

# ISG—FHEV 等效燃油消耗最小控制策略

周 祥<sup>1</sup>, 宋 璐<sup>1</sup>, 付主木<sup>2</sup>, 宋书中<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 电气工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 为了有效提高 ISG 重度混合动力汽车 (full hybrid electric vehicle assisted by an integrated starter generator, ISG—FHEV) 发动机和电机驱动系统效率以及整车的燃油经济性, 设计了一种等效燃油消耗最小控制策略 (equivalent consumption minimization strategy, ECMS); 在分析 ISG—FHEV 功率分流模式的基础上, 同时考虑发动机和电机驱动系统效率, 构建出包含发动机和电机驱动系统的功率分配、ISG 电机和主电机间的功率分配两个控制变量的整车等效燃油消耗最小目标函数; 引入庞特里亚金极小值原理 (pontryagin's minimum principle, PMP) 并加入电池 SOC 偏差控制确定等效因子; 最后, 进行了仿真和对比分析; 结果表明, 与基于规则的控制策略相比, 发动机效率提高 9%, ISG 电机和主电机总效率提高 11.4%, 百公里耗油量降低 9.98%。

**关键词:** 混合动力汽车; 燃油经济性; 等效因子; 等效燃油消耗最小策略

## Equivalent Consumption Minimization Strategy for Full Hybrid Electric Vehicle Assisted by an Integrated Starter Generator

Zhou Xiang<sup>1</sup>, Song Lu<sup>1</sup>, Fu Zhumu<sup>2</sup>, Song Shuzhong<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In order to effectively improve the drive efficiency of the engine and motor and the whole vehicle fuel economy for Full hybrid electric vehicle assisted by an Integrated Starter Generator (ISG—FHEV), this paper designed an equivalent consumption minimization strategy (ECMS). Considering the engine and the motor drive system efficiency based on the analysis of ISG—FHEV power split mode, the equivalent fuel consumption minimization objective function containing two control variables which are power distribution between the engine and motor drive system and the ISG motor and the main motor was constructed. By introducing Pontryagin's Minimum Principle (PMP) and the deviation control of battery state of charge (SOC) to determine the equivalent factor. Finally, we carried on the simulation and comparative analysis. The simulation results show that engine efficiency increases 9%, total motor efficiency is up 11.4%, fuel consumption to travel 100 km decreases 9.98% compared with the Rule-based control strategy.

**Keywords:** hybrid electric vehicle; fuel economy; equivalent factor; equivalent consumption minimization strategy

## 0 引言

ISG (integrated starter generator) 型混合动力汽车用 ISG 电机代替原起动机实现发动机的快速启停, 同时具有辅助发电功能, ISG 技术近年来已成为国内外汽车行业研究的热点<sup>[1]</sup>。

目前对 ISG 混合动力汽车的研究主要集中在轻中度结构上<sup>[2-3]</sup>, 可实现发动机快速启动和纯电动模式, 但存在发动机输出能量损失较大和没有考虑 ISG 电机工作效率等不足。ISG 重度混合动力汽车 (ISG—FHEV) 采用 ISG 电机和主电机两个电机, 提供更大功率的电机驱动系统, 有效解决了上述不足, 同时具有轻中度结构的优点, 是极具潜力的混合动力汽车结构<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-11-17。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助 (61473115, 51375145); 河南省科技创新人才杰出青年计划资助 (144100510004); 河南省高校科技创新人才支持计划资助 (13HASTIT038)。

**作者简介:** 周 祥 (1991-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事混合动力汽车控制策略的研究。

宋书中 (1961-), 男, 河南济源人, 博士, 教授, 博导, 主要从事混合动力汽车控制策略的研究。

国内外对于 ISG—FHEV 的研究主要是针对特定驱动系统设计相应的控制策略。ADHIKARI 等<sup>[5]</sup>以提高发动机输出效率为目的, 提出了一种复合式 ISG—FHEV 在线能量平衡控制策略。秦大同<sup>[6]</sup>针对采用离合器和行星排作为动力耦合机构的重度混合动力汽车, 提出离合器模糊控制和电机输出转矩对发动机转矩波动的补偿控制。上述研究方法以发动机燃油经济性为重点, 对于电机电能的经济性考虑较少, 这样保证机械效率最优, 不能获得电效率最优。PAGANELLI 等<sup>[7]</sup>率先提出了基于等效燃油消耗最小策略的瞬时优化控制策略, 考虑了油电转换效率, 本质上包含了整车动力系统的效率问题, 目前在混合动力汽车能量管理控制策略领域得到了普遍的认可<sup>[8-9]</sup>。林歆悠<sup>[10]</sup>等构建发动机与电池间的功率分配, 采用等效燃油消耗最小控制策略进行实时优化。杨阳等<sup>[11]</sup>制定了电荷消耗型和电荷增长型两种不同的驱动方案, 并以瞬时系统效率最优为目标制定了整车等效燃油消耗控制策略, 使整车燃油经济性得到很大的提高。

