



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404980

引用格式:高丙奇,杨彬彬,司书龙,等.飞轮混合动力汽车结构设计及控制策略[J].科学技术与工程,2025,25(14):6072-6082.

Gao Bingqi, Yang Binbin, Si Shulong, et al. Structure design and control strategy of flywheel hybrid electric vehicle[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6072-6082.

飞轮混合动力汽车结构设计及控制策略

高丙奇¹, 杨彬彬^{1*}, 司书龙¹, 张志发², 赵博³, 张铁柱¹

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255000; 2. 中国重汽集团济南动力有限公司发动机厂, 济南 250000;
3. 山东理工大学电气与电子工程学院, 淄博 255000)

摘要 飞轮混合动力系统(planetary gear set based flywheel hybrid electric powertrain, PGS-FHEP)在提高车辆性能和能源利用率方面具有巨大优势。本文研究对其主要部件进行了设计和匹配,并在等效能耗最小控制策略(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)的基础上,引入动态规划(dynamic programming, DP)控制策略获取最优电池荷电状态(state of charge, SOC)轨迹,通过实时调整遗传算法(genetic algorithm, GA)求得的初始最优等效因子,确保实际 SOC 轨迹与最优轨迹相符,从而搭建了一种可实时控制的自适应等效能耗最小控制策略(adaptive equivalent consumption minimization strategy, A-ECMS),最终在中国轻型商用车行驶工况(China light-duty commercial vehicle test cycle, CLTC-C)工况下对三种控制策略进行了仿真对比。结果表明,在 A-ECMS 控制下,较传统 ECMS 相比,加装 PGS-FHEP 的飞轮混合动力汽车(flywheel hybrid electric vehicle, FHEV)综合能耗降低了 2.51%,控制效果更接近 DP 控制策略;系统能量回收率可达 57.72%,其中,飞轮以机械能形式回收占比 23.64%。此外,能量回收过程中,飞轮的参与使电池的峰值功率显著降低。

关键词 飞轮混合动力系统;参数匹配;动态规划;等效能耗最小控制策略

中图分类号 U469.72;

文献标志码 A

Structure Design and Control Strategy of Flywheel Hybrid Electric Vehicle

GAO Bing-qi¹, YANG Bin-bin^{1*}, SI Shu-long¹, ZHANG Zhi-fa², ZHAO Bo³, ZHANG Tie-zhu¹

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. Sinotruk Jinan Power Co., Ltd., Engine Factory, Jinan 250000, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

[Abstract] Vehicle performance and energy efficiency can be significantly enhanced by PGS-FHEP (planetary gear set based flywheel hybrid electric powertrain). The main components were designed and matched, and DP (dynamic programming) control strategy was introduced based on ECMS (equivalent consumption minimization strategy) to obtain the optimal SOC (state of charge) trajectory. The initial optimal equivalent factor obtained by GA (genetic algorithm) was adjusted in real time to ensure that the actual SOC trajectory is consistent with the optimal trajectory. Thus, a real-time A-ECMS (adaptive equivalent consumption minimization strategy) was built, and the three control strategies were simulated and compared under CLTC-C (China light-duty commercial vehicle test cycle) condition. The results show that under the control of A-ECMS, compared with the traditional ECMS, the comprehensive energy consumption of FHEV (flywheel hybrid electric vehicle) equipped with the PGS-FHEP is reduced by 2.51%, and the control effect is closer to the DP control strategy. The energy recovery rate of the PGS-FHEP is 57.72%, of which 23.64% is recovered in the form of mechanical energy. In addition, the participation of the flywheel significantly reduces the peak power of the battery during energy recovery process.

[Keywords] planetary gear set based flywheel hybrid electric powertrain; parameter matching; dynamic programming; minimum equivalent fuel consumption strategy

当今在能源危机和环境保护的双重背景下,兼具传统燃油车和纯电动汽车优点的混合动力汽车受到更为广泛的关注^[1-2]。当前主流的混合动力汽车采用电池作为电机驱动和制动能回收的能量源,

车辆行驶过程中,电能和机械能间的频繁转换导致能量传递效率降低。飞轮储能属于物理储能技术,与电池相比,具有功率密度高、响应速度快、循环寿命长等特点^[3-4]。将飞轮储能装置引入混合动力系

收稿日期:2024-07-03; 修订日期:2025-02-26

基金项目:国家自然科学基金(52075307)

第一作者:高丙奇(1999—),男,汉族,山东临邑人,硕士研究生。研究方向:新能源汽车能源动力系统。E-mail:884116468@qq.com。

*通信作者:杨彬彬(1984—),男,汉族,河北海兴人,博士,副教授。研究方向:新能源汽车能源动力系统。E-mail:yangbinbin@sdu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

统,借助飞轮的快速响应特性可实现行驶过程中的瞬时高功率输出及制动能量高效回收,有效提升了车辆动力性和经济性^[5-6]。

根据能量传递形式不同,飞轮混合动力系统主要分为电驱动式和机械式。与电驱动式相比,机械式在运行过程中不涉及能量形式转换,因此能量传递效率更高。20世纪60年代以来,众多科研机构开始对机械式飞轮混合动力系统进行研究。Shen等^[7]提出一种带有飞轮的零惯性动力系统,避免了车辆加速时由内燃机(internal combustion engine, ICE)惯性导致的加速阻力,但该系统无法实时回收制动能。Song等^[8]设计出一种功率分流式机械混合动力系统,仿真结果表明,该系统的燃油经济性与传统混合动力系统相当但动力性更强。Diego-Ayala等^[9]提出了一种机械并联式混合动力系统,搭载该系统的汽车在城市循环中的油耗较燃油车下降了11.3%,但其无法优化ICE工况点。综上,机械式飞轮混合动力系统在降低油耗、提升动力等方面存在巨大潜力,但无电机辅助情况下,无法实现对ICE运行工况的精确调节。同时,储能飞轮回收的车辆动能无法转化为电能长期储存,最终会因摩擦而耗散。因此,本课题组提出了一种新型的飞轮混合动力系统(planetary gear set based flywheel hybrid electric powertrain, PGS-FHEP),加入电机以调节ICE工况和储能飞轮能量的存储与释放。该系统充分结合了机械式飞轮混合动力系统的高效率和电机灵活可控的特性,利用行星齿轮机构(planetary gear set, PGS)取代传统的无级变速器(continuously variable transmission, CVT)进行动力传递,可实现更平稳的动力输出和更高效的能量回收^[10]。

