

# 纯电动轿车传动系统匹配仿真与优化研究

田 晟, 肖佳将

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 纯电动轿车传动系统参数的合理匹配和优化设计对提高其动力性能和续航里程至关重要。以某款直接挡微型纯电动轿车为研究对象, 根据其动力性能和续航要求, 对动力传动系统的关键部件进行初步的设计匹配; 用 ADVISOR 建立更适应微型纯电动轿车行驶道路情况的组合工况, 在该组合工况下对车辆的动力性和续航里程进行仿真; 在 50 km/h 的等速工况下对其续航里程进行仿真; 为了提高续航里程, 利用遗传算法对传动系传动比进行优化。仿真结果表明, 优化后车辆的续航里程得到了明显提升, 动力性也满足整车性能的要求。

**关键词:** 纯电动轿车; 传动系统; 匹配; ADVISOR 组合工况; 仿真; 优化

中图分类号: U463.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2020)01-0069-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.3073

## Research on Matching Simulation and Optimization of Pure Electric Vehicle Drive System

TIAN Sheng, XIAO JiaJiang

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640 China)

**Abstract:** Reasonable matching and optimizing design of pure electric vehicle are of great significance to improve its dynamic property and endurance mileage. This article takes a certain one-speed transmission mini pure electric vehicle as the research object. According to its dynamics and mileage requirements, the key components of the drive system are preliminary designed and matched. ADVISOR is utilized to establish a combined driving cycle that is more suitable for the road conditions of the mini pure electric vehicle, and simulate its dynamic property and endurance mileage under the constant speed condition of 50km/h independently. Then, this article optimizes the final drive ratio by genetic algorithm. Again, the simulation result shows that the mileage requirements of the optimized vehicle are significantly improved, and the dynamic property also meets the vehicle performance requirements.

**Keywords:** pure electric vehicle; drive system; match; ADVISOR combined driving cycle; simulation; optimization

收稿日期: 2019-03-29

基金项目: 国家留学基金项目(201706155003); 广东省科技计划项目(2015A080803001)。

第一作者: 田晟(1969—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源汽车开发

ORCID: 0000-0002-3119-1730 E-mail: shitian1@scut.edu.cn

引用格式: 田晟, 肖佳将. 纯电动轿车传动系统匹配仿真与优化研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 69-76.

TIAN Sheng, XIAO JiaJiang. Research on Matching Simulation and Optimization of Pure Electric Vehicle Drive System[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2020, 39(1): 69-76.

我国的汽车工业在近年来得到了飞速发展,根据国家统计局最新数据显示,2017年,我国的汽车总产量达到了2 901.81万辆,连续9年位列世界第一。与此同时,高速发展的汽车工业也给中国的能源消耗和环境带来了巨大的挑战。根据中国石油集团经济技术研究院发布的《2017年国内外油气行业发展报告》,2017年,我国石油对外依存度达到67.4%,远高于50%的国际安全水平。另一方面,环境污染问题在我国也变得日益严重。研究表明,在城市空气污染中,汽车尾气是重要来源,特别是在北京和上海这种特大城市,尾气排放是空气污染最主要的来源之一<sup>[1]</sup>。在这种环境下,节能和发展新能源汽车成为解决我国环境问题的关键途径<sup>[2]</sup>。近年来,我国加大了对发展绿色、节能、环保的纯电动汽车的投入力度,纯电动汽车技术得以迅速发展,其性能得到了很大的提高,成本得到了有效的控制。但目前,动力电池寿命等关键技术还没有取得重大突破,所以对传动系统参数的合理匹配和优化是当前条件下提高纯电动汽车动力性和续航里程的最有效途径之一。

## 1 纯电动轿车动力传动系统参数选择

### 1.1 整车参数与性能指标要求

本文所研究的某款直接挡微型纯电动轿车的整车参数与性能指标要求如表1所示。

表1 整车参数与性能指标要求

参数名称	参数值
整备质量/kg	855
满载质量/kg	1 120
旋转质量转换系数	1.05
传动系效率	0.96
滚动阻力系数	0.016
空气阻力系数	0.29
迎风面积/m <sup>2</sup>	2.05
轮胎规格	165/65 R15
轴距/m	2.15
百公里耗电量/(kWh/100 km)	13
最高车速/(km/h)	100
最大爬坡度/%	20
0~50 km/h加速时间/s	10
50 km/h等速工况续航里程/km	251

