

7-2-2020

Powertrain System Matching Optimization and Regenerative Braking Strategy for Pure Electric Vehicle

Zhang Qi

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

Xiaoling Fu

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;2. Department of Physics, Changji University, Changji 831100, China;

Li Ke

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

Guojing Xing

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Powertrain System Matching Optimization and Regenerative Braking Strategy for Pure Electric Vehicle

Abstract

Abstract: *Different matching proposals meeting the constraints were multi-objective optimized with the combined matrix, and a new regenerative braking control strategy for electric vehicle was designed.*

According to the design targets of pure electric vehicle, the parameters of drive motor, battery pack and reducer were analyzed. Multi-objective optimization function was designed with the linearity weighted aggregation method, considering both power and economy of electric vehicle, and the vehicle performance of different proposals was comparatively measured through Cruise combined matrix simulation. The front and rear braking force distribution control strategy was designed based on the velocity and brake pedal intensity. Simulation results show that the selection and matching of powertrain system has a great impact on the electric vehicle's power and economy, and the regenerative braking control strategy takes into account both energy recovery and braking safety.

Keywords

electric vehicle, matching optimization, regenerative braking strategy, modeling and simulation, AVL Cruise

Authors

Zhang Qi, Xiaoling Fu, Li Ke, Guojing Xing, and Chenghui Zhang

Recommended Citation

Zhang Qi, Fu Xiaoling, Li Ke, Xing Guojing, Zhang Chenghui. Powertrain System Matching Optimization and Regenerative Braking Strategy for Pure Electric Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 600-609.

纯电动汽车动力系统匹配优化与再生制动策略

张奇¹, 符晓玲^{1,2}, 李珂¹, 邢国靖¹, 张承慧¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 昌吉学院物理系, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 通过组合矩阵实验和多目标优化方法评价了不同匹配方案, 设计了一种新型电动汽车再生制动控制策略。根据整车性能指标分析电机、电池、主减速器等需求; 采用线性加权法设计了兼顾动力性与经济性的多目标优化函数, 并通过 Cruise 组合矩阵实验, 衡量了不同匹配方案的优劣; 最后, 依据车速和制动踏板强度设计了基于前后轮制动力分配的再生制动策略。仿真结果表明电动汽车动力系统的选型匹配对整车动力性和经济性影响很大, 再生制动控制策略兼顾了能量回收和制动安全性。

关键词: 电动汽车; 匹配优化; 再生制动策略; 建模与仿真; AVL Cruise

中图分类号: TP391.9;U469.72 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 03-0600-10

Powertrain System Matching Optimization and Regenerative Braking Strategy for Pure Electric Vehicle

Zhang Qi¹, Fu Xiaoling^{1,2}, Li Ke¹, Xing Guojing¹, Zhang Chenghui¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Department of Physics, Changji University, Changji 831100, China)

Abstract: Different matching proposals meeting the constraints were multi-objective optimized with the combined matrix, and a new regenerative braking control strategy for electric vehicle was designed. According to the design targets of pure electric vehicle, the parameters of drive motor, battery pack and reducer were analyzed. Multi-objective optimization function was designed with the linearity weighted aggregation method, considering both power and economy of electric vehicle, and the vehicle performance of different proposals was comparatively measured through Cruise combined matrix simulation. The front and rear braking force distribution control strategy was designed based on the velocity and brake pedal intensity. Simulation results show that the selection and matching of powertrain system has a great impact on the electric vehicle's power and economy, and the regenerative braking control strategy takes into account both energy recovery and braking safety.

Keywords: electric vehicle; matching optimization; regenerative braking strategy; modeling and simulation; AVL Cruise

引言

随着能源危机和环境污染的日益严重, 新能源

和节能技术的地位越来越重要。在汽车领域, 零排放、无污染的纯电动汽车已经成为未来汽车发展的主要方向^[1]。与混合动力电动汽车不同, 纯电动汽车唯一的动力源和能量源是驱动电机和动力电池, 其选型是否合理、参数是否匹配直接影响整车的动力性、经济性和成本^[2]。

电机、电池、主减速器等品类繁多、性能各异, 如何根据整车设计指标选择动力总成的最佳匹配,



收稿日期: 2014-11-13 修回日期: 2015-02-06;
基金项目: 国家自然科学基金(51277116, 61304130, 61304029);
作者简介: 张奇(1987-), 男, 山东, 助理实验师, 研究方向为电动汽车; 符晓玲(1977-), 女, 新疆, 博士生, 讲师, 研究方向为电动汽车; 李珂(通讯作者 1979-), 男, 山东, 博士, 副教授, 研究方向为新能源与电气传动。

<http://www.china-simulation.com>

• 600 •

是电动汽车研发人员首先要解决的问题。目前电动汽车领域专业的仿真软件主要有 Advisor^[3], Cruise, CarSim^[4], PSAT 和 HEVSim 等^[5], 其中正向仿真软件 Cruise 采用图形化、模块化、分层化建模方式, 提高了系统的建模速度和灵活度; 更重要的是 Cruise 开放了丰富的软硬件接口, 实现了与 Matlab, CarSim, CarMaker 等仿真软件和 dSPACE, ETAS, InMotion 等硬件系统的联合仿真, 在国内外汽车厂商和科研院所的部件选型、性能预测和控制器开发等方面得到了广泛应用^[6-11]。

根据电动汽车整车参数和性能指标, 分析了动力需求, 通过 Cruise 汽车仿真软件, 采用组合矩阵实验和多目标优化方法得到了动力系统的最优匹配; 并设计了一种新型的再生制动控制策略。

