doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.041

基于力矩陀螺的拖拉机峰值驱动功率补偿试验研究

王龙龙[1,2]　刘富豪[1,2]　倪云龙[1,2]　何志祝[1,2]　周　全[1,2]　李　臻[1,2]

（1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 智能农业动力装备全国重点实验室，北京 100083）

摘要： 针对小型电动拖拉机突变环境载荷作用下牵引阻力激增、瞬时动力不足导致的降速及停车问题，基于单框架控制力矩陀螺防侧翻系统提出了峰值驱动功率补偿和陀螺卸载能量回收方法。根据陀螺进动效应和惯性储能潜力，设计拖拉机-力矩陀螺系统能量流动方式和功率转换模式，构建了拖拉机欠功率驱动工况下的时变牵引功率需求模型。考虑瞬时驱动功率补偿、卸载能量回收等工作模式，兼顾侧翻控制功能，采用基于规则的多源能量管理方法设计了力矩陀螺系统能量流动和功率输出调控策略。基于该策略，采用比例模型试验平台，在越障、爬坡工况下开展了拖拉机峰值驱动功率补偿试验。结果表明，与无补偿相比，力矩陀螺系统释放的能量可显著提升拖拉机直流母线电压，补偿瞬态驱动功率。同时，侧翻控制后的陀螺卸载能量回收试验表明，力矩陀螺系统理论上可实现拖拉机防侧翻控制、峰值驱动功率补偿和陀螺转子卸载能量回收等功能，有效提高系统的综合利用率和能量使用效率。

关键词： 电动拖拉机；控制力矩陀螺；功率补偿；能量管理

中图分类号： S219.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2024)S1-0383-09

Experimental Verification on Peak Driving Power Compensation of Tractors Employing Control Moment Gyro

WANG Longlong[1,2]　LIU Fuhao[1,2]　NI Yunlong[1,2]　HE Zhizhu[1,2]　ZHOU Quan[1,2]　LI Zhen[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Reduced speed and stalling in small electric tractors, caused by sudden increases in traction resistance and insufficient instantaneous power under complex environmental conditions, significantly impact operational quality and efficiency. A novel method for peak driving power compensation and gyro energy recovery was proposed based on a single gimbal control moment gyro (CMG) anti-rollover system. An energy flow and power conversion model for the tractor-CMG system was developed, incorporating the effects of gyroscopic precession and energy storage. Building on this model, a time-varying traction power demand model was created for scenarios with insufficient power. Subsequently, a rule-based multi-source energy management strategy was designed to regulate the CMG system's energy flow and power output, addressing instantaneous power compensation, energy recovery, and rollover control. By combining the state of charge of the tractor's power battery pack and the gyro system, the overall energy management was optimized. When the basic output power of the battery pack was insufficient to meet the instantaneous power demand caused by traction resistance, the gyro rotor decelerated to release energy, compensating for the tractor's peak driving power. Experiments on a scaled model platform, focusing on obstacle disturbances and climbing, demonstrated that the CMG system significantly improved the tractor's direct current bus voltage and compensated for transient power deficits. Furthermore, gyro energy recovery tests following rollover control indicated that the CMG system can effectively perform multiple functions. These included rollover prevention, peak power compensation, and energy recovery from gyro rotor unloading, thus improving overall system utilization and energy efficiency.

Key words: electric tractor; control moment gyro; power compensation; energy management

收稿日期：2024－07－20　修回日期：2024－08－30

基金项目： 国家自然科学基金项目(52175259)和拼多多-中国农业大学研究基金项目(PC2023B01005)

作者简介： 王龙龙(1995—)，男，博士生，主要从事农机装备智能控制技术研究，E-mail：wlonglong0529@163.com

通信作者： 李臻(1988—)，男，副教授，博士生导师，主要从事农机装备智能传感与控制技术研究，E-mail：zhenli@cau.edu.cn

0 引言

电动拖拉机作为未来农业生产活动中常用的动力机械，其绿色、经济、智能化发展对提高农业生产效率、减少能源消耗具有重要意义[1-3]。然而，在实际行驶中，尤其是面对板结土壤、局部粘性土壤、石块及障碍物等复杂、突变田间环境干扰时，拖拉机的牵引阻力会短时激增[4-5]。而由于储备功率有限，小型电动拖拉机常因瞬时动力不足而进入欠功率驱动状态。

在欠功率驱动状态中，拖拉机的峰值输出功率不足以应对瞬时激增的阻力，常引发降速、停车等问题。这不仅影响作业的连续性和效率，还可能影响整个农田生产的进程[6-7]。此外，频繁的欠功率驱动还会对电动拖拉机的动力系统造成负荷过大、能效降低等问题，缩短设备使用寿命。因此，如何有效应对这种欠功率驱动问题，补偿峰值需求驱动功率，已成为当前电动拖拉机研发中的一个关键技术挑战。

为改善电动拖拉机在复杂道路行驶过程中的行驶和牵引性能，提升蓄电池能量利用效率和循环使用寿命，围绕其辅助能源的基础理论研究和能源供给架构持续发展，涉及增程器[8]、燃料电池[9-10]、超级电容[11]、动量飞轮[12]等诸多方面。其中，动量飞轮在储存、释放能量过程中，具有循环寿命长、响应速度快、比能量和比功率高的特点[13]，在船舶[14]、汽车[15-17]、电网[18-19]等领域应用广泛，有望作为潜在能源解决拖拉机欠功率驱动问题。