### 1.2 驱动系统布置形式的选择

纯电动汽车常见的布置形式主要有传统型、无离合器传统型、一体式电驱动、双电机电动轮驱动型、轮毂轮边驱动型、轮毂轮内驱动型等<sup>[3]</sup>。本文选择后轮驱动无离合器传统型布置形式,该布置形式结构简单紧凑,省去了离合器,减轻了动力传动系统的体积和质量,提高了机械传动效率。具体形式如图1所示。

### 1.3 驱动电机参数的选择

根据电机的外特性,电机转速在基速以下输出恒转矩,基速以上输出恒功率,因此电机的额定功率应该满足最高车速的要求,不小于车辆以最高车速行驶时的阻力功率<sup>[4]</sup>。电机峰值功率应不小于车辆在各种行驶工况下最大功率的需求,即应同时满足车辆行驶过程中,最高车速、最大爬坡度和加速时间要求所需的最大功率<sup>[5]</sup>,以保证车辆在任何工况下都能正常行驶。

$$P_1 = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gf}{3\ 600} u_{\max} + \frac{C_D A}{76\ 140} u_{\max}^3 \right) \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gf \cos \alpha}{3\ 600} u_{\alpha} + \frac{C_D A}{76\ 140} u_{\alpha}^3 + \frac{G \sin \alpha}{3\ 600} u_{\alpha} \right) \quad (2)$$

$$P_3 = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gf}{1.5 \times 3\ 600} u_m + \frac{C_D A}{2.5 \times 76\ 140} u_m^3 + \frac{\delta m u_m^2}{2 \times 3\ 600 t_m} \right) \quad (3)$$

$$P_e \geq P_1, P_{\max} \geq \max\{P_1, P_2, P_3\}, P_e = P_{\max} / \lambda \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $P_1$ 为满足最高车速的所需功率; $P_2$ 为满足最大爬坡度的所需功率; $P_3$ 为满足加速时间的所需功率,引用了经验公式<sup>[6]</sup>; $\eta_T$ 为传动系效率; $G$ 为满载重量,N; $f$ 为滚动阻力系数; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为迎风面积,m<sup>2</sup>; $\alpha = \arctan i$ , $i$ 为最大爬坡度,取20%; $u_{\alpha}$ 为爬坡时的车速,取20 km/h; $\delta$ 为旋转质量转换系数; $P_e$ 为电机额定功率; $P_{\max}$ 为峰值功率; $\lambda$ 为过载系数<sup>[7]</sup>。

### 1.4 传动系传动比的选择

纯电动汽车以最高车速行驶,传动比最小,满足最大爬坡度时,传动比最大<sup>[8]</sup>,所以传动系传动比的取值范围应满足以下条件:

$$i_{\min} \leq 0.377 \frac{n_{\max} r}{u_{\max}} \quad (5)$$

$$i_{\max} \geq \frac{G(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) r}{\eta_T T_{\max}} \quad (6)$$

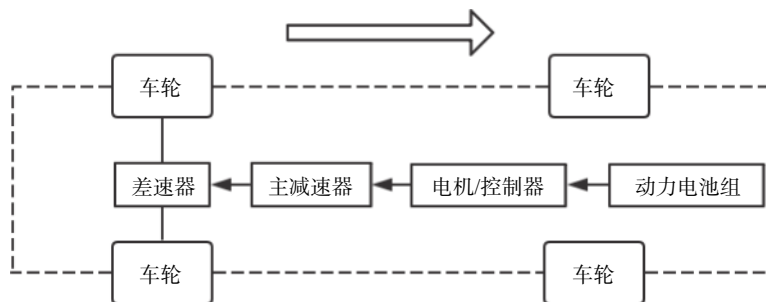


图 1 驱动系统布置形式

式中： $n_{max}$ 为电机的峰值转速，r/min； $r$ 为车轮的滚动半径，m； $T_{max}$ 为电机的最大输出转矩，N·m； $i$ 为传动系传动比即主减速器传动比，传动系传动比  $i$  应在  $i_{max}$  与  $i_{min}$  之间。

### 1.5 动力电池数量的选择

动力电池是纯电动汽车的能量源，因此动力电池参数的选取必须满足车辆续航里程和电机峰值功率的要求<sup>[9]</sup>。

$$n = \max \{n_1, n_2\} \quad (7)$$

式中： $n_1 = P_{emax} / (P_{bmax} \eta_e \eta_{ec})$ ，为满足电机峰值功率所需电池数量； $n_2 = LW_1 \times 1000 / C_b V_b$ ，为满足续航里程所需电池数量； $P_{bmax}$ 为单块电池最大输出功率，1.5 kW； $\eta_e$ 为电机的工作效率； $\eta_{ec}$ 为控制器的工作效率， $\eta_e \eta_{ec}$ 取 0.92； $L$ 为车辆的续航里程，km； $W_1$ 为车辆行驶单位距离所消耗的能量，kWh； $C_b$ 为单体电池的标称容量，100 Ah； $V_b$ 为单体电池的额定电压，3.2 V。

