

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.10.001

# 计及能耗经济性和电池寿命的 PHEV 能量管理策略优化

秦大同, 章晓星, 姚明尧

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对一款混联式双电机插电混合动力汽车,建立了整车动力学模型和电池寿命衰减模型,同时为反映电池温度对电池寿命的影响,建立了电池温度模型;考虑能量管理控制对能耗经济性和电池寿命衰减的影响,制定了一种多模式逻辑规则能量管理策略,并分析了控制参数变化对能耗经济性和电池寿命的影响。建立包含等效油耗和电池寿命衰减的多目标优化模型,基于多目标改进遗传算法对能量管理策略控制参数进行优化,优化结果表明:基于本文插电式混合动力汽车能量管理策略的优化方法得到的控制参数 Pareto 最优解集兼顾了插电式混合动力汽车的能耗经济性和电池寿命,可以得到多组不同的控制参数优化解,为能量管理策略的设计应用提供了多种可供选择的方案。

**关键词:**插电式混合动力汽车;能量管理策略;能耗经济性;电池寿命;多目标优化

**中图分类号:**U462.34

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2020)10-001-11

## Optimization of PHEV energy management strategy considering battery life and energy consumption economy

QIN Datong, ZHANG Xiaoxing, YAO Mingyao

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, a vehicle dynamics model and a battery life attenuation model were established for a hybrid dual-motor plug-in hybrid vehicle. At the same time, to reflect the influence of battery temperature on battery life, a battery temperature model was also established. Considering the impact of energy management control on energy economy and battery life decay, a energy management strategy of multi-mode logic rules was developed, and the impact of different control parameters on energy economy and battery life was analyzed. A multi-objective optimization model with equivalent fuel consumption and battery life attenuation was established to optimize the energy management strategy control parameters based on multi-objective improved genetic algorithm. The results show that the Pareto optimal solutions based on the design and optimization method of PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) energy management strategy in this article are feasible in terms of both energy consumption economy and battery life of plug-in hybrid vehicles. With many different optimal solutions of control parameters, it provides a variety of alternative schemes for the design and application of PHEV energy management strategy.

**收稿日期:**2020-05-03

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2016YFB0101402);中央高校基本科研业务费资助项目(2018CDJDCD0001)。

Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFB0101402), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018CDJDCD0001).

**作者简介:**秦大同(1956—),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事动力传动及其综合控制研究,(E-mail) dtqin@cqu.edu.cn。

**Keywords:** PHEV; energy management strategy; energy consumption economy; battery life; multi-objective optimization

能量管理策略是插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)的关键技术,目前大致分为:基于规则的能量管理策略、基于瞬时优化的能量管理策略及基于全局优化的能量管理策略<sup>[1]</sup>。其中,规则能量管理策略简单有效且实用性较强,应用较为广泛。

目前大多数能量管理策略的研究主要以提高能耗经济性为目的<sup>[2]</sup>。插电式混合动力汽车在行驶过程中需要频繁进行充放电循环,动力电池性能的衰减也不可避免。由于电池成本昂贵,为延长电池寿命,有必要在制定能量管理策略时考虑电池寿命衰减情况<sup>[3]</sup>。电池充放电深度、充放电次数、温度以及电流大小等因素都会对电池寿命产生影响。Ebbesen 等<sup>[4]</sup>建立安时(Ah)累计电池模型,考虑电池充放电功率大小对电池寿命的影响,设计了混合动力汽车的能量管理优化控制策略,但在电池寿命模型中没有建立电池的温度变化模型。李悦<sup>[5]</sup>建立电池寿命模型,考虑电池充放电倍率对电池寿命的影响,动态调整能量管理策略中充放电功率门限值,但未对影响电池充放电深度的电池荷电状态(state of charge, SOC)目标值进行优化。赵凯清<sup>[6]</sup>在制定能量管理策略时通过限制电池的充放电功率和对不同行驶里程下电池 SOC 使用范围进行划分来限制电池电流过大和温度过高,从而减少对电池寿命的影响但此种方法未建立电池寿命模型,不能准确评价控制参数改变对燃油经济性和电池寿命衰减的影响。也有学者<sup>[7-8]</sup>建立包含燃油消耗和电池寿命衰减的优化目标函数,采用基于动态规划和随机动态规划算法等全局优化算法进行能量管理策略的制定。此方法虽然可以使优化目标达到全局最优,但是求解过程中因计算量较大实时性不能得到保证。

此外,对于能量管理策略多目标优化问题,很多学者采取加权系数或者惩罚函数法将多目标优化问题转化为单目标优化问题。Xu 等<sup>[8]</sup>将燃油经济性和电池寿命衰减的多目标优化问题利用价格形式转化为单目标优化问题进行仿真分析。Li 等<sup>[9]</sup>对电池容量衰减量施加惩罚因子,将燃油消耗量和电池寿命衰减量求和后的目标函数作为优化目标。但此方法在优化目标相互影响或冲突时,存在加权系数难以确定等问题<sup>[10-11]</sup>。

笔者以一款混联式双电机插电混合动力汽车为研究对象,针对以往能量管理策略优化研究中未考虑电池温度变化对电池寿命的影响,建立了电池温度模型。在制定能量管理策略时既考虑能耗经济性,同时兼顾电池寿命。首先确定车辆在指定运行模式下各动力部件运行区域的匹配关系,然后确定各运行模式之间的切换规则,制定了规则能量管理策略,并分析了控制参数对能耗经济性和电池寿命的影响,从而选出了对能耗经济性和电池寿命影响较大的待优化控制参数。在进行能量管理策略优化时,针对传统加权系数法或惩罚函数法的不足,将能耗经济性和电池寿命同时作为优化目标,采用基于 Pareto 原理的多目标遗传算法在综合工况下对能量管理策略控制参数进行优化,优化结果为能量管理策略的设计应用提供了多种选择方案。

