

纯电动物流车动力系统设计优化*

DESIGN AND OPTIMIZATION OF ELECTRIC LOGISTICS VEHICLE POWER SYSTEM

王永鼎** 李恒***

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

WANG YongDing LI Heng

(College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要 为了对电动物流车动力系统参数进行合理匹配,根据电动物流车的技术要求,对电动物流车的相关参数进行初步设计计算,并在模拟工况的基础上通过 AVL-Cruise 搭建整车仿真模型进行模拟仿真。基于纯电动物流车动力系统参数匹配的复杂性,需要对各项参数进行综合考虑,提出了一种多目标遗传算法的优化方式。该方式将车辆的动力性及经济性同时作为优化目标,将最高车速,加速时间等作为约束,建立传动系统优化模型并对其求其最优解。通过对优化后的参数进行仿真分析,表明该多目标遗传算法用于电动物流车动力系统优化的可行性及合理性,为电动物流车动力系统参数优化提供了一种新的途径。

关键词 纯电动物流车 参数匹配 仿真分析 遗传算法 多目标优化

中图分类号 U462

Abstract In order to reasonably match the parameters of the electric logistics vehicle power system, according to the technical requirements of the electric logistics vehicle, the preliminary design and calculation of the relevant parameters of the electric logistics vehicle are carried out, and the whole vehicle simulation model is built by AVL-Cruise on the basis of the simulation conditions. Based on the complexity of parameter matching of pure electric logistics vehicle power system, various parameters need to be considered comprehensively, and a multi-objective genetic algorithm optimization method is proposed. The optimization method takes the vehicle's power and economy as the optimization goal at the same time, and takes the maximum vehicle speed and acceleration time as constraints, establishes the transmission system optimization model and finds its optimal solution. Through the simulation analysis of the optimized parameters, the feasibility and rationality of the multi-objective genetic algorithm for the optimization of the power system of the electric logistics vehicle is presented, which provides a new way for the optimization of the power system parameters of the electric logistics vehicle.

Key words Pure electric logistics vehicle; Parameter matching; Simulation analysis; Genetic algorithm; Multi-objective optimization

Corresponding author: LI Heng, E-mail: liheng@nvaqu.edu.cn, Tel: +86-21-61900803, Fax: +86-21-61900803.

The project supported by the Shanghai Ocean University Research Project Management (No.K-9001-00-0006).

Manuscript received 20191019, in revised form 20191103.

引言

近年来,随着经济的快速发展,环境污染问题日益突出。环境污染按环境要素可分为大气污染,土壤污染和水体污染。解决大气污染是解决环境污染问题的重要一环,大气污染会对人体健康和植物的生长造成伤害,其产生因素是多方面的,其中汽车尾气便是污染的主要来源之一^[1]。而随着物流业的快速发展,物流

车日益增多,因此发展电动物流车代替传统燃油车,对大气污染的治理具有积极作用^[2-3]。

1 电动物流车动力系统参数匹配

1.1 电动物流车的相关参数及设计要求

本文是以东风 EM30 为原型,结合车辆的运输要求和运输环境,确定本次设计仿真的基本参数,相关参数如表 1 所示。

* 20191019 收到初稿, 20191103 收到修改稿。上海海洋大学科研项目管理 (K-9001-00-0006) 资助。

** 王永鼎, 男, 1963 年生, 上海人, 汉族, 上海海洋大学教授, 硕士, 研究方向为动力系统参数匹配, 车辆工程。

*** 李 恒 (通信作者), 男, 1995 年生, 山东德州人, 汉族, 上海海洋大学硕士研究生, 研究方向为动力系统参数匹配。

表 1 电动物流车相关参数

Tab.1 Related parameters of electric logistics vehicles

车辆参数 Vehicle parameters	参数值 Parameter value
长×宽×高 Length × width × height/mm ³	5400×1995×2360
整备质量(不含电池) Curing quality (Without battery)/kg	1 880
满载质量(不含电池) Full load quality (Without battery)/kg	3 480
车轮滚动半径 Wheel rolling radius/mm	364
滚动阻力系数 Rolling drag coefficient	0.015
迎风面积 Frontal area/m ²	3.5
轴距 Wheelbase/mm	3 250
风阻系数 Wind resistance coefficient	0.4
机械系统传动效率 Mechanical system transmission efficiency	0.97

