

基于气道喷射的汽油机全负荷工况燃油喷射控制策略研究

万 滨^{1,2}, 郝 伟¹, 于秀敏², 祝遵祥¹, 冯朋朋¹, 董立冬¹

(1. 中国第一汽车股份有限公司技术中心 发动机部, 长春 130011; 2. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

Research on Fuel Injection Control Strategy of Port Fuel Injection Gasoline Engine under Full-Load Conditions

WAN Bin^{1,2}, HAO Wei¹, YU Xiumin², ZHU Zunxiang¹, FENG Pengpeng¹, DONG Lidong¹

(1. Engine Department, China FAW Co., Ltd. R & D Center, Changchun 130011, China;
2. National Key Lab of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The effect of injector parameters on the mixture preparation process was investigated by using simulation on a port fuel injection engine. To this end the effect of fuel injection timing on power and emission characteristics under full-load condition was studied by experiments. Results show that by improving the injector design, homogeneous mixture required by open-valve injection can be produced by adjusting the injector's spray cone angle, installation angle and installation position. Through the optimization of injection timing, a best end of injection (EOI) of the best open valve injection is discovered at full load conditions and at a speed of 1 200 r/min~5 600 r/min. When the EOI is 420°, the engine power is increased by 1%~2% compared with that of the closed valve injection, and total hydrocarbons (THC) emissions are almost not affected. While the closed-valve injection has better power performance at the speed of 6 000 r/min.

摘要: 通过对一台气道喷射式汽油机应用模拟仿真方法,研究了喷油器参数对混合气形成过程的影响;通过试验分析,研究了不同燃油喷射时刻对全负荷工况下动力性与排放的影响。仿真与试验结果表明:喷油器改进设计后,通过对喷油器喷雾角度、安装角度及安装位置的调整,能够形成开阀喷射所需要的均质混合气;通过对燃油喷射时刻的寻优发现,在全负荷工况,转速为 1 200~5 600 r/min 下,存在最佳开阀喷射的喷油结束角 (EOI),EOI 为 420°曲轴转角时,发动机动力性与闭阀喷射相比能够提升了 1%~2%,且 THC 排放保持不变。而转速为 6 000 r/min 时,闭阀喷射的动力性较佳。

关键词: 内燃机;喷油策略;气道喷射;动力性能

Key words: IC engine; fuel injection strategy; port fuel injection; power performance

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.03.012

中图分类号: TK417+.12

文献标识码: A

0 概述

近年来国内外汽油机研究与开发的热点,如缸

内直喷技术、可变气门升程技术等都使发动机动力性与经济性有了较大提高。然而,受到成本与维护费用的影响,传统的自然吸气气道喷射汽油机结合

收稿日期: 2015-07-22

作者简介: 万 滨(1985—),男,硕士生,主要研究方向为内燃机工作过程优化与控制, E-mail: wanbin@rdc.faw.com.cn;

于秀敏(联系人),男,教授, E-mail: yuxm@jlu.edu.cn。

可变气门正时技术仍是目前 A 级车市场的主流。即便汽车消费不断升级,新的细分市场不断出现,A 级车产品也仍然是众多消费者购车的首选。GB 27999—2014《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》中规定,为推动我国先进技术应用,持续降低我国乘用车燃料消耗量,要求我国乘用车平均燃料消耗量水平在 2020 年下降至 0.05 L/km 左右,对应二氧化碳排放约为 120 g/km。综上,无论从市场表现还是从政策法规上看,发展 A 级车产品及提升小型化汽油机产品的品质仍具有一定的市场价值。

汽车行业的技术创新与核心竞争能力最重要的体现之一是开发出成本低、车主接受意愿高、性能全面优化和强化、能满足最严格的排放法规限值要求、具有良好的经济性的发动机。这是一项系统工程,其实质是应用各种研发技术,挖掘出内燃机的全部潜力,由此研发出新一代高性能发动机^[1]。传统理念认为,气道喷射汽油机是将燃油喷到进气道及气门壁面,从进气道和气门壁面及进气中吸收热量,挥发形成均匀的混合气后由进气门进入燃烧室内;而缸内直喷发动机是将燃油直接喷到燃烧室内,由于燃油大部分在燃烧室内气化,气化吸热冷却了吸入的空气,使空气密度增加,提高了充气效率,同时汽油在气缸内气化冷却了燃烧室,从而降低了发动机的爆震倾向^[1-2]。本文中以 CA4GA 型汽油机为研究对象,采用新思路,为实现高的动力输出,在全负荷工况下,使自然吸气发动机与缸内直喷发动机一样,燃油在进气行程中喷射,通过燃油喷射策略的改变提高发动机的动力性。

