

喷射策略对缸内直喷汽油机 油耗和颗粒排放的影响

段伟^{1,3}, 牛贝妮², 解方喜³, 洪伟³

1. 菲亚特克莱斯勒动力科技研发(上海)有限公司, 上海 201807;
2. 上海宏景智驾信息科技有限公司, 上海 201804;
3. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025

摘要:通过优化缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)汽油机的喷油正时和喷射压力,研究喷射策略对降低汽油机油耗和排放的粒子数量(particle number, PN)的影响。研究表明:对于单次喷射策略,适当提高喷射压力和增大喷油起始相位,可以降低PN排放和改善油耗,喷油起始相位过小或过大均不利于PN排放,转速小于3000 r/min时,优化的喷油起始相位为压缩上止点前曲轴转角 $280^{\circ}\sim 300^{\circ}$,转速为3000~5000 r/min时,优化的喷油起始相位为压缩上止点前曲轴转角 $300^{\circ}\sim 320^{\circ}$;对于二次喷射策略,合理调整第二次喷油结束相位和喷射比例,可以改善经济性和排放性,随着发动机转速和负荷的增加,减小第二次喷油结束相位和提高喷射比例,可以获得较好的经济性和排放性。

关键词:GDI;喷油正时;喷射压力;污染物排放;PN

中图分类号:TK411;TK417

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2021)06-0042-07

引用格式:段伟,牛贝妮,解方喜,等.喷射策略对缸内直喷汽油机油耗和颗粒排放的影响[J].内燃机与动力装置,2021,38(6):42-48.

DUAN Wei, NIU Beini, XIE Fangxi, et al. Effect of injection strategy on fuel consumption and PN emission of GDI engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021,38(6):42-48.

0 引言

随着轻型汽车污染物排放和油耗限值标准的实施^[1-2],内燃机产业面临严峻挑战,行驶中的车辆也要进行污染物排放检测^[3-5]。为了满足日益严格的排放和油耗要求,目前轻型车用汽油机主要通过增压直喷^[6]、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)^[7]等机内净化技术配合汽油机颗粒捕集器(gasoline particulate filter, GPF)^[8-10]后处理系统。与进气道多点喷射(port fuel injection, PFI)汽油机相比,缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)汽油机排放的粒子数量(particle number, PN)相对较多,冷机工况的PN排放约为车辆I型试验(国六)PN排放的50%~70%。随着GDI汽油机强化指标的不断提高,汽油机低速大负荷时出现爆震和早燃的概率越来越高^[11]。早燃发生时,缸内压力和温度急剧升高,并伴有剧烈的压力波动和噪声,早燃对火花塞和活塞造成极大破坏,限制了汽油机性能改善^[12-13]。为了实现GDI汽油机的高效清洁工作,必须合理优化和匹配发动机关键控制参数(燃油喷射正时、喷射压力、EGR率等),改善排放性能、降低燃油消耗^[14]、减小早燃和超级爆震的概率^[15]。

本文中以某小型GDI增压汽油机为研究对象,研究发动机常用工况下喷射策略对汽油机性能的影响,通过优化发动机喷油相位、喷油比例和喷油压力达到降低油耗和排放的目标。

收稿日期:2021-04-02

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20200403150SF)

第一作者简介:段伟(1985—),男,山西大同人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机工作过程控制与优化,E-mail:yunfeic422@126.com。

1 试验设备与试验方法

试验在一台直列3缸GDI增压汽油机上进行,汽油机技术参数如表1所示。

表1 汽油机技术参数

缸径/mm	行程/mm	连杆长度/mm	排量/L	压缩比	增压器类型	冷却方式
70	86.5	146.3	0.999	10.5:1	涡轮增压	水冷

试验通过AVL测功机、油耗仪、燃烧分析仪、排放物和颗粒物分析仪等设备采集发动机功率、燃油消耗量、缸内燃烧压力、排放物和颗粒数等数据,选用INCA公司的592通信采集设备连接发动机电控单元(electronic control unit, ECU)调整喷油相位和喷射压力,并通过INCA软件采集发动机关键运行参数,应用AVL冷却水管理系统控制发动机冷却水温度为90℃。试验边界条件如表2所示。

表2 边界条件

大气压力/kPa	气体常数 $R/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	进气温度/℃	中冷后温度/℃	过量空气系数
101.3	287	25±2	40±2	1.0

