混合动力汽车模式切换的冲击影响与控制*

郭琼[1] 彭宇明[1,2] 谌帆[1]

（1.西南交通大学汽车与能源动力研究所，成都 610000；2.先进驱动节能技术教育部工程研究中心，成都 610000）

【摘要】为探究离合器控制策略和能量管理策略对混合动力汽车行驶过程中模式切换造成的冲击问题，选取典型的P2+双离合器变速器（DCT）构型作为研究对象，通过MATLAB/Simulink和AVL Cruise M联合仿真平台设计了离合器模糊控制策略和模式切换主动优化控制策略，研究结果表明：采用离合器模糊控制策略的整车模型在保证良好的动力性的同时，能够实现更佳的驾驶平顺性；模式切换主动优化控制策略在将模式切换次数降低25.66%的情况下，等效燃油消耗量仅比基于规则的能量管理策略轻微增加0.97%，在满足动力性需求的前提下兼顾了平顺性和经济性。

关键词：混合动力系统 能量管理策略 模式切换 冲击 离合器

中图分类号：U469.72 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250232

The Impact and Control of Mode Switching in Hybrid Vehicles

Guo Qiong[1], Peng Yuming[1,2], Chen Fan[1]

(1. Institute of Automotive and Energy Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000; 2. Engineering Research Center of Advanced Driving Energy-Saving Technology Ministry of Education, Chengdu 610000)

【Abstract】To investigate the jerk issue caused by mode transitions in hybrid electric vehicles under different clutch control and energy management strategies, a typical P2+Dual-Clutch Transmission (DCT) architecture is selected as the research object. A clutch fuzzy control strategy and an active mode transition optimization control strategy are designed based on the MATLAB/Simulink and AVL Cruise M co-simulation platform. The results indicate that the vehicle model utilizing the clutch fuzzy control strategy achieves superior driving smoothness while maintaining excellent dynamic performance. Furthermore, the active mode transition optimization strategy reduces the mode switching frequency by 25.66%, with only a marginal 0.97% increase in equivalent fuel consumption compared to the conventional rule-based energy management strategy. This approach successfully balances driving smoothness and fuel economy while meeting the dynamic performance requirements.

Key words: Hybrid power system, Energy management strategy, Mode switch, Impact, Clutch

【引用格式】郭琼, 彭宇明, 谌帆. 混合动力汽车模式切换的冲击影响与控制[J]. 汽车工程师, 2026(6): 43-48.

GUO Q, PENG Y M, CHEN F. The Impact and Control of Mode Switching in Hybrid Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2026(6): 43-48.

1 前言

混合动力汽车具有多个动力源，不同动力源的搭配形成多种工作模式。模式切换过程中涉及发动机起停、离合器接合断开以及电机转矩响应等，尤其是工况复杂多变时，车辆模式的切换频率明显提高，从而引起汽车的冲击，影响动力输出稳定性、乘坐舒适性和零部件的寿命[1]。因此，对混合动力

*基金项目：四川省自然科学基金面上项目（2023NSFSC0395）。

通信作者：彭宇明（1970—），男，副教授，主要研究方向为车辆及部件系统性能及优化、新能源与混和动力控制技术，cdmikepeng@swjtu.cn。

汽车模式切换过程的冲击影响研究具有一定的理论意义和工程应用价值。

在离合器控制方面,文献[2]~文献[6]通过离合器分合速度调整、离合器接合油压控制方法设计、电动机和离合器接合油压协调控制来降低混合动力汽车的冲击度。

在能量管理策略方面,文献[7]~文献[9]通过制定离合器和电机转矩协调控制策略或者确定发动机、电机、离合器三者间的最优转矩并配置PID控制器来降低混合动力汽车的冲击度。文献[10]设计了驱动和制动工况下的全局最优模式切换策略。文献[11]设计了模式切换抑制函数,开发了考虑模式切换频次的动态规划算法。文献[12]提出了一种面向模式切换过程的混合动力汽车协调控制策略。文献[13]通过研究混合动力汽车各部件间的速比关系,计算各驱动模式的传递效率并得到平衡曲线,优化了串并联模式的切换时机。文献[14]分别设计了双电机协同控制和双电机与制动器协同控制两类模式切换控制策略。

以上研究大多专注于降低车辆的冲击度影响、提高平顺性,但未兼顾平顺性和经济性。本文通过设计离合器模糊控制策略和模式主动切换优化控制策略研究混合动力汽车行驶时由模式切换带来的冲击问题,在保证基本动力需求的前提下兼顾平顺性与经济性。

