

# 电动汽车主减速比优化研究

郑健,张铁柱,张洪信,赵清海  
(青岛大学 机电工程学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**为了使电动汽车在满足动力性能要求的前提下,具有更佳的经济性,根据整车性能要求对动力系统参数进行匹配与选型,基于 AVL cruise 软件建立整车模型,仿真分析整车的动力性与经济性。基于 Pointer 优化算法对主减速比进行优化,分析对比优化前后整车的动力性与经济性。结果表明,通过对电动汽车主减速比的优化,可以在满足整车动力性能指标的要求下,得到更佳的经济性。

**关键词:**电动汽车;参数匹配;性能仿真;参数优化

**中图分类号:**V469.72; TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0196-04

## Research on Optimization of Main Reduction Ratio of Electric Vehicle

ZHENG Jian, ZHANG Tiezhu, ZHANG Hongxin, ZHAO Qinghai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** To make electric vehicles more economical under the premise of meeting the performance requirements, according to its performance requirements, the power system parameters are matched and selected, and the vehicle model is built based on AVL cruise software which is used to simulate and analyze its power and economy. Based on the Pointer optimization algorithm, the main reduction ratio is optimized, and the power and economy of the whole vehicle before and after the optimization are analyzed and compared. The results show that by optimizing the main reduction ratio, it is possible to obtain better economy under meeting its power requirements.

**Keywords:** electric vehicle; parameter matching; performance simulation; parameter optimization

## 0 引言

电动汽车凭借自身零排放、零污染、节能环保的特点,已经成为新能源汽车的重要一员<sup>[1]</sup>,并且随着续航里程的不断提升,近年来得以快速发展<sup>[2]</sup>。相比于传统内燃机汽车,电动汽车虽然具有更简单的动力系统,但仍然是一个涉及多学科的复杂动力系统。电动汽车的动力系统主要由动力电池、驱动电机和传动系统组成<sup>[3]</sup>。电动汽车的动力性评价指标有最高车速、最大爬坡度和加速时间<sup>[4]</sup>,经济性评价指标有百公里电量消耗量和续航里程。电动汽车的动力性和经济性与动力系统的参数息息相关,因此动力系统参数的合理匹配尤为重要<sup>[5-6]</sup>。

本文以某款电动汽车为例,根据整车的动力性能和经济性性能要求,对驱动电机和动力电池的参数进行匹配设计,同时对主减速器的传动比进行初步设计,并在 AVLcruise 软件中建立整车模型进行仿真。基于 Pointer 优化算法,对初步设计的主减速器的传动比进行优化,对优化前后整车的动力性能和经济性性能进行对比分析,通过优化分析得到满足电动汽车动力性能指标下,经济性最优时的主减速比,实现了对电动汽车主减速比的优化研究。

## 1 动力系统参数匹配

合理的动力系统参数匹配是电动汽车开发设计的前提,也是后期主减速比优化研究的前提。其中重要的内容包括:在满足汽车动力性和续航里程达标的基础上,以提高燃油经济性和减少污染物排放为目标,对驱动电机和动力电池的相关参数进行匹配,同时对电动汽车的主减速比进行初步设计。

### 1.1 整车参数与性能要求

本文中电动汽车的整车主要参数如表 1 所示。

表 1 整车主要参数

物理量	数值
外形尺寸/mm	4600×1800×1500
整车整备质量( $m_0$ )/kg	1600
总质量( $m$ )/kg	1980
迎风面积( $A$ )/m <sup>2</sup>	2
空气阻力系数( $C_D$ )	0.3
滚动阻力系数( $f$ )	0.015

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2017YFB0102004);山东省重大创新工程项目(2017CSGC0502)

