

基于 I-PSO 算法和 Simulink 的湿式离合器优化设计 *

钱煜, 程准, 陈兵兵, 鲁植雄[†]

(南京农业大学 工学院, 南京 210031)

摘要: 为提高湿式离合器的轻便性和可靠性, 提出了一种 I-PSO 算法与 Matlab/Simulink 相结合的湿式离合器优化设计新方法。对湿式离合器进行动力学分析, 基于 MATLAB/Simulink 搭建湿式离合器动力传递的仿真模型。引入模拟退火算法中对粒子进行扰动的思想对改进的粒子群算法进行再度改进, 并基于某测试函数验证了算法改进的效果; 选择离合器的滑磨功与体积为优化目标。最终联合改进粒子群算法与 MATLAB/Simulink 中建立的湿式离合器仿真模型对某具体型号湿式离合器进行多目标优化设计。结果表明, 改进后的粒子群算法在寻优的速率和精度上具有一定的效果; 优化后的湿式离合器与原设计相比, 总目标函数缩小约 40.12%, 滑磨功减小了约 61.8%, 优化效果明显。

关键词: 模拟退火算法; 改进粒子群算法; MATLAB/Simulink; 湿式离合器; 优化设计

中图分类号: TP391.9 **doi:** 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.08.0595

Optimal design of wet clutch based on i-pso algorithm and simulink

Qian Yu, Cheng Zhun, Chen Bingbing, Lu Zhixiong[†]

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to improve the lightness and reliability of wet clutch, a new method of wet clutch optimization design based on I-PSO algorithm and MATLAB/Simulink is proposed. The dynamic analysis of wet clutch is carried out, and the simulation model of power transmission of wet clutch is built based on MATLAB / Simulink. The idea of perturbation of particles in simulated annealing algorithm is introduced to improve the improved particle swarm optimization algorithm again, and the effect of the improved algorithm is verified based on a test function. Sliding grinding power and volume of the clutch are selected as the optimization objective. Finally, combined with the improved particle swarm optimization algorithm and the wet clutch simulation model established in MATLAB/Simulink, the multi-objective optimization design of a specific type of wet clutch is carried out. The results show that the improved particle swarm optimization algorithm has a certain effect on the speed and accuracy of the optimization. Compared with the original design, the total objective function of the optimized wet clutch is reduced by about 40.12%, and the sliding grinding work is reduced by about 61.8%. The optimization effect is obvious.

Key words: simulated annealing algorithm; improved particle swarm optimization; MATLAB/simulink; wet clutch; optimal design

0 引言

湿式离合器是一种利用液压压紧多个摩擦片和钢片进而起到换挡和动力传递的装置^[1-4]。它具有结合时平稳, 分离时迅速的特点。同时, 其能传递较大的扭矩, 且成本低廉, 所以被广泛使用^[5-7]。在机械设计阶段, 对湿式离合器的基本机械参数进行优化意义深远。

现阶段关于湿式离合器优化设计有着一定程度上的研究。文献[8]基本以滑磨功作为优化目标, 并采用 MATLAB 的优化工具箱对湿式离合器进行优化设计。文献[9]采用改进的 Metropolis 算法对重载车辆的湿式离合器进行优化设计, 优化过程中以离合器总体积、摩擦盘变形和散热面积组成目标函数。文献[10]采用一种改进的遗传算法, 以离合器体积、摩擦片比热容和摩擦片体积的加权和作为目标函数对东方红-LA3004 拖拉机的离合器进行优化。文献[11]从结合压力和

滑磨速度出发对湿式离合器摩擦片的整体结构进行参数优化, 优化时采用 MATLAB 中的 fmincon 函数。文献[12]对比了利用传统和改进遗传算法进行大轮拖拉机湿式离合器参数优化的效果, 但是收敛于最优解时需要的迭代次数约为 100 次。以上研究虽然都对湿式离合器的优化设计提供了一定的方法和指导, 但是这些方法优化计算过程迭代次数较多, 采用 MATLAB 自带的优化工具箱导致优化算法与机械设计不能很好的匹配, 而利用改进的遗传算法则增加了编程难度和计算复杂度。除此之外, 优化目标往往都只是采用与离合器体积有关的固定函数, 而忽略湿式离合器本身的动力学作用。

