

# 重载混合动力车辆再生制动策略设计与优化\*

薛金红, 涂群章, 邵发明, 潘明

(陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为进一步提高混合动力应急救援车辆的能源利用率, 针对 N3 类重型车辆的特点设计了双模糊逻辑控制策略, 分别对前后轴之间的制动力及前轴再生制动与机械制动的制动力进行了合理分配, 同时兼顾了车辆的制动稳定性及再生制动能量的回收效率。为了更好地发挥模糊逻辑控制器的性能, 采用多目标粒子群优化算法, 以车辆制动稳定性指标及再生制动能量回收量为优化目标, 对双模糊逻辑控制器的输入/输出隶属度参数进行了优化。最后, 通过 Simulink 离线仿真实验验证了所设计的双模糊逻辑再生制动策略及多目标粒子群优化算法的正确性、有效性及实用性。

**关键词:** 机械电子工程; 再生制动; 多目标粒子群优化算法; 模糊逻辑控制; 混合动力车辆

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2022.01.012

引用格式: 薛金红, 涂群章, 邵发明, 等. 重载混合动力车辆再生制动策略设计与优化[J]. 信息技术与网络安全, 2022, 41(1): 75-83.

## Design and optimization of regenerative braking strategy for heavy-duty hybrid electrical vehicles

Xue Jinhong, Tu Qunzhang, Shao Faming, Pan Ming

(College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to further improve the energy efficiency of hybrid emergency rescue vehicles, a dual-fuzzy logic control (Dual-FLC) strategy was designed according to N3 heavy-duty vehicles. The braking force between the front and rear axles, the regenerative braking force and mechanical braking force on the front axle were distributed reasonably. At the same time, both the recovery efficiency of the regenerative braking energy and the braking stability of the vehicle were considered comprehensively. In order to make the fuzzy logic control (FLC) strategy play better performance, a multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) strategy was adopted to optimize the input and output membership parameters of the dual fuzzy logic controller with the target of the vehicle braking stability index and the recovery amount of regenerative braking energy. Finally, the correctness, effectiveness, and practicability of the designed Dual-FLC regenerative braking strategy and the MOPSO algorithm were verified by the offline Simulink simulation.

**Key words:** mechanical and electronic engineering; regenerative braking; multi-objective particle swarm optimization; fuzzy logic control; hybrid electrical vehicle

### 0 引言

混合动力车辆以其排放低、能源利用率高的特点正在逐步取代传统燃油车辆。本文所研究的应急救援车辆是一种重载车辆, 在抢险救灾、事故救援、消防救援等灾害救援领域发挥着至关重要的作用, 要求具有响应速度快、机动性能高、地形适应

能力强等特点。

混合动力车辆的能量管理策略是当前研究的热点, 也是混合动力车辆的一个关键技术, 近些年已被很多学者进行了研究, 但研究的重点大部分放在了行车过程的能量管理方面, 而制动控制策略作为能量管理策略中非常重要的一部分, 特别是对于应急救援车辆这类载重大、行驶路况复杂的车辆, 制动能量的损失非常多, 直接影响到车辆的制动性

\* 基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0802903)

能及能源的利用率。近年来很多学者针对再生制动力机械制动之间的分配也做了一些研究。现在广泛研究的再生制动策略主要可以分为三类：一是基于确定规则的制动策略，如基于 ECE 法规和 I 线的制动力分配<sup>[1-4]</sup>，基于制动强度的制动策略<sup>[5]</sup>等；二是基于智能控制的制动策略，如基于模糊逻辑控制的制动策略<sup>[6-8]</sup>，基于自适应模糊控制的制动策略<sup>[9]</sup>，基于神经网络的多目标优化制动策略<sup>[10]</sup>，基于庞特里亚金最小原理的制动策略<sup>[11]</sup>等；三是基于智能优化算法的制动策略，如基于遗传算法的多目标优化策略<sup>[12]</sup>，基于田口方法优化的模糊逻辑制动控制策略<sup>[13]</sup>，改进优化算法的自适应能量管理策略<sup>[14]</sup>，改进非线性模型预测控制方法的能量回收控制策略<sup>[15]</sup>等。这些制动策略采用了不同的方法进行制动力的分配，在不同方面对制动策略进行了改进，都有各自的优势，但主要侧重的是轻型车辆，在本文设计重载应急救援车辆的制动控制方面并不完全适用，需在路面行驶工况、车辆制动稳定性等方面重点改进。

本文针对重型应急救援车辆的特点，设计了一种双模糊逻辑控制策略，对前后轴制动力及前轴再生制动力和机械制动力进行分配，制定了一种适合于本类型车辆的优化方案，并采用多目标粒子群优化算法对模糊控制参数进行优化，以实现两个再生制动性能指标的共同优化。通过 Simulink 离线仿真实验，验证了优化后的双模糊逻辑控制策略及多目标优化算法的制动效果。

### 1 车辆再生制动系统建模

本文所研究的混合动力应急救援车辆制动控

制系统示意图如图 1 所示。车辆制动时的制动力由两部分组成(离合器闭合时,通过发动机可以提供反拖制动力,此部分与传统内燃机车辆一致,本文中暂不考虑):一部分为液压系统作用在四个车轮上的摩擦力,另一部分为前轴上的电动/发电机产生的反向扭矩作用在车轮轴上形成的制动力(后轴上的电动机仅当车辆需求扭矩非常大时提供辅助动力)。

#### 1.1 下坡路面车辆制动受力分析

对于普通车辆,我国在公路路线设计规范中对于道路坡度有明确的规定:即设计车速为 80 km/h 的道路最大坡度不超过 5%,因此在设计普通车辆再生制动策略时可以忽略道路坡度对控制策略的影响。然而应急救援车辆属于特种车辆,具有载重大、工况多、行驶地形复杂等特点,公路路线设计规范对其并不适用。本文设计的应急救援车辆要求最大爬坡率为 60%(坡度  $\alpha \approx 31^\circ$ ),相较于平坦路面制动,下坡时制动消耗的能量更多,在设计应急救援车辆制动策略时必须考虑道路的坡度对制动性能的影响。对重载应急救援车辆下坡制动时进行受力分析,如图 2 所示(忽略滚动阻力和空气阻力)。