此外，拖拉机在坡地行驶过程中，受坡道角度、土壤参数、行驶速度和随机路况等诸多因素作用，易引发严重侧翻失稳事故[20-22]，威胁人员和装备安全。为解决此类问题，前期的研究基于单框架控制力矩陀螺设计了主动防侧翻系统[23]。该系统通过操控高速稳定旋转的陀螺转子进动，产生供拖拉机恢复稳定的防侧翻力矩，有效防止侧翻事故发生。该系统中高速旋转的陀螺转子不仅可以通过进动提供防侧翻力矩，还可作为变速率动量飞轮将储存的机械能转换为电能输出，为应对小型拖拉机瞬时动力欠缺问题提供新的解决思路。

本文以前期研究的控制力矩陀螺系统为基础，以拖拉机峰值驱动功率补偿为目标，兼顾陀螺转子卸载能量回收，建立整机和力矩陀螺系统功率匹配数学模型，设计基于规则的能量管理策略，在多种欠功率驱动工况下开展试验验证。

1 基于力矩陀螺的峰值功率补偿原理

1.1 系统结构组成

控制力矩陀螺系统主要由陀螺转子、支承框架、伺服电机、转子电机和系统基座组成。如图1所示，伺服电机控制陀螺转子沿Z轴方向进动，根据陀螺转子进动效应，可实现沿X轴的侧翻回稳力矩输出。另一方面，通过陀螺转子电机的电动机至发电机工作模式的转换，调控陀螺转子沿Y轴减速运动，结合整流桥、稳压电路，可实现机械能至电能的转换，发挥惯性储能潜力，从而完成拖拉机峰值功率补偿和陀螺转子卸载能量回收。

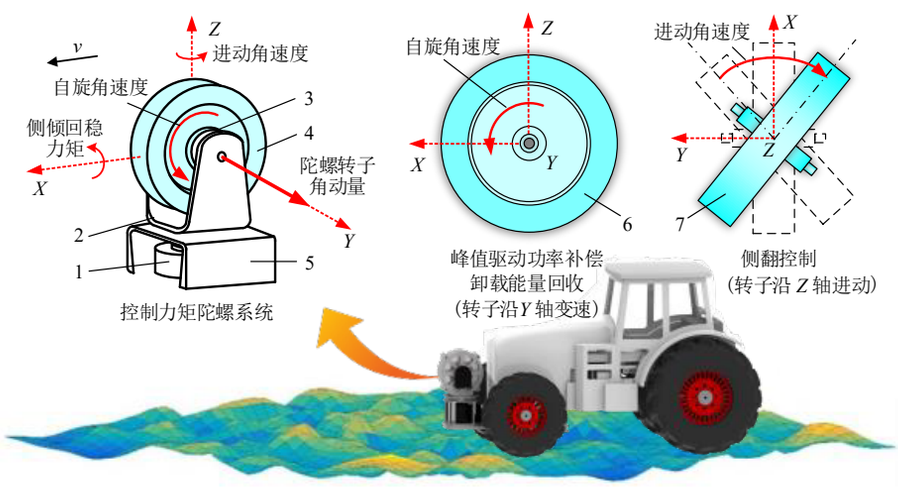


图1 控制力矩陀螺系统工作原理图

Fig. 1 Schematic of control moment gyro

1. 伺服电机 2. 支承框架 3. 转子电机 4、6、7. 陀螺转子 5. 系统基座

1.2 运行模式设计

为实现陀螺电机的电动机和发电机的工作状态切换和交-直流电功率的双向可控流动，设计如图2所示的陀螺系统功率转换电路。根据能量流动方式，可分为4种模式运行。

充电储能模式：采用三相脉冲宽度调制(Pulse width modulation，PWM)逆变器将车载低压或动力蓄电池组中的直流电转换成交流电，经充放能控制器传输至转子电机。由转子电机驱动飞轮转子以低功耗缓慢加速运转，到达额定转速后系统进入能量保持状态。

转速保持模式：陀螺转子到达额定转速后，控制器以小电流驱动陀螺转子维持额定转速，保持充足的角动量

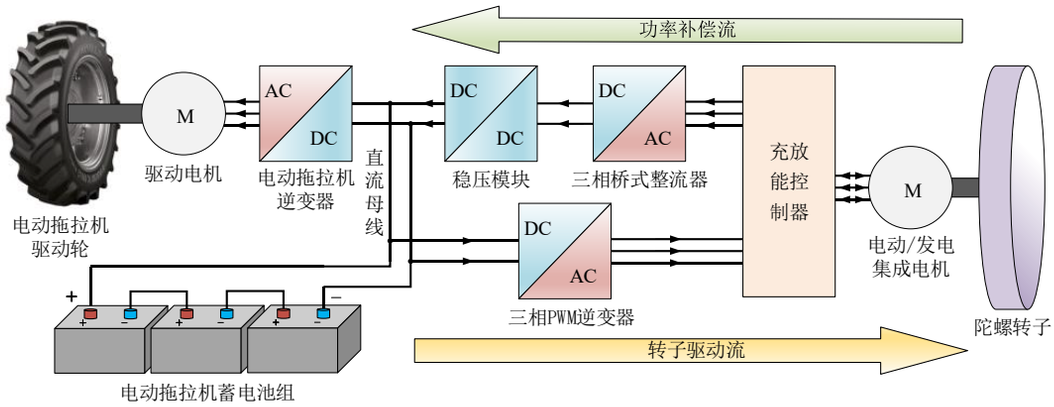


图2　控制力矩陀螺系统能量转换电路原理图

Fig. 2　Energy conversion circuit of control moment gyro

(用于防侧翻控制)和惯性储能潜力(用于峰值功率补偿)。

放电释能模式:在拖拉机欠功率驱动工况下,将陀螺系统工作模式由充电储能切换为放电释能模式。陀螺电机则由电动机切换为发电机状态运行,拖拉机驱动电机作为负载接入系统。陀螺转子减速制动并将释放的电能与蓄电池直流母线并联入网。在此模式下,针对拖拉机瞬时驱动功率欠缺问题,开展峰值功率补偿工作。

