

混合动力电动汽车的跟车控制与能量管理

赵秀春^{1,2} 郭戈^{3,4}

摘 要 混合动力电动汽车 (Hybrid electric vehicles, HEVs) 的能量管理问题至关重要, 而混合动力电动汽车的跟车控制不仅涉及跟车效果与安全性, 也影响着能量的高效利用. 将 HEVs 的跟车控制与能量管理相结合, 提出一种基于安全距离的 HEVs 车辆跟踪与能量管理控制方法. 首先, 考虑坡度、载荷变动建立了 HEVs 车辆跟车系统的非线性模型, 并基于安全距离, 提出一种基于道路观测器的动态面控制 (Dynamic surface control, DSC) 进行车辆跟踪控制. 然后, 结合跟踪控制下工况循环, 采用滚动动态规划 (Dynamic programming, DP) 算法进行混合动力电动汽车能量实时优化控制. 最后, 通过仿真研究进行验证.

关键词 混合动力电动汽车, 动态面控制, 车辆跟踪, 能量管理, 动态规划

引用格式 赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车的跟车控制与能量管理. 自动化学报, 2022, 48(1): 162–170

DOI 10.16383/j.aas.c200136

Tracking Control and Energy Management of Hybrid Electric Vehicles

ZHAO Xiu-Chun^{1,2} GUO Ge^{3,4}

Abstract The energy management of hybrid electric vehicles (HEVs) is very important. The tracking control of hybrid electric vehicles not only involves tracking and safety, but also affects the energy efficiency. Integrated with the problem of vehicle tracking control, an energy management control method based on safety distance for hybrid electric vehicles (HEVs) is proposed in this paper. Firstly, the nonlinear model of vehicle tracking system is established considering the change of slope and load. Considering the safety distance, a dynamic surface control (DSC) based on road observer is proposed for vehicle tracking control. Then, combined with the driving cycle under tracking control, the dynamic programming (DP) algorithm is used to optimize the energy real-time control of hybrid electric vehicles. Finally, the effectiveness is verified by simulations.

Key words Hybrid electric vehicles (HEVs), dynamic surface control (DSC), vehicle tracking, energy management, dynamic programming (DP)

Citation Zhao Xiu-Chun, Guo Ge. Tracking control and energy management of hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(1): 162–170

近年来, 能源与环保问题越来越受到全球专家学者的关注, 汽车保有量的不断增加导致能源消耗与环境污染日益加剧, 同时也使得城市拥堵现象越来越严重^[1]. 混合动力电动汽车 (Hybrid electric vehicles, HEVs) 具备传统汽车和纯电动汽车两者

的优点, 既能够缓解纯电动汽车电池续航里程的问题, 又能够有效降低燃油汽车的能耗与污染问题, 是目前解决能源危机与环境污染的有效途径之一. 混合动力电动汽车的能量管理策略直接影响着车辆性能和燃油经济性, 而车辆驾驶工况是车辆动力性和燃油经济性的重要影响因素, 对能量管理起着至关重要的作用. 在实际驾驶环境中, 车辆的工况循环和速度变化往往是未知的, 给混合动力电动汽车的控制与能量管理带来了挑战.

目前, 混合动力电动汽车的能量管理控制策略的研究主要分为基于规则和基于优化的控制算法两大分支^[2]. 基于规则的控制策略主要是根据车辆的不同转矩、车速、电池电量 *SOC* 或发动机效率 *map* 图进行工作模式划分, 制定规则进行切换控制^[3–4]. 该控制策略算法简单且规则容易实现, 但无法适应不同工况和实时动态变化的需求, 因而往往通过结合其他智能控制算法 (如模糊控制、神经网络) 以获

收稿日期 2020-03-16 录用日期 2020-08-14

Manuscript received March 16, 2020; accepted August 14, 2020

国家自然科学基金 (U1808205, 61573077, 61973053, 51975089, 51575079), 辽宁省教育厅科学研究经费 (LJYT201915) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1808205, 61573077, 61973053, 51975089, 51575079), and Scientific Research Fund of Liaoning Provincial Education Department (LJYT201915)

本文责任编辑 董海荣

Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 大连理工大学 大连 116024 2. 大连民族大学 大连 116600
3. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004
4. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004

1. Dalian University of Technology, Dalian 116024 2. Dalian Minzu University, Dalian 116600 3. Laboratory of Synthetical Automation for Industrial Process, Northeastern University, Shenyang 110004 4. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004

得更好的鲁棒性和适应性. 但在实际驾驶条件下, 仍无法保证最佳的控制性能^[5-7]. 因此, 更多的研究开始关注并探索基于优化的能量管理控制策略. 基于既定的工况循环或已知的速度规划, 动态规划 (Dynamic programming, DP) 算法以其公认的全局最优性被广泛应用于混合动力能量管理控制, 但由于实际的驾驶循环往往都是未知的且其计算负担较高而受到制约, 因而难以进行实时控制而多用于评价或固定路线的能量管理^[8-10]. 为了改善 DP 算法在实际应用中的局限性, 专家学者进行了各种改进与探索^[11-12]. 另一方面, 为了更好地实现实时优化控制, 模型预测控制被普遍采用^[13-14]. 比如, 文献 [13-14] 根据驾驶员意图采用模型预测算法对转矩分配或功率需求进行瞬时预测控制, 虽然能够实现实时优化, 但其预测控制效果基于初始状态的选择, 且无法实现全局最优.

上述能量管理研究都是针对单辆 HEV 车辆进行能量管理控制, 但实际道路上车辆并不是独立行驶, 往往是在车流中跟随前方车辆行驶. 因此, 车辆的行驶还会受到前车行驶模式和速度变化的影响, 所以混合动力电动汽车的能量管理需要与跟车控制相结合. 车辆跟车控制方面的研究已有数十年历史, 主要集中于自适应巡航控制 (Adaptive cruise control, ACC)^[15-17] 和车辆队列控制^[18-21]. 车辆队列控制关注的是多个车辆的协同控制, 其重点是队列稳定性. ACC 属于单车控制技术, 解决的是与前车保持安全距离的巡航控制问题, 已在很多中高档汽车中使用. 已有的自适应巡航控制大多针对内燃机车辆, 很少有混合动力电动汽车跟车控制方面的研究. 本文主要考虑车辆跟随前方车辆的安全控制和跟车过程中的能量管理问题, 队列稳定性并不属于本文研究范围.

