Dynamical Systems and Control 动力系统与控制, 2019, 8(2), 81-93
Published Online April 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/dsc
https://doi.org/10.12677/dsc.2019.82010

Optimization of Fuzzy Control Strategy for Differential Coupling Hybrid Power System Based on Genetic Algorithm

Xin Wang[1], Qing Zhang[1], Yin Wang[1], Feng Xiao[2*], Jianjun Hu[2]

[1]Power Research Institute of Chang'an Automobile, Chongqing
[2]State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing
Email: wangxin@changan.com.cn, *15079140747@163.com

Received: Mar. 6th, 2019; accepted: Mar. 17th, 2019; published: Mar. 27th, 2019

Abstract

In order to improve the economic performance and emission performance of hybrid vehicles, this paper is based on the study of the structure and working characteristics of the differential coupled power system. The ADVISOR simulation software is used to redevelop the model of the differential coupled power system. Two-input single-output fuzzy control strategy was designed for the input and the demand torque as input, and the engine was started and stopped. The 25 fuzzy rule variables were optimized using the genetic algorithm, and the vehicle performance simulation and logic were performed under UDDS conditions. The performance was compared under the threshold strategy. The results show that the optimized fuzzy control strategy can more reasonably control the start and stop of the engine of the car, and obviously improve the economy under the premise of ensuring the power of the car, and can effectively reduce the car emissions.

Keywords

ADVISOR Redevelopment, Differential Coupling Hybrid, Fuzzy Control Strategy, Genetic Algorithm

基于遗传算法的差速耦合式混合动力系统模糊控制策略优化

王　鑫[1]，张　青[1]，王　银[1]，肖　凤[2*]，胡建军[2]

[1]重庆长安汽车股份有限公司动力研究院，重庆
[2]重庆大学机械传动国家重点实验室，重庆
Email: wangxin@changan.com.cn, *15079140747@163.com

*通讯作者。

文章引用: 王鑫, 张青, 王银, 肖凤, 胡建军. 基于遗传算法的差速耦合式混合动力系统模糊控制策略优化[J]. 动力系统与控制, 2019, 8(2): 81-93. DOI: 10.12677/dsc.2019.82010

收稿日期：2019年3月6日；录用日期：2019年3月17日；发布日期：2019年3月27日

摘　要

为提高混合动力汽车的经济性和排放性能，本文基于对差速耦合式动力系统的结构和工作特征的研究，在ADVISOR仿真软件中对差速耦合式动力系统模型进行再开发，以电池电量和需求转矩为输入、发动机的启停为输出设计双输入单输出的模糊控制策略，并利用遗传算法对25个模糊规则变量进行优化，在UDDS工况下进行整车性能仿真，与逻辑门限策略下的性能进行对比。结果表明，优化后的模糊控制策略能更合理地控制汽车发动机启停，明显提高了经济性，并能有效降低汽车排放。

关键词

ADVISOR再开发，差速耦合式混合动力，模糊控制策略，遗传算法

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

目前世界上应用广泛的混联式混合动力系统当属日本 Toyota 公司研发的“Prius”混合动力系统。为了突破丰田混合动力系统(THS)专利的束缚，吉林大学汽车学院曾小华老师首次提出了利用对称式锥齿轮差速器作为动力耦合装置的新型混合动力汽车的设想[1]。文献[2]和文献[3]表明差速器应用于混联式混合动力汽车动力耦合具有可行性，为混合动力汽车的动力耦合提供了一种新的选择。文献[4]表明差速耦合式混合动力汽车虽然取消了变速器和离合器，但仍具有无级变速的功能，可通过发电机的调节，控制发动机在最佳工作区间工作，提高了经济性。文献[5]以试验的方法进一步验证了经过改造后的对称式锥齿轮差速器可以作为混联式混合动力汽车的动力耦合装置。

目前国内文献的报道主要是针对结构的可行性分析和验证，曾小华等[4]仅仅根据需求转矩，调节发电机转矩来控制发动机在高效区域工作提高了系统的经济性，而对于在整车上的应用及控制策略研究较缺乏，控制策略作为混合动力系统的核心部分，是实现低油耗、低排放的关键技术之一，本文在研究差速耦合式动力系统结构和工作特征的基础上，在 ADVISOR 中进行了控制器模型的再开发，提出了差速耦合式混合动力系统的模糊控制策略，根据电池电量 SOC 和需求转矩来模糊调节发动机开关量，以此来控制发动机的启停，以降低排放和综合油耗。同时因为遗传算法具有全局性、并行性和鲁棒性，可以优化模糊控制策略[6] [7]，使模糊控制器更加接近专家行为[8]，所以本文采用遗传算法对 25 个模糊规则变量进行优化。最后通过仿真，将优化模糊控制器后的性能与优化前及逻辑门限控制策略控制性能仿真结果进行对比，结果表明，本文采用遗传算法优化后的模糊策略以控制发动机启停在满足动力性的前提下，能大幅提高差速耦合式混合动力系统的经济性，且极大降低了排放。

