

DOI: 10.7652/xjtuxb201907016

采用安全态势评估的 PHEV 节能控制策略

高建平^{1,2}, 徐振海¹, 雷朝阳¹, 郝建国¹

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳;

2. 河南科技大学机械装备先进制造河南省协同创新中心, 471003, 河南洛阳)

摘要: 为了同时提高插电式混合动力汽车(PHEV)的行驶安全性和经济性,首先利用组合优化算法以实际道路工况对关键控制参数进行优化,实现将需求转矩合理分配到电机和发动机。其次,通过共用多种传感器所获取的驾驶行为特征和车间运动特征,结合模糊推理和数据驱动的方法,对当前行驶情景的安全态势进行评估。之后,依托安全态势量化值对当前情景的电机输出转矩进行不同程度的修正,既可以避免出现较大的加速度,又可以获得更多的制动能量回收。最后,进行了硬件在环试验,结果表明:通过实际工况优化关键控制参数,使得文中策略较以新标欧洲循环测试(NEDC)或联邦城市运行(FUDS)工况优化后的能耗分别降低了 6.69%,5.7%;通过根据安全态势对电机转矩进行修正,使得文中策略较以实际工况优化后的能耗进一步降低了 2.09%,并且对车速控制具有一定的“削峰填谷”作用,从而可实现安全性与经济性的双重效果提高。

关键词: 关键控制参数优化;安全态势评估;电机转矩修正;节能控制策略

中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0108-10

Energy-Saving Control Strategy for PHEV Based on Security Situation Estimation

GAO Jianping^{1,2}, XU Zhenhai¹, LEI Zhaoyang¹, XI Jianguo¹

(1. Vehicle & Transportation Engineering Institute, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: For further improving the safety and economy of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), the key control parameters are optimized by actual driving cycle using a combinatorial optimization algorithm to realize the reasonable distribution of demand torque to motor and engine. Then, through sharing and using the driving behavior and inter-vehicle motion characteristics obtained from multiple sensors, the security situation of the current driving scenario is estimated by fuzzy inference and data-driven method. Meanwhile, according to the security situation, the motor torque is properly amended to avoid large acceleration and obtain more braking energy recycling. Finally, an HIL simulation is conducted and the results show that through the optimization on key control parameters, the energy consumption is improved by 6.69% and 5.7% compared with that optimized by NEDC and FUDS, respectively. Through motor torque amendment based on security situation, the energy consumption is further reduced by 2.09% compared with that optimized by actual driving cycle, and there is also a peak-cutting

and valley-filling function on the speed change, resulting in improvement both in safety and economy.

Keywords: key control parameters optimization; security situation estimation; motor torque amendment; energy-saving control strategy

面对能源危机和环境污染,改变能源使用结构、开发利用新型能源和相关节能技术,以减少对不可再生能源的依赖和环境污染已成为全球发展的共识^[1]。发展新能源汽车,从交通和汽车工业的角度带动并引领能源产业革命是当前汽车技术研究的热点^[2]。插电式混合动力汽车(PHEV)具有比普通混合动力汽车(HEV)更好的经济性和排放性能,以及比纯电动汽车(EV)更长的续驶里程,其控制策略作为保障多动力源协调工作的核心,直接影响整车动力性和经济性^[3]。

PHEV 控制策略主要包括基于规则的和基于优化的控制策略,前者包括基于确定规则的和基于模糊规则的策略,后者包括基于全局优化的和基于实时优化的策略^[4]。文献[5]通过基于规则的策略分配发动机和复合电源之间的功率,由模型预测控制(MPC)实现对动力电池与超级电容之间的控制。文献[6]通过不同车速的电力状态转移概率矩阵来预测车辆的用电需求,不仅将动力电池的电量限制在一定范围内,而且降低了动力电池的峰值和平均充放电功率,降低了复合电源的整体损耗。文献[7]利用模拟退火粒子群优化算法对 HEV 能量控制策略进行参数优化以实现最小油耗。随着智能网联技术的发展,毫米波雷达等无线传感技术的可用性和可承受性越来越强,其获得的驾驶环境数据正在变得可用,为整车控制的进一步优化提供了可能^[8]。文献[9]考虑到路面水平曲率的影响,利用动态规划推导出不同曲率路面对应的最优恒定速度,以此达到节能的效果。文献[10]将驾驶行为视为随机扰动,用等效消耗最小化策略对随机模型预测控制进行了改进。尽管这些策略在一定程度上改善了 PHEV 的经济性,但均依赖于固定标准循环工况,与实际道路行驶存在一定的偏差,并且忽略了前方车辆运动状态等信息动态时变的影响,而车辆在实际行驶时往往对前方车辆的运行状态较为敏感,常常根据前车的状态实时调整车速,因此在车辆节能性方面有待进一步优化。

为了进一步挖掘 PHEV 的节油能力,本文通过共用多传感器获取的驾驶行为特征和车间运动特征,结合模糊推理和数据驱动的方法,对当前行驶情

景的安全态势进行评估,以此得到一个安全态势量化值。利用由多岛遗传算法(MIGA)和序列二次规划算法(NLPQL)组成的组合优化算法,以实际道路行驶数据拟合的工况对关键控制参数进行优化。依托安全态势量化值,将车辆行驶情景划分为 4 种水平,通过在不同水平对电机进行不同程度的驱动转矩限制和制动转矩增大,既可以避免行驶过程中出现较大的加速度,又可以获得更多的制动能量回收,实现安全性与经济性的双重效果提高。

1 基于模糊推理的安全态势评估

当前大多数安全态势评估方法通过计算单一的评价参数(碰撞时间 T_{TC} 、车头时距 T_{HW} 、碰撞距离 D_{TC} 等),并与不同级别的默认阈值进行比较来确定其级别^[11],而实际行驶过程中,安全态势主要取决于驾驶员对车辆的操作以及周围车辆的运行状态,单一的评价参数无法描述其整个动态变化过程。因此,文中综合考虑驾驶行为和车间运动特征进行安全态势评估,如图 1 所示,包括安全态势的在线评估过程和隶属度函数的离线确定过程。

