

车载复合电源模糊能量管理策略优化设计

陈德海, 徐王娟, 华 铭

(江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对电动汽车复合电源模糊能量管理, 传统模糊控制依赖专家经验存在精度不高、自适应性弱等不足, 设计了一种基于改进布谷鸟搜索算法 (ICS) 优化的模糊控制方法; 在 Matlab/Simulink 平台上建立车载复合电源模糊控制器, 采用 ICS 算法对模糊控制器中的隶属度函数参数进行优化, 然后将其嵌入到 Advisor 软件中复合电源电动汽车模型进行仿真与分析; 结果表明, 与传统模糊控制相比较, 该方法能更好发挥超级电容性能优势, 减缓了电池输入、输出功率且整车能耗经济性得到提升。

关键词: 电动汽车; 复合电源; 改进布谷鸟搜索算法; 控制策略

Optimization Design of Fuzzy Energy Management Strategy for Vehicle-mounted Hybrid Energy Storage System

Chen Dehai, Xu Wangjuan, Hua Ming

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Aiming at the fuzzy energy management of hybrid energy storage system (HESS) in electric vehicle, the traditional fuzzy control, which relies on expert experience, has the disadvantages of low accuracy and poor adaptability. A improved cuckoo search (ICS) algorithm optimization fuzzy control method is designed. Establishing fuzzy controller for vehicle-mounted HESS based on Matlab/Simulink platform, and the ICS algorithm is used to optimize the parameters of membership function in fuzzy controller. Then, the optimized fuzzy controller is embedded into the HESS with electric vehicle of Advisor software for simulation and analysis. The result shows that compared with the traditional fuzzy control, the designed method can more effectively exert ultracapacitor performance advantage, slow down the input and output power of the battery, and energy consumption economy of the vehicle is raised.

Keywords: electric vehicle; hybrid energy storage system; improved cuckoo search algorithm; control strategy

0 引言

面对各种复杂交通环境, 电动汽车动力电池频繁工作在启动、加速或爬坡等短时大功率需求下, 承受大电流冲击, 对其使用寿命产生严重削弱^[1]。超级电容作为一种新型储能装置, 具有高功率密度、快速充放电和循环使用寿命长等优点已在诸多行业得到应用^[2]。在单一电池电动汽车中加入超级电容及相关附件, 与动力电池有机组合成复合电源系统, 可发挥两种储能装置优点。目前, 对车载复合电源能量管理策略研究中常用方法是逻辑门限控制^[3], 其主要参照工程经验设定参数值, 具有不依赖路况信息、简单易实现。但不能保证车载复合电源能量合理分配。文献 [4-7] 采用离线优化控制策略, 在理论上能达到全局控制最优, 但需已知全局工况信息。文献 [8] 提出了一种基于模型预测控制方法, 能对车载复合电源能量合理分配,

但该方法要求较高模型精度, 还需提前预知工况信息。基于模糊控制的车载复合电源能量管理策略^[9-10], 不需要构建精确、复杂的数学模型, 具有较好鲁棒性, 可实现车载复合电源能量分配。但模糊控制器依赖专家经验, 通常情况下难以获得全局控制最优。为此, 采用生物启发式搜索算法对模糊控制器进行优化, 以改善模糊控制器的控制精度及自适应性^[11]。

布谷鸟算法 (Cuckoo Search, CS) 是一种基于布谷鸟巢寄生繁育和莱维飞行 (Lévy flights) 的新兴、高效生物启发式搜索算法^[12]。具有参数设置少、原理简单易实现、随机搜索路径优和全局寻优能力强等优点^[13]。目前 CS 算法已在实际问题中得到应用, 相关科研成果日益倍增。但 CS 算法参数设置固定, 在迭代后期可能面临收敛速度慢、容易陷入局部最优陷阱等问题, 对最优解的质量产生影响。针对此问题, 在原 CS 算法基础之上进行改进, 对 CS 算法中飞行步长 a 和发现概率 p_a 两个参数引入动态调整机制。将改进布谷鸟搜索算法对模糊控制器进行优化, 有助于摆脱模糊控制器中专家经验主观性, 提高控制器的精度及自适应性。

