

并联混合动力汽车能量管理系统的仿真研究

欧阳壮¹, 张 瑞², 朱天军³

(1. 广东省肇庆市质量计量监督检测所, 广东 肇庆 526070;

2. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056107;

3. 肇庆学院 机械与汽车工程学院, 广东 肇庆 526061)

摘要: 对于混合动力汽车而言, 节能减排是促使其发展的主要原因, 而能量管理策略是节能减排的关键技术, 因此针对并联混合动力汽车的能量管理策略展开研究; 首先运用 ADVISOR 电动汽车仿真软件, 选用某款并联混合动力车型, 并使用标准 ECE_ECDU 和 UDDS 循环工况来评估整车燃油经济性和污染物排放效果; 然后, 采用门限参数优化的方法对控制策略进行优化; 最后对比优化前后不同循环工况仿真结果中汽车的燃油经济性和排放性能的变化, 并分析了优化后的策略对汽车性能的影响; 研究表明, 所提出的优化方法使汽车在 ECE_ECDU 和 UDDS 循环工况中的每百公里油耗分别降低了 8.45% 和 10%, 有害气体 HC、CO 和 NO_x 含量分别减少了 5.88% 和 5.8%、12.24% 和 11.54%、8.55% 和 7.51%, 进一步验证了优化策略的有效性。

关键词: 并联式混合动力汽车; ADVISOR; 逻辑门限策略; 循环工况; 仿真分析

Simulation and Research on Energy Management System of Parallel Hybrid Electric Vehicle

OUYANG Zhuang¹, ZHANG Rui², ZHU Tianjun³

(1. Quality Measurement Supervision and Testing Institute of Zhaoqing City, Zhaoqing 526070, China;

2. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: Energy saving and emission reduction for hybrid electric vehicle are the main reason of its development, and an energy management strategy is the key technology for energy saving and emission reduction. Therefore, the energy management strategy research of parallel hybrid electric vehicle is carried out; Firstly, ADVISOR electric vehicle simulation software is used to select a certain parallel hybrid vehicle, and the cycle conditions of the standard ECE_ECDU and UDDS are used to evaluate the fuel economy and pollutant emission effect of whole vehicle; Then, the threshold parameter optimization method is used to optimize the control strategy; Finally, the changes of fuel economy and emission performance for the vehicle in the simulation results are compared with the different cycle conditions before and after the optimization, and the influence of the optimized strategy on the vehicle performance is analyzed; The research shows that the proposed optimization method can reduce the fuel consumption per 100 kilometers of the car in the ECE_ECDU and UDDS cycle conditions by 8.45% and 10%, respectively, and the harmful gases HC, CO and NO_x content by 5.88% and 5.8%, 12.24% and 11.54%, 8.55% and 7.51%, respectively, which further verifies the effectiveness of the optimization strategy.

Keyword: parallel hybrid vehicle; ADVISOR; logic thresholds policy; cyclic conditions; simulation analysis

0 引言

随着时代的发展, 汽车已经成为了我们日常生活中不可或缺的一部分, 同时汽车的发展也成为了时代发展的重要内容之一。由于石油等不可再生资源的过度挖掘、损耗, 汽车燃料的使用迎来了新的挑战, 传统的燃油汽车已不符合时代发展的需要。由于纯电动汽车具有清洁、无污染的优势, 所

以快速发展起来。目前纯电动汽车存在续航里程短、电池使用年限短的不足, 使其很难被大众所接受。混合动力汽车结合了传统燃油汽车和纯电动汽车的优势, 它的出现不仅实现了汽车在不同能源之间的混合利用, 而且降低了传统汽车能源的使用, 也改变了其驱动结构和方式, 进一步促使混合动力汽车成为未来汽车研发的首选方案之一^[1]。

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-07-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205105); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2017213); 河北省科技计划项目(17394501D); 广东省教育厅特色创新项目(2019KTSCX201); 肇庆市社会与民生科技项目(2020SN004); 广东省教育厅重点领域项目(2021ZDZX1061)。

作者简介: 欧阳壮(1970-), 男, 广东化州人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事检验检测方向的研究。

通讯作者: 朱天军(1977-), 男, 河北邢台人, 博士, 教授, 主要从事车辆动态控制、新能源汽车和自动驾驶汽车应用方向的研究。

引用格式: 欧阳壮, 张 瑞, 朱天军. 并联混合动力汽车能量管理系统的仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 133-139, 146.

