增程式混合动力汽车的分段式能量管理策略研究

洪木南，周安健，苏　岭，姚振辉，刘　波

（重庆长安汽车股份有限公司 新能源汽车研究院，重庆 401120）

摘　要：分析了增程式混合动力汽车的开关式能量管理策略，提出了一种兼顾提高发动机效率和减少充放电损失的分段式能量管理策略。为进一步降低油耗，在分段式策略基础上引入自学习算法，自动在线调整分段式控制阈值。建立混合动力汽车仿真模型，对开关式能量管理策略和分段式能量管理策略进行了仿真比较，同时对具有自学习功能的分段式能量管理策略进行了仿真分析。某车型的仿真研究案例表明，与开关式策略相比，分段式能量管理策略能使油耗降低 3.2%，自学习策略则在充电周期内路线较为固定的情况下可以自动调节到最优的控制阈值。

关键词：混合动力汽车；增程；能量管理；自学习

中图分类号：U469.72　　**文献标识码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2095-1469.2019.02.04

Research on Segmented Energy Management Strategy for Range Extender Hybrid Electric Vehicles

HONG Munan，ZHOU Anjian，SU Ling，YAO Zhenhui，LIU Bo

（New Energy Automobile R&D Institute，Chongqing Chang'an Automobile Co.，Ltd，Chongqing 401120，China）

Abstract：The traditional energy management strategy for range extender hybrid electric vehicles was analyzed. A segmented energy management strategy was proposed，which aims to improve the engine operation efficiency and reduces the losses during both charging and discharging. To further reduce the fuel consumption，the auto-learning was implemented to adjust the SOC threshold in the segmented management strategy. A model was built for range extender hybrid electric vehicles and simulations were conducted to compare the results of the traditional strategy and the segmented management strategy. The effects of the auto-learning method were also analyzed. The simulation results show that the segmented energy management strategy reduces the fuel consumption by 3.2%. By using the auto-learning method，the optimum values of the thresholds in the strategy are obtained for the fixed driving conditions during the charging cycle.

Keywords：hybrid electric vehicles；range extender；energy management；auto learning

随着非可再生资源的日渐枯竭和环境污染的加剧，世界各国针对汽车节能技术开展了大量的研究与开发。混合动力汽车具有怠速启停、能量回收等节油功能，同时可以将发动机小型化，进一步降低油耗和排放，循环工况节油率可达 25%[1-2]，是减少石油依赖，降低环境污染的有效途径。插电式混

收稿日期：2018-04-28　改稿日期：2018-05-22

基金项目：国家科技支撑计划“长安汽车插电式混合动力汽车开发与产业化”（2013BAG12B00）

参考文献引用格式：

洪木南，周安健，苏岭，等 . 增程式混合动力汽车的分段式能量管理策略研究 [J]. 汽车工程学报，2019，9(2)：104-108.

HONG Munan，ZHOU Anjian，SU Ling，et al. Research on Segmented Energy Management Strategy for Range Extender Hybrid Electric Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering，2019，9(2)：104-108.（in Chinese）

合动力汽车插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，PHEV）除了具有常规混合动力汽车的功能，还可以利用电网的能量进一步降低油耗和减少排放，近年来受到越来越多的关注[3]。

为了充分利用从电网充入的能量，在每个充电周期内，PHEV 能量管理策略可以分为电能消耗（Charge Depleting，CD）阶段和电能维持（Charge Sustaining，CS）阶段。在 CD 阶段，PHEV 要充分使用电能驱动车辆，动力电池剩余电量（State of Charge，SOC）逐渐下降；在 CS 阶段，既要避免动力电池过度放电，又要防止电池 SOC 过高而导致电网充电空间下降，所以需要将动力电池 SOC 维持在一个适当的范围内[4]。

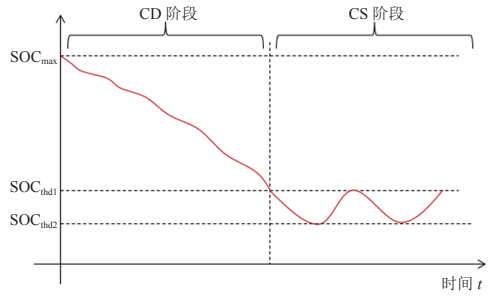

图 1　PHEV 能量管理策略示意图

常见的 CD 阶段策略有两类，一类是完全使用纯电动驱动，发动机始终处于停机状态；另一类则是油电混合驱动，纯电动驱动和发动机驱动在整个 CD 阶段可以同时发生，也可以先后发生。CS 阶段策略也分为油电混合驱动和仅靠发动机驱动两种[5]。

