

# BSG怠速起停系统车辆控制策略研究

逯家鹏<sup>1</sup> 李幼德<sup>1</sup> 吕景华<sup>2</sup> 赵健<sup>1</sup>

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022; 2. 一汽轿车股份有限公司产品部, 长春 130048)

**摘要:** 对怠速起停系统节油原理及影响因素进行分析。根据驾驶员安全性、驾驶习惯和舒适性及油耗排放性能, 制定BSG起停系统发动机自动停机控制策略、发动机自动启动控制策略、关闭起停系统控制策略及起停协调控制策略, 并设定各控制参数阈值。应用该策略搭载实车进行试验, 结果表明起停控制策略可按驾驶员要求控制车辆起停。BSG系统NEDC综合工况节油4%~5%, 城市工况节油12%, 实际城市使用工况节油8.1%。BSG起停系统车辆排放满足国V要求, CO和THC污染物排放量明显降低, 但NO<sub>x</sub>排放量略有升高。

**关键词:** BSG系统; 怠速起停; 控制策略; 油耗; 排放

**中图分类号:** U469.79      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0316-07

## Control Strategy of BSG Vehicle Idling Start-stop System

Lu Jiapeng<sup>1</sup> Li Youde<sup>1</sup> Lü Jinghua<sup>2</sup> Zhao Jian<sup>1</sup>

(1. College of Automobile Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Product Development Department, FAW Car Company Limited, Changchun 130048, China)

**Abstract:** The belt driven starter generator (BSG) system structure, working principle and working mode were introduced, the oil-saving principle of start-stop system, the relationship between idle speed and oil-saving rate, and the relationship between idle time ratio and oil-saving rate were analyzed. According to the driver's safety, driving habits and comfort, fuel economy and emission, the BSG start-stop system control strategy was formulated, which included engine automatic stopping strategy, engine automatic starting strategy, start-stop system shutdown strategy, and start-stop coordination strategy. The start-stop control parameters threshold values of battery SOC, catalyst temperature, engine water temperature, environmental temperature, and braking system vacuum pressure were set. The strategies were applied to the real vehicle. On the revolving drum, the fuel consumption and emissions were tested in NEDC cycle with the carbon balance method and instantaneous fuel consumption equipment. On the road, the fuel consumption was tested in NEDC cycle and actual road conditions. The test results showed that the proposed control strategy was correct, the threshold value of control parameters was reasonable, and the control strategy satisfied the requirement of idle start-stop function. The revolving drum test results showed that the BSG system could save oil by 4%~5% in NEDC cycle, and it could save oil by more than 12% in city conditions. The BSG vehicle emission met the national V emission standard. The CO and THC pollutants were decreased significantly, and the NO<sub>x</sub> pollutants were increased slightly. The road fuel consumption test results showed that during the morning rush of the city, the BSG system could save oil by more than 8.1%.

**Key words:** belt driven starter generator system; idling start-stop; control strategy; fuel consumption; emission

收稿日期: 2015-11-02 修回日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205156)

作者简介: 逯家鹏(1979—),男,工程师,博士生,主要从事整车动力性经济性排放性能研究,E-mail: lu\_jiapeng@163.com

通信作者: 李幼德(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事汽车地面系统与控制研究,E-mail: auto\_tes@jlu.edu.cn

## 引言

随着城市汽车保有量的增加,交通拥堵现象加剧,导致汽车在红绿灯路口怠速停车时间越来越长,从而带来的燃油消耗和尾气排放问题也越来越引起关注。为了解决车辆怠速时不做功而空耗燃油的问题,国内外很多研究机构及企业研发了怠速起停系统<sup>[1-4]</sup>。主要研究内容集中在新型机械结构设计、起停过程动力学分析和整车控制策略 3 个方面<sup>[5-8]</sup>。目前国内外公开的怠速起停系统整车控制策略不够全面,并且很少公开各控制参数的阈值设定<sup>[9-11]</sup>。

本文研究的带驱动一体化起动/发电机(Belt driven starter generator, BSG)起停系统整车控制策略重点考虑 3 类因素:驾驶员安全性、驾驶员驾驶习惯及舒适性和油耗排放性能。通过理论分析及标定测试确定了各控制参数的阈值。并在转鼓试验台上应用碳平衡法及油耗仪法对车辆进行 NEDC 循环油耗及排放测试<sup>[12]</sup>,在道路上使用油耗仪对车辆进行模拟 NEDC 循环油耗测试及城市道路实际工况油耗测试<sup>[13]</sup>,验证整车控制策略的实用性及降油耗降排放的效果。

