

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.049

基于 APSO 算法的拖拉机牵引性能预测通用模型 建立与试验

赵静慧^{1,2} 赵腾龙^{1,2} 徐立友^{1,2} 李妍颖^{1,2} 张静云^{1,2} 刘永红³ 孙丽³

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039;

3. 凯迈(洛阳)机电有限公司, 洛阳 471003)

摘要: 针对现有轮式拖拉机牵引性能预测模型通用性差、预测精度低等问题, 提出了一套涵盖系统建模、预测优化、实例验证全过程的适用于四轮驱动与二轮驱动拖拉机的牵引性能预测通用模型。通过深入分析土壤力学、轮胎力学、传动系统之间的相互作用, 将拖拉机牵引性能抽象为轮-壤模型、驱动力模型、滑转率模型、牵引力模型 4 个基本模型, 以建立适用于四轮驱动与二轮驱动拖拉机的整机牵引性能预测通用模型。为了提高预测精度, 以整机滑转率为优化目标, 建立基于自适应粒子群优化算法 (APSO) 的牵引性能预测优化方法。通过线上优化, 验证了模型准确性和通用性。为了进一步验证该通用模型优越性和工程实用性, 以东方红某 105 kW 拖拉机作为试验样机, 在中国一拖集团有限公司田间全地型试验场, 完成线下试验。试验结果表明, 与现有预测模型相比, 对于四轮驱动拖拉机, 基于 APSO 的牵引性能预测方法的滑转率和滚动阻力平均绝对误差分别为 1.9% 和 0.18 kN。对于二轮驱动拖拉机, 相应的平均绝对误差分别为 2.7% 和 0.25 kN, 精度大幅提升。

关键词: 四轮驱动拖拉机; 二轮驱动拖拉机; 牵引性能; 预测模型; 通用模型; APSO 算法

中图分类号: S219.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0519-11

OSID:



General Model Building and Experiment on Traction Performance Prediction Based on APSO Algorithm

ZHAO Jinghui^{1,2} ZHAO Tenglong^{1,2} XU Liyou^{1,2} LI Yanying^{1,2} ZHANG Jingyun^{1,2} LIU Yonghong³ SUN Li³

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China

3. Cama (Luoyang) Electromechanic Co., Ltd., Luoyang 471003, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor generality and low prediction accuracy of existing models for traction performance of wheeled tractors, a set of general model for traction performance prediction of four-wheel drive and two-wheel drive tractors was proposed, which covered the whole process of system modeling, prediction optimization and case verification. By analyzing the interaction of many physical fields such as soil mechanics, tire mechanics and transmission system, the tractor traction performance was abstracted into four basic models, namely wheel - soil model, driving force model, slip rate model and tractive force model, in order to establish a general model for the whole machine traction performance prediction of four-wheel drive and two-wheel drive tractors. In order to improve the prediction accuracy, the traction performance prediction optimization algorithm based on adaptive particle swarm optimization (APSO) was established with the overall machine slip rate as the optimization objective. Through on-line optimization, the accuracy and universality of the model were verified. In order to further verify its superiority and engineering practicability, a 105 kW tractor of YTO was used as a test prototype to complete the offline test in the whole field test site. The experimental results showed that compared with the existing prediction models, the error of slip rate and rolling resistance of the APSO-based prediction method was 1.9% and 0.18 kN, respectively. For two-wheel drive tractors, the corresponding errors were 2.7% and 0.25 kN, respectively, and the accuracy was greatly improved. The general model of traction performance prediction for four-wheel drive and two-wheel drive tractors was studied, which had certain research significance in the fields of traction control and performance of wheeled tractors.

Key words: four-wheel drive tractor; two-wheel drive tractor; tractive performance; prediction model; general model; APSO algorithm

收稿日期: 2024-08-18 修回日期: 2024-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001200)

作者简介: 赵静慧(1990—),女,博士生,主要从事拖拉机机组性能分析方法研究,E-mail: zhaojinghui001@aliyun.com

通信作者: 徐立友(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆新型传动系统与控制技术研究,E-mail: xlyou2002@sina.com

0 引言

牵引性能是拖拉机农业作业过程中的核心评价指标,包含牵引效率、滑转效率、滚动效率等^[1-3]。在拖拉机整机设计阶段,牵引性能预测模型可以有效运用于拖拉机整机性能研究、参数优化和控制系统配置,有助于降低设计冗余,提升能源利用率并减少开发成本^[4],从而提升实际作业过程中的牵引效率和整机经济性。

针对轮式拖拉机牵引性能预测模型,文献[5-6]提出了 LOTUS 性能预测平台,并比较了斜交轮胎和子午线轮胎、双轮胎和单轮胎对牵引性能的影响。BESSELINK^[7]针对非均匀牵引工况,从滑转效率最大化的角度分析四轮驱动拖拉机的牵引效率预测模型。研究表明,当各轮滑转率相等时,滑转效率不会达到最大值。AL-HAMED 等^[8]改进了 LOTUS 性能预测平台,通过友好型界面大幅降低预测计算复杂性。同时,对 41 台采用子午线轮胎拖拉机的预测结果和试验结果相对比,证实了改进平台的正确性。张文春等^[9]针对传统计算方法复杂的问题,在大量统计数据基础上,首次明确计算机计算和作图流程,建立了驱动轮滑转率模型和发动机特性模型,并通过泰山 25 型拖拉机在标准跑道上进行实测值与预测值比较,结果表明各挡位特征值误差均较小,所建模型具有准确性。曹冲等^[10]以四轮驱动拖拉机为研究对象,在 Matlab 和 AVL-CRUISE 仿真软件中分别建立牵引预测模型。仿真分析结果显示,在对模型适当简化前提下,2 个仿真软件结果基本一致,证明了 AVL-CRUISE 在拖拉机牵引性能仿真上的可行性。赵静慧等^[11]针对四轮驱动拖拉机,搭建了包含前后轮附着差异、载荷转移和前后桥运动不协调等的牵引效率预测模型,并提出双维度迭代算法,提高了预测精度。

目前,国内外针对轮式拖拉机牵引性能预测模型的相关研究均较少,且大多时间久远^[12-13]。在现有牵引性能预测模型的研究领域中,主要集中于通过半经验的方法建立拖拉机的牵引性能预测平台,或针对特定驱动形式拖拉机,建立对应的牵引性能预测模型。模型缺乏通用性,且预测精度较低^[14-15]。

因此,本文通过分析土壤力学、轮胎力学、传动系统之间相互作用,在农业作业环境下,提出适用于四轮驱动和二轮驱动拖拉机的牵引性能预测通用模型。为了提高预测精度,以轮胎滑转率为优化目标,建立基于 APSO 算法的牵引性能通用预测优化算法。最后通过线上仿真和线下优化,验证预测模型和算法的准确性、通用性和优越性。

1 拖拉机牵引性能预测模型

通过分析拖拉机土壤力学、轮胎力学、传动系统之间的相互作用,引入滑转效率、滚动效率和牵引效率,将拖拉机牵引性能抽象为轮-壤模型、驱动力模型、滑转率模型、牵引力模型 4 个基本模型,以建立适用于四轮驱动与二轮驱动拖拉机的整机牵引性能预测通用模型。

