

· 新能源汽车与低碳运输 ·

基于动力性与经济性的两挡纯电动汽车传动比优化

何波¹, 彭忆强^{1,3,4*}, 任洪涛², 吴维斐¹, 芦文峰¹

(1. 西华大学汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2. 成都联腾动力控制技术有限公司, 四川 成都 610100;
3. 四川汽车关键零部件协同创新中心, 四川 成都 610039; 4. 汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要:为实现纯电动汽车动力系统高效匹配,充分发挥关键部件的最大效用,以实现整车动力性与经济性最佳为目标进行研究,通过对纯电动汽车行业标准和整车参数的收集整理,确定XH2型纯电动汽车基本性能参数,根据前期已做的整车匹配选型工作,确定以动力系统传动比为优化变量的优化方案,利用matlab软件建立动力系统多目标优化数学模型,设定目标函数,引入4种非线性求解方式对模型求解。对比分析结果,得到该车的最佳传动比方案,该方案使整车动力性改善明显,经济性略有提高。

关键词:纯电动汽车;动力系统;传动比;多目标优化;非线性求解

中图分类号:U462 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-159X(2017)03-0008-8

doi:10.3969/j.issn.1673-159X.2017.03.002

Gear Ratio Optimization of Two-speed Electric Vehicles Based on Power and Economy

HE Bo¹, PENG Yiqiang^{1,3,4*}, REN Hongtao², WU Weifei¹, LU Wenfeng¹

(1. School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Chengdu lianteng power control technology Co. Ltd, Chengdu 610100 China;

3. Collaborative innovation Center of Automotive Key Components, Chengdu 610039 China;

4. Key laboratory of Automotive Measure-control and Safety, Chengdu 610039 China)

Abstract: In order to realize the efficient matching of the pure electric vehicle powertrain system and maximize the utility of the key components, the optimization of the vehicle power and economy is studied. Through the analyses of the industry standards for electric vehicles and vehicle parameters, the basic performance parameters of XH2 electric vehicle are determined. The optimization scheme that sets the gear ratio of powertrain as an optimization variable has been determined via the previous matching and selection work. With matlab software, the multi-objective optimization mathematical model for powertrain system is established, and four solving nonlinear manners are used to solve this model through setting objective functions, comparing and analyzing the results. Consequently, the optimal scheme for vehicle gear ratio is derived, and the performance of power is improved largely while the performance of economy is raised slightly.

Keywords: electric vehicle; powertrain system; gear ratio; multi-objective optimization; nonlinear solving manner

随着全球能源危机的不断加深,大气污染和全球气温上升的危害加剧,世界各国纷纷以电动汽车作为未来汽车发展的主攻方向^[1]。目前,纯电动汽车性能提升主要受限于关键零部件核心技术尚无

突破性进展。在现有的技术条件下,进行高效匹配和优化是提升纯电动汽车动力性与经济性的重要手段之一。

纯电动汽车多目标匹配研究文献较少。吉林

收稿日期:2016-07-01

基金项目:新能源汽车电控技术四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0021);四川省科技支撑项目(2015GZ0128,2015GZ0145)。

* 通信作者:彭忆强(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为汽车电子控制。E-mail: yqpeng@mail.xhu.edu.cn

引用格式:何波,彭忆强,任洪涛,等. 基于动力性与经济性的两挡纯电动汽车传动比优化[J]. 西华大学学报(自然科学版),2017,36(3):8.

大学周飞鲲鹏以多工况平均续航里程、多工况平均总能耗以及整车整备质量为目标,采用模拟退火粒子群算法的优化方式对动力系统参数匹配进行优化^[2]。清华大学张抗抗以最高车速、加速时间和百公里电耗为优化目标,对3种动力系统匹配方案进行对比选择^[3]。刘振军等以多目标遗传算法对电动汽车传动系统进行优化,但在约束处理问题上未进行探究^[4]。

上述文献对纯电动汽车的动力系统进行了较为理想的匹配,也得出了较为理想的结果,但在非线性约束条件的处理上却还未有理想的解决方法,大多采用罚函数法的方式将有约束条件或非线性约束条件转化为无约束条件进行运算。

综上所述,纯电动汽车动力系统的匹配技术及研究热点是如何改进可控参数,充分发挥动力系统的潜力,以达到整车性能的最优化匹配。最优化匹配问题的难点在于未知汽车动力性与经济性为非统一量纲的优化问题,必须进行多目标优化求解,而在实际求解过程中算法往往遇到非线性约束问题的处理难题。在优化算法过程中可能产生偏离可行域的解,特别是在遗传算法中,遗传因子作用于可行解后,可能产生不可行解。

