DOI: 10.3901/JME.2020.14.119

网联环境下基于分层式模型预测控制的车队 能量控制策略研究*

唐小林¹ 李珊珊¹ 王红² 段紫文¹ 李以农¹ 郑玲¹

(1. 重庆大学汽车工程学院 重庆 400044;

2. 清华大学车辆与运载学院 北京 100084)

摘要: 网联环境下如何同时兼顾车间协同控制与车辆燃油经济性是提高交通效率与发挥节能潜力的关键技术之一。首先,为解决车队协同控制,同时减少车辆燃油消耗,以功率分流式混合动力汽车车队为研究对象,以城市道路为背景,建立多车速度规划与跟驰模型,基于该模型设计了模型预测控制(Model predictive control, MPC)算法,规划汽车队列的未来车速,以提高混合动力汽车车队的跟车稳定性;其次,利用分层式模型预测控制设计一种实时能量管理策略,上层从优化速度及频繁加减速等为目标获取最优经济车速,下层控制系统根据该最优车速对混合动力汽车实施能量管理;最后该实时能量管理策略在保证跟车稳定的前提下,优化车辆燃油经济性;将该算法与动态规划(Dynamic programming, DP)进行结果对比。结果表明,该方法能够实现整个车队的协同跟车控制,获得较好的燃油经济性。

关键词: 混合动力汽车; 智能网联; 模型预测控制; 能量管理策略

中图分类号: U461

Research on Energy Control Strategy Based on Hierarchical Model Predictive Control in Connected Environment

TANG Xiaolin¹ LI Shanshan¹ WANG Hong² DUAN Ziwen¹ LI Yinong¹ ZHENG Ling¹

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: How to consider both the cooperative control of the vehicle platoon and fuel economy is one of the key technologies to improve the traffic efficiency and give full play to energy saving potential in connected environment. Firstly, in order to solve the collaborative control of the vehicle platoon and reduce fuel consumption, a multi-vehicle speed planning and following model is established for hybrid electric vehicle platoon in urban roads. Based on the model, the model predictive control (MPC) is designed to plan the future speed and improve the stability of hybrid electric vehicle platoon. Secondly, a layered model predictive control is used to design a real-time energy management strategy. The upper layer obtains the optimal economic vehicle velocity with the goal of optimizing the speed and frequent acceleration. The lower layer control system implements energy management for the hybrid electric vehicle based on the optimized vehicle speed. This real-time energy management strategy optimizes vehicle fuel economy on the premise of ensuring stable follow-up. Finally, the algorithm is compared with the results of dynamic programming(DP). The results show that the method can realize the coordinated follow-up control of the entire fleet and obtain better fuel economy.

Key words: hybrid electric vehicle; network environment; model predictive control; energy management strategy

0 前言

随着智能交通系统以及车-车通信(Vehicle to

vehicle, V2V)、车-路(Vehicle to infrastructure, V2I)通信技术的出现,车联网技术在近年来迅速发展。在当前的交通系统中,交通效率、安全性与经济性是主要考虑的三大指标。基于V2V、V2I的智能网联汽车技术,在提高行车安全和减轻驾驶员负担等方面将发挥重要作用,并具有提高节能减排和交通效率的潜力。最新研究指出,建成智能网联汽车产业链以及智慧交通体系,道路交通效率可提高30%,

* 国家自然科学基金(51705044)、国家重点研发计划(2017YFB0102603-3)和机械系统与振动国家重点实验室开放基金课题(MSV202016)资助项目。
20191117收到初稿,20200320收到修改稿

