

可变截面涡轮增压器与废气再循环 对柴油机排放的影响

楼狄明¹, 郭石磊^{1,2}, 谭丕强¹, 胡志远¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 联合汽车电子有限公司, 上海 201206)

摘要: 以一台重型柴油机为试验对象, 研究可变截面涡轮增压器(VGT)和废气再循环(EGR)阀门开度对柴油机增压比、空燃比、燃油消耗率及 NO_x 、CO、HC、 CO_2 和烟度等排放特性的影响。研究表明, 随着EGR阀门开度的增大, 增压比、空燃比降低, 经济性变差。EGR阀门开度和VGT阀门开度对 NO_x 排放影响很大, 随EGR阀门开度和VGT阀门开度增大, NO_x 排放的体积分数显著降低, 但HC、CO、 CO_2 的体积分数和烟度升高。为实现降低 NO_x 排放的同时控制燃油消耗率和烟度的升高, 可在中等负荷时选择EGR阀门开度50%、VGT阀门开度45%的控制策略; 在高负荷时选择EGR阀门开度75%、VGT阀门开度55%的控制策略。

关键词: 重型柴油机; 废气再循环; 可变截面涡轮增压器; 排放特性

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Effects of VGT/EGR on Emissions from Diesel Engine

LOU Diming¹, GUO Shilei^{1,2}, TAN Piqiang¹, HU Zhiyuan¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. United Automotive Electronic Systems Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: The effects of variable geometry turbine (VGT)/exhaust gas recirculation (EGR) on pressure ratio, air-fuel ratio, specific fuel consumption, and emissions of NO_x , CO, HC, CO_2 and smoke from a heavy duty diesel engine have been investigated. The results show that pressure ratio and air-fuel ratio decrease, and fuel economy deteriorates with the increase of the opening of the EGR valve. NO_x emission can be strongly affected by the opening of the EGR valve and VGT valve. NO_x emission can be greatly reduced by increasing the opening of the EGR valve and VGT valve, and there is good logarithmic relationship between decline of volume concentration of NO_x and the opening of EGR valve.

However, HC, CO, CO_2 and smoke emissions are increased. In order to lower NO_x emission, while effectively controlling fuel economy and smoke emission, 50% of the opening of the EGR valve combined with 45% of the opening of the VGT valve is suitable at medium load, and 75% of the opening of the EGR valve combined with 55% of the opening of the VGT valve is suitable at high load.

Key words: heavy duty diesel engine; exhaust gas recirculation; variable geometry turbine; emission characteristics

柴油机具有燃油消耗低、转矩输出高、可靠性好的特点, 得到了广泛应用^[1], 汽车柴油化倾向也越来越明显^[2]。但由于其排放量大、对环境污染严重, 柴油机污染物的排放法规越来越严格^[3]。 NO_x 是柴油机主要排放物之一^[4], 有效控制 NO_x 排放是柴油机排放控制的重点。

废气再循环(EGR)是降低柴油机 NO_x 排放的有效方法^[5-6]。但EGR会导致颗粒(PM)和碳氢(HC)排放升高^[7-8], 且对于涡轮增压柴油机, 在一些工况下难以实现足够的EGR。可变截面涡轮增压器(VGT)可有效解决涡轮增压柴油机低速转矩不足、瞬态响应迟缓的问题^[9-10], 在全工况范围内实现与柴油机的良好匹配^[11-12]。同时通过改变柴油机涡轮与压后压差, 进一步调节柴油机负荷工况下的EGR, 能够进一步降低柴油机的排放^[13]。

基于以上分析, 通过试验研究不同VGT阀门开度和EGR阀门开度对重型车用柴油机燃油经济性、 NO_x 、CO、HC、 CO_2 和烟度等排放的影响。

1 试验装置与研究方法

试验研究在一台直列6缸、增压中冷、带有

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AAA111706)

第一作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为发动机排放控制。E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

通讯作者: 郭石磊(1991—), 男, 工程硕士, 主要研究方向为发动机排放控制及后处理技术。E-mail: 13guoshilei@tongji.edu.cn

VGT 和 EGR,排量为 11.7 L 的电控高压共轨重型柴油机上进行,该柴油机缸径为 126 mm,行程为 155 mm,压缩比为 17:1,最大扭矩为 1 579 N·m,最大扭矩时对应转速为 1 200~1 500 r·min⁻¹,额定功率为 282 kW,额定功率时对应转速为 2 100 r·min⁻¹. 试验台架示意图如图 1 所示.

