

基于改进粒子群优化神经网络的拖拉机排放方法研究

郑伯文^{1,2} 邓芝超^{1,3} 罗振豪^{1,3} 宋正河^{1,3} 毛恩荣^{1,3} 杨子涵^{1,4}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;

3. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;

4. 洛阳智能农业装备研究院有限公司, 洛阳 471000)

摘要: 针对农用拖拉机排放污染严重的问题,特别是限制氮氧化物(NO_x)和碳烟(Soot)的排放,以中国一拖集团某型号农用柴油机为研究对象,采用系统建模仿真、台架试验验证和仿真分析结合的方法对发动机排放优化进行了研究。首先构建了农用拖拉机燃烧室三维模型并导入 CONVERGE 进行燃烧排放模拟与仿真,通过对模型缸内压力、热释放率试验值与仿真值的对比,证明该模型具有较高精确度,能够较好地描述发动机内部燃烧排放过程。之后以燃烧室的缩口率、凸台深度、燃烧室深度为输入,以发动机 NO_x 和 Soot 排放量为输出建立人工神经网络作为代理模型。计算决定系数 R^2 和平均相对误差(MRE)来验证人工神经网络的精确度。然后在此基础上提出一种改进的粒子群优化算法,从而获得燃烧室缩口率、凸台深度、燃烧室深度的最佳参数组合,形成新的燃烧室结构并导入 CONVERGE 软件中进行排放模拟计算并与原燃烧室的排放量进行对比。结果表明采用新的燃烧室结构后能够降低发动机 NO_x 和 Soot 排放,可为相关农用拖拉机燃烧室系统设计和开发提供参考和思路。

关键词: 农用拖拉机; 排放优化; 人工神经网络; 改进粒子群算法

中图分类号: S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0417-10

Emission Method of Tractor Based on Improved Particle Swarm Optimization Neural Network

ZHENG Bowen^{1,2} DENG Zhichao^{1,3} LUO Zhenhao^{1,3} SONG Zhenghe^{1,3} MAO Enrong^{1,3} YANG Zihan^{1,4}

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

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Luoyang Intelligent Agricultural Equipment Research Institute, Luoyang 471000, China)

Abstract: Aiming at the serious problem of emission pollution of agricultural tractors, especially limiting the emission of NO_x and Soot, taking a certain model of agricultural diesel engine of YITO as the research object, relevant research on engine emission optimization was carried out by using a combination of system modeling and simulation, bench test verification and simulation analysis. Firstly, a three-dimensional model of the combustion chamber of the agricultural tractor was constructed and imported into CONVERGE for combustion emission simulation and emulation, and through the comparison of the test values of the model cylinder pressure and heat release rate with the simulation values, it was proved that the model could describe the internal combustion and emission process of the engine better and had a high degree of accuracy. After that, an artificial neural network was established as an agent model with the shrinkage rate, camber depth, and combustion chamber depth as inputs, and NO_x and Soot emitted from the engine as outputs. The goodness of fit R^2 and the mean relative error (MRE) were calculated to verify the accuracy of the artificial neural network. Then an improved particle swarm optimization algorithm was proposed on this basis to obtain the optimal parameter combinations of the combustion chamber shrinkage rate, camber depth, and combustion chamber depth to form combustion chamber structure and imported

收稿日期: 2023-06-20 修回日期: 2023-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700301)

作者简介: 郑伯文(1994—),男,博士生,主要从事农机装备新能源技术研究,E-mail: bowen7329@foxmail.com

通信作者: 宋正河(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备设计与试验研究,E-mail: songzhenghe@cau.edu.cn

into CONVERGE software to perform emission simulation calculations and compare the emissions with the original combustion chamber. It was found that the combustion chamber structure can reduce the engine NO_x and Soot emissions, which provided reference and ideas for the design and development of the combustion chamber system of the related agricultural tractors.

Key words: agricultural tractors; emission optimization; artificial neural network; improved particle swarm algorithm

0 引言

拖拉机作为农业装备的核心,其技术发展水平体现着国家农业机械化程度和农业现代化发展水平^[1]。随着中国农业机械化作业程度的不断提升,农业机械的整体保有量持续增加^[2]。现有拖拉机所采用的动力源以柴油机为主。与汽油机相比,柴油机排放的柴油烟灰(Soot)和氮氧化物(NO_x)明显增加,对人体健康和生态环境造成严重危害^[3]。为解决柴油机排放问题,环保部规定非道路移动机械开始正式实施“国四”排放标准。面对日益严格的排放法规和紧迫的能源环境形势,降低柴油机污染物排放对于我国经济社会稳定发展和环境保护具有重要意义^[1,4]。

目前,降低柴油机污染物的方法^[5]主要包括油品技术(提高燃油和润滑油品质^[6]和替代燃料等^[7-8])、机内净化技术(本体优化设计^[9]、增压^[10]和增压中冷^[11]、燃油喷射优化^[12]和废气再循环^[13]等)和机外排气后处理技术(柴油机氧化催化转化技术^[14]、柴油机颗粒捕集技术^[15-16]和选择性催化还原技术^[17]等)。作为形成油雾和进行燃烧的主要容器,燃烧室对混合气形成和燃烧起到关键作用。通过对燃烧室系统进行本体优化设计,可增强缸内涡流与湍流之间的相互作用,促进油气混合气形成并在缸内均匀分布,从而提高发动机整体燃烧效率,并有效降低有害排放物质的产生^[18-19]。目前,国内外已展开大量的燃烧室结构优化相关研究。传统研究方法主要为通过经验公式^[20]、数值仿真^[21-23]和整机试验^[24]等途径对燃烧室形状进行设计和优化。然而,传统研究方法存在工作周期长、成本高、对试验模型的精度要求高等诸多限制。

