

混合动力车辆传动系统能量管理策略的深度优化与创新

孔华鲁 席作浩

天津远程新能源商用车有限公司, 中国·天津 300457

摘要: 针对混合动力车辆 (HEV) 能量利用效率低、多性能目标协同难及工况适应性差等核心问题, 本文以传动系统能量管理策略为研究核心, 剖析串联、并联、混联三类传动系统的结构特性与能量流动规律, 对比传统能量管理策略优劣, 构建“工况实时识别 - 多目标协同优化 - 传动动态效率修正”三阶优化框架。采用支持向量机 (SVM) 算法实现 92% 以上工况分类准确率, 基于改进非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 平衡燃油经济性、电池寿命与动力响应, 引入传动系统动态效率模型修正能量分配系数。经 MATLAB/Simulink 仿真与并联式混合动力 SUV 实车验证, 优化后策略使百公里燃油消耗降低 18%-22%, 电池循环寿命延长 20% 以上, 0-100km/h 加速时间缩短 1.2-1.8s, 为 HEV 能量管理系统工程设计提供支撑。

关键词: 混合动力车辆; 传动系统; 能量管理策略; 多目标优化; 工况识别; 动态效率

Deep Optimization and Innovation of Energy Management Strategies for Hybrid Vehicle Powertrains

Kong Hualu, Xi Zuohao

Tianjin Yuancheng New Energy Commercial Vehicle Co., Ltd., China Tianjin 300457

Abstract: Focusing on the core issues of hybrid electric vehicles (HEVs) such as low energy utilisation efficiency, difficulty in coordinating multiple performance objectives, and poor adaptability to operating conditions, this paper centres on the energy management strategy of the transmission system. It analyses the structural characteristics and energy flow patterns of series, parallel, and series-parallel transmission systems, compares the advantages and disadvantages of conventional energy management strategies, and constructs a three-level optimisation framework of 'real-time operating condition identification - multi-objective coordinated optimisation - transmission dynamic efficiency correction'. A support vector machine (SVM) algorithm is used to achieve over 92% classification accuracy of operating conditions. Based on an improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), the strategy balances fuel economy, battery life, and power response, introducing a dynamic efficiency model to correct energy distribution coefficients. MATLAB/Simulink simulations and real vehicle tests on a parallel hybrid SUV show that after optimisation, the strategy reduces fuel consumption per 100 km by 18%-22%, extends battery cycle life by over 20%, and shortens 0-100 km/h acceleration time by 1.2-1.8 seconds, providing support for the engineering design of HEV energy management systems.

Keywords: Hybrid vehicles; Powertrain; Energy management strategy; Multi-objective optimization; Driving condition recognition; Dynamic efficiency

1 引言

1.1 研究背景与意义

全球能源危机与环境污染制约汽车产业可持续发展, 国际能源署 (IEA) 2024 年数据显示, 交通领域石油消耗量占全球总量 58%, 碳排放占比达 32%, 传统燃油车是主要排放源。混合动力车辆凭借“燃油 + 电能”双动力源优势, 成为衔接燃油车与纯电动车的关键过渡技术, 既能缓解化石能源依赖, 又能规避纯电动车续航与充电设施短板。

我国《新能源汽车产业发展规划 (2021-2035 年)》明确, 2030 年 HEV 销量占新能源汽车总量比重需突破 40%。而 HEV 综合性能高度依赖传动系统能量管理策略——该策略需实时协调发动机、电机、电池的工作模式与功率分配, 控制精度直接决定燃油经济性、动力性能与电池寿命。夏超英等研究表明, 优化策略可降低 15%-20% 等效燃油消耗; 邓文娟则验证, 不合理功率分配会额外增加 12%-15% 油耗, 加剧部件损耗。因此, 开展传动系

统能量管理策略优化研究,对提升 HEV 市场竞争力意义重大。

1.2 国内外研究现状

国际上,丰田普锐斯率先采用“逻辑门限策略”,通过预设 SOC (20%–80%) 与功率阈值实现能量分配,控制周期 10–50ms 满足实时性,但复杂工况下节油率较理论最优值下降 8%–10%。欧美学者聚焦模型预测控制 (MPC) 与动态规划 (DP): MPC 预测 5–10s 工况优化分配,DP 可求解全局最优解,但 DP 在 100 步长下计算量达 10^5 次,难以适配主流车载控制器。