## 1 整车动力系统结构和参数

所研究的插电式混合动力系统结构如图 1 所示。该结构以电机 MG1 作为驱动电机,电机 MG2 作为发电机,主要有 3 种驱动形式:纯电动驱动、串联混合动力驱动和并联混合动力驱动。通过离合器 C1 的结合和分离实现发动机参与或退出驱动整车。

该动力系统主要有以下几种工作模式:

- 1) 纯电动模式。电池提供能量给电机 MG1 驱动车辆。
- 2) 串联型混合驱动模式。发动机和电池一起提供能量给电机 MG1 驱动车辆。
- 3) 串联型行车充电模式。发动机驱动电机 MG2 发电,一部分能量给电机 MG1 驱动车辆,多余能量对电池充电。

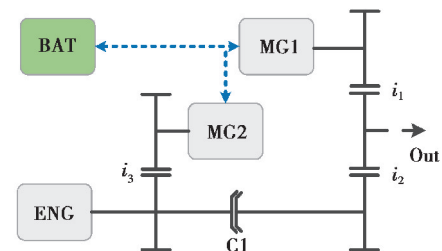


图 1 整车动力系统结构

Fig. 1 Vehicle power system structures

- 4) 发动机单独驱动模式。发动机作为唯一动力源单独驱动车辆。
  - 5) 并联型混合驱动模式。发动机和电机 MG1 共同驱动车辆, 电池提供能量给电机 MG1。
  - 6) 并联型行车充电模式。发动机驱动车辆, 多余功率由电机 MG1 给电池充电。
  - 7) 再生制动模式。由电机 MG1 进行能量回收对电池充电。
- 整车的主要结构参数和动力系统参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 整车主要结构参数

Table 1 Main vehicle parameters of PHEV

整备质量/kg	迎风面积/m <sup>2</sup>	风阻系数	车轮半径/m	滚动阻尼系数
1 550	2.25	0.35	0.289	0.012 5

表 2 PHEV 动力系统参数

Table 2 Power system parameters of PHEV

发动机峰值 功率/kW	MG1 电机峰值 功率/kW	MG2 电机峰值 功率/kW	锂电池容量/ (A · h)	锂电池 数目	主减速比 $i_0$	传动比 $i_1$	传动比 $i_2$	传动比 $i_3$
93	90	63	40	128	3.58	2.3	0.8	1

## 2 电池寿命模型

锂离子电池寿命模型实际建模过程复杂且仿真计算量大, 针对研究的电池类型, 选择文献[12]提出的磷酸铁锂电池容量衰减经验模型, 基于此模型进行考虑电池寿命的能量管理策略研究。

$$Q_{\text{loss}} = A \cdot e^{-\left(\frac{E_a + B \cdot C_{\text{rate}}}{RT_{\text{bat}}}\right)} \cdot (A_h)^z, \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{loss}}$  为电池容量衰减, %;  $A$  为前因子;  $E_a$  为活化能, J;  $E_a = 31\,700$  J;  $B$  为放电倍率的修正系数,  $B = -370.3$ ;  $C_{\text{rate}}$  为电池放电倍率;  $R$  为气体常数, J/(mol · K),  $R = 8.31$ ;  $T_{\text{bat}}$  为电池工作温度, K;  $A_h$  为放电安时量;  $z$  为时间因子,  $z = 0.55$ 。前因子和放电倍率的关系如表 3 所示。

表 3 前因子和放电倍率的关系

Table 3 Relationship of pre-exponential factor and the  $C_{\text{Rate}}$ 

$C_{\text{rate}}$	1/2	2	6	10
$A$	31 630	21 681	12 934	15 512

对  $A$  值和放电倍率  $C_{\text{rate}}$  之间的关系进行拟合:

$$A(C_{\text{rate}}) = 32\,350 e^{-0.3375C_{\text{rate}}} + 4\,041 e^{0.1271C_{\text{rate}}}, \quad (2)$$

上述电池寿命半经验模型主要是在恒流充放电情况下得到的, 为了适应车辆行驶过程中电池电流频繁变化的情况, 对锂电池容量衰减模型进行改进, 在相同寿命条件下将不同温度和放电倍率下的累计放电安时量等效到温度为 25 °C, 放电倍率为  $C_{\text{rate}} = 1$  时进行计算<sup>[13]</sup>。  $Q_1$  和  $Q_n$  分别为放电倍率为 1 和  $n$  时的电池容量衰减,  $A_{\text{hl}}$  为  $C_{\text{rate}} = 1$  时电池实际放电安时量,  $A_{\text{hn}}$  为  $C_{\text{rate}} = n$  时电池实际放电安时量,  $T_{\text{bat}0} = 25$  °C,  $T_{\text{bat}}$  为不同工作条件下的电池温度。可以得出  $C_{\text{rate}} = n$  时电池实际放电安时量  $A_{\text{hn}}$  和等效温度为 25 °C, 放电倍率  $C_{\text{rate}} = 1$  时放电安时量  $A_{\text{hl}}^*$  的关系为

$$A_{\text{hl}}^* = \sqrt[0.55]{\frac{A(n)}{A(1)}} \cdot e^{-\frac{(31\,700 - 370.3n)}{8.317T_{\text{bat}}} + 12.64} \cdot A_{\text{hn}}. \quad (3)$$