近年来,机器学习等热门计算机技术迅速发展,在燃烧室排放快速预测及优化研究领域展现出卓越的性能^[25]。ROY等^[26]利用神经网络成功地预测了可变EGR策略高压共轨柴油机燃油消耗量、有效热效率、 CO_2 排放、 NO_x 排放以及PM排放等参数,为其优化提供了重要参考。CHEN等^[27]使用CFD软件并结合优化算法对燃烧室结构进行多目标优化,优化后,Soot排放量显著减小;DONATEO等^[28]采用遗

传算法对燃烧室形状、压缩比、偏心距及尺寸等多维参数进行了优化计算。优化后, NO_x 排放降低20%;陈天锴^[29]运用GBDT智能算法构建了柴油机燃油消耗率(BSFC)、 NO_x 排放和CO排放的预测模型,并基于预测模型与NSGA-III遗传算法实现了柴油机三目标帕累托优化标定。优化后,总体油耗下降1.67%, NO_x 排放减少27.01%,CO排放降低19.15%;石晋宏^[30]运用机器学习方法,建立了F-T煤制油柴油机在不同工况下喷油参数与排放物之间关系的机器学习数值模型。并对喷油参数进行优化分析,确定了其排放性能最优的喷油参数组合,成功降低Soot和 NO_x 排放量。综上所述,机器学习预测模型准确度和精度高、时间与经济成本低,并且易于与遗传算法等优化方法相结合,为拖拉机柴油机排放优化提供了技术支持^[31-32]。但由于柴油机控制参数之间存在耦合影响,优化算法往往难以求解出最优参数。在多目标优化中,容易陷入局部最优解且不易收敛。

基于此,本文拟使用一台某型号农用拖拉机的柴油机作为研究对象,建立其燃烧室模型并进行仿真模拟计算,并在此基础上利用人工神经网络作为代理模型,以燃烧室的缩口率、凸台深度和燃烧室深度作为输入参数,以 NO_x 和Soot排放量作为输出参数进行优化设计,通过改进后的粒子群优化算法将局部寻优逐步切换到全局寻优,获得燃烧室结构最佳输入参数匹配,以降低发动机 NO_x 和Soot排放。

1 农用拖拉机燃烧室总体设计

1.1 燃烧室设计参数

燃烧室是产生可燃混合气的场所,同时也是燃料所具有的化学能转化为机械能的场所。因此它的核心任务是使燃烧室内的空气及时与相配合的喷雾燃料混合,以利于混合气的形成和燃烧过程的进行。根据混合气形成方式以及燃烧室内部结构特点,柴油机燃烧室基本上分为两大类,即直喷式燃烧室和分隔式燃烧室。总的来说,直喷式燃烧室在经济性和起动性方面有显著优点。缸径在100 mm以上、转速为2 000~3 000 r/min的农机柴油机,基本采用

直喷式。作为拖拉机动力,一般情况下这两种燃烧室均可采用。由于燃烧室各自的特点,其较优型式取决于发动机的缸径、转速、用途、要求等多方面因素,结合实际情况和试验条件,本研究以中国一拖集团提供的某型号农用拖拉机柴油机燃烧室为研究对象,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要技术参数

Tab.1 Engine main technical parameters

参数	数值/型式
缸径/mm	105
行程/mm	125
总排量/L	4.33
额定功率/kW	73.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 200
最大扭矩/(N·m)	400
最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)	1 400 ~ 1 600
压缩比	17.5
燃烧室形状	ω 型

对发动机燃烧室的几何形状特征进行定义,如图 1 所示, h 为凸台深度。

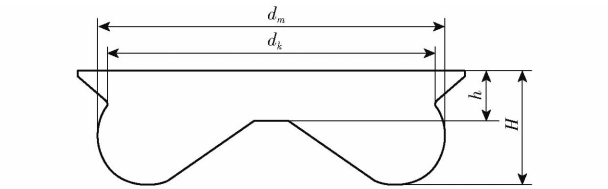


图 1 燃烧室结构简图

Fig.1 Structure schematic of combustion chamber

引入参数缩口率 δ 和径深比 γ , 计算公式分别为

$$\delta = \frac{d_m - d_k}{d_m} \times 100\% \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{d_m}{H} \tag{2}$$

式中 d_m ——燃烧室最大直径,mm
 d_k ——燃烧室缩口直径,mm
 H ——燃烧室深度,mm

1.2 燃烧室几何三维模型建立

针对该型号农用拖拉机燃烧室系统进行三维建模,根据中国一拖集团提供的发动机参数,绘制三维模型并导入 CONVERGE 软件中。选取标定功率工况,流动介质为空气。计算采用的发动机模型包括进排气管、进排气门、气缸和燃烧室缸内几何模型,如图 2 所示。左图为燃烧室系统的三维模型,右图为燃烧室系统三维模型网格划分图。

2 燃烧室仿真模型建立与验证

柴油机燃烧和排放问题一般采用数值模拟仿真

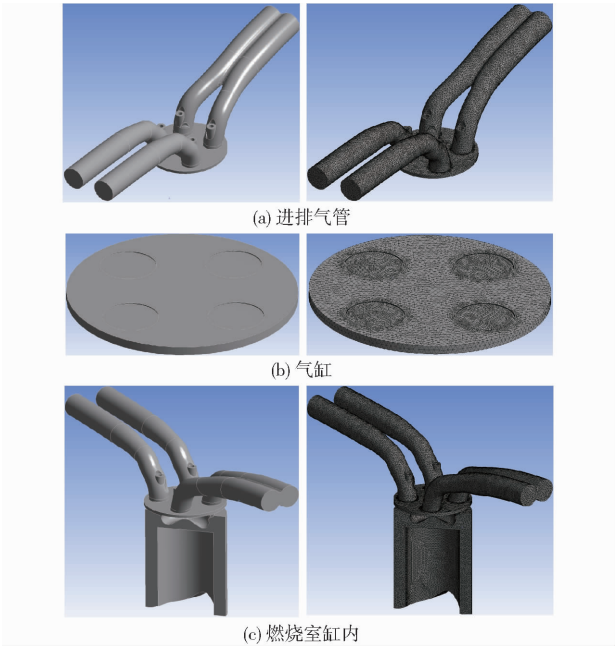


图 2 发动机燃烧室系统几何模型

Fig.2 Geometric modeling of engine combustion chamber systems

和台架实体试验两种方法。随着计算机技术的不断进步,国内外研究者可以通过数值模拟仿真技术观察和分析发动机内部的瞬态特性从而对整个燃烧与排放过程有一个更深层次的研究和理解,为试验研究提供优化方向。本研究采用 CONVERGE 软件进行相关数值模拟仿真分析。

