

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.006

基于多岛遗传算法的增程式汽车增程器工作点研究

曹龙龙, 钟 勇, 邱煌乐, 范周慧, 郜建行

(福建理工大学 福建省汽车与电子电驱动重点实验室, 福建 福州 350118)

摘 要: 为了提高增程式汽车燃油经济性, 提出一种基于多岛遗传算法优化增程器工作点的方法。首先, 对整车进行动力参数匹配, 为仿真提供基础; 其次, 搭建了发动机五点控制策略和制动能量回收策略, 并验证所搭建模型和参数匹配的合理性; 最后, 采用多岛遗传算法对增程器的启停阈值进行优化, 以提升整车燃油经济性。仿真结果表明: 优化后, 在保证动力性能的前提下, 整车燃油经济性在 WLTC、CLTC 工况下分别提高了 51.6%, 60.1%, 进一步提升了整车对能量的有效利用率。

关键词: 增程式汽车; 多岛遗传算法; 燃油经济性; 能量管理; 发动机工作点

中图分类号: U469.72; U461.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2025)05-0039-07

引文格式: 曹龙龙, 钟 勇, 邱煌乐, 等. 基于多岛遗传算法的增程式汽车增程器工作点研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(5): 39-45.

Research on the Working Point of the Extended-Range Vehicle Extender Based on the Multi-Island Genetic Algorithm

CAO Longlong, ZHONG Yong, QIU Huangle, FAN Zhouhui, GAO Jianhang

(Fujian Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive,
Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In view of an improvement of the fuel economy of extended range vehicle, a method based on the multi-island genetic algorithm has thus been proposed for an optimization of the operating point of the range extender. Firstly, the power parameters of the entire vehicle is matched to provide a foundation for simulation. Secondly, a five-point engine control strategy and braking energy recovery strategy are established, thus verifying the rationality of the model and parameter matching. Finally, the multi-island genetic algorithm is used to optimize the start-stop threshold of the range extender so as to improve the vehicle fuel economy. The simulation results show that after optimization, the fuel economy of the entire vehicle has been improved by 51.6% and 60.1% under WLTC and CLTC conditions respectively while ensuring the power performance, further enhancing the effective utilization of energy by the vehicle.

Keywords: extended-range vehicle; multi-island genetic algorithm; fuel economy; energy management; engine operating point

0 引言

随着新能源汽车相关技术的不断发展, 纯电动汽车、混合动力汽车及燃料电池汽车的性能逐步提升, 但同时对整车经济性要求也越来越高。能耗是评价汽

车经济性的一个重要指标, 通过对整车的优化设计, 可以降低能耗, 进而增加续航里程。增程式电动汽车利用增程器补充能量, 相较于纯电动汽车, 有效解决了续航里程短的问题。因此, 在纯电动汽车产业链成熟度不高、成本较高的情况下, 增程式电动汽车将是

收稿日期: 2024-06-26

作者简介: 曹龙龙, 男, 福建理工大学硕士生, 主要研究方向为新能源汽车, E-mail: 1494459648@qq.com

未来一段时间内汽车产业发展的重点方向^[1]。

增程器是增程式电动汽车的核心部件,由发动机与发电机同轴连接构成,并且采用高度集成的结构设计^[2]。国内外对于增程器的研究主要集中在对发动机的关键参数进行优化方面。梁月^[3]建立了发动机动力模式仿真模型,并运用优化算法对点火提前角进行优化;许彤彤^[4]运用多目标遗传算法对增程式电动汽车发动机的点火提前角和空燃比进行了优化,得到了原机和优化压缩比后的发动机对应的点火提前角和空燃比的最优方案。许勤等^[5]研究了增程器的最佳工作点选取策略,并应用到实车开展燃油经济性测试。由于增程器开启时刻会影响整车经济性,能量管理控制的研究又多集中在分析增程器开启后能量源功率的分配问题,而对增程器启动时刻的研究颇少。因此,展开对增程器启动时刻的研究以提升整车经济性是有必要的。

