

基于动态规划的混合动力汽车能量管理策略优化

张雪钊¹,周沁悠²

(1. 衢州职业技术学院,浙江 衢州 324000;2. 上海领科国际高中,上海 201615)

摘要:为提升混合动力汽车的燃油经济性,采用动态规划算法对实车能量管理策略进行优化。首先实车测试得到相关数据并进行分析,获取能量管理策略的重要规则参数;然后利用动态规划算法仿真计算获取车辆全局最优的能量管理控制参数。两者对比结果表明,动态规划算法的参数可以使车辆的燃油经济性提升10%,使用动态规划算法可以实现混合动力汽车能量管理策略的优化。

关键词:动态规划;能量管理策略;混合动力汽车

中图分类号:U469.7

文献标识码:A

doi:10.14031/j.cnki.njwx.2024.05.005

Optimization of Energy Management Strategy for HEV Based on Dynamic Programming

ZHANG Xuezhao¹, ZHOU Qinyou²

(1. Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China; 2. Shanghai Ulink International High School, Shanghai 201615, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy of hybrid electric vehicles, dynamic programming algorithm is used to optimize the energy management strategy of real vehicles. First of all, the relevant data are obtained from the real vehicle tests and analyzed to obtain the important rule parameters of energy management strategy. Then the dynamic programming algorithm is used to obtain the global optimal energy management control parameters. The comparison results show that the parameters of the dynamic programming algorithm can improve the fuel economy of the vehicle by 10%, and the energy management strategy of hybrid electric vehicles can be optimized by using the dynamic programming algorithm.

Keywords: dynamic programming; energy management strategy; HEV

0 引言

新能源汽车能量管理策略研究是新能源汽车技术的核心,关系到整车节能目标能否实现,也是实现国家碳排放战略的重要一环。目前有大量基于智能化算法实现车辆能量管理策略的研究,但鉴于其计算资源要求高、技术不成熟的缺点,车辆在实际应用中还是基于规则的能量管理策略。因此,本文梳理了现有能量管理策略涉及的关键可标定参数,介绍了能量管理策略开发需要的车辆模型、动态规划算法,分析了动态规划算法的仿真数据。通过与实测数据对比,获得能量管理策略的优化参数,对提升混合动力汽车燃油经济性具有重要意义。

1 基于规则的能量管理策略

当驾驶员需求功率确定后,能量管理策略最重要的就是决策模式切换。模式切换模块的主要作

基金项目:2022年衢州市科技攻关指导性项目(ZD2022159);衢州职业技术学院2022年闯关性教学评价项目(CGJXPJ202204);2023横向项目(QZYHX2023034)

作者简介:张雪钊(1990—),男,山东菏泽人,硕士,讲师,研究方向为新能源汽车整车控制策略。

用是判断在当前车速、SOC状态下车辆处于什么模式更有利于提高车辆的经济性。模式切换模块包括模式切换状态机设置和模式切换条件计算^[1-2]。

1.1 模式切换状态机

整车工作模式切换状态机如图1所示。标准纯电模式(EV2)即只有驱动电机MG2驱动车辆,消耗动力电池的电能;充电混动模式(HEV1),即发动机启动,发动机功率主要向电池充电以使电池SOC上升。标准纯电模式和充电混动模式组成车辆的广义纯电模式(EV1)。标准混动模式(HEV2),即驱动车辆的能量主要来自发动机,电池电量基本保持平衡。

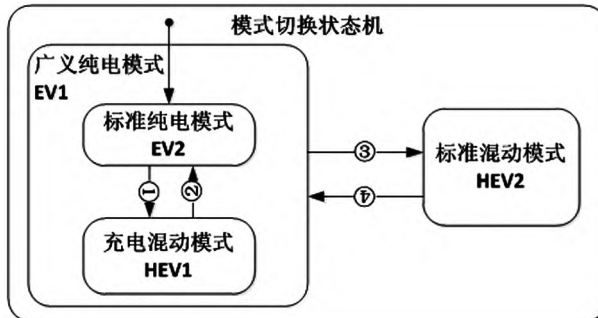


图1 模式切换状态机

广义纯电模式(EV1)下,驱动电机可以满足整车驱动功率需求,发动机启动的目的仅仅是给电池充电,使得纯电模式可以持续运行。标准混动模式(HEV2)下,发动机提供驱动的功率需求,成为主要动力源。

