doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.040

基于侧偏力矩检测的旋耕起垄拖拉机自主导航控制方法

林熙淼[1,2]　叶云翔[3,4]　王梦想[1]　贺磊盈[1,2]　马锃宏[1,2]　杜小强[1,5]

（1. 浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2. 浙江省种植装备技术重点实验室，杭州 310018；
3. 浙江省农业科学院农业装备研究所，杭州 310021；4. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)，杭州 310018；5. 全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018）

摘要： 拖拉机拖挂机具进行旋耕起垄作业时，由于田地不平坦且土壤紧实度不均匀，机具与土壤间存在不可预测耕作阻力，从而产生侧偏力矩，影响车辆行进位姿，进而降低导航跟踪精度。为实现在复杂农业环境下旋耕起垄的精准自主导航作业，设计了一种基于侧偏力矩检测的旋耕起垄拖拉机自主导航控制方法。首先，根据拖拉机三点悬挂结构及作业场景，分析机具悬挂点受力对导航车辆的影响，研制了一种二维轴销传感器并以此搭建了侧偏力矩采集系统，用于检测土壤相对车辆产生的侧偏力矩，试验结果表明侧偏力矩导致导航作业横向误差滞后性增加。其次，将侧偏力矩引入旋耕起垄拖拉机运动学模型中作为外部随机扰动，采用分离控制策略和线性反馈机制实时计算预测状态误差，设计了鲁棒模型预测控制（RMPC）算法控制器。最后，基于ROS框架开发导航控制系统，并将软硬件集成部署至旋耕起垄拖拉机，在单次灭茬处理的甘蓝农田进行作业试验，试验结果表明，导航平均横向误差绝对值为0.022 m，平均航向误差绝对值为0.034 rad，平均垄体直线度为4.4 cm，整体作业质量可以满足作物种植要求。

关键词： 无人拖拉机；旋耕起垄；鲁棒模型预测控制；自主导航；侧偏力矩

中图分类号： S24　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2024)S1-0373-10

Autonomous Navigation Control Method of Rotary Tillage Ridging Tractor Based on Lateral Torque Detection

LIN Ximiao[1,2]　YE Yunxiang[3,4]　WANG Mengxiang[1]　HE Leiying[1,2]　MA Zenghong[1,2]　DU Xiaoqiang[1,5]

（1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou* 310021, *China*
4. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310018, *China*
5. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*）

Abstract: When the tractor tows the tillage equipment for rotary tillage and ridge forming operations, uneven terrain and inconsistent soil compaction lead to unpredictable cultivation resistance, resulting in lateral torque that affects the vehicle's travel posture and ultimately reduces the accuracy of navigation tracking. To achieve precise autonomous navigation for rotary tillage and ridge forming in complex agricultural environments, a control method was designed based on detecting lateral torque for autonomous navigation of the rotary tillage riding tractor. Firstly, based on the three-point hitch structure of the tractor and the operating scenario, the impact of forces at the tool suspension points on the navigation vehicle was analyzed. A two-dimensional axle pin sensor was developed to build a lateral torque collection system for detecting the lateral torque generated by the soil relative to the vehicle. The experiments demonstrated that lateral torque increased the lag in lateral errors during navigation operations. Secondly, the lateral moment of force was introduced into the kinematic model of the rotary tillage ridging tractor as an external random disturbance. A separation control strategy and linear feedback mechanism were used to calculate and predict state errors in real time, leading to the design of a robust model predictive control (RMPC) algorithm

收稿日期：2024－07－30　修回日期：2024－08－30

基金项目： 浙江省农机研发制造推广应用一体化试点项目（YF20220801）和浙江省“三农九方”农业科技协作项目（2024SNJF070-1）

作者简介： 林熙淼（2001—），男，硕士生，主要从事农业机器人研究，E-mail: 1605194375@qq.com

通信作者： 杜小强（1978—），男，教授，博士，主要从事农业机器人研究，E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

controller. Finally, a navigation control system was developed based on the ROS framework, and the software and hardware were integrated and deployed on a rotary tillage ridging tractor. Field operation experiments were conducted in a cabbage field during a single stubble treatment. The results indicated that the average absolute value of the lateral navigation error was 0.022 m, the average absolute value of the heading error was 0.034 rad, and the average linearity of the ridges was 4.4 cm, demonstrating that the overall operation quality met crop planting requirements.

Key words: unmanned tractor; rotary tillage ridging; robust model control; autonomous navigation; lateral torque

0 引言

旋耕起垄作业是一项重要的农业机械化技术,它通过使用旋耕起垄机等农业机械,实现土地的旋耕和起垄,从而改善土壤结构,为作物生长提供良好的土壤环境。这项技术不仅可以提高土地利用率,还能提升作物的产量和质量。无人拖拉机拖挂机具进行旋耕起垄作业时,导航作业精度尤为关键,它直接影响到作业的质量和效率[1]。由于拖挂农具开垄作业时土壤与重负荷农具间受力复杂,外部扰动变量较大[2],亟需设计鲁棒性好的旋耕起垄拖拉机自主导航控制系统。

国外对于拖挂类农机自主导航领域已经有了一定的研究基础。BACKMAN等[3]开发了一种被牵引农具的运动学模型预测方法(NMPC),卫星定位制导农业田间车辆,该方法主要根据机具的横摆位置保证车辆控制精准度。KAYACAN等[4]根据BACKMAN方法,将牵引车辆引入控制系统,设计了一种改进的NMPC方法,减少了导航误差,然而其分布式设计增加了导航系统的复杂性。AVITAL等[5]阐述了农业环境具有显著的随机非结构化特征,总结了针对不同环境下导航模式、核心技术和工作任务的不同特点。国内针对农业无人导航方面的研究已有一定基础,但相关拖挂类农具的成果较少且并没有针对拖挂农具受力情况设计的导航控制器。LIU等[6]基于GNSS导航系统与农田平整系统理论,设计张力传感器,提出了一种考虑土地平整度的全局路径规划方法。熊子庆[7]设计了基于模糊规则的纯跟踪控制方法,该方法根据地面的凹凸性制定模糊规则输出前视跟踪算法,转向算法采用PD转向控制算法,直行和转向算法结合具有较好的鲁棒性和收敛速度,但规则设计复杂。李娇等[8]针对软件算法控制器适用条件限制,设计了一套硬件导航系统辅助探测装置,使用触杆对玉米地的地形进行探测并整合成一套拖拉机自主偏转导航系统。