1 整车基本参数与性能指标

根据标准 GB/T3730.3-1992^[12] 和 GB1589-2004^[13], 参照国内纯电动汽车和 Cruise 模型实例, 设计的纯电动汽车整车基本参数如表 1 所示; 根据标准 GB/T28382-2012^[14], 设计的整车动力性与经济性指标如表 2 所示。

表 1 整车基本参数

参数	指标	参数	指标
整备质量/kg	1 280	轴距/mm	2 400
满载质量/kg	1 580	轮胎滚动半径/mm	301
迎风面积/m ²	1.95	轮胎转动惯量/kg·m ²	0.1431
风阻系数	0.38	滚动阻力系数	0.015

表 2 整车性能指标

动力性能	指标	经济性能	指标
最高车速/(km/h)	≥130	NEDC 续驶里程/km	>80
最大爬坡度%	≥30	FTP75 续驶里程/km	>80
0~50 km/h 加速时间/s	≤6	NEDC 百公里电耗/kWh	≤16
0~80 km/h 加速时间/s	≤10	FTP75 百公里电耗/kWh	≤18

2 整车参数匹配

参数匹配的主要任务是根据整车参数和性能指标, 通过理论分析计算, 确定电机、电池等参数选型范围。理想的参数匹配实际是一个约束非线性

优化问题, 是根据整车参数、性能指标等约束性条件, 通过优化算法, 得到动力系统参数的最优解。然而, 要优化的系统参数与整车动力性和经济性指标之间是相互影响、乃至矛盾的关系。有些参数, 如电机需求功率, 并不是电机本身的内部变量, 通过匹配也只能得到下限值; 又如电机最大转速、最大扭矩与主减速比之间彼此耦合、相互限制, 共同决定了汽车的最高车速、最大爬坡度等性能, 无法直接确定其一, 因此同时对这些参数进行优化的难度很大。在实际中, 受汽车需求功率的限制, 电机功率一般是首先需要确定的变量, 然后可根据电机转速和转矩, 通过优化主减速器的速比来满足最高车速、爬坡度等指标。

2.1 驱动电机参数匹配

电动汽车驱动电机匹配主要是根据整车性能指标, 考虑行驶工况, 确定电机额定功率、峰值功率、最高转速和峰值扭矩等^[15-16]。

2.1.1 电机额定功率

电机功率应考虑持续运行时的额定功率和短时运行的峰值功率。其中, 额定功率一般可由汽车在水平道路上以最高车速行驶时的功率来确定, 此时电机的输出功率为^[17]:

$$P_{\text{const}} = \frac{1}{3600} \left(mgf + \frac{C_D A_f V_{\text{max}}^2}{21.25} \right) \frac{V_{\text{max}}}{\eta_t} \quad (1)$$

式中: m 为整备质量, 单位 kg; f 为滚动阻力系数; A_f 为迎风面积, 单位 m²; C_D 为空气阻力系数; V_{max} 为最高车速, 单位 km/h; η_t 为电机输出轴到驱动轮之间机械传动装置的总传递效率。

代入参数可得汽车需求功率为 29.87 kW, 考虑效率和余量, 选取电机的额定功率应 ≥31 kW。

2.1.2 电机峰值功率

电机峰值功率一般出现在汽车最大爬坡或全力加速行驶时, 其中最大坡度下电机短时输出功率为^[17]:

$$P_{slp} = \frac{1}{3600} [mg(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) + \frac{C_D A_f V_{\alpha_{\max}}^2}{21.25}] \frac{V_{\alpha_{\max}}}{\eta_t} \quad (2)$$

式中： α_{\max} 为最大爬坡度； $V_{\alpha_{\max}}$ 为爬坡速度，单位 km/h。

代入最大爬坡度指标 30%，取爬坡速度 20 km/h，计算可得电机需求功率为 22.45 kW。另外，根据 GB/T28382-2012：通过 4%坡度的最高车速不低于 60 km/h；通过 12%坡度的最高车速不低于 30 km/h。由式(2)可得这两条指标要求的电机功率至少为 14.45 kW 和 15.18 kW。

汽车全力加速行驶时，需要满足加速时间的指标要求，此时电机的需求功率为^[17]：

$$P_{acc} = \frac{1}{3600} [\frac{2}{3} mgf + \frac{2}{5} \frac{C_D A_f V_{end}^2}{21.25} + \frac{\delta m V_{end}}{2 t_d^{1.5}}] \frac{V_{end}}{\eta_t} \quad (3)$$

式中： δ 为旋转质量换算系数； t_d 为加速时间，单位 s； V_{end} 为加速目标速度，单位 km/h。

代入 0~50 km/h 和 0~80 km/h 的加速时间指标，可得电机输出功率分别为 37.11 kW 和 46.41 kW。

电机峰值功率即为同时满足以上需求功率的最大值， $P_{\max} = \text{MAX} \{22.45, 14.45, 15.18, 37.11, 46.41\}$ kW = 46.41 kW。考虑效率和余量，所选电机峰值功率应 ≥ 49 kW。

综上得到了电机需求峰值功率和额定功率，虽然没有限制功率上限值，但是并不意味着电机功率选得越大就越好。因为随着功率增大，电机体积和质量也会随之增加，而且功率过大会导致汽车行驶中电机不能在高效率区附近工作，导致经济性变差，能量利用率变低。此外，还要考虑电机峰值功率与额定功率比值限制，即电机过载系数范围。