汽车交通事故可减少 80%，油耗与排放均降低 20%^[1-2]。因此，智能网联汽车可以提供更安全、更节能、更环保、更舒适的出行方式和综合解决方案。

相比于传统燃油车，混合动力汽车可实现发动机工作点与工况的解耦，从而可以保证发动机工作在低油耗区，因而成为各大汽车厂商研究的重点^[3]。能量管理策略是混合动力汽车发挥动力性能、降低油耗和排放的关键技术。目前混合动力汽车的控制策略主要有基于规则和基于优化的方法等^[4]。基于规则的控制策略不能适应变化工况的需求，导致较高的燃油消耗。因此，近年来基于优化的控制策略得到了学者的青睐。基于优化的方法可分为全局优化和瞬时优化两种^[4]。全局优化的理论主要基于最优控制理论以及贝尔曼原理的动态规划算法^[5]，动态规划需要提前知道需求工况，多用于理论研究或者作为其他优化算法的基准。瞬时优化方法主要包括模型预测控制策略、等效燃油消耗最小策略等。在这些方法中，MPC 是备受关注的控制策略之一^[6-7]，在计算能力以及内存受到限制的情况下，MPC 依然可以得到在线的局部最优解^[8]。

由于智能网联汽车是涉及驾驶行为、车辆本身以及道路环境的复杂非线性系统，而 V2V 以及 V2I 通信技术的出现，汽车可以更有效的获得车辆自身状态和汽车周边的交通环境等数据，综合各方面信息的速度和挡位的在线优化，可大大提高车辆燃油经济性与交通效率。对于城市道路而言，改善道路基础设施建设是比较困难的。因此，利用现有的交通网络优化交通信号灯以改善交通流量是目前主要的研究趋势^[9]。

大量文献研究了城市道路上考虑红绿灯的燃油经济性优化策略。KAMAL 等^[10]设计了一种可测量当前交通相关信息的新型控制系统，该控制系统通过预测前车的未来状态，基于模型预测控制的方法优化控制当前车辆车速。QIU 等^[11]针对网联环境下的四驱混合动力汽车的控制策略问题，提出了在线优化等效因子的 ECMS 能量管理策略。MANDAVA^[12]建立了随机仿真模型，优化车辆加/减速的频率，避免车辆在红绿灯交叉路口停车，相比不考虑速度规划的情况省油 12%~14%。ASADI 等^[13]基于获取的近程雷达和交通信号信息，同时设计了一种模型预测控制算法优化车辆的燃油经济性与排放性。MAHLER 等^[14]建立了一种交通信号相位预测模型，该模型可基于交通信号历史平均时间和实时相位数据来确定交通灯出现绿灯状态的概率，提出了一种最优速度预测规划算法，优化车辆的燃油经济性。

LIU 等^[15]学者考虑实时道路交通流、交通灯和车辆行驶状态(包括行驶速度和方向)，提出了无启停动态路径规划算法，优化路径通过时长以及燃油消耗。试验表明，在不同仿真场景下，节能路线的累计能耗均小于正常路线，相比节能 5.18%~16.4%。已有文献考虑了优化单辆车燃油经济性的控制策略，尚未考虑到车车间的协同控制。虽然一些文献考虑了拥挤的交通场景，但大部分是基于安全性的研究，尚未考虑燃油经济性。针对以上不足，本文设计考虑多车协同控制以及燃油消耗的分层式 MPC 优化算法。首先，在车辆上层控制系统中，根据 V2V 以及 V2I 通信获得的实时信息，建立车队的速度规划与多车跟驰模型，并基于模型预测控制优化车队协同控制与频繁加减速问题，以获得最优行驶车速；其次，下层控制系统根据该车速获取最优的功率分配，在考虑有交通信号灯的道路上环境中，利用分层式模型预测控制设计了实时能量管理策略；最后，通过与 DP 能量管理策略的对比分析后，证明了提出的 MPC 算法在燃油经济性方面的优越性。本研究提出的分层控制框架如图 1 所示，交通信号灯正时可以通过 V2I 获取，汽车的位置和速度信息可以通过 V2V 实现互通。本文结构框架如下：第 1 节介绍了多车速度规划与跟驰模型，第 2 节分析了优化目标函数与能量管理策略，第 3 节对计算结果进行了讨论采用 DP 以及 MPC 算法进行了对比研究，第 4 节对全文进行了总结。

1 多车速度规划与跟驰模型

本文的算法逻辑框图如图 2 所示，利用 V2V 和 V2I 技术获取的信息，利用油耗模型建立车队跟驰模型，设计模型预测控制算法，规划汽车队列的未来车速，同时决定汽车动力系统的最优能量分配。