混合动力电动汽车跟车控制系统更为复杂, 既要考虑车辆的跟踪性能, 又要考虑车辆的能量管理问题. 近几年, 有少量关于混合动力电动汽车跟车控制和能量管理的研究. 比如, 文献 [22] 提出基于规则的混合动力电动汽车能量管理与自适应巡航控制方法, 该算法简单易实现, 但无法保证性能最优; 文献 [23-24] 分别给出一种基于驾驶员行为预测和车辆加速度预测的能量管理方法; 文献 [25] 给出混合动力电动汽车能量管理与自适应巡航控制的动态规划和在线查表方法; 文献 [26] 提出考虑道路坡度的 HEV 车辆队列控制与能量管理方法. 需要指出的是, 上述研究存在如下几方面的不足: 1) 将能量管理与车辆巡航控制综合到同一成本函数, 参数较多, 计算负担较重, 且性能互相影响; 2) 车辆环境工况中未

充分利用前车信息, 需要进行加速度预测或假定参考值; 3) 无法实现道路坡度和载荷实时变化的影响.

本文旨在针对混合动力电动汽车跟车控制与能量管理综合问题, 考虑前车与道路工况, 提出了基于安全距离的 HEV 车辆动态面控制 (Dynamic surface control, DSC), 然后针对安全距离内的驾驶工况, 采用滚动动态规划算法进行混合动力电动汽车实时能量管理. 本文主要创新点和贡献如下:

1) 考虑前车对行驶工况的影响以及混合动力电动汽车能量的综合控制, 通过车辆跟踪控制为动态规划算法提供工况循环, 既保证了控制的最优性又解决了算法对工况预测和速度规划的要求;

2) 通过基于观测器的 DSC 跟车控制, 考虑了道路坡度和载荷实时变动对车辆跟踪控制性能与车辆能量消耗的影响;

3) 基于安全距离的滚动动态规划算法, 解决了存储空间有限和在线计算负担大的问题, 可实现实时能量优化管理.

本文组织结构如下: 第 1 节给出 HEV 跟车系统、能量管理模型及控制目标, 第 2 节是基于安全车距的跟车控制器设计、稳定性分析以及能量管理动态规划方法, 第 3 节为仿真验证, 第 4 节是本文总结.

1 系统模型与问题描述

考虑如图 1 所示的 HEVs 车辆跟踪系统, 其中, s_i 、 s_q 、 v_i 、 v_q 分别为当前车辆 i 、前车 q 的位置和速度, P_i 为车辆 i 的功率需求. 假设车辆已经配备了 V2V 等无线通信及传感装置, 能够获得前方车辆的状态信息 (车辆的位置、速度).

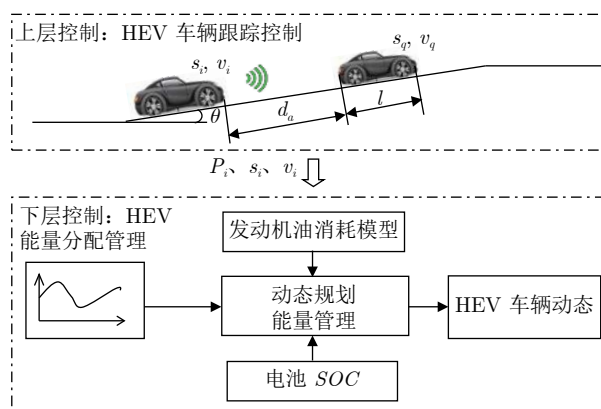


图 1 HEV 控制系统

Fig.1 HEV control system

1.1 HEV 车辆动力学模型

HEV 车辆的纵向动力模型如下^[27]

$$\begin{cases} \dot{s}_i = v_i \\ \dot{v}_i = \frac{1}{m_i}(F_i - F_a - F_r - F_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_i 、 s_i 、 v_i 分别为当前车辆的质量、位置和速度, F_i 为车辆的牵引力或制动力, F_a 为车辆行驶过程中的空气阻力, F_r 为滚动阻力, F_g 为坡道阻力. 其中, 空气阻力由车辆行驶的速度、空气阻力系数 C_D 、空气密度 ρ 和车辆的迎风面积 A 决定.

$$F_a = \frac{1}{2}C_D\rho A v_i^2 \quad (2)$$

滚动阻力为

$$F_r = \mu m_i g \cos \theta \quad (3)$$

式中, μ 为滚动阻力系数, g 为重力加速度, θ 表示道路坡度.

车辆的坡道阻力为

$$F_g = m_i g \sin \theta \quad (4)$$

综合式 (1) ~ 式 (4), 车辆的动力学模型表示为

$$\begin{cases} \dot{s}_i = v_i \\ \dot{v}_i = b_1 F_i - b_2 v_i^2 - b_3 w \end{cases} \quad (5)$$

式中, $b_1 = 1/m_i$, $b_2 = C_D\rho A/2m_i$, $b_3 = g$, $w = \mu \cos \theta + \sin \theta$, w 表示道路坡度和路面情况, 未知且不确定. 为方便研究, 往往假定道路情况不变, 忽略了道路坡度和路面变化的影响, 本文则将其视为系统的扰动项, 并通过控制器设计对其观测补偿以更加符合实际情况, 同时也更能体现道路坡度对于 HEV 能量消耗的影响.

理想的车间距定义为

$$d_a = s_q - s_i - l_i - k\theta \quad (6)$$

式中, d_a 为理想的车间距, 即在当前车速下制动且能保证不与前车相撞的最小安全距离; s_q 表示前车的位置; l_i 表示车辆的长度; $k > 0$ 为坡度系数.