基于此, 本文针对 ISG—FHEV, 综合考虑发动机和电机驱动系统的效率, 提出了一种新的确定油电转换等效因子的方法, 设计了一种含两个变量的等效燃油消耗最小控制策略, 最后在 MATLAB/ADVISOR 环境下进行了仿真与对比分析。

## 1 ISG-FHEV 动力总成结构及模式分析

### 1.1 ISG-FHEV 动力总成结构

本文拟采用发动机、ISG 电机、主电机和 3 个离合器相结合的 ISG-FHEV，其系统结构如图 1 所示。

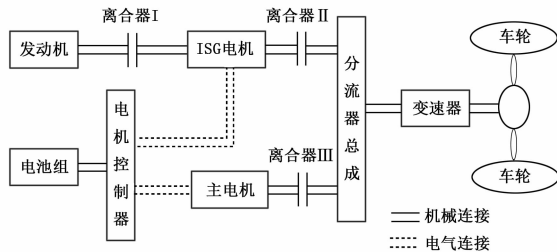


图 1 ISG-FHEV 系统结构

该混合动力汽车系统结构上将 ISG 电机和发动机放在一个传动输出轴上，两者之间采用单轴并联式连接结构。增设了分流器总成和相应的离合器，不仅能使 ISG 电机实现发动机的快速起停、发电和辅助发动机驱动，而且还具有单独驱动、辅助主电机驱动等功能，可以实现多种工作模式的切换。

### 1.2 模式分析

上述 ISG-FHEV 系统结构中的分流器总成主要起到两个作用，首先是实现发动机驱动系统与电机驱动系统之间的功率分配，其次是实现 ISG 电机和主电机之间的电功率分配。假设离合器闭合时不发生功率损耗，则 ISG-FHEV 驱动系统下功率分流模式包含 4 种情况。

1) 行车充电模式：离合器 I、II 闭合，III 分离。发动机将多余的输出功率经 ISG 电机、电机控制器向电池充电。其功率分流如下：

$$\begin{cases} P_{req} = P_{eng} - |P_{bat}| \\ P_{bat} = P_{isg} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $P_{req}$  为整车的功率需求， $P_{eng}$  为发动机输出功率， $P_{bat}$  为电机驱动系统输出功率， $P_{isg}$  为 ISG 电机输出功率。

2) 发动机单独驱动模式：离合器 I 闭合，II、III 分离。电机驱动系统不参与整车驱动。其功率分流如下：

$$\begin{cases} P_{req} = P_{eng} \\ P_{bat} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

3) 混合驱动模式：离合器 I 闭合，II、III 的分离和闭合由分流器总成决定。电机驱动系统包括主电机驱动和 ISG 电机驱动。如果离合器 III 分离，发动机与 ISG 电机混合驱动车辆；如果离合器 II、III 闭合，发动机、ISG 电机和主电机全混合驱动；如果离合器 II 分离，发动机与主电机混合驱动。其功率分流如下：

$$\begin{cases} P_{req} = P_{eng} + P_{bat} \\ P_{bat} = P_{isg} + P_{emg} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $P_{emg}$  为主电机输出功率。

4) 纯电动模式：离合器 I 分离，II、III 的离合状态同混和驱动模式下相同，由分流器总成决定。发动机不参与整车驱动。其功率分流如下：

$$\begin{cases} P_{eng} = 0 \\ P_{req} = P_{bat} \end{cases} \quad (4)$$

上述功率分流方式通过分流器总成来实现，通过设计相应的能量管理控制策略实现混合动力汽车工作模式切换的同时分

配该模式下的发动机、ISG 电机和主电机的最优功率，从而实现整车的最佳燃油经济性。

## 2 等效燃油消耗最小控制策略

对于电量维持型混合动力汽车而言，电池只是作为一个能量缓冲器，消耗的电池电能需要在车辆未来的行驶中由发动机多消耗一定量的燃油进行补偿，需要建立所消耗电池电能与补偿所需燃油的等效关系。其中恒定的等效因子  $s$  只适用于特定的驱动工况，实际使用时还应根据实际工况做出相应调整，避免实际工况与预设循工况相差较大时等效燃油消耗量计算误差太大等不足。