1.1 轮-壤模型

通过采用基于土壤圆锥指数的地面力学方法来构建轮-壤模型^[16-17]。模型中利用土壤圆锥指数来量化土壤的压缩强度和抗剪强度。在拖拉机的常规耕作深度范围内,不同类型土壤具有不同圆锥指数,耕作土壤或留茬地圆锥指数在 450 ~ 1 500 kPa 之间^[18-19]。

通过引入轮胎指数 C_n ,反映农用轮胎在具有粘性和摩擦特性土壤中的表现,计算式为

$$C_n = \frac{C_l b d}{F_z} \quad (1)$$

式中 C_l ——土壤圆锥指数, kPa

b ——轮胎断面宽度, mm

d ——轮胎直径, mm

F_z ——轮胎法向载荷, kN

通过引入轮胎机动指数 B_n ,修正拖拉机在实际工作状态下轮胎所能发挥的牵引性能,计算式为

$$B_n = C_n \frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \quad (2)$$

式中 δ ——轮胎径向形变量, mm

h ——轮胎断面高度, mm

定义滚动阻力系数为轮胎滚动阻力与法向载荷之比。拖拉机轮胎与土壤进行交互时,会产生由于其法向载荷变化而引起的土壤下陷,从而影响其行驶阻力变化^[20]。其表达式为

$$M_{RR} = \frac{M_R}{F_z} = \frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5S}{\sqrt{B_n}} \quad (3)$$

式中 M_{RR} ——轮胎滚动阻力系数

M_R ——轮胎滚动阻力, kN

S ——轮胎滑转率

式中 1、0.04、0.5 为相关经验系数,与所选拖拉机轮胎规格有关。

拖拉机在进行牵引作业时,其受力情况如图 1 所示。根据图 1 可知,拖拉机在作业过程中,前轮与后轮均产生滚动阻力。

拖拉机运行过程中,对拖拉机进行受力分析,前

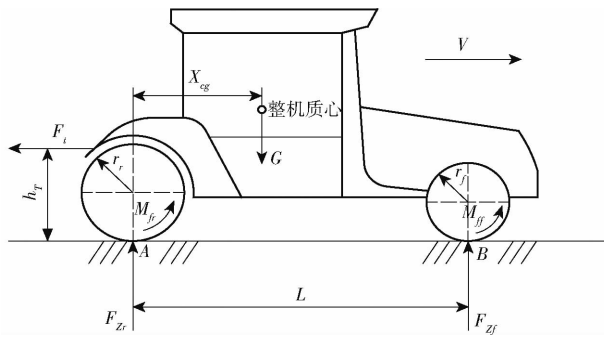


图 1 拖拉机整机受力情况

Fig. 1 Forces of whole tractor

后轮滚动阻力矩为

$$M_{jf} = F_{zf} M_{RRf} r_f \quad (4)$$

$$M_{jr} = F_{zr} M_{RRr} r_r \quad (5)$$

式中 M_{jf} 、 M_{jr} ——拖拉机前、后轮滚动阻力矩, $N \cdot m$

F_{zf} 、 F_{zr} ——前、后轮地面法向支反力, kN

r_f 、 r_r ——拖拉机前、后轮半径, mm

M_{RRf} 、 M_{RRr} ——前、后轮滚动阻力系数

根据式(3)~(5),结合轮-壤模型与牛顿第二定律,可得到前、后轮所受地面法向支反力表达式为

$$F_{zf} = \frac{G(X_{cg} - M_{RRr} r_r) - F_i h_T}{2(L + M_{RRf} r_f - M_{RRr} r_r)} \quad (6)$$

$$F_{zr} = \frac{G(L - X_{cg} + M_{RRr} r_r) + F_i h_T}{2(L + M_{RRf} r_f - M_{RRr} r_r)} \quad (7)$$

式中 G ——拖拉机实际重力, kN

L ——拖拉机轴距, mm

X_{cg} ——质心到后轴轴心纵向距离, mm

h_T ——牵引点高度, mm

F_i ——拖拉机整机牵引力, kN

1.2 驱动力模型

整机驱动力影响拖拉机在田间作业时的整机滑转率、对外输出牵引力等牵引性能关键指标。文献[9]和文献[11]分别基于发动机输出特性和轮-壤作用关系,建立了驱动力模型。因此,结合上述研究,本文提出改进的整机驱动力建模方法。

1.2.1 基于发动机输出特性的驱动力利用系数

农业作业时,发动机输出转矩经前、后驱动轮转化为整机驱动力^[21]。根据发动机在实际工况下所输出转矩,计算拖拉机前、后桥转矩。当发动机向前桥所输出转矩为 T_{ef} 时,其向后桥输出转矩为 T_{er} ,得到前、后轮驱动力为

$$F_{qf.e} = \frac{T_{er} \eta_{cr} i_r}{r_f} \quad (8)$$

$$F_{qr.e} = \frac{T_{ef} \eta_{cf} i_f}{r_r} \quad (9)$$

式中 i_f 、 i_r ——发动机到前、后驱动轮传动比

η_{cf} 、 η_{cr} ——拖拉机驱动系前、后桥传动效率

$F_{qf.e}$ 、 $F_{qr.e}$ ——发动机到前、后驱动桥驱动力, kN

定义驱动轮驱动力利用系数为驱动轮驱动力与轮胎法向载荷之比。该系数可以有效表示前、后桥驱动力与轴荷之间关系,可表示为

$$G_{TRf.e} = \frac{F_{qf.e}}{2F_{zf}} = \frac{F_{qf.e}}{W_f} \quad (10)$$

$$G_{TRr.e} = \frac{F_{qr.e}}{2F_{zr}} = \frac{F_{qr.e}}{W_r} \quad (11)$$

式中 $G_{TRf.e}$ 、 $G_{TRr.e}$ ——前、后轮胎驱动力利用系数

W_f 、 W_r ——拖拉机前、后驱动桥轴荷, kN

1.2.2 基于轮-壤作用关系的驱动力利用系数

根据拖拉机轮-壤模型,驱动轮驱动力是轮胎土壤接触面对轮胎所产生的横向剪应力反力,则基于轮-壤作用关系的驱动力利用系数 $G_{TR.w}$ 可表示为

$$G_{TR.w} = 0.88(1 - e^{-0.1B_n})(1 - e^{-7.5S}) + 0.04 \quad (12)$$

1.2.3 有效驱动力

拖拉机驱动轮的有效驱动力利用系数主要取决于发动机输出特性和轮-壤相互作用关系。为了提高计算通用性,以两者中的较小值作为实际驱动力利用系数,以此计算有效驱动力。则拖拉机驱动轮实际驱动力利用系数可表示为

$$\begin{cases} G_{TRf} = \min(G_{TRf.e}, G_{TRf.w}) \\ G_{TRr} = \min(G_{TRr.e}, G_{TRr.w}) \end{cases} \quad (13)$$