## 1 BSG 起停系统结构及工作原理

### 1.1 BSG 系统结构及参数

图 1 为 BSG 起停系统车辆的结构示意图。它与传统车辆的区别是在传统车辆基础上取消了起动机,将传统发电机更换为一体化起动/发电机,将传统的免维护电池更换为 AGM 高能蓄电池,并对前端轮系进行重新设计。在此基础上又增加了必要的传感器及开关。本文是在一款 MT 车型上开发的 BSG 起停系统。整车、发动机、变速器、轮胎及 BSG 系统的主要参数如表 1 所示。

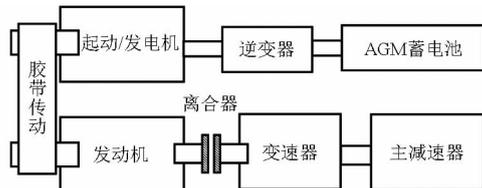


图 1 BSG 起停系统结构示意图

Fig. 1 BSG start-stop system structure diagram

图 2 为 BSG 起停系统的电气结构示意图。BSG 起停系统控制器接收蓄电池 SOC 值、电力负荷等参数判断蓄电池状态,进行能源管理控制;接收方向盘转角和制动系统压力等参数进行发动机起动控制;接收发动机舱盖、安全带、车门开关状态、离合器开关、空挡开关及倒挡开关等信息,进行发动机起停

止控制。

表 1 整车主要参数

Tab. 1 Vehicle main parameters

参数	数值
整备质量/kg	1 325
迎风面积/m <sup>2</sup>	2. 2
风阻系数	0. 29
滚动阻力系数	0. 011
滚动半径/mm	308
排量/L	1. 595
最大功率/kW(r·min <sup>-1</sup> )	76(5 600)
最大扭矩/(N·m)(r·min <sup>-1</sup> )	145(3 500)
变速器各挡速比	3. 455/1. 955/1. 281/
主减速比	0. 973/0. 815
电机额定功率/kW	4. 533
蓄电池额定容量/(A·h)	10
	65

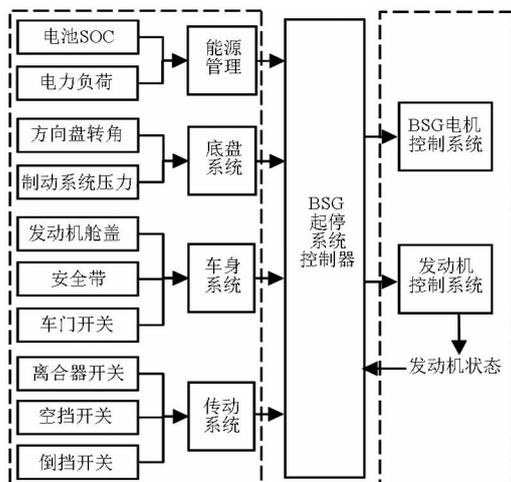


图 2 BSG 起停系统电气结构

Fig. 2 BSG start-stop system electrical structure

### 1.2 BSG 系统工作原理及工作模式

BSG 起停系统工作原理为 BSG 电机通过胶带带动发动机曲轴转速迅速升高到怠速转速以上,并由整车控制器控制发动机点火,从而起动发动机。当车辆停止发动机在怠速工况下,且外界环境及车辆状态满足起停系统要求的情况下,驾驶员松开离合器踏板时发动机自动熄火,当驾驶员踩下离合器或制动踏板时发动机自动启动<sup>[14-16]</sup>。

BSG 起停系统有 4 种基本工作模式:①起动工况起动时,BSG 电机在短时间内将发动机加速至怠速转速以上,然后发动机喷油点火开始工作。②停车工况控制系统自动切断汽油机供油,发动机处于关闭状态。③减速工况驾驶员踩下制动踏板,向起停/发电机传送信号,使其将车辆的制动能量转化为电能并存储起来。④正常行驶工况发动机正常工作。