1.1 汽车动力学建模

本文研究对象为某功率分流式混合动力汽车，整车动力系统结构如图 3 所示。其中 HEV 主要传动部件参数如表 1 所示。

对于车队中任意一辆混合动力汽车而言，其运动学模型^[15]为

$$\mathbf{x}_h = \begin{pmatrix} s_h \\ v_h \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_h = f(\mathbf{x}_h, u_h) = \begin{pmatrix} v_h \\ u_h - \frac{1}{2M_h} C_D \rho A v_h^2 - fg \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中， v_h 为当前车辆的速度，m/s； s_h 为当前车辆

的位置, m ; u_h 为当前车辆加速度, m/s^2 。本文的混合汽车队列的每一辆汽车类型完全相同。因此,

M_h 、 C_D 、 ρ 、 A 和 f 分别为汽车的质量, 迎风阻力系数, 空气密度, 迎风面积和道路阻力系数。

图1 分层控制架构

图2 基于分层式MPC的燃油经济性控制策略

图3 混合动力汽车构型

表 1 汽车参数

描述	数值
汽车质量 M_h/kg	1 480
迎风面积 A/m^2	2.5
迎风阻力系数 ρ	1.23
主减速器传动比	3.268
行星齿轮副传动比	$r_1 = 2.6, \quad r_2 = 2.636$
发动机	最大功率 70 kW, 最大转矩 120 N · m
电机	最大功率 60 kW, 最大转矩 207 N · m
发电机	最大功率 40 kW, 最大转矩 55 N · m
电池	最大功率 90 kW, 容量 65 A · h

在该层控制问题中, 优化目标之一是车队每辆汽车预测域内平均功率, 即单位距离的油耗,

$$\frac{\sum_{t=k}^{t=k+N-1} \dot{m}_{fuel}^h(t) \Delta t}{s(k+N-1)-s(k)}, \quad \dot{m}_{fuel}^h(t) \text{ 即上层控制器燃油消耗}$$

率, Δt 为时间步长, N 为控制时域。在上层控制系统中, 简化的燃油消耗的模型如式(3)所示^[15]

$$\dot{m}_{fuel}^h(t) = \frac{P_w^h(t)}{\eta_{eff} H_{LHV}} \quad (3)$$

$$P_w^h = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f v_h^3 + M_h g f v_h + \beta (v_h M_h u_h) + (1 - \beta) (-\eta_{rec} v_h M_h u_h) \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & u_i \geq 0 \\ 0 & u_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{\min} &\leq v_h(t) \leq v_{\max} \\ u_{\min} &\leq u_h(t) \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, P_w^h 是当前车辆的行驶功率; η_{rec} 是层控制器的调整效率; H_{LHV} 是燃油的低热值; $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 是由城市道路交通规则决定的车速和加速度最大最小值。

1.2 车速规划

车队中任意车辆可由 V2V 技术获取前方红绿灯

灯路口的信号灯配时信息, 根据该信息规划一个避免汽车在信号灯路口红灯状态停车的目标车速。在任意时刻 k , 当前汽车的目标车速 $v_{\text{target}}^h(k)^{[16]}$ 为

$$v_{\text{target}}^h(k) = \begin{cases} \frac{d_a^h(k)}{Tt_{\text{total}} - t_g - k} & \text{当前是红灯} \\ v_{\text{max}} & \text{当前是绿灯且 } \frac{d_a^h(k)}{Tt_{\text{total}} - k} \leq v_{\text{max}} \\ \frac{d_a^h(k)}{Tt_{\text{total}} + t_r - k} & \text{当前是绿灯的其他情况} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{light} = \begin{cases} \text{红灯} & 0 \leq \text{mod}\left(\frac{k}{t_{total}}\right) \leq t_r \\ \text{绿灯} & t_r < \text{mod}\left(\frac{k}{t_{total}}\right) \leq t_{total} \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{total} = t_r + t_g \quad (9)$$

$$T > \frac{k}{t_{total}} \quad (10)$$

式中, $d_a^h(k)$ 是当前车辆离道路前方的最近一次交通灯的距离; t_r 与 t_g 分别是红灯和绿灯状态持续的时间, 信号灯循环周期是 t_{total} ; T 是描述交通灯循环次数的整数, 当 $k = Tt_{cycle}$ 时, T 增加 1。函数 mod 产生 k 除以 t_{total} 的余数。从式(7)可以看出, 绿灯状态下, 只要满足 $\frac{d_a^h(k)}{Tt_{total} - k} \leq v_{\max}$, 即不违反城市道路