**作者简介:**郑健(1992—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为电动汽车智能化动力集成技术。

续表 1

物理量	数值
轮胎滚动半径( $r$ )/m	0.302
轴距( $L$ )/mm	2 650

本文中整车的性能指标如表 2 所示。

表 2 整车性能指标

物理量	数值
最高车速( $v_{\max}$ )/(km/h)	$\geq 120$
车速 40 km/h 的爬坡度( $i$ )/%	$\geq 25$
0~100 km/h 加速时间( $t_m$ )/s	$\leq 15$
NEDC 工况续航里程( $S$ )/km	$\geq 300$
60 km/h 等速续航里程( $L$ )/km	$\geq 400$

## 1.2 驱动电机参数匹配

根据整车的动力性能指标,对驱动电机的参数进行匹配,驱动电机的峰值功率需要满足最高车速、爬坡和加速所需的功率<sup>[7]</sup>,即:

$$P_{\max} \geq \max \{P_1, P_2, P_3\} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{v_{\max}}{3\ 600 \eta_i} \left( mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{v_i}{3\ 600 \eta_i} \left( mgf \cos \alpha + mg \sin \alpha + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{v_m}{3\ 600 \eta_i t_m} \left( mgf t_m \frac{1}{1.5} + \delta m \frac{v_m}{2 \sqrt{t_m}} + \frac{C_D A v_m^2 t_m}{21.15 \times 2.5} \right) \quad (4)$$

式中: $P_{\max}$ 为电机的峰值功率; $P_1$ 为满足最高车速要求所需的电机功率; $P_2$ 为满足爬坡要求所需的功率; $P_3$ 为满足加速要求所需的功率; $v_{\max} = 120$  km/h; $\eta_i$ 为传动系效率, $\eta_i = 0.92$ ; $g$ 为重力加速度; $v_i$ 为爬坡度 25%时的车速, $v_i = 40$  km/h; $\alpha$ 为车速 40 km/h 时的爬坡坡度角, $\alpha = 14.04^\circ$ ; $v_m$ 为车辆加速的末速度, $v_m = 100$  km/h; $t_m = 15$  s; $\delta$ 为旋转质量换算系数, $\delta = 1.08$ 。

由式(2)~式(4)计算得: $P_1 = 25.35$  kW; $P_2 = 50.86$  kW; $P_3 = 64.85$  kW; $P_{\max}$ 取 75 kW,即电机的峰值功率为 75 kW。

主减速比( $i_0$ )暂定为 7.5,对驱动电机的其余参数进行匹配,后文将对 $i_0$ 取值的合理性进行验证,并对 $i_0$ 的大小进行优化分析。

$$n_{\max} = \frac{v_{\max} i_0}{0.377r} \quad (5)$$

由式(5)计算得,驱动电机最高转速为: $n_{\max} = 7\ 904.86$  r/min。

对驱动电机的额定功率( $P_e$ )、额定转速( $n_e$ )、峰值扭矩( $T_{\max}$ )与额定转矩( $T_e$ )进行计算。

$$P_e = \frac{P_{\max}}{\lambda} \quad (6)$$

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

$$T_{\max} = \frac{9\ 549 P_{\max}}{n_e} \quad (8)$$

$$T_e = \frac{9\ 549 P_e}{n_e} \quad (9)$$

式中: $\lambda$ 为过载系数,数值一般为 2~3,本文取 2.5; $\beta$ 为恒功率区系数,数值一般为 2~4,本文取 3。

由式(6)~式(9)计算得: $P_e = 30$  kW; $n_e = 3\ 000$  r/min; $T_{\max} = 238.73$  N·m; $T_e = 95.49$  N·m。

根据计算结果,选取某款永磁同步电机,具体参数如表 3 所示。

表 3 驱动电机参数

物理量	数值
额定电压/V	320
峰值转速/(r/min)	10 000
峰值功率/kW	75
峰值扭矩/(N·m)	240
额定转速/(r/min)	3 000
额定功率/kW	30
额定转矩/(N·m)	100