为了协调车辆行驶过程中ICE、电机等部件间的转矩分配,需要设计合理的能量管理策略。其中,基于规则的控制策略由于易于实现、简单实用等特点受到广泛关注。周奇勋等^[11]针对一款混合动力客车设计了考虑ICE工作特性、电机工作特性的规则控制策略,仿真结果显示车辆油耗降低了20%。然而,逻辑门限值的设置依靠主观经验,无法适应不同行驶工况的需求,节能效果有限。为此,国内外学者对基于优化的能量管理策略进行了深入研究,其通常分为两类:基于瞬时优化和全局优化的控制策略^[12]。其中,以动态规划算法(dynamic programming, DP)为代表的基于全局优化控制策略因需提前获知车辆未来的行驶路况,计算量大,难以在实车上大规模应用,通常仅作为评价其他控制策略的标准。以等效能耗最小控制策略(equivalent

consumption minimization strategy, ECMS)为代表的基于瞬时优化的能量管理策略以其计算量小、实时性强等优势,得到更为广泛的应用。Paganelli等^[13]首次将ECMS应用于并联式混合动力汽车中,并取得了良好的控制效果。Zhang等^[14]使用卷积神经网络预测车速以实时调整ECMS的等效因子,测试结果表明,车辆燃油经济性提高了0.2%到5%。但ECMS控制性能严重依赖于等效因子的调节,且传统ECMS算法中,电池荷电状态(state of charge, SOC)的修正依赖于传统的惩罚函数机制。该方法通常将SOC稳定在某个区间内,导致SOC终值与目标SOC值偏离较多,从而无法有效规划SOC轨迹,且通过该方法修正后的等效因子并不能反映实际工况下的最优值。

综上所述,DP和ECMS各有其优势和局限性,如何有效结合DP和ECMS二者的优势从而设计高效的能量管理策略,成为本文研究的重点。因此,现首先对PGS-FHEP的主要部件进行设计和匹配,并针对加装该系统的飞轮混合动力汽车(flywheel hybrid electric vehicle, FHEV)进行模式划分。为了充分结合DP和ECMS的优势,在ECMS基础上引入DP控制策略下的最优SOC轨迹,实时调整等效因子,不断优化ICE和控制电机的转矩分配,进而搭建自适应等效能耗最小控制策略(adaptive equivalent consumption minimization strategy, A-ECMS)。

1 系统的结构和工作模式

1.1 PGS-FHEP 结构

如图1所示,PGS-FHEP主要由ICE、控制电机、电池、PGS、储能飞轮和飞轮制动器等组成。该系统中作为主动力源的ICE与行星架相连,控制电机、储能飞轮通过减速齿轮分别与太阳轮、齿圈相连,三者动力通过PGS耦合并最终经行星架输出。

1.2 系统参数设计与匹配

根据最高车速、最大爬坡度和加速性能^[15],确定车辆最大输出功率为130 kW。随后,对其动力系统进行设计匹配,车辆及动力系统参数如表1所示。

需要设计的传动系统参数包括车辆主减速器传动比 i_0 、PGS的特征参数 k 、控制电机减速齿轮的速比 k_1 及储能飞轮减速齿轮的速比 k_2 。主要设计依据是使车辆总输出转矩满足设计指标中的加速和爬坡性能要求,且在极端速度下行驶时,ICE、控制电机以及储能飞轮的转速不超过前述各部件选型设计的最高限值。

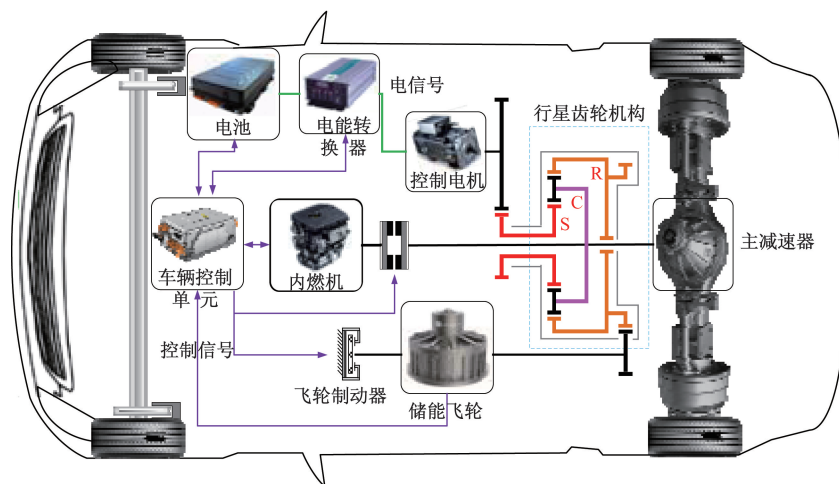


图1 PGS-FHEP结构

Fig. 1 Structure of PGS-FHEP

表1 车辆及动力系统参数

Table 1 Vehicle and powertrain specifications

项目	参数	数值
车辆	整备质量/kg	1 670
	满载质量/kg	3 490
	迎风面积/m ²	2.061
	风阻系数	0.4
	轮胎半径/m	0.324
	滚阻系数	0.01
	传动效率	0.9
ICE	额定功率/kW	83
	最大转矩/(N·m)	147
	额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000
控制电机	额定功率/kW	83
	额定转矩/Nm	255
	最高转速/(r·min ⁻¹)	7 000
	过载系数	1.75
电池	电池额定电压/V	310
	电池额定容量/Ah	30
储能飞轮	转动惯量/(kg·m ²)	0.14
	最高转速/(r·min ⁻¹)	20 000

(1)最大驱动转矩要求。车辆进行爬坡性能测试时,ICE 和控制电机以相应车速下的最大输出转矩驱动车辆。根据 PGS 的传动特性可知,ICE、控制电机的耦合转矩输出需满足以下要求。

$$[T_{ICE_max} + k_1(k+1)T_{MG_max}]i_0\eta_i \geq \left[mg(f\cos\alpha + \sin\alpha) + \frac{C_d A_f v_\alpha^2}{21.15} \right] \gamma_w \quad (1)$$

式中: T_{ICE_max} 和 T_{MG_max} 分别为ICE 和控制电机的最大输出转矩,N·m; k_1 为控制电机减速齿轮的速比; k 为 PGS 的特征参数; i_0 为车辆主减速器传动比; η_i 为车辆传动效率; m 为车辆质量,kg; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; f 为滚阻系数; α 约为对应的坡度角取 16.7° ; C_d 为风阻系数; A_f 为车辆头部迎风面积,m²;

v_α 为车辆在相应坡度的道路上稳定爬坡时的最大车速,取 15 km/h ; γ_w 为车轮半径,m。

(2)最高转速要求。车辆以最高车速行驶时,ICE 和控制电机不能超出其转速范围工作,因此需满足以下要求,即

$$\begin{cases} \frac{n_{ICE_max}}{60} \geq \frac{v_{max} i_0}{3.6 \times 2\pi\gamma_w} \\ \frac{n_{MG_max}}{60 k_1(k+1)} \geq \frac{v_{max} i_0}{3.6 \times 2\pi\gamma_w} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_{ICE_max} 和 n_{MG_max} 分别为ICE 和控制电机的最高转速,r/min。

