

# 基于粒子群优化算法的纯电动物流车动力系统 参数匹配优化\*

蒲磊<sup>1</sup> 郑伟光<sup>2</sup>

(1. 东风柳州汽车有限公司, 柳州 545004; 2. 广西科技大学, 柳州 545004)

**【摘要】**为研究搭载两挡电控机械式自动变速器(AMT)车辆的传动系统速比对整车性能的影响,以某款纯电动物流车为研究对象,根据整车基本参数对车辆驱动电机、电池组和传动系统速比进行匹配设计,基于AVL\_CRUISE仿真平台建立整车模型,通过仿真验证匹配参数的合理性,选用粒子群优化(PSO)算法,以提升整车动力性和经济性为目标,对匹配两挡AMT的传动系统速比进行优化。仿真结果表明:优化后纯电动物流车速度由0 km/h加速至100 km/h的加速时间缩短了2.31 s,单个新欧洲驾驶循环(NEDC)工况下整车能耗降低了3.14%,整车的动力性和经济性明显改善。

**关键词:**纯电动物流车 传动系统 粒子群优化算法

中图分类号:U463.2 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230008

## Parameter Matching Optimization of Power System of Pure Electric Logistics Vehicle Based on Particle Swarm Optimization

Pu Lei<sup>1</sup>, Zheng Weiguang<sup>2</sup>

(1. Dongfeng Liuzhou Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545004; 2. Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545004)

**【Abstract】**To investigate the influence of transmission system speed ratio of vehicle equipped with 2-speed AMT on vehicle's performance, this paper, taking a pure electric logistics vehicle as a research object, matched and designed the vehicle's driving motor, battery pack and transmission system speed ratio according to the vehicle's basic parameters. The vehicle model was established based on the AVL\_CRUISE simulation platform, the rationality of matching parameters was verified by simulation, and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was selected to improve the vehicle's power and economy, and the speed ratio of transmission system matching two-gear AMT was optimized. The simulation results show that the 0-100 acceleration time of the pure electric logistics vehicle is shortened by 2.31 s after optimization, the energy consumption of the vehicle is reduced by 3.14% under single NEDC cycle condition, and the power performance and economy of the vehicle are obviously improved.

**Key words:** Pure electric logistics vehicle, Transmission system, Particle Swarm Optimization (PSO)

**【引用格式】**蒲磊, 郑伟光. 基于粒子群优化算法的纯电动物流车动力系统参数匹配优化[J]. 汽车工程师, 2023(5): 20-25.

PU L, ZHENG W G. Parameter Matching Optimization of Power System of Pure Electric Logistics Vehicle Based on Particle Swarm Optimization[J]. Automotive Engineer, 2023(5): 20-25.

## 1 前言

纯电动物流车主要用于城市物流行业,研究其动力系统参数匹配对提高其整车动力性和经济性、

推动城市物流行业的发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前,制约纯电动汽车发展的主要问题是续航里程较短和整车性能较低,合理匹配动力传动系统参数有助于纯电动汽车获得较好的动力性和经济

\*基金项目:广西科技计划项目(桂科AA22068060);柳州市科技计划项目(2021AAA0104, 2022AAA0102);柳东科技计划项目(20210117)。

性。孙景伦等<sup>[2]</sup>在对纯电动汽车动力系统进行参数匹配后,采用基于多目标优化的遗传算法对传动系统的传动比进行优化,提高了纯电动汽车的续航里程。Hu等<sup>[3]</sup>通过建立电动汽车驱动系统模型,根据驱动电机的特性进行了动力系统参数匹配与优化设计,仿真分析结果表明,优化后的整车能耗明显降低。盛继新等<sup>[4]</sup>为提高纯电动汽车的驱动电机效率,采用全局优化算法对动力传动系统参数以及两挡变速器传动比进行优化,优化后整车性能显著提升。由此可见,动力系统参数优化有助于整车性能和续航里程改善。目前,动力系统参数优化算法主要包括遗传算法、全局优化算法等。粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法在优化过程中可以更好地体现整车能耗的变化情况,适用于纯电动物流车两挡传动比的优化。