车辆下坡制动时,车辆动力学方程可表示为:

$$F_b = F_{lf} + F_{lr} = Mg \sin \alpha + Mj = Mg(\sin \alpha + \frac{j}{g}) \quad (1)$$

其中,  $F_b$  为车辆的总制动力,  $F_{lf}$  为前轮制动力,  $F_{lr}$  为后轮制动力,  $M$  为整车重量,  $\alpha$  为路面坡度,  $j$  为车辆制动时的负加速度。

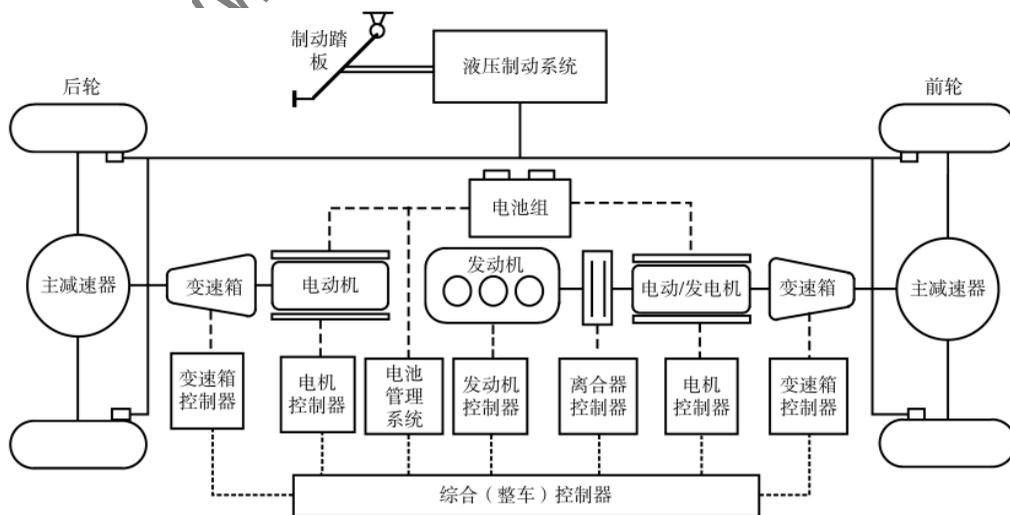


图 1 应急救援车辆制动控制系统结构示意图

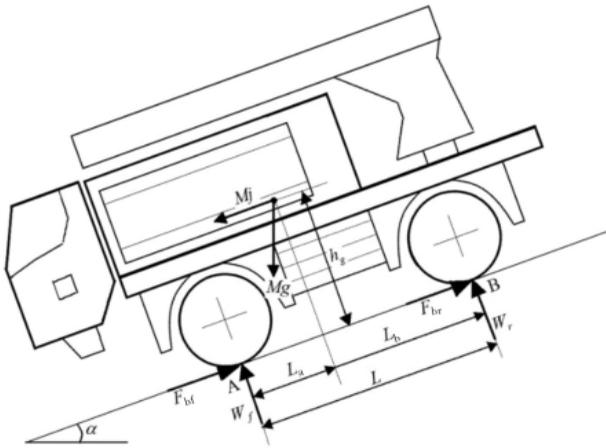


图2 下坡路面制动时车辆的受力分析图

在平坦路面行驶时,车辆的制动强度定义为  $z=j/g$ ,然而当车辆下坡时,制动力还需克服车辆自重产生的沿路面方向的加速度,因此车辆的制动强度相应地应表示为  $z=j/g+\sin\alpha$ 。对前后轮接地点 A 点和 B 点分别进行受力分析,得到车辆的理想制动力分配公式为:

$$F_{br} = \frac{Mg}{h_g} \sqrt{\frac{h_g L \cos\alpha}{Mg} F_{wf} + \left(\frac{L_b}{2} \cos\alpha\right)^2 - \left(F_{wf} + \frac{Mg L_b}{2h_g} \cos\alpha\right)} \quad (2)$$

根据式(2)得到不同路面坡度(以  $0^\circ$  和  $20^\circ$  为例)及不同路面附着系数下车辆的理想制动力曲线如图3所示。

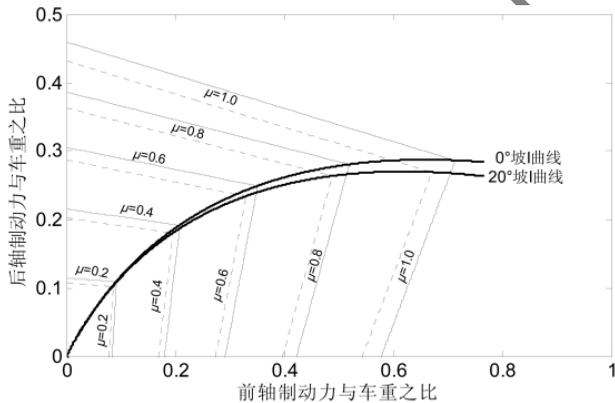


图3 不同道路坡度和不同路面附着系数下的 I 曲线

从图3可以看出,当路面附着系数  $\mu$  不变,而道路坡度增加时,作用在车轮上的最大制动力会降低,因此,车辆制动时必须考虑路面坡度对制动力分配的影响,同时必须遵循 ECE 法规对车辆制动力分配的要求。