1 改进布谷鸟搜索算法原理

CS 算法模拟某些布谷鸟巢寄生繁育行为并结合莱维飞

收稿日期:2018-06-23; 修回日期:2018-07-20。

基金项目:江西省自然科学基金(20151BAB206034)。

作者简介:陈德海(1978-),男,河南南阳人,副教授,硕士生导师,主要从事新能源汽车能量预测与控制方向的研究。

通讯作者:徐王娟(1992-),男,硕士研究生,主要从事车载复合电源系统建模及其能量管理策略方向的研究。

行,能快速有效寻找问题最优解。为简述布谷鸟随机寻窝产卵过程,先假设 3 个理想状态^[14]:

- 1) 每只布谷鸟随机选择宿主巢产下一枚卵;
- 2) 具有优质卵的宿主巢将会保留至下一代;
- 3) 鸟巢数量是固定的,宿主鸟发现外来卵的概率为 p_a ($[0, 1]$),一旦宿主鸟发现外来卵则会选择弃巢或者排除巢中外来卵。

以上 3 个状态假设,把布谷鸟产下的卵看作问题新的解,该算法的实质是利用新的解或者潜在更好的解,来替换宿主巢中不好的解。CS 算法寻优搜索路径及位置更新公式如式 (1) 所示:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^t + a \oplus L(\lambda), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式 (1) 中, x_i^t 表示第 t 代的第 i 个鸟窝位置; a 是步长控制因子,控制随机搜索范围大小; \oplus 是点乘积; $L(\lambda)$ 为服从 Lévy 分布的随机搜索路径,如式 (2) 所示:

$$L(s, \lambda) \sim s^{-\lambda}, (1 < \lambda \leq 3) \quad (2)$$

式中, s 为莱维飞行所得到步长。

由发现概率 p_a 完成 CS 算法另一部分搜索。当式 (1) 更新鸟窝位置后,利用发现概率 p_a 淘汰部分鸟巢(解),再利用偏好随机游走方式在淘汰鸟巢附近生成新的鸟巢,如式 (3) 所示:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v(x_j^t - x_k^t) \quad (3)$$

式中, v 为缩放因子,服从 $(0, 1)$ 区间均匀分布; x_j^t 和 x_k^t 为第 t 代两个随机解。

由于标准 CS 算法中发现概率 p_a 和步长 a 在迭代过程中保持不变,对优化问题进行求解时,参数 p_a 和 a 大小可能会影响 CS 算法收敛速度或解的质量。若 p_a 值较小, a 值较大则会导致解的质量不高;若 p_a 值较大, a 值较小则会加快收敛速度,无法保证找到最优解。基于此,采用一种改进布谷鸟搜索算法^[15],该改进算法基于原 CS 算法基础之上,随着迭代次数增加,动态调整步长 a 和发现概率 p_a 大小,如式 (4)、(5) 和 (6) 所示:

$$c = \frac{1}{T} \ln \left(\frac{a_{\min}}{a_{\max}} \right) \quad (4)$$

$$a^t = a_{\max} \exp(c, t) \quad (5)$$

$$p_a^t = p_{a, \max} - \frac{t}{T} (p_{a, \max} - p_{a, \min}) \quad (6)$$

式中, T 为最大迭代次数; t 表示当前迭代次数; a^t 为当前迭代次数下步长,随着迭代次数增加呈现指数衰减趋势; a_{\min} , a_{\max} 分别为步长最小值和最大值; p_a^t 为当前迭代次数下发现概率,随着迭代次数增加呈现线性递减趋势; $p_{a, \min}$, $p_{a, \max}$ 分别为发现概率最小值和最大值。

通过对原 CS 算法中步长 a 和发现概率 p_a 进行改进,ICS 算法能较好地提升 CS 算法的收敛速度和解的质量。ICS 算法基本流程由如下所示:

- 1) 定义目标函数 $f(X)$, $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$
- 2) 产生 n 个鸟巢初始位置并设置算法相关参数
- 3) while ($t <$ 最大迭代次数)

- 4) 对每个巢采用式 (1) 产生新的位置(解) X_i
- 5) 计算新解 X_i 的适应值(目标函数值) f_i
- 6) 从上一代 n 个解中选择最优适应值 f_j 所对应 X_j 作为候选解
- 7) if ($f_i > f_j$) then
- 8) 用新的解代替候选解
- 9) end
- 10) 更新发现概率 p_a^t 并淘汰部分解
- 11) 由偏好随机游走产生新的解以替换淘汰的解
- 12) 保存最佳的解
- 13) 更新 $t \leftarrow t + 1$
- 14) end

2 车载复合电源结构及工作模式

2.1 车载复合电源结构

车载复合电源拓扑结构设计对其综合性能发挥有着重要影响。根据双向 DC/DC 功率转换器个数及所在位置,拓扑结构主要分为被动式、半主动式和主动式^[16]。选择半主动式拓扑结构复合电源作为研究对象,其结构示意图如图 1 所示。

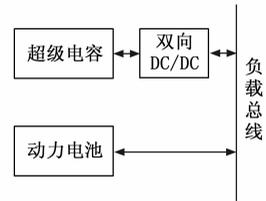


图 1 半主动式拓扑结构复合电源示意图

图 1 中,超级电容右侧端连接双向 DC/DC 功率转换器再与动力电池并联接入负载总线。其中,动力电池作为主能量源,满足整车对续航里程基本要求;超级电容作为辅助能量源,满足整车频繁启动、加速或爬坡等短时大功率需求;双向 DC/DC 功率转换器平衡两种储能装置工作电压,并负责复合电源底层能量管理工作。该结构设计可通过主动控制超级电容工作,对动力电池形成有效保护。同时,相较于其它结构类型,在经济成本方面较适中。

2.2 车载复合电源工作模式

复合电源电动汽车在行驶过程中,车载复合电源呈现不同工作模式。汽车启动时,超级电容能在短时间内完成大功率输出,达到汽车起步要求。当汽车行驶在中低速或者低功率需求工况下,主要由动力电池进行工作,并监测超级电容 SOC_{uc} (荷电量)是否需要为其充电。当行驶在急加速、爬坡或高速等工况下,整车需求功率增大,由动力电池和超级电容共同工作以满足整车功率需求,同时应合理地分配二者输出功率比例,限定动力电池处在大电流下工作。当整车处在在再生制动路况下,电机处于发电状态,根据动力电池 SOC_{bat} 和超级电容 SOC_{uc} 大小,优先选择对超级电容进行再生能量回收,其次选择由动力电池进行能量回收。

3 车载复合电源模糊能量管理策略

根据电动汽车处在驱动模式和制动模式下复合电源呈现

不同工作状态，设计了两个并联模糊控制器，如图 2 所示。

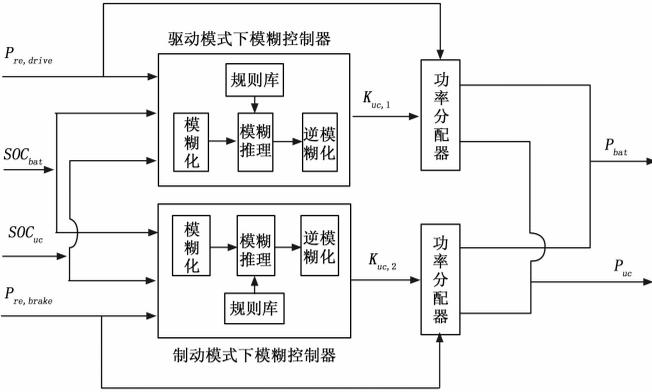


图 2 车载复合电源双模糊控制器结构示意图

模糊控制器输入量分别为整车驱动/制动需求功率 P_{re} 、 SOC_{bat} 和 SOC_{uc} ，输出量为 K_{uc} （超级电容功率分配系数）。模糊控制器首先对这 3 个输入量进行模糊化处理，由规则库进行模糊推理后，再经逆模糊化运算得到功率分配系数。功率分配器根据功率分配系数大小，从而得到超级电容功率 P_{uc} 和动力电池功率 P_{bat} ，如式 (7) 和 (8) 所示：

