

基于 GWO – MPC 的联合收获机喂入量控制方法与仿真实验

孙意凡¹ 刘仁杰¹ 李世超¹ 张漫¹ 李寒²

(1. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 收获机作为农业生产的重要生产工具,其喂入量控制一直是自动控制领域研究的热点问题。本文通过分析收获机工作方式,建立收获时收获机喂入量变化模型。设计开发收获机作业参数监测系统,以小麦作为实验对象,在我国华北地区开展田间实验,验证系统喂入量监测精度并同步采集产量、含水率和作业速度等参数,系统喂入量监测平均相对误差为 8.55%。以收获机在割台高度不变条件下保持额定喂入量为控制目标状态,收获机作业速度作为控制量,采用模型预测的方法对收获机喂入量进行仿真控制。采用灰狼优化算法优化二次规划的权值矩阵,仿真结果表明,权值矩阵优化后,喂入量控制平均绝对误差小于 0.1 kg/s,平均降低 38.1%。喂入量控制误差与收获区域的产量成反比,与含水率成正比。在相邻时域内产量、含水率变化较小的收获区域效果更好。

关键词: 联合收获机; 喂入量; 模型预测控制; 作业速度; 灰狼优化算法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)11-0083-09

OSID:



Feed Rate Control Method and Simulation Experiment of
Combine Harvester Based on GWO – MPC

SUN Yifan¹ LIU Renjie¹ LI Shichao¹ ZHANG Man¹ LI Han²

(1. Key Laboratory of Smart Agriculture Systems Integration, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Combine harvester is an important tool of agricultural production. The feed rate of harvester has always been a hot topic in the area of automatic control. By analyzing the operation mode of harvester, the change model of feed rate of harvester was established. A monitoring system for state parameters of harvester was designed and developed. The system includes grain flow sensor, header height sensor, grain moisture content sensor, feed rate sensor and global navigation satellite system. Taking wheat as the experimental object, a field experiment was carried out in North China to verify the monitoring accuracy of feed rate in different yield moisture content plots. The parameters such as feed rate, yield, moisture content and operation speed were also collected simultaneously. The average relative error of feed rate monitoring was 8.55%. Taking the feed rate of harvester as the control target state and the operating speed of harvester as the control quantity, the feed rate of harvester was simulated by using the method of model prediction. Grey wolf optimization algorithm was used to optimize the weight matrix of quadratic programming. The simulation results showed that the MAE of feed rate control was less than 0.1 kg/s after the weight matrix optimization, which was decreased by 38.1% on average. The error of feed rate control was inversely proportional to the yield of the harvest area and proportional to the moisture content. The control effect was better in harvest areas with even wheat growth.

Key words: combine harvester; feed rate; MPC; operation speed; GWO

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001500-2022YFD2001501、2022YFD2001600-2022YFD2001601)

作者简介: 孙意凡(1996—),男,博士生,主要从事联合收获机自动化研究,E-mail: 243566273@qq.com

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

0 引言

联合收获机是现代农业生产的重要工具,推进收获机智能化是降低作业成本、提高工作效率的重要途径。喂入量是收获机作业时的重要参数,维持额定喂入量能够减小收获损失率,提高收获效率。影响收获机喂入量的因素可大致分为两类^[1-3]:一类是收获区域环境因素,如收获区域的作物产量、含水率等;另一类是收获机控制参数,如收获机的作业速度、割台高度。根据收获区域的环境因素变化,调整作业速度、割台高度等控制参数使喂入量维持额定状态是喂入量控制主要研究方向^[4-8],其中,调整作业速度是控制收获机喂入量的主要方法^[9-11]。EBRAHIMI等^[12]建立了一个拥有9种作业速度和割幅宽度组合的调控方案,实现收获机喂入量调整。姬江涛等^[13]以喂入量为控制目标,采用PID控制调整收获机作业速度。尤惠媛等^[14]根据基于脱粒滚筒扭矩的喂入量模型,采用模糊控制的方法控制作业速度以调整喂入量。介战等^[15]建立喂入量与倾斜输送机底板压力、作业速度的回归模型,采用模糊控制的方法实现收获机喂入量控制。

综上所述,调整收获机作业速度是控制喂入量的有效方法。在控制器设计方面,主要采用模糊控制器实现喂入量控制^[16-19]。模糊控制器不依赖明确的数学模型,具有鲁棒性强、容错率高等优点。但其控制规则主要依据经验进行设置,经验不足会导致控制精度降低。为实现更精确的喂入量控制,本文建立收获机作业时的喂入量变化模型,设计基于模型预测控制的喂入量控制器。以小麦收获为研究对象,设计开发收获机作业参数监测系统;通过田间实验采集收获机喂入量、割台高度、作业速度、收获区域小麦产量和含水率数据。在此基础上,以割台高度不变条件下喂入量保持额定作为控制目标,收获机作业速度作为控制量,开展收获机喂入量控制的仿真研究。采用灰狼优化算法对模型预测控制中二次规划权值矩阵参数进行寻优。以降低收获区域产量、含水率变化对控制精度的影响,减小控制误差。

1 材料与方法

1.1 收获机作业参数监测系统设计

为有效获取收获机喂入量、作业速度、收获区域作物产量、含水率等参数,设计开发了收获机作业参数监测系统。该系统包括谷物流量传感器、割台高度传感器、谷物含水率传感器、喂入量传感器、全球导航卫星系统(Global navigation satellite system,