2 混合动力汽车模式切换冲击度响应

为了研究混合动力汽车模式切换的冲击度响应,本文选择应用较多且模式切换频繁的P2+双离合器变速器(Dual-Clutch Transmission,DCT)构型车辆作为研究对象,选用AVL Cruise M软件搭建P2同轴并联混合动力汽车的仿真模型,整车关键部件参数如表1所示,在Simulink中搭建基于规则的能量管理策略,主要以动力电池的荷电状态(State of Charge,SOC)和需求转矩作为逻辑门限参数,具体模式划分阈值参考文献[8]。该策略以经济性作为主要考虑因素,模式切换频繁,其冲击响应如图1所示,其中,模式0~模式6分别表示停车待机模式、纯电驱动模式、行车充电模式、发动机直驱模式、混动模式、制动能量回收模式、动态切换过渡模式。同时,本文将全球统一轻型车辆测试循环(World Light Vehicle Test Cycle,WLTC)工况划分为6个速度时段,如图2所示。

表1 整车关键部件参数

参数	取值
整车质量/kg	2 150
发动机排量/L	1.5
发动机最大功率/kW	125
发动机最大扭矩/N·m	255
P2电机额定功率/kW	80
P2电机峰值功率/kW	160
P2电机额定转矩/N·m	160
P2电机峰值转矩/N·m	320

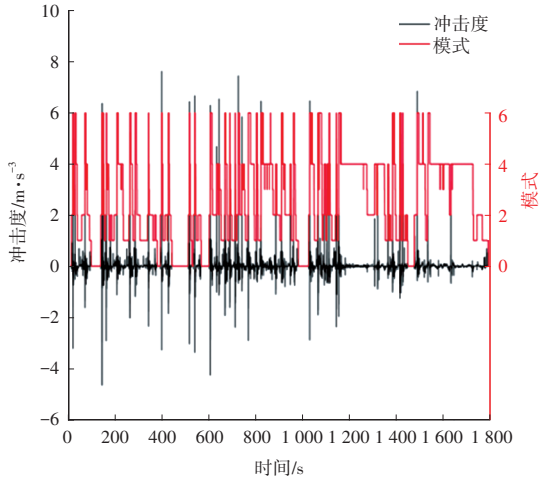


图1 基于规则的能量管理策略的冲击度响应

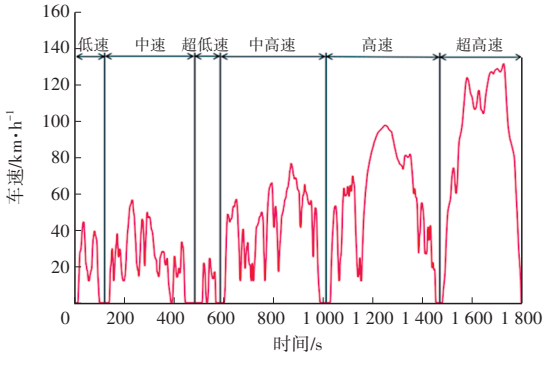


图2 WLTC工况划分

整车冲击度反映整车纵向加速度的变化率,较小的冲击度表示混合动力模式切换更为平顺,对驾驶员和传动系统的冲击也较小,从而有利于提升驾驶体验。最大冲击度可被人体最直观地感受到,但其并不能准确表示驾驶平顺性,故本文提出采用冲击度均方根(Root Mean Square,RMS)评估整体冲击能量的大小和密集程度,准确衡量一组冲击度数据的离散程度,从而正确评估具体工况下的平顺性。提取车辆在WLTC工况6个时段的最大冲击度、模式切换频次以及冲击度RMS,如表2所示。

表2　基于规则的能量管理策略各速度时段的冲击度数据

时段	最大冲击度/m·s^{-3}	模式切换频次/次	冲击度RMS/m·s^{-3}
低速	5.487	19	0.387
中速	7.634	54	0.381
超低速	6.674	15	0.478
中高速	7.457	92	0.397
高速	6.474	90	0.301
超高速	6.859	34	0.150

车辆在WLTC工况不同时段的冲击度表现出多样化的响应,表明在车辆运行过程中,不同的工况和工作模式会导致不同程度的冲击,频繁的模式切换会带来冲击问题。各时段的最大冲击度基本处于5~8 m/s^{3}范围内,可被乘员明显感知。其中,最大冲击度所处的时段为中速时段,但是冲击度RMS的最大值出现在超低速时段,同样印证了最大冲击度并不能准确评估平顺性。