电动物流车通常需要具备一定的性能,城市间的物流工况以高速公路为主,结合路况可设定基本性能要求如表 2 所示。

表 2 电动物流车性能要求

Tab.2 Performance requirements of electric logistics vehicles

性能参数 Performance parameter	参数值 Parameter value
最高车速 Maximum speed/(km/h)	≥120
最大爬坡度 Maximum grade	≥20%(25 km/h)
0 km/h~100 km/h 加速时间	
0 km/h~100 km/h acceleration time/s	≤19
续航里程(60 km/h)	
Recharge mileage(60 km/h)/km	≥300

1.2 驱动电机参数匹配

驱动电机是电动物流车的唯一动力源,因此电机的参数匹配对电动物流车的性能有很大影响^[4]。驱动电机的主要参数包括额定功率和峰值功率,额定转矩和最高转矩,额定转速及最大转速^[5]。因电动物流车行驶过程中所受阻力与一般车辆相同,故采用一般车辆的动力计算方式进行初步设计。

1.2.1 电机额定功率和峰值功率匹配

驱动电机的峰值功率一般情况下基于电动车的最高车速 $v_{\max}$, 加速时间 t , 以及最大爬坡度 $\alpha_{\max}$ 确定。

(1) 根据车辆最高速度确定最大功率^[6]

车辆在最高车速行驶时,行驶阻力主要受车轮滚动阻力及车身空气阻力的影响,此时功率为

$$P_{\max 1} = \frac{v_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (1)$$

式中, η_t 为传动系统效率; f 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; A 为迎风面积, m²; $v_{\max}$ 为最高车速, km/h; m 为车辆含电池满载质量,其中预设电池质量为 600 kg。

基于表 2 的要求,将表 1 中的参数代入,计算可得

$$P_{\max 1} = 53.37 \text{ kW}$$

(2) 根据车辆加速时间确定最大功率

车辆在最大加速度加速时,主要受到加速阻力,车轮的滚动摩擦力以及车身的迎风阻力的影响,此时的

功率为

$$P_{\max 2} = \frac{1}{3600t_a\eta_t} \left(\delta m \frac{v_t^2}{2\sqrt{t_a}} + mgf \frac{v_t}{1.5t_a} + \frac{C_D A v_t^3}{21.15 \times 2.5t_a} \right) \quad (2)$$

式中, t_a 为汽车加速时间, s; v_t 为汽车加速末速度, km/h; δ 为旋转质量转换系数, 取为 1.04^[7]。

基于表 2 的要求,将表 1 中的参数代入,计算可得

$$P_{\max 2} = 84.35 \text{ kW}$$

(3) 根据车辆最大爬坡度确定最大功率

车辆在爬坡过程中,其受力情况主要为车轮的摩擦阻力,爬坡阻力以及车身的迎风阻力,此时的功率为

$$P_{\max 3} = \frac{v_{\alpha}}{3600\eta_t} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A v_{\alpha}^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

式中, v_{α} 为最大爬坡度时速度, km/h; $\alpha_{\max}$ 为最大爬坡度, $\alpha_{\max} = \arctan i$ 。

基于表 2 的要求,将表 1 中的参数代入,计算可得

$$P_{\max 3} = 60.65 \text{ kW}$$

显然,驱动电机必须满足如下要求^[8]

$$P_{\max} \geq [P_{\max 1}, P_{\max 2}, P_{\max 3}] \quad (4)$$

选择 $P_{\max} = 100 \text{ kW}$ 。

初步确定电动机的额定功率为 50 kW,峰值功率为 100 kW。

为了验证 50 kW 额定功率能够满足满载时要求,进行以下参数验证。

根据整车性能要求,最高车速应大于等于 120 km/h,因电机具有一定的过载能力,故本文采用最高车速的 95% 来计算额定功率,确保电机额定功率满足行车要求

$$P_{\text{额}} = \frac{v_m}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_m^2}{21.15} \right) \quad (5)$$