## 2 怠速起停节油分析

### 2.1 停机节油率计算

按照 NEDC 循环工况计算怠速停机节油率。NEDC 工况起停系统燃油经济性计算模型中停机时间为

$$T_{\text{idle}} = T_1 - T_2 + N_{\text{stop}} T_3 - (N_{\text{stop}} - 1) T_4 \quad (1)$$

式中  $T_{\text{idle}}$  —— 停机时间

$T_1$  —— 车速等于 0 的时间

$T_2$  —— 因发动机水温过低而禁止自动停机的时间

$T_3$  —— 车速从自动停机触发限值到停稳的时间

$T_4$  —— 驾驶员从踩下离合器踏板到车辆启动 (车速不为 0) 的时间

$N_{\text{stop}}$  —— 自动停机次数

根据启动触发策略, NEDC 规定的车辆启动前离合器踏板操作会触发发动机自行启动。根据停机触发策略, 由于 NEDC 规定的离合器踏板操作在车速降至限值之前已完成, 车速限值即为自动停机触发条件。

燃油经济性计算公式为

$$N_{\text{inj}} = 2n_{\text{idle}}/60 \quad (2)$$

$$c_{\text{inj}} = V_{\text{inj}} \lambda \rho_{\text{fuel}} / \rho_{\text{air}} \quad (3)$$

$$c_{\text{sec}} = c_{\text{inj}} N_{\text{inj}} \quad (4)$$

$$c_{\text{fe}} = 100 c_{\text{sec}} T_{\text{idle}} \eta / D_{\text{necd}} \quad (5)$$

$$\beta_{\text{fe}} = c_{\text{fe}} / c_{\text{necd}} \quad (6)$$

式中  $n_{\text{idle}}$  —— 平均怠速转速

$N_{\text{inj}}$  —— 每秒喷射的次数

$V_{\text{inj}}$  —— 每次喷射的平均进气量

$\lambda$  —— 理论空燃比

$\rho_{\text{fuel}}$  —— 燃油密度  $\rho_{\text{air}}$  —— 空气密度

$c_{\text{inj}}$  —— 每次喷射的燃油消耗量

$c_{\text{sec}}$  —— 每秒的理论燃油消耗量

$\eta$  —— 考虑怠速喷油加浓以及电池充电消耗等方面的折算系数

$c_{\text{fe}}$  —— 计算百公里节油量

$c_{\text{necd}}$  —— 实际百公里油耗 (无起停功能)

$D_{\text{necd}}$  —— NEDC 理论行驶距离

$\beta_{\text{fe}}$  —— 起停系统的计算节油率

可以看出, 怠速时间和怠速油耗影响怠速起停的节油率。

怠速时间是描述循环工况的重要参数之一, 怠速时间占循环工况总时间的比例不同, 汽车的燃油经济性差别很大。以国内典型城市循环工况为例, 通过设定不同的怠速时间, 可以模拟不同行驶工况。

基于这些工况进行仿真, 可得到怠速停机时怠速时间比例与汽车节油率的关系, 如图 3 所示。从图中可以看出, 怠速时间占循环工况总时间的比例越大, 汽车燃油经济性提高越显著。

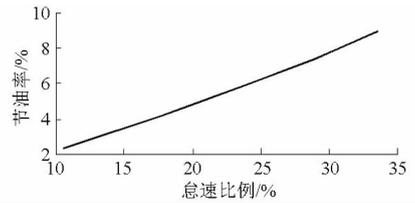


图 3 怠速比例与节油率的关系

Fig. 3 Relationship between idle ratio and oil-saving rate

发动机怠速转速直接决定怠速时的油耗, 通过调整发动机的怠速转速, 基于国内典型城市循环工况进行经济性仿真, 得到汽车怠速停机时发动机怠速转速与节油率的关系, 如图 4 所示。从图中可以看出, 怠速停机时节油率随发动机怠速转速增大而逐渐提高, 其原因主要是发动机怠速转速越大, 停车时车辆附件消耗的功率也越大, 致使怠速油耗相对较高, 而实现怠速停机后节油效果越明显。另外, 还可看出发动机怠速转速变化对怠速停机时燃油经济性改善影响较小。