3　离合器模糊控制策略

离合器的接合过程大致可分为完全分离、滑摩和完全接合3个阶段。本文离合器的基本控制策略为:空行程阶段,离合器主、从动盘快速接合,相互靠近,尽量缩短接合时间;在空行程阶段结束,开始进入滑摩阶段时,离合器主、从动盘转速差较大,为了减小冲击,接合应较为缓慢;随着滑摩过程的进行,离合器主、从动盘转速逐渐接近,此时应该加快离合器接合速度。

由于离合器接合过程具有很强的非线性,无法采用精确的数学模型表述,而模糊控制不需要为研究对象建立精确数学模型,是一种采取经验化和模糊化规则的控制方式,适用于本文的离合器控制。离合器模糊控制器采用两输入(离合器主、从动盘转速差e及其变化率e_c)、单输出(离合器接合行程变化量L)实现对离合器接合过程的控制。获得输入变量的精确值后归一化处理,分别乘以各自的量化因子实现模糊化,离合器主、从动盘转速差的基本论域设为[0,4 775],转速差变化率的基本论域设为[0,995],两者的模糊论域为[0,1],模糊语言为{非常小,小,中,大,很大},对应的模糊子集为{VS,S,M,B,VB},模糊语言值的隶属度函数选择高斯函数:

$$f(x,\sigma,k)=e^{-\frac{(x-k)^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

式中:σ、k分别为正态分布的标准偏差、均值。

输出量为离合器单位时间的位移变化量,基本论域和模糊论域均为[0,1],模糊语言为{非常小,小,较小,中,较大,大,很大},对应模糊子集为{VS,S,MS,M,MB,B,VB},模糊语言值的隶属度函数选择梯形函数。梯形隶属度函数定义域由变量x确定:

$$f(x,a,b,c,d)=\begin{cases}0, & x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a\leqslant x\leqslant b\\ \dfrac{d-x}{d-c}, & c\leqslant x\leqslant d\\ 0, & x>d\end{cases} \tag{2}$$

式中:a、d为梯形下部的左、右拐点,b、c为梯形上部的左、右拐点。

可得模糊控制规则如表3所示。

表3　离合器行程变化控制规则

L		e				
		VS	S	M	B	VB
e_c	VS	M	S	VS	S	M
	S	MB	MS	S	MS	S
	M	MB	M	MS	M	M
	B	B	MB	MS	MB	B
	VB	VB	B	M	B	VB

为准确反映整车的动力性,提取实际转矩与需求转矩进行对比,如图3所示。模糊控制策略冲击度与模式切换情况如图4所示。

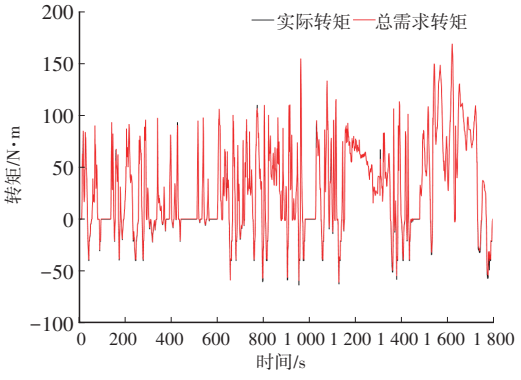


图3　采用模糊控制策略时实际转矩与需求转矩

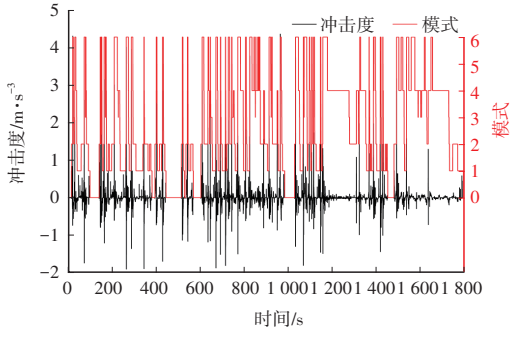


图4　采用模糊控制策略时冲击度与模式切换情况

由图3可知,整车需求转矩与实际转矩呈现出较高的一致性,验证了整车模型和模糊控制策略的合理性。对比离合器正常接合和采用模糊控制策略时的最大冲击度、模式切换频次以及冲击度RMS,如表4所示。