式中, v_m 为最高车速的 95%, 即 $v_m = 120 \text{ km/h} \times 95\% = 114 \text{ km/h}$ 。

计算可得 $P_{\text{额}} = 47.66 \text{ kW}$, 验证表明额定功率 50 kW 满足要求。

1.2.2 电机额定转矩与最高转矩的选择

结合资料及查阅文献[9-10],确定驱动电机的最大转速为4 000 r/min,额定转速为1 500 r/min。

电动机的额定功率为

$$T_{\text{额}} = 9550 \frac{P_{\text{额}}}{n_{\text{额}}} \quad (6)$$

计算可得

$$T_{\text{额}} \approx 318.33 \text{ N} \cdot \text{m}$$

取 $T_{\text{额}} = 318 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

电动机的过载系数

$$\lambda = P_{\text{max}}/P_{\text{额}} = 2$$

电动机的最大转矩为

$$T_{\text{max}} = \lambda T_{\text{额}} \quad (7)$$

计算可得

$$T_{\text{max}} \approx 636.67 \text{ N} \cdot \text{m}$$

因此可取 $T_{\text{max}} = 637 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

1.2.3 电机额定电压的选择

额定电压是电动机的一项重要参数,额定电压越大,在同等功率下的额定电流越小,对元器件的要求也越低,但与此同时,需要串联更多的单体电池,意味着各单体电池的差异带来的不稳定性也随之增加。反之,额定电压越低,放电电流也越大,对元器件的要求也越高,电路的能量损耗也越大。结合驱动电机的功率,电动机的额定电压选为538 V。

综合前文的各项分析,电动机的各项基本参数如表3。

表3 电动机基本参数

Tab.3 Basic parameters of the motor

参数名称 Parameter name	参数值 Parameter value
额定功率 Rated power/kW	50
峰值功率 Peak power/kW	100
额定转矩 Rated torque/(N·m)	318
最大转矩 Maximum torque/(N·m)	637
额定转速 Rated speed/(r/min)	1 200
最大转速 Maximum speed/(r/min)	4 000
额定电压 Rated voltage/V	538

1.3 传动比参数匹配

1.3.1 最小传动比

最小传动比通常根据电动汽车最高车速及电机最大转速来确定

$$i_{\text{min}} = 0.377 \frac{n_{\text{max}}}{v_{\text{max}}} r \quad (8)$$

式中, n_{max} 为最大转速, r/min; v_{max} 为最高车速, km/h; r 为车轮滚动半径, m。

代入计算可得

$$i_{\text{min}} \leq 4.57$$

1.3.2 最大传动比

最大传动比通常根据最大爬坡度及最大扭矩决定

$$i_{\text{max}} = \frac{mg(f \cos \alpha_{\text{max}} + \sin \alpha_{\text{max}})}{T_{\text{max}} \eta_t} r \quad (9)$$

式中, T_{max} 为最大扭矩, N·m; η_t 为传动系统机械传动效率。

代入计算可得

$$\begin{cases} i_{\text{max}} \geq 3.97 \\ q = \frac{i_{\text{max}}}{i_{\text{min}}} \approx 0.87 \end{cases} \quad (10)$$

因为 $q < 1$, 所以仅需一个主减速器即可同时满足最大爬坡度, 最高车速等要求^[11-12], 选取 $i = i_{\text{max}} = i_{\text{min}} = 4.39$ 。

1.4 电池组参数设计

锂电池因具有较高的能量密度, 使用寿命长等优点而普遍作为电动车电池组的电池单体。其中18650型钴酸锂电池单体一致性好, 技术成熟且成本较低, 因此选用该电池作为动力电池组的单体电池。该型号单体电池标准电压 $U_{\text{单}} = 3.7 \text{ V}$, 标准容量 $C_{\text{单}} = 2000 \text{ mAh}$, 标准质量 $m_{\text{单}} = 45 \text{ g}$ 。

电池组电压应与驱动电机电压相匹配, 因此电池组串联个数 $N_{\text{串}} = U_{\text{标}}/U_{\text{单}} = 145$ 。

电池组的总容量应满足电动车的行驶里程的需求, 在恒定速度为 $v_{\text{恒}} = 60 \text{ km/h}$ 的工况下, 电动车的总功率为

$$P_{\text{恒}} = \frac{1}{3600 \eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\text{恒}}^2}{21.15} \right) v_{\text{恒}} \quad (11)$$