限速规定时,那么车辆以最大车速行驶,否则设定汽车的目标车速是使汽车避免在红绿灯路口停车的最大车速。同时,为了避免汽车出现通过交通路口时出现停车的局面,必定存在一个目标车速范围 $[v_{lb}^h(k), v_{ub}^h(k)]$ 。其中, $v_{lb}^h(k)$ 是目标车速的下限, $v_{ub}^h(k)$ 是目标车速的上限, 在本文中, 设定 $v_{\text{target}}^h(k) = v_{ub}^h(k)$ 。其目标车速规划原理如图 4 所示, 汽车的行驶车速处于 $[v_{lb}^h(k), v_{\text{target}}^h(k)]$ 内, 则就可以使汽车在通过交通灯路口时, 处于绿灯状态可以通行。目标车速的下限为

$$v_{lb}^h(k) = \begin{cases} \frac{d_a^h(k)}{Tt_{total} - k} & \text{当前是红灯} \\ \frac{d_a^h(k)}{Tt_{total} - k} \leq v_{max} & \text{当前是绿灯且} \\ \frac{d_a^h(k)}{(T+1)t_{total} - k} & \text{当前是绿灯的其他情况} \end{cases} \quad (11)$$

图4 目标车速规划原理

1.3 基于 MPC 的控制策略

在线实时控制是混合动力汽车能量管理优化控制策略实施的难点问题，模型预测控制由于具有在线控制的优点在自动控制领域得到了广泛运用^[17]。本文中采用模型预测控制方法解决上层控制器的优化问题，优化目标包括单位时间的功率消耗即油耗，跟车距离，目标车速跟随以及加减速次数。优化预测域内的加速度，从而获得下一时刻当前车辆的最优经济车速。在上层控制策略中，当前车辆 h 的优化函数由以下几部分组成

$$J_1^h(t) = \frac{\sum_{t=k}^{k+N-1} \dot{m}_{fuel}^h(t) \Delta t}{s(k+N-1) - s(k)} \quad (12)$$

$$J_2^h(t) = [S_0 + t_h(v_h(t) - v_p(t)) + (s_h(t) - s_p(t))]^2 \quad (13)$$

$$J_3^h(t) = (v_h(t) - v_{target}^h(t))^2 \quad (14)$$

$$J_4^h(t) = u_h(t)^2 \quad (15)$$

$$J_h = \underset{u_h(t)}{\operatorname{argmin}} \sum_k^{k+N-1} [\alpha_1 J_1^h(t) + \alpha_2 J_2^h(t) + \alpha_3 J_3^h(t) + \alpha_4 J_4^h(t)] \quad (16)$$

优化函数的约束条件如下

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v_{lb}^h(k) \leq v_h \leq v_{target}^h(k) \leq v_{\max} \\ u_{\min} \leq u_h(t) \leq u_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = 20 + 100 \times \exp(0.05 \times v_range(k)) \\ \alpha_2 = \min(50 \times \exp(-0.1 \times [(s_h(t) - s_p(t)) / ((v_h(t) - v_p(t)) + 0.001) - t_h]), 300) \\ \alpha_3 = 100 + 200 \times \exp(-0.007 \times v_range(k)) \\ \alpha_4 = 1000 + 1000 \times \exp(-0.05 \times v_range(k)) \end{cases} \quad (18)$$