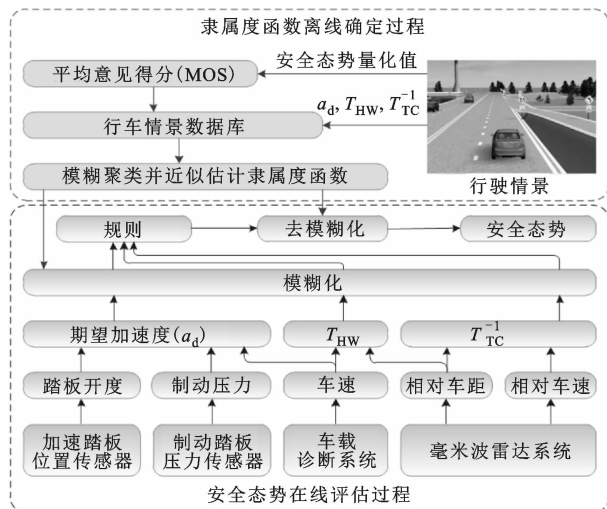


图 1 安全态势评估示意图

若前车不存在或距离较远时,其运行状态对后车安全态势的影响微乎其微,考虑到自适应巡航系统通常将安全时距设定为 $1.5 \sim 2.5 \text{ s}$ ^[12],因此当两车间的距离超过一定的阈值 d_s 时,其安全态势的量化值可视为 0,此时车辆处于自由行驶模式(FD)。

安全态势评估的一般流程如图 2 所示,其中, T_s 为默认时距阈值, d_0 为最小安全距离,文中 $T_s=2.5\text{ s}$, $d_0=4\text{ m}$ 。

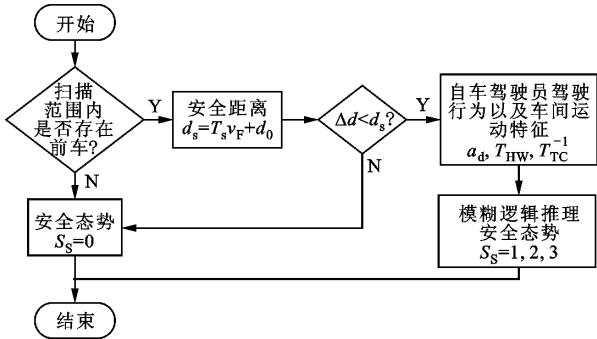


图 2 安全态势评估的一般流程

1.1 评价参数的选取

实际行驶过程中,驾驶员的纵向驾驶行为体现在对加速踏板或制动踏板的操作上,以达到其期望的加速度 a_d ,因此文中使用 a_d 作为驾驶行为对当前行驶情景安全态势影响的评价参数,其计算方式为

$$a_d = \frac{1}{m} \left[\frac{T_a + T_b}{R_w} - mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 - C_r mg \cos \theta \right] \quad (1)$$

式中: m 为整车质量; v 为车速; T_a 为驱动轴输出转矩; T_b 为制动转矩; R_w 为车轮滚动半径; g 为重力系数; θ 为道路坡度; ρ 为空气密度常数; A 为迎风面积; C_d 为空气阻力系数; C_r 为滚动阻力系数。

常用于描述车间运动特征的评价参数包括 D_{TC} 、 T_{HW} 和 T_{TC} ,计算式为

$$D_{TC} = \Delta d; \quad T_{HW} = \frac{\Delta d}{v_F}; \quad T_{TC} = \frac{\Delta d}{v_r} \quad (2)$$

式中: Δd 为两车之间的相对距离; v_F 为自车速度; v_r 为两车之间的相对速度。但是,由式(2)可知, D_{TC} 忽略了车速变化对安全态势的影响, T_{HW} 无法描述相对车速变化而引起的安全态势变化,而当两车的速度相近或相等时, T_{TC} 会趋于无穷大,不具备收敛特性。因此,为了克服单一评价参数的不足,文中联合 T_{HW} 和 T_{TC}^{-1} 用于描述车间运动特征, T_{HW} 能够表征稳态跟车过程的收敛趋势, T_{TC}^{-1} 能够反映人为跟车中的“looming”效应^[13]。

模糊推理时,每个变量均可以看作具有 $S(S \geq 2)$ 个模糊集合,每个模糊集合表示不同的类别。文中模糊推理系统输入变量以及输出变量 S_s (安全态势)的模糊集合类别如表 1 所示。

1.2 隶属度函数的确定

传统隶属度函数确定方法大多依赖专家经验,

表 1 各变量模糊集合类别

输入变量	模糊集合类别
a_d	紧急加速(HA)、平缓加速(SA)、匀速(CS)、平缓减速(SD)、紧急减速(HD)
T_{HW}	小(S)、中(M)、大(B)
T_{TC}^{-1}	小(S)、中(M)、大(B)
S_s	平稳跟随(SF)、潜在危险(PD)、危险行驶(DD)

在很大程度上受到人为的干扰^[14]。模糊聚类确定隶属度函数的方法是一种基于数据驱动的方法,其目的在于根据样本数据内部的关联性与相似性进行模糊聚类,之后利用常用的隶属函数近似逼近各变量的隶属度函数,可以有效避免人为因素的影响,因此文中运用模糊聚类法确定隶属度函数。

1.2.1 建立行驶情景数据库 由于安全态势缺乏明确的定义,有必要在特定的驾驶条件下,通过大量的模拟实验,创建一个行驶情景数据库并量化安全态势,以确定各变量的隶属度函数。PreScan 是一种汽车主动安全模拟平台,可连接至第三方的汽车动力学模型和 HIL 模拟器/硬件,用于数据采集和自动化测试等活动^[15]。文中联合 PreScan、Matlab 与驾驶员模拟器以模拟真实的驾驶情景,如图 3 所示,8 名具有 1~5 年驾驶经验的驾驶员进行了模拟实验。