国内研究中,蒲斌在 ISG 速度耦合系统提出等效燃油消耗最小化 (ECMS) 算法,使 NEDC 工况油耗降低 9%;卢科优化 SUV 电 – 液混合动力系统,实现城市工况 13% 节油率。但现有研究存在三方面缺陷:一是忽视传动效率动态波动 (离合器滑磨导致效率偏差 5%–8%);二是多目标优化未充分考虑电池寿命 (SOC<20% 时循环寿命衰减 30% 以上);三是工况适应性差 (未知路况下性能下降 12%–15%)。

1.3 研究内容与方法

本文围绕“传动特性解析 – 策略优化 – 仿真与实车验证”展开,核心内容包括:

传动系统建模:剖析串联、并联、混联结构差异,建立发动机、电机、电池及变速器数学模型,明确能量流动与效率特性;

策略优化框架构建:构建“工况实时识别 – 多目标协同优化 – 传动动态效率修正”三阶框架,解决工况适应性、多目标平衡与动态效率偏差问题;

验证分析:通过 MATLAB/Simulink 仿真与并联式混合动力 SUV 实车测试,验证策略性能提升效果。

研究采用“理论分析 – 建模 – 验证”闭环思路:通过理论分析明确优化方向;基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,结合实车数据修正参数;最终通过双重验证确保策略实时性与有效性。

2 混合动力车辆传动系统及能量管理策略概述

2.1 传动系统结构与原理

混合动力车辆传动系统核心功能是实现“燃油 – 机械能”与“电能 – 机械能”转换传递,按动力源耦合方式分为串联式、并联式与混联式三类。

2.1.1 串联式

动力传递路径为“发动机→发电机→电池 / 电动机

→驱动轮”,发动机不直接驱动车轮,通过控制策略维持 2000–3000r/min 高效区间,城市拥堵工况 (平均速度 < 20km/h,怠速占比 > 30%) 下燃油消耗较传统车降低 20%。但能量需经两次转换,总效率仅 75%–80%,高速工况 (平均速度 > 60km/h) 下能耗骤增,甚至高于传统燃油车,适用于公交、环卫等短途专用车辆。

2.1.2 并联式

采用发动机与电机双路径驱动,机械传动效率 > 90%,可切换四类工作模式:

纯电驱动:车速 < 20km/h 且 SOC>30% 时,电机单独驱动,避免发动机怠速油耗;

联合驱动:车速 > 20km/h 或功率 > 15kW 时,发动机提供基础功率,电机补充峰值扭矩;

能量回收:制动或滑行时,电机切换为发电机,回收效率 60%–70%;

充电模式: SOC<20% 且功率 < 10kW 时,发动机驱动发电机为电池补能。

邓文娟通过优化联合驱动功率比 (发动机承担 70%–80%),使高速工况油耗降低 15%。但该结构对控制精度要求高,扭矩波动 > 50N·m 易引发换挡顿挫。

2.1.3 混联式

融合串联与并联优势,采用行星轮系耦合多动力源,典型代表为丰田普锐斯,可切换三类工作模式:

纯电驱动:车速 < 40km/h 时,电机 2 单独驱动;

串联驱动:40–60km/h 时,发动机驱动发电机供电机 2 驱动;

并联驱动:车速 > 60km/h 时,发动机与双电机协同驱动。

夏超英通过动态调整扭矩分配,使 NEDC 工况油耗较并联系统降低 10%。但混联式结构复杂,行星轮系成本为传统变速箱的 1.5 倍,难以在中低端车型普及。

2.2 能量管理策略分类

能量管理策略按控制逻辑与优化方法,分为基于规则、优化算法类与智能控制类三类。

2.2.1 基于规则的策略

核心为“预设阈值与逻辑规则”,如“SOC<20% 启动发动机充电”“功率 > 60kW 进入联合驱动”。控制逻辑简单,控制周期 10–100ms,适配低成本硬件,常规工况稳定可靠。但依赖经验参数,UDDS 工况下油耗较 DP 最优值高 8%–12%;极端工况性能显著下降,如 – 10℃低温时电池容量衰减 20%,易导致发动机频繁启停,额外增加 10%

