

某 1.5L 自吸增程器设计开发

陈克朋, 陈涛, 庾汉郎, 宋扬, 李紫卫

(东风汽车集团有限公司技术中心, 武汉, 430058)

Development of a Specific Extended Range Based on a 1.5L Naturally Aspirated Engine

CHENKeping, CHEN Tao, TUO Hanyun, SONG Yang, LI Ziweri

(Dongfeng Motor Corporation Technology Center, Wuhan 430058)

摘要:基于某增程搭载车型性能需求, 开发的一款 1.5L 增程专用自吸发动机, 匹配专用发电机, 提升增程车型续航里程。通过台架性能开发及整车仿真验证, 主要结论: 1. 增程专用发动机使用工况点更为集中, 通过高效燃烧系统、催前 EGR 方案、阿特金森循环、电动化及热管理等技术措施, 发动机最高热效率达到 42%, 同时大幅拓宽用户使用高效区。2. 相比基础机型, 混动专用自吸发动机在整车 WLTC 馈电油耗收益 0.58L/100km, 续航里程能够提升 12%。3. 通过发动机与发电机高效区匹配, 提升增程器总成效率, 结合总成台架试验验证, 最高油电转换率达到 3.5kwh/L。

Abstract: A 1.5L extended range specialized naturally aspirated engine was developed based on the performance requirements of a certain equipped, with the aim of improving range. Through bench performance development and vehicle simulation verification, the main conclusions were as follows: 1. The operating conditions of the extended range professional engine are more concentrated. Through technical measures such as efficient combustion system, pre-catalyst EGR scheme, atkinson cycle, electrification and thermal management, the maximum thermal efficiency of the engine has reached 42%, and efficiency has been greatly expanded. 2. Compared to the basic model, the hybrid dedicated engine has a fuel consumption gain of 0.58L/100km in the WLTC, and endurance mileage increase the range by 12%. 3. The efficiency of the range extender assembly is improved by matching the high efficiency zone of the engine and the generator. Combined with the bench test verification, the highest oil-electricity conversion efficiency reaches 3.5kwh/L.

关键词: 增程专用; 油电转换率; 续航里程

Key words: extended range specialized; oil-electricity conversion efficiency; endurance mileage

中图分类号: TK4***文献标识码: A

0 概述

随着油耗法规的加严以及国家政策的激励引导, 新能源汽车技术得到快速发展, 尤其是十四五阶段, 呈现爆发式增长趋势。纯电车型和混合动力车型作为汽车未来可持续发展的两大核心方向, 国内外车企均已发布产品电动化时间, 现阶段混动车型已成为新能源开发主力。

混合动力是将发动机, 电机, 电池有机结合, 既能够提升动力性、驾驶感, 同时可以大幅降低整车油耗。主流的混动构型主要包括串联构型、并联

构型、混联构型, 其中增程式混合动力汽车 (REV) 属于纯串联构型, 发动机用于高效发电而不参与整车直驱。相比传统动力, REV 具备混动车型的使用动力性及油耗优势, 相比纯电车型, REV 能够最大程度解决用户充电焦虑与里程焦虑问题, 具有使用成本低, 车辆安全、可靠等优点^{[1][2]}。

增程式混合动力系统构型示意图 1: 在纯电模式下, 动力电池通过驱动电机提供动力; 馈电状态下, 整车 PDCU 提供增程器启动信号, 通过 SOC/车速/控制策略判断增程器电功率, 保证车辆动力需求; 减速状态时, 驱动电机通过制动能量回收, 提

供电池电量。

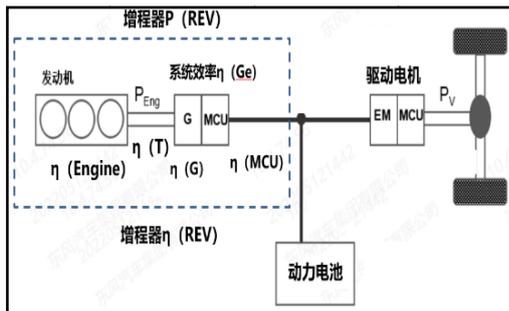


图 1 增程器动力系统构型

目前国内外车企的增程车型现状：宝马 I3、雪佛兰 Volt，日产 e-power 系列增程车型等。而国内呈现欣欣向荣景象，比亚迪的仰望，东风猛士系列、长安深蓝 SL03，吉利星越，新势力的理想、岚图、零跑、问界等等，目前均在研发下一代增程器系统，提升用户驾驶性能。