GNSS)和车载工控机,系统结构如图1所示。冲量式谷物流量传感器和电容式谷物含水率传感器分别安装在升运器的出粮口和底部,通过CAN总线将数据传输给驾驶室的车载工控机。喂入量传感器通过监测割台主动轴扭矩反映喂入量,数据通过ZigBee网络传输至车载工控机。割台高度传感器为安装在收获机割台液压缸的长度传感器,通过监测割台液压缸伸缩长度监测割台高度,数据通过RS232串口传输至车载工控机。GNSS天线安装在收获机驾驶室顶部,接收机放置在驾驶室内通过RS232串口将收获机作业时的位置信息传输至车载工控机。根据GNSS记录的收获机作业时的位置信息计算收获机作业速度。车载工控机在接收各传感器数据的基础上,完成监测结果的显示与存储。



图1 收获机作业参数监测系统
Fig.1 Monitoring system of harvester operate parameter

1.2 田间实验与数据采集

1.2.1 喂入量监测精度田间验证实验

系统中产量、含水率等传感器的监测精度经不断优化已经能够满足田间收获的作业需求。为验证监测系统中喂入量的监测精度,选用新疆Ⅲ型联合收获机搭载作业参数监测系统于2020年6月在我国华北地区开展麦收实验。实验收获区域小麦长势均匀,先后在收获区域开展6次直线收获实验,收获机作业时割台高度为25 cm,割幅为2 m,通过调整收获机作业速度得到不同喂入量梯度,收获路线如图2所示。

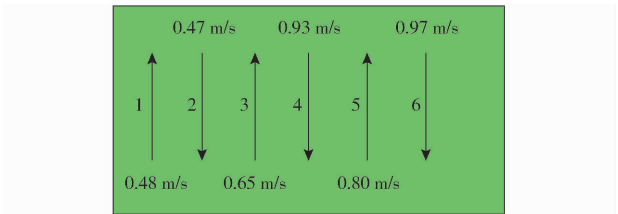


图2 收获机作业路线
Fig.2 Operation route of harvester

每次收获实验结束后,人工采集收获路径附近1 m²的作物样本,用于计算实际喂入量 M_F ,计算方

法为

$$M_F = S\rho = vwp \quad (1)$$

式中 v ——收获机作业速度

w ——收获机作业时割幅

ρ ——人工采样作物密度

S ——单位时间内收获机作业面积

人工采集时样本割茬高度为 25 cm。

在 6 次收获实验得到的实验数据中各随机取 40 组数据,共计 240 组数据作为建模集建立收获机作业时割台主动轴扭矩传感器电压与实际喂入量的线性模型。各随机取 20 组数据,共计 120 组作为验证集对建模结果进行验证。根据验证结果分析作业参数监测系统的喂入量监测精度。

1.2.2 仿真数据采集

选用新疆Ⅲ型联合收获机搭载收获机作业参数监测系统于 2021 年 6 月在我国华北地区开展麦收实验。为分析收获区域小麦产量、含水率对喂入量控制结果的影响,在小麦种植阶段(2020 年 10 月),通过控制播种量的方法得到不同产量的收获区域;并在收获阶段小麦充分晾晒前后分别开展收获实验获取不同含水率数据,如图 3 所示。收获区域Ⅰ为小麦充分晾晒后的收获区域,其小麦含水率低于 15%;收获区域Ⅱ和收获区域Ⅲ为小麦晾晒前的收获区域,其含水率均高于 20%;收获区域Ⅰ和收获区域Ⅱ为常规播种量的小麦密植区,其小麦产量高且长势分布相对均匀;收获区域Ⅲ为播种量减半的小麦疏植区,其产量较低且小麦长势分布差异较大。实验过程中驾驶收获机以速度 0.5 m/s 在不同收获区域完成直线收获作业,记录收获路径上小麦产量、含水率等数据。收获时收获机割台高度保持 25 cm,实际割幅为 2 m,系统采样频率为 1 Hz。

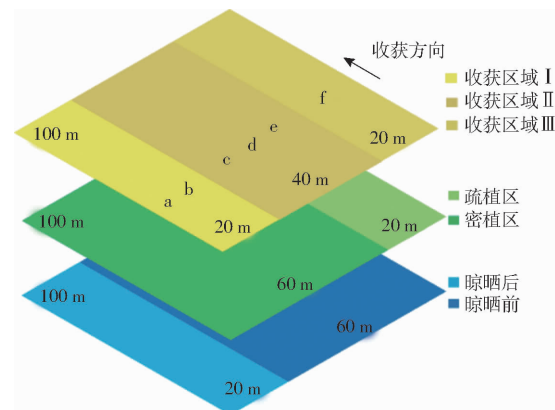


图 3 收获实验区域分布

Fig. 3 Distribution of harvest experiment area

收获实验结束后,选取 6 组特点鲜明的数据作为喂入量控制仿真数据,其收获区域分布如图 3 所示。其中,数据组 a 和数据组 b 为收获区域Ⅰ内得

到的实验数据,数据组 c、数据组 d 和数据组 e 为收获区域Ⅱ内得到的实验数据,数据组 f 为收获区域Ⅲ内得到的实验数据。

1.3 收获机喂入量控制

1.3.1 模型预测控制算法原理

在获取田间数据的基础上,选择模型预测控制算法(Model predictive control, MPC)实现收获机喂入量控制。模型预测控制^[20-22]是一种工业实践过程中逐步发展起来的计算机控制算法,具有控制效果好、鲁棒性强的优点。模型预测控制的基本思想是根据目标系统的工作模型、系统目前的状态量以及系统的控制量去预测系统下一步的输出,由预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个要素组成,其基本原理如图 4 所示,图中 T 为控制周期。

