

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策

朱波, 吴迪, 张农, 郑敏毅

引用本文:

朱波, 吴迪, 张农, 等. 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策[J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 956–964.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0856>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题

Multiple demands vehicle routing problem with time windows and service order constraints

*控制与决策*. 2019, 34(7): 1565–1570 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1630>

### 基于置信规则库专家系统的司控器开关量健康状态评估

A state estimation method for driver controller's microswitch based on belief rule base

*控制与决策*. 2019, 34(4): 805–810 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1237>

### 异构通信网联车系统鲁棒协同自适应巡航控制

Robust cooperative adaptive cruise control of connected vehicle systems with heterogonous communication

*控制与决策*. 2019, 34(11): 2407–2413 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0499>

### 考虑车辆等待的应急物资调配方案优化研究

Optimization of emergency materials allocation plan considering vehicle waiting

*控制与决策*. 2019, 34(10): 2229–2236 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0227>

### 战时物流配送车辆路径优化问题

Optimization of vehicle routing problem in military logistics on wartime

*控制与决策*. 2019, 34(1): 121–128 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0983>

### 求解带容量约束车辆路径问题的混合变邻域生物共栖搜索算法

Hybrid variable neighborhood symbiotic organisms search for capacitated vehicle routing problem

*控制与决策*. 2018, 33(7): 1190–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0346>

### 灾后动态环境下基于MPC的应急运输实时调度

Real-time relief transportation planning based on MPC in post-disaster dynamic environment

*控制与决策*. 2018, 33(12): 2131–2141 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0928>

### 级联式滑模观测器的永磁同步电机鲁棒滑模控制

Robust sliding mode control of PMSM based on cascaded sliding mode observers

*控制与决策*. 2016, 31(11): 2071–2076 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1314>

## 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策

朱波<sup>1,2†</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 张农<sup>1</sup>, 郑敏毅<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学汽车工程技术研究院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 通过对标准新欧洲汽车法规循环(NEDC)工况的分析,提取出NEDC工况中的实时交通信息,分析不同驾驶状态对于车辆能耗的影响,提出一种新的基于实时交通信息的适用于V2I车辆的测试工况;结合电动汽车能量回收的优点,考虑电池-电机-制动特性约束,设计多源信息融合框架下的制动力分配策略;结合模型预测控制(MPC)的滚动优化思想提出MPC软约束框架下的电动汽车V2I最优控制策略;在AMESim & Simulink联合仿真平台上进行高精度纯电动车整车建模和MPC最优控制器的设计;对优化后车辆和未优化的车辆进行仿真对比验证,结果表明:结合道路交通信息进行最优决策的V2I纯电动车辆可有效降低车辆运行中的启停频率,减少整车能耗、车辆加速度和冲击度幅度,并显著提高整车经济性和舒适性。

**关键词:** 电动汽车; V2I; 交通信息; AMESim; MPC; 信息融合

**中图分类号:** U469.72+2

**文献标志码:** A

## Decision-making research of V2I electric vehicle based on rolling optimization and energy recovery

ZHU Bo<sup>1,2†</sup>, WU Di<sup>1</sup>, ZHANG Nong<sup>1</sup>, ZHENG Min-yi<sup>2</sup>

(1. Automotive Engineering Technology Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** By analyzing the standard new european driving cycle (NEDC), this paper extractes the real-time traffic data in NEDC and analyses the influence of different driving behaviour for vehicle energy consumption, and proposes a new cycle with real-time traffic information for the V2I vehicle test. In order to develop the regenerative braking potential in electric vehicles and considering the battery constraints, motor constraints and braking characteristics, the braking force distribution strategy under the framework of multi-source information fusion is designed. Then the optimal control strategy of V2I for the electric vehicles under the soft constraint framework of model predictive control (MPC) is proposed based on the rolling optimization theory of MPC. The dynamic modeling of high precision vehicles and the design of MPC optimal controllers are carried out on the AMESim & Simulink co-simulation platform. Finally, the comparison between the optimized vehicle and the unoptimized vehicle is simulated, and results show that, after the combination of road traffic information and the optimization strategy, the V2I intelligent vehicle can effectively reduce the stop&go frequency, energy consumption as well as the acceleration and jerk, thus significantly improving the economic and comfortable performance.

**Keywords:** electric vehicle; V2I; traffic information; AMESim; MPC; information fusion

## 0 引言

在我国“中国制造2025”战略中,智能网联汽车是其中的研究重点.智能网联汽车可以通过V2X获得周围的环境信息以及车辆本身的相关信息,决策出车辆的控制策略.同时,电动汽车经济性和舒适性的研究是目前的研究热点,在电池能量密度很难实现革命性突破的现状下,通过引入更多的外部道路交通信息,结合整车自身状态参数决策的V2I电动汽车整车

优化控制可以显著提升车辆行驶的经济性和舒适性.

近几年,日本推出了i-Japan战略2015<sup>[1]</sup>,相关后续研究表明,利用外部信息选择最佳车辆行驶方案,汽车的经济性行驶可通过改善车辆行驶轨迹并结合整车能量管理进行优化,从而有效提升经济性.文献[2]指出,可以从3个方面对经济性行驶进行优化:1)不考虑道路和交通信息的单车行驶优化;2)考虑道路和交通信息的单车行驶优化;3)基于车-车、车-路

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-11-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0103700).

责任编辑: 陈虹.

†通讯作者. E-mail: zhubo@hfut.edu.cn.

通信的多车行驶优化. 文献[3-5]通过使用道路标志、信号以及交通流的信息对城市工况下的车辆行驶轨迹进行了优化, 结果显示, 这些道路交通信息对车辆最优行驶轨迹有很大的影响.