增程车型主要打造纯电驾驶感与续航里程，其中增程器的核心关键在于混动高效发动机与电机系统的开发、匹配设计^[3]。

1 增程专用发动机性能需求

1.1 用户场景需求

根据增程车型用户驾驶大数据，其使用纯电场景占比达到 70%-80%，当出现馈电、长途、高速、爬坡等场景，增程器启动，弥补整车动力性，提供充足续航。

用户常用典型的使用场景：城市工况下，用户车速低，启停次数占比大，对增程的纯电里程要求高，满足用户上下班基本需求；在市郊工况，启停次数少，中高速（60-80km/h）场景占比大。尤其在节假日的长途工况场景，如何降低里程焦虑，增程车型的可有可电会是用户选择的重要需求点。

1.2 增程器车型抱怨点及痛点

（1）电池电量不足时，受限于电池输出功率降低，仅仅依靠增程器提供电力，动力性驾驶感受可能会成为抱怨点，因此需要在控制策略上，兼顾整车馈电动力性及纯电里程。（2）高温动力性也可能成为增程痛点，增程器与整车完全结构，无直驱模式，主要依据需求功率、效率和 NVH 机型匹配，如匹配不合理，在长时高温爬坡场景，出现高水温

下的发动机限扭，动力性降低。（3）高速场景下的油耗，相比发动机直驱模式，增程器存在发电机的效率损耗，因此长时高速油耗难以达到直驱的水平。

1.3 混动专用发动机性能需求

（1）在满足整车电功率需求下，发动机传统动力需求降低，如额定功率、低速扭矩、最高转速、最大扭矩范围。（2）深度挖掘经济性潜力，提升油电转换效率，提高续航里程。（3）增程车型控制策略通常采用多点策略以及功率跟随策略，使用工况集中，扩大最佳经济区，涵盖常用工况。（4）持续改善发动机 NVH，结合策略上的优化，满足驻车发电、加速等场景^[4]。

2 增程器性能匹配设计

本文以 1.5L 自吸发动机开发为例，论述增程器匹配设计原则，进一步明确增程专用发动机性能需求。表 1 为增程器主要技术参数，发动机通过限扭减震器与发电机直连。

表 1 增程器技术参数

类别	参数	技术参数
增程器	发动机与发电机连接方式	限扭减震器直连
发动机	发动机排量	1.5L
	增压型式	自然吸气
	净功率	75kW
	最大净扭矩	135Nm
发电机系统	最高效率	42%
	峰值功率	65kW
	额定功率	45kW
	系统最高效率	≥95%
动力电池	最高转速	5500rpm
	额定电压	350v

2.1 发动机选型设计

表 2 为三款典型发动机选型方案，主要包含以下性能评估因素：

表 2 发动机选型方案

发动机	自吸方案 A	自吸方案 B	增压方案 C
额定/峰值电功率需求	45kW/65kW		
发动机功率/最大扭矩	75kW/135Nm	90Kw/150Nm	100kW/220Nm
极限动力性	满足	OK	OK
高温动力性	满足	OK	OK
经济性/效率	优	中	优
NVH	优	优	优+
热管理	优	优	优+
成本	优	优	中

(1) 动力性：发动机首先满足增程器额定功率与峰值功率的基本需求，尤其高温/高海拔动力性。发动机在高温下爆震倾向增加，推迟点火角，动力性劣化，如图 2 所示；高海拔空气稀薄，新鲜空气量降低，同样带来动力性下降。



图 2 发动机高温动力性

(2) 经济性：对于混动车型，总成效率和续航里程始终是设计开发的重要方向，自吸方案 B 属于传统动力，无法满足混动车型需求。

(3) NVH 方面，动力性越高，相同需求功率下的发动机转速更低，有利于整车 NVH，但增压方案 3 存在更高的成本压力。综合各维度性能及成本，综合选择方案 A。

2.2 发电机系统性能设计

发电机系统由发电机及控制器组成。发电机系统优先满足增程器峰值功率与额定需求；同时，尽可能提升发电机系统效率，如图 3 所示，发电机高效区主要在中高速区域，通过叠长、电磁匝数、开关频率等措施，扩大高效区范围，与发动机高效区

