

增程式混合动力汽车高速运行经济性研究

潘文军^{1,2}, 周晓刚¹, 丁磊¹, 刘永刚²

(1. 东风柳州汽车有限公司, 广西柳州 545005; 2. 重庆大学 高端装备机械传动全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要:为了评估增程式混合动力汽车在高速工况下的燃油经济性,本文建立某MPV的整车动力学模型和关键零部件模型,并提出相应的能量管理策略。试验结果表明,基于所提能量直驱策略的增程式混合动力汽车的高速燃油经济性显著提升,解决了增程式混合动力高速燃油经济性劣于燃油车的行业难题。

关键词:增程式混合动力汽车; 高速运行; 经济性

中图分类号:U462.3⁺4

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)03-0006-05

Research on High-speed Operation Economy of Extended-range Hybrid Vehicles

PAN Wenjun^{1,2}, ZHOU Xiaogang¹, DING Lei¹, LIU Yonggang²

(1. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545005, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipments, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:To evaluate the fuel economy of range-extended hybrid vehicles under high-speed conditions, this paper establishes the vehicle dynamics model and key components models of an MPV and proposes the corresponding energy management strategy. The results show that the fuel economy of range-extended hybrid vehicles utilizing the proposed energy management strategy under high-speed conditions is significantly improved. This research solves the industry problem of inferior fuel economy in range-extended hybrids compared to conventional fuel vehicles at high speed.

Key words: extended-range hybrid vehicle; high-speed operation; fuel economy

增程式混合动力汽车与插电式混合动力汽车的主要区别在于前者取消了发动机直驱功能,驱动系统成本更低,节约的成本可用于增加电池容量,从而提升外插电的纯电续航里程^[1-4]。另外,增程式混合动力汽车可实现发电机与驱动电机分离布置,因此增程式混合动力汽车可实现前置发电机后轮驱动,带来更加出色的动力性能和驾驶体验^[2]。

本文以某增程式混合动力多用途车(MPV)为研究对象,针对增程式混合动力系统制定高速发电低速用电的能量管理策略^[2],优化增程器工作点,在满足驾驶员需求功率的前提下,最大程度提升增程器的系统效率,为改善增程式混合动力MPV的能耗提供解

决方案。最后对比不同动力总成系统在高速上的能耗表现。

1 车辆动力学建模

根据汽车理论,汽车在纵向坡角度为 θ 的道路上行驶的力平衡方程为 $F_t = F_i + F_r + F_w + F_j$ ^[5],其中 F_t 为驱动力, F_i 为坡度阻力, F_r 为滚动阻力, F_w 为空气阻力, F_j 为加速阻力。最终可得:

$$F_t = mg \cdot (\sin \theta + f \cos \theta) + \frac{C_D A v^2}{21.15} + \delta m a \quad (1)$$

整车及主要部件参数见表1。该车动力系统架构如图1所示。图中,G为发电机与发电机控制器的

收稿日期:2024-03-21。

基金项目:柳州市科技计划项目(2022ABA0101)。

第一作者:潘文军(1985—),男,硕士;高级工程师;主要从事新能源动力系统优化与控制工作。E-mail:Panwj@dfzm.com。

二合一集成; M 为驱动电机与电机控制器的二合一集成; HECU 为混合动力整车控制器, 负责整车能量流和发动机的控制。发动机与二合一 G 直接连接, 发动机转速与发电机转速相同; 发动机与车轮无物理连接, 发动机转速控制可与车速解耦, 为行车 NVH 优化提供更大空间。发动机工作时, 带动发电机发电并向车内电网输送直流高压电, 可用于电池包充电, 也可作为二合一 M 提供电能^[6-8]。

表 1 整车参数和性能指标

结构	参数	数值
车辆信息	整备质量 m/kg	2 200
	滚动阻力系数 f	0.007 5
	空气阻力系数 C_D	0.334 6
	滚动半径 r/mm	335
	迎风面积/ m^2	2.688 7
发动机	最大转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	5 500
	最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	286.6
驱动电机	最大功率/ kW	120
	最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	300
发电机	最大功率/ kW	70
	最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	130
蓄电池	额定电压/ V	349.4
	额定容量/ Ah	53