在常规混合动力汽车的基础上将电池容量和电机功率加大，再增加车载充电机和外部充电接口，即可得到 PHEV，因此，PHEV 的构型同常规混合动力的构型并无区别。其中，并联、混联或动力分流构型因发动机可以直接参与驱动，在普通轿车应用中具有较多优势，所以受到大量关注[1-6]。随着 PHEV 纯电里程的增加，发动机不再是主导，仅作为增程器偶尔使用，因此增程式 PHEV 也将逐步得到发展[7]。

本文分析了增程式 PHEV 的开关式能量管理策略，针对其不足，提出了一种分段式能量管理策略。为进一步发挥分段式策略的优势，提出了一种自动调整分段式控制阈值的自学习能量管理策略。接着建立混合动力汽车仿真模型，对开关式能量管理策略和分段式能量管理策略进行了仿真比较，同时对具有自学习功能的分段式能量管理策略进行了仿真分析。

1　开关式能量管理策略

开关式能量管理策略如图 2 所示，当 SOC 低于某一限值时，立即启动发动机，在提供驱动功率的同时给电池充电；当 SOC 高于另一限值时，停止发动机。该策略在 CD 阶段完全使用纯电动行驶，在 CS 阶段则一部分时间用纯电动行驶，一部分时间由发动机发电驱动车辆行驶，同时给电池充电。

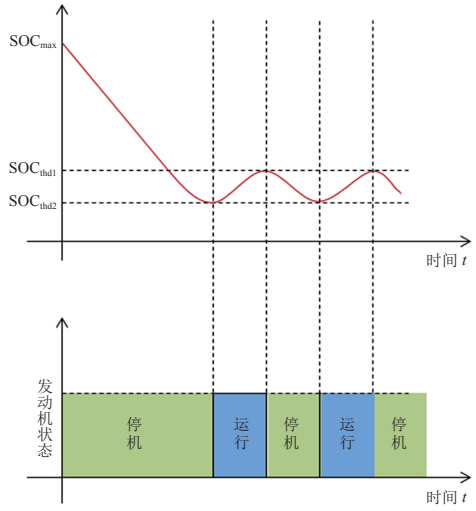

图 2　开关式能量管理策略示意图

该方法优势明显，一旦发动机启动，可以始终工作在最高效率点，发动机的工作状态达到最佳，同时可以让 SOC 保持在一定的区间内。它的缺点是，发动机的发电功率和车辆驱动功率无关，发动机的大部分能量要经过电池的充放电过程再释放出来，降低了整个驱动系统的效率，其实质为牺牲电效率换取发动机的机械效率。从能量转换的角度看，发动机在车辆处于中高负荷时可以实现较高效率的发电且所发电量全部直接用于驱动车辆，从而避免进出电池带来的能量损失。开关式策略仅根据 SOC 大小决定发动机的启停，难以实现燃油经济性的最优化。

2 分段式能量管理策略

为了解决上述开关式控制的缺点，功率跟随算法被提了出来[8]。功率跟随算法大大减少了充放电过程，在一定的功率区间内，发电功率始终等于驱动功率；当驱动功率很低时，发动机按预先设定的最低功率点工作，多余的功率给电池充电；当驱动功率很大，发动机功率不够时，电池放电补充。这种方法不能保证 SOC 维持在一定区间，通常需要增加一些辅助策略，在低 SOC 时适当多充电，高 SOC 时适当减小发电功率。同时，由于发动机的功率要跟随驱动功率而发生变化，所以无法让发动机始终工作在最高效率点上，其实质是牺牲发动机的机械效率换取电效率。功率跟随策略下发动机的工作点如图 3 所示。