气道喷射汽油机燃油进入缸内被认为有四种方式:剥离雾化、喷雾雾化、油膜挤入、气门和缸盖底部油膜沉积^[3-4]。文献[5]将气道喷射汽油机混合气形成原理总结为传送机理和转化机理。气道喷射汽油机燃油喷射过程对缸内燃烧过程的影响非常显著。文献[6]进行了气道喷射式汽油机油气混合过程的三维瞬态数值模拟,通过对模拟发动机在 3 500 r/min 全负荷工况下闭阀喷射与开阀喷射对混合气浓度的影响指出,不同的喷射模式对应的缸内燃油的存在形式有所不同。闭阀喷射模式下进入缸内的是燃油蒸气,压缩至点火时刻缸内的混合气浓度分布较为均匀;开阀喷射模式下缸内燃油虽然以燃油蒸气为主,但出现了燃油液滴和附壁油膜的形式,点火时刻缸内空燃比变化范围较大,分层明显。此外,全负荷工况下进气流体的流速对燃油喷射的影响不容忽视。采用开阀喷射时,燃油附壁现象比较明显,进入缸中的燃油量只占到了一半左

右,该工况下燃油喷射时刻与气流流速的匹配十分重要^[6]。本文将针对开阀喷射时燃油雾化不均匀的问题,对燃油喷射系统改进设计并进行模拟分析,再进行试验验证开阀喷射对动力性与排放的影响。

1 试验概述

试验中,使用 Kistler 6115BFD16A41 缸压传感器结合电荷放大器测量缸内压力。试验燃料为 93# 汽油。试验样机基本参数见表 1。试验过程中用到的主要仪器设备及参数见表 2。试验用排气分析仪的主要技术参数见表 3。

表 1 试验样机基本参数

项目	参数
发动机型式	直列 4 缸,自然吸气,电控多点喷射,进排气可变气门正时
缸径/mm×行程/mm	73×80
压缩比	11.2
排量/mm ³	1 339
连杆长度/mm	129.5

表 2 主要仪器设备

仪器设备	型号	主要参数
光电编码器	AVL 365	精度:0.01°
燃油流量计	AVL KAMA 4 000	测量范围 0.12~40.00 L/h,精度±0.1%
交流电力测功机	HORIBA DYNAS3 LI145	最高转速 8 000 r/min,最大转矩 370 N·m
温度传感器	K 型热电偶	测量范围 0~1 300 ℃,精度±0.75%
宽域氧传感器	BOSCH LSU4.2	测量范围 λ≥0.7
电荷放大器	AVL 3058	测量范围±10 V,精度<0.01% F. S.

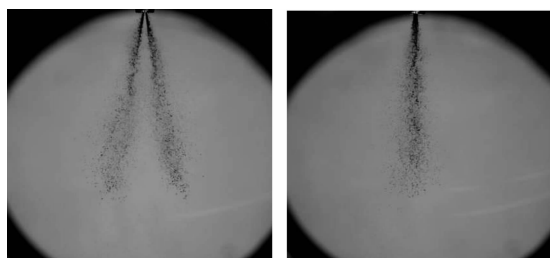
表 3 HORIBA MEXA-7500DEGR 排气分析仪技术参数

目标排放物	分析模块	测量原理	测量精度
CO	AIA-722	不分光红外分析仪	0.01%
CO ₂	AIA-722	不分光红外分析仪	0.1%
HC	FIA-725A	氢火焰离子化分析仪	1×10 ⁻⁶
NO _x	CLA-755A	化学发光分析仪	1×10 ⁻⁶
O ₂	MPA-720A	顺磁分析仪	0.1%

2 燃料供给系统的改进设计及试验研究

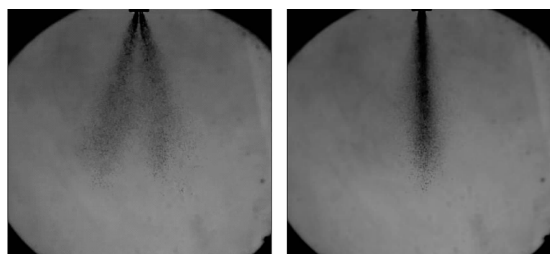
为了在短时间内形成均质混合气,需要使燃油雾化更加细化。在喷油压力不变的情况下,将原来的喷油器由 4 孔改为 12 孔。喷雾特性对比如图 1~图 4 所示。新 12 孔喷油器索特(Sauter)粒径 SMD^[7]为原 4 孔喷油器的 1/2 左右,说明新 12 孔喷