本文以纯电动物流车为研究对象,根据整车基本参数对纯电动物流车进行动力系统参数匹配,基于AVL\_CRUISE仿真软件平台建立整车模型,采用粒子群优化算法对传动系统传动比进行优化,并在新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)工况下进行整车仿真,并对仿真结果进行分析。

## 2 动力系统参数匹配

### 2.1 纯电动物流车整车参数及性能

本文以某纯电动物流车为研究对象,其主要参数及性能指标如表1所示。

表1 整车参数及性能指标

基本参数	数值	基本参数	数值
整车质量 $m/\text{kg}$	4 495	主减速比 $i_0$	6.142
空气阻力系数 $C_D$	0.49	车轮半径 $r/\text{m}$	0.35
滚动阻力系数 $f$	0.013 2	旋转质量换算系数 $\delta$	1.2
迎风面积 $A/\text{m}^2$	6.96	传动系统机械效率 $\eta_T$	0.92

结合整车参数制定纯电动物流车的动力性指标和经济性指标,如表2所示。

表2 整车性能指标

设计指标	数值	设计指标	数值
最高车速 $u_{\max}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	90	续航里程 $L/\text{km}$	200
最大爬坡度 $\alpha_{\max}/\%$	25	百公里能耗 $Q/\text{kW}\cdot\text{h}$	15
0~100 km/h 加速时间 $t/\text{s}$	12		

### 2.2 驱动电机选型

选用永磁同步电机作为驱动电机,根据纯电动物流车的动力性指标及整车基本参数确定驱动电机参数。

驱动电机的峰值功率  $P_{\max}$  须大于汽车在最高车速时的需求功率  $P_u$ 、最大爬坡度需求功率  $P_\alpha$ , 以及满足加速时间要求的功率  $P_a$ <sup>[5]</sup>:

$$P_{\max} \geq \{P_u, P_\alpha, P_a\} \quad (1)$$

其中:

$$P_u = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{mgfu_{\max}}{3600} + \frac{C_D Au^3}{76140} \right) \quad (2)$$

$$P_\alpha = \frac{u}{\eta_T} \left( \frac{mgf \cos \alpha}{3600} + \frac{mg \sin \alpha}{3600} + \frac{C_D Au^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

$$P_a = \frac{u}{\eta_T} \left( \frac{mgf}{3600} + \frac{C_D Au^2}{76140} + \frac{\delta m}{3600} \frac{du}{dt} \right) \quad (4)$$

式中,  $u$  为车速;  $g=9.8 \text{ m/s}^2$  为重力加速度;  $\alpha$  为爬坡度, 当  $\alpha=25\%$  时为最大爬坡度;  $du/dt$  为速度对时间的导数, 即加速度。

将整车参数代入上述各式, 可求得电机的峰值功率。

为使汽车稳定在最大车速, 电机的额定功率  $P_e$  为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{P_{\max}}{\lambda} \\ P_e \geq P_u \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为过载系数, 一般取为 2~3, 本文取  $\lambda=2.2$ 。

驱动电机的最高转速  $n_{\max}$  要满足汽车对最高车速的需求:

$$n_{\max} = u_{\max} i_0 / (0.377r) \quad (6)$$

式中,  $r$  为车轮半径。

驱动电机的额定转速  $n_e$  满足:

$$n_e = n_{\max} / \beta \quad (7)$$

式中,  $\beta$  为电机的扩大功率区系数, 本文取  $\beta=2$ 。

驱动电机的额定转矩  $T_e$  和最大转矩  $T_{\max}$  满足:

$$T_e = 9550 P_e / n_e \quad (8)$$

$$T_{\max} = \lambda T_e \quad (9)$$

综上, 本文选取的永磁同步电机参数如表3所示。

表3 永磁同步电机参数

参数	峰值功率 /kW	额定功率 /kW	最大转速 /r·min <sup>-1</sup>	额定转速 /r·min <sup>-1</sup>	最大转矩 /N·m
数值	80	40	6 000	3 000	255