2.1.3 电机最高转速

车用驱动电机一般选用中高速电机，电机最高转速没有特别具体的限值要求。另外，考虑最大转

速与额定转速的比值的限制，即扩大恒功率区系数的范围，电机额定转速也随之确定。选定电机的最高和额定转速分别为 7 500 r/min 和 3 000 r/min。

2.1.4 电机峰值转矩

电机峰值功率为电机在额定转速以最大转矩运行时输出的功率，有：

$$P_{\max} = \frac{n_{rat} T_{\max}}{9550} \quad (4)$$

代入参数，可知电机的峰值转矩约为 210 Nm。

2.2 动力电池组参数匹配

动力电池是纯电动汽车唯一的能量源，其功率大小和容量直接影响整车的动力性和续航里程。

2.2.1 电池充放电功率

电池主要与电机存在能量流动，电池持续放电功率和峰值功率必须与电机功率相匹配。此外，考虑再生制动，电池充电功率还要满足多数工况下的充电需求。

2.2.2 电池容量

根据整车百公里耗电和续航里程指标，若只考虑等速工况，则动力电池的能量至少 12.8 kWh，考虑余量，可选电池的能量至少为 15 kWh。根据电池组放电深度、平均工作电压和电机系统效率等，可计算出动力电池的容量：

$$C_{bat} = \frac{1000 E_{bat} L_{dis}}{U_{bat} D_{soc} \eta_{mot}} \quad (5)$$

式中： E_{bat} 为电池存储能量，单位 kW； L_{dis} 为续航里程，单位 km； U_{bat} 为电池平均工作电压，单位 V； D_{soc} 为电池放电深度%； η_{mot} 为电机及控制器效率。

若电池放电深度取 78%，电池组平均工作电压分别为 288 V 和 320 V 时，可得电池容量分别为 59.35 Ah 和 62.84 Ah。

2.3 主减速器参数匹配

与发动机不同，电机具有理想的转速-转矩机

械特性, 工况响应快, 因此与传统汽车采用变速箱不同, 纯电动汽车只需要一个固定速比的主减速器即可。固定速比主减速器不需要换挡执行器和控制器, 结构简单、效率高、成本低, 但其速比对整车性能有较大影响, 必须考虑匹配优化。

当电机以峰值扭矩在最大爬坡度行驶时, 可得主减速器速比的下限值, 式(2)变形, 可得:

$$i \geq \frac{mg(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) + C_D A_f V_{\alpha_{\max}}^2 / 21.25}{T_{\max} \eta_t} r \quad (6)$$

式中: i 为主减速器速比; r 为轮胎滚动半径, 单位 m。

根据电机转速与车速的关系, 由电机最高转速和汽车最高车速可以确定传动比的上限值:

$$i \leq \frac{0.377 \gamma n_{\max}}{V_{\max}} \quad (7)$$

代入数据, 得主减速比取值范围为 $5.79 \leq i \leq 6.55$ 。由公式(6), (7)可知, 一般情况下,

主减速器的速比越大, 电机需求的最大转矩越小, 电机尺寸越小、成本越低, 但速比过大会导致电机转速过高, 增加电机设计开发难度。

综上, 动力部件选型的基本参考如表 3 所示。

表 3 动力系统匹配计算或直接选定结果

动力系统参数	计算或选定结果	其他约束条件
电机额定/最大功率 kW	$\geq 31 / 49$	$2 \leq P_{\max} / P_{\min} \leq 3$
电机额定/最大转速 r/min	3000/7 500	$2 \leq n_{\max} / n \leq 4$
电机最大转矩 Nm	≥ 162	$P_{\max} = n T_{\max} / 9550$
电池放电功率 kW	≥ 42	
电池容量 Ah 320 V/288 V	$\geq 60 / 63$	
主减速器速比	$5.79 \leq i \leq 6.55$	

3 基于 Cruise 组合矩阵的匹配优化

3.1 整车模型搭建

图 1 为在 AVL Cruise 建立的纯电动汽车模型, 系统仿真采用与 Matlab/Simulink 联合仿真的方式。

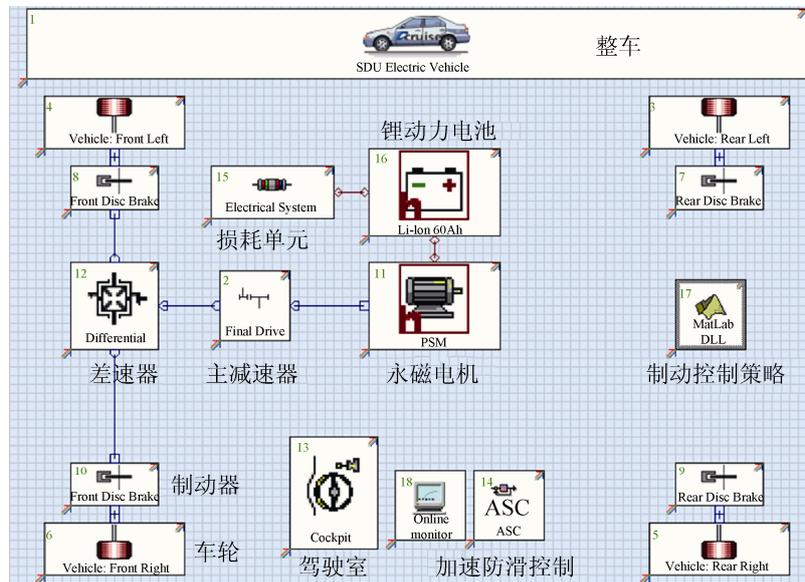


图 1 纯电动汽车 Cruise 仿真模型

3.2 动力系统匹配选型

在实际中, 考虑产品的性能、价格等因素后, 满足整车设计指标部件的可选方案往往是有限的, 因此对可选部件组合方式的匹配优化更具有现实

意义。由于组合会导致计算任务成倍数增加, 而且性能指标等难以直接计算, 需要借助专业的汽车仿真软件, Cruise 矩阵计算功能为解决这一难题提供了便利。根据表 3, 确定的动力系统可选组合方案

如表 4 所示，其中驱动电机选用效率和能量密度高、恒功率区调速范围宽的永磁同步电机；动力电池选用比能量和比功率高、充电时间短、寿命长和安全性相对较好的锂离子电池。