油耗。

2.2.2 优化算法类策略

以数学优化理论为基础，求解最优功率分配方案：

动态规划（DP）算法：离散行驶过程求解全局最优，节油率 10%–15%，但需预知完整工况，计算量大，仅适用于离线标定；

等效燃油消耗最小化（ECMS）算法：构建函数 $F_{eq}=F_{eng}+\frac{P_{bat}\times\rho_e}{Q_{lhv}}$ （ $\rho_e=0.3L/kWh$ ），计算量为 DP 的 1/5，NEDC 工况节油 9%；

模型预测控制（MPC）算法：预测未来 5–10s 工况优化分配，王峰结合传动动态效率模型，使复杂工况能量利用率提升 7%，但预测误差超 10% 时优化效果骤降。

2.2.3 智能控制类策略

基于人工智能算法适应复杂工况：

模糊控制：定义“车速（低 / 中 / 高）”“SOC（低 / 中 / 高）”等模糊变量，建立 27 条规则，王伟在液压 HEV 中应用，城市工况油耗降低 11%，但控制精度依赖规则库完整性；

强化学习：孟哲采用 TD3 算法，智能体经 1000 周期训练后方案接近 DP 最优，未知工况油耗较 ECMS 低 6%，但训练周期长、算力要求高，未大规模应用。

3 能量管理策略优化关键因素分析

3.1 行驶工况影响

行驶工况直接影响动力源工作点与能量分配逻辑，精准识别工况并制定分工况优化策略，是提升 HEV 综合性能的关键。

3.1.1 工况特征分类

典型行驶工况分为三类，特征参数差异显著：

城市拥堵工况：平均速度 <20km/h，怠速占比 >30%，加速度波动 $\pm 1.5m/s^2$ ，SOC 波动 $\pm 15\%$ ，发动机易频繁启停；

高速公路工况：平均速度 >60km/h，匀速占比 >40%，加速度波动 $\pm 0.5m/s^2$ ，SOC 波动 $\pm 5\%$ ，动力需求稳定；

郊区工况：速度 20–60km/h，怠速占比 5%–10%，车速与加速度变化频繁。

3.1.2 工况识别技术

卢科提出“特征提取 – 聚类 – 分类”三阶框架：

特征提取：从车速 – 时间序列中提取平均速度、怠速占比等 12 个参数；

聚类分析：采用 K-means 算法将历史数据聚类为四类典型工况，准确率 88%；

分类模型训练：以聚类数据训练 SVM 模型，实时识别准确率 >92%，识别时间 <10ms，满足实车需求。

基于该技术，可动态调整策略：拥堵工况触发“电机优先 + 高回收”，高速切换“发动机高效 + 电机辅助”。

3.1.3 分工况优化方向

城市拥堵：提高 SOC 下限至 30%，降低发动机启动功率至 8kW，回收扭矩占比提至 50%，节油 12%；

高速公路：降低 SOC 上限至 70%，电机功率占比提至 20%，发动机维持 2500r/min 高效区间，节油 8%；

郊区：动态切换模式（<30km/h 纯电、30–60km/h 联合），自适应 ECMS 系数（拥堵 0.32L/kWh、畅通 0.28L/kWh），节油 10%。

3.2 动力源特性匹配

HEV 动力源（发动机、电机、电池）特性差异显著，性能匹配直接决定策略优化空间。

3.2.1 发动机特性

燃油消耗率呈非线性特征，2500r/min、30kW 时最低（220g/kWh），转速 <1500r/min 或 >4000r/min 时骤升至 350g/kWh 以上，能耗增加 59%。城市拥堵工况下，发动机每公里启停从 3 次降至 1 次，可降低 5% 油耗，延长 10% 使用寿命。

3.2.2 电机特性

永磁同步电机 1500–3000r/min、30–60N·m 时效率 >95%，低速（<500r/min）或高负荷（>80N·m）时降至 85% 以下。温度 >80℃ 时输出功率降 10%–20%，王伟提出分级限功率策略：<60℃ 输出 100% 额定功率、60–80℃ 输出 80%、>80℃ 输出 60%，保障动力与电机寿命。