针对上述问题, 一方面为使优化计算复杂度低, 降低编程难度, 提高机械设计优化效果, 另一方面为使优化后的湿式离合器更符合实际工程中轻量化和高可靠性的需要。本文提出了一种改进的粒子群算法并结合 Simulink 中建立的湿式离合器动力学模型来进行关键参数优化设计的方法。根据湿

收稿日期: 2018-08-17; **修回日期:** 2018-10-17 **基金项目:** 国家重点研发计划资助项目 (2016YFD0701103); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX17_0647)

作者简介: 钱煜 (1995-), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设计、车辆电子控制技术; 程准 (1992-), 男, 江苏苏州人, 博士研究生, 主要研究方向为车辆系统动力学与控制、智能算法; 陈兵兵 (1990-), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设计、车辆电子控制技术; 鲁植雄 (1962-), 男 (通信作者), 湖北武穴人, 教授, 博士, 主要研究方向为车辆电子控制技术、车辆动力学研究与分析 (1248687161@qq.com)。

式离合器的运行工况和传动机理, 在 MATLAB/Simulink 中建立了某型号湿式离合器的动力学模型。引入模拟退火算法迭代计算的思想对粒子群算法进行改进, 并通过一个经典测试函数验证了改进后的粒子群算法在计算复杂度、收敛速度和精度上的效果。根据 Simulink 中湿式离合器动力学模型仿真计算得到的滑磨功值以及湿式离合器总体积和内腔体积的计算公式, 并结合改进的粒子群算法进行某型号湿式离合器的优化。本文研究以期对湿式离合器以及其他机械优化设计提供一定的理论指导。

1 湿式离合器仿真模型的建立

为便于建模研究, 假设液压系统不存在泄漏并且忽略液压油阻尼^[13]。湿式离合器充油过程的动力学方程如下所示:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k(x_0 + x_1) = p_c A \quad (1)$$

其中: m_1 为活塞部分的质量; x_1 为活塞在充油阶段的位移; k 为活塞回位弹簧的刚度; x_0 为弹簧初始压缩量; p_c 为离合器内部油压; A 为活塞作用面的表面积。

随着充油阶段油压的不断变化, 湿式离合器存在三个工作状态^[14]。

a) 若湿式离合器处于滑磨状态, 即处于半接触、半联动的状态。则湿式离合器的动力学方程如下所示:

$$T_e - T_{fc} = J_e \frac{dw_e}{dt} \quad (2)$$

$$T_{fc} - T_f = J_c \frac{dw_c}{dt} \quad (3)$$

其中: T_e 为湿式离合器输入端扭矩; T_{fc} 为离合器摩擦扭矩; T_f 为离合器从动端扭矩; J_e 为输入端转动惯量; J_c 为从动端转动惯量; w_e 为输入端角速度; w_c 为从动端角速度。

b) 若湿式离合器处于完全结合状态, 则动力学方程如下所示:

$$T_e - T_f = (J_e + J_c) \frac{dw_c}{dt} \quad (4)$$

此时, 输入端转速与从动端转速相等。

c) 若湿式离合器处于完全分离状态, 则动力学方程如下所示:

$$T_{fc} = 0 \quad (5)$$

湿式离合器传递扭矩的计算公式如下所示:

$$T_{fc} = \frac{2}{3} \mu(\Delta w) A z \frac{R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 - R_2^2} \left[p_c - \frac{k(x_0 + x_1)}{\pi(R_3^2 - R_4^2)} \right] \quad (6)$$

其中: Δw 为输入、输出端的转速差; $\mu(\Delta w)$ 为滑动摩擦系数, 其值与转速差有关; z 为摩擦片数量; R_1 为摩擦片外径; R_2 为摩擦片内径; R_3 为活塞外径; R_4 为活塞内径。

