

基于ANFIS的拖拉机犁耕机组牵引控制技术 研究

王宁, 徐立友, 席志强

河南科技大学车辆与交通工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年3月31日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

本研究探讨了神经模糊策略在预测犁耕机具牵引力方面的潜力。为此, 采用自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 的计算机模拟环境, 对丘陵山地拖拉机犁耕作作业的田间数据进行了模拟。在ANFIS模拟环境中, 犁耕深度和前进速度被标记为独立输入变量, 牵引阻力被标记为因变量, 构建了一种新型牵引阻力预测模型。将ANFIS的结果与使用PID控制策略获得的结果进行比较。结果表明, 采用ANFIS控制时, 拖拉机耕深、牵引力的控制精度更加准确; 滑转率在有效控制时间内的时长得到了进一步的提高。使用ANFIS控制下的滑转率波动幅值相比于PID控制下的滑转率波动幅值降低了41.65%, 有效控制时间有12%的提升。根据本研究中评估的ANFIS模型的潜力, 所提出的模型可以作为一种有效的替代建模工具, 用于直接预测耕作操作期间机具的牵引阻力, 这些参数与前进速度和犁深的同时变化有关。

关键词

牵引阻力预测, 模糊神经网络, 自适应神经模糊推理系统, 驱动防滑

Research on Traction Control Technology of Tractor Plowing Unit Based on ANFIS

Ning Wang, Liyou Xu, Zhiqiang Xi

College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang
Henan

Received: Mar. 31st, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

This study explores the potential of neuro-fuzzy strategies in predicting traction forces of plough-

ing implements. To this end, a computer simulation environment of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was used to simulate field data on tractor plough tillage operations in hilly mountainous areas. In the ANFIS simulation environment, ploughing depth and forward speed were labelled as independent input variables and traction resistance was labelled as the dependent variable, and a novel traction resistance prediction model was constructed. The ANFIS results were compared with those obtained using a PID control strategy. The results show that the control accuracy of tractor ploughing depth and tractive effort is more accurate when ANFIS control is used; the slip rate is further improved in terms of the duration of the effective control time. The amplitude of slip rate fluctuations using ANFIS control was reduced by 41.65% compared to the amplitude of slip rate fluctuations under PID control and there was a 12% improvement in effective control time. Based on the potential of the ANFIS model evaluated in this study, the proposed model can be used as an effective alternative modelling tool for directly predicting the traction resistance of the implement during tillage operations, parameters that are related to the forward speed and simultaneous changes in plough depth.

Keywords

Traction Resistance Prediction, Fuzzy Neural Network, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Drive Anti-Skid

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

丘陵山地是我国重要的地形类型之一，其地形复杂多变。然而我国关于丘陵山地拖拉机的相关研究相对滞后，现在使用的机型作业质量粗糙，对丘陵山地的适应性较差[1] [2] [3]。鉴于此种情况，对于丘陵山地拖拉机驱动以及效率方面的研究日益成为热门研究对象。殷新东和鲁植雄建立了四轮驱动拖拉机防滑控制系统，依据拖拉机防滑有关研究结合模糊控制理论，改善了拖拉机在丘陵山地作业时驱动轮滑转现象，拖拉机的驱动力和耕作效率有了明显提升[4]。同时，邹爱民通过对丘陵山地拖拉机的后悬挂结构、后悬挂电液控制系统的研究分析，为改善拖拉机在丘陵山地的作业质量和适应性提供了重要的技术支持。这些研究成果对于提升我国丘陵山地拖拉机的发展水平具有重要的意义和应用价值[5]。周浩等通过实验验证拖拉机旋耕机，结合所设计的自动调平系统，结果表明旋耕机作业后地表更加平整，耕作效果更加理想，耕深变化幅度较小[6]。Osinenko 等提出了用户自定义策略，用来优化拖拉机能效或推进力，并在状态变量的自适应估计中采用了模糊控制的无迹卡尔曼滤波[7]。Kim 和 Lee 提出了牵引能量平衡自适应控制法，该算法特点是采用土壤反应指数和 Brixius 牵引模型，根据最大牵引力和最小能耗优化滑转率，能够适应土壤条件的变化，分为滑转优化、滑转控制和滑转补偿三部分[8]。虽然我国在拖拉机领域进行了研究，但由于丘陵山区的拖拉机作业环境要求较高，传动要求也较高，经常出现操作困难、传动不稳等问题，特别是车轮打滑现象严重影响了拖拉机的传动性能和作业效率。Shafaei 等通过实验分析证明了将模糊神经网络之一的 ANFIS 模型应用在耕作牵引阻力预测上的可行性，但在初始化模糊神经网络时只利用了试凑法来确定输入隶属函数个数，每 1 次试验都要对整个模型重新进行训练，效率低下且耗费大量计算机算力[9]。

