

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.053

基于灰色关联的电动汽车传动系统速比多目标优化

邓毅^{1,3}, 覃俊源², 朱明明¹, 秦国锋³

(1. 桂林师范高等专科学校, 广西 桂林 541001;

2. 柳州五菱新能源汽车有限公司, 广西 柳州 545007;

3. 广西师范大学, 广西 桂林 541004)

摘 要:根据汽车理论计算电机、电池、传动系统参数,基于 Isight 与 Cruise 建立仿真分析模型,用多岛遗传算法对传动系统速比进行单目标优化,采用灰色关联方法计算多目标优化中各单目标的权重系数;采用 NSGA-II 算法多目标优化并与经验确定权重系数的多目标优化方法进行对比。结果证明:基于灰色关联的优化方法最大爬坡度提高 4.36%,百公里能量消耗下降 2.33%,总体优化效果优于基于经验确定权重系数的多目标优化方法。

关键词:电动汽车;传动系统速比;灰色关联;多目标优化;遗传算法

中图分类号:U469.72 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0276-05

Multi-objective Optimization of Speed Ratio of Electric Vehicle Power System Based on Grey Correlation

DENG Yi^{1,3}, QIN Junyuan², ZHU Mingming¹, QIN Guofeng³

(1. Guilin Normal University, Guilin 541001, China;

2. Liuzhou Wuling New Energy Vehicle Co., Liuzhou 545007, China;

3. Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: According to the automotive theory, the motor, battery and transmission system parameters are calculated, the simulation analysis model is established based on Sight and Cruise, the single-objective optimization of the transmission system speed ratio is performed by the multi-island genetic algorithm, and the weight coefficient of each single target in the multi-objective optimization is calculated by the gray correlation method. The multi-objective optimization of the NSGA-II algorithm is applied to compare with the multi-objective optimization method of the empirical weight coefficient. The results show that the maximum climbing degree of the optimization method based on grey correlation is decreased by 4.36%, the energy consumption of 100 kilometers is decreased by 2.33%, and the overall optimization effect is better than that of the multi-objective optimization method based on empirical determination of weight coefficient.

Keywords: electric vehicles; speed ratio of power system; grey correlation; multi-objective optimization; genetic algorithm

0 引言

电动汽车能够显著提升能量转化效率^[1],但是电动汽车动力电机输出的动力通过传动系统传递到车轮,动力系统的匹配设计与优化分析对其动力性和经济性有较大影响^[2-3]。

在对纯电动汽车动力系统进行优化的时候,一般考虑最大爬坡度、加速时间、最高车速、百公里电耗中的一个或者多个指标作为目标进行优化^[4-6]。KWON 等^[7]通过考虑电气和机械效率来优化电动汽车传动系统的齿轮比。汪伟等^[8]对纯电动汽车的动力系统的传动比进行了优化,提升了续航里程。郑锦汤等^[9-10]以加速时间和能量消

耗为优化目标对传动系统速比进行优化动力性和经济性都得到了提升。王永鼎等^[11]以主减速器的传动比、电池并联个数作为优化变量,最大爬坡度和续航里程作为优化目标,采用遗传算法进行了优化。牛秦玉等^[12]以整车经济性为优化目标,采用非线性权重粒子群算法实现全局优化,动力性基本不变,但经济性有明显提高。白有俊等^[13]对太阳能辅助充电的城郊公交纯电动小巴动力系统参数进行了优化,节约了电能及动力电池容量。李聪波等^[14]选用优化目标为能耗和百公里加速时间,对动力系统参数与控制策略进行集成优化,能有效降低电动汽车的能耗。李胜琴等^[15]对双电机驱动纯电动汽车动力系统的控制策略进行优

第一作者简介:邓毅(1974—),广西桂林人,高级讲师,学士,研究方向为机电一体化技术, qinguofeng@gxnu.edu.cn。

化,整车的动力性和经济性均得到了提高。杨年炯等^[16]通过正交试验方法,利用 Cruise 软件建立模型优化整车经济性能和动力性能。LI 等^[17]在不同驱动电机的主要性能参数下,对双速变速器的传动比进行优化,实现了整车经济性能和动力性能的同步提高。