2. 系统建模

2.1. 结构及工作特性

图 1 为差速耦合式混合动力系统结构图，其系统核心是对称式锥齿轮差速器。太阳轮对应左半轴齿

轮，并与发电机相连；行星架对应从动锥齿轮，与主动锥齿轮相啮合并由发动机启动；另一半轴齿轮对应齿圈，通过电机耦合，并输出转矩驱动车轮。系统输入为需求功率、发动机实际输入功率、发电机实际输入功率、驱动电机实际输入功率；输出分别为发动机需求功率、发电机需求功率、驱动电机需求功率和实际输出功率[9]。

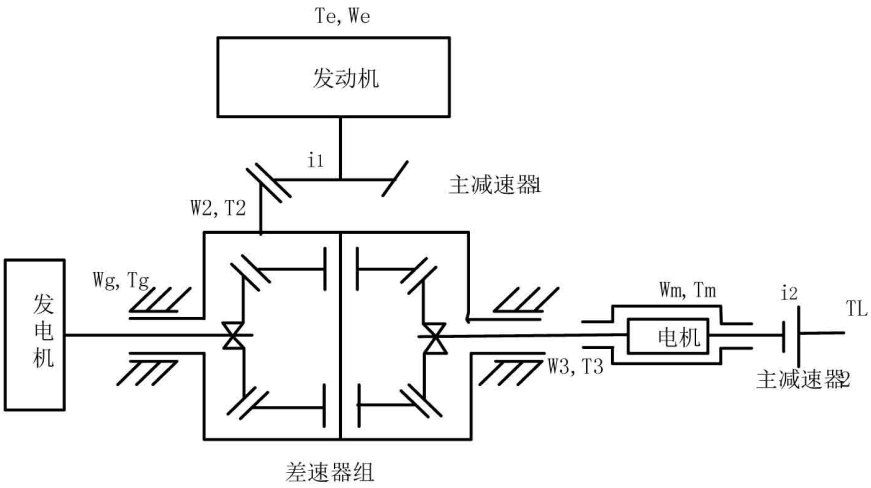

Figure 1. Differential coupling hybrid power system structure
图 1. 差速耦合式混合动力系统结构

某款车型的整车性能指标、整车系统参数分别见表 1 和表 2。

Table 1. Vehicle performance index
表 1. 整车性能指标

整车性能	性能评价指标	要求
动力性	最高车速/(km/h)	>160
	20 km/h 最大爬坡度(%)	>30
	0~100 km/h 加速时间/s	<13
经济性	百公里综合油耗/L	<4

Table 2. Vehicle system parameters
表 2. 整车系统参数

整车参数					
整车质量/kg		1386	迎风面积/m^2		1.746
车轮半径/m		0.287	滚阻系数		0.009
空阻系数		0.30	传动效率		0.85
主减速器 1 速比		1.06	主减速器 2 速比		3.48
电机	峰值功率/kw	75	发电机	额定功率/kw	15
	额定转矩/(N·m)	358		最大转矩/(N·m)	55
	基速/(r/min)	2000		最高转速/(r/min)	5500
	最高转速/(r/min)	6000		额定转速/(r/min)	2500
发动机	峰值功率/kw	43	电池	单体额定电容/(A·h)	18
	峰值转矩/(N·m)	102		单体额定电压/v	6.4
	最高转速/(r/min)	4000		串联单体个数	50

2.2. 数学模型

在差速耦合式混合动力系统中，发动机、发电机和输出到电机的输出轴三部分由差速器相互耦合(转速耦合)，通过发电机的转速调节，满足整车车速要求。输出到电机的输出轴与驱动电机磁场耦合(转矩耦合)后输出到驱动轴，满足整车转矩要求。

差速耦合式混合动力系统的核心采用对称式锥齿轮行星机构，特征参数 $K = 1$ (齿圈与太阳轮的齿数比)。根据行星齿轮结构特性，图 1 中各参数有如下动力学关系：

$$w_2 = \frac{w_e}{i_1}, w_3 = w_m \tag{1}$$

$$T_2 = T_e \cdot i_1, T_3 = T_L - T_m \tag{2}$$

$$T_L = T_3 + T_m \tag{3}$$

$$T_g = T_3 \tag{4}$$

$$T_g = T_L - T_m \tag{5}$$

$$T_e \cdot w_e = T_2 \cdot w_2 = \left(T_L - T_m\right) \cdot w_m + T_g \cdot w_g \tag{6}$$

$$2 \cdot w_2 = w_g + w_3 = w_g + w_m = \frac{2 \cdot w_e}{i_1} \tag{7}$$

$$T_g = \frac{T_2}{2} = \frac{T_e \cdot i_1}{2} \tag{8}$$

$$T_m = T_L - \frac{T_2}{2} = T_L - \frac{T_e \cdot i_1}{2} \tag{9}$$

式中，W_e、T_e 分别为发动机的输出转速和转矩；主减速器 1 和主减速器 2 的传动比分别为 i_1 和 i_2；W_g、T_g 分别为发电机的输入转速和转矩；W_3 和 T_3 分别为耦合器输出到输出轴的转速和转矩；W_m 和 T_m 分别为电机输出到输出轴的转速和转矩；W_2、T_2 分别为发动机输入到差速耦合器的转速和转矩；T_L 为输出轴输出总转矩。