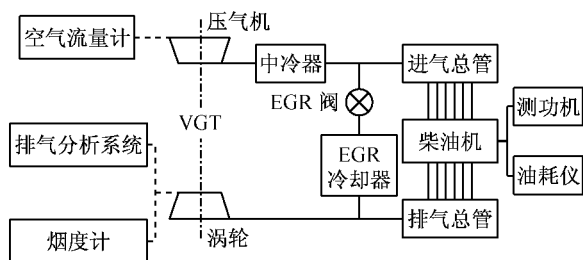


图 1 柴油机台架试验系统

Fig.1 Test system of diesel engine

台架系统主要设备包括: HORIBA Dynas3 HD460 电力测功机以及台架辅助设备. 测试仪器包括 HORIBA FQ2100DP 燃油消耗仪、HORIBA MEXA-7100DEGR 排气分析系统以及 AVL-439 不透光烟度计等. 电力测功机实时测量柴油机的转矩和功率等数据,排气分析系统和烟度计测量尾气中气态物的浓度和不透光烟度.

台架试验所使用的燃料为市售国 V 柴油,其主要理化特性指标如表 1 所示.

表 1 燃料主要理化指标

Tab.1 Fuel properties

20 °C 密度/ (kg·m ⁻³)	20 °C 运动黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	十六烷值	硫含量/ (mg·kg ⁻¹)
821.9	4.5	57.2	2.0

VGT 通过调节喷嘴环导向叶片转过的角度来调节涡轮有效流通截面,如图 2 所示,在低转速时,相当于一个快速反应的小涡轮;在高转速时,相当于一个高效率的大涡轮^[14]. VGT 改变进排气之间的压差,为增压柴油机在较宽广的工作范围内实现 EGR 提供了条件^[15]. 定义:VGT 阀门全关,涡轮有效流通截面最小为 100%开度;VGT 阀门全开,涡轮有效流通截面最大为零开度.

柴油机试验工况对应转速为常用的最大扭矩转速为 1 295 r·min⁻¹,对应负荷为中(50%)、高(100%)2 种负荷. 该试验工况下 NO_x 排放较高,需采用较大 EGR 率实现 NO_x 排放降低;但又由于增压压力较高,不采用 VGT 难以实现较大的 EGR 率. 通过柴油机标定系统,调整 VGT 阀门开度(θ_v)和 EGR 阀门开度(θ_e),2 种工况下 θ_v 分别为 40%,

45%,50%和 55%, θ_e 分别为 0,25%,50%,75%和 100%,研究 VGT 和 EGR 阀门开度对柴油机经济性和排放特性的影响. 并按照 NO_x、燃油消耗率、烟度等权值综合优化原则获得 2 种工况下柴油机综合性能最佳的 VGT 阀门开度和 EGR 阀门开度方案.

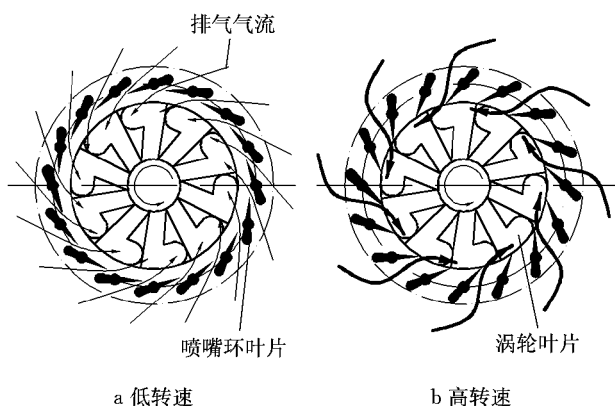


图 2 可变截面涡轮增压器示意图

Fig.2 Schematic diagram of variable geometry turbine

2 试验结果与分析

2.1 VGT 和 EGR 阀门开度对增压比、空燃比及燃油消耗率的影响

2.1.1 增压比

由图 3a 可见,在中等负荷工况下,随着 θ_v 增大,增压比升高, θ_e 为零时增幅最高为 15.3%;随着 θ_e 增大,增压比下降,在 θ_v 为 55%时降幅最高为 18.9%. 这是因为随着 θ_v 增大,涡轮等效流通面积变小,涡轮转速升高,转化废气做功的能力增强,压气机转速升高,增压压力不断增大. 而随着 θ_e 增大,流经涡轮的排气减少,导致涡轮做功能力下降,使得压气机转速下降,增压比降低.

由图 3b 可见,在高负荷工况下,增压比有明显提高,其最高增压比与中等负荷工况相比提高了 24.9%,同时, θ_v 对增压比的影响也更加明显. 随 θ_v 增大,增压比提高,最大增幅为 14.4%. 这是因为在高负荷工况下,柴油机排气总量和温度增加,涡轮前压力升高,此时涡轮做功能力增强, θ_v 变化造成的涡轮等效流通面积的改变对增压比影响更加明显.