侧翻控制及卸载能量回收模式:拖拉机沿坡地等高线作业期间,受复杂路况激扰导致侧翻风险时,基于前期研究的陀螺转子进动角速度控制律调节陀螺转子进动,输出防侧翻力矩[23]。拖拉机恢复稳定且行驶至非危险路况后,陀螺转子执行放电释能模式,将高速旋转的陀螺转子储存的机械能转换成电能输出至蓄电池,完成卸载能量回收,增加能源利用率。

2　系统建模与控制策略设计

2.1　数学模型

2.1.1　拖拉机纵向动力学模型

电动拖拉机在田间行驶过程中,驱动力和行驶阻力共同决定其纵向运动特性,受力分析如图3所示。

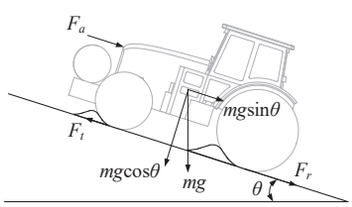


图3　拖拉机上坡越障过程受力分析

Fig. 3　Dynamics analysis of tractor during slope climbing and obstacle surmounting

考虑坡度阻力、加速阻力、空气阻力和滚动阻力,根据牛顿运动定律,拖拉机-控制力矩陀螺耦合系统在加速爬坡过程中纵向动力学方程为

$$m\dot{v} = F_t - F_g - F_a - F_r \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} F_g = mg\sin\theta \\ F_a = \dfrac{1}{2}C_a A\rho_a v^2 \\ F_r = \mu mg\cos\theta \end{cases} \tag{2}$$

式中　F_t——拖拉机驱动力,N

F_g——坡度阻力,N

F_a——空气阻力,N

F_r——滚动阻力,N

m——拖拉机和陀螺系统总质量,kg

v——拖拉机纵向速度,m/s

g——重力加速度,m/s^2

θ——拖拉机俯仰角,rad

C_a——空气阻力系数

ρ_a——空气密度,kg/m^3

A——迎风面积,m^2

μ——滚动阻力系数

根据驱动力和车速的关系,拖拉机轮胎作用于地面的驱动功率可表示为

$$P_d = F_t v = \left(\mu mg\cos\theta + mg\sin\theta + \frac{1}{2}C_a A\rho_a v^2 + m\dot{v}\right)v \tag{3}$$

式中　P_d——拖拉机行驶所需驱动功率,kW

此外,鉴于拖拉机的动力输入来自动力电池组和陀螺转子的机械能,根据各系统输出功率关系,拖拉机正常行驶所需驱动功率还可表示为

$$P_d = \left(P_{bat} + P_{gyro}\right)\eta_{tra} \tag{4}$$

式中　P_{bat}——动力电池组输出功率,kW

P_{gyro}——力矩陀螺系统输出功率,kW

η_{tra}——动力传输效率

2.1.2　动力电池模型

动力电池组为拖拉机提供稳定行驶和作业过程所需驱动功率,储存控制力矩陀螺防侧翻系统卸载回收的能量。根据电池电压和内阻关系计算电池荷电状态(State of charge,SOC),即

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^{t} I_{bat}\,\mathrm{d}t}{3\,600Q_{bat}} \tag{5}$$

其中

$$I_{bat} = \frac{U_{bat_oc} - \sqrt{U_{bat_oc}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}} \tag{6}$$

式中　I_{bat}——电池输出电流,A

SOC_t、SOC_0——t时刻、初始时刻电池荷电状态

Q_{bat}——电池容量，A·h

U_{bat_oc}——电池组开路电压，V

R_{bat}——电池组内阻，Ω

动力电池组母线电压为

$$U_{bus} = U_{bat_oc} - I_{bat}R_{bat} \tag{7}$$

式中 U_{bus}——电池组母线电压，V

根据以上分析，可得到动力电池组输出功率为

$$P_{bat} = U_{bat_oc}I_{bat} - I_{bat}^2R_{bat} \tag{8}$$

2.1.3 陀螺系统模型

力矩陀螺系统主要通过控制陀螺转子的升、降速度实现机械能和电能之间的相互转换。根据陀螺转子绕主轴的最大和最小稳定转速计算力矩陀螺系统的可用能量，计算式为

$$E_{gyro} = \frac{1}{2}J_{gyro}\omega_{\max}^2(1 - \omega_{\min}^2/\omega_{\max}^2) \tag{9}$$

式中 E_{gyro}——力矩陀螺系统可用能量，J

J_{gyro}——转子沿主轴的转动惯量，kg·m²

$\omega_{\max}$——陀螺转子最高稳定转速，r/min

$\omega_{\min}$——陀螺转子最小稳定转速，r/min

因此，力矩陀螺系统输出功率为

$$P_{gyro} = \frac{\mathrm{d}E_{gyro}}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

根据陀螺转子绕主轴的最大、最小稳定转速，陀螺转子的荷电状态可以等效为

$$SOC_{gyro} = \frac{\omega_{rot}^2}{\omega_{\max}^2} \tag{11}$$

式中 SOC_{gyro}——力矩陀螺系统荷电状态

ω_{rot}——陀螺转子实时转速，r/min

2.2 基于固定规则的能量管理策略

考虑到基于规则的多源能量管理策略易于实现、鲁棒性强[24-26]，特别适用于多种工作模式下的能量储存、转化、释放，本文采用该方法进行拖拉机峰值功率补偿、防侧翻控制和卸载能量回收。

通过对电动拖拉机爬坡、越障等行驶工况的需求功率分析，得到以下规则：

(1)拖拉机进入复杂道路工作前，须先将陀螺转子转速提升至额定值，储备充足的机械能，确保陀螺系统荷电状态SOC_{gyro}到达设定值，即$SOC_{gyro} > SOC_{gyro_\min}$。