电动汽车的一个显著优点就是可以通过再生制动节约能耗, 从而提升续航里程. 据相关研究, 在城市工况下频繁的启停和制动所消耗的能量已达到了总消耗能量的一半以上<sup>[6]</sup>. 文献[7]基于纯电动车再生制动系统特性, 将跟随性、安全性、舒适性和经济性作为优化指标, 设计了ACC模式下的制动力分配策略; 文献[8]利用粒子群算法对模糊控制器的模糊规则进行优化, 设计了控制再生制动力分配的模糊控制器, 结果显示, 合理有效的制动力分配策略可以有效提升电动汽车的经济性.

电动汽车的舒适性也是一个相当重要的性能指标, 目前对于舒适性的研究大多集中在控制策略的优化上. 模型预测控制(MPC)由于其可以协调控制多目标的特性受到了广泛关注, 但是MPC算法在建模时往往过于复杂, 并且运算时往往会出现非可行性解, 所以一些研究人员也提出了改进方法<sup>[9-13]</sup>.

本文基于某款纯电动汽车, 以提升整车经济性和舒适性为目标, 引入外部环境信息进行V2I车辆的控制研究. 首先, 提取出NEDC工况中的交通信息, 在此基础上提出一种新的适用于V2I车辆的测试工况; 其次, 针对电动汽车的制动回收特性, 结合车辆自身约束, 设计基于电机-电池-制动特性多源信息融合框架下的最优制动力分配策略; 然后, 在Simulink中设计基于软约束和控制增量的MPC最优控制策略, 在AMESim中建立高精度车辆动力学模型; 最后, 在联合仿真环境下进行仿真验证.

### 1 基于道路交通信息的工况研究

在整车开发和测试中, 一般采用固定的车速循环进行仿真分析和测试, 常用的标准工况是NEDC, 它是根据欧洲的城市和市郊交通信息设计的工况. 标准工况作为客观标准进行能耗和排放测试, 可以统一对比尺度, 但是由于与整车实际的行驶工况有差别, 并不能反映实际的整车运行状态和能耗水平. 一旦车速确定, 驾驶员的驾驶习惯以及驱动系统的工作点也就确定, 因此整车运行的驱动控制优化空间很小, 而且与实际不符. 实际在驾驶过程中, 驾驶员并不知道实际的运行预期车速, 知道的只是前方的道路信息和红绿灯信息. 驾驶员根据交通灯信息、周围车辆信息、行人及障碍物信息等, 结合自身的驾驶习惯以及

乘坐感受, 通过改变驾驶操作, 达到主观评价上的整车最优性能. 由于目前可以用于测试V2I的工况比较少, 本文根据NEDC工况提取出交通信息, 提出一种新的V2I测试工况.

将NEDC工况中每个停车点的信息量化为交通灯信息, 即在NEDC工况中存在着13个交通灯. NEDC工况中的停车时间可以理解为车辆等红灯的时间, 将车辆启动的时间点认为是交通灯由红灯变绿的时间点, 在每段路程中均存在启动-加速-匀速-减速-停车的过程, 这段过程的行驶距离可认为是相邻两个交通灯之间的道路长度(此处假设交通灯路口无距离). NEDC是由4个联合国欧洲经济委员会汽车法规(ECE)工况和1个市郊循环(EUDC)工况组成的, 对ECE和EUDC工况作数据分析, 可以得出其中每个阶段(加速/减速/匀速)对应的路段长度, 如图1和表1所示.

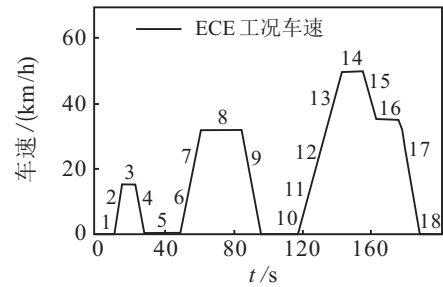


图1 ECE量化

表1 ECE工况分析

序号	状态	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	速度/(km/h)	持续时间/s	NEDC时间/s
1	停车	0	0	11	11
2	加速	1.04	0~15	4	15
3	匀速	0	15	8	23
4	减速	-0.83	15~0	5	28
5	停车	0	0	21	49
6	加速	0.69	0~15	6	55
7	加速	0.79	15~30	6	61
8	匀速	0	32	24	85
9	减速	-0.81	32~0	11	96
10	停车	0	0	21	117
11	加速	0.69	0~15	6	123
12	加速	0.51	15~35	1	134
13	加速	0.46	35~50	9	143
14	匀速	0	50	12	155
15	减速	-0.52	50~35	8	163
16	匀速	0	35	15	178
17	减速	-0.97	35~0	10	188
18	停车	0	0	7	195

由图1和表1可以计算出ECE每个路段对应的距离, 同理, 对EUDC工况作数据分析也可以得出EUDC工况每个路段对应的距离, 如图2和表2所示.

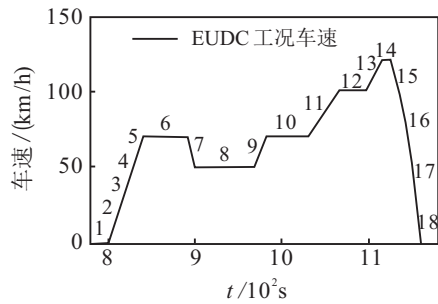


图2 EUDC量化

表2 EUDC工况分析

序号	状态	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	速度/(km/h)	持续时间/s	NEDC时间/s
1	停车	0	0	20	20
2	加速	0.69	0~15	6	26
3	加速	0.51	15~35	11	37
4	加速	0.42	35~50	10	47
5	加速	0.4	50~70	14	61
6	匀速	0	70	50	111
7	减速	-0.69	70~50	8	119
8	匀速	0	50	69	188
9	加速	0.43	50~70	13	201
10	匀速	0	70	50	251
11	加速	0.24	70~100	35	286
12	匀速	0	100	30	316
13	加速	0.28	100~120	20	336
14	匀速	0	120	10	346
15	减速	-0.69	120~80	16	362
16	减速	-1.04	80~50	8	370
17	减速	-1.39	50~0	10	380
18	停车	0	0	20	400