式中， J_1^h 代表时间域 N 内的平均功率，即单位时间的燃油消耗， $\dot{m}_{fuel}(t)$ 如式(3)所示； J_2^h 表示当前车辆 h 与前车 p 的相对距离的函数，其中， S_0 是标准跟车距离， t_h 为车头时距，本文取 $t_h = 1.5$ s。 J_3^h 表示汽车车速偏离目标车速的程度，MPC 控制的优化目标是得到最优的加速度，进而得到最优的行驶速度。目标车速是通过预知前方交通信息规划得到的

经济车速，可避免由于交通限制汽车怠速停车的发生。因此实际行驶速度与目标车速的偏差越小越好。 J_4^h 考虑驾驶操作的平稳性。 α_2 是关于实际跟车距离 $[s_h(t) - s_p(t)]$ 以及与前车相对速度 $[v_h(t) - v_p(t)]$ 的函数。 $v_range(k)$ 表示车速范围的大小， $v_range(k) = v_target(k) - v_lb(k)$ ，当车速范围较小时， α_1 、 α_3 、 α_4 可取为常数。

2 基于模型预测控制的能量管理策略

2.1 整车模型

本文研究对象为功率分流式 HEV，动力传动系统为行星排耦合系统，忽略齿轮副中的摩擦，该耦合系统中的静态平衡方程为

$$r_1 \cdot \omega_{R_1} + \omega_{gen} = (1 + r_1) \cdot \omega_{eng} \quad (19)$$

$$\omega_{mot} = r_2 \cdot \omega_{R_2} \quad (20)$$

$$T_{R_1} : T_{eng} : T_{gen} = 1 : -\left(1 + \frac{1}{r_1}\right) : \frac{1}{r_1} \quad (21)$$

$$T_{R_2} : T_{mot} = 1 : \frac{1}{r_2} \quad (22)$$

式中， r_1 、 r_2 表示两行星齿轮副的传动比，参数如表 1 所示； ω_{R_1} 、 ω_{R_2} 、 ω_{gen} 、 ω_{eng} 、 ω_{mot} 分别表示齿圈 1，齿圈 2，发电机，发动机，电机的转速； T_{R_1} 、 T_{R_2} 、 T_{gen} 、 T_{eng} 、 T_{mot} 分别表示齿圈 1、齿圈 2、发电机、发动机、电机的转矩。

发动机燃油消耗率与其转矩及其转速相关，假设发动机完全预热，油耗通过发动机 MAP 图获取，因此建立的油耗非线性模型为

$$\dot{m}_f = f(T_{eng}, \omega_{eng}) \quad (23)$$

式中， $\dot{m}_f$ 表示发动机的燃油消耗率； f 是非线性函数。

电池 SOC 是影响电池寿命的重要因素，同时也是下层控制系统的状态变量。忽略电池温度对内阻的影响，电池内阻模型如图 5 所示，基于内阻模型建立的电池 SOC 模型为

$$\dot{\text{SOC}}_h = -\frac{V_{oc}^h - \sqrt{(V_{oc}^h)^2 - 4P_{batt}^h R_{eq}^h}}{2C_{batt}^h R_{eq}^h} \quad (24)$$

图5 电池内阻模型

$$P_{batt} = T_{gen} \omega_{gen} \cdot \eta_1^{\text{sgn}(-T_{gen})} + T_{mot} \omega_{mot} \cdot \eta_2^{\text{sgn}(-T_{mot})} \quad (25)$$

式中, P_{batt}^h 为电池总功率; C_{batt}^h 为电池电容; V_{oc}^h 、 R_{eq}^h 分别是电池模型的开路电压与等效内阻; η_1 、 η_2 分别是发电机与电机的能量转换效率。

2.2 MPC 能量管理策略

研究对象下层控制系统接收来自上层控制器输出的经济车速 v_h , 同时可映射为汽车需求功率, 运用能量管理策略得到电池与发动机两者的最优功率分配。

下层控制系统的问题可描述为

$$\dot{x} = f(x, u_{hl}, w) \quad (26)$$

式中, $x = \text{SOC}_h$; $u_{hl} = \begin{pmatrix} T_{eng} \\ \omega_{gen} \end{pmatrix}$; $w = \begin{pmatrix} v_h \\ T_{demand} \end{pmatrix}$; x 是其状态变量; u_{hl} 为控制变量; w 表示可测量系统输入。