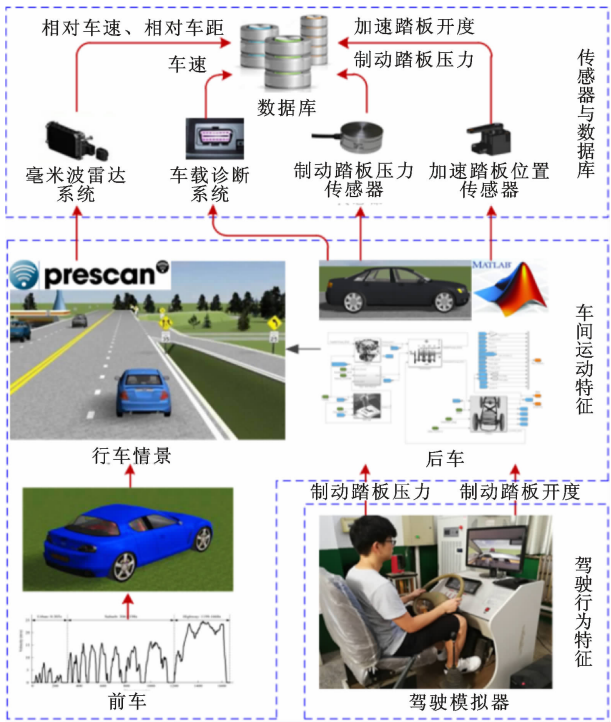


图 3 数据采集方案示意图

考虑到模拟过程中行驶情景的数据量相当庞大,文中首先采用 K 均值聚类算法和平均意见得分

法(MOS)对安全态势进行标注量化,具体步骤如下。

步骤 1 将行驶数据划分为 N 个集合,以集合中心表示整个集合。对于 N 的取值,较大的 N 可以更准确地近似安全态势,但是观察者无法在短时间内对 MOS 测试进行量化。反之,当 N 过低时,MOS 测试的结果很平滑,但集合内部的差异性过大,量化的准确性下降。根据文献[16], $N=70$ 能够在 MOS 测试中得到合理且精确的量化结果。

步骤 2 观察量化安全态势。本文共征集了 27 名观察者的观察结果,其中,观察设置如下:平稳跟车,得 1 分;潜在危险,需要驾驶员谨慎驾驶,得 2 分;危险行驶,需要驾驶员集中注意力并做好随时制动的准备,得 3 分。

步骤 3 计算安全态势得分的平均值。考虑到观察者的驾驶经验存在一定的差别,文中更注重那些经验丰富的观察者所给出的分数,计算式为

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n w_i S_{ki} / \sum_{i=1}^n w_i \tag{3}$$

式中: S_{ki} 是第 i 个观察者给出的第 k 组的分数; w_i 是第 i 个观察者驾驶经验的权重,3 a 以上取 $w_i=0.5$,2~3 a 取 $w_i=0.3$,1~2 a 取 $w_i=0.2$ 。表 2 为所得到的各类中心和行驶情景安全态势的量化值。

表 2 各变量模糊集合类别

N	a_d	T_{HW}	T_{TC}^{-1}	S_s
1	-3.684 4	1.773 5	-0.484 7	1.155 2
2	-3.135 2	2.109 2	-0.177 9	1.166 5
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
70	2.503 4	1.943 4	0.033 7	2.216 0

1.2.2 模糊聚类确定隶属度函数 文中以 a_d 为例,其隶属度函数的确定过程如下。

(1)模糊聚类。①采用欧几里得距离法^[17]建立样本间的相似关系。假定 a_d 的数据为 $(a_{d,1}, a_{d,2}, \cdots, a_{d,n})^T$,其中任意两个元素 $a_{d,i}$ 与 $a_{d,j}$ 之间的相似系数为

$$R(a_{d,i}, a_{d,j}) = 1 - \frac{|a_{d,i} - a_{d,j}|}{\delta} \tag{4}$$

式中 δ 为一个常数,定义如下

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |a_{d,i} - a_{d,\max}| \tag{5}$$

得到一个 n 维的相似矩阵 $R_s(r_{ij}=R(a_{d,i}, a_{d,j}))$ 。

②计算 R_s 的模糊等价矩阵 R_e

$$R_s \rightarrow R_s^2 \rightarrow \cdots \rightarrow R_s^{2^n} \rightarrow R_s^{2^{n+1}} \tag{6}$$

直至 $R_s^{2^n}=R_s^{2^{n+1}}$,则模糊等价矩阵 $R_e=R_s^{2^n}$ 。

③通过阈值 λ 得到等价矩阵 R_e 的 λ 截矩阵 $R_{e,\lambda}$,并根据 $R_{e,\lambda}$ 对 a_d 进行分类。若 $R_{e,\lambda}(a_{d,i}, a_{d,j})=1$,则 $a_{d,i}$ 与 $a_{d,j}$ 属于同一类,其中 $\lambda \in [0,1]$,根据分类数确定。

(2)利用三角形隶属函数近似估计隶属度函数。假定 a_d 分为 K 类,即 $C_1, C_2, \cdots, C_K$,其中,第 $h(1 \leq h \leq K)$ 个模糊集 C_h 包含 N_h 个元素。文中需要确定三角形的 3 个顶点 $(a_h, 0)$ 、 $(b_h, 1)$ 、 $(c_h, 0)$,计算式如下

$$\left. \begin{aligned} a_h &= \min(a_{d,1}, a_{d,2}, \cdots, a_{d,N_h}) \\ b_h &= \frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} a_{d,i}, \quad i = 1, 2, \cdots, N_h \\ c_h &= \max(a_{d,1}, a_{d,2}, \cdots, a_{d,N_h}) \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

则模糊集合 C_h 的隶属度函数

$$f_{C_h}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_h}{b_h-a_h}, & a_h < x < b_h \\ \frac{c_h-x}{c_h-b_h}, & b_h < x < c_h \end{cases} \tag{8}$$

(3)修正隶属度函数。在确定 C_1 的隶属度函数时,通常认为当变量绝对小时,其绝对隶属于 C_1 ,即隶属度等于 1,因此需要对其隶属度函数进行修正,同样 C_K 也需要进行修正,修正方式分别如下

$$f_{C_1}(x) = \begin{cases} 1, & a_1 < x < b_1 \\ \frac{c_1-x}{c_1-b_1}, & b_1 < x < c_1 \end{cases} \tag{9}$$

$$f_{C_K}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_K}{b_K-a_K}, & a_K < x < b_K \\ 1, & b_K < x < c_K \end{cases} \tag{10}$$

通过模糊聚类所确定的隶属度函数如图 4 所示,每个模糊集的隶属函数都存在着明显的不规则性和不对称性,其原因在于驾驶员对外界环境感受有所差异,并且对外界环境的反应也具有不对称性。