结合实际工程项目 XH2 型纯电动汽车研发,对该车的动力系统关键部件进行匹配选型和优化。以实现基本目标参数为约束条件,建立多目标数学模型的约束条件,通过对动力性与经济性评价函数(即目标函数)的研究,建立目标函数数学模型。在多工况下引入变速器换挡策略,考虑了换挡情况下的纯电动汽车传动比优化问题。提出基于 NSGAI 算法的分层优化思想,并结合直接求取、罚函数和基因修复方式对优化模型中的非线性问题进行求解,从而得到 XH2 型纯电动汽车的最佳传动比组合方案。本文所完成的相关工作可为纯电动汽车的设计和开发过程中的动力系统匹配及优化环节提供参考。

1 动力系统匹配

XH2 型纯电动汽车采用后轮驱动方式,其动力系统包括驱动电机、动力电池以及变速器、主减速器等关键零部件。

该车由动力电池提供能量,驱动电机将电能转化为机械能,经变速器和主减速器,作用于后轴,驱动汽车行驶,其整车结构及动力系统布置如图1所示。根据整车参数和性能指标进行动力系统的匹

配选型,对发挥整车性能至关重要^[5]。

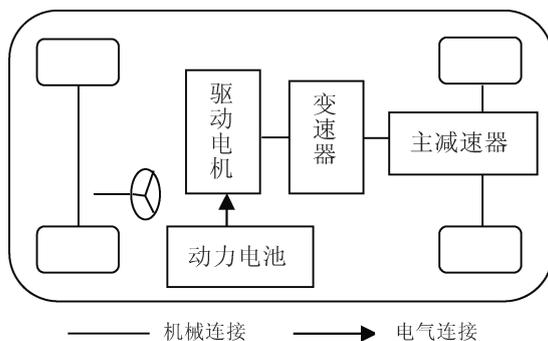


图1 XH2型纯电动汽车结构简图

1.1 整车基本参数

XH2 型纯电动汽车基本参数如表1所示。

表1 整车基本参数

| 参 量 | 数值 |
|--|--------------------|
| 整车质量 m/kg | 1 000 |
| 尺寸规格/($\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$) | 2695 × 1559 × 1565 |
| 迎风面积 A/m^2 | 2.2 |
| 车轮滚动半径 r/m | 0.288 |
| 旋转质量惯性系数 δ | 1.1 |
| 滚动阻力系数 f | 0.015 |
| 空气阻力系数 C_d | 0.32 |
| 传动系机械效率 η_t | 0.92 |

1.2 整车基本性能指标

整车目标性能参考 GB/T 28382—2012 中的规定,设定 XH2 型纯电动汽车的动力经济性能指标如表2所示。

表2 整车基本性能指标

| 序号 | 整车性能 | GB/T 28382 | 设计值 |
|----|-------------------|------------|----------|
| 1 | 最高车速 | 未规定 | ≥90 km/h |
| 2 | 30 min 最高车速 | ≥80 km/h | ≥80 km/h |
| 3 | 4% 爬坡车速 | ≥60 km/h | ≥60 km/h |
| 4 | 12% 爬坡车速 | ≥30 km/h | ≥30 km/h |
| 5 | 最大爬坡度 | ≥20% | ≥20% |
| 6 | 0 ~ 50 km/h 加速性能 | ≤10 s | ≤10 s |
| 7 | 50 ~ 80 km/h 加速性能 | ≤15 s | ≤15 s |
| 8 | 工况法续航里程 | ≥80 km | ≥80 km |
| 9 | 匀速续航里程 | 未规定 | ≥100 km |

1.3 动力系统选型

通过对整车动力系统的匹配计算^[6],初步确定

了各参数的拟选值,最后结合项目实施的现有条件,选择最适合的传动部件,相关参数如表3所示。

表3 动力系统选型参数

| 参数 | 项目 | 计算值 | 拟选值 | 确定值 |
|----|--------------|---------------|-------|-------|
| 电机 | 额定功率/kW | ≥ 11.32 | 12 | 20 |
| | 峰值功率/kW | ≥ 22 | 30 | 40 |
| | 峰值转矩/Nm | ≥ 125 | 130 | 127 |
| 参数 | 峰值转速/(r/min) | $\geq 5\ 398$ | 6 000 | 6 000 |
| | 电池 | 标称电压/V | 320 | 320 |
| 参数 | 标称容量/Ah | ≥ 30 | 50 | 50 |
| 总传 | 上限 | 7.477 | 7.477 | 待优化 |
| 动比 | 下限 | 5.561 | 5.561 | 待优化 |

由表3可知总传动比有较宽的选择区间。由文献[7]可知无论是经济性还是动力性,两挡传动方案均优于固定挡。为充分发挥整车性能,获得最佳的动力性与经济性指标,本文将传动系定为两挡传动。