2.3. 驱动模式与能量路线

本文致力于研究驱动工况下差速耦合式混合动力系统的各项性能，限于本章篇幅，略写制动模式。本文采用 5 种驱动模式：纯电动、发动机单独驱动、行车发电、混合驱动和联合驱动。各模式下能量流动路线如表 3 所示。

Table 3. Energy flow paths in various modes
表 3. 各模式下能量流动路线

模式	能量流动路线
纯电动	动力电池－电机－输出轴
发动机单独驱动	发动机－差速耦合器－输出轴
行车发电	发动机－差速耦合器－输出轴；发动机－差速耦合器－发电机－动力电池
联合驱动	动力电池－电机－输出轴；发动机－差速耦合器－输出轴
混合驱动	动力电池－电机－输出轴；发动机－差速耦合器－输出轴；发动机－差速耦合器－发电机－动力电池

除纯电动模式外，其他模式下发动机都开启，并且差速耦合器根据需求转速和转矩、发动机的输出转速和转矩通过调节发电机来自行选择工作模式。发动机启停由发动机开关控制，电池电量小或需求转

矩极大时，发动机开启；电量 SOC 高且需求转矩小时发动机关闭。

2.4. 差速耦合器与发动机开关控制

在差速耦合式混合动力系统中，当需求转矩小且电量充足时，发动机不工作，驱动电机单独工作，提供转矩和转速，以提高经济性，降低排放；其他情况下，发动机工作，发动机经差速耦合器传递到输出轴的转矩与电机转矩共同作为输出总转矩，电机转速、输出转速与由发电机调节的差速耦合器输出转速三者相同，以到达按需求驱动车辆的目的。当以固定的数值表示转矩和 SOC 大小来控制发动机启停时，当需求扭矩和 SOC 值在此固定值周围变动时，会造成发动机的反复启动和关闭，损坏发动机。因此，本文利用模糊控制器来控制发动机的启闭以减少发动机的频繁启停。

发动机开关控制模块中用需求功率和转矩的正负判断发动机是否处于驱动状态。建立驱动模式下的发动机开关控制模块在 ADVISOR 中如图 2 所示。图 2 中，模糊控制器输出的开关量范围[0, 1]，而发动机的启停只能用 1 和 0 来表示，本文让大于 0.5 的输出取为 1，表示发动机启动，小于 0.5 的取为 0，表示发动机关闭。

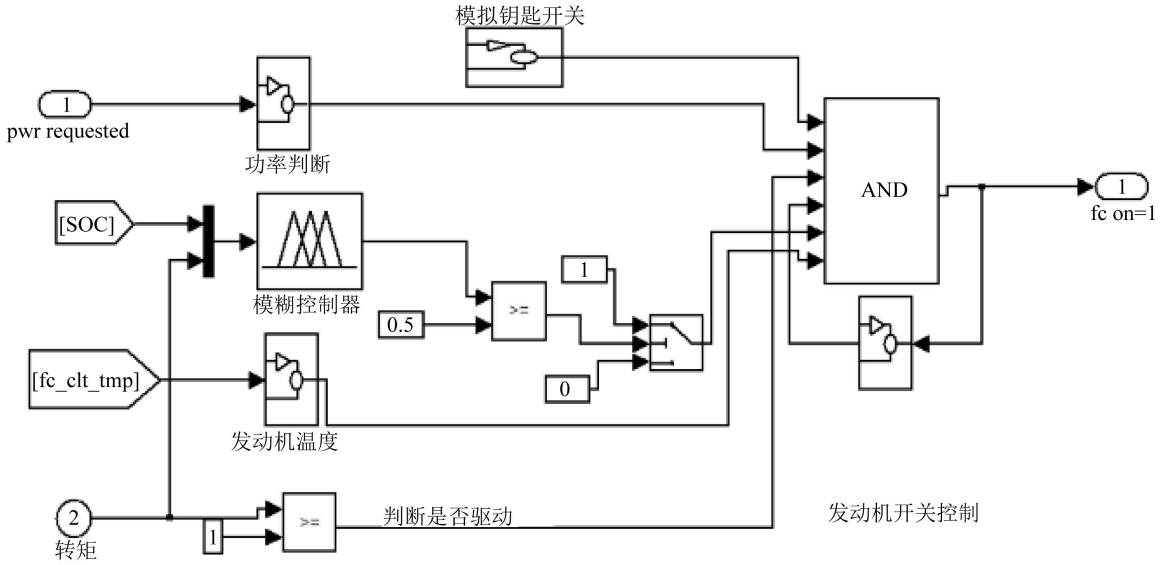

Figure 2. Engine switch control module
图 2. 发动机开关控制模块

3. 模糊控制器的设计

相较于逻辑门限控制来说，模糊控制能更合理控制发动机的启停，减少频繁启动，同时有效降低油耗与排放。本文设计了以电池电量 SOC 和需求转矩为输入、发动机的启停为输出的双输入单输出的模糊控制器。