对于混合动力汽车来说,它的能量管理系统是使其运行的关键技术。对保证混合动力汽车是否有较好的燃油经济性、综合排放性能以及汽车动力性能均有影响^[2]。混合动力汽车能量管理系统的主要目的是满足汽车驾驶员对牵引功率的需求,维持蓄电池充电并优化传动系效率和油耗和排放^[3-4]。

混合动力汽车能量管理系统的仿真研究,可以完善能量管理策略。在满足汽车行驶工况下所需各方面动力性能要求的同时,让车辆可以实现发动机、电机以及动力电池等部件输出功率的最优分配,使能量利用率达到最高,进而提升车辆的燃油经济性和排放性能^[5-6]。Ramadan 等人提出一种基于 GPS (global positioning system) /规则的混合方法,并结合 PNs (petri nets) 一起使用,以减少驾驶行程中的燃油消耗。这种策略是基于以往行程中记录的 GPS 数据和电池的最终充电容量而开发的^[7]。Rezaei 等人在等效能耗最小化策略的基础上,提出一种新型的并联式混合动力汽车实时能量管理策略即 ECMS-CESO (equivalent consumption minimization strategy-catch energy saving opportunities)。研究表明,与瞬时自适应等效能耗策略相比,燃油经济性提高了 7%^[8]。Han 等人提出一种新型基于能量预测的并联式混合动力汽车能源管理策略 (ECMS-EP, equivalent consumption minimization strategy-energy prediction)。通过 Matlab/Simulink 在 3 种不同的预测时域下进行仿真,验证了所提出的自适应规则 ECMS-EP 的性能。研究显示,与传统的自适应 ECMS (equivalent consumption minimization strategy) 相比,所提出的策略能实现更稳定的 SOC (state of charge),燃油经济性由 2.7% 提升至 7%^[9]。Des Buttes 等人为了检验并联混合动力汽车的规定污染物排放量和混合动力传动系统效率之间的关系。引入排放、废气温度、催化剂传热和效率的简化模型,通过三维动态规划和加权目标函数确定热机和电机之间功率请求的最优分配。在不同的工况下进行对比,得出在最佳扭矩状态下污染物排放减少了 8%~33%^[10]。Hmidi 等人通过能量管理策略优化对车辆最佳运行的参数化研究。提出基于规则的能量管理策略,使用基于灰狼优化算法对规则进行优化。模拟结果推断出最佳能量管理策略对燃油消耗和 CO₂ 排放的影响^[11]。

为了进一步提升基于规则的逻辑门限管理策略的性能,以传统的并联式混合动力汽车为模型。首先通过使用 Matlab/Simulink 和 ADVISOR 软件进行仿真试验。其次利用参数优化的方法对控制策略中的门限参数进行优化。最后对比门限参数优化前后汽车在不同循环工况下的燃油经济性和排放性能的变化,进而得出所提优化方法对汽车性能的影响。

1 并联式混合动力汽车的结构及工作方式

1.1 并联式混合动力汽车

并联式混合动力汽车的结构形式如图 1 所示,发动机和电动机与驱动桥之间的是通过变速装置同时连接的^[12]。

二者共同为驱动轴提供动力,同时也可以作为单一的动力源为车辆提供动力。例如在小载荷路面上行驶而驱动部分处于低转速区时,可以让发动机与离合器分离或者关闭发动机,仅依靠电动机让汽车正常行驶;也可以增加发动机的工作负荷让电动机成为发电为电池提供电能,此时发动机既是汽车的驱动源也是电池的电力来源。这种结构形式的汽车在稳定的高速行驶中,发动机处于满负荷(中等转速)的工作状态,具有较高的工作效率以及质量比,所以在高速公路上行驶时具有很好的燃油经济性。目前这种结构形式常用于小型乘用车。

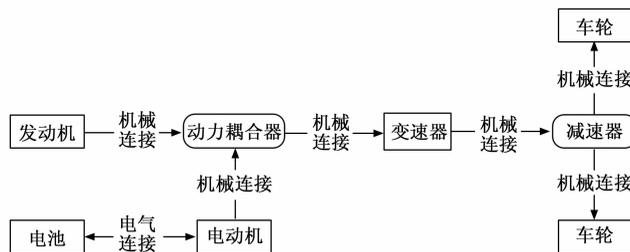


图 1 并联式混合动力汽车结构组成

1.2 并联式混合动力汽车的工作方式

混合动力汽车有两个驱动部件,分别是发动机和电动机,而在并联式混合动力汽车中两者以并联的方式结合在一起共同为汽车提供驱动力。并联结构下,这两个部件都是动力总成,它们之间的功率是可以相互叠加的,发动机功率和电动机功率为汽车所需最大驱动功率的 0.5~1 之间。故可以利用小功率的电动机或者发电机和发动机让整个动力系统的质量、装配尺寸都会有所减小,所以并联式混合动力系统常用于小型乘用车^[13]。

在并联混合动力汽车行驶过程中,汽车的动力来源可以是发动机或电动机与电池组,也可以是由二者共同工作提供动力。此时,发动机和电动机产生的动力通过机械耦合装置之后产生更大的扭矩和驱动力,发动机可以为电池组提供能量,使其处于最佳的工作状态^[14]。

2 并联式混合动力汽车的能量管理策略

混合动力汽车的能量管理系统对保证是否具有较好的燃油经济性、动力性以及排放性都有重大影响,是混合动力汽车发展过程中不可或缺的一步。对于同一种并联式混合动力汽车来说,选择不同的能量管理策略会得到不同的燃油消耗、电池 SOC 值和排放数据^[15-16]。目前主要研究的并联式混合动力汽车的能量管理策略主要包括:基于规则的逻辑门限控制策略、瞬时优化能量管理策略、全局最优能量管理策略以及模糊能量管理策略 4 种能量管理策略^[17]。