### 2.3 电池组参数计算

动力电池是驱动电机的能量来源, 其参数确定要与驱动电机的参数相匹配, 同时需保证车辆续航里程的要求<sup>[6]</sup>。本文选用三元锂离子电池, 其动力电池的能量  $W$  为:

$$W = W_{100} L / (100 \gamma_{\text{soc}}) \quad (10)$$

式中,  $W_{100}$  为动力电池的额定容量;  $L$  为整车续航里程;  $\gamma_{\text{soc}}$  为动力电池放电深度, 取  $\gamma_{\text{soc}}=0.8$ 。

根据理论计算和权衡,为纯电动物流车匹配的动力电池的额定电压为532 V,总容量为152 A·h。

### 3 CRUISE 仿真建模分析

#### 3.1 整车建模

本文根据上述整车参数及计算获得的驱动电机数据、驱动电池数据进行模型搭建。整车模型包括整车模块、驾驶室模块、变速器模块、主减速器模块、离合器模块、驱动电机模块、动力电池模块、车轮和制动器模块等。通过设置仿真工况计算任务,包括全负荷加速工况时间、爬坡工况任务的时间以及车速、NEDC 工况下的整车能耗、行驶所能达到的最高车速等来完成整车的性能仿真和分析。搭建的纯电动物流车整车模型如图1所示。

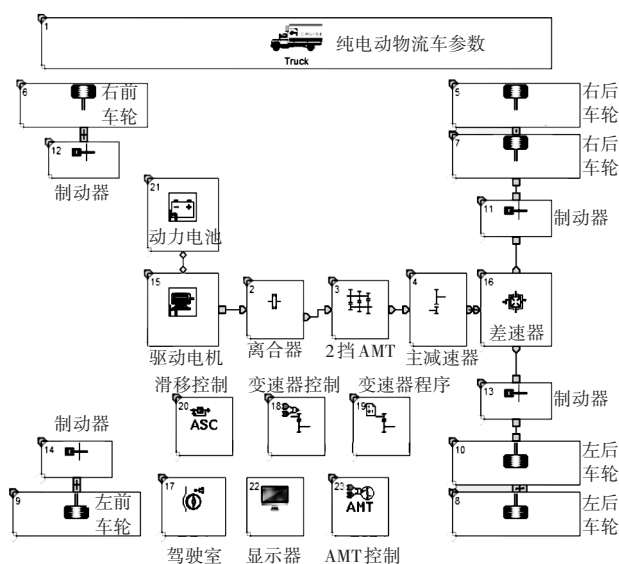


图1 整车模型

#### 3.2 仿真结果分析

根据已知的整车性能参数及上述匹配的动力性指标设置仿真任务。设置最高车速仿真任务、全负荷加速性能仿真任务、爬坡性能仿真任务,分别验证车辆的最高车速、加速和爬坡性能,选择接近城市工况的NEDC工况作为仿真循环工况计算整车能耗,如图2所示,初步选定1挡传动比为7.52,2挡传动比为5.41,仿真结果如表4所示。

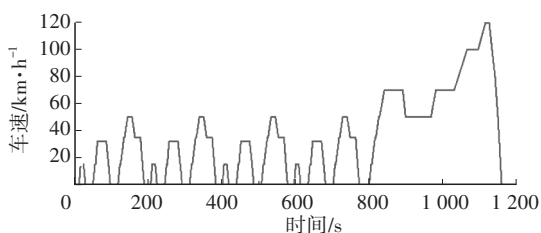


图2 NEDC循环工况

表4 仿真结果

参数	仿真结果
最高车速 $u_{max}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	102
最大爬坡度 $\alpha_{max}/\%$	25.33
0~100 km/h 加速时间 $t/\text{s}$	12.38
NEDC 工况下续航里程/km	285
单个NEDC 工况能耗 $Q/\text{kW}\cdot\text{h}$	17.72

由仿真结果可知,本文选用的驱动电机和动力电池可以满足整车的动力性指标要求,参数匹配的初步仿真结果可满足设计目标,证明了参数匹配的合理性。但考虑汽车实际运行工况,整车的经济性能和动力性能在极端情况下会受到影响。而两挡变速器传动比对纯电动物流车的动力性和经济性影响较为明显,合适的传动比可以促使驱动电机工作在高效区,提高汽车的工作效率,使整车性能得到提升,因此有必要对整车传动比进行优化。