由以上分析可得 NEDC 工况的交通信息,将 NEDC 工况量化成 13 条路段,每个路段的长度和绿灯时刻如图 3 和表 3 所示。

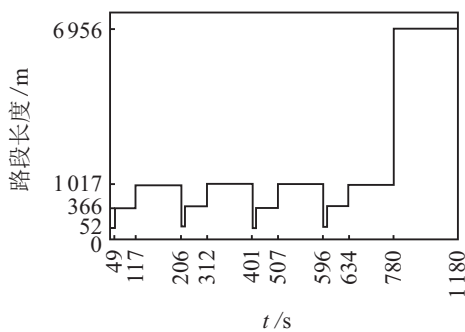


图3 智慧-新欧洲排放循环工况(I-NEDC)交通信息

表3 基于NEDC的交通信息

序号	长度	绿灯时刻/s	序号	长度	绿灯时刻/s
L1	52	49	L8	314	507
L2	314	117	L9	650	596
L3	650	206	L10	52	634
L4	52	244	L11	314	702
L5	314	312	L12	650	780
L6	650	401	L13	6956	1180
L7	52	439			

文献[14]分析了城市工况下的不同行驶状态所占能耗比:启动/加速过程占比最大,达到38%;巡航过程占比35%;怠速过程占比为19%;剩下减速过程占比8%。因此,采用经济性的行驶策略对提升经济性具有积极意义。据统计,NEDC 工况中加速时间占比21.54%,停车和减速时间分别占比30.77%和17.44%,可知其经济性还有很大的提升空间。因此,I-NEDC 工况的提出使得V2I 车辆预先得知交通信息,为车辆控制的优化和经济性的提升建立了良好基础。

## 2 基于整车性能的控制策略设计

本文的控制对象为电动汽车,决策对象有两个:一是经由制动力分配策略决策出的电机和液压制动系各自承担的制动力;二是由MPC 控制器决策出的期望行驶速度。

### 2.1 制动力分配策略设计

#### 2.1.1 电池充电特性约束

理论上,当车辆制动时的制动力完全由电机制动力提供时,能量回收率会达到最大,但是电池的充电能力是有限的,具体表现为SOC 限制和电池充电功率限制等。剩余电量(SOC)限制指的是当SOC 大于某阈值时,为了防止电池过充不再进行制动回收,本文设置SOC 充电阈值为0.95。

制动能量回收电池端回收功率不得超过动力电池的最大充电功率,否则会对电池造成损害。因此可得在电池充电能力约束下的最大制动力如下:

$$F_{bM1} \leq \frac{P_{Bmax}}{\eta_B \eta_M \eta_T v i} \quad (1)$$

其中: $F_{bM1}$  为充电能力约束下的最大再生制动力, $P_{Bmax}$  为电池最大充电功率, $\eta_B$  为电池充电效率, $\eta_M$  为电机的发电效率, $\eta_T$  为传动系的传动效率, $v$  为车速, $i$  为总传动比。

电池内阻和温度也属于制约制动回收的重要因素,因为电池内阻是电池SOC 和温度的函数,当温度降低时,电池内阻明显增大,当SOC 减小时,电池内阻也明显增大。当温度保持一定时,电池开路电压随SOC 的增加而增加,因此可充电功率和可充电电流明显减小<sup>[15]</sup>。在制动系统工作时,电池温度也会发生变化,因此必须考虑电池温度不得高于电池允许工作温度。

当电池管理系统(BMS) 系统检测到电池温度已达到电池允许工作温度的90% 以上时,发送电池高温警告信息给汽车控制单元(VCU),VCU 接收到报警信息后改变制动力分配策略,取消电机承担的需求制动力,即液压制动系承担全部的需求制动力,待电池温度降低到安全范围再恢复原有的制动力分配策略。

### 2.1.2 电机发电特性约束

理想状态下,电机可回收转矩越大,其产生的再生制动力越大,电机的制动能力越强,即能够制动回收的能量越多.然而,电机的再生制动转矩会受到电机发电特性的约束,当制动强度比较大时,电机制动回收提供的制动力无法满足制动需求,而当电机转速降到500 r/min时,电机上的反电动势过低,使得再生制动力降为0 N,此时再生制动失效<sup>[16]</sup>.

电机发电时的工作特性与电机工作在电动状态下的特性基本相同,电机发电特性约束如下:

$$T_{bM2} = \begin{cases} 0, & n < n_{\min}; \\ \frac{9550P_{\max}}{n_b}, & n < n_b; \\ \frac{9550P_{\max}}{n}, & n > n_b. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $P_{\max}$  为电机峰值功率;  $n_b$  为电机基速;  $n_{\min}$  为电机发电转速下限.

### 2.1.3 车辆制动特性约束

设计在晴天干沥青路面(高路面附着系数)上的制动力分配策略如图4所示(如图中虚线所示).

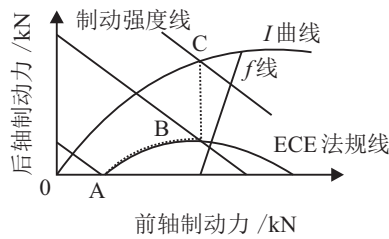


图4 高附着系数路面制动力分配

根据需求制动强度  $z$  的不同,在设计制动力分配策略时按以下几种模式进行:

$$\begin{cases} F_f = Gz, & z \leq z_A; \\ F_f = 0.95 \frac{G(z + 0.07)(b + zh_g)}{0.85L}, & z_A < z \leq z_B; \\ F_f = \frac{T_{bM\max} i \eta T}{R}, & z_B < z \leq z_C; \\ F_f = Gz \frac{(b + zh_g)}{L}, & z > z_C; \\ F_r = Gz - F_f; \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $F_f$  为前轴制动力,  $F_r$  为后轴制动力,  $h_g$  为车辆质心高度,  $z$  为制动强度,  $L$  为前后轮轴距,  $b$  为质心距后轴的距离,  $T_{bM\max}$  为电机的峰值制动转矩,  $i$  为总传动比.