$$P_{uc} = P_{re} \times K_{uc} \quad (7)$$

$$P_{bat} = P_{re} - P_{uc} \quad (8)$$

为便于模糊控制器实现及后续优化计算，首先将各输入、输出量的隶属度函数论域统一转换为 $[1, 11]$ 连续区间上，各输入、输出量的模糊子集和隶属度函数如表 1 和图 4、图 5 所示。对于整车驱动需求功率 $P_{re,drive}$ 和制动需求功率 $P_{re,brake}$ ，这里的“1”表示两种需求功率均为 0，“11”表示两种需求功率均最大。对于动力电池 SOC_{bat} ，“1”表示 SOC_{bat} 为 0.2，“11”表示 SOC_{bat} 为 0.9。对于超级电容 SOC_{uc} ，“1”表示 SOC_{uc} 为 0.4，“11”表示 SOC_{uc} 为 1。对于功率分配系数 $K_{uc,1}$ 和 $K_{uc,2}$ ，“1”表示这两种模式下功率分配系数均为 0，“11”表示两种模式功率分配系数均为 1。各变量取值范围均位于 $[1, 11]$ 连续区间上。模糊隶属度函数采用图 3 和图 4 所示的交叠梯形和三角形，以便后续参数调整。

表 1 各输入、输出量的模糊子集

输入、输出变量		模糊子集
整车功率	驱动	(VS,S,M,B,VB)
	制动	(S,M,B)
电池荷电量	驱动	(L,M,H)
	制动	(L,M,H)
超级电容荷电量	驱动	(L,M,H)
	制动	(L,M,H)
功率分配系数	驱动	(VS,S,M,B,VB)
	制动	(VS,S,M,B)