在恒速下车辆行驶里程与车辆消耗总能量的关系为

$$W_{\text{恒}} = P_{\text{恒}} t = P_{\text{恒}} (S/v_{\text{恒}}) \quad (12)$$

代入数据得 $W_{\text{恒}} \approx 72.00 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

根据锂电池的结构和特点, 单体电池串并联后的总能量应满足

$$C_{\text{总}} \geq \frac{1000 W_{\text{恒}}}{U_{\text{额}} \xi_{\text{SOC}}} \quad (13)$$

式中, ξ_{SOC} 为电池组有效电容系数, 取 $\xi_{\text{SOC}} = 0.8$ 。

代入数据, 解得 $C_{\text{总}} \geq 167.28 \text{ A} \cdot \text{h}$ 。

最终选取动力电池的容量 $C_{\text{总}} = 168 \text{ A} \cdot \text{h}$, 动力电池的组合方式选为84并145串, 共12 180块单体电池。

电池组总质量为 $m_{\text{电}} = N m_{\text{单}} = 548.1 \text{ kg}$, 小于预设质量, 故前述功率计算满足要求。

车辆含电池满载实际质量为 $m = 4 028.1 \text{ kg}$ 。

2 Cruise 建模与仿真

2.1 整车模型的建立

Cruise 软件可以用于车辆的动力性, 经济性的仿

真,用户可以根据不同的模块建立不同布置结构的模型,可以计算并优化车辆的各项性能^[13]。

将电动车的各模块通过电气或机械进行连接,将相应数据导入各模块中,建立的仿真模型如图 1 所示。

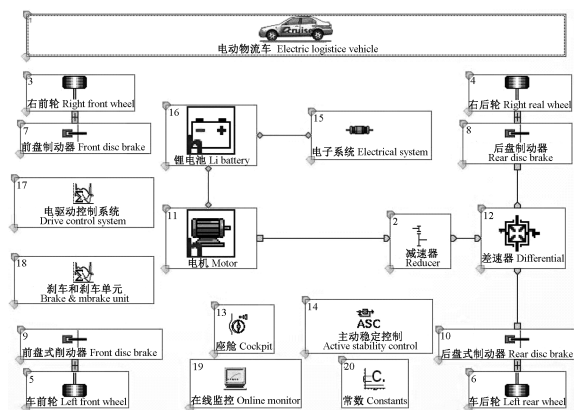


图 1 电动物流车整车模型

Fig.1 Electric vehicle model

2.2 仿真结果分析

2.2.1 最高车速分析

基于 Cruise 软件仿真分析,初步参数设计车辆的最高车速曲线如图 2 所示。车辆满载情况下最高速度为 136.44 km/h,满足最高车速至少为 120 km/h 的设计要求。

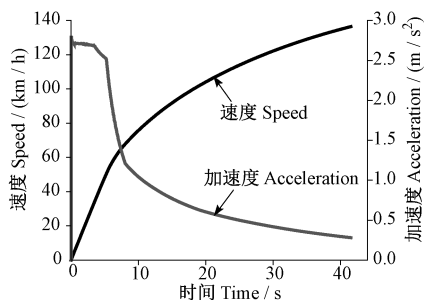


图 2 最高车速曲线

Fig.2 Maximum speed curve

2.2.2 加速性能分析

因电动物流车的主要行驶路况为城市路况,经常需要起停等操作,因此汽车的加速性能是一项重要的参数指标,如图 3 所示为基于 Cruise 模拟仿真汽车加速曲线,0 km/h~100 km/h 加速时间为 18.22 s,满足设计要求的 0 km/h~100 km/h 加速时间小于 20 s。

2.2.3 爬坡性能分析

汽车的爬坡性能也是汽车的一项重要参数指标^[14],图 4 为汽车爬坡性能仿真模拟曲线,可以看出汽车在 25 km/h 的车速下,爬坡坡度为 28.81%,满足设计要求。

