

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.02.002

# 插电式混合动力汽车能量管理策略研究现状和发展趋势

苏岭<sup>1</sup>, 曾育平<sup>2</sup>, 秦大同<sup>3</sup>

(1.重庆长安新能源汽车有限公司, 重庆 401120; 2.南昌工程学院 江西省精密驱动与控制重点实验室, 南昌 330099; 3.重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**目前国内外学者对插电式混合动力汽车能量管理策略进行了较为广泛和深入的研究, 取得了良好的节能减排效果, 为进一步提升其性能, 有必要对插电式混合动力汽车能量管理策略的研究现状进行总结并对其发展趋势进行分析。首先对插电式混合动力汽车动力源能量流分配方法进行了归纳和分析, 指出了当前插电式混合动力汽车能量管理策略两个亟待解决的问题: 未考虑发动机冷却液温度和三元催化器温度等温度因素对油耗和排放影响; 当前插电式混合动力汽车能量管理策略是以行驶功率需求作为输入, 忽略了驾驶室制冷/供暖功率需求。最后提出了计及发动机冷却液温度和三元催化器温度等温度因素的能量管理策略和计及驾驶室制冷/供暖功率需求的能量管理策略两个未来研究方向。

**关键词:**插电式混合动力汽车; 能量管理; 研究综述; 温度因素

**中图分类号:**U461.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2017)02-010-06

## Current situation and development trend of plug-in hybrid electric vehicle's energy management strategies

SU Ling<sup>1</sup>, ZENG Yuping<sup>2</sup>, QIN Datong<sup>3</sup>

(1. Chongqing Chang'an New Energy Vehicle Ltd., Chongqing 401120, P.R.China; 2. The Jiangxi Province Key Labruary of Persision Drive and Contorl, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, P.R.China; 3. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** Domestic and foreign scholars has extensively and deeply researched into plug-in hybrid electric vehicle's energy management strategies, and good results of energy saving and emission reduction has been achieved. In order to further improve the performance of plug-in hybrid electric vehicle, it is necessary to summarize the research status of its energy management strategies and analyze its development trend. Firstly, we summarized and analyzed the power source's energy flow distribution method of plug-in hybrid electric vehicle, and then pointed out two problems that needed to be solved in the current plug-in hybrid electric vehicle's energy management strategies. The first problem is the influence of engine coolant temperature and catalytic converter temperature on fuel consumption and emission isn't considered, and the

**收稿日期:**2016-08-12

**基金项目:**“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAG12B01); 重庆市基础与前沿研究计划杰青项目(cstc2013jcyjqq60002); 机械传动国家重点实验室开放基金资助(SKLM-T-KFKT-201617)。

Supported by Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2013BAG12B01), Chongqing Outstanding Projects of the Basic and Frontier Research Program(cstc2013jcyjqq60002) and the State Key Laboratory of Mechanical Transmission's Open Fund(SKLM-T-KFKT-201617).

**作者简介:**苏岭(1975-), 男, 工学博士, 主要从事动力系统电子控制研究, (E-mail)1208277891@qq.com.

second one is the current energy management strategies only take drive power demand as input and the cab cooling/heating power demand is ignored. Finally, two future research directions were proposed. The first direction is the energy management strategy integrating engine coolant temperature and ternary catalytic converter temperature, and the second one is the strategy integrating cab's cooling/heating power demand.

**Keywords:** plug-in hybrid vehicle; energy management; research review; temperature factor

插电式混合动力汽车能量管理策略(energy management strategy, EMS)是车辆具有良好性能的基础<sup>[1]</sup>。其核心问题是确定动力总成在各种行驶工况下的工作模式,以及每种工作模式下发动机和电机之间的功率分配问题。能量管理策略作为插电式混合动力汽车的核心技术之一<sup>[2]</sup>,国内外学者对其进行了较为广泛和深入的研究,其研究范围从基于规则的静态优化<sup>[3]</sup>发展到基于某种优化控制理论的局部<sup>[4-5]</sup>或全局优化<sup>[6]</sup>;从针对特定工况的优化<sup>[7-8]</sup>发展到对实际行驶工况进行辨识和预测以对控制策略的控制参数进行在线调节和动态优化<sup>[9-10]</sup>;从以稳态工况下的燃油经济性为单目标优化<sup>[11]</sup>发展到以燃油经济性和排放为多目标优化<sup>[12]</sup>。上述能量管理策略的研究取得了良好的节能减排效果,但插电式混合动力汽车能量管理策略仍具有进一步提升性能的潜力。因此,有必要对现有插电式混合动力汽车能量管理策略进行归纳和分析,提炼出插电式混合动力汽车能量管理策略的未来发展方向,为今后的研究工作提供参考。