模糊规则是模糊控制器的核心。在已确定各输入、输出变量模糊子集和隶属度函数后，列写出模糊控制规则，

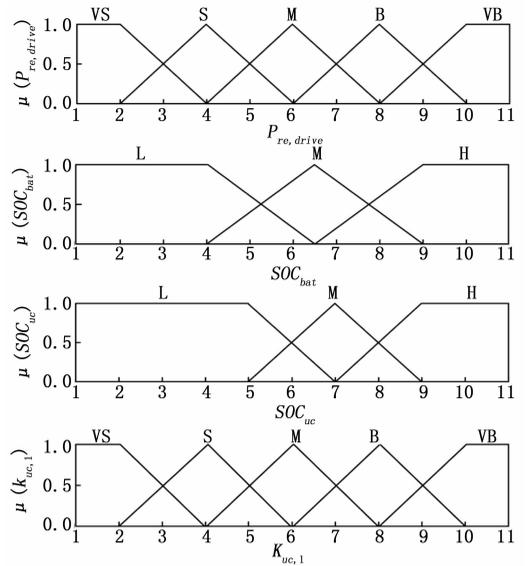


图 3 驱动模式下输入、输出量的隶属度函数

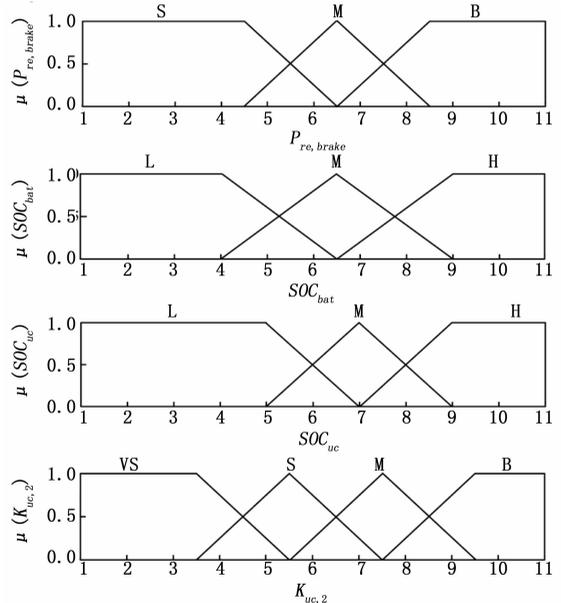


图 4 制动模式下输入、输出量的隶属度函数

见表 2 和表 3。这里所选取的模糊控制规则形式为：

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i,$$

$$\text{Then } y \text{ is } B^i, i = 1, 2, \dots, n$$

其中： R^i 表示第 i 条规则； x_i 为输入量； y 为输出量。逆模糊化运算采用重心法。

4 改进布谷鸟搜索算法优化的模糊控制器

模糊控制器中隶属度函数和模糊控制规则的选取依赖专家经验，带有较强的主观性，通常难以实现全局控制最优。由于模糊控制存在非线性，传统优化算法对其优化效果欠佳。布谷鸟算法是作为一种高效的元启发式智能算法，能在复杂空间中实施有效搜索。因此，将改进布谷鸟算法与模糊控制器相结合，保持模糊控制规则不变，利用 ICS

表 2 驱动模式下模糊控制规则表

K_{uc-1}	$P_{re-drive}$					
		VS	S	M	B	VB
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = L)$	L	VS	VS	S	S	S
	M	VS	VS	S	M	M
	H	VS	VS	VS	VS	S
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = M)$	L	S	S	S	M	B
	M	VS	S	M	B	B
	H	VS	S	M	B	B
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = H)$	L	S	M	B	VB	VB
	M	VS	S	M	B	VB
	H	VS	S	S	M	M

表 3 制动模式下模糊控制规则表

K_{uc-2}	$P_{re-brake}$			
		S	M	B
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = L)$	L	B	M	M
	M	B	B	B
	H	B	B	B
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = M)$	L	B	S	M
	M	B	M	M
	H	B	M	M
$SOC_{bat} (SOC_{uc} = H)$	L	VS	VS	VS
	M	S	S	M
	H	VS	S	B

算法对模糊控制器中的隶属度函数参数进行优化, 以期获得最佳模糊能量管理策略。

4.1 隶属度函数优化参数编码

针对图 3 和图 4 中各输入、输出量的隶属度函数, 选择隶属度函数顶点坐标作为待优化参数。以整车驱动需求功率隶属度函数为例, 如图 5 所示, 需要确定隶属度函数优化参数在 $[1, 11]$ 区间是实数 x_1, x_2, \dots, x_5 。余下各变量隶属度函数待优化参数确定与此方法类似。

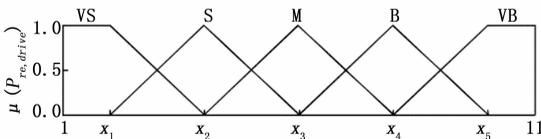


图 5 驱动模式下需求功率隶属度函数的优化参数

因此, 在这两种模式共确定 29 个隶属度函数优化参数。对这 29 个优化参数进行编码作为 ICS 算法搜索空间维数大小, 其编码集合 X 如式 (7) 所示:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{29})^T \quad (7)$$

其中: $1 \leq x_1, x_2, x_3, \dots, x_{29} \leq 11$ 。

4.2 目标函数选择

为表征 ICS 算法中布谷鸟随机寻窝产下的卵优劣, 需定义一个目标函数。本文研究目标是对车载复合电源能量合理分配, 尽可能地让超级电容多工作在大功率需求工况下, 避免电池受大电流充放电影响, 使电池在全程工况里

