

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.03.008

# 电增压促进废气再循环对发动机性能的影响

周颖<sup>1</sup>, 潘金元<sup>2</sup>, 尹爱勇<sup>3</sup>

- 安徽工贸职业技术学院机械与汽车工程系, 安徽淮南 232007;
- 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;
- 铜陵职业技术学院机械工程系, 安徽铜陵 244000)

**摘要:** 在一台 1.5 L 带废气涡轮增压的直喷汽油机上进行了电动增压和废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)协同对发动机动力性和经济性的影响规律试验研究。结果表明:全负荷下电动增压促进最高废气再循环率随转速的上升而下降,在 4 个试验转速下分别提升了 17.7%、15.2%、13.84% 和 0;部分负荷下电动增压促进最高废气再循环率随负荷的提高与转速下降,在 6 个试验工况下最高废气再循环率分别被提高了 23.63%、30.31%、0、14.09%、19.74% 和 0。全负荷与较低的 3 个转速下电动增压介入后有效燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)降低近 10%,最高转速下废气涡轮增压完全取代电动增压;部分负荷下的两组工况内,电动增压介入后,最高 BSFC 降低了 10.8% 和 8.4%。结论表明合理应用电增压促进最高废气再循环率可以提升发动机的燃油经济性并保持较高的动力性。

**关键词:** 废气涡轮增压;电动增压;废气再循环;动力性;经济性;有效燃油消耗率

**中图分类号:**TK411.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2023)03-0044-05

## Effect of Electric Supercharging Promotion of Exhaust Gas Recirculation on Engine Performance

ZHOU Ying<sup>1</sup>, PAN Jinyuan<sup>2</sup>, YIN Aiyong<sup>3</sup>

- Department of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Vocational & Technical College of Industry & Trade, Huainan, Anhui 232007, China; 2. Chery Automotive Co. Ltd., Wuhu, Anhui 241006, China; 3. Tongling Polytechnic, Tongling, Anhui 244000, China)

**Abstract:** An experimental study was carried out on the synergistic effect of electric supercharging and exhaust gas recirculation (EGR) on engine power and economy on a 1.5 L direct injection gasoline engine with exhaust gas turbocharging. The results show that under full load, the maximum EGR rate promoted by electric supercharging decreases with the increase of rotational speed, and increases by 17.7%, 15.2%, 13.84% and 0 respectively under the four experimental rotational speeds. Under partial load, the maximum EGR rate promoted with electric supercharging decreases with the increase of load and rotational speed. Under six experimental conditions, the maximum EGR rate is increased by 23.63%, 30.31%, 0, 14.09%, 19.74% and 0 respectively. Under full load and at three lower rotational speeds after the intervention of electric supercharging, the brake specific fuel consumption (BSFC) is reduced by nearly 10%. At the highest speed, exhaust gas turbocharging completely replaces electric supercharging. In two groups of working conditions under partial load and after the intervention of electric supercharging, the maximum BSFC is reduced by 10.8% and 8.4%. It is concluded that the reasonable application of electric supercharging to promote the highest EGR rate can improve the fuel economy and maintain higher power performance of the engine.

**Keywords:** exhaust gas turbocharging; electric supercharging; EGR; power performance; economy; BSFC

收稿日期:2022-04-24

基金项目:安徽省教育厅自然科学研究重点项目(2022AH053025、KJ2021A1343)。

作者简介:周颖(1987—),女(满族),内蒙古赤峰人,副教授,硕士,主要研究方向:汽车现代设计理论与方法,e-mail:439273479@qq.com。

## 0 引言

汽车工业的发展与交通运输的发展紧密相关,汽车工业协同交通运输业对推动全球经济的快速发展影响深远<sup>[1]</sup>。内燃机是汽车的动力源,主要消耗石油和天然气。废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术可以大大增加工作混合气的总热容,降低最高燃烧温度,减少NO<sub>x</sub>的排放<sup>[2-3]</sup>。废气涡轮增压技术通过有效利用排气能量实现进气加压,增加进气密度,提高了内燃机的各项性能指标<sup>[4-5]</sup>。由于EGR和涡轮增压的综合作用,与高压EGR相比,低压EGR在降低燃烧温度和利用排气能量方面具有更多优势。低压EGR可以满足高EGR率,在NO<sub>x</sub>排放和节能方面效果更好。低压EGR也存在涡轮增压器转速波动低,进气压力不足的问题。在低速时,很难引入废气并提高EGR率,导致发动机缺火,以及EGR率的响应特性滞后<sup>[6]</sup>。电动增压技术可以有效地解决上述问题,显著改善涡轮增压发动机的低速扭矩和瞬态响应<sup>[7]</sup>。

