doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.021

# 基于 BiLSTM－Transformer 混合模型的丘陵地区履带式甘蔗收获机倾翻风险预测

李尚平[1,2]　宋家华[1,2]　文春明[2]　李凯华[3]　韦雨彤[1,2]　程健华[4]

（1.广西民族大学物理与电子信息学院，南宁 530006；2.广西智能视觉协作机器人工程研究中心，南宁 530006；
3.南宁钛银科技有限公司，南宁 530103；4.广西大学机械工程学院，南宁 530004）

**摘要**：针对履带式甘蔗收获机在丘陵地区作业时存在因车身重心高和轮距窄而易发生倾翻危险，且难以预测问题，本文通过样机测试，实时检测样机车架振动加速度变化，经频域处理分析，提取车架倾斜状态时振动特征，提出一种基于双向长短期记忆网络与 Transformer 混合模型的倾翻预测方法。通过对振动加速度信号预处理，应用经验模态分解提取倾斜状态的时域与频域特征，重构去噪后信号。利用 BiLSTM 捕捉长期依赖关系，采用 Transformer 提取局部时序关系，有效提高了样机倾翻预测准确性。试验结果表明，在不同状态下履带式甘蔗收获机倾翻预测准确率达到 95.39%，耗时 11.87 ms。为进一步验证倾翻模型效果，对原始数据进行了 t－SNE 降维可视化，绘制了混淆矩阵图，为复杂环境下甘蔗收获机预警和调平系统的实时控制提供了依据。

**关键词**：丘陵地区；甘蔗收获机；倾翻预测；BiLSTM；Transformer

**中图分类号**：S238　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)04-0213-11　　**OSID**：

# BiLSTM－Transformer Hybrid for Predicting Tilt Risk of Crawler Sugarcane Harvesters in Hilly Terrain

LI Shangping[1,2]　SONG Jiahua[1,2]　WEN Chunming[2]　LI Kaihua[3]　WEI Yutong[1,2]　CHENG Jianhua[4]

(1. *College of Physics and Electronic Information*, *Guangxi University for Nationalities*, *Nanning* 530006, *China*
2. *Guangxi Engineering Research Center of Intelligent Vision and Collaborative Robotics*, *Nanning* 530006, *China*
3. *Nanning Taiyin Technology Co.*, *Ltd.*, *Nanning* 530103, *China*
4. *College of Mechanical Engineering*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)

**Abstract**: To address the rollover risk of crawler-type sugarcane harvesters operating on hilly terrain-caused by a high center of gravity and narrow track width—this study establishes a real-time vibration measurement and prediction framework. Vibration acceleration signals of the harvester frame are collected during tilt tests on a dedicated experimental platform. The signals are processed in the frequency domain to extract key vibration features that characterize different inclination states. A hybrid BiLSTM－Transformer model is proposed to predict potential rollover conditions. In the proposed method, vibration acceleration data are first preprocessed and decomposed using empirical mode decomposition (EMD) to obtain denoised and reconstructed time-frequency components. The BiLSTM network effectively captures long-term temporal dependencies in the vibration sequences, while the Transformer module focuses on extracting local temporal and attention-based contextual features. The complementary strengths of these two networks enhance both learning efficiency and predictive stability. Experimental results demonstrate that the proposed hybrid model achieves a prediction accuracy of 95.39% with an average response time of 11.87 ms, meeting real-time monitoring requirements. To further validate model effectiveness, t－SNE dimensionality reduction visualization and confusion matrix analysis are performed, confirming the model's discriminative capability across different tilt states. This research provides a reliable theoretical and technical foundation for the development of real-time rollover warning and automatic leveling control systems for crawler-type sugarcane harvesters in complex hilly environments.

**Key words**: hilly terrain; sugarcane harvesters; toppling prediction; BiLSTM; Transformer

收稿日期：2025－07－19　修回日期：2025－09－07

**基金项目**：广西科技重大专项(桂科 AA22117006)

**作者简介**：李尚平(1956—)，男，教授，博士生导师，主要从事智能制造技术信息化研究，E-mail：spli501@vip.sina.com

**通信作者**：文春明(1969—)，男，教授，主要从事智能控制技术研究，E-mail：2924831969@qq.com

## 0 引言

广西作为我国最主要的甘蔗主产省份,甘蔗产量和产糖量均占到全国七成,甘蔗种植面积、蔗糖产量已连续多年稳定在 $1.1\times10^7$ $hm^2$、$6\times10^6$ t 以上,而丘陵地区蔗田占据总种植面积的 60% 以上[1-3]。许多蔗地比较分散、块小,大部分坡角在 10°以内[4-6],且甘蔗常沿山坡的等高线种植,形成一侧高一侧低的蔗垄,实现设备化生产难度大。这种作业环境对机械化收获构成了严峻挑战,在丘陵地区作业的小型履带式甘蔗收获机,因自身重心偏高,在坡地及不平蔗垄上作业时难以维持稳定,存在严重倾翻风险[7-9]。

自 20 世纪 60 年代起,美国、德国和意大利等发达国家已对山地车辆稳定性与安全性展开研究,并逐步应用于工程实践[10]。PIJUAN 等[11]提出可调节车身高度的悬挂机构以提升稳定性和通过性;HOLLER[12]设计防侧翻装置,可在危险工况下发出警报并自动减速;KONRIED[13]研发传感器系统,通过监测角速度与加速度预测侧翻趋势。在动力学建模与预警方法方面,WANG 等[14]建立三自由度动力学模型并采用横向载荷传递率作为指标;YE 等[15]提出基于临界频率的重型车辆翻转预测;ZHU 等[16]基于支持向量机构建的侧翻预警模型;GUAN 等[17]提出以非承载轮垂直载荷比值作为评估指标。总体来看,国外在悬挂优化、翻车检测与预警等方面已形成较系统的研究体系,前述研究多以丘陵山地及小地块地形为对象,但仍主要针对开阔或规则道路条件,难以直接适应我国复杂的丘陵环境[18-19]。

国内相关研究多集中在收获机结构设计及动力系统改进,例如:李尚平等[20]聚焦于丘陵地区剪叉式甘蔗转运车的调平控制系统设计与试验,有效解决了转运车在田间作业操作难度大、转运过程易侧翻等实际问题。赖晓等[21]设计了一种适用于履带式甘蔗收获机的底盘调平机构,提出了在两侧设置调平机构的创新方案,然而在倾翻风险预测和控制方面的研究相对较少。文献[22-23]针对丘陵地区的甘蔗转运车状态识别技术进行了深入研究,提出了一种基于深度置信网络的识别模型,对转运车工作状态精确分类;张昊等[24]以零转矩点横向偏移为指标,结合模型预测控制器和差动制动实现防侧翻;张建良等[25]将 CNN-BiLSTM-Transformer 应用于舰船诊断,为车辆倾翻预测提供了方法借鉴。总体而言,国内研究在模型与算法方面已取得一定成果,但多集中于商用车或特定装备,缺乏面向丘陵地区农机具系统性研究。

综上所述,目前国内外在丘陵地区履带式甘蔗收获机倾翻预测方面研究较少,未充分考虑车辆实际行驶工况的复杂性和车辆行驶历史状态对当前倾翻状态的影响。

针对丘陵地区履带式甘蔗收获机因复杂地形和坡度变化易发生倾翻的问题,本文通过实机测试,提出一种基于双向长短期记忆网络与 Transformer 的混合模型,可实时预测收获机倾翻风险。采集作业过程加速度信号,采用经验模态分解去除噪声与干扰,并提取时域与频域特征输入模型。以期提升丘陵地区作业时安全性与稳定性。