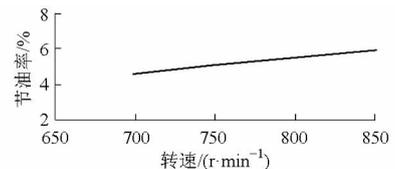


图 4 怠速转速与节油率的关系

Fig. 4 Relationship between idle speed and oil-saving rate

### 2.2 怠速停机后的起停节油控制

空燃比、进气量及点火角等参数直接影响发动机怠速停机重起的燃油消耗。

启动时若能将空燃比适当加大, 可减小基本喷油量。由于起停式发动机的怠速停机时间短, 重新启动发动机时气缸内温度较高, 适当加大空燃比在保证其启动安全性的情况下可降低油耗。在基本空燃比一定的条件下, 将进气量减小, 可减小基本喷油量。

在怠速停机后重新启动发动机时, 空燃比和进气量都变化后, 为了确保启动扭矩的稳定性并且发动机不产生爆燃, 也需要对点火角重新标定。

## 3 整车控制策略

### 3.1 控制策略关键考虑因素

制定 BSG 起停系统整车控制策略重点考虑 3 类因素: 驾驶员安全性、驾驶员驾驶习惯及舒适性和油耗排放性能。基于以上因素制定关闭起停系统控制策略、自动停止发动机控制策略和自动启动发动

机控制策略。驾驶员安全因素主要包括安全带是否扎紧、发动机舱盖是否关闭、BSG 系统是否有故障、制动系统压力是否高于阈值及方向盘转角是否大于阈值等。驾驶习惯及舒适性主要包括油门踏板是否松开、离合器是否松开、变速箱是否在空挡、上次换挡不是倒挡、车速小于阈值及空调 AC 是否关闭等。油耗排放性主要包括环境温度是否大于阈值,发动机水温是否大于阈值、催化器温度是否大于阈值及电池 SOC 值是否大于阈值等。

### 3.2 发动机自动停机控制策略

当驾驶员遇到红绿灯或其他需要长时间停车时,车辆必须同时满足图 5 发动机自动停机控制逻辑的所有条件,起停系统才能发挥作用,实现发动机自动停机功能。图 5 中虚线框内为驾驶员安全性策略,点划线框内为油耗排放性能策略,实线框内为驾驶员驾驶习惯及舒适性策略。

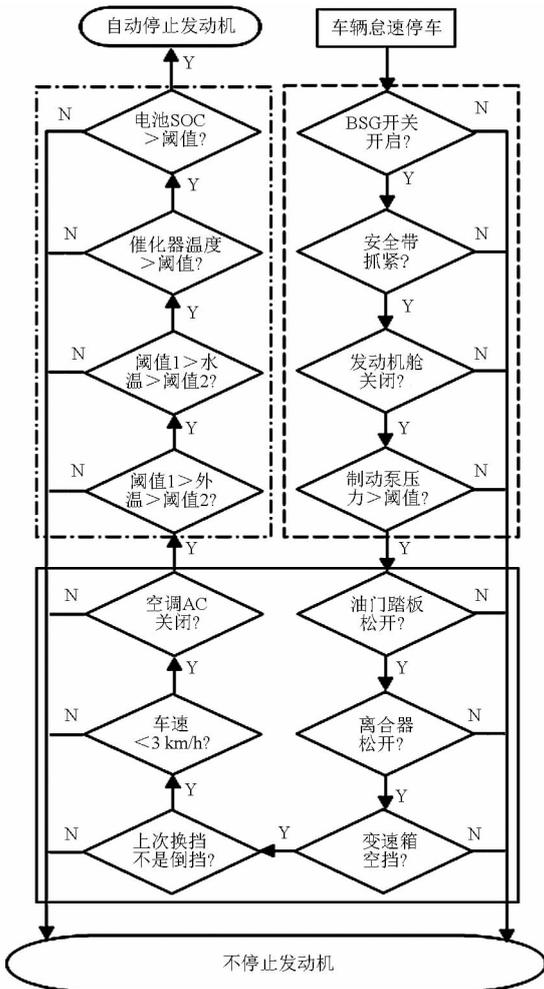


图 5 发动机自动停机逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of engine automatic stopping