### 1.6 纯电动轿车参数匹配结果

由式(1)—(7)分析计算得到动力传动系统关键部件参数初步匹配结果如表 2 所示。

表 2 纯电动轿车动力传动系统参数匹配结果

传动系统	参数名称	参数值
永磁同步电机	系统输入电压范围/V	280 ~ 460
	额定电压/V	328
	额定/峰值功率/kW	35/70
	额定/峰值转速/(r/min)	3 000/8 000
	最大转矩/(N·m)	280
传动系	主减速器传动比	8.19
	额定电压/V	3.2
动力电池	标称容量/Ah	100
	电池数量	102

## 2 基于 ADVISOR 的纯电动轿车建模与仿真

### 2.1 仿真模型的建立

ADVISOR(高级车辆仿真器)是基于 MATLAB/Simulink 平台的汽车仿真软件，可对车辆的动力性和经济性进行仿真分析<sup>[10]</sup>，软件中汽车的各个部件都用图标表示。本文所选择的直接挡纯电动轿车取消了变速器，在 ADVISOR 中的仿真结构如图 2 所示。

ADVISOR 采用后向仿真为主、前向仿真为辅的混合仿真方法。其仿真流程为：首先进行后向仿真，并考虑系统各元件的效率和功率限制等因素，根据动力性指标计算出车辆所需的驱动力，逆着功率流方向求出车轮所需提供的转速和转矩，逐级反推出动力电池需提供的功率；然后在前向仿真过程中，根据电池提供的实际功率顺着功率流方向推算出实际车速<sup>[11]</sup>。

根据前面对动力传动系统关键部件的设计匹配，在 ADVISOR 中选择相应的部件仿真模型建立起纯电动轿车的整车仿真模型，如图 3 所示。同时根据匹配的参数对相应部件 m 文件进行修改。

### 2.2 仿真结果

根据整车性能指标要求，对所匹配的纯电动轿车进行动力性和续航里程的仿真。ADVISOR 中内置有多种行驶循环工况，之前的研究多是在单一工况下对汽车性能的仿真。重庆大学刘永刚等综合考虑市区拥堵、城市郊区、高速公路不同道路情况，建立了 6 种工况的综合工况，采用模拟退火粒子群优化算法对混合动力汽车动力系统与控制策略参数进行了优化<sup>[12]</sup>。本文的研究对象为微型纯电动轿车，一般行驶在城市及市郊普通道路，不考虑城市极其拥堵的情况，建立了 CYC\_UDDS、CYC\_

ECE、CYC\_1015 共 3 种典型城市工况的组合行驶循环工况 trip\_association, 以更好地适应微型纯电动轿车不同的城市行驶条件。每个循环的周期为 2 814 s, 行驶距离为 20.13 km, 平均车速为 25.74 km/h。

由图 4 分析可知, 车速在 trip\_association 循环中处于一个动态的变化过程, 车速主要分布在 0 ~ 50 km/h 的区间范围内, 占据了 90% 左右, 尤其是在 35 km/h 附近。这说明该工况是基于微型纯电动轿车大多数时段在良好城市道路条件下以较低的车速行驶, 考虑到纯电动轿车的续航问题。0 ~ 7.5 km/h 的车速占到整个循环车速的 30% 左右, 主要是考虑到车辆起步、等待红灯、避让行人、拥堵等情况。

对 trip\_association 循环工况下的整车动力性和续航里程进行仿真, 设定仿真步长为 1 s, 循环次

数为 10, 设定加速和爬坡测试参数, 得到仿真结果如图 5 所示。

由于本文的电机等参数是以预期最高车速 100 km/h 选择, 在该工况下仿真获得的最高车速为 108.9 km/h, 满足车辆的动力性要求。可以看出, 在前 7 个循环, 车速均能达到循环工况所设定的车速, 从第 8 个循环开始一直到电池电量耗尽, 车辆的动力性开始显著变差, 这主要是因为电池 SOC 的降低。在图 5(a) 中实际车速与工况设定的车速之差即为曲线的蓝色部分。由图 5(b) 可以看出当电池 SOC 下降到 10% 左右时, 曲线开始变缓, 电池的剩余容量不足以维持工况所需的车速, 到最后工况车速跟随曲线变差。所以在实际中电动汽车电池一般放电到 SOC 为 10% 左右即需要充电, 以保证车辆的动力性。