1) 选择输入、输出变量

需求转矩和 SOC 对发动机的启停有极大的影响，在满足动力性且电量充足的情况下，应尽量减少发动机的开启时间。所以，在模糊控制器的设计中，以需求转矩和电池 SOC 值作为模糊控制器的两个输入，以是否开启发动机作为输出变量。

2) 输入量的模糊化

取电池电量 SOC 的模糊论域为[0, 1]，相应的模糊子集为{VL, L, M, H, VH}，分别对应过低、偏低、

适中、偏高和过高。为防止电池过冲与过放，将过低和过高的取值范围加大，隶属度函数如图 3 所示；选取需求转矩 Trq 的模糊论域为[0, 250]，相应的模糊子集为{NB, NS, O, PS, PB}，分别对应过小、偏小、适中、偏大和过大，其隶属度函数如图 4 所示。

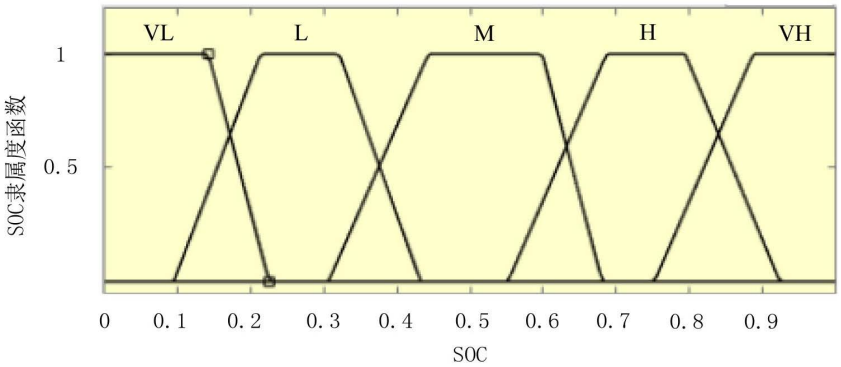

Figure 3. SOC subordinating degree function
图 3. SOC 隶属度函数

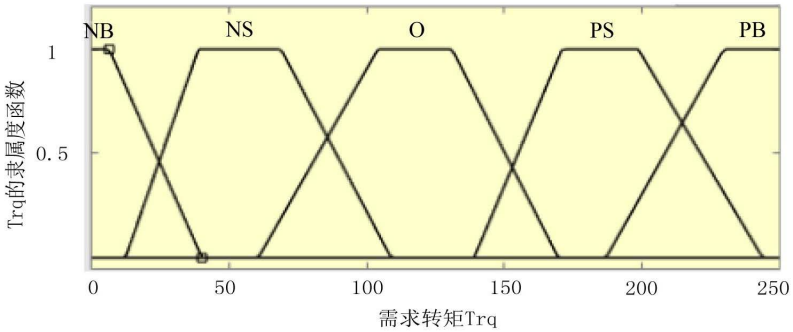

Figure 4. Required torque membership function
图 4. 需求转矩隶属度函数

3) 输出量的模糊化

输出量为发动机的开闭值 k，取其模糊论域为[0, 1]，相应的模糊子集为{A, B, C, D, E, F}。本文让大于 0.5 的输出取为 1，表示发动机启动，小于 0.5 的取为 0，表示发动机关闭。输出量的隶属度函数如图 5 所示。