1.2 模式切换条件

车辆驱动时默认进入标准纯电模式,标准纯电模式下消耗动力电池的电能。当电池电能消耗到一定程度时必须进入充电混动模式以补充电能,因此标准纯电模式(EV2)和充电混动模式(HEV1)之间主要以电池SOC作为切换判定条件。

当车辆需求功率较大时,即使电池电量充足,驱动电机驱动车辆的效率也会比发动机驱动车辆的效率低,因此此时车辆会由广义纯电模式(EV1)进入到标准混动模式(HEV2),两者之间的切换主要以车辆需求功率作为判定条件。对应模式切换状态机的切换条件如表1所示。

表1 模式切换条件

模式切换	判定条件
①	$SOC < SOC_{low}$
②	$SOC > SOC_{high}$
③	$PowerRq > PowerRq_{high}$
④	$PowerRq < PowerRq_{low}$

其中 SOC_{low} 和 SOC_{high} 的值根据电池充放电容量限制可以较为容易确定。而 $PowerRq_{low}$ 和 $PowerRq_{high}$ 一般受车速和SOC与目标值差值影响,一般设置成车速和SOC与目标值差值的二维表格,该表格需要工程师标定完成。工程师标定一般依靠经验进行,只能保证参数处于合理范围,并不能寻找到最优解。尤其是考察该参数对实际车辆运行工况整体经济性影响时,工程师依靠经验标定很难完成。因此有必要探索一种智能化的参数标定方法,以完成该参数的标定,达到最佳效果。

2 车辆模型搭建

精确的车辆模型是进行能量管理策略优化分析的基础,因此本部分介绍车辆模型的搭建^[3]。根据先前的工作,已经建立了整车阻力和动力系统部件模型,通过控制连接、机械连接和电气连接3种方式完成了模型集成,并且将试验获得的发动机扭矩和发动机转速输入到车辆模型中,使车辆模型运行并得到车速、发动机瞬时油耗、电池电功率和SOC信号。

图2为测试数据和仿真数据的对比。图2a曲线表明仿真模型能够精确跟随车辆车速;图2b曲线表明车辆SOC的变化与测试数据存在略微的差异;图2c曲线表明仿真模型可以精确地跟随车辆油耗变化;图2d曲线表明电池电功率的仿真值和实测值存在一个偏移,这是由于仿真模型中附件功率消耗采用了平均值的计算方法,而实际附件功率是一个瞬时变化值,SOC的差异同样是这个原因,但整体趋势依然非常接近,完全满足仿真精度要求。