(2)如图4所示，当整车瞬时需求功率P_d大于动力电池基础功率P_{bat}后($P_d > P_{bat}$)，力矩陀螺系统介入。陀螺转子降速输出能量补足P_d和P_{bat}的差值，完成拖拉机峰值驱动功率补偿。其中，期望的力矩陀螺系统补偿功率为

$$P_{gyro} = P_d - P_{bat} \tag{12}$$

(3)当$P_d < P_{bat}$时，控制力矩陀螺系统停止工作，拖拉机由动力电池组独立供电。

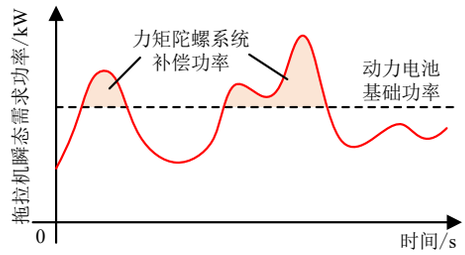


图4 拖拉机瞬态峰值驱动功率补偿示意图

Fig. 4 Schematic of transient peak driving power compensation for tractor using control moment gyro

(4)拖拉机沿等高线行驶时，为确保安全稳定行驶，防侧翻功能优先于峰值功率补偿和卸载能量回收。陀螺转子处于转速保持模式，为防侧翻力矩输出提供充足的角动量。

(5)在拖拉机完成侧翻控制后，关闭陀螺转子转速保持模式，并降速至0。此时，陀螺转子电机执行发电机功能，将转子机械能转换为电能，并经整流和稳压电路输出至电池组，完成卸载能量回收。

根据以上能量切换规则和陀螺转子工作模式，得到如图5所示基于规则的力矩陀螺系统能量管理策略。

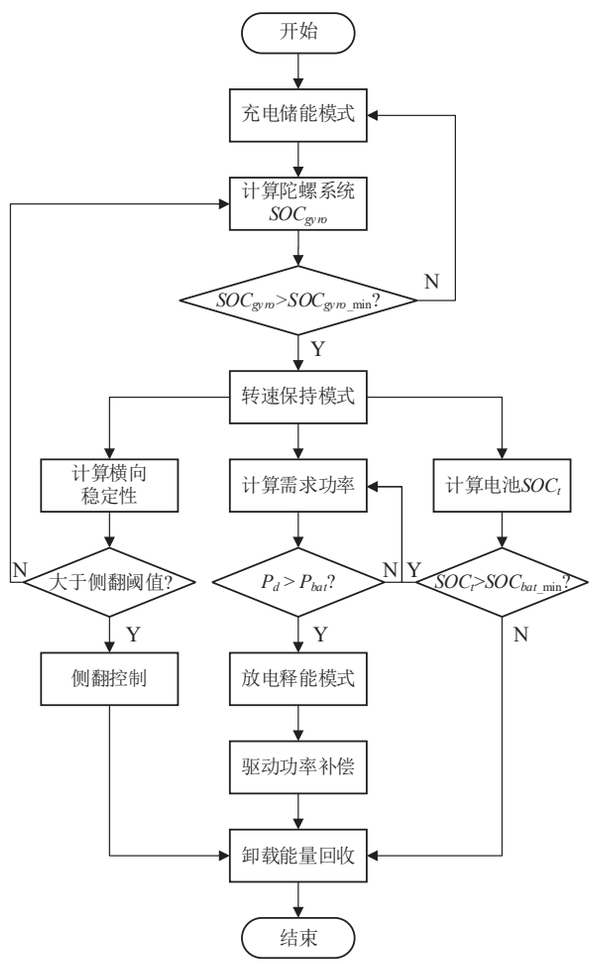


图5 基于规则的拖拉机和力矩陀螺系统能量管理策略

Fig. 5 Rule-based energy management strategy for tractor and control moment gyro system

3　试验平台搭建与方案设计

为确保试验人员安全和试验结果有效性，车辆动态侧翻特性试验研究多采用比例模型试验方法[27-28]。本文在前期根据相似理论设计搭建的1∶5.5比例模型试验平台基础上[23]，加入能量转换电路，进一步验证控制力矩陀螺系统在拖拉机牵引阻力激增工况下的峰值驱动功率补偿性能。

根据控制力矩陀螺系统力矩输出和惯性储能特性，选用最高转速为9 500 r/min的永磁无刷直流电机作为机械能和电能转换的关键部件。通过带滤波电容的三相整流桥（AC-DC模块）将来自转子电机的交流电转换为直流电并经DC-DC模块输出稳定电压。试验采用ADC模块基于电阻分压原理获取直流母线电压。其它主要硬件组成和传感芯片如表1所示。同时，采用铝合金板和田间土壤搭建了300 cm×200 cm×30 cm试验土槽，设置越障、爬坡和等高线试验场景，试验平台和试验场景如图6所示。

表1　试验平台主要硬件组成

Tab.1　Main hardware components of test platform

名称	型号
转子电机	朗宇V4008/KV600
姿态传感器	MPU-6050
电子调速器	好盈X-Rotor/40A
带磁编码器伺服电机	飞特SM40BL
控制芯片	STM32F103ZET6
光电编码器	HKT30-301
电流传感器芯片	ACS712
DC-DC模块	SX1038