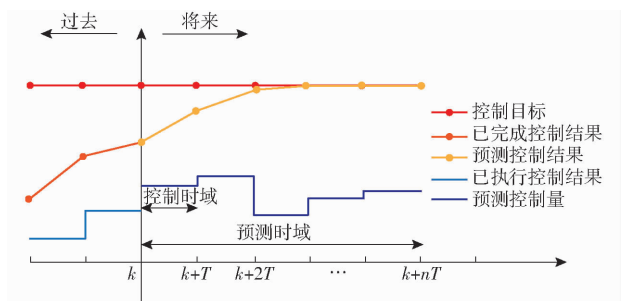


图 4 模型预测控制原理图

Fig. 4 Schematic of model predictive control

在整个控制过程中,始终存在一条参考轨迹即系统状态控制目标,以时刻 k 为当前时刻,控制器会根据 k 时刻的状态量和预测模型,对系统未来一段时域内的控制量输出和状态量变化做出预测,经模型预测后得到 k 时刻的预测时域内的控制序列 U_k 和状态量输出序列 X_k 为

$$\begin{cases} U_k = (u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N_p-1|k)) \\ X_k = (x(k+1|k), x(k+2|k), \dots, x(k+N_p|k)) \end{cases} \quad (2)$$

其中 N_p 为预测时域长度。预测时域内的状态量参考输出,即状态量控制目标序列 R_k 为

$$R_k = (r(k+1|k), r(k+2|k), \dots, r(k+N_p|k)) \quad (3)$$

为使状态量输出 X_k 和状态量参考输出 R_k 之间的误差最小,同时确保控制量 U_k 和控制量变化量 ΔU_k 在被控系统允许的范围,进行二次规划优化控制序列,其表达式为

$$J = \sum_{k=0}^{N_p} (R_k - X_k)^T Q (R_k - X_k) + U_k^T F U_k + \Delta U_k^T P \Delta U_k \quad (4)$$

式中 Q ——输出量和参考输出之间误差的权重

F ——控制量权重

J ——二次规划序列

P ——控制量变化量权重

通过调整权重可以获得不同的系统输出响应。经二次规划优化求解可得最优控制序列值 U_k^* 。

将控制量输出序列 U_k^* 的第 1 个元素作为 k 时刻输出的控制量,即控制时域的实际控制量。当时间来到 $k+T$ 时刻,重复上述过程,通过滚动优化实现对被控对象的持续控制。此外,为应对控制时域内环境变化对控制精度的影响,在新的采样时刻重新检测控制目标的状态,并根据误差信息对下一时刻的预测初值进行反馈校正。

1.3.2 收获机喂入量变化模型

模型预测算法的关键在于建立可靠的模型对控制目标状态进行预测与调整,因此建立准确的喂入量变化模型,确定喂入量与作业速度的关系是实现收获机喂入量控制的首要任务。由式(1)可知,收获过程中,单位时间内喂入收获机脱粒滚筒的小麦质量 $\dot{M}_F$ 与单位时间内收获机作业面积 S 、收获地块喂入收获机的小麦密度 ρ 有关。单位时间内收获机作业面积 S 取决于收获机工作时的实际割幅 w 以及作业速度 v 。

其中,收获地块喂入收获机的小麦密度 ρ 取决于收获区域的小麦产量 Y_m 、收获时小麦含水率 c 以及收获时收获机割台高度 h 。

$$\rho = f(c, h, Y_m) \tag{5}$$

小麦成熟后,收获区域的小麦产量不会出现明显变化,根据喂入收获机的作物草谷比 r 和收获区域作物湿产量可以得到收获区域的作物密度 ρ 为

$$\rho = (1 + r) Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \tag{6}$$

式中 c_0 ——产量计算时的标准含水率

通过作物样本处理可知,作物晾晒过程中,作物籽粒含水率与茎秆含水率成线性关系。以此为基础可以得到收获时喂入收获机的谷类作物草谷比与收获时收获机的割台高度、作物籽粒含水率的线性模型^[22]

$$r = f(c, h) = x_1 c + x_2 h \tag{7}$$

式中 x_1, x_2 ——草谷比参数

即通过监测收获时收获区域的产量、含水率以及割台高度可有效反映收获时喂入收获机的小麦密度,小麦密度计算式为

$$\rho = (1 + x_1 c + x_2 h) Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \tag{8}$$

由式(1)、(8)得到收获机工作时,收获机喂入量的变化模型

$$M_F = vw(1 + x_1 c + x_2 h) Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \tag{9}$$