## 1 底盘调平机构

### 1.1 底盘调平机构组成及工作原理

如图 1 所示,履带式甘蔗收获机主要由履带底盘、车身机架和横向调平机构组成。履带底盘设置于整机底部,起到支撑整机、承载各工作部件的重要作用,使收获机具备良好的地面适应能力,可实现直线行驶与原地转向等多种运动形式,以满足不同地形条件下的作业需求。横向调平机构则安装于履带底盘与车身机架之间,用于调整车架的姿态,使车架保持平衡,提高整机在复杂地形中行驶的稳定性。

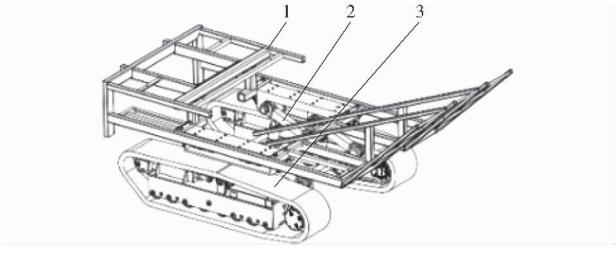


图 1 履带式收获机与横向调平机构

Fig. 1 Schematic of lateral leveling mechanism for crawler-type harvester

1. 车身机架 2. 横向调平机构 3. 履带底盘

调平机构采用曲柄滑块结构,并在整个提升系统中形成一个平行四边形的调平机构,如图 2 所示。底盘两侧的曲柄分别与液压缸铰接连接,通过控制 2 个液压缸同步伸缩,驱动曲柄做同步转动,进而调整车身机架与履带底盘之间的垂直位移,保持车架的水平姿态。该结构能够使收获机在不平整地形中保持车身水平状态,从而保障甘蔗收获机操作安全和作业效率[26]。

### 1.2 调平机构试验样机组成

由于样机过大,不便开展倾翻试验,根据相似性原理,按照与实机 1∶4的比例,在实验室搭建了调平试验样机如图 3 所示,履带式甘蔗收获机实机与样机参数如表 1 所示。试验样机上层机架简化为铝型材架子,承载重物;行走机构底盘用 4 个升降液压缸

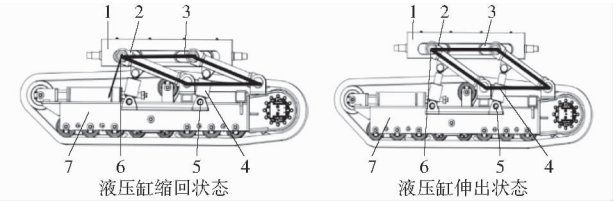


图 2　履带式收获机机身横向调平机构

Fig. 2　Schematic of lateral leveling for crawler-type harvester

1. 矩形槽　2. 曲柄　3. 双轮装配　4. 液压缸　5. 支座　6. 轮轴　7. 履带收获机行走系机构



图 3　履带式甘蔗收获机试验样机

Fig. 3　Tracked sugarcane harvester test platform

**表 1　甘蔗收获机实机与试验样机主要参数**

**Tab. 1　Comparison of main parameters between sugarcane harvester and test platform**

| 参数 | 实机 | 试验样机 |
|---|---|---|
| 长/mm | 4 000 | 1 000 |
| 宽/mm | 2 000 | 500 |
| 高/mm | 2 432 | 608. 5 |
| 表面积/$mm^2$ | $1.205\ 7\times10^8$ | $7.54\times10^6$ |
| 体积/$mm^3$ | $9.052\times10^8$ | $1.42\times10^7$ |
| 承载质量/kg | 68 600 | 1 068. 2 |

支撑，模拟丘陵坡角变化；曲柄滑块机构和底盘等装置安装在底座上。

### 1.3　工作原理

为解决丘陵坡地作业时因车身倾斜引发的侧翻风险问题，在履带式甘蔗收获机上设计一套主动式底盘横向调平系统。该系统基于两侧独立的曲柄滑块机构实现调平功能，其工作原理为底盘单侧的联动调平。当车身角度传感器实时监测到底盘横向倾角变化时，信号传输至单片机控制单元，单片机根据设定的阈值和调平策略进行逻辑判断；若车身倾角超过预设临界值，则判定为存在侧翻风险。此时，单片机发出控制指令，驱动处于低位侧液压缸伸出，带动曲柄旋转，从而提高该侧车架。与此同时，高位侧液压缸保持静止，整个车架以高位侧辊轮槽为转轴发生转动，实现车身姿态的动态调平。通过 4 自由度调平机构的协同运动，车架姿态及时调整为水平状态，可有效地化解在倾斜地面作业时的稳定性难题。

## 2　倾翻预测模型设计

为实现对履带式甘蔗收获机倾翻提前预测，提出一种基于多模态特征融合的时序预测模型。该模型结合时域特征、频域特征与深度神经网络建模能力，构建防倾翻风险的智能实时预测模型。

### 2.1　振动信号采集与处理方法

为获取收获机运行过程的动态特征，在试验样机靠近重心横梁处安装加速度传感器（BWT901CL 型），测量范围为 ±16 $g$，采样频率为 200 Hz。传感器主要安装在样机重心位置，如图 4a 所示，确保获取各轴向的典型振动特征。传感器通过蓝牙与上位机连接，在维特智能样机下实现实时数据采集与存储，所采集数据包括 $X$、$Y$、$Z$ 3 轴加速度。

此外，在室内和收获作业现场（广西南宁市武鸣区府城镇伏良基地）采集了履带式甘蔗收获机运行数据，收获机自重 8 t 左右，配有扶蔗、剥叶、输送和切梢等装置，作业速度为 1 ~ 3 km/h。加速度传感器布置在驾驶室底部中心、重心位置和后履带连接横梁中心等关键部位如图 4b、4c 所示，采集车身、底盘及重心处振动数据。

为提高数据质量并满足后续建模需求，对采集



(a) 样机重心处　(b) 实机驾驶室底部中心、重心位置　(c) 实机后履带连接横梁中心

图 4　传感器安装位置

Fig. 4　Sensor installation positions

的加速度信号进行预处理,包括对异常值检测缺失值填补和数据归一化处理,提高模型训练的稳定性与收敛速度。

### 2.2 倾翻预测原理

履带式甘蔗收获机在丘陵等不平整地形作业时,受到不规则地形扰动,容易发生姿态突变、车体失稳等情况,导致发生倾翻事故。倾翻前上下方向的振动加速度时域和频域如图 5 所示,由图 5 可发现,在倾翻瞬间,时域加速度突变,频域有多个高频振动峰值,且振幅明显增强的动态特征,因此可以通过对其振动信号进行分析建模,实现倾翻风险的提前预测。