目前针对电动增压器的研究主要集中在性能及其对发动机性能的直接影响上<sup>[8-10]</sup>。很少有研究涉及电动增压促进EGR提升发动机性能的综合应用。本研究通过在GDI涡轮增压发动机上安装EGR系统和电动增压器,研究该项组合技术对发动机性能和燃油经济性的影响,旨在为节能减排发动机的开发提供参考。

## 1 试验理论

油耗是发动机经济性的评价指标,分为油耗率(比油耗)和油耗量。油耗率是单位功率单位时间所消耗的燃油量。同样也存在指示油耗率 $b_i$ (g/kW·h)和有效油耗率 $b_e$ (g/kW·h)。由于发动机在不同的工况运行时,其油耗率不一样,也可以用油耗量 $B$ 作为经济性的衡量指标。实际应用时,通常测定功率和单位时间的燃油消耗量,经单位换算后可以求出油耗率和油耗量。

### 1.1 指示燃油消耗率

为了能更清楚地对不同工作容积发动机工作循环的热功率转换有效程度进行比较,引入平均指示压力 $p_{mi}$ (MPa),用于研究单位气缸容积一个循环所做的指示功。

$$p_{mi} = \frac{W_i}{V_s} \quad (1)$$

式中: $W_i$ 为发动机一个工作循环的指示功(kJ); $V_s$ 为发动机气缸工作容积(L)。

式(1)也可以写成下式:

$$W_i = p_{mi} V_s = p_{mi} (\pi D^2/4) S \quad (2)$$

式中: $D$ 和 $S$ 分别为气缸直径和活塞行程。

具有 $i$ 个气缸的发动机的指示功率 $P_i$ (kW)为:

$$P_i = 2p_{mi} V_s \frac{n}{\tau} i \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为冲程数,此处 $\tau=4$ 。

在实际应用时,一般采用式(1)和式(2)代入式(3)得到式(4):

$$P_i = \frac{p_{mi} V_s n i}{30\tau} \quad (4)$$

指示燃油热效率 $b_i$ (g/kW·h)是指单位指示功的耗油量,即:

$$b_i = \frac{B}{P_i} \times 10^3 \quad (5)$$

式中:燃油消耗量 $B$ (kg/h)可以通过油耗计测得,指示功率 $P_i$ (kW)可以通过式(4)求得。

### 1.2 有效燃油消耗率

衡量发动机经济性能的重要指标是有效燃油消耗率 $b_e$ (g/kW·h)和有效热效率 $\eta_{ei}$ ,两者成反比关系,知道其一值后,可求出另一个值。

有效燃油消耗率 $b_e$ (g/kW·h)是单位有效功的耗油量,即:

$$b_e = \frac{B}{P_e} \times 10^3 \quad (6)$$

式中:燃油消耗量 $B$ (kg/h)可以通过油耗计测得;指示功率 $P_e$ (kW)可以通过式(7)求得。

### 1.3 发动机有效功率

发动机有效功率 $P_e$ (kW)可以利用各种形式的测功器和转速计分别测出发动机在某一工况下发动机曲轴的输出转矩 $T_{tq}$ (N·m)和转速 $n$ (r/min),可以通过试验按下式计算求得:

$$P_e = T_{tq} \frac{2\pi n}{60} \times 10^{-3} = \frac{T_{tq} n}{9550} \quad (7)$$