程范围内平均输入、输出功率最小。目标函数定义为单位里程动力电池输入输出功率之和最小, 如式 (8) 所示:

$$\min f(X) = \sum P_{bat}/distance \quad (8)$$

式中, $\min f(X)$ 为目标函数; $distance$ 为工况行驶里程;

4.3 ICS 算法优化流程

利用 ICS 算法对车载复合电源模糊能量管理策略中的模糊控制器优化的具体流程如下:

- 1) 对各输入、输出量的隶属度函数优化参数进行编码作为 ICS 算法搜索空间维数大小并设置搜索范围;
- 2) 初始化生成 n 个鸟窝初始位置并设置最大迭代次数 T 、发现概率 p_a 及步长 a 最大值和最小值;
- 3) 计算在初始位置处的目标函数适应度大小;
- 4) 采用式 (1) 更新新的解;
- 5) 计算新解适应度值, 若新解的适应度更高, 则用新解替换旧解;
- 6) 由式 (6) 更新发现概率并丢弃部分解, 用偏好随机游走方式产生相同数量的解以替换丢弃的解;
- 7) 计算当前迭代次数下所有解的适应度并输出当前最优解;
- 8) 判断是否满足终止条件, 若满足则获得最优解, 进行解码, 从而获得一组最佳隶属度函数参数; 反之则跳转至步骤 4。ICS 算法参数设置为: $p_{a,\min} = 0.05; p_{a,\max} = 1; a_{\min} = 0.005; a_{\max} = 0.5; T = 500; n = 30$ 。

5 仿真结果分析

为验证所设计的 ICS 算法优化的复合电源模糊能量管理策略有效性, 在 Advisor 软件平台上搭建复合电源电动汽车仿真模型, 仿真基本参数见表 4。采用离线优化方式求解模糊控制器, 将已优化的模糊控制器嵌入到所建立的复合电源电动汽车模型中, 选择 UDDS (美国城市道路循环工况) 和 NEDC (新欧洲行驶循环试验工况) 下进行仿真试验, 并与未优化的模糊能量管理策略仿真结果进行比较分析。

表 4 仿真基本参数

部件	参数	数值
整车	整备质量(m)/kg	1130
	迎风面积(FA)/m ²	2.0
	滚动半径(r)/m	0.282
双向 DC/DC	效率	0.85
动力电池	单体额定电压/V	18
	单体容量/Ah	60
	数量/个	20
超级电容	单体额定电压/V	2.7
	单体额定容量/F	500
	数量/个	120

图 7 和图 8 为车载复合电源分别在 UDDS 和 NEDC 工况下依次采用传统模糊控制和本文所设计方法得到的动力电池功率变化曲线。从图中可以看出, 同一工况下, 相比

于 Fuzzy 控制，基于 ICS-Fuzzy 控制的车载复合电源，当整车处在峰值功率或大功率需求时，动力电池输入、输出功率幅度得到有效降低，有效缓解了动力电池工作负荷，避免电池受短时大电流充、放电影响而导致其使用寿命降低。说明该方法能对车载复合电源能量合理分配，让超级电容的性能优势得到较好发挥，改善了动力电池工作环境。

