

基于模拟退火粒子群算法的混合动力汽车能量管理策略研究

肖戊坤 岳东鹏

天津职业技术师范大学 汽车与交通学院, 中国·天津 300000

摘要: 论文针对混合动力汽车能量管理问题, 提出一种基于模拟退火粒子群算法 (SAPSO) 的自适应能量管理策略。该策略以增程式混合动力汽车为研究对象, 构建了包含动力电池、APU 和驱动电机的系统数学模型, 设计了融合 PSO 全局搜索能力和 SA 局部优化特性的混合优化算法。基于 SOC 水平划分三个控制阶段, 建立了考虑能源价格波动的自适应优化框架。仿真结果表明, 与传统策略相比, 该方案在综合能源成本、SOC 稳定性和系统可靠性方面均取得明显改善, 百公里能源成本平均降低 12.4%, SOC 波动减少 36.5%。

关键词: 混合动力汽车; 能量管理; 模拟退火算法; 粒子群优化

Research on Energy Management Strategy of Hybrid Electric Vehicle based on Simulated Annealing Particle Swarm Algorithm

Wukun Xiao Dongpeng Yue

Tianjin University of Technology and Education, School of Automotive and Transportation, Tianjin, 300000, China

Abstract: This paper addresses the energy management challenges of hybrid electric vehicles by proposing an adaptive energy management strategy based on the Simulated Annealing Particle Swarm Optimization (SAPSO) algorithm. The strategy focuses on extended-range hybrid electric vehicles, constructing a mathematical model that includes the battery, APU, and drive motor. It designs a hybrid optimization algorithm that combines the global search capabilities of PSO with the local optimization features of SA. Based on the State of Charge (SOC), the strategy divides the control process into three stages and establishes an adaptive optimization framework that considers energy price fluctuations. Simulation results show that, compared to traditional strategies, this approach significantly improves overall energy costs, SOC stability, and system reliability. Specifically, it reduces the energy cost per 100 kilometers by an average of 12.4% and decreases SOC fluctuations by 36.5%.

Keywords: hybrid electric vehicle; energy management; simulated annealing algorithm; particle swarm optimization

0 前言

混合动力汽车作为节能减排的重要技术路线, 其能量管理策略直接影响整车性能和经济性。随着新能源汽车市场的快速发展, 油电价格波动加大给传统固定策略带来挑战。智能优化算法因其良好的全局寻优能力和计算效率, 在能量管理领域展现出重要应用价值。论文提出将模拟退火机制引入粒子群算法, 设计面向能源价格波动的自适应能量管理策略, 以提升混合动力系统的综合性能。

1 混合动力汽车动力系统结构及工作原理

论文以增程式混合动力汽车为研究对象, 该系统主要由动力电池组、APU (辅助动力单元)、驱动电机及其控制器等关键部件组成。APU 包含发电机与发动机, 可在需要时为动力电池充电或直接为驱动系统供电。动力系统通过整车控制器实现对各部件的协调控制, 从而满足整车动力性需求。

从能量流动的角度分析, 该动力系统具有三种基本工

作模式: 纯电动模式下, 依靠动力电池的电能驱动电机运行; 混合动力模式时, APU 与动力电池共同为驱动电机供电; 充电模式下, APU 对动力电池进行充电。系统可根据车辆行驶状态和电池 SOC 水平自动切换工作模式。

为进行后续的能量管理策略研究, 需要对系统关键部件进行数学建模。动力电池采用内阻等效电路模型描述其充放电特性, APU 模型基于发动机一发电机组的工作特性建立, 驱动电机模型则重点考虑其能量转换效率特性。

2 模拟退火粒子群算法设计与实现

2.1 粒子群优化算法原理

粒子群优化 (PSO) 算法通过模拟鸟群觅食行为进行全局寻优。在 n 维搜索空间中, 每个粒子代表一个潜在解, 具有位置和速度两个属性。粒子 i 在 k 次迭代时的位置和速度更新方程为:

$$V(k+1) = \omega V(k) + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - X(k)) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - X(k)) \quad (1)$$

其中: V 为粒子速度向量, m/s ; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 间随机数; p_{best} 为个体最优位置; g_{best} 为全局最优位置; X 为当前位置, m 。

$$X(k+1) = X(k) + V(k+1) \quad (2)$$

其中: $X(k+1)$ 为更新后位置, m ; $X(k)$ 为当前位置, m ; $V(k+1)$ 为更新后速度, m/s 。算法在迭代过程中, 粒子通过个体经验 (p_{best}) 和群体经验 (g_{best}) 不断调整搜索方向和步长。惯性权重 ω 控制粒子保持原有速度的程度, 学习因子 c_1 、 c_2 分别控制粒子对个体经验和群体经验的学习程度。这种机制使 PSO 算法具有较强的全局搜索能力, 但在局部优化阶段容易出现早熟收敛。