为了使丘陵山地拖拉机在犁耕作业过程中能量利用更加高效、牵引阻力预测更加准确，本文将犁耕

深度和前进速度作为输入变量，牵引阻力作为输出因变量，构建了一种经过改进的基于模糊神经网络，提出了一种牵引阻力建模预测方法[10]。利用神经网络算法从而自适应调整相应的规则，经过多次训练迭代，最终生成对于丘陵山地拖拉机牵引阻力的预测模型。与传统方法相比，该模型可以通过短时间的训练模拟，预测牵引阻力接近拖拉机实际阻力，同时可以在线控制将驱动轮滑转率控制在不易打滑的范围内，从而使驱动车轮的牵引性能始终维持在最佳工况。

2. 整机结构

2.1. 调整要求

针对丘陵山地特殊的地形地貌，设计的驱动防滑装置需要满足以下使用要求：

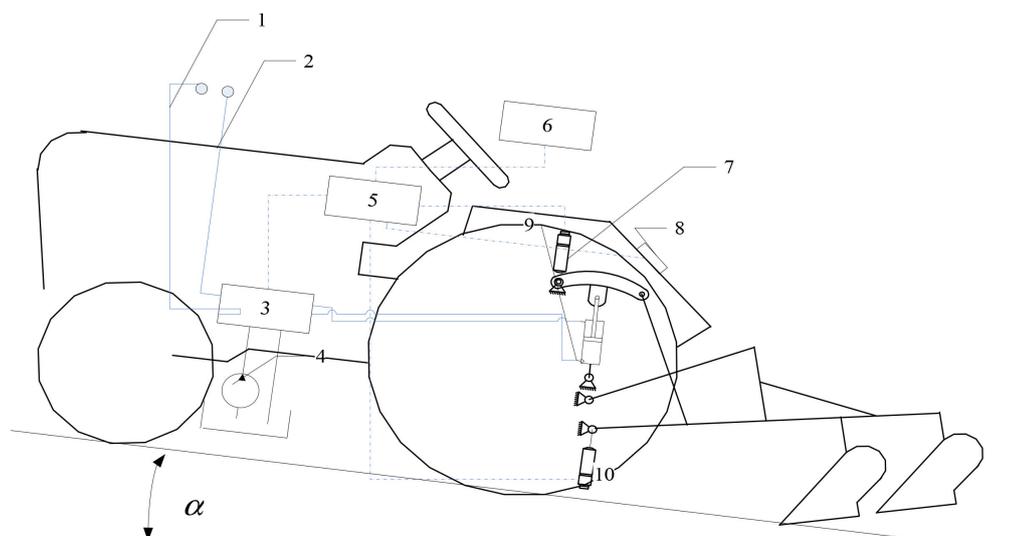
1) 尽可能缩短车轮打滑的时间，确保拖拉机在作业过程中保持稳定。这样可以使作业更加高效，同时减少燃料消耗，增加农具使用时间。

2) 克服由于作业地段颠簸崎岖使得拖拉机各个轮胎受力不平衡的问题，防止轮胎磨损和构件变形。这种驱动防滑装置需要具备足够的承载能力，能够在不平的地形上稳定行驶，同时避免对机器造成过大的冲击。

3) 避免车轮悬空的情况，减少对地面的破坏，这需要驱动防滑装置具有足够的牵引力，能够保持拖拉机与地面的接触。综上所述，设计的驱动防滑装置需要具备足够的承载能力、牵引力和稳定性，能够克服复杂地形和障碍物的影响，确保拖拉机在作业过程中稳定、高效地工作。同时，还需要注意保证安全性，确保操作人员和机器的安全。