考虑拖挂机具的受力特征设计导航控制器更接近实际工作情况,可以提高导航控制鲁棒性。本文对旋耕起垄作业的悬挂机具与土壤的互作关系进行受力分析,并搭建侧偏力矩采集系统进行田间作业数据采集,验证侧偏力矩对导航性能的影响。在此基础上,将侧偏力矩作为外部扰动引入车辆运动学模型,设计鲁棒模型预测控制(RMPC)算法控制器,并搭建导航系统部署至旋耕起垄拖拉机,开展甘蓝农田旋耕起垄作业自主导航试验,为悬挂式农业车辆导航控制提供技术参考。

1 旋耕起垄作业分析

目前,起垄作业机具通过一次作业或者多次作业将土壤塑造成适合蔬菜和植物栽植的垄形结构,以满足种植作物的生长环境需求[9]。本文以中国东南部(江浙地区)的甘蓝种植为例,该地区田地由于频繁大量降雨产生积水,采用起垄种植方法,可以有效防止根部积水,有利于蔬菜的生长。依据甘蓝的相关种植要求,垄体设计要求为垄面宽度900~2 200 mm,底面宽度1 000~2 400 mm,同时为了保证后续种植、管理和收获作业的顺利进行,还需预留宽度为250 mm的通道和深200 mm的沟渠,如图1所示。

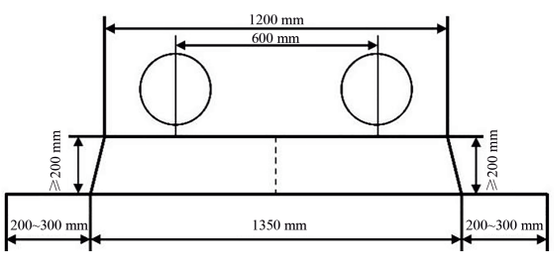


图1 甘蓝种植农艺要求

Fig. 1 Agricultural requirements for cabbage planting

拖拉机车辆在搭载旋耕起垄机具负荷作业时,两侧垅土圆盘由于进土量不平衡而受力不均,产生的横向力通过悬挂点对拖拉机形成侧偏力矩,影响车辆跟踪稳定性。进行作业时,机具两侧的垅土圆盘和旋耕刀作为关键受力部件[10],负责切割并推动土壤向旋耕装置内聚拢,旋耕装置对土壤进行破碎。机具两侧的垅土圆盘呈现为空间任意曲面,土壤对圆盘曲面的作用力构成了一个复杂的空间任意力系,同时,垅土圆盘和旋耕刀也会受到X、Y、Z方向工作阻力的影响。如图2所示,图中R_x、R_y、R_z表示力的分量,R表示这些分量的合力。

旋耕起垄机具通过三点悬挂与拖拉机形成半刚性连接[11],机具的摆动中心O由两侧拉杆延长线与阻力线的交点确定。此时,机具的摆动中心O与拖拉机的动力中心线P共线,此时为正牵引,如图3a所示。当机具两

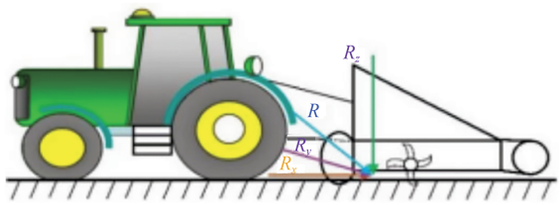
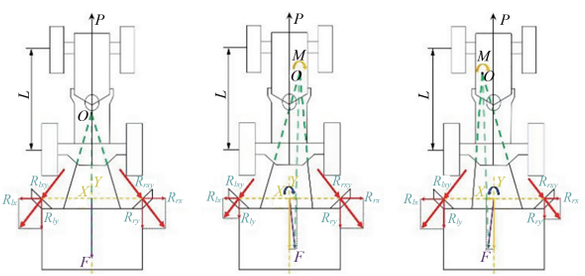


图2　旋耕起垄机具受力特征

Fig. 2　Force characteristics of rotary tillage and ridging equipment

侧进土量不均衡，不平衡的耕作阻力 F 通过三点悬挂拉杆传递给拖拉机，使得机具的摆动中心 O 偏离拖拉机的动力中心线 P，导致偏牵引现象的产生，如图3b和图3c所示，本文将这种受力特征定义为侧偏力矩。将拖挂机具的合力沿 X 轴和 Y 轴进一步分解为沿 X 轴方向的分力 R_{lx}、R_{rx} 以及沿 Y 轴方向分力 R_{ly}、R_{ry}。



（a）正牵引　（b）右偏牵引　（c）左偏牵引

图3　旋耕起垄机具侧偏力矩牵引受力示意

Fig. 3　Schematics of lateral torque traction force of rotary tillage and ridging equipment

2　旋耕起垄自主导航硬件系统设计

2.1　侧偏力矩采集系统

2.1.1　二维轴销传感器设计

目前农业作业中测量机具耕作阻力的装置主要有两种方法。第1种为测力框架法[12]，通过在悬挂架间设计不同结构的测量框架如六向力结构、五杆测力结构等测量耕作阻力，但由于其结构复杂且通用性差导致应用受限。第2种为三点销求和测力法[13]，该方法根据拖拉机三点悬挂结构中的各个销轴精准测量各点阻力，以此并结合悬挂方式设计二维轴销传感器，有效实现耕作阻力的精确测量。

结合农用拖拉机三点悬挂结构特性以及旋耕起垄机具悬挂点尺寸，通过将二维轴销传感器断面设计成圆形杆状，以此替换拖拉机与农机具之间原有的连接轴销。二维轴销传感器安装方式如图4所示。

考虑到轴销传感器随着机具的抬升下降产生扭转[14]，二维轴销传感器作业时 X 方向与机具的水平方向平行固定，Y 方向与机具的垂直方向平行固定。通过实际测量，三点悬挂上拉杆的连接销孔直径为28.5 cm，而下拉杆的连接销孔直径为29.7 cm。基于这一规格，将上下拉杆二维轴销传感器的截面直径设计为27.5 cm和28 cm。针对旋耕起垄作业速度具体要求，设定工作速

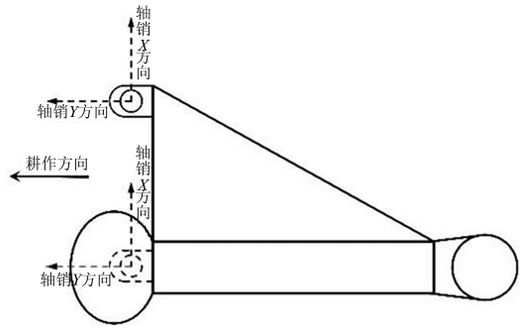


图4　二维轴销传感器安装示意图

Fig. 4　Installation diagram of two-dimensional axis pin sensor

度在2~4 m/s范围内，以此估算出牵引阻力最大值约5 kN。3个拉杆所受的最大平均阻力为17 kN。为了确保二维轴销传感器的性能和耐用性，选择17-4 PH高强度材料进行制造。在三点悬挂测力装置中，轴销传感器内部布置两组电阻应变片，每个轴销传感器独立组成全桥差分电路[15]。当轴销传感器受力发生形变，电桥平衡状态破坏，导致电阻值变化、电桥失衡。通过测量电阻值的变化，可以得到应变量的信息。最后，根据应变量与外力之间的关系计算出施加在轴销传感器上的外力。二维轴销传感器中应变片布置如图5所示。