针对已有研究的不足,本文以提升整车燃油经济性为目标,拟利用多岛遗传算法对增程器启动时刻进行调节优化,并以电池荷电状态(state of charge, SOC)的范围确定增程器工作点。在Cruise仿真软件中建立增程式电动汽车模型,进行经济性仿真,并以等效燃油消耗量为指标,将优化前后的结果进行对比,以验证所提方法对提升整车经济性的有效性。

1 仿真平台搭建

本研究依托某款增程式电动汽车进行,其整车参数见表1,其动力性指标和经济性指标见表2。

表1 整车参数

Table 1 Vehicle parameters

参 数	取 值	参 数	取 值
整备质量/kg	1 600	轮距/mm	1 585/1 586
总质量/kg	1 975	轮胎滚动半径/mm	335 (215/55R18)
计算质量/kg	1 741.3	质心离地高度/mm	675.5
轴距/mm	2 600	质心距前轮距离/mm	1 098

表2 汽车性能指标

Table 2 Dynamics index

指 标	参 数	取 值
动力性指标	0~100 km/h 加速时间/s	≤ 10
	最高车速/(km·h ⁻¹)	≥ 140
	最大爬坡度/%	≥ 30
经济性指标	WLTC 综合能耗 (L/100 km)	≤ 5.97
	CLTC 综合能耗 (L/100 km)	≤ 5.56

1.1 动力参数匹配

在模型搭建之前,需要对增程式电动汽车的主要驱动部件进行参数匹配,参数匹配的准确性将直接影

响研究结果。增程式电动汽车的结构有混合式、并联式和串联式,本文研究的基于串联式增程式电动汽车的结构如图1所示。该增程式电动汽车中有两个能量源,分别是动力电池和增程器,其中增程器由发动机和ISG(integrated starter generator)电机串联而成。实验前,需对驱动电机、增程器和动力电池进行参数匹配。

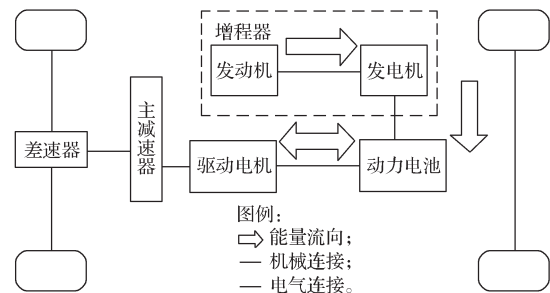


图1 增程式汽车结构和能量流向示意图

Fig. 1 Booster vehicle structure and energy flow schematic diagram

汽车在行驶过程中受到的阻力由滚动阻力、加速阻力、空气阻力、坡度阻力组成。增程式电动汽车上唯一的动力源驱动电机在进行参数匹配时,需要能克服行驶阻力,其计算式如式(1)所示。

$$F = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15 u_a^2} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

式中: $Gf \cos \alpha$ 为滚动阻力,其中 G 为整车重力(N), f 为滚动阻力系数, α 为坡度角; $C_D A / (21.15 u_a^2)$ 为空气阻力,其中 C_D 为风阻系数, A 为迎风面积(m²), u_a 为期望最高车速; $G \sin \alpha$ 为坡度阻力; $\delta m \frac{du}{dt}$ 为加速阻力,其中 δ 为质量转换系数。

根据式(1)可计算出车辆在行驶过程中不同工况下——加速工况、爬坡工况、巡航工况等的整车需求功率。进行驱动电机参数匹配时,驱动电机峰值功率需要满足不同工况下的整车需求功率,即需满足式(2)。

$$P_{\max} \geq \max(P_{\max V}, P_{\max P}, P_{\max a}) \quad (2)$$

式中: $P_{\max}$ 为驱动电机峰值功率; $P_{\max V}$ 为最高车速计算功率; $P_{\max P}$ 为最大爬坡度计算功率; $P_{\max a}$ 为最大加速度计算功率。