## 1 基于规则的能量管理策略

基于规则的能量管理策略是研究最早,也是目前广泛应用于实际车辆控制的能量管理策略,其主要分为静态逻辑门限能量管理策略和基于模糊规则能量管理策略。

### 1.1 静态逻辑门限能量管理策略

静态逻辑门限能量管理策略主要是以关键零部件的稳态效率 Map 图为依据,然后根据车辆当前的电池 SOC 值、车速、驱动系统需求转矩等运行参数确定系统的工作模式,同时协调发动机、电机、动力电池等部件之间的能量流动,以充分利用电网电能。Banvait<sup>[3]</sup>等以电池 SOC 为模式切换参数将车辆的运行分为电量消耗模式(charging of depleting, CD)和电量维持模式(charging of sustaing, CS),且在 CD 模式以电机作为主要动力源,当需求转矩超过电机的最大扭矩时,起动机。而在 CS 模式,发动机作为主要动力源,电机进行辅助。Fajri 等<sup>[13]</sup>以电池 SOC 为模式切换参数将车辆运行分为纯电动模式(EV)和电量维持模式(CS),该策略要求在电池 SOC 较高时,电机单独驱动整车行驶,因此需要电机的额定功率较大。Zhang 等<sup>[14]</sup>同样以电池 SOC 为模式切换参数将车辆运行分为 CD 模式和 CS 模式,但针对 CD 模式,采用了基于规则的电动辅助控制策略,并通过解析法获取了各参数值;针对 CS 模式,采用了类似于传统混合动力汽车的逻辑门限控制策略,并采用非占优排序多目标遗传算法对 CS 模式的控制策略参数进行了优化。周能辉等<sup>[15]</sup>则以加速踏板开度为模式切换参数将车辆的运行分为多个阶段,并根据整车不同电量状态和功率需求来调整模式切换参数。

### 1.2 基于模糊规则能量管理策略

基于模糊规则能量管理策略与静态逻辑门限能量管理策略不同的是:基于模糊规则能量管理策略不是基于固定单一的数值,而是先将由数字代表的明确系统经过隶属度函数模糊化成满足度指标,然后通过一系列模糊规则或者专家知识库的推理和聚集计算出系统输出。Li 等<sup>[16-17]</sup>等针对并联式插电混合动力汽车,提出了基于模糊逻辑的能量管理策略,模糊控制器的输入为扭矩差值(即需求扭矩与发动机最优扭矩差值)、电池 SOC 和电机转速,输出为发动机输出扭矩。Li 等<sup>[18]</sup>针对串联式插电混合动力汽车,且为避免因电池 SOC 预估不精确导致电池过放电现象,提出了基于多个模糊逻辑控制器的能量管理策略,该策略设计了 3 个模糊逻辑控制器,第 1 个模糊逻辑控制器根据电池 SOC 和电池端电压确定电池工作状态 BWS(battery working state),第 2 个模糊逻辑控制器根据电池工作状态 BWS 和车辆需求功率确定发动机的目标输出功率,第 3 个模糊逻辑控制器用于发动机与发动机组的内部控制。徐小东等<sup>[19]</sup>借助 GPS(global position system),把行驶里程作为输入条件,提出基于转矩分配的模糊控制策略,该模糊控制策略的输入为电池 SOC、需求扭矩和行驶里程,输出为电机转矩分配系数。

静态逻辑门限能量管理策略与基于模糊规则能量管理策略的优点都是算法简单、计算量小、实时性强,

且不依赖特定的循环工况,缺点都是规则的制定完全依赖设计者经验,所以无法最大化地挖掘插电式混合动力汽车的节油潜力。

## 2 瞬时优化能量管理策略

瞬时优化能量管理策略是以瞬时优化目标最小或最大进行优化,获取每个时刻发动机和电动机的转矩分配关系。瞬时优化目标通常包括等效燃油消耗和 Hamilton 函数值。因此根据瞬时优化目标的不同,瞬时优化能量管理策略可分为等效燃油消耗最小控制策略和基于极小值原理控制策略。

