

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2022.03.009

EGR 技术在汽油机上的应用研究进展

周颖¹, 潘金元²

(1. 安徽工贸职业技术学院机械与汽车工程系, 安徽 淮南 232007; 2. 奇瑞汽车股份有限公司
汽车工程技术研发总院, 安徽 芜湖 241006)

摘要:随着燃油消耗法规和排放标准的日益严格,许多新技术被应用到汽油机上,在汽油机上应用排气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术已成为主流。在介绍高、低压 EGR 系统的基础上,首先阐述了 EGR 系统的工作原理,分析了 EGR 系统的特点;然后结合汽油机的通用曲线,提出了利用 EGR 策略改善有效燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)的方法,并分析和说明了应用 EGR 技术的减排作用。得出结论:EGR 技术将是现代汽油机技术的必要组成。

关键词:燃油消耗法规;排放标准;排气再循环;通用曲线;有效燃油消耗率

中图分类号:U464.171 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)03-0047-05

Research Progress on the Application of EGR Technology in Gasoline Engine

ZHOU Ying¹, PAN Jinyuan²

(1. Anhui Vocational & Technical College of Industry & Trade, Huainan, Anhui 232007, China;
2. Chery Automotive Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241006, China)

Abstract:With the increasingly stringent fuel consumption regulations and emission standards, many new technologies have been applied to gasoline engines. The application of exhaust gas recirculation (EGR) technology in gasoline engines has become the mainstream. Based on the introduction of high and low pressure EGR system, firstly, the working principle of EGR system is described, and the characteristics of EGR system are analyzed; Then combined with the general curve of gasoline engine, the method of using EGR strategy to improve brake specific fuel consumption (BSFC) is proposed, and the emission reduction effect of applying EGR Technology is analyzed and explained. It is concluded that EGR Technology will be a necessary part of modern gasoline engine technology.

Keywords:fuel consumption regulations; emission standards; EGR; general curve; BSFC

0 引言

近年来,排放标准和油耗法规日益严苛,促使多种节能减排技术与装置应用于现代轿车并逐步发展成熟,排气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术是其中的代表之一。EGR 系统工作时会将一部分排气通过进气系统返回燃烧室,以降低最高燃烧温度,从而减少氮氧化物的形成。该技术首次出现是在 20 世纪 60 年代,由于能够有效改善燃油消耗和尾气排放,EGR 技术从众多车用发动机节能减排技术中脱颖而出^[1-3],国内外学者也纷纷开始研究该技术对发动机性能的影响^[4-5]。

国内外学者应用理论分析、台架试验和模拟测试等方法,对 EGR 系统在汽油机上的应用进行了深入研究,取得了诸多成果。在 EGR 系统研究方面,国内学者对 EGR 系统的输出放热率^[6]、降低爆震倾向^[7]节油效果^[8]、推迟点火角度^[9]、发动机燃烧特性^[10]、发动机经济性和动力性以及 NO_x 排放性^[11]等展开了研究。国外学者探索了抗爆性^[12-13]、部分负载性能和 EGR 系统耐受性^[14]、燃油经济性^[15]、排放问题^[16-19]、燃油效率^[20]等因素对发动机性能的影响。以上研究成果证明了 EGR 系统在汽油机上的应用能够降低油耗并且有利于减少 NO_x 的排放。

本文在对近 20 年相关文献进行梳理的基础上,

收稿日期:2022-03-11

基金项目:安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2019A1056、KJ2021A1343)。

作者简介:周颖(1987—),女(满族),内蒙古赤峰人,讲师,硕士,研究方向:汽车现代设计理论与方法。

首先从汽油机高、低压EGR系统及其对发动机性能的影响出发,阐述汽油发动机EGR系统的结构和工作原理;其次结合汽油机的通用曲线,提出了利用EGR策略改善有效燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)的方法;再次进一步分析和说明应用EGR技术的减排作用;最后得出相关结论,并提出需要进一步研究的问题。

1 汽油发动机EGR系统简介

EGR系统从结构上划分,可分为内部EGR系统和外部EGR系统。内部EGR系统会降低泵气损失,增加缸内热负荷^[6];外部EGR系统技术是在排气系统上接入排气再循环管路,引出废气导入进气系统,达到废气与新鲜空气充分混合的效果^[7]。根据涡轮增压器做功前后位置的不同,外部EGR系统又分为高压EGR系统和低压EGR系统^[8]。高压EGR系统是因为其在涡轮做功之前取气,会导致缸内气体压力较高,而低压EGR系统经过涡轮做功后,部分废气被排除,导致气缸内气体压力较小。