当  $z \leq z_A$  时,为低制动强度模式,此时制动力完全分配至前轴,A点为ECE法规线与横轴的交点对应的制动强度;当  $z_A < z < z_B$  时,为中强度制动模式,制动力分配按照AB线分配,为了保证车辆稳定性,AB为ECE法规线的拟合线,拟合系数为0.95;当  $z_B < z < z_C$  时,为高强度制动模式,此时电机制动力

已达到最大,此时保持前轴制动力不变,仅由后轴增加液压制动力;当  $z_C < z$  时,为紧急制动模式,此时为保证安全性,放弃再生制动,前后轴制动力按照I曲线分配.式(3)中各边界点计算如下:

$$\begin{cases} z_A = 0.1; \\ z_B = \frac{b + 0.07h_g}{2h_g} + \frac{\sqrt{(b + 0.07h_g)^2 \times 4 \left( 0.07b - 0.89 \frac{LT_{bM\max} i \eta T h_g}{GR} \right)}}{2h_g}; \\ z_C = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \frac{LT_{bM\max} i \eta T h_g}{GR}}}{2h_g}. \end{cases} \quad (4)$$

### 2.1.4 多源信息融合制动力分配策略

电机转速与车速之间的关系如下:

$$v = \frac{n2\pi R \times 3.6}{60i} = 0.377 \frac{nR}{i}. \quad (5)$$

其中:  $v$  为当前车速,  $n$  为当前电机转速,  $i$  为总传动比,  $R$  为车轮半径.结合式(5)构建电池-电机-制动特性信息融合框架,可得

$$T_{bM} = \min \begin{cases} 0, & v \leq 0.377 \frac{n_{\min} R}{i}; \\ \left( T_f(z), \frac{1000P_{B\max} R}{v\eta i}, 9550 \frac{P_{\max}}{n_b} \right), & 0.377 \frac{n_{\min} R}{i} < v \leq 0.377 \frac{n_b R}{i}; \\ \left( T_f(z), \frac{1000P_{B\max} R}{v\eta i}, 3600 \frac{P_{\max} R}{vi} \right), & v > 0.377 \frac{n_b R}{i}. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $i$  为总传动比;  $\eta$  为总效率,等于电池充电效率、电机发电效率与传动效率的乘积;  $v$  为车速;  $P_{\max}$  为电机最大发电功率;  $P_{B\max}$  为电池最大充电功率;  $n_b$  为电机基速;  $n_{\min}$  为电机发电转速下限;  $T_f(z)$  为制动特性约束下的电机需求制动力.

由式(6)可绘制多源信息融合框架下的电机可用再生制动转矩与车速、制动强度的关系,如图5所示.

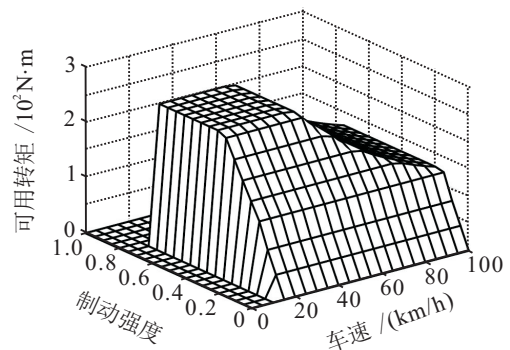


图5 电机可用最大再生制动转矩

## 2.2 VCU控制策略设计

目前VCU一般采用分层控制结构,即上层控制器决策出期望加速度,下层控制器决策出控制量控制受控车辆行驶.本文在MPC控制框架下设计了上层控制器,同时下层控制器采用PID控制实现.VCU控制系统结构如图6所示.

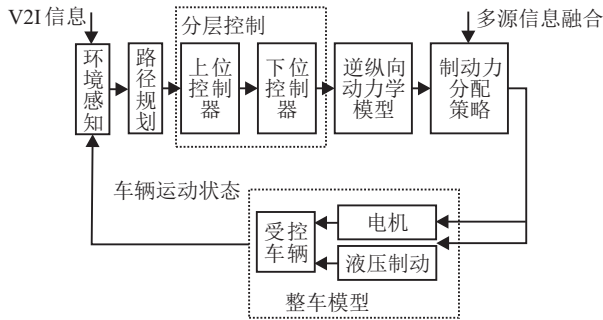


图6 VCU控制系统结构

如图6所示,环境感知包括车联网对于当前道路交通信息的获取处理和自车传感系统对于车辆运动状态信息的获取处理,结合多源信息进行V2I车辆的路径规划.将参考轨迹和车辆当前运动状态信息输入到MPC上位控制器,上位控制器根据所接收到的信息决策出车辆的期望车速,下位控制器接收上位控制器传来的期望车速和反馈而来的实际车速进行PID控制决策出期望加速度.将期望加速度输出到车辆逆纵向动力学模型可得期望控制力.将期望驱动控制力输出到电机模型进行驱动控制;将期望制动力结合电机状态(温度等)和电池状态(SOC等)并输入到信息融合框架下的制动力分配策略,经决策得到期望电机制动转矩和期望液压制动力,分别将其作为电机和液压制动系的目标量对车辆进行制动控制.

受控车辆在行驶过程中会时刻接收到当前路段的交通灯信息和路段长度信息,控制目标是在交通灯变为绿灯的时刻车辆恰好通过当前路口,因此当前路段的全局预期轨迹是当前路段上车辆距离交通灯的剩余距离.MPC控制策略的预测控制输出会时刻向VCU反馈当前车辆轨迹和预期轨迹的误差,并且通过目标函数和约束条件时刻约束系统控制增量的大小和误差大小,在实时性目标和舒适性目标之间寻求平衡点,找到最优控制增量.将控制增量作用于系统后,再重复进行以上过程.VCU在每个时刻接收到的车辆当前位置和当前车速都是不同的,因此尽管当前路段的全局预期轨迹是固定的(在交通灯变为绿灯的时刻车辆恰好通过当前路口),但在预测时域内的预测轨迹是时刻不同的,VCU控制策略不断进行信息的更新和优化,以保证每个预测时域内的优化目标函数最小为目标,进行滚动优化控制车辆行驶.