注 1. 文献中理想的车间距 d_a 多采用固定值^[20, 27], 并不能很好地适应车速变化; 文献 [24, 28] 基于车速变化设定 d_a , 但往往由于车速实时变化使安全距离不断变化, 从而影响控制性能. 本文理想车间距 d_a 基于道路限速决定, 通过智能交通系统获得当前道路限速并依据限速确定安全车距, 使 d_a 既不会频繁变动, 也更符合交通法规和实际情况. 同时, 考虑坡度对安全距离的影响, 当 $\theta > 0$, 即车辆爬坡时, 安全车距相应缩短; 当 $\theta < 0$, 即车辆下坡时, 安全车距相应增加.

1.2 HEV 功率能量模型

考虑 Power-split HEV^[26], 其结构如图 2 所示,

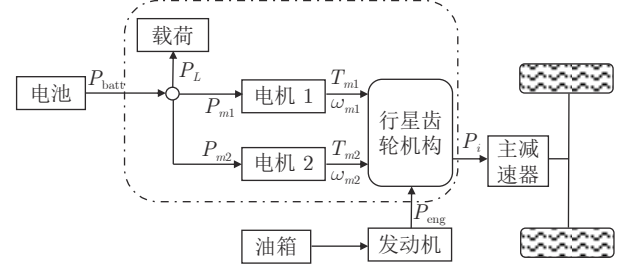


图 2 Power-split HEV 功率关系

Fig.2 Power-split HEV power relationship

P_L 指其他电器载荷, 从功率平衡的角度, 车辆 i 的功率 P_i 由电池功率和发动机功率共同提供, 即

$$\begin{cases} P_i(k) = P_{\text{eng}}(k) + P_{\text{batt}}(k) \\ P_{\text{eng}} = T_{\text{eng}}\omega_{\text{eng}} \\ P_{\text{batt}} = T_{m1}\omega_{m1}\eta_{m1} + T_{m2}\omega_{m2}\eta_{m2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_{eng} 和 P_{batt} 分别表示发动机功率和电池功率, 电池功率为正表示电池正在放电, 为负则代表电池正处于充电状态. ω_{m1} , ω_{m2} , ω_{eng} 与 T_{m1} , T_{m2} , T_{eng} 分别表示电动机 1、电动机 2 与发动机的转速与转矩; η_{m1} , η_{m2} 为电机效率.

由行星轮机构的运动关系, 其转速满足

$$\begin{cases} \omega_s = -\alpha\omega_r + (1 + \alpha)\omega_c \\ \omega_{m1} = -\alpha\varepsilon\omega_{\text{req}} + (1 + \alpha)\omega_{\text{eng}} \\ \omega_{m2} = \varepsilon\omega_{\text{req}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, ω_r , ω_c , ω_s 分别表示齿圈、行星架和太阳轮的转速, 分别和发动机、电机 1 和电机 2 相连; α 为齿圈相对于太阳轮的传动比; ω_{req} 为车轮转速; ε 为主减速器的传动比, 转矩关系为

$$\begin{cases} T_{m1} = -\frac{1}{1 + \alpha}T_{\text{eng}} \\ T_{m2} = \frac{T_{\text{req}}}{\varepsilon} - \frac{\alpha}{1 + \alpha}T_{\text{eng}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, T_{req} 为车轮转矩.

根据电池内阻模型, 电池的功率 P_{batt} 为

$$\begin{cases} P_{\text{batt}} = V \times I_{\text{batt}} \\ P_{\text{batt}} = V_{\text{oc}}I_{\text{batt}} - I_{\text{batt}}^2 R_{\text{batt}} \end{cases} \quad (10)$$

求解式 (10)

$$I_{\text{batt}} = -\frac{V_{\text{oc}} \pm \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4P_{\text{batt}}(t)R_{\text{batt}}}}{2R_{\text{batt}}} \quad (11)$$

由于相同功率下, 电池电压越大其电流越小. 因此忽略较大取值, 电池的 SOC 动态表示为

$$\dot{SOC} = -\frac{I_{batt}}{Q_{batt}} = -\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4P_{batt}(k)R_{batt}}}{2Q_{batt}R_{batt}} \quad (12)$$

式中, I_{batt} 为电池电流, V_{oc} 表示电池输出电压, R_{batt} 为电池的内阻, Q_{batt} 表示电池电量.

发动机的功率 P_{eng} 由发动机转矩和转速计算得到

$$P_{eng} = T_{eng}\omega_{eng} \quad (13)$$

式中, ω_{eng} 与 T_{eng} 分别表示发动机的转速和转矩.

发动机的燃油消耗率为发动机的转速 ω_{eng} 和转矩 T_{eng} 的函数, 通常由发动机台架试验获得. 图 3 为 Advisor 中发动机油耗 map 图.

$$\dot{m}_f = \psi(\omega_{eng}, T_{eng}) \quad (14)$$

式中, $\dot{m}_f$ 为燃油消耗率.

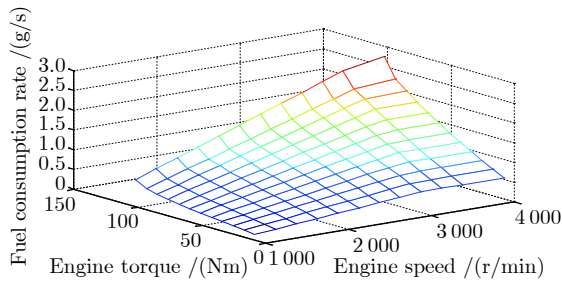


图 3 发动机燃油消耗率

Fig.3 Engine fuel consumption rate map in Advisor

因此, 对于一定工况循环下的功率需求, 根据 HEV 功率平衡与行星轮机构运动关系, 可以通过发动机的转矩和转速控制进行 HEV 车辆的能量优化管理.