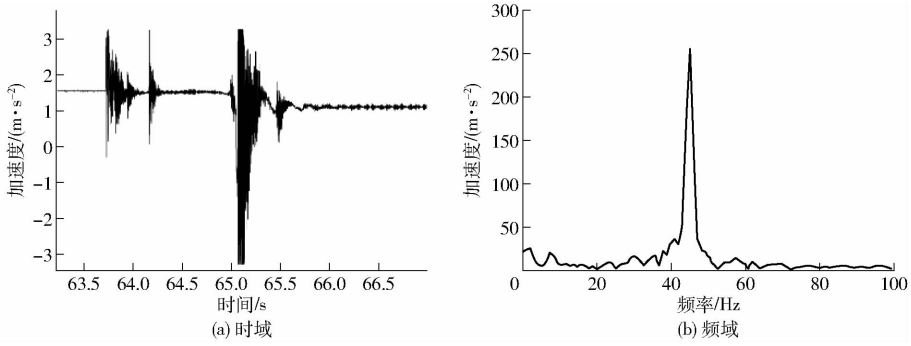


图 5 倾翻前时域和频域加速度

Fig. 5 Acceleration in time and frequency domains before tipping

基于以下理论对模型进行预测分析:

(1)动力学原理:车辆的横向加速度变化是其稳定性的重要指标,突变常预示即将发生倾翻。

(2)信号处理:通过快速傅里叶变换提取反映非线性与频域变化的典型特征。

(3)时序建模理论:倾翻过程为动态演化事件,具有明显的时序依赖特性,通过深度学习模型如 BiLSTM、Transformer 模型演变倾翻过程。

### 2.3 多模态特征提取

为充分描述甘蔗收获机在不同运行状态的动态特征,从时域和频域 2 个维度对加速度数据进行特征提取,构建多模态输入信息源,为后续模型提供丰富的试验数据。

#### 2.3.1 时域特征提取

Jerk 为加速度变化率,用于量化加速度突变程度。在设备运行过程中,尤其在倾翻前,加速度会出现明显的突变特征,因此,Jerk 是一个有效的动态特征。Jerk 计算公式为

$$Jerk(t) = \frac{a(t+\Delta t) - a(t)}{\Delta t} \tag{1}$$

式中 $\Delta t$——相邻采样点时间间隔

$a(t)$——各时间点加速度

Jerk 的突然增大通常预示着设备的动态特性发生突变,是识别倾翻风险的重要特征之一。结合 BiLSTM 和 Transformer 模型,可有效捕捉到倾翻前加速度急剧变化,从而提升倾翻预测准确性。

#### 2.3.2 频域特征提取

为捕捉收获机在不同工况下的振动频率特性,采用快速傅里叶变换(FFT)将加速度信号转换到频域,并提取以下 3 类频谱特征:主频率代表信号能量最集中的频率分量,反映设备振动主模态;频谱熵衡量频谱分布的混乱程度,可识别异常模式;带宽表示信号能量主要分布的频率区间。当设备出现侧倒或撞击等异常状态时,频谱中高频成分往往增强,能量集中于高频区域,从而导致带宽增大,因此可将带宽作为识别异常的重要参考。

### 2.4 混合深度预测模型设计

本文预测模型主要由 BiLSTM、自适应稀疏自注意力(ASSA)机制和 Transformer 模块组成,三者结构优势互补,实现对倾翻风险精准识别。

#### 2.4.1 BiLSTM 网络

长短期记忆网络(LSTM)是一种改进的循环神经网络(RNN),通过在传统结构中引入遗忘门、输入门和输出门,可有效解决普通 RNN 在建模长序列时易出现的梯度消失问题,能够更好地捕捉输入数据的长期依赖关系。鉴于甘蔗收获机在丘陵地区作业中产生的振动加速度信号具有明显的时序依赖性,引入 LSTM 作为特征提取模块,以学习倾倒前加速度信号的动态模式。进一步地,采用双向 LSTM 融合正向与反向序列信息,为后续模型提供更全面的时序特征表示,其结构如图 6 所示。

由图 6 可见,双向长短期记忆网络是在传统 LSTM 网络基础上的拓展与优化。该模型通过在网络中同时引入正向与反向 LSTM 层,分别对序列的时间前向和后向特征进行建模,从而实现对时序数据全局上下文信息的全面捕捉。该结构可有效提升模型对长距离依赖关系的建模能力,在处理复杂时序特征的识别与分类任务中表现出更高的准确性。

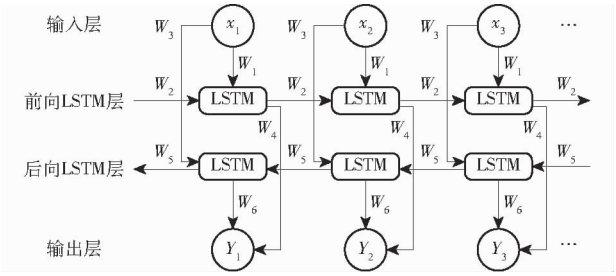


图 6　双向长短期记忆网络 BiLSTM 结构

Fig. 6　Structure of bidirectional long short-term memory network

### 2.4.2　自适应稀疏自注意力机制(ASSA)

为提升模型在长序列上的注意力效率，ASSA 机制引入稀疏策略，仅选择与查询相关性最强的 Top-K 位置进行注意力计算。相比传统全连接注意力机制，ASSA 大幅降低了计算复杂度，同时保留了对关键动态变化的敏感性。此外，该机制还具备可学习的自适应权重分配能力，进一步增强模型对复杂模式的建模能力。

履带式甘蔗收获机在丘陵复杂地形作业时会产生大量振动加速度信号，其中包含大量冗余信息，而倾倒风险往往由少量局部突变引发。ASSA 机制能够自动聚焦与倾翻风险高度相关的局部异常特征，并通过稀疏与密集注意力的融合保持整体信息完整性。这样既提高了特征提取效率，又避免了冗余信息干扰，从而显著增强模型在复杂工况下对倾翻风险的提前识别和预测能力。

### 2.4.3　Transformer 模型

Transformer 模型是一种革命性的网络架构如图 7 所示，采用经典的编码器-解码器结构，其内部由位置编码、多头注意力层及前馈网络等关键组件构成。这种设计不仅能实现高效的并行计算，还从根本上解决长距离依赖的建模难题，能够捕捉序列中的全局关联性。

自注意力机制输入包括查询矩阵 $\boldsymbol{Q}$、键矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和值矩阵 $\boldsymbol{V}$，计算公式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{X}_f \boldsymbol{W}^Q \\ \boldsymbol{K} = \boldsymbol{X}_f \boldsymbol{W}^K \\ \boldsymbol{V} = \boldsymbol{X}_f \boldsymbol{W}^V \\ \text{Attention}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V}) = \text{Softmax}\left(\dfrac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_K}}\right)\boldsymbol{V} \\ h_i = \text{Attention}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})_i \\ \text{MultiHead}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V}) = \text{Concat}\left(\sum_{i=1}^{m} h_i\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中　$\boldsymbol{X}_f$——输入序列矩阵