### 1.2 ECE 法规规定的 N3 类车辆的制动力分析

根据 ECE 法规 R13 附录 10 制动力在车辆各轴之间的分配和对牵引车与挂车匹配的要求,对于 N3 类车辆需满足的条件如图4所示。

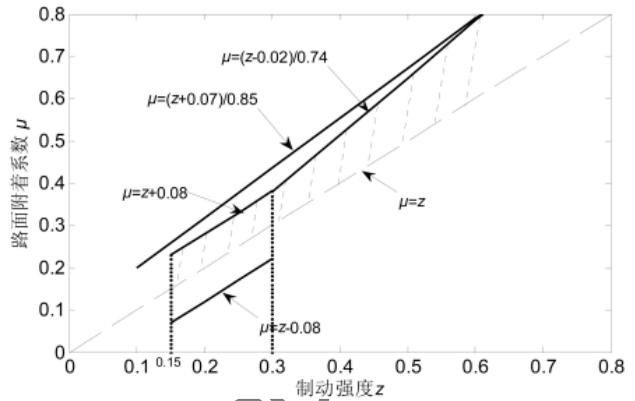


图4 ECE 法规确定的 N3 类车辆不同制动强度下的路面附着系数范围

设前后轴的制动力分配系数  $\gamma = F_{br}/F_b$ ,则理想制动力分配系数为:

$$\gamma = \frac{\cos\alpha L_b + zh_g}{\cos\alpha L} \quad (3)$$

前后轴附着系数利用率分别为:

$$\begin{cases} \mu_f = \frac{\gamma \cdot zL}{L_b \cos\alpha + zh_g} \\ \mu_r = \frac{(1-\gamma) \cdot zL}{L_a \cos\alpha - zh_g} \end{cases} \quad (4)$$

(1) 当制动强度  $z < 0.3$  时,前、后轴附着系数满足  $\mu_f \leq \frac{z+0.07}{0.85}$ ,  $\mu_r \leq \frac{z+0.07}{0.85}$ ,  $\mu_f > \mu_r$ ,则前后轴制动力分配系数满足:

$$\begin{cases} \gamma \leq \frac{z+0.07}{0.85} \cdot \frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{zL} \\ \gamma \geq 1 - \frac{z+0.07}{0.85} \cdot \frac{L_a \cos\alpha - zh_g}{zL} \\ \gamma > \frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{L \cos\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 当制动强度  $z \geq 0.3$  时,前、后轴附着系数满足  $\mu_f \leq \frac{z+0.07}{0.85}$ ,  $\mu_r \leq \frac{z-0.0188}{0.74}$ ,  $\mu_f > \mu_r$ ,则前后轴制动力分配系数满足:

$$\begin{cases} \gamma \leq \frac{z+0.07}{0.85} \cdot \frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{zL} \\ \gamma \geq 1 - \frac{z-0.0188}{0.74} \cdot \frac{L_a \cos\alpha - zh_g}{zL} \\ \gamma > \frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{L \cos\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

为了避免后轮先抱死,根据式(5)、(6)可得车辆在平坦路面及坡度路面制动时的制动力分配曲线需满足关系式:

$$\frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{L \cos\alpha} \leq \gamma \leq \frac{z + 0.07}{0.85} \cdot \frac{L_b \cos\alpha + zh_g}{zL} \quad (7)$$

根据分析可知,按照 I 曲线进行制动力分配时,前后轴制动力分配系数较小,车辆稳定性较好,但制动能量回收效率较低;按照 ECE 法规曲线进行制动力分配时,前后轴制动力分配系数较大,前轴附着系数利用率大,制动能量回收效率较高,但车辆的稳定性会降低。

### 1.3 车辆制动控制模式

在车辆制动过程中,需根据不同的工况、车速、电池 SOC 值、道路坡度及制动强度等进行制动模式的切换,如图 5 所示,且需保证模式转换过程的平稳性及安全性,以便使制动性能达到最优。模糊逻辑控制器因具有很强的自适应性及鲁棒性,非常适合应用于制动模式切换过程中。在此为了保证好的制动性能,本文设计了双模糊逻辑制动控制策略,分别用来确定前后轴的制动力分配及前轴上机械制动与再生制动间的分配,这样既可以提高能量利用率,又可以保证车辆的稳定性。

### 2 双模糊逻辑制动策略

本文设计如图 6 所示的双模糊逻辑制动策略,设定前后轴制动力分配系数为  $\gamma = F_{bf}/F_b$ ,前轴再生制动力分配系数  $\lambda = F_{br}/F_{bf}$ 。其中,  $F_b$  由制动踏板的

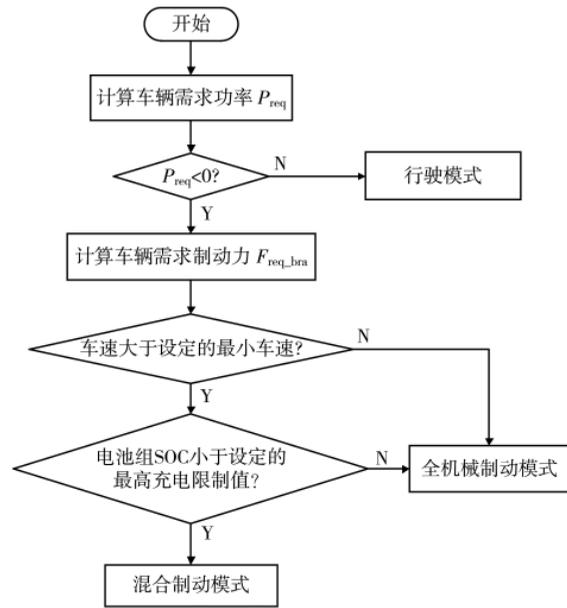


图 5 制动控制模式切换流程图

开度及地面最大附着系数确定;  $F_{br,reg}$  为车辆前轴再生制动力,由前轴电机的转速、峰值扭矩及电池组 SOC 值确定。

#### 2.1 模糊变量的确定

车辆前后轴制动力间的分配主要影响车辆的稳定性及舒适性,与车辆的行驶速度、制动强度、道路坡度等有关,因此将车速  $v$ 、道路坡度  $\alpha$  及制动强度  $z$  作为模糊逻辑控制器 1 的输入,将前后轴制动力分配系数  $\gamma$  作为模糊逻辑控制器 1 的输出。前