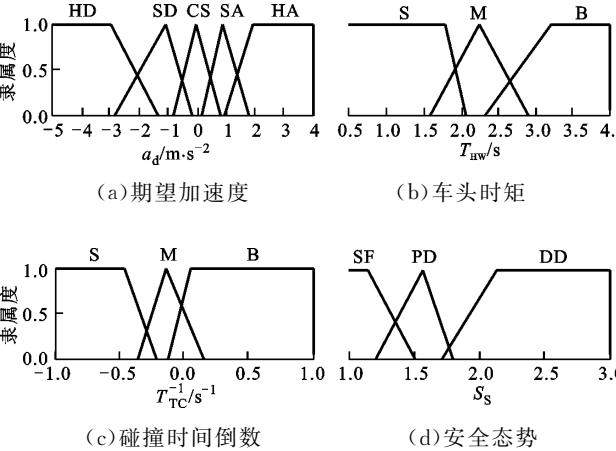


图 4 各变量模糊集的隶属度函数

图 5 为模糊推理系统与 MOS 测试的结果对比,该模糊推理系统与 MOS 的输出结果均方根误差为 0.050 8,输出结果相近。

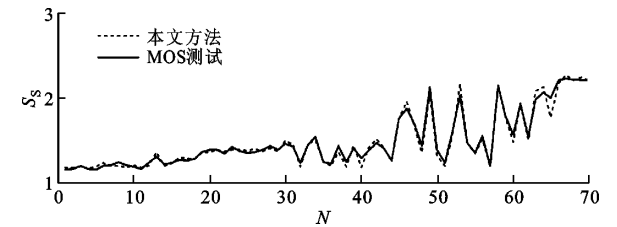


图 5 模糊推理系统结果与 MOS 测试结果的比较

2 基于安全态势的节能控制策略

基于安全态势评估的 PHEV 节能控制策略首先以实际工况对关键控制参数进行优化,以增强其工况适应性,之后根据安全态势对电机转矩进行修正,以避免出现较大的加速并增加制动能量回收,从而提高行驶安全性,并进一步提高整车经济性。

2.1 关键控制参数优化

文中以某单轴并联式 PHEV 为研究对象,其系统结构和主要技术参数分别如图 6 和表 3 所示,其控制策略基于电池荷电状态(SOC)分为电量消耗(CD)阶段和电量维持(CS)阶段,如表 4 所示。本文首先利用某城市实际行驶工况(见图 7)以整车综合

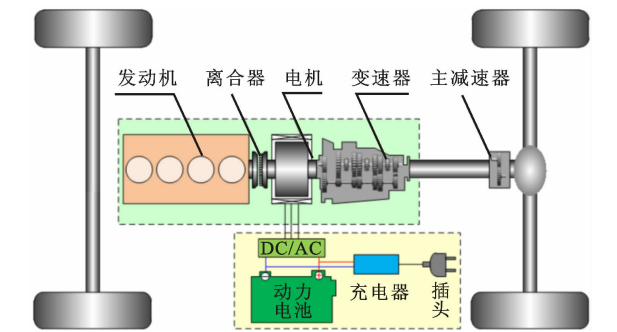


图 6 单轴并联式 PHEV 结构简图

表 3 整车主要参数表

参数	数值
整车整备质量/kg	1 380
满载质量/kg	1 870
发动机最大功率/kW	56
发动机最大扭矩/N·m	118
电池容量/A·h	23
电机最大功率/kW	30
电机最大扭矩/N·m	100
变速器传动比	3.62,2.22,1.51,1.08,0.85
主减速器传动比	3.8

能耗为优化目标,以整车动力性为约束条件,以与能耗关系密切的关键控制参数为优化变量进行优化^[18]。

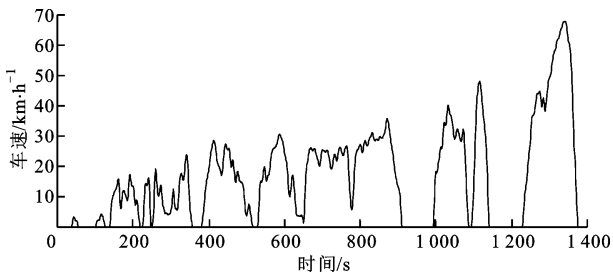


图 7 某城市实际行驶工况

整车综合性能优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min F(x) &= F_f + F_e/3.02 \\ \text{s. t. } g_i(x) &\geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \\ x_j^l &\leq x_j \leq x_j^h, j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $F(x)$ 为整车百公里综合能耗; F_f 为发动机百公里燃油消耗量; F_e 为动力电池百公里消耗的电量; $g_i(x)$ 为动力性约束条件; n 为约束条件的个数; x_j 为优化变量; m 为优化变量的个数; x_j^l 与 x_j^h 分别为第 j 个优化变量的上限与下限。

表 4 整车转矩分配方式

运行阶段	离合器状态	工作状态	工作模式	转矩分配
CD 阶段 ($S_{SOC} \geq K_{CD/CS}$)	0	$T_{req} \leq T_{M_max}$	纯电驱动	$T_M = T_{req}$
	1	$T_{M_max} < T_{req} \leq T_{M_max} + T_{ICE_min}$	并联混合驱动	$T_M = T_{req} - T_{ICE_min}, T_{ICE} = T_{ICE_min}$
		$T_{M_max} + T_{ICE_min} < T_{req} \leq T_{M_max} + T_{ICE_max}$	并联混合驱动	$T_M = T_{req} - T_{ICE_max}, T_{ICE} = T_{ICE_max}$
CS 阶段 ($S_{SOC} < K_{CD/CS}$)	1	$T_{req} \leq T_{ICE_min}$	车载充电	$T_M = T_{req} - T_{ICE_min}, T_{ICE} = T_{ICE_min}$
		$T_{ICE_min} < T_{req} \leq T_{ICE_max}$	发动机单独驱动	$T_{ICE} = T_{req}$
		$T_{ICE_max} < T_{req}$	混合驱动	$T_M = T_{req} - T_{ICE_max}, T_{ICE} = T_{ICE_max}$