2.1.2 空燃比

由图 4a 可见,在中等负荷工况下,随着 θ_e 的增大,空燃比下降明显, θ_v 为 55%时空燃比降幅最大达 39.7%. 这是因为随着 θ_e 增大,废气回流量增多使得进气减少,空燃比下降. θ_e 较小时,随 θ_v 增大,空燃比增大;而 θ_e 增大到 100%时,空燃比降低. 这

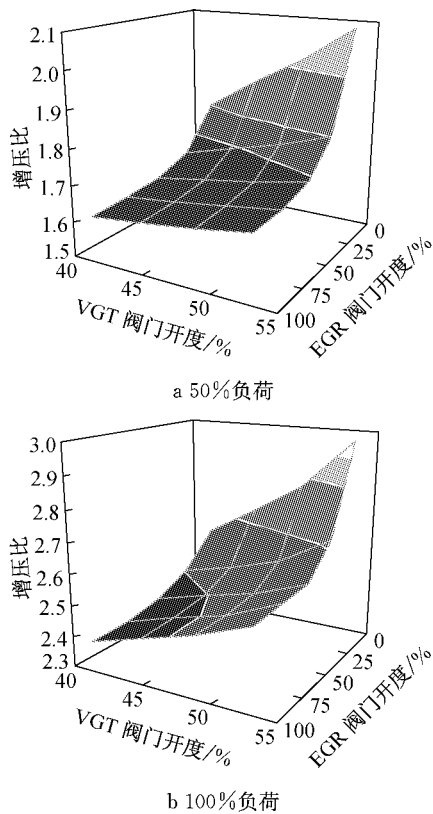


图 3 VGT 与 EGR 阀门开度对增压比的影响

Fig. 3 Effects of the opening of VGT and EGR valve on pressure ratio

是因为随 θ_v 增大,增压压力升高,进气量增大,但同时涡前压力升高,会使得废气回流量升高,且随着 θ_E 不断增大,VGT 影响废气回流的效果更加明显,这使得大 θ_E 时的空燃比有所降低。但总体来看,在中等负荷下,由于进气量充足, θ_v 对空燃比变化影响较小,不同 θ_E 下变化幅度在 10% 左右。

由图 4b 可见,与中等负荷工况相比,在高负荷工况下空燃比下降。 θ_E 增大导致废气回流增多,空燃比下降。随着 θ_v 增大,空燃比下降。这是因为 θ_v 增大会使泵气损失提高;另一方面使得涡前压力升高,涡前压力与压后压力间的压差增大,废气回流增多,导致空燃比下降。

2. 1. 3 燃油消耗率

由图 5a 可见,在中等负荷工况下,随着 θ_E 和 θ_v 增大,燃油经济性变差,燃油消耗率由 $212.2 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 增大到 $221.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,最高增幅为 4.4%。这是因为,一方面 EGR 系统引入缸内的废气量增大,废气对缸内混合气的稀释作用增强,同时混合气的比热容增大,滞燃期延长,导致柴油机经济性变差;另一方面,随着 θ_v 增大,柴油机排气背压增加,泵气损失增大,柴油机经济性变差,燃油消耗率升高。