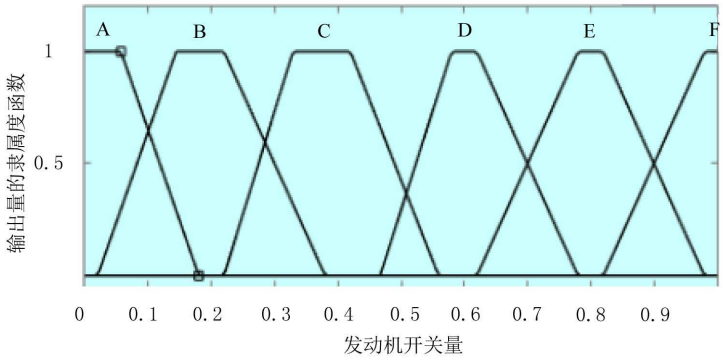

Figure 5. The membership function of the output quantity
图 5. 输出量的隶属度函数

4) 模糊规则

由上文驱动模式设计可知，当电池电量低或需求转矩大时发动机启动，电量 SOC 高且需求转矩小时发动机关闭。因此，初步制定模糊控制规则如表 4 所示。

Table 4. Initial fuzzy control rules
表 4. 初定模糊控制规则

Trq	SOC				
	VL	L	M	H	VH
NB	E	D	C	B	A
NS	F	E	D	C	C
O	F	E	D	D	C
PS	F	F	E	D	D
PB	F	F	E	E	D

图 6 为输入、输出三维曲线图。

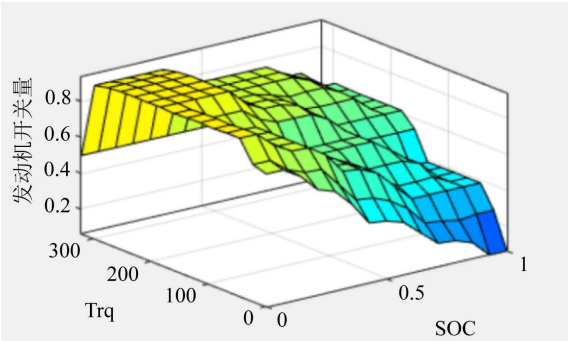

Figure 6. Initial input and output fuzzy 3D curve
图 6. 初定输入、输出模糊三维曲线图

4. 遗传算法优化模糊控制器

本文用遗传算法优化 25 个模糊规则来提高差速耦合式混合动力系统的经济性和排放性。因模糊控制器在发动机开关控制中，要优化它，就必须先运行 ADVISOR 得到仿真结果数据以计算目标函数，所以利用 ADVISOR 软件的非界面函数来获取结果数据参与计算，值得注意的是，非界面函数初始化会清空上次的仿真数据，合理的保存和导入数据是成功的关键(图 7)。

4.1. 遗传算法优化模糊控制器过程

利用 ADVISOR 的非界面函数来实现遗传算法优化模糊控制器的计算。具体过程如下：

1) 工作空间初始化

2) 遗传算法的基本参数确定。取初始种群 50 个体数目，最大遗传代数 50 代，优化变量个数 25 个，每个变量的二进制位数为 3 位，代沟取 0.9，交叉概率 0.97，变异概率 0.001。

3) 创建初始种群并译码。使用函数 crtbp 来初始种群，函数 bs2rv 将二进制转换为十进制。最后得到一个包含 50 个个体，每个个体包含 25 个变量的初始种群。

4) 目标函数与适应度函数的建立。由于最大爬坡度与经济性和排放性的指标相反，爬坡度越大越好，经济性和排放性越小越好。考虑经济性、排放性和动力性等目标，本文利用爬坡度上限 60%与最大爬坡

度差值作为一个目标值，采用加权系数法来将多目标转换为单目标函数。同时以经济性为主，排放性和动力性为辅，取等效汽油消耗率的加权系数为 0.7，动力性的加权系数为 0.1，排放性各取 0.05，采用排序法来进行适应度的分配。

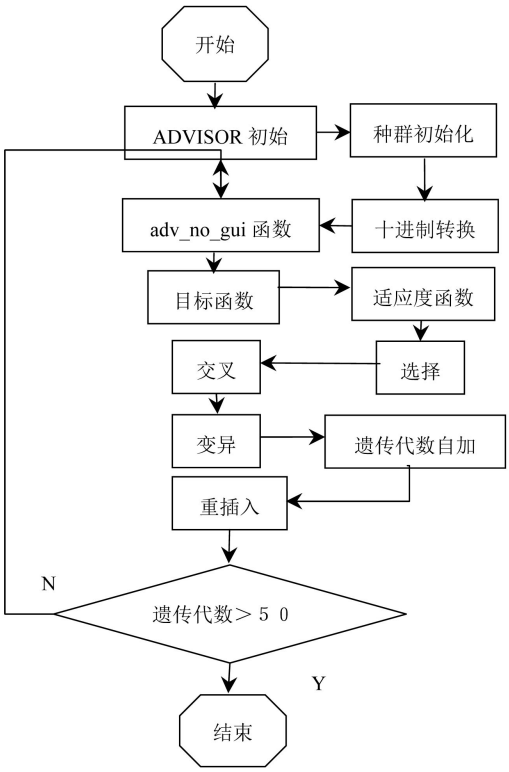

Figure 7. The flow field diagram of fuzzy controller is optimized by genetic algorithm
图 7. 遗传算法优化模糊控制器的流场图

5) 遗传操作。使用 select 函数、recombin 函数、mut 函数和 reins 函数作为遗传操作函数，分别进行选择、交叉、变异和重插入。

6) 终止判断。当遗传代数超过 50 代时，遗传算法终止。

4.2. 优化结果

遗传算法在 50 次迭代中种群目标函数均值变化和最优目标函数值的收敛过程如图 8 所示；经过 50 次迭代后目标函数值分布如图 9 所示。

最优目标值在第 7 次迭代后趋于最低值，经 50 次迭代后，由于遗传算法的局部搜索能力较差以及对初始种群的选择有一定的依赖性，导致第 20 个异常个体出现，除此之外，其余个体的目标值都相等为最小目标函数值。从数据中取出优化后的模糊规则，导入 ADVISOR 中开关控制的模糊控制器中，利用模糊工具箱中 surface 得出控制器的三维曲线图。

经遗传算法优化后的输入、输出模糊控制三维曲线如图 10 所示。

5. 仿真分析

基于 ADVISOR 软件，在 UDDS 工况下进行仿真，UDDS 循环工况如图 11 所示。将优化模糊控制器后的性能与优化前及逻辑门限控制策略控制性能仿真结果进行对比。本文使用逻辑门限控制策略是指：