2 动力系统多目标优化模型

优化数学模型包含优化变量、优化目标函数和优化约束条件等3个要素。根据文献[6]已做过的关于XH2型纯电动汽车的匹配工作,本文将以传动系总传动比(包括主减速器传动比、变速器传动比,见表3)作为优化变量,以整车动力性与经济性作为优化目标建立优化目标函数,引入传动比的约束条件,然后计算得到最佳传动比方案,最终获得最佳的动力性与经济性。

2.1 优化目标函数

纯电动汽车动力性与经济性评价指标较多,本文选取最具代表性的4个评价参数作为优化目标函数:动力性方面选取了最高车速和0~80 km/h加速时间;经济性方面选取了60 km/h匀速工况百公里电耗和循环工况下的百公里电耗^[8-9]。

2.1.1 最高车速

纯电动汽车最高车速主要受电机峰值转速的限制和电机峰值功率的影响^[10-11],其关系如下:

$$v_{\max} = \frac{0.377r n_{\max}}{i_{\text{gmin}} i_0}, \quad (1)$$

$$P_{\max} \geq mgfv_{\max} + \frac{c_d A v_{\max}^2}{21.15}. \quad (2)$$

式中: v_{\max} 为最高车速,km/h; r 为车轮滚动半径; n_{\max} 为电机最大转速; i_{gmin} 为变速器最小传动比; i_0 为主减速器传动比; P_{\max} 为电机峰值功率,kW; g 为重力加速度,取9.81 N/kg,其余各参数详见表1。

2.1.2 0~80 km/h加速时间

参考国标中对于整车加速时间的规定,加速时间不仅受传动比的影响,还主要受电机外特性的影响。XH2型纯电动汽车选用永磁同步电机,当车速小于电机额定转速时,驱动力由最大扭矩决定,当车速大于电机额定转速时,驱动力由车速与电机峰值功率决定。

$$F_t = \begin{cases} \frac{T_{\max} i_g i_0 \eta_t}{r} & v \leq v_{pe}, \\ \frac{3600 P_{\max} \eta_t}{v} & v > v_{pe}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_t 为驱动力; T_{\max} 为电机最大扭矩,Nm; i_g 为变速器传动比; v_{pe} 为电机额定功率下所对应的车速。

两挡位车辆加速时间的计算,以动力性为评价指标时,必须考虑换挡点问题。按照最佳动力性换挡规律,以I挡和II挡加速度曲线交点为换挡点。当II挡驱动力大于I挡驱动力时,应及时切换为II挡加速。本文运用Matlab软件编写m文件,采用以 Δv 为定步长、使 $1/a$ 累加的方法来求解加速时间 t ,计算式如下:

$$t = \sum_{v=0}^{v_{\max}} \frac{\delta m}{F_t - F_f - F_w} \Delta v. \quad (4)$$

式中: F_f 为滚动阻力, $F_f = mgf$; F_w 为空气阻力, $F_w = \frac{C_d A v^2}{21.15}$; v 为车速, Δv 为速度增量,1 km/h。

考虑到加速时间中,关于电机换挡问题所对应的电机外特性输出曲线分为恒转矩区与恒功率区,并且II挡恒转矩区可能存在车速大于80 km/h的情况;所以加速时间累加求解公式如下式所示:

$$t = t_0 + \begin{cases} \sum_{v=0}^{v_{pe2}} \frac{\delta m}{\max(F_{t1}, F_{t2}) - F_f - F_w} \Delta v + \\ \sum_{v=v_{pe2}}^{80} \frac{\delta m}{\frac{3600 P_{\max} \eta_t}{u} - F_f - F_w} \Delta v & v_{pe2} \leq 80 \\ \sum_{v=0}^{80} \frac{\delta m}{\max(F_{t1}, F_{t2}) - F_f - F_w} \Delta v & v_{pe2} > 80 \end{cases} \quad (5)$$

2.1.3 匀速工况百公里电耗

纯电动汽车在60 km/h匀速工况下的百公里电耗 E_{k100} 计算式如下式所示:

$$E_{k100} = \frac{100}{60} \frac{F_t v}{3600 \eta_{mt}} = \frac{100}{60} \left(mgf + \frac{C_d A v^2}{21.15} \right) \cdot \frac{v}{3600 f_{\text{map}} \left(\frac{mgf + \frac{C_d A v^2}{21.15}}{r i \eta_t}, 0.377 r v \right)}. \quad (6)$$

式中: i 为传动系总传动比; η_{m} 为电机效率,是关于电机转矩 T 和电机转速 n 的非线性函数,可通过本文所用电机效率 MAP 矩阵查得,如图 2 所示。