4　试验与结果分析

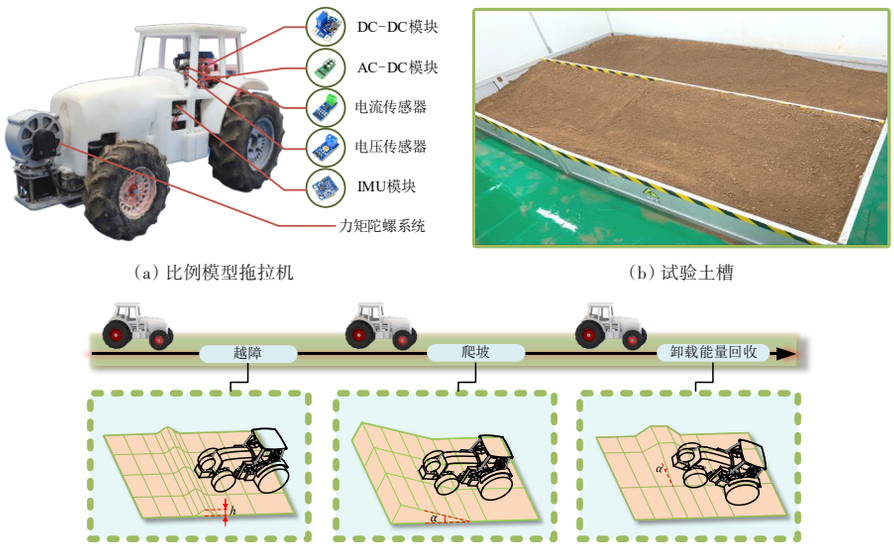
4.1　越障过程中峰值功率补偿试验

为模拟拖拉机在田埂、凸丘、土块及障碍物等复杂环境中驱动功率需求激增的行驶工况，验证力矩陀螺系统对拖拉机峰值驱动功率补偿能力，采用高0.065 m半圆弧型规则障碍，开展车速为0.37 m/s的试验验证，试验场景如图7a所示。

从图7b拖拉机俯仰角响应曲线可以看出，拖拉机经历怠速、越障前、越障、越障后4个阶段。在此过程中，拖拉机由静止至正常行驶、前轮越障、后轮越障、越障后恢复正常行驶等4种工况，对拖拉机驱动力矩需求较高，分别对应直流母线功率图中的4个波峰，如图7c所示。

为确保试验系统在拖拉机稳定行驶条件下进行，峰值功率补偿仅在前轮越障、后轮越障、越障后恢复至正常行驶等3种工况下介入。如图7c所示，在这3种工况下，陀螺转子自旋转速由稳定行驶的9 200 r/min减速，由永磁直流无刷转子电机将机械能转换为电能输出。而且随着直流母线功率峰值的增加，陀螺转子减速度增加，说明力矩陀螺系统在此过程中开展了峰值功率补偿工作，陀螺转子随直流母线功率实时降速释放能量。

结合图7d可知，在陀螺减速释放能量过程中，拖拉机直流母线电压由初始值12.2 V提升至12.8 V。而无陀螺功率补偿试验组，直流母线电压则受牵引阻力影响降低至11.2 V。对比试验结果说明，通过陀螺转子减速释放能量可有效避免较大的拖拉机直流母线压降，缓解母线电压过冲。试验结果表明，力矩陀螺系统可有效实现拖拉机越障过程中峰值驱动功率补偿的目标。



（a）比例模型拖拉机　　（b）试验土槽

（c）试验场景设计

图6　比例模型拖拉机试验平台与试验场景设计

Fig. 6　Design of scaled model tractor test platform and scenarios

4.2 爬坡工况下峰值功率补偿试验

针对拖拉机在直线坡道行驶工况下，受坡度阻力作用驱动功率需求激增的行驶工况，进一步验证力矩陀螺系统对拖拉机欠功率驱动补偿能力，在20°直线坡道下开展车速为0.32 m/s的试验验证，试验场景如图8a所示。

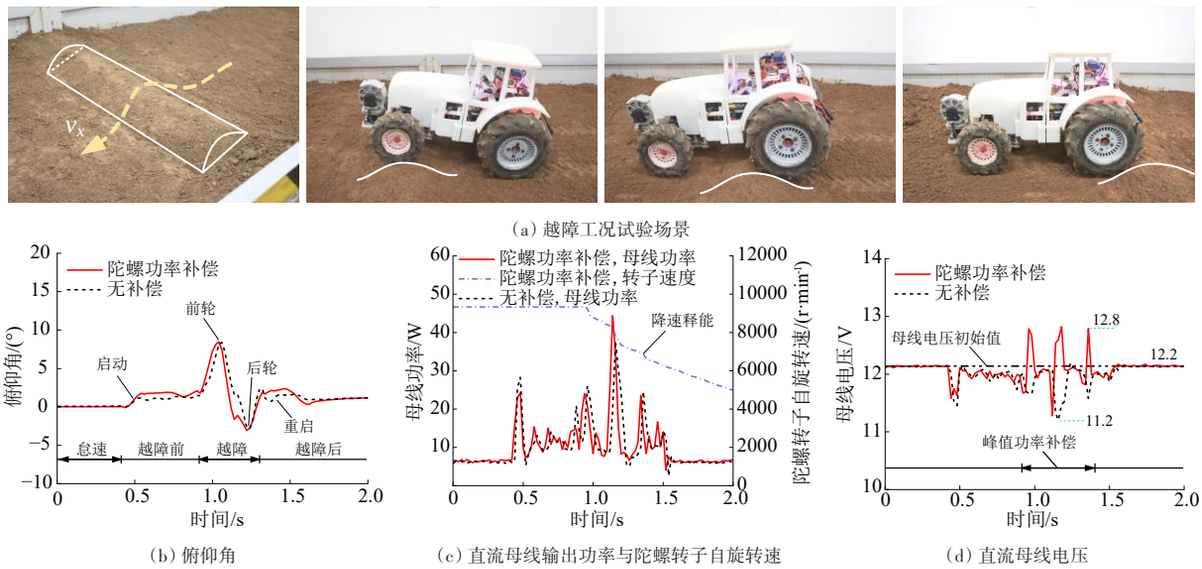
从图8b可以看出，拖拉机爬坡过程中，俯仰角逐渐增加，受坡度阻力作用，整车正常行驶所需驱动力也将逐渐增加。随着拖拉机需求功率的增加，力矩陀螺系统在1.28 s后由转速保持模式切换至放电释能模式，转子由稳定转速9 050 r/min降低至4 115 r/min，将机械能转换为电能输出，试验结果如图8c所示。