2.1 基于规则的逻辑门限控制策略

基于规则的逻辑门限控制策略是通过设置动力电池 SOC 值最大值(最小值)、汽车行驶车速以及发动机工作转速等一组门限参数来限定动力系统各部件所处的工作范围。该种策略根据预设规则判断和选择动力总成的工作模式。同时,根据动力源的稳态效率图确定如何在发动机和电机

之间分配功率以减少油耗和排放。

由于这种策略主要依靠前面累计的工程经验来设置门限参数, 这样并不能保证并联式混合动力汽车可以使燃油经济性达到最优, 且这些静态的门限参数并不能适应工况的动态变化, 无法使得整车系统处于最大效率状态。吴剑提出一种基于动态逻辑门限方法的能量管理策略。通过基于车辆实时参数, 设定一组可变的门限参数, 实现了混合动力系统不同工作模式的切换, 并确定了不同工作模式中动力系统主要部件的最佳工作曲线和合理控制发动机与电机之间的转矩分配以及无级变速器的速比, 进而提高车辆性能^[18]。刘辉等人通过对基于动态逻辑门限参数进行调整, 在发动机的最优工作曲线中引入功率分配因子, 根据电池不同的 SOC 与需求转矩的大小调整发动机和电机的运行方式, 进而改变车辆的驱动模式提升燃油经济性^[19]。

这种能量管理策略相对于其他的能量管理策略较为简单。在汽车实际行驶时, 这种策略易于实现且具有良好的稳定性, 所以被广泛地应用于并联式混合动力汽车。

2.2 瞬时优化控制策略

瞬时优化控制策略作为一种等效燃油消耗最小的控制策略, 其应用效果也比较好。采用这种策略, 可以对汽车的实际耗油量以及汽车的电机等效耗油量进行计算。根据计算结果选择小的耗油量当作计算的工作点, 进而实现发动机、电动机转矩的合理分配。同时在汽车行驶中, 无需事先输入整个行驶工况的数据, 仅通过汽车行驶工况的数据反馈就能对汽车进行瞬时地优化, 进而提升汽车的性能。Kazemi 等人提出一种基于驾驶条件预测的自适应等效能耗最小策略增强方法, 利用车辆在预测时间范围内的近似未来能量需求, 更新等效因子的次优值。结果表明该方法在满足充电可持续性的前提下降低了油耗^[20]。刘西学采用改进的等效能耗最小策略对无级变速器 (CVT, continuously variable transmission) 的速比进行优化, 将优化得到的 CVT 速比嵌套在基于规则的控制策略中, 形成基于 ECMS 和门限值相结合的控制策略。研究表明改进的策略不仅提升了燃油经济性, 也使 SOC 值稳定性更好^[21]。

这种策略在实施过程中具有较为复杂的运算过程, 且成本较高, 因此难以在汽车上大范围推广使用。

2.3 全局最优能量管理策略

全局最优能量管理策略是一种以动态规划为主要手段, 能基于某种工况下对汽车实现全局优化。该种策略具有一定的研究价值, 但是需要将循环工况作为计算的前提条件, 具有一定的局限性。Yuan 等人提出一种新分层能量管理策略。通过引入层次强化学习实现近似全局优化。利用采集的实际行驶工况对车速预测和所提出策略进行验证。研究表明, 所提策略能通过自学习适应驾驶类型的变化, 与基于规则的策略相比, 氢消耗量降低了 6.14%, 进而抑制燃料电池的老化^[22]。Liu 等人以等效因子为核心, 研究等效油耗最小化策略的燃油经济性效应。建立了蓄电池 SOC、车辆加速度 a 和等效因子 S 的关系模型。采用遗传算法对

US06 条件下的校正函数进行优化, 以加速度 a 和电池 SOC 为自变量, 得到了最佳等效因子图, 建立了改进的等效能耗管理全局优化最优等效因子。结果表明与传统的等效能耗管理相比, 即使 SOC 低于目标值, 电池仍有正功率输出, 燃油经济性提高 1.88%, 与基于规则的能量管理策略相比, 燃油经济性提高了 10.17%^[23]。

虽然这种策略能使得汽车达到一种全局最优的工作状态, 但是这种策略的实现设计计算复杂。在汽车研究设计的具体使用中, 其通常需要通过与其他控制策略共同工作才能实现优化。由于目前对它的研究发展深度有限以及技术限制, 全局优化的控制策略尚不能实现独立的控制, 只能作为当前汽车设计以及研究的参考对象。

2.4 模糊能量管理策略

模糊控制是一种基于模糊推理的非线性控制方法, 可以简化非线性时变系统的复杂控制问题。模糊控制器将输入信号转换为模糊变量, 然后根据专家制定的推理机制, 应用规则库中的相关规则得出模糊结论, 并进一步将其转换为相应的精确变量, 以协调车辆各部分的能量值, 从而实现整车的最佳性能^[24]。