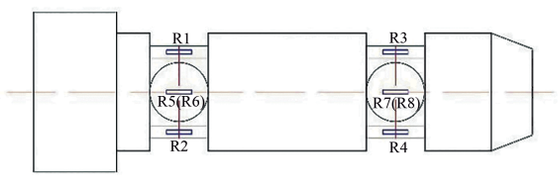


图5　二维轴销传感器布片示意图

Fig. 5　Location of strain gauges in two dimensional axis pin sensor

对二维轴销传感器的结构尺寸和布片桥接进行设计和加工，二维轴销传感器及受力采集模块实物如图6所示。

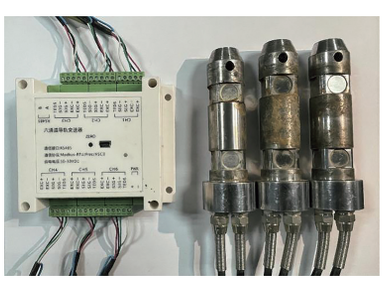


图6　二维轴销传感器与数据采集模块实物图

Fig. 6　Physical picture of two-dimensional axis pin sensor and data acquisition module

2.1.2　侧偏力矩分析

在平整且紧实度均匀地面作业时，机具两侧受到的力相对均匀，将施加在拖拉机上的纵向力定义为耕作阻力。然而，在单次灭茬地面作业时，由于机具两侧垅土圆盘进土量不一致，导致受力不均衡，进而产生横向力。这种横向力通过三点悬挂系统传递给拖拉机，形成侧偏力矩。通过研制的二维轴销传感器采集三点悬挂处各

点分力，侧偏力矩和耕作阻力计算式为

$$M = \left(F_{\text{left}} - F_{\text{right}}\right)L \tag{1}$$

$$F = F_{\text{upper}} + F_{\text{left}} + F_{\text{right}} \tag{2}$$

$$F_{\text{upper}} = F_{\text{left}} = F_{\text{right}} = F_x \cos\alpha + F_y \sin\alpha \tag{3}$$

式中 F_x——二维轴销传感器测量得到的X方向力

F_y——二维轴销传感器测量得到的Y方向力

α——机具倾斜角度

F_{upper}——上拉杆轴销受力

F_{left}——左下拉杆轴销受力

F_{right}——右下拉杆轴销受力

M——侧偏力矩

L——拖拉机与机具之间的距离，取1.9 m

为了更好地阐释耕作阻力和侧偏力矩的概念，采用侧偏力矩采集系统在田间进行初步测试。并使用式(1)、(2)计算旋耕起垄作业时侧偏力矩和耕作阻力，如图7所示。

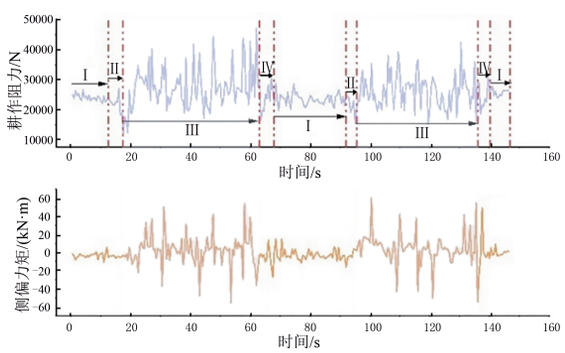


图7 耕作阻力与侧偏力矩变化曲线

Fig. 7 Collection of tillage resistance and lateral torque

从图7中可以明显看出，机具在作业过程中受到的阻力和侧偏力矩存在显著变化并可以分解为4个阶段：机具悬挂在空中(Ⅰ)，机具下降进入土壤(Ⅱ)，旋耕起垄机具匀速作业(Ⅲ)，农具从土壤中抬升(Ⅳ)。而侧偏力矩产生的主要原因是农具两侧受力不均，如图8所示，左下悬挂点和右下悬挂点的力传感器数值变化更直观表现了机具受力状态。

上述测试结果表明机组在复杂环境下进行旋耕起垄作业时，机具与土壤之间的相互作用会给拖拉机行驶带来额外的动态变化，特别是在起垄作业过程中产生的侧偏力矩。如果在导航控制系统中没有针对这些动态变化进行适当的处理和调整，侧偏力矩可能会严重影响拖拉机的导航作业精度和系统鲁棒性，产生显著的导航误差。因此，为了确保导航作业精度和提高作业效率，开发具有一定抗干扰能力的旋耕起垄导航控制系统至关重要。

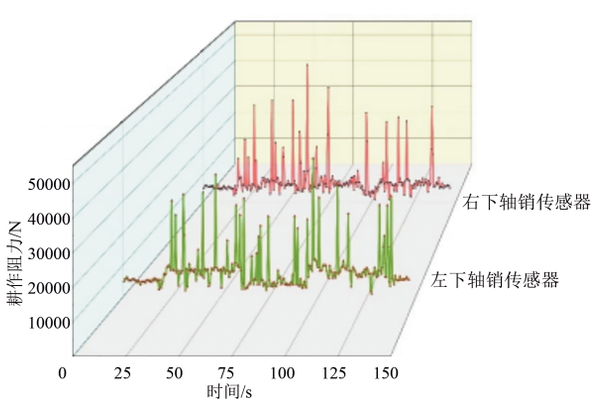


图8 左下拉杆和右下拉杆传感器受力变化曲线

Fig. 8 Force variation curves of left and right lowerpull rod sensors

2.2 旋耕起垄自主导航试验系统集成

2.2.1 试验系统架构

根据旋耕起垄机具的选型及配套牵引拖拉机的功率需求，选用ISEKI T954型拖拉机作为研究平台，如图9所示。该型号拖拉机具有前轮最大转角55°，在小地块中灵活作业的明显优势，配备了诸多先进功能，如独立电控PTO(动力输出)、前后动力拨片换向和电子液压升降手柄，使其在无需踩离合的情况下也能轻松实现前后动力转向，以及作业机具的一键升降。