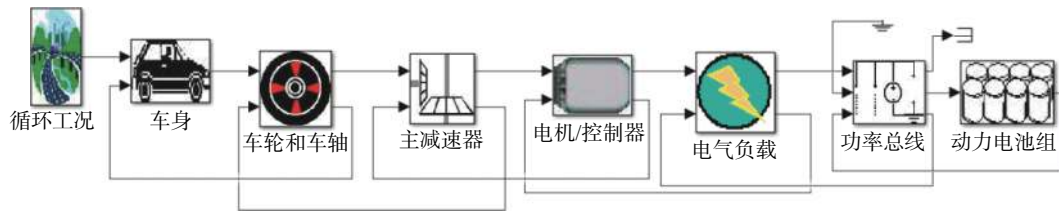


图 2 直接档纯电动轿车 ADVISOR 仿真结构

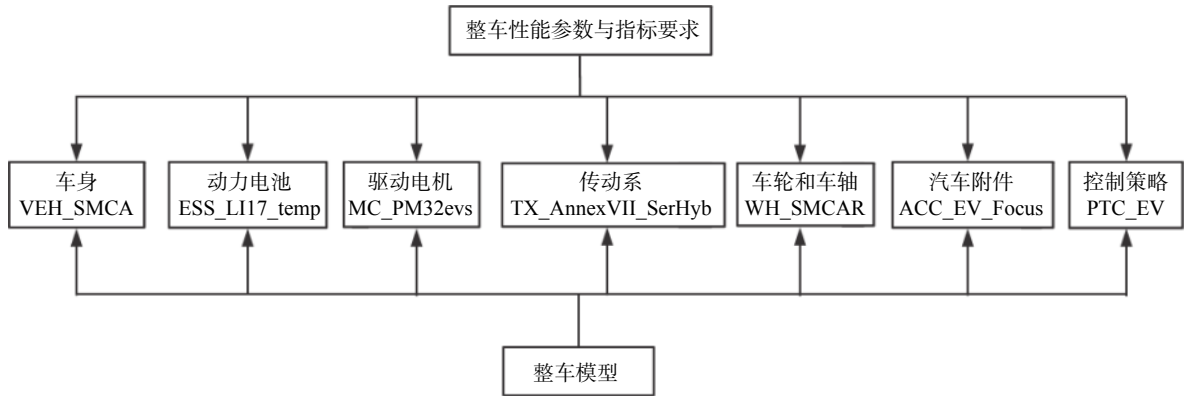


图 3 直接档纯电动轿车仿真模型组成示意图

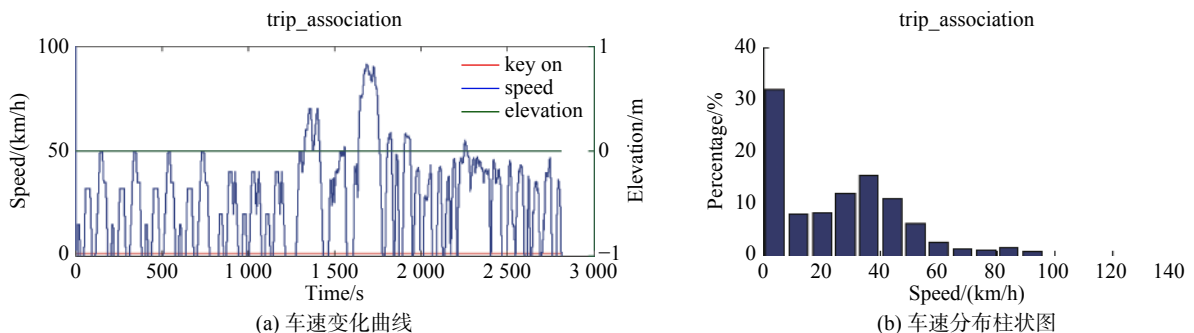


图 4 trip\_association 循环工况曲线

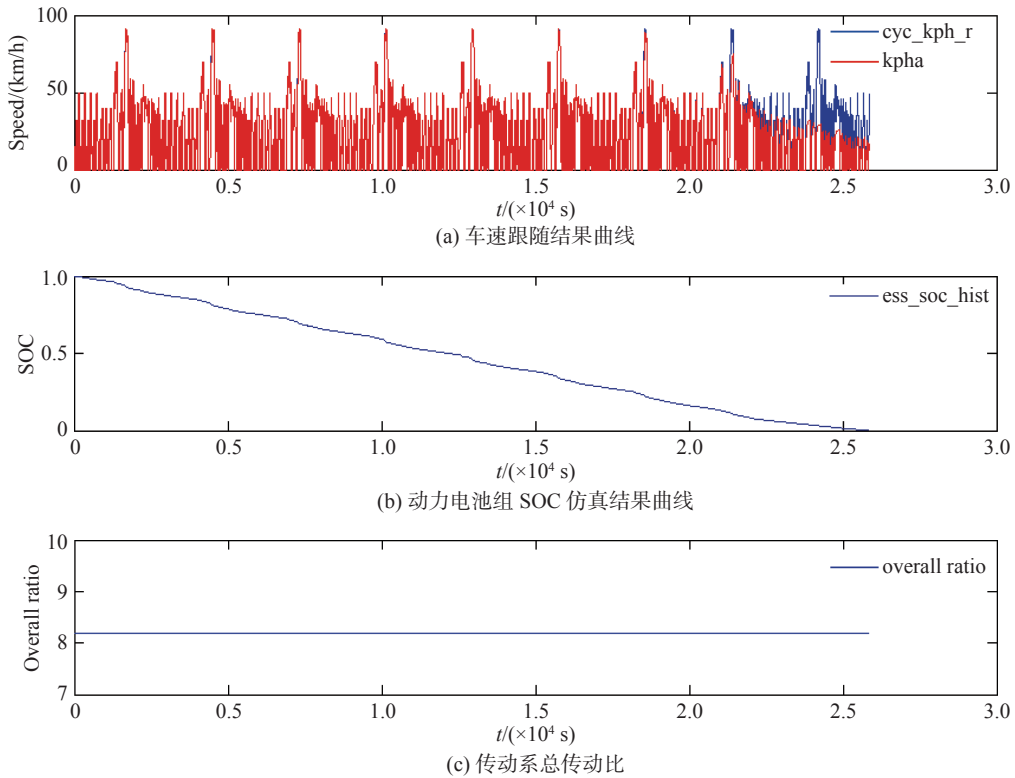


图 5 trip\_association 循环工况仿真结果

对 50 km/h 等速工况下车辆的续航里程进行仿真,选择 CYC\_CONSTANT\_45 工况,并将其 m 文件中的速度修改为 vel = 31.068 559 6,该工况