动力电池作为增程式电动汽车的储能装置,且为纯电模式下的唯一能量源,其容量的大小关系到车辆行驶的续航里程。其容量大小采用等速法计算,假设本研究的增程式汽车以匀速 60 km/h 行驶,其具体计算方法由式(3)~(5)确定。

$$P_x = (mgf u_n / 3 600 + C_D A u_n^3 / 76 140) \quad (3)$$

式中: P_x 为选取计算工况所需功率; u_n 为计算车速。

$$W = P_x \times (S / u_n) \quad (4)$$

式中: S 为设计目标续航里程; W 为整车总能耗。

$$C = 1000W / (U \times \beta_{\text{soc}}) \quad (5)$$

式中: C 为动力电池组容量; U 为动力电池组电压; β_{soc} 为电池放电深度。

增程器作为增程式电动汽车额外的能量源,其作用是在动力电池不足以提供满足车辆需求的电能时,由增程器来补充这一不足能源。增程器由发动机和 ISG 电机组成,将燃油转换成电能提供给动力电池。增程器的动力参数匹配分为发动机和 ISG 电机两个部分的参数匹配。发动机采用匀速 90 km/h 来计算功率,功率 P_e 由式(6)所得。

$$P_e = P_r / (\eta_g \eta_e) \quad (6)$$

式中: η_g 为 ISG 电机平均效率; η_e 为驱动电机平均效率; P_r 为整车实际需求功率。

由于增程器中的 ISG 电机与发动机的连接属于刚性同轴连接, ISG 电机的参数匹配只需满足如下要素即可: 1) 二者功率差距小; 2) 二者转速差距小; 3) 二者高效工作区相同。

综上所述,动力参数匹配的结果见表 3。

表 3 动力部件参数

Table 3 Power component parameters

参 数	取值	参 数	取值
驱动电机额定功率 /kW	60	ISG 电机峰值功率 /kW	75
驱动电机峰值功率 /kW	130	ISG 电机峰值扭矩 /(N·m)	130
驱动电机最高转速 /(r·min ⁻¹)	1 200	发动机峰值扭矩 /(N·m)	137
动力电池额定电压 /V	355.2	发动机峰值功率 /kW	75
动力电池总容量 /(kW·h)	2.1	增程器最高转速 /(r·min ⁻¹)	12 000

1.2 模型搭建

本文采用 AVL_Cruise 软件搭建整车仿真模型,通过制定合理的能量管理策略,使动力系统在高效率区间工作^[6]。搭建的整车仿真模型如图 2 所示。

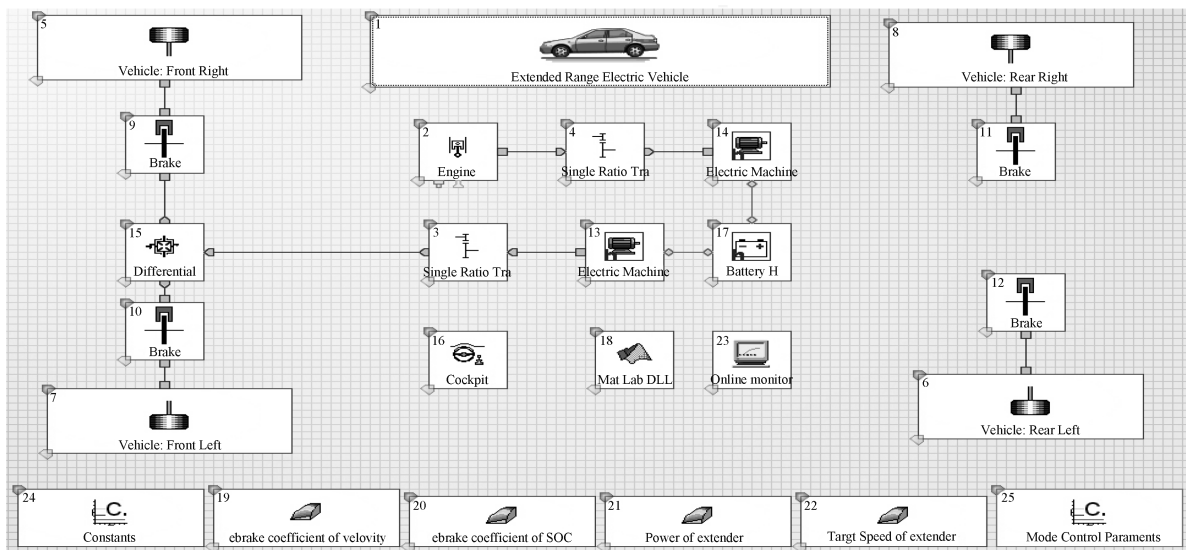


图 2 整车仿真模型

Fig. 2 Vehicle simulation model

根据前文对驱动电机、动力电池、发动机、ISG 电机的参数匹配结果,将参数输入对应模块中,其余模块例如主减速器模块、制动器模块、车轮模块、差速器模块等,根据研究对象的车型参数输入。