优化函数为

$$\arg \min_{u_{hl}} J_h = \sum_{t_0}^{t_f} \beta_s (\text{SOC}(t) - \text{SOC}_r)^2 + \beta_m \dot{m}_f(u_{hl}(t))^2 \quad (27)$$

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\min}^h \leq \text{SOC}_h(t) \leq \text{SOC}_{\max}^h & \forall t \\ \omega_{eng,\min}^h \leq \omega_{eng}^h(t) \leq \omega_{eng,\max}^h & \forall t \\ \omega_{gen,\min}^h \leq \omega_{gen}^h(t) \leq \omega_{gen,\max}^h & \forall t \\ \omega_{mot,\min}^h \leq \omega_{mot}^h(t) \leq \omega_{mot,\max}^h & \forall t \\ T_{eng,\min}^h \leq T_{eng}^h(t) \leq T_{eng,\max}^h & \forall t \\ T_{gen,\min}^h \leq T_{gen}^h(t) \leq T_{gen,\max}^h & \forall t \\ T_{mot,\min}^h \leq T_{mot}^h(t) \leq T_{mot,\max}^h & \forall t \end{cases} \quad (28)$$

式中, $\beta_s = 0.02$, $\beta_m = 1$, β_s , β_m 分别表示 SOC 差值与油耗的权重。SOC_{min}^h 为 SOC 下限, SOC_{max}^h 为 SOC 上限。 $\omega_{eng,\min}^h$ 、 $\omega_{eng,\max}^h$ 分别为发动机转速的最大最小约束。 $\omega_{gen,\min}^h$ 、 $\omega_{gen,\max}^h$ 为发电机转速限制。 $\omega_{mot,\min}^h$ 、 $\omega_{mot,\max}^h$ 分别表示电动机的最大最小转速限制。 $T_{eng,\min}^h$, $T_{eng,\max}^h$, $T_{gen,\min}^h$, $T_{gen,\max}^h$, $T_{mot,\min}^h$, $T_{mot,\max}^h$ 分别对应发动机, 发电机, 电动机转矩的最小最大约束。

基于 MPC 实施的在线能量管理实施过程, 首先, 下层控制系统接收上层控制系统的输出信号 v_h , 在后向仿真模型中计算出车轮处的功率需求, 运用优化求解器优化得到最优的能量分配, ECU 实时控制分配发动机需求转矩, 电动机需求转矩以及发电机需求转矩及其发动机、电池组的工作状态。

3 结果分析

3.1 仿真结果

基于本文提出的跟车算法得到的不同仿真时间

的车辆轨迹如图 6、7 所示。水平直线表示红灯时长, 水平直线中间的空白部分表示绿灯时长, 本文中设定, $t_r = 40$ s, $t_g = 30$ s, 因此一个信号灯循环周期是 70 s。从图 6 可以看出, 车队在整个 600 s 的运行时长内, 共通过了 15 个红绿灯路口, 行驶距离 7.9 km。在 300 s 的运行时间内, 共通过了 8 个红绿灯路口, 行驶距离为 4.2 km。从图 6、7 中还可以看出, 车辆轨迹均与红色直线没有交叉, 说明车队在通过交通灯路口时, 其状态均为绿灯, 不存在违反交规的情况。混合动力汽车车队在通过交通灯路口时, 大部分情况是在红灯时间结束时立马通过交通灯路口, 说明了本文提出的目标车速规划方法可以最大限度的减少混合动力汽车在交通灯路口停车, 尽量使在汽车在绿灯时间窗口内通过交通灯路口, 提高交通效率; 车队中任意车辆的运行轨迹没有出现重叠交叉, 说明跟车距离均大于零, 整个车队没有出现超车撞车的现象。而结果也表明, 实际跟车距离控制在设定的理想跟车距离 5 m 左右, 车队中相邻车辆之间没有碰撞, 保证了车队的安全性, 整个车队实现了协同控制。