的每个循环周期为 50 s,行驶距离为 0.69 km,设定仿真步长为 1 s,循环次数为 500,仿真结果如图 6 所示。

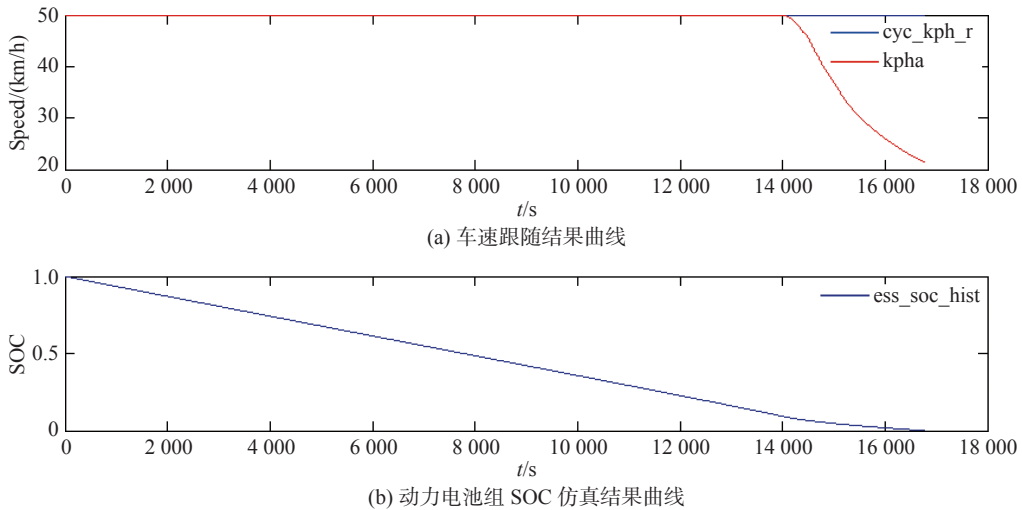


图 6 50 km/h 等速工况仿真结果

在图 6(a)中,车辆以 50 km/h 行驶 14 000 s 左右后,车速开始显著降低,对应图 6(b)中 SOC 曲线下开始变缓,其原因如图 5 分析,主要因为电池能量不足无法使车辆维持 50 km/h 的车速。整车性能仿真结果如表 3 所示。

### 3 基于遗传算法的传动系传动比优化

续航里程不足是目前限制纯电动汽车应用范围的主要因素,且表 3 中的车辆以 50 km/h 等速行驶时的续航里程未能达到要求,因此对车辆的续航里程进行优化。遗传算法是目前动力传动系统参