车辆经再生制动停车后,假设储能飞轮因吸收能量达到最高转速,为了保证下一次起步时控制电机能调节飞轮输出能量,二者应满足以下转速关系,即

$$\frac{n_{MG_max}}{k_1} \geq k k_2 n_{FW_max} \quad (3)$$

式中: n_{FW_max} 为储能飞轮的最高转速,r/min。

综上,传动系统参数为: $i_0 = 6.9$, $k = 2.8$, $k_1 = 0.326$, $k_2 = 0.22$ 。

1.3 FHEV 工作模式划分

根据驾驶条件和驾驶员意图,FHEV 的工作模式可划分为以下6种。

(1)电机单独驱动模式(pure electric driving, ED):离合器分离,ICE 处于停机状态,电能经控制电机转化为机械能传递到 PGS 用于驱动车辆行驶。此外,若储能飞轮具有较高初始速度,车辆再次起动的初始阶段由储能飞轮提供动力,此时控制电机输出正转矩,开始反向减速,工作在发电模式,将储能飞轮的部分动能转化成电能储存进电池,利用储能飞轮驱动车辆可提高系统能量效率,如图2(b)所示。

(2) ICE 单独驱动模式 (fuel powered driving, FD): 仅由 ICE 提供动力, 控制电机随车速空转, 飞轮转速受空气、轴承摩擦等因素的影响而逐渐降低。

(3) 混合驱动模式 (electricity-fuel powered driving, EFD): ICE 运行在经济区域, 控制电机根据车辆需求扭矩进行功率补偿。此外, 若飞轮具有初始速度, 则三者动力经 PGS 耦合共同驱动车辆行驶, 如图 2(b) 所示。

(4) 行车充电模式 (charging during driving, CD): 离合器开启, ICE 运行在经济区域, 控制电机以发电模式运行, 将 ICE 的部分溢出功率转化为电能储存于电池中, 提升电池 SOC, 另一部分则以机械能形式储存于飞轮中。

(5) 再生制动模式 (regenerative braking, RB): 离合器分离, ICE 处于停机状态, 控制电机以发电模式运行, 车辆回收的部分动能转化为电能储存于电池中, 其余部分在控制电机调节下直接以机械能形式储存于储能飞轮中。若车辆发生紧急制动, 车辆以机械制动模式运行。

(6) 停车模式 (parking, P): 离合器分离, ICE 停止运行, 飞轮储存的机械能经 PGS 传递至电池, 并以电化学能形式长期储存于电池中。

2 控制策略设计

FHEV 的能量最终来源是燃油和电能, 能量流动关系如图 3 所示。当 FHEV 的需求能量确定时, 根据控制策略可通过分配不同的燃油和电能以达到驾驶员的动力需求。

如图 4(a) 所示, 基于全局优化的能量管理策略, 在约束条件下利用最优控制理论, 将综合能耗最小作为优化目标, 可获得任意时刻下各变量的最优解序列。其中, 电池 SOC 轨迹变化实质上是电池电量的变化。通过分析实际 SOC 轨迹, 可得到电能的使用情况, 进而分析得出任意时刻 ICE 和控制电机的转矩分配。同理如图 4(b) 所示, 若已知某个工况下的最优 SOC 轨迹, 如能使电池实际 SOC 轨迹沿着最优 SOC 轨迹变化, 则可实现 ICE 和控制电机间的最佳转矩分配, 确保车辆在该工况下以最低的综合能耗运行。