2.2 模拟退火算法原理

模拟退火 (SA) 算法源于固体退火原理, 通过引入概率接受准则避免陷入局部最优。算法以温度 T 控制搜索过程, 系统能量状态 E 代表目标函数值。新解的接受概率由 Metropolis 准则决定:

$$P = \exp\left(-\frac{E_{new} - E_{old}}{kT}\right) \quad (3)$$

其中: P 为接受概率; E_{new} 、 E_{old} 分别为新旧解的能量状态, J ; k 为玻尔兹曼常数; T 为当前温度, K 。

$$T(k+1) = \alpha T(k) \quad (4)$$

其中: $T(k+1)$ 为降温后温度, K ; α 为降温系数; $T(k)$ 为当前温度, K 。

初始阶段较高的温度使系统具有较大概率接受劣解, 有利于跳出局部最优; 随着温度逐渐降低, 系统趋于稳定。这种退火机制赋予了算法良好的局部搜索能力, 但全局搜索效率较低。

2.3 模拟退火粒子群混合算法设计

为克服单一算法的不足, 论文将 SA 算法的退火机制引入 PSO 算法, 设计了混合优化算法 SAPSO。该算法在 PSO 速度更新的基础上, 对粒子新位置进行 Metropolis 准则判断, 并采用自适应降温策略调节接受概率, 如图 1 所示。

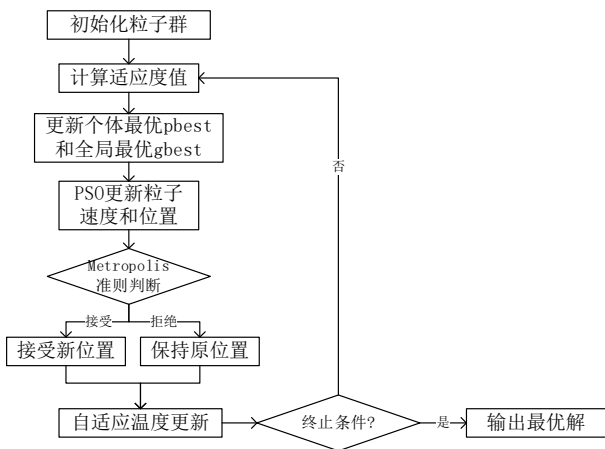


图 1 模拟退火粒子群混合算法流程

该混合算法继承了 PSO 的群体协作特性和 SA 的跳出

局部最优能力。通过 Metropolis 准则控制粒子位置更新, 在保持较强全局搜索能力的同时, 提高了算法的局部精细搜索能力。自适应降温策略则根据种群多样性动态调节温度参数, 实现搜索过程的自适应控制。

3 混合动力汽车能量管理策略设计

3.1 能量管理策略框架

论文设计的能量管理策略采用分层控制结构, 包括策略层、控制层和执行层。策略层根据车辆行驶状态、电池 SOC 和能源价格等信息, 确定当前最优的工作模式和功率分配方案。控制层接收策略层的指令, 结合各部件的工作特性和约束条件, 将功率分配方案转化为具体的控制指令。执行层则负责将控制指令传递给各执行机构, 实现对发动机转速、电机转矩等物理量的实际控制。

策略层是能量管理的核心, 采用 SAPSO 算法对功率分配进行实时优化。优化目标包括最小化能源成本和维持电池 SOC 在合理范围内两个方面。通过建立反映发动机燃油消耗、电机效率和电池损耗的数学模型, 将优化问题转化为考虑多个约束条件的非线性规划问题。同时, 引入能源价格因素, 建立适应油电价格波动的自适应优化框架。

控制层采用规则型控制器实现功率分配方案的执行。控制器包含多组 IF-THEN 规则, 根据车速、加速度需求、SOC 等状态变量选择合适的控制规则。为提高控制精度, 在规则库中加入模糊控制机制, 使控制输出能够平滑过渡。执行层则通过 CAN 总线将控制信号传递给各执行机构的电子控制单元 (ECU), 实现对物理量的精确控制。