式中 G_{TRf} 、 G_{TRr} ——拖拉机实际前、后轮驱动力利用系数

则拖拉机整机驱动力表达式为

$$F_q = F_{qf} + F_{qr} = G_{TRr} W_r + G_{TRf} W_f \quad (14)$$

式中 F_q ——拖拉机驱动力, kN

F_{qf} 、 F_{qr} ——拖拉机前、后桥驱动力, kN

1.3 滑转率模型

结合拖拉机轮-壤模型和驱动力模型,建立目标滑转率表达式为

$$S = \sigma^* \ln \frac{G_{TRmax}}{G_{TRmax} - G_{TR}} \quad (15)$$

式中 σ^* ——拟合系数,在留茬地土壤条件下,通常为 0.632

G_{TRmax} ——拖拉机最大驱动力利用系数

四轮驱动拖拉机在进行牵引作业时,前后轮胎规格不同,轮-壤特性差异较大。同时,前桥轴荷向后桥转移,前、后轮的地面附着系数产生变化。因此,引入前后桥运动不协调系数 ε ,表征实际速度与理论速度的差异,计算式为

$$\varepsilon = \frac{V_{lf} - V_{lr}}{V_{lf}} \quad (16)$$

式中 V_{L_f} 、 V_{L_r} ——前、后桥理论速度, km/h

拖拉机实际速度与理论速度表示为

$$V = V_f = V_r \quad (17)$$

$$V_{L_r} = \frac{V}{1 - S_r} \quad (18)$$

式中 V ——拖拉机实际速度, km/h

V_f 、 V_r ——拖拉机前、后桥实际速度, km/h

V_{L_r} ——拖拉机理论速度, km/h

根据式(17)、(18), 计算拖拉机实际速度、理论速度与前、后桥理论速度, 则拖拉机前、后轮滑转率表示为

$$V = V_{L_f}(1 - S_f) = V_{L_r}(1 - S_r) \quad (19)$$

式中 S_f 、 S_r ——前、后轮滑转率

1.4 牵引力模型

拖拉机通过牵引挂钩向负荷车输出的力称为牵引力。拖拉机整机驱动力、整机滚动阻力分别表示为

$$F_q = F_{qf} + F_{qr} \quad (20)$$

$$F_{RR} = M_{RRf}W_f + M_{RRr}W_r \quad (21)$$

式中 F_{RR} ——拖拉机整机滚动阻力, kN

根据式(20)、(21), 拖拉机对外输出有效力为整机驱动力与整机滚动阻力之差, 牵引力 F_t 表示为

$$F_t = F_q - F_{RR} \quad (22)$$

1.5 牵引效率通用模型

拖拉机实际牵引作业过程中, 滑转效率是整机实际驱动力与理论驱动力的比值。根据驱动轮与土

壤之间的交互关系, 拖拉机滑转效率 η_s 可表示为

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \frac{F_{qf}}{F_q} \frac{S_f}{1 - S_f} + \frac{F_{qr}}{F_q} \frac{S_r}{1 - S_r}} \quad (23)$$

定义拖拉机对外输出有效力与驱动力之比为滚动效率 η_f , 表示为

$$\eta_f = \frac{F_q - F_{RR}}{F_q} \quad (24)$$

对于轮式驱动拖拉机, 在结合拖拉机轮-壤作用机理、整机发动机输出特性、前后桥运动不协调度、传动系统作业效率等多个关键影响因素相互作用结果后, 根据式(23)、(24), 可得到表征二轮驱动和四轮驱动拖拉机的通用性牵引性能预测模型, 表达式为

$$\eta_T = \eta_s \eta_f \eta_c = \frac{\left(1 - \frac{F_{RR}}{F_q}\right) \eta_c}{1 + \frac{F_{qf}}{F_q} \frac{S_f}{1 - S_f} + \frac{F_{qr}}{F_q} \frac{S_r}{1 - S_r}} \quad (25)$$

式中 η_T ——拖拉机牵引效率

η_c ——拖拉机传动效率

根据轮-壤模型、驱动力模型、滑转率模型、牵引力模型4个整机动力学模型, 建立适用于四轮驱动拖拉机与二轮驱动拖拉机的整机牵引性能预测模型, 如图2所示。该模型能有效表征拖拉机在牵引工作中牵引效率受到轮胎规格、整机滑转、轮-壤特性以及整机运动不协调、发动机转矩分配等因素的影响。

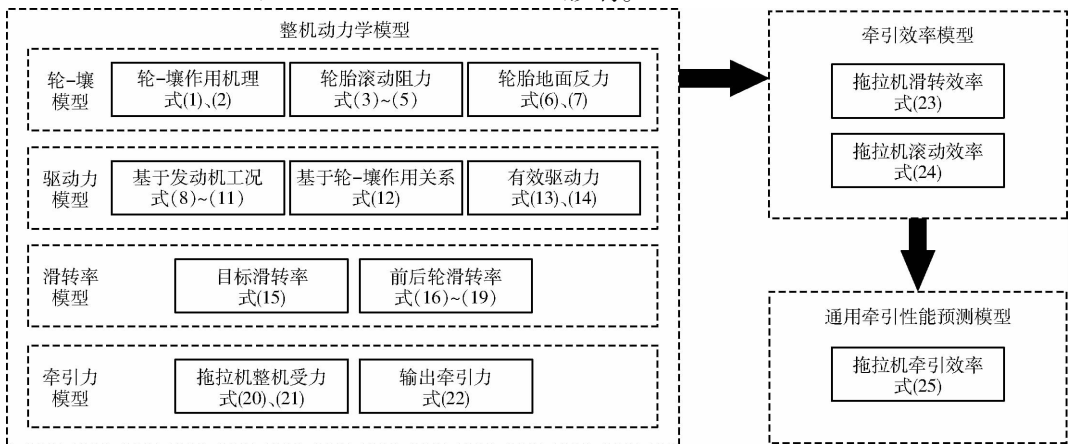


图2 拖拉机牵引性能通用性预测模型建立流程图

Fig. 2 Establishing general prediction model of traction performance

2 APso 牵引性能预测优化算法

以整机牵引性能预测通用模型为基础, 通过整机建模和算法优化共同实现预测通用模型的快速准确预测, 见图3。在整机建模层面, 针对拖拉机整机建模过程中的迭代求解问题, 借助 Matlab/Simulink 仿真平台建立数学模型并进行迭代

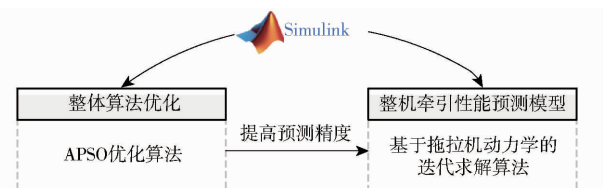


图3 整机牵引性能预测优化方法示意图

Fig. 3 Prediction method for whole traction

计算^[22]。以目标滑转率为优化目标,采用 APSO 算法优化求解流程,提升整机牵引性能预测精度和计算响应速率。

APSO 是一种解决非线性复杂函数优化求解的进化算法^[23]。在粒子群优化算法(PSO)基础上,通过引入可自适应调整的权重因子,避免优化陷入局部最优解。

以驱动轮滑转率最小为优化目标,以车轮瞬时法向地面支反力、后桥瞬时转矩为优化变量,根据式(15),对整机后轮滑转率进行优化求解,可得

$$J = \min f(F'_{Zr}, T'_{er}) \quad (26)$$

其中

$$f(F'_{Zr}, T'_{er}) = 0.632 \ln \frac{2r'_r F'_{Zr} G_{TR\max}}{2r'_r F'_{Zr} G_{TR\max} - T'_{er} \eta_{cr} i_r} \quad (27)$$