2.2.4 续航里程分析

电动物流车的续航里程是评价其经济性能的一项

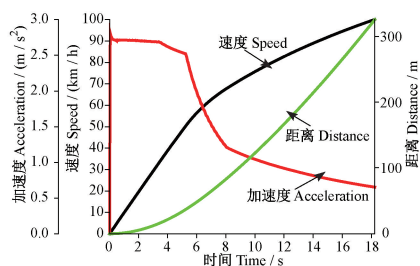


图 3 0 km/h~100 km/h 加速性能曲线图

Fig.3 0 km/h~100 km/h acceleration performance curve

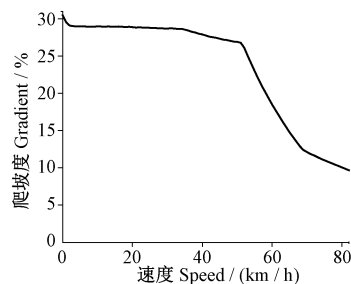


图 4 爬坡性能曲线

Fig.4 Climbing performance curve

重要指标,图 5 为电动物流车在 60 km/h 等速工况下的仿真曲线。可以看出其在该工况下的续航里程达到了 307.19 km,满足设计要求。

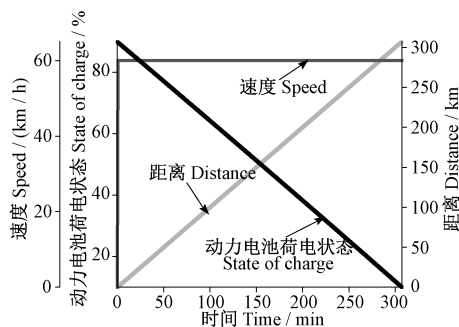


图 5 60 km/h 等速续航里程曲线

Fig.5 60 km/h constant speed range curve

2.2.5 NEDC 工况下 SOC 变化分析

图 6 为基于 Cruise 软件模拟汽车在 NEDC(新标欧洲循环测试)工况运行条件下的 SOC 变化曲线。从图中可以看出,在汽车运行速度较低的情况下,汽车耗电量相对比较平稳。在汽车运行速度较高的情况下,电量消耗比较大。

3 电动物流车动力系统优化

电动物流车动力系统的优化是非线性、多目标的优化问题。遗传算法是模仿达尔文生物进化理论出现的优化方法,该优化方法非线性、全局性和通用性等特点与解决该优化问题相符^[15-16]。

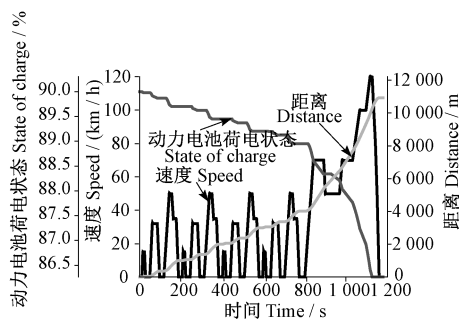


图6 NEDC 工况曲线

Fig.6 NEDC working condition curve

3.1 优化变量的选取

选取主减速器的传动比、电池并联个数作为优化变量

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T = [i_{\text{传}}, N_{\text{并}}]^T \quad (14)$$

3.2 目标函数的建立

(1) 动力性优化目标

选取最大爬坡度作为电动物物流车的动力性优化目标

$$i = \tan(\arcsin \frac{21.15Ti_{\text{传}}\eta_1 - 21.15mgfr - C_DAv_\alpha^2}{21.15rmg}) \quad (15)$$

(2) 经济性优化目标

纯电动物流车的经济性是评价车辆性能的一个重要指标,本文选取等速 60 km/h 工况的续航里程作为经济性优化目标

$$L = \frac{76140 C_{\text{总}} \eta_1 \eta}{21.15mgf + C_DAv_{\text{恒}}^2} \quad (16)$$

将多目标函数转换为单目标函数

$$f(\mathbf{X}) = w_1 f(x_1) + w_2 f(x_2) \quad (17)$$

式中, w_1 为动力性因子, $f(x_1)$ 为动力性目标函数, w_2 为经济性因子, $f(x_2)$ 为经济性目标函数。

(3) 约束条件的建立

本文将最高车速, 0 km/h ~ 100 km/h 加速时间, 最大传动比定为约束。

最高车速应大于性能要求的车速

$$g_1(\mathbf{X}) = v_{\text{max}} - v \leq 0 \quad (18)$$

0 km/h ~ 100 km/h 加速时间应小于性能要求的时间。

$$g_2(\mathbf{X}) = t_0 - t_1 \leq 0 \quad (19)$$

最大传动比应满足附着条件

$$g_3(\mathbf{X}) = \frac{T_m i_{\text{max}} \eta_1}{r} - F\phi \leq 0 \quad (20)$$