图9 ISEKI T954型拖拉机

Fig. 9 ISEKI T954 tractor

旋耕起垄导航作业试验系统主要包括感知层、决策层和控制层3个核心组成部分，构成了一个从数据收集、决策制定到实际执行的完整控制流程，确保拖拉机能够精确地跟随预定路径进行作业[17]，如图10所示。其中，感知层负责收集数据，通过高精度的卫星定位装置和惯性测量传感器收集车辆的定位和运动速度，并结合其他传感器如二维轴销传感器，收集拖拉机作业过程中关键信息(如侧偏力矩)，并将这些信息实时传递给决策层。决策层核心由上位机构成，上位机内部部署导航控制算法，用于分析感知层传来的数据，并根据这些数据计算出最优的控制指令。最后，控制层将决策层的路径跟踪算法转化为具体的硬件操作，通过底层硬件控制器如电推杆、直驱方向盘执行，从而实现拖拉机田间导航作业。

2.2.2 组合导航模块

定位获取在路径跟踪控制系统中至关重要，是实现精准导航和高效控制不可或缺的一环。充分利用BDS在精准农业中的优势，采用BDS信号接收器配合RTK固定基站来获取拖拉机位置信号，并通过WIS2000型组合导航模块实现对车辆的精确定位，组合导航实物如图11所示。

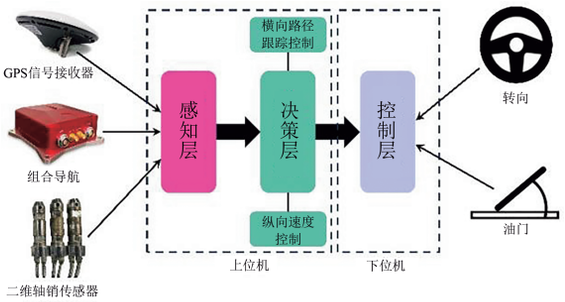


图 10　试验系统架构

Fig. 10　Experimental system architecture



图 11　组合导航模块

Fig. 11　Integrated navigation module

通过组合导航模块获取拖拉机的相对位置信息后，这些数据被发送至上位机导航控制系统，通过坐标系转换成车身坐标系，导航控制系统获取车辆当前的精确位置后，计算出从当前位置到目标位置的最优控制量，以精确地跟踪这一路径。该上位机采用 Intel Core i5-11500 处理器，配备基于 Linux 内核的 Ubuntu 操作系统，并具有多个数据接口。上位机结合传感器信息对导航控制算法进行最优求解。之后，这些决策指令发至下位机执行，从而精准地实现拖拉机导航作业。

2.2.3　导航下位机集成

导航控制系统下位机主要负责接收上位机发出的指令，控制拖拉机电动方向盘、油门控制器、PTO 开关以及机具上升下降等执行机构动作，从而实现拖拉机导航控制。使用 Arduino Nano 微处理器作为主控芯片，CAN 模块接收上位机控制指令并通过串口发送，驱动油门及转向机构，TTL 转 485 通讯模块接收二位轴销传感器受力数据并在主控芯片中处理各功能集成，如图 12 所示。

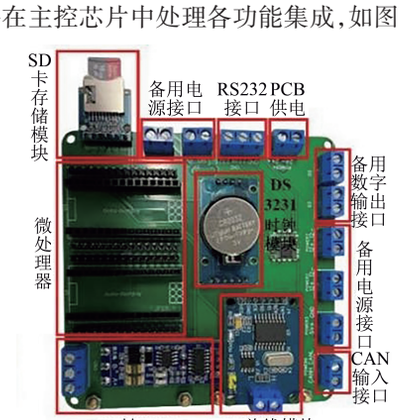


图 12　下位机功能集成

Fig. 12　Integration of lower computer functions

3　旋耕起垄自主导航控制算法与软件设计

3.1　车辆运动学模型建立

考虑到拖拉机以较低速度行驶，车辆运动学模型可以满足路径跟踪的需求[18]。针对轮式农业拖拉机，通常采用前轮转向和后轮驱动的方式。为了简化分析，将阿克曼转向模型进一步简化为自行车模型进行运动学建模，如图 13 所示。该运动学模型的构建基于以下假设[19]：①假设拖拉机只在二维平面内运动，不考虑任何垂向运动。②忽略左右轮的转角差值，车辆转向过程中质心侧偏角不变。③假设拖拉机是一个质量均匀的刚体。

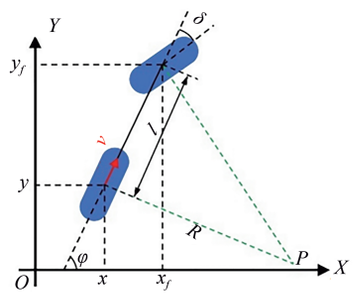


图 13　拖拉机运动学模型

Fig. 13　Tractor kinematic model

图 13 中，l 为拖拉机轴距，φ 为车身航向角，δ 为拖拉机前轮转角，v 为拖拉机后轴中心线速度，R 为拖拉机转向半径，P 为拖拉机瞬时转动中心。基于上述假设，选取广义坐标作为状态变量，拖拉机速度和前轮转角作为控制变量[20]。

拖拉机后轴中心点 (x, y) 处的速度 v 可以表示为

$$v = \dot{x}\cos\varphi + \dot{y}\sin\varphi \tag{4}$$

拖拉机转向时需满足运动学约束方程

$$\begin{cases} \dot{x}\sin\varphi - \dot{y}\cos\varphi = 0 \\ \dot{x}\sin(\varphi + \delta) - \dot{y}\cos(\varphi + \delta) = 0 \end{cases} \tag{5}$$

联合式(4)、(5)可得

$$\begin{cases} \dot{x} = v\cos\varphi \\ \dot{y} = v\sin\varphi \end{cases} \tag{6}$$

基于拖拉机前轮和后轮几何关系可得

$$\begin{cases} x_f = x + l\cos\varphi \\ y_f = y + l\sin\varphi \end{cases} \tag{7}$$

式中　x_f——拖拉机前轴中心点相对 X 轴坐标

y_f——拖拉机前轴中心点相对 Y 轴坐标

将式(6)、(7)代入式(5)，整理可得

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{l}\tan\delta \tag{8}$$

基于上述推导，将式(6)、(8)作为拖拉机运动学模型状态方程[21]，将其转换成状态空间表达形式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v\cos\varphi \\ v\sin\varphi \\ \dfrac{\tan\delta}{l}v \end{bmatrix} \tag{9}$$

式(9)可进一步表示为

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u}) \tag{10}$$

其中 $\boldsymbol{\xi} = [x\ y\ \varphi]^{\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{u} = [v\ \delta]^{\mathrm{T}}$