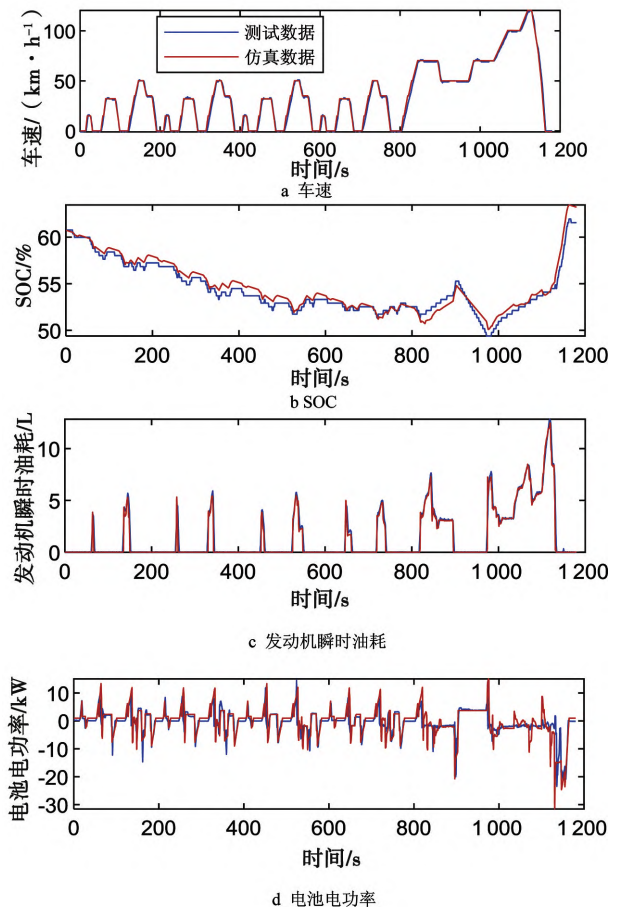


图2 测试和仿真数据对比

3 动态规划算法分析

动态规划(DP)算法是全局优化算法,可以为其他算法提供对比标准^[4],DP算法的实现可参考文献。对混合动力汽车,SOC为状态量,发动机功率为控制量。在工况数据已知的情况下,根据第二章车辆模型可以计算SOC从一个时刻状态在发动机功率控制量输入下转化为下一个时刻状态的关系^[5-7]。模型可以描述成公式(1)

$$x_{(k+1)} = f(x_k + u_k + v_k + a_k) + x_k \quad (1)$$

式中 x_k — 电池 SOC, %;
 u_k — 发动机功率, kW;
 v_k — 车速参数, km/h;
 a_k — 车辆加速度参数, m/s^2 ;
 f — 车辆模型, 实现 SOC 状态在发动机功率控制量输入下的转换;
 k — 划分步长, 工况以 1 s 为间隔划分步长, 取值 0, 1, ..., N-1 (N—总步数, 随工况时间长短变化)。

优化的目标是使总的燃油消耗最小

$$J = \sum_{k=0}^{(N-1)} \Delta m_f(u_k, k) * T_s \quad (2)$$

式中 $\Delta m_f(u_k, k)$ — 每一步长 k 的瞬时油耗值, g/s;

T_s — 时间步长, $T_s = 1 \text{ s}$ 。

SOC 的初始值为 60%

$$x_0 = 60 \quad (3)$$

SOC 的终止值为 60%

$$x_N = 60 \quad (4)$$

SOC 的变化范围为 30 ~ 70%

$$x_k \in [30, 70] \quad (5)$$

发动机功率的变化范围为 0 ~ 73 kW, 0 代表发动机不启动, 73 kW 为发动机最大功率

$$u_k \in [0, 73] \quad (6)$$

4 能量管理策略优化对比分析

使用动态规划算法求解上述优化控制问题。在 NEDC 和 WLTC 工况下, 优化计算结果与实车测试结果对比如下。

图 3 可以看出, 在 NEDC 的市区阶段, DP 算法比实车少启动 4 次发动机, 使得 DP 算法对应的 SOC 下降较快。在市郊的高速阶段, 两者的启动时间一致, 但是 DP 算法对应的发动机功率更大, SOC

快速上升, 最终两者的 SOC 基本达到相同水平。图 4 中, WLTC 工况下发动机启动次数 DP 算法比实车显著减少, 且发动机工作后转速和转矩更稳定。NEDC 和 WLTC 工况数据对比如表 2。