表 4 动力系统部件的可选方案

部件	可选方案	代号	备注
永磁同步电机	额定电压 288 V	M_1	最高转速 7 500 r/min
	峰值功率 66 kW		额定转速 3 000 r/min
	额定功率 32 kW		最大扭矩 210 Nm
主减速器	5.84	K_1	$K_{i+1} = K_i + 0.1$
	$i = \{1, 2, \dots, 7\}$
	6.54	K_8	$K_1 = 5.84$
动力电池	320V 60 Ah	B_1	100 串 6 并/600 节
	288V 63 Ah	B_2	90 串 7 并/630 节

3.3 组合矩阵计算与结果分析

Cruise 仿真实验中，以电机、电池等需匹配优化的部件作为组合矩阵的输入，通过加载不同的测试任务，如工况循环、全力加速、爬坡测试等，可以对整车性能进行仿真测试。系统仿真中组合矩阵输入方法和仿真测试任务如图 2 所示。

为保护电池，仿真中电池组的放电深度只有 78%，即 SOC 工作区间为 20%~98%。行驶工况选取典型的欧盟标准 NEDC 和美国标准 FTP75，其

中 NEDC 工况是一种稳态工况，局部速度恒定；FTP75 工况行驶区间多为变速行驶，更接近真实的行驶工况。不同匹配方案的动力性、经济性仿真结果对比曲线如图 3 所示。Cruise 仿真结果表明：

1) 依据选型匹配，计算得到的动力系统基本满足表 2 中整车指标要求，但由于选型部件的余量较小，考虑损耗等因素，在主减速比为 K_1 - K_3 时，最高爬坡度稍微低于预期。

2) 由于忽略了电池质量等差异，两种动力电池对整车动力性基本无影响，但续航里程和百公里电耗与其密切相关。由于行驶工况并非等速工况，所以百公里电耗与续航里程并无明确的关系，并非百公里电耗越小，续航里程就越大。

3) 汽车最高车速和最大爬坡度都是反映汽车动力性能的重要指标，但两者无法同时得到提高，因此在多目标优化设计中，必须针对特定需求，选择具体的优化目标。

虽然不同组合都能基本满足整车性能指标，但电动汽车在设计时往往侧重点于某些指标，从而产生了方案择优问题。然而，由于不同评价指标彼此联系又相互矛盾，无法直接进行择优，实质上，该问题是一个多目标优化问题。