式中 $\boldsymbol{\xi}$——导航控制系统状态变量

$\boldsymbol{u}$——系统控制量

拖拉机进行导航作业时,通过输入控制量改变拖拉机的状态量,从而实现拖拉机导航作业。

3.2 鲁棒模型预测控制算法

针对导航控制系统受外部扰动影响作业精度下降这一问题,将侧偏力矩作为外部可测量扰动引入车辆运动学模型,构建鲁棒预测模型。为了减小侧偏力矩对导航作业性能的影响,结合侧偏力矩采集分析数据,土壤与机具交互时施加在机具上的耕作阻力是有界的,且由于拖拉机执行机构的能量有限,因此将侧偏力矩通过归一化处理后作为外部扰动变量引入车辆运动学模型,以此构建鲁棒运动学模型[22],表达式为

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\varphi\\ \sin\varphi\\ \dfrac{\tan\delta}{l}\end{bmatrix} v + \begin{bmatrix}w_1\\ w_2\\ w_3\end{bmatrix} = f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u}) + Dw \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{w} = [w_1\ w_2\ w_3]^{\mathrm{T}}$

式中 $\boldsymbol{w}$——外部有界扰动

D——机具左右两侧拉杆轴销单个悬挂点受力计算得出的侧偏力矩

由于拖拉机执行机构能量有限,因此,外部扰动需要满足有界性。采用分离控制策略,将标称系统(不考虑外界扰动影响)即传统的模型控制系统从实际的鲁棒控制系统中进行分离,并基于标称模型构建目标函数和相应的状态及控制约束,通过二次规划求解最优控制量,结合线性状态反馈机制,实时计算标称模型与鲁棒模型之间的预测状态误差,在导航控制系统受到扰动影响之前进行补偿校正,抑制外部扰动影响。将非线性鲁棒运动学模型线性化,即

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_r = \begin{bmatrix}\dot{x}_r\\ \dot{y}_r\\ \dot{\varphi}_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\varphi_r\\ \sin\varphi_r\\ \dfrac{\tan\delta_r}{l}\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$v_r = f(\boldsymbol{\xi}_r,\boldsymbol{u}_r) \tag{13}$$

式中 x_r——参考目标点X轴相对位置

y_r——参考目标点Y轴相对位置

φ_r——参考目标点方向角

v_r——参考目标点速度

$\boldsymbol{u}_r$——参考目标点期望速度和前轮转角矩阵

定义轨迹跟踪误差$\tilde{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_r$,$\tilde{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_r$,将式(13)在任意参考目标点$(\boldsymbol{\xi}_r, \boldsymbol{u}_r)$处进行泰勒展开,并忽略高阶项,可得到

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = f(\boldsymbol{\xi}_r,\boldsymbol{u}_r) + \left.\frac{\partial f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{\xi}}\right|_{\substack{\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{\xi}_r\\ \boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_r}} \tilde{\boldsymbol{\xi}} + \left.\frac{\partial f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{u}}\right|_{\substack{\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{\xi}_r\\ \boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_r}} \tilde{\boldsymbol{u}} \tag{14}$$

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix}0 & 0 & -v_r\sin\varphi_r\\ 0 & 0 & v_r\cos\varphi_r\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{u}} = \begin{bmatrix}\cos\varphi_r & 0\\ \sin\varphi_r & 0\\ \dfrac{\tan\delta_r}{l} & \dfrac{v_r}{\cos^2\delta_r l}\end{bmatrix} \tag{16}$$

状态量误差变化量$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}$表示为

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}} = \begin{bmatrix}\dot{x}-\dot{x}_r\\ \dot{y}-\dot{y}_r\\ \dot{\varphi}-\dot{\varphi}_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 0 & -v_r\sin\varphi_r\\ 0 & 0 & v_r\cos\varphi_r\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x-x_r\\ y-y_r\\ \varphi-\varphi_r\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\cos\varphi_r & 0\\ \sin\varphi_r & 0\\ \dfrac{\tan\delta_r}{l} & \dfrac{v_r}{\cos^2\delta_r l}\end{bmatrix} \tag{17}$$

则 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}} = \boldsymbol{A}_t\tilde{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{B}_t\tilde{\boldsymbol{u}}$

其中 $\tilde{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix}x-x_r\\ y-y_r\\ \varphi-\varphi_r\end{bmatrix}$ $\tilde{\boldsymbol{u}} = \begin{bmatrix}v-v_r\\ \delta-\delta_r\end{bmatrix}$

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_t = \begin{bmatrix}1 & 0 & -Tv_r\sin\varphi_r\\ 0 & 1 & Tv_r\cos\varphi_r\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}_t = \begin{bmatrix}T\cos\varphi_r & 0\\ T\sin\varphi_r & 0\\ \dfrac{T\tan\delta_r}{l} & \dfrac{Tv_r}{\cos^2\delta_r l}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{18}$$

式中 T——采样周期

为了满足导航控制系统设计需求,将式(17)采用前向欧拉法进行离散化,得到

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}} = \frac{\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) - \tilde{\boldsymbol{\xi}}(k)}{T} = \boldsymbol{A}_t\tilde{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{B}_t\tilde{\boldsymbol{u}} \tag{19}$$

其中 $\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) = (T\boldsymbol{A}_t + \boldsymbol{E})\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + T\boldsymbol{B}_t\tilde{\boldsymbol{u}}$

式中 k——离散变量

$\boldsymbol{E}$——单位矩阵

通过联合式(11)、(17),可得到离散化后的线性时变车辆预测模型

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) = \boldsymbol{A}_t\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + \boldsymbol{B}_t\tilde{\boldsymbol{u}}(k) + D_t\boldsymbol{w}(k) \tag{20}$$

式中 D_t——通过二维轴销传感器测量获取并经过归一化处理的侧偏力矩

考虑外部扰动,额外定义误差

$$e_{fb}(k) = \boldsymbol{\xi}(k) - z(k) \tag{21}$$

式中 $z(k)$——标称模型状态量和控制量

当$z(0) = \boldsymbol{\xi}(0)$,初始时刻拖拉机的位姿可通过多种传感器获取,因此,标称预测模型与实际鲁棒预测模型

初始时刻姿态相同。实际鲁棒预测模型状态是理想情况下标称系统的输出状态量与由外部扰动引起的误差量之和。

在k时刻，拖拉机导航控制系统实际输入定义为[23]

$$u(k)=s(k)-K(k)e_{fb}(k) \tag{22}$$

其中　$s(k)=s(k-1)+\Delta s(k)$

式中　$s(k)$——标称预测模型k时刻最优控制量

$e_{fb}(k)$——k时刻实际预测模型与标称鲁棒模型之间的预测状态输出误差

$s(k)$通过二次型优化求解，滚动优化执行每一时刻最优控制增量序列的第一组向量。

线性反馈增益K通过求解Riccati方程获取，计算式为

$$K=-(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{R})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} \tag{23}$$

其中　$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}-\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\right)(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B})^{-1}\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\right)+\boldsymbol{Q}$ (24)