由于汽车行驶过程中电池 SOC 不是一直处于放电模式, 因此在计算过程中把发动机对电池进行充电时电池寿命衰减近似成放电情况下进行计算, 以累计充放电电量进行  $A_{\text{hn}}$  的计算<sup>[14]</sup>。

$$A_{hm} = \int_0^{t_f} \frac{|I_t(t)|}{3600} dt, \quad (4)$$

式中:  $t_f$  为终端时刻;  $I_t(t)$  为行驶过程中的电流大小。

因此在 1 个行驶工况内, 电池寿命损失可表示为:

$$Q_1 = \int_0^{t_f} A(1) * e^{-\frac{(31700-370.3)}{8.31T_{bat0}}} * \frac{A(n(t))}{A(1)} * e^{-\frac{(31700-370.3n)}{8.31T_{bat(t)}+12.64}} * (A_{hm}(t))^{0.55} dt. \quad (5)$$

式中,  $n(t)$  为行驶过程中电池充放电倍率;  $T_{bat}(t)$  为行驶过程中电池的温度。

写成离散形式, 工况划分为  $k$  个时间间隔, 每个间隔为  $\Delta t_k$ :

$$Q_1 = \sum_k A(1) * e^{-\frac{(31700-370.3)}{8.31T_{bat0}}} * \frac{A(n(k))}{A(1)} * e^{-\frac{(31700-370.3n)}{8.31T_{bat(k)}+12.64}} * \left(\frac{I(k)}{3600}\right)^{0.55} \Delta t_k. \quad (6)$$

为了反映电池温度对电池寿命的影响, 有必要建立电池的温度模型。由于进行电池组温度计算主要是为了进行能量管理策略的仿真研究, 而建立高精度的电池热模型相对复杂且不是本文的研究内容, 因此在建立电池热模型时进行了相应的简化处理。电池的温度模型包括生热模型和散热模型。锂离子电池的生热量主要来自欧姆内阻生热、电化学反应热以及极化生热。由于准确测量生热速率比较困难, 笔者采用理论法建立电池生热模型, 锂离子电池正常工作温度范围内, 其热量产生主要与电压、电流、内阻以及电量有关, 化学反应热对总热量影响较小, 热量主要来自电池内阻损耗生热。假设电池内部均匀生热且热源稳定, 建立的电池生热速率模型为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} q = \frac{I}{V_b} \left( (U - U_{op}) + T \frac{\partial U_{op}}{\partial T} \right), \\ U - U_{op} = IR, \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $q$  为生热速率;  $V_b$  为电池体积;  $I$  为电池电流, 充电为正, 放电为负;  $T$  为电池温度;  $U_{op}$  为电池开路电压;  $R$  为电池内阻;  $U$  为电池工作电压;  $(U - U_{op})$  表示焦耳热部分;  $\frac{\partial U_{op}}{\partial T}$  为温度系数, 表示可逆反应热部分。

车载电池组的散热方式主要有风冷和液冷, 目前大多数车使用的是风冷散热方式。在电池散热模型建立时假设热量通过电池表面和周围空气进行对流换热, 当电池温度超过设定温度时进行强制冷却, 以单体电池的生热特性代替电池组的热特性<sup>[16]</sup>。任一时刻电池组表面和冷却空气进行对流换热的传热量  $Q_{bat-air}$  计算公式为

$$Q_{bat-air} = \frac{T_{bat} - T_{air}}{R_{eff}}, \quad (8)$$

$$R_{eff} = \frac{1}{h A_s} + K, \quad (9)$$

式中:  $T_{air}$  为冷却空气温度;  $R_{eff}$  为热传递等效热阻;  $h$  为空气对流换热系数, 取  $h = 5$ ;  $A_s$  为电池表面积;  $K$  为与电池组散热表面积、电池壳体厚度以及电池材料导热率有关的常量。根据电池的生热量和散热量可以列出电池温度的均质对流换热方程为

$$q_{bat} = \frac{T_{bat} - T_{air}}{R_{eff}} + c_{bat} * m_{bat} * \frac{dT_{bat}}{dt}, \quad (10)$$

式中:  $q_{bat}$  为电池生热量;  $T_{air}$  为冷却空气温度;  $R_{eff}$  为热传递等效热阻;  $c_{bat}$  为电池比热容;  $m_{bat}$  为电池质量。

### 3 考虑电池寿命的能量管理策略制定

在制定能量管理策略时既要考虑车辆的燃油经济性, 同时也要考虑动力电池的寿命。首先确定车辆在指定运行模式下各动力部件运行区域的匹配关系, 然后确定各运行模式之间的切换规则。

#### 3.1 主要运行模式分析

##### 1) 纯电动驱动模式。

在纯电动驱动模式下, 当动力电池可以提供充足的能量驱动车辆时, 由电机 MG1 单独驱动车辆。此时, 发动机和电机 MG2 处于关闭状态, 整车的功率需求由电机 MG1 单独提供。



## 2) 串联型混合动力模式。

对于串联型混合动力模式,一般有 2 种常用的控制策略<sup>[17]</sup>。第 1 种是功率跟随模式,使用这种策略可以减少电池的充放电循环,提高电池的寿命,但会导致某些情况下发动机工作在低效区,影响了发动机的效率。第 2 种是恒功率模式,发动机在高效区恒功率运行对电池进行充电,驱动电机的能量只能从电池获取。这样发动机的效率虽然提高了,但是会导致某些情况下电池出现大电流放电,从而影响电池的寿命和电池的效率。