式中 T'_{er} ——后桥瞬时转矩, N·m

r'_r ——拖拉机后轮瞬时半径, mm

F'_{Zr} ——拖拉机车轮瞬时法向地面支反力, kN

根据 APSO 算法原理和优化目标,建立牵引性能预测优化流程,如图 4 所示。

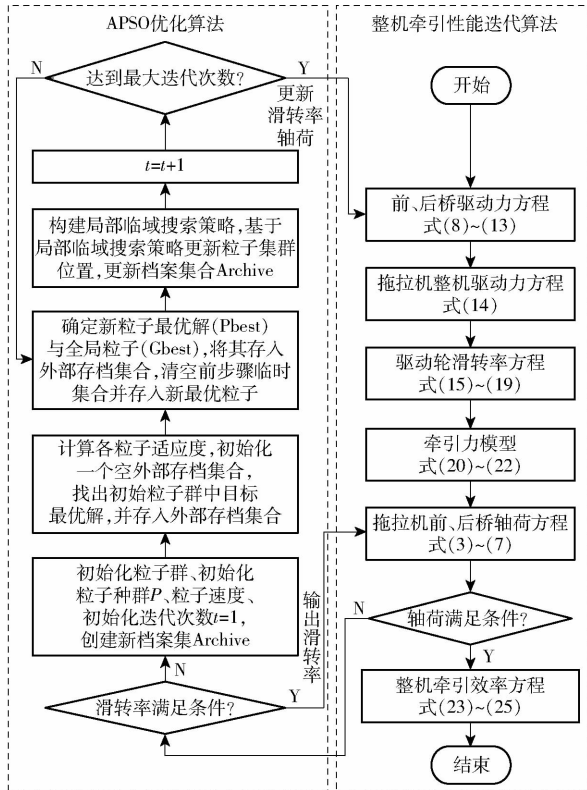


图 4 拖拉机牵引性能仿真流程图

Fig. 4 Simulation flow chart of traction performance

具体步骤如下:

(1) 引入 APSO 算法,在拖拉机通用牵引性能预测模型建立中,基于式(15)滑转率求解模块,判断驱动桥轴荷是否满足整机运行条件,以此引入 APSO 优化算法。

(2) 初始参数设置,初始化粒子群数量、粒子种

群 P 、粒子速度、迭代次数,创建新档案集 Archive,相关初始参数如表 1 所示。以 F'_{Zr} 、 T'_{er} 为变量参数,以后轮滑转率为因变量,建立优化目标及相应粒子群。

表 1 APSO 初始参数

Tab. 1 APSO initial parameter

参数	数值	参数	数值
最大迭代次数	150	学习因子 C_1	1.7
种群规模	50	学习因子 C_2	2.0
惯性权重	0.9	最小惯性权重	0.5
粒子衰减因子	0.15	最大惯性权重	1.3

(3) 最优粒子筛选,计算各粒子适应度,建立外部空存档集合,对初始粒子进行筛选,找出最优粒子并存入所建立外部存档集合。

(4) 种群变异与迭代并计算目标适应度,根据预设的惯性权重系数和惯性权重衰减率进行内部计算。对粒子进行选择、交叉和变异操作,产生下一代群体。计算每个粒子的适应度,即目标函数值。更新粒子速度和位置,以便更好地探索搜索空间。

(5) 输出最优粒子,迭代结束时,对比内部粒子最优个体和前后代所产生最优个体。如果为最优个体,迭代结束,输出最优个体;反之,则重复步骤(2)~(4)。

为了防止算法运行过程中各变量函数值超出容许范围,保证驱动系统合理运行,需施加约束

$$\begin{cases} T_{ert, \min} < T_{ert} < T_{ert, \max} \\ F_{Zrt, \min} < F_{Zrt} < F_{Zrt, \max} \\ G_{TRrt, \min} < G_{TRrt} < G_{TRrt, \max} \end{cases} \quad (28)$$

式中 $T_{ert, \max}$ 、 $T_{ert, \min}$ ——后桥转矩上、下限

$F_{Zrt, \max}$ 、 $F_{Zrt, \min}$ ——拖拉机后轮法向地面支反力上、下限

$G_{TRrt, \max}$ 、 $G_{TRrt, \min}$ ——拖拉机驱动力利用系数上、下限

为验证 APSO 算法相较于 PSO 算法在求解拖拉机最优滑转率过程中具备更好的准确性和快速响应特性,设置基于 PSO 的牵引性能预测算法作为对照组。设定以拖拉机后轮滑转率为优化目标,适应度函数值变化过程如图 5 所示。由图 5 可知,随着迭代次数增加,APSO 算法适应度函数值相较于 PSO 算法下降速率更快,在迭代次数为 32 附近达到最低适应度 30,并随之趋于稳定。适应度仿真结果说明 APSO 优化求解函数时整体收敛速度更快,并且在相同迭代次数下具有更好的优化效果。

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

以东方红某 105 kW 拖拉机(4×4 轮式)为试验

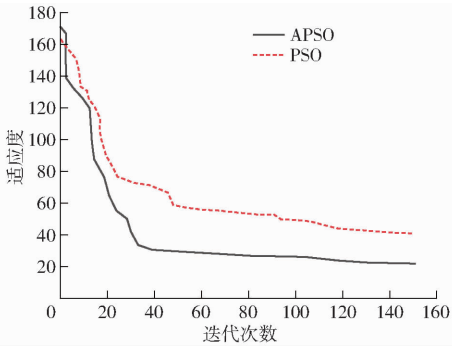


图5 优化迭代适应度函数对比

Fig. 5 Fitness function comparison

对象,开展线上仿真试验,整机参数见表2。以土壤圆锥指数为 850 kPa 的地面为牵引作业下的仿真环境,通过图4所示的建模流程在 Matlab/Simulink 环境中建立仿真模型。

表2 东方红某 105 kW 拖拉机整机参数

Tab. 2 YTO 105 kW tractor machine parameters

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 050×2 370×3 200
整机最大牵引力/kN	52.6
发动机标定功率/kW	110.3
前轮轮胎型号	14.9-26
后轮轮胎型号	18.4-38
前轮轮距/mm	1 714
后轮轮距/mm	1 676
整车重力/kN	61.8
静态前桥轴荷 W_f /kN	26.3
静态后桥轴荷 W_r /kN	35.5
牵引点高度 h_T /mm	435

3.2 四轮驱动拖拉机仿真分析

图6为四轮驱动拖拉机轮胎驱动力利用系数与牵引力的关系。由图6可知,在牵引力到达整机容许特征牵引力时, $G_{Trf} = 0.80$, $G_{Trr} = 0.78$,前轮轮胎驱动力利用系数大于后轮轮胎驱动力利用系数。在牵引力为 48.3 kN 时,轮胎驱动力利用系数达到最大。