由于传统模糊能量管理策略存在自适应能力差、缺乏学习等问题, Zhang 等人设计了一种基于行驶循环工况识别的混合动力汽车神经网络模糊能量管理策略 (NNF-EMS, neural network fuzzy-energy management strategy)。通过神经网络样本学习和特征参数分析方法实现行驶循环工况识别, 将识别结果作为模糊控制的参考输入, 进而优化函数。结果表明所提策略能实现不同行驶工况下模糊隶属度函数和模糊规则的自适应优化^[25]。毛建中等人利用测试实验数据所得出的发动机的工作效率图制定了模糊控制规则, 并将发动机的工作效率作为优化目标, 采用蚁群算法对模糊控制策略中的隶属度函数进行优化。研究表明优化后的策略提升了车辆的燃油经济性和电池的使用年限^[26]。何正伟等人根据模糊理论构建了复合电源的模糊控制能量管理策略, 并利用 ADVISOR 软件构建了带有复合电源的汽车模型。研究显示, 应用所设计的模糊控制策略能够提升的汽车的动力性^[27]。

这种策略无需建立精准的系统模型, 鲁棒性强, 具有适当的人工推理能力, 计算速度快, 只需用一种便于设计而且易于理解的方式就可以达到目标的控制效果, 可以基于嵌入式系统在线应用。但是因为模糊控制主要是依赖人的经验这种主观性强的方法来实现的控制。同时这种策略无法使汽车实现全局最优。为了获得更好的控制效果, 需要采用优化算法对模糊控制的参数进行优化。常用的优化算法有遗传算法和粒子群优化算法。在并联式混合动力汽车的能量管理中, 模糊控制仍处于一个不断完善的时期, 需要不断地优化改进。

通过综合比较不同能量管理策略的优缺点以及复杂程度, 最后选取基于规则的逻辑门限策略为本文的仿真研究对象。

3 并联式混合动力汽车能量管理系统仿真及分析

ADVISOR 软件是以 Matlab/Simulink 环境为开发基础, 包含多种汽车模型的高级车辆仿真软件^[28]。该软件不仅具有完整的图形功能, 还具有数值计算高效和语法结构简单两个优点。本文选用的大部分模型均是由研究人员已经搭建好的, 节省了各部件以及整车模型参数选取的时间, 也极大降低了仿真的难度。

3.1 汽车整体参数以及模型选择

通过比较所选模型为传统并联式混合动力汽车模型 PARALLEL_defaults_in, 具体参数如图 2 所示。

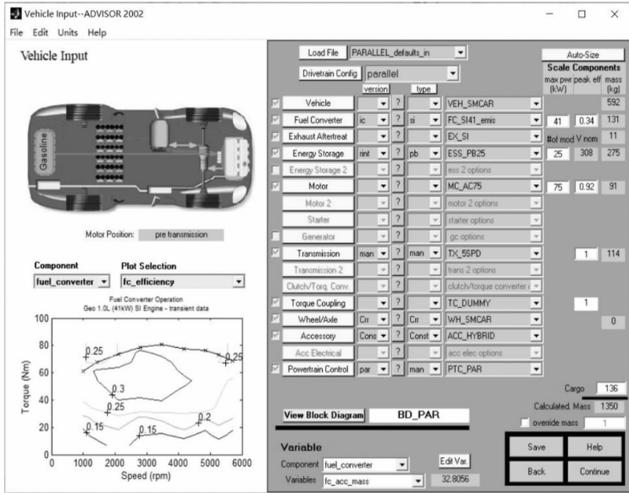


图 2 ADVISOR 车辆参数定义

3.2 仿真工况选择

由于并联式结构多用于小型混合动力汽车上, 该类型的车辆更多行驶于城市道路或者市郊道路上, 因此所选取的仿真工况为循环工况。循环工况是我国常用于整车测试 ECE_EUDC (economic commission for europe_extra urban driving cycle) 工况 (该工况由两个工况组合而成, 分别是城市道路行驶工况 ECE (economic commission for europe) 和市郊行驶工况 EUDC (extra urban driving cycle)), 为了使仿真数据更加贴近实际情况, 另外选用同一种车型在美国的 UDDS (urban dynamometer driving schedule) 城市循环工况进行仿真研究, 各循环工况分别进行 10 次试验^[29]。以下图 3 与图 4 为以上两种循环工况的具体参数。

3.3 循环工况仿真

根据选取的并联式混合动力汽车传统能量管理策略——基于规则的逻辑门限策略应用于并联式混合动力汽车车型上进行 ECE_EUDC 循环工况以及 UDDS 循环工况仿真, 以下为各循环工况下的仿真结果。

3.3.1 基于 ECE_EUDC 循环工况下的仿真结果

图 5 所示的仿真结果可以看出选用基于规则的逻辑门限策略的并联混合动力汽车在 ECE_EUDC 循环工况下的百公里燃油消耗量为 7 L/100 km, 0~96.6 km/h 的加速时间为 9 s, 64.4~96.6 km/h 的加速时间为 4.5 s, 0~137 km/h 的