1.3.3 收获机喂入量误差预测模型

根据收获机喂入量变化模型和收获工作的实际情况,以收获机喂入量 M_F 和收获机割台高度 h 为状态量,以收获机作业速度 v 作为控制量建立控制系统,系统状态方程为

$$\dot{X} = AX + BU \tag{10}$$

式中 X ——状态量矩阵

U ——控制量矩阵

$\dot{X}$ ——状态量变化量

A ——状态量参数矩阵

B ——控制量参数矩阵

以割台高度不变情况下,收获机喂入量保持额定为状态量的控制目标,并以此控制目标作为展开中心对喂入量变化方程做一阶泰勒展开以实现线性化。

得到状态量误差 $\tilde{X}$ 与控制量误差 $\tilde{U}$ 的一阶线性模型为

$$\tilde{X} = \tilde{A}\tilde{X} + \tilde{B}\tilde{U} \tag{11}$$

其中

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & vwx_2 Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} w(1 + x_1 c + x_2 h) Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \\ 0 \end{bmatrix}$$

通过前向欧拉法对状态量误差模型进行离散化,得到状态量误差 $\tilde{X}$ 与控制量误差 $\tilde{U}$ 的离散系统状态方程为

$$\tilde{X}(k + 1) = (T\tilde{A} + E)\tilde{X} + T\tilde{B}\tilde{U} \tag{12}$$

其中

$$T\tilde{A} + E = \begin{bmatrix} 1 & Twx_2 Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T\tilde{B} = \begin{bmatrix} Tw(1 + x_1 c + x_2 h) Y_m \frac{1 + c}{1 + c_0} \\ 0 \end{bmatrix}$$

不同产量、含水率条件下的状态量、控制量和控制量变化量控制需求不同,选择合理的二次规划权值矩阵是提高控制精度的关键。根据环境变化设置动态权值能够有效降低收获区域小麦产量、含水率变化对控制精度的影响。

1.4 权值矩阵优化

1.4.1 灰狼优化算法

灰狼优化算法^[24-25]是模拟狼群等级制度下集体狩猎的群体智能优化算法。狼群中的等级制度共分为 4 个,即 α 狼、 β 狼、 γ 狼和 ω 狼。分别对应候选解中的最优值、第二优值、第三优值和其他候选

解。该算法的优化过程就是对狼群不同阶层个体位置更新的过程。

在灰狼搜索猎物过程中, 每只狼与猎物之间的距离为

$$\begin{cases} D = |CP_x(t) - P(t)| \\ P(t+1) = P_x(t) - ZD \end{cases} \quad (13)$$

式中 P_x ——猎物位置向量

P ——灰狼位置向量

D ——灰狼与猎物间的距离向量

t ——迭代次数

向量系数 Z 和 C 的计算公式分别为

$$\begin{cases} Z = 2zI_1 - z \\ C = 2I_2 \end{cases} \quad (14)$$

其中, I_1 与 I_2 为模在 $[0, 1]$ 内的随机向量, z 为收敛因子。狼群通过更新 α, β, γ 3 个等级的狼的位置寻找最优的猎物位置。为模拟狼群逼近猎物, z 随着迭代次数从 2 线性减少到 0。当 $|Z| \leq 1$ 时, 算法收敛, 获得猎物位置。

确定猎物位置后, α, β, γ 3 个等级狼的位置固定, 候选解 ω 根据前 3 个等级狼的位置更新位置靠近猎物。其数学模型为

$$\begin{cases} P_1 = P_\alpha - Z_1 D_\alpha \\ P_2 = P_\beta - Z_2 D_\beta \\ P_3 = P_\gamma - Z_3 D_\gamma \end{cases} \quad (15)$$

$$X_\omega(t+1) = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 P_\alpha - P| \\ D_\beta = |C_2 P_\beta - P| \\ D_\gamma = |C_3 P_\gamma - P| \end{cases} \quad (17)$$

式中 $D_\alpha, D_\beta, D_\gamma$ ——候选解与 3 个优解间的距离

P_1, P_2, P_3 ——候选解相对 3 个优解的位置更新向量

X_ω ——更新后的候选解位置

$C_1, C_2, C_3, Z_1, Z_2, Z_3$ ——向量系数

1.4.2 权值矩阵优化参数

以喂入量控制误差最小为优化目标, 采用狼群优化算法获取不同产量、含水率条件下模型预测控制二次规划中的最佳权值, 其流程如图 5 所示。寻优过程中种群数量为 30, 最大迭代次数为 500。权值矩阵中可变参数的变化范围为 $[0.1, 5]$ 。

1.5 收获机作业速度控制仿真

为验证该方法在喂入量控制方面的效果, 以田间收获实验获取的数据为基础, 对收获机喂入量进行仿真控制, 控制器结构如图 6 所示。 y_{set} 为状态量控制目标, 即收获机喂入量额定值和仿真

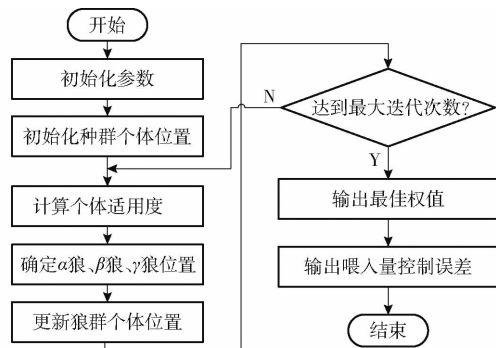


图 5 权值矩阵寻优流程

Fig. 5 Optimization process of weight matrix



图 6 MPC 控制器结构

Fig. 6 Structure of MPC controller

过程中收获机割台高度; y_r 为状态量参考轨迹, y 为状态量控制结果, 即割台高度不变条件下, 收获机作业速度调整后的实际喂入量。 u 为模型预测后的控制序列, u^* 为权值优化后经二次规划得到的最佳控制序列。