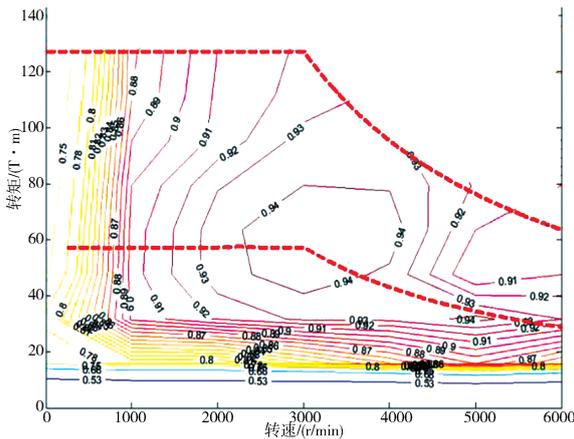


图2 匀速工况百公里电耗

在匀速工况条件下,速度 v 为常量,故百公里电耗计算式中变量仅为总传动比 i 。由于变速器为两挡位,故以两挡中较小能耗作为 XH2 型纯电动汽车的能耗。

$$E_{k_v} = \min(E_{100}(i_{g1} \cdot i_0), E_{100}(i_{g2} \cdot i_0)) \quad (7)$$

式中: E_{k_v} 为 60 km/h 匀速百公里电耗; i_{g1} 为 I 挡传动比; i_{g2} 为 II 挡传动比。

2.1.4 循环工况百公里电耗

在循环工况百公里电耗中,所使用的测试工况为 NEDC 循环工况,该工况由 ECER15 城市工况与郊区工况构成。其计算方式主要为积分计算,且积分函数变量中涉及电机效率点以及变速器控制策略等非线性处理;因此,需离散化处理并通过求和方式近似求解^[12]。

$$E_{k_{\text{cyc}}} = \frac{100}{S_{\text{cycle}}} \sum_{t=0}^{t=t_{\text{end}}} P_m \Delta t \quad (8)$$

式中: S_{cycle} 为工况里程, km; t_{end} 为循环工况截止时间; P_m 为电机所需要功率。

$$P_m = \frac{F_t v}{\eta_{\text{m}} \eta_t} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{m}} = f_{\text{map}}\left(\frac{F_t}{r i_g' i_0 \eta_t}, \frac{i_g' i_0}{0.377 r v}\right) \quad (10)$$

式中: f_{map} 函数需通过实验或电机效率得到; i_g' 为最佳经济性换挡规律下的变速器传动比。通过比较 I 挡与 II 挡传动比下电机效率,选取效率较高者为当前挡位,从而确定传动比 i_g' ,此对应关系由非线性对应函数 L 表示。

$$i_g' = L\{\max(\eta_{\text{m}}(i_{g1}), \eta_{\text{m}}(i_{g2}))\} \quad (11)$$

式中: $\eta_{\text{m}}(i_{g1})$ 为 I 挡传动比所对应电机效率;

$\eta_{\text{m}}(i_{g2})$ 为 II 挡传动比所对应电机效率。

综上,循环工况下百公里电耗计算式如下:

$$E_{k_{\text{cyc}}} = \frac{100}{S_{\text{cycle}}} \sum_{t=0}^{t=t_{\text{cyc}}} \frac{F_t v}{f_{\text{map}}\left(\frac{F_t}{r i_g' i_0 \eta_t}, \frac{i_g' i_0}{0.377 r v}\right) \eta_t} \Delta t \quad (12)$$

2.2 优化约束条件

2.2.1 爬坡约束条件

最大传动比应满足最大爬坡度要求,输出驱动力应小于地面能提供的最大附着力。

$$i_{g1} i_0 \geq \frac{mgf \cos \alpha + \frac{C_d \cdot A \cdot v_p^2}{21.15} + mgf \sin \alpha}{\eta_t T_{\text{max}} r} \quad (13)$$

$$i_{g1} i_0 \leq \frac{mg \varphi r}{\eta_t T_{\text{max}}} \quad (14)$$

式中: α 为爬坡度,取 11.6° ; φ 为地面附着率,取 0.75; v_p 为爬坡度为 α 时的车速。

2.2.2 最高车速约束

最小传动比应满足最高车速时电机转速限制,以及输出转矩大于行驶阻力矩的要求。

$$i_{g2} i_0 \leq \frac{0.377 N_{\text{max}} r}{v_{\text{max}}} \quad (15)$$

$$i_{g2} i_0 \geq \frac{F_{v_{\text{max}}} r}{\eta_t T_{\text{max}}} \quad (16)$$

