

文章编号: 2095-2163(2022)07-0014-06

中图分类号: U464.171

文献标志码: A

# 结合道路信息预测的启停系统控制策略研究

王维强, 周一鹤, 于金泉, 蔡凡昌, 严运兵

(武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 武汉 430065)

**摘要:** 混合动力汽车不同能量源的使用要随着路况拥堵情况而调整, 为提高燃油经济性, 需要对汽车发动机怠速启停系统进行能量管理。利用前车车速、当前道路车辆数、交通信号灯倒计时等交通信息对是否进入启停模式进行智能化判断, 确定了一种基于道路信息预测的启停控制优化方案。通过在 MATLAB/Simulink 中建立前车状态模拟模块、控制策略模块、速度跟随模块、油耗计算模块, 利用 CarSim 软件中的整车动力学模型, 搭建 CarSim 与 Simulink 的联合仿真软件平台, 测试在不同拥堵路况下, 车辆的启停次数与燃油经济性。仿真结果表明, 优化后的启停系统控制策略启停次数明显减少, 燃油经济性提升, 整体策略有效。

**关键词:** 发动机怠速启停; 联合仿真; 动力学模型; 燃油经济性

## Research on the control strategy of start-stop system combined with road information prediction

WANG Weiqiang, ZHOU Yihe, YU Jinqian, CAI Fanchang, YAN Yunbing

(School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**[Abstract]** The use of different energy sources in hybrid energy vehicles should be adjusted with road congestion, and in order to improve fuel economy, energy management of the car idle start-stop system is required. Using traffic information such as the speed of the vehicle in front, the number of vehicles on the current road, and the countdown of traffic lights, the intelligent judgment is made on whether to enter the start-stop mode, and an optimization scheme of the start-stop control optimization scheme based on road information prediction is determined. By establishing a front vehicle status simulation module, control strategy module, speed following module, fuel consumption calculation module in MATLAB/Simulink in combination with the vehicle dynamic model in CarSim software, a joint simulation software platform between CarSim and Simulink is built to test the number of start and stop times and fuel economy of vehicles under different congested road conditions. Simulation results show that the number of start-stops of the control strategy of the optimized start-stop system is significantly reduced, the fuel economy is improved, and the overall strategy is effective.

**[Key words]** engine idle start-stop; joint simulation; dynamic model; fuel economy

## 0 引言

混合动力汽车作为一种由燃油汽车向纯电动汽车过渡的成熟的新能源汽车解决方案, 与传统燃油汽车相比, 发动机启停次数显著增加。发动机的频繁启停不但会带来发动机的油耗增加, 启动不平稳, 还会降低车内乘客乘坐的舒适性, 因此研究汽车启停系统的优化措施对于混合动力汽车的应用具有重要意义。

## 1 启停系统结构

目前国内外发动机怠速启停系统根据组成不同

分为3种方案: 博世采用的独立增强型起动机与发电机方案、以法雷奥为主的采用辅助启动电机的集成起动机/发电机方案、以马自达为主的基于缸内直喷发动机的直接启停方案<sup>[1]</sup>。3种方案中, 集成式起动机及发电机方案在欧洲部分车型中得到运用, 但目前使用最多的还是独立增强型起动机与发电机方案, 即博世采用方案如图1所示。

该方案使用增强型起动机(Enhanced Start Motor ESM)代替传统起动机, 以齿轮啮合的方式与发动机相连, 使用循环寿命更长。在蓄电池方面, 由于传统铅酸蓄电池使用寿命短, 用在启停系统中大概使用3个月就需要更换, 所以选择使用具有玻璃

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51975428); 湖北省科技创新专项重点项目(2018AAA060); 中央引导地方科技发展专项(2018ZYYD027)。

**作者简介:** 王维强(1967-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 汽车新能源与节能技术; 周一鹤(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 结合路况识别混合动力汽车能量管理。