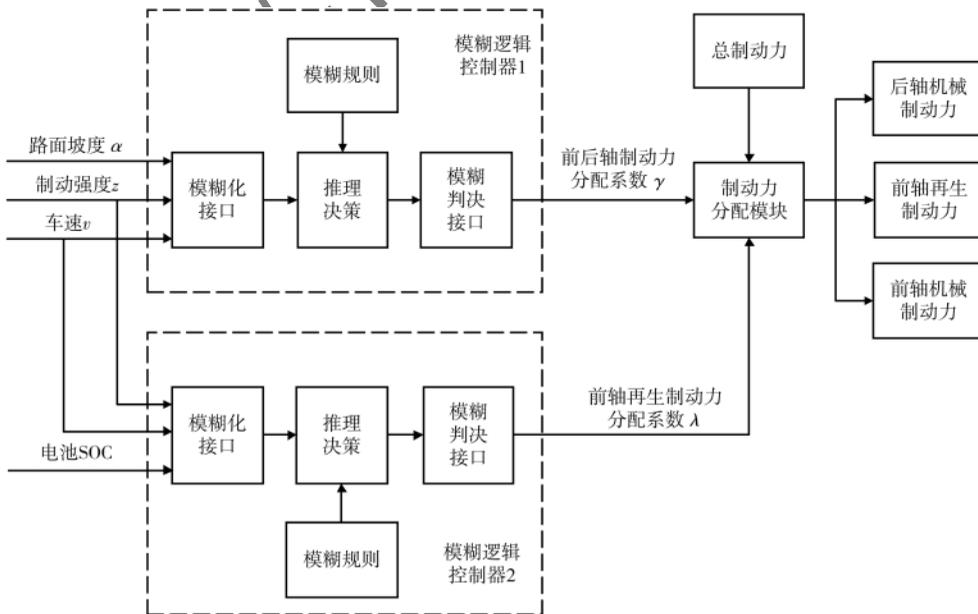


图 6 车辆制动的双模糊逻辑控制工作原理

轴再生制动与机械制动力间的分配主要影响制动能量回收效率,与车辆的行驶速度、制动强度及电池 SOC 等有关,因此将车速  $v$ 、制动强度  $z$  和电池 SOC 值作为模糊逻辑控制器 2 的输入,将前轴再生制动力分配系数  $\lambda$  作为模糊逻辑控制器 2 的输出。

## 2.2 变量模糊化

由于当车辆行驶速度很低( $v < 12 \text{ km/h}$ )时电动机转速太低,无法回收能量,因此设定  $v \in [12, 100]$ ,模糊子集为  $v = \{S, M, B\}$ ;道路坡度  $\alpha \in [0, \pi/6]$ ,模糊子集为  $\alpha = \{S, B\}$ ;制动强度  $z \in [0, 0.61]$ , $z$  在模糊控制器 1 中模糊子集设定为  $z = \{VS, S, M, B, VB\}$ ;控制器 1 的输出量  $\gamma \in [0.4, 1]$ ,模糊子集为  $\gamma = \{VS, S, MS, MB, B, VB\}$ 。

在再生制动过程中,若电池 SOC 值超过允许充电的最大限值  $\text{SOC}_{\max} = 0.9$ ,允许放电的最低限值  $\text{SOC}_{\min} = 0.2$ ,因此设定  $\text{SOC} \in [0.2, 0.9]$ ,模糊子集为  $\text{SOC} = \{S, B\}$ ;模糊控制器 2 中制动强度  $z = \{S, M, B\}$ ;控制器 2 的输出量  $\lambda \in [0, 1]$ ,模糊子集  $\lambda = \{S, M, B\}$ 。

## 2.3 模糊规则及模糊推理

### 2.3.1 模糊规则

本文设定模糊规则如下:

(1)当车辆的行驶速度很高时,为保证制动时间及制动的平稳性,再生制动逐渐退出,机械制动逐渐增大;当车速处于中等大小时,在保证车辆稳定性的前提下尽可能多地回收制动能量。

(2)当电池 SOC 值接近设定最高限时,逐渐降低再生制动力分配,保护电池不过充。

(3)当制动强度较小时,尽量多地将制动力分配给再生制动进行能量回收,当制动强度逐渐增大时,逐渐加大机械制动所占比例,当制动强度很大时,再生制动完全退出,全部由机械制动承担。

(4)当行驶道路坡度较小时,尽可能多地将制动力分配给再生制动,随着坡度的增大,增大机械制动所占比例直至再生制动完全退出。

### 2.3.2 模糊推理

基于以上设计原则,两个模糊控制器的模糊规则设计如表 1 和表 2 所示。

## 3 多目标优化策略

### 3.1 制动性能评价指标

混合动力车辆制动性能的主要评价指标可用制动能量回收量、制动能量回收率、制动过程的稳定性等表示,本文中采用制动能量回收量和制动过

表 1 模糊逻辑控制器 1 的模糊规则

$\gamma$	$v$				
	S	M	B		
$z$	VS	VB	VB	B	$\alpha$
	S	B	MB	MB	
	M	MS	MS	S S	
	B	MS	S	S	
$z$	VB	MS	S	S	$\alpha$
	VS	VB	B	S	
	S	MB	MS	VS	
	M	MS	S	S B	
$z$	B	S	S	S	$\alpha$
	VB	S	S	S	

表 2 模糊逻辑控制器 2 的模糊规则

$\lambda$	$v$				
	S	M	B		
$z$	S	B	B	M	$\text{SOC}$
	M	B	M	S S	
	B	M	M	S	
$z$	S	M	M	S	$\text{SOC}$
	M	M	S	S B	