2.2. 丘陵山地拖拉机作业状态与受力分析

丘陵山地拖拉机在作业时如遇到上坡工况，需要控制电液悬挂系统的水平倾角，以适应地形的起伏和变化。在丘陵山地的作业中，沿着坡地等高线的作业形式可以提高安全性和作业效率[11]。因此，控制拖拉机电液悬挂系统的水平倾角对于实现这种作业形式至关重要。丘陵山地拖拉机作业状态示意图如图1。



1-力调节手柄，2-位调节手柄，3-提升阀，4-油泵，5-控制器 6-控制面板，7-位传感器，8-辅助控制，9-双作用油缸，10-力传感器

Figure 1. Schematic diagram of tractor operating conditions in hilly mountainous terrain
图1. 丘陵山地拖拉机作业状态示意图

以拖拉机后轮与地面接触点为原点 O ，拖拉机前进方向为水平坐标轴 X ，竖直方向为坐标轴 Y 建立直角坐标系。拖拉机作业过程中，整机受力分析见图 2。犁体所受土壤阻力 R_{xy} 可分解为水平阻力 R_x 和垂直阻力 R_y ，公式分别为：

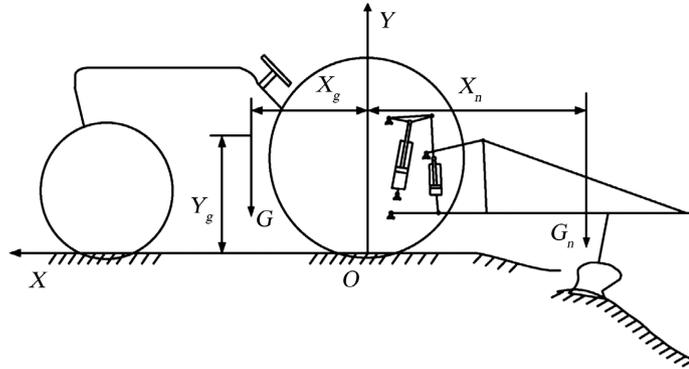


Figure 2. Schematic diagram of the force analysis of a tractor in hilly mountainous terrain
图 2. 丘陵山地拖拉机的受力分析示意图

$$R_x = p \cdot H \tag{1}$$

$$R_y = H \frac{dy}{dx} + qH \tag{2}$$

式中： H 为耕深，m； p 和 q 为阻力系数。犁体所受水平阻力 R_H 为：

$$R_H = R_x + L_x = R_x + fR_z \tag{3}$$

式中： L_x 为犁侧板与沟壁的摩擦力，N； f 为摩擦因数，一般 $f = 0.3 \sim 0.8$ ，取 0.6； R_z 为土壤对犁侧板的横向反作用力，N，本研究取为 $R_x/3$ 。由式(3)得：

$$R_H = 1.2R_x \approx n_p k_p b_p H \tag{4}$$

式中： n_p 为犁具配套犁体数； k_p 为犁耕比阻， $k_p = k_{p0} + k_{pR}$ ，其中 k_{p0} 为均质土壤下耕作比阻，其值为定值， k_{pR} 为非均质土壤下耕作时比阻变化扰动量，Pa； b_p 为单犁体工作幅宽，m。

由式(2)得，垂直阻力 R_y 可分解为动态分量 R_D 和稳态分量 R_W ，其中动态分量 R_D 为：

$$R_D = H \frac{dy}{dx} = H \frac{y(t)}{x(t)} \tag{5}$$

式中： $x(t)$ 为拖拉机牵引速度，m/s； $y(t)$ 为犁具的升降速度，m/s。稳态分量 R_W 为

$$R_W = qH \tag{6}$$

在拖拉机牵引速度保持不变的情况下， R_D 随着犁具的上升速度增加而增加，在耕深和牵引速度保持不变的前提下，犁具受到的垂直阻力 R_y 可看作是土壤阻尼力，此时将 $\frac{H}{x(t)}$ 看成一个定量 K_d ，即

$$R_y = K_d y(t) + qH \tag{7}$$

3. 牵引力 - 滑转率联合控制系统

本控制系统在牵引力控制的基础上，加入对于滑转率的监测控制，即牵引力 - 滑转率联合控制系统。在拖拉机进行犁耕作业时，在线监测滑转率是否在设定的范围内，以牵引力控制为主要控制方式，当滑