1.3 本文目标

本文的控制目标是将车辆跟踪控制与混合动力电动汽车能量管理相结合, 设计控制器实现安全距离内 HEV 车辆的跟踪控制以保证车辆的安全性, 同时通过跟踪控制提供准确的实时工况信息以保证优化的能量管理. 即满足以下两点要求:

1) 跟踪稳定性: 考虑实际的交通状况, 即有前车的情况下进行基于安全车距 d_a 下的车辆跟踪控制, 设计控制器跟踪前车速度 v_q , 即 $v_i \rightarrow v_q$, 并保证车辆的位置跟踪误差 $\delta_i = s_i - (s_q - d_a - l)$ 收敛到一个邻域内;

2) 燃油经济性: 以前方车辆速度 v_q 轨迹作为当前 HEV 车辆的驾驶工况, 在安全车距 d_a 内, 对 HEV 车辆 i 进行实时能量优化管理. 即在满足系统约束条件下, 使 HEV 车辆的燃油消耗成本最低:

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} \psi(\omega_{eng}, T_{eng}) dt$$

注 2. 在实际的交通状况下, 若没有前方车辆, 则采用虚拟车辆代替前车, 以当前道路限速作为虚拟车辆的车速, 以当前限速下的理想车距为安全距离. 以当前限速下的理想车距为安全距离确定前车位置, 既保证车辆的行驶安全性, 也更符合实际的道路交通状况; 车辆以当前限速为参考车速, 可使车辆更接近于能耗高效区间, 既有利于节省能耗, 又能够提高道路的交通效率.

2 基于安全车距的车辆跟踪与能量管理

考虑存在前方行驶车辆的实际道路交通状况, 将 HEV 车辆的车辆跟踪与能量管理控制相结合. 首先采用 DSC 设计基于安全车距的跟踪控制器进行车辆位置与速度的跟踪控制, 在保证车辆安全驾驶的同时为 HEV 车辆能量管理提供实时驾驶工况; 然后在安全距离内应用滚动动态规划算法对发动机与蓄电池功率进行优化分配, 使能量消耗最小.

2.1 基于安全车距的车辆 DSC 跟踪控制

为实现更好的跟踪效果并为能量管理提供准确的工况信息, 在设计 DSC 控制器前, 首先对路面情况进行观测.

1) 观测器的设计

由式 (5) 可得

$$b_3 w = b_1 F_i - b_2 v_i^2 - \dot{v}_i \quad (15)$$

设计观测器如下

$$\dot{\hat{w}} = k_0 [b_1 F_i - b_2 v_i^2 - \dot{v}_i - b_3 \hat{w}] \quad (16)$$

式中, k_0 为观测器增益, 且 $k_0 > 0$.

定义辅助变量 $z = \hat{w} + k_0 v_i$, 则

$$\dot{z} = \dot{\hat{w}} + k_0 \dot{v}_i \quad (17)$$

将式 (16) 代入式 (17) 得

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{\hat{w}} + k_0 \dot{v}_i = k_0 [b_1 F_i - b_2 v_i^2 - \dot{v}_i - b_3 \hat{w}] + k_0 \dot{v}_i = \\ &= k_0 [b_1 F_i - b_2 v_i^2 - b_3 \hat{w}] = \\ &= k_0 [b_1 F_i - b_2 v_i^2 - b_3 (z - k_0 v_i)] \end{aligned} \quad (18)$$

2) 补偿控制器设计

驱动力由两部分构成

$$F_i = F_{dsc} - F_w \quad (19)$$

式中, F_{dsc} 表示 DSC 控制器输出, F_w 为克服道路坡度与路面阻力的补偿控制.

将式 (19) 代入式 (5) 得

$$\dot{v}_i = b_1 F_{\text{dsc}} - b_1 F_w - b_2 v_i^2 - b_3 w \quad (20)$$

针对观测到的路面状况, 设计补偿控制器

$$F_w = -\frac{b_3}{b_1} \hat{w} \quad (21)$$

定义观测器误差

$$\tilde{w} = w - \hat{w} \quad (22)$$

对式 (22) 求导

$$\dot{\tilde{w}} = \dot{w} - \dot{\hat{w}} \quad (23)$$

在城市工况下道路坡度通常比较平缓, 因此 $\dot{w} = 0$, 结合式 (15)、式 (16) 得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{w}} = -\dot{\hat{w}} = & -k_0[b_1 F_i - b_2 v_i^2 - \dot{v}_i - b_3 \hat{w}] = \\ & -k_0[(b_2 v_i^2 + \dot{v}_i + b_3 w) - b_2 v_i^2 - \dot{v}_i - b_3 \hat{w}] = \\ & -k_0 b_3 \tilde{w} \end{aligned} \quad (24)$$

将式 (21)、式 (22) 代入式 (20), 则

$$\dot{v}_i = b_1 F_{\text{dsc}} - b_2 v_i^2 - b_3 \tilde{w} \quad (25)$$

因此, 系统 (5) 转化为

$$\begin{cases} \dot{s}_i = v_i \\ \dot{s}_i = \dot{v}_i = b_1 F_{\text{dsc}} - b_2 v_i^2 - b_3 \tilde{w} \end{cases} \quad (26)$$

3) 动态面控制器设计

首先, 定义第一动态面为位置误差

$$Z_1 = \delta_i = s_i - (s_q - d_a - l) \quad (27)$$

则

$$\dot{Z}_1 = \dot{s}_i - \dot{s}_q = v_i - \dot{s}_q \quad (28)$$

取虚拟控制量

$$\alpha = -k_1 Z_1 + \dot{s}_q \quad (29)$$

其中, $k_1 > 0$.

$$\dot{\alpha} = -k_1 \dot{Z}_1 + \dot{v}_q$$

α 通过一阶滤波得到

$$T\dot{\alpha}_f + \alpha_f = \alpha, \alpha_f(0) = \alpha(0) \quad (30)$$

其中, T 为时间常数, $T > 0$.