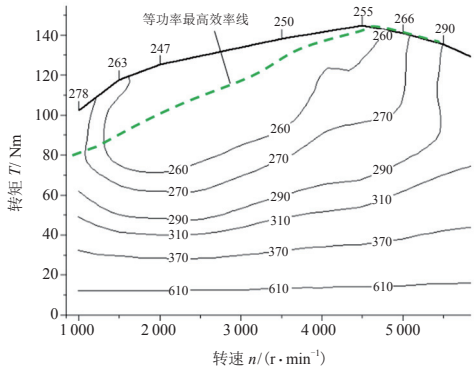

图 3 功率跟随策略下发动机的工作点

为了在 PHEV 中综合体现开关式策略和功率跟随策略的优势，提出了一种分段式能量管理策略，如图 4 所示，将 SOC 使用范围分成 4 个区域，其

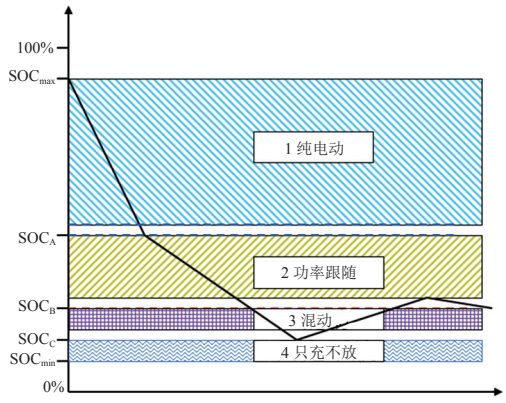

图 4 分段式能量管理策略

中 SOC_{min}、SOC_{max} 为电池允许使用的最低和最高 SOC，SOC_A、SOC_B、SOC_C 为控制阈值。高 SOC 区域采用纯电动模式，发动机停机；中高 SOC 区域采用功率跟随算法；中低 SOC 区域采用开关式控制策略；低 SOC 区域对电池进行保护，只能充电不能放电。

在纯电动模式，根据驾驶员踏板和当前电机转速计算整车驱动功率，由驱动电机执行，发动机始终关闭，只在回收能量时充电，该阶段电量下降较快。

在功率跟随模式，发动机启动，发动机功率由下式给定：

$$P_{ice}=\min\left\{P_{ice_max},\left(P_{drv}+P_{aux}\right)/\eta_{gen}\right\}。$$

式中：P_{drv} 为整车驱动需求功率，kW；P_{aux} 为各控制器和车载用电器的功率消耗，kW；η_{gen} 为发电机发电效率，该效率与发电机的转速和转矩相关，%；P_{ice_max} 为发动机最大功率，kW；P_{ice} 为发动机最终目标功率，kW。

确定发动机的目标功率后，由最佳油耗线可以确定发动机的目标转速。最佳油耗线是发动机油耗特性图上一系列等功率线与有效燃油效率等高线相切的切点连接而成的线，其上的每一个点代表某个给定功率下的最低油耗点。

当驱动功率很大，发动机最大功率发电仍无法满足时，不足的部分由电池放电进行补充，因此该阶段仍然属于电量消耗模式，但由于大部分时间发动机发电功率满足整车驱动和其它用电要求，所以电量下降较缓慢。

在混动模式，发动机始终工作在最经济区域以上，发电功率优先满足驱动功率和整车用电功率，驱动功率太大而发电功率满足不了时，电池需辅助出力，驱动功率小而发电功率有剩余时，全给电池充电。

在只充不放模式，发动机工作在最经济区域以上，发电功率优先满足电池充电功率和整车用电功率，电池充电功率必须大于一个定值。驱动功率太大而发电功率满足不了时，优先给电池充电，限制驱动功率，驱动功率小而发电功率有剩余时，全给电池充电。

分段式控制策略通过在高 SOC 区域采用纯电动模式，充分利用电网充入电池的电量；在中低 SOC 区域引入功率跟随的控制思想，发电量随驱动功率

而变化，减少了流经电池的能量损失；在低 SOC 区域通过混动和只充不放的控制模式，确保电量维持在低位水平而不过高或过低。

由于发动机在功率跟随区就有可能启动，如果在当前充电周期（即两次外插充电期间）内的行驶里程较短，原始充电量就已经够用时，去掉功率跟随区可以降低燃油消耗。如果当前充电周期内的行驶里程较长，去掉功率跟随区会导致快速到达混动区，混动区中电池不断地充放电，不利于系统整体效率的提高。