程的稳定性来评价再生制动性能。

制动能量的回收量:用制动过程中回收到的最大能量来表示,可表示为  $E_{m,reg} = \int P_{m,reg} dt$ ,其中  $P_{m,reg} = \omega_m \cdot T_m \cdot \eta = \omega_m T_m f(T_{m,reg}, n_m, \text{SOC})$  为电动/发电机在馈电状态下的最大输出功率。公式中的  $T_{m,reg}$  为发电机转矩,与当前转速下电机峰值扭矩、电池最大充电功率、ECE 法规确定的电机最大可用转矩等有关。

制动过程的稳定性:与车辆前后轮上的制动力分配有关,当后轮先抱死时,车辆将产生侧滑;当前轮先抱死时,车辆将失去转向能力,因此当前后轮同时抱死(即前后轮制动力分配曲线为 I 曲线)时,制动稳定性最好。此处采用实际前后轴制动力分配系数  $\gamma$  与按 I 曲线分配时前后轴制动力分配系数  $\gamma_1$  的偏差量的总和进行评价,定义为制动稳定性指标  $S_r$ ,即  $S_r = \int |\gamma - \gamma_1| dt$ 。

上文所设计的模糊逻辑控制器的模糊子集及隶属度函数都是根据经验设定的,无法保证在此参数下车辆的制动性能最优,因此应用智能算法对模糊逻辑控制器的模糊子集边界及隶属度函数进行优化,可以提高车辆的整体制动性能。

### 3.2 优化参数的确定及优化原则

根据约束条件及经验判断,设定需优化的模糊逻辑控制器参数如图 7 所示。为降低算法的复杂性及计算量,本文在综合优化难度和优化精度的前提下,尽量减少待优化参数。设定每个模糊量的论域范围不变,每个模糊子集的中间值不变,每个模糊子集以中间值为中心对称分布,生成 10 个待优化参数。

制动策略的优化原则为:

(1) 当车辆行驶速度较低时,尽量提高再生制动能量回收量,即  $E_{m\_reg}$  最大。

(2) 当车辆行驶速度很高或车辆制动强度很大时,优先保证车辆制动稳定性,使车辆制动稳定性指标最优,即  $S_r$  最小。

将上述多目标优化问题表达为数学形式即为:

$$\begin{cases} \max & y_1 = E_{m\_reg}(x) \\ \min & y_2 = S_r(x) \end{cases}, x = [x_1, x_2, \dots, x_{10}] \quad (8)$$

### 3.3 优化策略

在本文设计的制动策略多目标优化问题中,优化目标函数为再生制动回收能量(目标 1)和制动稳定性指标  $S_r$ (目标 2),在当前粒子( $E'_{m\_reg}$  &  $S'_r$ )与个体历史最优粒子( $E_{m\_reg}$  &  $S_r$ )互相都不能支配对方时,群体最优位置  $gbest$  不能简单地随