油器雾化性能比原 4 孔喷油器提高近 1 倍。



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 1 原 4 孔喷油器喷雾形状



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 2 新 12 孔喷油器喷雾形状

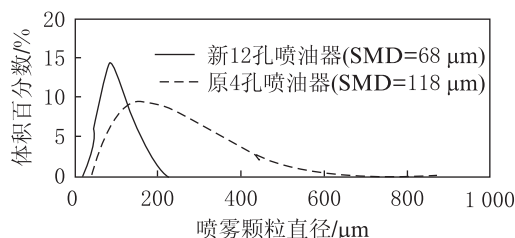


图 3 体积百分数对比

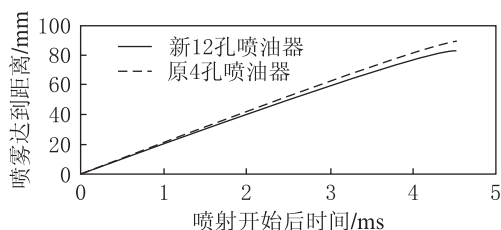


图 4 喷雾颗粒贯穿度对比

3 混合气形成过程的模拟研究

3.1 开阀喷射喷油器的调整参数

为提高开发效率,减少动态计算数目,以定常流的计算流体动力学(CFD)解析方法进行分析优化喷油器参数。为减少开阀喷射湿壁量,提高喷雾目标精度,需要优化的喷油器的参数有喷雾角度、安装角度及安装位置,如图 5 所示。

3.2 喷油器的喷孔数目对比

图 6 和图 7 分别为 4 孔喷油器与 12 孔喷油器

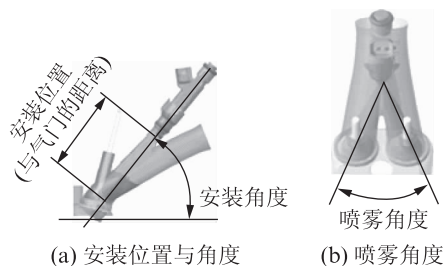


图 5 喷油器的喷雾角度、安装角度及安装位置

的喷雾状态对比,其中喷雾角度为 20° ,安装角度为 50° ,安装位置为 82 mm。从两种喷油器喷雾状态可以看出,12 孔喷油器喷雾颗粒更加细化,但是两者都有较多的油滴和油膜附着在喷油器安装槽、气道和气缸壁上,并形成不均匀的混合气流入气缸内。

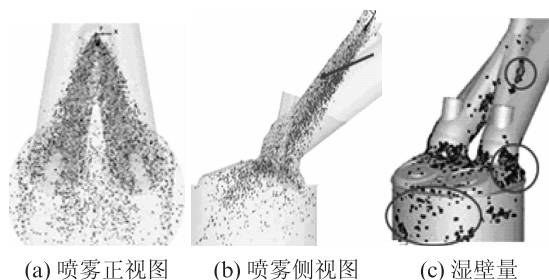


图 6 原 4 孔喷油器喷雾状态

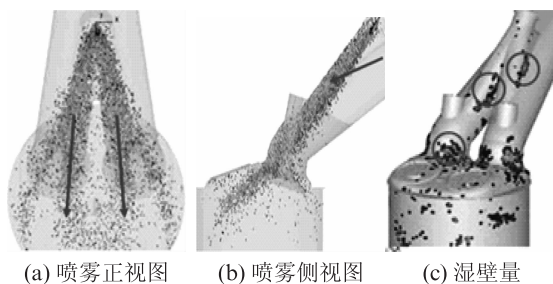


图 7 新 12 孔喷油器喷雾状态

3.3 喷油器的喷雾角度调整

为使均匀的混合气流入气缸内,将 12 孔喷油器的喷雾角度由原来的 20° 调整为 25° ,安装角度与安装位置不变,调整前后的喷雾状态如图 8 和图 9 所示。调整后的混合气较为均匀地进入缸内,气道和气缸壁上的油膜相对较少,但喷油器安装槽上的油膜却相对增加。