采用逻辑门限值的方法来控制发动机的启停。具体实现如下：当前电池电量 SOC 大于 0.35 且需求转矩小于 150 N·m 时发动机关闭，其他情况下发动机启动，其余参数与模糊控制策略下一致。

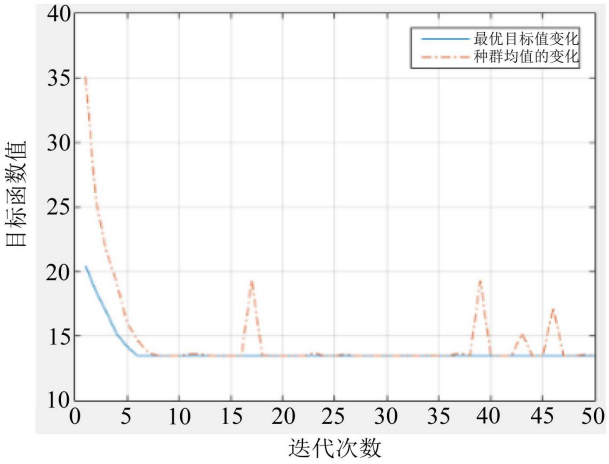

Figure 8. Genetic convergence process
图 8. 遗传收敛过程

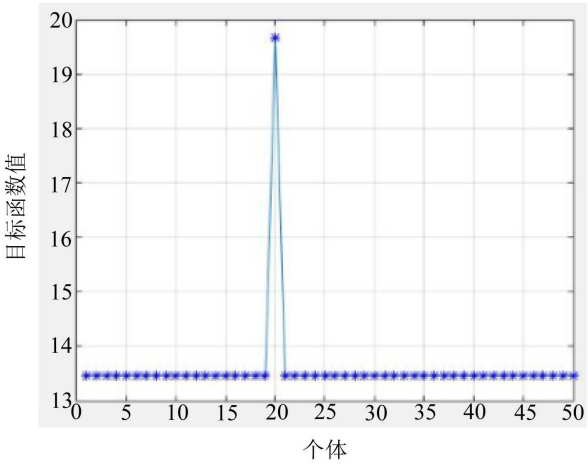

Figure 9. The target value for each individual after the 50th iteration
图 9. 第 50 次迭代后每个个体的目标值

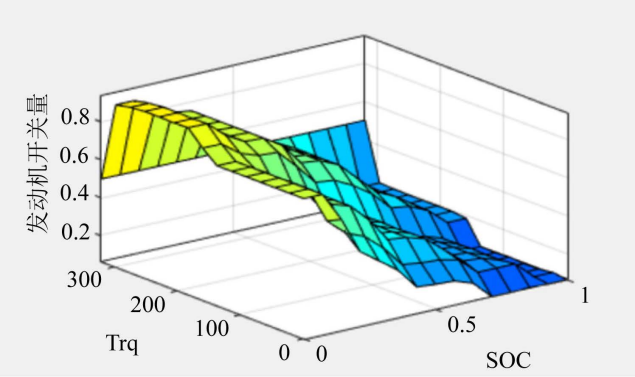

Figure 10. The input and output fuzzy 3D curves are optimized
图 10. 优化后输入、输出模糊三维曲线

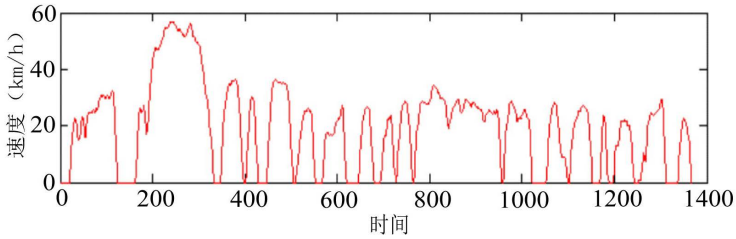

Figure 11. UDDS drive cycle
图 11. 循环工况

5.1. 发动机启停仿真

分别在逻辑门限控制策略与优化模糊控制器前后的控制策略下进行性能仿真，利用仿真结果数据，得到各个策略下发动机开启时间在循环工况时间下的占比，如图 12 所示。由图 12 可以得到逻辑门限和优化模糊控制前后发动机开启时间占比分别为 20.88%、19.61%和 17.71%，优化后的模糊控制器相较于逻辑门限下发动机占比减少了 15.18%。图 13 为在连续多个 UDDS 工况下发动机启停堆积面积图，可以看到在各个时间段上发动机的启停状况，优化模糊控制器后的启停频率明显减少。