1.3 能量管理控制策略

增程式汽车的能量管理策略主要是车辆进入增程模式后,通过控制发动机使整车具有良好的动力性与经济性。基于规则的能量管理策略分为恒温器控制策略、多点控制策略、功率跟随控制策略和模糊控制策略。恒温器控制策略中,由于动力电池会因在增程器启动状态下长时间大功率充放电而降低使用寿命,综合经济性并不高;功率跟随控制策略中,发动机控

制复杂,输出功率频繁,综合燃油效率较低;模糊控制中,因其过多依赖前人和工程师的经验制定规则,无法达到最优解^[7]。而发动机多点控制结合恒温器和功率跟随控制策略的优点,能让发动机在多个效率点进行工作,并随功率的变化而选择工作点,具有高效、结构简单、成本低的优点^[8]。具体的增程模式控制策略如下:

1) 当动力电池 SOC 处于 20% ~ 80% 范围时,车辆进入增程模式。

2) 根据发电需求功率和动力电池 SOC 的变化,合理切换发动机的工作点。

制定的发动机工作点切换规则如表 4 所示。

表 4 发动机工作点切换规则

Table 4 Rules for switching engine operating points

编号	SOC/%	功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)
工作点 1	20~32	8	1 200	62.89
工作点 2	32~44	16	1 800	85.11
工作点 3	44~56	24	2 500	90.00
工作点 4	56~68	35	3 200	101.80
工作点 5	68~80	40	3 800	99.09

1.4 制动能量回收策略

制动能量回收是新能源汽车独有的功能。通过制动时利用驱动电机反转发电的特性将一部分能量回收至动力电池中,降低了整车总能耗,是一种提高经济性的有效手段。增程式电动汽车的制动分为机械制动和电机制动。其中电机制动是指电机在发电时产生的制动扭矩会经传动系统直接作用在汽车驱动轮上,达到车辆停止或减速的作用^[9]。

本研究采用机械制动和电机制动共同作用的模式,并且要求在制动能量回收时,制动减速度要维持在 1.3 m/s^2 。其中,进行制动能量回收的前提是不满足紧急制动的条件,即制动需求扭矩不大于最大安全制动扭矩。进入制动能量回收模式后,判断当前制动需求扭矩是否大于机械制动设定的最大值:若没有,制动需求扭矩由机械制动提供;若有,则满足机械制动设定值后,剩下的扭矩由驱动电机制动提供,具体的实现过程如图 3 所示。

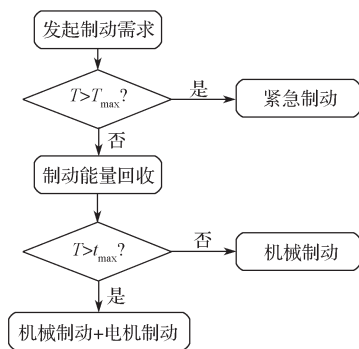


图 3 制动模式判断流程图

Fig. 3 Brake mode judgment flowchart

2 增程器工作点研究

2.1 发动机工作点

相较于能量转换装置的 ISG 电机而言,研究能量产生装置即发动机的工作点对于研究增程器工作点具有更大意义。本研究根据动力电池的工作范围初定发动机的工作点,即在动力电池 SOC 为 20% 时启动,在动力电池 SOC 为 80% 时停止。通过对发动机启停的阈值进行优化,以降低整车燃油消耗。