图6 车队车辆轨迹(600 s)

图7 车队车辆轨迹(300 s)

不同仿真时间的车速曲线如图 8a、8b 和图 9a、

9b 所示。从图中可以看出, 混合动力汽车车队的车速曲线十分接近, 进一步说明了本文所提出的算法可以实现整个车队的协同控制。对于某一 HEV 而言, 整个车速曲线由低速匀速区, 加速区, 高速匀速区等组成。由于代价函数既考虑了避免汽车在交通灯路口处于怠速/停车的问题, 同时还考虑其他约束。汽车速度曲线中存在加减速区是正常的, 但未曾出现频繁加减速的情况, 说明在一定程度上提高了汽车的平顺性。如图所示, 车速均大于 0, 说明整个车队在行驶过程中未曾出现停车。

图 8 车速度曲线(600 s)

图 9 车速度曲线(300 s)

就下层控制系统而言, 图 10 给出了在 600 s 的仿真时间内, 车队中每辆车电池 SOC 随车速的变化曲线。由于每辆车的车速具有相似性, 因此电池 SOC 的变化趋势也是相似的。

3.2 对比分析

为了证明本文所提出的 MPC 能量管理策略具有更好的经济性, 与 DP 能量管理策略进行了对比分析。

其动态规划算法的能量管理问题可描述为^[4]

$$u^{opt} = \min \{J\} \quad (29)$$

$$J = \sum_{t_0}^{t_f} L(x, u, t) \quad (30)$$

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (31)$$

式中, $x = \text{SOC}$, $u = \begin{pmatrix} T_{eng} \\ \omega_{gen} \end{pmatrix}$, L 表示 t 时刻的瞬时代价函数。

基于 DP 的 HEV 能量管理目标是求解全局最优控制序列, 求解过程主要分以下两个步骤进行:

- ① 离散状态变量;
- ② 逆向求解每个阶段、每个离散点的最优控制变量以及到最后阶段的成本函数;
- ③ 正向寻找各个离散点的最优控制量。逆向求解过程如下所示。

第 N 阶段

$$J_N^* = L(x_N, u(N)) \quad (32)$$

第 k 阶段 ($1 \leq k \leq N-1$)

$$J_k^*(x_k) = \min_{u(k)} [L(x_k, u(k)) + J_{k+1}^*(x_{k+1})] \quad (33)$$

$$x(k+1) = f(x_k, u(k)) \quad (34)$$

式中, x_k 表示 k 时刻的状态值, $J_k^*(x_k)$ 为系统在 k 阶段, 从状态 x_k 到达阶段 N 的最优代价函数。

从循环工况的第 N 阶段开始至第一阶段结束, 计算各阶段下的每个 SOC 离散值上的最优解和到第 N

阶段的最优代价函数,记录下最优解和最优代价函数。

在给定 SOC 初始值后,将逆向求解所得的控制序列运用到该阶段的状态方程中,求得下一时刻的状态变量 SOC 的值,直到得到阶段的 SOC 终值。

基于提出的分层式 MPC 算法所得到的燃油经济性以及由 DP 算法得到的油耗以及各 SOC 终值如表 2 所示,由于终值 SOC 与预设值有一定误差,因此表 2 中的油耗是折算了 SOC 的差值得到的最终等效油耗。由表 2 可以看出, MPC 策略比 DP 的油耗增加了约 14%, SOC 终值增加约 2.8%,油耗相对 DP 能量管理策略要高,但仍在可以接受的范围内。由贝尔曼原理可知, DP 策略可实现全局最优,因此车队中单车使用动态规划策略优化的油耗最低,

SOC 终值也更接近参考点。而 MPC 策略由于其瞬时优化的特点具有实时控制的优越性。

表 2 燃油消耗及其与其他方法的对比

车辆编号	百公里油耗/(L/100 km)			
	MPC	SOC(T)	DP	SOC(T)
1	3.951 3	0.519 7	3.449 0	0.490 1
2	3.966 5	0.519 6	3.487 9	0.492 0
3	4.026 3	0.521 6	3.492 4	0.491 3
4	4.031 1	0.521 1	3.530 0	0.491 9
5	3.988 3	0.519 4	3.543 2	0.492 2
6	4.020 3	0.521 0	3.544 4	0.494 9
均值	3.997 3	0.520 4	3.507 8	0.492 1
与 DP 对比	(+)14%	(+)2.8%	—	—