## 1.3 动力电池参数匹配

动力电池作为电动汽车的储能单元,其性能的高低影响着电动汽车的动力性与经济性,本文选用目前市面上认可度较高的某款锂电池,单体电压( $u$ )为 3.2 V,容量( $c$ )为 10 AH,整个电池组由电池单体组成,根据 60 km/h 匀速行驶 400 km 所需的功率,对动力电池进行匹配设计,NEDC 工况下的续航里程将在后文中仿真验证。

$$P_i = \frac{v_i}{3\ 600 \eta_i} \left( mgf + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right) \quad (10)$$

$$C \geq \frac{1\ 000 P_i L}{UD v_i \eta_m \eta_{\text{bat}}} \quad (11)$$

$$n_1 = \frac{U}{u} \quad (12)$$

$$n_2 = \frac{C}{c} \quad (13)$$

式中: $P_i$ 为以 60 km/h 匀速行驶所需的功率; $v_i$ 为匀速行驶的车速, $v_i = 60$  km/h; $L = 400$  km; $C$ 为电动汽车的电池容量; $U$ 为电动汽车的电压, $U = 320$  V; $D$ 为电池放电深度, $D = 0.85$ ; $\eta_m$ 为电机控制器效率, $\eta_m = 0.9$ ; $\eta_{\text{bat}}$ 为电池放电效率, $\eta_{\text{bat}} = 0.95$ ; $n_1$ 为电池单元串联个数; $n_2$ 为电池单元并联个数。

由式(10)~式(13)计算得 $n_1 = 100$ ; $n_2 = 20.4$ 。

根据计算结果所选取的动力电池组参数如表 4 所示。

表 4 动力电池组参数

物理量	数值
单体电压/V	3.2
单体容量/AH	10
串联个数	100
并联个数	21
放电深度/(%)	85

## 1.4 主减速器传动比初步设计

电动汽车传动系统传动比的确定需要满足以下要求:

1) 保证实现预期的最高车速;2) 保证汽车一定车速下的最大爬坡度;3) 尽可能保证电机工作在高效率区;4) 保证电机既能在恒转矩区提供较高的瞬时转矩,又能在恒功率区提供较高的运营速度<sup>[8]</sup>。本文所研究的车辆模型只装备主减速器即可满足动力性能要求<sup>[9]</sup>,故主减速器的传动比即为传动系统的传动比,根据以下条件确定主减速器传动比的取值范围。

最大传动比( $i_{max}$ )需要满足最高设计车速的要求:

$$i_{max} \leq 0.377 \frac{n_{max} r}{v_{max}} \quad (14)$$

最小传动比( $i_{min}$ )需要满足一定车速下爬坡度的要求:

$$i_{min} \geq \frac{\left( mgf \cos \alpha + mgs \sin \alpha + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right) r}{T_{max} \eta_t} \quad (15)$$

由式(14)、式(15)初步确定的主减速器传动比的范围为 5.79~8.54,本文初步选定的  $i_0 = 7.5$  位于该范围,满足要求。传动比范围较小,电动机恒功率调速范围较宽,采用单级圆柱斜齿轮主减速器<sup>[10-11]</sup>。