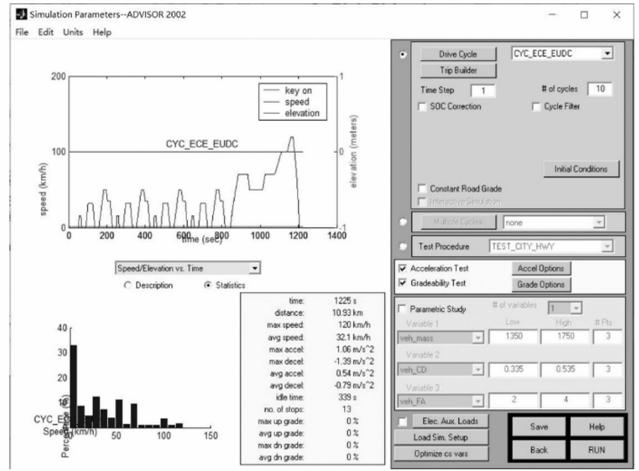


图 3 ECE_EUDC 循环工况参数

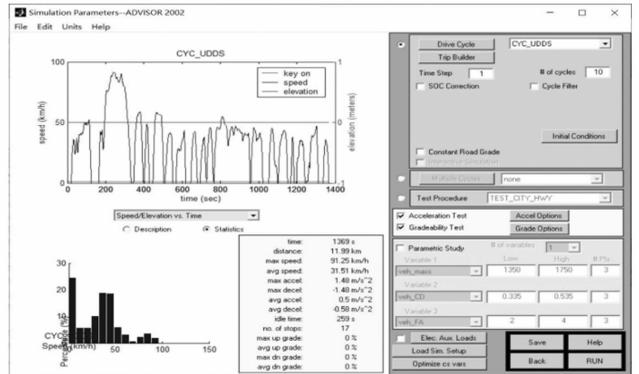


图 4 UDDS 循环工况参数

加速时间为 18.4 s, 最大的加速度可以达到 5 m/s², 最高车速可达 191.4 km/h, 时速 24.1 km/h 下最大爬坡度可达 26.4%, 行驶过程中所排放的 HC 有 0.136 grams/km, CO 为 0.907 grams/km, NO_x 为 0.152 grams/km。

Fuel Consumption(L/100 km)	7
Gasoline Equivalent	7
Distance(km)	109.3
Emissions(grams/km)	
HC	0.136
CO	0.907
NO _x	0.152
PM	0
Acceleration Test	
0-96.6 km/h	9
64.4-96.6 km/h	4.5
0-137 km/h(s)	18.4
Max. Accel. (m/s ²):	5
Distance in 5s(m):	55.1
Time in 0.4 km(s):	16.9
Max. Speed(kmph):	191.4
Gradeability at 24.1 km/h:	26.4%

图 5 ECDU 循环工况仿真结果

图 6 所示的仿真结果可以看出选用基于规则的逻辑门限策略的并联混合动力汽车 ECE_EUDC 循环工况下, 行驶过程中的速度变化稳定, 电池的 SOC 值初始值为 0.7,

随着时间的变化而降低最终稳定在了 0.6 左右, 直至工况行驶结束。从排放曲线图可以看出发动机在循环工况中是一直处于工作状态的, 其排放量除了汽车刚起步时所需发动机提供较高的转矩所导致的排放量较多外, 在后续汽车持续行驶过程中各污染物 (CO、HC、NO_x) 排放量均较小 (0.02 以下)。

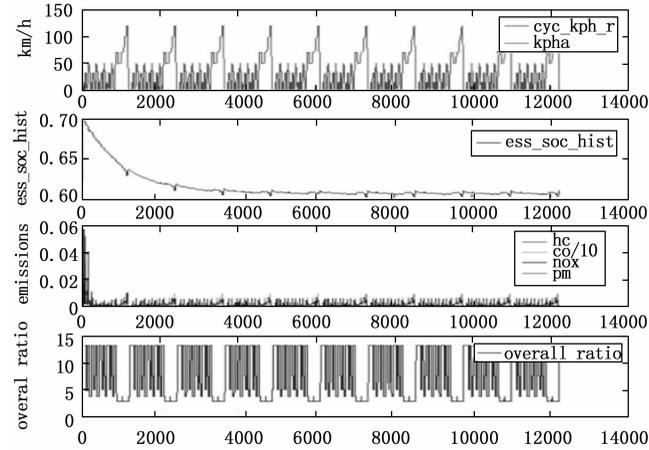


图 6 ECE_ECDU 循环工况仿真结果

3.3.2 基于 UDSS 循环工况下的仿真结果

利用相同车型以及控制策略, 在 UDSS 循环工况下进行仿真, 仿真结果如图 7 和图 8 所示。由于图示结果与 ECE_EUDC 仅是数据不相同, 增加本工况的仿真仅为仿真结果提供验证的对比数据, 故不再对其进行详细说明, 相关数据将在后文中综合整理分析, 以下仅为结果的展示。

Fuel Consumption(L/100 km)	7.1
Gasoline Equivalent	7.1
Distance(km)	119.9
Emissions(grams/km)	
HC	0.138
CO	0.708
NOx	0.173
PM	0
Standards	
Acceleration Test	
0-96.6 km/h 9	Max. Accel. (m/s ²):5
64.4-96.6 4.5	Distance in 5s(m):55.1
0-137 km/h(s): 18.4	Time in 0.4 km(s):16.9
	Max. Speed(kmph):191.4
Gradeability at 24.1 km/h:	26.4%