2.1 数学模型

虽然柴油机缸内的流体流动过程变化复杂,但仍然遵循基本的流体动力学控制方程。采用经典流体力学中所遵循的质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律三大定律作为数学模型基础,为发动机气缸内的气体流动提供理论和计算基础。

质量守恒方程反映了流体运动与质量的关系,遵循质量守恒定律。质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式中 ρ ——密度,kg/m³
 t ——时间,s
 $u_x、u_y、u_z$ ——速度 u 在 $x、y、z$ 方向上的分量, m/s

动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_x u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_y u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_z u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \tag{4}$$

其中 $\operatorname{div}(\rho u)=\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}$

式中 p ——缸内流体的表面作用力, N

$\tau_{xx}、\tau_{xy}、\tau_{xz}$ ——黏性应力在 $x、y、z$ 方向上的分量, Pa

$F_x、F_y、F_z$ ——作用于微元体 $x、y、z$ 方向上的体积力, N

div ——散度

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_y T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_z T)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{h'}{C_p} \frac{\partial y}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{h'}{C_p} \frac{\partial y}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{h'}{C_p} \frac{\partial y}{\partial z}\right]+S_T \quad(5)$$

式中 C_p ——定压比热容, J/(kg·K)

S_T ——黏性消耗值, 表示在流体流动过程中受到的黏性摩擦力使得流体内的机械能被迫转化成的内能

T ——温度, K

h' ——流体传热系数, 一般为定值

一般情况下由于发动机缸内流体运动条件复杂多变, 高速且气体不可压缩, 因此采用实际气体状态方程来描述相关变化。

实际气体状态方程为

$$p_i=\frac{RT}{v-b}-\frac{a}{v^2-ubv+wb^2} \quad(6)$$

式中 p_i ——压力, Pa

v ——比体积

R ——气体常数, 取 8.314

$a、b、u、w$ ——实际气体状态方程相关系数

2.2 湍流与喷雾模型

湍流是一种不规则、多尺度但又有一定结构的流动形式, 一般具有很强的扩散性、耗散性和非定向性。采用非稳态连续方程和 Navier-Stokes (NS) 方程来描述湍流的瞬时运动。本研究选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行湍流模型建模, 因为它具有良好的稳定性和收敛性, 能够较好地反映流场内旋转、冲击、分层等效果。在 RNG $k-\varepsilon$ 方程中, 湍动能运输方程表示为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_j}=\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)-\rho \varepsilon+S \quad(j=1,2,3) \quad(7)$$

湍流动能方程为

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial(\sqrt{g} \rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \bar{u}_j k-\frac{\mu_{\text {eff }}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=\mu_t(P+P_B)-\rho \varepsilon-\frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\rho k\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad(8)$$

湍流耗散率方程为

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial(\sqrt{g} \rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \bar{u}_j k-\frac{\mu_{\text {eff }}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_t P-\frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\rho k\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right]+c_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B-c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}+c_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i}-\frac{\rho \varepsilon^2}{k} \frac{c_{\mu} \eta^3\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta \eta^3} \quad(9)$$

式中 k ——湍流动能, J

$\sqrt{g}$ ——距离张量行列式

x_j ——坐标 ($j=1,2,3$)

u_j ——速度在 $x、y、z$ 坐标上的分量, m/s

$\mu_{\text {eff }}$ ——亚网格黏力系数

ε ——耗散率 S ——源项

μ_t ——湍流黏度系数

$P、P_B$ ——湍流动能项, J

η ——平均流与湍流时间尺度比率

u_i ——坐标轴 x_i 方向上的速度分量, m/s

$c_{\varepsilon 1}、c_{\varepsilon 2}、c_{\varepsilon 3}、c_{\varepsilon 4}、\sigma_k、c_{\mu}、\eta_0、\beta$ ——经验常数

燃料在缸内的雾化和喷射过程是一种极其复杂的动力学过程, 它包括断裂、碰撞、凝聚、撞壁等复杂的物理变化过程^[33], 参考文献[33-34], 选用表 2 所示的各喷雾子模型开展相关研究。

表 2 喷雾子模型
Tab.2 Spray sub-model

子模型名称	选用模型	子模型名称	选用模型
破碎模型	KH-RT	蒸发模型	Frossling
碰撞模型	NTC	撞壁模型	Wallfilm

2.3 燃烧与排放模型

在整个燃烧过程中涉及了多种化学反应过程, 伴随着多种中间产物生成并且再次参与反应。因此需要合适的反应机理来描述这些过程, 并导入到燃烧模型。本研究选用 SAGE 模型, 并将化学反应机理导入模型中, 多步化学反应机理为

$$\sum_{m=1}^M v'_{m,r} x_m \leftrightarrow \sum_{m=1}^M v''_{m,r} x_m \quad(r=1,2,\cdots,R) \quad(10)$$