仿真过程中收获机额定喂入量为 3 kg/s 。割台高度维持 25 cm 不变, 割幅为 2 m , 起始作业速度为 1 m/s 。收获机保持直线收获行驶, 不进行转弯、卸粮等操作。控制周期为 1 s , 每个控制周期的控制量变化范围为 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m/s}$ 。仿真结束后, 以喂入量平均绝对误差 (MAE) 作为评价指标, 分析产量、含水率等因素对喂入量控制的影响。

2 结果与讨论

2.1 喂入量实验验证结果

通过 240 组建模集得到喂入量与割台主动轴扭矩的一阶线性模型, 如图 7 所示, 经 120 组验证集验证得该模型的平均相对误差为 8.55% , 能够满足田间监测的需求。

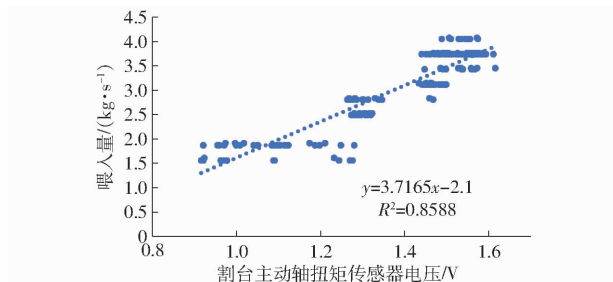


图 7 基于割台主动轴扭矩的喂入量监测模型

Fig. 7 Monitoring model of feed rate based on torque of header drive shaft

2.2 数据采集结果

在田间实验数据中选出6组具有代表性的标准产量、含水率数据,结果如图8所示。图8a和图8b为收获区域Ⅰ中数据组a和数据组b的采集结果,其中数据组a的小麦长势非常均匀,连续收获过程中,产量变化极小;而数据组b的小麦产量随收获机前进连续变化。图8c、8d、8e为收获区域Ⅱ中数据组c、数据组d和数据组e的采集结果,其中数据组

d为平均含水率较高条件下,含水率和小麦产量随收获机前进不断增加的实验数据,数据组c和数据组e为高含水率条件下,小麦产量连续变化的实验数据,且数据组c的小麦产量高于数据组e;图8f为收获区域Ⅲ中数据组f的采集结果,该组产量较低,且随收获机前进过程中,相邻时域内产量波动较大。不同数据组标准产量、含水率平均值如表1所示。

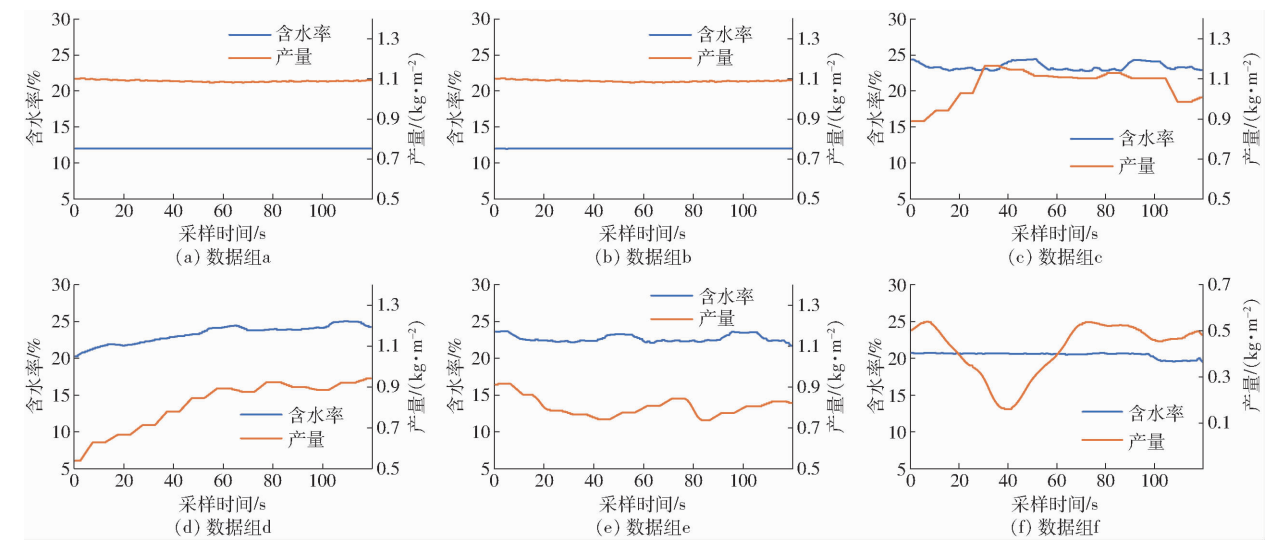


图8 数据采集结果
Fig. 8 Results of data acquisition

表1 不同数据组产量、含水率平均值

数据组	a	b	c	d	e	f
含水率/%	11.9	11.0	23.4	22.7	23.3	20.5
标准产量/(kg·m ⁻²)	1.09	0.89	1.07	0.80	0.81	0.42