3 自学习策略

如前所述，进入功率跟随区的 SOC 阈值和当前充电周期内的行驶里程有关，不仅如此，用电负载等影响车辆能耗的因素也会导致最佳功率跟随 SOC 阈值发生变化。因此，固定的 SOC 阈值并不适用于不同的驾驶工况和驾驶习惯。一些学者通过提取工况特征参数 [9] 或 GPS 信息交互获取工况信息 [10-11]，从而选取更匹配的控制参数，但控制较为复杂，且无法考虑驾驶员操作、车辆用电负荷等其它因素的影响。本节首先研究 SOC 阈值与油耗的关系，并在充电周期结束时，利用该关系对 SOC 阈值进行调整，从而获得最佳的 SOC 阈值。

3.1 SOC 阈值对油耗的影响

由图 4 可知，各 SOC 阈值具有如下关系：$SOC_{min} \leqslant SOC_C \leqslant SOC_B \leqslant SOC_A \leqslant SOC_{max}$。为了充分利用电网能量，$SOC_B$、$SOC_C$ 应越低越好，但不能突破电池使用下限，且应预留一定的安全范围。同时，为了在 CS 阶段不频繁启停发动机，SOC_B 和 SOC_C 的缓冲区间不能太窄。

SOC_A 的选取则直接影响 CD 阶段电量消耗的速度。研究表明，PHEV 在当前充电周期结束时，如果 SOC 正好到达期望值，油耗最低 [12]，此时，来自电网的电能被分散到整个 CD 阶段。因此，如果当前充电周期内的总耗能不大于外部补充的电能，不需要启动发动机，油耗为 0，$SOC_A = SOC_B$，无需启用功率跟随模式；如果当前充电周期内的总耗能大于外部补充的电能，则需要提前启动发动机才能获得更低的油耗，且总耗能越大，发动机启动时机越早，即 SOC_A 越大。

3.2 SOC 阈值自学习

如果驾驶员的行驶里程和驾驶习惯较为固定，可以通过判断当前充电周期内车辆运行时的 SOC 对 SOC_A 进行调整，以便在下一个充电周期降低油耗。为了防止误调整带来的油耗大幅上升，每一个充电周期仅对 SOC_A 进行阶梯性的微调，例如 0.5%。调整方法如下：

（1）如果当前充电周期内车辆运行时的 SOC 始终大于 SOC_B，表明没有进入 CS 阶段，充入电池的电网能量没有充分利用，应推迟启动发动机，SOC_A 向下调整 0.5%（不能低于 SOC_B，最低只能与 SOC_B 相等）。

（2）如果当前充电周期内车辆运行时的 SOC 到达 SOC_B（±2%）后维持了一段较长的时间，表明车辆在 CS 阶段运行时间过长，发动机启动太晚，SOC_A 应向上调整 0.5%。

（3）如果当前充电周期内车辆运行时的 SOC 到达 SOC_B（±2%）后仅维持了较短的时间，或者充电周期结束时 SOC 正好到达 SOC_B，SOC_A 不调整。

4 控制策略仿真分析

4.1 仿真模型

增程式混合动力车辆模型是在 Matlab/ Simulink 软件环境下，以某企业自主开发的混合动力汽车平台模型为基础搭建的。混合动力平台模型经过多次和实车试验数据对比，已用于指导车辆动力系统选型，具有较高的准确性。增程式混合动力车辆模型的部分参数见表 1。

4.2 结果分析

给定初始 SOC 为 45%，选择 $SOC_C = 30\%$，$SOC_B = 35\%$，针对 3 种不同的 SOC_A，运行 NEDC 工况 6 000 s，结果见表 2。由表可知，在电量均得到充分利用的前提下，SOC_A 越大，越能提前启动发动机进入功率跟随阶段，对油耗有改善。由图 5 中的 SOC 变化曲线可知，随着 SOC_A 的提高，电量