仿真阶段采用的发动机模型由某型号发动机实际部分负荷特性测试数据来建立。该发动机的部分负荷特性如图 1 所示。

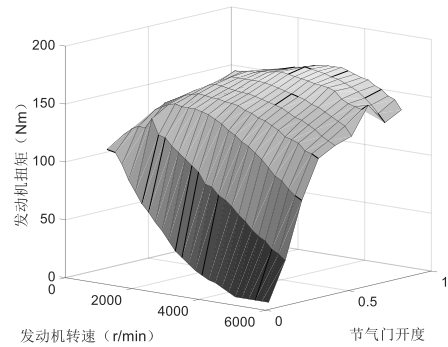


图 1 发动机部分负荷特性

Fig. 1 Engine partical load characteristics

仿真时采用二维线性插值法来获取不同工况下发动机的扭矩或转速特性。车辆行驶时所受到的阻力模型参考文献^[15]。综上所述, 基于 Matlab/Simulink 建立的湿式离合器仿真模型如图 2 所示。

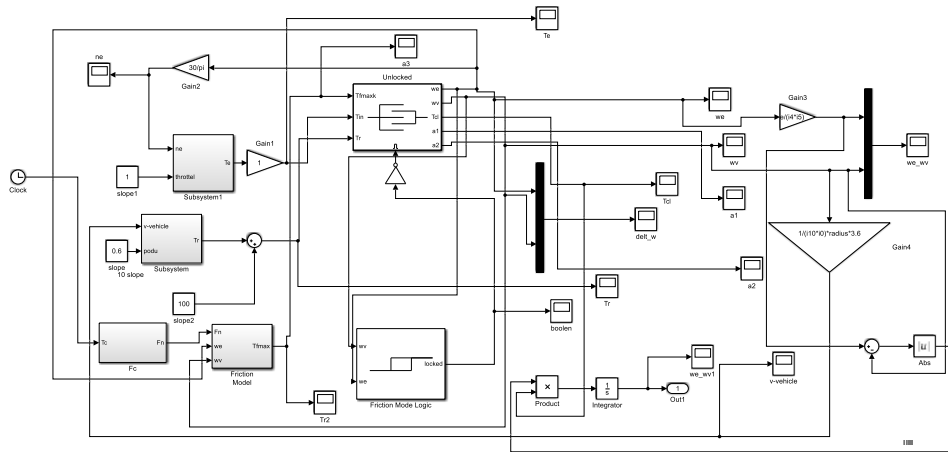


图 2 基于 Matlab/Simulink 建立的湿式离合器仿真模型

Fig. 2 Simulation model of wet clutch based on Matlab/Simulink

2 一种改进的粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 与遗传算法 (genetic algorithm, GA) 相似, 都属于模拟自然界某种规律的进化算法^[16-18]。但是, PSO 算法没有 GA 算法的交叉和变异等操作, 仅仅通过种群最优位置信息和个体历史最优信息的交换即可进行算法的更新迭代。所以, PSO 算法具有编程较易, 精度高和收敛快等优点。其速度更新采用如下公式:

$$v_i^{d+1} = \omega v_i^d + c_1 r_1 (p_i^d - x_i^d) + c_2 r_2 (p_g^d - x_i^d) \quad (7)$$

其中: v_i^d 为第 i 个粒子第 d 次迭代的飞行速度; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 0~1 之间的随机数; p_i^d 为第 i 个粒子第 d 次迭代的历史最佳值; p_g^d 为所有粒子第 d 次迭代的历史最佳值。

为避免 PSO 算法陷入局部最优解的早熟现象, 加快收敛速度, 参考文献^[19,20]对 PSO 算法的惯性权重取值、学习因子和进化判定准则进行改进。

除此之外, 针对计算机辅助优化设计在机械工程实际领

域当中的应用, 引入模拟退火算法对待优化变量每次迭代皆在一个固定值基础上进行扰动思想。即, PSO 算法每次迭代的位置信息设为扰动值, 每次迭代后都需要将位置信息加上设定的固定值再进行适应度值的计算。改进 PSO 算法的流程图如图 3 所示。