注: S_{SOC} 为当前动力电池的 SOC; $K_{CD/CS}$ 为 CD/CS 模式切换系数;离合器状态中 0 表示断开,1 表示接合; T_{req} 为当前需求转矩; T_{M_max} 为当前电机最大输出转矩; T_{ICE_min} 、 T_{ICE_max} 分别为当前发动机的最小和最大输出转矩; T_M 、 T_{ICE} 分别为分配给电机和发动机的转矩。

优化的关键控制参数包括 CD 与 CS 阶段的模式切换系数 $K_{CD/CS}$, 动力电池 SOC 的上、下限 $S_{SOC,H}$ 、 $S_{SOC,L}$, CD 和 CS 阶段离合器的结合车速 V_{CD} 、 V_{CS} 以及发动机工作转矩上、下限修正系数 E_H 、 E_L ; 动力性约束条件包括以 20 km/h 速度行驶时的最大爬坡度不小于 30%, 0 到 50 km/h 的加速时间不大于 5 s, 0 到 100 km/h 的加速时间不大于 14 s, 实际车速与期望车速差值的绝对值不大于 3 km/h。优化算法选择由 MIGA 和 NLPQL 组成的组合优化算法, 优化前期充分发挥 MIGA 的全局搜索能力, 优化后期借助 NLPQL 快速定位至最优区域, 从而实现全局快速寻优, 改善优化质量^[19]。借助 Isight 优化平台(如图 8 所示)分别以新标欧洲循环测试(NEDC)工况、联邦城市运行(FUDS)工况和实际工况对关键控制参数进行优化, 结果如表 5 所示。

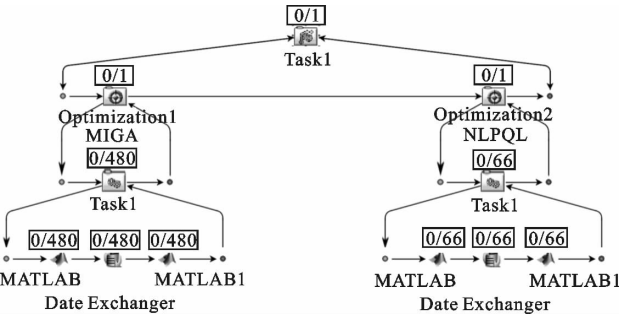


图 8 Isight 组合优化平台

表 5 以 NEDC、FUDS 和实际工况优化后的
关键控制参数

优化变量	FUDS 工况	NEDC 工况	实际工况
$S_{SOC,H}$	0.954	0.926	0.893
$S_{SOC,L}$	0.342	0.362	0.374
$K_{CD/CS}$	0.418	0.425	0.442
E_H	0.893	0.783	0.837
E_L	0.406	0.251	0.141
V_{CD}	88.3	89.6	84.4
V_{CS}	30.1	34.2	26.8

2.2 电机转矩修正

根据安全态势量化值划分了 4 种工作模式, 通过在不同模式对电机转矩进行不同程度的修正, 以实现安全性与经济性双重效果提高, 修正方式如下。

(1)自由行驶模式(工作模式 1)。当处于自由行驶模式时, 不需要考虑前车对自车安全性的影响, 因此不对电机的输出转矩进行修正, 仅输出原始输出转矩, 即

$$T_{FD} = T_M$$

(12)

式中 T_M 为以实际工况优化后的电机输出转矩。

(2)平稳跟随模式(工作模式 2)。当处于平稳跟随模式时, 为了避免出现较大的加速度, 需要对电机的最大驱动转矩进行限制, 同时根据制动意图, 增大电机的制动转矩, 以获得更多的制动能量回收, 即

$$T_{SF} = \begin{cases} \min(T_{M_{\max}} K_{D1}, T_M), & T_M > 0 \\ (T_{M_{\min}} - T_M) K_{B1} + T_M, & T_M \leq 0 \end{cases}$$

(13)

式中: $T_{M_{\max}}$ 和 $T_{M_{\min}}$ 分别为电机的最大驱动转矩和最大制动转矩; K_{D1} 和 K_{B1} 分别为平稳跟随模式的驱动转矩和制动转矩的修正系数, 其中 K_{D1} 随着安全态势的增大而减小, 用于反映不同安全态势下对驱动转矩限制的不同程度; K_{B1} 随着安全态势的增大而增大, 以提高制动能量回收。

(3)潜在危险模式(工作模式 3)。当处于潜在危险模式时, 不仅要避免出现较大的加速度, 还要避免急加速的情况发生, 也就是说既要限制电机的驱动转矩, 还要限制驱动转矩的变化率。同时根据制动意图, 增大电机的制动转矩, 以获得更多的制动能量回收, 即

$$T_{PD} = \begin{cases} \min(T_{M_{\max}} K_{D2}, T_M) \& \frac{dT}{dt} \leq a, & T_M > 0 \\ (T_{M_{\min}} - T_M) K_{B2} + T_M, & T_M \leq 0 \end{cases}$$

(14)

式中: K_{D2} 和 K_{B2} 的定义分别与 K_{D1} 和 K_{B1} 类似, 但 K_{D2} 要比 K_{D1} 略小, 以增大对驱动转矩的限制程度, 并且为了保证在模式切换的过程中驱动转矩无缝衔接和平滑过渡, K_{D2} 与 K_{D1} 的值在模式切换临界点需相等, 同样, K_{B2} 的值比 K_{B1} 要略大, 并且在模式切换临界点需相等; a 是转矩变化率的限制参数。

(4)危险行驶模式(工作模式 4)。当处于危险行驶模式时, 两车间的碰撞风险较大, 自车需要直接切断动力并进入制动模式, 同时根据驾驶员减速意图, 主动增加电机制动转矩以提高制动能量回收, 即

$$T_{DD} = \begin{cases} T_{M_{\min}} K_{B3}, & T_M > 0 \\ \min[T_{M_{\min}} K_{B3}, (T_{M_{\min}} - T_M) K_{B3} + T_M], & T_M \leq 0 \end{cases}$$

(15)