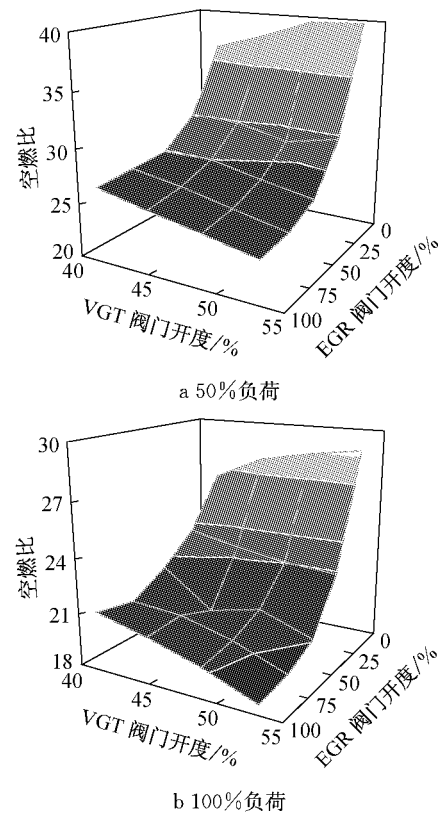


图 4 VGT 与 EGR 阀门开度对空燃比的影响

Fig. 4 Effects of the opening of VGT and EGR valve on air-fuel ratio

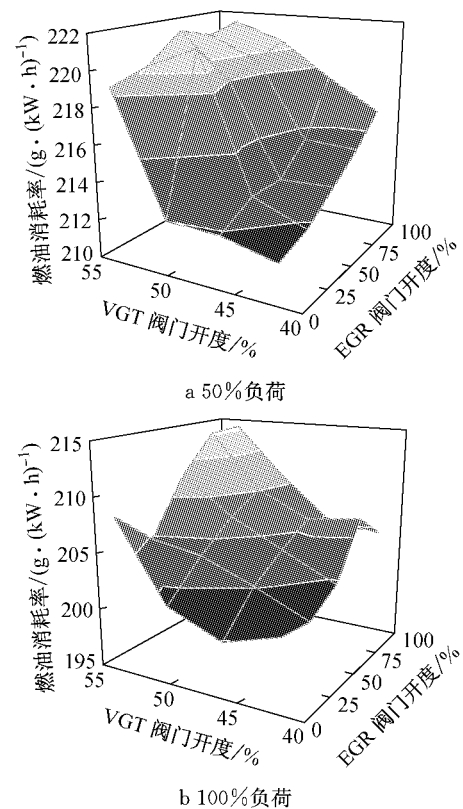


图 5 VGT 与 EGR 阀门开度对燃油消耗率的影响

Fig. 5 Effects of the opening of VGT and EGR valve on specific fuel consumption

由图 5b 可见,在高负荷工况下,由于缸内温度升高,热效率升高,相比于中等负荷工况,燃油消耗率有所降低.但由于空燃比降低, θ_E 和 θ_V 对燃油消耗率的影响更加明显,随着 θ_E 增大,燃油消耗率先升高,然后基本保持不变,其最高增幅为 3.8%.随着 θ_V 增大,燃油消耗率升高,其最高增幅为 4.5%.

2.2 VGT 和 EGR 阀门开度对排放的影响

2.2.1 氮氧化物

由图 6a 可见,在中等负荷工况下,随着 θ_V 和 θ_E 的增大, NO_x 体积分数降低. NO_x 产生条件为高温、富氧和高温持续时间.随着 θ_V 增大,涡前压力和压后压力都明显升高,但涡前压力升高幅度大于压后压力,这使得废气回流增多,同时 θ_E 增大也增加了废气回流量.废气的引入降低了缸内燃烧温度,同时减小了新鲜进气量,抑制了 NO_x 的生成, NO_x 体积分数降低.

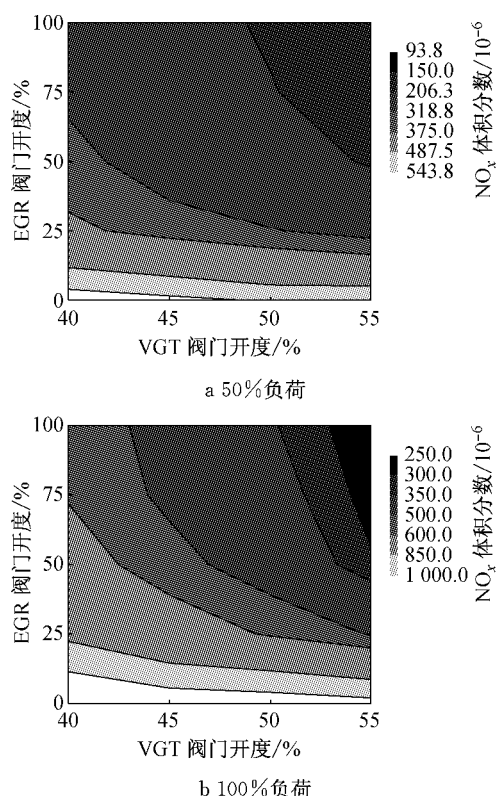


图 6 VGT 与 EGR 阀门开度对 NO_x 排放的影响

Fig.6 Effects of the opening of VGT and EGR valve on NO_x

由图 6b 可见,在高负荷工况下,由于喷油量增大,缸内温度升高, NO_x 体积分数与中等负荷工况相比有明显升高.在该工况下,由于排气能量大,涡轮做功能力增强, θ_E 增大使空燃比降低,继而影响 NO_x 排放的效果更为明显,不同 θ_V 下 NO_x 体积分数最高降低幅度达到 75.4%.虽然随着 θ_V 增大,增

压比升高,但其对废气回流量的影响更加明显,使得 NO_x 体积分数下降.

以各个 θ_V 下 θ_E 为零时的 NO_x 体积分数为基准,定义 θ_E 为 x' ,不同 θ_E 下 NO_x 体积分数的降幅为 y ,对 y 进行分析可以发现,其与 θ_E 呈现出很强的对数关系,如图 7 所示.