### 2.1 整车等效燃油消耗分析

为了实现发动机、ISG 电机和主电机的功率最优分配，这里定义两个变量  $\alpha$  和  $\beta$ ，其中  $\alpha$  来实现发动机驱动系统和电机驱动系统之间的模式切换， $\beta$  来实现主电机驱动和 ISG 电机驱动之间的模式切换，定义如下

$$\alpha = \frac{P_{bat}}{P_{req}} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{P_{emg}}{P_{bat}} \quad (6)$$

由于两个控制变量  $\alpha$  和  $\beta$  均和电机驱动系统输出功率  $P_{bat}$  有直接关系，并且 ISG 电机和主电机所消耗的电能均来自于电池，两者消耗的电池电能可等效为发动机的燃油消耗。因此，为使控制简单，后文采用等效燃油消耗思想，将上述两个控制变量转化为一个控制变量。

目标函数为任意时刻的整车燃油消耗率：

$$J = \dot{m}_{eng}(t) + \dot{m}_{bat-equ}(t) \quad (7)$$

式中， $\dot{m}_{eng}(t)$  为发动机燃油消耗率， $\dot{m}_{bat-equ}(t)$  为所消耗电池电能的等效燃油消耗率。

$\dot{m}_{bat-equ}(t)$  由下式计算，可得

$$\dot{m}_{bat-equ}(t) = \dot{m}_{isg}(t) + \dot{m}_{emg}(t) = s \frac{P_{bat}(t)}{Q_{LHV}} \quad (8)$$

式中， $Q_{LHV}$  为燃油低热值， $s$  为油电转换等效因子， $\dot{m}_{isg}(t)$  为 ISG 电机的电能消耗率， $\dot{m}_{emg}(t)$  为主电机的电能消耗率，将式 (8) 代入 (7)，ISG-FHEV 整车燃油消耗率的目标函数为：

$$J_{min} = \min \left( \dot{m}_{eng}(t) + s \frac{P_{bat}(t)}{Q_{LHV}} \right) \quad (9)$$

其约束条件为：

$$\begin{cases} SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \\ 0 \leq P_{eng}(t) \leq P_{eng,max}(t) \\ P_{isg,min}(t) \leq P_{isg}(t) \leq P_{isg,max}(t) \\ P_{emg,min}(t) \leq P_{emg}(t) \leq P_{emg,max}(t) \\ P_{req}(t) = P_{eng}(t) + P_{isg}(t) + P_{emg}(t) \end{cases}$$

在约束条件下，以整车等效燃油消耗量最小值  $J_{min}$  为控制目标，以电池功率  $P_{bat}$  为控制变量，结合发动机的高效运行曲线图，通过目标函数求得最小等效燃油消耗量  $J_{min}$  及其所对应的电池功率  $P_{bat}$ 。由式 (5) 可求出  $\alpha$ ，从而确定出发动机和电机驱动系统的功率分配，但通过式 (6) 不能直接确定  $\beta$ ，还需要利用电机驱动系统的最高效率。其中电机驱动系统总效率为：

$$\eta_{bat} = \left\{ \frac{P_{ess}}{P_{bat}} \right\}^i = \left\{ \frac{P_{emg} \eta_{emg}^i + P_{isg} \eta_{isg}^i}{P_{bat}} \right\}^i \quad (10)$$

式中， $P_{ess}$  为电池充放电功率； $\eta_{emg}^i$ 、 $\eta_{isg}^i$  分别为主电机效率和

ISG 电机效率,  $i = 1$  为发电状态,  $i = -1$  为电驱动状态。

根据功率平衡, 由式 (6) 得 ISG 电机输出的功率为:

$$P_{isg} = (1 - \beta)P_{bat} \quad (11)$$

将式 (6) 和 (11) 代入到 (10) 中, 可求出电机驱动系统的最高效率

$$\eta_{bat\max} = \operatorname{argmax}_{\beta \in (\beta_{\min}, \beta_{\max})} \{ \beta \eta_{eng}^i + (1 - \beta) \eta_{isg}^i \}^i \quad (12)$$