2.2 多岛遗传算法

多岛遗传算法是遗传算法的变种,用于解决复杂的优化问题。它通过将遗传算法应用于多个相互连接但相对独立的子群体(岛屿)中,以促进种群的多样性,避免早熟收敛,并提升全局搜索能力。每个岛屿都在本地范围内独立地运行遗传算法,并且定期地与其他岛屿进行信息交换,以实现全局优化。增程式电动汽车是一个非线性的复杂系统,若建立数学模型精准研究增程器工作点,将会耗费大量人力物力。近年来,许多研究采用优化算法的方式,规避了传统建立数学模型的缺陷。多岛遗传算法在解决复杂优化问题、避免早熟收敛和提高全局搜索能力方面有较大潜力。如王恒等^[10]基于多岛遗传算法对燃料电池汽车模糊控制策略进行了优化,孙永厚等^[11]基于多岛遗传算法对汽车动力总成悬置解耦进行了优化。可见多岛遗传算法已在汽车领域得到了广泛应用。因此,本文拟采用多岛遗传算法,在 Isight 和 Avl_Cruise 平台上^[12]进行增程器工作点研究,具体步骤如下。

1) 建立优化数学模型^[13]。以发动机五点控制策略中增程器的启动点和终止点作为优化变量,以动力电池的动作范围作为约束条件,以世界轻型汽车测试循环工况(word light vehicle test cycle, WLTC)和中国轻型汽车测试循环工况(china light-duty vehicle test cycle, CLTC)下的等效百公里燃油消耗量作为优化目标,建立优化数学模型。

2) 确定优化设计变量。优化变量为启动点和终止点,在优化过程中,假定这些变量为连续值并进行计算,且用一个向量表示:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T = [s, e]^T. \quad (7)$$

式中: s 为增程器启动点; e 为增程器终止点。

3) 建立优化目标函数。建立如下 WLTC 和 CLTC 工况下,等效百公里燃油消耗量多目标优化函数:

$$\min F(\mathbf{x}) = [W(\mathbf{x}), C(\mathbf{x})]. \quad (8)$$

式中: $F(\mathbf{x})$ 为多目标优化函数; $W(\mathbf{x})$ 为 WLTC 工况下等效百公里油耗量优化目标函数; $C(\mathbf{x})$ 为 CLTC 工况下等效百公里油耗量优化目标函数。

4) 建立优化约束条件。优化约束条件如下:

$$\begin{cases} 20 \leq s \leq 40; \\ 60 \leq e \leq 80. \end{cases} \quad (9)$$

两种工况下的优化过程如图 4 所示,图中纵坐标为等效燃油消耗数值, $\text{L}/(100 \text{ km})$,横坐标为迭代次数。由图中可以看出,采用多岛遗传算法的寻优效果较好,在迭代 200 次左右,逐渐趋于平稳。在 WLTC 工况中,等效燃油消耗值稳定在 $5.8 \text{ L}/(100 \text{ km})$ 左右,在 CLTC 工况中,等效燃油消耗值稳定在 $5 \text{ L}/(100 \text{ km})$ 左右。

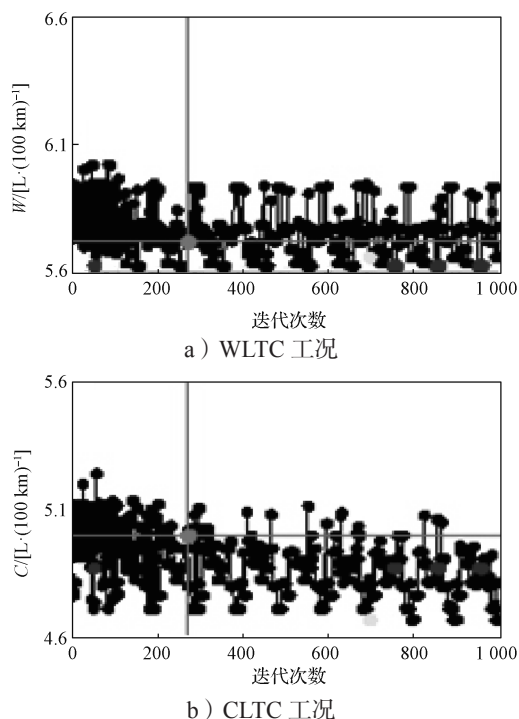


图4 不同工况下的优化过程图

Fig. 4 Optimization process diagram under different working conditions

3 仿真分析

3.1 动力性指标验证

为验证动力参数匹配的准确性以及能量管理控制策略的合理性,需要对整车的动力性能进行仿真验证,并与动力性能指标相比较。本研究建立了百公里加速仿真任务,得知0~100 km/h的加速时间为8.99 s,符合动力性要求。

