

插电混动系统热效率提升与馈电油耗控制算法优化

赵国军

二一二越野车（安徽）科技有限公司 安徽省 合肥市 230091

【摘要】: 针对插电混动系统在真实道路工况下发动机高效区驻留不足、馈电油耗偏高等问题,提出面向系统效率的协同优化方案。首先通过发动机工况组织优化,将喷油提前角与进排气相位等关键执行量纳入高效候选工作点映射,引导发动机运行由瞬态离散点向高效带迁移。其次在馈电模式能量管理中引入自适应权重因子,综合车速与加速度表征的瞬态强度、路况等级、SOC与电池功率边界等信息,实现发动机与电机功率分配的在线调度,并以燃油消耗率与电机等效损耗的统一代价为优化目标。最后构建热管理与能量管理协同控制策略,将暖机、余热利用与启停决策与热状态绑定,降低热状态波动对效率与油耗的不利影响。MATLAB/Simulink仿真结果表明,优化后发动机热效率由39.0%提升至42.0%,馈电油耗由7.5 L/100 km降至6.2 L/100 km。实车100 km馈电测试结果显示,馈电油耗为6.3 L/100 km,与仿真值偏差1.6%,验证了所提策略的工程可实现性与节油效果。

【关键词】: 插电式混合动力; 发动机热效率; 馈电油耗; 自适应能量管理; 热管理协同控制

0 引言

插电混动兼具电驱体验与燃油补能优势,但在电量维持阶段易受负荷波动、暖机过程与附件功率需求影响,导致发动机高效区驻留不足并推高馈电油耗。传统规则式能量管理在复杂路况下适应性有限,常出现发动机介入偏早、低负荷发电比例偏高与启停频繁等问题。同时,热状态对发动机摩擦损失、电池内阻与附件能耗具有显著耦合作用,若热管理与能量管理割裂控制,难以获得系统最优。为满足法规与用户实用场景的双重约束,有必要开展面向系统级效率的发动机工况优化、自适应能量管理与热管理协同研究。

1 插电混动系统热效率与馈电油耗的现状分析及问题提出

插电混动系统作为兼顾电驱体验与燃油补能便利性的动力架构,近年在紧凑型SUV与中型轿车平台上加速普及,其关键技术已从电驱功率叠加转向系统级效率优化,工程实现通常依靠高压电池、电机以及发动机协同工作来完成多源动力分配。面向量产应用的主流PHEV发动机热效率多处于38%至40%区间,在真实道路工况中仍易受到负荷波动、暖机时长以及附件功率需求的牵制,使得高效区停留时间不足,进而削弱整车在混动工况下的节油潜力。进一步观察馈电模式下的能耗表现,部分紧凑型SUV在电量维持阶段可出现7.5 L/100 km的油耗水平,其背后往往对应SOC维持目标保守、发动机介入点与扭矩分配不够贴近高效区,以及频繁启停带来的燃油附加消耗。鉴于现行油耗限值与排放法规持续收紧,企业在型式认证与用户实用场景之间面临更强约束,既需要把发动机工作点引导至更高热效率区域,也需要把馈电能量管理算法从规则驱动转向可自适

应的全局权衡,由此凸显热效率提升与馈电油耗控制策略协同研究的必要性。

2 插电混动系统热效率提升与馈电油耗控制算法优化策略

2.1 基于发动机工况优化的热效率提升方法

发动机有效热效率的发挥在插电混动架构中更依赖工况组织方式而非单点指标,原因在于发动机介入多发生在SOC维持阶段或动力需求突增阶段,负荷与转速往往呈现短时波动特征,使燃烧相位、泵气损失以及机械损失在时间轴上叠加放大。结合量产PHEV常见的中高压缩比阿特金森化设计可以观察到,若控制策略未把扭矩请求引导至制动比油耗低谷附近,发动机将频繁停留在中低负荷区域并触发节气门节流,导致进气歧管压力偏低、有效压缩终了温度不足,燃烧稳定性与传热损失共同拉低有效热效率。为把发动机运行区间从离散的瞬态点迁移到更连续的高效带,本研究把喷油提前角作为燃烧相位调节的关键执行量,在满足爆震边界与排温约束的前提下,使缸内压力上升速率更贴近最佳指示效率窗口,同时配合点火与稀薄燃烧边界管理,降低由过迟燃烧带来的膨胀损失。面向结构层面的工况适配,还需把压缩比与进排气相位的耦合关系纳入标定约束,在发动机可变机构许可范围内把几何压缩比的优势转化为有效压缩比的可控性,避免在低负荷时因过高压缩终了压力而被迫大幅退火,从而把原本可以转化为指示功的能量转移为冷却损失。进一步考虑插电混动对高负荷补能工况的依赖,选用米勒循环把进气门早关或晚关当作实现膨胀比大于压缩比的手段,以降低压缩功并抑制高负荷爆震倾向,使发动机能够在较高负荷下稳定运行并把工作点推向高效率区域。为支撑控制