由图8d可知，在陀螺转子输出能量的作用下，拖拉机直流母线电压由11.64 V提升至12.9 V。而无力矩陀螺系统开展直流母线峰值功率补偿时，直流母线电压继续降低至11.3 V。对比结果说明，力矩陀螺系统可有效缓解负载功率增加导致的直流母线压降。

此外，试验在1.67 s时关闭力矩陀螺系统功率补偿能量流，直流母线电压受坡度阻力的继续作用迅速降低至11.7 V。该结果从反面进一步证明了力矩陀螺系统功率补偿时维持直流母线电压的作用。以上试验结果证明，陀螺转子降速释放能量可有效补偿坡度阻力作用下拖拉机峰值驱动功率，避免直流母线电压显著下降。

4.3 卸载能量回收试验

为验证力矩陀螺系统在防侧翻控制后能够完成卸

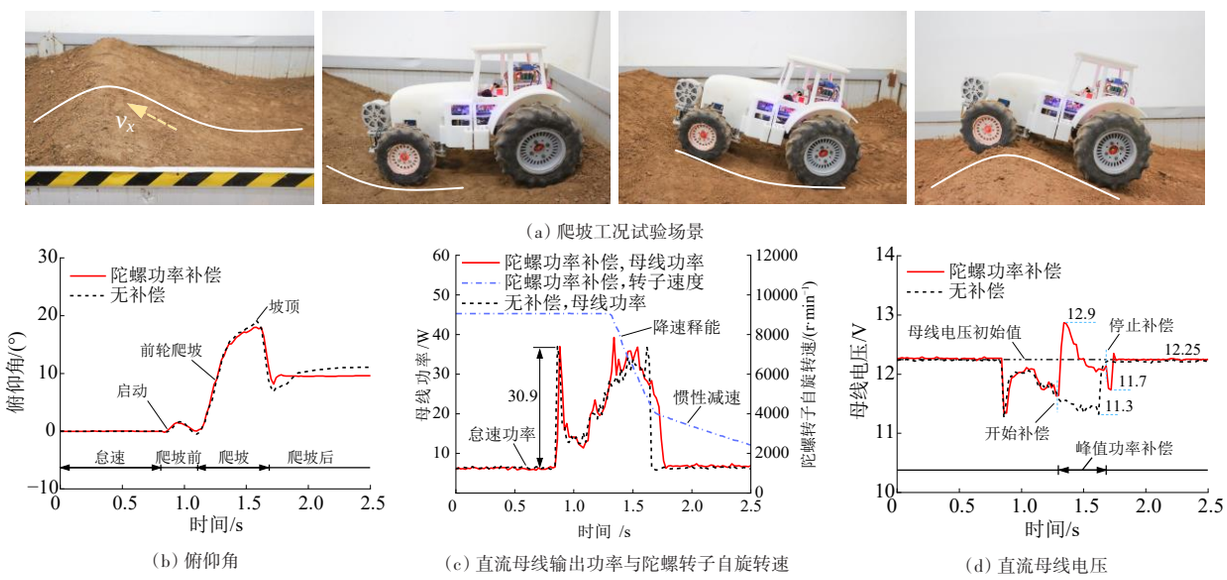


(a) 越障工况试验场景

(b) 俯仰角　(c) 直流母线输出功率与陀螺转子自旋转速　(d) 直流母线电压

图7 拖拉机越障过程中峰值驱动功率补偿试验效果

Fig. 7 Effectiveness of peak driving power compensation during tractor obstacle surmounting



(a) 爬坡工况试验场景

(b) 俯仰角　(c) 直流母线输出功率与陀螺转子自旋转速　(d) 直流母线电压

图8 拖拉机坡度阻力作用下峰值功率补偿试验效果

Fig. 8 Effectiveness of peak driving power compensation under tractor slope resistance

载能量回收，试验在设置0.05 m半圆弧形障碍的23°斜坡上，以速度0.35 m/s开展卸载能量回收试验，具体场景如图9所示。

试验分为怠速、侧翻控制、卸载能量回收、关闭能量回收系统4个阶段开展，拖拉机侧倾角和俯仰角响应如图10a所示。在侧倾控制阶段，无陀螺系统试验组，拖拉机侧倾角逐渐增加至90°以上，表明拖拉机发生了侧翻事故。而在力矩陀螺系统介入下，侧倾角曲线包含2个波峰，分别表示前、后轮越障阶段，对应的陀螺进动角位置响应如图10b所示。在此期间，陀螺进动角位置由-40.88°分别进动至4.16°和40.64°，表明拖拉机在侧翻风险中，陀螺系统通过实时进动输出了相应的防侧翻力矩，将其恢复至稳定行驶状态。