尽量重叠匹配。

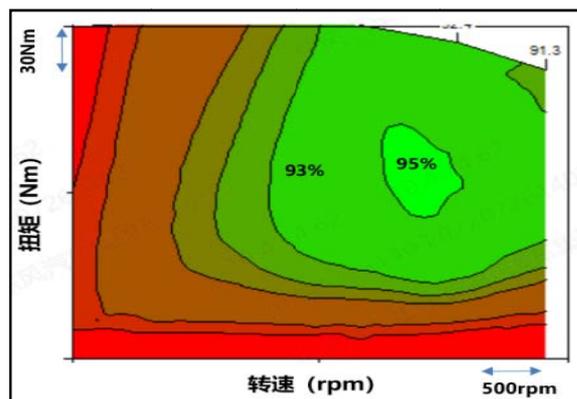


图 3 发电机系统效率示意图

2.3 增程器性能匹配

增程器主要由发动机及发电机系统组成，总成匹配决定了增程器性能。

发电机与发动机采用花键硬性连接，传动效率 >99.5%，发动机与发电机转速一致。增程器动力性，低速扭矩受限于发动机低速扭矩；额定/峰值功率往往受限于发电机系统功率。

增程器效率，匹配设计要求发动机与发电机系统高效区重合，提升增程器总成效率，效率关系见公式 1 所示：

$$\eta (REV) = \eta (Engine) * \eta (Ge) * \eta (T) \quad (1)$$

式中 $\eta (REV)$ 为增程器总成效率，单位 (%)； $\eta (Engine)$ 为发动机效率，单位 (%)， $\eta (T)$ 为传动效率，单位 (%)

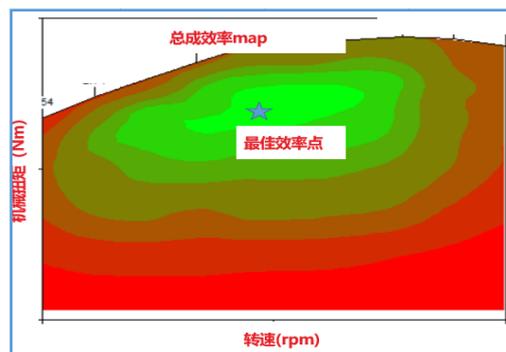


图 4 增程器总成效率 map

图 4 为典型的 1.5L 自吸增程器总成效率，发动机高效区对应转速 2500-3500rpm；发电机系统高效区转速 3500-4500rpm，匹配后的总成最佳效率在 3500rpm。对于增程专用自吸发动机设计，提升最佳效率的同时，扩大高效区转速是关涉设计，尤其其中低速范围，保证用户使用场景下综合效率最佳^[5]。

3 增程专用 1.5L 自吸发动机开发

基于某增程车型，开发一版 1.5L 自吸混动发动机，满足动力需求下，挖掘油耗潜力。发动机基于混动化、高效化、电动化方向，重点设计开发燃烧系统、进排气系统、EGR 系统、降摩擦及热管理系统。

相比增压混动发动机，自吸在热效率存在劣势：

(1) 最佳效率负荷无法达到甜点位置，摩擦功对自吸影响更大；(2) 无增压补气，导致最佳效率工况的 EGR 率偏低，无法充分发挥节油效率；(3) 泵气损失，自吸工况泵气损失为负，始终“抽气”耗功，而增压负荷工况，增压器利于废气提供正能量。

3.1 高效燃烧系统设计

混动发动机燃烧系统采用“三高快”设计理念：高气道滚流+高压缩比+高冲程/缸径，提升燃烧速率。提升发动机热效率的主要途径，包括提高燃烧指示热效率、降低泵气损失和摩擦损失。其中，提高压缩比是最为常用以及有效手段，这也是发动机不断追求更高压缩比的原因，但受冲程/缸径比的限制，当压缩比提高到一定程度后，热效率收益将不再明显，反而带来强烈爆震与燃烧不稳的风险。对于 1.5L 自吸混动发动机，同样采用这种理念，浅碟形活塞的高压缩比设计，配合高冲程缸径比，充分压榨指示燃烧热效率的收益；同时，配合 Masking 高气道滚流设计，相比传统机型，这一设计提高了 80% 滚流比，燃烧上止点处的湍动能提升 55%，大幅加快燃烧速度。350bar 高压直喷技术，让燃烧更为充分与稳定，有效降低排放。