式中: K_{B3} 为危险模式时的制动转矩修正系数, 反映制动能量回收的不同程度, 定义与 K_{B1} 和 K_{B2} 类似。

3 验证分析

为了更加准确真实地验证提出的节能控制策略, 采用“虚拟环境+真实控制器+真实驾驶员+虚

拟被控对象”的 HIL 试验方案,如图 9 所示,自行车由驾驶员操控,前车工况预先设定,其工况是实时采集的两个校区(如图 10 所示)之间的实际道路工况,如图 11 所示,该实际道路工况全程共 11.1 km,用时 1 619 s。

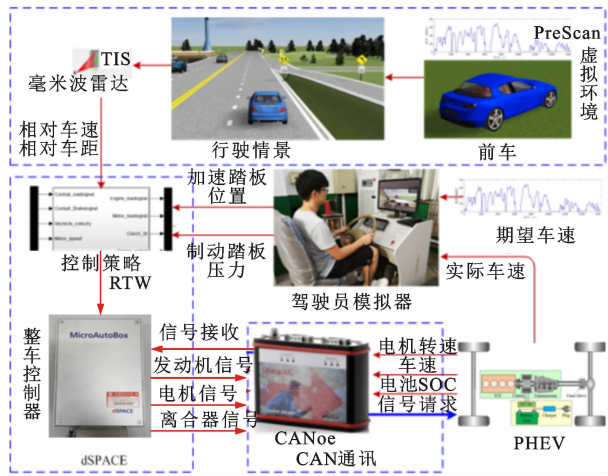


图 9 HIL 试验方案示意图



图 10 道路行驶路线

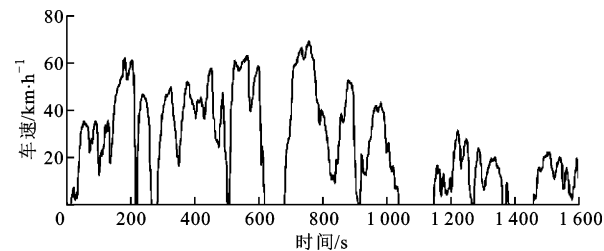


图 11 实际道路行驶工况

(1)关键控制参数优化。以上述 3 种工况优化关键控制参数后,试验过程中动力电池的 SOC 变化如图 12 所示。其中,以实际工况优化关键控制参数

后的 SOC 下降更为平缓,原因在于其 $K_{CD/CS}$ 较大,使得车辆较早地进入 CS 阶段,并且通过限制动力电池的 SOC 上、下限,使得 SOC 波动更加频繁,但仍能保持在一定的范围内,进入 CS 阶段后,动力电池依然具有充放电的能力,从而可充分利用电能。

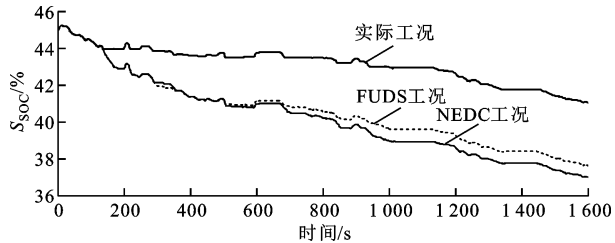
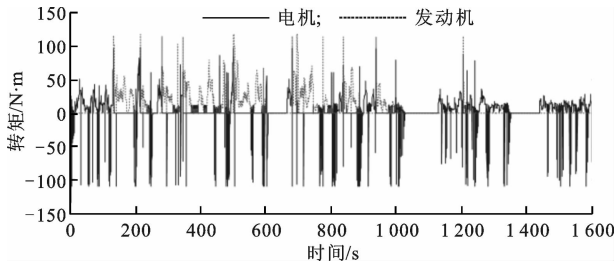
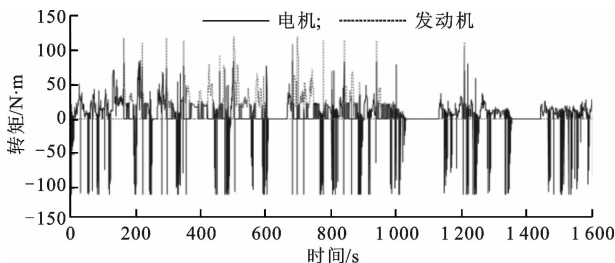


图 12 关键控制参数优化后的动力电池 SOC 变化曲线

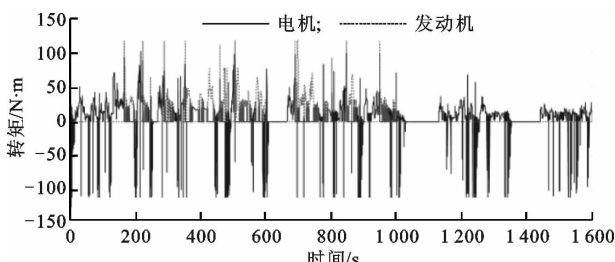
图 13 为以上述 3 种工况优化后的关键控制参数对发动机、驱动电机的转矩分配结果。其中,以实际工况优化后的关键控制参数,其离合器结合转速较小,使得发动机能够更早地介入到工作,并且通过修正发动机工作的上下限,可以有效改善发动机转矩频繁变化的状况,发动机工作在相对稳定的区域,使得其更加符合车辆的实际运行情况。



(a)实际工况



(b)FUDS 工况



(c)NEDC 工况

图 13 优化后的关键控制参数对转矩的分配结果

(2)电机转矩修正。图 14 为在以实际工况优化后的关键控制参数的基础上增加电机转矩修正的控制策略的动力电池 SOC 变化曲线,通过在不同的行驶情景对电机进行不同程度的驱动转矩限制或制动转矩增大,使得其 SOC 变化趋势更为平缓。