通过控制车身整体俯仰角,并采用穷举法,可大约判断本文所研究车辆的最大爬坡度,约为38%。该条件下的验证结果见图5。

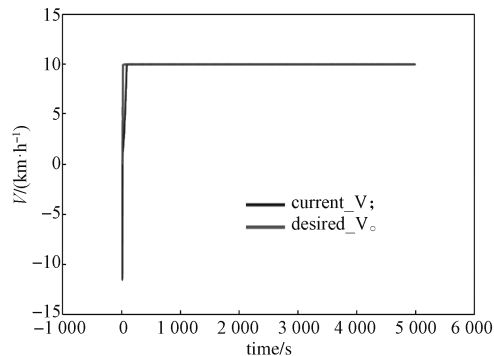


图5 最大爬坡度仿真验证结果

Fig. 5 Simulation verification results of maximum climbing slope

在设定最大爬坡度后,通过实际车速是否达到所设定车速来判断车辆是否能以设定速度达到所设置

的坡度。如图5所示,实际车速能达到设定车速。仿真得到最高车速为185 km/h,由于Cruise软件中对于最高车速仿真结果只有文本显示,无曲线图,故不再多余叙述。通过仿真得到的动力性能仿真结果与动力性能指标的对比结果如表5所示。

表5 动力性能仿真结果

Table 5 Dynamic simulation results

动力参数	仿真数值	指标参数值
0~100 km/h 加速时间 /s	8.99	≤ 10
最高车速 /(km·h ⁻¹)	185	≥ 140
最大爬坡度 /%	38	≥ 30

表5中的数据表明,动力性能仿真结果完全满足动力性能指标,从而验证了动力参数匹配的准确性和控制策略的合理性,为本文增程器工作点研究提供了基础。

3.2 经济性指标验证

本文研究增程器工作点的根本目的,是降低增程式汽车等效百公里燃油消耗量(由于混合动力汽车有电机和发动机两个动力源,故以等效百公里燃油消耗量作为经济性评价指标)以获得更好的燃油经济性。在进行增程器工作点研究前,需要对制定的控制策略进行经济性仿真,并且与经济性指标进行对比。优化前的增程器工作点如图6所示。图中显示发动机在动力电池SOC为20%时开始工作,在SOC为80%时停止工作,符合所制定控制策略的要求。

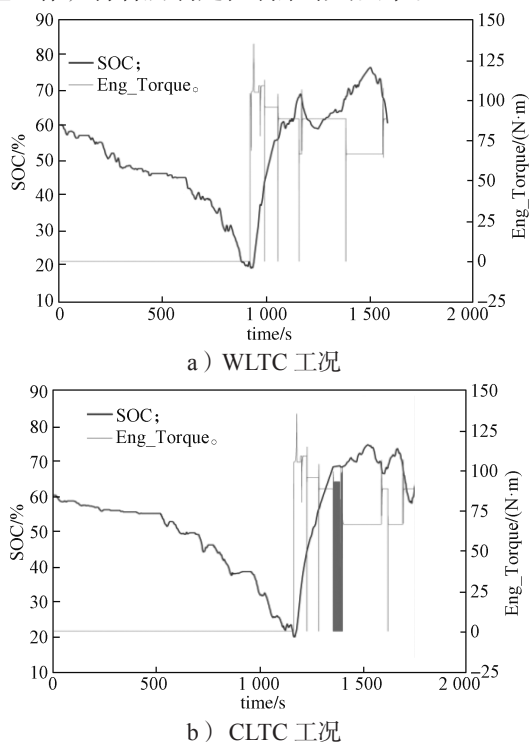


图6 优化前增程器工作点

Fig. 6 Range extender operating point before optimization

将优化前的经济性仿真结果, 根据比亚迪混动车的换算方式, 即每 3 kW 电量相当于 1 L 燃油消耗, 进行换算, 并与经济性指标进行对比, 所得结果如表 6 所示。