**通讯作者:** 王维强 Email: wangwq03@163.com

**收稿日期:** 2021-12-30

纤维隔板 AMG 蓄电池。发动机控制模块 ECM 作为启停系统的核心控制单元通过接受电池、档位、刹车等各种信号判断是否进入启停功能。当刹车松开,启动命令发出后,AGM 电池提供电能,一体机作为电动机使用,拖动发动机快速运转至怠速以上。在车辆正常行驶时,一体机作为发电机使用,为 AMG 蓄电池充电。整体系统拥有响应迅速,使用寿命长,减少油耗,结构简单等优点<sup>[2]</sup>。



图1 独立增强型起动机与发电机方案

Fig. 1 Independent enhanced starter and generator scheme

## 2 启停系统对经济性影响

发动机在起动后,燃烧做功的能量使得发动机转速得以迅速上升,当发动机转速超 600 r/min 时,ECM 控制起动机脱离,然后停机,这时候由于惯性,起机会慢慢停止运转,而发动机继续依靠燃油和进气量燃烧产生动能,使得发动机转速上升到峰值后才转到怠速转速<sup>[3-4]</sup>。因此,在启动瞬间喷油量和进气量的控制十分关键。

文献[5]对电控汽油发动机进气量和喷油量的关系进行研究,提出了喷油量与进气量的关系式(1):

$$F_m = \frac{A_m}{\lambda} \quad (1)$$

其中, $F_m$  是喷油量; $A_m$  为进气量; $\lambda$  为空燃比。且进气量  $A_m$  又可以由公式(2)得出:

$$A_m = A_v \cdot A_d \quad (2)$$

其中, $A_v$  为空气容积率, $A_d$  为空气密度。

由此可以通过空气流量传感器及气压传感器来预测起动时汽油喷油量。由于实际行驶过程中存在驾驶习惯、汽油浓度等系列因素,仅通过进气量很难准确对喷油量做出预估。所以从启停停机时间与起动机起动油耗的关系出发再做研究。发动机怠速与起动机油耗的关系如式(3):

$$S_1 - S_2 = I \cdot T_{is} - S_2 \quad (3)$$

其中, $S_1$  为发动机停机节省的油耗; $S_2$  为发动机起动机时消耗的油耗; $I$  为发动机怠速时燃油消耗; $T_{is}$  为怠速停机时间。

于是可以得出只有  $S_1 - S_2 > 0$  进入启停才有意义,否则会耗油<sup>[6]</sup>。

所以并非启停越频繁,节油效果越好。相反,当启停停机时间过短,发动机再启动所需油耗会更大,并且燃烧不充分所产生的尾气,将给节能减排带来反效果。因此,如何控制进入启停模式的时机,对启停控制策略来说是十分重要的。

## 3 结合道路信息预测的启停控制策略

在实际应用中,传统控制策略难以对车辆运行条件做出有效判断,不能准确识别驾驶员下一步操作意图。何仁、刘凯等人<sup>[7]</sup>提出利用摄像头图像识别,捕捉红绿灯倒计时显示屏信息,来判断是否进入启停停机,以及是否提前启动。受此启发,且考虑到在车辆实际行驶路况中,除了红绿灯会影响车辆启停外,道路拥堵状况也会在极大程度上影响发动机启停次数,所以利用地图信息中获取到的车辆所在道路有无红绿灯,以及距离红绿灯的距离,道路上车辆的数量、车辆的行驶速度等信息对是否进入启停停机进行智能判断,提出一种结合道路信息预测的拥堵路况启停系统控制策略优化

道路拥堵在实际路况中又分为事故引起的拥堵和信号灯引起的排队拥堵。下面针对两种拥堵路况进行分析。

### 3.1 信号灯引起的排队拥堵

对于由交通信号灯引起的排队拥堵来说,主要需要根据红灯等待时长来判断是否进入怠速停机,结合已有统计信息和笔者所在武汉市黄家湖西路道路观测信息得到:黄家湖三街黄家湖路至黄家湖三街黄家湖西路段,红绿灯倒计时 30 s,且当红灯变绿灯时,第一辆车通过红绿灯的平均时间至少 2 s,第二辆车之后随着每辆车增加 2.5 s,依次类推,第十辆车过红绿灯平均时间为 24.5 s。可以判断,在此道路上倒计时 30 s 内,最多可以通过 12 辆汽车,红灯前 12 辆车,主要需要根据红灯等待时长来判断是否进入怠速停机状态,而第 12 辆车之后的车辆则主要根据前方 12 辆车的状态来判断。