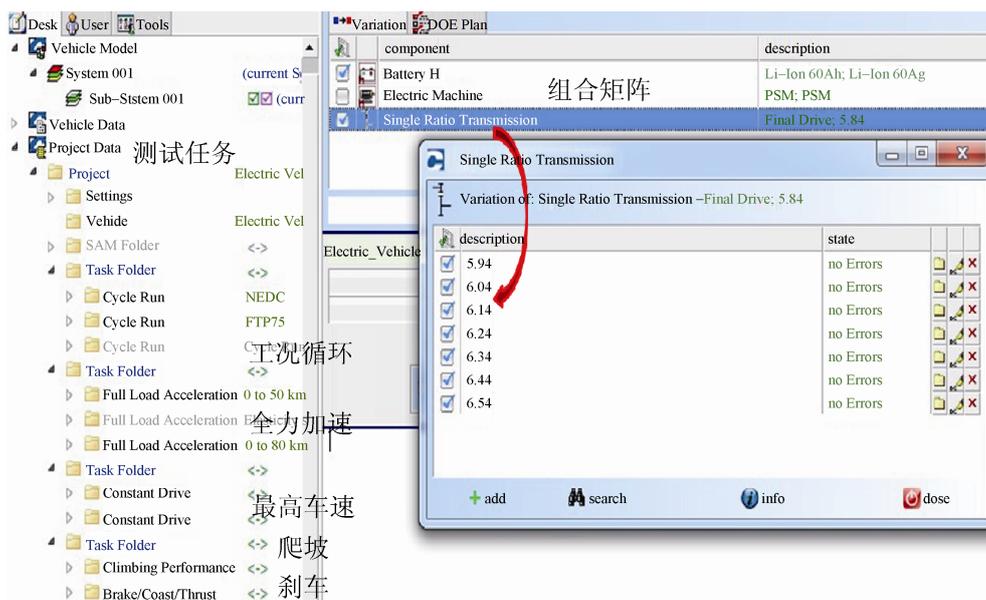


图 2 Cruise 组合矩阵输入和仿真测试任务

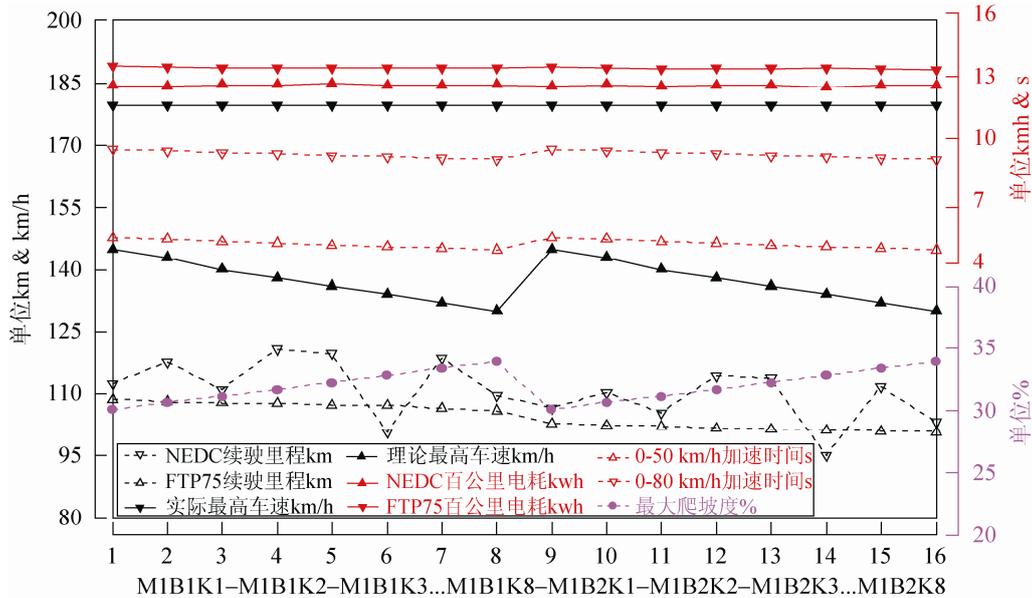


图 3 不同匹配方案的动力性、经济性仿真结果对比曲线

3.4 多目标优化函数设计

目前解决多目标优化问题的方法主要有加权系数法、目标规划法等传统方法和进化算法、模拟退火算法、粒子群算法、克隆选择算法等现代启发式算法^[18]。其中加权系数法简单有效,通过对不同性能指标分配不同的权重因子,可以实现将方案择优的多目标优化问题转化成单目标问题。

在多目标优化时,由于不同指标的单位量纲不同,比如最高车速(km/h)和续航里程(km),无法直接线性加权,因此必须首先需要进行无量纲变换以修正单位量纲的影响^[19]。变换公式为:

$$Y = \frac{X - \bar{X}}{\delta} \quad (8)$$

式中: X 为参数现值; \bar{X} 为参数均值; δ 为标准差。

据此,可定义无量纲影响的多目标优化函数:

$$\begin{cases} M(y) = k_1 P_{ow}(y) + k_2 E_{co}(y) + k_3 E_{mi}(y) \\ \sum_{i=1}^3 k_i = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{ow}(y)$, $E_{co}(y)$, $E_{mi}(y)$ 分别为无量纲化后的动力性能、经济性能和排放性能; k_1 , k_2 , k_3 分别为对应的加权系数。

由设计指标可知,动力性指标包括最高车速、

最大爬坡度、不同车速的加速时间等,经济性指标包括不同路况下的百公里油耗和续航里程等。在实际中,优化目标并不是要全面优化这些指标,而是在所有性能满足设计指标前提下,根据特定需求再重点优化某些性能,比如赛车会更关注最高车速、电动汽车更关注续航里程等、山地越野车可能会更关注爬坡性能等,不同特定需求决定了不同的目标优化函数。

线性加权法在选取优化的评价指标时,一般要求各指标有相同的变化趋势,即所优化的指标取值都是越大越好或者越小越好。在这里,考虑通常对于能量有限的纯电动汽车来说,消费者更关心电动汽车充电一次能跑多远,所以经济性指标选取 NEDC 和 FTP75 工况下的续航里程,动力性评价指标选取实际最高车速。此外,在多目标优化转为单目标优化的过程中,加权系数的选取是一个极为困难的问题,这里考虑更多关注电动汽车的续航里程,因此 k_2 选取适当大于 k_1 , 分别取 0.7 和 0.3。纯电动汽车无尾气排放,因此 $k_3=0$ 。

考虑指标要求等约束性条件后,上述多目标优化函数可表示为:

$$\begin{cases} V_{\min} & M(y) = k_1 P_{ow}(y) + (1 - k_1) E_{co}(y) \\ \text{s.t.} & V_{\max} \geq 130, \text{且} L_{nedc} \geq 80, L_{ftp} \geq 80 \end{cases} \quad (10)$$

采用无量纲变换后, 评价结果如表 5 所示。最高车速和续驶里程都是越大越好, 因此总目标优化函数评价也是越大越好。考虑主减速比取 K1-K3 时, 最高爬坡度不满足指标, 因此永磁电机与 320 V/60 Ah 锂动力电池、速比 6.14 的主减速器相匹配的 M1B1K4 方案是加权系数分别取 0.7 和 0.3 时的最优方案。从表 6 最优方案与设计指标的性能提升对比可知, 最终方案性能提升的比重也反映优化目标的权重系数的不同, 权重系数越大, 其性能提升比例也一般越大。通过组合匹配仿真实验可知, 动力系统的匹配优化对整车性能有直接影响, 当各可选部件方案较多, 尤其是方案之间差异较大时, 效果会更加显著。

表 5 不同匹配方案的单目标函数优化评价

方案 M1	评价	方案 M1	评价
B1K1	1.63	B2K1	-0.36
B1K2	1.88	B2K2	-0.22
B1K3	1.00	B2K3	-0.95
B1K4	1.81	B2K4	-0.24
B1K5	1.48	B2K5	-0.49
B1K6	-0.59	B2K6	-2.54
B1K7	0.95	B2K7	-1.05
B1K8	-0.20	B2K8	-2.09

表 6 最优方案整车性能提升比例

动力性能	提升	经济性能	提升
最高车速	6.15%	NEDC 续驶里程	50.8%
最大爬坡度	1.07%	FTP75 续驶里程	34.5%
50km/h 加速时间	11.8%	NEDC 百公里电耗	19.4%
80km/h 加速时间	4.50%	FTP75 百公里电耗	23.8%

4 再生制动控制策略与 Cruise 仿真

4.1 再生制动控制策略

在动力总成最优匹配的基础上, 进行控制策略的验证, 是电动汽车设计开发的过程之一。纯电动汽车能量有限, 减速制动时又将多余的动能转化为热量耗散掉。据统计, 在城市工况下制动能量能占