以发动机压缩上止点作为参考基准点,定义基准点对应的曲轴转角为0°,定义基准点前喷油开始时刻与基准点之间的曲轴转角为喷油起始相位 θ_{SOI} ,定义基准点前喷油结束时刻与基准点之间的曲轴转角为喷油结束相位 θ_{EOI} ,定义喷射比例为主喷油量(第一次喷油量)与后喷油量(第二次喷油量)之比。对于单次喷射策略,试验主要优化喷油起始相位 θ_{SOI} 和喷射压力 p_r ;对于二次喷射策略,在单次喷射策略优化的基础上,优化第二次喷油结束相位 θ_{EOI} 和两次燃油喷射比例 γ_r ,稳态测试点测试发动机转速和相对进气量 Q_r ,转速测试范围为1000~5000 r/min,测试间隔为1000 r/min; Q_r 为0.3~1.5,间隔为0.3。 Q_r 计算如下:

$$Q_r = Q_a / Q_t$$

式中: Q_a 为实际进气量,L; Q_t 为理论进气量,L,可通过理想空气状态方程计算。

试验主控制参数如表3所示。

表3 试验主要控制参数

冷却水温度/℃	发动机转速/(r·min ⁻¹)	Q_r	p_r /MPa	$\theta_{SOI}/(^{\circ})$
90	1000~5000	0.3~1.5	5、10、15、20	340、320、300、280、260

在不同的喷射压力下,采集不同喷油起始相位 θ_{SOI} (以对应的曲轴转角计算)时发动机进入稳态工况后的参数,通过AVL_PUMA系统记录所有测试点的发动机性能、排放、燃烧等参数,记录时间为20s。选择6个测试工况点(分别记作TEST-1、TEST-2、TEST-3、TEST-4、TEST-5、TEST-6)进行重点分析,测试工况点的发动机转速和 Q_r 如表4所示。

表4 测试工况点的发动机转速和 Q_r

工况点	发动机转速/(r·min ⁻¹)	Q_r	工况点	发动机转速/(r·min ⁻¹)	Q_r
TEST-1	2000	0.3	TEST-4	2000	0.6
TEST-2	4000	0.6	TEST-5	2000	1.2
TEST-3	5000	0.3	TEST-6	2000	1.5

2 试验结果及分析

2.1 单次喷射策略

TEST-1 工况发动机不同单次喷射策略(喷油起始相位和喷射压力)下比油耗、燃烧稳定性、PN 和 HC 排放如图 1 所示,图中以平均有效压力变动系数(coefficient of variation, CoV)评价燃烧稳定性,平均有效压力变动系数为缸内平均有效压力的标准差与缸内平均有效压力之比。