本文研究的重点在于V2I车辆在获取道路信息后跟踪参考轨迹时的经济性和舒适性,因此采用计算量较小的二自由度车辆运动学模型作为预测模型的基础.建立的运动学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ \frac{\tan \delta}{l} \end{bmatrix} v. \quad (7)$$

其中: $(x, y)$ 为车辆后轴中心的坐标, $\psi$ 为车辆的航向角, $\delta$ 为前轮偏角, $v$ 为车辆后轴速度, $l$ 为轴距.二自由度模型可以被看作输入为 $u(v, \delta)$ 和状态量为 $X(x, y, \psi)$ 的控制系统.由于V2I车辆可以通过车联网获取当前路段的交通灯位置和时间信息,以保证车辆无需等红灯直接通过路口为目标,可以设计出V2I车辆的参考轨迹,其一般形式如下:

$$\dot{X}_r = f(X_r, u_r). \quad (8)$$

将式(7)泰勒级数展开并忽略高阶项,再与式(8)相减,可以得到V2I车辆线性误差模型如下:

$$\dot{\tilde{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_r \sin \psi_r \\ 0 & 0 & v_r \cos \psi_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \psi - \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi_r & 0 \\ \sin \psi_r & 0 \\ \frac{\tan \delta_r}{l} & \frac{v_r}{l \cos^2 \delta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v - v_r \\ \delta - \delta_r \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(9)得到的目标函数和控制器约束存在一些缺陷<sup>[9]</sup>:首先,目标函数无法对控制增量进行限制,该模型的控制增量为车辆加速度,而车辆加速度对经济性和舒适性有着直接的影响;其次,由于控制器约束为硬约束,在求解过程中可能会出现没有可行性解的情况.首先对式(9)作离散化处理,引入控制增量和松弛因子对模型进行改进.

$$\bar{X}(k+1) = A(k)\bar{X}(k) + B(k)u(k) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r \sin \psi_r T \\ 0 & 1 & v_r \cos \psi_r T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{X}(k) + \begin{bmatrix} T \cos \psi_r & 0 \\ T \sin \psi_r & 0 \\ \frac{T \tan \delta_r}{l} & \frac{T v_r}{l \cos^2 \delta_r} \end{bmatrix} u(k),$$

$$Y(k) = C(k)\bar{X}(k) = [1 \ 0 \ 0] \bar{X}(k). \quad (10)$$

引入增量模型后,预测模型如下:

$$\zeta(k+1) = \bar{A}(k)\zeta(k) + \bar{B}(k)\Delta u(k),$$

$$\eta(k) = \bar{C}(k)\zeta(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]\zeta(k). \quad (11)$$

其中各矩阵定义如下:

$$\zeta(k) = [\bar{X}(k) \quad u(k-1)]^T,$$

$$\bar{A}(k) = \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \bar{B}(k) = \begin{bmatrix} B(k) \\ I \end{bmatrix}. \quad (12)$$

构建MPC控制器软约束优化目标函数<sup>[17]</sup>如下:

$$\min \sum_{i=1}^{N_p} [e(k+i|k)]^T Q [e(k+i|k)] +$$

$$\sum_{i=0}^{N_c-1} \Delta u(k+i)^T R \Delta u(k+i) + \rho \xi^2;$$

$$\text{s.t. } e(k+i|k) = \eta(k+i|k) - \eta_{\text{ref}}(k+i),$$

$$\Delta u_{\min} - \xi \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} + \xi,$$

$$u_{\min} - \xi \leq u(k-1) + \Delta u(k) \leq u_{\max} + \xi,$$

$$\eta_{\min} - \xi \leq \eta(k+i|k) \leq \eta_{\max} + \xi. \quad (13)$$

其中:  $N_p$ 为预测时域;  $N_c$ 为控制时域;  $\eta_{\text{ref}}(k+i)$ 为根据当前路段的交通信息设计的参考轨迹;  $Q$ 为跟踪误差的权重矩阵,  $R$ 为控制增量的权重矩阵, 仿真时均设置为单位矩阵;  $\xi$ 为引入的松弛因子;  $\rho$ 为松弛因子惩罚系数. 由于松弛因子的存在, 当系统不满足硬约束时, MPC控制器会自动增大松弛因子, 保证控制器最优解存在. 优化目标函数中: 第1项体现了对轨迹跟踪精度的要求; 第2项体现了对控制增量的要求; 最后一项是松弛因子的惩罚函数, 惩罚系数约束松弛程度, 避免松弛因子无限增大, 也使控制器在可行性解与松弛程度中寻找平衡点. 惩罚系数越大, 松弛因子扩展约束的能力越弱; 反之, 能力越强.

式(13)中约束条件均为软约束, 这样可以避免系统没有可行性解, 同时由于在目标函数中存在松弛因子惩罚系数, 可以避免松弛因子无限扩大. 第1个和第2个约束条件分别是对控制增量和实际控制量的约束, 避免车辆加速度/减速度过大影响车辆舒适性; 第3个约束条件是对预测输出的约束, 系统预测输出主要物理意义为车辆实际轨迹与参考轨迹的误差, 反映了系统对于实时跟随性的要求, 对其进行约束是为了防止系统过于关注跟随性而忽略了舒适性. 比如在误差较大时, MPC会产生较大的控制增量以迅速减小误差, 这样虽然会提高跟随性, 但是舒适性却受到很大影响, 因此对其进行约束可以提高系统性能. MPC优化问题可转化为带约束的二次规划问题, 在Matlab中可用积极集法或内点法求解. 在每个预测时域内求解得到一系列的控制增量序列, 将该序列的第1个元素作为实际的控制增量与上一时刻的控制量相加作为当前时刻的控制量, 系统执行这一控制量直到下一预测时域. 在新的预测时域, 系统又得

到新的状态信息, 通过预测优化求解得到新的控制序列, 如此循环往复即为MPC控制器的工作过程.