层对工况的快速判别与在线寻优，有必要建立热效率与工况参数的映射关系，将转速、扭矩、空燃比、喷油提前角、进气门关闭角以及冷却液温度等变量组织为多维查表或回归模型，使能量管理在给定需求功率下能够直接检索可行的高效候选工作点。基于热效率的量化表达，可把有效热效率定义为有效功与燃料输入热量之比，用于表征上述工况优化对能量转换链路的贡献，表达式如下：

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_{in}}$$

其中， η_e 表示发动机有效热效率（单位：无量纲）， W_e 为发动机输出的有效功（单位：J）， Q_{in} 表示燃料燃烧释放并输入到发动机系统的热量（单位：J）。

2.2 馈电模式下自适应能量管理算法优化

馈电模式的油耗抬升往往并非由发动机效率单一因素触发，而是来自发动机与电机在时间域上的功率分配偏离系统综合效率最优解，典型表现为 SOC 维持目标过于保守导致发动机过早介入、低负荷发电比例偏高以及启停切换频繁引入的附加燃油消耗。传统规则式控制通常依靠固定阈值来触发动机介入与功率跟随，其优点在于可解释性强且易于量产落地，但在城市拥堵与高速巡航交替出现的真实道路中，固定阈值难以覆盖路况变化引起的需求功率谱迁移，进而造成发动机工作点在高效区附近缺乏驻留时间。为缓解该矛盾，本研究在规则框架上引入自适应权重因子，将车速、加速度表征的瞬态强度、道路坡度或导航预测得到的路况等级，以及电池 SOC 与电池可用功率边界共同映射为权重调度量，使同一套控制逻辑在不同工况下呈现差异化的能量分配倾向。具体而言，当车速稳定且道路负荷波动较小，权重因子将增加发动机在高效区的持续供能比例并降低无效充放电往返；当检测到频繁加减速或坡度上升导致的峰值功率需求，权重因子将把电机瞬态响应能力纳入优先级，以降低发动机快速升降负荷带来的燃烧偏离与附件瞬态损失，同时把 SOC 维持策略从刚性目标转为允许小幅摆动的软约束，从而减少为了追踪 SOC 而进行的低效发电。算法结构上，控制器在每个采样周期内完成状态识别、权重更新、候选功率分配生成以及约束校核，并在电机效率、发动机效率与电池功率限制之间进行折中，控制流程如图 1 所示。该方法以最小化馈电油耗为主线，同时把电机损耗与电池能量吞吐引起的等效损失纳入统一代价，以避免出现短期油耗下降但系统总损失上升的反直觉结果，其目标函数可写为：

$$J = \min \int_{t_0}^{t_1} (\dot{m}_f + P_{em,loss}) dt$$

其中， J 表示馈电能量管理的优化目标值（单位：与定义量纲一致的综合代价值）， $\dot{m}_f$ 为燃油消耗率（单位：kg/s）， $P_{em,loss}$ 表示电机及其逆变器等效损耗功率（单位：W）， t 为时间变量（单位：s）， t_0 与 t_1 分别表示优化时间窗起止时刻（单位：s）。