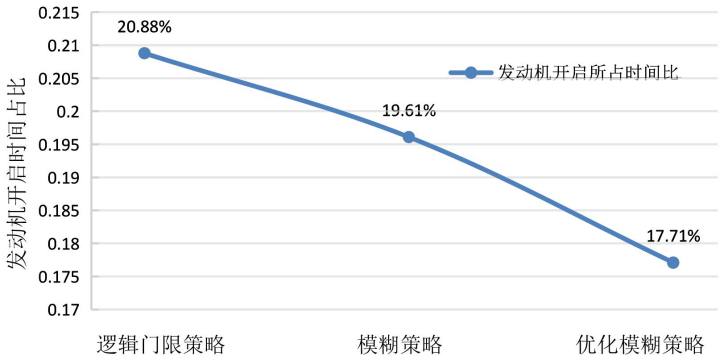

Figure 12. Engine startup time ratio
图 12. 发动机开启时间占比

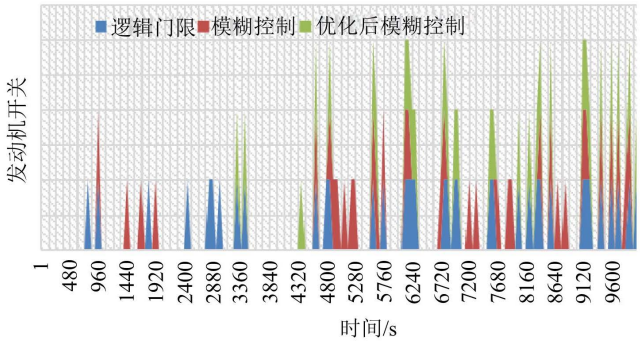

Figure 13. Engine start-stop accumulation area diagram
图 13. 发动机启停堆积面积图

5.2. 动力性仿真

采用最高车速、20 km/h 爬坡度和百公里加速时间作为差速耦合式混合汽车的动力性能指标。优化模糊控制器后的动力性能与优化前及逻辑门限控制策略控制动力性能仿真结果如图 14 所示。结合表 1 与图

14 可知：利用优化模糊器前后的控制策略与逻辑门限控制策略来控制发动机启停，都能满足动力性要求。最高车速几乎不变；优化模糊控制器前后，汽车 20 km/h 爬坡度和百公里加速时间几乎不变；模糊策略与逻辑门限策略相比，模糊策略下 20 km/h 爬坡度和百公里加速时间性能略微下降，但远满足设计要求。

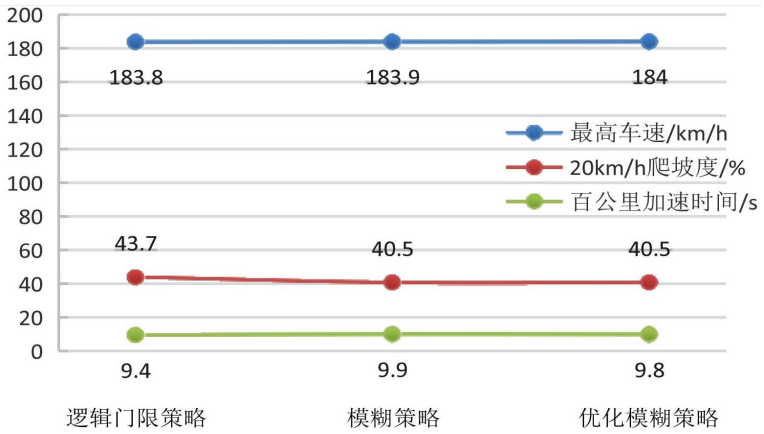

Figure 14. Simulation results of dynamic performance
图 14. 动力性仿真结果

5.3. 经济性仿真

采用混合动力汽车的综合油耗[10]作为汽车的经济性能指标。优化模糊控制器后的经济性能与优化前及逻辑门限控制策略控制经济性能仿真结果如图 15 所示。由图 15 可以看出，在逻辑门限策略与优化模糊器前后控制策略下，汽车综合油耗分别为 3.686 L/100km、32.293 L/100km 与 2.838 L/100km，经济性大幅上升。相较于逻辑门限策略，优化后的模糊策略百公里综合油耗下降了 23%。主要原因是模糊策略减少了发动机的开启时刻，降低了油耗。

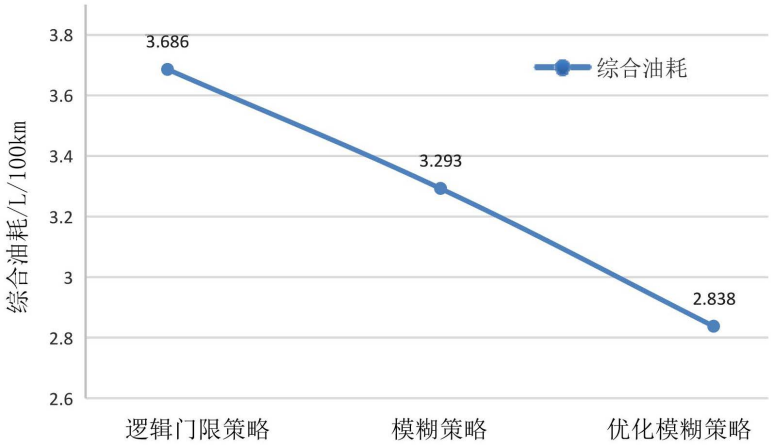

Figure 15. Economic simulation results
图 15. 经济性仿真结果

5.4. 排放性仿真

采用每公里 HC、CO、NOx 和微粒排放 PM 的排放量作为排放性能指标。优化模糊控制器后的排放性能与优化前及逻辑门限控制策略控制排放性能仿真结果如图 16 所示，微粒排放 PM 在各种策略下都为