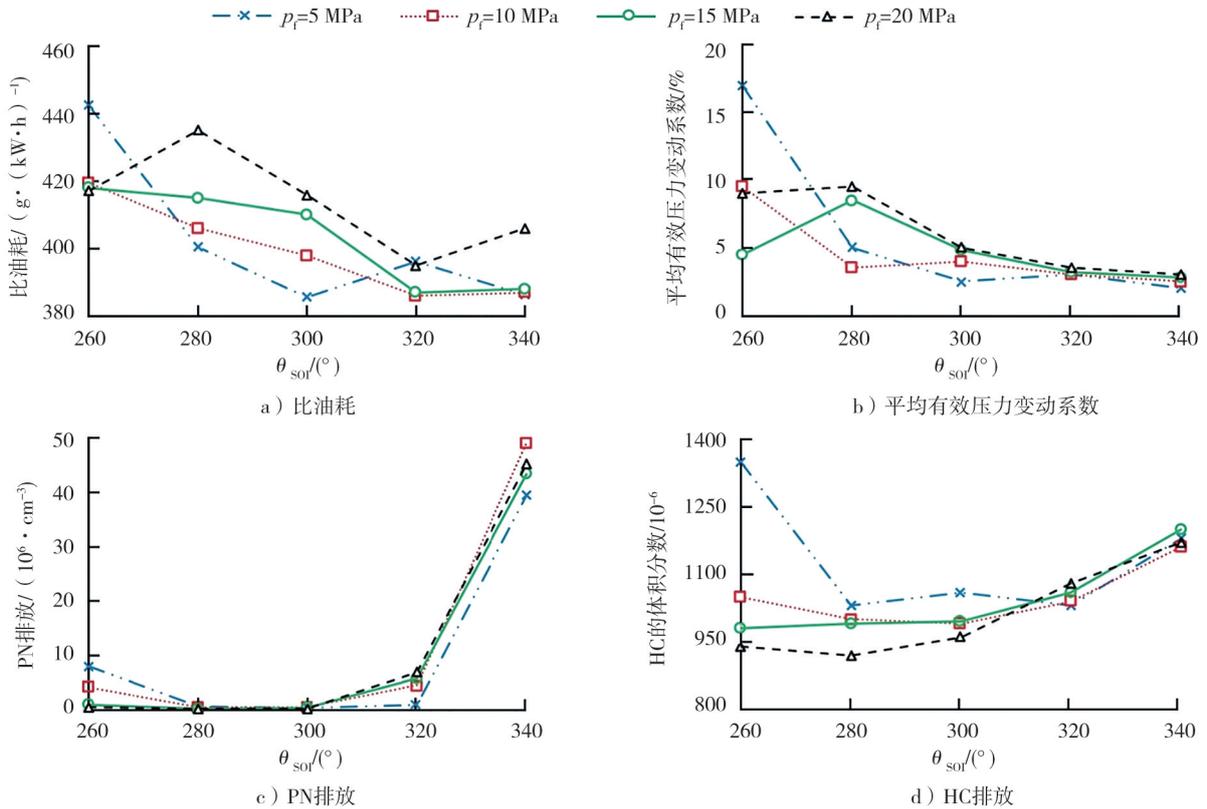


图 1 TEST-1 工况不同单次喷射策略时发动机比油耗、平均有效压力和排放对比

由图 1 可知: θ_{soi} 过小或过大均不利于降低比油耗, θ_{soi} 过小,油气混合时间较短,易形成过浓和过稀区域,可燃混合气较少,燃烧不充分,比油耗较高; θ_{soi} 过大接近排气上止点时,燃油喷射撞击到活塞表面的机会增加,形成较多油膜,不利于燃油和空气充分混合形成较多的可燃气体,造成比油耗偏高, θ_{soi} 适当增加($\theta_{soi} = 300^\circ \sim 320^\circ$)时比油耗较低;比油耗对 p_f 敏感度较低, θ_{soi} 增加可以改善燃烧稳定性,燃烧稳定性的变化规律与 p_f 有一定的相关性,但影响较小;提高 p_f 可降低 PN 和 HC 排放, $\theta_{soi} = 280^\circ \sim 300^\circ$ 时 PN 排放最低, θ_{soi} 过小或过大都有可能增加 HC 和 PN 排放,但对 HC 排放的影响相对较弱,这是由于水温及缸内温度较高,易于燃油蒸发形成较多均质混合气,降低 HC 排放。

中、高转速和中、大负荷(TEST-2、TEST-3)工况不同单次喷油策略下比油耗和 PN 排放对比如图 2、3 所示。

由图 2、3 可知, p_f 提高能够降低比油耗, $\theta_{soi} = 320^\circ$ 时比油耗最低; $\theta_{soi} < 320^\circ$ 时,提高 p_f 可以降低 PN 排放, $\theta_{soi} = 300^\circ \sim 320^\circ$ 时 PN 排放最低。和图 1 运行工况相似, θ_{soi} 过小或过大,都有可能增加 PN 排放。 θ_{soi} 增加,对 PN 排放的影响较弱,但 p_f 较高(15~20 MPa)时,增加 θ_{soi} ,可能导致 PN 排放恶化。

依据比油耗、HC 和 PN 排放以及获得的最小平均有效压力变动系数(原则上应小于 5%)优化 θ_{soi} 和 p_f ,以达到最佳的燃油消耗、较低的排放和较好的燃烧稳定性。在提高 p_f 时,最小喷油脉宽(minimum fuel pulse width, MFPW)应大于 $400 \mu s$,且不应进入非线性区域,不同转速和 Q_r 对应的优化 θ_{soi} 和 p_f 如表 5、6 所示。