机选择其中之一,目标 2 的优先级需高于目标 1。依据以上分析,设计了适用于本文制动策略的最优解集选择机制,如图 8 所示。

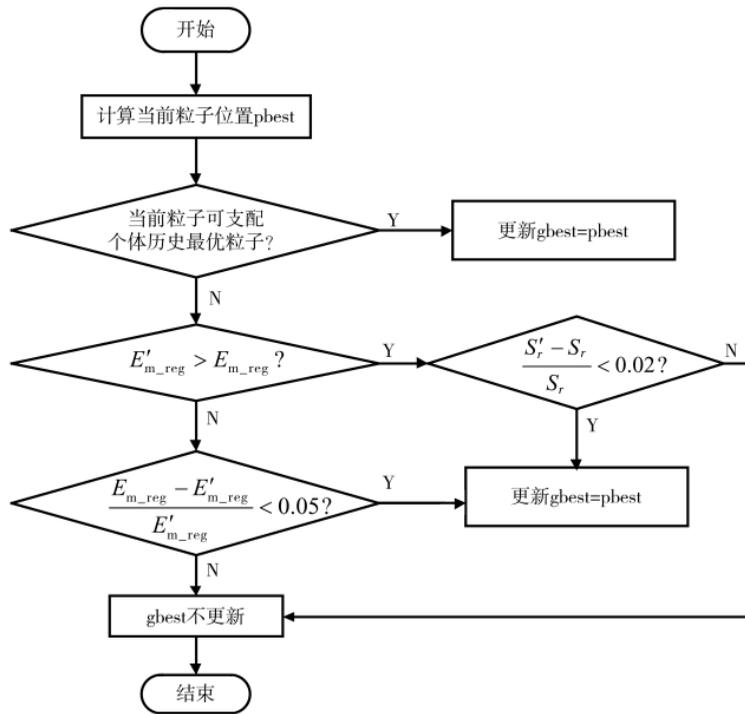


图 8 制动策略的最优解集选择机制

### 3.4 多目标粒子群优化(MOPSO)算法设计

如果粒子群算法中的参数设置不够合理,粒子群算法会无法收敛,或较早陷入局部极值点,出现

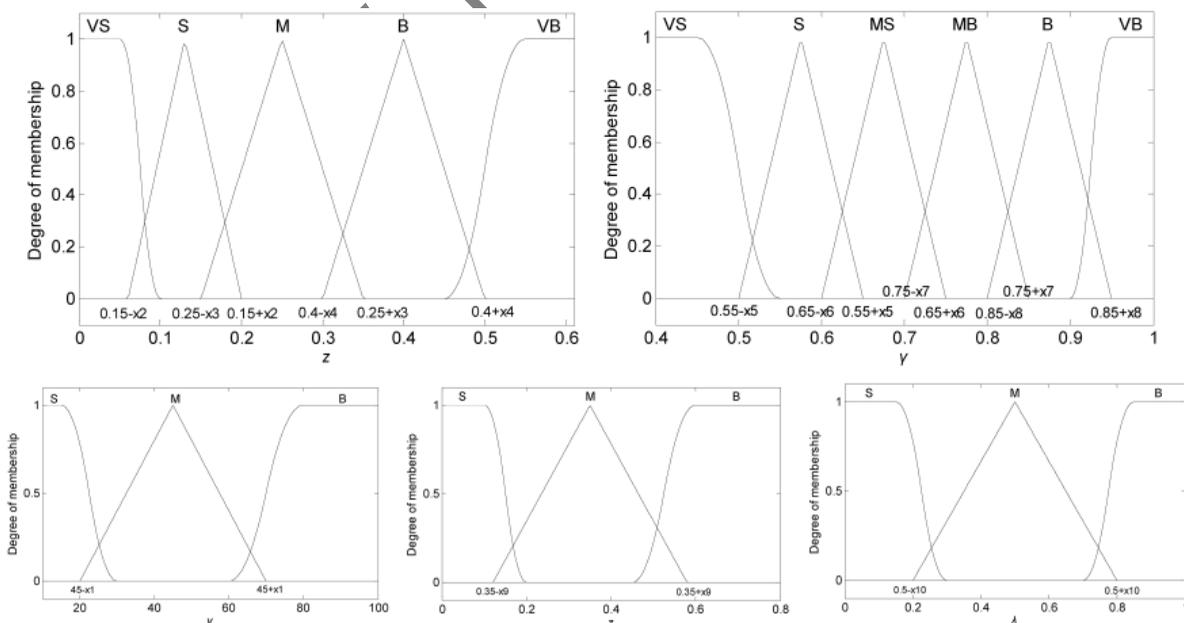


图 7 待优化的模糊逻辑控制器参数设置

早熟现象。为了提高算法的效率和精度,本文采用带有收缩因子的粒子群算法,在速度和位置更新中加入收缩因子  $\varphi = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|}$ ,  $C = c_1 + c_2 (C > 4)$ , 其中  $c_1, c_2$  为学习因子,粒子速度和位置更新公式如式(9)所示:

$$\begin{cases} v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + c_1 r_1 [p_{i,j}(k) - x_{i,j}(k)] \\ \quad + c_2 r_2 [p_{g,j}(k) - x_{i,j}(k)] \\ v_{i,j}(k+1) = \varphi \cdot v_{i,j}(k+1) \\ x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \end{cases} \quad (9)$$

粒子的适应度值(目标函数值)通过调用 Simulink 模型计算车辆制动能量回收量和制动稳定性指标得出, MOPSO 的具体实现过程如图 9 所示。

#### 4 制动策略仿真实验

为验证所设计的双模糊逻辑控制策略及多目标粒子群优化算法的正确性及实用性,在 Simulink 平台上搭建了应急救援混合动力车辆的仿真模型,编写了多目标粒子群优化算法对仿真模型中的模糊变量进行优化,并对优化前后的模糊逻辑控制策略进行离线仿真。搭建的顶层仿真模型如图 10 所示,为保证本文制动策略在多种路况下的有效性,进行多目标优化时的仿真工况采用 UDDS-HWFET 混合工况,速度曲线如图 11 所示。从图中可以看出,此混合工况涵盖了低速、中速及高速三种速度范围,涵盖了一般制动、紧急制动等制动状态,很适合用于本文制动策略的设计及验证。

根据本文设计的最优解选择机制,应用多目标

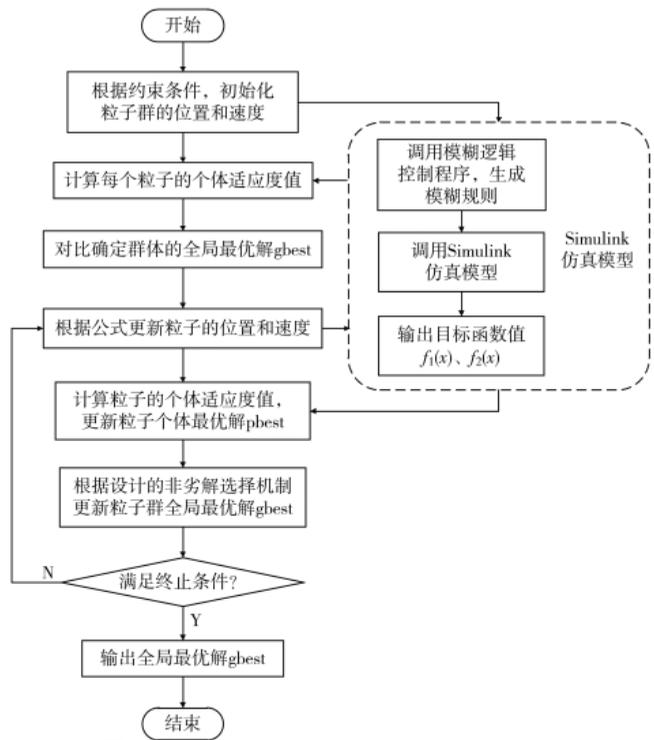


图 9 MOPSO 算法流程图

粒子群优化算法对设定的  $x_1 \sim x_{10}$  共 10 个参数进行优化。选定群体粒子数量  $N=100$ , 迭代次数  $M=100$ , 得出的优化目标函数的适应度值如图 12 所示。优化前后的制动能量回收量与制动稳定性指标随时间的变化曲线如图 13 所示。从图中可以看出,经过 30 次迭代后制动回收能量总量由 3.985 0 提高到 4.076 2, 经过 70 多次迭代后制动稳定性指标由 548.73