表4　离合器正常接合与采用模糊控制策略时各速度时段的冲击度数据

时段	正常离合器接合			离合器模糊控制策略		
	最大冲击度/m·s^{-3}	模式切换频次/次	冲击度RMS/m·s^{-3}	最大冲击度/m·s^{-3}	模式切换频次/次	冲击度RMS/m·s^{-3}
低速	5.487	19	0.387	4.312	14	0.337
中速	7.634	54	0.381	4.040	52	0.335
超低速	6.674	15	0.478	3.737	14	0.407
中高速	7.457	92	0.397	4.366	88	0.332
高速	6.474	90	0.301	3.910	81	0.270
超高速	6.859	34	0.150	3.183	31	0.131

由表4可知,采用模糊控制策略时,6个速度时段的冲击度RMS降低10%~20%,最大冲击度降低20%~60%,同时模式切换频次均得到了不同程度的降低。

4　模式切换主动优化控制策略

模式切换主动优化控制策略在保证动力需求的前提下,综合平衡燃油经济性和平顺性,以减少不必要的模式切换,特别是避免冲击度较大的切换过程。具体而言,在制动能量回收模式下按正常逻辑切换;在纯电驱动模式下,若预判模式切换带来的冲击度超过人体敏感阈值(5 m/s^3)且当前动力仍可满足需求,则保持现有模式不切换,否则切换至有发动机参与的模式;在发动机已参与工作的模式下,切换判断原则与纯电驱动模式一致。提取出整车车速对比情况如图5所示,主动优化控制策略的冲击响应如图6所示。

由图5可以看出,车速表现出良好的跟随性,表明主动优化控制策略可满足基本动力需求。由图6整理得到2种控制策略6个速度时段的冲击度数据,如表5所示。

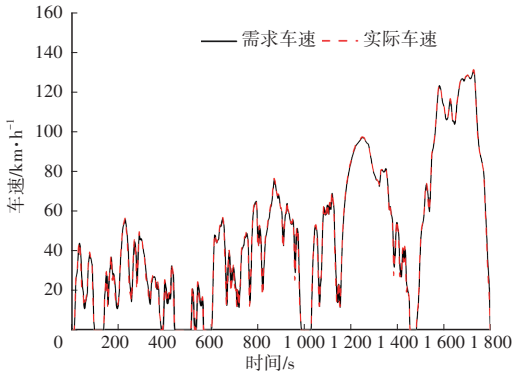


图5　采用主动优化控制策略时的车速对比曲线

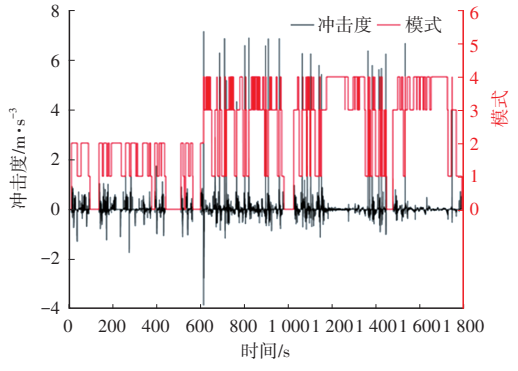


图6　采用主动优化控制策略时的冲击度与模式切换过程

表5　采用2种控制策略时的冲击度对比

时段	基于规则的能量管理策略			主动优化控制策略		
	最大冲击度/m·s^{-3}	切换频次/次	冲击度RMS/m·s^{-3}	最大冲击度/m·s^{-3}	切换频次/次	冲击度RMS/m·s^{-3}
低速	5.487	19	0.387	−1.305	5	0.243 2
中速	7.634	54	0.381	2.200	26	0.225 6
超低速	6.674	15	0.478	−1.114	8	0.273 6
中高速	7.457	92	0.397	7.166	87	0.349 2
高速	6.474	90	0.301	6.386	71	0.286 4
超高速	6.859	34	0.150	6.487	29	0.139 3

由表5可知,相对于基于规则的能量管理策略,主动优化控制策略在减少了模式切换频次的同时,各速度时段的最大冲击度和冲击度RMS也不同程度降低。在主动优化策略中,低速、中速和超低速

时段的最大冲击度、模式切换频次及冲击度RMS降低幅度显著大于其他3个时段，这是因为在中低速工况下，主动优化控制策略更多地将车辆保持在纯电驱动模式，减少了非必要模式切换的频次，有效降低了中低速时段模式切换对冲击度的影响，同时降低了燃油消耗量。但是主动优化策略在高速时段的冲击度降低效果不如离合器模糊控制策略，离合器控制始终是平顺性优化的最重要环节。