2.3 仿真控制结果与分析

2.3.1 MPC 仿真结果分析

根据田间实验采集的实验数据,以割台高度不变情况下喂入量额定为控制状态量,作业速度为控制量,开展收获机喂入量仿真控制,得到不同产量、含水率条件下的喂入量控制结果和作业速度变化情况,如图9所示。

以喂入量第1次达到额定参数时为稳定状态,各数据组喂入量稳定控制的平均绝对误差如表2所示。其中,前5个数据组在喂入量第1次达到稳定状态后,喂入量控制的平均绝对误差小于0.1 kg/s。数据组f在喂入量状态第1次达到稳定状态后喂入量控制的平均绝对误差为0.125 kg/s。

(1) 含水率对控制结果的影响

数据组a和数据组c在采样时间30~105 s时间内的平均产量分别为1.09 kg/m²和1.12 kg/m²,平均含水率分别为11.9%和23.4%。观察两组数

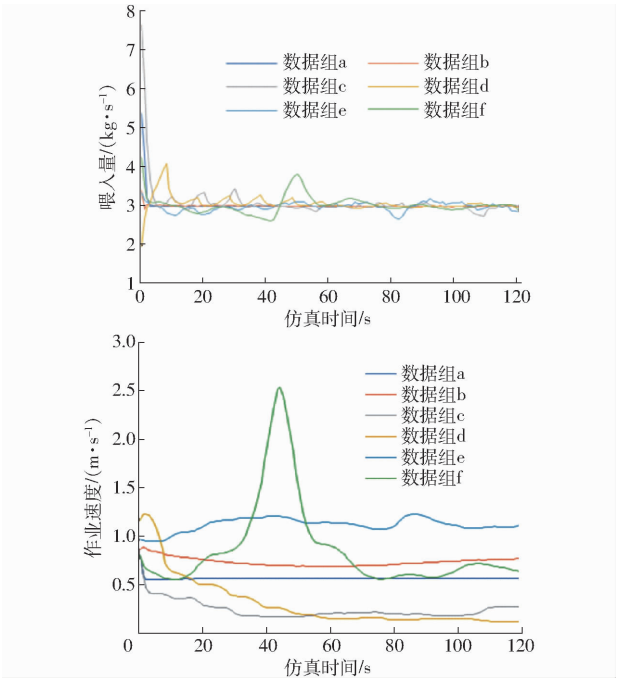


图9 仿真结果
Fig. 9 Simulation results

表2 喂入量控制平均绝对误差

数据组	a	b	c	d	e	f
MAE/(kg·s ⁻¹)	0.004	0.009	0.065	0.092	0.075	0.125

据的仿真结果,其喂入量控制的平均绝对误差分别为 0.004 kg/s 和 0.039 kg/s。由此可见,当收获机在小麦产量相近的区域开展收获工作时,该方法在低含水率条件下的喂入量控制结果优于高含水率条件下的控制结果。

(2)产量与含水率递增时的控制结果

数据组 d 的仿真结果反映了含水率和产量随收获机前进不断增长的情况下,喂入量的控制结果。当喂入量第 1 次达到额定状态后,随着收获机前进过程中小麦产量和含水率不断增加,收获机作业速度不断下降,且下降速度与产量、含水率的增长速度呈正相关。

(3)产量对控制结果的影响

从数据组 b 的控制结果可以看出,在含水率几乎不变的条件下,为调整喂入量维持额定状态,收获机作业速度变化与收获区域的产量变化成反比。说明在小麦晾晒充足的收获区域,小麦产量是调整收获机喂入量的重要参考依据。

数据组 c 和数据组 e 的平均含水率分别为 23.4% 和 23.3%,平均产量分别为 1.07 kg/m² 和

0.81 kg/m²。两组数据仿真结果中喂入量控制的平均绝对误差分别为 0.065 kg/s 和 0.075 kg/s。由此可见,在含水率接近的条件下,该方法在产量较高的收获区域的喂入量控制效果优于产量较低的收获区域的喂入量控制效果。

数据组 f 为疏植区实验数据,其平均产量为 0.42 kg/m²,平均含水率为 20.5%,喂入量控制的平均绝对误差为 0.125 kg/s,高于其他数据组。除了疏植区产量较低的原因外,疏植区较大的长势差引起数据组 f 中相邻时域内产量剧烈变化也是造成控制效果不佳的重要原因。在模型预测控制中,控制时域的控制序列是根据 k 时刻产量、含水率条件经过二次规划得到的结果,因此当 $k + T$ 时刻与 k 时刻的产量、含水率差异较大时,二次规划得到的控制序列无法适应新的收获环境,使控制误差增加。

2.3.2 GWO - MPC 仿真结果分析

为降低喂入量控制误差,采用灰狼算法优化二次规划中的权值矩阵。优化后喂入量控制结果如图 10 所示。各数据组喂入量第 1 次达到额定状态后的平均绝对误差如表 3 所示。