图 7 UDSS 循环工况仿真结果

3.4 能量管理策略优化

由基于规则的逻辑门限能量管理策略工作原理可知, 通过对门限参数修改可以对策略进行优化, 使车辆获得更好的动力性能, 同时还能减少排放。由图 9 得知控制策略的优化可以通过对其设置一定的约束、所预期的目标值以及参数选用范围让其不断仿真测试, 进而找出最优的参数。

在 ADVISOR 中可以利用基于 MATLAB 和基于 VisualDOC 两种方式对控制策略进行优化。研究选用基于 MATLAB 的方式对控制策略进行优化, 但是基于 MATLAB 的方式不能对电池的 SOC 值进行优化只能对 3 种门限

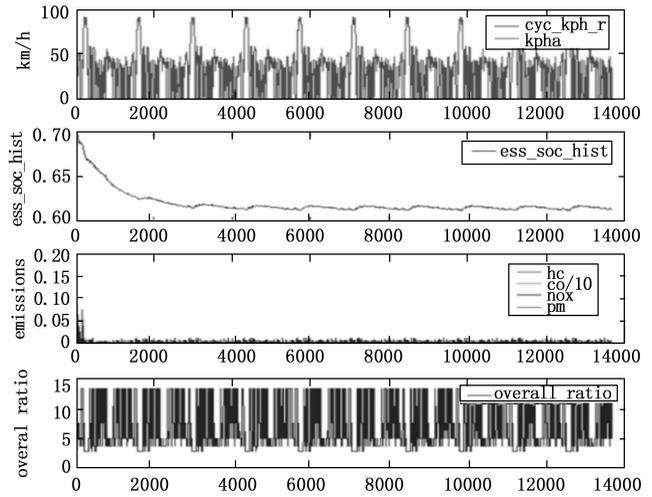


图 8 UDSS 循环工况仿真结果

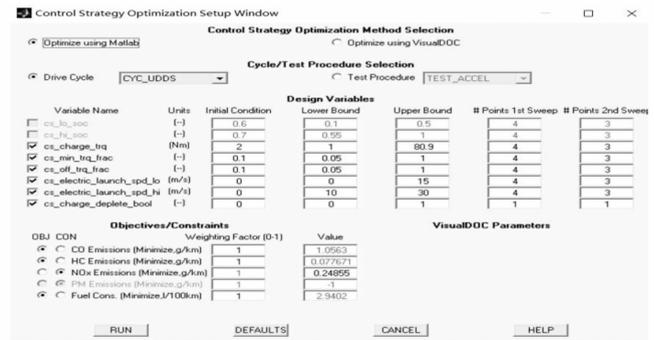


图 9 控制策略优化界面

参数基于某种工况进行仿真测试。因此研究选取以下 3 种门限参数作为优化对象: 发动机充电转矩: cs_charge_trq 、发动机的最小转矩系数: $cs_min_trq_frac$ 、发动机关闭转矩: $cs_off_trq_frac$ 。

通过给定的约束、所预期的目标值以及参数选用范围, 如图 10、11 和 12 所示, ADVISOR 利用 MATLAB 不断对在设定范围内的门限参数进行逐一测试运算, 达不到目标值的取值将被舍弃, 最终得出最优的参数组如图 13 所示。

