

■ 哈尔滨东安汽车发动机制造有限公司/方立辉 郝美刚 范宝庆

外部EGR对涡轮增压汽油机性能的影响

能源与环保是当今世界上任何国家、行业都必须关注的课题，汽车行业尤不例外。目前我国乘用车中汽油车占90%以上，基于国情我们可以预测，在今后相当长的一段时间内，我国生产的乘用车仍将以汽油车为主。汽油机燃烧易发生爆震，通过降低压缩比或延迟点火时间可抑制爆震的发生，但减小压缩比会使燃烧热效率降低，而推迟点火时间会导致油耗上升和大负荷时排气温度过高。工程上常采取加浓混合气的方法降低燃烧温度，从而降低排气温度，但混合气加浓后会使油耗上升，CO和HC排放升高。内燃机采用废气再循环技术EGR (Exhaust Gas Recirculation) 可以改善燃油经济性，显著减少排放中的 NO_x 含量以及降低排气温度。

EGR技术有外部EGR和内部EGR之分。外部EGR是指通过管道将排气中的一部分气体引入到进气系统与新鲜空气混合形成发动机进气。内部EGR是指通过改变进、排气门开启重叠角来改变缸内残余废气量。

纵观汽油机技术的“变迁路线”可以断言：未来汽油机的发展趋势是多种先进技术的有机结合。国内汽油机生产企业多是先将国外先进技术引进吸收，快速量产，再到自主研发、升级改进。对于国外先进技术的引进具有技术封闭、知识产权以及“滞后性”等缺点。

试验

对一款成熟机型进行改造升级，企业最关心的是实际工程意义，即改造后发动机相关性能指标的提升幅度（决定市场前景）。出于此目的，我司对某款废气涡轮增压型汽油机（1.5L）进行了“外部冷却EGR”的台架改装及性能摸底试验。

1. 试验机参数

试验机参数见表1。

表1 试验机参数

发动机技术	双凸轮轴，VVT，废气涡轮增压
气缸布置形式	L4，16V，MIVEC (VVT)，TC
缸径×冲程/mm×mm	75.5×82.0
排量/L	1.5
压缩比	9
配气机构	DOHC
最大净功率/kW / r·min ⁻¹	110/5 500
最大净转矩/N·m / r·min ⁻¹	210/2 000~4 500
外廓尺寸（长×宽×高）/ mm×mm×mm	638×620×639
重量/kg	126±2

2.外部EGR率计算

“再循环废气量”是有关外部EGR研究中的重要参数，常用EGR率进行描述。EGR率是指废气再循环量占进气总量的比值，可用以下两种方法对其进行计算：

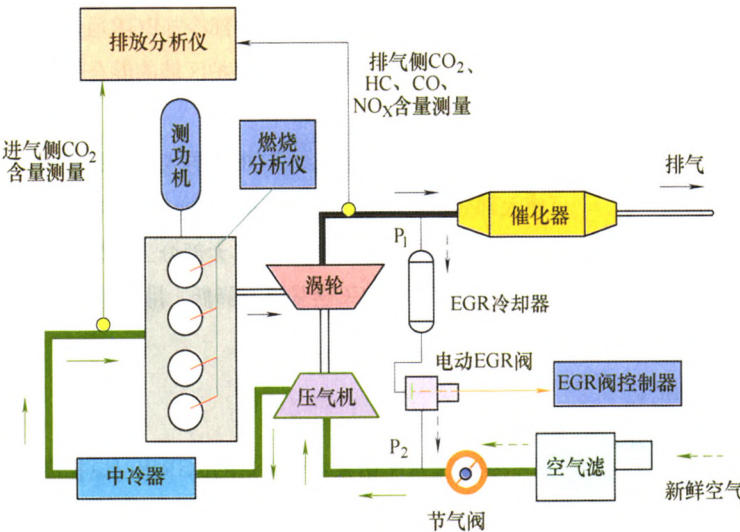
(1) CO₂浓度法 是指通过测量进气总管、排气总管以及大气环境中的CO₂浓度进行EGR率的计算。

(2) 质量流量法 是指通过测量再循环废气和吸入新鲜空气的质量流量进行EGR率的计算。

我们选择CO₂浓度法作为本次摸底试验EGR率计算的理论依据，充分利用现有试验资源。

3.试验台架搭建

根据此型试验机特性以及本次摸底试验，尽可能利用现有的试验资源，经我方论证最终确立的试验台架搭建方案如附图所示。ECU系统采用DAE现有的UAES ME788 ETK—ECU（试验用，无EGR控制模块）系统。电动EGR阀采用单独的EGR阀控制器（带位置反馈功能）进行控制。



试验台架搭建示意

试验台架搭建过程中，各关键技术的解决如下：

(1) 废气导入、导出点的选择 考虑试验安全性以及导入废气量的控制容易性，本次试验选择从涡轮后取废气。对于各试验工况点所

导入废气量的多少，主要取决于废气“导入点”与“导出点”的压力差（如图1中所示的P₁、P₂管道处的压力差）以及废气管道的最小流通面积。通过分析进气管道各部分的压力情况，将废气“导出点”选择在压气机入口与空气滤之间。试验过程中可能会出现某些试验工况电动EGR阀已开至最大，但所导入的废气量仍需增加的情况。我们选择在空气滤后加装一个“节气阀”（某型发动机机械节气门，本次试验利用台架油门执行机构对其进行控制），通过调整“节气阀”开度可提高P₂管道处的真空度，以此进一步增加所导入的废气量。