### 4 基于粒子群优化算法的传动比优化

#### 4.1 两挡传动比范围确定

传动系统两挡传动比的确定和优化要同时满足最高车速和最大爬坡度的设计要求,并充分考虑汽车动力性和经济性的要求<sup>[7]</sup>。车辆以1挡在无风、水平路面上行驶时,由汽车行驶平衡方程式可得:

$$i_{g1}i_0 \geq \frac{mgr(f \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max}) + \frac{C_D A u^2 r}{21.15}}{T_{max} \eta_T} \quad (11)$$

式中,  $i_{g1}$  为变速器1挡传动比。

1挡传动比需保证车轮不打滑,根据车轮和路面的附着条件,有:

$$i_{g1}i_0 \leq G\varphi/T_{max}\eta_T \quad (12)$$

式中,  $G=60\%$  为整车前轴轴荷比例;  $\varphi=0.7$  为道路附着系数。

汽车的2挡传动比需根据车辆的最高车速和驱动电机的转速确定。纯电动物流车以最高车速在水平良好的路面上匀速行驶时,不考虑坡道阻力和加速阻力,由汽车行驶平衡方程式可得:

$$i_{g2}i_0 \geq \frac{r}{T_{max}\eta_T} (mgf + \frac{C_D A u_{max}^2}{21.15}) \quad (13)$$

最小传动比还需根据驱动电机的最高转速和整车车速来确定:

$$i_{g2}i_0 \leq 0.377r n_{max}/u_{max} \quad (14)$$

将相关参数带入式(11)~式(14)计算可得:纯电动物流车两挡变速器的传动比范围为:  $6.925 \leq i_{g1} \leq 8.494$ ,  $4.282 \leq i_{g2} \leq 5.474$ 。

## 4.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种群体范围寻优算法<sup>[8]</sup>,目前广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制等领域<sup>[9]</sup>。

PSO算法在寻找最优解过程中每个粒子都有确定适应度值<sup>[10]</sup>,粒子*i*第*k*次迭代的速度 $v_{id}^k$ 为:

$$v_{id}^k = \omega v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (p_{best} - x_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (g_{best} - x_{id}^{k-1}) \quad (15)$$

式中, $\omega$ 为惯性权重因子,用于调节对解空间的搜索范围; $x_{id}^k$ 为粒子第*k*次迭代更新的位置; $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子,用于调节学习最大步长; $r_1$ 、 $r_2$ 均为随机函数,取值范围为[0,1],用于增加搜索的随机性; $p_{best}$ 为粒子个体最优值,即某个粒子个体经历的所有位置中适应度最优的位置; $g_{best}$ 为群体极值,即所有粒子搜索到的适应度最优的位置。

粒子的位置更新公式为:

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (16)$$

粒子群算法的流程如图3所示。

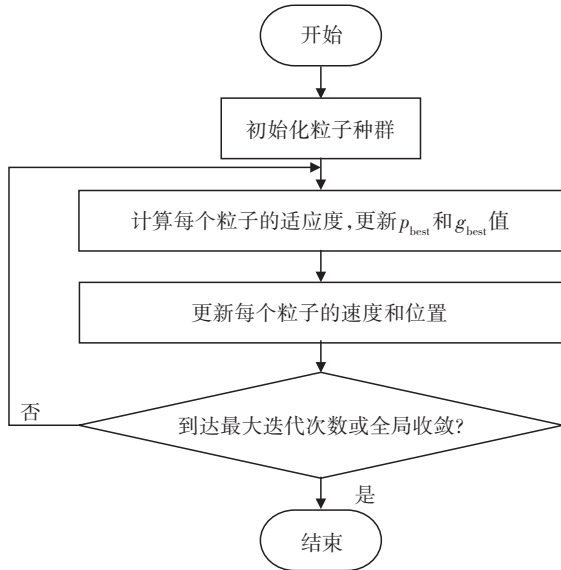


图3 粒子群优化算法流程

## 4.3 建立目标函数

本文选取两挡变速器的传动比(其中1挡传动比为 $i_{g1}$ ,2挡传动比为 $i_{g2}$ )作为优化设计变量*x*:

$$x = (i_{g1}, i_{g2}) \quad (17)$$

本文选取纯电动物流车从0 km/h起步连续加速到100 km/h的加速时间*t*作为汽车动力性的优化目标函数:

$$F(x) = t = \frac{1}{3.6} \int_0^{u_e} \frac{\delta m}{F_t - mgf - \frac{C_D A u_a^2}{21.15}} du +$$

$$\frac{1}{3.6} \int_{u_e}^{100} \frac{\delta m}{F_t - mgf - \frac{C_D A u_a^2}{21.15}} du \quad (18)$$

其中驱动力 $F_t$ 为:

$$F_t = \begin{cases} \frac{3600P_{max}\eta_T}{n_e}, & 0 < u_a \leq u_e \\ \frac{3600P_{max}\eta_T}{n_{max}}, & u_e < u_a \leq 100 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $u_a$ 为当前车速; $u_e$ 为在当前挡位下车辆所能达到的最大车速,1挡下的车速为 $u_{e1}=0.377n_e r/i_{g1}$ ,2挡下的车速为 $u_{e2}=0.377n_e r/i_{g2}$ 。

本文选取单个NEDC工况下的整车能耗为经济性目标函数:

$$T(x) = \min Q(i_{g1}, i_{g2}) \quad (20)$$

将动力性目标函数和经济性目标函数转化为单一目标函数:

$$M = \lambda_1 F(x) + \lambda_2 T(x) \quad (21)$$

式中, $\lambda_1$ 为动力性加权因子; $\lambda_2$ 为经济性加权因子。

约束条件的建立以不小于表2所给出的整车动力性指标为准。设计优化变量,建立目标函数和约束条件,将优化后的数据代入CRUISE整车模型进行仿真分析。

## 4.4 优化结果分析

按照图3所示的流程建立优化模型并优化传动比,其迭代次数及适应度如图4所示。当迭代次数为5次时,目标函数取得最优值,所对应的1挡、2挡最优传动比分别为8.23、5.02。