表 6 优化前等效燃油消耗量

Table 6 Equivalent fuel consumption before optimization

仿真工况	等效百公里油耗 / [L·(100 km) ⁻¹]	指标参数值 / [L·(100 km) ⁻¹]
WLTC 工况	5.87	5.97
CLTC 工况	5.14	5.56

根据表 2 中结果, 通过跟经济性指标进行对比, 得知本文初始制定的控制策略合理, 为增程器工作点的研究提供了前提保障。

3.3 制动能量回收策略验证

建立滑行工况用于模拟车辆在行驶过程中较长时间制动的情况, 所得仿真结果如图 7 所示。由图可以得知, 随着车辆开始制动, 整车的制动减速度在 1.3 m/s² 附近波动, 符合所制定的制动能量回收控制策略。

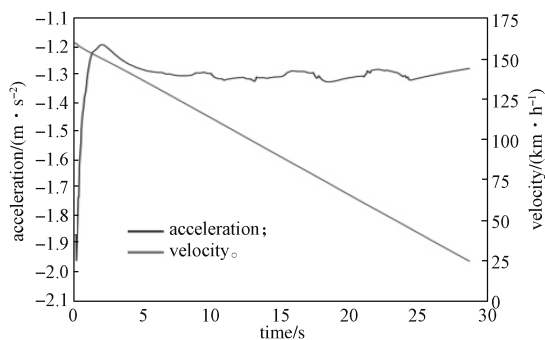
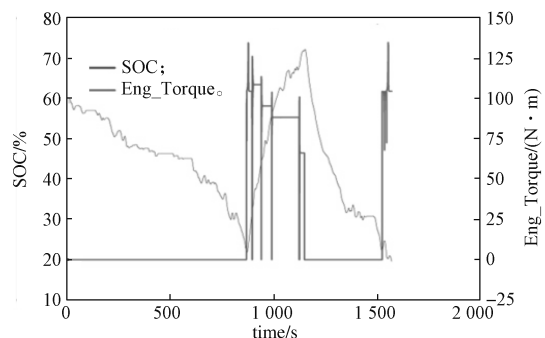


图 7 制动减速度仿真曲线

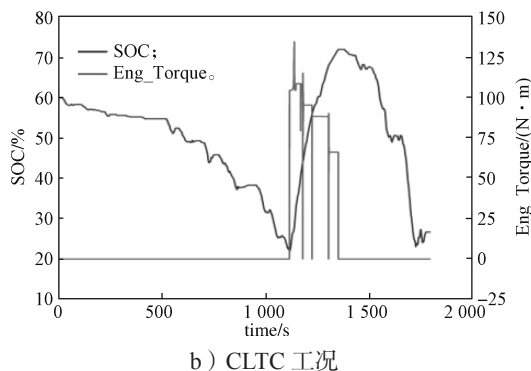
Fig. 7 Braking deceleration simulation curve

3.4 优化前后经济性对比

根据前文对增程器的工作点进行优化后得到的结果, 将增程器的工作点从动力电池 SOC 为 20%~80% 更改为 22%~72%。将优化后的控制策略在 WLTC 和 CLTC 两个工况下进行仿真, 得到的仿真结果如图 8 所示。



a) WLTC 工况



b) CLTC 工况

图 8 优化后增程器工作点

Fig. 8 Range extender operating point after optimization

由图 8 可看出, 在 WLTC 工况和 CLTC 工况下, 增程器均在 SOC 低于 22% 时开启, 且转矩变化波动较小, 能够进一步节省油耗。

优化后的经济性按照上一小节的等效百公里燃油消耗量计算方式进行计算, 并与优化前的燃油经济性进行比较, 结果如表 7 所示。

表 7 优化前后等效燃油消耗量对比

Table 7 Comparison of equivalent fuel consumption before and after optimization

仿真工况	等效百公里油耗 / [L·(100 km) ⁻¹]	
	优化前	优化后
WLTC 工况	5.87	2.84
CLTC 工况	5.14	2.05

由表 7 中数据可知, 相较于优化前的等效百公里燃油消耗量, 优化后 WLTC 工况的燃油经济性提高了 51.6%, CLTC 工况的燃油经济性提高了 60.1%。