式中 $v'_{m,r}$ ——物质 m 和反应 r 反应物的化学计量系数

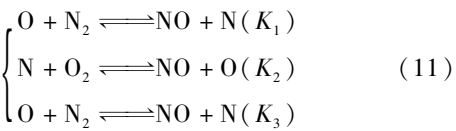
$v''_{m,r}$ ——物质 m 和反应 r 生成物的化学计量系数

R ——反应总个数

x_m ——物质 m 的化学符号

由于 CONVERGE 中针对 NO_x 和 Soot 配置了相对应的排放模型, 其余的 CO、HC 等排放物是通过

反应机理后计算得出,因此本研究对 NO_x 与碳烟 Soot 模型进行研究。选用 Zeldovich 模型对缸内生成 NO_x反应进行描述,其主要反应为



式中 K_1 、 K_2 、 K_3 ——化学反应速率常数
碳烟净生成量主要由生成量和被氧化量决定,其计算公式为

$$S_{\varphi 2}=S_n+S_g+S_{\text{O}_2} \quad (12)$$

式中 $S_{\varphi 2}$ ——Soot 净生成量
 S_n ——晶体核生成 Soot 量
 S_g ——Soot 表面生成源量
 S_{O_2} ——被氧化 Soot 量

2.4 模型验证

对原发动机缸内燃烧进行模拟,对比燃烧室系统内的压力曲线和放热率,验证数值模型的准确性。设置发动机的初始边界条件如表 3 所示。

表 3 模型计算的初始边界条件

Tab.3 Initial boundary conditions for model calculations

条件	区域	温度/K	压力/MPa
初始条件	进气道	309	1.83
	排气道	800	1.21
	燃烧室	533	1.56
边界条件	进气口	309	1.83
	排气口	800	1.20
	燃烧室壁面	433	
	气缸盖底面	525	
	活塞顶部	533	

拖拉机发动机排放试验台架主要由测功机、气体测量计、油耗仪、排气分析仪、不透明烟度计等设备组成,如图 3 所示。试验地点位于洛阳西苑车辆与动力检验所有限公司。



图 3 农用拖拉机排放优化试验

Fig.3 Emission optimization experiment for agricultural tractors

选取转速为 2 000 r/min、负载 100% 的田间作业工况下对比发动机缸内压力与放热率的仿真值和试验值,如图 4 所示。由图 4 可知,试验与仿真的缸

内压力与放热率随时间变化的曲线相近,缸内压力峰值和放热率峰值误差均在 10% 以内,曲轴转角误差不超过 5°CA。试验结果与仿真结果基本吻合,因此所建立的模型能够较为准确地描述该发动机内的燃烧排放过程。

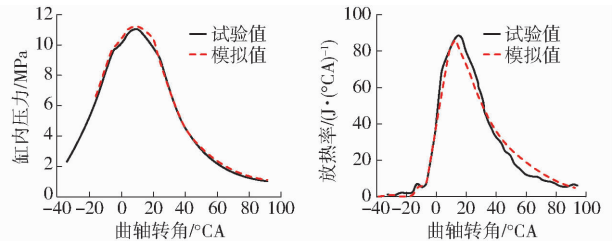


图 4 模拟和试验工况的缸内压力和放热率对比

Fig.4 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate for simulated and experimental conditions

同时在 CONVERGE 中建立 1/8 燃烧室模型,在保证准确性的前提下提高计算效率。按原机参数设置边界,利用 2.1 节的相关数值模型设置,在 1/8 燃烧室模型中进行网格适应性验证,如图 5 所示。

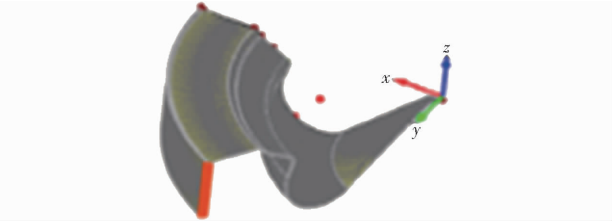


图 5 燃烧室 1/8 网格模型

Fig.5 Combustion chamber 1/8 mesh model

在网格适应性验证中,为了保证在低计算量的基础上提高仿真分析的精度,设置了多组网格加密策略组合进行对比并选择最优组合。设定 1/8 燃烧室固定加密 3 层,自适应加密设置为 3 层和 4 层,得到 9 组加密组合,计算并记录其时间,如表 4 所示。结合计算时间因素的考虑,选择基础网格尺寸为 5 mm,自适应加密层数 3 层的组合 8 网络划分加密方案。

表 4 网格划分与计算时间

Tab.4 Grid division and calculation time

组合序号	基础网格尺寸/mm	自适应加密层数	最小网格尺寸/mm	计算时间/h
1	1	3	0.125 0	>24
2	2	4	0.125 0	4.166 7
3	2	3	0.250 0	3.966 7
4	3	3	0.375 0	0.883 3
5	3	4	0.187 5	0.916 7
6	4	3	0.500 0	0.416 7
7	4	4	0.250 0	0.666 7
8	5	3	0.625 0	0.300 0
9	6	3	0.750 0	0.266 7

3 基于改进粒子群算法的燃烧室模型优化

3.1 燃烧室人工神经网络模型构建及验证

使用 CONVERGE 随机生成并采集缩口率、凸台深度、燃烧室深度 3 个输入量的样本点,采集 300 组随机数据用于建立人工神经网络模型。大约 75% 的数据用于训练模型,25% 的数据用于测试模型。以燃烧室的缩口率、凸台深度、燃烧室深度为输入,以发动机排放出的氮氧化物(NO_x)和碳烟(Soot)排放量为输出建立人工神经网络模型,模型结构如图 6 所示。

采用决定系数 R^2 、平均相对误差(MRE)两项指标对建立的燃烧室系统人工神经网络模型进行精度验证。通过计算建立的 NO_x 和 Soot 模型的 R^2 、MRE 如图 7 所示。结果表明,所有输出参数的拟合优度