表3 整车性能仿真结果

参数名称	仿真结果
最高车速/(km/h)	108.9
最大爬坡度/%	24
0~50 km/h加速时间/s	8.9
trip_association循环工况续航里程/km	172.6
50 km/h等速工况续航里程/km	220.6

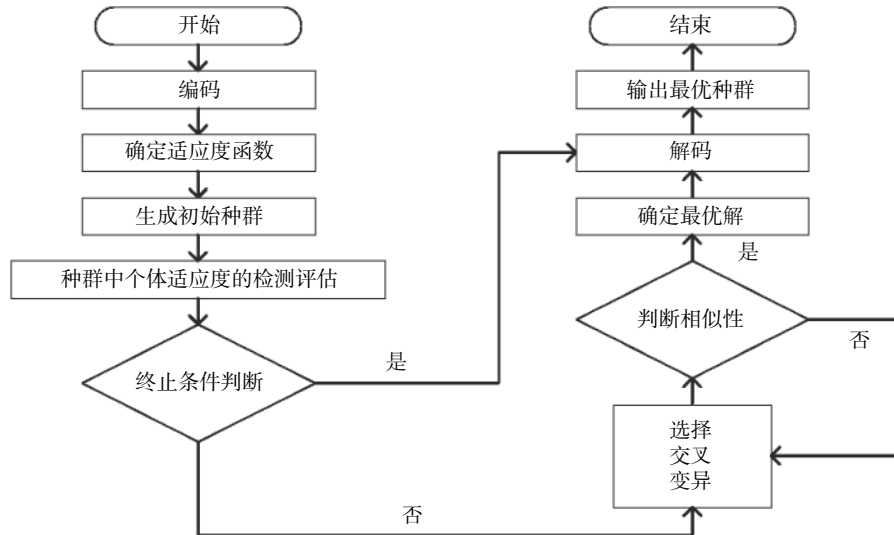


图7 遗传算法基本流程图

### 3.1 确定设计变量

纯电动汽车动力传动系统在电机和电池参数确定后,传动系传动比对整车性能有较大影响,因此优化设计的变量为主减速器的传动比。

$$x = i_0 \quad (8)$$

### 3.2 确定目标函数

本文采用外点罚函数法进行约束处理,由于罚函数法建立的目标函数是对目标函数求极小值,因此需要对续航里程取倒数,所以目标函数的表达式为

$$f(i_0) = 1/L \quad (9)$$

能量消耗可用下式表达<sup>[15]</sup>:

$$W_c = 1000 \sum P_i t_i / \eta \quad (10)$$

$$P_i = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gf}{3600} u_i + \frac{Gi}{3600} u_i + \frac{C_D A}{76140} u_i^3 + \frac{\delta m u_i}{3600} \frac{du}{dt} \right) \quad (11)$$

式中:  $W_c$ 为单个 CYC\_CONSTANT\_45 等速工况所消耗的电能;  $u_i$ 为车辆在不同行驶状态下的行驶车速, m/s;  $P_i$ 为对应于  $u_i$  下的功率消耗, kW。

动力电池组的总能量  $W$  (kWh) 与单体电池容

数匹配优化的常用方法之一,遗传算法可以同时处理多个个体,有效避免了搜索时陷于局部最优解,因此具有良好的全局搜索性能<sup>[13]</sup>,其基本流程如图7所示。

遗传算法可以用来解决普通的优化算法不适用的优化问题,例如那些目标函数不连续的、不可微分的、随机的、非线性的问题<sup>[14]</sup>。

量之间的关系为<sup>[16]</sup>

$$W = 10^{-3} C_b V_b n \eta_{DOD} \quad (12)$$

式中,  $\eta_{DOD}$  为放电深度,取 0.9。

当车辆以 50 km/h 等速行驶时,续航里程为

$$L = Wu\eta/P \quad (13)$$

式中:  $P$  为 CYC\_CONSTANT\_45 等速工况消耗的功率;  $u = 50$  km/h。

### 3.3 确定约束条件

1) 动力性约束,包括车辆的最高车速、最大爬坡度和加速时间的约束。在通常情况下,一般当车辆的最大爬坡度和加速时间都满足预期指标要求时,最高车速也能满足预期的要求<sup>[17]</sup>,因此这里不再对最高车速进行约束。根据车辆驱动力与行驶阻力平衡方程式

$$F_t = \sum F = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (14)$$

爬坡时忽略车辆加速阻力  $F_j$ , 由式(14)计算获得爬坡度为

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{F_t - F_f}{mg \sqrt{1 + f^2}} \right) + \arctan(f) \quad (15)$$