针对交通信号灯引起的排队拥堵,制定以下策略:根据道路信息判断当前车辆是否为前 12 辆车之一,若是则:当红灯倒计时  $T_{red} < T_{is0}$  时,车辆怠速运转;当红灯倒计时  $T_{red} > T_{is0}$  时,车辆停机。其中, $T_{is0}$  为怠速油耗  $S_1$  与发动机起动一次油耗  $S_2$  相等时,发动机怠速运转的时长,计算公式(4):

$$T_{is0} = S_2 \div i \quad (4)$$

其中,  $i$  为发动机怠速时燃油消耗。

若车辆是排队车辆中第 13 辆及以后车辆, 则根据道路信息进行判断: 当排队车辆中有 1/2 以上车速为 0 km/h, 且 100% 车辆车速小于 5 km/h 时, 车辆停机。起控制逻辑程序框图如下图 2 所示。

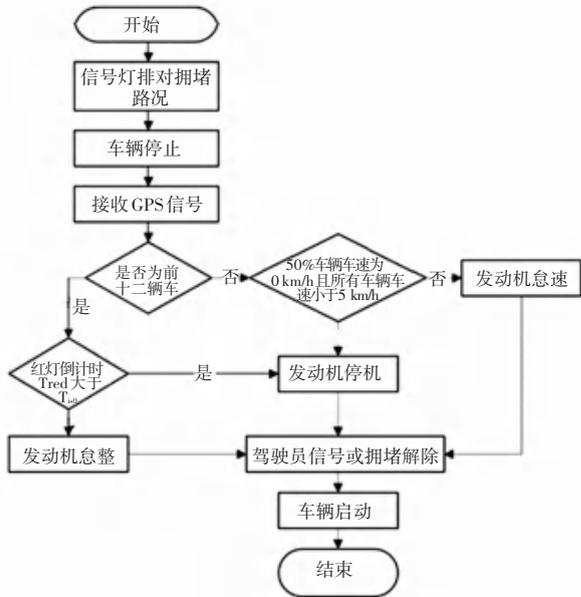


图 2 信号灯引起的排队拥堵路况启停策略流程图

Fig. 2 Traffic flowchart of the start-stop strategy for queuing congestion caused by traffic lights

### 3.2 事故引起的拥堵

对于事故拥堵可以通过实时交通信息判断当前路段有无交通信号灯, 车辆拥挤程度及车辆行驶速度来进行判定。在由事故引起的长距离拥堵路段, 传统启停策略为跟随前车, 即前车启停发动机启动, 前车停机发动机停机。在长距离拥堵路段, 该策略具有显著弊端, 即燃油经济性差, 乘坐舒适性差, 且容易损伤零部件, 所以针对这一路况, 做出改进来改善频繁启停工况: 在前车后保险杠距离  $S_i$  大于临界值  $S_{i0}$ , 后车辆再启动, 有效避免了在该距离中不必要的车辆启停动作。  $S_{i0}$  计算过程如公式 (5):

$$S_{i0} = V_{is} * T_{is0} + S_{safe} \quad (5)$$

其中,  $V_{is}$  为车辆怠速行驶车速,  $S_{safe}$  为在低速行驶路段, 车辆需要与前车之间保持的安全距离。

另外在车辆启动后, 则启用车速控制模块, 保证与前车后保险杠之间的距离始终为  $S_{i0}$ , 若在行驶过程中识别到前车有刹车动作直至停车, 使与前车后保险杠距离  $S_i < S_{i0}$ , 则将车速平稳降至怠速, 直至与前车后保险杠距离  $S_i = S_{safe}$  时, 发动机停机, 启停系统一个工作循环结束。事故引起的拥堵路况流程图如图 3 所示。