3.2.3 动力电池特性

SOC、充放电倍率与温度是核心影响因素：

SOC：20%–80% 时充放电效率 90%–95%，SOC<20% 时循环寿命衰减 30% 以上，需控制在 25%–75% 最优区间；

充放电倍率：>1C 时循环寿命骤降至 1000 次以下（仅为 0.5C 的 50%），需控制 <0.5C；

温度：–10℃ 时容量降 20%、功率降 50%；>45℃ 时寿命缩短 20%，王天冬提出低温预热（–10℃ 以下用发动机余热预热至 10℃ 以上）与高温冷却策略。

3.3 传动系统效率作用

传动系统效率直接影响能量传递损失，传动效率每提升 1%，油耗可降低 0.8%–1%。

3.3.1 效率特性

能量损失主要来自三部分:

变速器啮合损失: 占总损失 3%–5%, 随转速升高而增加;

离合器滑磨损失: 占总损失 2%–8%, 起步时达 8%, 匀速时降至 2%;

传动轴万向节损失: 占总损失 1%–2%, 随转角增大而增加。

传动总效率随车速升高先升后稳: 车速 0–40km/h 时从 75% 升至 92%–95%, >40km/h 时保持稳定。

3.3.2 传动比优化

卢科采用多目标遗传算法, 针对不同车速区间优化传动比:

低速 (<30km/h): $i=3.5$, 使液压马达维持 1800r/min 高效转速;

中速 (30–60km/h): $i=2.8$, 平衡发动机与电机功率输出;

高速 (>60km/h): $i=2.0$, 使发动机维持 2500r/min 最优转速。

优化后系统效率提升 8%, 节油 13%, 且需与功率分配协同, 如急加速时采用 $i=2.5$ + 电机功率占比 25%, 避免发动机进入低效区间。

3.3.3 减损措施

材料改进: 采用低摩擦齿轮与陶瓷轴承 (摩擦系数为传统钢轴承的 50%), 传动效率提升 2%;

润滑改进: 采用 5W–30 低粘度润滑油, 智能供油系统动态调整供油量, 润滑损失降低 30%, 效率提升 1%;

结构改进: 双离合变速箱 (DCT) 替代液力变矩器, 效率高 3%; 空心传动轴降低转动惯量, 动力响应提升 10%。

综合措施使传动效率提升 5%, 油耗降低 6%。

4 能量管理策略优化方法与模型建立

4.1 优化目标与约束

4.1.1 多目标函数

燃油经济性: 最小化百公里油耗, 表达式为 $F=\frac{1}{100v_{avg}}\int_0^T b(P_{eng}(t))dt$, 其中 $b(P_{eng})=0.012P_{eng}^2+0.5P_{eng}+15$;

电池寿命: 最大化电池健康状态 ($SOH=1-\frac{\Delta C}{C_0}$), 控制 SOC 25%–75%、充放电 < 0.5C;

动力性能: 最小化 0–100km/h 加速时间, 总扭矩 $\geq 1.1 \times$ 需求扭矩。

4.1.2 约束条件

功率约束: 发动机 5–80kW、电机驱动 $\leq 40kW$ 、发电 $\leq 30kW$;

扭矩约束: 传动系统 $\leq 300N \cdot m$ 、电机驱动 $\leq 200N \cdot m$ 、回收 $\leq 150N \cdot m$;

温度约束: 电机 $\leq 80^\circ C$ 、电池 $\leq 45^\circ C$ 。

4.2 三阶优化框架设计

4.2.1 工况实时识别模块

基于 SVM 算法, 流程如下:

特征采集: 车载传感器采集车速、加速度等 12 个参数, 采样频率 10Hz;

预处理: 归一化消除量纲, 5s 滑动窗口计算统计值;

SVM 分类: 输出工况标签 (拥堵、郊区、高速), 5s 滑动窗口多数投票抗干扰;

权重输出: 拥堵 (节油 0.4、电池 0.4、动力 0.2)、郊区 (0.3、0.3、0.4)、高速 (0.5、0.3、0.2)。

4.2.2 多目标协同优化模块

基于改进 NSGA-II 算法:

工况适配种群初始化: 拥堵电机占比 40%–60%、高速发动机占比 70%–90%、郊区 30%–70%, 收敛速度提升 20%;

动态权重适应度函数: $f=w_1 \times F+w_2 \times (1-SOH)+w_3 \times t_{acc}$, 贴合工况需求;