为了兼顾燃油经济性和电池寿命,串联型混合动力模式采用如下工作方式:将发动机控制在效率较高区域工作,对需求功率进行功率跟随,当需求功率大于或小于发动机高效区域能够输出的功率时,由电池组通过充放电补偿车辆需求功率和发动机输出功率的差值。这样既可以提高电池的充放电效率和寿命,又可以使发动机工作在高效区。在发动机-发电机联合工作效率图上对不同功率下的最优效率工作点进行寻优,获得串联型混合动力模式下“发动机-发电机”最佳功率曲线,如图 2 中虚线所示。在不同需求功率下,控制发动机运行在该最佳功率曲线上,限制发动机-发电机工作功率范围为 $[P_{low}, P_{high}]$ 。

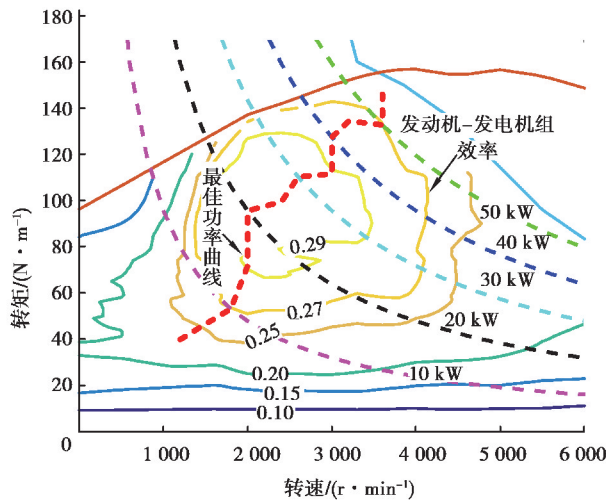


图 2 发动机-发电机组效率 MAP 和最佳功率曲线

Fig. 2 Engine-generator efficiency MAP and best power curve

## 3) 并联型混合动力模式。

如果使发动机始终运行在最优经济曲线上,则电机频繁地补偿车辆需求转矩和发动机输出转矩的差值,这样虽然可以获得较好的燃油经济性,但是会造成电池组的充放电次数增加,对电池寿命不利。因此定义并联型混合动力模式工作方式如下:当整车的的需求转矩在设定的发动机高效工作区间时,发动机单独工作;当整车的的需求转矩不在发动机的高效工作区时,通过电机 MG1 调节发动机始终工作在最优经济曲线上。以发动机各转速下的最大转矩乘以定值比例系数 $F_{up}$ 、 $F_{low}$ 得到上下限值进行发动机高效工作区间划分<sup>[18]</sup>。

## 4) 制动模式。

当电池  $S_{oc}$  (表示电池 SOC 值大小) 小于充电最大门限值  $S_{ochigh}$ 、车辆需求制动力矩  $T_{brake}$  小于电机能够提供的最大制动力矩、制动减速度绝对值小于门限值  $a_{brake}$  且车速小于最低车速门限值  $V_{low}$  时,采用再生制动模式,车辆需求制动力矩等于再生制动力矩;当电池  $S_{oc}$  小于充电最大门限值  $S_{ochigh}$ 、车辆需求制动力矩  $T_{brake}$  大于电机能够提供的最大制动力矩、制动减速度绝对值小于门限值  $a_{brake}$  且车速小于最低车速门限值  $V_{low}$  时,采用联合制动模式,电机能够提供的最大制动力矩等于再生制动力矩,其余制动力由机械制动提供。

## 3.2 模式切换规则

### 1) CD 模式和 CS 模式切换。

CD 模式主要是以电池提供能量为主,而 CS 模式主要是以发动机提供能量为主。为避免 CD 和 CS 模式之间的频繁切换,同时考虑电池使用寿命及 SOC 合理使用范围,设置 CD 模式进入 CS 模式的电池目标 SOC 初值  $S_{ocl}$  为 0.35, CS 模式进入 CD 模式的电池目标 SOC 初值  $S_{och}$  为 0.45。

2) CD 模式下模式切换规则。

CD 模式下车辆的功率需求可以完全由动力电池提供,但是会造成功率需求较大时电池的电流较大,影响电池寿命和效率。为此,可在功率需求较大时进入串联型混合动力模式工作,由发动机提供部分需求功率,从而限制电池组放电功率。同时,规定在车速较高且功率需求不是很大时,工作在并联型混合动力模式满足车辆性能需求。

当电池  $S_{oc} > 0.45$  时,进入 CD 模式。当整车需求功率小于  $P_{cd}$  且车速小于  $V_{cd}$  时,采用纯电动模式;当车速大于  $V_{cd}$  时,采用并联型混合动力模式;当需求功率大于  $P_{cd}$  时采用串联型混合动力模式。

3) CS 模式下模式切换规则。

当电池  $S_{oc} < 0.35$ ,进入 CS 模式。当整车需求功率小于  $P_{cs}$  且车速小于  $V_{cs}$  时,采用纯电动模式;当车速大于  $V_{cs}$  时,采用并联型混合动力模式;当需求功率大于  $P_{cs}$  时采用串联型混合动力模式。此外,当电池电量低于 SOC 使用下限时,为维持电池电量,整车工作在串联型混合动力模式,发动机额外提供功率对电池进行充电,直至电池 SOC 达到 0.35。整车电量不足时,规定发动机额外提供的电池充电功率应基本维持在 5 kW 左右<sup>[19]</sup>。