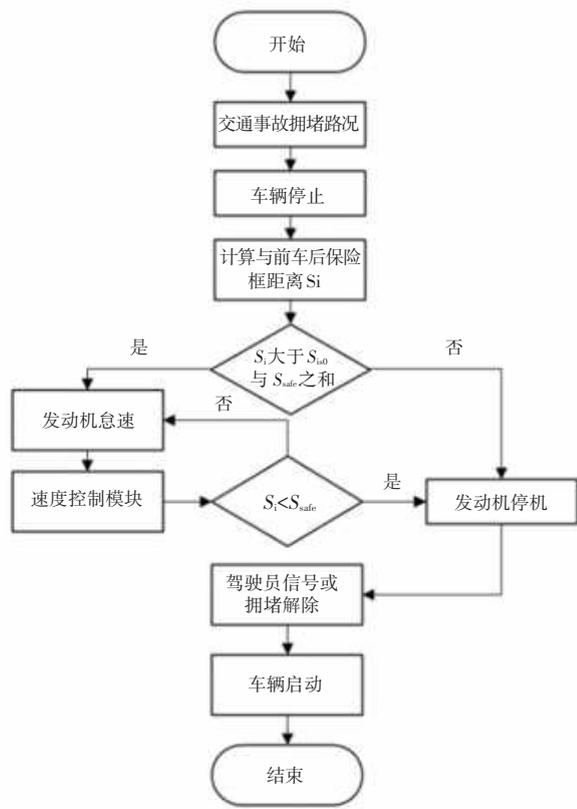


图 3 事故引起的拥堵路况启停策略流程图

Fig. 3 Flowchart of the start-stop strategy for congestion caused by the accident

## 4 仿真验证及结果分析

针对无信号灯道路由交通拥堵引起的拥堵路况启停策略, 以启停次数和燃油经济性为考察指标与传统的跟随前车即停即走策略在 CarSim/Simulink 做出仿真对比。

### 4.1 CarSim/Simulink 联合仿真模型

CarSim 是面向特性的车辆仿真软件, 在 CarSim 中整车被分为数个子系统, 通过对各个子系统的参数与特性曲线进行设置完成建模。此次选用 CarSim 中 C-Class 预设模型, 仿真车辆主要参数见表 1。

表 1 仿真车辆主要参数

Tab. 1 The main simulation parameters of the vehicle

参数	数值	参数	数值
汽车质量/kg	1 274	质心高度/m	0.54
轴距/mm	2 578	发动机功率/KW	150
转动惯量/kg · m <sup>2</sup>	606.1	车轮滚动半径/mm	350
滚动阻力系数	0.012		

### 4.2 搭建联合仿真平台

CarSim 提供了与 Simulink 联合仿真接口, 并通

过 S 函数来实现两者的连接和通信<sup>[8]</sup>。在 CarSim 中建立好整车动力学模型, 将发动机节气门开度  $Thr\_eng$ 、制动器的制动压力  $P\_bk$ 、左右轮的前轮转角作为 Simulink 输入的信号, 将发动机转速

$AV\_eng$ 、变速器传动比  $Ig$ 、车速  $V$ 、车辆位置  $Xo1$ 、车辆加速度  $ax1$  作为输出信号。搭建的模型如图 4 所示。