1.1 汽油机高、低压EGR系统的分析

如图1所示,高压回路中的废气先经EGR冷却器、EGR阀之后再与增压中冷后的新鲜空气混合;而低压回路中的废气先经过催化器催化,在EGR阀的控制下大部分废气会直接从排气管排出,只有少部分废气在EGR阀的控制下,经过空气滤清器,然后与被发动机吸入流过空气滤清器、节气门的新鲜空气混合后再流入增压空气冷却器冷却,减小混合气密度,提高发动机新鲜充量。

由表1可知,高压EGR系统优点在于对叶轮和中冷器没有损害;另外由于其管路相对较短、压力较高、空气流速较高,使EGR反应速率较高。其缺点在于仅在一定范围的转速和负荷下使用EGR,无法覆盖爆震区,同时其成本也高于低压EGR系统。低压EGR系统的优点是排气经过叶轮、中冷器,然后被平均分配到气缸中,故各缸燃烧一致性好。搭载低压EGR系统的发动机是在涡轮后端取气,涡轮效率无损失,而且废气都经过叶轮,提高了涡轮响应速率。低压EGR系统可在全工况范围内工作,节油效果更好,但其压差低,需使用混合阀才能在全工况内达到流量要求,在标定技术上不如高压EGR系统成熟。

1.2 EGR率对发动机性能的影响

在汽油机通用图谱中,通过不同的EGR策略可以实现不同发动机的性能改善。通过不同的EGR率控制,可以达到不同的节能目标。文献[2]指出,

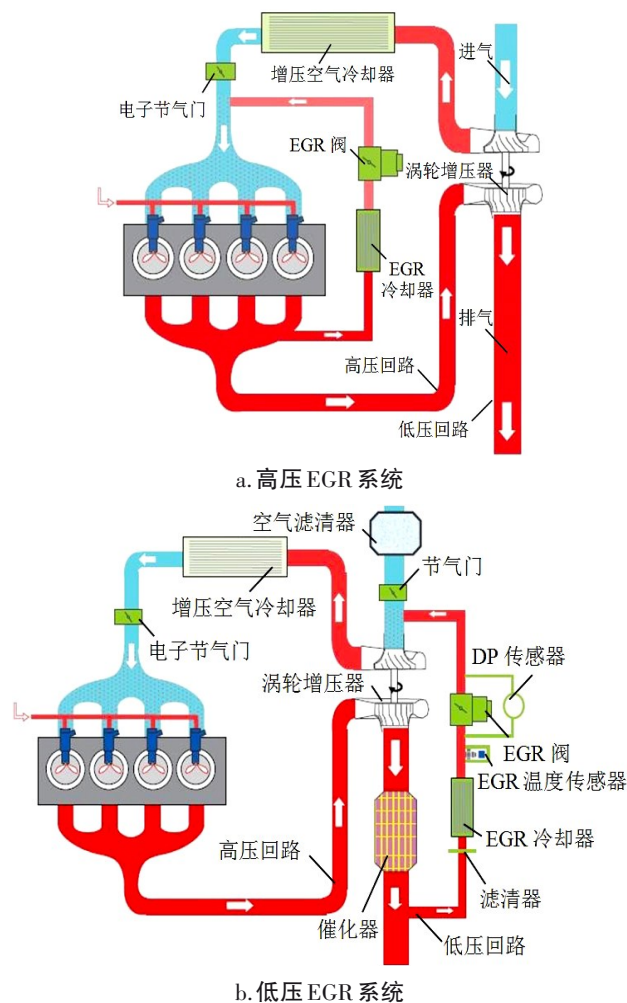


图1 汽油机高压和低压EGR系统

表1 高低压EGR系统的比较

项目	不带EGR	高压EGR	低压EGR
压缩比	0	-	++
部分负荷BSFC	0	+	+
高负荷BSFC	0	+	+
综合BSFC	0	+	++
腐蚀特性	0	-	-
成本增量	0	-	--