4 结语

本文研究了增程器开启时刻对增程式电动汽车经济性的影响, 设计了一种多岛遗传算法, 并以等效百公里燃油消耗量为目标函数, 对增程器开启点与关闭点进行寻优。此外, 设计了发动机五点控制和能量回收策略以完善整车能量管理策略。经过 Cruise 软件仿真, 将优化前后的结果进行对比, 得知优化后的燃油经济性在两种仿真工况下均得到了 50% 以上的提升, 仿真结果验证了该方法对提升增程式电动汽车经济性有较好的应用性。

参考文献:

- [1] 张维佳, 何云堂. 增程式电动汽车标准和产业现状 [J]. 中国汽车, 2023, 33(3): 3-6.
ZHANG Weijia, HE Yuntang. Standards and Industry

- Status of Range-Extended Electric Vehicle[J]. China Auto, 2023, 33(3): 3-6.
- [2] 金一垒. 电动汽车增程器控制策略研究和模型化开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
JIN Yilei. Control Strategy Study and Model Development of Range-Extender for Electric Vehicles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [3] 梁月. 变冲程发动机动力模式点火提前角优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
LIANG Yue. Study on Optimization of Ignition Timing for Variable Stroke Engine Power Mode[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [4] 许彤彤. 小型增程器发动机关键参数优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
XU Tongtong. Research on Optimization of Key Parameters of Small Range Extender Engine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [5] 许勤, 纪少令, 刘承科, 等. 某1.5 L增程器最佳工作点选取研究[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(20): 98-101.
XU Qin, JI Shaoling, LIU Chengke, et al. Research on the Selection Strategy of the Best Working Point of a 1.5 L Extender[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(20): 98-101.
- [6] 隗海林, 王泽钊, 张家祯, 等. 基于AVL-Cruise的燃料电池汽车传动比及能量管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(9): 2119-2129.
KUI Hailin, WANG Zezhao, ZHANG Jiazhen, et al. Transmission Ratio and Energy Management Strategy of Fuel Cell Vehicle Based on AVL-Cruise[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2119-2129.
- [7] 罗祥. 增程式电动汽车控制策略设计与优化算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
LUO Xiang. Research on Control Strategy Design and Optimization Algorithm of Extended Range Electric Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [8] 冯仁华, 孙旺兵, 赵智超, 等. 增程式混合动力汽车能量管理策略设计与优化研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 11-20.
FENG Renhua, SUN Wangbing, ZHAO Zhichao, et al. Research on Energy Management Strategy Design and Optimization of Extended Range Hybrid Electric Vehicle[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(8): 11-20.
- [9] 张国飞. 电动汽车制动能量回馈控制研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
ZHANG Guofei. Research on Control of Regenerative Braking for Electric Vehicle[D]. Yantai: Yantai University, 2022.
- [10] 王恒, 李蒙, 王铁, 等. 基于多岛遗传算法的燃料电池汽车模糊控制策略优化[J]. 机械设计与制造, 2023(11): 12-16.
WANG Heng, LI Meng, WANG Tie, et al. Fuzzy Control Strategy Optimization of Fuel Cell Vehicles Based on Multi-Island Genetic Algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(11): 12-16.
- [11] 孙永厚, 杨帅, 刘夫云, 等. 基于多岛遗传算法汽车动力总成悬置解耦优化[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 155-158, 162.
SUN Yonghou, YANG Shuai, LIU Fuyun, et al. Decoupling Optimization of an Automotive Powertrain Suspension Based on Multi-Island Genetic Algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(12): 155-158, 162.
- [12] 邹旭东, 马玉坤, 张西龙. 混合动力公交车传动系统参数优化及能量控制策略[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 315-321, 337.
ZOU Xudong, MA Yukun, ZHANG Xilong. Driving System Parameter Optimization and Energy Control Strategy of Hybrid Electric Buses[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(3): 315-321, 337.
- [13] 艾小忱, 郑广勇, 张寿凤, 等. 基于Cruise-Isight联合仿真的乘用车变速器速比优化[J]. 机械传动, 2018, 42(2): 90-94.
AI Xiaochen, ZHENG Guangyong, ZHANG Shoufeng, et al. Optimizing of Transmission Gear Ratio Based on Cruise-Isight Co-Simulation[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(2): 90-94.

(责任编辑: 廖友媛)