## 4 考虑能耗经济性和电池寿命的能量管理多目标优化

### 4.1 控制参数对能耗经济性和电池寿命影响的灵敏度分析

基于规则的能量管理策略其可调整的控制参数较多,控制参数的变化会对能耗经济性和电池寿命产生不同的影响。灵敏度分析的目的就是分析不同的控制参数的变化对能耗经济性和电池寿命的影响程度。选取功率门限值  $P_{cd}$  和  $P_{cs}$ 、车速门限值  $V_{cd}$  和  $V_{cs}$ 、串联型混合动力模式发动机输出功率范围限值  $P_{low}$  和  $P_{high}$ 、发动机最优工作区间上下限值系数  $F_{up}$  和  $F_{low}$ 、CD 和 CS 模式的 SOC 切换门限值  $S_{ocl}$  和  $S_{och}$  作为控制参数。功率门限值  $P_{cd}$  和  $P_{cs}$ 、车速门限值  $V_{cd}$  和  $V_{cs}$  均取初始值的 60%~140% 作为参数取值区间。串联型混合动力模式发动机输出功率范围限值  $P_{low}$  和  $P_{high}$ 、发动机最优工作区间上下限值系数  $F_{up}$  和  $F_{low}$  的取值应保证发动机尽量工作在高效率区域。CD 和 CS 模式的 SOC 切换门限值  $S_{ocl}$  和  $S_{och}$  的取值应保证  $S_{och}$  大于  $S_{ocl}$ ,这样不会导致模式切换无法判断的情况。考虑电池使用寿命设置电池 SOC 使用下限为 0.25<sup>[20]</sup>。控制参数的初值及具体取值范围如表 4 所示。

表 4 控制参数及取值区间

Table 4 Value ranges of optimal variables

控制参数	$P_{cd}/\text{kW}$	$V_{cd}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{cs}/\text{kW}$	$V_{cs}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{low}/\text{kW}$	$P_{high}/\text{kW}$	$F_{up}$	$F_{low}$	$S_{ocl}$	$S_{och}$
初值	45	110	15	60	10	55	0.8	0.5	0.35	0.45
下限值	27	66	9	36	6	33	0.7	0.4	0.25	0.40
上限值	63	154	21	84	20	60	0.9	0.6	0.35	0.50

分别对表 4 中的每个控制参数在其取值范围内等步长取值,保持其他控制参数不变,在 4 个 WLTP 循环工况下对不同的控制参数值进行仿真,计算每个控制参数与燃油消耗以及电池寿命衰减之间的相关系数,如表 5 所示。

表 5 控制参数对结果的灵敏度分析

Table 5 Sensitivity analysis of control parameters to results

控制参数	$P_{cd}/\text{kW}$	$V_{cd}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{cs}/\text{kW}$	$V_{cs}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{low}/\text{kW}$	$P_{high}/\text{kW}$	$F_{up}$	$F_{low}$	$S_{ocl}$	$S_{och}$
燃油消耗	-0.847	-0.668	-0.836	-0.078	0	0.995	-0.807	0.663	0.992	$-7.50 \times 10^{-16}$
电池寿命	-0.660	0.960	0.970	0.490	$-7.95 \times 10^{-17}$	-0.990	-0.490	0.290	-0.990	$-7.50 \times 10^{-16}$

通过表 5 可以发现,控制参数  $P_{\text{low}}$  和  $S_{\text{och}}$  的变化对能耗经济性和电池寿命的影响程度较低,因此选择其余 8 个控制参数作为能量管理策略的优化变量。

#### 4.2 优化目标及优化变量

将整车能耗经济性和电池寿命作为能量管理策略优化目标,考虑 PHEV 同时存在燃油消耗和电量消耗,将油耗和电耗转换成等效油耗进行优化分析<sup>[21]</sup>。优化变量如表 6 所示。

$$f_1 = \int_0^t \frac{j_f * Q_{\text{fuel}}(t) + j_e * \frac{P_{\text{elec}}(t)}{\eta_{\text{elec}}}}{7.8} dt, \quad (11)$$

$$f_2 = \int_0^t Q_{\text{loss}}(t) dt, \quad (12)$$

式中:  $f_1$  为等效燃油消耗评价函数;  $j_f$  为油价,取  $j_f = 7.8$  元/L;  $Q_{\text{fuel}}(t)$  为  $t$  时刻燃油消耗量;  $j_e$  为电价,取  $j_e = 0.52$  元/度;  $P_{\text{elec}}(t)$  为  $t$  时刻动力电池充放电功率,充电时大于 0,放电时小于 0;  $\eta_{\text{elec}}$  为电网的充电效率,取 0.98;  $f_2$  为电池容量衰减量;  $Q_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时刻电池寿命衰减。

表 6 优化变量

Table 6 Optimization variable

变量范围	$P_{\text{cd}}/\text{kW}$	$V_{\text{cd}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{\text{cs}}/\text{kW}$	$V_{\text{cs}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{\text{high}}/\text{kW}$	$F_{\text{up}}$	$F_{\text{low}}$	$S_{\text{ocl}}$
初值	45	110	15	60	55	0.8	0.5	0.35
下限值	27	66	9	36	33	0.7	0.4	0.25
上限值	63	154	21	84	60	0.9	0.6	0.35