进一步提取出主动优化控制策略的模式切换与油耗、电耗、SOC变化情况，如图7、图8所示。总结2种控制策略的综合等效燃油消耗量对比情况如表6所示。

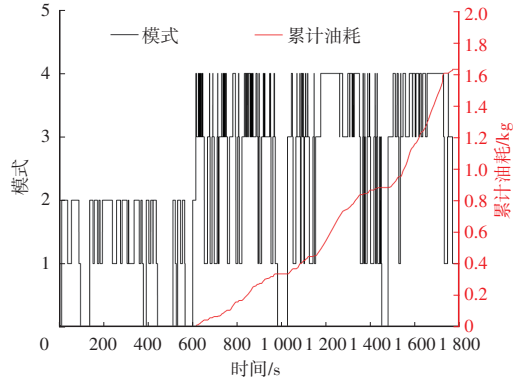


图7　采用主动优化控制策略时的模式切换和油耗情况

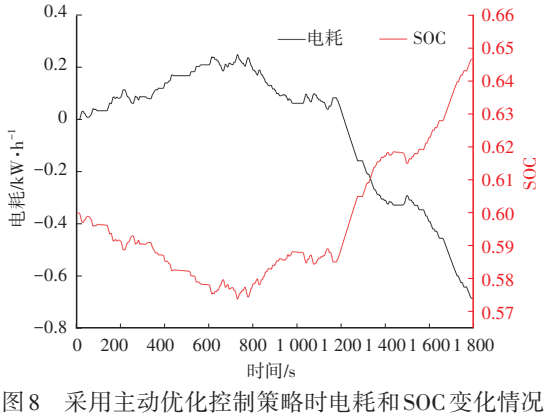


图8　采用主动优化控制策略时电耗和SOC变化情况

表6　2种控制策略的模式切换频次与等效燃油消耗量

策略	基于规则的能量管理策略	主动优化控制策略
切换频次/次	304	226
百公里燃油消耗量/L	9.373	9.396
百公里电消耗量/kW·h	−3.111	−2.906
等效百公里燃油消耗量/L	8.471	8.553

由表6可知，主动优化控制策略在将模式切换次数降低25.66%的情况下，等效燃油消耗量仅比基于规则的能量管理策略轻微增加0.97%，表明主动优化控制策略在保证动力性的同时，显著减少了非必要的模式切换，从而提升了整车的平顺性，同时对能耗的影响有限。

5　软件在环测试

与离线仿真有所区别，实车会存在一定的动态特性滞后[15]。本文基于AVL Model.CONNECT平台进行软件在环测试，验证控制策略的有效性。提取联合仿真和软件在环测试的WLTC工况6个速度时段的冲击度响应如图9所示。

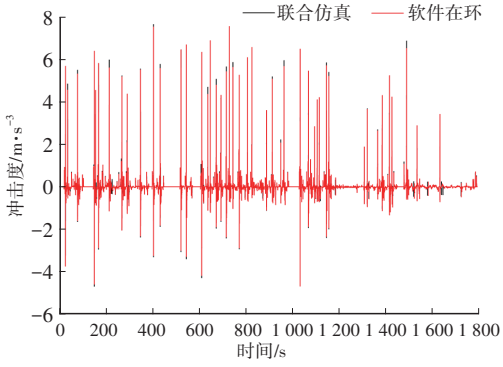


图9　联合仿真和软件在环测试的冲击度对比

根据图9的冲击度数据总结各时段的最大冲击度与冲击度RMS数据，如表7所示。

表7　联合仿真和软件在环测试各速度时段的冲击度　m/s³

时段	联合仿真		软件在环测试	
	最大冲击度	冲击度RMS	最大冲击度	冲击度RMS
低速	5.487	0.387	5.669	0.393
中速	7.634	0.381	7.526	0.381
超低速	6.674	0.478	6.675	0.479
中高速	7.547	0.397	7.542	0.398
高速	6.474	0.301	6.476	0.318
超高速	6.859	0.150	6.511	0.15