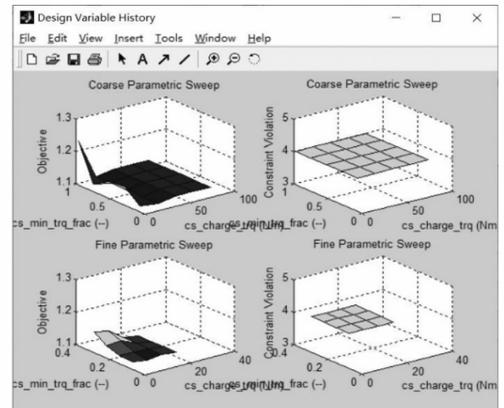


图 10 发动机充电转矩参数取点最优贴近过程

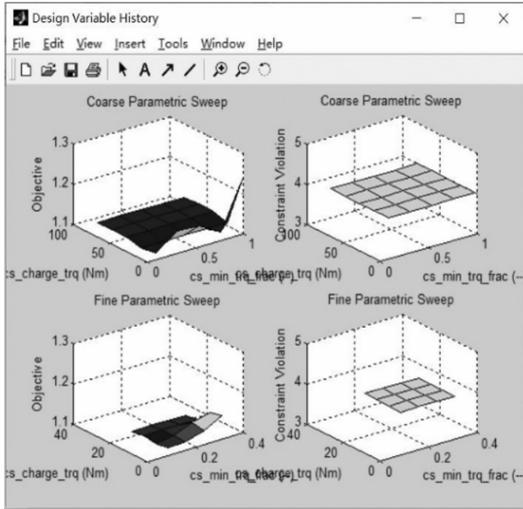


图 11 发动机最小转矩系数参数取点最优贴近过程

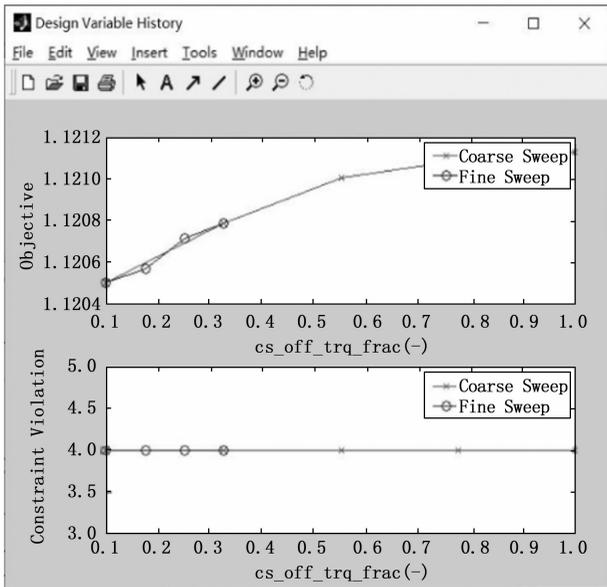


图 12 发动机关闭转矩系数参数取点最优贴近过程

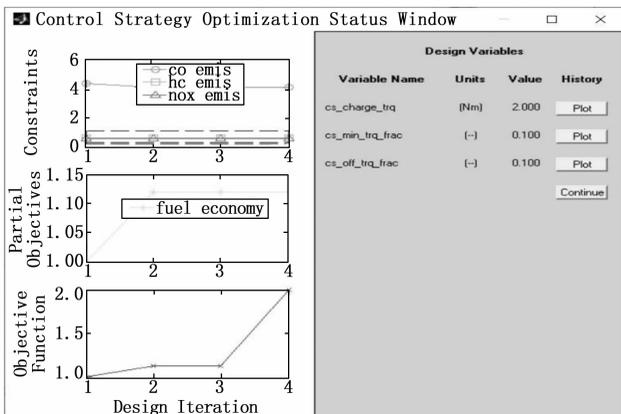


图 13 参数优化结果

3.5 策略优化后仿真结果以及优化前后对比

将优化后的能量管理策略参数取值输入到原来的车辆模型中，然后按照优化前的仿真过程以及相应条件对其分别进行 ECE_EUDC 以及 UDDS 循环工况仿真，其结果如图 14 和图 15 所示。将优化后各工况的仿真结果与未优化的仿真结果进行汇总，得到了表 1 与表 2。

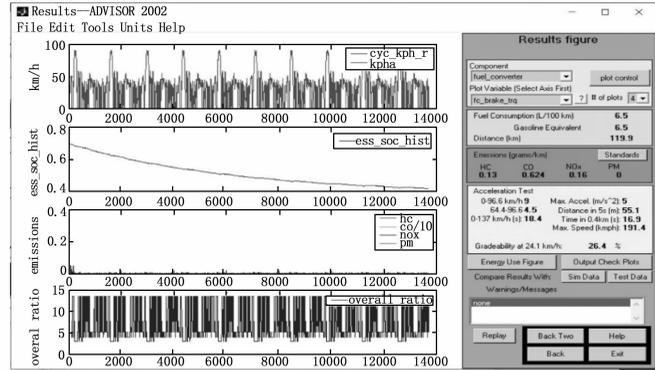


图 14 优化后 UDDS 工况下的仿真结果

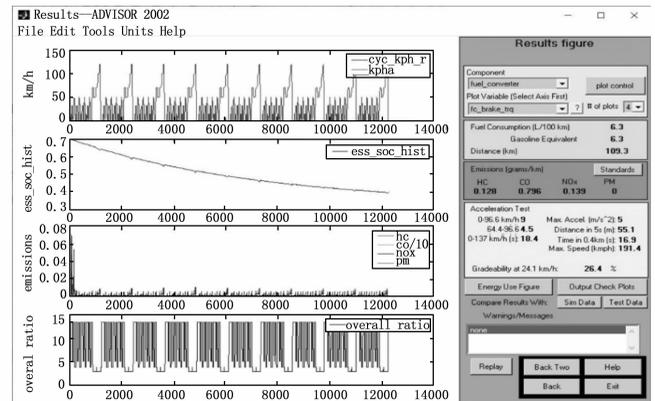


图 15 优化后 ECE_EUDC 工况下的仿真结果

表 1 汽车燃油消耗量及动力性能参数

名称	策略	百公里油耗 L/100 km	0~137 km 加速时间 s	24.1 km/h 时最大爬坡坡度 %	最高车速 km/h	最大加速度 m/s ²
UDDS 工况仿真	优化前	7.1	18.4	26.4	191.4	5
	优化后	6.5	18.4	26.4	191.4	5
ECE_EUDC 工况仿真	优化前	7	18.4	26.4	191.4	5
	优化后	6.3	18.4	26.4	191.4	5

表 2 汽车尾气排放物含量(单位 grams/km)

名称	策略	HC 排放量	CO 排放量	NO _x 排放量
UDDS 工况仿真	优化前	0.138	0.708	0.173
	优化后	0.13	0.624	0.16
ECE_EUDC 工况仿真	优化前	0.136	0.907	0.152
	优化后	0.128	0.796	0.139