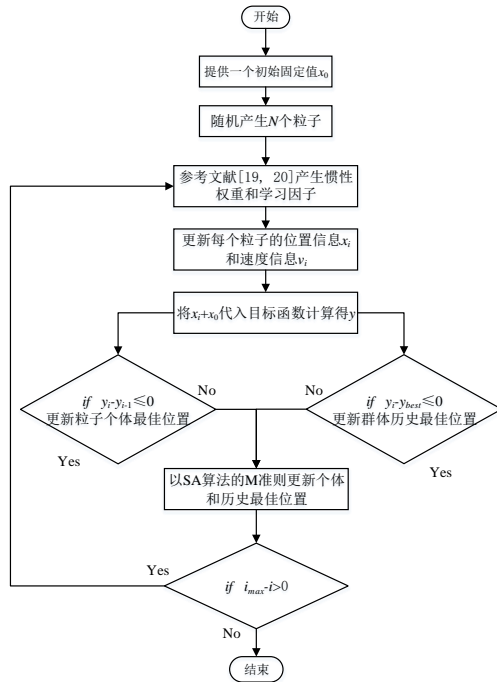


图 3 改进 PSO 算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of I-PSO

为验证上述改进 PSO 算法 (I-PSO) 的计算复杂度, 选择如下测试函数对其进行检验测试^[21]。

$$\min f(x) = x \sin(10\pi x) + 2 \quad (8)$$

该测试函数的定义域为[-1, 2], 其图形如图 4 所示。

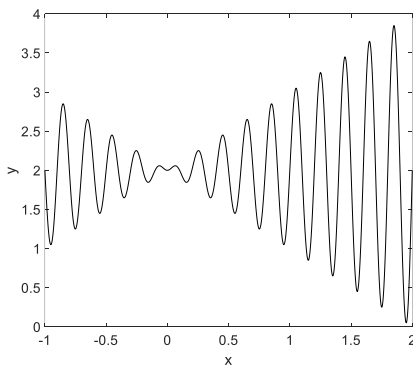


图 4 测试函数在定义域内的图形

Fig. 4 The graph of the test function in the defined domain

本文研究采用的计算机的制造商为 Lenovo, 处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @3.30 GHz, 内存为 8GB。为充分验证本文提出的改进 PSO 算法的寻优效果, 分别采用标准的 PSO 算法、遗传算法和模拟退火算法进行实验对比。标准和改进 PSO 算法的粒子数量、遗传算法的种群规模以及模拟退火算法的扰动次数都设置为 100, 迭代次数设置为 50 次。其中, 模拟退火算法的扰动因子设置为 0.1, 遗传算法的变异和交叉概率分别设置为 0.01 和 0.7。

算法验证结果如图 5 所示。图 5 表明本文改进后的 PSO 算法在第 9 代时已经收敛至最优解 0.04974, 耗时约 0.0906 s。而标准的 PSO 算法则需要约 22 代, 耗时约 0.2215 s。遗传算

法在 15 代时收敛至 0.04987, 耗时约 0.2154 s。模拟退火算法在 50 代时收敛至 0.04977, 耗时约 0.0158 s。综上, 本文改进的 PSO 算法在收敛所需迭代次数、计算机耗时以及收敛精度上都具有一定的优势。