注:“0”表示参考;“++”表示更好的;“+”表示好的;“-”表示差的;“--”表示更差的。

部分负荷区BSFC降低2%~7%,该区域燃烧温度下降,泵气损耗降低,压缩比增大;爆震区BSFC降低5%~7%,该区域爆震降低,燃烧温度下降,比热容比增加,泵气损耗降低;浓缩区BSFC降低15%,通过

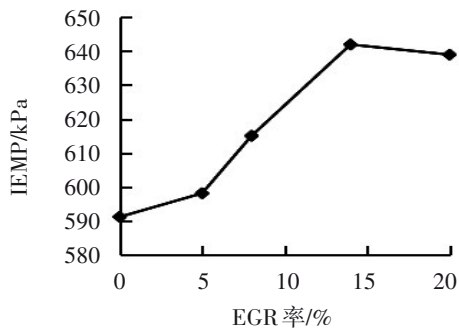
提高压缩比,在该区域,达到了最大BSFC的降低值。其中,许多因素,包括泵气损失减少、燃烧温度下降、爆震降低、比热容增加和压缩比增加,都可以解释BSFC的改善。

2 EGR在汽油机上的应用效果分析

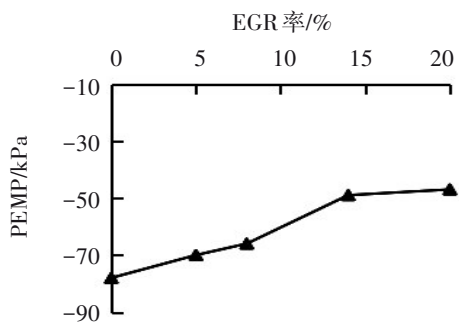
在发动机低转速高负荷工况引进EGR,可以起到降低燃烧温度,抑制爆震,降低油耗的作用^[12],同时还可以减小泵气损失,改善功率输出^[13]。在高转速高负荷工况引进EGR,可以提高混合气比热容,并能够代替高温开环控制,解除浓喷,降低油耗^[14]。为了详析EGR系统应用在汽油机上的主要影响,以下整理相关文献所研究的EGR系统对指示平均有效压力(indicated mean effective pressure, IMEP)、泵气平均有效压力(pump mean effective pressure, PMEP)、早燃次数、高负荷和燃烧特性的影响。

2.1 EGR率对IMEP和PMEP的影响

为了降低汽油机部分负荷时的泵气损失,采用排气门早关和降低排气门升程2种方式来控制内部EGR系统,由此间接调节进气量,实现发动机负荷控制。文献[3]指出,在部分负荷工况下,随着EGR率的增加,IMEP显著增加;同时随着EGR率的增加,PMEP变小,泵气损失减小(图2)。



a. EGR率对汽油机IMEP的影响



b. EGR率对汽油机PMEP的影响

图2 EGR率对汽油机IMEP和PMEP的影响

从图2可以看出,随着EGR率的增加,IMEP比PMEP整体上升快。公式(1)可用于描述PMEP对IMEP改善的贡献。

$$\varepsilon = \Delta \text{PMEP} / \Delta \text{IMEP} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε 为贡献率,%; ΔPMEP 为泵气平均有效压力下降值,MPa; ΔIMEP 为指示平均有效压力增加值,MPa。

图2中,当EGR率设置为5%时, ε 的最大值为96%;当EGR率在0%~20%波动时, ε 大于50%。上述结果表明,当EGR率为0%~20%时,PMEP的下降对IMEP的改善贡献超过50%,其原因是随着EGR率的增加,节气门开度增大,导致进气压力升高。