## 2 整车模型的建立与仿真

### 2.1 整车模型的建立

借助 AVL cruise 软件,利用其模块化的建模功能,搭建整车模型,如图 1 所示。

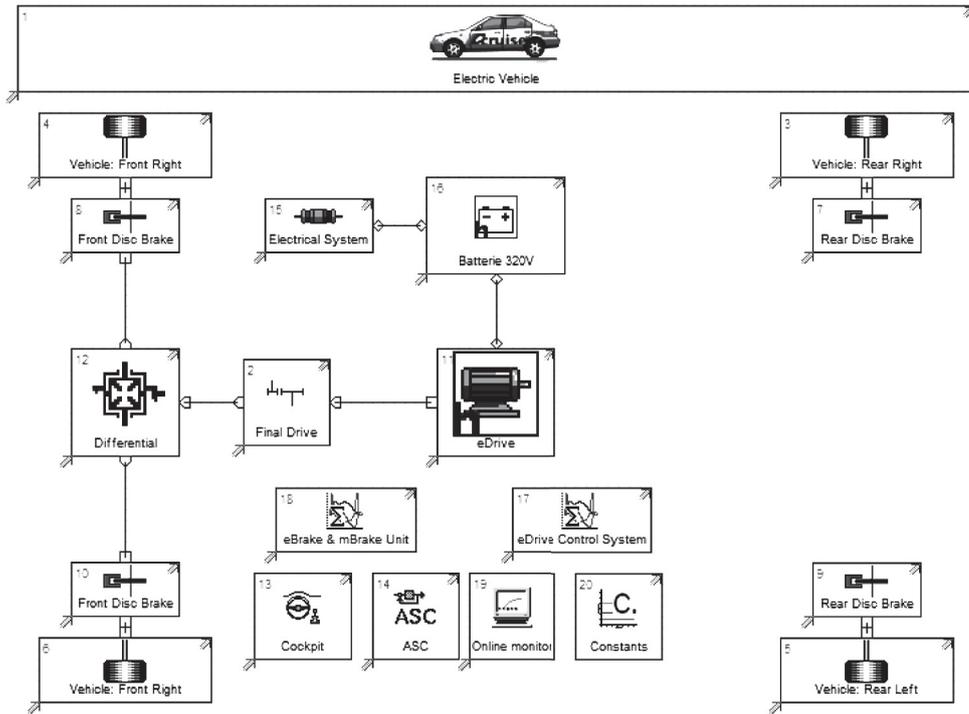


图 1 电动汽车整车模型

### 2.2 模型仿真

对整车模型的动力性和经济性性能仿真,仿真结果如表 5 所示。

表 5 整车模型仿真结果

物理量	数值
最高车速( $v_{max}$ )/(km/h)	151.00
车速 40 km/h 时的爬坡度( $i$ )/(%)	33.18
0~100 km/h 的加速时间( $t_m$ )/s	13.41
NEDC 工况下的百公里电耗( $h$ )/kW	14.95
60 km/h 等速工况下的百公里电耗( $e$ )/kW	11.10
NEDC 工况下的续航里程( $S$ )/km	402.67
60 km/h 等速行驶下的续航里程( $L$ )/km	524.32

## 3 主减速器传动比的优化

由于电动汽车所搭载驱动电机的特性,电动汽车通常不装备变速器,传动系的传动比只由主减速器确定。主减速器传动比的大小,影响着电动汽车的动力性性能和经济性性能。前文中,根据经验对传动比进行了选择,因此,需要对传动比的大小进行优化分析。

### 3.1 优化模型的建立

借助 AVL cruise 软件,在对车辆模型的动力性性能与经济性性能仿真的基础上,基于 Pointer 优化算法对主减速比的大小进行优化。Pointer 算法是线性单纯法、序列二次规划法、最速下降法和遗传算法的组合,它会自动捕捉设计空间的信息,自动组合 4 种优化算法,形成一个最优

的优化策略,求解全局最优解。

### 1) 优化变量

当驱动电机的特性一定时,整车的动力性能和经济性能在一定程度上取决于主减速比的大小,前文中只对主减速比的大小进行了初步的确定,没有严格的计算推理,因此将主减速比的大小作为优化目标。

$$i_0 = \{i_x | 5.79 \leq i_x \leq 8.54\} \quad (16)$$

式中  $i_x$  为主减速比的可能取值。

### 2) 约束条件

本文主要根据动力性能指标对动力系统进行了匹配,因此以设计目标对整车动力性能的要求作为优化约束。

$$\frac{P_{\text{speed}}(v)}{\eta_t} \leq P_{b\text{max}} \quad (17)$$

$$\frac{P_i(v)}{\eta_t} \leq P_{b\text{max}} \quad (18)$$

$$\frac{P_{\text{acc}}(v)}{\eta_t} \leq P_{b\text{max}} \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{speed}}(v)$  为满足车辆最高车速要求所需的功率;  $P_i(v)$  为满足车辆一定车速下坡坡度要求所需的功率;  $P_{\text{acc}}(v)$  为满足车辆加速性能要求所需的功率;  $P_{b\text{max}}$  为电池能提供的最大功率。