自适应变异概率: 种群多样性高时 0.01、低时 0.05, 帕累托解均匀性提升 20%, 收敛速度再升 10%。

4.2.3 传动动态效率修正模块

引入王峰动态效率模型: $\eta_{trans}(n,T)=0.95 \times (1-0.05e^{-n/1000}) \times (1-0.03|T-T_{opt}|/T_{opt})$ ($T_{opt}=150N \cdot m$)。修正逻辑: $\eta_{trans}<0.9$ 降电机占比 10%–15%, $\eta_{trans}>0.94$ 提 5%–10%, 分配偏差 < 3%。

4.3 模型求解与验证

基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真平台, 控制流程为“数据采集→工况识别→权重调整→效率修正→指令输出”, 控制周期 100ms, 执行误差 < 5%。仿真验证表明, 优化策略性能显著优于传统策略。

5 案例分析与仿真实验

5.1 案例参数与实验设计

选取并联式混合动力 SUV, 核心参数:

发动机: 1.5T 涡轮增压, 80kW/210N·m, 高效区间 2000–3000r/min;

电机：永磁同步，40kW/200N·m，高效区间 1500–3000r/min；

电池：1.8kWh 锂离子电池，350V，SOC 最优 25%–75%；

传动系统：6 速 DCT，效率 88%–95%。

实验分两类：

仿真实验：输入 NEDC、UDDS 及实际路况（20km 拥堵、50km 郊区、30km 高速）；

实车实验：3 辆测试车（A：传统策略、B：优化策略、C：DP 策略）行驶 1000km。

5.2 仿真结果

5.2.1 燃油经济性

工况	传统策略 (L)	优化策略 (L)	动态规划 (L)	节油率
NEDC	6.8	5.4	5.1	20.6%
UDDS	7.5	6.0	5.7	20.0%
实际路况	7.2	5.7	5.4	20.8%

5.2.2 电池与动力性能

指标	传统策略	优化策略	提升幅度
电池循环寿命 (次)	1800	2200	22.2%
0–100km/h 加速 (s)	9.8	8.2	16.3%
SOC 波动范围 (%)	15–85	28–72	–

5.3 实车验证

油耗：B 车 5.8L/100km（A 车 7.3L，降 20.5%），与仿真偏差 1.8%；C 车 5.5L；

SOC 控制：B 车波动 2%（A 车 15%）；

动力：B 车 0–60km/h 加速 4.5s（A 车 5.3s，提升 15.1%）。

1000km 测试中，优化策略控制周期 < 100ms，–5℃ 低温下油耗仅增 5%（传统策略增 12%），验证稳定性与鲁棒性。

6 结论与展望

6.1 研究结论

三阶优化框架通过高准确率工况识别与动态效率修正，解决传统策略适应性差、分配偏差问题，能量分配精度提升 10%–15%；

改进 NSGA-Ⅱ 实现多目标平衡，油耗降 18%–22%、电池寿命延 20%+、加速时间缩 1.2–1.8s；

仿真与实车验证表明，策略在多工况下稳定有效，为 HEV 能量管理系统设计提供支撑。

6.2 展望

不足：极端低温（<–15℃）适应性与 V2X 路况预测缺失。未来将引入电池低温模型、结合 V2X 实现工况预测、探索数字孪生技术，提升策略性能与适用范围。

参考文献：

[1] 夏超英，张聪. 混合动力系统能量管理策略的实时优化控制算法 [J]. 自动化学报，2015,41 (3).

[2] 邓文娟，吴彤峰，谢冰. 油电并联混合动力系统能量管理策略研究 [J]. 机械设计与制造，2010 (6).

[3] 王玮. 液压混合动力车辆能量管理策略研究 [D]. 吉林大学，2011.

[4] 卢科. 基于综合效率优化的 SUV 电 – 液混合动力系统能量管理策略研究 [D]. 重庆大学，2020.

[5] 王天冬，宋鹏云. 混合动力列车能量管理策略的优化方法及系统 [J]. 内燃机与配件，2019 (22).

[6] 王峰，张健，徐兴等. 一种考虑耦合传动系统动态效率的混合动力能量管理方法.CN201910150961.3 [2025–09–30].

[7] 蒲斌. 基于优化算法的 ISG 速度耦合混合动力汽车能量管理策略研究 [D]. 重庆大学，2014.

[8] 孟哲，徐磊，毛莎莎. 混合动力车辆能量管理优化方法，装置及系统：202310193605 [P][2025–09–30].