定义滤波误差

$$e = \alpha_f - \alpha \quad (31)$$

对其求导得

$$\dot{e} = \dot{\alpha}_f - \dot{\alpha} \quad (32)$$

然后, 定义第二动态面

$$Z_2 = v_i - \alpha_f \quad (33)$$

将式 (29)、式 (31)、式 (33) 代入式 (28) 得

$$\dot{Z}_1 = \dot{s}_i - \dot{s}_q = v_i - \dot{s}_q = Z_2 + \alpha_f - \dot{s}_q =$$

$$Z_2 + e + \alpha - \dot{s}_q =$$

$$Z_2 + e + (-k_1 Z_1 + \dot{s}_q) - \dot{s}_q =$$

$$Z_2 + e - k_1 Z_1 \quad (34)$$

将式 (29) ~ 式 (31)、式 (34) 代入式 (32) 得

$$\dot{e} = \dot{\alpha}_f - \dot{\alpha} = \frac{\alpha - \alpha_f}{T} - \dot{\alpha} =$$

$$\frac{-e}{T} - (-k_1 \dot{Z}_1 + \ddot{s}_q) = \frac{-e}{T} + k_1 \dot{Z}_1 - \ddot{s}_q =$$

$$\frac{-e}{T} + k_1 (Z_2 + e - k_1 Z_1) - \ddot{s}_q =$$

$$\left(k_1 - \frac{1}{T}\right)e + k_1 Z_2 - k_1^2 Z_1 - \ddot{s}_q \quad (35)$$

设计 DSC 控制器

$$\begin{aligned} F_{\text{dsc}} = & -\frac{1}{b_1}(-b_2 v_i^2 + k_2 Z_2 - \dot{\alpha}_f) = \\ & -\frac{1}{b_1} \left(-b_2 v_i^2 + k_2 Z_2 - \frac{\alpha - \alpha_f}{T} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

其中, $k_2 > 0$.

对式 (33) 求导, 并将式 (25)、式 (36) 代入得

$$\dot{Z}_2 = \dot{v}_i - \dot{\alpha}_f =$$

$$b_1 F_{\text{dsc}} - b_2 v_i^2 - b_3 \tilde{w} - \dot{\alpha}_f =$$

$$b_1 \left[-\frac{1}{b_1}(-b_2 v_i^2 + k_2 Z_2 - \dot{\alpha}_f) \right] - b_2 v_i^2 -$$

$$b_3 \tilde{w} - \dot{\alpha}_f = -k_2 Z_2 - b_3 \tilde{w} \quad (37)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} Z_1^2 + \frac{1}{2} Z_2^2 + \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} \tilde{w}^2 \quad (38)$$

对式 (38) 求导, 并将式 (24)、式 (34)、式 (35)、式 (37) 代入得

$$\dot{V} = Z_1 \dot{Z}_1 + Z_2 \dot{Z}_2 + e \dot{e} + \tilde{w} \dot{\tilde{w}} =$$

$$Z_1 (Z_2 + e - k_1 Z_1) + Z_2 (-k_2 Z_2 - b_3 \tilde{w}) +$$

$$e \left(\left(k_1 - \frac{1}{T} \right) e + k_1 Z_2 - k_1^2 Z_1 - \ddot{s}_q \right) +$$

$$\tilde{w} (-k_0 b_3 \tilde{w}) = Z_1 Z_2 + (1 - k_1^2) Z_1 e -$$

$$k_1 Z_1^2 - k_2 Z_2^2 - b_3 Z_2 \tilde{w} + \left(k_1 - \frac{1}{T} \right) e^2 +$$

$$k_1 Z_2 e - \ddot{s}_q e - k_0 b_3 \tilde{w}^2 \quad (39)$$

根据杨氏不等式

$$\begin{cases} Z_1 Z_2 \leq \frac{1}{4} Z_1^2 + Z_2^2 \\ (1 - k_1^2) Z_1 e \leq (1 + k_1^2) \left(\frac{1}{4} Z_1^2 + e^2 \right) \\ -b_3 Z_2 \tilde{w} \leq |-b_3 Z_2 \tilde{w}| \leq b_3 \left(Z_2^2 + \frac{1}{4} \tilde{w}^2 \right) \\ k_1 Z_2 e \leq k_1^2 Z_2^2 + \frac{1}{4} e^2 \\ -\ddot{s}_q e \leq |-\ddot{s}_q e| \leq e^2 + \frac{1}{4} \ddot{s}_q^2 \end{cases} \quad (40)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \left(k_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} k_1^2 \right) Z_1^2 - (-k_1^2 + k_2 - 1 - \\ & b_3) Z_2^2 - \left(\frac{1}{T} - \frac{9}{4} - k_1 - k_1^2 \right) e^2 - \\ & b_3 \left(k_0 - \frac{1}{4} \right) \tilde{w}^2 + \frac{1}{4} \ddot{s}_q^2 \end{aligned} \quad (41)$$

为保证系统的跟踪稳定性, 引入下列引理.

引理 1^[29]. 对于非线性系统, 存在正定函数 V 满足下列微分不等式

$$\dot{V} \leq -\varsigma V + C \quad (42)$$

其中, $V > 0$, $C \geq 0$. 对于 t_0 , $V(t)$ 满足不等式

$$\begin{aligned} 0 \leq V(t) \leq & \frac{[C - (C - \varsigma V(t_0)) \exp(-\varsigma(t - t_0))]}{\varsigma}, \\ \forall t \geq t_0 \end{aligned} \quad (43)$$

即 $V(t)$ 以指数收敛率 ς 最终一致收敛于 C/ς , 则系统最终一致有界.

根据引理 1, 对于非线性系统 (26), 存在正定函数式 (38). 根据式 (40), 只要

$$\begin{cases} k_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} k_1^2 \geq 0 \\ -k_1^2 + k_2 - 1 - b_3 \geq 0 \\ \frac{1}{T} - \frac{9}{4} - k_1 - k_1^2 \geq 0 \\ k_0 - \frac{1}{4} \geq 0 \end{cases} \quad (44)$$

则 $\dot{V} \leq -\varsigma V + C$, 其中

$$\begin{aligned} \varsigma = & \min \left(\left(k_1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} k_1^2 \right), (-k_1^2 + k_2 - 1 - b_3), \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{T} - \frac{9}{4} - k_1 - k_1^2 \right), \left(k_0 - \frac{1}{4} \right) \right) \end{aligned}$$

则系统最终一致有界. 因此, Lyapunov 函数 V 一致

有界, 适当地选择观测器增益、滤波器时间常数和控制器参数能够使得 ς 足够大, C/ς 足够小, 使观测器误差和系统跟踪误差收敛到零的一个邻域内.