### 3 AMESim整车建模

#### 3.1 车辆动力学模型

汽车行驶阻力主要有滚动阻力、空气阻力、坡道阻力和加速阻力, 电动汽车动力学方程为

$$\frac{T_m i \eta_T}{R} = G f \cos \alpha + G \sin \alpha + \frac{C_D A}{21.15} V^2 + \delta m a. \quad (14)$$

其中:  $T_m$ 为电机驱动扭矩, 为正值时表示驱动, 为负值时表示制动;  $\alpha$ 为路面坡度角;  $m$ 为电动汽车质量;  $G = mg$ 为电动汽车重量;  $f$ 为滚动阻力系数;  $i$ 为总传动比;  $\eta_T$ 为传动系机械效率;  $C_D$ 为空气阻力系数;  $A$ 为迎风面积;  $V$ 为车速;  $\delta$ 为汽车旋转质量换算系数;  $a$ 为车辆加速度;  $R$ 为车轮半径.

#### 3.2 传动系建模

在AMESim中建立前置前驱的电动汽车模型, 电机控制器输入/输出端功率为

$$\begin{cases} P_{mI} = P_B = U_B I_B, \\ P_{mO} = \eta_m P_{mI}. \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $P_{mI}$ 为电机控制器输入功率;  $P_B$ 为电池输出功率;  $U_B$ 为电池组输出电压;  $I_B$ 为电池组输出端电流;  $P_{mO}$ 为电机输出功率;  $\eta_m$ 为电机系统效率(含电机和控制器), 一般采用效率图(MAP)并经过台架试验测试得到.

单级减速器的输入输出功率为

$$\begin{cases} P_{gI} = P_{mO}, \\ P_{gO} = \eta_g P_{gI}. \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $P_{gI}$ 为单级减速器输入功率,  $P_{gO}$ 为单级减速器输出功率,  $\eta_g$ 为单级减速器效率. 单级减速器由于只有两组齿轮, 一般认为其效率较高, 可以达到96%~98%, 本文在建模时将其设置为0.96.

#### 3.3 电池系统建模

在AMESim中建立电池系统模型. 动力电池系统由并联与串联电池模组构成, 相关方程为

$$\begin{cases} U_{\text{cell}} = U_{0\text{cell}} - R_{\text{cell}} I_{\text{cell}}, \\ I_{\text{cell}} = \frac{I_B}{P_{\text{bank}}}, \\ U_B = U_{\text{cell}} N_{\text{cell}} S_{\text{bank}}. \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $U_{\text{cell}}$ 为单体电池输出电压,  $U_{0\text{cell}}$ 为单体电池的开路电压,  $R_{\text{cell}}$ 为单体电池内阻,  $I_{\text{cell}}$ 为单体电池电流;  $I_B$ 为动力电池组输出端电流,  $P_{\text{bank}}$ 为并联电池模组数量,  $U_B$ 为电池组的输出端电压,  $N_{\text{cell}}$ 为每个串

联模组中串联的单体电池数量,  $S_{bank}$  为串联电池模组数量.

### 3.4 逆纵向动力学模型

为了由期望加速度得到期望驱动/制动力, 需要进行逆纵向动力学建模. 当期望加速度为正时, 由式(14)反推可得电机期望转矩; 当加速度为负时, 由下式可得期望制动力

$$\begin{cases} ma = F_b + Gf \cos \alpha + G \sin \alpha + \frac{C_D A}{21.15} V^2, \\ F_b = \frac{T_{bM} i \eta_T}{R} + F_m. \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $\alpha$  为路面坡度角;  $m$  为电动汽车质量;  $G = mg$  为电动汽车重量;  $f$  为滚动阻力系数;  $i$  为总传动比;  $\eta_T$  为传动系机械效率;  $C_D$  为空气阻力系数;  $A$  为迎风面积;  $V$  为车速;  $a$  为车辆加速度;  $R$  为车轮半径;  $T_{bM}$  为在进行制动力分配后电机所承担的制动力矩;  $F_m$  为进行制动力分配后液压制动系所承担的制动力.

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 车辆动力学模型验证

为了验证所建立的纯电动车整车模型的有效性, 在NEDC工况中进行模型精度验证. 整车仿真实验参数如表4所示.

表4 整车参数

参数名称	取值	参数名称	取值
整车质量/kg	1560	减速器效率	0.96
风阻系数	0.32	减速器速比	8
迎风面积/m <sup>2</sup>	2.2	电机峰值扭矩/N·m	255
空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.226	电机峰值功率/kW	80
旋转质量换算系数	1.01	电池组电压/V	340
重力加速度/(m/s <sup>2</sup> )	9.8	电池容量/kWh	25

将在NEDC工况下整车模型输出的车速值设为  $V_1$ , NEDC工况的车速参考值设为  $V_2$ , 两者对比如图7所示.

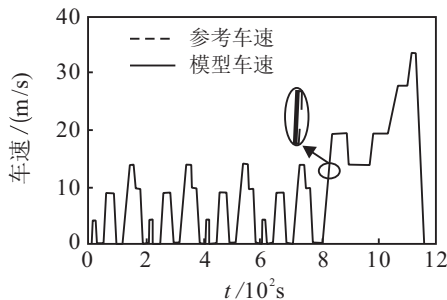


图7 模型验证车速对比

由图7可见, 建立的车辆动力学模型输出车速与NEDC工况标准参考值略有误差, 但误差较小. 为了

进一步衡量模型精度, 利用下式计算相对误差<sup>[18]</sup>

$$\text{Error} = \frac{\int_0^T |V_1 - V_2| dt}{\int_0^T |V_2| dt}. \quad (19)$$

其中:  $T = 1180$  s 为NEDC工况单循环时间, 求得  $\text{Error} = 0.933\%$ . 由此可见, 在AMESim中建立的整车动力学模型精度较高, 可以用来作进一步的优化分析.