### 3.3 发动机自动启动控制策略

当驾驶员在等待红绿灯需要再次起动车辆时,如果发动机是由起停系统停车且满足图 6 发动机自动启动控制逻辑的所有条件,起停系统起作用,实现

发动机自动启动功能。

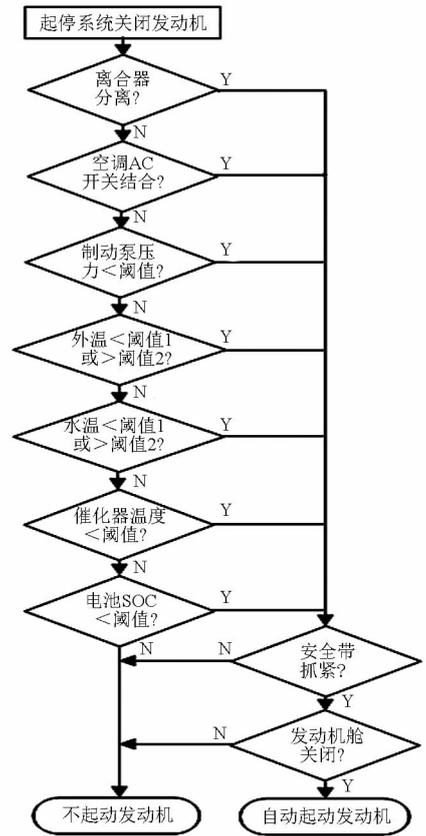


图 6 发动机自动启动逻辑图

Fig. 6 Logic diagram of engine automatic starting

### 3.4 起停控制策略变量阈值设定

结合蓄电池性能参数及整车用电系统负荷设定蓄电池 SOC 阈值。考虑催化器起燃温度为 250 ~ 300℃,设定催化器温度阈值。考虑发动机摩擦功及耐久性,设定发动机水温度阈值。基于外界温度过高或过低会影响空调系统的使用,设定外界温度阈值<sup>[17-20]</sup>。基于制动系统怠速真空度压力为 60 kPa,在 20 kPa 时助力明显减小,设定制动系统压力阈值。详细阈值见表 2。

表 2 控制策略变量阈值

Tab. 2 Control strategy variable threshold values

变量	停机阈值	启动阈值
蓄电池 SOC/%	≥ 55	≤ 40
催化器温度/℃	≥ 300	≤ 250
发动机水温/℃	[40, 110]	< 40 或 > 110
外界温度/℃	[-10, 30]	< -10 或 > 30
制动系统压力/kPa	≥ 30	≤ 20

### 3.5 关闭起停系统控制策略

当起停系统满足图 7 的全部控制逻辑时,怠速起停系统自动关闭。

### 3.6 起停协调控制策略

起动或停机状态协调控制策略根据发动机自动

停机策略、发动机自动起停策略、车速、发动机转速等判断起停功能状态,根据起停功能状态控制发动机的停机和起停。图8给出了起停协调策略状态跳转示意图:将起停发动机状态分为6种,各状态之间的跳转依据相应的触发条件。其中除禁用状态之外,其他状态都是起停功能开启后的状态,而待机状态代表ECU处于上电但发动机尚未启动过的状态。