注 3. 基于车辆非线性动态模型, 对道路情况 w 进行观测补偿, 使 DSC 跟踪系统能够更好地适应道路变化, 具有更好的跟踪性能; 同时, 既无需进行速度预测也考虑了道路坡度对 HEV 车辆能量管理的影响, 为 HEV 的能量管理提供了保障.

2.2 基于滚动 DP 的 HEV 能量管理

将车辆跟踪控制与 HEV 能量管理相结合, 既保证了车辆的跟踪安全性, 又为当前 HEV 车辆提供了工况循环信息. 因此, 本节采用动态规划策略在安全车距内对 HEV 车辆进行能量优化管理, 使 HEV 在满足各种约束条件下, 通过优化发动机与蓄电池功率分配使系统的性能指标即燃油消耗降至最低.

根据发动机功率与转矩之间的关系式 (13), HEV 车辆油耗模型式 (14) 转化为

$$\dot{m}_f = \varphi(\omega_{\text{eng}}, P_{\text{eng}}) \quad (45)$$

式中, $\varphi(\cdot)$ 表示油耗率与发动机转速、功率之间的函数关系. 图 4 为基于 Advisor 车辆参数转化后的不同转速下车辆油耗模型.

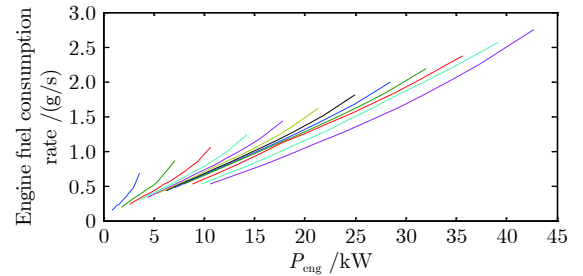


图 4 发动机燃油消耗率-功率曲线

Fig.4 Engine fuel consumption rate and power

离散化控制目标为

$$\min_{P_{\text{eng}}} J = \sum_{k=0}^{N-1} \varphi(\omega_{\text{eng}}, P_{\text{eng}}, k) \quad (46)$$

约束条件满足

$$SOC(k+1) = f(SOC(k), P_{\text{eng}}(k), k)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (47)$$

$$\begin{cases} SOC^{\min} \leq SOC \leq SOC^{\max} \\ P_{\text{batt}}^{\min} \leq P_{\text{batt}} \leq P_{\text{batt}}^{\max} \\ P_{\text{eng}}^{\min} \leq P_{\text{eng}} \leq P_{\text{eng}}^{\max} \\ \omega_{\text{eng}}^{\min} \leq \omega_{\text{eng}} \leq \omega_{\text{eng}}^{\max} \end{cases} \quad (48)$$

式中, $(\cdot)^{\min}$ 与 $(\cdot)^{\max}$ 分别表示最小值、最大值.

考虑采样时间内 $\Delta SOC(k)$ 的约束, 进一步减少状态空间和计算量, 以实现实时控制.

$$\Delta SOC(k) = SOC(k+1) - SOC(k) =$$

$$-\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4P_{batt}(k)R_{batt}}}{2Q_{batt}R_{batt}} =$$

$$-\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4[P_i(k) - P_{eng}(k)]R_{batt}}}{2Q_{batt}R_{batt}} \quad (49)$$

$$\Delta SOC(k)_{\max(\min)} =$$

$$-\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4P_{batt_max(\min)}(k)R_{batt}}}{2Q_{batt}R_{batt}}$$

$$SOC_{k\min} \leq SOC(k) \leq SOC_{k\max} \quad (50)$$

滚动 DP 算法的计算过程如下:

1) 在安全距离内进行初始化并定义时间及状态存储空间;

2) 根据跟踪控制安全距离内的当前车辆 i 的车速轨迹, 得到车辆速度和功率 $v_i(k)$, $P_i(k)$, $k = N, N-1, \dots, 1$;

3) 对于阶段 k 对应的 $v_i(k)$, $P_i(k)$, 考虑阶段状态约束 $SOC_j(k) \in [SOC_{k\min}, SOC_{k\max}]$, 计算所有状态转移所对应的变化量 $J_{ij}(k)$, 并求得所有状态 j 对应的成本函数最优值 $J_k = \min[J_{ij}(k) + J_j(k+1)]$;

4) 进入到下一阶段 $k = k-1$, 重复步骤 3) 直到 $k = 1$, 找到成本函数最低的最优控制和状态;

5) 以优化结果作为安全车距内的控制输入, 滚动执行整个优化过程.

注 4. 第 2.1 节基于观测器补偿的 DSC 控制器为安全距离内的动态规划算法提供了准确的驾驶工况循环, 保证了能量管理的有效性; 在安全车距内考虑单位步长内电池 SOC 变化的约束, 使得 HEV 能量管理的状态空间和控制空间大大缩减, 减少了计算负担, 更有利于 HEV 能量管理的实时性.

3 仿真研究

对 HEV 车辆跟踪与能量管理进行仿真研究, 并与 Advisor 中的能量管理控制结果进行比较, 验证所采用控制策略的有效性.

3.1 DSC 车辆跟踪控制仿真验证

考虑跟车行驶的工况, HEV 车辆参数如表 1 所示. 假设前车按照 ECE 城市工况循环行驶, 总距离约为 1 km, 其最高限速为 50 km/h, 道路坡度如

图 5 所示, 车辆初始安全距离设为 30 m. DSC 跟踪控制器参数根据式 (44) 分别选为: $k_0 = 0.5$, $k_1 = 2$, $k_2 = 30$, $T = 1$, 仿真结果如图 6、图 7 所示.