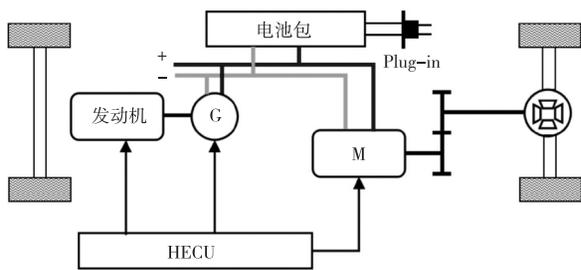


图 1 增程式混合动力汽车系统架构简图

2 车辆关键部件建模

2.1 动力电池模型

动力电池模型采用图 2 所示的等效电路模型^[6]。本文主要研究高速营运场景, 忽略温度的影响, 只考虑电池电荷状态(SOC)的影响。根据该模型原理, 动力电池的电流及 SOC 的计算公式为:

$$I_{\text{bat}} = \frac{U_{\text{oc}} - \sqrt{U_{\text{oc}}^2 - 4P_e R_{\text{in}}}}{2R_{\text{in}}} \quad (2)$$

$$\dot{\text{SOC}} = -\frac{U_{\text{oc}} - \sqrt{U_{\text{oc}}^2 - 4P_e R_{\text{in}}}}{2R_{\text{in}} C_{\text{eq}}} \quad (3)$$

$$U_{\text{out}} = U_{\text{oc}} - I_{\text{bat}} R_{\text{in}} \quad (4)$$

式中: I_{bat} 为电池电流; U_{oc} 为电池开路电压; U_{out} 为电池输出端电压; R_{in} 为电池内阻; P_e 为电池充放电功率, 当其作为放电功率时, 其值为驱动电机所需功率与所有附件功率之和; C_{eq} 为电池包容量。

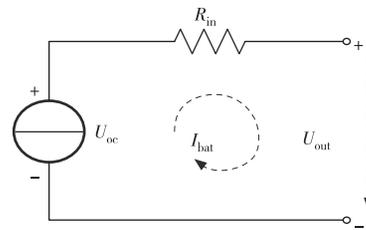


图 2 电池等效电路模型图

其中电池开路电压 U_{oc} 和电池内阻 R_{in} 均与 SOC 有关, 变化关系如图 3 所示。

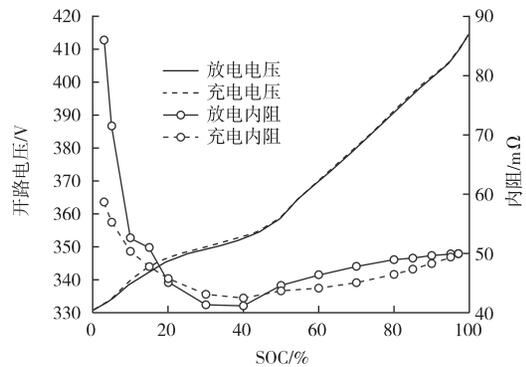


图 3 动力电池开路电压和内阻随 SOC 的变化图

2.2 发电机模型

发电机与发动机直连, 发电机转速与发动机转速相同。在已有电量足够的纯电驱动模式下, 发电机和发动机均不工作。在已有电量不足的混合动力模式下, 启动发动机和发电机。发电机根据当前 SOC 状态分为两种工作模式:

- 1) 当前 SOC 处于 SOC 平衡点与紧急发电点之间时, 发电机进入功率平衡模式, 发电机按照需求功率发电, 电流流向驱动电机。其中 SOC 平衡点是指将电池 SOC 维持在一个相对稳定的状态(一般在 20%~30%), 此时发动机产生的能量主要用于整车功

率和电池补电需求。紧急发电点是指 SOC 下降到一定程度(一般设定为 10%~15%)时,强制发动机和发电机启动并为电池充电,以防止电池过度放电而损害其性能或寿命。

2) 当前 SOC 处于紧急发电点以下时,进入紧急发电模式,发电功率大于需求功率,电流除了流向驱动电机外,还额外为电池包充电,提升 SOC。发电机的发电功率 P_{gen} 可通过式(5)计算得到。

$$P_{gen} = \frac{T_{gen} \cdot n_{gen}}{9550} \cdot \eta_{gen}(T_{gen}, n_{gen}) \quad (5)$$