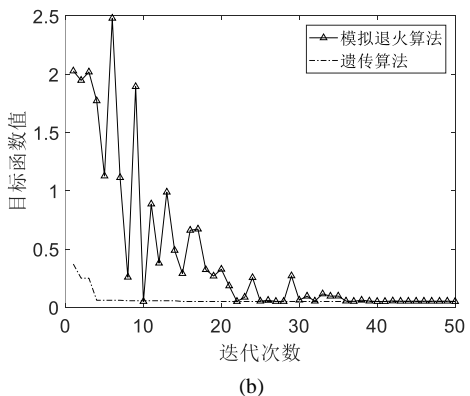
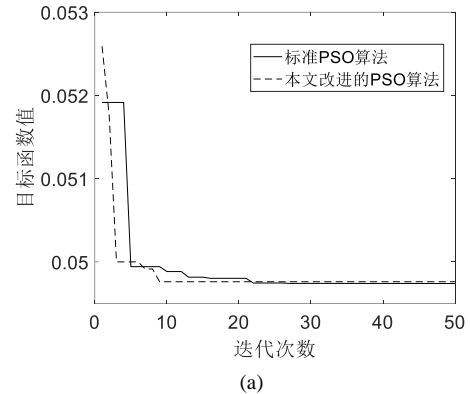


图 5 算法验证结果

Fig. 5 Algorithm verification result

3 某种湿式离合器的优化设计

本文针对本课题与上海宇意机械有限公司合作研制出的某离合器进行优化。该离合器的主要参数如表 1 所示。

表 1 离合器主要参数

Table 1 Main parameters of clutch

参数	参数值
摩擦片外径/mm	164
摩擦片内径/mm	135
活塞外径/mm	162
活塞内径/mm	148
摩擦片数	8
弹簧刚度/N/mm	800
适用油压/Mpa	4
摩擦片材料	铜基粉末

待优化变量为摩擦片数量 z 、摩擦片外半径 R_1 、摩擦片内半径 R_2 和充油设定压力 p_c 。

与轻量化有关的湿式离合器指标有总体体积和内腔体积, 计算方式分别如下:

$$V_{total} = \pi L_{total} R_{total}^2 \quad (9)$$

$$V_{内腔} = \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2)z(d+s)}{4} \quad (10)$$

其中: L_{total} 为离合器壳体总长度; R_{total} 为离合器壳体外径, 其与摩擦片外半径 R_1 线性相关; d 为摩擦片厚度; s 为摩擦片间隙。

综上, 与轻量化和待优化变量有关的目标函数 F_1 设立为

$$F_1 = R_1^2 + 2R_1 + z(R_1^2 - R_2^2) \quad (11)$$

目标函数 F_2 为通过基于 MATLAB/Simulink 的湿式离合器仿真模型计算得到滑磨功值。滑磨功计算公式如下:

$$F_2 = \int_0^{T_{cl}} (w_e(t) - w_c(t)) dt \quad (12)$$

根据经验法去对比 F_1 和 F_2 的数量级关系, 最终确立的总目标函数如下所示:

$$F_{\text{总}} = F_1 + \frac{F_2}{2000} \quad (13)$$

4 优化设计结果与分析

采用本文提出的改进的 PSO 算法基于表 1 中的参数对上述型号的湿式离合器进行优化设计。粒子群规模设为 50, 最大迭代次数设为 50。寻优结果如图 6 所示。

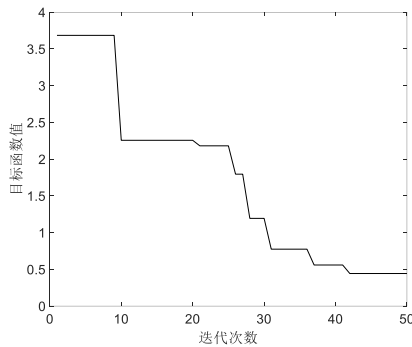


图 6 湿式离合器优化迭代结果

Fig. 6 Optimization iterative results of wet clutch

该湿式离合器按原先设计参数计算得到的总目标函数数值为 0.7396, 优化后为 0.4429, 改进了 40.12%。优化后充油压力设定值为 4.7816 Mpa, 摩擦片数量为 11 个, 摩擦片外半径为 93.5112 mm, 内半径为 73.7055 mm。