2.2.3 加速时间约束

由于正向计算 $i_{g1} i_0$ 的下限较为复杂,故采用反向验证计算方式,得到爬坡约束条件包含于 0 ~ 50 km/h 加速时间的约束。而以 II 挡低传动比恒转矩加速时,50 ~ 80 km/h 加速时间同样满足设计要求,故不添加新的约束条件。

2.2.4 换挡条件约束

1) 由于采用两挡传动, I 挡传动比 i_{g1} 与 II 挡传动比 i_{g2} 比值过大会造成换挡困难。一般认为比值不宜大于 1.7 ~ 1.8^[13-14]。考虑为自动变速器,取 1.7。

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} \leq 1.7 \quad (17)$$

2) 为了使得挡位切换后,驱动电机功率与加速度平稳过渡,则 I 挡(高挡)最高车速 v_{max} 应小于 II 挡车速最高峰值点^[15]。

$$v_{g1\text{max}} \leq v_{g2\text{max}_0} \quad (18)$$

$$v = \frac{0.377 n r}{i} \quad (19)$$

2.2.5 其他约束

主减速器比受体积与负载的影响,乘用车主减速器传动比一般为3.0~4.5。

$$3.0 \leq i_0 \leq 4.5. \quad (20)$$

2.2.6 约束汇总

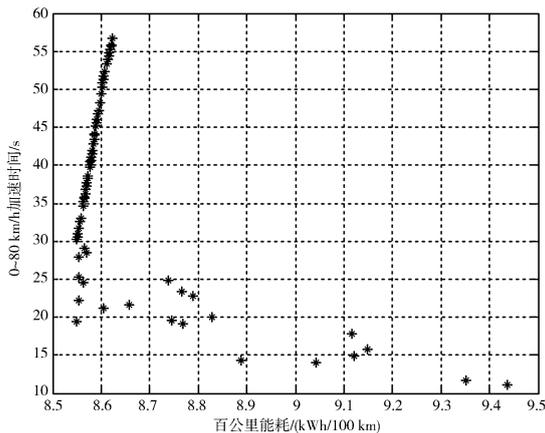
总结约束条件如下:

$$\text{s. t.} \begin{cases} 5.56 \leq i_{g1} i_0 \leq 20, \\ i_{g1} - 1.7 i_{g2} \leq 0, \\ 2.18 \leq i_{g2} i_0 \leq 7.477, \\ 3.0 \leq i_0 \leq 4.5, \\ i_{g2} \leq i_{g1}. \end{cases} \quad (21)$$

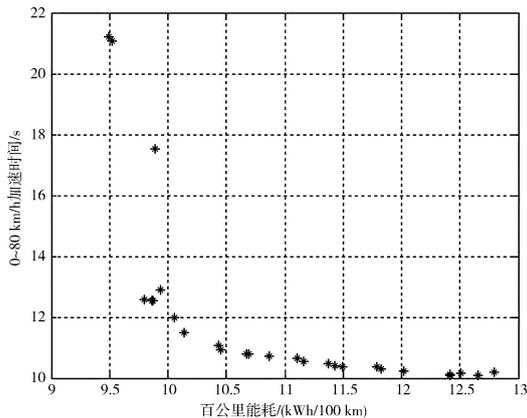
3 非线性求解方式对比分析

3.1 非线性约束条件求解

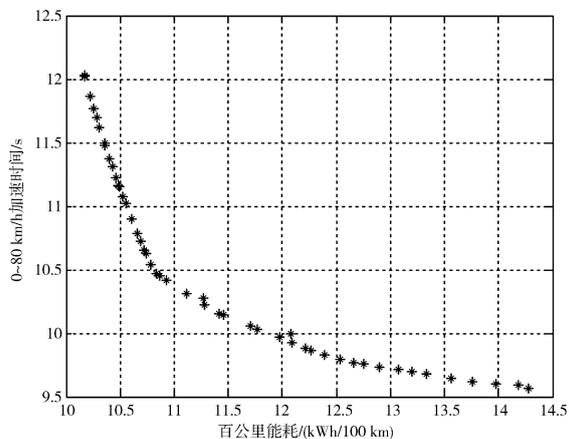
式(21)中有2个约束条件为非线性约束,对于这样的非线性约束问题,增加了求解难度。下面分别以直接求取方式、罚函数方式、基因修复方式和分层优化方式求解^[16]。为减少算法耗时,其中能耗计算中只进行了组合工况中前200s工况(即ECE工况),计算结果分别如图3中的(a)、(b)、(c)和(d)所示。