转率超出所设定范围, 切换由滑转率控制, 使得拖拉机在保证最优滑转率的同时不断调节耕深, 其控制流程如图 3 所示。采用此种控制策略, 一方面可以保证牵引力稳定在预先设定区间附近, 另一方面使拖拉机工作时保持在最优滑转率, 从而提高了发动机的输出功率, 减少了燃油消耗, 拖拉机作业效率得到了显著提升[12]。

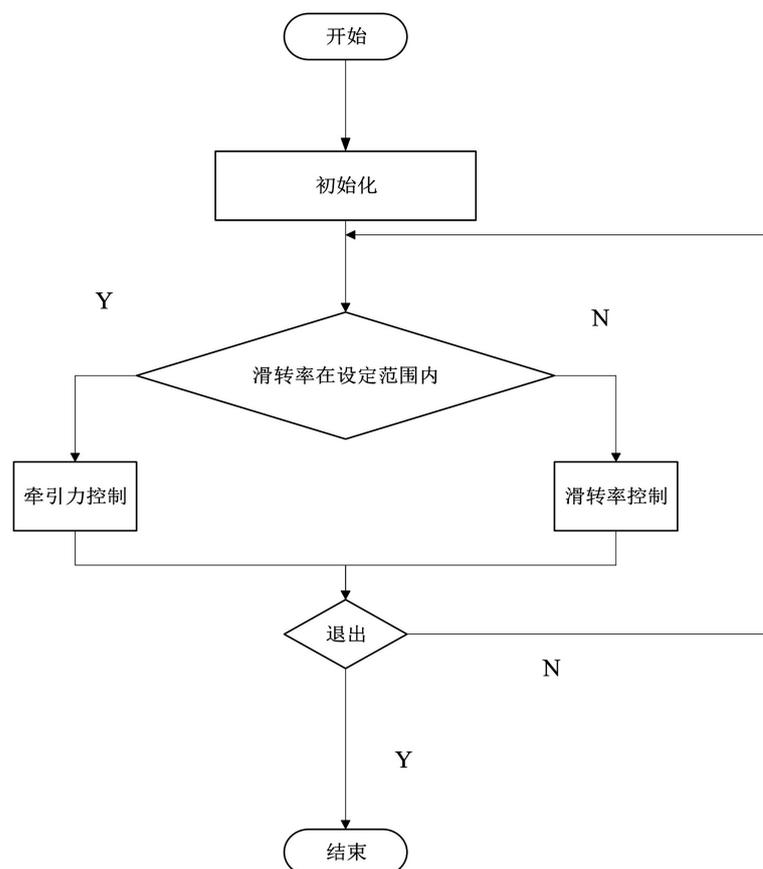


Figure 3. Flow chart of the joint control method
图 3. 联合控制方法流程图

根据丘陵山地拖拉机的实际作业工况, 本文提出了一种牵引力和滑转率控制系统。该系统设定了牵引力和滑转率的控制阈值, 并根据实时反馈信号进行控制。当滑转率处于预先设定的理想滑转率范围内时, 系统始终执行牵引力控制; 当滑转率超出预先设定的理想滑转率范围时, 系统不在使用牵引力控制, 改用滑转率进行控制。具体地, 滑转率的控制采用简单的开关控制方式。当滑转率低于预先设定的范围时, 下降阀开始工作, 犁体迅速降低, 以增加耕深, 从而提高牵引力; 当滑转率高于预先设定的范围时, 上升阀工作, 犁体迅速抬高, 以减小耕深, 从而降低牵引力。通过这种方式, 系统可以在保证牵引力的同时, 控制滑转率在车轮不会产生滑转的区间内。该系统的控制信号由牵引力传感器、地面速度传感器和飞轮转速传感器提供的反馈信号计算得出。根据信号误差生成控制电压, 通过调整驱动电液比例阀悬挂机构的高度, 实现耕深的调节, 进而实现对于牵引力和滑转率的控制改变。通过实验验证, 该系统对于牵引效率的提升和滑转率的有效控制改善较为明显。提高拖拉机的作业效率和安全性。综上所述, 本文提出了一种基于牵引力和滑转率控制的拖拉机控制系统, 该系统能够在实际作业中有效地控制牵引力和滑转率, 提高作业效率和安全性。联合控制系统工作原理如图 4 所示。