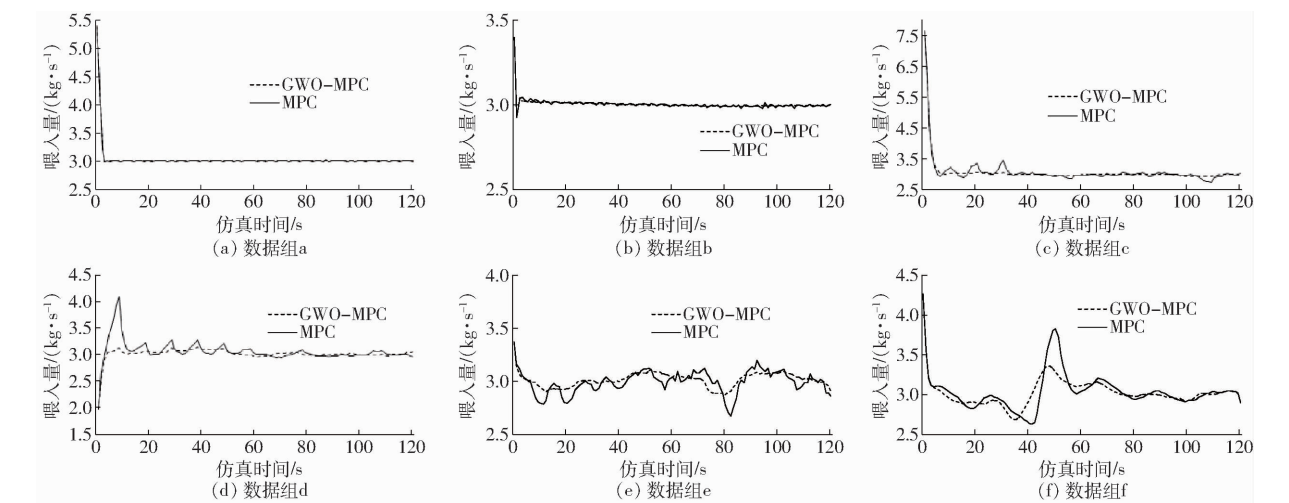


图 10 优化后喂入量控制结果

Fig. 10 Control results of feed rate after optimization

表 3 优化后喂入量控制平均绝对误差

Tab.3 Average absolute error of feed rate control after operated

数据组	a	b	c	d	e	f
MAE/(kg·s ⁻¹)	0.001	0.007	0.034	0.042	0.05	0.094
MAE 降低百分比/%	75.0	27.2	14.5	53.8	33.1	24.6

优化后 6 个数据组的喂入量控制平均绝对误差 (MAE) 小于 0.1 kg/s,平均降低 38.1%。仿真结果表明,通过灰狼算法优化二次规划中的权值矩阵能够有效降低相邻时域内产量、含水率变化对控制结果的影响,提高喂入量控制精度。

综上所述,该方法能够有效应对控制过程中收

获区域小麦产量、含水率的变化,更适用于常规种植的小麦长势相对均匀的收获区域,为收获机喂入量控制提供思路与方法。本研究目前开展了仿真验证实验,后续研究中还需设计控制系统开展田间实验。此外,采用机器视觉等方法提前获取即将收获区域的环境参数变化用于模型预测也能够提高控制精度。

3 结论

(1)开发了收获机作业参数监测系统,开展田间实验采集含水率、产量等数据并对监测系统喂入量监测精度进行验证。建立了收获机作业时的喂入量变化模型,采用模型预测控制的方法,以割台高度

不变条件下喂入量额定作为状态量控制目标,收获机作业速度作为控制量实现了收获机喂入量的仿真控制。分析了不同含水率、产量变化条件下的喂入量控制结果。采用灰狼优化算法动态更新二次规划权值矩阵,降低收获区域产量、含水率变化对控制精度的影响。