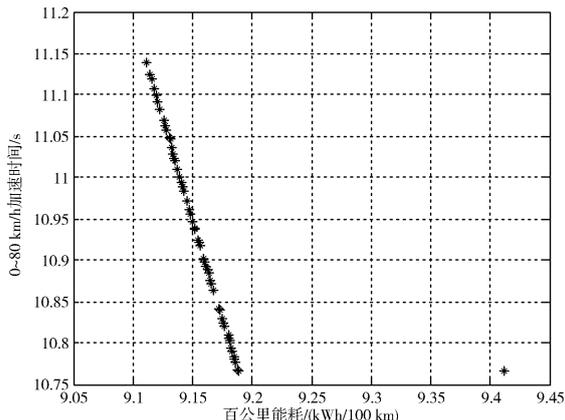
(a) 直接求取方式解集



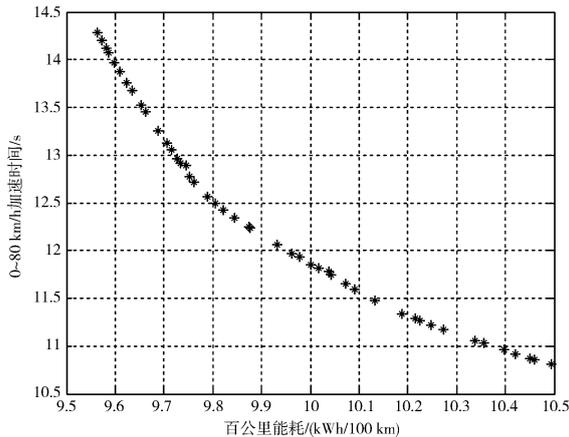
(b) 罚函数方式解集



(c) 基因修复方式解集



(d) 分层优化顶层解集



(e) $i_0 = 3.14$ 时分层优化底层解集

图3 非线性求解方式解集

由图3(a)可知,目标函数0至80 km/h加速时间可优化区域为10 s至57 s,而设计要求仅为25 s,聚集于非约束域内,并且随着代数的增加,不可行域的个体会随之增加,离目标可行域渐远,甚至无解。其中能满足非线性约束条件的解集较少,解集中有部分为无解的情况,主要因为百公里电耗中结合了汽车行驶工况的原因,若传动比不满足加速则会产生无解;因此,以直接求解的方式进行优化,其

解集可参考性较低。

由图3(b)可知,通过对不可行解施加某种惩罚,经过不断迭代后,使解集收敛于可行的解集。而对于惩罚函数的选取比较敏感,过大则过早收敛于非极值,过小收敛性很差。经多次尝试,加大惩罚因子能轻微改善解集效果。对于弱约束工程可运用,而对于强约束工程则需慎重考虑,如能耗计算。

由图3(c)可知,本文采用淘汰方式,对于不满足约束条件式(21)的基因,对其所有目标表现型都配置为无穷大,进行直接淘汰。基因修复法的解分布均匀且连续,并且所产生的解都满足约束条件。

由图3(d)可知,最小能耗为9.1~9.2

kWh/100 km,0到80 km/h的加速时间可优化为10.75~11.15 s。优化顶层解集分布均匀且连续,最优解集中于3.0~3.14范围内,对于主减速器传动比的选择具有较好的参考价值。由图3(e)可知,受底层分目标函数的影响,在底层运算中选取分目标为最小值作为适应度函数。可首先从优化顶层解集中确定主减速器传动比,此处取 i_0 为3.14进行底层挡位传动比的选择。综合图3(d)、(e),分层优化方式计算过程太费时且优化参数不应过多。

3.2 非线性求解方式对比

对上述各非线性求解方式及其求解结果进行对比和总结,得到表4。基于此总结,综合考虑计算时间与非线性解集的满足情况,最终确定优化模型的求解方法为基因修复方式。

表4 非线性求解方式比较

| 方法 | 优点 | 缺点 | 非线性处理思路 | 可行性 |
|--------|-----------------------|------------------|-------------|------------------------|
| 直接方式 | 计算复杂度低运算速度快 | 可行解随代数的增加而偏离可行域 | 不进行处理 | 不建议使用 |
| 罚函数方式 | 计算复杂度低运算速度快 | 罚函数的选取以及罚因子大小的调试 | 转为无约束 | 对于弱约束条件可以使用,难点在罚函数参数选取 |
| 基因修复方式 | 运算速度快 | 对遗传算法的掌握要求较高 | 总保证个体产生于可行域 | 可选用 |
| 分层优化方式 | 便于对具体工程问题的分析,理解各参数影响域 | 计算过于缓慢 | 总保证个体产生于可行域 | 对于优化参数较少,计算时间要求低的问题适用 |