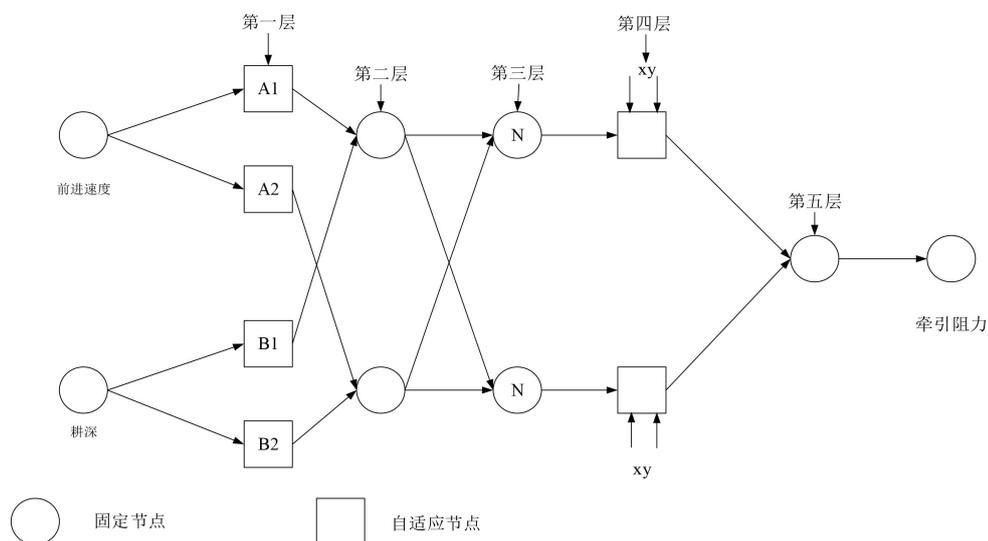


Figure 5. ANFIS model structure
图 5. ANFIS 模型结构

根据给出的仿真设定工况，通过拖拉机模型计算牵引力，并将牵引力误差及误差的变化率输入模糊神经控制器，经过模糊神经控制算法，把提升臂液压变化量与提升臂液压系统的初始压力求和，得到实际提升臂液压系统的压力。通过这个压力值，可以计算出实际的牵引力。车辆系统模块根据所反馈的压力值，以调整驱动轮的牵引力，并逐步接近期望值。

从图 6 的仿真结果中不难看出，使用 ANFIS 控制器时，系统的超调量更小，因此该控制器可以使得控制系统的稳定性和精度得到提升。在仿真工作中，可以通过改变工作装置的犁耕深度来减少驱动轮打滑的时间，这种效果是非常明显的。当耕深装置工作深度过深时，驱动轮开始发生滑转，原因在于垂直载荷随着耕深的增加而变大。此时，模糊神经控制器开始工作，通过减小工作装置液压系统的压力，来提升工作装置，减少工作深度，提高牵引效率。这样，驱动轮滑转率很快地降低，维持在预设范围内，从而实现了更好的牵引效果。