(4) 约束模型转换

为了能够通过遗传算法尽情求解, 需要将上述优化约束问题转换为无约束问题。本文通过外点罚函数

法对其进行转换

$$(X, r^{(i)}) = f(X) + r^{(i)} \sum_{z=1}^3 \{ \max[0, g_z(X)] \}^3 \quad (21)$$

式中, $r^{(i)}$ 为惩罚因子, 该数列随迭代次数递增; $g_z(X)$ 为不等式约束。

3.3 求解结果

将上述无约束的优化问题通过 Matlab 进行程序编写, 利用遗传算法进行求解。

综合考虑动力性优化与经济性优化, 取 $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.5$ 。优化结果如表 4 所示。

表 4 优化结果

Tab.4 Optimization results

参数 Parameter	$i_{\text{传}}$	$N_{\text{并}}$
数值 Value	4.15	88

3.4 优化后参数仿真分析

将优化后的参数输入到 Cruise 中进行仿真, 仿真结果如表 5 所示。仿真表明除最高车速降低了 7.5%, 电动物物流车的加速性能, 爬坡性能以及 60 km/h 续航里程性能均得到了提高。

表 5 优化后仿真结果

Tab.5 Optimized simulation results

车辆参数 Vehicle parameters	原参数 Original parameter	现参数 Current parameter	偏差 Deviation/ %
0 km/h ~ 100 km/h 加速时间 0 km/h ~ 100 km/h acceleration time/s	18.22	17.07	-6.3
最高车速 Maximum speed/ (km/h)	136.44	126.21	-7.5
25 km/h 最大爬坡度 25 km/h maximum grade/%	28.81	30.19	4.8
60 km/h 续航里程 60 km/h recharge mileage/km	307.19	346.51	12.8

4 结论

本文以东风 EM30 为原型, 通过运用相关计算机仿真软件进行参数仿真及优化, 所完成的主要研究总结如下:

1) 结合车辆的基本参数, 根据电动车辆的设计要求, 对电动车的驱动系统, 传动系统以及能源系统进行了参数设计。通过 Cruise 建立车辆模型, 设定计算任务, 对电动车辆的动力性能及经济性能进行设计和仿真。仿真结果显示, 本次参数匹配车辆最高车速, 0 km/h ~ 100 km/h 加速时间, 汽车爬坡度均满足要求。

2) 通过 Matlab 采用遗传算法对相关参数进行优化, 在保证车辆最高速度满足要求的情况下, 电动物

车的加速性能,爬坡性能以及 60 km/h 续航里程性能均得到了提高。

3) 这种通过理论计算与软件仿真相结合的方式,可以减少车辆初期设计的时间及费用成本。同时表明了将遗传算法应用于电动物流车动力系统参数匹配的可行性,为电动物流车动力系统优化提供了新的途径。

参考文献 (References)