### 4.2 优化策略效果验证

I-NEDC与NEDC工况下车速对比如图8所示, 实线表示优化后车辆, 虚线表示未优化车辆.

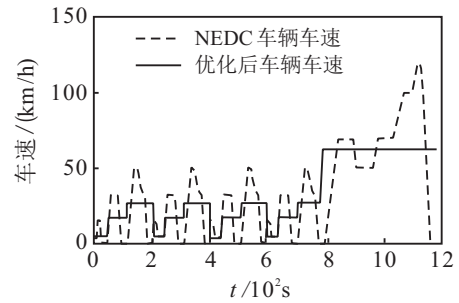


图8 两种工况下车速对比

NEDC工况车辆和I-NEDC工况中优化后车辆的经济性对比如表5所示.

表5 两种工况下整车经济性对比

指标	NEDC车辆	优化车辆	对比提升/%
总能耗(单循环)	1.75 kWh	1.33 kWh	24
SOC(初始95%)	88.02%	89.67%	1.65
百公里能耗	15.79 kWh	12.03 kWh	23.68
续航里程(SOC:100%~10%)	142.45 km	187.09 km	31.34

由图8和表5可以看出, 结合了道路交通信息和多源信息融合制动力分配策略的优化车辆经济性明显提升, 并且避免了原有工况中的频繁加减速过程. 单工况能耗较优化前降低了24%, 百公里能耗较优化前降低了23.68%, 续航里程提高了31.34%. NEDC工况车辆与I-NEDC工况中优化车辆的舒适性对比如图9和图10所示. 对整车舒适性指标量化统计如表6所示.

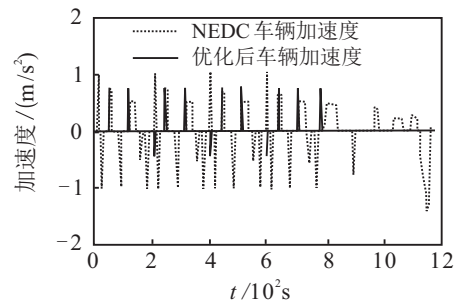


图9 两种工况下加速度对比

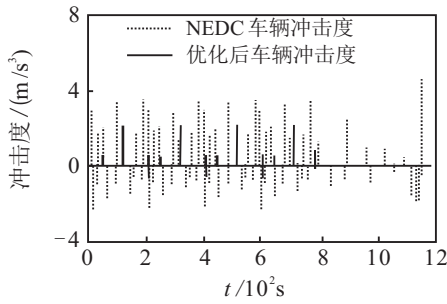


图10 两种工况下冲击度对比

表6 两种工况下整车舒适性对比

指标(绝对值)	NEDC车辆	优化车辆	对比提升/%
加速度波动次数	35	13	62.82
加速度峰值	1.41 m/s <sup>2</sup>	0.73 m/s <sup>2</sup>	47.84
冲击度峰值	4.64 m/s <sup>3</sup>	2.11 m/s <sup>3</sup>	54.33

由表6可以看出,在根据交通信息进行优化决策后的车辆整体加速度和冲击度数值显著减小,且与未优化前相比波动频率降低,整车舒适性得到了很大的改善。

为了更好地对比验证本文提出的控制策略的改进效果,将NEDC的量化交通信息(表1和表2)作为实时道路信息用于路径规划,以保证与NEDC标准工况具有相同的加/减速过程.设计在NEDC工况下采用优化策略后的车辆与未优化的NEDC车辆进行对比,仿真结果如图11所示。

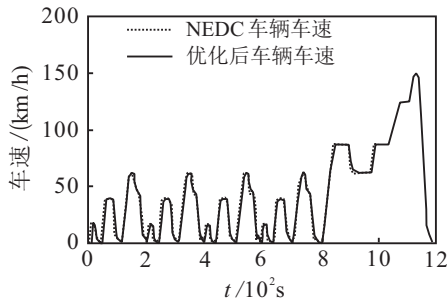


图11 优化前后车速对比

优化前后的经济性对比如表7所示。

表7 优化前后整车经济性对比

指标	NEDC车辆	优化车辆	对比提升/%
总能耗(单循环)	1.75 kWh	1.51 kWh	13.71
SOC(初始95%)	88.02%	89.01%	0.99
百公里能耗	15.79 kWh	13.63 kWh	13.67
续航里程(SOC:100%~10%)	142.45 km	165.09 km	15.89

由图11和表7可以看出,结合NEDC标准交通信息的优化后车辆行驶速度曲线与标准NEDC工况曲线基本吻合,表明在实时路径规划下的优化策略对于不同的行驶过程(加速/减速等)具有较好的鲁棒性,而且,优化后的车辆能耗显著降低,提升了续航里程,

因此整车经济性也得到了改善.优化前后整车舒适性对比如图12和图13所示:

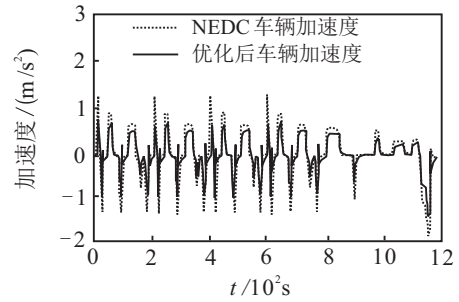


图12 优化前后加速度对比

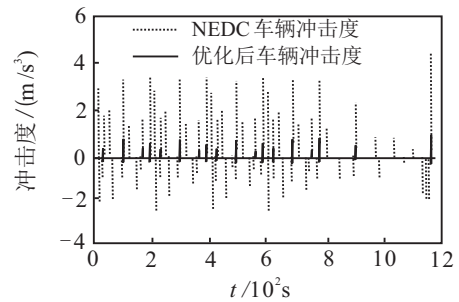


图13 优化前后冲击度对比

对整车舒适性指标作量化统计如表8所示。

表8 优化前后整车舒适性对比

指标(绝对值)	NEDC车辆/(m/s <sup>2</sup> )	优化车辆/(m/s <sup>2</sup> )	对比提升/%
加速度峰值	1.41	1.08	23.41
加速度方差	0.39	0.26	33.33
冲击度峰值	4.64	0.65	86.05
冲击度方差	0.36	0.07	80.56