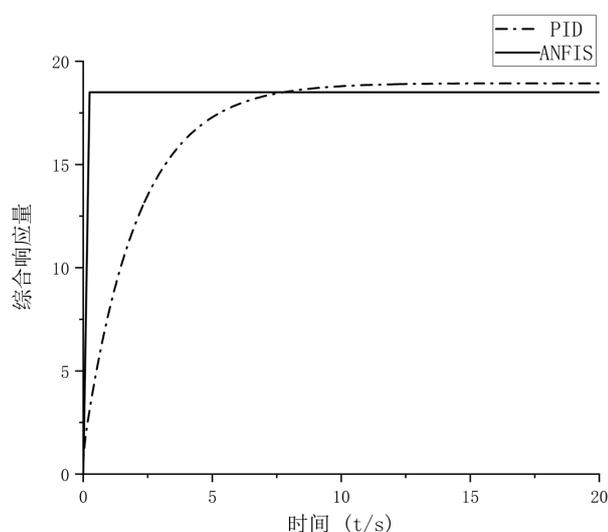


Figure 6. Theoretical response test of tractor
图 6. 拖拉机的理论响应测试

根据试验结果得出的结论是，在试验中使用了比阻值变化作为阶跃的干扰力，由于土壤比阻发生了改变，致使耕深和牵引阻力随之波动，但波动幅值较小。在被干扰前，耕深基本保持在 25 cm 左右。当对系统施加脉冲干扰信号时，系统工作 6 秒后，耕深再次回到预先指定值 25 cm。实际耕深随着输入信号发生变化而产生响应，并能在 0.5 秒内达到预先设定耕作深度并维持不变，符合耕深控制误差在 -10%~+10% 的范围内。综上所述，试验结果表明该系统能够有效地控制耕深，并保持稳定的控制精度(图 7~9)。