$\boldsymbol{W}^Q$、$\boldsymbol{W}^K$、$\boldsymbol{W}^V$——可训练矩阵

$d_k$——$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$ 维数

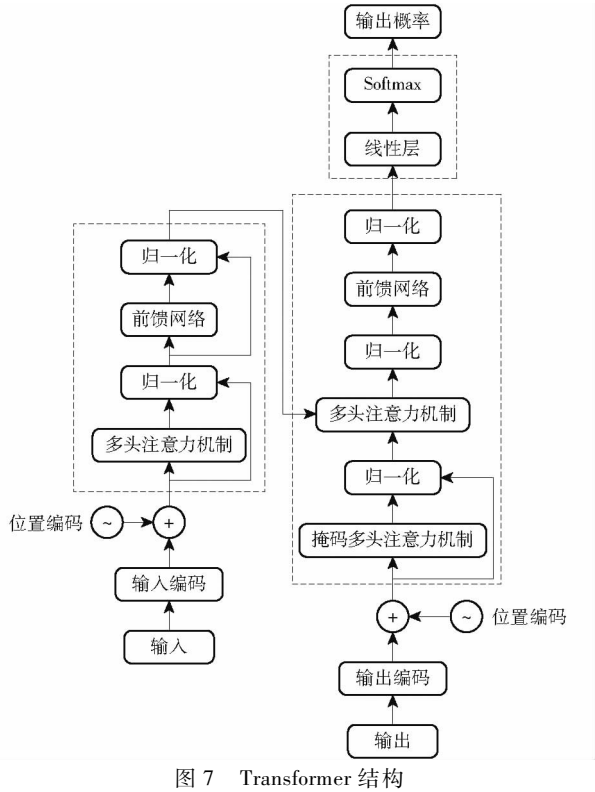


图 7　Transformer 结构

Fig. 7　Architecture of Transformer model

$m$——注意力头数量

$h_i$——第 $i$ 个注意力头计算结果

Concat——拼接各个注意力头计算结果

### 2.5　BiLSTM－Transforme 混合模型融合策略

本文模型结构融合了 BiLSTM 的时序递归建模能力、ASSA 的局部高效注意机制以及 Transformer 的全局上下文建模优势，具备更强的序列理解能力。BiLSTM 用于提取原始特征的前后向依赖结构，ASSA 聚焦关键时刻信号以增强局部响应性，Transformer 则补充对长距离依赖关系的建模。模型最终通过多层全连接神经网络实现分类输出，训练过程中引入 Dropout 抑制过拟合，进一步增强模型的泛化能力。

## 3　试验与结果分析

### 3.1　室内试验

在室内坡度－3.5°下进行试验，并将车身返回平地后重复相同的操作过程。采集底盘角度、车身角度以及重心处的振动加速度等数据，底盘和车身角度变化曲线如图 8 所示，底盘角度波动范围在－3.5°～0°之间，车身角度变化在误差 ±1.5°内，车身处于平衡状态。3 轴加速度的时域和频域波形如图 9、10 所示，由图 9 可知，车辆围绕 1 $g$ 重力加速度波动，幅度在 ±0.3 $g$ 内；由图 10 可知，加速度信号的主要频率为 50 Hz 左右，最大幅值达到 90.96 m/s$^2$，这些数据总体上相对稳定，没有较大波

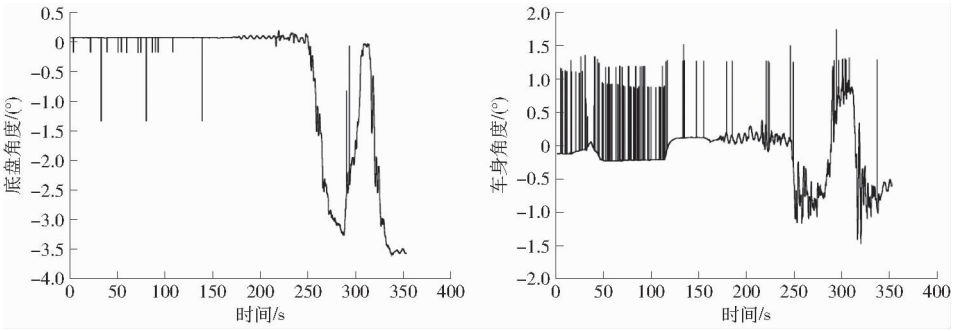


图 8 室内正常行驶过程底盘和车身角度变化曲线

Fig. 8 Plots of chassis tilt and vehicle body roll angles during normal workshop operation

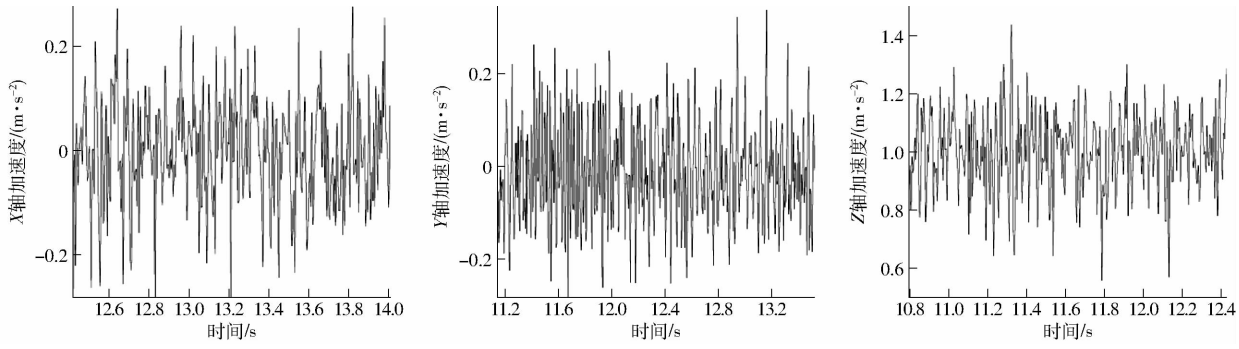


图 9 室内正常行驶过程 3 个方向加速度时域波形

Fig. 9 Plots of acceleration in three directions over time during normal driving in workshop

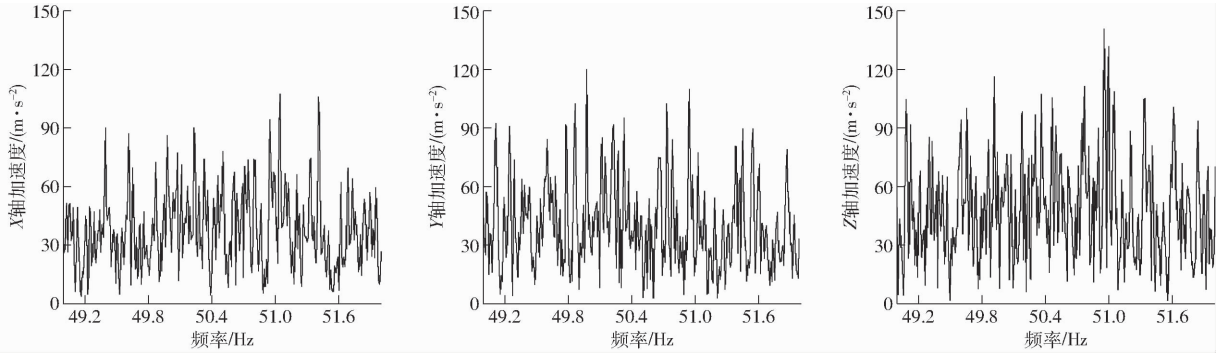


图 10 室内正常行驶过程 3 个方向加速度频域波形

Fig. 10 Plots of acceleration in frequency domain for three directions during normal workshop operation

动或突变,车辆处于正常状态。

### 3.2 田间收获试验

在田间收获时,底盘和车身角度变化曲线如图 11所示,底盘角度波动范围为 -5° ~ 3°,车身角度变化约 ±1°内,说明车身在平衡状态。3 轴加速度时域波形和频域波形如图 12、13 所示,车辆加速度波动范围较小,主频约为 42 Hz,最大幅值为 433 m/s$^2$,这些数据总体上相对稳定,没有较大波动或突变,车辆处于正常状态。