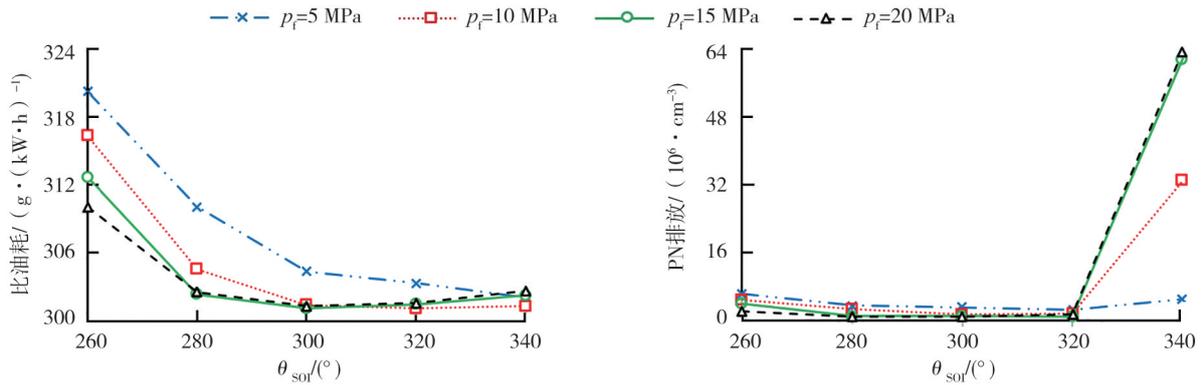


图 2 TEST-2 工况不同单次喷射策略时比油耗和 PN 排放对比

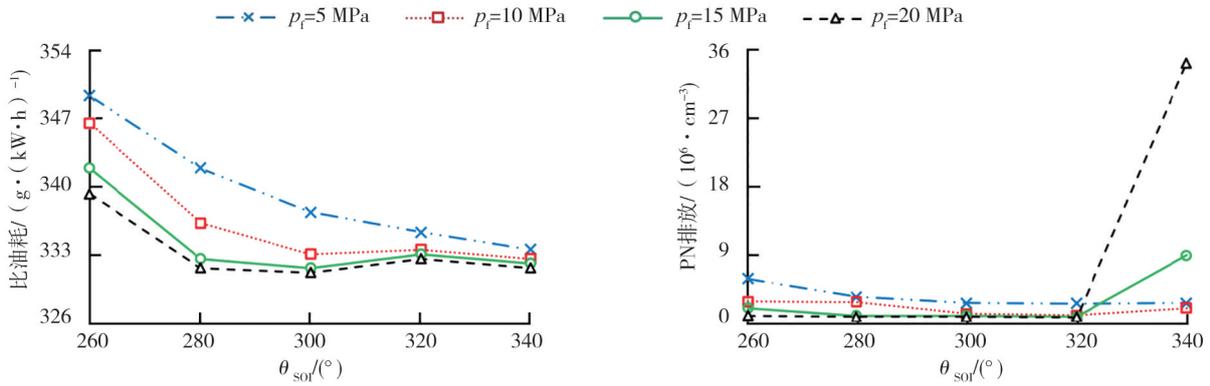


图 3 TEST-3 工况不同单次喷射策略时比油耗和 PN 排放对比

表 5 不同转速和 Q_r 对应的优化 θ_{soi} /°

Q_r	发动机转速/($r \cdot \min^{-1}$)				
	1000	2000	3000	4000	5000
0.3	300	300~320	300	300~320	300~320
0.6	280~300	300	300	300~320	300~320
0.9	280	280~300	300	300~320	320
1.2	280	280~300	300	300~320	320
1.5	280	280~300	300	320	320

表 6 不同转速和 Q_r 对应的优化 p_f /MPa

Q_r	发动机转速/($r \cdot \min^{-1}$)				
	1000	2000	3000	4000	5000
0.3	10	10~15	10~15	15	15
0.6	15	15	15~20	15~20	20
0.9	20	20	20	20	20
1.2	20	20	20	20	20
1.5	20	20	20	20	20

2.2 二次喷射策略

在单次喷射策略优化的基础上,调整第二次喷油结束相位 θ_{EOI} 和喷射比例 γ_f ,试验控制参数如表 7 所示。

表 7 试验控制参数

冷却水温度/°C	发动机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	Q_r	喷油结束相位 θ_{EOI} /(°)	γ_f
90	1000,2000,3000	0.3,0.6,0.9,1.2,1.5	200,180,160,140,120,100,80	0.6,0.7,0.8