到所用总能量的一半左右, 浪费严重。因此在能量紧张的纯电动汽车上研究有效的再生制动控制策略具有重要的现实意义。

再生制动力分配策略主要有基于车速分配、基于理想前后轮制动力分配^[20]和基于最优回馈能量制动力分配^[21]。文献[20]引入实际比例阀液压分配线, 设计了一种实用的前后轮制动力分配策略; 文献[21]基于前后轮制动力分配方案, 从电机效率优化角度提出了一种高效回馈制动策略; 文献[22]基于再生制动电路, 以充电电流为控制对象, 设计了一种再生制动 H_∞鲁棒控制器。

本文制动策略与上述方法不同, 以制动踏板强度为基本判定依据, 设计了基于前后轮制动力分配的控制策略, 并以车速进一步划分制动力分配系数, 融合了基于车速分配的优点。与原基于理想前后轮制动力分配策略相比, 通过增加策略的判定维数, 使制动控制策略更为精细; 通过调整判定阈值可以在制动回收和制动安全之间的侧重点进行平衡, 保证了在提高能量利用率的同时, 兼顾了制动安全, 实用性较强。

4.2 再生制动力分配与仿真建模

由图 1 可知, 电动汽车为前轮驱动, 因此前驱动轮再生制动力的大小直接决定了制动过程回收的能量。前驱动轮再生制动力的大小基本由 3 个过程决定: (1) 前后轮总制动力要满足整车制动距离的要求; (2) 总制动力前后轮之间的分配比例, 要满足整车制动时的稳定性; (3) 前驱动轮的机械制动力和再生制动力之间的分配问题。

再生制动控制策略首先根据车辆当前行驶状态(车速大小)和驾驶员制动需求(制动踏板强度)来判断驾驶员的制动意愿是紧急强制动、中度还是轻度制动需求^[23], 进而决定采取得制动模式, 包括无制动模式、只有前轮驱动轮制动模式、前后轮同时制动有再生制动模式和前后轮同时制动无再生制动模式。

制动模式 M_B 判断条件基本表达式:

$$M_B = \begin{cases} M_0 & P_B = 0 \\ M_1 & 0 < P_B \leq 0.1, \\ & \text{且 } SOC < SOC_{high}, \\ & v_{veh} \sim v_{seti} (i = 1, 2, \dots, m) \\ M_2 & 0.1 < P_B < 0.8, \\ & \text{且 } SOC < SOC_{high}, \\ & v_{veh} \sim v_{setj} (j = 1, 2, \dots, n) \\ M_3 & P_B \geq 0.8 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $M_i (i=0 \sim 3)$ 分别代表 4 种制动模式; SOC_{high} 表示电池 SOC 设定的上限值; v_{seti} , v_{setj} 分别表示再生制动时根据车速划分的再生制动比例系数作用域。

当制动踏板强度 $P_B=0$ 时, 显然, 前后轮均无制动力; 当制动强度 $0 < P_B \leq 0.1$ 时, 驾驶员制动需求比较小, 总制动力全部由前轮驱动轮承担, 且有再生制动力; 当 $0.1 < P_B < 0.8$ 时, 电动汽车总制动力按制动力分配需求在前后轮之间进行分配, 且前轮制动力按照制动力系数分配再生制动力和机械制动力的大小; 当 $P_B \geq 0.8$ 时, 驾驶员制动需求较为强烈, 为保证制动安全, 前驱动轮无再生制动, 总制动力均由前后轮的机械制动力来提供。

与单独考虑制动踏板强度来判断制动模式相比, 通过引入当前车速作为参考量划分不同的再生制动系数作用域, 能够调整再生制动能量回收与制动安全性之间的侧重, 比如中度制动强度但车速过快时, 可适当增大驱动轮机械制动力的分配。此外, 还通过限定电机作为发电机工作时的区域和电池 SOC 工作范围, 确保再生制动转矩不会高于发电机当前最大转矩和电池在再生制动时不会过充。

在 Cruise 中, 总需求制动力矩 T_B 等于制动踏板强度与前后轮制动器最大制动力的乘积, 而制动器最大制动力由制动器参数决定;

$$\begin{cases} T_B = 2P_B (T_{Bf \max} + T_{Br \max}) \\ T_{Bf \max} = p_{Bf} \cdot A_f \cdot \eta_f \cdot \mu_f \cdot r_f \cdot c_f \\ T_{Br \max} = p_{Br} \cdot A_r \cdot \eta_r \cdot \mu_r \cdot r_r \cdot c_r \end{cases} \quad (12)$$

式中: $T_{Bf \max}$, $T_{Br \max}$ 分别是前后轮制动器能够提供的最大制动力矩, 单位 Nm; p_B 表示前后轮当

前制动力的大小, 单位 N; 其余参数为车轮制动器的物理参数。

前驱动轮再生和机械制动力的分配系数采用车速与再生/机械制动系数的查表法获得, 而分配系数一般通过试验或根据经验得到。再生制动时制动力分配过程如图 4 所示。

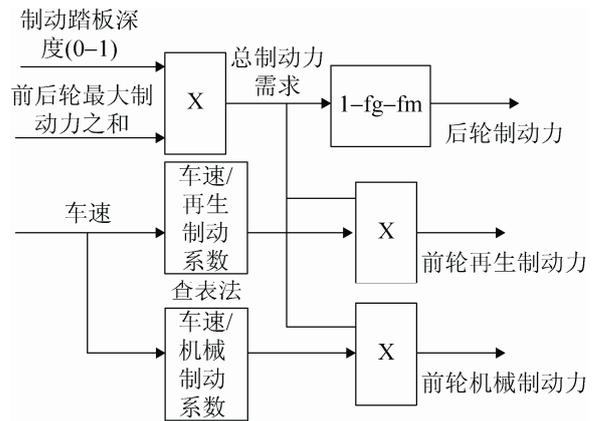


图 4 再生制动时制动力分配过程

在 Cruise 中修正后的电机给定负载信号 Lg_m 可表示为:

$$Lg_m = \begin{cases} \frac{T_d}{T_{m \max}} & M_B = M_0 \text{ 或 } M_3; Lg_m \in [-1 \sim 0] \\ \frac{T_{br}}{T_{g \max}} & M_B = M_1, \text{ 或 } M_2; Lg_m \in [0 \sim 1] \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_d , T_{br} 分别表示电机需求的驱动和制动转矩; $T_{m \max}$, $T_{g \max}$ 分别表示电机作为电动机和发电机时的当前最大转矩。