与平均指示压力相似,平均有效压力可以看作是一个假想的、平均不变的压力作用在活塞顶上,使活塞移动一个行程所做的功等于每循环所做的有效功。平均有效压力是衡量发动机动力性能的一个重要参数。按照上述定义,可以用式(4)所表示的 $P_i$ 和 $p_{mi}$ 之间的关系,写出 $P_e$ 和 $p_{me}$ 的关系式:

$$P_e = \frac{p_{me} V_s n i}{30\tau} \quad (8)$$

$$p_{me} = \frac{30\tau P_e}{V_s n i} \quad (9)$$

应用式(7)和式(8)的恒等关系,可得式(10):

$$T_{iq} = \frac{318.3 p_{me} V_s i}{\tau} \quad (10)$$

## 2 试验系统

图 1 为试验台架系统的架构,通过进排气管路、油路和线路连接了测控系统、发动机及其主要部件。进气分 2 路,发动机吸气时一路为新鲜空气由空气滤清器过滤后进入电动涡轮增压器,然后由废气涡轮增压器的叶轮增速增压后进入增压中冷器冷却后进一步降温增加进气密度,再通过进气管被吸入气缸;另一路由排出的高温废气经过 EGR 中冷器降温增加进气密度后,由 EGR 控制阀控制进入电涡轮增压器的预混废气量。排气由排气管排出,并利用其动能推动废气涡轮增压器的涡轮,排气被减速后流入三元催化装置净化后排入大气。系统在对对应位置安装了必要的测控装置,包括油耗仪、测功机、气体排放分析仪等。

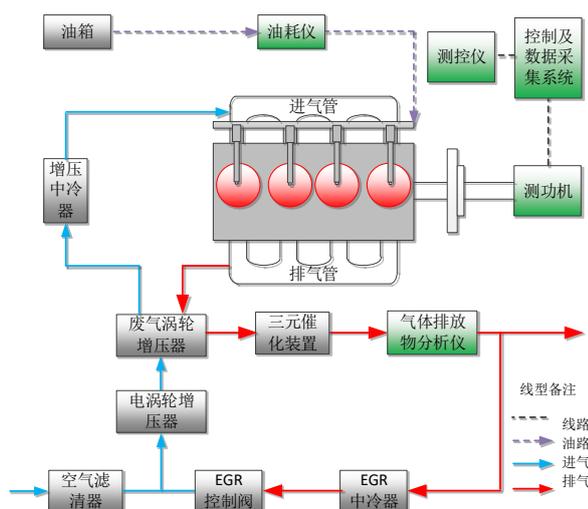


图 1 试验台架系统架构

试验用发动机为一台带废气涡轮增压的缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)发动机。该发动机的主要参数包含缸径 74.5 mm、行程 85.9 mm、排量 1.5 L、压缩比 12.5、额定功率 96 kW(5 500 r/min)、峰值扭矩 200 N·m(1 400~4 000 r/min)、涡轮增压器压气机流量 439.2 kg/h、涡轮增压器涡轮机流量 0.012 3 kg/s、喷油嘴喷射压力 350 kPa 等。

## 3 试验结果及分析

本研究选取汽油车实际应用中常用的转速 1 250 r/min、1 500 r/min、2 000 r/min、3 000 r/min 和 4 000 r/min 作为台架试验发动机转速,研究全负荷和部分负荷下电动增压分别对最高 EGR 率与燃油

消耗量 BSFC 的影响。

### 3.1 对最高 EGR 率的影响

EGR 在引入进气增压后不但可以降低发动机 NO<sub>x</sub> 排放还可以获得更大的发动机输出功率。为了弥补废气涡轮增压在发动机低转速时无法引入的不利局面,试验在台架系统进气管上串联一台电动增压器,用于在外特性低转速区间提高新鲜充量,为 EGR 率的提升创造条件,外特性下电增压前后最高 EGR 率,如图 2 所示。图 2 中,发动机转速在 1 250 r/min 低转速工况下,电增压不工作时无法引入 EGR 率,电增压工作后,最大 EGR 率被最大限度地提高了 24%;发动机转速在 1 500、2 000、3 000 r/min 时,最大 EGR 率也分别提升 17.7%、15.2% 和 13.84%。随着发动机转速的提高,由于废气涡轮增压的作用愈加明显,导致电增压贡献越来越小。4 000 r/min 时,电增压工作前后最高 EGR 率均为 10.11%,说明此时进气系统已经无电动增压。