式中　$\boldsymbol{Q}$——标称模型预测控制器目标函数中的半定权重矩阵

$\boldsymbol{R}$——标称模型预测控制器目标函数中的正定权重矩阵

$\boldsymbol{P}$通过给定的$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$进行求解，通过Riccati方程求解结果会有多个可行解，为了控制系统的稳定性，因此，K的选取需要满足$\left|\mathrm{eig}\left(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tK\right)\right|<1$。

联合式(22)、(23)可得

$$e_{fb}(k+1)=\left(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tK\right)e_{fb}(k)+D_t\boldsymbol{w}(k) \tag{25}$$

由于$\left|\mathrm{eig}\left(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tK\right)\right|<1$且$\boldsymbol{w}(k)$有界，则标称预测模型跟踪误差在不考虑扰动的情况下为全局指数稳定；对于全局指数稳定的线性系统添加一个外部扰动，则附加扰动的全局指数稳定系统是能够保证最终是有界的，所以标称预测模型$z(k)$为指数稳定，$e_{fb}(k)$为最终有界，即$\boldsymbol{\xi}(k)=z(k)+e_{fb}(k)$最终有界。误差$e_{fb}(k)$的演化通过预测扰动$\boldsymbol{w}(k)$动态得到，即

$$\begin{bmatrix}e_{fb}(1)\\e_{fb}(2)\\\vdots\\e_{fb}(k)\end{bmatrix}=D_t\begin{bmatrix}w(0)\\w(1)\\\vdots\\w(k-1)\end{bmatrix}\cdot$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & 0 & \cdots & 0\\(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tk) & \boldsymbol{I} & \cdots & 0\\\vdots & \vdots & & \vdots\\\prod_{i=1}^{k-1}(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tk)^i & \prod_{i=2}^{k-1}(\boldsymbol{A}_t-\boldsymbol{B}_tk)^i & \cdots & \boldsymbol{I}\end{bmatrix} \tag{26}$$

式中　$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

在k时刻，拖拉机导航控制系统实际控制量输入为

$$u(k)=s(k)-K(k)e_{fb}(k) \tag{27}$$

该控制量根据外部侧偏力矩扰动变化，结合标称模型最优控制量对RMPC系统的控制量实时补偿校正[24]，使控制系统能够更快地趋于稳定和收敛。同时，满足相应的状态约束X及控制约束U。

3.3　控制器软件开发

在田间复杂环境下进行旋耕起垄导航作业时，针对离散化后的线性时变车辆模型构建导航控制系统会受到外部扰动的影响，进而导致导航作业精度下降。因此，针对外部可测量扰动，构建含有外部扰动的鲁棒预测模型。其中，扰动项具有与状态量相应的维数。在Matlab仿真环境中基于round()函数生成[-1，1]之间的随机数，作为外部可测量随机扰动D_t。为了给线性状态反馈提供必要的补偿余地，标称预测模型的控制约束取值相对保守。基于拖拉机当前状态量与目标状态量之间的误差，构建目标函数，通过二次型优化求解标称模型的最优控制量，结合线性状态反馈机制，计算标称模型与鲁棒模型之间的预测状态输出误差，并对标称模型最优控制量进行补偿修正，通过求解线性反馈增益K确保RMPC系统的稳定性。为了观察拖拉机状态量的收敛性和稳定性，以跟踪误差趋于零为目标，将拖拉机的初始位置设定$\boldsymbol{\xi}$为[1 1 0.5]，参考目标点$\boldsymbol{\xi}_r$为[0 0 0]。在Matlab环境中搭建RMPC框架，并设定相应的仿真参数，仿真时长60 s，如表1所示。

表1　RMPC算法仿真参数设定

Tab. 1　RMPC algorithm simulation parameter settings

参数	数值
采样周期/s	0.1
标称模型前轮最大转角δ_{max}/rad	0.7
随机扰动D_t	2round()-1
扰动系数$\boldsymbol{w}(k)$	[0.8 0.8 0.6]
预测时域N_p	23
控制时域N_c	18
参考车辆速度/(km·h^{-1})	3
松弛因子ε	8
松弛因子权重系数ρ	10
前轮转角最大增量/rad	0.174
速度最大增量/(km·h^{-1})	0.36

拖拉机导航控制系统基于Ubuntu系统ROS框架进行部署开发，其发布-订阅通信机制为系统提供了极大的灵活性和便捷性。软件主要由主程序、姿态获取、参考目标点计算、标称模型优化求解、鲁棒模型控制量求解、串口通信6个部分组成。其中，拖拉机姿态获取模块通过利用传感器实时坐标转换计算拖拉机的位置和姿态。参考目标点计算模块根据拖拉机位置和参考轨迹确定参考目标点及其序号。标称模型优化求解模块通过获取车辆当前位置与参考目标点之间的误差，并基于标称模型目标函数及相应的状态和控制约束进行优化求解，从而获得标称模型的最优控制量，根据最优控制量预测标称模型状态输出。鲁棒模型预测模块通过将侧偏力矩进行归一化处理，基于标称预测模型的最优控

制量，计算鲁棒模型的预测状态输出[25]。

主函数控制模块对各个模块进行初始化，根据参考目标点序列号计算出参考路径曲率，并通过CAN通信向下位机发出前轮转角、机具上升下降和PTO开启关闭作业指令。串口通讯模型在控制系统负责接收上位机指令，并对指令解析传递给执行机构，实现拖拉机导航控制。控制软件系统架构如图14所示。

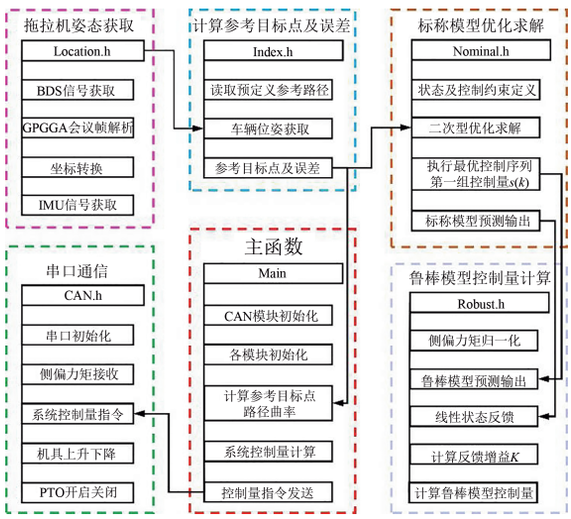


图14 导航控制系统架构

Fig. 14 Navigation control system architecture

4 旋耕起垄自主导航试验与结果分析

4.1 试验方法

为测试所设计的旋耕起垄自主导航试验系统在实际复杂农业环境中的性能及其对外部扰动的抑制能力，开展实地作业试验。试验场地位于浙江省农业科学院杨渡科研创新基地，试验地块上一生长周期甘蓝收获后，使用灭茬机对地面进行了单次灭茬处理，旋耕起垄机组田间试验现场如图15所示。