3.2 EGR 系统的设计

外部冷却 EGR 技术也是提升热效率关键手段，通过将发动机高温废气冷却后送入缸内，一方面可以大幅降低进气系统泵气损失，同时冷却 EGR 可以吸收缸内高温，有效抑制爆震，提升燃烧效率。为了充分发挥冷却 EGR 节油潜力，采用更高的外部 EGR 率，但过高的 EGR 带来燃烧不稳、甚至失火的风险。因此采用 120mJ 的高能点火线圈，能量密度提升 40%，配合超高压压缩比设计，使用工况的最高 EGR 率达到了 30%，其中提升湍动能是燃烧稳定性重要手段。

另一方面，对于自吸发动机的 EGR 系统，有催化器前与催化器后的两种典型方案；催化器后的 EGR 系统布置也是目前市场最常用的设计，“干净”

的废气通过 EGR 阀、冷却器至进气歧管，极限工况下的可靠性风险更低，如图 5 所示。但对于追求极限性能的混动专用发动机，催化器前 EGR 系统方案也逐渐成为技术趋势，利用高温废气中未燃 HC 等，直接通入燃烧系统进行再次燃烧，提升效率。

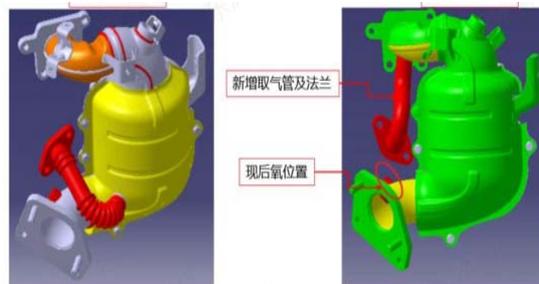


图 5 EGR 系统设计（催化后与催化前方案）

通过台架试验对比两种方案油耗收益，如图 6 所示：在相同的边界下，催化器前 EGR 系统方案，使用工况点油耗收益再次提升 1-2%，未燃 HC 等成分加速燃烧速率；但对于高负荷工况，爆震倾向增强，油耗劣化趋势。增程模式与整车完全结构的油电，选择匹配点时会在最高效率区，避免爆震强烈工况。

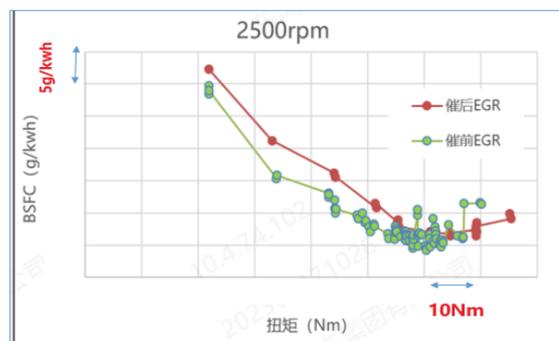


图 6 EGR 方案油耗对比

最后，就是进气歧管的 EGR 系统均匀性设计，发动机性能不仅需要更高的 EGR 率，也要求四缸 EGR 混合气均匀。设计关键点在于 EGR 与新鲜空气混合角度和充分的混合时间，其中，EGR 到进气歧管的入口采用插入式结构，直接引导 EGR 混合流向与混合方向，充足的稳压腔容积，通过数十轮的优化迭代，最终实现各工况下优秀的混合均匀性。

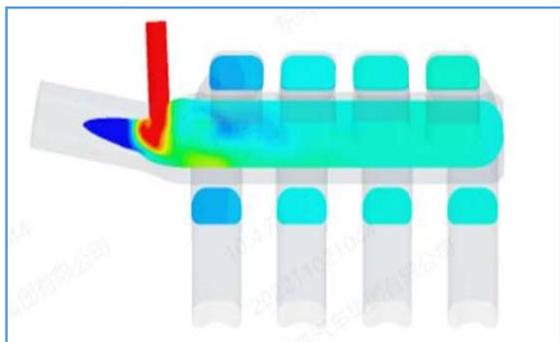


图 7 进气歧管 EGR 入口设计

3.3 进排气系统设计

增程混动专用的进排气设计可以牺牲非关键的功率与低速动力，例如进气歧管结构，考虑整车布置等因素，进气歧管设计更为灵活：取消排气 VVT、可变进气技术等，实现产品高性价比；采用集成排气歧管设计，结构更为紧凑，有利于冷启动温升等。