3.4 喷油器的安装角度调整

为减少喷油器安装槽上的油膜附着,将 12 孔喷油器安装角度由原来的 50° 调整为 54° ,喷雾角度为优化后的 25° ,安装位置不变。调整前后的喷雾状态如图 10 和图 11 所示。

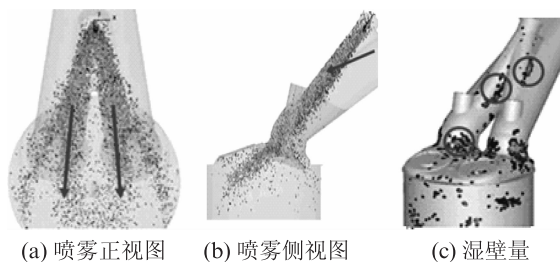


图8 喷雾角度为20°时喷雾状态

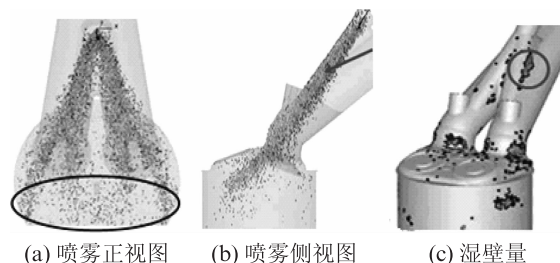


图9 喷雾角度为25°时喷雾状态

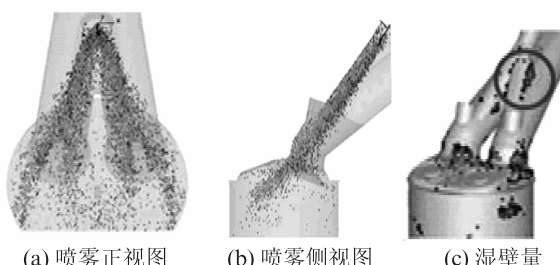


图10 安装角度为50°时喷雾状态

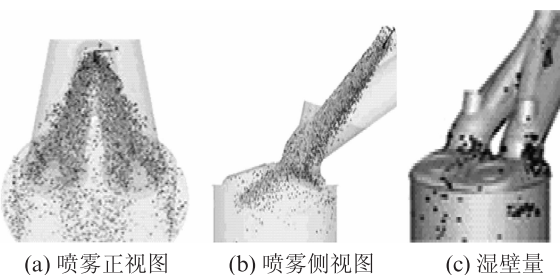


图11 安装角度为54°时喷雾状态

3.5 喷油器的安装位置调整

将12孔喷油器安装位置由原来的82 mm调整为65 mm,即将喷嘴加长了17 mm,喷雾角度为优化后的25°,安装位置为优化后的54°。喷雾状态如图12和图13所示。因气流对喷雾的影响减小,喷油器安装槽、气道及气缸壁上的油滴都明显减少。

4 喷油控制策略的试验研究

4.1 喷油定时的相位寻优与选择

试验工况见表4。图14~图26分别为1 200~6 000 r/min下喷油定时的相位寻优过程。试验结果

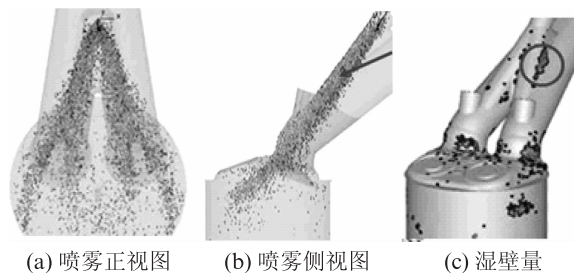


图12 安装位置为82 mm时喷雾状态

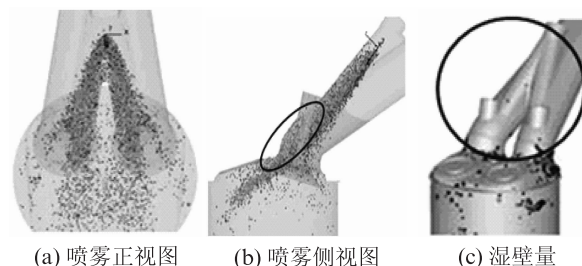


图13 安装位置为65 mm时喷雾状态

表明:在1 200~5 600 r/min下,喷油结束角(EOI)由闭阀喷射曲轴转角为270°增大至开阀喷射510°的过程中,转矩呈现增大趋势,且在EOI=420°时存在拐点。而随着EOI增大,THC排放也在低转速时也存在增大趋势,同样在EOI=420°时存在拐点,超过拐点后THC排放恶化比较严重。在6 000 r/min时,随着EOI增大,转矩呈下降趋势,THC排放无明显变化。