图7为四轮驱动拖拉机轮胎滑转率与牵引力的关系。由图7可知,在拖拉机牵引力 F_i 小于 2.5 kN 时,拖拉机后轮滑转率小于 0,由于前后桥运动不协调导致后轮同时出现滚动与滑移的现象,整车出现一定制动效果。当 F_i 为 2.5 kN 时,后轮滑转率为 0,后轮理论线速度等于整车速度,后轮处于纯滚动状态,前轮有一定滑转的情况出现。当牵引力 $F_i > 2.5$ kN 时,前轮、后轮滑转率均大于 0,前轮理论线速度大于整车速度,后轮理论线速度小于整车速度。此时由于拖拉机仍存在前后桥运动不协调的情况,导致前轮理论线速度较高。

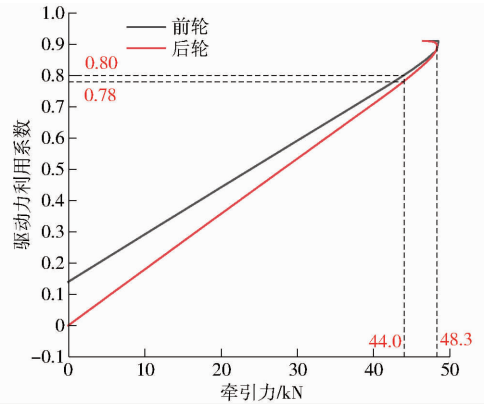


图6 四轮驱动拖拉机驱动力利用系数与牵引力关系

Fig. 6 Relationship between driving force utilisation and tractive force of four-wheel drive tractor

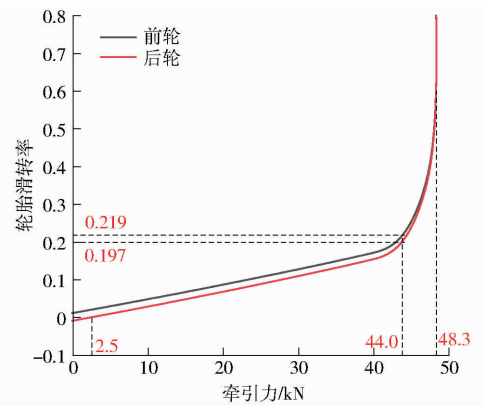


图7 四轮驱动拖拉机轮胎滑转率与牵引力关系

Fig. 7 Relation between tire slip rate and tractive force of four-wheel drive tractor

图8为四轮驱动拖拉机轮胎滚动阻力系数与牵引力的关系。由图8可知,随着牵引力增加轮胎滚动阻力也随之增加,在牵引力逐渐增大到容许特征牵引力时,拖拉机前轮滚动阻力系数从 0.064 增大到 0.071,后轮滚动阻力系数从 0.058 增大到 0.078。在拖拉机牵引力大于其容许特征牵引力时,随着拖拉机前、后轮滑转率迅速增大,轮胎滚动阻力系数也随之增大,当牵引力增大到 48.3 kN 时,轮胎滚动阻力系数出现急剧上升,导致整机滚动阻力显

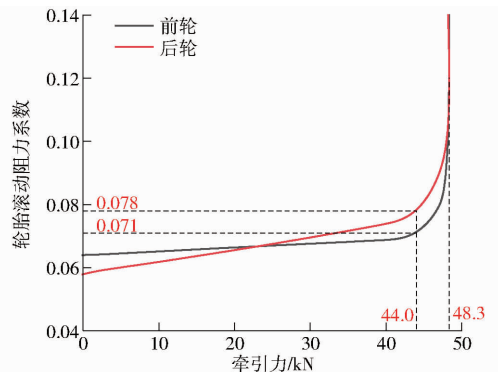


图8 四轮驱动拖拉机轮胎滚动阻力系数与牵引力关系

Fig. 8 Relation between rolling resistance coefficient and tractive force of four-wheel drive tractor

著增加。由此得出,在土壤圆锥指数为 850 kPa 的土壤条件下,该型号拖拉机在四轮驱动情况下最大牵引力为 48.3 kN。

图 9、10 为四轮驱动拖拉机前后桥载荷与驱动特性的关系。由图 9 可见,随着牵引力不断增加,前、后桥载荷出现载荷转移的情况。载荷转移量与牵引力呈线性关系,当牵引力达到容许特征牵引力时,前桥轴荷 W_f 降至 19.3 kN,占整车重力的 31%,较静止状态下前桥轴荷减轻 23%。由图 10 可知,当牵引力 $F_t < 10.9$ kN 时,拖拉机前桥驱动力 F_{qf} 大于后桥驱动力 F_{qr} ,当牵引力 $F_t > 10.9$ kN 时,拖拉机前桥驱动力 F_{qf} 小于后桥驱动力 F_{qr} 。随着牵引力继续增大,拖拉机后桥轴荷不断增加且前桥轴荷不断减小,进一步加快了拖拉机后桥驱动力 F_{qr} 的增加速率。当牵引力 F_t 到达其容许特征牵引力 44.0 kN 时,后桥驱动力 F_{qf} 为 35.7 kN,而前桥驱动力 F_{qr} 为 17 kN,后桥驱动力为前桥的 2 倍以上。

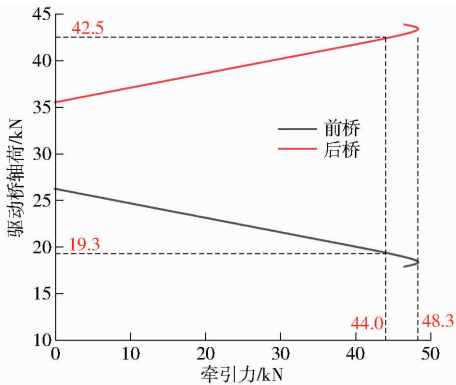


图 9 四轮驱动拖拉机驱动桥轴荷与牵引力关系
Fig. 9 Relation between axle load and tractive force of four-wheel drive tractor

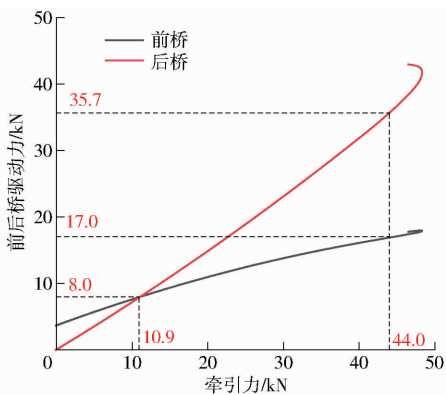


图 10 四轮驱动拖拉机前后桥驱动力与牵引力关系
Fig. 10 Relationship between driving force and tractive force of axle of four-wheel drive tractor

图 11 为四轮驱动拖拉机牵引性能计算结果。由图 11 可知,在牵引效率最高点 A 处牵引力为 25.5 kN,牵引效率为 0.699,滚动阻力系数为 0.067。整机在特征滑转率点 B 时的牵引力为