所以,爬坡度约束条件为

$$g_1(i_0) = -\arcsin\left(\frac{F_t - F_f}{mg\sqrt{1+f^2}}\right) - \arctan(f) + 20\% \leq 0 \quad (16)$$

汽车在起步加速时,忽略坡度阻力 $F_i$ ,则有:

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_t - F_f - F_w}{\delta m} \quad (17)$$

$$T = \int_{u_0}^{u_i} \frac{\delta m}{F_t - F_f - F_w} dt \quad (18)$$

所以,加速时间约束条件为

$$g_2(i_0) = \int_0^{50} \frac{\delta m}{F_t - F_f - F_w} dt - 10 \leq 0 \quad (19)$$

2)续航里程的约束,即 50 km/h 等速工况下的约束,其约束条件为

$$g_3(i_0) = 251 - \frac{W}{W_c} S \leq 0 \quad (20)$$

式中, $S$ 为单个 CYC\_CONSTANT\_45 等速工况的行驶距离。

同时还应对传动比进行约束,传动比的上下限由式(5)和式(6)获得。

$$2.58 \leq i_0 \leq 8.98 \quad (21)$$

由于传动比的约束是数值区间上的约束,可直接在 MATLAB 遗传算法工具箱设定最小值和最大值。

### 3.4 传动系传动比优化结果

综合整理式(8)—(20)可建立遗传算法优化的适应度函数:

$$F(i_0) = f(i_0) + \sigma \sum_{j=1}^3 g_j(i_0) \quad (22)$$

式中, $\sigma$ 为惩罚因子, $\sigma > 0$ 且 $\sigma \rightarrow +\infty$ 。

利用 MATLAB 遗传算法工具箱,得到优化后的传动系传动比即主减速器传动比 $i = i_0 = 4.358$ 。遗传算法优化结果如图 8 所示。

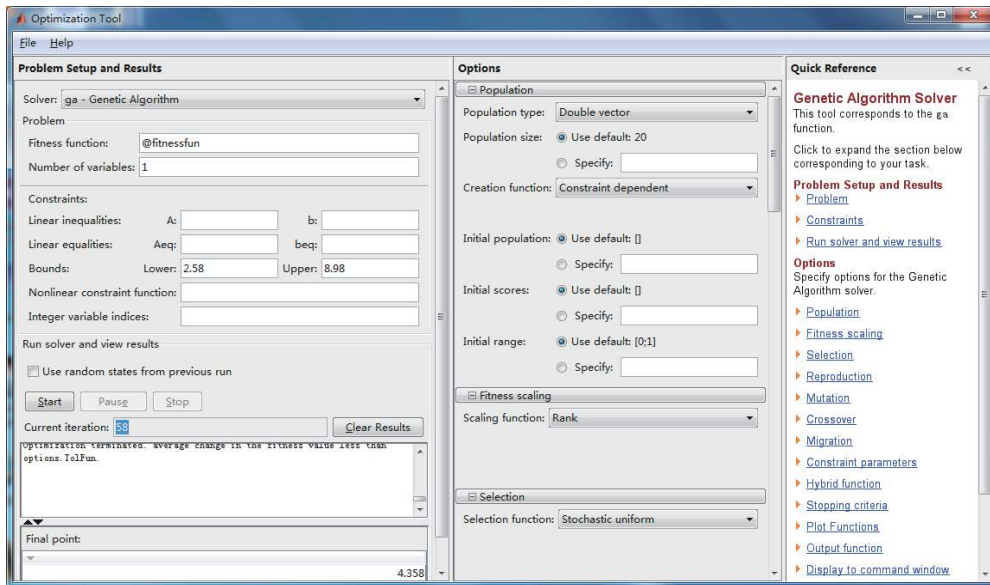


图 8 遗传算法优化结果

修改 ADVISOR 模型 m 文件中的相关参数并再次进行仿真,对比优化前后的仿真结果得到表 4 和表 5。

表 4 优化前后整车性能仿真结果对比

参数名称	优化前仿真结果	优化后仿真结果
最高车速/(km/h)	108.9	111.1
最大爬坡度/%	24	22.6
0~50 km/h加速时间/s	8.9	10
trip_association循环工况续航里程/km	172.6	192.7
50 km/h等速工况续航里程/km	220.6	262.5

表 5 优化前后能量利用效率对比

能量利用效率	优化前	优化后
储能装置	0.81/-	0.82/-
电机及控制器	0.74/0.47	0.83/0.68
主减速器	0.96/0.96	0.96/0.96
车轮及车轴	0.93/1.01	0.93/1.01
总能量利用效率	0.355	0.404