2.2 EGR率对早燃次数的影响

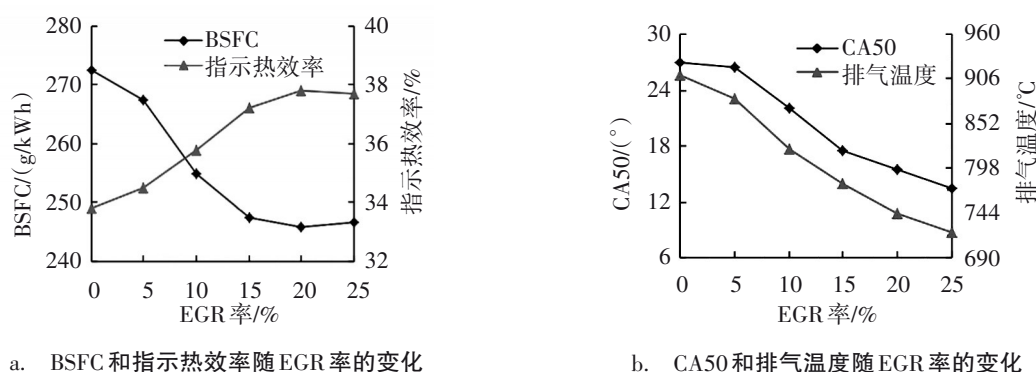
通过改进的发动机设计或控制方案,火花点火发动机可以避免爆震或早燃等异常燃烧现象。文献[2]研究了EGR率对预点火事件的影响。试验发动机的压缩比为10.0,工况点为1250 r/min、平均有效缸内压力(brake mean effective pressure, BMEP)为13 bar和进气温度为60℃,EGR温度为90℃,采用化学计量空燃比 λ ,EGR率从6%变为10%。测试表明,在汽油机上采用EGR策略可以降低早燃次数。在完成EGR试验后,进行了无EGR的基础发动机试验,对比发现加装EGR系统后的发动机发生早燃事件要低于正常基础发动机。该早燃现象主要体现为表面点火。由于EGR技术可以减少汽油机的早燃次数,可以使用更大的点火提前角来实现更高的燃烧效率,故可以在低速满载时对BSFC进行改进。

2.3 EGR率对高负荷的影响

汽油发动机小型化是用于减少汽车CO₂排放的主要技术之一,然而随着大幅度的小型化,工作点已经向更高负荷发生转变,也意味着现代汽油发动机的燃油经济性可能在于将排气温度保持在可接受范围内且不需要过度加油。文献[4]分析了在1.4 T的GDI发动机上采用水冷式排气歧管(water cooled exhaust manifold, WCEM)和EGR技术对BSFC的改进。在3500 r/min和4000 r/min下,相应的扭矩为240 N·m,由于使用低压EGR系统,因此不会实现浓缩。测试结果表明,当以最大负荷点高速消除浓缩时,可节省燃料3%~6%。EGR可以使气缸燃烧温度下降,从而使发动机不需要浓缩来降低排气温度,最终达到节能的目的。

2.4 EGR率对燃烧特性的影响

发动机小型化被认为是降低汽油机燃油消耗量的一种很有前途的策略。但缩小涡轮增压发动



a. BSFC和指示热效率随EGR率的变化

b. CA50和排气温度随EGR率的变化

图3 燃烧特性随EGR率的变化关系

机需要考虑爆震的影响,以避免发动机损坏。低压EGR是一种有效的高负荷爆震抑制方法,而EGR又可以降低低负荷时的泵气损失,因此有助于改善燃油的燃烧特性。文献[5]研究了EGR对发动机燃烧特性的影响。试验发动机排量为1.5 L,压缩比为11.5。当发动机转速为3 000 r/min、BMEP为10 bar工况点时,燃烧特性随EGR率的变化关系如图3所示。从图3可以看出,随着EGR率的增加,BSFC、曲轴转角(crankshaft angle, CA)CA50和排气温度在下降,而指示热效率在升高。

3 结语

通过对近20年相关文献进行梳理,发现EGR

系统在发动机的节能减排上取得了理论与实用研究的诸多成果,得出EGR系统将是现代汽油机技术的必要因素。未来针对该技术的应用,在以下几个方面仍需要展开进一步研究。

1)EGR系统将和颗粒捕捉技术、电控高压喷油技术、进气富氧技术等密切结合起来,以使各种有害排放物全面降低;从而解决柴油机BSFC恶化和颗粒物排放增加的问题。

2)将高精度率的闭环EGR控制与冷却EGR联合应用,使排放与燃油经济性达到最佳平衡。

3)可变截面涡轮增压系统与EGR系统形成良好匹配,改善燃烧放热率和输出功率。

参考文献:

- [1] 李志强,胡瑞玲,刘景平.国外排气再循环(EGR)冷却器制造技术及应用现状[J].汽车工艺与材料,2002(12):15-17+35.
- [2] AMANN M, ALGER T, MEHTA D. The effect of EGR on low-speed pre-ignition in boosted SI engines[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1):235-245.
- [3] CAVINA N, ROJO N, BUSINARO A, et al. Investigation of water injection effects on combustion characteristics of a GDI TC Engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(4):2209-2218.
- [4] TAYLOR J, FRASER N, WIESKE P. Water cooled exhaust manifold and full load EGR technology applied to a downsized direct injection spark ignition engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(1):225-240.
- [5] SIOKOS K, KOLI R., PRUCKA R, et al. Assessment of cooled low pressure EGR in a turbocharged direct injection gasoline engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 1(1):1535-1543.
- [6] 孙振宇,庞斌,周鹏,等.内部EGR对自吸柴油机性能影响的仿真研究[J].内燃机与动力装置,2020,37(5):93-98.
- [7] 张宇璠,刘金玉,韩令海,等.外部EGR对于汽油机性能和排放的影响研究[J].现代车用动力,2021(3):39-43.
- [8] 张法,曹亮,曹权佐,等.高低压冷却EGR对增压发动机影响研究[J].汽车实用技术,2021,46(21):142-144+148.
- [9] 李小平,洪伟,解方喜,等.应用推迟点火、排气再循环及过稀混合气降低稀燃甲醇发动机NOx排放[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(5):1478-1483.
- [10] 黄昭明,沈凯,安宗权,等.不同压缩比米勒循环和低压排气再循环对增压直喷汽油机性能影响[J].内燃机工程,2019,40(4):13-18.
- [11] 梁昱,张滔,钟丽琼,等.排气再循环改善生物柴油发电机的经济性和排放性[J].农业工程学报,2015,31(24):23-29.
- [12] ALGER T, MANGOLD B, ROBERTS C, et al. The interaction of fuel anti-knock index and cooled EGR on engine performance and efficiency[J]. SAE International Journal of Engines, 2012, 5(3):1229-1241.
- [13] ALGER T, WALLS M, CHADWELL C, et al. The interaction between fuel anti-knock index and reformation ratio in an engine equipped with dedicated EGR[J]. SAE International Journal of Engines, 2016, 9(2):786-795.

- [14] SZYBIST J, SPLITTER D. Effects of fuel composition on EGR dilution tolerance in spark ignited engines[J]. SAE International Journal of Engines, 2016, 9(2):819-831.
- [15] CHAUVET T, DIMITROVA Z, ALGER T. Synergies between high EGR operation and GDI systems[J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 1(1):101-114.
- [16] HEDGE M, WEBER P, GINGRICH J, et al. Effect of EGR on particle emissions from a GDI engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1):650-666.
- [17] ALGER T, MANGOLD B. dedicated EGR: A new concept in high efficiency engines[J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1):620-631.
- [18] WOLK B, EKOTO I. Calorimetry and imaging of plasma produced by a pulsed nanosecond discharge igniter in EGR gases at engine-relevant densities[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(3):970-983.
- [19] SMITH J, RUPRECHT D, ROBERTS, P, et al. A comparison of EGR correction factor models based on SI engine data [J]. SAE International Journal of Engines, 2019, 12(2):203-217.
- [20] RANDOLPH E, FIESELER K, CONWAY G, et al. The effects of EGR composition on combustion performance and efficiency[J]. SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility, 2021, 3(1):250-261.

(上接第22页)

- [13] WANG Z P, QU L J, YAO J F, et al. An EAV-HP Insertion in 5'Flanking Region of SLCO1B3 Causes Blue Eggshell in the Chicken[J]. PLoS Genetics, 9(1), e1003183.
- [14] 莫国东,黄英飞,吴强,等.广西三黄鸡的遗传多样性及保种效果分析[J].基因组学与应用生物学,2020,39(5):2021-2027.
- [15] 黄勋和,赵雪敏,柯振华,等.中国乌骨鸡微卫星位点 LEI0258 多态性研究[J].江苏农业科学,2019,47(5):40-45.
- [16] 黄勋和,李丽芝,张金枫,等.华南家鸡MHC-B区域复合微卫星位点 LEI0258 的遗传多样性与进化研究[J].畜牧兽医学报,2016,47(11):2175-2183.
- [17] 陈政昆,韦聪聪,朱雯,等.安徽白山羊保种群微卫星标记遗传多样性分析[J].黑龙江畜牧兽医,2020(9):54-56+63.