表4 试验工况

项目	参数
转速/(r·min ⁻¹)	1 200~6 000
油门踏板开度/%	100
汽油标号	93
过量空气系数	0.8~0.9
冷却液温度/℃	88
机油温度/℃	95

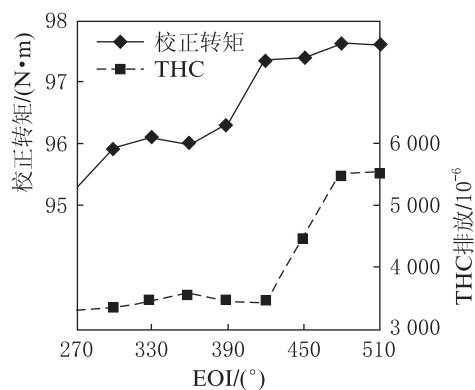


图14 1 200 r/min 喷油时刻相位寻优

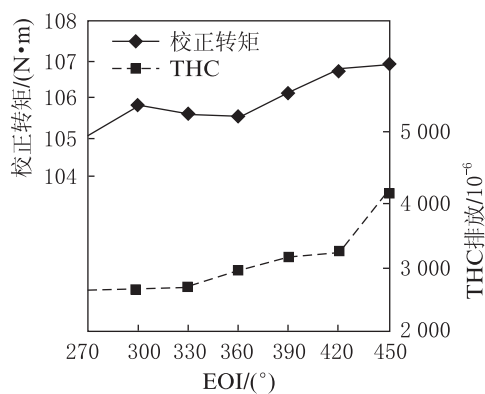


图 15 1 600 r/min 喷油时刻相位寻优

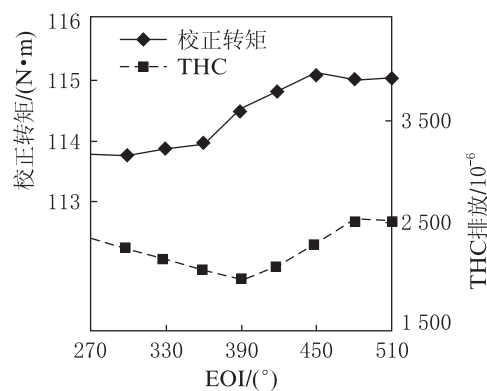


图 19 3 200 r/min 喷油时刻相位寻优

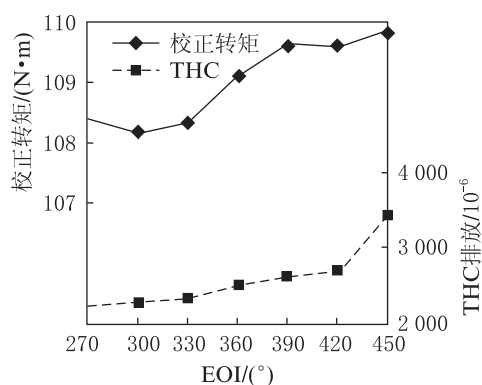


图 16 2 000 r/min 喷油时刻相位寻优

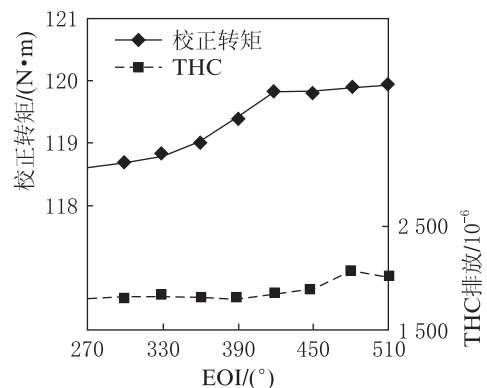


图 20 3 600 r/min 喷油时刻相位寻优

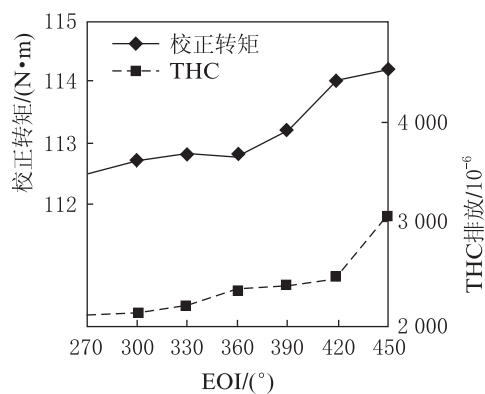


图 17 2 400 r/min 喷油时刻相位寻优