### 2.1 基于等效燃油消耗最小能量管理策略

等效燃油消耗最小控制策略(equivalent consumption minimization Strategy, ECMS)是瞬时优化能量管理策略的代表,其实质是通过实时计算发动机和电机在不同扭矩分配组合下的整车各项性能来综合确定最佳的工作模式和最佳的扭矩分配策略。Tulpule 等<sup>[4-5]</sup>和 Mahyar 等<sup>[7-8]</sup>针对已知行驶工况,以不同的优化目标研究了基于等效燃油消耗最小的插电式混合动力汽车能量管理策略,其中前者是以瞬时发动机实际燃油消耗与电池的等效燃油消耗之和为优化目标,以电池 SOC 为状态变量,优化发动机和电机的输出扭矩。后者是以总能源成本最低为优化目标,其主要是将发动机油耗和电池电量消耗通过油价和电价转化为整车的能源消耗成本,并将等效系数定义为用于均衡车辆在行驶旅途中电能供给与需求的参数。

上述基于等效燃油消耗最小控制策略的研究都是基于特定的行驶工况进行的,而实际上目标函数中的等效油耗部分强烈依赖于行驶工况特性,因此有些学者采用自适应的方法对等效燃油系数进行在线调整,使等效燃油消耗最小控制策略应用于不同的行驶工况。例如:He 等<sup>[9]</sup>把自适应的方法与等效燃油消耗最小控制策略相结合,提出了基于工况识别的自适应等效燃油消耗最小控制策略(Adaptive-ECMS),以扩展算法对不同工况的适应性;Geng 等<sup>[20-21]</sup>将等效系数定义为能量比,且通过遥感技术获取车辆的位置和通过传感器技术获取电池的 SOC,在此基础上实时更新能量比,从而实时调整发动机和电机的扭矩,以达到节省燃油的目的;Khayyer 等<sup>[10]</sup>通过智能交通系统获取行驶距离和按 60 秒的周期预估车速,并将这些工况信息用于等效系数的调整,从而获得了自适应等效燃油消耗最小控制策略;Larsson 等<sup>[22]</sup>提出了基于 GPS 技术的自适应等效燃油消耗最小控制策略,其将 GPS 获取的行驶路况数据融合至等效燃油消耗最小的优化控制策略中,实时调整控制参数,将电池电量均匀使用至整个行驶工况,减少发动机对电池的充电过程。

### 2.2 基于极小值原理能量管理控制策略

基于极小值原理控制策略的 Hamilton 函数是关于控制变量的函数,该策略通过求取每个时刻 Hamilton 函数的最小值来获取最优控制变量,因此,可将基于极小值原理控制策略看成是以 Hamilton 函数为瞬时优化目标的瞬时优化能量管理策略。

Sharma 等<sup>[23]</sup>和 Kim 等<sup>[24-25]</sup>针对已知的行驶工况,研究了基于极小值原理的能量管理策略并对拉格朗日因子和边界约束等问题进行了探讨。Chen 等<sup>[26]</sup>等同样针对已知行驶工况,提出了基于极小值原理和模拟退火算法的混联式插电混合动力汽车能量管理策略,该策略以发动机油耗为目标函数,电池电流为控制变量,模拟退火算法用于优化发动机开关功率和最大电流系数这两个控制策略参数。上述基于极小值原理的控制策略都是以燃油消耗为目标函数,Stockar<sup>[27-29]</sup>等则提出了以总的二氧化碳排放为目标函数的极小值原理的控制策略,其首先将发动机油耗和电池电能的消耗通过能源二氧化碳转换系数转换成二氧化碳排放量,然后采用极小值原理以总的二氧化碳排放最少为目标进行求解,获得优化的电池功率;同时分析了循环工况和发电能源结构对控制策略的影响。