#### 4.3 优化约束

在满足车辆动力性指标以及电池续航里程约束基础上,发动机转矩  $T_e$  和转速  $n_e$ ,电机 MG1、转矩  $T_{m1}$  和转速  $n_{m1}$ ,电机 MG2、转矩  $T_{m2}$  和转速  $n_{m2}$ ,电池  $S_{\text{oc}}(t)$ 、车速  $V_{\text{veh}}$  的约束优化约束条件如下:

$$\begin{cases} T_e(t) \in [0, T_{\text{emax}}], \\ n_e(t) \in [800, n_{\text{emax}}], \\ |T_{m1}(t)| \in [0, T_{m1\text{max}}], \\ |T_{m2}(t)| \in [0, T_{m2\text{max}}], \\ n_{m1}(t) \in [0, n_{m1\text{max}}], \\ n_{m2}(t) \in [0, n_{m2\text{max}}], \\ S_{\text{oc}}(t) \in [0.2, 0.9], \\ V_{\text{veh}}(t) \in [0, 150]. \end{cases} \quad (13)$$

#### 4.4 仿真分析

为适应实际工况的复杂性,选择全球统一轻型车辆排放测试规程(worldwide harmonized light vehicles test procedure, WLTP)工况进行仿真,WLTP 工况包含了市区、郊区和高速等行驶工况。对组合工况运行 4 次,总时间为 7 208 s。WLTP 工况时间-车速曲线如图 3 所示。

利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建整车仿真模型,考虑到电池  $S_{\text{oc}}$  的估计精度并参考文献[22-23]中 PHEV 整车仿真时  $S_{\text{oc}}$  初始值的选取,设置电池初始  $S_{\text{oc}}$  为 0.9,在 WLTP 工况下进行仿真,总里程为 93.06 km。基于多目标遗传算法对能量管理控制策略控制参数进行优化仿真。选取最优前端个体在种群中所占的比例为 0.3,种群规模为 100,进化代数 80,在优化过程中,随着进化代数的增加,在约束条件给定区域内寻找尽可能逼近真实最优解的非支配解,最终得到该多目标优化的 Pareto 最优解集,如图 4 所示。

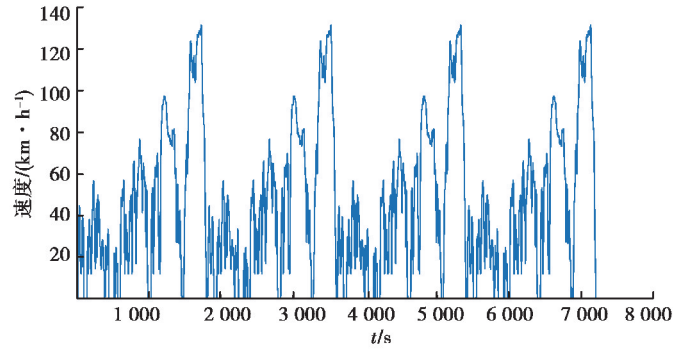


图 3 WLTP 循环工况速度曲线

Fig. 3 WLTP cycle condition speed curve

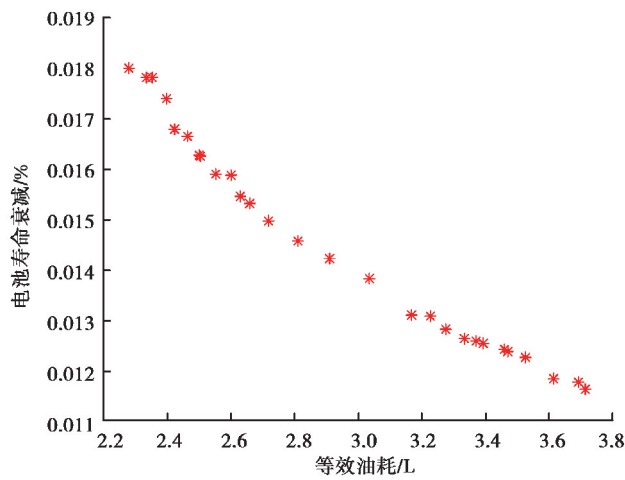


图 4 多目标优化的 pareto 最优解

Fig. 4 Pareto optimal solution for multi-objective optimization

优化结果可以直观地体现出等效油耗和电池寿命衰减之间的关系。从图 4 中可以看出,等效油耗与电池寿命两个目标函数之间是相互冲突的,一个目标函数值的改进往往会以牺牲另一个目标函数值为代价,可以根据实际需要进行最优解的选择。选取 6 组具有代表性的 pareto 最优解进行对比研究,如表 7 所示。可以发现,pareto 前沿中的解互不占优,即 6 组优化解中每两个解互相比,一个性能指标提升的同时,另一个性能指标则会下降。针对能耗经济性和电池寿命两个优化目标对能量管理策略控制参数进行优化的过程其实就是合理协调发动机和电机工作的过程,既要保证能耗经济性的提高,同时也要合理考虑对电池寿命的影响。

表 7 部分具有代表性的 pareto 最优解及性能指标

Table 7 Some representative pareto optimal solutions and performance indicators

组号	$P_{cd}/$ kW	$P_{cs}/$ kW	$V_{cd}/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$V_{cs}/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$S_{ocl}$	$P_{high}/$ kW	$F_{up}$	$F_{low}$	$f_1/L$	$f_2/\%$
优化前	45.00	15.00	110.00	60.00	0.35	55.00	0.80	0.50	3.03	0.016
1	54.07	15.19	106.20	46.34	0.27	46.59	0.81	0.54	2.36	0.018
2	47.57	14.61	97.51	59.36	0.29	50.08	0.84	0.41	2.42	0.168