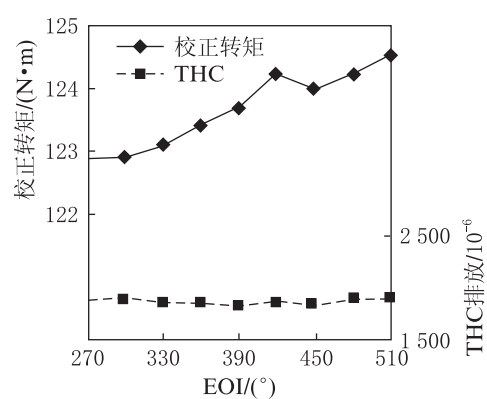


图 21 4 000 r/min 喷油时刻相位寻优

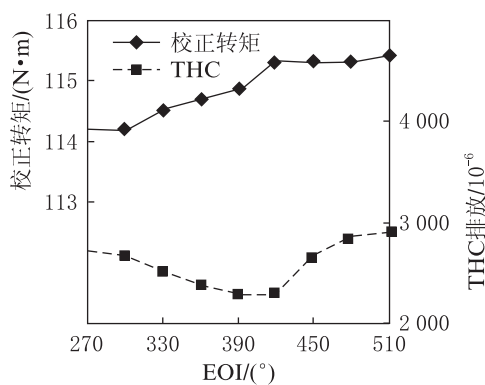


图 18 2 800 r/min 喷油时刻相位寻优

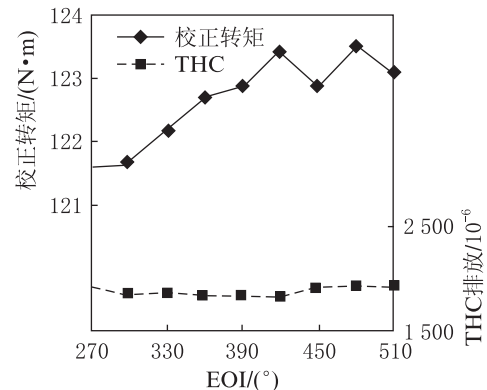


图 22 4 400 r/min 喷油时刻相位寻优

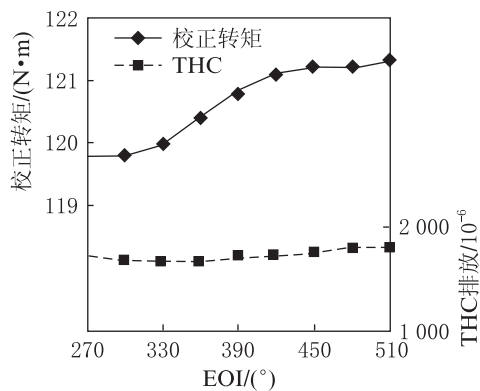


图 23 4 800 r/min 喷油时刻相位寻优

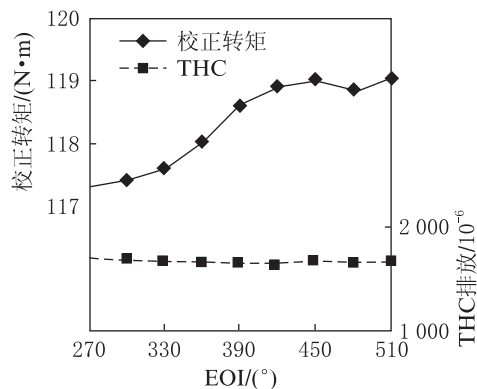


图 24 5 200 r/min 喷油时刻相位寻优

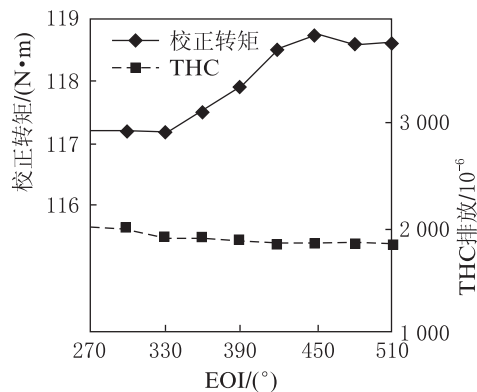


图 25 5 600 r/min 喷油时刻相位寻优

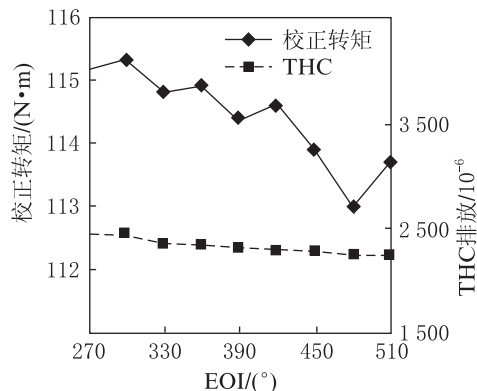


图 26 6 000 r/min 喷油时刻相位寻优