注:表5中“A/B”表示“驱动模式下的能量利用效率/制动模式下的能量利用效率”

由表 4 可知,虽然优化后的爬坡性能和加速性能比优化前有很小幅度的下降,但优化后的最高车

速比优化前提升了 2.2 km/h(约 2%), 超过整车动力性要求 11.1 km/h; trip\_association 循环工况下的续航里程比优化前提升了 20.1 km(约 11.6%); 50 km/h 等速行驶的续航里程比优化前提升了 41.9 km(约 19%), 超过续航要求 11.5 km。

对表 5 进行分析, 车辆在行驶过程中, 有驱动和制动两种模式, 由于制动模式下回收能量, 所以电池不存在能量利用效率。制动能量回收过程的能量回收以车轮处的制动系为起点, 车轮/车轴处的能量损耗为负, 所以其能量利用效率大于 1。当车辆驱动加速时, 电机处于恒转矩区且输出较大转矩, 当加速到一定车速后, 电机输出的转矩减小, 此时电机运行处于恒功率区。当车辆制动减速时, 电机输出反方向的转矩。在驱动模式下, 电机需要较大的输入功率, 因此在电机输出相同功率的情况下, 传动比优化后需要的输入功率更小, 对应电机损耗的功率也就越小。在制动模式下, 在回收的制动能量相同的情况时, 优化后电机输出的能量更大, 在能量传输过程中损耗的能量更小。因此, 优化后的电机/控制器能量利用效率有明显提升, 总能量利用效率也明显提升, 这表明车辆续航里程的提高。

## 4 结论

1) 以某款直接挡微型纯电动轿车为研究对象, 结合对其动力传动系统关键部件的性能研究, 根据车辆的动力性和续航要求, 对驱动电机、传动系、动力电池主要参数进行了匹配。

2) 利用 ADVISOR 建立整车模型, 并建立了更适应微型纯电动轿车城市道路行驶情况的组合工况 trip\_association, 在组合工况和 50 km/h 的等速工况下进行仿真, 验证参数匹配的合理性。

3) 基于遗传算法以提高续航里程为目标对初步匹配的传动系传动比进行优化, 获得最佳传动比。再次仿真显示, 续航里程有了较明显的提升, 优化后的整车动力性和续航里程均能较好地满足要求, 电机/控制器能量利用效率和总能量利用效率都有所提高, 说明本文对动力传动系统的参数匹配与优化方法是合理的。

## 参 考 文 献

- [1] WANG Y, LI L, CHEN C, et al. Source apportionment of fine particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai[J]. *Geophys Res: Atmospheres*, 2014, 119(4): 1903 – 1914.
- [2] LIU Z W, HAO H, CHEN X, et al. Critical issues of energy efficient and new energy vehicles development in China[J]. *Energy Policy*, 2018(115): 92 – 97.
- [3] 赵广宣. 纯电动汽车动力传动系统匹配与整体优化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [4] HUANG M Y, WEN P P, ZHANG Z, et al. Research on hybrid ratio of fuel cell hybrid vehicle based on ADVISOR[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(36): 16282 – 16286.
- [5] PROCHAZKA P, PAZDERA I, VOREL P, et al. Design of small electric car[C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. [S.l]: [s.n], 2012: 359-364.
- [6] 曾小华, 王庆年, 宋大风. 汽车功率需求的简单求法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 43(1): 613 – 617.
- [7] XU C H, NIU J G, PEI F L. Design and simulation of the power-train system for an electric vehicle[C]// 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce. [S.l]: [s.n], 2011: 3868-3871.
- [8] LIU X Y, TIAN H J. 3 tons pure electric vehicles power system design based on cruise[C]// MATEC Web of Conferences. [S.l]: [s.n], 2017, 139, 00146.
- [9] ZHOU M L, ZHAO L P, ZHANG Y, et al. Pure electric vehicle power-train parameters matching based on vehicle performance[J]. *International Journal of Control and Automation*, 2015, 8(9): 53 – 62.
- [10] MARKEL T, BROOKER A, HENDRICKS T, et al. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 255 – 266.
- [11] SAME A, STIPE A, GROSSMAN D, et al. A study on optimization of hybrid drive train using advanced vehicle simulator(ADVISOR)[J]. *Journal of Power Source*, 2010, 195(19): 6954 – 6963.
- [12] 刘永刚, 李杰, 秦大同, 等. 基于多工况优化算法的混合动力汽车参数优化[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(16): 61 – 69.
- [13] 龚贤武, 唐自强, 马建, 等. 两挡纯电动汽车动力传动系统的参数匹配与优化[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 310 – 315.

(下转第 99 页)