### 3.3 倾翻试验

为验证履带式甘蔗收获机倾翻预测模型,逐步增大斜坡角度直至倾翻,获取左倾数据并通过傅里叶变换分析加速度信号,振动加速度变化趋势如图 14 所示。

由图 14 可知,在试验初期调平阶段,信号中出现多个振动尖峰,是由于液压缸驱动快速调整样机姿态,导致结构受力不均,引发强烈的瞬时振动。随着斜坡角度逐步增大,车身接近倾翻临界状态,$X$ 轴(上下方向)、$Y$ 轴(前后方向)和 $Z$ 轴(左右方向)的加速度波动显著增强,尤其是 $X$ 轴方向的幅值变化更为剧烈,表明样机在重心偏移和外力作用下出现了复杂的动态响应。

在调平阶段,样机通过液压缸快速调整姿态,外力主要沿垂直方向($X$ 轴)作用于车体结构。为研究该方向的动态特性,对 $X$ 轴加速度信号进行频谱分析,如图 15 所示。结果表明,$X$ 轴方向存在明显多频振动特征,峰值频率分布广泛,表明系统在受力不稳定时出现多阶模态响应。这种多频现象可能源于车辆接近倾翻时,重心偏移导致结构非线性增强,进而引发强烈的耦合振动。

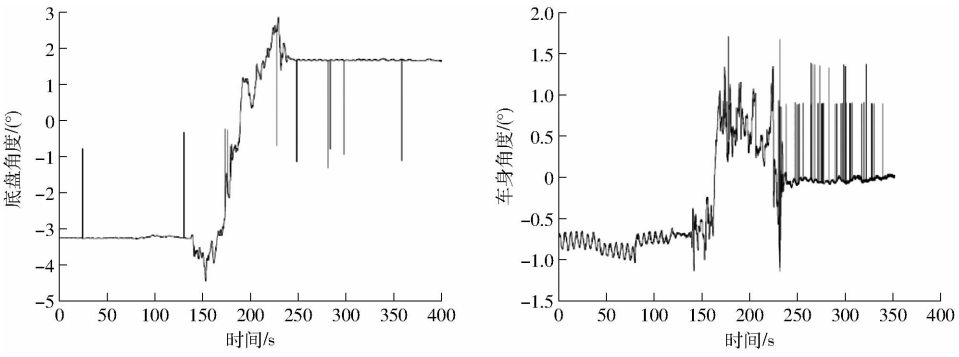


图 11　田间正常行驶过程底盘和车身角度变化

Fig. 11　Plots of chassis tilt and vehicle body roll angles during normal field operation

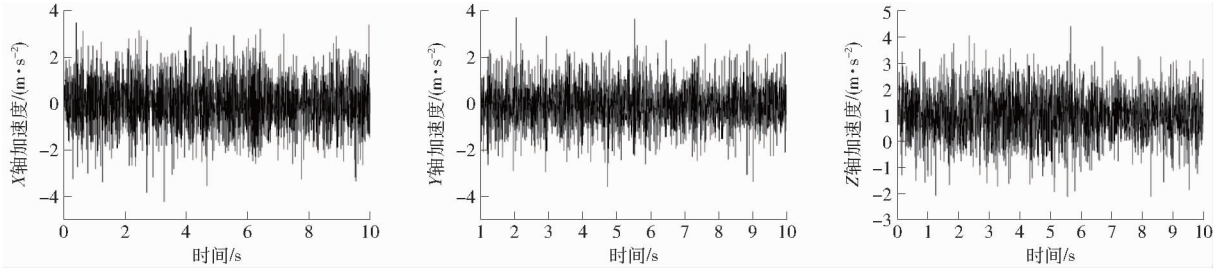


图 12　田间正常行驶过程 3 个方向加速度时域波形

Fig. 12　Plots of acceleration in three directions over time during normal driving in field

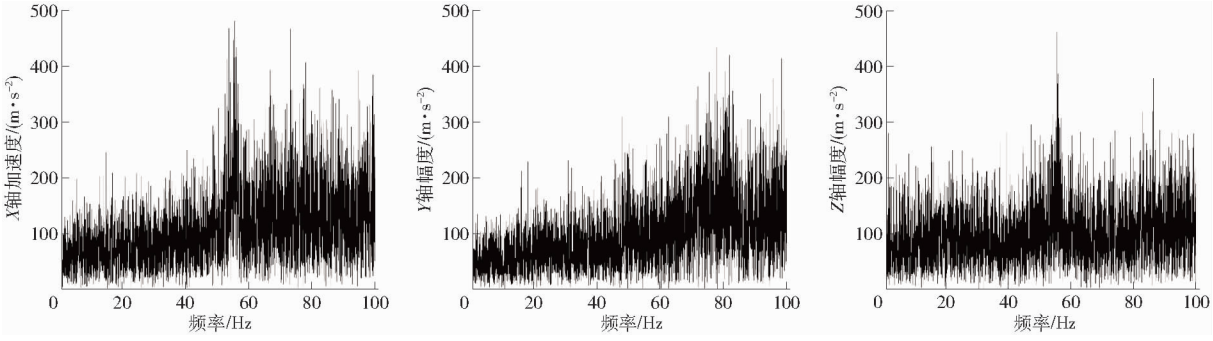


图 13　田间正常行驶过程 3 个方向加速度频域波形

Fig. 13　Plots of acceleration in frequency domain for three directions during normal driving in field

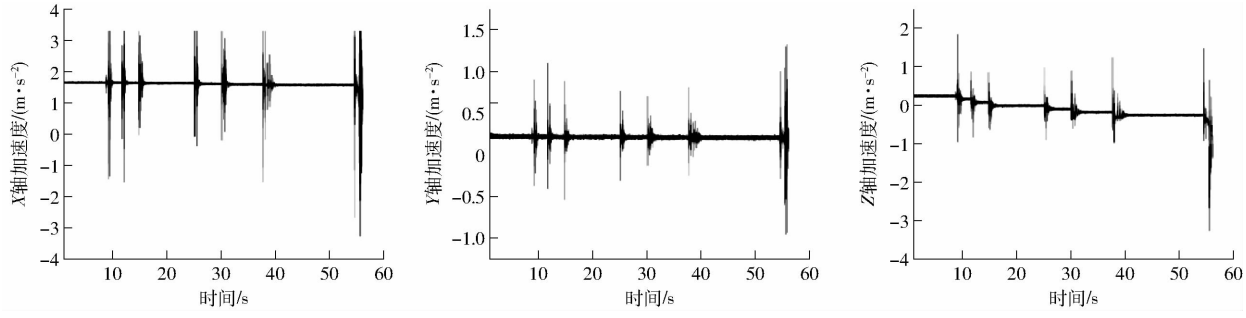


图 14　试验样机倾翻过程 3 个方向加速度时域波形

Fig. 14　Plots of acceleration in three directions over time as experimental platform topples

### 3.4　倾翻预测模型

#### 3.4.1　模型训练试验

在模型训练过程中，需设置训练参数：BiLSTM 隐藏层节点数为 128，学习率为 $1\times10^{-5}$，迭代次数为 60，批量大小为 256。通过观察损失率和预测准确率的变化，评估模型的收敛性和泛化能力。如图 16 所示，随着迭代次数增加，模型损失值不断降低，准确率逐步提高并趋于稳定，表明模型具有良好的收敛性和训练效果。

#### 3.4.2　消融试验

为验证本文方法的有效性，与常用诊断模型包括 CNN、GRU、BiLSTM、Transformer 和 CNN－BiLSTM 模型开展对比试验。每类模型重复 20 次试验得到平均诊断准确率（Accuracy）、损失值（Loss）、