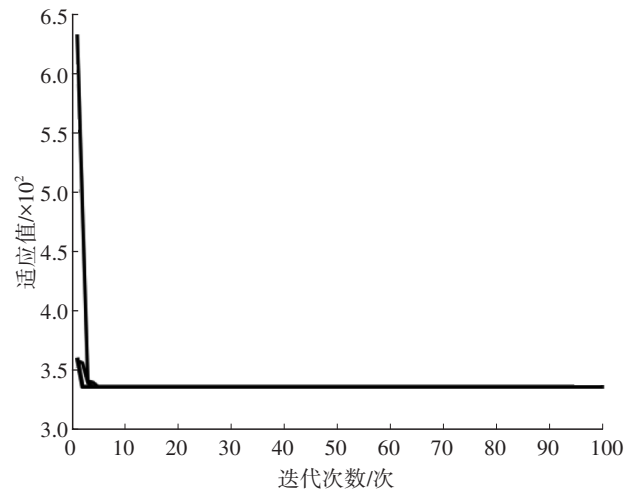


图4 粒子群算法优化结果

将优化后的传动比输入整车仿真模型,仿真结果如图5、图6所示,两挡传动比优化前、后整车性能

仿真结果如表5所示。由表5可知,0~100 km/h加速时间缩短了2.31 s,单个NEDC工况下能耗降低了3.14%,实现了整车的动力性和经济性的提高。

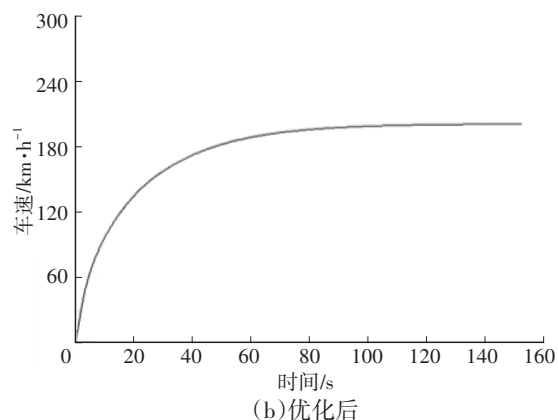
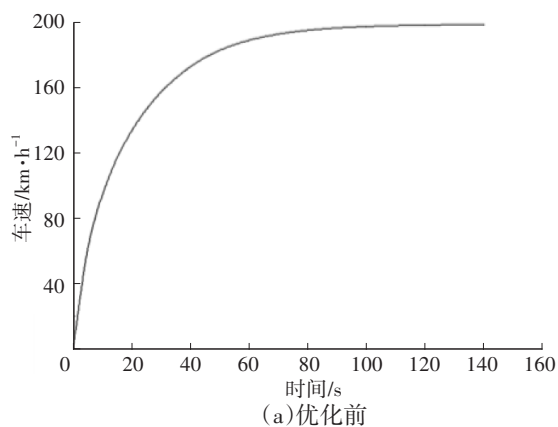


图5 动力性能指标优化前、后对比

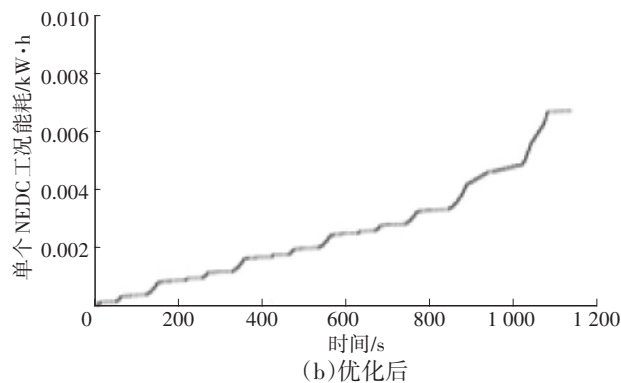
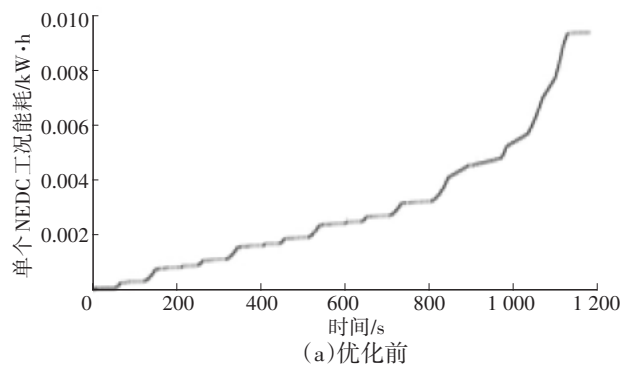


图6 经济性能指标优化前、后对比

表5 优化前、后仿真结果对比

优化指标	优化前	优化后
1挡传动比	7.52	8.23
2挡传动比	5.41	5.02
0~100 km/h加速时间 $t/s$	12.38	10.07
单个NEDC工况能耗 $Q/kW \cdot h$	14.72	14.26

## 5 结束语

本文以某纯电动物流车为研究对象,根据其整车参数和性能指标,计算了驱动电机、动力电池、传动系统参数,并在AVL\_CRUISE软件平台搭建整车模型,进行动力性能和经济性能的计算仿真,并采用粒子群优化算法对两挡变速器传动比进行优化。仿真结果表明:优化后纯电动物流车0~100 km/h加速时间缩短了2.31 s,单个NEDC工况下整车能耗降低了3.14%,整车动力性和经济性均有所提高。