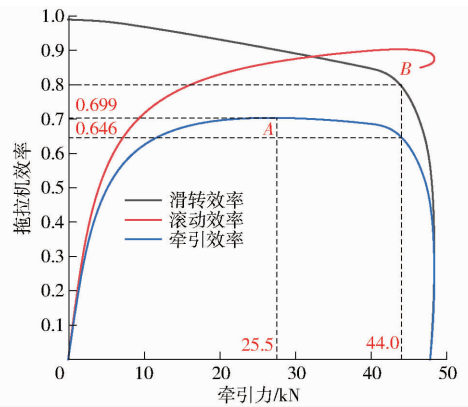


图 11 四轮驱动拖拉机牵引性能曲线

Fig. 11 Four-wheel drive tractor traction performance

44.0 kN,牵引效率为 0.646,滚动阻力系数达 0.075。此外,当 $\eta_s = 0.8$ 时,即滑转率达到容许滑转率 0.2 时,四轮驱动拖拉机牵引力达到容许特征值 44.0 kN,此时前轮滑转率为 0.219,大于容许滑转率;后轮滑转率为 0.197,小于容许滑转率。分析可得,该模型可以有效体现四轮驱动拖拉机运动不协调性对拖拉机前后桥的影响,表现效果较好。

3.3 二轮驱动拖拉机仿真分析

为进一步证实该模型对二轮驱动拖拉机仍具备普适性,在相同仿真条件下,建立该车型在二轮驱动模式下的相关数学模型,并保持其他参数不变。

图 12 为二轮驱动拖拉机后轮驱动力利用系数与牵引力的关系。在牵引力到达整机容许特征牵引力 27.1 kN 时, $G_{Tr} = 0.72$,由于拖拉机此时仅有后轮提供驱动力,所以此时前轮不产生相应驱动作用,轮胎驱动力利用系数始终为 0。当牵引力达到 35.2 kN 时,拖拉机驱动力利用系数达到最大。

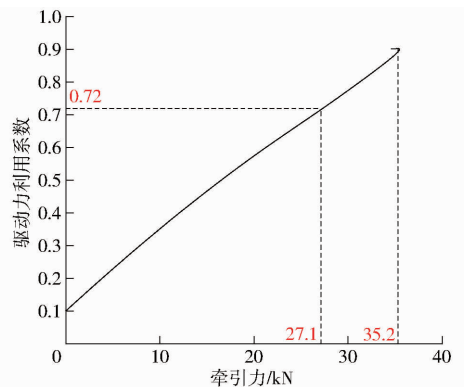


图 12 二轮驱动拖拉机后轮驱动力利用系数与牵引力关系
Fig. 12 Relationship between driving force utilisation and tractive force of two-wheel drive tractor tire

图 13 为二轮驱动拖拉机轮胎滚动阻力系数与牵引力的关系。拖拉机前、后轮随着牵引力增大出现变化。在牵引力逐渐增大到容许特征牵引力时,拖拉机前轮滚动阻力系数从 0.062 降低到 0.056,

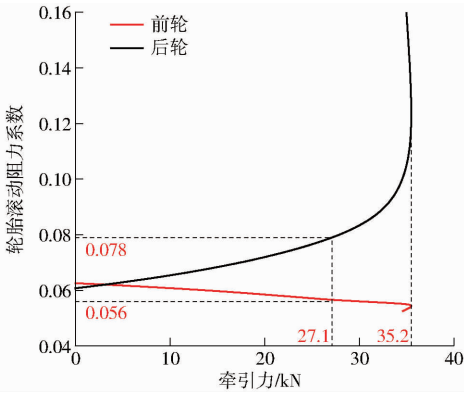


图 13 二轮驱动拖拉机轮胎滚动阻力系数与牵引力关系
Fig. 13 Relation between rolling resistance coefficient and tractive force of two-wheel drive tractor

后轮滚动阻力系数从 0.061 增大到 0.078。由式(6)、(7)可知,在拖拉机后轮驱动时,由于质心转移导致前轴载荷下降,拖拉机前轮滚动阻力系数随着牵引力增大出现下降现象。当牵引力增大到 35.2 kN 时,轮胎滚动阻力系数出现急剧上升,导致整机滚动阻力显著增加。由此得出,在土壤圆锥指数为 850 kPa 的土壤条件下,该型号拖拉机在二轮驱动情况下最大牵引力为 35.2 kN。

图 14 为二轮驱动拖拉机后轮滑转率仿真结果,此时前轮滑转率为 0。由图 14 可知,随着牵引力不断增大,后轮滑转率也不断提高,同时在牵引力达到 35.2 kN 左右时,拖拉机滑转率急剧增大导致车轮打滑现象严重。

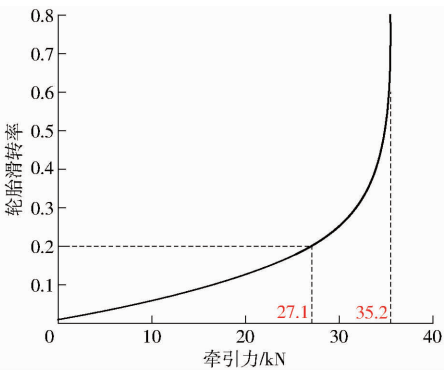


图 14 二轮驱动拖拉机轮胎滑转率与牵引力关系
Fig. 14 Relationship between tire slip rate and tractive force of two-wheel drive tractor

图 15 为二轮驱动拖拉机牵引性能仿真结果。在行走效率最高点 A 处牵引力为 18.7 kN,牵引效率为 0.649,滚动阻力系数为 0.066。整机在容许滑转率点 B 时牵引力为 27.1 kN,牵引效率为 0.616,滚动阻力系数达 0.069。对比图 11 可以看出,二轮驱动拖拉机最高牵引效率和拖拉机在容许滑转率点的牵引效率均低于四轮驱动拖拉机。因此,其他参数相同时,拖拉机采用四轮驱动能够有效提高整机

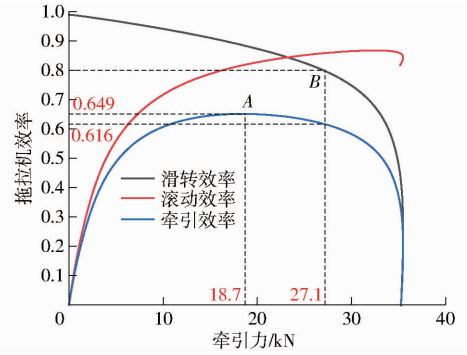


图 15 二轮驱动拖拉机牵引性能曲线

Fig. 15 Two-wheel drive tractor traction performance

牵引效率,性能提升 10% 左右。

综上,由四轮、二轮驱动拖拉机牵引性能预测仿真试验可知,所建模型的驱动轮驱动力利用系数、轮胎滑转率、轮胎滚动阻力系数和整机效率均符合拖拉机田间作业环境下的牵引性能输出特性要求。