3.2 基于 SOC 状态的分阶段控制

针对电池 SOC 的变化特性, 将能量管理策略划分为三个控制阶段。各阶段的控制目标和策略重点存在差异, 如表 1 所示。

在电力驱动为主阶段, 系统优先使用电池能量, APU 仅在特殊情况下启动。该阶段的控制重点是合理分配电机功率, 避免电池过度放电。控制算法主要基于电机效率图和电池放电特性进行优化, 确保系统在高效区间工作。

混合驱动为主阶段是能量管理的核心, 需要综合考虑发动机和电机的工作效率、能源价格以及电池 SOC 等多个因素。该阶段采用 SAPSO 算法实时优化功率分配比例, 使系统在满足动力需求的同时实现最优经济性。

在电荷维持阶段, 控制策略以维持电池 SOC 为主要目标。系统通过调节 APU 的输出功率, 在满足行驶功率需求的同时对电池进行充电。为避免频繁启停 APU, 采用滞回控制方式确定 APU 的启动和停止时机。

3.3 能量管理策略优化模型构建

面向能源价格波动的自适应能量管理策略优化模型主要包括目标函数、决策变量和约束条件三个部分。目标函数由单位行驶里程的综合能源成本和电池 SOC 偏差两项组成, 通过权重系数调节两者的重要性, 如图 2 所示。

表 1 基于 SOC 的分阶段控制策略

控制阶段	SOC 范围	主要工作模式	控制重点	APU 工作状态
电力驱动为主	$SOC > 0.7$	纯电动模式	优先使用电能, APU 待机	停机或低功率待机
混合驱动为主	$0.4 \leq SOC \leq 0.7$	混合动力模式	优化油电配比, 平衡效率与成本	高效区间工作
电荷维持	$SOC < 0.4$	充电模式	维持 SOC, 保证续航能力	高功率充电

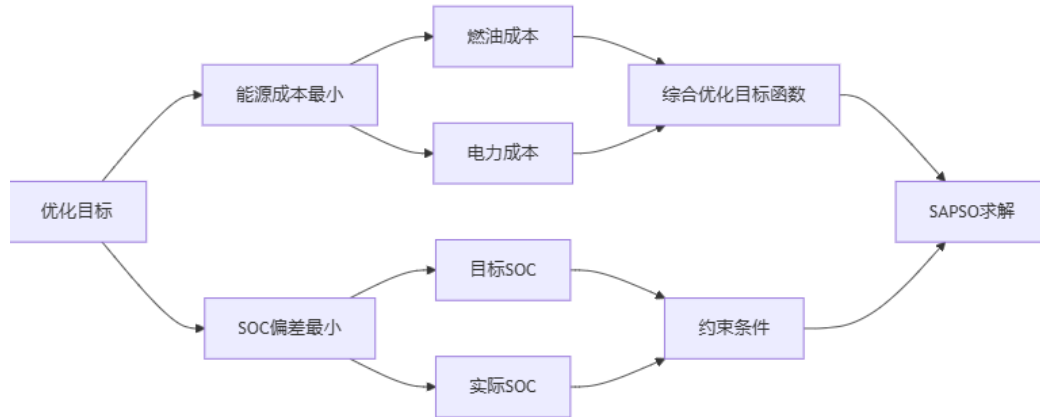


图 2 能量管理策略优化模型结构

决策变量包括 APU 的输出功率和电机的输出转矩。约束条件主要考虑：发动机和电机的功率范围约束、电池 SOC 的上下限约束、系统功率平衡约束等。其中功率平衡约束确保发动机功率和电机功率之和满足车辆行驶需求。

模型求解采用改进的 SAPSO 算法，将粒子的位置向量映射为 APU 和电机的控制量。通过不断迭代优化，得到在当前工况下的最优功率分配方案。同时，模型中引入了油电价格比作为自适应参数，当能源价格发生波动时，系统能够自动调整控制策略，维持最优的经济性。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真方案设计与数据处理

为验证所提出的能量管理策略的有效性，论文基于 MATLAB/Simulink 平台构建混合动力汽车仿真模型。仿真工况选取中国典型城市工况循环 (CCBC)、高速循环工况 (HWFET) 以及新欧洲行驶循环 (NEDC) 三种标准工况。同时收集了全国不同地区 2024 年第一季度的油电价格数据，包括北京、上海、广州等 15 个主要城市的实时能源价格数据作为优化参数输入。仿真实验分为固定能源价格组和价格波动组两组进行对比。