的消耗变得更加“均匀”。此外，当 $SOC_A = 35\%$ 时，不会进入功率跟随模式，其实质是采用了开关式能量管理策略。

表 1 车辆模型参数

参数		值
整车	整车质量 m/ kg	1 526
	滚动半径 r/ m	0.307
	主减速比	6.37
发动机	最大功率 P_{max}/kW	36(5 300 r/min)
	最大转矩 T_{max}/Nm	68(5 000 r/min)
发电机	额定功率 P_{rated1}/kW	40
	额定转矩 T_{rated1}/Nm	65
驱动电机	额定功率 P_{rated2}/kW	61
	额定转矩 T_{rated2}/Nm	210
	峰值功率 P_{peak1}/kW	78
	峰值转矩 T_{peak}/Nm	314
	峰值转速 n_{max}/(r·min^{-1})	10 000
	30 min 最高稳定转速 n_{con}/(r·min^{-1})	8 000
电池	峰值功率 P_{peak2}/ kW	177
	电池容量 C/ Ah	40

表 2 不同 SOC 阈值仿真结果

SOC_A	SOC 范围 /%	百公里油耗 /(L·100 km^{-1})
35%	45.00 ~ 36.04	5.630
39%	45.00 ~ 36.79	5.460
43%	45.00 ~ 36.74	5.448

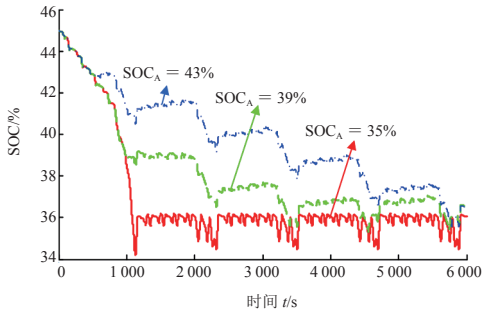

图 5 三种不同 SOC 阈值下的 SOC 曲线

4.3 自学习策略

为验证自学习策略的效果，同时减少仿真量，假设每个充电周期的驾驶路线固定为 6 000 s 的 NEDC 标准驾驶循环工况，每次充电仅充至 45%。设定 $SOC_C = 30\%$，$SOC_B = 35\%$，初始 $SOC_A = 35\%$，根据每次运行时 SOC 的值来动态调整 SOC_A 阈值，结果如图 6 所示。由图可知，随着 SOC_A 阈值的调整，百公里油耗逐渐降低；经过 18 次调整后，$SOC_A = 44\%$ 时，油耗降至最低值，此时，如果 SOC_A 再增加，油耗反而恶化。

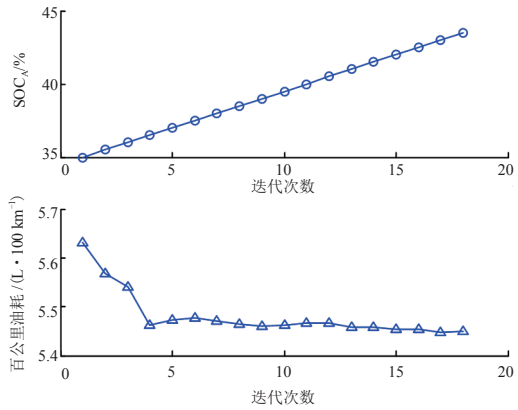

图 6 SOC 阈值自学习结果

5 结论

提出了一种包含纯电动、功率跟随、混动、只充不放 4 个控制区的分段式能量管理策略，比开关式策略具有更好的燃油经济性。某车型的仿真研究案例表明，与开关式能量管理策略相比，分段式能量管理策略能使油耗降低 3.2%。利用自学习手段对分段式能量管理策略的 SOC 控制阈值进行自动在线调整，在每两次充电之间，驾驶路线较为固定的情况下，可以自动调节到最优的控制阈值。

参考文献（References）

[1] YUARAJ K B，SHARMA R，YADAV A，et al. Optimal Torque Handling in Hybrid Powertrain for Fuel Economy Improvement [C]// SAE Technical Papers，2013-26-0068，2013.

[2] BAALEN J V，STEINBUCH M. Optimal Energy Management Strategy for the Honda Civic IMA [D]. Eindhoven：Eindhoven University of Technology，2006.

[3] ZEMAN J，PAPADIMITRIOU I，WATANABE K，et al. Modeling and Optimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Fuel Economy [C]// SAE Technical Papers，2012-01-1018，2012.

[4] 张博 . 可外接充电混合动力汽车能量管理策略研究 [D]. 长春：吉林大学，2009.

（下转第 156 页）