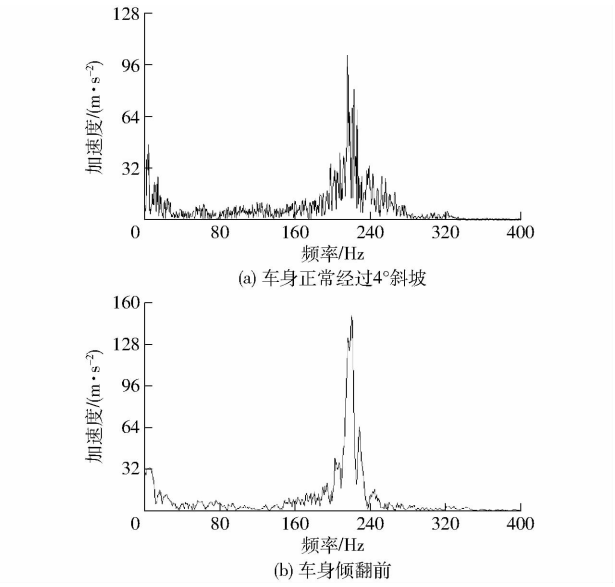


图 15 车身正常经过斜坡和倾翻前 $X$ 轴加速度频域波形

Fig. 15 $X$-axis acceleration frequency spectrum during normal slope crossing and pre-rollover

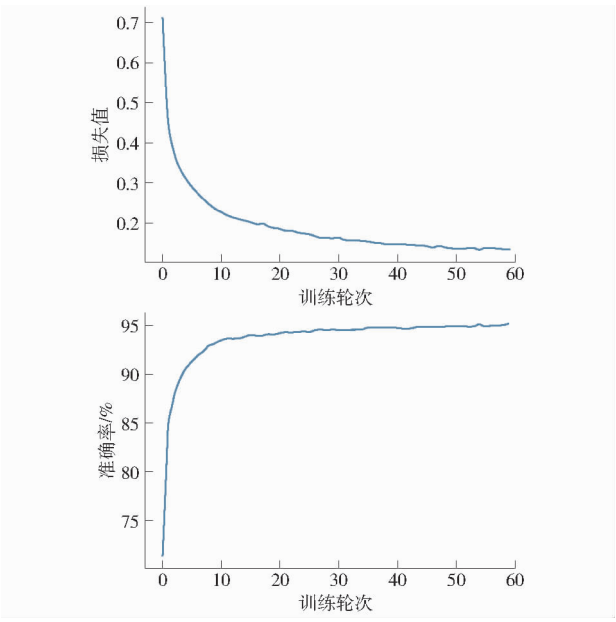


图 16 损失值和准确率曲线

Fig. 16 Loss and accuracy curves

召回率(Recall)、F1 分数(F1 - Score)和平均单样本预测耗时等参数。

为了更直观显示各模型预测效果,构建如图 17 所示的混淆矩阵。

由图 17a 可知,预测类别和真实类别基本对应,说明本文模型能够实现准确分类,诊断准确率最高;而图 17b CNN 模型的诊断效果最差,原因在于其仅提取空间特征,忽略了时间维度上的信息。由图 17f 可知,CNN - BiLSTM 由于综合了空间特征和时序特征开展判断,对 3 类状态的分类效果较好。由图 17c ~ 17e 可知,GRU、BiLSTM、Transformer 和 CNN - BiLSTM 等时序特征方法对倾翻预测效果较好,然而不适用于倾翻状态的准确判断,因为该类模型主要关注时序特征提取,而忽略了数据的幅值变化等空间特征信息。数据集分别设置 2 980 个左倾数据、8 712 个正常数据和2 881 个右倾数据进行训练,由图 17 计算出不同模型各参数试验结果,如表 2 所示。由表 2 可以看出本文模型对3种状态预

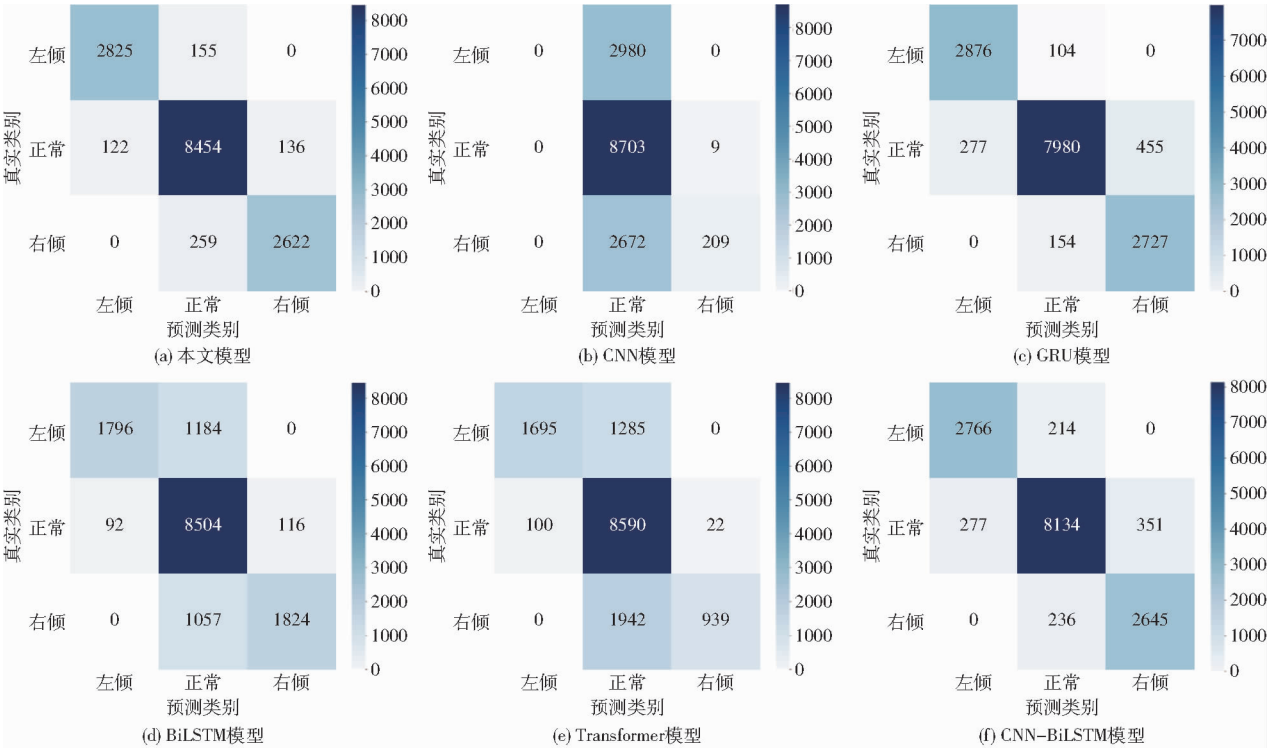


图 17 混淆矩阵图

Fig. 17 Confusion matrix

**表 2　不同诊断模型性能试验结果**

**Tab. 2　Performance comparison of different fault diagnosis models**

| 模型 | 准确率/% | 召回率/% | F1 分数/% | 平均单样本预测耗时/ms |
|---|---|---|---|---|
| 本文模型 | 95.39 | 95.39 | 95.37 | 11.87 |
| CNN | 61.15 | 61.15 | 47.78 | 3.12 |
| GRU | 86.66 | 86.66 | 87.08 | 3.87 |
| BiLSTM | 83.19 | 83.19 | 82.31 | 4.53 |
| Transformer | 77.02 | 77.02 | 74.21 | 7.85 |
| CNN－BiLSTM | 92.95 | 92.95 | 92.96 | 13.45 |