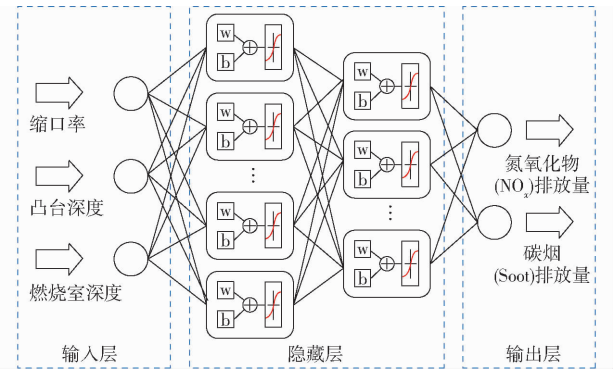


图 6 燃烧室人工神经网络模型构成

Fig. 6 Combustion chamber artificial neural network model composition

系数都接近于 1,表明所建立的人工神经网络模型具有很高的精度。

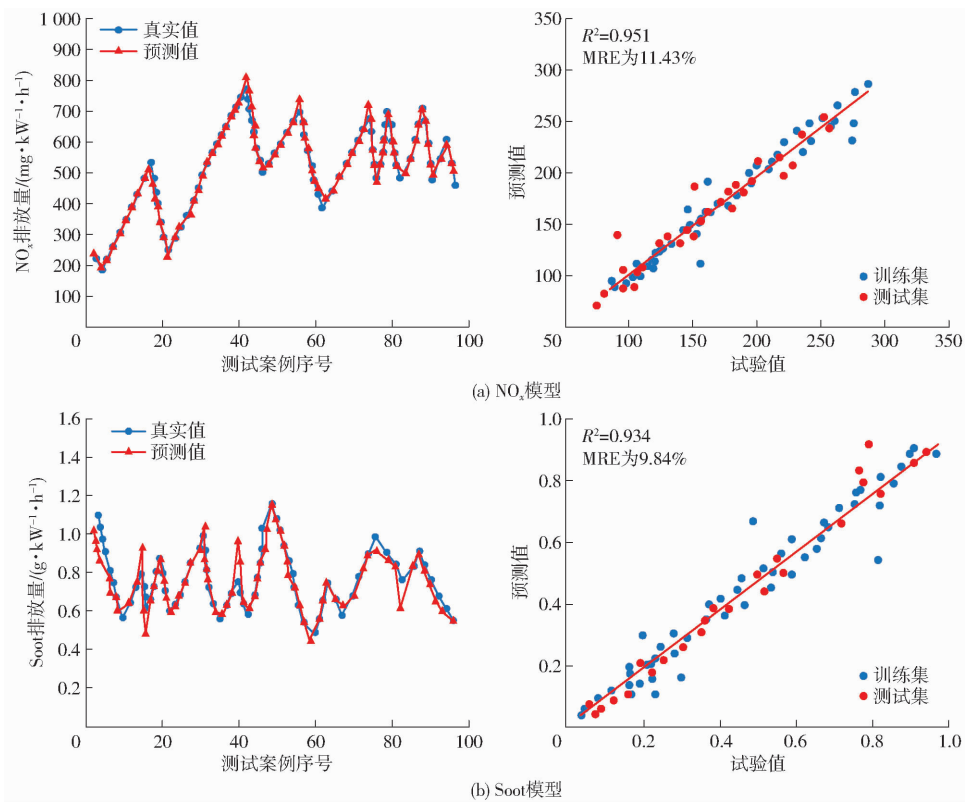


图 7 排放人工神经网络模型真实值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of true and experimental values of emission artificial neural network models

3.2 粒子群算法基本原理

粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 是一种全局寻优算法,最早由 KENNEDY 提出^[35]。通过改变和更新粒子的速度和位置,通过迭代次数的增加,使得粒子达到整个全局最优位置。

设粒子群在一个 n 维空间中搜索,粒子 j 在空间中的位置为 $p_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$,表示问题的一个解, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{in})$ 表示粒子的速度,则 PSO 算法公式为

$$\begin{cases} v_i^{(j+1)} = wv_i + c_1r_1(p_{\text{best}i}^{(j)} - p_i^{(j)}) + c_2r_2(g_{\text{best}i}^{(j)} - g_i^{(j)}) \\ p_i^{(j+1)} = p_i^{(j)} + v_i^{(j+1)} \end{cases} \quad (13)$$

式中 w ——惯性因子,其值为非负,代表该粒子上一次的速度对当前粒子的影响程度,根据经验, w 一般取 0.9

c_1 、 c_2 ——学习因子,通常取 $c_1 = c_2 = 2$

r_1 、 r_2 ——随机数值,取值范围在 0 ~ 1 之间

3.3 改进粒子群算法应用

为了提高粒子群的收敛速度,降低算法耗时

间,同时能够更好地应用于建立的人工神经网络模型,本文对粒子群算法进行改进。首先选择目标函数为

$$\min f(a,b,c)=\delta_1P_{NO_x}+\delta_2P_{Soot}$$

(14)

式中 $a、b、c$ ——缩口率、凸台深度、燃烧室深度
 $P_{NO_x}、P_{Soot}$ —— NO_x 排放量和 Soot 排放量
 $\delta_1、\delta_2$ ——相应的常量系数

本研究提出一种改进 PSO 算法,在优化过程中借助算舌线函数^[36]不断调整惯性因子,使其迭代初期惯性因子取较大值且改变速率慢,在后期惯性因子取较小值且改变速率快,从而利于 PSO 从局部寻优逐步切换到全局寻优。算舌线函数为

$$y=\frac{8a^3}{x^2+4a^2}$$

(15)

对式(15)求解二阶导数,得到

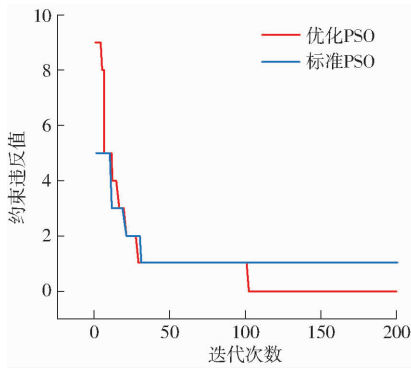
$$y''=\frac{-16a^3(4a^2-3x^2)}{(4a^2+x^2)^3}$$

(16)