上述仿真试验结果证明了本文所提出的牵引性能通用预测模型可准确预测四轮驱动拖拉机、二轮驱动拖拉机的整机牵引性能,模型具有通用性和准确性。同时,所提基于 APSO 算法的预测优化方法也具有准确性。

4 试验验证

4.1 实例设计

为验证所提通用模型和预测算法的准确性、优越性和工程实用性,以东方红某 105 kW 拖拉机为例,通过分离分动箱离合器实现整机四轮驱动、二轮驱动。在中国一拖集团有限公司全地型试验场,开展拖拉机牵引性能试验,基本参数如表 2 所示。测试环境土壤圆锥指数为 800 kPa,试验场地如图 16 所示。

试验通过搭载在 TA5310 型负荷车与被测拖拉机上的 PCM-6851 型拖拉机综合性能测试仪进行数据分析,OMRONE6B2-CWZ3E 型轮胎转速传感器获取理论速度,GPS 速度传感器获取实际车速。基于式(19),实时将拖拉机牵引力、驱动力、行驶阻力及前、后轮胎滑转率上传至上位机。

在测试中,负荷车负载牵引力从 0 kN 开始,以 0.5 kN 为步长线性增加,测试作业距离取 80 m。测试速度为 5 km/h,当驱动轮出现全滑转现象时停止测试。

同时,以基于 APSO 的预测模型作为仿真组 I,以文献[11]中所采用的拖拉机牵引性能预测模型作为仿真组 II,在 Matlab/Simulink 仿真软件中,分别构建与试验环境相一致的仿真模型,对所选车型建立牵引性能预测模型进行分析与对比。



图 16 拖拉机牵引性能试验

Fig. 16 Tractive performance test of tractor

1. 轮胎转速传感器 2. 数据测量放大器

4.2 试验结果分析

4.2.1 四轮驱动拖拉机

图 17 为四轮驱动拖拉机滑转率对照结果,试验结果的特征指标值对比如表 3 所示。仿真组 I 与试验组在最大牵引力与特征滑转率对应的牵引力误差分别为 0.90% 与 4.65%。仿真组 II 与试验组在最大牵引力与特征滑转率对应牵引力误差分别为 2.24% 与 12.14%。由此可见,本研究提出的拖拉机田间牵引性能通用性预测模型适用于四轮驱动拖拉机,且 APSO 牵引性能预测优化方法的滑转率和滑转效率等参数的测量精度均优于仿真组 II。

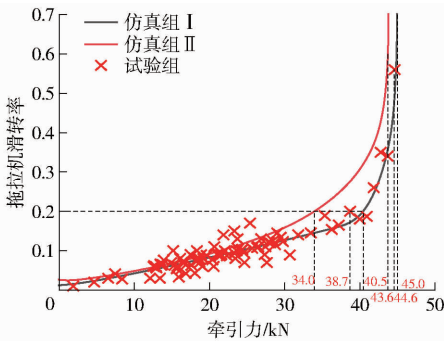


图 17 四轮驱动拖拉机滑转率试验结果

Fig. 17 Four-wheel drive tractor slip rate test result

图 18 为四轮驱动拖拉机滚动阻力对照结果,试验结果的特征指标值对比如表 4 所示。仿真组 I 与试验组在未施加牵引负载与特征滑转率对应的滚动阻力误差分别为 2.71% 与 2.63%。仿真组 II 与试验组在未施加牵引负载与特征滑转率对应的滚动阻力误差分别为 4.89% 与 5.27%。

表 3 四轮驱动拖拉机试验特征指标值对比

Tab. 3 Test characteristic of four-wheel drive tractor

组别	整机全滑转		基于特征滑转率	
	牵引力/kN	误差/%	牵引力/kN	误差/%
试验组	44.6		38.7	
仿真组 I	45.0	0.90	40.5	4.65
仿真组 II	43.6	2.24	34.0	12.14

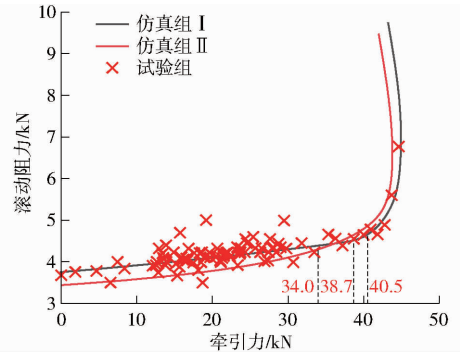


图 18 四轮驱动拖拉机滚动阻力试验结果

Fig. 18 Rolling resistance test result of four-wheel drive tractor

表 4 四轮驱动拖拉机滚动阻力对比

Tab. 4 Rolling resistance of four-wheel drive tractor

组别	未施加牵引负载		基于特征滑转率	
	滚动阻力/kN	误差/%	滚动阻力/kN	误差/%
试验组	3.68		4.55	
仿真组 I	3.78	2.71	4.67	2.63
仿真组 II	3.50	4.89	4.31	5.27

阻力误差分别为 2.71% 与 2.63%。仿真组 II 与试验组在未施加牵引负载与特征滑转率对应的滚动阻力误差分别为 4.89% 与 5.27%。

4.2.2 二轮驱动拖拉机

图 19 为二轮驱动拖拉机滑转率对照结果,试验结果的特征指标值对比如表 5 所示。仿真组 I 与试验组在最大牵引力与特征滑转率对应的牵引力误差分别为 1.19% 与 5.59%。仿真组 II 与试验组在最大牵引力与特征滑转率对应牵引力误差分别为 3.86% 与 10.07%。试验结果表明,本研究提出的拖拉机田间牵引性能通用性预测模型同样适用于二

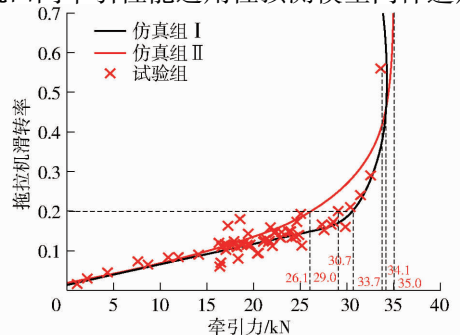


图 19 二轮驱动拖拉机滑转率试验结果

Fig. 19 Two-wheel drive tractor slip rate test result

表5 二轮驱动拖拉机试验特征指标值对比

Tab.5 Test characteristic of two-wheel drive tractor

组别	整机全滑转		基于特征滑转率	
	牵引力/kN	误差/%	牵引力/kN	误差/%
试验组	33.7		29.0	
仿真组 I	34.1	1.19	30.7	5.59
仿真组 II	35.0	3.86	26.1	10.07

轮驱动拖拉机,且 APISO 牵引性能预测优化方法下,整机的滑转率和滑转效率等参数的测量精度也均优于仿真组 II。

图 20 为二轮驱动拖拉机滚动阻力对照结果,试验结果的特征指标值对比见表 6 所示。仿真组 I 与试验组在未施加牵引负载与特征滑转率对应的滚动阻力误差分别为 2.12% 与 0.86%。仿真组 II 与试验组在未施加牵引负载与特征滑转率对应的滚动阻力误差分别为 7.16% 与 6.69%。