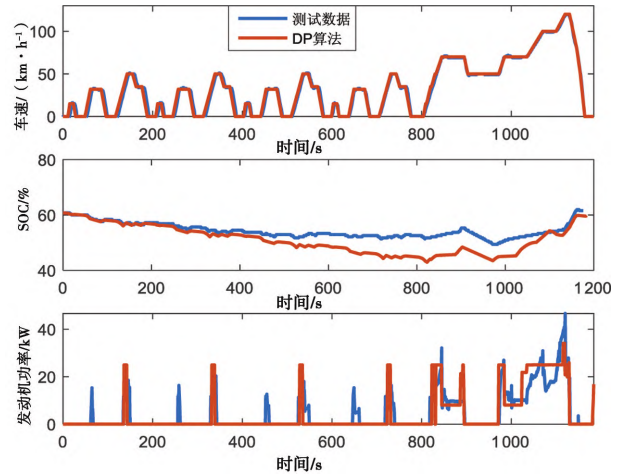


图 3 NEDC 工况仿真结果

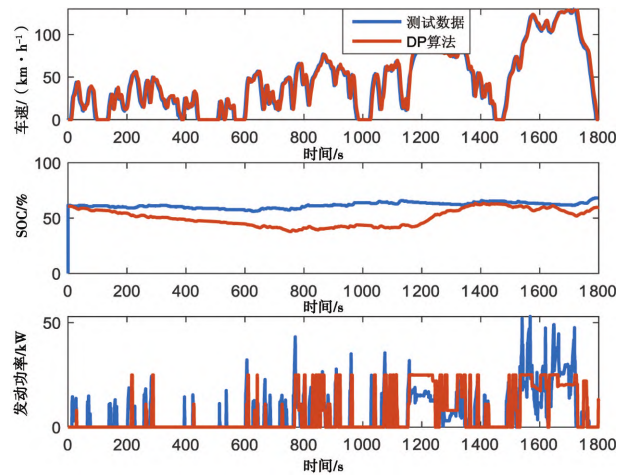


图 4 WLTC 工况仿真结果

表 2 NEDC 和 WLTC 工况数据对比

对比性能	NEDC		WLTC	
	油耗/ $[\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$	发动机平均热效率/%	油耗/ $[\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$	发动机平均热效率/%
测试数据	4.34	32.36	4.72	32.98
DP 算法	3.91	35.62	4.18	35.82
性能提升/%	10	10	11	9

油耗计算结果显示 (表 2), DP 算法下车辆有 10% 左右的节能潜力, 再进一步分析发动机和 MG2 工作点分布情况 (图 5、图 6), 与测试数据相比 DP