TEST-4 工况,发动机 $\theta_{soi} = 300^\circ$ 、 $p_f = 15$ MPa 时,不同 θ_{EOI} 和 γ_f 下比油耗、燃烧稳定性、HC 和 PN 排放的对比如图 4 所示。由图 4a)可知:适当增加 θ_{EOI} 可以降低比油耗,但 θ_{EOI} 过小或过大都不利于比油耗改善,这是因为随着 θ_{EOI} 的减小,油气混合时间较短,易形成不均匀混合气,且喷雾有可能撞击活塞,形成油膜,不利于油气充分混合;随着 θ_{EOI} 不断增加,后喷油量有可能干扰主喷油量,造成喷油器频繁动作,喷油量不准确,不利形成当量空燃比混合气; $\theta_{EOI} = 120^\circ \sim 140^\circ$ 时,比油耗较低。由图 4a)、4b)可知: θ_{EOI} 对燃烧稳定性和比油耗的影响有一定的相关性,随着 γ_f 的提高,可以降低比油耗, $\gamma_f = 0.8$ 时,比油耗相对较

低。由图4c)、d)可知:减小 θ_{EOI} ,可以降低HC排放,但对PN排放影响不大,过大的 θ_{EOI} ,有可能增加HC排放, θ_{EOI} 减小或增加,对PN排放的影响相对较小。