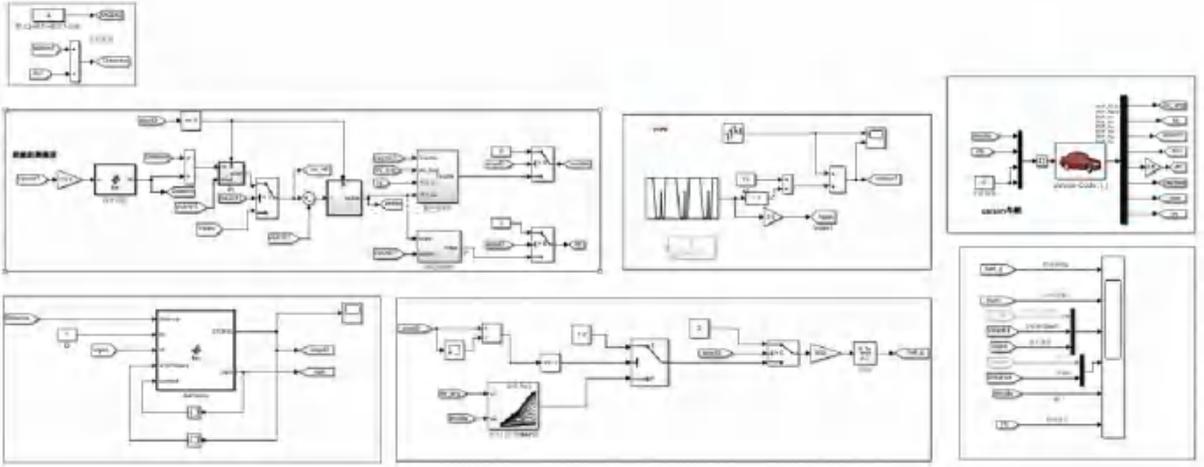


图 4 CarSim/Simulink 联合仿真模型

Fig. 4 Joint CarSim/Simulink simulation model

#### 4.2.1 前车状态模块

这一模块中对前车速度做出设置: 在第 [0 6 10 14 15 16 18 20 22 25] s, 分别设置其速度为: [3 3 0 0 2 0 0 3 3 3] km/h, 设置完成后对前车速度积分即得前车位置, 随后与跟车安全距离  $S_{safe}$  相加, 得到目标车辆当前位置  $Xo1$ , 并将前车速度与位置输入至控制策略模块和速度跟随模块。

在控制策略模块中, 针对由事故引起的拥堵路况, 采用在前车后保险杠距离  $S_i$  大于临界值  $S_0$  后车辆再启动的启停控制策略, 有效避免了在该距离中不必要的车辆启停动作, 并添加计数器模块, 统计路程中启停次数。

#### 4.2.2 速度跟随模块与油耗计算模块

在这一模块中, 对车辆进行驱动系统和制动系统的纵向动力学建模, 随后通过 Simulink 中 PID 模块输出期望车速, 再通过控制节气门开度使汽车按照设定的车速行驶, 继而达到控制与前车间距为期望间距, 并保持车速跟随的目的。

本模块中 PID 控制器由比例单元、积分单元、微分单元 3 部分组成, 其输入  $e(t) = V_{set}(t) - V(t)$  与输出  $u(t)$  之间的关系为式(6):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + (T_D de(t))/dt \quad (6)$$

改写成传递函数形式(7):

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_D S \right) \quad (7)$$

其中,  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_D$  为微分时间常数。

对式(7)进行离散化处理, 式(8):

$$u(KT) = K_p \left\{ e(KT) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^i e(jT) + \frac{T_D}{T} [e(KT) - e(KT - T)] \right\} \quad (8)$$

其中,  $K$  为采样信号;  $u(KT)$  为第  $K$  个时刻的控制器输出值;  $e(KT)$  为第  $K$  个时刻的速度偏差值;  $e(KT - T)$  为第  $K - 1$  个时刻的速度偏差值, 最终经过仿真验证,  $K_p$  取 2,  $K_i$  取 0.001,  $K_d$  取 0。

再对行驶中的车辆进行纵向动力学分析, 式(9)和式(10):

$$F_x - F_B - (CF_x A D v^2)/2 - G \cos \theta_f - G \sin \theta_f - \delta_{ma} = 0 \quad (9)$$

$$\sigma = 1 + \sigma_1 + \sigma_2 i_k^2 \quad (10)$$

其中,  $F_x$  为轮胎驱动力;  $F_B$  为制动力;  $\sigma_1$  取 0.04;  $\sigma_2$  取 0.06。

驱动时, 制动力为 0, 则可得式(11):

$$F_x = (CF_x A D v^2)/2 + G \cos \theta_f + G \sin \theta_f - (1 + \sigma_1 + \sigma_2 i_k^2) ma \quad (11)$$