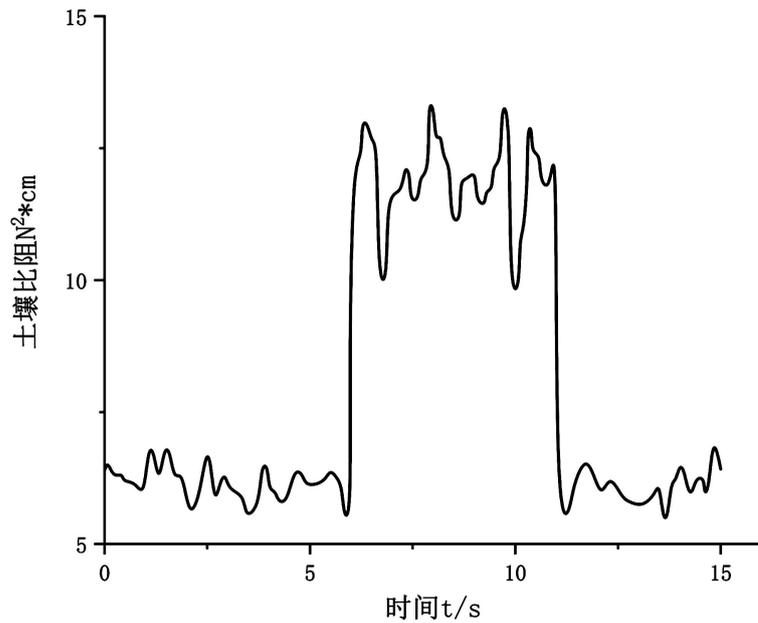


Figure 7. Soil specific resistance
图 7. 土壤比阻

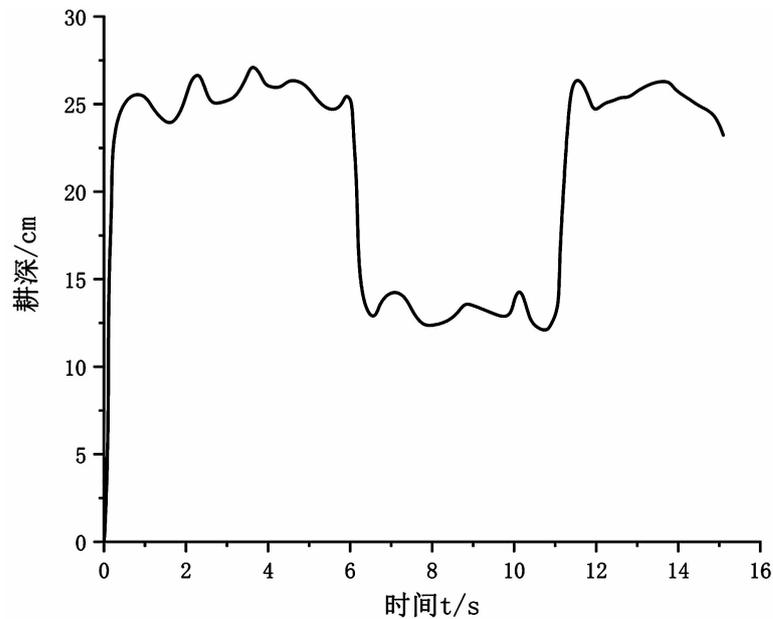


Figure 8. Plot of tillage depth response curve
图 8. 耕深响应曲线图

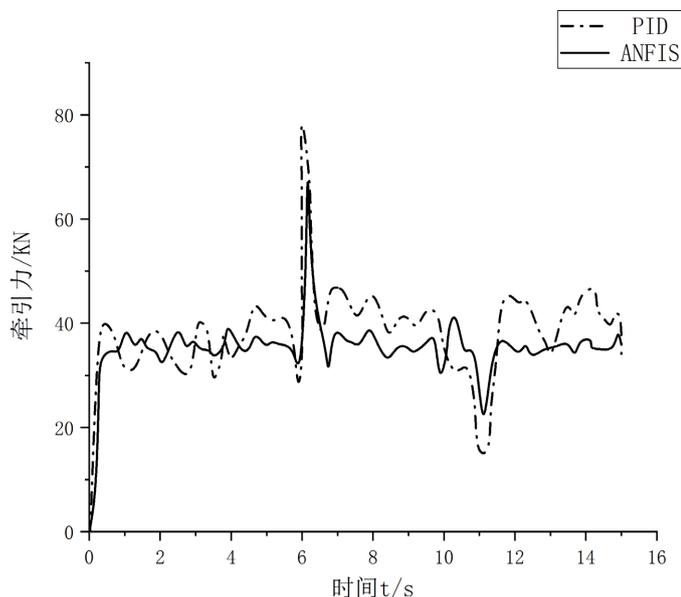


Figure 9. Traction force comparison curve
图 9. 牵引力对比曲线

当土壤比阻突然激增时,牵引力随即产生波动。与比阻呈正相关,在 PID 控制下牵引力最大值为 80.79 N,最小值为 14.65 N;在 ANFIS 控制下牵引力最大值为 75.27 N,最小值为 16.9 N。结果表明后者控制下牵引力更加稳定,效果明显优于前者。

由图 10 可知,当设定滑转率设定在 0.1~0.2 范围内时,系统经过 15 s 运行后,采集此段时间的滑转率变化,采用模糊 PID 控制时,所采集到的实际滑转率峰值为 0.2726,最小达到 0.0534,波动范围为 0.2192,结果表明有 12 s 的时间滑转率超过控制时间,有 80% 的时间在有效时间范围内;而采用 ANFIS 控制下采集到的实际滑转率峰值为 0.2094,最小值为 0.0815,波动范围为 0.1279,结果表明有 12.96 s 的时间滑转率超过控制时间,有 86% 的时间在有效时间范围内。通过以上对比分析不难看出,使用 ANFIS 控制下的滑转率波动幅值相比于 PID 控制下的滑转率波动幅值降低了 41.65%,有效控制时间有 12% 的提升。

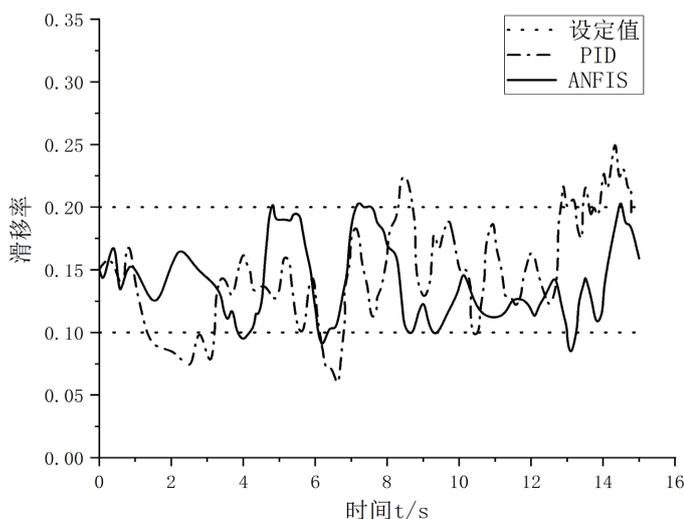


Figure 10. Slip rate comparison curve
图 10. 滑转率对比曲线

从以上仿真结果不难看出,采用 ANFIS 控制时,拖拉机耕深、牵引力的控制精度更加准确;滑转率在有效控制时间内的时长得到了进一步的提高。

6. 结论

本文使用速度、耕深作为自变量,牵引阻力作为因变量,经过试验验证,根据 DBSCAN 聚类确定 ANFIS 模型的初始设定,构建了基于 ANFIS 耕作牵引阻力预测模型。该模型通过不断地迭代训练,可以在较短的训练时长内,较为高效的生成预测模型。从预测的角度来看,这种牵引阻力预测模型一方面对所构建模型的结构进行了一定程度的简化,另一方面该模型预测误差精度得到了显著提升,耕深控制误差维持在 -10% ~ $+10\%$ 的范围内。