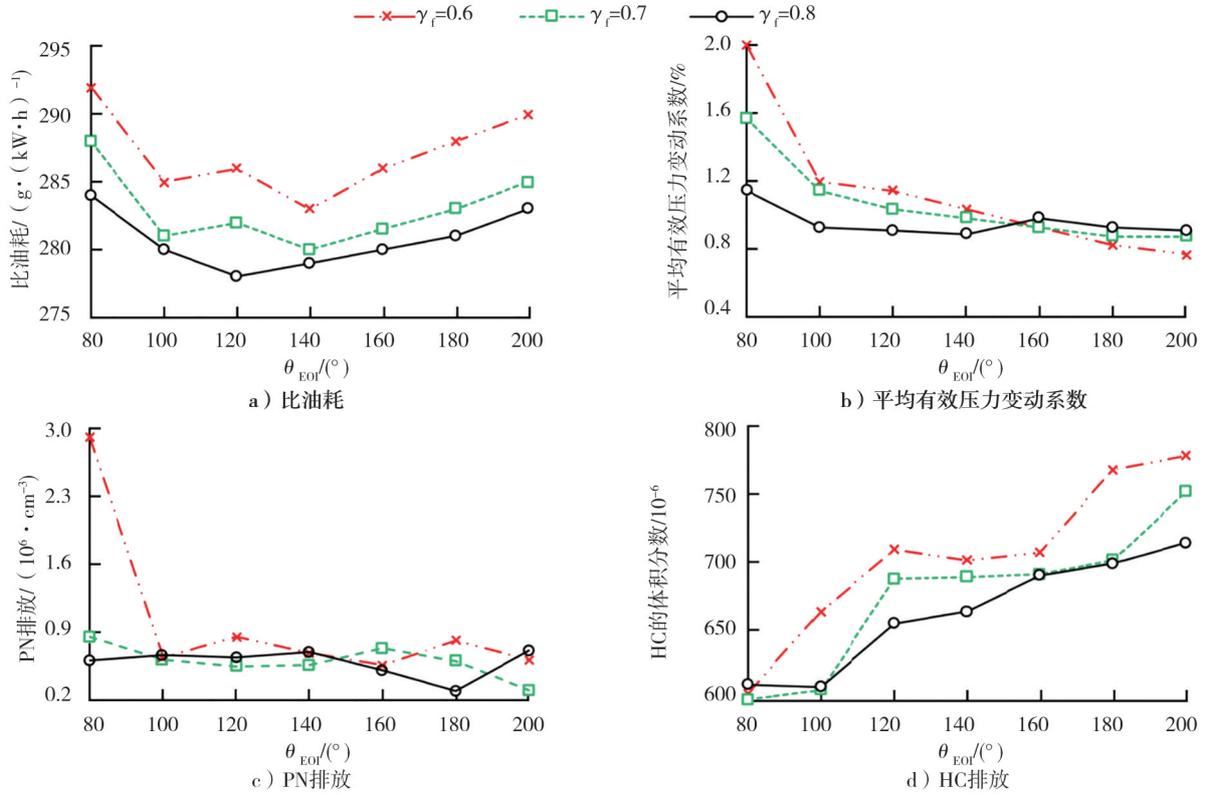


图4 TEST-4 工况不同二次喷射策略下比油耗、平均有效压力和排放对比

TEST-5 和 TEST-6 工况, $\theta_{SOI} = 290^\circ$ 、 $p_f = 20 \text{ MPa}$ 下,不同 θ_{EOI} 和 γ_f 对发动机比油耗、燃烧稳定性、HC 和 PN 排放的影响如图 5、6 所示。