由于纯电动汽车动力系统多个优化目标之间往往是矛盾的,因此如何选取合理的系数让所有性能都能达到要求是多目标优化的关键。

1 整车性能参数及要求

表 1 为某纯电动汽车的基本参数。

参数	数值
整备质量/kg	1 685
满载质量/kg	2 080
迎风面积/m ²	2.58
风阻系数	0.4
主减速比	4.13
轴距/m	3.55
轮胎规格	175/70R14LT
滚动摩擦因数	0.013
传动效率	0.95
最高车速/(km/h)	130
最大爬坡度/%	40
(0~100 km/h)加速时间/s	≤12
最大续航里程/km	400
最高车速/(km/h)	130
车轮滚动半径 r/m	0.300

2 参数计算与选型

2.1 电机参数计算

本文选用转速低于 9 000 r/min 的中速电机,额定转速范围在 6 000~9 000 r/min 之间。

1) 电机的功率确定

a) 根据最高车速计算电机功率

$$P_{E1} = \frac{V_{\max}}{3\ 600\vartheta_T} \times \left(Mgf + \frac{C_d \times A \times V_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (1)$$

式中: P_{E1} 为电动汽车以最高车速行驶时电机所达到的功率,kW; M 为整车质量,kg; g 为重力加速度,m/s²; f 为滚动阻力系数; C_d 为空气阻力系数;

A 为电动汽车的迎风面积,m²; ϑ_T 为动力传动系统的总效率。

b) 根据某一车速爬上最大坡度计算电机功率

$$P_{E2} = \frac{1}{3\ 600\vartheta_T} \times \left(Mgf \cos \alpha + Mgsin \alpha + \frac{C_d \times A \times V_n^2}{21.15} \right) V_n \quad (2)$$

式中: P_{E2} 为电动汽车在坡度为 40%的坡道上行驶所需要的功率,kW; i 为最大爬坡度; V_n 为电动汽车爬坡时的车速,km/h; α 为最大坡度角,°, $\alpha = \arctan\left(\frac{i}{100}\right)$ 。

c) 加速性能计算电机功率:

$$P_{E3} = \frac{1}{3\ 600\vartheta_T} \times \left(Mgf + \frac{\delta M d_v}{d_t} + \frac{C_d \times A \times V_a^2}{21.15} \right) V_a \quad (3)$$

式中: P_{E3} 为电动汽车加速时需要的功率,kW; V_a 为电动汽车加速时的车速,km/h; δ 为汽车旋转质量转换系数。

电动汽车峰值功率为 $P_{\max} = \max \{ P_{E1}, P_{E2}, P_{E3} \}$ 。

电机的额定功率可根据式(4)求出,电机的过载系数 λ 一般为 1~3,则

$$P_e = \frac{P_{\max}}{\lambda} \quad (4)$$

式中 P_e 为额定功率,kW。

2) 电机的转矩确定

a) 额定转矩计算:

$$T_e = \frac{9\ 550 \times P_e}{n_e} \quad (5)$$

式中: T_e 为额定转矩,Nm; n_e 为额定转速,r/min。

b) 最大转矩计算:

$$T_{\max} = \frac{9\ 550 \times P_{\max}}{n_e} \quad (6)$$

式中: $T_{\max}$ 为最大转矩,Nm; $P_{\max}$ 为最大功率,kW。

根据计算,结合可选电机的型号,电机参数选取如表 2 所示。

表 2 驱动电机参数表

参数	数值
额定功率/kW	66.12
额定转速/(r/min)	6 000
峰值功率/kW	100
峰值转速/(r/min)	9 000
额定转矩/Nm	105.25
最大转矩/Nm	157.88

2.2 电池组参数计算

本研究车型选择锂离子电池,根据电池浅充浅放的原则。满电状态按照 SOC 的 90%、最大放电程度按照 SOC 剩余 30%、续驶里程 400 km 计算。根据国际标准,在道路上按照 40 km/h 的等速行驶计算整车行驶阻力:

$$F_1 = Gf + \frac{C_d A V^2}{21.15} \quad (7)$$

式中: F_1 为整车行驶阻力; G 为重力; f 为滚动阻力系数。

车辆行驶 400 km 所需的功为 $W = F_1 \times S$, 单体电压为 $V_{\text{bat}} = 3.2 \text{ V}$, 容量 $I_{\text{bat}} = 15 \text{ Ah}$, 则需要的电池数目为 $N_{\text{bat}} = \frac{W}{V_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}}} \div 0.6 \div 3.6$ 。

根据总电压 V_{bat} 计算结果, 需要串联的电池数

为 $N_s = \frac{V_D}{V_{\text{bat}}}$, 并联的电池数目为 $N_p = \frac{N_{\text{bat}}}{N_s}$ 。