仿真参数设置方面，混合动力系统主要部件参数来自某款量产增程式电动汽车，包括：电池组额定容量 45kWh，额定电压 350V，最大放电功率 180kW；APU 最大输出功率 85kW，最佳工作点油耗率 235g/kWh；驱动电机峰值功率 150kW，额定功率 75kW，最高转速 12000r/min。SAPSO 算法参数设置为：种群规模 50，最大迭代次数 200，学习因子 $c_1=c_2=2$ ，初始温度 100K，降温系数 0.95，位置和速度约束范围根据实际物理限制确定。

数据处理采用分段统计分析方法。首先对原始数据进

行降噪和滤波处理，采用三西格玛准则去除异常值；然后按照 SOC 的三个控制区间对数据进行分类统计，计算各区间的平均燃油消耗率、电能消耗率、能源成本、排放水平等指标；接着使用滑动平均法对瞬时数据进行平滑处理，减少数据波动对分析结果的影响；最后采用归一化处理对不同量纲的评价指标进行统一处理，便于综合性能对比。为保证数据可靠性，每组实验重复进行三次，取平均值作为最终结果。

4.2 仿真结果对比与性能分析

通过对比实验，对所提出的自适应能量管理策略与传统策略的性能进行全面分析。两种策略在不同工况下的主要性能指标对比如表 2 所示。

表 2 不同工况下传统策略与自适应策略性能对比

评价指标	工况类型	传统策略	自适应策略	改善幅度
百公里油耗 (L/100km)	CCBC	4.8	4.2	12.5%
	HWFET	4.2	3.8	9.5%
	NEDC	4.5	4.0	11.1%
电能消耗率 (kWh/100km)	CCBC	15.6	14.8	5.1%
	HWFET	13.8	13.2	4.3%
	NEDC	14.5	13.8	4.8%
SOC 偏差均方根 (%)	CCBC	8.5	5.2	38.8%
	HWFET	6.8	4.5	33.8%
	NEDC	7.6	4.8	36.8%
综合能源成本 (元/100km)	CCBC	52.6	45.8	12.9%
	HWFET	48.5	42.6	12.2%
	NEDC	50.2	44.1	12.2%
APU 启停次数 (次/100km)	CCBC	18	12	33.3%
	HWFET	12	8	33.3%
	NEDC	15	10	33.3%

实验结果表明,在考虑能源价格波动的情况下,自适应策略能够根据当前油电价格比自动调整功率分配方案。当电价相对较低时,系统增加电能使用比例;当油价相对较低时,则适当提高 APU 的工作时间。这种自适应机制在三种工况下均表现出良好的经济性,使得百公里综合能源成本平均降低了 12.4%。

从动态性能来看,自适应策略下系统的 SOC 波动更小,三种工况下的偏差均方根平均降低了 36.5%,说明电池管理更加稳定。同时,APU 的启停次数显著减少,平均降低了 33.3%,有利于提高系统可靠性和延长使用寿命。特别是在城市工况下,由于频繁加减速,自适应策略的优势更为明显。

5 结语

论文提出一种基于模拟退火粒子群算法的混合动力汽车能量管理策略,通过融合 PSO 的群体协作特性和 SA 的局部搜索能力,实现了对功率分配的实时优化。所设计的分阶段控制框架和自适应优化模型,有效应对了能源价格波动带来的挑战。仿真实验验证了该策略在经济性、稳定性和可

靠性方面的优越性。未来研究将重点关注算法的实时性能优化、多目标权重的自适应调节,以及策略在实际道路工况下的验证和改进,为混合动力汽车节能减排技术的发展提供新思路。

参考文献:

- [1] 张富椿,尹燕莉,马永娟,等.网联混合动力汽车队列的生态驾驶与能量管理分层控制[J].汽车安全与节能学报,2025,16(1):159-169.
- [2] 杨建军,柳东威,李菁元,等.混合动力汽车的道路预见性节能技术及一种测评方法[J].汽车安全与节能学报,2025,16(2):268-276.
- [3] 田珂,马骁.融合动态规划与XGBoost算法的混合动力汽车能量管理策略[J].车用发动机,2025(2):80-88.
- [4] 杨诚.基于Amesim的混合动力汽车能量管理控制优化[J].滁州职业技术学院学报,2025,24(1):52-56.
- [5] 张小波,刘钦,胡阳,等.混合动力汽车动力系统的设计与优化[J].内燃机与配件,2025(2):15-17.

作者简介:肖戊坤(2001-),男,中国山西长治人,硕士,从事新能源汽车及电子控制技术研究。