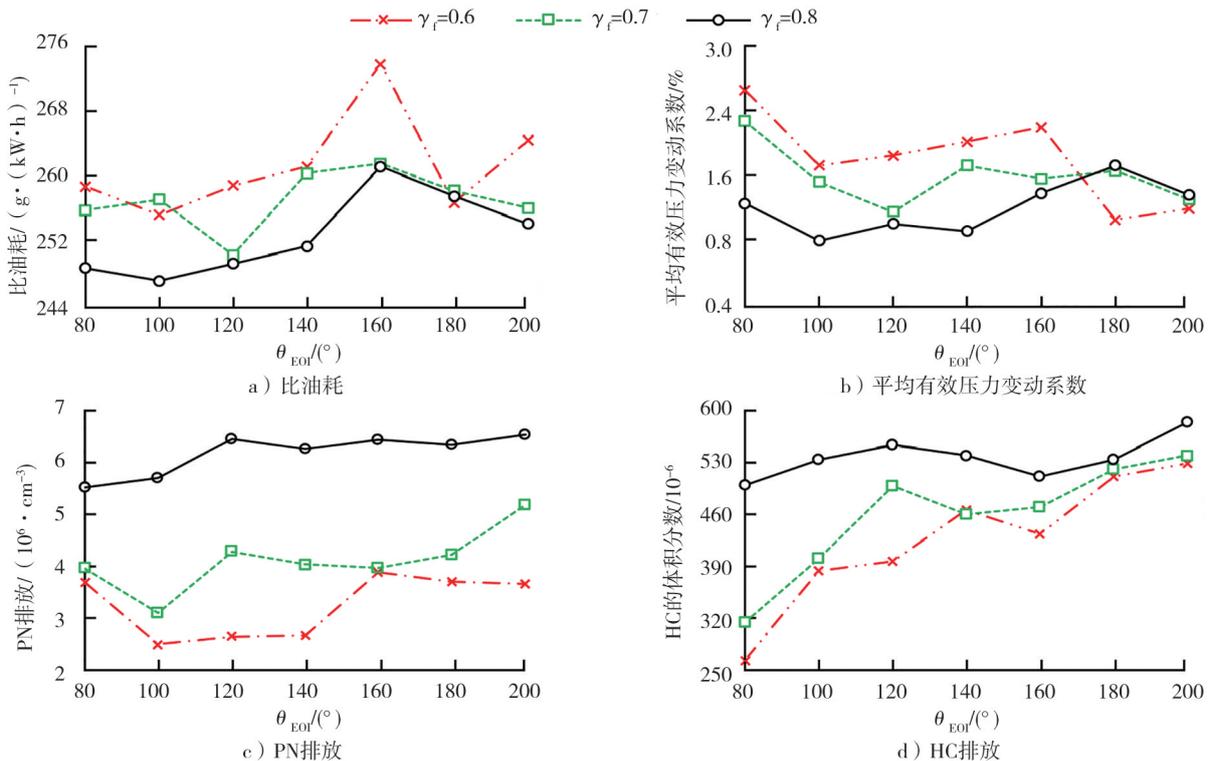


图5 TEST-5 工况不同二次喷射策略下比油耗、平均有效压力和排放对比

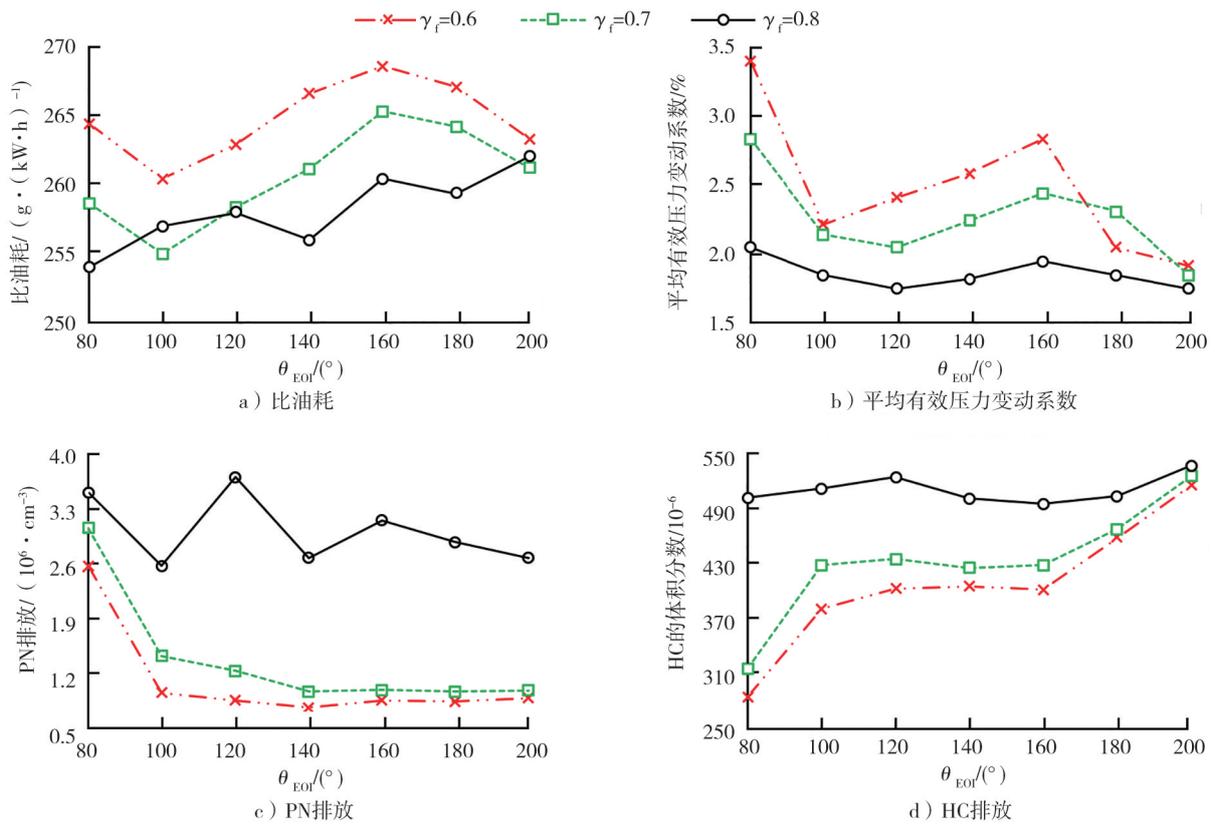


图6 TEST-6工况不同二次喷射策略下比油耗、平均有效压力和排放对比

相对于低负荷,中高负荷时 θ_{EOI} 对比油耗影响较低, γ_f 影响较大。在 $\theta_{EOI} = 80^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 和 $\gamma_f = 0.8$ 时, 比油耗最低。当 γ_f 降低时,可改善 PN 和 HC 排放,随着 θ_{EOI} 的减小,PN 排放可能增加,HC 有可能降低,当增加 θ_{EOI} ,HC 排放略增加,PN 排放略降低,但整体上, θ_{EOI} 对 PN 排放影响相对较低。随着发动机负荷的增加, θ_{EOI} 向减小方向移动,可以获得较好的经济性和排放性。

与单次喷油策略优化原则相同,在获得最佳喷射比例时,不应该使第二次喷油的最小喷油脉宽进入非线性区域。

不同转速和 Q_r 对应的优化喷油结束相位 θ_{EOI} 和喷油比例 γ_f 如表 8、9 所示。

表 8 不同转速和 Q_r 对应的优化 θ_{EOI} $^{\circ}$

Q_r	发动机转速/($r \cdot min^{-1}$)		
	1000	2000	3000
0.3	160	140	120
0.6	140	120	100
0.9	120	100	100
1.2	100	80	80
1.5	80	80	80