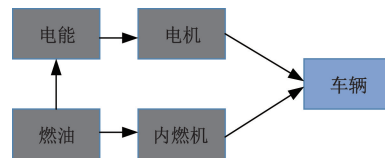


图 3 FHEV 能量关系

Fig. 3 FHEV energy relationship

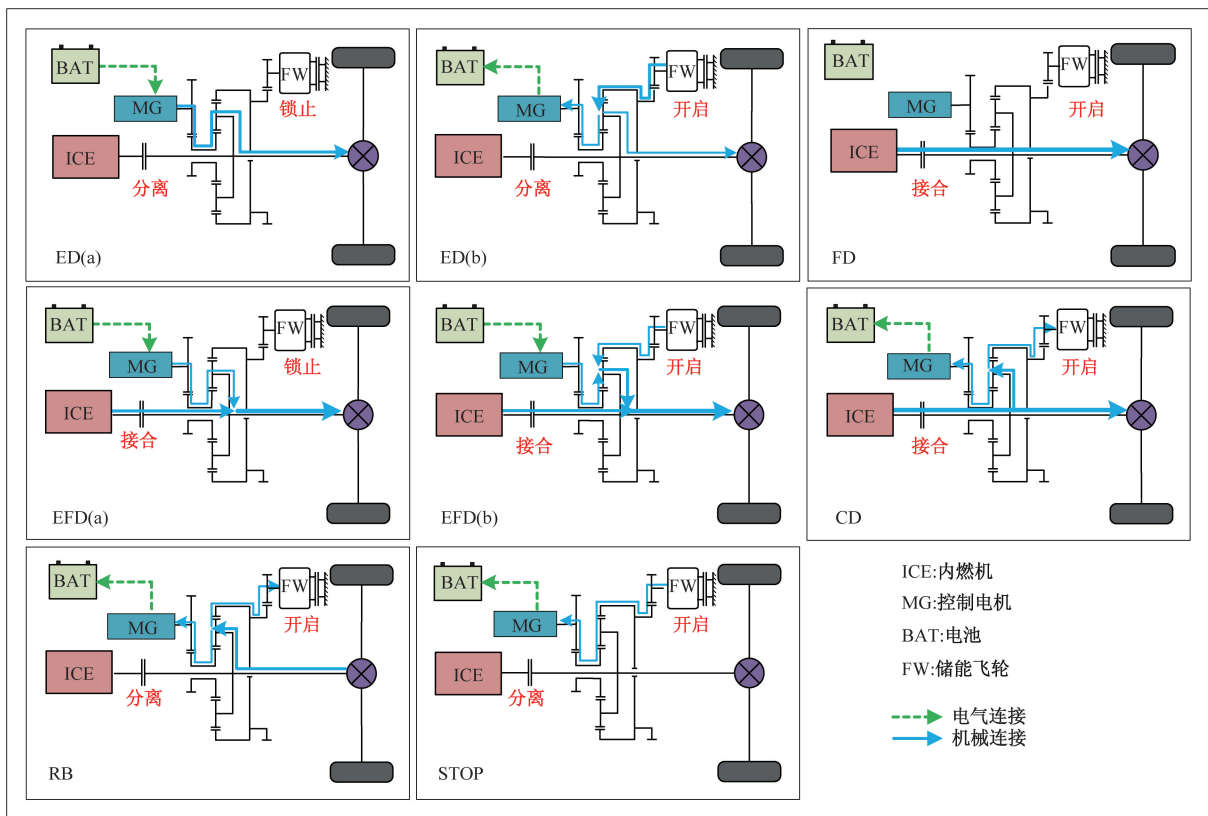


图 2 车辆工作模式

Fig. 2 Vehicle operating mode

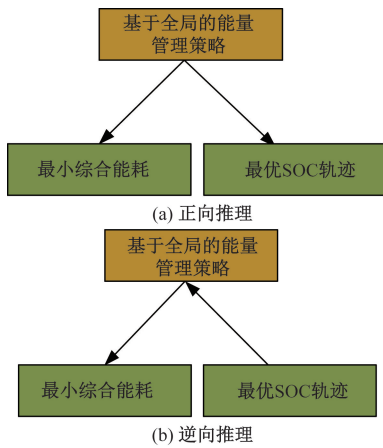


图4 控制策略逻辑推理

Fig. 4 Logical reasoning of control strategy

2.1 DP 控制策略

DP 是一种用于解决多级决策过程优化问题的全局最优数学算法,能够为不同问题提供最佳的解决方案^[16]。在利用 DP 求解复杂的多级决策问题时,通常需要将问题划分为 N 个子阶段,每个子阶段都使用 M 个状态变量来描述系统的状态。通过引入控制变量,可实现从一个状态到另一个状态的转移。求解过程中,DP 通常采用逆向求解的方法,对每个状态的控制变量进行求解,随后通过正向寻优搜索整个循环周期内的实现最小成本的控制序列,如图 5 所示。

运行 DP 控制策略时,首先利用车辆模型计算出车辆在当前时刻的需求扭矩。随后,该策略会根据车辆的需求扭矩寻求在整个行驶过程中最佳的扭矩分配。在此过程中,以 ICE 转矩 $T_m(k)$ 为控制变量,电池 SOC 为状态变量,保证 SOC 值稳定在 $[0.5, 0.7]$ 范围内,求得使车辆能耗最小时的 SOC 序列。电池 SOC 状态转移方程为

$$SOC_{k+1} = \begin{cases} SOC_k - \frac{I_b \Delta t}{3 \cdot 600 C \eta_{dis}}, & I_b > 0 \\ SOC_k - \frac{I_b \Delta t \eta_{char}}{3 \cdot 600 C}, & I_b < 0 \end{cases} \quad (4)$$

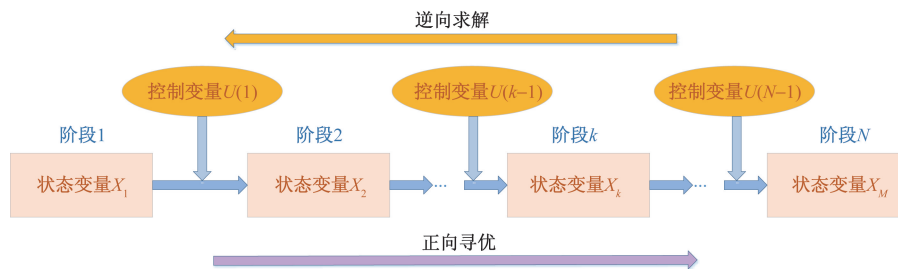


图5 DP 算法流程

Fig. 5 Flowchart of DP algorithm

式(4)中: I_b 为电池组电流,A; C 为电池容量,Ah。

优化目标函数为

$$L[SOC(k), T_{ICE}(k)] = \frac{[f_{ICE}(k) + f_B(k) + f_{FW}(k)]}{FC_{equ}} \quad (5)$$

式(5)中: $f_{ICE}(k)$ 、 $f_B(k)$ 和 $f_{FW}(k)$ 分别为单个步长下 ICE,控制电机和储能飞轮的能量消耗,g; FC_{equ} 为总能量消耗,g。

利用 DP 控制策略求解中国轻型商用车行驶工况 (China light-duty commercial vehicle test cycle, CLTC-C) 工况下最优的电池 SOC 序列如图 6 所示。

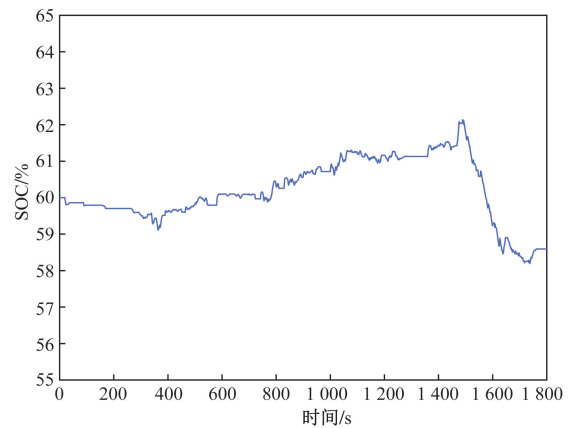


图6 最优 SOC 序列

Fig. 6 Optimal SOC sequence

2.2 A-ECMS 控制策略

2.2.1 ECMS 工作原理

ECMS 是一种瞬时控制策略,其利用等效因子将电耗等效为油耗,并将两者相加作为 ECMS 的综合能耗指标。根据车辆的瞬时工作状态,计算出瞬时时刻车辆的需求扭矩,通过不断调整 ICE 和控制电机的转矩配比,来寻求最低的综合能耗。

混合动力汽车的综合能耗表示为

$$m_{feqv}(t) = m_f(t) + \frac{s(t)}{Q_{lhv}} P_{batt}(t) \quad (6)$$

式(6)中: $m_{feqv}(t)$ 为 ICE 瞬时等效油耗,g; $m_f(t)$ 为 ICE 瞬时油耗,g; $s(t)$ 为等效因子; Q_{lhv} 为燃油低热

值, J/g ; $P_{batt}(t)$ 为电池输出功率, W 。

2.2.2 等效因子选取

ECMS 能够实现实时优化,但其控制性能取决于等效因子的设定^[17]。CLTC-C 工况下等效因子 s 取不同值时,电池 SOC 轨迹变化如图 7 所示。以 $s=3.2$ 时的 SOC 轨迹为参考值,当 s 增加或降低 0.2 时, SOC 轨迹波动剧烈,说明电池 SOC 对等效因子较为敏感。如表 2 所示,不同等效因子下的综合能耗不同,且随等效因子增大,电耗逐渐降低,油耗逐渐升高,这是由于电能转换为燃油能量的代价增大,车辆更倾向于使用燃油来提供动力。

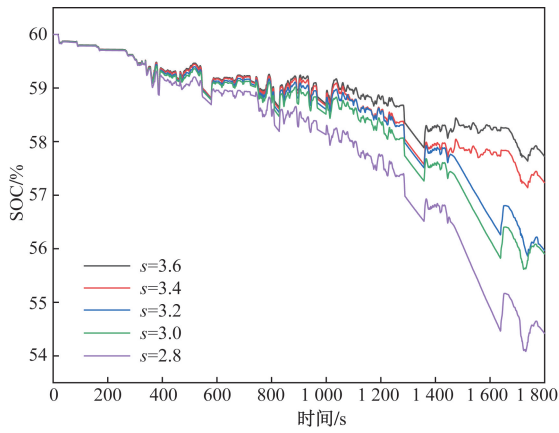


图 7 不同等效因子下的 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC curves under different equivalent factors