与模糊 PID 控制相比,基于 DBSCAN 改进的 ANFIS 模型对于非线性模型拟合能力良好,精度更加准确。对测试数据集上多数数据有良好的适应能力,模型预测效果与实测数据比较接近。该研究为后续发动机动力合理分配、提升牵引力利用效率、延长农具使用寿命等方面提供了研究发展方向。牵引阻力和速度作为影响拖拉机功率消耗的两个最重要的因素,依据上述研究模型,可以根据犁耕作业时所预测的牵引阻力,更高效地利用功率消耗,将发动机的功率优化匹配给液压悬挂系统;同时根据该牵引阻力预测模型可以对当前复杂耕作环境,拖拉机的负载强度是否符合标准进行评判,从而可以延长农具使用寿命。

致 谢

本论文是在导师徐立友教授和席志强老师的悉心指导下完成的。导师对待科研工作认真负责,对待学生耐心平和,为人处世正直善良。这些优良作风无时无刻不在对我产生积极的影响,让我在前进的道路上不再迷茫。不仅使我树立了远大的学术目标、掌握了基本的研究方法,还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。本论文的完成,每一步都是在导师的指导下完成的,倾注了导师大量的心血。在此,谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢!

参考文献

- [1] 李晓. 丘陵山区农业机械化的几点思考[J]. 农机市场, 2017(4): 29-30.
- [2] 董秀林, 董国辉, 周福章, 史维祥. 拖拉机阻力控制系统的室内模拟实验装置[J]. 农业机械学报, 1996(4): 158-161.
- [3] 李象, 毛恩荣, 韩聚奎. 拖拉机阻力控制系统室内动态仿真试验[J]. 北京农业工程大学学报, 1989(4): 46-53.
- [4] 殷新东, 鲁植雄. 基于滑转率的四轮驱动拖拉机防滑模糊控制算法仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2010(12): 6-10.
- [5] 邹爱民. 丘陵山地拖拉机后悬挂技术的应用与研究[J]. 南方农机, 2018, 49(8): 43.
- [6] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(z1): 117-123.
- [7] Osinenko, P.V., Geissler, M. and Herlitzius, T. (2015) A Method of Optimal Traction Control for Farm Tractors with Feedback of Drive Torque. *Biosystems Engineering*, **129**, 20-33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.009>
- [8] Kim, J. and Lee, J.H. (2018) Traction-Energy Balancing Adaptive Control with Slip Optimization for Wheeled Robots on Rough Terrain. *Cognitive Systems Research*, **49**, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.01.007>
- [9] Shafaei, S.M., Loghavi, M. and Kamgar, S. (2017) Appraisal of Takagi-Sugeno-Kang Type of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Draft Force Prediction of Chisel Plow Implement. *Computers and Electronics in Agriculture*, **142**, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.023>
- [10] 张波, 周俊. 基于模糊神经网络的拖拉机耕作牵引阻力预测研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(1): 213-220.
- [11] 朱忠祥, 陈一明, 翟志强, 等. 丘陵山地拖拉机加载仿形试验台设计[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(10): 173-185. <https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2022.10.16>
- [12] 张硕, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 后轮驱动大功率拖拉机牵引力-滑转率联合自动控制方法[J]. 农业工程学报, 2016,

-
- 32(12): 47-53. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.007>
- [13] 李志磊, 魏正英, 周建平, 等. ETO 影响因素及 ANFIS 预测模型研究[J]. 机械设计与制造, 2016(10): 22-26. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3997.2016.10.007>
- [14] 刘凯. 基于 BP 神经网络的四旋翼双闭环 PID 轨迹跟踪控制[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(11): 62-63. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-182X.2018.11.026>
- [15] 王月兰, 马增益, 尤海辉, 唐义军, 沈跃良, 倪明江, 池涌, 严建华. 基于自适应神经模糊推理系统的煤粉锅炉飞灰含碳量建模[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 26-32. <https://doi.org/10.19666/j.rfd.201704004>