在抑制爆震方面，自吸发动机更适用阿特金森，如图 8 所示，结构上通过进气凸轮大包角型线设计实现进气门晚关，膨胀比大于压缩比，抑制爆震，达到提高热效率目的。同时，阿特金森循环也能够有效减小节气门节流损失，降低泵气损失。

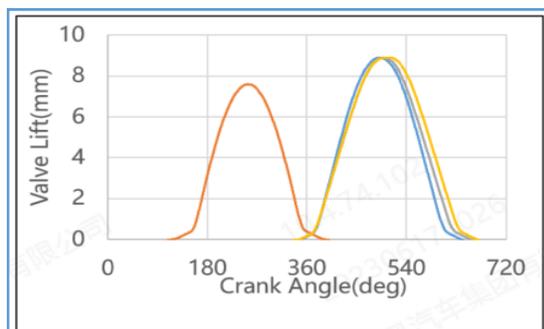


图 8 进气阿特金森循环

在性能开发阶段，通过台架对比验证了两种典型阿特金森型线的效果，如图 9 所示：大包角型线在中低负荷具备明显的收益，节油 1%-2%；但在高负荷工况，泵气损失收益消失，收益将不再明显。

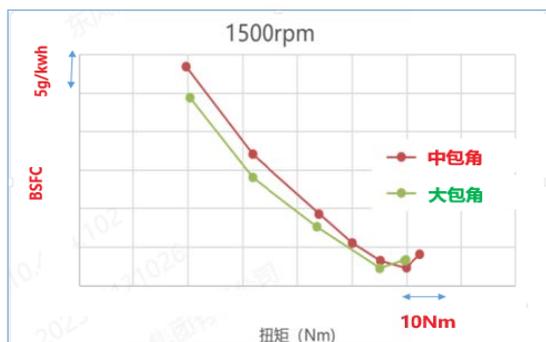


图 9 阿特金森节油对比

3.4 降摩擦及热管理

采用先进的电动化集成方案：包括电动水泵、电子节温器、电动压缩机、MAP 可变机油泵等的应用，实现附件和关键执行器件的全面电动化。相比传统机型，电动化设计可以降低摩擦功 30%-40%。降低摩擦功虽然可以大幅改善中低负荷工况油耗，但这非混动车型使用区域，尤其增程定点工况，摩擦功带来的油耗收益已大幅下降，因此在设计中，综合摩擦功技术性价比进行判断。

热管理方面，除了集成排气歧管，电动水泵实现了多种不同模式策略组合：快速暖机，通过与 PTC 加热结合，实现整车优秀热管理效率。电动水泵与发动机解耦，具有灵活的冷却控制能力，防止发动机在极限工况下超温，保证使用工况下的高效运行：

增程混动专用发动机开发，不仅仅是先进技术的堆积，更为关键的在于系统的匹配性：（1）增程器与整车性能匹配，控制策略实现总成的发挥；（2）发动机与发电机的匹配，最佳油电转换效率；（3）发动机各性能的综合考虑与匹配，提升关键性能。

（4）系统中的设计组合，例如燃烧系统的匹配，高压缩比、高滚流、阿特金森循环、冷却 EGR 等方案，是基于用户工况下的需求为目标，极限挖掘效率潜力，扩大使用高效区，满足整车匹配使用需求^{[6][7][8]}。

4. 台架开发及应用

4.1 发动机台架试验开发

在标准环境下，采用混动技术路线，完成发动机台架性能开发，针对增程使用工况进行专项优化，其万有特性油耗如图 10，发动机最大热效率达到 42%，对应转速 2500rpm；同时大幅扩大最佳燃油经济区至 1500-4200rpm，保证增程车型始终在最佳运行区间工作。采用催化器前 EGR 系统方案，最大 EGR 率达到 30%，稳定运行。

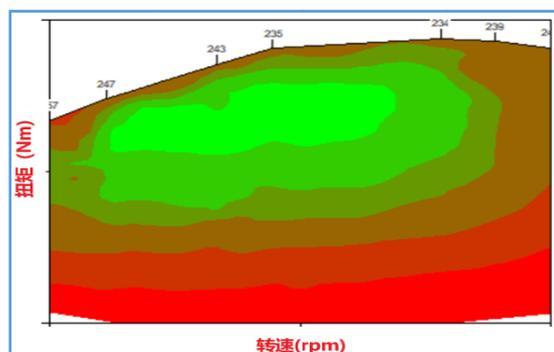


图 10 混动自吸发动机万有特性

4.2 整车油耗收益

基于增程式混合动力汽车参数,在AVL-Cruise软件中搭载整车仿真模型,将Simulink能量管理策略集成在Cruise软件中,实现整车控制策略优化及性能预测。