测较好，可以计算得出 94.7% 左倾数据、97% 正常数据和 91% 右倾数据，CNN 模型最差，只能预测出 0% 左倾数据、99% 正常数据和 7% 右倾数据，CNN－BiLSTM 模型性能接近本文模型。

进一步构建相对应的 t－SNE 可视化图，将高维特征映射到二维空间，测试样本在模型特征空间的分布状态如图 18 所示。由图 18 可知，所有 3 类特征均能实现良好的聚类效果，类别之间的距离较大，分类效果好。图 18f 特征分布存在明显的类间重叠，导致分类准确率下降。此外，由图 18b～18e 可知，特征类之间距离较小，存在一定重合，分界不清晰，易造成误判。

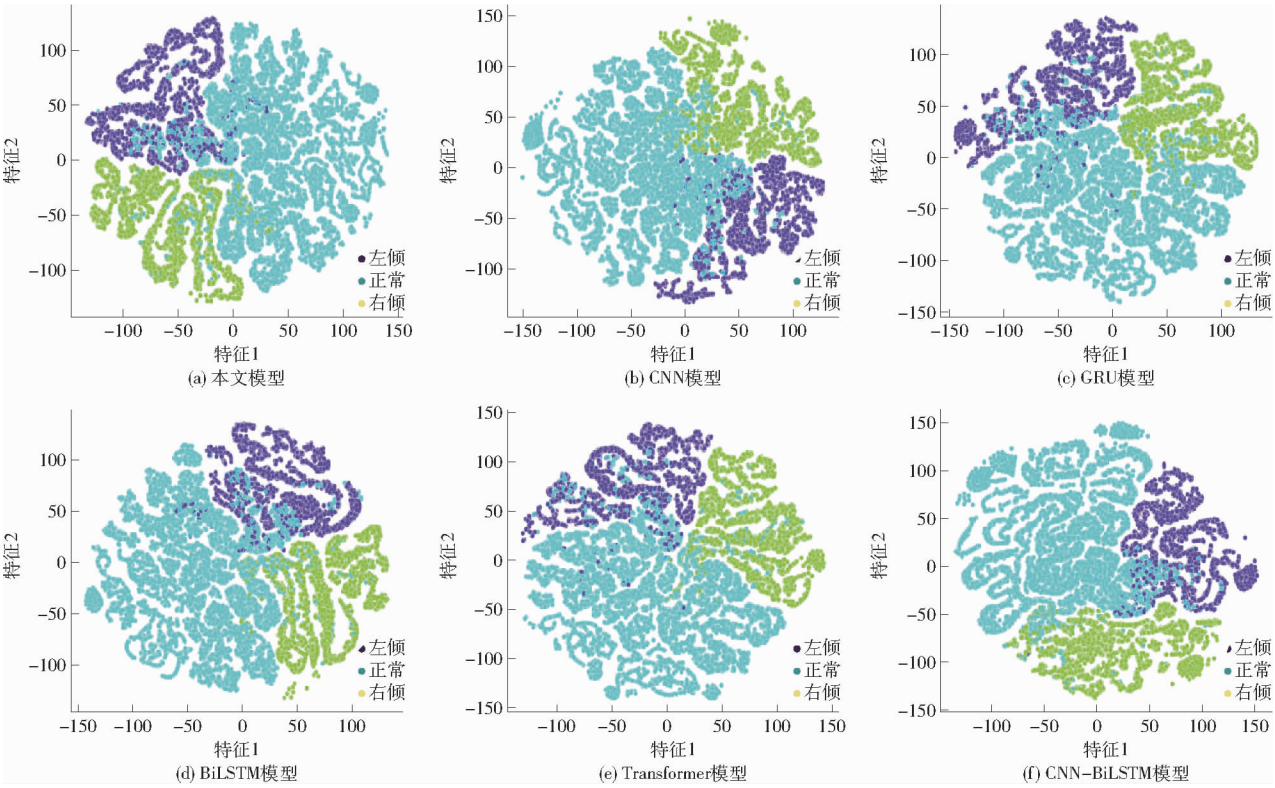


图 18　基于 t－SNE 的数据可视化效果

Fig. 18　Data visualization using t－SNE

## 4　结论

（1）针对加速度信号在倾翻前的变化，本文构建了一种融合双向长短期记忆网络、自适应稀疏自注意力与 Transformer 的混合模型，预测在丘陵地区作业的甘蔗收获机倾翻风险。试验结果表明，该模型通过处理时序信号的长期依赖性与局部动态特征，在准确性与鲁棒性方面均显著优于传统的单一结构模型。

（2）确立了一套从信号降噪到多维特征提取的有效方法。采用集合经验模态分解方法显著提升了原始信号的质量，并通过融合加速度变化时域特征与 FFT 频域特征，构建了能够全面反映设备动态行为的特征集，为模型的预测奠定了基础。

（3）综合性能评估显示，所提模型在各项关键指标上表现优异。t－SNE 可视化结果直观地验证了模型对不同风险状态具有卓越的区分能力，而混淆矩阵则验证了其高分类准确率和稳定性。研究成果为丘陵地区甘蔗收获机安全预警系统提供了一种可靠、高效的技术方案。

## 参　考　文　献

[1]　金娟. 甘蔗设备化破解瓶颈走出“广西方案”[N]. 中国农机化导报，2024－01－01(005).
JIN Juan. Mechanized sugarcane production in Guangxi: breaking bottlenecks and developing the “Guangxi model” [N]. China