续表 7

组号	$P_{cd}/$ kW	$P_{cs}/$ kW	$V_{cd}/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$V_{cs}/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$S_{ocl}$	$P_{high}/$ kW	$F_{up}$	$F_{low}$	$f_1/L$	$f_2/\%$
3	48.75	14.70	97.35	55.84	0.29	49.67	0.85	0.42	2.46	0.017
4	49.35	14.20	92.48	54.72	0.30	48.16	0.81	0.42	2.72	0.015
5	50.58	13.33	78.56	51.80	0.30	49.21	0.82	0.42	3.17	0.013
6	51.05	15.10	66.55	50.45	0.30	47.23	0.85	0.42	3.71	0.011

图 4 中给出了对电池寿命衰减和等效油耗不同重视程度的所有最优解,等效油耗越低则表示该优化解对能量经济性的重视程度越低,对电池寿命的重视程度越高。取等效油耗最低的优化解作为能耗经济性最优解与其他优化解进行比较。

选取第 4 组优化解与能耗经济性最优解的仿真结果进行对比分析,如图 5~8 所示。由表 8 仿真结果对比可得,第 4 组优化解相比能耗经济性最优解的等效油耗增加了 19.30%,但电池寿命衰减降低了 16.67%。从图 8 可以看出,由于在制定能量管理策略时考虑了电池寿命,相对于只考虑能耗经济性最优的能量管理策略其电池的温升得到了有效控制,从而减少了温度过高对电池寿命的不利影响。

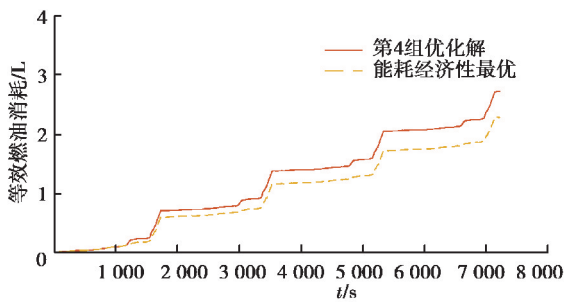


图 5 等效燃油消耗对比

Fig. 5 The comparison of equivalent fuel consumption

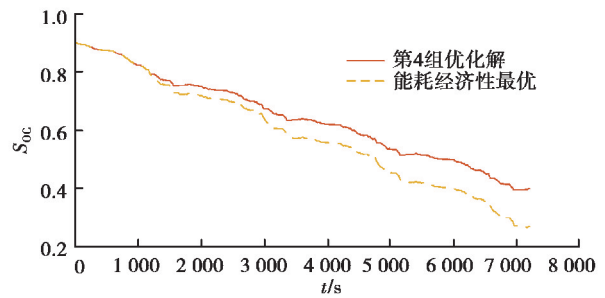


图 6 Soc对比

Fig. 6 The comparison of Soc

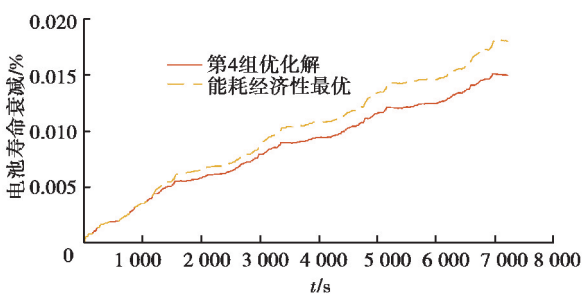


图 7 电池寿命衰减对比

Fig. 7 The comparison of battery life fading

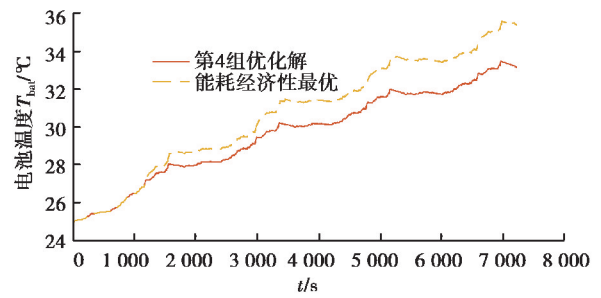


图 8 电池温度对比

Fig. 8 The comparison of battery temperature

表 8 仿真结果对比

Table 8 The comparison of simulative optimal solutions

优化方法	等效油耗 $f_1/L$	电池寿命衰减 $f_2/\%$	对比/ $\%$
能耗经济性最优	2.28	0.018	+19.30
第 4 组优化解	2.72	0.015	-16.67

## 5 结 论

1) 结合插电式混合动力汽车实际运行情况,建立了电池寿命衰减模型,针对车辆行驶过程中电池温度的不断变化,结合电池的生热特性和散热机理,通过电池组简化热模型进行计算以考虑温度对电池寿命的影响。

2) 在设计的规则能量管理策略基础上,综合考虑能耗经济性和电池寿命对能量管理策略控制参数进行优化,得到了多组 Pareto 最优解。通过仿真对比发现,在能量管理策略优化中等效油耗和电池寿命是一组相互影响的目标量。因此在实际使用中,根据能耗经济性和电池寿命两个目标重要程度的不同,可以基于不同的优化控制参数,选择不同的最优解来满足能量管理控制的不同需求。