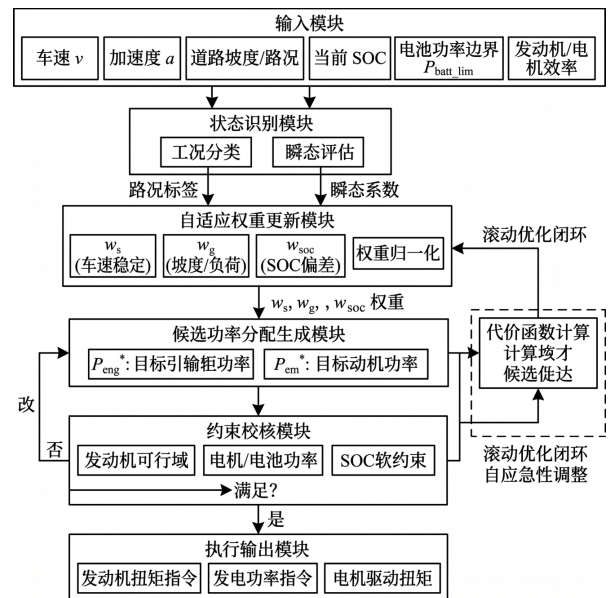


图1 自适应能量管理算法控制流程图

2.3 热管理与能量管理的协同控制策略

插电混动系统在馈电阶段的效率边界还受到热状态的显著牵制，冷却液温度、机油黏度以及电池温度共同决定了摩擦损失、充放电内阻损耗与附件功率需求，若热管理与能量管理各自独立运转，控制目标将出现局部最优导致的能量浪费。面向低温环境，电池内阻升高会把同等电功率需求转化为更高的电池损耗与热耗散，使电机侧等效效率下降并诱发发动机承担更多驱动与发电任务，进而增加燃油消耗；因此有必要把发动机余热回收与电池预热纳入统一调度框架，使发动机在进入稳定高效区运行时同步提供可控热流，把电池温度提升到更适宜的窗口，以降低后续充放电过程中的能量损失。结合冷却系统可变流量水泵与电子节温器的执行特性，协同策略可把冷却回路从以防过热为主的被动调节，转变为面向系统效率的主动热流分配，使发动机在高负荷补能阶段维持较高冷却液温度以减少缸壁传热损失，同时把暖机阶段的热量优先分配给对效率敏感的电池与乘员舱需求，从而降低 PTC 加热或电加热器带来的高压侧电耗。进一步考虑馈电模式下发动机启停频繁引起的热冲击与排放风险，协同控制需要把发动机停机决策与热状态绑定，当冷却液温度与三元催化器温度低于设定阈值时延迟停机或采

用低功率维持模式，以减少重复暖机造成的燃油附加消耗；当热状态已进入稳定区间，则允许更积极的停机策略以释放电机驱动空间，并把附件负荷通过电动化部件进行移峰填谷。由此形成的热管理与能量管理联合调度可把热效率提升措施、SOC 软约束以及热状态演化统一到同一控制语境中，使馈电阶段的油耗控制不再依赖单一阈值，而体现为对功率流与热流的耦合优化过程。

3 优化策略的仿真与实车验证及效果分析

3.1 仿真验证与结果分析

为把前述工况优化、馈电自适应能量管理以及热管理协同策略的作用边界在可控条件下加以量化，本研究借助 MATLAB/Simulink 搭建面向量产插电混动架构的系统级仿真模型，并把发动机、驱动电机与高压电池的关键特性以参数化方式嵌入同一能量流框架。发动机子模型以转速与扭矩为主索引构建效率地图，同时把喷油提前角与进排气相位等执行量引入可调标定层，用于刻画工况组织对有效热效率的影响；电机与逆变器以效率二维查表描述牵引与发电双象限损耗，电池子模型则把开路电压与内阻随 SOC 以及温度变化的特性纳入功率边界约束，以支撑馈电阶段 SOC 软约束的可实现性。为避免结果被单一工况放大，本研究在仿真中选取包含低速启停、加减速过

渡以及中速巡航片段的综合驾驶循环，并把初始 SOC 设置在电量维持区间内，以贴近馈电模式的典型使用条件。对照组沿用固定阈值的发动机介入与功率跟随规则，优化组则将自适应权重因子映射到功率分配决策，并在每个采样周期内同步校核发动机高效候选工作点、电机效率以及电池充放电功率限制，使发动机尽可能在高效带形成更连续的驻留，同时削减为维持 SOC 而引发的低负荷发电与无效能量往返。仿真输出以发动机热效率与馈电油耗作为核心评价指标，并在同一循环边界条件下对比优化前后差异，从而把控制策略对系统综合效率的贡献从工况随机性中剥离出来。对比结果表明，优化策略能够把发动机工作点从中低负荷离散区间推向更高效率区域，使发动机热效率提升至 42%，同时在 SOC 波动幅度可控的前提下抑制频繁启停与低效发电带来的燃油附加消耗，使馈电油耗降至 6.2 L/100 km。与性能指标并行的能量流核算显示，优化后发动机输出功用于驱动的比例增加而用于短周期充放电的比例下降，电机侧损耗随之降低，体现出目标函数对燃油消耗率与电机等效损耗的统一权衡能够在系统层面形成更一致的节能指向。为便于对关键指标进行工程对照，表 1 汇总了优化前后发动机热效率与馈电油耗的对比数据，可为后续实车标定与参数回归提供基准参照。