为了探寻该工况下的最优等效因子,本研究将遗传算法(genetic algorithm, GA)与 ECMS 结合构建离线等效因子全局优化模型。其中,将等效因子 s 和式(6)所示的瞬时综合油耗分别作为 GA 算法的优化参数和目标函数进行迭代寻优,将目标函数值最小工作点对应的参数 s 作为全局最优等效因子,计算流程如图 8 所示。同时,应满足以下约束条件,最终得到 CLTC-C 工况下的最优等效因子为 3.14。

$$\left. \begin{aligned} T_{ICE, \min} &\leq T_{ICE} \leq T_{ICE, \max} \\ n_{ICE, \min} &\leq n_{ICE} \leq n_{ICE, \max} \\ T_{MG, \min} &\leq T_{MG} \leq T_{MG, \max} \\ n_{MG, \min} &\leq n_{MG} \leq n_{MG, \max} \\ n_{FW, \min} &\leq n_{FW} \leq n_{FW, \max} \\ SOC_{\min} &\leq SOC \leq SOC_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中: SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为电池 SOC 的上限和下限。

表 2 不同等效因子下综合能耗对比

Table 2 Comparison of comprehensive energy consumption under different equivalent factors

s	2.8	3	3.2	3.4	3.6
油耗/g	841.68	813.93	831.44	902.91	912.54
电耗/(kW·h)	0.51	0.42	0.36	0.23	0.20
飞轮最终转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	19 288	19 693	19 682	19 686	19 678
综合油耗/ [$L \cdot (100 \text{ km})^{-1}$]	7.86	7.68	7.66	7.80	7.81

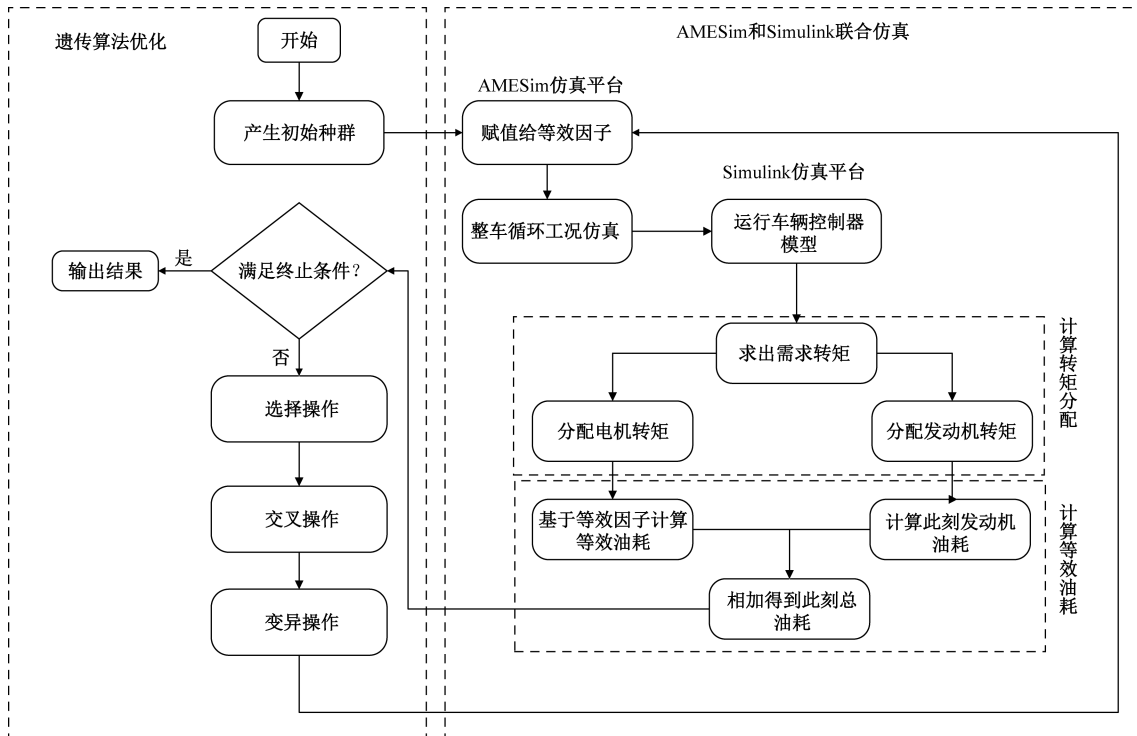
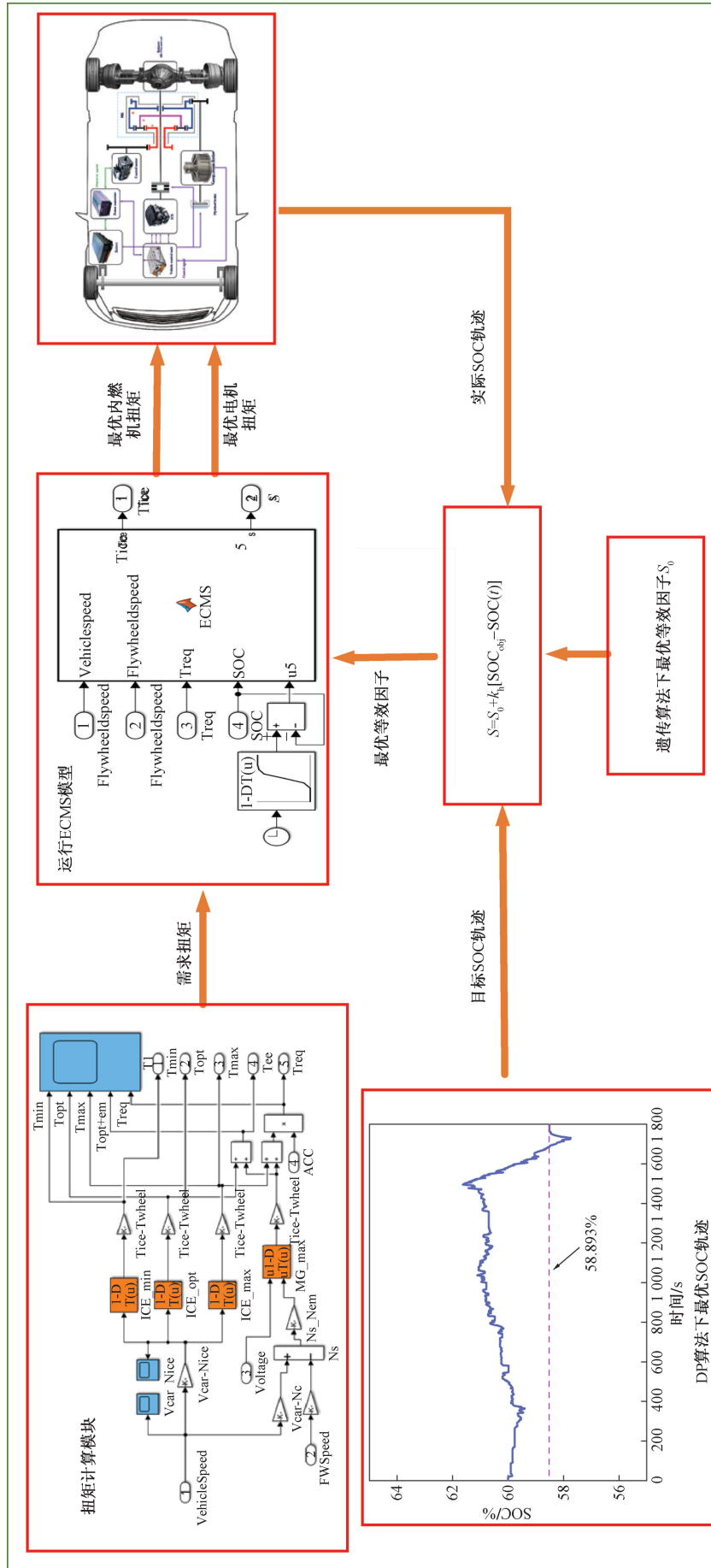