通过再生制动, 实现了能量制动回收和制动安全之间的平衡, 保证了电机和电池能够在合理高效的区间运行, 实现整车动力性、经济性和舒适性的综合控制。

4.3 再生制动 Cruise 仿真实验结果

再生制动控制策略的部分仿真结果如图 5~9 所示。在 NEDC 工况和 FTP75 工况下, 实际车速与电机输出转矩、输出功率变化曲线, 图 5~6 是分别可知实际车速与目标车速曲线基本吻合, 表明电机功率能够满足该工况下整车的动力需求; 在控制策略下, 整车能够及时响应车速需求, 控制效果

符合预期设计目标；在制动阶段，电机处于发电状态，能够实现能量回馈。

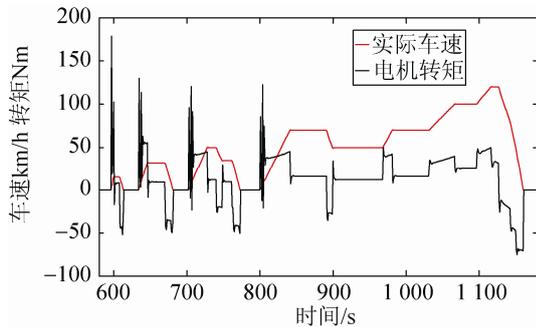


图 5 NEDC 工况下实际车速与电机输出转矩曲线

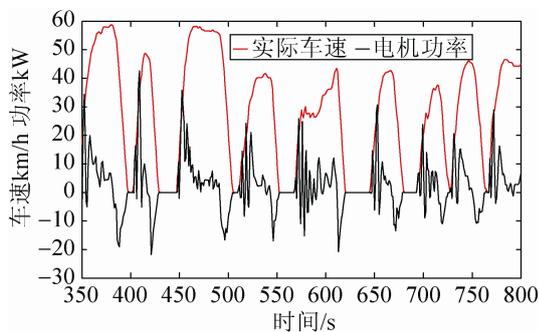


图 6 FTP75 工况下实际车速与电机输出功率曲线

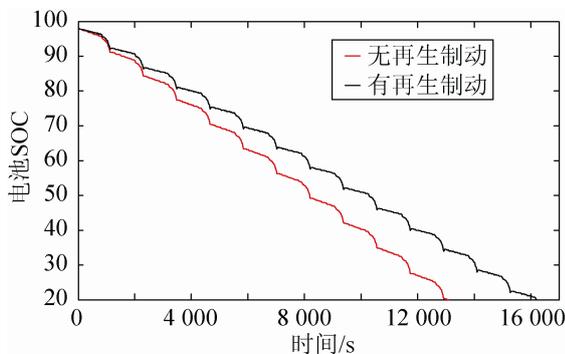


图 7 NEDC 工况下有无再生制动时电池 SOC 变化对比曲线

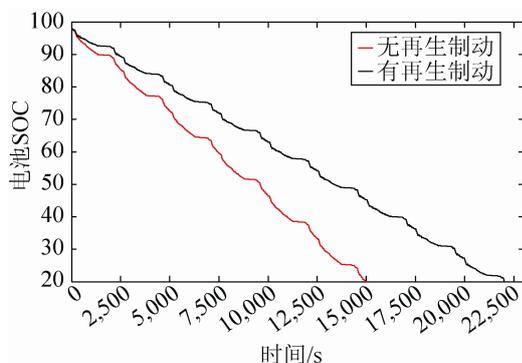


图 8 FTP75 工况下有无再生制动时电池 SOC 变化对比曲线

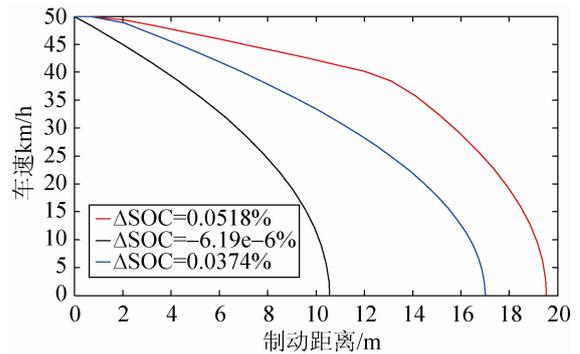


图 9 有无再生制动时车速与制动距离对比曲线

图 7~8 是分别在 NEDC 工况和 FTP75 工况下，有无再生制动控制策略时，电池 SOC 变化的对比曲线。由 Cruise.log 仿真结果计算可知，再生制动控制策略下使电动汽车的续航里程分别提高了 21.9% 和 45.3%。可见，在更接近实际路况行驶的 FTP75 瞬态工况下，由于存在较频繁的制动过程，再生制动的优势更加显著；与无再生制动时相比，再生制动显著提高了能量的利用率。