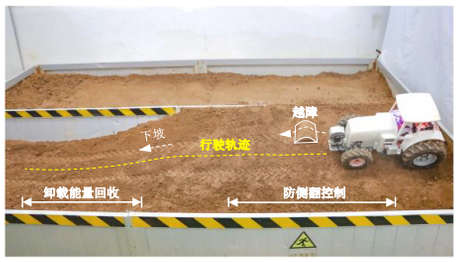


图9　拖拉机侧翻控制后卸载能量回收试验场景

Fig. 9　Test scenario for energy recovery after tractor rollover control

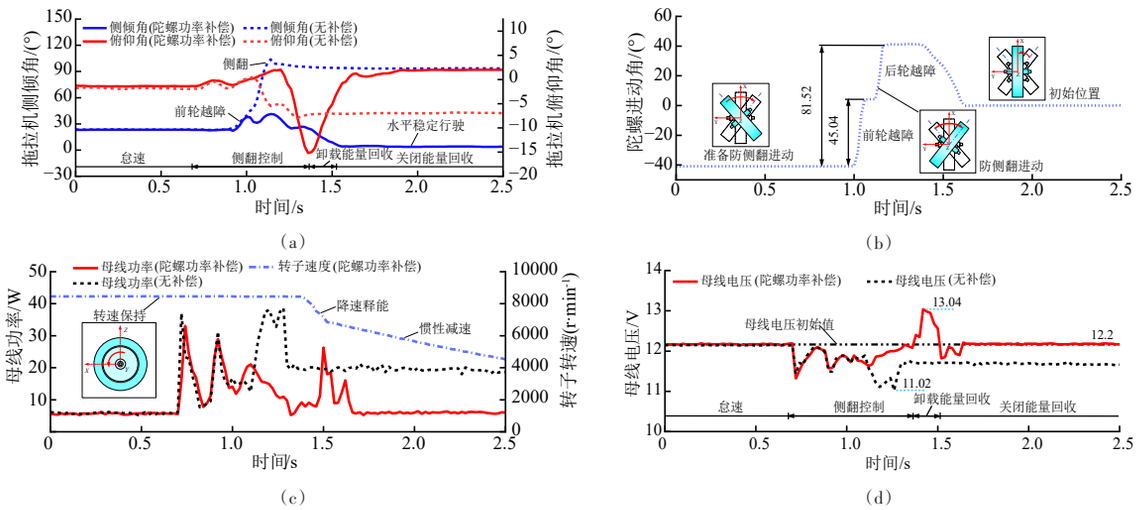


图10　拖拉机侧翻控制和陀螺转子卸载能量回收试验结果

Fig. 10　Results of tractor rollover control and gyro rotor unloading energy recovery tests

在陀螺系统完成防侧翻目标后，拖拉机侧倾角逐渐降低至5°以下，俯仰角由2°降低至-15°，说明拖拉机开始向坡下侧行驶至稳定状态。之后陀螺系统开展卸载能量回收工作，拖拉机直流母线输出功率和陀螺转子转速响应曲线如图10c所示。

在卸载能量回收阶段，陀螺转子转速由8 450 r/min降低至6 850 r/min，说明陀螺转子进入降速释能模式。由图10d可知，在此过程中，拖拉机直流母线由电池组提供的12.2 V电压逐渐增加至13.04 V，说明陀螺转子降速将机械能转换成电能有效供给至拖拉机直流母线。该部分的电能可用于驱动拖拉机正常行驶或在拖拉机停止后给蓄电池充电。

此外，在关闭能量回收后，拖拉机直流母线电压迅速降低至11.82 V，低于母线初始电压。与关闭能量回收前的12.5 V相比，母线电压降低0.68 V，结果进一步验证了陀螺转子降速释放能量提升直流母线电压的能力。以上试验结果说明，力矩陀螺系统不仅可以完成拖拉机防侧翻任务，还能够实现陀螺转子卸载能量回收，提高了系统的利用率和能量使用效率。

5　结论

(1)基于拖拉机力矩陀螺侧翻回稳系统，利用高速陀螺转子的惯性储能潜力，以拖拉机峰值驱动功率补偿为目标，设计了陀螺系统能量流转和功率输出模式，搭建了电动拖拉机时变牵引功率需求模型。

(2)为实时调控拖拉机峰值驱动功率，采用易于实现、鲁棒性强的基于规则的多源能量管理方法，兼顾防侧翻控制和陀螺卸载能量回收功能，构建了力矩陀螺系统多种工作模式下的能量储存、转换、释放策略。

(3)越障、爬坡等欠功率驱动工况试验结果表明，设计能量调控策略可有效实现拖拉机峰值驱动功率补偿，提升整机通过性和稳态行驶能力。同时在完成防侧翻控制后还可实现陀螺转子卸载能量回收，理论上可有效提高力矩陀螺系统的利用率和能量使用效率。

参　考　文　献

[1]　WANG S, WU X, ZHAO X, et al. Co-optimization energy management strategy for a novel dual-motor drive system of electric tractor considering efficiency and stability[J]. Energy, 2023,281:128074.

[2] 刘孟楠，雷生辉，赵静慧，等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊1)：348－364.
LIU Mengnan，LEI Shenghui，ZHAO Jinghui，et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp.1)：348－364.（in Chinese）

[3] ZHANG J，FENG G，YAN X，et al. Cooperative control method considering efficiency and tracking performance for unmanned hybrid tractor based on rotary tillage prediction[J]. Energy，2024，288：129874.

[4] 李同辉，谢斌，王东青，等. 双电机驱动电动拖拉机实时自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊2)：530－543.
LI Tonghui，XIE Bin，WANG Dongqing，et al. Real-time adaptive energy management strategy for dual-motor-driven electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：530－543.（in Chinese）

[5] 汪珍珍，周俊，王旭. 增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：428－438.
WANG Zhenzhen，ZHOU Jun，WANG Xu. Research on energy management model for extended-range electric rotary-tilling tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：428－438.（in Chinese）

[6] SHAO X，YANG Z，MOWAFY S，et al. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction[J]. Soil and Tillage Research，2023，227：105620.

[7] ZHANG S，REN W，XIE B，et al. A combined control method of traction and ballast for an electric tractor in ploughing based on load transfer[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，207：107750.