(2) 废气温度的控制 如附图所示，经过EGR冷却器的废气温度主要对电动EGR阀的使用寿命、压气机的“污浊”情况、导出废气量等有一定影响。结合本次试验的主要目的，试验中将经EGR冷却器冷却后的废气温度控制在100~150℃。

(3) 进/排气侧排放物测点的选侧 选取排放测点，需考虑采集点气体的均匀性，气体压力是否满足排放分析仪的要求等。基于以上思考，我们将进气侧测点选在发动机电子节气门前；排气侧测点选在涡轮后。

4.试验工况点的选择

根据搭载此型试验机的车辆在转鼓试验台上运行NEDC循环测试情况，以及试验机自身特点等，最终选择的试验工况点见表2。

表2 试验工况点

转速/r·min ⁻¹	800	1 200	1 700	2 000	2 200	2 600	3 600	4 400
负荷 /bar (10 ⁵ Pa)	2、4、6	4、6、8	4、8、10	2	4、6、10、14	6、10、14	6、10、12	6、8、12
WOT/r·min ⁻¹	1 000、1 400、2 200、2 600、3 600、4 400、5 000							

5. 试验方法及各工况点最优EGR率的评定

在确保进、排气系统的气密性满足要求后方可进行相关试验。试验过程需手动调试ECU及EGR阀控制器中的相关参数,以保证发动机在最优参数下运行。由于本试验机是我公司的成熟机型,ECU底数据中VVT运行参数已为最优,故本次对此不做调整(以底数据为准)。现以工况点6bar/2 600r·min⁻¹ (1bar=10⁵Pa)为例说明试验方法及最优EGR率的评定。

(1) EGR率为0 即未导入废气时试验数据采集。

①发动机拉至2 600r/min,先通过调节电子节气门开度来增加负荷(目标负荷为6bar),如果电子节气门已开至100%,但若负荷仍低于目标值,此时需调整涡轮增压占空比来满足负荷要求。

②调整点火角及空燃比。空燃比以涡轮前排气温度不超过限值(本试验为930℃)、过量空气系数 λ 尽可能逼近1为目标,进行最优空燃比的确定。点火角的调整以燃烧分析仪数据CA50(放热率为50%时最大爆发压力对应的曲轴转角)为6°~8°或者爆震边界(系统退点火角0.8°)为目标,进行最佳点火提前角的确定。

③在确保空燃比及点火角均为最优参数,且发动机运行在目标工况时可采集相关试验数据。

(2) 导入废气后试验数据采集 主要分三步:

第一步,发动机拉至目标工况6bar/2 600r·min⁻¹,调整EGR率至某一固定值(首先通过调整EGR阀的开度来调整EGR率。如果EGR阀已开至最大且此时仍想加大EGR率,可通过调整附图中所示的“节气阀”开度来加大 P_2 处的真空度,以进一步增加所导入的废气量)。

第二步,重新调整点火提前角至最优,而空燃比和VVT角度调整至与EGR率为0时一致,并调整进气量使发动机运行在目标工况点6bar/2 600r·min⁻¹。观察燃烧分析仪数据COV(连续几个工作循环平均有效压力的协方差,可以直接反映燃烧的稳定性)值,工程应用上认为COV值在3%~5%以内时发动机运行是稳定的。

第三步,在确保点火提前角为最优参数、空燃比和VVT角度与EGR率为0时一致,且发动机稳定运行

在目标工况点时可采集相关试验数据。

通过重复进行这三步,可以扫描出6bar/2 600r·min⁻¹工况点几组不同EGR率下的试验数据。

(3) 最优EGR率评定 此次摸底试验,我们是以油耗为主要评价指标来选取最优EGR率。当EGR率为17%时燃油消耗率为267g/kW·h最低,COV值为1.9%发动机运行稳定,故认为此次试验6bar/2 600r·min⁻¹工况点的最优EGR率为17%。其他工况点最优EGR率的选取与上述6bar/2 600r·min⁻¹相同,这里不再赘述。

试验结果分析

随着EGR率的升高,最佳点火提前角增大,故加装外部EGR后改善了燃烧效率。

试验机采用优化后的EGR率,涡轮前排气温度明显降低(其中大负荷区域可降低100℃左右),即采用优化后的EGR率燃烧室燃烧温度明显降低,亦即采用优化后的EGR率可减少试验机的传热损失和抑制爆震的发生。故该款试验机加装外部冷却EGR后,压缩比有一定提升空间、排气温度保护区域的混合气浓度可以进一步减稀。

本试验机加装外部冷却EGR并导入适量的废气,可使大部分工况的燃油消耗率降低10g/kW·h左右,可显著降低排放物中的NO_x含量(大部分工况NO_x含量降至0.13%以下),CO含量略有降低,排放物HC小幅恶化。

结语

根据台架试验结果:优化后的EGR率可以提高涡轮增压型汽油机燃油经济性、显著减少排放中的NO_x含量,以及降低燃烧温度。加装“外部冷却EGR”后,我司该款涡轮增压型汽油机压缩比可进一步提高。本试验方法可靠,易于掌握,值得推广应用。

关键词:

EGR 废气再循环 油耗 排放

(收稿日期20140111)