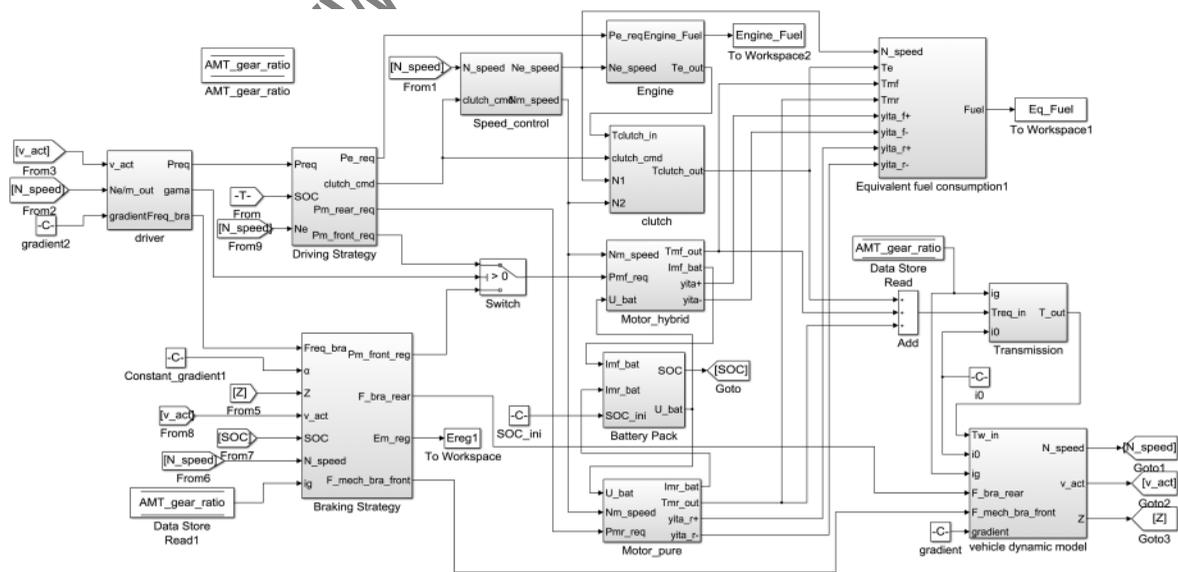


图 10 混合动力应急救援车辆 Simulink 顶层仿真模型

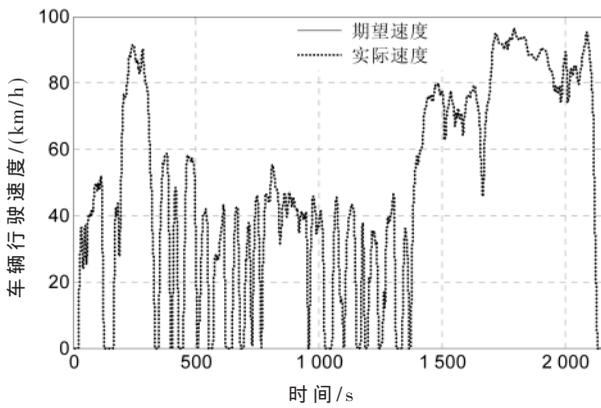


图 11 UDDS-HWFET 混合工况下的速度曲线

下降到 530.71, 车辆的再生制动性能得到了整体提升。

仿真周期内 SOC 值随时间变化的曲线如图 14 所示, 可以看出, 在设定的初始 SOC 值相同的情况下, 经过仿真时间内电池组的充放电后, 最终的 SOC 值基本一致(优化前为 0.609 4, 优化后为 0.608 6),

但中间过程中优化后的算法使得电池组最大充电量及最大放电量都更多, 这样可以充分发挥电池组在混合动力车辆能源分配中的作用, 提高车辆的燃油经济性及能源利用率。

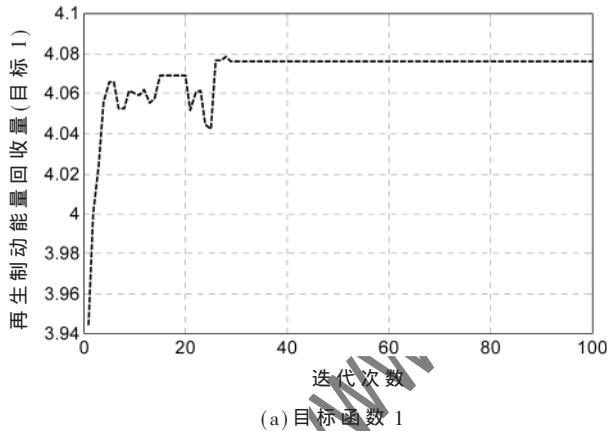
### 5 结论

本文在前期建立的重型应急救援车辆混合动力系统整车模型的基础上, 研究设计了适用于本类型车辆的再生制动策略, 在保证车辆制动稳定性的同时, 进一步提高了车辆的能源利用率。

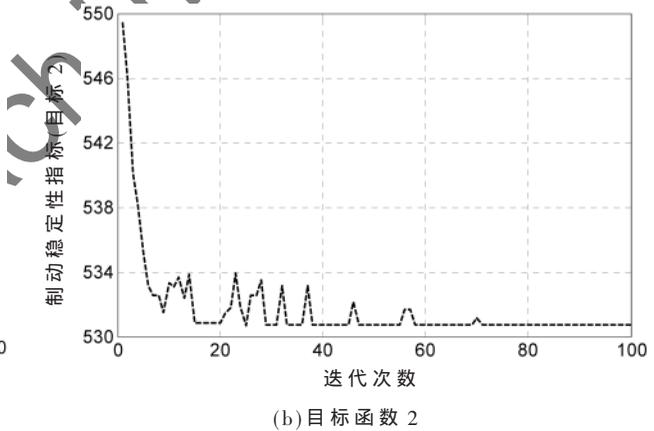
(1) 双模糊逻辑制动策略使重型应急救援车辆制动力分配更合理。相比于单模糊逻辑控制器, 应用双模糊逻辑控制器的制动力分配更合理。