优化前与原始湿式离合器的滑磨功对比如图 7 所示。

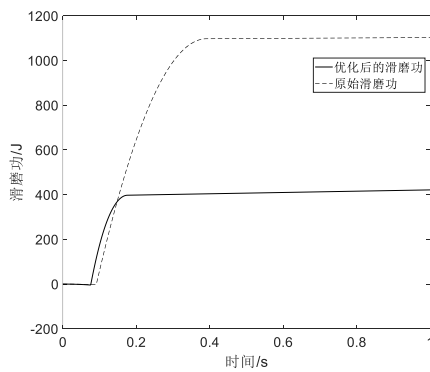


图 7 改进前后湿式离合器的滑磨功对比

Fig. 7 Comparison of sliding grinding performance of improved wet clutch

根据图 7, 由本文提出的基于湿式离合器原始参数的优化设计效果明显, 在很大程度上减小了湿式离合器工作过程中产生的滑磨功, 提高了实际应用的可靠性。具体来说, 滑磨功减小了 61.8%。

5 结束语

a) 本文根据湿式离合器动力学分析, 基于 MATLAB/Simulink 成功建立了湿式离合器的仿真模型, 为湿式离合器优化设计、控制策略开发等研究提供了一定的理论指导。

b) 本文在惯性权重、学习因子取值和进化判定准则的改进基础上, 在 PSO 算法中引入模拟退火算法对决策变量每次迭代皆在一个固定值基础上进行扰动的思想。测试函数的结果表明, 仅用 9 次迭代, 耗时约 0.0906 s 即可收敛至全局最优值, 比标准 PSO 算法提速约 59.1%。

c) 结合湿式离合器的关键性能, 本文提出了一种基于轻量化和可靠性的综合优化目标函数。并基于本文提出的 I-PSO 算法和 Simulink 中湿式离合器仿真模型对某型号湿式离合器进行优化设计。结果表明, 该方法在很大程度上提升了离合器的性能, 优化后目标函数改进了 40.12%, 滑磨功减小了 61.8%。

参考文献:

- [1] 赵二祥, 马彪, 李和言, 等. 非均匀接触对湿式离合器摩擦特性的影响 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48 (3): 661-669. (Zhao Erhui, Ma Biao, Li Heyan, *et al.* Effect of non-uniform contact on friction characteristics of wet clutches [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2018, 48 (3): 661-669.)
- [2] 张书同, 孙保群, 胡松华. 多片湿式离合器结构的换挡响应研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56 (1): 15-19. (Zhang Shutong, Sun Baoqun, Hu Songhua. Study on shifting response of multi-plate wet clutch [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56 (1): 15-19.)
- [3] Iqbal S, Al-Bender F, Ompusunggu A P, *et al.* Modeling and analysis of wet friction clutch engagement dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60: 420-436.
- [4] Ingram M, Reddyhoff T, Spikes H A. Thermal behaviour of a slipping wet clutch contact [J]. Tribology Letters, 2011, 41 (1): 23-32.
- [5] 邹婷婷, 张志刚, 陈瑶, 等. 湿式离合器典型工况参数对摩擦钢片温度场的影响 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2018, 32 (1): 50-57. (Zou Tingting, Zhang Zhigang, Chen Yao, *et al.* Influence of typical working condition of wet clutch on temperature field of separator plate [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2018, 32 (1): 50-57.)
- [6] 李和言, 王宇森, 熊涪博, 等. 离合器配对摩擦副径向温度梯度对接触比压的影响 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (1): 136-143. (Li Heyan, Wang Yusen, Xiong Cenbo, *et al.* Effect of radial temperature gradient on interface pressure of clutch friction pair [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (1): 136-143.)
- [7] 刘文, 王青松, 林腾蛟, 等. 基于响应面试验设计的湿式离合器优化策略 [J]. 重庆大学学报, 2018, 41 (6): 9-23. (Liu Wen, Wang Qingsong, Lin Tengjiao, *et al.* Optimization strategy of wet clutch based on response surface test design [J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41 (6): 9-23.)
- [8] 汤鹏翔, 刘艳芳, 王书翰, 等. 多片湿式离合器优化设计 [J]. 2010, 36 (3): 291-294. (Tang Pengxiang, Liu Yanfang, Wang Shuhan, *et al.* Optimal design of clutch in automatic transmission [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36 (3): 291-294.)
- [9] 陈凤. 基于改进 Metropolis 算法的重载车辆湿式离合器优化设计 [J]. 机械传动, 2015, 39 (8): 93-96. (Chen Feng. Optimization design of heavy type vehicle wet clutch based on improved metropolis algorithm [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (8): 93-96.)
- [10] 徐立友, 李晴, 周志立. 一种改进遗传算法在离合器参数优化中的应用 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (24): 3307-3311, 3317. (Xu Liyou, Li Qing, Zhou Zhili. An improved genetic algorithm and its applications