### 参考文献

- [1] 王宗泽. 纯电动物流车动力传动系统参数匹配优化技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
WANG Z Z. Research on Parameter Matching Optimization Technology of Power Transmission System for Pure Electric Logistics Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [2] 孙景伦, 周萍, 孙跃东. 纯电动汽车动力传动系参数匹配及仿真[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 51-55.  
SUN J L, ZHOU P, SUN Y D. Parameter Matching and Simulation of Power Transmission System for Pure Electric Vehicle[J]. Electronic Technology, 2016, 29(1): 51-55.
- [3] HU J J, ZU G Q, JIA M X, et al. Parameter Matching and Optimal Energy Management for A Novel Dual-Motor Multi-Modes Powertrain System[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 116: 113-128.
- [4] 盛继新, 张邦基, 朱波, 等. 两挡纯电动汽车传动系统参数优化和试验对比[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7): 763-770.  
SHENG J X, ZHANG B J, ZHU B, et al. Parameter Optimization and Experimental Comparison of Two-Speed Pure Electric Vehicle Transmission System[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(7): 763-770.
- [5] 贾燕红. 基于ADVISOR的纯电动汽车动力性匹配设计及仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
JIA Y H. Power Performance Matching Design and Simulation Research of Pure Electric Vehicle Based on ADVISOR[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [6] 白素强, 杨瑞兆, 邓家奇. 纯电动汽车动力系统参数匹配及仿真分析[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(19): 1-4.  
BAI S Q, YANG R Z, DENG J Q. Parameter Matching and

- Simulation Analysis of Pure Electric Vehicle Power System [J]. Automotive Practical Technology, 2020, 45(19): 1-4.
- [7] 郑锦汤, 陈吉清, 李玉忠. 多目标遗传算法的纯电动汽车动力系统参数优化[J]. 现代制造工程, 2020(6): 46-51.
- ZHENG J T, CHEN J Q, LI Y Z. Parameter Optimization of Pure Electric Vehicle Power System Based on Multi-Objective Genetic Algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (6): 46-51.
- [8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization [J]. Swarm Intelligence, 2007, 1(1): 33-57.
- [9] 吕柏行, 郭志光, 赵韦皓, 等. 标准粒子群算法的优化方式综述[J]. 科学技术创新, 2021(28): 33-37.
- LÜ B H, GUO Z G, ZHAO W H, et al. A Review of Optimization Methods for Standard Particle Swarm Algorithm[J]. Science and Technology Innovation, 2021 (28): 33-37.
- [10] 周飞鲲. 纯电动汽车动力系统参数匹配及整车控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- ZHOU F K. Research on Parameter Matching and Vehicle Control Strategy of Pure Electric Vehicle Power System[D]. Changchun: Jilin University, 2013.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年2月6日。

## 《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》杂志创刊于1986年,是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车制造类月刊、中国汽车工程学会会刊,是全面报道汽车先进制造工艺与材料应用的专业性杂志。

《汽车工艺与材料》杂志始终致力于汽车制造新技术的开发(如汽车制造领域中的四大工艺)、新材料的研究应用、轻量化技术、智能制造、绿色制造技术、加工技术、生产装备、检测技术、数字化模拟技术及生产管理等方面的报道。努力为汽车及零部件生产中各门类的决策者及研究开发人员提供更好、更快、更节约成本的汽车行业发展动态信息,为其适应国内与国际激烈的汽车生产市场竞争提供有效的帮助。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商,及时报道汽车行业最新的设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目:

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求:

- (1)来稿须具有独创性并与实践相结合,文章字数最好控制在6000字以内。
- (2)来稿不能在国内、外公开杂志上发表过,严禁一稿多投,对同时一稿多投者,编辑部将视对本刊声誉、工作上造成的影响程度,采取相应处理措施。
- (3)来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。
- (4)来稿须包括以下项目:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。
- (5)来稿文章格式应符合一般科技论文格式,或参考近期本刊所刊登文章格式。
- (6)稿件图片请发清晰原图,图形尺寸应适中,并配上图名和图号,且文中要有相应体现(例如:如图1所示、见图2等)。图中英文需要翻译成中文。
- (7)计量单位必须采用(或换算成)中华人民共和国法定计量单位。文章中外文字母大小写、上下角标应书写正确,避免同一符号代表2种及以上物理量的情况出现。
- (8)文章必须附有公开发表的参考文献,且在文中应标注文献引用处。参考文献注册项目应齐全,包括作者姓名、题名、刊名(或书名,图书应注明出版地与出版社)、出版年、卷、期。
- (9)请在来稿时注明作者联系方式(包含手机、办公室电话、E-mail等)。
- (10)本刊投稿网址:<http://qegyyl.cbpt.cnki.net>,咨询电话:0431-82028069。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。