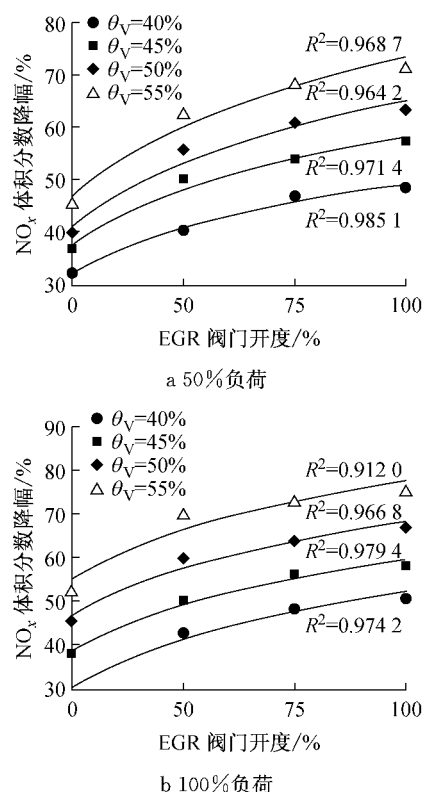


图 7 NO_x 体积分数降幅与 EGR 阀门开度的关系

Fig.7 Relationship between decline of volume concentration of NO_x and the opening of EGR valve

由图 7 可见,在 2 种工况下,随着 θ_V 的减小,回归方程的相关系数增大, θ_E 对 NO_x 体积分数的降幅影响的显著性提高.

在 2 种工况下,不同 θ_V 下 NO_x 体积分数的降幅与 θ_E 的回归方程如表 2 所示.

表 2 NO_x 体积分数的降幅回归方程

Tab.2 Regression equation of decline of volume concentration of NO_x

负荷	θ_V	回归方程
50%	40%	$y=12.081\ln t-6.2640$
	45%	$y=14.727\ln t-9.4270$
	50%	$y=17.256\ln t-14.2330$
	55%	$y=19.041\ln t-14.2590$
100%	40%	$y=15.853\ln t-20.496$
	45%	$y=14.913\ln t-8.8963$
	50%	$y=15.395\ln t-2.4997$
	55%	$y=16.262\ln t+2.8721$

由表 2 可见, θ_V 为 40% 和 45% 时, 在中等负荷下的回归方程对数项系数大于高负荷下的对数项系数; 而 θ_V 为 50% 和 55% 时正好相反. 这说明, 在中等负荷时较大的 θ_V 下 θ_E 对 NO_x 体积分数降幅影响更强; 而高负荷时较小的 θ_V 下 θ_E 对 NO_x 体积分数降幅影响更加明显.

2.2.2 一氧化碳

由图 8a 可见, 在中等负荷工况下, 随着 θ_E 的增大, 废气回流量增大, 虽然 θ_V 增大提高了增压比, 但涡前压力的升高使废气回流更加容易, 废气的引入降低了内的氧气含量, 燃料不完全燃烧, 导致 CO 体积分数急剧升高, 其最高增幅达到 677.5%.

由图 8b 可见, 与中等负荷工况相比, 在高负荷工况下 CO 体积分数明显上升. 随着 θ_E 和 θ_V 的增大, CO 体积分数上升. 且由于高负荷工况 VGT 对于提高增压比方面的效果更加明显, VGT 对于 CO 排放的影响也更加显著.

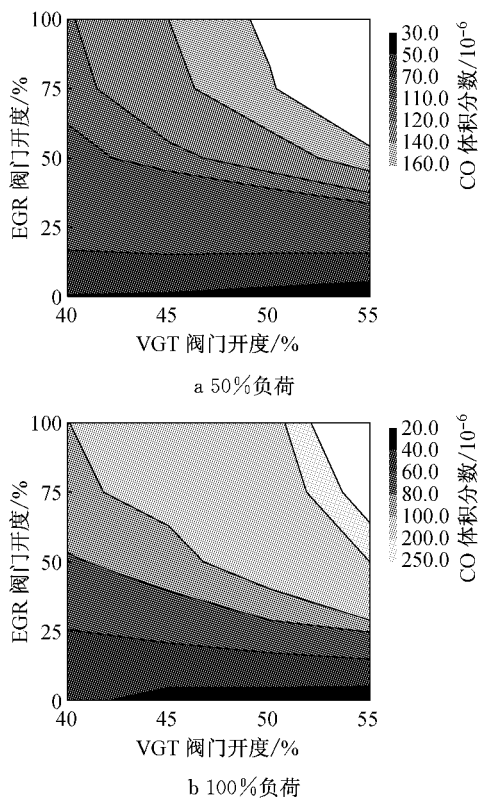


图 8 VGT 与 EGR 阀门开度对 CO 排放的影响

Fig.8 Effects of the opening of VGT and EGR valve on CO

2.2.3 碳氢

由图 9a 可见, 在中等负荷工况下, 随着 θ_E 增大, HC 体积分数先上升后小幅下降, 但总体呈上升趋势, 且均保持在 5×10^{-6} 左右. 这是因为随着 θ_E 和 θ_V 增大, 废气回流量增大, 对混合气的稀释作用增强,

由于空气不足, 燃烧火焰扩散不彻底, 导致排气中的 HC 上升.