(2)作业参数监测系统喂入量田间监测精度高于 90%,能够满足田间收获作业的需求。

(3)在小麦产量接近的收获区域,该方法在低

含水率条件下的控制结果优于高含水率条件下的控制结果。

(4)在含水率接近的条件下,该方法在产量较高的收获区域的控制效果优于产量较低的收获区域的控制效果。

(5)该方法在相邻时域产量、含水率变化较小的收获区域控制效果更好。

(6)权值矩阵优化后,喂入量控制平均绝对误差小于 0.1 kg/s,平均降低 38.1%。

参 考 文 献

- [1] PAULSEN M R, KALITA P K, RAUSCH K D. Postharvest losses due to harvesting operations in developing countries: a review [C]// American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, 2015: 152176663.
- [2] WANG Keru, XIE Ruizhi, MING Bo, et al. Review of combine harvester losses for maize and influencing factors [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14: 1 - 10.
- [3] 陈度, 王书茂, 康峰, 等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 18 - 21.
CHEN Du, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 18 - 21. (in Chinese)
- [4] 潘静, 邵陆寿, 王轲. 水稻联合收割机喂入密度检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 113 - 116.
PAN Jing, SHAO Lushou, WANG Ke. Detection method on feed density for rice combine [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 113 - 116. (in Chinese)
- [5] ABDEEN M, SALEM A, ZHANG G. Longitudinal axial flow rice thresher performance optimization using the taguchi technique [J]. Agriculture, 2021, 11(2): 88.
- [6] HUISMAN W, VAN L J, HEIJNING J J. Automatic feed rate control of a combine harvester in wheat [J]. Agricultural Engineering, 2004, 34(3): 19 - 23.
- [7] GOMEZ-GIL G J, LOPEZ-LOPEZ L J, NAVAS-GRACIA L M, et al. The spatial low-pass filtering as an alternative to interpolation methods in the generation of combine harvester yield maps [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011(6): 1087 - 1097.
- [8] 王新, 付函, 王书茂, 等. 收割机作业速度多目标控制模型的鲁棒优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 27 - 33.
WANG Xin, FU Han, WANG Shumao, et al. Robust optimal design of multi-objective control model of working speed for combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 27 - 33. (in Chinese)
- [9] 王志文. 基于喂入量预测的联合收割机作业速度控制系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
WANG Zhiwen. Research on speed control system of combine harvester based on feed quantity forecast [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
- [10] 林伟, 吕新民, 樊建荣. 基于喂入量的联合收割机速度控制系统的研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 118 - 121.
LIN Wei, LÜ Xinmin, FAN Jianrong. Research on combine harvesters' velocity control system based on feed quantity [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 118 - 121. (in Chinese)
- [11] 袁文胜, 帅士兵, 杨忠平, 等. 联合收割机行走速度自动控制系统的的设计[J]. 农机化研究, 2006, 28(7): 107 - 109.
YUAN Wensheng, SHI Shuaibing, YANG Zhongping, et al. Design of combine harvesters' walking velocity automatic control system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(7): 107 - 109. (in Chinese)
- [12] EBRAHIMI NIK M A, KHADEMOLHOSSEINI N, ABBASPOUR-FARD M H, et al. Optimum utilisation of low-capacity combine harvesters in high-yielding wheat farms using multi-criteria decision making [J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(3): 382 - 388.
- [13] 姬江涛, 王荣先, 符丽君. 联合收割机喂入量灰色预测模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 63 - 66.
JI Jiangtao, WANG Rongxian, FU Lijun. Grey prediction fuzzy PID control of the feeding quantity in combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 63 - 66. (in Chinese)
- [14] 尤惠媛, 卢文涛. 联合收割机喂入量模糊控制系统研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 229 - 234.
YOU Huiyuan, LU Wentao. Fuzzy control system for feed quantity of combine harvester [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(5): 229 - 234. (in Chinese)
- [15] 介战, 陈家新, 刘红俊. GPS 联合收割机随机喂入量模糊控制技术[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 55 - 58.
JIE Zhan, CHEN Jiaxin, LIU Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 55 - 58. (in Chinese)
- [16] CHEN J, NING X, LI Y, et al. A fuzzy control strategy for the forward speed of a combine harvester based on KDD [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 15 - 22.
- [17] 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收割机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 87 - 91, 86.

CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 87 - 91, 86. (in Chinese)

[18] 陈进,郑世宇,李耀明,等.联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J].农业机械学报,2011,42(10):110 - 115.
CHEN Jin, ZHENG Shiyu, LI Yaoming, et al. Grey predictive fuzzy control system of forward speed for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):110 - 115. (in Chinese)

[19] CHEN D, KANG F, ZHU Q Y, et al. Study on combine harvester speed control based on optimum threshing power consumption model[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012,130 - 134:1911 - 1914.

[20] 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.

[21] COENA T, SAEYSA W, MISSOTTENB B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control [J]. Biosystems Engineering, 2008,99:47 - 55.

[22] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等.基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J].农业机械学报,2022,53(11):22 - 30,99.
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):22 - 30,99. (in Chinese)

[23] SUN Yifan, LIU Renjie, ZHANG Man, et al. Design of feed rate monitoring system and estimation method for yield distribution information on combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,201:107322.

[24] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46 - 61.

[25] 张晓凤,王秀英.灰狼优化算法研究综述[J].计算机科学,2019,46(3):30 - 38.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(3):30 - 38. (in Chinese)

(上接第 70 页)

[19] 马云海. 农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.

[20] 郭徽,杨薇,刘英. 云南三七主根干燥特性及其功效指标评价[J]. 农业工程学报, 2014,30(17): 305 - 313.
GOU Hui, YANG Wei, LIU Ying. Drying characteristics and efficacy index evaluation for main root of Yunnan *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(17): 305 - 313. (in Chinese)

[21] 石林榕,马周泰,赵武云,等.胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报,2019, 35(20):25 - 33.
SHI Linrong, MA Zhoutai, ZHAO Wuyun, et al. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20):25 - 33. (in Chinese)

[22] 张涛,刘飞,赵满全,等.玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018, 23(4): 120 - 127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of DEM simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120 - 127. (in Chinese)

[23] 张胜伟,张瑞雨,陈天佑,等.绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报,2022, 53(3): 71 - 79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)

[24] 韩树杰,戚江涛,坎杂,等.新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报,2021, 52(4): 101 - 108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101 - 108. (in Chinese)

[25] 郝建军,魏文波,黄鹏程,等.油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报,2021, 37(12):36 - 44.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12):36 - 44. (in Chinese)

[26] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等.香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(5): 121 - 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121 - 130. (in Chinese)

[27] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等.胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报,2022,53(10): 146 - 155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(10): 146 - 155. (in Chinese)

[28] 薛浩田. 三七联合收获机整机设计及关键部件的仿真试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
XUE Haotian. The whole machine design and simulation test of key components of *Panax notoginseng* combined harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)