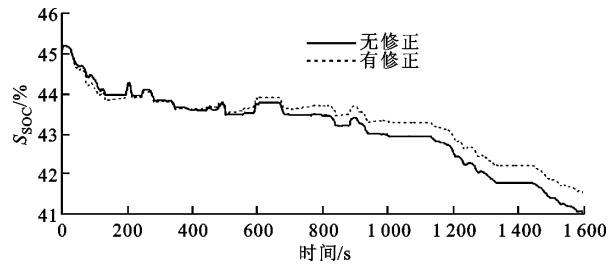
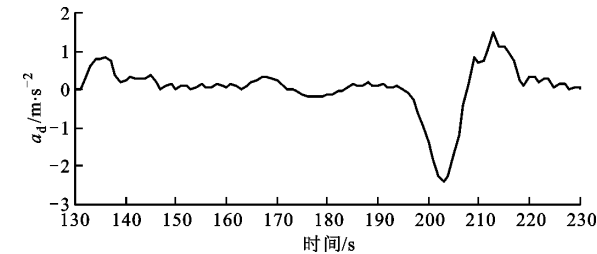
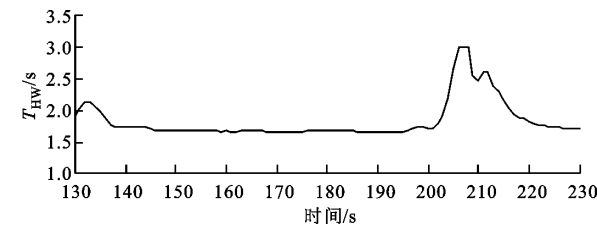


图 14 有无电机转矩修正的控制策略的 SOC 变化曲线

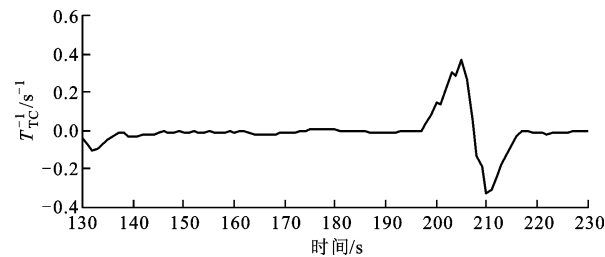
图 15 为试验过程中 130~230 s 的安全态势评估结果和电机转矩修正结果。从图 15a~15d 中可以看出,安全态势评估的结果充分体现了驾驶行为特征和车间运动特征,例如在 140~190 s,表征车间运动特征的 T_{HW} 和 T_{TC}^{-1} 已经趋于稳定,但由于表征驾驶行为特征的 a_d 出现了较大的波动,安全态势评估结果随之变化。从图 15e 中可以看出,当电机工



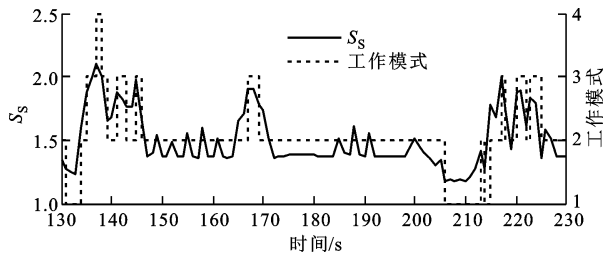
(a)期望加速度 a_d 变化曲线



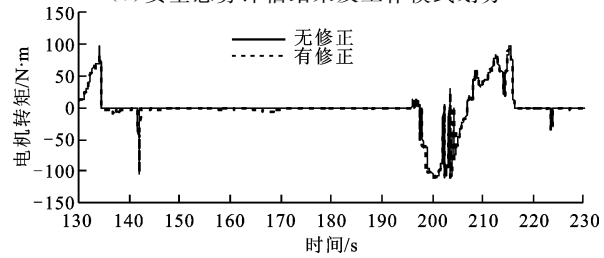
(b)车头时距 T_{HW} 变化曲线



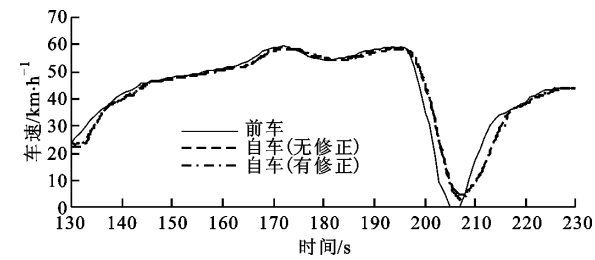
(c)碰撞时间倒数 T_{TC}^{-1} 变化曲线



(d)安全态势评估结果及工作模式划分



(e)电机转矩修正结果



(f)车速变化曲线

图 15 130~230 s 的安全态势评估结果和电机转矩修正结果

作在不同模式时,电机转矩随安全态势的变化受到了不同程度的驱动限制或制动增大,例如在 167 s,模式由平稳跟随切换到潜在危险,电机的制动转矩明显增大并出现波谷;在 213 s 和 215 s,模式由自由行驶切换到平稳跟随,电机驱动转矩的峰值被部分削减,有效避免了较大加速度的出现并增大了制动能量回收。从图 15f 中可以看出,由于电机转矩被不同程度修正,车速在 192~198 s 的峰值受到了部分削减,在 206~213 s 的波谷得到部分填充,对车速控制具有一定的“削峰填谷”作用。因此,根据安全态势对电机转矩进行修正不仅进一步提高了整车经济型,同时提高了行驶安全性。

将试验过程中的能耗换算为百公里的能耗结果如表 6 所示,可以看出通过实际工况优化关键控制参数,使得文中策略较以 NEDC 或 FUDS 工况优化后的能耗分别降低了 6.69%、5.7%。通过根据安全态势对电机转矩进行修正,使得文中策略较以实际工况优化后的能耗降低了 2.09%,经济性得到进一步提高。

表 6 试验过程中的百公里能耗对比

参数	NEDC	FUDS	实际	文中
	工况	工况	工况	策略
油耗/L	2.29	2.41	3.14	3.17
电耗/kW·h	6.12	5.62	2.94	2.59
综合能耗/L	4.32	4.27	4.11	4.03

4 结 论

(1)通过共用多传感器获取的驾驶行为特征(a_d)和车间运动特征(T_{HW} 和 T_{TC}^{-1}),结合模糊推理对当前行驶情景的安全态势进行了评估。同时,利用 Pre Scan软件建立了行驶情景数据库,结合数据驱动和 MOS 的方法确定了各变量模糊集的隶属度函数。

(2)利用 MIGA+NLPQL 的组合优化算法,分别以 NEDC 工况、FUDS 工况和实际工况对关键控制参数进行了优化。同时依托安全态势量化值对电机转矩进行了不同程度的驱动限制或制动增大,既有效避免了较大加速度的出现,又增多了制动能量回收。

(3)HIL 试验结果表明:通过实际工况优化关键控制参数,使得文中策略较以 NEDC 或 FUDS 工况优化后的能耗分别降低了 6.69%、5.7%;通过根据安全态势对电机转矩修正,文中策略较以实际工况优化后的能耗进一步降低了 2.09%,并且对车速控制具有一定的“削峰填谷”作用,从而可实现安全性与经济性的双重效果提高。

参考文献:

[1] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会. 节能与新能源汽车技术路线图 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 104-123.