根据计算, 选配参数如表 3 所示。

表 3 电池组参数表

参数	数值
蓄电池单体电压/V	3.2
蓄电池单体容量/Ah	15
蓄电池单体并联数目/个	13
蓄电池小单元容量/Ah	195
蓄电池串联数目/个	110
蓄电池总电压/V	350
蓄电池单体数目/个	1 324

2.3 动力传动系统参数确定

1) 最大传动比的选择

根据设计原理, 一般通过电机的峰值转矩和车辆最大爬坡度进行计算。由汽车行驶方程式得

$$i_{\max} \geq \frac{(Mgf \cos \alpha_{\max} + Mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_d A}{21.15} V_n^2) r}{T_{\max} \vartheta_T} \quad (8)$$

式中: $i_{\max}$ 为传动系最大传动比。

最大传动比还应满足驱动轮与路面之间的附着力, 即

$$F_{t\max} = \frac{T_{\max} i_{\max} \vartheta_T}{r} \leq \varphi F_z = \varphi mg \frac{b}{L} \quad (9)$$

式中: $F_{t\max}$ 为纯电动汽车最大驱动力; φ 为路面附着系数, 取 0.6; F_z 为地面对驱动轮的反向作用力; L 为汽车轴距; b 为汽车中心至后轴的距离。

由式 (9) 可得传动系最大传动比需满足

的条件:

$$i_{\max} \leq \frac{\varphi m g r b}{T_{\max} L \vartheta_T} \quad (10)$$

2) 最小传动比的选择

最小传动比只需要满足纯电动汽车预期最高

车速, 即 $i_{\min} \leq 0.376 \frac{n_{\max} r}{v_{\max}}$ 。

3) 传动系统挡位确定

为了保证换挡时顺滑不中断, 因此前一挡的换挡车速必须高于第二挡位的基速, 关系如下:

$$v_{(n-1)\max} = \frac{0.337 n_{\max} r}{i_{n-1}} \geq v_{n,b} = \frac{0.337 n_b r}{i_n} \quad (11)$$

式中: $v_{(n-1)\max}$ 为第 n 挡的最高车速; i_n 为第 n 挡的传动比; $n_{\max}$ 为电机最高转速; n_b 为电机基速。

通过式 (11) 化简得到:

$$n \geq 1 + \log \frac{n_{\max}}{n_b} \cdot \frac{i_{\max}}{i_{\min}} \quad (12)$$

根据计算结果得到挡位需大于 1。所以本文选择两挡变速器。为了使换挡顺滑不中断, 两挡之间的比值应该在 1.0~1.8 之间, 确定传动比参数为: 主减速比 4.3, 1 挡速比 3.1, 2 挡速比 2.1。

3 整车模型搭建及仿真

3.1 建立模型

本文所研究的车型在 Cruise 软件上搭建, 设置 NEDC 工况, 仿真研究动力与经济性能。模型如图 1 所示。

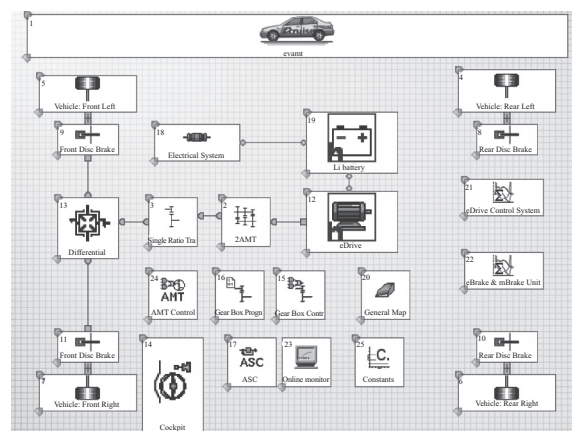


图 1 Cruise 搭载 AMT 两挡变速器模型

3.2 动力性能仿真

动力性能和经济性能仿真结果如表 4 所示。从结果来看, 各项动力与经济性能数值均满足设计要求。

表4 仿真结果

参数名称	数值
最高车速/(km/h)	137
0~100 km/h 加速度时间/s	11.27
最大爬坡度/%	41.73
百公里的能耗量/(kW·h)	16.33
最大续航里程/km	416.335 85

表5 单目标优化结果

项目 名称	i_{g1}	i_{g2}	i_{g0}	加速时 间 t/s	最大 爬坡 度/%	电耗 $Q/$ (kWh/ 100 km)
电耗最优	2.80	2.31	3.88	11.27	40.82	15.89
加速时间最优	2.94	2.30	3.85	11.04	40.25	16.09
爬坡度最优	2.88	2.42	3.99	14.47	44.71	16.02