图 8 GA 算法流程

Fig. 8 Flowchart of genetic algorithm



S为等效因子; k_p 为比例系数; SOC为标SOC值; SOC(t)为每时刻SOC值

图9 控制策略流程图

Fig.9 Flowchart of control strategy

2.3 控制策略搭建

对于传统的混合动力汽车而言,通过合理选取等效因子,能够在各种工况下实现较好的燃油经济性,并确保车辆始末 SOC 值维持稳定。由于传统的惩罚函数机制仅是将 SOC 稳定在某个范围,无法精确规划 SOC 轨迹,导致控制电机大部分时间无法运行在其最优工作区域。所以,本文研究以电池 SOC 稳定为约束条件,利用 DP 控制策略求解出最低综合油耗下的电池 SOC 变化曲线,并将其作为目标 SOC 轨迹对 ECMS 控制策略进行优化,从而搭建了 A-ECMS 控制策略,修正后的等效燃油因子为

$$s = s_0 + K_h [\text{SOC}_{\text{obj}} - \text{SOC}(t)] \quad (8)$$

式(8)中: s_0 为初始最优等效因子; k_h 为惩罚函数系数; SOC_{obj} 为目标 SOC 轨迹; $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻的 SOC 值。

3 仿真测试及结果分析

为充分对比三种控制策略下 FHEV 的综合能耗、SOC 轨迹变化、ICE 和控制电机工况点分布,在 CLTC-C 工况下进行了仿真分析。

首先在 CLTC-C 工况下验证了 A-ECMS 的有效性和 PGS-FHEP 的动态特性。如图 10(a) 所示, FHEV 的实际车速能较为稳定地跟随期望速度曲线。如图 10(b) 所示,车速误差基本保持在 1 km/h 以内,表明该控制策略能满足其在给定工况下的行驶要求。PGS 中不同齿轮的转速情况如图 10(c) 所示,齿轮间的转速关系和运行规律符合其运动学特性。各主要部件的扭矩如图 10(d) 所示。从图 10 中看出, FHEV 在低速工况段运行时,由控制电机和飞轮提供动力, ICE 输出扭矩为 0。车辆在高速工况段运行时,文中提出的控制策略能较好地协调 ICE 和控制电机的转矩分配。上述结果表明,该控制策略具有合理性,并可保证 PGS-FHEP 的动态特性。

FHEV 在 CLTC-C 工况下分别采用三种控制策略行驶时, ICE 和控制电机的工况点分布情况分别如图 11 和图 12 所示。相较于传统 ECMS, A-ECMS 控制下的 ICE 工况点较为集中且更多分布在经济区域。同时,通过对实际 SOC 轨迹的控制,优化了电池的充放电策略,使控制电机大部分时间运行在最优工作区域。综合能耗如表 3 所示, A-ECMS 控制下 FHEV 的综合能耗较传统 ECMS 下降了 2.51%。

采用不同控制策略时,电池 SOC 的变化曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出, A-ECMS 控制策略下实际的 SOC 轨迹可较好地跟随最优 SOC 轨迹,与 DP 控制策略保持着相似的充放电特征,最终值为 58.163%,