由图 9b 可见, 在高负荷工况下, 随着 θ_E 和 θ_V 增大, HC 体积分数升高. 且与中等负荷工况相比, HC 体积分数有所降低, 这是因为在高负荷工况下, 排气能量提高, 涡轮效率提高使增压比上升, 改善了油气混合情况, 排气中的 HC 降低.

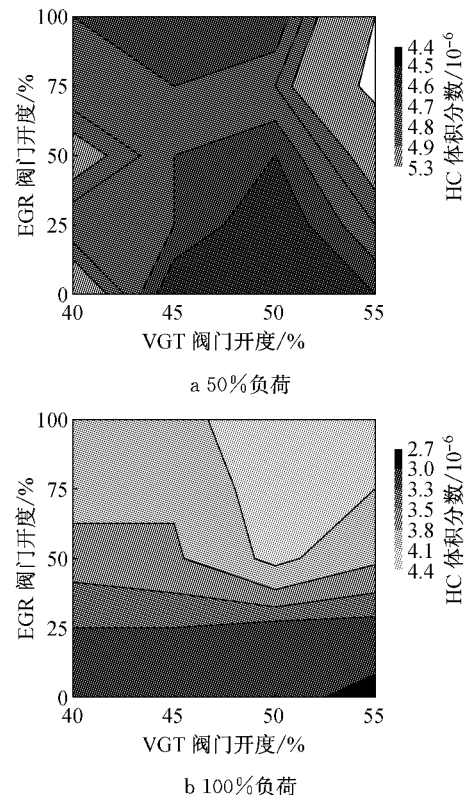


图 9 VGT 与 EGR 阀门开度对 HC 排放的影响

Fig.9 Effects of the opening of VGT and EGR valve on HC

2.2.4 二氧化碳

由图 10a 可见, 在中等负荷工况下, 随着 θ_E 增大, CO_2 体积分数明显升高, 最高增幅达到 70.9%. 这是因为随着 θ_E 增大, 废气回流量增多, 废气的引入稀释了新鲜进气, 降低了缸内燃烧温度, 使缸内燃烧恶化, 油耗升高, CO_2 体积分数升高. 随 θ_V 增大, CO_2 体积分数升高. 这是因为, 一方面 θ_V 增大会使废气回流量增大, 另一方面, θ_V 过大也会使泵气损失增大, 油耗升高, CO_2 体积分数升高.

由图 10b 可见, 与中等负荷工况相同, 由于废气回流增多, 缸内燃烧恶化, 油耗升高, 高负荷 CO_2 体积分数随着 θ_E 和 θ_V 的增大逐渐升高.

2.2.5 烟度

EGR 系统对于柴油机烟度的影响与空燃比密切相关. 由图 11a 可见, 在中等负荷工况下, 随着 θ_E

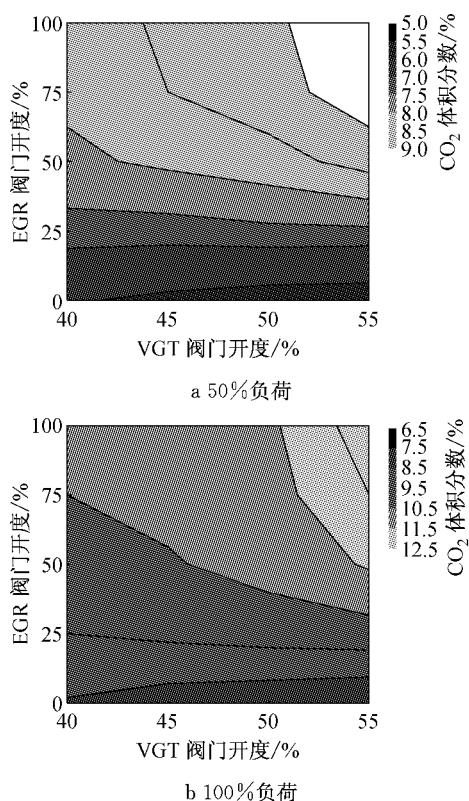
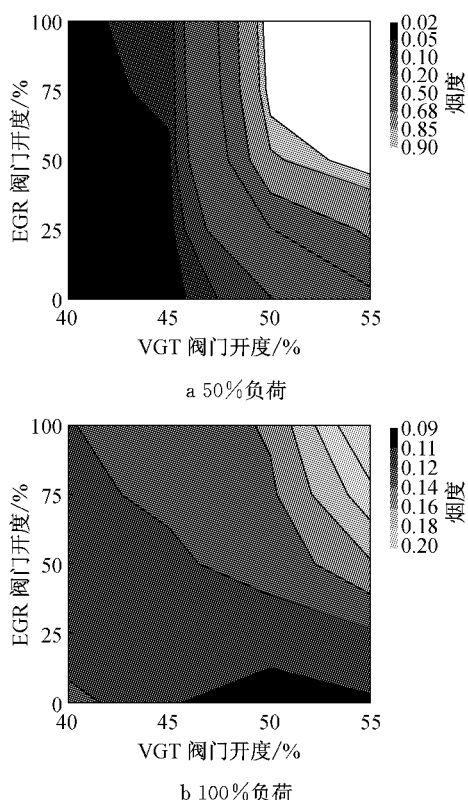
图10 VGT与EGR阀门开度对CO₂排放的影响Fig. 10 Effects of the opening of VGT and EGR valve on CO₂