式中: T_{gen} 为发电机扭矩; n_{gen} 为发电机的转速; $\eta_{gen}(T_{gen}, n_{gen})$ 为根据发电机的扭矩、转速查表的效率函数,如图 4 所示。通过查找发电机 MAP 表得到当前扭矩和转速下对应的效率 η_{gen} 。

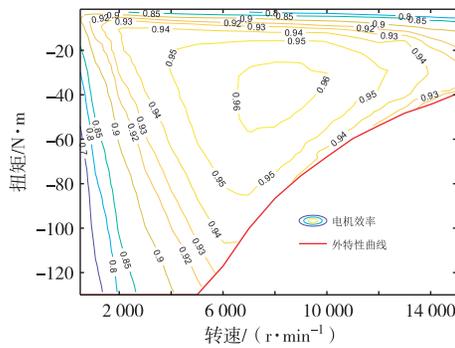


图 4 发电机效率 MAP 图

2.3 驱动电机模型

驱动电机在驱动中输出功率,在制动中将机械能转换成电能为电池包充电。本文采用试验建模法对电机进行建模,即通过试验获取电机的主要数据,再利用插值算法得到如图 5 所示的驱动电机效率稳态 MAP 图。

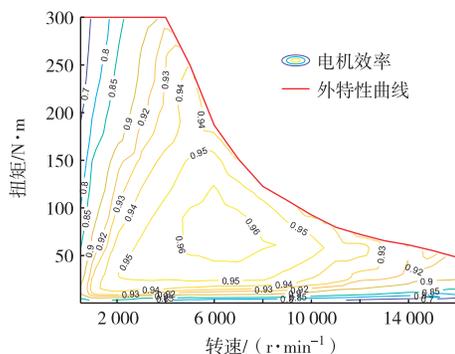


图 5 驱动电机效率 MAP 图

电机驱动功率 P_D 计算见式(6):

$$P_D = T_m \omega_m = U_{out} I_{bat} \eta_{mot}$$

$$T_m \omega_m \geq 0, \quad \text{驱动状态}$$

$$T_m \omega_m < 0, \quad \text{制动状态} \quad (6)$$

式中: T_m 为电机扭矩, ω_m 为电机转速, $T_m \omega_m \geq 0$ 电机为驱动状态, $T_m \omega_m < 0$ 电机为制动能量回收状态; U_{out} 为电池输出端电压; I_{bat} 为电池输出端电流,由式(2)计算; η_{mot} 为电机效率,可表示为:

$$\eta_{mot} = \eta_{mot}(T_m, \omega_m) \quad (7)$$

2.4 发动机模型

本文提供的发动机万有特性曲线,是基于发动机台架试验获得的稳态比油耗数值特性,与发动机的转速和扭矩相关。发动机稳态比油耗 MAP 如图 6 所示。对发动机台架试验数据进行插值,建立发动机静态查表模型,通过发动机转速和扭矩查表,得到当前的瞬时燃油消耗率。

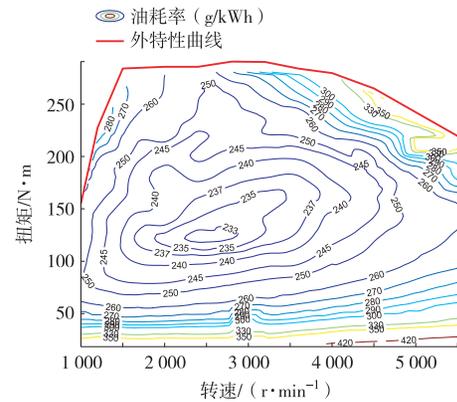


图 6 发动机稳态比油耗 MAP 图

基于上述方法,发动机瞬时燃油消耗率查表公式为:

$$\dot{m}_f = \psi(n_e, T_e) \quad (8)$$

式中: \dot{m}_f 为发动机的瞬时油耗 (g/s); $\psi(n_e, T_e)$ 为根据发动机的转速和扭矩查表的油耗函数, n_e 为发动机转速, T_e 为发动机扭矩。