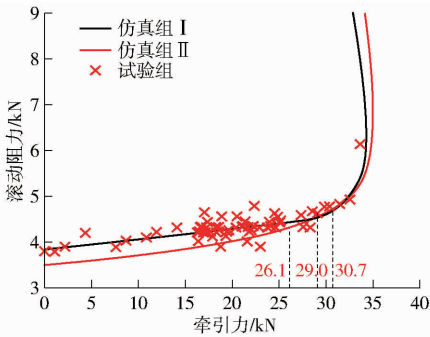


图 20 二轮驱动拖拉机滚动阻力试验结果

Fig. 20 Rolling resistance test result of two-wheel drive tractor

表 6 二轮驱动拖拉机滚动阻力对比

Tab.6 Rolling resistance of two-wheel drive tractor

组别	未施加牵引负载		基于特征滑转率	
	滚动阻力/kN	误差/%	滚动阻力/kN	误差/%
试验组	3.77		4.63	
仿真组 I	3.85	2.12	4.67	0.86
仿真组 II	3.50	7.16	4.32	6.69

采用平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 进一步评价模型的有效精度,计算结果如表 7 所示。由表 7 可知,对于四轮驱动拖拉机,采用本研究提出

的基于 APISO 算法优化的拖拉机田间牵引性能通用性预测模型的整机滑转率平均绝对误差为 1.9%,滚动阻力平均绝对误差为 0.18 kN。仿真组 II 滑转率平均绝对误差为 3.1%,滚动阻力平均绝对误差为 0.27 kN。由此可见,本研究提出的基于 APISO 算法优化的拖拉机牵引性能通用性预测方法与实测值偏差较小,模型准确度较高。

表 7 平均绝对误差计算结果

Tab.7 MAE calculation

组别	四轮驱动		二轮驱动	
	滑转率平	滚动阻力	滑转率平	滚动阻力
	均绝对误	平均绝对	均绝对误	平均绝对
仿真组 I	1.9	0.18	2.7	0.25
仿真组 II	3.1	0.27	4.6	0.46

5 结论

(1) 通过深入分析土壤力学、轮胎力学、传动系统等多个物理场的相互作用,将拖拉机牵引性能抽象为轮-壤模型、驱动力模型、滑转率模型、牵引力模型 4 个基本模型,建立了适用于四轮驱动与二轮驱动拖拉机的整机牵引性能预测通用模型。

(2) 为了提高预测精度,以整机滑转率为优化目标,提出了基于 APISO 算法的牵引性能预测优化方法,并分别对所选四轮驱动与二轮驱动拖拉机进行线上优化仿真。仿真结果准确,能有效对二轮、四轮驱动轮式拖拉机牵引性能进行预测。验证了模型的准确性和通用性。

(3) 为了进一步验证提出模型的优越性和工程实用性,以东方红某 105 kW 拖拉机作为试验样机,在中国一拖集团有限公司田间全地型试验场,完成线下试验。试验结果表明,与现有四轮驱动拖拉机预测模型相比,基于 APISO 的预测模型滑转率和滚动阻力平均绝对误差分别为 1.9% 和 0.18 kN。在二轮驱动拖拉机的预测中,相应平均绝对误差分别为 2.7% 和 0.25 kN,精度大幅提高。

参 考 文 献

- [1] 赵云. 拖拉机牵引性能试验分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 1996, 14(1): 1-7.
- [2] 陶倩文, 闫祥海, 仝一锟, 等. 拖拉机室内台架试验技术现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 121-128. TAO Qianwen, YAN Xianghai, TONG Yikun, et al. Current status and prospect of tractor indoor bench test technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 121-128. (in Chinese)
- [3] TIWARI V K, PANDEY K P, PRANAV P K. A review on traction prediction equations[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(3): 191-199.
- [4] 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)
- [5] FRANK M. Z. Predicting tractor field performance[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(2): 249-255.

- [6] GRISSO R, PERUMPRAL J, ZOZ F. An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils[J]. *Journal of Terramechanics*, 2006, 43(2): 225–236.
- [7] BESSELINK B C. Tractive efficiency of four-wheel-drive vehicles; an analysis for non-uniform traction conditions[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217(5): 363–374.
- [8] AL-HAMED S A, AL-JANOBI A A. A program for predicting tractor performance in Visual C++[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(2): 137–149.
- [9] 张文春, 方在华. 理论牵引特性曲线数学模型及计算机作图程序[J]. *拖拉机*, 1987(5): 23–28.
- [10] 曹冲, 王继磊. 拖拉机牵引性能仿真[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(1): 81–85.
CAO Chong, WANG Jilei. Simulation of tractor's traction performance[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2013, 44(1): 81–85. (in Chinese)
- [11] 赵静慧, 刘孟楠, 徐立友, 等. 四轮驱动拖拉机牵引性能预测模型建立与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 439–447.
ZHAO Jinghui, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Prediction model and experiment on tractive performance of four-wheel drive tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 439–447. (in Chinese)
- [12] NAKASHIMA H, OIDA A. Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE–DE method[J]. *Journal of Terramechanics*, 2004, 41(2): 127–137.
- [13] WONG J Y, ZHAO Z, LI J, et al. Optimization of the tractive performance of four-wheel-drive tractors-correlation between analytical predictions and experimental data[J]. *SAE Transactions*, 2000, 109: 252–260.
- [14] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 1–17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Current situation and prospect of key technology development of agricultural tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 1–17. (in Chinese)
- [15] LI X, XU L, LIU M, et al. Research on torque cooperative control of distributed drive system for fuel cell electric tractor[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 219: 108811.
- [16] AL-HAMED S A, GRISSO R D, ZOZ F M, et al. Tractor performance spreadsheet for radial tires[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1994, 10(1): 45–62.
- [17] FERVERS C W. Improved FEM simulation model for tire-soil interaction[J]. *Journal of Terramechanics*, 2004, 41(2): 87–100.
- [18] WISMER R D, LUTH H J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles[J]. *Journal of Terramechanics*, 1973, 10(2): 49–61.
- [19] 周志立, 方在华, 张文春. 拖拉机理论牵引特性的计算机辅助分析[J]. *洛阳工学院学报*, 1993, 14(1): 1–6.
- [20] KUMAR A, PANDEY K P. Matching tyre size to weight, speed and power available for maximising pulling ability of agricultural tractors[J]. *Journal of Terramechanics*, 2001, 38(2): 89–97.
- [21] 曹六建. 轮式拖拉机理论牵引特性计算与验证[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2022, 49(2): 26–28.
CAO Liujian. Calculation and verification of theoretical traction characteristics of wheeled tractors[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2022, 49(2): 26–28. (in Chinese)
- [22] 李贤哲, 张明柱, 刘孟楠, 等. 基于多岛遗传算法的电动拖拉机分布式驱动系统优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 401–411.
LI Xianzhe, ZHANG Mingzhu, LIU Mengnan, et al. Optimized design and validation of distributed drive system for electric tractor based on multi-island genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 401–411. (in Chinese)
- [23] ZHAN Z, ZHANG J, LI Y, et al. Adaptive particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2009, 39(6): 1362–1381.