结合转矩与 THC 排放变化,1 200~5 600 r/min 下应采用 $EOI=420^\circ$ 的开阀喷射,6 000 r/min 应采用 $EOI=270^\circ$ 的闭阀喷射。优化后的喷油时刻如图 27 所示。

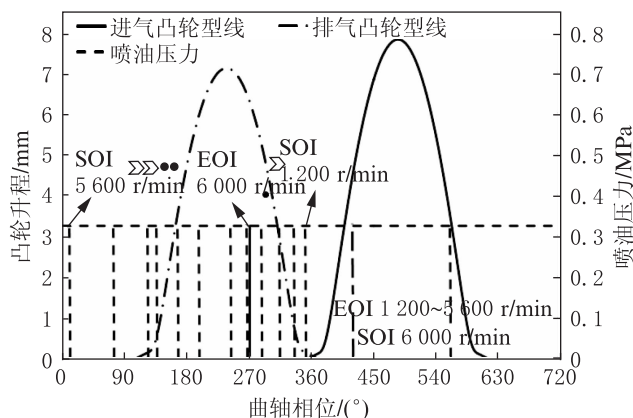


图 27 1 200~6 000 r/min 喷油时刻选取

4.2 开阀喷射与闭阀喷射性能对比

如图 28 所示,在 1 200~5 600 r/min 下,开阀喷射比闭阀喷射转矩提升了 1~2 N·m,而 6 000 r/min 时开阀喷射转矩下降。平均有效压力 (BMEP) 变化趋势与转矩相同,如图 29 所示。混合气的形成过程在低转速与高转速下不同,随着转速的升高,为使燃油与空气有充足的时间混合,同时随进气流进入气缸,越早喷油越好^[8]。图 30 为充气效率对比情况。低转速时开阀喷射充气效率比闭阀喷射高,且较为明显,随着转速升高,两者充气效率逐渐接近,6 000 r/min 时开阀喷射充气效率低于闭阀喷射。THC 排放对比如图 31 所示。开阀喷射与闭阀喷射测量结果相近,说明燃油雾化充分,混合气也比较均匀。50% 放热率 (MBF50)、燃烧波动率 (COV) 对比分别如图 32 和图 33 所示。开阀喷射与闭阀喷射测量结果基本相同。