表 1 HEV 车辆主要参数
Table 1 Parameters of HEV

参数	数值	单位	参数	数值	单位
整车质量	1332	kg	车轮半径	0.287	m
重力加速度	9.81	N/kg	迎风面积	1.746	m ²
车身长度	3	m	空气密度	1.29	kg/m ³
风阻系数	0.3	—	滚动阻力系数	0.3	m/s

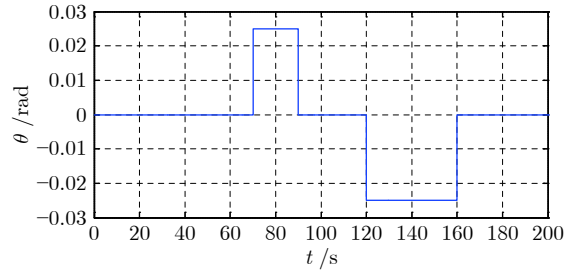


图 5 道路坡度

Fig.5 Road slope

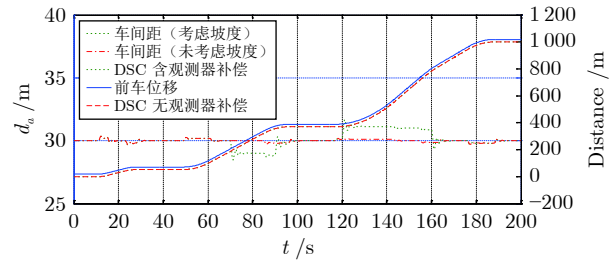


图 6 HEV 车辆位置

Fig.6 Position profile of HEV

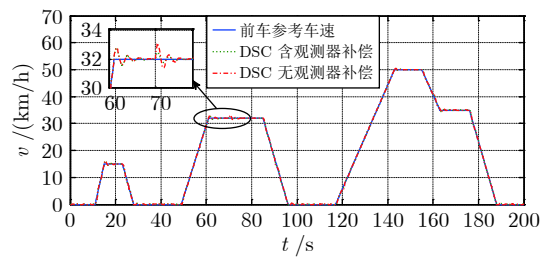


图 7 HEV 车辆速度曲线

Fig.7 Velocity profile of HEV

图 6 为车辆跟踪的位置与车距变化曲线, 具有较好的位置跟踪性能, 且考虑了坡度的变化对车间距进行了适当的调整. 图 7 中, 两种控制器均能实现较好的速度跟踪, 但通过局部放大可以看出具有补偿控制器的 DSC 控制能够更快地适应实时的速度变化, 具有更好的适应性和跟踪控制效果.

3.2 能量管理优化仿真

基于跟踪控制的车速工况与功率需求, 应用滚动动态规划算法进行数值仿真研究.

图 8 为车速工况与功率需求曲线, 由图可以看出车辆在加速过程中的功率大于零且逐渐增加; 车辆速度减小时, 车辆功率为负, 处于再生制动状态. 在图 9 中, HEV 车辆电池 SOC 随着行驶工况与电池能量的消耗与回收而发生变化. 图 10 为基于跟踪工况下的 HEV 功率分配曲线. 当车速较低时, HEV 所需的功率主要由电池通过电动机提供; 随着车辆速度与功率需求的增加, 发动机和电动机共同工作提供能量; 当车速下降时, HEV 通过再生制动进行能量回收. 表 2 为采用该策略与 Advisor 中能量管理策略的燃油消耗对比, 百公里油耗提高了约 12 %, 由此可以看出本文所采用的方法具有良好的燃油经济性.

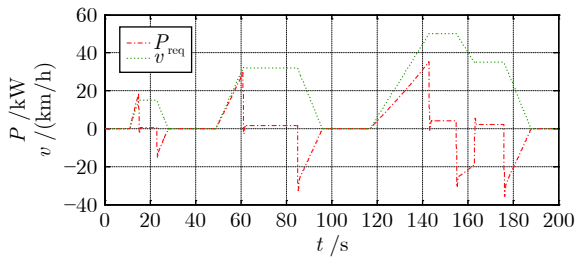


图 8 速度工况曲线

Fig.8 Velocity cycle of HEV

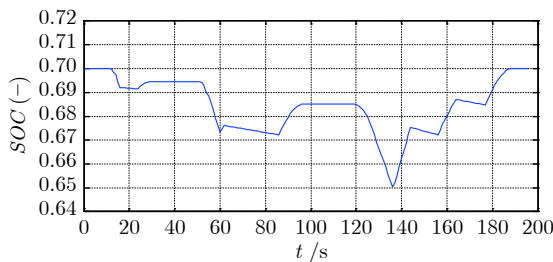


图 9 SOC变化曲线

Fig.9 SOC of HEV

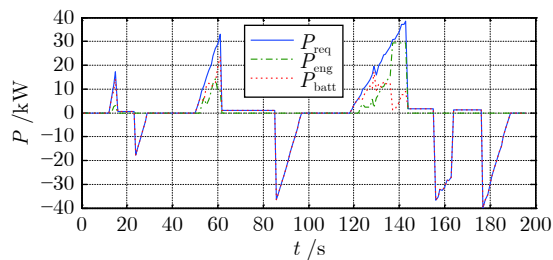


图 10 功率分配曲线

Fig.10 Power distribution of HEV

表 2 燃油消耗对比

Table 2 Comparison of fuel consumption

优化方法 (ECE 工况)	燃油消耗 (l/100 km)	提高 (%)
Advisor	6.3	—
本文算法	4.68	12

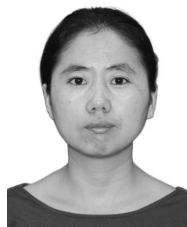
4 结论

本文研究了混合动力电动汽车的车辆跟踪与能量管理控制. 考虑在有前车的道路工况下, 基于安全车距设计了具有观测补偿的动态面跟踪控制算法, 为 HEV 车辆能量管理提供了驾驶工况, 并在安全距离内对 HEV 采用滚动动态规划算法进行能量管理. 考虑单位步长内电池 SOC 变化的约束进一步缩小对 SOC 状态搜索空间, 更有利于车辆的安全控制和实时的能量优化管理. 需要指出的是, 本文未考虑车辆在交叉路口、红灯或转弯时的安全车距与速度跟踪问题, 我们将在后续研究中更全面地考虑各种复杂交通情况下的混合动力电动汽车跟车控制与能量管理问题, 并将进一步研究多个 HEV 车辆的队列控制与能量管理问题.