由式(16)可得出算舌线函数的拐点坐标为 $(\pm\frac{2\sqrt{3}}{3}a,\frac{3}{2}a)$ 。在点 $(0,2a)$ 时,函数值较大且曲线变化率最小,而在拐点处函数值较小且曲线变化率最大,基于此特性设计惯性因子的调整策略为

$$w(i)=w_{min}+(w_{max}-w_{min})\left(\frac{2}{a}\frac{\eta_i}{\eta_{max}}\frac{2\sqrt{3}}{3}a+4a^2\right)=w_{min}+(w_{max}-w_{min})\left(\frac{12}{h^2(i)+3}-3\right)$$

(17)



式中 $w_{min}、w_{max}$ ——惯性因子的最大值和最小值
 η_i ——当前迭代次数
 η_{max} ——最大迭代次数
最后迭代计算 200 组数据后得到燃烧室优化模型参数(表 5)。

表 5 燃烧室参数优化前后对比

Tab.5 Comparison of combustion chamber parameters before and after optimization

燃烧室参数	原值	ANN + PSO 优化值
缩口率	0.924	0.82
凸台深度/mm	7.9	8.1
燃烧室深度/mm	17.80	18.56

4 结果与分析

对比了标准 PSO 算法优化和改进后 PSO 算法优化的结果,如图 8 所示。改进后的 PSO 算法相较于一般 PSO 算法主要有两方面提升:一方面在寻优过程中能够使得粒子跳出局部最优达到全局最优,另外一方面在满足约束的前提下进一步降低了目标函数值。

在此基础上获得了缩口率、凸台深度、燃烧室深度的最佳参数组合。通过重新设计燃烧室导入 CONVERGE,运行燃烧排放过程。发动机的排放量如图 9 和表 6 所示, NO_x 减少约 $1.21\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, Soot 减少约 $0.06\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

燃烧室的缩口率对缸内压缩过程末期的气流运动有重要影响,同时也会增加活塞内部的热负荷。

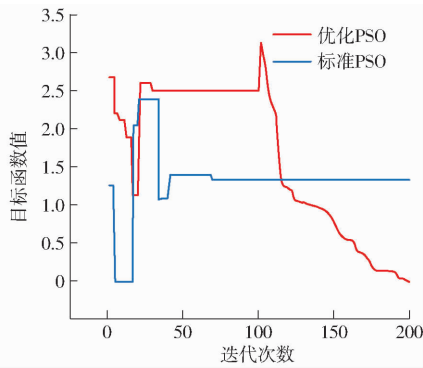


图 8 改进前后 PSO 算法对比

Fig. 8 Comparison of PSO algorithm before and after improvement

缩口直径 d_k 体现了燃烧室容积大小,进而会影响混合油气的形成和燃烧。随着缩口直径的增大,在燃烧过程中的油气混合和燃烧速率会提高,缸内的燃烧温度提高,因此缸内出现大量高温且氧气充足区域,这使得 NO_x 的生成量急剧增加。但随着温度的升高,会加速部分 Soot 氧化,从而降低 Soot 的生成。如果缩口直径过大会造成燃烧温度降低, NO_x 生成

量减少而 Soot 生成量增加。凸台深度 h 的变化影响了油气喷雾在缸内撞壁后的分流比例,从而对燃烧过程和燃烧温度产生影响,并最终影响排放物的生成。燃烧室深度 H 会影响缸内活塞高度,如果活塞高度过大会使得废气不容易从排气口排出,增加了燃烧室内的热负荷,并且会导致活塞的使用寿命降低等。由此可见燃烧室的缩口率、凸台深度、燃烧

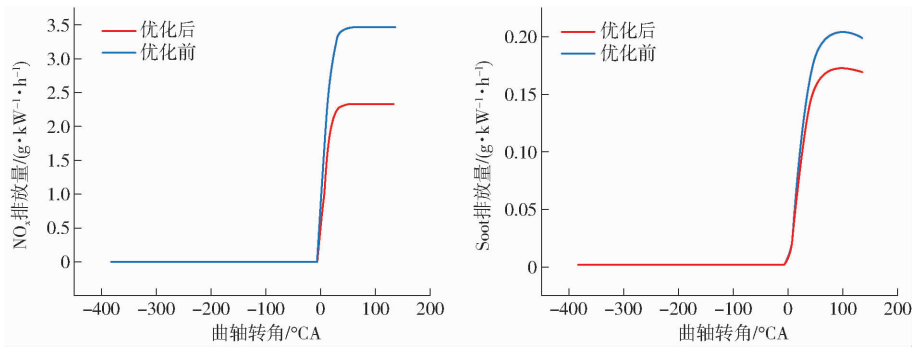


图 9 改进 PSO 算法优化前后发动机排放对比

Fig. 9 Comparison of engine emissions before and after optimization by improved PSO algorithm

表 6 燃烧室排放水平优化前后对比

排放参数	g/(kW·h)	
	NO _x 排放量	Soot 排放量
非道路国Ⅲ排放限值	4.00	0.20
非道路国Ⅳ排放限值	2.00	0.025
原发动机排放值	3.45	0.20
优化后发动机排放值	2.24	0.14

室深度对于燃烧室系统设计有重要影响,也是农用柴油机排放优化的重要考虑因素。改进后的燃烧室缩口率由 0.924 降低到 0.82,说明随着缩口直径变大,NO_x的排放水平提高而 Soot 的排放水平降低。这是由于缩口直径变大之后缸内油气混合和燃烧水平提升,整个燃烧过程中温度的升高促进 NO_x的生成效率同时抑制 Soot 的生成。凸台深度由 7.9 mm 升高到 8.1 mm,这一变化会影响到缸内温度,从而影响缸内 NO_x和 Soot 的生成速率。燃烧室深度由 17.8 mm 上升到 18.56 mm,随着燃烧室深度的增大,NO_x的排放水平降低,但 Soot 的变化规律与之相反。经过改进 PSO 算法优化得到的参数变化趋势与传统的试验验证结果相吻合。ANN + PSO 的方法相较于传统方法缩短了试验周期,节省了试验成本。