4 基于 Isight 联合 Cruise 优化

Cruise / Isight 联合优化模型的建立如图2所示。

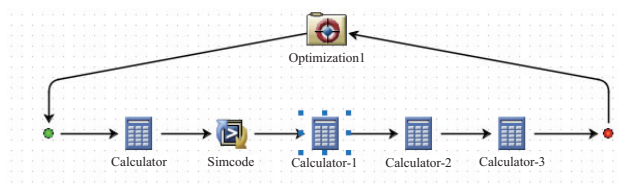


图2 Isight 优化界面

1) 优化方法选择

本文中的单目标优化采用多岛遗传算法,多目标优化采用 NSGA-II。

2) 基于多岛遗传算法单目标优化建立数学模型

本文的 AMT 变速器各挡速比和主减速器速比为设计变量,即 $X = [i_{g1}, i_{g2}, i_{g0}]$ 。

在优化过程中,以 0~100 km/h 加速时间、最大爬坡度和 100 km 能量消耗综合评价指标为目标函数。分别采用多岛遗传算法进行单目标优化。

爬坡度 $j_{\max}$ 约束为

$$j_{\max} \geq 40\% \quad (13)$$

最大车速约束为

$$I_{\max} \geq 130 \quad (14)$$

为了换挡平滑约束为

$$1 < y = (i_{g1} \times i_{g0}) / (i_{g2} \times i_{g0}) < 1.8 \quad (15)$$

优化变量取值范围要求为: $2.6 < i_{g1} < 3.6$; $1.6 < i_{g2} < 2.6$; $3.8 < i_{g0} < 4.8$ 。在优化过程中,为了确保优化目标单位统一,用计算器将优化结果归一化。公式如下:

$$N_{\text{ACC100}} = \text{acc} / 11.27 \quad (16)$$

$$N_{\text{NEDC}} = \text{necd} / 16.33 \quad (17)$$

$$N_{\text{INN}} = 1 / (\text{in} / 41.73) \quad (18)$$

式中: N_{ACC100} 为 0~100 km/h 加速时间的归一化; N_{NEDC} 为百公里电耗的归一化; N_{INN} 为最大爬坡度倒数的归一化。单目标最优结果如表5所示。

3) 基于单目标优化结果建立多目标优化

将单目标优化得到的速比最大值和最小值作为多目标优化中速比的约束范围,优化变量为: $2.80 < i_{g1} < 2.94$, $2.30 < i_{g2} < 2.42$, $3.85 < i_{g0} < 3.99$, 约束为式(13)~式(15)。

4) 主观确定权值优化

通过3组主观设置权重系数,将0~100 km/h 加速时间、最大爬坡度、百公里能量消耗3个多目标优化转变为单目标函数 $f(X)$, 表达式为

$$\min f(X) = \left(T(X), Q(X), \frac{1}{J(X)} \right) \quad (19)$$

式中: $f(X)$ 为目标函数; $T(X)$ 为 0~100 km/h 加速时间; $Q(X)$ 为 NEDC 工况 100 km 能量消耗; $J(X)$ 为最大爬坡度。3组主观设置权重值和优化结果分别如表6和表7所示。

表6 3组权重系数选取

权重系数	加速时间/s	最大爬坡度/%	百公里能量 消耗/(kWh)
第1组	0.4	0.3	0.3
第2组	0.3	0.4	0.3
第3组	0.3	0.3	0.4

表7 传统主观设置权值优化结果

项目标 名称	0~100 km/h 加速时间/s	最大 爬坡度/%	NEDC 工况 100 km 能量消耗 Q/kWh
优化前	11.27	41.73	16.33
第1组	11.29	43.27	15.94
第2组	11.26	44.03	16.06
第3组	11.45	44.72	16.02

5) 基于灰色关联度分析确定子目标权重系数

通过主观设置权重的多目标优化方法比优化前有了明显提升,但是存在主观,并不科学。本文采用灰色理论中的灰色关联度分析来确定多目标优化目标的权重系数^[18]。通过表5单目标最优值的优化目标确定参考列和序列,进行无量纲化处理:

$$a_i = \{a_i(k) | k=1,2,3\} \quad (20)$$

$$a_0 = \{a_0(k) | k=4\} \quad (21)$$

计算每个被评价对象指标序列与参考序列对

应目标的绝对差值:

$$|a_0(k) - a_i(k)| \quad i=1,2,3, k=4 \quad (22)$$

通过式(23)计算灰色关联度系数:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |a_0(k) - a_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |a_0(k) - a_i(k)|}{|a_0(k) - a_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |a_0(k) - a_i(k)|} \quad (23)$$