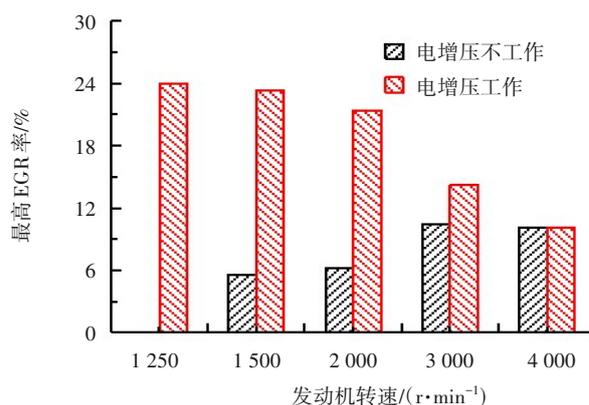


图 2 外特性下电动增压前后最高 EGR 率

为了进一步研究电增压对促进 EGR 提升发动机工作的性能的影响,在发动机部分负荷工况 0.8、1.1、1.4 MPa 下,对电增压前后的最高 EGR 率做了试验,相关影响如图 3 所示。图 3(a)显示在 1 500 r/min、0.8 MPa 工况下,不需要电增压辅助,而随着发动机负荷的提高,电增压对最高 EGR 率的贡献也在不断提高,最高 EGR 率在 1 500 r/min、1.1 MPa 和 1 500 r/min、1.4 MPa 工况下,分别提高了 23.63% 和 30.31%;图 3(b)显示发动机在 2 000 r/min、0.8 MPa 发动机已不需要电增压辅助,而随着发动机负荷的提高电增压对最高 EGR 率的贡献在不断提高,最高 EGR 率在 2 000 r/min、1.1 MPa 和 2 000 r/min、1.4 MPa 工况下,分别提高了 14.09% 和 19.74%。可知电增压对最高 EGR 率提升随着发动机负荷与转速的变化而变化,负荷越高、转速越低,电增压对最高

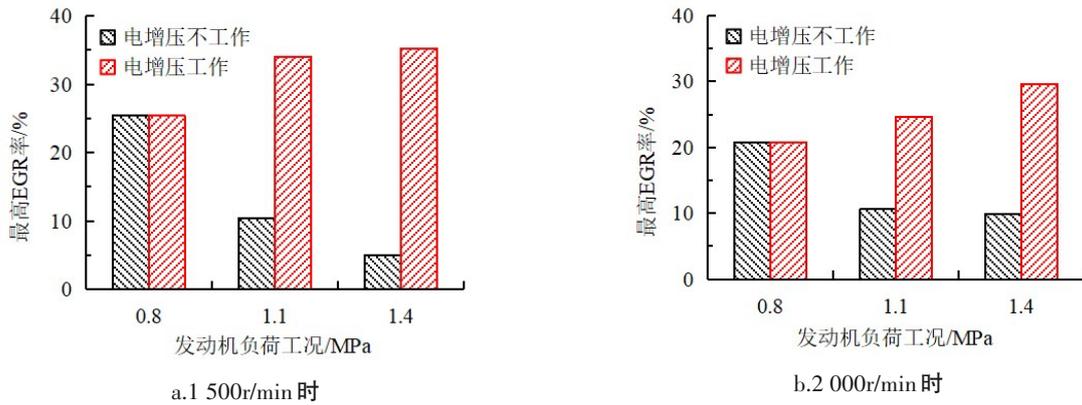


图 3 部分负荷下电动增压前后最高 EGR 率

EGR 率提升更为明显,原因是高负荷、低转速下进气压力高且新鲜充量大,导致难以引入排气,需要电增压辅助提升最高 EGR 率,而电增压工作后对发动机的燃油经济性和 NO<sub>x</sub> 的排放也有显著提高。

### 3.2 对燃油消耗量 BSFC 的影响

电动增压有效提升了低转速下发动机的动力

性,而在 EGR 系统的发动机上,电动增压对其油耗也有不同程度的改善。为了研究外特性下电增压促进 EGR 率对发动机性能的影响,通过台架试验研究了 1 250、1 500、2 000、3 000 r/min 下,电动增压促进 EGR 率分别对有效燃油消耗率 (brake specific fuel consumption, BSFC)、发动机功率、平均有效缸

