident in agricultural production at present. It is still lacking in the reliable theoretical and technical support to the tractor rollover, because of the abruptness and rapidity of the accident. In this review, the research achievements were firstly summarized on the mathematical description of tractor kinematics and rollover dynamics. A systematic analysis was made on the strengths and weaknesses of dynamic and kinematic modeling approaches on the rollover characteristics of tractors. According to the variability of field operation environments and the complexity of the tractor rollover, machine learning was also introduced to treat the complex force relationships and unknown disturbances during tractor operation. Secondly, the research progresses were reviewed on the tractor rollover mechanisms, in order to extract the influencing factors of rollover. Furthermore, it was recommended that the influencing factors of rollover should be classified and quantified to explore the specific mechanism under different rollover conditions. It was necessary to establish the complete characterization of the influencing factors of rollover. Thirdly, the design principles of rollover warning were incorporated with the active anti-rollover control systems. The rollover risks were systematically summarized to assess the anti-rollover systems. Tractor parameters also shared a significant impact on the assessment indicators of rollover risk. The most effective solutions were using cost-saving intelligent sensors and soft computing with machine learning. The active anti-rollover control system was significantly improved to solve the insufficient anti-rollover torque and control timeliness in the active anti-rollover control system. More control schemes should be proposed to combine the multiple rollover prevention actuators and the pre-perception of the environment. Fourthly, the summary was also made on the theoretical basis and technical achievements of rollover protection devices. A pre-regulatable actuator should be designed on the intelligent, automated, or foldable rollover protection device in the active anti-rollover control system. Lastly, the experimental means were summarized for the rollover mechanism analysis and theoretical verification. The platforms should be recommended with the function of data process and posture control. The hardware simulation platforms were also integrated with the different simulation software. The reason was that the current lateral stability platforms were unable to reconstruct the complexity environment, and then represent the complexity of the tractor variation in real time. Research priorities and directions of tractor anti-rollover and rollover protection were specifically predicted to provide basic research and product development in modern agriculture.

Keywords: tractor; control; anti-rollover; evaluation for rollover risk; rollover protective structure