Agricultural Mechanization Herald, 2024 - 01 - 01(005). (in Chinese)
[2] 韦敬楠. 设备化对广西农户甘蔗生产效率的影响[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9):216 - 222.
WEI Jingnan. The impact of mechanization on sugarcane production efficiency of farmers in Guangxi[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9):216 - 222. (in Chinese)
[3] 李明,田洪春,黄智刚. 我国甘蔗产业发展现状研究[J]. 中国糖料, 2017, 39(1):67 - 70.
LI Ming, TIAN Hongchun, HUANG Zhigang. Research on the development status of sugarcane industry in China[J]. China Sugar, 2017, 39(1):67 - 70. (in Chinese)
[4] 郭艺山,谢武装,梁波,等. 原料甘蔗小规模设备化收获及厢式化运输模式探讨[J]. 广西糖业,2016(3):47 - 48.
GUO Yishan, XIE Wuzhuang, LIANG Bo, et al. Exploration of small-scale mechanized harvesting and box-type transportation model for raw sugarcane[J]. Guangxi Sugar Industry, 2016(3):47 - 48. (in Chinese)
[5] 鲁华,武涛. 对广西甘蔗设备化收获发展现状的思考[J]. 甘蔗糖业, 2023, 52(4):53 - 59.
LU Hua, WU Tao. Thoughts on the current situation of mechanized sugarcane harvesting in Guangxi[J]. Sugarcane & Sugar Industry, 2023, 52(4):53 - 59. (in Chinese)
[6] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023, 54(5):1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Review on hilly and mountainous agricultural equipment and key technologies for slope operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):1 - 18. (in Chinese)
[7] 姜惠,唐小虎,张旭烽,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. Research on motion control of posture-adjustable wheeled tractors in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6):392 - 403. (in Chinese)
[8] 曾俊豪,高巧明,赵鹏飞,等. 丘陵山地遥控履带割草机设计与性能试验[J]. 中国农机化学报,2024, 45(5):49 - 55,194.
ZENG Junhao, GAO Qiaoming, ZHAO Pengfei, et al. Design and performance test of remote-controlled crawler mower for hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5):49 - 55,194. (in Chinese)
[9] 牟孝栋,杨福增,段罗佳,等. 丘陵山地拖拉机调平与防翻关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智慧农业,2024,6(3):1 - 16.
MU Xiaodong, YANG Fuzeng, DUAN Luojia, et al. Research status and development trend of tractor leveling and anti-rollover technologies in hilly and mountainous areas[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3):1 - 16. (in Chinese)
[10] 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. Theoretical research on dynamic stability of crawler tractor steering on slopes[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
[11] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(3 - 4):161 - 171.
[12] HOLLER G. Method and apparatus for vehicle rollover prediction and prevention: US6954140B2[P]. 2024 - 12 - 24.
[13] KONRIED S J. Vehicle rollover sensing using extended Kalman filter[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2003.
[14] WANG R, XU X, CHEN S, et al. Vehicle rollover warning and control based on attitude detection and fuzzy PID[J]. Applied Sciences, 2023, 13(7):4339.
[15] YE Z, XIE W, YIN Y, et al. Dynamic rollover prediction of heavy vehicles considering critical frequency[J]. Automotive Innovation, 2020, 3:158 - 168.
[16] ZHU T, YIN X, NA X, et al. Research on a novel vehicle rollover risk warning algorithm based on support vector machine model[J]. IEEE Access, 2020, 8:108324 - 108334.
[17] GUAN Q, GONG A, HU M, et al. Anti-rollover warning control of dump truck lifting operation based on active suspension [J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, 32:109 - 119.
[18] 王萧. 丘陵山地履带拖拉机车身自适应调平系统的研究[D]. 成都:四川农业大学,2022.
WANG Xiao. Research on adaptive leveling system for crawler tractors in hilly and mountainous areas[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[19] 韦尚纯. 广西丘陵山区甘蔗设备化收获存在问题及对策[J]. 河北农机,2023(5):22 - 24.
WEI Shangchun. Problems and countermeasures of mechanized sugarcane harvesting in hilly areas of Guangxi[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2023(5):22 - 24. (in Chinese)
[20] 李尚平,闫昱晓,徐冰,等. 丘陵地区剪叉式甘蔗转运车调平控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(11):384 - 393.
LI Shangping, YAN Yuxiao, XU Bing, et al. Design and experiment of scissor-type sugarcane transport vehicle leveling control system in hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11):384 - 393. (in Chinese)
[21] 赖晓,程健华,李尚平,等. 丘陵履带式甘蔗收获机底盘调平机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(12):100 - 109.
LAI Xiao, CHENG Jianhua, LI Shangping, et al. Design and test of chassis leveling mechanism for crawler sugarcane harvester in hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):100 - 109. (in Chinese)

[22] 袁泓磊,李尚平.基于深度置信网络甘蔗转运车状态识别[J].甘蔗糖业,2021,50(2):61－71.
YUAN Honglei, LI Shangping. Sugarcane transport vehicle state recognition based on deep belief network[J]. Sugarcane & Sugar Industry, 2021, 50(2):61－71. (in Chinese)
[23] 袁泓磊.丘陵地区甘蔗转运车状态识别方法研究[D].南宁:广西民族大学,2021.
YUAN Honglei. Research on state recognition methods of sugarcane transport vehicles in hilly areas[D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2021. (in Chinese)
[24] 张昊,李擎.微型货车高速转弯的改进模型预测防侧翻控制[J].科学技术与工程,2023,23(19):8264－8272.
ZHANG Hao, LI Qing. Improved model predictive anti-rollover control of micro trucks during high-speed turning[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19):8264－8272. (in Chinese)
[25] 张建良,韩涛,季瑞松.基于 CNN－BiLSTM－Transformer 的舰船中压直流全电推进系统诊断设计[J].试验技术与管理,2025,42(1):11－18.
ZHANG Jianliang, HAN Tao, JI Ruisong. Diagnostic design of medium-voltage DC full electric propulsion system for ships based on CNN－BiLSTM－Transformer[J]. Experimental Technology and Management, 2025, 42(1):11－18. (in Chinese)
[26] 李尚平,韦雨彤,任泓宇,等.丘陵地区履带式甘蔗收获机横向调平系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(6):374－385.
LI Shangping, WEI Yutong, REN Hongyu, et al. Design and test of transverse leveling system for crawler sugarcane harvester in hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6):374－385. (in Chinese)

(上接第 179 页)

[16] HAN L H, MAO H P, HU J P, et al. Development of a riding-type fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2019, 17(3): e0205.
[17] 袁挺, 张宇, 尹金亮, 等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12):116－125.
YUAN Ting, ZHANG Yu, YIN Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined struture of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(12):116－125. (in Chinese)
[18] 辛亮, 王明成, 孙国玉, 等. 番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3):96－105.
XIN Liang, WANG Mingcheng, SUN Guoyu, et al. Design and experiment of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3):96－105. (in Chinese)
[19] 王磊, 方子辰, 王振涛, 等. 不等速行星轮系机构混合多位姿综合方法及应用[J]. 中国机械工程, 2024, 35(12): 2211－2220.
WANG Lei, FANG Zichen, WANG Zhentao, et al. Mixed multi pose synthesis method and applications of unequal velocity planetary gear trains[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(12): 2211－2220. (in Chinese)
[20] 王磊, 吴启帅, 俞高红, 等. 小株距非圆齿轮行星轮系植苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11):294－305.
WANG Lei, WU Qishuai, YU Gaohong, et al. Design and experiment of small plant-spacing non-circular planetary gear train planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 294－305. (in Chinese)
[21] 俞高红, 赵钧, 单杭琦, 等. 蔬菜钵苗自动移栽机纵向送盘机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11):285－293.
YU Gaohong, ZHAO Jun, SHAN Hangqi, et al. Design and experiment of longitudinal feeding mechanism of vegetable pot seedling automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11):285－293. (in Chinese)
[22] SOH G S, MCCARTHY J M. The synthesis of six-bar linkages as constrained planar 3R chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(2): 160－170.
[23] WANG L, SUN L, YU G H, et al. Approximate motion generation of an epicyclic gear train with noncircular gears based on optimization-homotopy algorithm[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME, 2023, 15(4):041002.
[24] YUN Guan, JAN V. PHClab: a MATLAB/octave interface to PHCpack[M]. New York: Springer, 2008.
[25] 冯立艳, 耿浩, 关铁成, 等. 按 K 和 φ 设计传力性能最佳曲柄摇杆机构的新方法[J]. 机械设计, 2019, 36(8):101－104.
FENG Liyan, GENG Hao, GUAN Tiecheng, et al. New design method for the crank-rocker mechanism with the best force-transmitting performance according to K and φ[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(8):101－104. (in Chinese)
[26] 孙适阔, 吕宁, 许津阁, 等. 一种按行程速比系数设计连杆机构的 MATLAB 实现方法[J]. 电子测试, 2021(9):57－58.
SUN Shikuo, LÜ Ning, XU Jin'ge, et al. A MATLAB realization method of connecting rod mechanism design according to the stroke speed ratio coefficient[J]. Electronic Test, 2021(9):57－58. (in Chinese)
[27] 李增刚, 李保国. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2021.