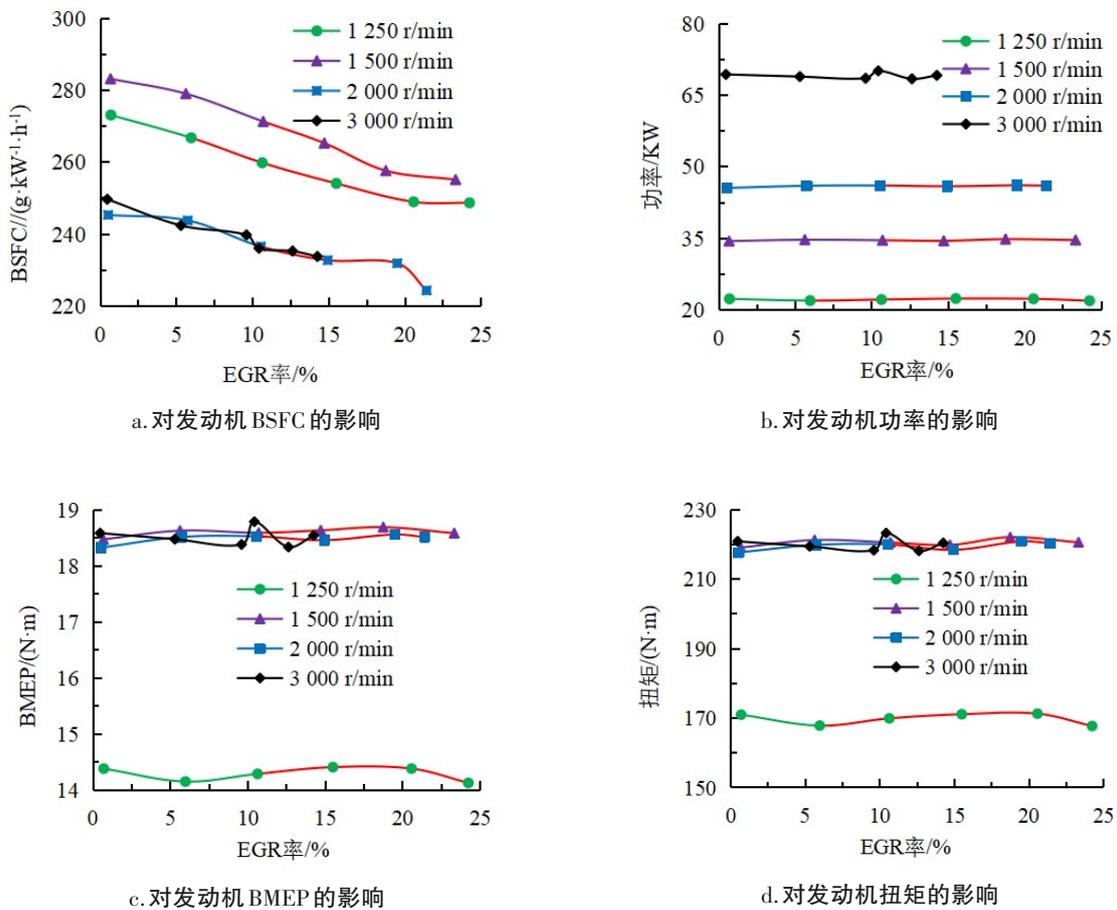


图 4 外特性下电动增压促进 EGR 率提高后发动机性能的变化

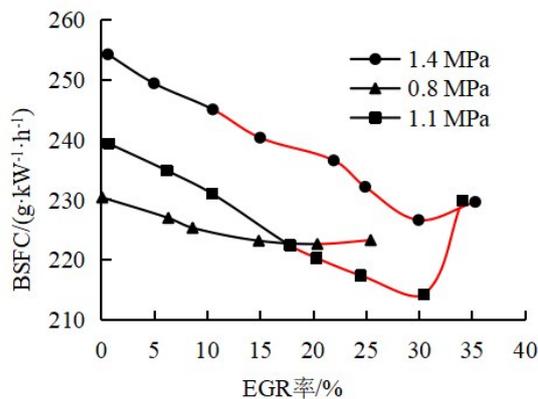
内压力(brake mean effective pressure, BMEP)和发动机扭矩的影响,如图4所示,图中红色走势线为电动增压介入。