3) 笔者未考虑电池热管理系统工作模式及电池组不一致性对电池寿命的影响,未来可进一步考虑电池热管理系统工作模式及电池组不一致性进行能量管理策略的制定。

### 参考文献:

- [1] 苏岭, 曾育平, 秦大同. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究现状和发展趋势[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(2): 10-15.  
SU Ling, ZENG Yuping, QIN Datong. Current situation and development trend of plug-in hybrid electric vehicle's energy management strategies[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(2): 10-15. (in Chinese)
- [2] Li J Q, Jin X, Xiong R. Multi-objective optimization study of energy management strategy and economic analysis for a range-extended electric bus[J]. Applied Energy, 2017, 194: 798-807.
- [3] 张冬冬. 动力电池寿命研究及其在增程式电动车控制中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
ZHANG Dongdong. Research on battery life and application to control of extended-range electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [4] Ebbesen S, Elbert P, Guzzella L. Battery state-of-health perceptive energy management for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2893-2900.
- [5] 李悦. 考虑电池衰减特性的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.  
LI Yue. Research on energy management strategy of plug-in hybrid vehicle considering battery decay characteristics[D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [6] 赵凯清. 基于电池安全与寿命的 PHEV 控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
ZHAO Kaiqing. Study on the control strategy of plug-in hybrid electric vehicle based on battery safety and life[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [7] Tang L, Rizzoni G. Energy management strategy including battery life optimization for a HEV with a CVT[C/OL]. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Piscataway, NJ: IEEE, 2016 (2016-07-14)[2020-05-03]. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7513014>.
- [8] Xu F G, Jiao X H, Sasaki M, et al. Energy management optimization in consideration of battery deterioration for commuter plug-in hybrid electric vehicle[C/OL]. 2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). Piscataway, NJ: IEEE, 2016 (2016-11-21)[2020-05-03]. <https://doi.org/10.1109/SICE.2016.7749262>.
- [9] Li J Q, Jin X, Xiong R. Multi-objective optimal energy management strategy and economic analysis for an range-extended electric bus[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 814-820.
- [10] 宋康, 陈潇凯, 林逸. 汽车行驶动力学性能的多目标优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 352-357.  
SONG Kang, CHEN Xiaokai, LIN Yi. Multi-objective optimization of vehicle ride dynamic behaviors[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2): 352-357. (in Chinese)
- [11] Wang Q, Frank A A. Plug-in HEV with CVT: configuration, control, and its concurrent multi-objective optimization by evolutionary algorithm[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(1): 103-115.
- [12] Wang J, Liu P, Hicks-Garner J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [13] 罗玉涛, 王峰, 喻皓, 等. 基于行驶工况的磷酸铁锂电池寿命模型研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 881-885.

- LUO Yutao, WANG Feng, YU Hao, et al. A study on the driving-cycle-based life model for LiFePO<sub>4</sub> battery[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(8): 881-885. (in Chinese)
- [14] Hu X S, Martinez C M, Yang Y L. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 87: 4-16.
- [15] Hu J J, Li T, Li J. Temperature field analysis and thermal dissipation structure optimization of lithium-ion battery pack in PEVs[J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, 7(1): 62-71.
- [16] Johnson V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 321-329.
- [17] 李晓英, 于秀敏, 李君, 等. 串联混合动力汽车控制策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2005, 35(2): 122-126.  
LI Xiaoying, YU Xiumin, LI Jun, et al. Control strategy for series hybrid-power vehicle[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2005, 35(2): 122-126. (in Chinese)
- [18] 喻厚宇, 黄妙华, 邓楚南. 并联 HEV 发动机最优工作线和高效工作区的确定[J]. *上海汽车*, 2007(7): 3-6.  
YU Houyu, HUANG Miaohua, DENG Chunan. Determining optimal operating curve and efficient operating region of the parallel HEV's engine[J]. *Shanghai Auto*, 2007(7): 3-6. (in Chinese)
- [19] Jeong J, Karbowski D, Rousseau A, et al. Model validation of the honda accord plug-in[C/OL]. *SAE 2016 World Congress and Exhibition, New York, U S A: SAE International*, 2016(2016-04-05)[2020-05-03]. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1151>.
- [20] 武小兰, 王军平, 曹秉刚, 等. 充电式混合动力电动汽车动力系统的参数匹配[J]. *汽车工程*, 2008, 30(12): 1095-1098, 1038.  
WU Xiaolan, WANG Junping, CAO Binggang et al. Parameter matching of powertrain in a plug-in hybrid electric vehicle[J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(12): 1095-1098, 1038. (in Chinese)
- [21] Gao A Y, Deng X Z, Zhang M Z, et al. Design and validation of real-time optimal control with ECMS to minimize energy consumption for parallel hybrid electric vehicles[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 1-13.
- [22] 刘和平, 许巧巧, 胡银全, 等. 自适应卡尔曼滤波法磷酸铁锂电池剩余容量估计[J]. *重庆大学学报*, 2014, 37(1): 68-74.  
LIU Heping, XU Qiaoqiao, HU Yinquan, et al. State of charge estimation of lithium iron phosphate batteries based on adaptive Kalman filters[J]. *Journal of Chongqing University*, 2014, 37(1): 68-74. (in Chinese)
- [23] 王慧璇. 基于动态规划的 Plug-in 混合动力汽车能量管理策略优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
WANG Huixuan. Optimal energy management strategy of plug-in hybrid vehicles based on dynamic programming[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)

(编辑 张 莘)