图11 VGT与EGR阀门开度对烟度的影响

Fig. 11 Effects of the opening of VGT and EGR valve on smoke

增加,空燃比迅速降低,此时缸内氧气含量下降、燃烧温度降低,对碳烟的氧化造成了不利影响,柴油机烟度上升,烟度增幅为102%~418%。随着 θ_v 增大,废气回流增多,对缸内混合气的稀释作用增强,导致混合气局部过浓或过稀,柴油机烟度大幅增加。

由图11b可见,与中等负荷工况相比,由于高负荷工况喷油量增加,缸内燃烧温度升高,排气流量增大,涡轮转速升高,涡轮增压器的效率提高;同时缸内的气流运动增强,混合气均匀性提高,使柴油机烟度有所下降,烟度变化幅度减小,随着 θ_e 增加,烟度增幅为13%~109%。EGR阀门关闭时,随着 θ_v 增大,柴油机烟度下降,而EGR阀门打开时,烟度升高,这可能是因为VGT对EGR系统的影响程度比进气更加明显。

2.3 VGT和EGR阀门开度的优化

2.3.1 优化方案

在2种工况下,柴油机NO_x体积分数、燃油消耗率和烟度等3种主要参数最优值如表3所示。

表3 3种主要参数最优值

Tab.3 Optimal values of 3 main parameters			
负荷/ %	NO _x 体积分数/ 10 ⁻⁶	燃油消耗率/ (g · (kW · h) ⁻¹)	烟度
50	153.0	212.2	0.02
100	258.5	199.9	0.10

为实现降低NO_x排放的同时有效控制燃油消耗率和烟度的升高,从而获得2种工况下柴油机的综合最佳性能,对以上3种主要参数的权值进行综合优化,具体评价标准为:在同一工况下,各个参数与其最优值偏差百分比(变化率)之和最小,即

$$M = \sum_{i=1}^3 \alpha_i Y_i$$

式中: M 为评价指标; α_i 为变化率权值, $i=1,2,3$,分别对应NO_x体积分数、燃油消耗率、烟度; Y_i 为变化率。取 $\alpha_1=0.6$, $\alpha_2=\alpha_3=0.2$,可知: M 值越小,优化效果越好。

2.3.2 方案选择

通过计算得:在50%负荷时, M 最小值出现在EGR阀门开度为50%、VGT阀门开度为45%处,此时 M 最小值为0.71;在100%负荷时, M 最小值出现在EGR阀门开度为75%、VGT阀门开度为55%处,此时 M 最小值为0.22。在2种工况下3种主要参数的优化结果如表4所示。

由表4可见,在优化方案中,可考虑通过改善燃烧等方式进一步降低其油耗和排放。

表 4 3 种主要参数优化结果

Tab.4 Optimization results of 3 main parameters

负荷/ %	NO _x 体积分数/ 10 ⁻⁶	燃油消耗率/ (g · (kW · h) ⁻¹)	烟度
50	277.4	213.9	0.05
100	277.9	214.1	0.19

3 结论

(1)增压比随着 VGT 阀门开度的增大而升高,且高负荷工况更加明显;在高负荷下的空燃比随着 VGT 阀门开度的增大而降低;EGR 阀门开度增大,增压比和空燃比都降低。

(2)EGR 阀门开度对 NO_x 排放影响很大,随着 EGR 阀门开度增大,柴油机 NO_x 体积分数明显下降,高负荷时效果更为显著。由于随着 VGT 阀门开度增大废气回流增多,NO_x 排放下降。EGR 阀门开度与 NO_x 体积分数降幅有很好的对数关系。