忽略传动系统的弹性变性后, 可得汽车驱动力  $F_x$  为公式(12):

$$F_x = \frac{T_{cin} \tau(\omega_r/\omega_e) i_k i_0 \eta_t}{2} \quad (12)$$

其中,  $T_{cin}$  为输入扭矩;  $\tau(\omega_r/\omega_e)$  为转矩特性

函数;  $\eta_i$  为传动系机械效率, 则式(13):

$$T_{icin} = ([ (CF_xADv^2)/2 + G\cos\theta_f + G\sin\theta_f - (1 + \sigma_1 + \sigma_2 i_k^2)ma ]R_r) \div (\omega_r/\omega_e) i_k i_0 \eta_i \quad (13)$$

在忽略节气门的滞后及扭转刚度等因素对发动机性能影响后, 可得到发动机输出转矩  $T_e$  与发动机转速  $\omega_e$  及节气门开度  $\alpha$  间的函数关系, 式(14)<sup>[9]</sup>:

$$T_e = f(\omega_e, \alpha) \quad (14)$$

则节气门开度, 式(15):

$$\alpha = \varphi(\omega_e, T_e) \quad (15)$$

其中,  $\varphi(\omega_e, T_e)$  为节气门开度特性函数, 则由发动机输出扭矩可得到发动机节气门开度 MAP 图如图 5 所示。

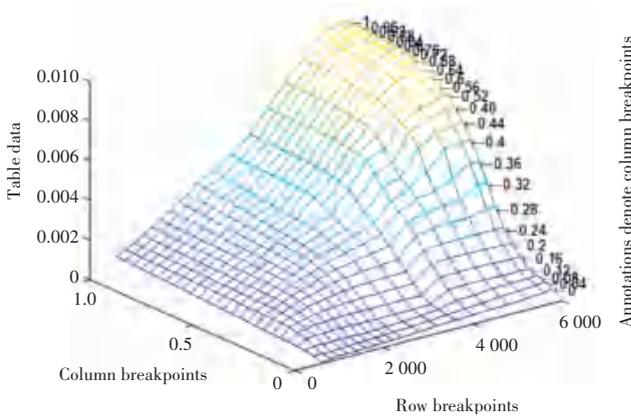


图 5 发动机节气门开度 MAP 图

Fig. 5 Engine throttle opening MAP diagram

同理, 制动时节气门开度为 0, 则有式(16):

$$F_B + F_{drag} + (CF_xADv^2)/2 + G\cos\theta_f + G\sin\theta_f + (1 + \sigma_1 + \sigma_2 i_k^2)ma_{des} = 0 \quad (16)$$

其中,  $F_{drag}$  为发动机对汽车的反拖力;  $a_{des}$  为期望加速度; 且另驱动力与制动力都为 0 时的期望加速度为  $a_{border}$ 。

那么对于期望制动压力, 式(17):

$$P_{bk} = \frac{(a_{border} - a_{des})(1 + \sigma_1 + \sigma_2 i_k^2)mR_r}{2(K_f + K_r)} \quad (17)$$