- [1] 曹念文,杨丰恺,施建中,等.南京地区低空雾霾气溶胶的拉曼-瑞利-米激光雷达测量[J].应用光学, 2012,33(5):979-984.
CAO NianWen, YANG FengWei, SHI JianZhong, et al. Raman-rayleigh-meter lidar measurement of low-altitude haze aerosol in Nanjing [J]. Applied Optics, 2012,33(5):979-984 (In Chinese).
- [2] 刘江红.纯电动汽车动力传动系统参数的匹配设计[J].汽车工程师, 2018(3):57-58.
LIU JiangHong. Matching design of powertrain parameters for pure electric vehicles [J]. Automotive Technician, 2018(3):57-58 (In Chinese).
- [3] 夕月.新能源汽车:驱动未来新世界[J].绿色中国,2013(16):62-65.
XI Yue. New energy vehicles: Driving the new world of the future [J]. Green China, 2013 (16): 62-65 (In Chinese).
- [4] 袁苑,钱立军,许宏云.基于 Cruise 中型纯电动客车动力匹配仿真[J].农业装备与车辆工程,2012,50(5):15-18.
YUAN Yuan, QIAN LiJun, XU HongYun. Power matching simulation of medium-sized pure electric bus based on CRUISE [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012,50(5):15-18 (In Chinese).
- [5] 刘锦波,张承慧.电机与拖动.2 版[M].北京:清华大学出版社,2015:338.
LIU JinBo, ZHANG ChengHui. Motor and drag. 2nd Edition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015:338 (In Chinese).
- [6] 丁楠楠.城市电动公交客车的动力系统优化匹配与能效分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014:14-17.
DING NanNan. Power system optimization matching and energy efficiency analysis of urban electric bus [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014:14-17 (In Chinese).
- [7] 秦大同,周保华,胡明辉,等.两挡电动汽车动力传动系统的参数设计[J].重庆大学学报,2011,34(1):1-6.
QIN DaTong, ZHOU BaoHua, HU MingHui, et al. Parameter design of two-gear electric vehicle power transmission system[J].Journal of Chongqing University, 2011,34(1):1-6 (In Chinese).
- [8] 刘灵芝,张炳力,汤仁礼.某型纯电动汽车动力系统参数匹配研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2007(5):591-593.
LIU LingZhi, ZHANG BingLi, TANG RenLi. Study on parameter matching of power system of a pure electric vehicle [J].Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2007 (5):591-593 (In Chinese).
- [9] 闫大伟,陈世元.电动汽车驱动电机性能比较[J].汽车电器,2004(2):4-6.
YAN DaWei, CHEN ShiYuan. Comparison of performance of electric vehicle drive motors [J].Automobile Electric Apparatus, 2004(2):4-6 (In Chinese).
- [10] 赵新红,徐新恒.纯电动汽车动力系统参数匹配研究[J].中国战略新兴产业,2018(32):85-86.
ZHAO XinHong, XU XinHeng. Study on parameter matching of pure electric vehicle power system [J]. China Strategic Emerging Industries, 2018(32):85-86 (In Chinese).
- [11] 郭孔辉,姜辉,张建伟.电动汽车传动系统的匹配及优化[J].科学技术与工程,2010,10(16):3892-3896.
GUO KongHui, JIANG Hui, ZHANG JianWei. Matching and optimization of electric vehicle transmission system [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (16): 3892-3896 (In Chinese).
- [12] 谢文泊.纯电动汽车动力匹配与仿真[D].合肥:合肥工业大学,2014:9-11.
XIE WenBo. Power matching and simulation of pure electric vehicles [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014: 9-11 (In Chinese).
- [13] 刘振军,赵海峰,秦大同.基于 Cruise 的动力传动系统建模与仿真分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2005(11):12-15.
LIU ZhenJun, ZHAO HaiFeng, QIN DaTong. Modeling and simulation analysis of power transmission system based on CRUISE [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005(11):12-15 (In Chinese).
- [14] 牛明强,郭兴众,孙骊洲,等.基于 Cruise 的纯电动汽车动力系统参数匹配与仿真[J].安徽工程大学学报,2014,29(3):49-53.
NIU MingQiang, GUO XingZhong, SUN WeiZhou, et al. Parameter matching and simulation of pure electric vehicle power system based on CRUISE [J].Journal of Anhui University of Engineering, 2014, 29(3):49-53 (In Chinese).
- [15] 赵丽娟,范佳艺.基于遗传算法的掘进机截割头多目标优化设计[J].机械强度,2018,40(6):1349-1355.
ZHAO LiJuan, Fan JiaYi. Multi objective optimization design of roadheader cutting head based on genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018,40 (6): 1349-1355 (In Chinese).
- [16] 赵树恩,杨明森,彭光旭.基于 NSGA-II 混合灵敏度分析的白车身轻量化优化设计[J].机械强度,2019,41(4):887-894.
ZHAO ShuEn, YANG MingSen, PENG GuangXu. Lightweight optimization design of BIW based on NSGA-II hybrid sensitivity analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019,41 (4): 887-894 (In Chinese).