算法计算的发动机工作点更加集中于高效区域, 而测试数据工作点分布更加分散。MG2 工作点, 二者的分布区域无显著差异。由此可见, 造成车辆经济

性差异的主要原因在于发动机工作点和工作时机的选择。

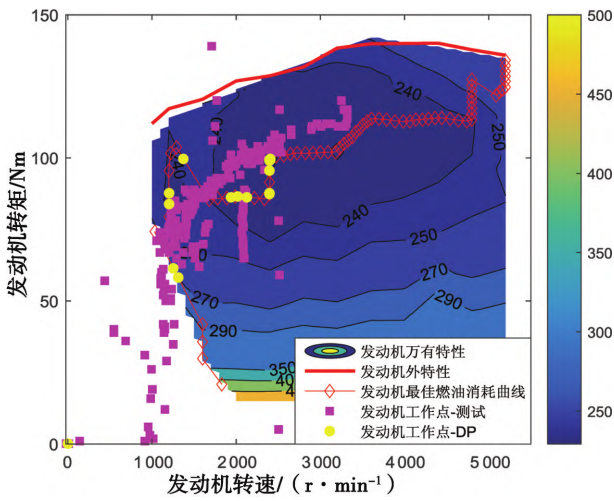


图 5 NEDC 工况发动机工作点

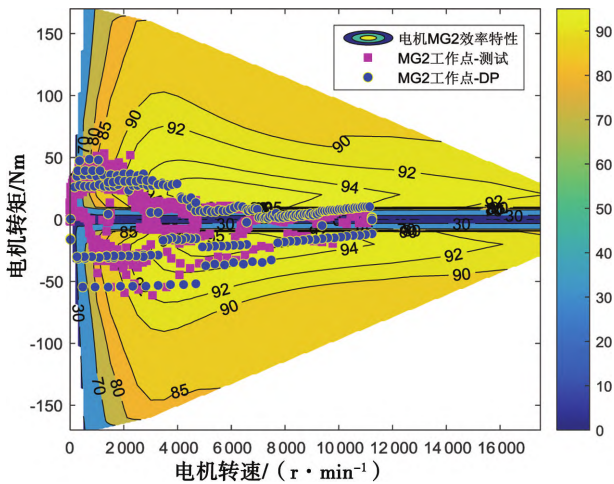


图 6 NEDC 工况 MG2 工作点

为了直观对比测试数据和 DP 算法 EV 模式到 HEV 模式切换(即发动机启动时机)的差异,将测试数据和 DP 算法计算数据的 EV 模式到 HEV 模式切换时的车速和对应车辆需求扭矩情况在图 7 中展示。数据表明,运用 DP 算法的模式切换点对应的功率要明显大于测试数据的切换功率,即 DP 算法会使发动机更晚启动,以充分使用纯电驱动能力。从等功率线的分布来看,测试数据一般在 10 kW 以下的功率进行切换,DP 算法一般在 10 ~ 20 kW 之间进行切换。从图 7 中还可以看出,切换的功率随车速具有分段的特性,以 DP 算法为例,40 km/h 车速以下切换功率大约 15 kW,40 ~ 60 km/h 车速切换功率大约 10 kW,60 km/h 车速以上切换功率大

约 5 kW 以下。

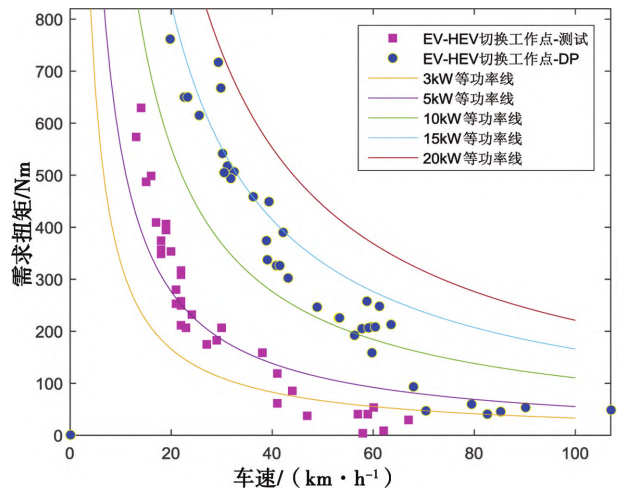


图 7 模式切换工作点

5 结语

本文研究了基于动态规划的混合动力汽车能量管理策略优化方法。通过分析基于规则的车辆能量管理策略,确定车辆模式切换条件是需要优化的参数,建立了能量管理策略优化所需的车辆模型,并对模型精度进行了验证。对能量管理策略优化在动态规划算法中的具体实现进行了描述,使用动态规划算法优化的仿真结果和测试数据进行对比。结果表明,动态规划算法的参数可以使车辆的燃油经济性提升 10%,使用动态规划算法可以实现混合动力汽车能量管理策略的优化。

参考文献:

- [1] 邓富昌,张校锋. 基于规则的混合型燃料电池汽车能量管理策略[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2023, 38(3): 75-80.
- [2] 龚长友,徐国栋,阚羽等. 基于优化规则的平行轴式 PHEV 能量管理策略研究[J]. 专用汽车, 2024(1): 17-20.
- [3] 张雪钊. 新能源汽车整车及动力系统精确建模方法研究[J]. 时代汽车, 2023(9): 93-95.
- [4] 路来伟,赵红,刘晓童. 基于动态规划算法的增程式汽车能量管理研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2023, 38(3): 59-68.
- [5] 田丽媛,柳敬伟,孙光达. 基于动态规划算法的纯电动汽车能量管理研究[J]. 车辆与动力技术, 2022(4): 27-32.
- [6] 陶正叁,李泽滔. HEV 模糊能量管理策略优化研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(10): 7-11+17.
- [7] 张子涵,谭小辉. 混合动力汽车能量管理策略及发动机优化探析[J]. 专用汽车, 2023(12): 13-15.