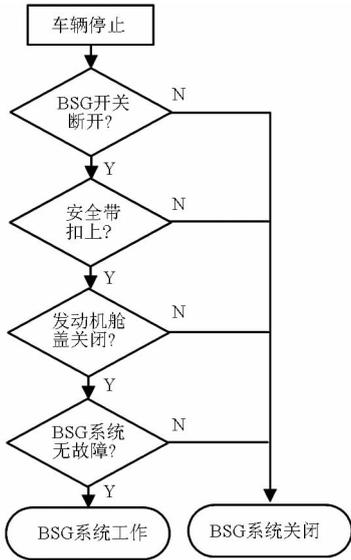


图7 起停系统关闭逻辑

Fig.7 Logic diagram of start-stop system shutdown

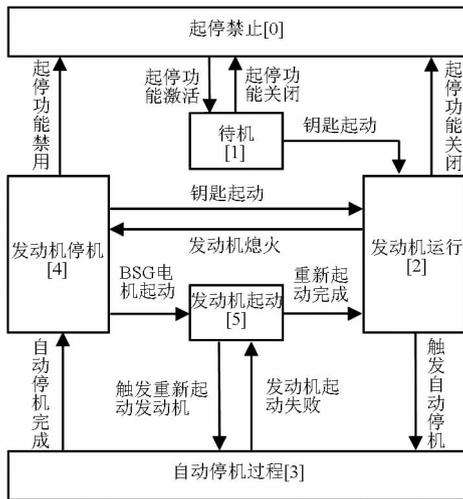


图8 起停协调控制策略

Fig.8 Start-stop coordinated control strategy

## 4 试验验证及分析

为了验证BSG起停系统整车控制策略及油耗排放性能,对BSG起停样车按照起停功能开启及关闭两种状态进行转毂和道路的油耗及排放测试。

### 4.1 整车油耗测试及分析

#### 4.1.1 转毂油耗测试

在转毂试验台上对BSG车辆分别进行碳平衡

法和油耗仪法NEDC工况油耗测试。碳平衡法直接从车辆排气尾管处取样分析测定油耗。油耗仪法是在油箱进出口油管处并入油耗仪测量装置逐秒实时记录油耗。油耗仪连接方法如图9所示。

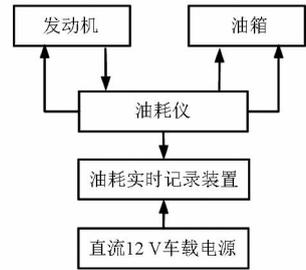


图9 油耗仪连接方法

Fig.9 Fuel consumption instrument connection method

对BSG车辆分别进行怠速起停功能开启及关闭2种状态油耗测试。表3为碳平衡法油耗测试结果,怠速起停开启节油为4.3%。

表3 碳平衡法油耗测试结果

Tab.3 Carbon balance fuel consumption test results

测试分类	L/(100 km)		
	市区	市郊	综合
怠速起停关闭	10.2	5.2	7.0
怠速起停开启	9.0	5.2	6.6

表4为油耗仪测试结果,怠速起停开启节油为4.5%。从结果可见碳平衡法和油耗仪法测试油耗结果基本一致。怠速起停对市区工况的油耗贡献为12%,对综合工况贡献为4%~5%。

表4 油耗仪测试结果

Tab.4 Fuel consumption instrument test results

测试分类	市区		市郊		综合油耗/ (L·(100 km) <sup>-1</sup> )
	油耗/ mL	里程/ km	油耗/ mL	里程/ km	
怠速起停关闭	417.7	4.0015	365.1	6.9773	7.13
怠速起停开启	377.6	4.0035	369.3	6.9624	6.81

#### 4.1.2 道路油耗测试

在某军用机场跑道上采用油耗仪法对BSG车辆进行NEDC工况道路油耗测试。驾驶员参照司机的NEDC工况车速来驾驶车辆,测试时长为20min。分别进行了怠速起停功能开启和关闭情况下的对比试验。车辆载荷为整备质量加载100kg。测试时天气晴朗,气温26℃,风速1.5m/s,气压为100.5kPa。测得油耗结果见表5,怠速起停开启节油为5%。

针对长春市城市道路实际工况进行道路油耗测试。测试时间为上午08:00—09:15。测试路线为长春市市中心干道及环路,里程约30km。使用车载GPS、油耗仪等设备实时采集车辆信息。试验分

表 5 道路油耗测试结果

Tab. 5 Road fuel consumption test results

测试分类	市区		市郊		综合油耗/ (L·(100 km) <sup>-1</sup> )
	油耗/ mL	里程/ km	油耗/ mL	里程/ km	
怠速起停关闭	422.6	4.021 3	370.4	6.963 1	7.22
怠速起停开启	376.1	4.032 4	381.2	7.012 2	6.86

2 d 完成,1 d 怠速起停功能开启,1 d 怠速起停功能关闭。试验车辆载荷为整备质量加载 100 kg。试验时气温 24℃,风速 1.1 ~ 2.8 m/s,气压为 100.6 kPa。测得的油耗数据见表 6,怠速起停开启节油为 8.1%。测试过程中怠速时间比例为 29.3%,平均车速 22.9 km/h,拥堵里程和相对通畅里程比例约为 3:2。

表 6 市区油耗测试结果

Tab. 6 City fuel consumption test results

测试分类	油耗/mL	里程/km	综合油耗/(L·(100 km) <sup>-1</sup> )
怠速起停关闭	2 530.8	28.34	8.93
怠速起停开启	2 319.3	28.25	8.21

## 4.2 整车排放测试及分析

在转毂试验台上对 BSG 车辆进行起停开关开启及关闭两种状态整车排放测试,排放结果如表 7 所示。起停开关开启及关闭状态排放污染物均达到国 V 排放标准中的 I 型试验限值。并且起停功能开启时,CO 和 THC 污染物排放量明显降低,NO<sub>x</sub> 排放