以上基于已知行驶工况开发的控制策略难以应用于实际工况。为此,Tribiolia 等<sup>[30]</sup>在不同的行驶工况下采用极小值原理控制策略进行优化,并采用回归分析方法对优化结果进行分析,从优化结果中提取能用于实时工况的规则,并将这些规则应用于整车的能量管理。Onori 等<sup>[31]</sup>提出了不依赖行驶工况的自适应极小值原理控制策略,其首先通过 GPS 技术预知行驶工况的平均车速和行驶里程参数,然后通过平均车速和行驶里程查表获得拉格朗日因子的初始值和通过行驶里程获取电池 SOC 参考值,最后根据实际电池 SOC 对电池 SOC 参考值跟踪情况以及有无坡道情况,实时更新拉格朗日因子。

与动态规划等全局优化算法相比,基于极小值原理控制策略和等效燃油消耗最小控制策略都具有计算

量小,计算速度快,所需存储空间小等优点,且这两种控制策略的结果接近全局最优,因此这两种控制策略是近年来研究的热点。

### 3 全局优化能量管理策略

全局优化能量管理策略是针对某个已知的行驶循环工况,应用最优化方法和最优控制理论,动态分配动力源的能量,以使整车性能达到最优。目前研究较多的插电式混合动力汽车全局优化能量管理策略是基于动态规划算法的能量管理策略。

张博等<sup>[6]</sup>等针对 NEDC 行驶工况,采用动态规划算法进行求解,获取了插电式混合动力汽车在不同行驶里程下的全局优化计算结果,然后通过统计分析和多元非线性回归的方法对计算结果进行分析,提取了动力总成工作模式切换规则和各种模式下能量分配规则。为使动态规划算法能应用于未知行驶工况,Yu 等<sup>[32]</sup>、Gong 等<sup>[33-34]</sup>和舒红等<sup>[35]</sup>将模型预测控制应用到基于动态规划算法的能量管理策略当中。Yu 等首先通过预测模型预知行驶工况,然后在可预知的行驶里程内采用动态规划算法获得在整个预知工况下的电池 SOC 参考值,之后采用反馈控制调整实际电池 SOC,使其跟踪电池 SOC 参考值。Gong 等利用智能交通系统、全球定位系统(GPS:global positioning systems)、地理信息系统(GIS:geographical information systems)和路边传感器获取行驶路径、车辆位置、实时和历史交通流、行驶里程、坡道、限速等路况信息,并根据这些路况信息和车辆行驶工况模型预测行驶工况,然后采用双阶动态规划算法(two-scale dynamic programming)把行驶里程分割为一系列子片段,在每个子片段中在线应用动态规划算法,以获得分段的优化结果。舒红等将动态规划应用于模型预测控制中,建立了基于空间域的并联式插电混合动力汽车燃油经济性预测控制模型,提出以理论电池 SOC 轨迹作为模型预测控制 SOC 的运行轨迹,并以未来行驶工况中出现的特殊工况为依据对理论 SOC 参考轨迹进行修正。

以上基于动态规划算法的控制策略都是以发动机油耗为单优化目标,Patil 等<sup>[36]</sup>等针对串联式混合动力汽车,研究了以整车使用成本和二氧化碳排放为多目标的动态规划算法控制策略。Moura 等<sup>[12]</sup>等首先建立了电池的电化学模型和马尔可夫链模型,然后提出了以整车使用成本和电池寿命为多目标的随机动态规划算法控制策略,并分析了电池容量、行驶里程和能源价格比对控制策略的影响。

全局优化能量管理策略可以实现真正意义上的最优化,但全局优化算法需要预知车辆行驶的全部工况,且计算量大,在目前条件下无法将其用于实时控制系统。

### 4 插电式混合动力汽车能量管理策略亟待解决的问题

插电式混合动力汽车电池容量大,纯电动行驶里程增加,发动机参与工作减少,因此发动机冷却液温度和三元催化器温度易处于非适宜温度区间,从而导致发动机油耗和排放增加,而目前插电式混合动力汽车能量管理策略并未考虑发动机冷却液温度和三元催化器温度等温度因素对油耗和排放影响。

功率需求作为能量管理控制策略的输入,对控制策略有重要影响。整车的功率需求包括车辆的行驶功率需求和电动附件功率需求,其中驾驶室制冷/供暖功率需求为主要的电动附件功率需求。而目前的插电式混合动力汽车能量管理策略是以行驶功率需求作为输入,忽略了驾驶室制冷/供暖功率需求。

### 5 结 语

综合上述分析,笔者认为,下一步的研究工作可以在以下两个方面开展:

1) 研究计及发动机冷却液温度和三元催化器温度等温度因素的插电式混合动力汽车能量管理策略。

目前插电式混合动力汽车能量管理策略没有考虑发动机冷却液温度和三元催化器温度对发动机油耗和排放的影响,而发动机冷却液温度和三元催化器温度对油耗和排放具有直接影响,因此在建立发动机热模型和三元催化器模型的基础上,研究计及发动机冷却液温度和三元催化器温度等温度因素的能量管理策略,对于满足日趋严格的排放法规和油耗政策具有重要的现实意义。

2) 研究计及驾驶室制冷/供暖功率需求的插电式混合动力汽车能量管理策略。

驾驶室制冷/供暖功率对插电式混合动力汽车纯电动续航里程和能量分配具有重要影响,插电式混合动

力汽车的供暖系统一般是在原发动机冷却液废热供暖的基础上,增加了 PTC (positive temperature coefficient, 正的温度系数) 加热器供暖, 研究计及驾驶室供暖功率需求的插电式混合动力汽车能量管理策略对增加发动机冷却液废热供暖、减少驾驶室供暖对电池电能的消耗和提高整车的总效率具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 钱立军, 邱利宏, 辛付龙, 等. 插电式四驱混合动力汽车能量管理与转矩协调控制策略[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 55-64.  
QIAN Lijun, QIU Lihong, XIN Fulong, et al. Energy management and torque coordination control for plug-in 4WD hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 55-64. (in Chinese)
- [2] 秦大同, 赵新庆, 苏岭, 等. 插电式混合动力汽车变参数能量管理策略[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 112-118.  
QIN Datong, ZHAO Xinqing, SU Ling, et al. Variable parameter energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(2): 112-118. (in Chinese)
- [3] Banvait H, Anwar S, Chen Y. A rule based energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle[C] // American Control Conference. St. Louis: IEEE, 2009: 3938-3943.
- [4] Tulpule P, Marano V, Rizzoni G. Effect of traffic, road and weather information on PHEV energy management[J]. SAE Technical Papers, 2011: 8-12.
- [5] Tulpule P, Marano V, Rizzoni G. Effects of different PHEV control strategies on vehicle performance[C] // Proceedings of the American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2009: 3950-3955.
- [6] 张博, 李君, 高莹, 等. Plug-in 混合动力汽车能量管理策略全局优化研究[J]. 中国机械工程, 2010(6): 715-720.  
ZHANG Bo, LI Jun, GAO Yin, et al. Study on global optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy management strategies[J]. China Mechanical Engineering, 2010(6): 715-720. (in Chinese)
- [7] Mahyar V, Taghavipour A, Azad N L, et al. A comparative analysis of route-based power management strategies for real-time application in plug-in hybrid electric vehicles[C] // American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2014: 2612-2617.
- [8] Mahyar V, Taghavipour A, Azad N L. Traction-motor power ratio and speed trajectory optimization for power split PHEVs using route information[C] // ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston: ASME, 2012: 301-308.
- [9] He Y, Chowdhury M, Pisu P, et al. An energy optimization strategy for power-split drivetrain plug-in hybrid electric vehicles[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2012, 22(5): 29-41.
- [10] Khayyer P, Wollaeger J, Onori S, et al. Analysis of impact factors for plug-in hybrid electric vehicles energy management[C] // 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Anchorage, September 16-19, 2012, Alaska, USA. [S.l.]: IEEE, 2012: 1061-1066.
- [11] Tulpule P, Marano V, Rizzoni G. Energy management for plug-in hybrid electric vehicles using equivalent consumption minimisation strategy[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2010, 2(24): 329-350.
- [12] Moura S J, Fathy H K, Callaway D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 545-555.
- [13] Fajri P, Asaei B. Plug-in hybrid conversion of a series hybrid electric vehicle and simulation comparison[C] // The 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Romania: IEEE, 2008: 287-292.
- [14] Zhang B, Mi C C, Zhang M. Charge-depleting control strategies and fuel optimization of blended-mode plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1516-1525.
- [15] 周能辉, 赵春明, 辛明华, 等. 插电式混合动力轿车整车控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 99-104.  
ZHOU Nenghui, ZHAO Chunming, XIN Minghua, et al. A research on the vehicle control strategy of a plug-in hybrid electric car[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2): 99-104. (in Chinese)
- [16] Li Y, Zeng Q, Wang C, et al. Research on fuzzy logic control strategy for a plug-in hybrid electric city public bus[C] // International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. [S.l.]: IEEE, 2010: 88-91.
- [17] Li Y S, Zeng Q L, Wang C L, et al. Research on control strategy for regenerative braking of a plug-in hybrid electric city public bus[C] // Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE, 2009: 842-845.