5 结论

- (1)构建了农用拖拉机燃烧室三维模型并导入 CONVERGE 中进行燃烧排放模拟与仿真,通过对模型缸内压力、热释放率试验值与仿真值的对比,证明该模型能够较好地描述发动机内部燃烧排放过程,具有较高精确度。
- (2)以燃烧室的缩口率、凸台深度、燃烧室深度为输入,以发动机排放出的氮氧化物(NO_x)和碳烟(Soot)排放量为输出建立人工神经网络模型,采用 R²、MRE 两项指标对建立的燃烧室系统人工神经网络模型进行精度验证。结果表明,所有输出参数的拟合优度系数均接近于 1,表明所建立的人工神经网络模型具有很高的精度。
- (3)针对常规的粒子群算法容易陷入局部最优的问题,对粒子群算法进行了改进,在优化过程中借助莫舌线函数不断调整惯性因子,从而利于 PSO 从局部寻优逐步切换到全局寻优。并通过 ANN + PSO 联合优化寻优找到最佳燃烧室尺寸,并且进行了燃烧室排放仿真分析。结果表明,经过优化后的燃烧室尺寸能够降低农用拖拉机的 NO_x和 Soot 排放,NO_x减少约 1.21 g/(kW·h),Soot 减少约 0.06 g/(kW·h)。

参 考 文 献

[1] 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. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1-17. (in Chinese)

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社,2021.

[3] 白海, 孟利清, 何超, 等. 非道路用柴油机实现国Ⅲ排放的技术路线研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(6):193-196.
BAI Hai, MENG Liqing, HE Chao, et al. Study on technical routes to achieve standards of emission stage Ⅲ for non-road diesel engine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2015,36(6):193-196. (in Chinese)

[4] 蔡凯. 柴油机燃用生物柴油的排放预测建模及多目标优化研究[D]. 成都:西华大学,2021.
CAI Kai. Research on emission prediction modeling and multi-objective optimization of diesel engine fueled with biodiese[D]. Chengdu:Xihua University, 2021. (in Chinese)

[5] 谭丕强,王德源,楼狄明,等. 农业机械污染排放控制技术的现状与展望[J]. 农业工程学报,2018,34(7):1-14.
TAN Piqiang, WANG Deyuan, LOU Diming, el at. Progress of control technologies on exhaust emissions for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(7):1-14. (in Chinese)

- [6] JELLES S J, MAKKEE M, MOULIJN J A. Ultra low dosage of platinum and cerium fuel additives in diesel particulate control [J]. *Topics in Catalysis*, 2001, 16 – 17(1/2/3/4) : 269 – 273.
- [7] E J, PHAM M, ZHAO D, et al. Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: a review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 620 – 647.
- [8] IMRAN S, EMBERSON D R, DIEZ A, et al. Natural gas fueled compression ignition engine performance and emissions maps with diesel and RME pilot fuels[J]. *Applied Energy*, 2014, 124(1) : 354 – 365.
- [9] 陈希颖,居钰生,张庆,等. 非道路移动机械用柴油机中国第三阶段排放标准关键技术研究[J]. *现代车用动力*,2015(3) :1 – 6.
CHEN Xiyong, JU Yusheng, ZHANG Qing, et al. Key technologies for non-road diesel engine to meet national stage 3 emissions regulation[J]. *Modern Vehicle Power*, 2015(3) : 1 – 6. (in Chinese)
- [10] 倪计民,刘越,石秀勇,等. 可变喷嘴涡轮增压及废气再循环系统改善柴油机排放性能[J]. *农业工程学报*,2016, 32(16) :82 – 88.
NI Jimin, LIU Yue, SHI Xiuyong, et al. Variable nozzle turbine combined with venturi exhaust gas recirculation system improving emission performance of diesel engines[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(16) :82 – 88(in Chinese)
- [11] 赵昌普,朱云尧,杨俊伟,等. 燃烧室形状对增压中冷柴油机燃烧和排放影响的数值模拟[J]. *内燃机学报*,2013, 31(4) :318 – 323.
ZHAO Changpu, ZHU Yunyao, YANG Junwei, et al. Effects of combustion chamber geometry on the combustion and emissions of turbocharged inter-cooling diesel engine[J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(4) : 318 – 323. (in Chinese)
- [12] 苏立旺,李向荣,李杰,等. 柴油机双卷流燃烧系统排放特性试验[J]. *农业工程学报*,2013,29(21) :60 – 65.
SU Liwang, LI Xiangrong, LI Jie, et al. Experiment of emissions characteristics for double swirl combustion system in diesel engine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(21) :60 – 65. (in Chinese)
- [13] 孙柏刚,谢均,张国英,等. 柴油机双卷流燃烧系统的排放特性[J]. *农业工程学报*,2013,29(9) :48 – 54.
SUN Baigang, XIE Jun, CHAI Guoying, et al. Emission characteristics of double swirl combustion system in diesel engine [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(9) : 48 – 54. (in Chinese)
- [14] KANG S B, KALAMARAS C, BALAKOTAIAH V, et al. Zoning and trapping effects on CO and hydrocarbon light-off in diesel oxidation catalysts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(46) : 13628 – 13633.
- [15] GALINDO J, SERRANO J R, PIQUERAS P, et al. Heat transfer modelling in honeycomb wall-flow diesel particulate filters [J]. *Energy*, 2012, 43(1) : 201 – 213.
- [16] CHEN T, WU Z, GONG J, et al. Numerical simulation of diesel particulate filter regeneration considering ash deposit[J]. *Flow Turbulence & Combustion*, 2016, 97(3) : 1 – 16.
- [17] LIAO Y, EGGENSCHWILER P D, RENTSCH D, et al. Characterization of the urea-water spray impingement in diesel selective catalytic reduction systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 964 – 975.
- [18] 耿永生. 汽车尾气污染及其控制技术[J]. *环境科学导刊*,2010,29(6) :62 – 69.
GENG Yongsheng. Tail gas pollution from the vehicles and its control technology [J]. *Environmental Science Survey*,2010, 29(6) :62 – 69. (in Chinese)
- [19] WANG G, YU W, LI X, et al. Experimental and numerical study on the influence of intake swirl on fuel spray and in-cylinder combustion characteristics on large bore diesel engine[J]. *Fuel*, 2019, 237(2) :209 – 221.
- [20] 雷基林,于跃,辛平凡,等. 柴油机燃烧室的系统设计方法研究与应用[J]. *农业工程学报*,2020,36(6) :36 – 46.
LEI Jilin, YU Yue, XIN Qianfan, et al. Investigation and application of systematic design method for combustion chamber of diesel engine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020,36(6) :36 – 46. (in Chinese)
- [21] RAKOPOULOS C D, KOSMADAKIS G M, PARIOTIS E G. Investigation of piston bowl geometry and speed effects in a motored HSDI diesel engine using a CFD against a quasi-dimensional model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(3) :470 – 484.
- [22] JAFARMADAR S, TAGHAVIFAR H, TAGHAVIFAR H, et al. Numerical assessment of flow dynamics for various DI diesel engine designs considering swirl number and uniformity index[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 110:347 – 355.
- [23] KHAN S, PANUA R, BOSE P K. Combined effects of piston bowl geometry and spray pattern on mixing, combustion and emissions of a diesel engine: a numerical approach[J]. *Fuel*, 2018, 225(8) :203 – 217.
- [24] 司鹏鹏,陈贵升,王鑫,等. 燃烧室和喷油器结构对重型柴油机性能与排放的影响[J]. *农业机械学报*,2013,44(11) : 12 – 18.
SI Pengkun, CHEN Guisheng, WANG Xin, et al. Effects of structure of combustion chamber and injector on heavy-duty diesel performance and emission characteristics[J] *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(11) : 12 – 18. (in Chinese)
- [25] 王志凯,陈盛,范玮. 神经网络宽度对燃烧室排放预测的影响[J]. *航空学报*,2023,44(5) :87 – 97.
WANG Zhikai, CHEN Sheng, FAN Wei. Effect of neural network width on combustor emission prediction [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023,44(5) :87 – 97. (in Chinese)
- [26] ROY S, BANERJEE R, BOSE P K. Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel

- engine coupled with EGR using artificial neural network[J]. *Applied Energy*, 2014, 119: 330 – 333.
- [27] CHEN Y, LV L. The multi-objective optimization of combustion chamber of DI diesel engine by NLPQL algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 1332 – 1339.
- [28] DONATEO T, TORNESE F, LAFORGIA D. Computer-aided conversion of an engine from diesel to methane[J]. *Applied Energy*, 2013, 108: 8 – 23.
- [29] 陈天楷. 高压共轨柴油机油耗与排放预测及优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
CHEN Tiankai. Prediction and optimization of fuel consumption and emission of high pressure common diesel engine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [30] 石晋宏. 基于 CMLIA 的 F-T 煤制油柴油机喷油参数优化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
SHI Jinhong. Optimization of fuel injection parameters on a diesel engine fueled with Fischer-Tropsch coal-to-liquid based on CMLIA[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [31] NIU X, WANG H, HU S, et al. Multi-objective online optimization of a marine diesel engine using NSGA-II coupled with enhancing trained support vector machine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 218 – 227.
- [32] FU J, YANG R, LI X, et al. Application of artificial neural network to forecast engine performance and emissions of a spark ignition engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117749.
- [33] JB H. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1998.
- [34] BHOWMIK S, PAUL A, PANUA R, et al. Performance-exhaust emission prediction of diesolenol fueled diesel engine; an ANN coupled MORSM based optimization[J]. *Energy*, 2018, 153(7): 212 – 222.
- [35] VAN DEN B. An analysis of particle swarm optimizers[D]. University of Pretoria, 2006.
- [36] 冯建鑫, 王雅雷, 王强, 等. 基于改进粒子群算法的快速反射镜自抗扰控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(12): 3675 – 3682.
FENG Jianxin, WANG Yalei, WANG Qiang, et al. Fast reflector self-anti-disturbance control based on improved particle swarm algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2021, 43(12): 3675 – 3682. (in Chinese)
-

(上接第 408 页)

- [24] 黄程程. 基于自适应卡尔曼滤波的汽车质心侧偏角估算研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
HUANG Chengcheng. Research on vehicle sideslip angle estimation based on adaptive Kalman filter[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [25] BOERNER M, ISERMANN R. Adaptive one track model for critical lateral driving situations[C] // Proc. 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control 2002, 2002: 393 – 400.
- [26] CHEROUAT H, BRACI M, DIOP S. Vehicle velocity, side slip angles and yaw rate estimation[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2005. IEEE. 2005: 349 – 354.
- [27] 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 基于改进 RBF 网的汽车侧偏角估计方法实验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(22): 105 – 110.
ZHANG Xiaolong, LI Liang, LI Hongzhi, et al. Experimental research on vehicle sideslip angle estimation based on improved RBF neural networks[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(22): 105 – 110. (in Chinese)
- [28] 刘万里, 彭冲, 韩家伟. 基于轮边驱动电动汽车轮胎力估计的路面附着系数估算[J]. *汽车实用技术*, 2018(10): 35 – 38, 41.
LIU Wanli, PENG Chong, HAN Jiawei. Estimate tire-road friction coefficient based on tire force estimation of the wheel drive electric vehicle[J]. *Automotive Practical Technology*, 2018(10): 35 – 38, 41. (in Chinese)
- [29] 李刚, 赵德阳, 解瑞春, 等. 基于改进的 Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波的车辆状态估计[J]. *汽车工程*, 2015, 37(12): 1426 – 1432.
LI Gang, ZHAO Deyang, XIE Ruichun, et al. Vehicle state estimation based on improved Sage-Husa adaptive extended Kalman filtering[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(12): 1426 – 1432. (in Chinese)
- [30] 冯振, 郭延宁, 吕跃勇. *Opencv 4 快速入门*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
- [31] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35 – 45.