4 优化结果

4.1 结果分析

通过对非线性求解方式的比较和分析,最终选择基因修复方式进行求解。随着进化代数的增加,其解集分布从离散逐渐收敛形成帕累托前沿。当进化至第100代时其解集分布较为均匀,各目标函数值已无变化,表明优化解集已收敛至最优解,如图4所示,可为XH2型纯电动汽车传动系传动比的选择提供参考。图中,C-B段能耗下降明显,加速时间延长,最高车速由90 km/h上升至120 km/h,主要归结于二挡传动比减少。A-B-C加速时间逐渐减少,百公里能耗逐渐增加,故C点动力性最佳,A点经济性最

佳,B点为趋势转折点,即动力性与经济性的折中。A、B、C点传动比方案如表5所示。

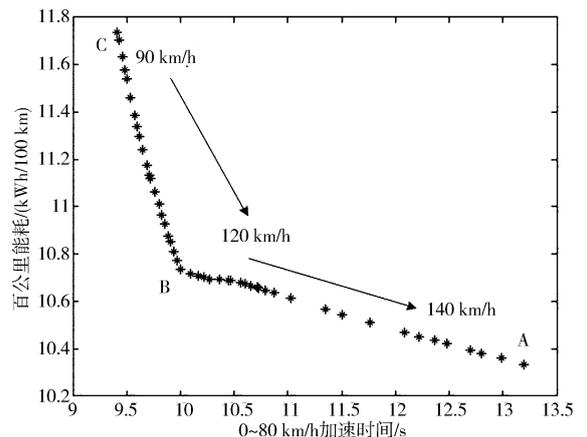


图4 各目标种群分布图

表5 最佳动力性与最佳经济性传动比组合

| 序号 | I挡传动比 i_{g1} | II挡传动比 i_{g2} | 主减速器传动比 i_0 | 最高车速/(km/h) | 0~80加速 时间/s | 综合百公里能耗/ (kWh/100km) |
|----|-------------------|--------------------|------------------|-------------|----------------|-------------------------|
| A | 1.886 7 | 1.109 9 | 3 | 148 | 13.2 | 10.335 |
| B | 2.521 9 | 1.486 6 | 3.811 5 | 118.7 | 10.082 5 | 10.717 9 |
| C | 3.044 9 | 1.791 2 | 4.178 7 | 90.00 5 | 9.413 9 | 11.735 7 |

4.2 结果对比

优化前,首先根据经验选定一套较为合理的整车传动比方案,然后根据约束条件得到传动比最优解集,再从中选出最佳的传动比。优化前后传动比对比和各项性能对比分别如表6、表7所示。

表6 优化前后传动比

| 项目 | 优化前 | 优化后 |
|---------|-----|---------|
| I挡传动比 | 1.7 | 1.886 7 |
| II挡传动比 | 1.2 | 1.109 9 |
| 主减速器传动比 | 3.5 | 3 |

表7 优化前后各项目性能对比

| 整车性能 | 评价指标 | 经验方案 | 优化方案 | 改善幅度/% |
|------|---------------------|----------|-----------|--------|
| 动力性 | 最高车速/(km/h) | 148 | 148 | 0 |
| | 最大爬坡度 | 22.37% | 26.88% | 20.16 |
| | 0~80 km/h 加速时间/s | 11.511 5 | 9.414 | 18.22 |
| 经济性 | 综合百公里能耗 | 10.57 | 10.544 8 | 0.24 |
| | 综合续航里程 | 151.3718 | 151.733 6 | 0.24 |