量有所升高。NO<sub>x</sub> 排放量升高主要出现在发动机停机后重新启动阶段。

表 7 排放测试结果

Tab. 7 Emission test results

测试分类	CO	THC	NO <sub>x</sub>
	排放量	排放量	排放量
国 V 限值(新鲜催化器)	1.20	0.10	0.050
怠速起停关闭	0.28	0.04	0.016
怠速起停开启	0.22	0.03	0.019

## 5 结束语

通过分析怠速起停节油原理及影响因素,制定了 BSG 起停系统关闭控制策略、发动机停机控制策略、发动机自动启动控制策略;在转毂试验台上应用碳平衡法及油耗仪法对车辆进行了 NEDC 循环油耗及排放测试,并在道路上进行模拟 NEDC 循环油耗测试及城市道路实际工况油耗测试。结果表明,本文所提出的控制策略正确,控制参数阈值设定合理,满足怠速起停控制要求。实现 NEDC 综合工况 BSG 系统节油 4% ~ 5%,城市工况节油 12%。实车道路模拟 NEDC 综合工况 BSG 系统节油 5%。城市早晨上班期间 BSG 起停系统节油 8.1%。起停功能开启及关闭整车排放污染物均可达到国 V 排放标准中的 I 型试验限值。并且起停功能开启时,CO 和 THC 污染物排放量明显降低,但 NO<sub>x</sub> 排放量略有升高。

## 参 考 文 献

- Bishop J, Nedungadi A, Ostrowski G, et al. An engine start/stop system for improved fuel economy [C]. SAE Paper 2007-01-1777, 2007.
- 徐小东. 发动机怠速自动起停系统控制策略的试验研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(2):133-137.  
Xu Xiaodong. Experimental study of control strategy for engine intelligent idling stop and start system [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(2): 133-137. (in Chinese)
- Gao B, Svancara K, Walker A. Development of a BSG micro-hybrid system [C]. SAE Paper 2009-01-1330, 2009.
- Prucka M J. Development of an engine stop/start at idle system [C]. SAE Paper 2005-01-0069, 2005.
- Yang Lianghui, He Hongwen, Sun Fengchun, et al. Research of fuzzy logic control strategy for engine start/stop in dual-clutch hybrid electric vehicle [C] // Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2010, 2: 912-917.
- 李红朋, 秦大同, 杨阳, 等. 汽车发动机启动过程的动力学仿真 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005, 28(6): 4-8.  
Li Hongpeng, Qin Datong, Yang Yang, et al. Dynamics simulation of ISG-HEV engine during starting [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(6): 4-8. (in Chinese)
- Michael B L, Shailesh S K, Jeffrey E C. Hybrid powertrain with an engine-disconnecting clutch [C]. SAE Paper 2002-01-0930, 2002.
- Kerem K, Andrea P, Beth B, et al. Application of model based design techniques for the control development and optimization of a hybrid-electric vehicle [C]. SAE Paper 2009-01-0143, 2009.
- 陈汉玉, 左承基, 袁银男. 轻度混合动力车发动机 Start/Stop 系统控制策略 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 97-102.  
Chen Hanyu, Zuo Chengji, Yuan Yinnan. Control strategy for engine Start/Stop system of mild hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 97-102. (in Chinese)
- 何仁, 刘凯, 黄大星, 等. 发动机智能怠速停止启动系统控制策略的研究 [J]. 汽车工程, 2010, 32(6): 466-469.  
He Ren, Liu Kai, Huang Daxing, et al. A study on the control strategy of intelligent idling stop&start system of engine [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(6): 466-469. (in Chinese)
- 刘巨江, 吴坚, 黄锐景, 等. 起停系统控制策略开发及试验研究 [J]. 车用发动机, 2012(5): 15-18.