根据建立的驱动系统与制动系统逆纵向动力学模型在 Simulink 中完成车辆的驱动控制与制动控制, 实现了对前车的车速跟随。

而在油耗计算模块中, 输入发动机转速与节气门开度, 可以对照节气门开度 MAP 图获取发动机输出扭矩  $T_e$ , 再对照发动机转速特性曲线, 可以得到对应的燃油消耗率  $b$  及功率  $p$ 。那么燃油消耗量  $B$ 。可由公式(18)计算得出:

$$B = \int_0^t (p \times b) dt \quad (18)$$

### 4.3 仿真分析

选取一段长 1 200 m 的水平道路作为仿真道路, 设置初始车速为 18 km/h, 仿真时间 100 s。仿真结果如图 6、图 7 所示。

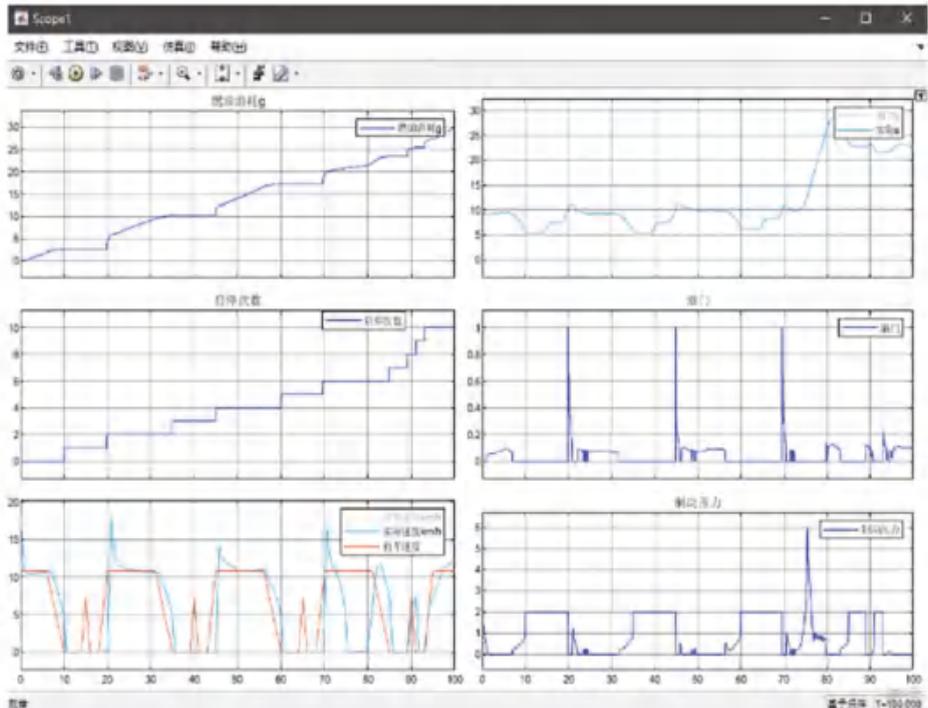


图 6 使用改进后的发动机启停策略后仿真结果

Fig. 6 Simulation result after using improved engine start-stop strategy

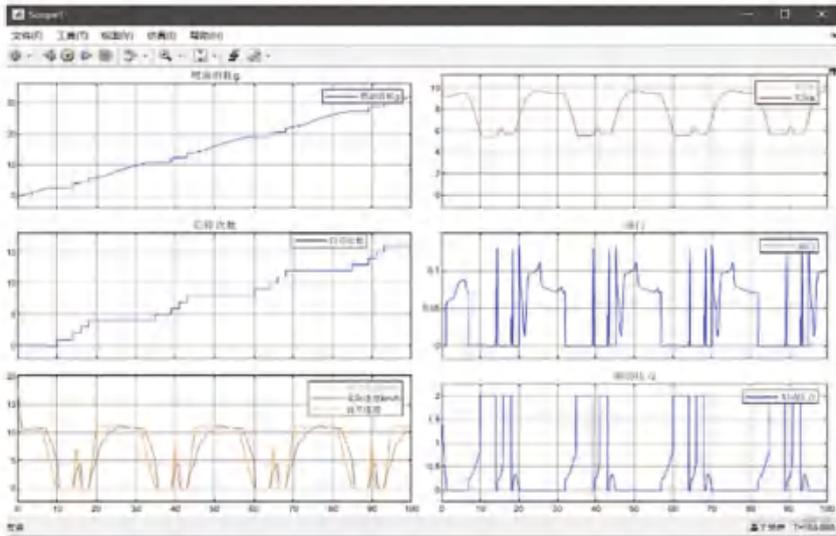


图7 使用“即走即停”策略仿真结果图

Fig. 7 Simulation results after using the Walk-and-Go strategy

可以看出,在这段1 200 m的拥堵路段中,车辆使用传统跟随前车即走即停的发动机启停策略时,发动机启停次数为16次,燃油消耗32 g,与前车距离均保持在6~10 m区间内,车速跟随前车较为紧密;而使用基于道路信息预测的发动机启停控制策略时,发动机启停次数为10次,同比减少31.5%,燃油消耗为30 g,同比下降6.25%,与前车距离在0~70 s内保持在5~10 m,在70~100 s内保持在10 m以上,车速跟随前车十分紧密。由此可见,在这段1 200 m的拥堵路段中,采用结合道路信息预测的启停系统控制策略后,整车的舒适性、燃油经济性与安全性均得到提升,优化方案有效。

## 5 结束语

本文设计了一种结合道路信息预测的启停系统控制策略,通过设置合理的等待距离来降低发动机启停次数;搭建了CarSim与Simulink的联合仿真软件平台,在一段1 200 m的水平拥堵路段中对优化前后的两种控制策略进行对比试验。通过仿真可以看出,所设计的发动机启停控制策略可以明显降低

启停次数与燃油消耗,改善乘坐舒适性、燃油经济性与驾驶安全性,为汽车的发动机启停系统控制策略提供了新的研究方法。

## 参考文献

- [1] 解本欣. 自动起停系统研究及匹配应用[D]. 吉林:吉林大学, 2016.
- [2] 黄晓鹏, 蔺宏良, 李帆, 等. 基于节能减排的发动机智能启停系统关键技术[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(5):47-50.
- [3] 祁克光, 黄开胜. 增强型起动机起停系统与48 V BSG技术分析[J]. 汽车电器, 2016(7):45-47.