References

- Li L, Wang X Y, Song J. Fuel consumption optimization for smart hybrid electric vehicle during a car-following process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **87**: 17–29
- Zhao Xiu-Chun, Guo Ge. Survey on energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3): 321–334
(赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车能量管理策略研究综述. *自动化学报*, 2016, **42**(3): 321–334)
- Li X, Evangelou S. Torque-leveling threshold-changing rule-based control for parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, **68**(7): 6509–6523
- Anbaran S A, Idris N R N, Jamati M, Aziz M J, Alsofyani I. Rule-based supervisory control of split-parallel hybrid electric vehicle. In: *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Energy Conversion*. Johor Bahru, Malaysia: IEEE Press, 2014. 7–12
- Denis N, Dubois M R, Desrochers A. Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle. *IET Intelligent Transport Systems*, 2015, **9**(1): 30–37
- Murphey Y L, Park J, Chen Z H, Kuang M L, Masrur M A, Phillips A M. Intelligent hybrid vehicle power control — Part I: Machine learning of optimal vehicle power. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(8): 3519–3530
- Zhang R D, Tao J L. GA-based fuzzy energy management system for FC/SC-powered HEV considering H₂ consumption and load variation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, **26**(4): 1833–1843
- Liu J C, Chen Y Z, Zhan J Y, Shang F. Heuristic dynamic programming based online energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, **68**(5): 4479–4493
- Chang Yuan. Research on energy management strategy of parallel hybrid electric multiple unit based on dynamic programming. *Internal Combustion Engine and Parts*, 2019, **8**: 114–119
(常远. 基于动态规划的并联混合动力动车组能量管理策略研究. *内燃机与配件*, 2019, **8**: 114–119)
- Larsson V, Johansson M L, Egardt B, Karlsson S. Commuter

- route optimized energy management of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(3): 1145–1154
- 11 Ko J, Ko S, Son H, Yoo B, Cheon J, Kim H. Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, **64**(2): 431–440
 - 12 Li G Q, Görges D. Ecological adaptive cruise control and energy management strategy for hybrid electric vehicles based on heuristic dynamic programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(9): 3526–3535
 - 13 Zeng X R, Wang J M. A parallel hybrid electric vehicle energy management strategy using stochastic model predictive control with road grade preview. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, **23**(6): 2416–2423
 - 14 Yan F J, Wang J M, Huang K S. Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(6): 2458–2467
 - 15 Moon S, Moon I, Yi K. Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance. *Control Engineering Practice*, 2017, **5**: 442–455
 - 16 Chen J Z, Zhou Y, Liang H. Effects of ACC and CACC vehicles on traffic flow based on an improved variable time headway spacing strategy. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, **13**(9): 1365–1373
 - 17 Chen Hong, Guo Lu-Lu, Gong Xun, Gao Bing-Zhao, Zhang Lin. Automotive control in intelligent era. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(7): 1313–1332
(陈虹, 郭露露, 宫询, 高炳钊, 张琳. 智能时代的汽车控制. 自动化学报, 2020, **46**(7): 1313–1332)
 - 18 Stefania S, Alessandro S, Antonio S V, Antonio P, Michele S, Renato L C. Platooning maneuvers in vehicular networks: A distributed and consensus-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, **4**(1): 59–72
 - 19 Wang C, Nijmeijer H. String stable heterogeneous vehicle platoon using cooperative adaptive cruise control. In: Proceedings of the 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, Spain: IEEE, 2015. 1977–1982
 - 20 Li Y F, Chen W B, Peeta S, Wang Y B. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: Design and experiments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, **21**(5): 1891–1902
 - 21 Zheng Y, Li S E, Wang J Q, Cao D P, Li K Q. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(1): 14–26
 - 22 Luo Y, Chen T, Li K. Multi-objective decoupling algorithm for active distance control of intelligent hybrid electric vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, **64–65**: 29–45
 - 23 Di Cairano S, Bernardini D, Bemporad A, Kolmanovsky V I. Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(3): 1018–1031
 - 24 Tajeddin S, Vajedi M, Azad N. A Newton/GMRES approach to predictive ecological adaptive cruise control of a plug-in hybrid electric vehicle in carfollowing scenarios. *IFAC-Papers Online*, 2016, **49**(21): 59–65
 - 25 Luo Y, Chen T, Zhang S W, Li K Q. Intelligent hybrid electric vehicle ACC with coordinated control of tracking ability, fuel economy, and ride comfort. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 2303–2308
 - 26 Yu K J, Yang H Z, Tan X, Kawaba T, Guo Y, Liang Q, et al. Model predictive control for hybrid electric vehicle platooning using slope information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(7): 1894–1909
 - 27 Guo G, Yue W. Autonomous platoon control allowing range-limited sensors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(7): 2901–2912
 - 28 Wang Qiong, Guo Ge. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(5): 888–896
(王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制. 自动化学报, 2019, **45**(5): 888–896)
 - 29 Qu Z, Dawson D M, Lim S Y, Dorsey J F. A new class of robust control laws for tracking of robots. *International Journal of Robotics Research*, 1994, **13**(4): 355–363



赵秀春 大连民族大学讲师, 大连理工大学控制科学与工程专业博士研究生. 2006 年获得东北大学硕士学位. 主要研究方向为车辆控制技术, 混合动力电动汽车能量管理.

E-mail: zxc_xiu@163.com



郭戈 东北大学教授. 1998 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为智能交通系统, 运动目标检测跟踪网络. 本文通信作者.

E-mail: geguo@yeah.net

(GUO Ge Professor at Northeastern University. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 1998. His research interest covers intelligent transportation system, and moving target detection and tracking with network. Corresponding author of this paper.)