(3)CO 和 CO₂ 排放随 EGR 阀门开度和 VGT 阀门开度的增大而升高,在低负荷下 HC 排放先升高,后小幅下降。

(4)在中等负荷时的烟度随 EGR 阀门开度和 VGT 阀门开度增大变化明显,在高负荷时烟度变化幅度降低。

(5)为实现降低柴油机 NO_x 排放的同时控制燃油消耗率和烟度的升高,控制策略选择为:在中等负荷时,EGR 阀门开度为 50%,VGT 阀门开度为 45%;在高负荷时,EGR 阀门开度为 75%,VGT 阀门开度为 55%。

参考文献:

- [1] Charlton S J. Developing diesel engines to meet ultra-low emission standards [C] // SAE 2005 Commercial Vehicle Engineering Congress and Exposition. Rosemont: SAE International, 2005: 2005-01-3628.
- [2] 楼狄明,石健,赵杰,等. 共轨柴油机燃用不同配比生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(6): 21. LOU Diming, SHI Jian, ZHAO Jie, *et al.* Performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fuelled with different proportion bio-diesel blends[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6): 21.
- [3] Barman J. Effective use of EGR rate to reduce NO_x and soot using multiple injections in light commercial diesel engines [C]//SAE 2013 Commercial Vehicle Engineering Congress and Exposition. Rosemont: SAE International, 2013: 2013-01-2424.
- [4] Brijesh P, Chowdhury A, Sreedhara S. Effect of ultra-cooled EGR and retarded injection timing on low temperature combustion in CI engines[C]// SAE 2013 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2013: 2013-01-0321.
- [5] Iwata H, Konstandopoulos A, Nakamura K, *et al.* Experimental study of physical and chemical properties of soot under several EGR conditions[C]// SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2014: 2014-01-1593.
- [6] Asad U, Tjong J. Transient build-up and effectiveness of diesel exhaust gas recirculation[C]// SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2014: 2014-01-1092.
- [7] Vitek O, Macek J, Polásek M, *et al.* Comparison of different EGR solutions[C]// SAE 2008 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2008: 2008-01-0206.
- [8] Osada H, Aoyagi Y, Shimada K, *et al.* Reduction of NO_x and PM for a heavy duty diesel using 50% EGR rate in single cylinder engine[C]// SAE 2010 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2010: 2010-01-1120.
- [9] 吴君华,黄震,王天灵. 可变喷嘴增压器与增压柴油机的匹配试验研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(1): 40. WU Junhua, HUANG Zhen, WANG Tianling. An experimental study on the matching of variable nozzle turbocharger with turbocharged diesel engine [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(1): 40.
- [10] 郭鹏江,王天灵,吴君华,等. 可变喷嘴涡轮增压器喷嘴环叶片位置对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 41. GUO Pengjiang, WANG Tianling, WU Junhua, *et al.* Effect of nozzle ring vane position of VNT on diesel engine performance [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(2): 41.
- [11] 陈贵升,郑尊清,尧命发,等. 不同增压方式下 EGR 对高压共轨柴油机燃烧和排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(6): 512. CHEN Guisheng, ZHENG Zunqing, YAO Mingfa, *et al.* Effects of EGR on combustion and emissions of a common-rail diesel engine based on different turbocharging systems[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(6): 512.
- [12] Kawamoto A, Takahashi Y, Koike Takaaki, *et al.* Variable geometry system turbocharger for passenger car diesel engine [C]// SAE 2001 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2001: 2001-01-0273.
- [13] Black J, Eastwood P G, Tufail K, *et al.* The effect of VGT vane control on pumping losses during full-load transient operation of a common-rail diesel engine[C]//8th International Conference on Engines for Automobiles. Naples: SAE International, 2007: 2007-24-0063.
- [14] 胡志远,宋浩,李金,等. 基于 VNT 的高压 EGR 系统对重型柴油机性能的影响[J]. 车用发动机, 2014(2): 68. HU Zhiyuan, SONG Hao, LI Jin, *et al.* Influence of VNT high pressure EGR system on heavy-duty diesel engine performance [J]. Vehicle Engine, 2014(2): 68.
- [15] 郑尊清,尧命发,高俊华,等. 采用 VNT/EGR 和 DOC 降低柴油机排放的试验[J]. 内燃机学报, 2010, 28(4): 289. ZHENG Zunqing, YAO Mingfa, GAO Junhua, *et al.* Experimental on reduction of diesel emissions by VNT/EGR and diesel oxidation catalyst [J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2010, 28(4): 289.