[2] 孙超. 混合动力汽车预测能量管理研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 1-2.

[3] 高建平, 郗建国. 新能源汽车概论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 27-31.

[4] YANG Chao, DU Siyu, LI Liang, et al. Adaptive real-time optimal energy management strategy based on equivalent factors optimization for plug-in hybrid electric vehicle [J]. Applied Energy, 2017, 203: 883-896.

[5] ZHANG Shuo, XIONG Rui, SUN Fengchun. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system [J]. Applied Energy, 2015, 185: 1654-1662.

[6] WANG Yanzi, WANG Weida, ZHAO Yulong, et al. A fuzzy-logic power management strategy based on

Markov random prediction for hybrid energy storage systems [J]. Energies, 2016, 9(1): 1-20.

[7] LEI Zhenzhen, CHENG Dong, LIU Yonggang, et al. A dynamic control strategy for hybrid electric vehicles based on parameter optimization for multiple driving cycles and driving pattern recognition [J]. Energies, 2017, 10(1): 1-20.

[8] 解来卿, 张东好, 罗禹贡, 等. 雷达共用型智能混合动力汽车节能控制策略 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(3): 286-291.

XIE Laiqing, ZHANG Donghao, LUO Yugong, et al. Radar sharing energy-saving control strategy for intelligent hybrid electric vehicle [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(3): 286-291.

[9] DING Feng, JIN Hui. On the optimal speed profile for eco-driving on curved roads [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(12): 4000-4010.

[10] LI Liang, YOU Sixiong, YANG Chao, et al. Driving-behavior-aware stochastic model predictive control for plug-in hybrid electric buses [J]. Applied Energy, 2016, 162: 868-879.

[11] XIONG Xiaoxia, CHEN Long, LIANG Jun. Vehicle driving risk prediction based on Markov chain model [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018, 2018: 1-12.

[12] ZHAO R C, WONG P K, XIE Z C, et al. Real-time weighted multi-objective model predictive controller for adaptive cruise control systems [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(2): 279-292.

[13] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 96-102.

PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Multi-mode switching controller for vehicle adaptive cruise control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 96-102.

[14] CAO Hui, JIA Lixin, SI Gangquan, et al. A clustering-analysis-based membership functions formation method for fuzzy controller of ball mill pulverizing system [J]. Journal of Process Control, 2013, 23(1): 34-43.

[15] TASS International. PreScan overview [EB/OL]. [2019-01-02]. <https://www.tassinternational.com/prescan-overview>.

[16] YIN Jiali, CHEN Bohao, ROBERT L K, et al. Auto-

- matic dangerous driving intensity analysis for advanced driver assistance systems from multimodal driving signals [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 18(12): 4785-4794.
- [17] 邱小平, 孙若晓, 于丹, 等. 改进的基于模糊推理的车辆跟驰行为分析方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(8): 135-143.
 QIU Xiaoping, SUN Ruoxiao, YU Dan, et al. An improved method to analyze car-following behavior based on fuzzy inference system [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2015, 43(7): 135-143.
- [18] 高建平, 孙中博, 丁伟, 等. 车辆行驶工况的开发和精度研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(10): 2046-2054.
 GAO Jianping, SUN Zhongbo, DING Wei, et al. Development of vehicle driving cycle and accuracy of research [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(10): 2046-2054.
- [19] 高建平, 孙中博, 张磊敏, 等. 基于实际工况的插电式混合动力公交车参数自适应控制策略研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 130-139.
 GAO Jianping, SUN Zhongbo, ZHANG Leimin, et al. Plug-in hybrid electric bus variable parameter control strategy considering influence of driving cycle [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(7): 130-139.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 66 页)

- [9] MAGALLON D. Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(19/20/21): 1998-2009.
- [10] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 1952, 48(2): 89-94.
- [11] NEMEC D, LEVEC J. Flow through packed bed reactors: 1 Single-phase flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(24): 6947-6957.
- [12] LI L, ZOU X, WANG H, et al. Investigations on two-phase flow resistances and its model modifications in a packed bed [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 101: 24-34.
- [13] 邹旭毛, 李良星, 孔刘波, 等. 颗粒堆积床内两相流动阻力及相间摩擦力 [J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(4): 470-475.
 ZOU Xumao, LI Liangxing, KONG Liubo, et al. Two-phase flow resistance and interfacial drag in packed beds [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, 51(4): 470-475.
- [14] 李良星, 邹旭毛, 孔刘波. 不同堆积结构颗粒床内的流动特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(9): 49-54.
 LI Liangxing, ZOU Xumao, KONG Liubo. Investigation on the flow characteristics in particulate beds with different packing structures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(9): 49-54.
- [15] LIPINSKI R J. A coolability model for postaccident nuclear reactor debris [J]. *Nuclear Technology*, 1984, 65(1): 53-66.
- [16] SCHULENBERG T, MÜLLER U. An improved model for two-phase flow through beds of coarse particles [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(1): 87-97.
- [17] TUNG V X, DHIR V K. A hydrodynamic model for two-phase flow through porous media [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1988, 14(1): 47-65.
- [18] REED A W. The effect of channeling on the dryout of heated particulate beds immersed in a liquid pool [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1982: 22-35.
- [19] HU K, THEOFANOUS T G. On the measurement and mechanism of dryout in volumetrically heated coarse particle beds [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, 17(4): 519-532.
- [20] TAHERZADEH M, SAIDI M S. Modeling of two-phase flow in porous media with heat generation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 69: 115-127.
- [21] CLAVIER R, CHIKHI N, FICHOT F, et al. Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: friction closure laws [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 91: 243-261.
- [22] KONOVALIKHIN M. Investigations of melt spreading and coolability in a LWR severe accident [D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2001: 103-135.
- [23] THAKRE S, LI L, MA W. An experimental study on coolability of a particulate bed with radial stratification or triangular shape [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 276: 54-63.

(编辑 荆树蓉)