(2) 基于车速和制动强度的再生制动能量回收策略能够保证优化目标及待优化参数的合理性及实用性。

(3) 多目标粒子群优化算法使双模糊逻辑再生制动控制策略更优化、更精确。经仿真实验验证本文设计的优化方案对应应急救援车辆双模糊制动策

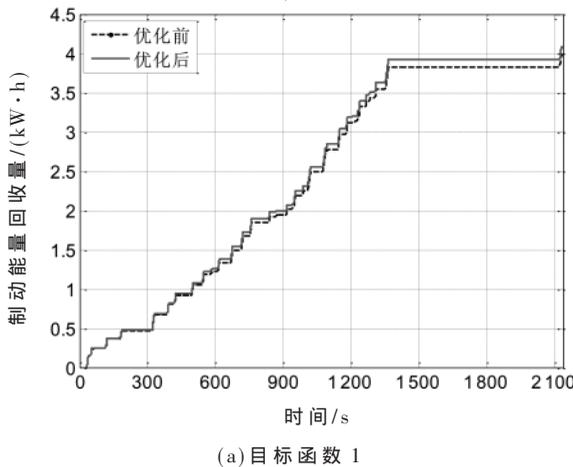


(a) 目标函数 1

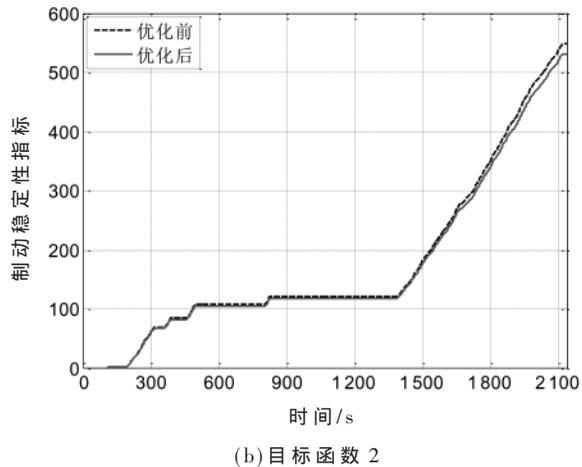


(b) 目标函数 2

图 12 目标函数优化的适应度曲线



(a) 目标函数 1



(b) 目标函数 2

图 13 优化前后的目标函数曲线

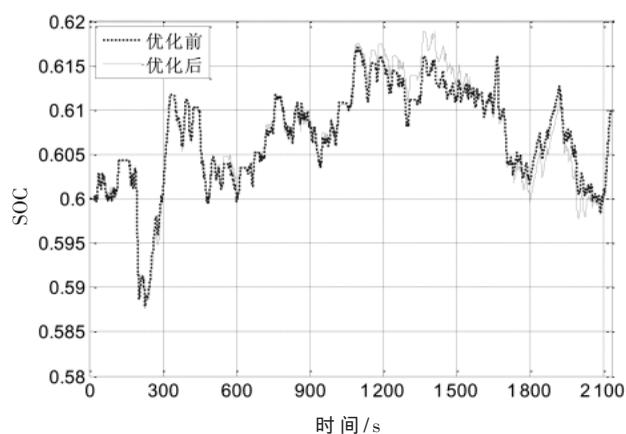


图 14 仿真周期内电池组 SOC 变化曲线

略具有很好的优化效果。

#### 参考文献

- [1] JI F Z, PAN Y, ZHOU Y, et al. Energy recovery based on pedal situation for regenerative braking system of electric vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(1): 144-173.
- [2] 张炳力, 闻静, 黄鹤, 等. 智能纯电动汽车再生制动力控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 13-18.
- [3] 张振. 基于 ECE 法规的纯电动汽车能效优化制动力分配策略[J]. 机电一体化, 2019, 25(4): 8-13.
- [4] 孙大许, 兰凤崇, 陈吉清. 基于 I 线制动力分配的四驱纯电动汽车制动能量回收策略的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(12): 1057-1061.
- [5] 王虎. 基于制动强度的能量回收控制方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(4): 417-422.
- [6] 彭栋, 殷承良, 张建武. 基于模糊控制的并联式混合动力汽车制动控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(4): 756-761.
- [7] 李峰, 谷中丽, 刘晓星. 混合动力履带车辆机电联合制动模糊控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(3): 221-227.
- [8] 张丹红, 周加洋, 苏义鑫. 基于模糊逻辑的 HEV 再生制动能量回收的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2011, 33(5): 717-720.
- [9] HE H W, WANG C, JIA H. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for

- electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 624-629.
- [10] HE H W, WANG C, JIA H, et al. An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114172.
- [11] LI Q, HUANG W Q, CHEN W R, et al. Regenerative braking energy recovery strategy based on Pontryagin's minimum principle for fuel cell/supercapacitor hybrid locomotive[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(11): 5454-5461.
- [12] FRIES M, KRUTTSCHNITT M, LIENKAMP M. Operational strategy of hybrid heavy-duty trucks by utilizing a genetic algorithm to optimize the fuel economy multi-objective criteria [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3668-3675.
- [13] CAO X H, ISHIKAWA T. Optimum design of a regenerative braking system for electric vehicles based on fuzzy control strategy[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(S1): S186-S187.
- [14] PRASANTHI A, SHAREEF H, ASNA M, et al. Optimization of hybrid energy systems and adaptive energy management for hybrid electric vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114357.
- [15] LI L, ZHANG Y B, YANG C, et al. Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus[J]. Energy Convers Manage, 2016, 111: 299-314.

(收稿日期: 2021-09-14)

#### 作者简介:

薛金红(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 电传动与智能控制。

涂群章(1969-), 通信作者, 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向: 机电传动与控制。E-mail: tqzlhj@126.com。

邵发明(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 信号处理、深度学习及软件工程。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所