### 3) 优化目标

本文中电动汽车的设计以节能环保为出发点,优化目标的选择应充分考虑电动汽车日常行驶的状况,综合考虑,将汽车以 60 km/h 匀速行驶时的百公里电耗最少作为优化目标。

$$e = \min\{e_i\} \quad (20)$$

式中:  $e_i$  为对应主减速比下以 60 km/h 匀速行驶时的百公里电耗。

## 3.2 优化结果与分析

基于 Pointer 优化算法,通过多次迭代计算,将优化后得到的主要性能指标与优化前的进行对比,对比结果如表 6 所示。

表 6 优化前后主要参数对比

物理量	优化前	优化后	对比/(%)
最高车速( $v_{\text{max}}$ )/(km/h)	151.75	179.00	+17.96
车速 40 km/h 时的爬坡度( $i$ )/(%)	33.18	25.01	-24.62
0~100 km/h 的加速时间( $t_m$ )/s	13.41	14.90	+11.11
NEDC 工况下的百公里电耗( $h$ )/kW	14.95	14.60	-2.34
60 km/h 等速工况下的百公里电耗( $e$ )/kW	11.10	10.63	-4.23
NEDC 工况下的续航里程( $S$ )/km	402.67	411.97	+2.31
60 km/h 等速行驶下的续航里程( $L$ )/km	524.32	545.93	+4.12

优化前后最高车速、爬坡度、0~100 km/h 加速时间的对比如图 2-图 4 所示。

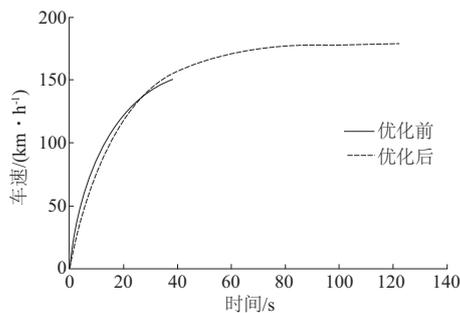


图 2 优化前后最高车速对比

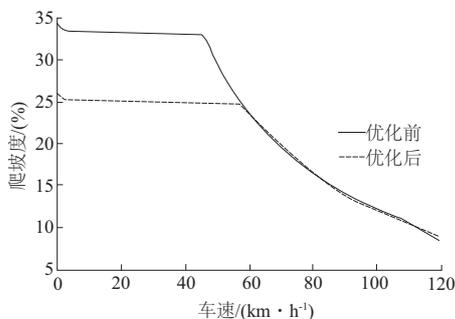


图 3 优化前后爬坡度对比

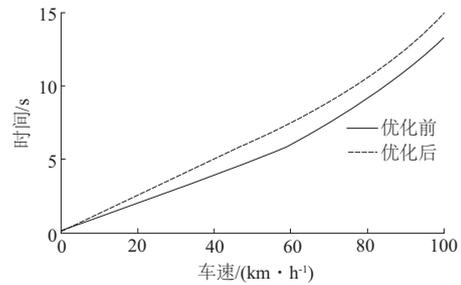


图 4 优化前后 0~100 km/h 加速时间对比

由表 6 和图 2-图 4 可知,优化后的最高车速相比于优化前得到较大提高。优化前,驱动电机在 39 s 达到最高转速,对应最高车速为 151.75 km/h,优化后,驱动电机在 123 s 达到最高转速,对应最高车速为 179 km/h,优化后的最高车速相比于优化前提高 17.96%。优化后的爬坡能力和加速能力相比于优化前有所下降。优化前,车速为 40 km/h 时的爬坡度为 33.18%,优化后降低到 25.01%,优化后相比于优化前下降 24.62%,0~100 km/h 的加速时间优化前为 13.41 s,优化后变为 14.90 s,优化后相比于优化前增加了 11.11%,但两者均满足设计要求。NEDC 工况和 60 km/h 等速工况的百公里电耗分别由优化前的 14.95 kW 和 11.10 kW 降低到优化后的 14.60 kW 和 10.63 kW,

(下转第 214 页)