图 10 车队电池 SOC 以及对应车速曲线

4 结论

本文以某功率分流式混合动力汽车车队为研究对象, 提出了基于车速规划的分层式模型预测控制算法。其中, 上层从优化速度及频繁加减速等为目标获取最优经济车速, 下层控制系统根据该最优车速对混合动力汽车实施能量管理。主要解决了以下问题: ① 提出目标车速规划的方法, 减少交通灯路口红灯状态停车问题; ② 建立多车跟驰模型, 设计模型预测控制算法提高混合动力汽车车队的跟车稳定性; ③ 保证跟车稳定的前提下, 优化车辆燃油经济性, 并与其他能量管理策略(DP)进行对比证明了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状与趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [2] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
China Society of Automotive Engineers. Energy saving and new energy vehicle technology roadmap[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016.
- [3] TANG Xiaolin, ZHANG Dejiu, LIU Teng, et al. Research on the energy control of a dual-motor hybrid vehicle during engine start-stop process[J]. Energy, 2019, 166: 1181-1193.
- [4] 王钦普, 游思雄, 李亮, 等. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究综述[J]. 机械工程学报, 2017(16): 15-33.
WANG Qinpu, YOU Sixiong, LI Liang, et al. Survey on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(16): 15-33.
- [5] BRAHMA A, GUEZENNEC Y, RIZZONI G. Optimal energy management in series hybrid electric vehicles[C]// American Control Conference, ACC(IEEE Cat. No. 00CH36334). IEEE, 2000, 1(6): 60-64.
- [6] BORHAN H, VAHIDI A, PHILLIPS M, et al. MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(3): 593-603.
- [7] LI L, YOU S, YANG C, et al. Driving-behavior-aware stochastic model predictive control for plug-in hybrid electric buses[J]. Applied Energy, 2016, 162: 868-879.
- [8] XIANG C, DING F, WANG W, et al. Energy management of a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control[J]. Applied Energy, 2017, 189: 640-653.
- [9] KAMAL S, MUKAI M, MURATA J, et al. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 831-841.
- [10] KAMAL S, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological driver assistance system using model-based anticipation of vehicle road traffic information[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2010, 4(4): 244-251.
- [11] QIU H, QIAN J, ZOMORODI H, et al. Design and optimization of equivalent consumption minimization strategy for 4WD hybrid electric vehicles incorporating vehicle connectivity[J]. Science China Technological Sciences, 2018(1): 1-11.
- [12] MANDAVA S, BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. Arterial velocity planning based on traffic signal information under light traffic conditions[C/CD]// International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2009.
- [13] ASADI B, VAHIDI A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 707-714.
- [14] MAHLER G, VAHIDI A. An optimal velocity-planning scheme for vehicle energy efficiency through probabilistic prediction of traffic-signal timing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2516-2523.
- [15] LIU C, WANG J, CAI W, et al. An energy-efficient dynamic route optimization algorithm for connected and automated vehicles using velocity-space-time networks. IEEE Access, 2019, 7: 108866-108877.
- [16] HOMCHAUDHURI B, LIN R, PISU P. Hierarchical control strategies for energy management of connected hybrid electric vehicles in urban roads[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 62: 70-86.

- [17] 张凤奇, 胡晓松, 许康辉, 等. 混合动力汽车模型预测能量管理研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 86-108.
- ZHANG Fengqi, HU Xiaosong, XU Kanghui, et al. Current status and prospects for model predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. Journal of

Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 86-108.

作者简介: 唐小林(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为混合动力汽车 NVH 与能量管理。

E-mail: tangxiaolin6@126.com

李珊珊, 女, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为混合动力汽车系统控制。

E-mail: shanLee206@163.com