由表8可以看出,在获得实时交通信息并进行优化决策后的车辆整体加速度和冲击度峰值显著减小,且与未优化前相比方差明显降低,说明行驶过程更加平稳,整车舒适性得到了提升。

## 5 结论

本文通过对NEDC工况的量化分析,提出了一种新的用于V2I车辆的测试工况;在多源信息融合框架下提出了一种制动力分配策略,设计了电机-电池-制动特性的前后轴制动力分配逻辑关系和计算方法;在Simulink中基于MPC软约束优化方法设计了汽车控制单元(VCU)分层控制器;在AMESim中建立了高精度车辆动力学模型并进行了验证;最后在标准NEDC和I-NEDC工况中分别进行了仿真对比实验,结果表明,本文设计的多源信息融合框架下的制动力分配策略和MPC最优控制策略可以有效提高整车经济性和舒适性,且对于不同的行驶状况具有鲁棒性和自适应性。

本文提出的I-NEDC工况是对V2I车辆测试工况

研究的试探性研究,虽然目前略显单一,但后面会对其进行进一步深入研究,加入更多的因素,比如弯道、障碍物等.

### 参考文献(References)

- [1] 于凤霞. i-Japan 战略2015[J]. 中国信息化, 2014(13): 13-23.  
(Yu F X. i-Japan strategy 2015[J]. Ichina, 2014(13): 13-23.)
- [2] 郭露露, 高炳钊, 陈虹. 汽车经济性行驶优化[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(5): 560-570.  
(Guo L L, Gao B Z, Chen H. Optimal ecodriving control of vehicles[J]. Science China Press: Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(5): 560-570.)
- [3] Eckert J J, Correa F C, Santicioli F M, et al. Vehicle gear shifting strategy optimization with respect to performance and fuel consumption[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2016, 44(1): 123-136.
- [4] Casavola A, Prodi G, Rocca G, et al. Efficient gear shifting strategies for green driving policies[C]. American Control Conference (ACC). Maryland: IEEE, 2010: 4331-4336.
- [5] Jin Q, Wu G, Boriboonsomsin K, et al. Power-based optimal longitudinal control for a connected eco-driving system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10): 2900-2910.
- [6] Ko J, Ko S, Son H, et al. Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(2): 431-440.
- [7] 初亮, 李天骄, 孙成伟. 面向再生制动优化的电动车自适应巡航控制策略[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(8): 1596-1602.  
(Chu L, Li T J, Sun C W. Research on adaptive cruise control strategy for electric vehicle based on optimization of regenerative braking[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(8): 1596-1602.)
- [8] 周云鹏, 赵韩, 江昊. 基于粒子群优化的电动汽车再生制动模糊控制[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(7): 769-772.  
(Zhou Y P, Zhao H, Jiang H. Regenerative braking system for EV with fuzzy control based on particle swarm optimization[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014, 37(7): 769-772.)
- [9] 李升波, 王建强, 李克强, 等. MPC实用化问题处理及在车辆ACC中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 645-648.  
(Li S B, Wang J Q, Li K Q, et al. Processing of MPC Practical problems and its application to vehicular adaptive cruise control systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(5): 645-648.)
- [10] Li S E, Peng H. Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(3): 419-429.
- [11] Li S E, Li K, Rajamani R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2011, 19(3): 556-566.
- [12] Li S, Li K, Wang J, et al. MPC based vehicular following control considering both fuel economy and tracking capability[C]. Vehicle Power & Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008: 1-6.
- [13] Li S E, Peng H, Li K, et al. Study on robustness and feasibility of MPC based vehicular adaptive cruise control system[C]. Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an: IEEE, 2009: 1297-1301.
- [14] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban Driving conditions[J]. Air Repair, 2000, 50(4): 543-554.
- [15] 刘志强, 过学迅. 纯电动汽车电液复合再生制动控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(9): 2687-2691.  
(Liu Z Q, Guo X X. Electronic-hydraulic-compound regenerative braking control for electric vehicles[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(9): 2687-2691.)
- [16] 何耀, 张陈斌, 刘兴涛, 等. 基于信息融合的LiFePO<sub>4</sub>动力电池组SOC估计[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 189-192.  
(He Y, Zhang C B, Liu X T, et al. SOC estimation for LiFePO<sub>4</sub> high-power batteries based on information fusion[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 189-192.)
- [17] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 47-88.  
(Gong J W, Jiang Y, Xu W. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 47-88.)
- [18] 何耀, 邱振华, 刘新天, 等. 信息融合架构下的新型再生制动控制策略[J]. 控制与决策, 2018, 33(7): 1231-1238.  
(He Y, Qiu Z H, Liu X T, et al. A new type of regenerative braking control strategy based on information fusion[J]. Control and Decision. 2018, 33(7): 1231-1238.)

### 作者简介

朱波(1980—), 男, 副研究员, 博士, 从事新能源汽车整车性能及智能控制等研究, E-mail: zhubo@hfut.edu.cn;

吴迪(1994—), 男, 硕士生, 从事新能源汽车智能辅助驾驶的研究, E-mail: wudi94322@163.com;

张农(1959—), 男, 教授, 博士, 从事车辆动力学及动力传动等研究, E-mail: nong\_zhang@163.com;

郑敏毅(1983—), 男, 讲师, 博士, 从事车辆动力学及悬架控制的研究, E-mail: zheng\_minyi@163.com.

(责任编辑: 闫 妍)