表 9 不同转速和 Q_r 对应的优化 γ_f %

Q_r	发动机转速/($r \cdot min^{-1}$)		
	1000	2000	3000
0.3	0.7	0.8	0.8
0.6	0.7	0.8	0.8
0.9	0.7	0.8	0.8
1.2	0.7	0.8	0.8
1.5	0.7	0.8	0.8

3 结论

- 1)适当提高喷射压力可以有效降低 PN 排放。
- 2)对于单次喷射策略,适当增加喷油起始相位并耦合较高喷射压力,可以降低油耗、改善 PN 和 HC

排放。

3) 对于二次喷射策略,合适的第二次喷油结束相位和喷射比例,可以改善经济性和排放性;随着发动机转速和负荷的增加,减小第二次喷油结束相位和提高喷射比例,可以获得较好的经济性和排放性。

参考文献:

- [1] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境出版社,2016.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 乘用车燃料消耗量限值:GB 19578—2021[S]. 北京:中国环境科学出版社,2021.
- [3] 姚志良,永亮,贺克斌,等. 宁波市实际道路下汽车排放特征的研究[J]. 环境科学学报,2006,26(8):1229-1234.
- [4] 王海鲲,傅立新,周昱,等. 应用车载测试系统研究轻型机动车在实际道路上的排放特征[J]. 环境科学,2008,29(10):2970-2974.
- [5] 许雪利,司福帅,马雁,等. NO_x 传感器测量实际道路 NO_x 排放的试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(1):21-25.
- [6] 尹子明,余伟,张春丽,等. 缸内直喷发动机正时系统设计及验证[J]. 内燃机与动力装置,2020,37(5):23-28.
- [7] XIE Fangxi, HONG Wei, SU Yan, et al. Effect of external hot EGR dilution on combustion, performance and particulate emissions of a GDI engine[J]. Energy Conversion and Management, 2017,142:69-81.
- [8] SUAREZ-BERTOIA R, LAHDE T, PAVLOVIC J, et al. Laboratory and on-road evaluation of a GPF-equipped gasoline vehicle [J]. Catalysts,2019,9(8):678.
- [9] 闫广义,张汉桥,蒋茂玓,等. 汽油机颗粒捕集器降低粒子数量试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2020,37(2):66-71.
- [10] 马志豪,尹振龙,杜维新,等. 金属型 GPF 对 GDI 发动机颗粒物微观特性的影响[J]. 内燃机学报,2021,39(2):130-137.
- [11] GAUTAM T K, DEREK B. Pre-ignition and 'super-knock' in turbocharged spark-ignition engines[J]. International Journal of Engine Research,2012,13(4):399-414.
- [12] 张志福,舒歌群,梁兴雨,等. 增压直喷汽油机超级爆震现象与初步试验[J]. 内燃机学报,2011,29(5):422-426.
- [13] 张健,虞坚,滕勤. 利用二次喷射抑制增压直喷汽油机超级爆震的试验研究[J]. 车用发动机,2013(4):56-59.
- [14] XIE Fangxi, ZHENG Wenliang, CHEN Hong, et al. Effects of split and single injection strategies on particle number emission and combustion of a GDI engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers:Part D:Journal of Automobile Engineering,2019,233(5):1100-1114.
- [15] 李元平,平银生,尹琪. 增压缸内直喷汽油机早燃及超级爆震试验研究[J]. 内燃机工程,2012,33(5):63-66.

Effect of injection strategy on fuel consumption and PN emission of GDI engine

DUAN Wei^{1,3}, NIU Beini², XIE Fangxi³, HONG Wei³

1. FCA Powertrain Technologies (Shanghai) R&D Co., Ltd., Shanghai 201807, China;

2. Shanghai Hong Jing Intelligent Drive Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201807, China;

3. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

Abstract: Based on a small turbocharged gasoline direct injection (GDI) engine, the effects of injection strategy on the reduction of fuel consumption and particle number (PN) emission are studied by optimizing injection timing and injection pressure. The results show that, for the single injection strategy, the increase of injection pressure and advancing the initial injection phase could effectively reduce PN emission and improve fuel consumption, but an excess earlier or later injection phase could lead to a deterioration of PN emission. For the engine speed lower than 3000 r/min, the optimal initial injection phase is 280°-300° before top dead center of

(下转第 58 页)