- [18] Li S G, Sharkh S M, Walsh F C, et al. Energy and battery management of a plug-in series hybrid electric vehicle using fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8):3571-3585.
- [19] 徐小东, 张冰战. 基于模糊逻辑的混合动力汽车控制策略研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(6): 725-728.  
XU Xiaodong, ZHANG Binzhan. A Study on the Hybrid Electric Vehicle Based on Fuzzy Logic Control Strategy[J]. *Journal of Heifei University of Technology(Natural Science)*, 2012, 35(6):725-728. (in Chinese)
- [20] Geng B, Mills J K, Sun D. Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9): 4238-4248.
- [21] Geng B, Mills J K, Sun D. Predictive control for Plug-in Microturbine powered hybrid electric vehicles using telemetry information[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. [S.l.]: IEEE, 2011:1468-1473.
- [22] Larsson V, Johannesson L, Egardt B, et al. Benefit of route recognition in energy management of plug-in hybrid electric vehicles[C]// American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2012: 1314-1320.
- [23] Sharma O P, Onori S, Guezennec Y, et al. Analysis of pontryagin's minimum rinciple-based energy management strategy for PHEV applications[C]// ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference, October 17-19, 2012, Fort Lauderdale, Florida, USA. [S.l.]: ASME, 2012: 145-150.
- [24] Kim N, Cha S, Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on pontryagin's minimum principle[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(5):1279-1287.
- [25] Kim N, Rousseau A, Lee D. A jump condition of PMP-based control for PHEVs[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23):10380-10386.
- [26] Chen Z, Mi C C, XIA B, et al. Energy management of power-split plug-in hybrid electric vehicles based on simulated annealing and pontryagin's minimum principle[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 272: 160-168.
- [27] Stockar S, Marano V, Rizzoni G, et al. Optimal control for plug-in hybrid electric vehicle applications[C] // 2010 American Control Conference Marriott Waterfront, June 30-July 02, 2010, Baltimore, MD, USA. [S.l.]: IEEE, 58(8): 5024-5030.
- [28] Stockar S, Marano V, Canova M, et al. Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(7): 2949-2962.
- [29] Filippi A D, Stockar S, Onori S, et al. Model-based life estimation of Li-ion batteries in PHEVs using large scale vehicle simulations; an introductory study[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference. [S.l.]: IEEE, 2010:1-6.
- [30] Tribioli L, Barbieri M, Capata R, et al. A real time energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on optimal control theory[J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 949-958.
- [31] Onori S, Tribioli L. Adaptive pontryagin's minimum principle supervisory controller design for the plug-in hybrid GM chevrolet volt[J]. *Applied Energy*, 2015, 147: 224-234.
- [32] Yu H, Kuang M, Mcgee R. Trip-oriented energy management control strategy for plug-in hybrid electric vehicles[C]// 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 12-15, 2011, Orlando, FL, USA. [S.l.]: IEEE, 2011: 5805-5812.
- [33] Gong Q, Li Y Y, Peng Z R. Trip based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles using gas-kinetic traffic flow model[C]// 2008 American Control Conference, June 11-13, 2008, Seattle, Washington, USA. [S.l.]: IEEE, 2008:3225-3230.
- [34] Gong Q, Li Y Y, Peng Z R. Trip-based power management of plug-In hybrid electric vehicle with two scale dynamic programming[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. Arlington: IEEE, 2007: 12-19.
- [35] 舒红, 聂天雄, 邓丽君, 等. 插电式混合动力汽车模型预测控制[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(5):36-41.  
SU Hong, NIE Tianxiong, DENG Lijun, et al. Model predictive control for a plug-in hybrid electric vehicle[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(5):36-41. (in Chinese)
- [36] Patil R, Kelly J C, Filipi Z, et al. A framework for the integrated optimization of charging and power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 62(6):1327-1334.