3 增程式混合动力能量管理策略设计

增程式混合动力能量管理策略是实现能耗经济性的关键要素^[9-10],主要包括工作模式的选择、发电机需求功率和发动机运行 MAP 的确定。

3.1 工作模式

增程式混合动力系统有纯电 EV 模式和增程 REEV 模式, 其工作模式策略如图 7 所示。

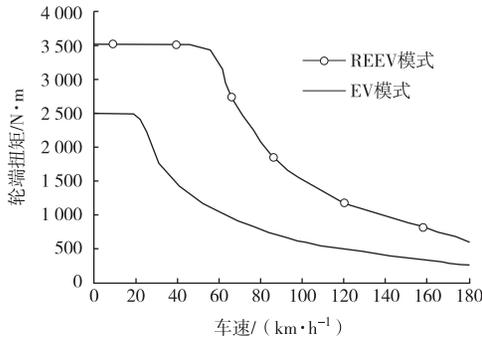


图 7 工作模式策略

1) 当电池电量足够, 且整车需求功率小于电池包输出功率时(常对应车速和转矩需求较低工况), 动力系统工作在 EV 模式。此时发动机不启动, 由电池给电机供电驱动车辆行驶, 充分发挥驱动电机大转矩、高效率、低噪音的优势。EV 模式下的功率分配如下:

$$P_{req} = P_{mot} \eta_{trans} = P_{bat} \eta_{bms} \eta_{mot} \eta_{trans} \quad (9)$$

式中: P_{req} 为需求功率; P_{mot} 为驱动电机功率; η_{trans} 为传动效率; P_{bat} 为电池包功率; η_{bms} 为电池效率; η_{mot} 为电机效率。

2) 当电池电量足够, 且整车需求功率大于电池输出功率时(常对应车速或转矩需求较高工况), 动力系统切换至 REEV 模式。发动机与发电机高效配合, 发动机工作在高效率发电点, 同电池一起提供电能用于驱动电机驱动车辆行驶, 兼顾续航和动力性。REEV 模式下的功率分配如下:

$$P_{req} = P_{mot} \eta_{trans} = (P_{engine} \eta_{gen} + P_{bat} \eta_{bms} \eta_{mot}) \eta_{trans} \quad (10)$$

式中: P_{engine} 为发动机功率; η_{gen} 为发电机效率。

3) 当电池包电量不足时, 车辆也进入 REEV 模式, 此时发动机带动发电机发电, 为驱动电机供电的同时还为电池包充电。

3.2 发电机需求功率

当车辆进入 REEV 模式, 发动机带动发电机发电时, 发电功率一般与需求功率相关, 需求功率越大, 发电功率也越大。同时, 当前 SOC 值与目标 SOC 值的差距也会进一步影响发电机发电功率。本文发电机

发电功率 MAP 表见表 2(发电机发电功率用负值表示)。若当前 SOC 值大于目标 SOC 值, 按 SOC 差距为 0 计算。

表 2 发电机发电功率 MAP 表

SOC 值 差距/%	不同需求功率下的发电功率/kW									
	-20	-10	0	10	20	30	40	60	80	
-12	-30	-30	-30	-40	-60	-74	-83	-83	-83	
-8	-20	-20	-20	-27	-37	-51	-62	-83	-83	
-6	-14	-14	-14	-19	-29	-43	-53	-79	-83	
-4	-10	-10	-10	-12	-23	-35	-47	-65	-83	
-3	-9	-9	-9	-11	-22	-34	-46	-60	-90	
-2	-8.5	-8.5	-8.5	-11	-20	-32	-44	-58	-78	
-1	-8	-8	-8	-9	-18	-30	-42	-56	-76	
-0.5	-7	-7	-7	-7	-12	-21	-34	-54	-74	
0	-5	-5	-5	-5	-10	-19	-31	-53	-73	

3.3 发动机运行 MAP

在确定工作模式和发电机发电功率后, 需对增程模式下的发电功率点进行分解, 以确定发动机高效运行的转速和扭矩。本文结合发动机比油耗、NVH、发电机效率等多维度因素综合考虑, 制定了发动机参数和发电机参数的关系, 部分数据见表 3。

表 3 部分发动机参数和发电机参数的关系

发电功率/ kW	发动机转速/ (r·min ⁻¹)	发动机扭矩/ N·m	发动机 比油耗	发电机 效率/%
-4.7	1 068	40.2	290	86.9
-8	1 158	67.9	255	88.6
-16	1 610	96.8	241	90.9
-23	1 995	111.0	237	92.3
-40	2 832	135.0	234	93.7
-58	3 352	165.5	235	92.8
-70	3 510	178.4	237	91.7