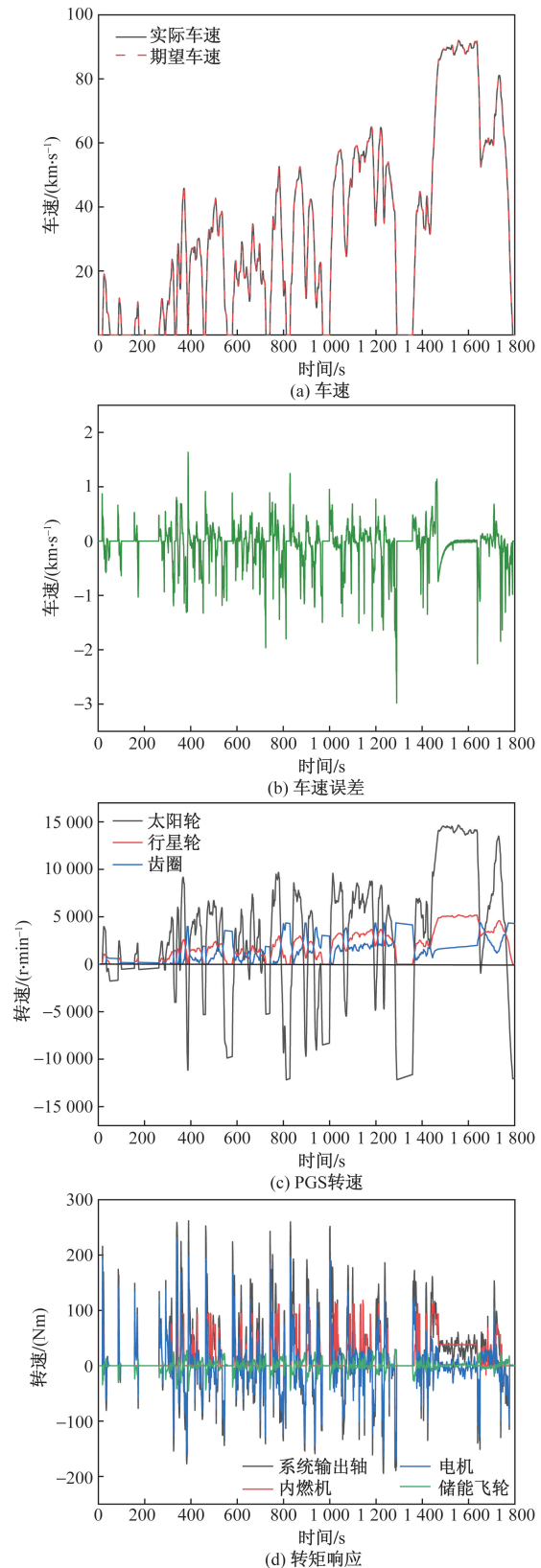


图 10 仿真结果

Fig. 10 Simulation results

接近 DP 控制策略下的 58.593%。同时,相较于传统 ECMS, 电池 SOC 轨迹变化幅度更小,更加稳定。

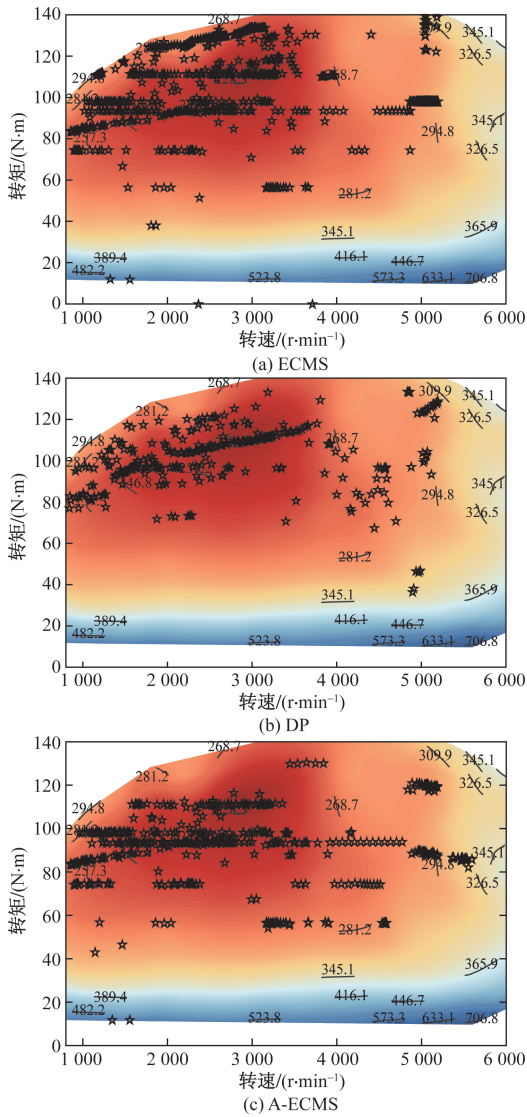


图 11 ICE 工况点分布

Fig. 11 Distribution of ICE operating points

表 3 能量消耗对比

Table 3 Comparison of energy consumption

参数	ECMS	DP	A-ECMS
油耗/g	821.44	842.44	869.62
电耗/(kW·h)	0.34	0.12	0.13
飞轮最终转速/(r·min ⁻¹)	19 280.4	19 703.3	19 693.3
综合油耗/[L·(100 km) ⁻¹]	7.56	7.08	7.37

飞轮转速随车速的变化规律和不同循环下的制动能量回收比例分别如图 14 和图 15 所示。CLTC 和淄博工况 (Zibo test cycle, ZBTC) 下, FHEV 的总制动能量分别为 5 708.41 kJ 和 4 635.05 kJ, 总回收率分别为 57.72% 和 70.14%, FW 以机械能形式直接回收的制动能量比例分别为 23.64% 和 55.62%。从以上结果可看出, 在启停工况较多的 ZBTC 工况下, FHEV 的动能回收效果更好, 说明其