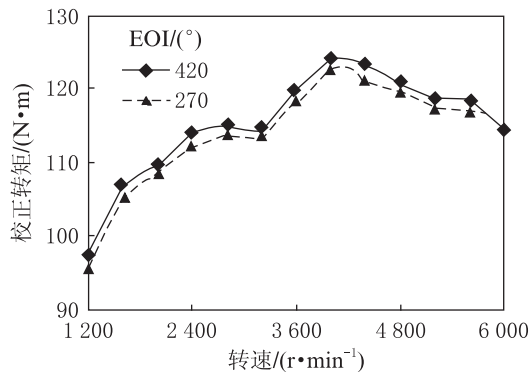


图 28 开阀喷射与闭阀喷射转矩对比

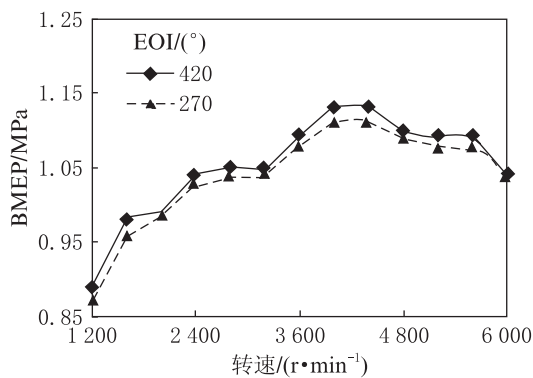


图 29 开阀喷射与闭阀喷射平均有效压力对比

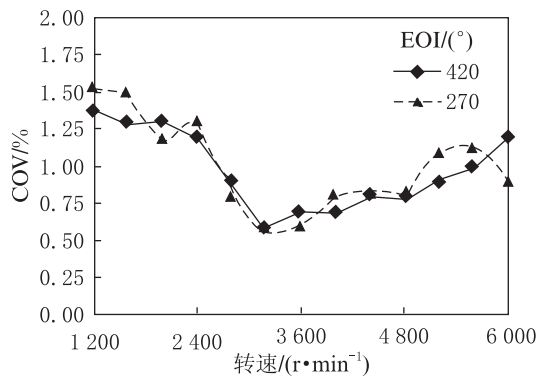


图 33 开阀喷射与闭阀喷射 COV 对比

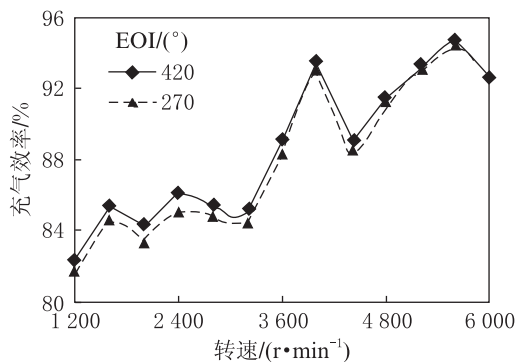


图 30 开阀喷射与闭阀喷射充气效率对比

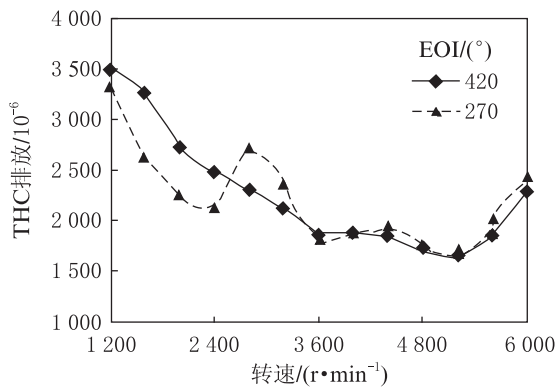


图 31 开阀喷射与闭阀喷射 THC 排放对比

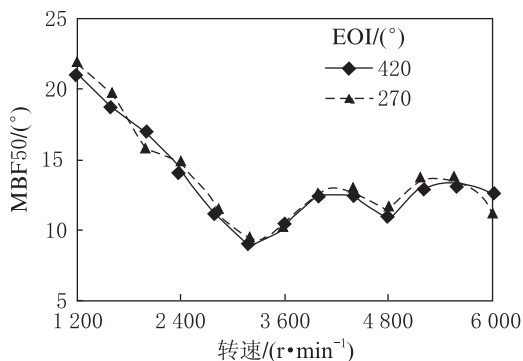


图 32 开阀喷射与闭阀喷射 MBF50 对比

5 结论

(1) 喷油器喷射参数的改进,可优化喷油器雾化性能,满足开阀喷射时短时间内形成均质混合气的要求。

(2) 通过模拟分析,优化喷油器安装参数,可使喷雾目标更准确,减少开阀喷射湿壁量,形成均质混合气。

(3) 发动机在全负荷工况中低转速下,开阀喷射使发动机动力性提升了 1%~2%,同时 THC 排放保持与闭阀喷射同等水平;而在最高转速下,闭阀喷射的动力性能较佳。

参考文献:

- [1] 李骏. 汽车发动机节能减排先进技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011.
- [2] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill Science Engineering, 1988.
- [3] SHIN Y, CHENG W, HEYWOOD J. Liquid gasoline behavior in the engine cylinder of a SI engine[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1994,941872.
- [4] MEYER R, HEYWOOD J. Liquid fuel transport mechanisms into the cylinder of a firing port-injected engine, Detroit, Michigan, USA, engine during start up [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1997,970865.
- [5] COSTANZO V, HEYWOOD J. Mixture preparation mechanisms in a port fuel injected engine[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2005,2005-01-2080.
- [6] 王晓瑜. 进气道喷射式汽油机油气混合过程三维瞬态数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [7] 刘峥,王建昕. 汽车发动机原理教程[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [8] LIPPERT A M, EITAHRY S H, HUEBLER M S. et al. Development and optimization of a small-displacement spark-ignition direct-injection engine—full-load operation. [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2004,2004-01-0034.