本次仿真采用的是增程多点控制策略,相比1.5L自吸发动机基础机型,增程专用发动机不仅是最高效率,其匹配的使用区域的总成效率均有大幅提升。发动机使用特征点油耗降低了8%-12%,整车WLTC循环的馈电油耗收益0.58L/100km,对应增程车型的续航里程提升12%。

4.3 增程器总成性能验证

增程器总成性能验证试验,也是性能开发重要的开发项。总成测试台架主要包括增程器总成样机、电池模拟器、功率分析仪(含电流传感器),燃油消耗仪;同时配备增程器冷却循环系统、润滑系统、整车进排气系统、燃油温度控制器等。

按照总成性能开发要求,完成增程器总成台架搭建与调试,测试增程器总成在不同电压下的效率及发动机油耗。基于台架实测电功率、发动机燃油消耗量,按照公式2计算增程器油电转换率,表征单位燃油能够发出的电量能力。

$$B(REV) = P(REV)/b(engine) * \rho \quad (2)$$

式中 $B(REV)$ 定位为增程器油电转换率,单位(kwh/L); $P(REV)$ 表征增程器输出电功率,单位(kW); $b(Engine)$ 为发动机油耗量,单位(kg/h); ρ 表示燃油密度,单位(g/ml)。

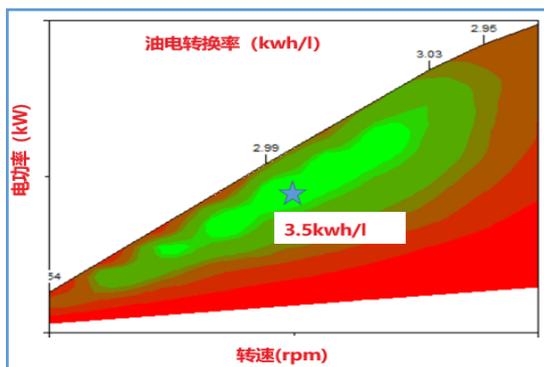


图 11 增程器油电转换率

上图为增程器总成油电转换率,横坐标为增程器转速,纵坐标为实测电功率,测试结果为增程器总成油电转换率,其高效区电功率覆盖25-75kW,最高油电转换率 ≥ 3.5 kwh/L,具备产品竞争力。

5. 结论

基于增程车型性能需求,开发一款1.5L增程专用自吸发动机,匹配发电机系统,提升增程器续航里程,主要结论:

(1) 增程发动机使用工况点更为集中,通过高效燃烧系统、催前EGR方案、阿特金森循环、电动化以及热管理等措施,发动机热效率达到42%,大幅拓宽使用高效区。

(2) 配合增程高效定点控制策略,整车在WLTC循环馈电油耗收益0.58L/100km,续航里程提升12%。

(3) 通过发动机与发电机高效匹配,提升增程器总成效率,搭建总成台架并实试验证,其最高油电转换率达到3.5kwh/L。

参考文献:

- [1] 肖海云, 虞卫飞, 胡俊勇. 增程器选型的分析研究[J]. 测试试验. 2021(16):126-129
- [2] 胥峰, 乔华, 等. 增程器最佳工作曲线的确定. 测试试验. 2020(2):70-73
- [3] 许勤, 纪少令, 等. 某1.5L增程器最佳工作点选取研究[J]. 测试试验. 2020(20):84-92
- [4] 宋光辉, 崔俊博, 等. 增程式电动汽车控制策略的研究[J]. 客车技术与研究. 2018(1):8-12
- [5] 聂立新, 刘同乐, 等. 增程式电动汽车动力参数选择及控制策略研究[J]. 客车技术与研究. 2019(1):16-19
- [6] 宋文福, 于忠贵, 等. 增程式混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 新能源汽车. 2020(16):80-83
- [7] 王煜华, 申立中, 黄粉莲. 燃油增程式车辆的控制策略研究[J]. 农业装备与车辆工程. 2020, 58(7):61-66
- [8] 王一戎, 徐焕祥, 等. 面向增程式电动汽车的高效汽油机试验研究[J]. 车用发动机. 2020(6):16-19