表1 优化前后馈电油耗与热效率对比表

对比项目	优化前数值	优化后数值	变化幅度
发动机热效率	39.0%	42.0%	+3.0%
馈电油耗	7.5 L/100 km	6.2 L/100 km	-1.3 L/100 km

3.2 实车测试与性能验证

在系统仿真给出可复现的收益区间后，本研究进一步把同一套控制逻辑部署到某款量产插电混动 SUV 的整车控制器中，并把发动机工况优化标定、自适应能量管理参数以及热管理协同调度策略作为一体化方案进行联调，以检验算法在真实道路扰动与热状态演化下的可迁移性。实车测试把车辆工作模式锁定在馈电模式，并将行驶里程设定为 100 km，使发动机介入、SOC 维持与冷却系统温控能够经历较完整的动态过程；测试过程中记录燃油消耗、SOC 轨迹、发动机转速与扭矩分布以及关键热状态量，用于与仿真输出的指标口径保持一致。道路条件覆盖城市拥堵路段的频繁启停以及郊区巡航的负荷平稳片段，使自适应权重因子对瞬态强度的调度逻辑得到充分触发，同时也把热管理协同策略在暖机阶段与稳定阶段的差异化决策暴露在可观测数据中。测试结果显示，优化后馈电油耗为 6.3 L/100 km，与仿真预测值 6.2 L/100 km 的偏差为 1.6%，表

明模型在发动机效率地图、电机损耗表征以及电池功率边界约束的组合描述上具备较好的一致性。与基准控制相比，发动机热效率提高 7.7%，对应的工况分布呈现出更明显的高负荷高效率驻留特征，并且 SOC 维持不再表现为围绕单一目标值的刚性追踪，而是以小幅可控摆动来换取启停次数下降与低效发电比例降低，使燃油消耗改善能够在实际道路扰动下保持稳定。综合仿真与实测的一致性可以推导出，所提出的优化策略在控制层面具备工程可实现性，并且在真实工况下对发动机热效率提升与馈电油耗抑制形成了可量化的协同收益。

4 结语

本文围绕馈电阶段油耗控制与系统效率提升，形成发动机工况优化、自适应能量管理与热管理协同的一体化策略体系。该方案通过高效候选工作点映射与权重自适应调度，减少低效发电与无效能量往返，并将启停与热状态约束联动以降低重复暖机与热冲击带来的附加消耗。仿真与实车结果一致性较好，



馈电油耗可稳定降至约 6.3 L/100 km, 发动机热效率得到提升。 插电混动车型在馈电工况下的节油标定与控制策略迭代提供有效路径。

研究表明, 从功率流与热流耦合角度进行联合优化, 可为量产

参考文献

- [1]刘圣宇,熊俊杰. 增程式汽车发动机热效率的动态控制方法研究[J]. 汽车维护与修理, 2025, (23):104-106.
- [2]杨艳超,吕大鑫. 新能源汽车电机驱动系统控制技术分析[J]. 汽车维护与修理, 2025, (23):107-109.
- [3]魏莉鸿,强永军. 基于自适应等效油耗最小的PHEV能量管理策略[J]. 车用发动机, 2025, (05):89-94.
- [4]曹龙龙,钟勇,邱煌乐,范周慧,郜建行,刘成龙. 基于模糊控制的自适应等效油耗最小能量管理策略[J]. 车用发动机, 2025, (02):89-94.
- [5]宋志辉,何建祥,张志敏,邱继虎,赵阳,李东利,刘岩,沈源. 面向商用车动力的甲醇发动机热效率提升路径与工程实践[J]. 内燃机工程, 2025, 46(05):52-61.

作者简介: 赵国军(1984—), 男, 汉族, 在职研究生, 研究方向为车辆工程。