- Liu Jujiang, Wu Jian, Huang Ruijing, et al. Development and experiment of control strategy for start/stop system[J]. *Vehicle Engine*, 2012(5):15-18. (in Chinese)
- 12 GB 18352.5—2013 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2013:44-49. GB 18352.5—2013 Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles(CHINA 5)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013:44-49. (in Chinese)
- 13 钱国刚,李菁元,陆红雨. 轻型乘用车在中国的怠速起停循环外油耗测试评价[J]. *汽车安全与节能学报*, 2015, 6(2):171-178. Qian Guogang, Li Jingyuan, Lu Hongyu. Off-cycle fuel consumption test and evaluation on start-stop light duty vehicles in China[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2015, 6(2):171-178. (in Chinese)
- 14 Victor E G. Pneumatic start-stop system[C]. SAE Paper 2007-01-2767, 2007.
- 15 Alberto B. Improvements of vehicle fuel economy using mechanical regenerative braking[C]. SAE Paper 2010-01-1683, 2010.
- 16 Jason C, Samuel T. Technological evaluation of fuel efficiency improvement concepts to meet future regulatory requirements in the North American market[C]. SAE Paper 2002-01-2809, 2002.
- 17 尹安东,李领领. 基于 CRUISE 的轻度 ISG 型 HEV 控制策略研究[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2012, 35(1):5-8. Yin Andong, Li Lingling. Research on control strategy for mild ISG HEV based on CRUISE[J]. *Journal of Hefei University of Technology:Natural Science Edition*, 2012, 35(1):5-8. (in Chinese)
- 18 隗寒冰,秦大同,刘永刚,等. ISG 轻度混合动力汽车冷起动排放仿真与试验[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(6):147-153. Wei Hanbing, Qin Datong, Liu Yonggang, et al. Cold start emission simulation and experiment of ISG type mild hybrid electric vehicle[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(6):147-153. (in Chinese)
- 19 陈威,陈慧. 基于模糊控制的电动汽车起停控制系统研究[J]. *山东交通学院学报*, 2011, 19(3):1-6. Chen Wei, Chen Hui. Stop & start control system of electrical vehicle based on fuzzy logic control [J]. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 2011, 19(3):1-6. (in Chinese)
- 20 张博,李君,杨世春,等. 混合动力汽车发动机起停控制策略[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2009, 39(3):561-565. Zhang Bo, Li Jun, Yang Shichun, et al. Control strategy for engine start stop in hybrid electric vehicle[J]. *Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition*, 2009, 39(3):561-565. (in Chinese)

(上接第 263 页)

- 5 Noorbakhah R, Yaghmaee P, Durance T. Radiant energy under vacuum (REV) technology: a novel approach for producing probiotic enriched apple snacks[J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(3):1049-1056.
- 6 Martins E M F, Ramos A M, Vanzela E S L, et al. Products of vegetable origin: a new alternative for the consumption of probiotic bacteria [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2):764-770.
- 7 Christion Rößle, Auty M A E, Brunton N, et al. Evaluation of fresh-cut apple slices enriched with probiotic bacteria[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2010, 11(1):203-209.
- 8 Betoret E, Betoret N, Arilla A, et al. No invasive methodology to produce a probiotic low humid apple snack with potential effect against *Helicobacter pylori*[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(2):289-293.
- 9 高蕙文,陈晓红,吕欣,等. 真空浸渍法制备固定化乳酸菌苹果粒的研究 [J]. *食品科学*, 2006, 27(7):155-158. Gao Huiwen, Chen Xiaohong, Lü Xin, et al. Study on lactic acid bacteria enriched apple pieces prepared with vacuum impregnation [J]. *Food Science*, 2006, 27(7):155-158. (in Chinese)
- 10 Betoret N, Puente L, Diaz M J, et al. Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2-3):273-277.
- 11 Pryor R W. Inductive conductivity measurement of seawater[C]//2013 COMSOL Conference, 2013.
- 12 Jin Yamei, Yang Na, Ma Qian, et al. The salt and soluble solids content evaluation of pickled cucumbers based on inductive electrical parameters [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(4):749-757.
- 13 杨哪,金亚美,马倩,等. 感应离子电流盐渍腌菜工艺研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10):238-244. Yang Na, Jin Yamei, Ma Qian, et al. Vegetable salting process based on inductive ion current [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10):238-244. (in Chinese)
- 14 黄寅. 鼠李糖乳杆菌 NCU239 高密度培养技术研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2011. Huang Yin. High cell density culture of *Lactobacillus rhamnosus* NCU239 [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011. (in Chinese)
- 15 Chitra Kusnadi, Sudhir K Sastry. Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(3):329-336.
- 16 Dehel T F, Dickinson M, Lorge F, et al. Electric field and Lorentz force contribution to atmospheric vortex phenomena [J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(10-11):631-638.