- [4] 祁克光. 汽车ISS控制技术节油研究与应用[J]. 安徽科技, 2012(11):37-38.
- [5] 焦建刚, 徐刚. 正确理解电控汽油发动机进气量与喷油量的关系[J]. 汽车维修与保养, 2014(11):90-91.
- [6] John Bishop, Ashok Nedungadi. An Engine Start/Stop System for Improved Fuel Economy[C]. SAE Paper 2007-01-1777.
- [7] 何仁, 刘凯, 黄大星等. 发动机智能怠速停止起动系统控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2010(6):467-469.
- [8] Mechanical Simulation Corporation. CarSim User Manual[M]. Ann Arbor: Mechanical Simulation Corporation, 2009.
- [9] 陈刚, 张为公. 汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12):48-54.

(上接第13页)

- [3] 刘雨安, 杨小文, 李乐之. 机器学习在疾病预测的应用研究进展[J]. 护理学报, 2021, 28(7):30-34.
- [4] Paul, K, Whelton. Sodium, Potassium, Blood Pressure, and Cardiovascular Disease in Humans[J]. Current Hypertension Reports, 2014, 16(8):1-8.
- [5] 邓建新, 单路宝, 贺德强, 等. 缺失数据的处理方法及其发展趋势[J]. 统计与决策, 2019, 35(23):28-34.
- [6] 宋花花, 赵松, 唐嘉敏, 等. AHA和经典诊断标准定义的高血压

患者动脉硬化程度比较的横断面研究[J]. 中国循证医学杂志, 2021, 21(10):1122-1125.

- [7] 李杰, 张晓玲. 随机试验设计中缺失值插补方法研究[J]. 大理学院学报, 2013, 12(10):1-5.
- [8] FERNANDEZ A, GARCIA S, CHAWLA N V, et al. SMOTE for Learning from Imbalanced Data: Progress and Challenges, Marking the 15-year Anniversary[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2018, 61:863-905.
- [9] 崔佳旭, 杨博. 贝叶斯优化方法和应用综述[J]. 软件学报, 2018, 29(10):23.