由表7可知,优化后的各项指标均优于优化前方案。虽然续航里程并无显著提升,但动力性明显优于优化前整车动力性。

在满足设计目标的前提下,利用 Advisor 软件进行整车仿真,优化前后的续航里程仿真结果如图5所示。

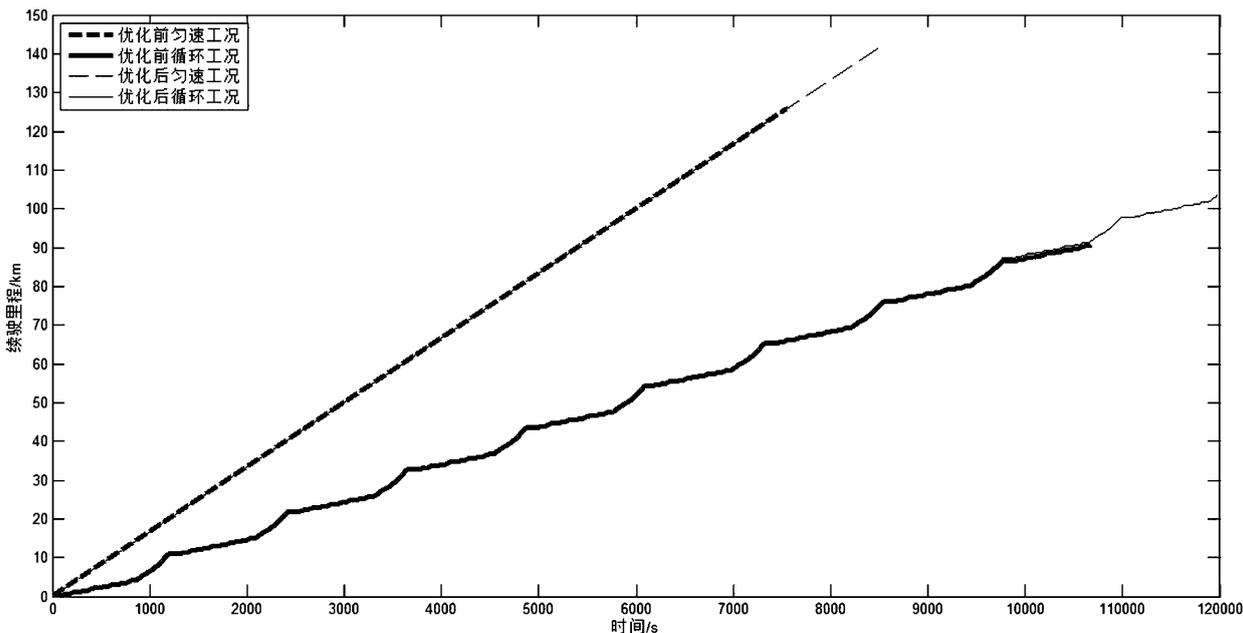


图5 优化前后续航里程图对比图

仿真得到优化后的XH2型纯电动汽车在16 kWh电量下的综合续航里程达到140 km左右,比优化前提高12~16 km。百公里电耗在11.3~15.4 kWh范围内,最大爬坡度可达55%,0~80 km/h加速时间9.1 s,比优化前提高1.7 s,最高车速超过

150 km/h,比优化前提高10 km/h。仿真得到的续航里程和百公里电耗与理论计算时的误差较大,主要原因是计算时未能考虑电池在放电后期的性能衰减;但在同一层面上,传动比方案的优化,对于整车动力性和经济性均有较大改善,并且均满足整车

设计目标性能。

5 结论

本文作者以传动比为切入点,对 XH2 型纯电动汽车进行匹配优化,以便改善该型车辆的整车动力性和经济性。通过上述研究工作得出了以下结论。

1)在纯电动汽车动力匹配选型计算中,应当考虑电池在放电后期引起的性能衰减以及换挡策略的研究。同时,应考虑动力系统中高压配电箱及线路附件电气效率的影响。

2)非线性处理方式能很好地用于整车多目标优化,其中基因修复方式更为突出,其运算速度更快,较少的迭代次数就能得到最优解。而基于 NS-GAII 算法的分层优化方式虽然也能获得较好的解集,但计算效率低,可酌情考虑。

3)基于基因方式得到传动比方案,对整车动力性改善明显,而经济性的提高较少。

4)最佳传动比方案必为图 4 中所形成的帕累托前沿上的方案,否则传动比针对动力性与经济性方面的提升仍有更优方案。

参 考 文 献

[1] 邹政耀,王若平. 新能源汽车技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013:3-8.

[2] 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.

[3] 张抗抗. 纯电动汽车效能优化方法研究[D]. 北京:清华大学,2014.

[4] 刘振军,崔荣宾,赵江灵,等. 纯电动汽车两档变速器的研究与设计[J]. 重庆理工大学学报,2014,28(2):7.

[5] 张珍,陈丁跃,刘栋. 纯电动汽车驱动系统的参数设计及匹配[J]. 上海汽车,2010(8):7.

[6] 任洪涛. XH2 纯电动汽车动力系统匹配及其多目标优化研究[D]. 成都:西华大学,2016.

[7] 周保华. 电动汽车传动系统参数设计及换挡控制研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.

[8] 王慧怡. 电动汽车动力性经济性综合评价研究[D]. 长春:吉林大学,2013.

[9] 周胜. 纯电动汽车动力性及经济型评价分析[D]. 长沙:湖南大学,2013.

[10] 刘新. 纯电动汽车动力参数匹配与仿真研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.

[11] 周胜,周云山. 纯电动汽车动力匹配及计算仿真[J]. 计算机仿真,2013,30(2):135-139.

[12] 宋媛媛. 基于行驶工况的纯电动汽车能耗建模及续航里程估算研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009:80.

[14] 王望予. 汽车设计[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2013:89.

[15] 李俊伟. 增程式电动汽车动力系统参数匹配及基于遗传算法的传动比优化研究[D]. 太原:中北大学,2014.

[16] ZITZLER E, DEBANDL K Thiele. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: Empirical results[J]. Evol Comput,2000,8:173.

(编校:夏书林)