4 仿真与测试结果

4.1 发动机运行工况点测试

根据前述设计得到的能量管理策略, 在实车上进行测试验证^[11], 实车发动机运行工况点如图 8 所示。结果表明, 实车发动机基本上都运行在不同工况的最

优经济曲线附近,具有良好的燃油经济性。

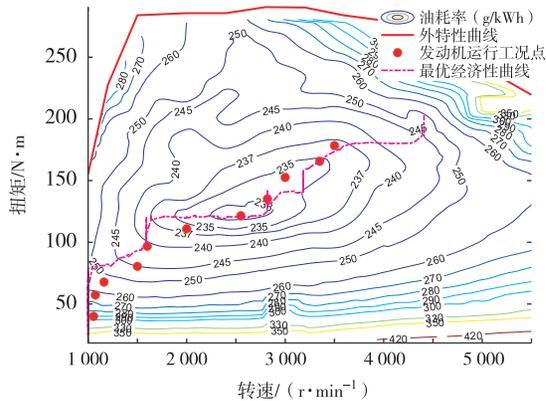


图8 发动机运行工况点

4.2 实际道路等速油耗测试

为进一步验证所设计的能量管理策略在高速行驶工况下的燃油经济性优化程度,将采用本文设计策略的增程式混合动力MPV与同车型的柴油版和汽油版进行相同行驶工况对比,得到不同车速下的等速百公里油耗,如图9所示。

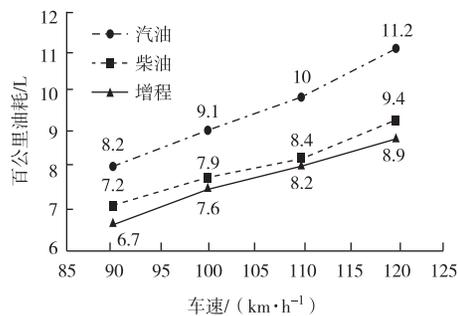


图9 各等速工况百公里油耗对比

从图中可看出,汽油版的等速油耗最高,增程混合动力版的最低(试验中油转换为电,未额外消耗电池包中的电量),而且随着车速上升,这种差距进一步拉大;柴油版油耗水平居于两者之间。证明了本文设计策略的有效性。

5 结束语

本文构建了整车动力学模型和发动机、发电机、

驱动电机和电池等关键零部件的模型,同时设计了增程式混合动力汽车能量管理策略,确保发动机工作在高效区间。实车测试结果表明,所设计的能量管理策略显著提升了增程式混合动力汽车在高速行驶条件下的燃油经济性,优于同车型的汽油版和柴油版。

参考文献:

- [1] XIAO Boyi, RUAN Jiageng, YANG Weiwei, et al. A review of pivotal energy management strategies for extended range electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021(149):111194.
- [2] 张立庆,李旭,于镒隆,等. 混合动力汽车动力分配结构及耦合模式分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2020, 49(2): 91-96.
- [3] 邓湘,范鹏,毕帅,等. 浅析乘用车增程技术现状与发展趋势[J]. 汽车科技, 2024(2): 56-63.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192.
- [5] 余志生. 汽车理论:第6版[M]. 北京:机械工业出版社, 2019:318.
- [6] 赵沂,彭凯,耿鹏,等. 插电式混合动力出租车的油耗优化方法研究[J]. 上海汽车, 2020(11): 9-14.
- [7] 聂立新,刘同乐,刘涛,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, 41(1): 16-18.
- [8] 宋光辉,崔俊博,宋杨,等. 增程式电动汽车控制策略的研究[J]. 客车技术与研究, 2018, 40(1): 8-11.
- [9] XUE Qicheng, ZHANG Xin, TENG Teng, et al. A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles [J]. Energies, 2020, 13(20): 5355.
- [10] 肖仁鑫,黄彪,贾现广,等. 增程式电动汽车参数匹配及控制策略多目标协同优化[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(5): 103-112.
- [11] 顾进,卢若振,吴生玉. 增程式电动汽车能耗仿真分析[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(15): 1-5.