根据求得的电池功率  $P_{bat}$ ,  $\beta$  的取值范围为  $\left[0, \frac{P_{eng\max}}{P_{bat}}\right]$ , 这个区间包含于  $[0, 1]$  区间, 求出最大值  $\eta_{bat\max}$  以及此时与其对应的  $\beta$ , 则可以求出  $P_{eng}$  和  $P_{isg}$ , 确定电机间的功率最优分配。

由上述分析可以看出, 通过等效燃油消耗最小控制策略求出两个控制变量  $\alpha$  和  $\beta$  的值, 可以实现工作模式的切换以及每一时刻发动机、ISG 电机和主电机三者之间的功率最优分配。

- 1) 当  $\alpha < 0$  时为行车充电模式;
- 2) 当  $\alpha = 0$  时为发动机单独驱动模式;
- 3) 当  $0 < \alpha < 1$  且  $\beta = 0$  时为发动机与 ISG 电机混合驱动模式;
- 4) 当  $0 < \alpha < 1$  且  $0 < \beta < 1$  时为三者混合驱动模式;
- 5) 当  $0 < \alpha < 1$  且  $\beta = 1$  时为发动机与主电机混合驱动模式;
- 6) 当  $\alpha = 1$  且  $\beta = 0$  时为 ISG 电机单独驱动模式;
- 7) 当  $\alpha = 1$  且  $0 < \beta < 1$  时为双电机混合驱动模式;
- 8) 当  $\alpha = 1$  且  $\beta = 1$  时为主电机单独驱动模式。

## 2.2 等效因子的确定

等效因子  $s$  将发动机燃油消耗和电池电能等效燃油消耗统一起来, 它的确定是等效燃油消耗最小策略的核心。如果等效因子  $s$  太大, 则汽车在行驶中将不倾向于使用电池电能, 会导致油耗增加; 反之, 汽车行使中过于倾向使用电池电能, 导致电池 SOC 下降过快。

最优的等效因子  $s$  每一时刻都由电池 SOC 决定, 这里用电池动态方程表征整车系统状态变化, 引入庞特里亚金极小值原理推导等效因子  $s$ 。根据电池 SOC 的定义, 电池 SOC 动态变化  $\xi(t)$  的表达式为:

$$\xi(t) = \frac{I(t)}{Q_{bat}} \quad (13)$$

式中,  $I(t)$  为电池中的电流,  $Q_{bat}$  为电池容量。

引入庞特里亚金极小值原理, 取式 (13) 的哈密顿函数为:

$$H = \dot{m}_{eng}(t) - \lambda \cdot \frac{I(t)}{Q_{bat}} \quad (14)$$

式中,  $\lambda$  为协态变量。

由于  $E_{bat} = Q_{bat} V_{bat}$ ,  $P_{bat}(t) = V_{bat} I(t)$ , 结合式 (7)、(8) 和 (14) 则推导出等效因子  $s$  和协态变量  $\lambda$  的关系

$$s = -\lambda \frac{Q_{LHV}}{E_{bat}} \quad (15)$$

式中,  $E_{bat}$  为电池总能量,  $V_{bat}$  为电池电压。

这里可以由协态变量  $\lambda$  计算出等效因子  $s$ , 而协态变量  $\lambda$  的最优值依赖于未来的电能需求, 是未来驱动条件和电池 SOC 当前值的函数。根据全局优化控制策略, 最优协态变量只能使用完整的行程信息获得, 由于不确定的未来电能需求, 只能使用局部信息得出一个估计值, 这将不可避免地产生误差并导致电池 SOC 从它的边界限制的发散, 得到的只是次优控

制。所以这里定义包含电池 SOC 偏差惩罚在内的整车能量消耗最优成本函数为:

$$J' = J_{eng} + J_{bat} + J_{SOC} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{eng}(t) dt + \frac{1}{Q_{LHV}} \cdot \frac{\bar{\eta}_{bat}}{\eta_{eng}^{SOC_{t_0}}} \int_{SOC_{t_0}}^{SOC_{t_f}} E_{bat} d(SOC) + \xi(SOC_{ref} - SOC(t))^2 \quad (16)$$

式中,  $\bar{\eta}_{bat}$  和  $\bar{\eta}_{eng}$  分别为电机驱动系统和发动机的平均效率,  $\xi$  为惩罚因子,  $SOC_{ref}$  为电池 SOC 的参考值。