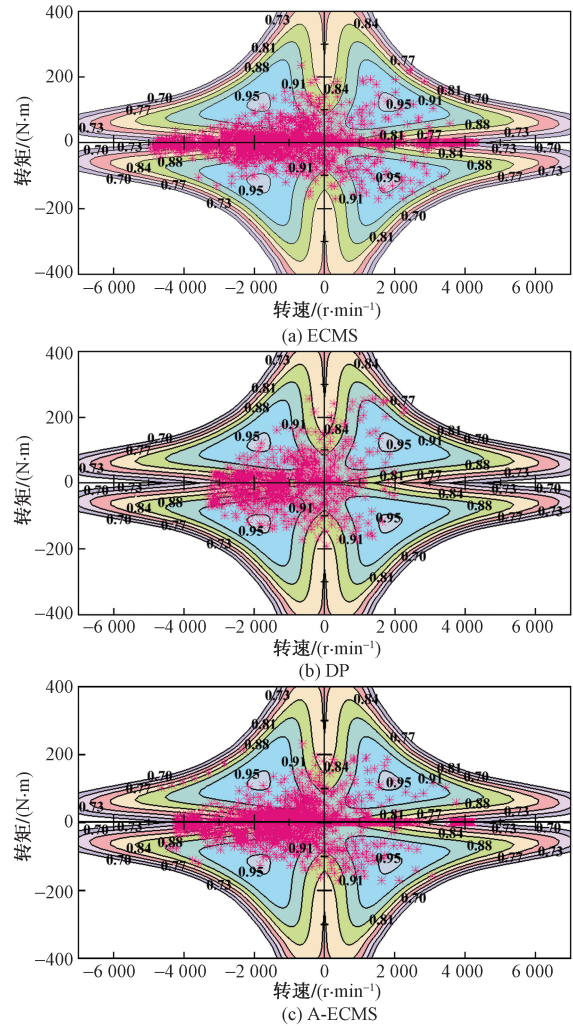


图 12 控制电机工况点分布

Fig. 12 Distribution of control MG operating points

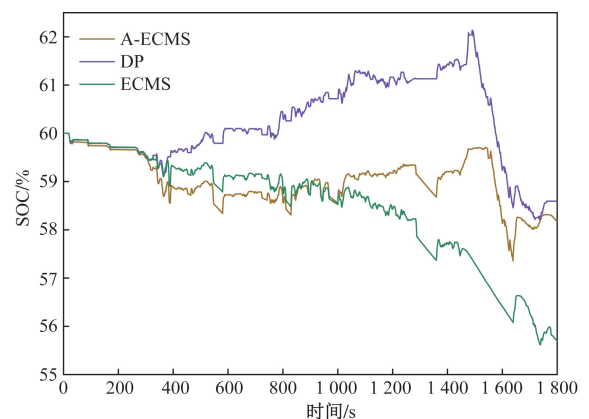


图 13 SOC 曲线

Fig. 13 SOC curve

适用于交通拥挤的城市路况。

此外, 分析了飞轮开关对电池功率的影响。如图 16 所示, 飞轮开启时可回收部分车辆制动能, 电池的峰值功率降低, 有利于延长其使用寿命。

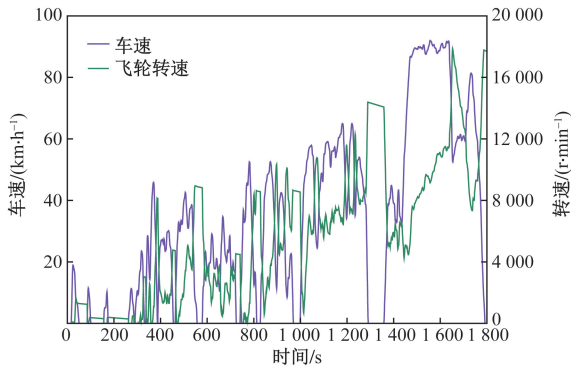


图 14 飞轮转速
Fig. 14 Flywheel speed

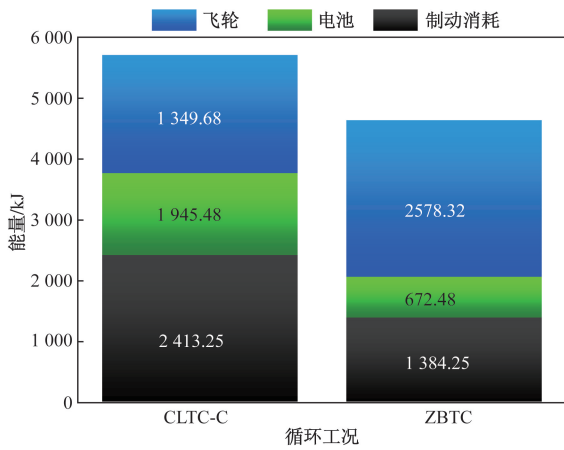


图 15 能量回收比例
Fig. 15 Energy recovery ratio

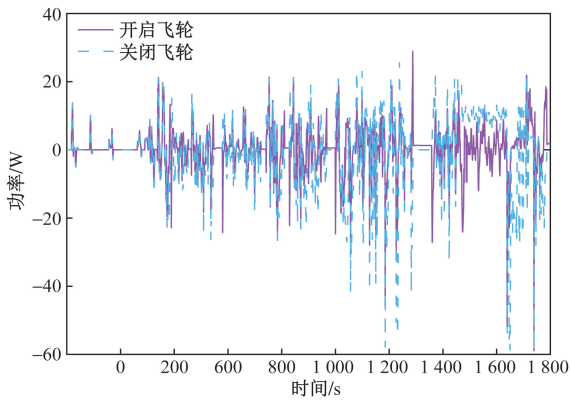


图 16 电池功率
Fig. 16 Battery power

4 结论

以一款搭载 PGS-FHEP 的 FHEV 为研究对象,首先对 PGS-FHEP 的主要部件进行了设计和匹配,分析了其工作模式及动态特性。其次,在 CLTC-C 工况下验证了 A-ECMS 的可行性。得出如下结论。

(1)与传统 ECMS 相比,A-ECMS 中 ICE 和控制电机运行工况点均得到优化,综合能耗更接近于 DP

控制策略,且克服了 DP 控制策略难以实时应用、计算量大的局限性。

(2)通过实时调整等效因子可精确规划电池实际 SOC 轨迹,使其与最优 SOC 轨迹保持相似的变化趋势。与传统 ECMS 相比,ICE 和控制电机的转矩分配得到优化,使实际 SOC 轨迹变化幅度更小,更加稳定,且飞轮开启时电池的峰值功率降低,可延长其使用寿命。

(3)CLTC-C 和 ZBTC 工况下,储能飞轮直接以机械能形式回收的制动能量比例分别为 23.64% 和 55.62%,有效提升了系统能量转化效率。

参 考 文 献

- [1] 韦福敏,刘鑫,许恩永,等. 基于速度预测与自适应差分进化算法的混合动力汽车能量管理策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10726-10736.
Wei Fumin, Liu Xin, Xu Enyong, et al. Energy management strategy for hybrid electric vehicles based on speed prediction and adaptive differential evolution algorithm[J]. ScienceTechnology and Engineering, 2022, 22(24): 10726-10736.
- [2] Manivannan R. Research on IoT-based hybrid electrical vehicles energy management systems using machine learning-based algorithm [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2024, 41. DOI: 10.1016/J. SUSCOM. 2023. 10094.
- [3] Wu G, Zhang X, Dong Z. Powertrain architectures of electrified vehicles: review, classification and comparison [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(2): 425-448.
- [4] 李红,储江伟,孙术发,等. 车用飞轮混合动力系统的应用进展[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 534-543.
Li Hong, Chu Jiangwei, Sun Shufa, et al. Application progress of flywheel hybrid powertrain in vehicle [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 534-543.
- [5] Zhang X, Chu J, Li H, et al. Key technologies of flywheel energy storage systems and current development status [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(1): 55-60.
- [6] 邢恩辉,王培振,尚鑫波,等. 电动汽车制动能量回馈技术 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(25): 116-127.
Xing Enhui, Wang Peizhen, Shang Xinbo, et al. Regenerative braking technology for electric vehicle [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(25): 116-127.
- [7] Shen S, Veldpaus F. Analysis and control of a flywheel hybrid vehicular powertrain [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(5): 645-660.
- [8] Song C, Kum D, Kim K. Feasibility analysis and performance evaluation of a novel power-split flywheel hybrid vehicle [J]. Energies, 2018, 11(7): 1-25.
- [9] Diego-Ayala U, Martinez-Gonzalez P, Mcglashan N, et al. The mechanical hybrid vehicle: an investigation of a flywheel-based vehicular regenerative energy capture system [J]. Drive System Technique, 2011, 222(11): 2087-2101.
- [10] Zhang Z, Yang B, Zhang Y, et al. Powertrain modeling and performance simulation of a novel flywheel hybrid electric vehicle [J]. Energy Reports, 2023, 9: 4401-4412.

- [11] 周奇勋, 曹世宏, 季新杰. ISG 混合动力汽车控制规则优化与转矩分配策略研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 751-756.
Zhou Qixun, Cao Shihong, Ji Xinjie. A research on the control rules optimization and torque distribution strategy for ISG hybrid electricvehicles[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(7): 751-756.
- [12] 张静, 于浩. 基于等效燃油消耗最小算法的并联式混合动力卡车控制策略[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 302-308.
Zhang Jing, Yu Hao. Control strategy of parallel hybrid electric vehicle based on ECMS algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 302-308.
- [13] Paganelli G, Delprat S, Guerra T, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains[J]. IEEE, 2002, 4: 2076-2081.
- [14] Zhang F, Xi J, Langari R. Real-time energy management strategy based on velocity forecasts using V2V and V2I communications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(2): 416-430.
- [15] 叶心, 张腾, 卢金涛, 等. 基于多目标遗传算法的混合动力汽车能量管理优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9389-9397.
Ye Xin, Zhang Teng, Lu Jintao, et al. Optimization of hybrid electric vehicle energy management based on multi-objective genetic algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9389-9397.
- [16] Peng J, Shen Y, Wu C, et al. Research on energy-saving driving control of hydrogen fuel bus based on deep reinforcement learning in freeway ramp weaving area[J]. Energy, 2023, 285: 129449.
- [17] 王志勇, 韩善灵, 张鑫, 等. 插电式混合动力汽车能量管理策略发展综述[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(12): 8-15.
Wang Zhiyong, Han Shanling, Zhang Xin, et al. A review of power management strategy for plug in hybrid electricvehicles[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(12): 8-15.