除回收能量外，还要考虑整车制动安全。根据 GB7258-1997^[24]，由 Cruise 制动实验结果图 9 可知，再生制动控制策略分配了部分制动转矩用于能量回收，影响了制动效果，与无再生制动的 10.5 m 相比有所增加，但仍然符合“初始速度 50 km/h 时，制动距离不超过 21 m”的制动要求。实际上，通过改变制动踏板强度和车速两个判断条件的阈值，可以调整再生制动过程能量回收和制动安全之间的平衡。前驱动轮再生制动转矩分配的大小是综合考虑经济性与安全制动要求的结果。由制动实验可知，通过调整再生制动控制策略，既可以实现整车制动的安全性指标，又能实现制动能量的回收。

5 结论

动力系统的匹配优化是电动汽车设计过程中不可缺少，其方案评价等问题实质上是多目标优化问题。在现实生活中，多目标优化问题非常普遍，借助遗传算法、粒子群算法等现代智能算法解决该类问题也是目前研究的热点问题之一。

制动能量回收对能量有限的纯电动汽车来说

意义重大, 再生制动控制一方面要考虑回收效率, 另一方面还要兼顾制动安全性要求。再生制动控制系统中再生制动力与保留的机械制动力的合理分配也是一个值得深入研究的问题。

混合动力电动汽车是目前市场量产的主流电动汽车, 与纯电动汽车相比, 混合动力汽车的匹配优化过程更加复杂。本文研究的内容可推广到约束性更强、系统更复杂的混合动力电动汽车, 对获得发动机、电机与传动装置之间的最佳匹配关系, 改善发动机的工作点, 提高发动机燃油经济性和减少尾气排放具有重要作用, 为其建模与控制等问题的解决提供了参考和快速有效的方法。

参考文献:

- [1] 张荣贵. 我国电动汽车发展前景 [J]. 机电技术, 2008 (4): 81-84.
- [2] 喻皓. 基于 Cruise 的增程式纯电动汽车仿真匹配分析 [J]. 机电工程技术, 2010, 39(8): 28-30.
- [3] 张昌利, 张亚军, 闫茂德, 等. 双能量源纯电动汽车再生制动模糊控制与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 233-238. (Zhang Changli, Zhang Yajun, Yan Maode, et al. Fuzzy Control Modeling and Simulation of Regenerative Braking System for Pure Electric Vehicle with Dual-source Energy Storage System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2011, 23(2): 233-238.)
- [4] 熊璐, 陈晨, 冯源. 基于 Carsim/Simulink 联合仿真的分布式驱动电动汽车建模 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1143-1148, 1155. (Xiong Lu, Chen Chen, Feng Yuan. Modeling of Distributed Drive Electric Vehicle Based on Co-simulation of Carsim/Simulink [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(5): 1143-1148, 1155.)
- [5] 张翔, 钱立军, 张炳力, 等. 电动汽车仿真软件进展 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1621-1623. (Zhang Xiang, Qian Lijun, Zhang Bingli, et al. State-of-the-art of the Electric Vehicles Simulation Software [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(8): 1621-1623.)
- [6] 吴剑, 张承慧, 崔纳新, 等. CRUISE 软件及其在电动汽车仿真中的应用 [C]// 2005 中国电动汽车研究与开发, 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 347-352.
- [7] 汪斌, 李峥, 彭红涛, 等. CRUISE 软件在混合动力汽车性能仿真中的应用 [J]. 汽车科技, 2007 (5): 38-40.
- [8] 姜海斌, 黄宏成. CRUISE 纯电动车动力性能仿真及优化 [J]. 机械与电子, 2010 (4): 61-65.
- [9] 陈树勇, 陈全世. 动力驱动系统匹配与控制策略研究 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(3): 276-280.
- [10] Wang Baohua, Luo Yongge. AVL Cruise-based Modeling and Simulation of EQ6110 Hybrid Electric Public Bus [C]// Computer Application and System Modeling (ICCSM), 2010 International Conference on. USA: IEEE, 2010, 7: 252-255.
- [11] Wang Quan, Wang Qingnian, Zeng Xiaohua. Dynamic Modelling and Simulation of THS II Based on CRUISE Software [C]// Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on. USA: IEEE, 2011: 1075-1079.
- [12] GB/T 3730.3-1992. 汽车和挂车的术语及其定义-车辆尺寸 [S].
- [13] GB 1589-2004. 道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值 [S].
- [14] GB/T 28382-2012. 纯电动乘用车技术条件 [S].
- [15] 王瑞敏, 张帆. 纯电动车动力系统选型和基于 AVL Cruise 的性能仿真 [J]. 移动电源与车辆, 2010 (4): 12-18.
- [16] 宋珂, 章桐. 纯电动和串联式混合动力汽车电机传动系参数匹配 [J]. 汽车工程, 2013, 35(6): 559-564.
- [17] 瓦伦托维兹, 王霄锋. 汽车工程学 I: 汽车纵向动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [18] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.
- [19] 曲玉琨, 张新征, 王章龙, 等. 火炮系统效能综合评价与指标无量纲化处理的研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2007 (3): 1-4.
- [20] 张承慧, 石庆升, 崔纳新. 一种新型的电动汽车再生制动力分配策略 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(增 2): 125-129.
- [21] 李珂, 张承慧, 崔纳新. 电动汽车用高效回馈制动控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(3): 324-330.
- [22] 白志峰, 曹秉刚, 李舒欣, 等. 电动汽车再生制动 H_{∞} 鲁棒控制仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2975-2978. (Bai Zhifeng, Cao Binggang, Li Shuxin, et al. Simulation on H_{∞} Robust Control for Regenerative Braking of Electric Vehicle [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2005, 17(12): 2975-2978.)
- [23] 商高高, 欧昌杰, 孙钦云. 并联式混合动力汽车再生制动控制策略仿真研究 [J]. 车辆与动力技术, 2012 (2): 30-34.
- [24] GB7258-1997. 机动车运行安全技术条件 [S].