结合式 (14) 和 (16), 根据哈密顿-雅克比-贝尔曼方程, 最优协态变量  $\lambda_{ref}$  是最优成本函数的偏导数, 则协态变量为:

$$\lambda(t) = \frac{\partial J'}{\partial (SOC)} = -\frac{\bar{\eta}_{bat}}{\eta_{eng}} \frac{E_{bat}}{Q_{LHV}} + 2\xi(SOC_{ref} - SOC(t)) \quad (17)$$

将式 (17) 代入 (15) 可得到等效因子  $s$  关于电池 SOC 随时间变化的表达式:

$$s(t) = \frac{\bar{\eta}_{bat}}{\eta_{eng}} - 2 \frac{Q_{LHV}}{E_{bat}} \xi(SOC_{ref} - SOC(t)) \quad (18)$$

此时, 等效因子  $s$  的初始值  $s_0$  为:

$$s_0 = \frac{\bar{\eta}_{bat}}{\eta_{eng}} \quad (19)$$

上述惩罚函数是一个非线性函数, 用来试探性地惩罚电池 SOC 的实际值和参考值之间的偏差, 使其接近于参考值, 以自适应调整等效因子  $s$ , 得到理想的最小等效燃油消耗。本文采用惩罚函数后将等效因子  $s$  的表达式改写为:

$$s(t) = s_0 - l_1 \left[ 1 - \left( \frac{SOC_{ref} - SOC(t)}{(SOC_{\max} - SOC_{\min})} \right)^{2l_2+1} \right] \quad (20)$$

惩罚函数的形状可以通过参数  $l_1$  和  $l_2$  进行调整, 使电池 SOC 控制在合理的范围内, 并保证电池 SOC 的初始值和最终值相同。

由上述分析可知, 等效因子初始值  $s_0$  是固定的, 它对某一工况得到的燃油消耗可能是最小的; 但对于变化的工况, 固定的  $s_0$  就无法时刻保证等效燃油消耗最小。研究表明, 等效因子初始最优值  $s_{ref}$  的轨迹与  $SOC_{ref}$  一致<sup>[12]</sup>, 而  $SOC_{ref}$  与汽车当前工况相关, 那么引入  $s_{ref}$  就能很好地适应变化的工况。所以在此基础上, 针对等效因子初始值  $s_0$ , 加入关于电池 SOC 参考值  $SOC_{ref}$  的 PI 控制, 得到等效因子初始最优值  $s_{ref}$  的表达式:

$$s_{ref} = s_0 + K_p(SOC_{ref} - SOC(t)) + K_I \int (SOC_{ref} - SOC(t)) dt \quad (21)$$

则等效因子  $s$  关于电池 SOC 随时间变化的表达式改写为:

$$s(t) = s_{ref} - l_1 \left[ 1 - \left( \frac{SOC_{ref} - SOC(t)}{(SOC_{\max} - SOC_{\min})} \right)^{2l_2+1} \right] \quad (22)$$

此时将电池的 SOC 纳入到等效因子的计算中, 对工况的变化的适应性更强, 从而在获得良好的整车燃油经济性的同时, 也能将电池的 SOC 值维持在良好的范围内。根据最小等效燃油消耗量  $J_{\min}$  得出所对应的电池功率  $P_{bat}(t)$ , 以期实现每一时刻发动机、ISG 电机和主电机三者之间的功率最优分配。

3 仿真及对比分析

本文在保证动力性的前提下，对所设计的一种基于 ISG—FHEV 的等效燃油消耗最小策略与基于规则的控制策略下的整车仿真模型在 MATLAB/ADVISOR 环境下进行了仿真及对比分析。仿真所用汽车的主要部件参数如表 1 所示。

表 1 汽车主要部件参数

部件名称	参数	ISG—FHEV
发动机	最大功率	50 kw
	最大转矩	90 Nm
	最高效率	0.4
主电机	最大功率	30 kw
	最大转矩	±220 Nm
	最高效率	0.96
ISG 电机	最大功率	10 kw
	最大转矩	±45 Nm
	最高效率	0.91
NIHM 电池组	标准电压	270 V
	容量	6.5 Ah
汽车参数	车轮半径	0.275 m
	迎风面积	1.92 m <sup>2</sup>
	总质量	1400 kg