- in clutch parameter optimization [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26 (24): 3307-3311, 3317.)
- [11] 郑少青. 无级变速器离合器结构参数优化及其起步控制策略 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012. (Zheng Shaoqing. CVT clutch structure parameter optimization and startup control algorithm [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012.)
- [12] 薛运起. 大轮拖电控 PTO 湿式离合器设计研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017. (Xue Yunqi. Design and research on wet clutch for electronic control PTO of large wheeled tractor [D]. Changchun: Jilin University, 2017.)
- [13] 冯能莲, 郑慕侨, 马彪. 动力换挡离合器充/放油特性仿真研究 [J]. *农业工程学报*, 2001, 17 (2): 68-71. (Feng Nenglian, Zheng Muqiao, Ma Biao. Performance simulation of power shift clutch during charge/discharge processes [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17 (2): 68-71.)
- [14] 常亚磊. 非道路车辆液压机无级变速器换挡过程动态特性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2012. (Chang Yalei. Research on dynamic characteristics in shifting process of hydro-mechanical continuously variable transmission used on the unroad vehicle [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.)
- [15] 李晓甫, 赵克刚, 黄向东, 等. 汽车行驶阻力模型参数的确定 [J]. *汽车工程*, 2011, 33 (8): 645-648. (Li Xiaofu, Zhao Kegang, Huang Xiangdong, *et al.* Determination of parameters in vehicle driving resistance model [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33 (8): 645-648.)
- [16] Wang Dongshu, Tan Dapei, Liu Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. *Soft Computing*, 2018, 22 (2): 387-408.
- [17] Wu Qinghua, Song Tao, Liu Hanmin, *et al.* Particle swarm optimization algorithm based on parameter improvements [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering*, 2017, 17 (3): 557-568.
- [18] 谢国民, 刘叶, 付华, 等. 基于 PSO-GSA 优化的井下加权质心人员定位算法 [J]. *计算机应用研究*, 2017, 34 (3): 710-713. (Xie Guomin, Liu Ye, Fu Hua, *et al.* Improved downhole weighted centroid localization algorithm based on PSO-GSA [J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34 (3): 710-713.)
- [19] 程准, 鲁植雄, 唐迪, 等. 基于改进 PSO 算法的拖拉机驱动防滑 PID 控制策略 [J]. *计算机应用研究*, 2017, 34 (1): 83-86. (Cheng Zhun, Lu Zhixiong, Tang Di, *et al.* PID control strategy of tractor driving anti slip control based on improved PSO algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34 (1): 83-86.)
- [20] 程准, 陆凯, 钱煜, 等. 基于改进 PSO 算法的 MAP 图标点选择新方法 [EB/OL]. *计算机应用研究*, 2019, 36 (10) . <http://www.arocmag.com/article/02-2019-10-027.html>. (Cheng Zhun, Lu Kai, Qian Yu, *et al.* New method of MAP fixed-point selection based on improved PSO algorithm [EB/OL]. *Application Research of Computers*, 2019, 36 (10) . <http://www.arocmag.com/article/02-2019-10-027.html>.)
- [21] Cheng Zhun, Lu Zhixiong. Research on the PID control of the ESP system of tractor based on improved AFSA and improved SA [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 142-147.