表 1 为并联混合动力汽车模型在仿真工况下的燃油消耗量和动力性能参数表, 通过表 1 中的数据可以得出对控制策略的门限参数经过优化后, 在 UDSS 工况中每百公里燃油消耗量减少了 8.45%, 在 ECE_EUDC 工况中每百公里燃油消耗量减少了 10%, 表明汽车的燃油经济性提升了。但是其他有关动力性能的数据并没有变化, 表明汽车的动力性并没有任何改变。表 2 为并联混合动力汽车模型在仿真工况下的尾气中有害物质含量, 通过表 2 中的数据可以得出, 门限参数经过优化后, 在 UDSS 工况中汽车尾气中的有害物质 HC、CO 和 NO_x 含量分别减少了 5.88%、11.54%、7.51%, 在 ECE_EUDC 工况中汽车尾气中的有害物质 HC、CO 和 NO_x 含量分别减少了 5.88%、12.24%、8.55%, 表明汽车的排放性能有所提升。图 16 为 UDSS 和 ECE_EUDC 循环工况经过优化后各参数的下降百分比。

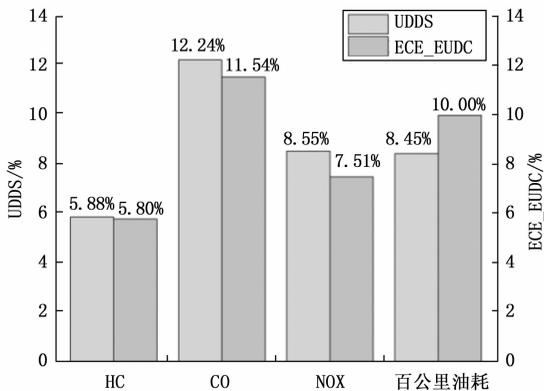


图 16 优化后汽车各参数下降百分比

4 结束语

随着石油能源的日益减少和污染物排放法规的逐年严格, 混合动力汽车已成为国内外新能源汽车行业的研究热点。本文对基于规则的逻辑门限策略的并联式混合动力汽车进行了仿真分析。主要在 ECE_EUDC 以及 UDSS 循环工况下的进行仿真研究。采用参数优化的方法对基于规则的逻辑门限控制策略的参数进行优化。分析了策略参数优化前后的仿真结果, 研究表明优化后的策略相较于优化前的策略汽车在 ECE_EUDC 和 UDSS 循环工况中的每百公里油耗分别降低了 8.45% 和 10%, 尾气排放物 HC、CO 和 NO_x 含量分别减少了 5.88% 和 5.8%、12.24% 和 11.54%、8.55% 和 7.51%。虽然控制策略参数的优化提高汽车的燃油经济性和排放性能, 但是受限于所提优化方法无法把所有的门限参数联系在一起进行综合测试优化, 导致无法实现整车全部性能的优化, 下一步可以将所涉及的门限参数整合优化, 以提升整车性能。

参考文献:

[1] 钟彦雄. 并联式混合动力汽车能量管理策略 [J]. 科技与创新, 2017 (2): 75-76.
[2] 徐燕. 混合动力电动汽车中利用决策树 CART 算法的能源

管理方案 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 229-234.
[3] 万鹤高. 并联混合动力系统能量管理策略研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
[4] 邓富昌. 并联混合动力汽车能量管理策略研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
[5] 张承慧, 李珂, 崔纳新, 等. 混合动力电动汽车能量及驱动系统的关键控制问题研究进展 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2011, 41 (5): 1-8.
[6] 马灵灵, 付主木, 李东卫. 基于路况预测的 PHEV 能量管理策略 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 207-211.
[7] RAMADAN H S, BECHERIF M, CLAUDE F. Energy management improvement of hybrid electric vehicles via combined GPS/rule-based methodology [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14 (2): 586-597.
[8] REZAEI A, BURL J B, ZHOU B, et al. A new real-time optimal energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 27 (2): 830-837.
[9] HAN S, ZHANG F, XI J. A real-time energy management strategy based on energy prediction for parallel hybrid electric vehicles [J]. IEEE access, 2018, 6: 70313-70323.
[10] DES BUTTES A G, JEANNERET B, KEROMNES A, et al. Energy management strategy to reduce pollutant emissions during the catalyst light-off of parallel hybrid vehicles [J]. Applied Energy, 2020, 266: 114866.
[11] HMIDI M E, BEN SALEM I, EL AMRAOUI L. An efficient method for energy management optimization control: Minimizing fuel consumption for hybrid vehicle applications [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42 (1): 69-80.
[12] 吴浩. 并联式混合动力叉车能量回收控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
[13] 崔胜民. 新能源汽车技术 [M]. 第三版. 北京: 北京大学出版社, 2020.
[14] 张东旭. 差速耦合式混合动力汽车系统建模与性能仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
[15] XUE Q, ZHANG X, TENG T, et al. A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles [J]. Energies, 2020, 13 (20): 5355.
[16] KATKAR V A, GOSWAMI P. Review on Energy Management Systems for Hybrid E Vehicles [C] //2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). IEEE, 2020: 1-6.
[17] 李明, 胡博, 葛帅帅, 等. 并联式混合动力汽车能量管理与模式切换控制研究 [J]. 南京理工大学报, 2020, 44 (6): 696-704.
[18] 吴剑. 并联式混合动力汽车能量管理策略优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.

(下转第 146 页)