在 NEDC 路况下验证 ISG—FHEV 的发动机效率、电机效率和电池 SOC 变化。NEDC 路况如图 3 所示。

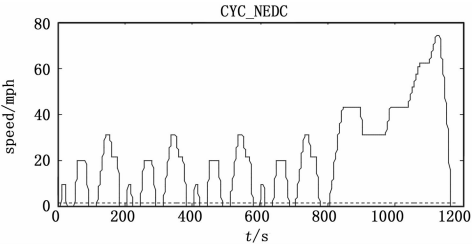
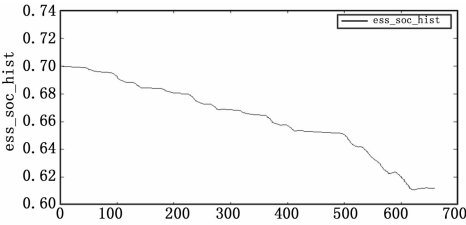


图 3 NEDC 路况

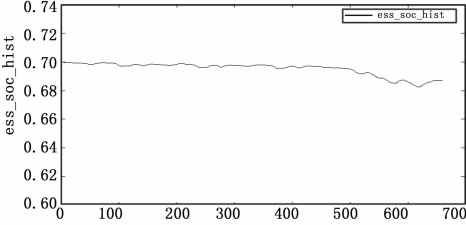
NEDC 路况下电池 SOC 变化曲线如图 4 所示。这里取电池 SOC 初值为 0.7，从图 4 (a) 和 (b) 可以看出，采用等效燃油消耗最小策略后，电池 SOC 最终值接近于初始值，并且保证电池 SOC 在小范围内变化。而采用基于规则控制策略后，电池 SOC 变化曲线呈波浪线快速下降趋势，电池损耗增加，不利于电池的长期使用。

图 5 和图 6 分别为 NEDC 路况下两种控制策略的主电机和发动机的工作点。对图 5 (a) 和 (b) 的比较可以看出，采用等效燃油消耗最小控制策略后，主电机输出转矩为正时，低速段效率为 75% 以上，高速段在 85%~90% 左右，主电机效率很高。而基于规则控制策略的主电机工作点大部分集中在低转矩附近，主电机的输出效率降低。从图 6 发动机的运行工作点可以看出，采用基于规则控制策略下的发动机工作点非常分散，许多工作点在高效运行区外，并有部分工作点在发动机最大转矩曲线上，发动机输出效率很低。而采用等效燃油消耗最小控制策略后，发动机工作在最优曲线上，发动机效率得到很大的提高。

仿真统计结果如表 2 所示。由表可知，采用等效燃油消耗

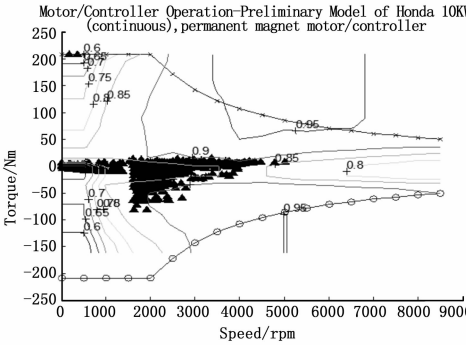


(a) 基于规则控制策略的电池 SOC 曲线

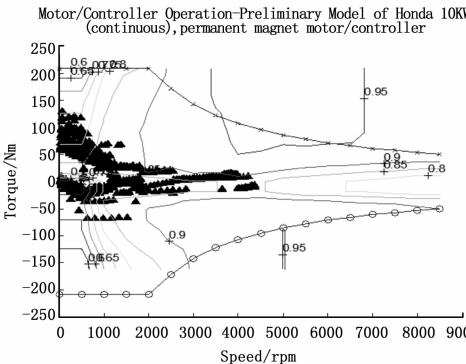


(b) ECMS 控制策略的电池 SOC 曲线

图 4 NEDC 路况下电池 SOC 曲线



(a) 基于规则控制策略的主电机工作点



(b) ECMS 控制策略的主电机工作点

图 5 NEDC 路况下主电机工作点

最小策略后，实现了电池 SOC 初始值和最终值相同，保证电池 SOC 在小范围内变化，并且其燃油经济性、发动机效率、电机效率和电池的充放电效率均有明显提高。

表 2 仿真结果数据对比

策略	ECMS	规则	对比
发动机效率	38.2%	29.2%	提高 9%
电机总效率	82.7%	71.3%	提高 11.4%
百公里耗油量	4.33L	4.81L	降低 9.98%
电池 SOC 变化	0.7~0.69	0.7~0.61	SOC 近似不变