0，所以未在图中表示。由图 16 可知：优化模糊控制器后的排放相较于逻辑门限策略来说，HC 排放下降了 27.71%、CO 排放下降了 26.46%、NOx 排放下降了 33.1%。在优化模糊控制器后的控制策略下，排放性能大幅提高。

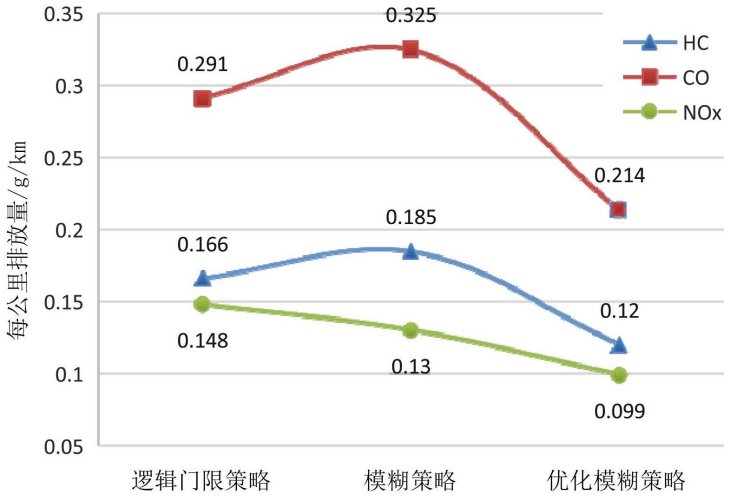

Figure 16. Emission simulation results
图 16. 排放性仿真结果

综上所述，遗传算法优化模糊控制器后，动力性变化不大；但在经济性和排放方面有显著的提升，其中百公里综合油耗下降约百分之十四，排放性大幅提高。优化模糊控制器后的策略相比于逻辑门限策略来说，动力性适当降低，但也远满足要求；经济性大幅提高，其中百公里综合油耗下降了 23%；排放极大降低。

6. 结束语

1) 基于对差速耦合式动力系统的结构和工作特征的研究，在 ADVISOR 仿真软件中对差速耦合式动力系统模型进行了再开发。首次提出了利用双输入单输出的模糊策略来控制差速耦合式混合动力系统的发动机启停，并利用遗传算法对模糊策略进行优化。

2) 将优化模糊控制策略前后的差速耦合式混合动力系统性能仿真结果对比，得到优化后的百公里综合油耗下降了 13.8%，排放性中 HC 排放下降了 35.14%、CO 排放下降了 34.15%、NOx 排放下降了 23.85%。动力性几乎没变。证明了遗传算法对于差速耦合混合动力系统的模糊控制优化的可行性。

3) 将遗传算法优化后的模糊控制策略的结果与逻辑门限策略控制发动机启停的性能仿真结果对比，得到优化模糊策略后的百公里综合油耗下降了 23%，排放性中 HC 排放下降了 27.71%、CO 排放下降了 26.46%、NOx 排放下降了 33.1%。动力性虽然轻微下降但仍远满足要求。

4) 基于遗传算法优化后的模糊控制策略能更合理地控制发动机的启停，极大地提高了汽车的经济性和排放性。

参考文献

[1] 苏天晨. 差速耦合式混合动力汽车模式切换的协调控制[M]. 吉林: 吉林大学, 2011.

[2] 于永涛, 王庆年, 曾小华, 等. 传统差速器应用于 HEV 动力耦合的可行性[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(2): 305-310.

[3] 杨章林. 差速器式 HEV 动力耦合装置设计分析[J]. 黑龙江工业学院学报, 2017, 17(9): 50-53.

[4] 曾小华, 于永涛, 宋大凤, 等. 基于差速耦合的混合动力汽车传递特性分析与控制[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(1): 1-5.

[5] Zeng, X., Nie, L. and Wang, Q. (2011) Experimental Study on the Differential Hybrid System Hybrid Electric Vehicle. *Procedia Engineering*, **16**, 708-715.

[6] 邹彦艳, 吴宇轩, 宋振宇, 等. 基于改进遗传算法的模糊控制器设计[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(11): 6-10.

[7] Hwang, H.S., Joo, Y.H., Kim, H.K., *et al*. (2014) Identification of Fuzzy Control Rules Utilizing Genetic Algorithms and Its Application to Mobile Robots. Algorithms and Architectures for Real-Time Control, 249-254.

[8] 葛安东. 基于遗传算法和模糊控制的某型纯电动汽车整车控制器的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

[9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19753-2013 轻型混合动力电动汽车能力消耗量试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 4-5.

[10] 吕力, 葛鹏, 柳邵辉. 中美插电式混合动力汽车能耗评价方法[J]. 汽车工程师, 2016(10): 55-58.

Hans汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-677X，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：dsc@hanspub.org