[8] 王宝超，乔明睿，初香港，等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：431－439.
WANG Baochao，QIAO Mingrui，CHU Xianggang，et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：431－439.（in Chinese）

[9] 李贤哲，张明柱，刘孟楠，等. 基于自适应多分辨率分析的电动拖拉机驱动功率分配策略[J]. 农业工程学报，2023，39(23)：55－66.
LI Xianzhe，ZHANG Mingzhu，LIU Mengnan，et al. Drive power allocation strategy for electric tractor based on adaptive multiresolution analysis[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(23)：55－66.（in Chinese）

[10] LIU M，LI Y，XU L，et al. General modeling and energy management optimization for the fuel cell electric tractor with mechanical shunt type[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，213：108178.

[11] 李利桥，高宗余，聂晶. 电动拖拉机混合电源负载自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：459－469.
LI Liqiao，GAO Zongyu，NIE Jing，et al. Load-adaptive energy management strategy research for electric tractor based on hybrid power source[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(9)：459－469.（in Chinese）

[12] 秦嘉浩，宋战胜，刘海帆，等. 拖拉机姿控飞轮防侧翻系统卸载能量回收试验研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊1)：564－567.
QIN Jiahao，SONG Zhansheng，LIU Haifan，et al. Energy harvesting module design for flywheel-based tractor anti-rollover system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.1)：564－567.（in Chinese）

[13] 戴兴建，邓占峰，刘刚，等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报，2011，26(7)：133－140.
DAI Xingjian，DENG Zhanfeng，LIU Gang，et al. Review on advanced flywheel energy storage system with large scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2011，26(7)：133－140.（in Chinese）

[14] HOU J，SUN J，HOFMANN H. Control development and performance evaluation for battery/flywheel hybrid energy storage solutions to mitigate load fluctuations in all-electric ship propulsion systems[J]. Applied Energy，2018，212：919－930.

[15] HUANG C，CHEN Y. Design of magnetic flywheel control for performance improvement of fuel cells used in vehicles[J]. Energy，2017，118：840－852.

[16] ZHANG W，WANG J，ZHU P，et al. A novel vehicle-mounted magnetic suspension flywheel battery with a virtual inertia spindle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2022，69(6)：5973－5983.

[17] ZHANG W，WANG Z. Dual-mode coordinated control of magnetic suspension flywheel battery based on vehicle driving conditions characteristics[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2024，10(1)：2124－2134.

[18] TZIOVANI L，HADJIDEMETRIOU L，CHARALAMPOUS C，et al. Energy management and control of a flywheel storage system for peak shaving applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2021，12(5)：4195－4207.

[19] 李彦吉，陈鹰，李祎杨. 基于飞轮储能的牵引变电所能量回收和电能质量综合治理系统的设计[J]. 储能科学与技术，2022，11(12)：3883－3894.
LI Yanji，CHEN Ying，LI Yiyang，Design of regenerative braking and power quality harnessed synthetically system in traction substation based on flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology，2022，11(12)：3883－3894.（in Chinese）

[20] HE Z，SONG Z，WANG 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.

[21] FORST L S. Tractor rollovers are preventable[J]. American Journal of Public Health，2018，108(11)：1436－1437.

[22] GUZZOMI A L，RONDELLI V，CAPACCI E. Operator protection in rollover events of articulated narrow track tractors[J]. Biosystems Engineering，2019，185：103－115.

[23] 王龙龙，蓝鸿，周胥，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(增刊2):320-327.
WANG Longlong，LAN Hong，ZHOU Xu，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(Supp.2):320 - 327.(in Chinese)

[24] LIU T，TAN W，TANG X，et al. Driving conditions-driven energy management strategies for hybrid electric vehicles：a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews，2021,151:111521.

[25] 何洪文,孟祥飞.混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J].北京理工大学学报，2022，42(8)：773 - 783.
HE Hongwen，MENG Xiangfei. A review on energy management technology of hybrid electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology，2022，42(8)：773 - 783.(in Chinese)

[26] 高锋阳，张浩然，王文祥，等.规则控制与行驶工况相结合的现代有轨电车能量管理策略[J].机械工程学报，2023,59(4):221 - 231.
GAO Fengyang，ZHANG Haoran，WANG Wenxiang，et al. Energy management strategy of modern tram based on the combination of rule control and driving conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023,59(4):221 - 231.(in Chinese)

[27] PHANOMCHOENG G，RAJAMANI R. New rollover index for the detection of tripped and untripped rollovers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2013,60(10):4726 - 4736.

[28] LI B，ZHANG J，DU H，et al. Two-layer structure based adaptive estimation for vehicle mass and road slope under longitudinal motion [J]. Measurement，2017,95:439 - 455.

(上接第382页)

[20] 赵春江，魏传省，付卫强，等.静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4):359 - 365.
ZHAO Chunjiang，WEI Chuansheng，FU Weiqiang，et al. Design and testing of cruise control system for hydrostatic transmission tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52 (4)：359 - 365.(in Chinese)

[21] 肖红，郑世界，于涛.农业运输车自动导航系统的设计及试验研究[J].农机化研究，2024，46(1)：263 - 268..
XIAO Hong，ZHENG Shijie，YU Tao. Design and experimental study of automatic navigation system for agricultural transport vehicles [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2024，46(1)：263 - 268.(in Chinese)

[22] 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 navigation path tracking control methods for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE，2023，39(15)：1 - 14.(in Chinese)

[23] HEWING L ，WABERSICH K，ZEILINGEAR M. Recursively feasible stochastic model predictive control using indirect feedback[J]. Automatica，2020，119(1):36 - 47.

[24] 满忠伟.基于鲁棒控制的推土机轨迹跟踪设计[J].机电产品开发与创新，2023，36(4)：52 - 54.
MAN Zhongwei. Design of bulldozer trajectory tracking based on robust control[J]. Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products，2023，36(4)：52 - 54.(in Chinese)

[25] JARDINT T P，GIVIGI N S. A robust model-predictive guidance system for autonomous vehicles in cluttered environments[J]. IEEE Systems Journal，2019，13(2)：2034 - 2045.