由表7可知，2种方式在各速度时段的最大冲击度和冲击度RMS差异均未超过6%，表明2种方式的冲击度测试结果均在合理范围内，从而证明了能量管理策略的可靠性。

6　结束语

本文利用MATLAB/Simulink和AVL Cruise M联合仿真平台设计了离合器模糊控制策略和模式切换主动控制策略研究混合动力汽车模式切换带来的冲击问题，结论如下：

a. 仅考虑经济性的控制策略会导致频繁的模式切换过程，带来冲击性问题。

b. 离合器的控制不仅可以降低混合动力汽车

的冲击度,还可以减少其模式切换频次。

c. 模式切换主动优化控制策略以较小的经济性代价获得了较好的模式切换冲击度控制效果。离合器模糊控制策略+模式切换主动优化策略可以较为有效地解决混合动力车辆的冲击度控制问题。

参 考 文 献

[1] 刘振涛. EVT混合动力传动系统的图论建模与构型综合设计理论研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LIU Z T. Research on Graph Modeling and Configuration Synthesis and Design of EVT Hybrid Electric Powertrains [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[2] 张俊智, 李波, 薛俊亮, 等. 混合动力电动汽车冲击度的试验[J]. 机械工程学报, 2008(4): 87-91.
ZHANG J Z, LI B, XUE J L, et al. Experimental Research on Jerk of Hybrid Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(4): 87-91.

[3] WANG F, XIA J Q, XU X, et al. New Clutch Oil-Pressure Establishing Method Design of PHEVs during Mode Transition Process for Transient Torsional Vibration Suppression of Planetary Power-Split System[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 148.

[4] HWANG H S, YANG D H, CHOI H K, et al. Torque Control of Engine Clutch to Improve the Driving Quality of Hybrid Electric Vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(5): 763-768.

[5] 贺伯林, 陈勇, 代青林. 基于LADRC的纯电动汽车双离合变速器换挡控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(9): 1668-1677.
HE B L, CHEN Y, DAI Q L. Control Strategy for Dual-Clutch Transmission Gear Shifting Process in Pure Electric Vehicles Based on LADRC[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(9): 1668-1677.

[6] 姜建满, 崔玉顺, 陆昌年. 基于模型预测控制的AMT自动离合器控制研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2024, 25(2): 33-38.
JIANG J M, CUI Y S, LU C N. Research on AMT Automatic Clutch Control Based on Model Predictive Control[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2024, 25(2): 33-38.

[7] 王晓磊. DHT模式切换过程协同控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
WANG X L. Research on the Cooperative Control Strategy of DHT Mode Switching Process[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[8] 崔宇轩. 混联式混合动力汽车模式切换控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CUI Y X. Study on Mode Switching Control Strategy of Series-Parallel Hybrid Passenger Vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[9] 李显阳. 并联混合动力汽车模式切换动态协调控制的仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LI X Y. Simulation Study on Mode-Shift Dynamic Coordinated Control of Parallel Hybrid Electric Vehicle[D]. Beijing Jiaotong University, 2014

[10] 谢腾. 电动汽车双电机耦合工作模式划分与切换频次优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
XIE T. Study on the Division of Working Mode and Mode-Switching Frequency Optimization of Electric Motor Dual-Motor Coupling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[11] 夏佳琪. 考虑模式切换频次的新型双电机PHEV实时能量管理策略[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
XIA J Q. Real-Time Energy Management Strategy for a Novel Dual-Motor Plug-in Hybrid Electric Vehicle Considering Frequency of Mode Transitions[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.

[12] 陈信强, 田翔, 王新树. 面向模式切换过程的混合动力汽车动力协调控制[J]. 上海汽车, 2025(1): 26-32.
CHEN X Q, TIAN X, WANG X S. Power Coordination Control of Hybrid Electric Vehicle for Mode Switching Process[J]. Shanghai Auto, 2025(1): 26-32.

[13] 周阳彬, 何继争, 黎宗智, 等. 混合动力汽车串并联模式切换控制研究[J]. 时代汽车, 2024(24): 104-106.
ZHOU Y B, HE J Z, LI Z Z, et al. Research on Series-Parallel Mode Switching Control of Hybrid Electric Vehicle [J]. Auto Time, 2024(24): 104-106.

[14] 王子豪. 双电机耦合驱动系统能量管理与模式切换控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
WANG Z H. Research on Energy Management and Mode Shift Control Strategy of Dual Motor Coupling Powertrain [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.

[15] 周美兰, 严文淼, 郭金梅. 复合电源纯电动汽车整车控制器设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(2): 73-80.
ZHOU M L, YAN W M, GUO J M. Design on Vehicle Controller for Pure Electric Vehicle with Composite Power [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(2): 73-80.

(责任编辑 斛 畔)
修改稿收到日期为2025年10月12日。