图15 机组田间旋耕起垄导航作业试验

Fig. 15 Field rotary tillage and ridge formation navigation operation experiment of unit

试验开始前，在试验田间采集两个坐标点，生成AB线长度为30 m，作为预定义参考轨迹。沿着该参考轨迹以5 m间隔，通过切片法和土壤参数传感器采集试验路径6个样点处土壤参数，现场土壤参数采集测量如图16所示，土壤参数统计结果见表2。

旋耕起垄导航作业开始时，拖拉机将自动驶向参考轨迹，并在横向误差小于5 cm且偏航角小于0.05 rad时控制旋耕起垄机具自动下降，同时开启PTO作业。



(a) 土壤采集环刀 (b) 去皮称量 (c) 土壤参数测量传感器

图16 土壤参数测量

Fig. 16 Soil parameters measurement

表2 试验田间土壤参数

Tab. 2 Soil parameters in field of experiment

参数	土壤湿密度/(g·cm^{-3})	土壤含水率/%	土壤温度/℃
数值	1.52	8.6	14.7
	1.49	8.3	14.3
	1.56	8.2	14.6
	1.49	8.8	14.4
	1.59	7.9	14.8
	1.55	8.4	14.5
均值	1.53	8.4	14.6

为了更加直观地观察旋耕起垄导航作业横向误差和航向误差，将旋耕起垄导航4次试验作业时的横向误差和航向误差进行组合绘制，如图17、18所示。

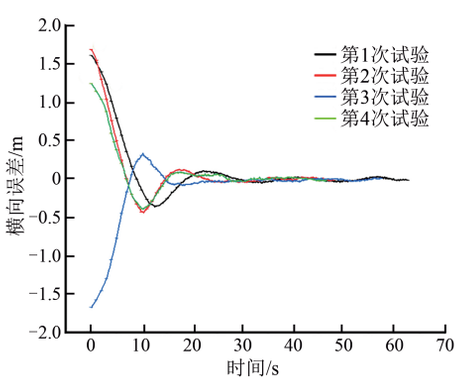


图17 导航作业横向误差变化曲线

Fig. 17 Lateral error of navigation task

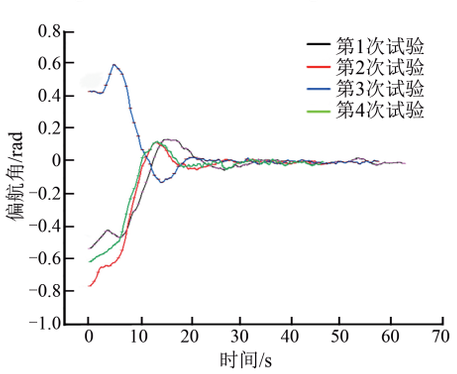


图18 导航作业偏航角变化曲线

Fig. 18 Navigation homework heading erroryaw angle variation curves

通过分析实际行驶轨迹、横向误差和航偏角误差，可以得到所设计的考虑侧偏力矩扰动的RMPC算法在旋耕起垄作业中的导航控制性能。试验统计结果如表3所示。

表3　RMPC算法单次灭茬地面4组路径跟踪数据统计

Table. 3　RMPC algorithm used for single crop removal on ground four sets of path tracking data statistics

参数	试验1	试验2	试验3	试验4	均值
平均横向误差绝对值/m	0.018	0.022	0.021	0.028	0.022
最大横向误差绝对值/m	0.046	0.067	0.100	0.085	0.075
平均航向误差绝对值/rad	0.029	0.031	0.038	0.037	0.034
最大航向误差绝对值/rad	0.018	0.012	0.029	0.018	0.019
平均耕作阻力/kN	48.13	53.05	47.79	49.93	49.73
最大耕作阻力/kN	107.02	98.69	108.87	104.24	104.70
平均侧偏力矩绝对值/(kN·m)	23.74	24.81	28.24	26.23	25.76
最大侧偏力矩绝对值/(kN·m)	91.30	73.86	96.33	98.46	89.99

试验结果表明，机组在匀速作业时受到外部平均为25.76 kN·m的侧偏力矩，其平均横向误差绝对值为0.022 m，航向误差绝对值为0.034 rad。该方法整体满足自主导航的控制精度需求。在同一试验平台上加入未引入侧偏力矩干扰的传统MPC算法和纯跟踪(PP)算法控制器在同一单次灭茬地面展开对比试验，该两种控制方法与提出的基于侧偏力矩扰动的方法进行对比，如表4所示。对比结果表明，该方法表现出更高的导航作业精度和抗干扰能力，平均航向误差绝对值相对减少21%和24%，最大航向误差绝对值相对减少25%和36%。表明引入侧偏力矩干扰的RMPC算法能够生成平滑的控制输入参数，有效处理机具作业产生的力矩干扰，实现导航作业性能整体提升。

表4　3种算法在单次灭茬地面路径跟踪数据统计

Tab. 4　Three algorithms for single crop removal on ground statistics of path tracking data

参数	PP算法	MPC算法	RMPC算法
平均横向误差绝对值/m	0.029	0.028	0.022
最大横向误差绝对值/m	0.106	0.095	0.075
平均航向误差绝对值/rad	0.84	0.82	0.62
最大航向误差绝对值/rad	6.22	5.59	3.55
平均耕作阻力/kN	55.25	52.25	49.73
最大耕作阻力/kN	121.20	102.01	104.70
平均侧偏力矩绝对值/(kN·m)	28.36	25.51	25.76
最大侧偏力矩绝对值/(kN·m)	929.50	88.37	89.99

4.2　结果分析

从表3和图17、18中可以看出，所设计的旋耕起垄自主导航系统可以实现BDS导航轨迹跟踪，且实际作业中的横向误差和航向误差均随时间收敛。4次试验的平均横向误差绝对值为0.022 m，平均航向误差绝对值为0.034 rad。

垄体直线度是旋耕起垄作业质量衡量标准之一。根据DB36/T 1211-2019《蔬菜机械化耕整地作业质量起垄作业质量》要求，对垄体直线度进行测量统计。垄体直线度测量方法为：在垄的起始、终点端以垄宽中心为端点，拉一条直线作为基准线，测定垄体中心线偏离基准线距离，测点间距2 m，计算偏差平均值作为垄体直线度，计算为

$$\delta_l = \frac{\sum_{z=1}^{n} \delta_z}{n} \tag{28}$$

式中　δ_l——垄体直线度，cm

δ_z——第z个测点垄体中线偏离基准线距离，cm

n——测点数量

根据垄体直线度测量方法，对采用了RMPC算法的旋耕起垄拖拉机进行作业测试，测试直线度场景如图19所示。共选取90个测量点进行评估，结果显示平均垄体直线度为4.4 cm，可以满足甘蓝种植需求。