由图4(a)显示,随着EGR率的提高,发动机转速在1 250、1 500、2 000 r/min外特性工况下,BSFC降低了近10%。主要原因是EGR对发动机爆震具有抑制作用,从而可以增大发动机的点火提前角,使得燃烧相位提前,可燃混合气得到充分燃烧,最终使该转速下外特性工况的BSFC得到明显改善。虽然电动增压能够促进EGR率的提高,但发动机转速在3 000 r/min时,电动增压基本被废气涡轮增压所取代,电动增压已经无须介入,此现象也强化了图2中的规律。由图4(b)、图4(c)和图4(d)显示,随着EGR率的提高,在发动机试验转速外特性工况下的发动机功率、BMEP和发动机扭矩变化不大,但总体上电动增压能够促进EGR率改善发动机各项性能参数。

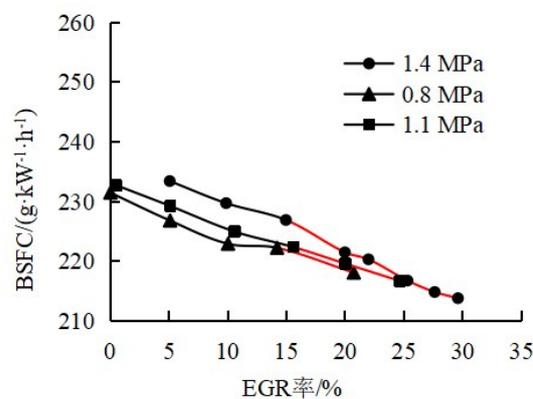
图5为在1 500、2 000 r/min部分负荷工况下电动增压促进EGR率提高后BSFC的变化(红色)。从2个图中电动增压介入点来看,部分负荷下电动增压促进EGR率提高后,发动机BSFC下降明显,但随着EGR控制阀进排气端压差接近,EGR率无法被提升,从而不能再推进EGR进一步发挥节油效果。图5(a)显示,随着EGR率的提高,在1 500 r/min、1.4 MPa部分负荷工况下,BSFC降低了近1.9%,电动增压介入后,在此基础上再降低9.1%,总的BSFC降低达到了10.8%。负荷降低后电动增压促进EGR率提高后,在1 500 r/min、1.1MPa部分负荷工况下,电动增压辅助BSFC比未介入前又降低了7.2%,但当EGR率超过30%后,在试验负荷1.1 MPa、1.4 MPa下,油耗不降反升,主要原因是过多的废气引入,导致空燃比过稀,燃烧恶化。图5(b)显示,随着EGR率的提高,发动机在2 000 r/min & 1.4 MPa部分负荷工况下,表现出与图5(a)相同的节油规律,与本节上述分析对应的BSFC为1.58%、6.5%和3.7%,同时该图还进一步反映了较高的试验转速节油效果更佳。

#### 4 结论

1)在发动机全负荷下电动增压对最高EGR率的影响,体现为在1 500、2 000、3 000 r/min下,随着发动机转速的提高废气涡轮增压作用渐显,当发动机转速达到4 000 r/min时已无须电动增压工作了。



a.1 500 r/min时



b.2 000 r/min时

图5 部分负荷下电动增压促进EGR率提高后BSFC的变化

在发动机部分负荷下电动增压对最高EGR率的影响,体现为在试验工况下电动增压在较高的负荷和较低的转速具有较高辅助作用,原因是高负荷与低转速时进气压力高且新鲜充量大,导致难以引入尾气,需要电增压辅助提升最高EGR率。

2)在发动机全负荷下电动增压对BSFC的影响,体现为随着EGR率的提高,在试验转速下外特性工况下BSFC降低,原因是EGR对发动机爆震具有抑制作用,从而可以增大发动机的点火提前角,使得燃烧相位提前,可燃混合气得到充分燃烧,最终使该转速下外特性工况的BSFC得到明显改善。在发动机部分负荷下电动增压对BSFC的影响,体现为在试验工况下,电动增压在较大负荷与较低转速介入时更能节油,但过高的EGR率使得油耗不降反升,原因是过多的废气引入后空燃比过稀燃烧恶化。