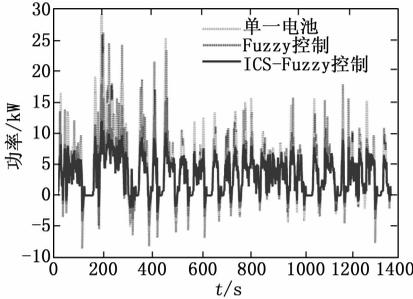


图 6 UDDS 工况下动力电池功率曲线

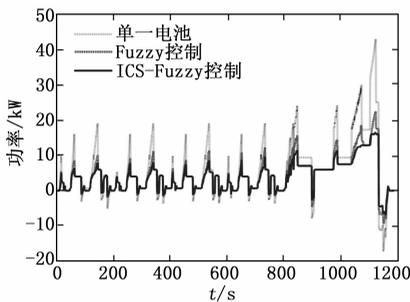


图 7 NEDC 工况下动力电池功率曲线

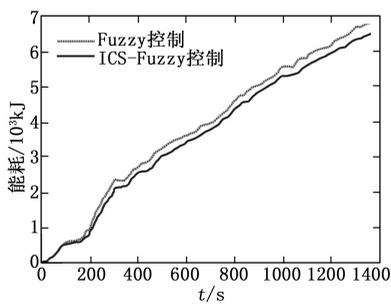


图 8 UDDS 工况下总能耗曲线

图 8 和图 9 为车载复合电源分别在这两种工况下总能耗曲线。从图中可以看出，同一工况下，在起始阶段部分，二者能耗曲线相近。当整车频繁处在启动、加速、高速和再生制动工况，基于 ICS-Fuzzy 控制的能耗曲线变化相对缓慢，特别是在再生制动工况时，因超级电容具有快速充放电特性，能回收更多再生能量作为储备电能，使得能耗曲线走势变得相对平缓。

表 5 为车载复合电源在 UDDS 和 NEDC 工况下能耗经济性比较。从表中可以看出，相较于 Fuzzy 控制，基于 ICS-Fuzzy 控制在单个 UDDS 工况和 NEDC 工况下总能耗分别降低了 5.965%、6.905%。换言之，在其它条件不变情况下，在同一工况下分别延长了 0.72 km 和 0.75 km。

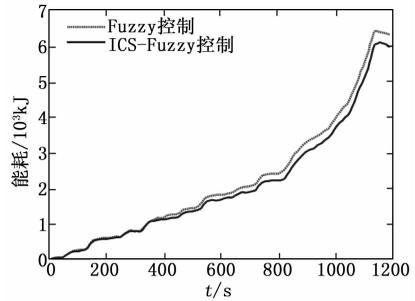


图 9 NEDC 工况下总能耗曲线

表 5 两种工况下能耗经济性比较

行驶工况	Fuzzy(kJ)	ICS-Fuzzy(kJ)	偏差/%
UDDS	6.823×10^3	6.416×10^3	-5.965
NEDC	6.314×10^3	5.878×10^3	-6.905

6 结语

本文对电动汽车车载复合电源模糊能量管理策略进行研究，设计了一种基于改进布谷鸟算法优化的模糊控制方法，以实现车载复合电源能量分配有效控制，在整车峰值功率或大功率需求时，减缓了动力电池输入、输出功率。该方法根据整车在两种行驶状态下的需求功率、动力电池 SOC 和超级电容 SOC 来控制超级电容功率分配系数，进而控制动力电池功率；同时以单位里程动力电池功率最小作为优化目标，采用改进布谷鸟搜索算法对模糊控制器中的隶属度函数参数进行优化。结果表明，本文所设计方法与传统模糊控制方法相比，能有效降低动力电池输入、输出功率幅度，缓解动力电池工作负荷。同时，经优化的模糊能量管理策略，整车能耗经济性得到提升。

参考文献:

- [1] 肖祥慧, 曾祥君, 戴作财. 一种新型电动车超级电容-蓄电池复合电源系统 [J]. 电子学报, 2017, 45 (4): 922-929.
- [2] 张雷, 晓松, 王震坡. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (16): 32-43.
- [3] 朱福顺, 何洪文, 林逸. 基于 CRUISE 的复合电源能量管理系统研究 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (1): 219-222.
- [4] 王斌, 徐俊, 曹乘刚, 等. 采用模拟退火算法的电动汽车能量管理系统优化 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49 (8): 90-96.
- [5] Wiezorek M, Lewandowski M. A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2017, 192: 222-233.
- [6] 宋传学, 周放, 肖峰. 基于动态规划的复合电源能量管理优化 [J]. 吉林大学学报 (工学报), 2017, 47 (1): 8-14.
- [7] Wegmann R, Doge V, Becker J, et al. Optimized operation of hybrid battery systems for electric vehicles using deterministic and stochastic dynamic programming [J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14: 22-38.