图19　垄体直线度测量

Fig. 19　Straightness measurement of ridge body

5　结论

(1)通过分析旋耕起垄作业过程中机具与土壤的互作关系和受力特征，结合拖拉机三点悬挂结构和旋耕起垄机具尺寸及实际应用场景，设计加工了二维轴销传感器，并结合姿态传感器，设计了一套侧偏力矩采集系统，试验验证侧偏力矩对导航性能影响。

(2)将侧偏力矩作为外部可测量随机扰动引入车辆运动学模型，采用分离标称系统策略，基于标称模型构建目标函数和相应的状态及控制约束，通过二次规划求解最优控制量，计算状态误差并进行补偿构建了鲁棒模型预测控制器。

(3)设计并集成旋耕起垄导航作业试验系统，采用BDS接收器与组合导航模块获取拖拉机的位姿，基于ROS框架部署RMPC导航系统，实现旋耕起垄拖拉机自主导航控制。在单次灭茬甘蓝田进行作业试验，平均横向误差绝对值0.022 m，平均航向误差绝对值为0.034 rad，符合甘蓝种植起垄导航要求。

参 考 文 献

[1] 梁玉刚，胡文彬，刘烨，等. 中国垄作栽培模式的研究进展[J]. 生态学杂志，2022，41(7)：1414－1422.
LIANG Yugang，HU Wenbin，LIU Ye，et al. Research progress on ridge cultivation mode in China [J]. Chinese Journal of Ecology，2022，41(7)：1414－1422.(in Chinese)

[2] 张鹏程，申屠留芳，孙星钊，等. 新型旋耕起垄抛土装置设计与试验[J]. 中国农机化学报，2024，45(7)：28－33，47.
ZHANG Pengcheng，SHENTU Liufang，SUN Xingzhao，et al. Design and test of a new rotary tillage ridge-making and soil-throwing device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(7)：28－33，47.(in Chinese)

[3] BACKMAN J，OKSANEN T，Visala A. Navigation system for agricultural machines：nonlinear model predictive path tracking[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2012，82：32－43.

[4] KAYACAN E，RAMON H，et al. Modeling and identification of the yaw dynamics of an autonomous tractor[C]//Control Conference (ASCC)，2013 9th Asian. IEEE，2013.

[5] AVITAL B，CLEMENT V. Agricultural robots for field operations：concepts and components[J]. Biosystems Engineering，2016，149：30－31.

[6] LIU G，KANG X，XIA Y X，et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(5)：27－33.

[7] 熊子庆. 油菜直播机组自主导航作业控制系统设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学，2023.
XIONG Ziqing. Design and experiment of autonomous navigation control system for rapeseed direct seeding machinery[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2023.(in Chinese)

[8] 李娇，李洪文，何卿，等. 拖拉机自动导航与机具偏转导航的仿真对比研究[J]. 农机化研究，2009，31(7)：22－25.
LI Jiao，LI Hongwen，HE Qing，et al. Simulation comparison study on automatic navigation and implement deflection navigation of tractors[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2009，31(7)：22－25.(in Chinese)

[9] 高庆生，胡桧，陈清，等. 我国设施蔬菜机械化起垄技术应用现状及发展趋势[J]. 中国蔬菜，2016(5)：4－7.
GAO Qingsheng，HU Gui，CHEN Qing，et al. Current status and development trend of ridge-making technology for protected vegetable mechanization in China[J]. China Vegetables，2016(5)：4－7.(in Chinese)

[10] 张还，郭鑫雨，张健，等. 马铃薯播种机两段式组合起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊1)：76－83，92.
ZHANG Huan，GUO Xinyu，ZHANG Jian，et al. Design and test of two-stage combined ridge-making device for potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.1)：76－83，92.(in Chinese)

[11] 丁超磊，赵海峰，乔建翔，等. 基于高精度GNSS惯性导航设备的自动导航驾驶拖拉机作业性能试验研究[J]. 拖拉机与农用运输车，2024，51(2)：49－51，59.
DING Chaolei，ZHAO Haifeng，QIAO Jianxiang，et al. Experimental study on the performance of tractors with automatic navigation driving based on high-precision GNSS inertial navigation equipment[J]. Tractors and Farm Transporters，2024，51(2)：49－51，59.(in Chinese)

[12] 于艳，龚丽农，尚书旗. 农机土槽试验动力学参数测试系统的研制[J]. 农业工程学报，2011，27(增刊1)：323－328.
YU Yan，GONG Linong，SHANG Shuqi. Development of a dynamic parameter testing system for agricultural machinery soil slot experiment[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(Supp.1)：323－328.(in Chinese)

[13] 许春林，李连豪，赵大勇，等. 悬挂农具作业动力学参数田间实时测试系统[J]. 农业机械学报，2013，44(4)：83－88，82
XU Chunlin，LI Lianhao，ZHAO Dayong，et al. Development of a real-time field testing system for dynamic parameters of suspended agricultural implements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(4)：83－88，82.(in Chinese)

[14] 陈博仪. 耕作阻力采集系统设计与试验研究[D]. 广州：华南农业大学，2023.
CHEN Boyi. Design and experimental study of a tillage resistance acquisition system[D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2023.(in Chinese)

[15] 涂云婷，金敏慧，张成功，等. 用于流速测量的微型力传感器的研制[J]. 微纳电子技术，2019，56(12)：992－998
TU Yunting，JIN Minhui，ZHANG Chenggong，et al. Development of a micro force sensor for flow velocity measurement[J]. Micronanoelectronic Technology，2019，56(12)：992－998.(in Chinese)

[16] 宋欣桦. 压力传感器静态标定试验数据的计算器和计算机处理[J]. 信息记录材料，2023，24(5)：105－107.
SONG Xinhua. Calculation and computer processing of static calibration test data for pressure sensors[J].Information Recording Material，2023，24(5)：105－107.(in Chinese)

[17] 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. Automatic navigation steering control method for tractors based on electric power steering[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(1)：48－57.(in Chinese)

[18] TANG L，YAN F，ZOU B，et al. An improved kinematic model predictive control for high-speed path tracking of autonomous vehicles [J]. IEEE Access，2020，99：1.

[19] 葛超，张嘉滨，王蕾，等. 基于模型预测控制的自动驾驶车辆轨迹规划[J]. 计算机应用，2024，44(6)：1959－1964.
GE Chao，ZHANG Jiabin，WANG Lei，et al. Trajectory planning for autonomous driving vehicles based on model predictive control [J]. Journal of Computer Applications，2024，44 (6)：1959－1964.(in Chinese)

(下转第391页)

[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.