式中 $\rho=1$ 为分辨系数。

通过式(24)计算关联度:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{oi}(k), i=1,2,3 \quad (24)$$

计算权重:

$$w = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} \quad (25)$$

各目标权重计算结果如表 8 所示。

表 8 各目标权重

权重系数	加速时间	最大爬坡度	百公里能量消耗
w	0.31	0.32	0.36

基于灰色关联度确定权值的单目标确定多目标优化结果如表 9 所示。本文采用的基于灰色关联的传动系统速比优化结果中 0~100 km/h 加速时间没有低于初始值,最大爬坡度提升和百公里能量消耗下降幅度分别为 4.36% 和 2.33%,比主观设置权重第 2 组的优化结果更加平衡。

表 9 基于灰色关联度多目标优化结果

项目名称	加速时间 t/s	最大爬坡度/%	100 km 能量消耗 $Q/(kWh)$
灰色关联多目标优化	11.27	43.55	15.95

5 结语

本文根据汽车动力学和车型开发要求进行了动力系统的匹配设计与选型,基于 Cruise 和 Isight 搭建联合仿真分析模型,采用灰色关联方法计算各目标的权重系数,与主观设置权重系数的多目标优化相比,基于灰色关联的多目标优化方法优化后的各项性能指标之间提升更加均衡。

参考文献:

- [1] 朱成,刘頔,滕欣余,等. 新能源汽车综合经济性对比分析及预测研究[J]. 汽车工程,2023,45(2):333-340.
- [2] 许敏,张亦嘉. 中国混合动力汽车动力总成技术进展[J]. 汽车安全与节能学报,2024,15(3):269-294.
- [3] LIU H W, LEI Y L, FU Y, et al. Parameter matching and optimization for power system of range-extended electric vehicle based on requirements[J]. Proceedings of the

Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(14):3316-3328.

- [4] 缪明雅. 基于 AVL Cruise 的某纯电动汽车动力系统匹配设计[J]. 汽车实用技术, 2022(23):109-113.
- [5] 吉协福,刘祚时. 基于粒子群算法纯电动汽车传统优化设计[J]. 机械设计与制造, 2022(5):60-63, 68.
- [6] 何智成,谢泽军,刘侃,等. 纯电动汽车传动系统-电机结构参数协同设计优化[J]. 汽车工程, 2023, 45(11):2113-2122.
- [7] KWON K, LEE J H, LIM S K. Optimization of multi-speed transmission for electric vehicles based on electrical and mechanical efficiency analysis[J]. Applied Energy, 2023, 342:121203.
- [8] 汪伟,杨凤敏,王汝佳,等. 纯电动汽车的动力参数优化研究[J]. 机械设计与制造, 2023(2):37-40.
- [9] 郑锦汤,陈吉清. 纯电动汽车动力系统速比优化设计[J]. 机械传动, 2019, 43(4):79-82, 93.
- [10] 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.
- [11] 王永鼎,李恒. 纯电动物流车动力系统设计及优化[J]. 机械强度, 2021, 43(1):244-249.
- [12] 牛秦玉,李珍惜,王智超,等. 电动汽车动力传动系统参数匹配与优化[J]. 机械传动, 2019, 43(2):129-136.
- [13] 白有俊,王月雷,郑艳,等. 面向城郊公交纯电动小巴动力系统匹配及经济性研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(2):134-138.
- [14] 李聪波,朱道光,胡芮,等. 电动汽车两挡动力系统参数与控制策略集成优化[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7):1706-1716.
- [15] 李胜琴,丁雪梅,于博. 双电机驱动纯电动汽车动力系统参数匹配设计及控制策略研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(11):145-152.
- [16] 杨年炯,宋英杰,肖旺. 某型纯电动汽车动力系统匹配及优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(6):557-561, 567.
- [17] LI Y H, ZHU B, ZHANG N, et al. Parameters optimization of two-speed powertrain of electric vehicle based on genetic algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(1):1687814020901652.
- [18] 李帅领. 汽车悬架控制臂性能计算分析及优化设计研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.

收稿日期:2023-09-04