

# 国 VI 天然气发动机的 EGR 均匀性研究

## Research on EGR Uniformity of the Natural Gas Engine for Stage VI

马义 乔锦阳 李俊 史艳彬 窦慧莉

(中国第一汽车股份有限公司技术中心, 长春 130011)

**摘要:** 分析了国 VI 天然气发动机各缸 EGR 不均匀产生的原因,发现排气压力的波动会对各缸 EGR 流量分布产生不利影响。从改变 EGR 气体流动相位和流动均匀性两个方面提出了 13 个改进方案,建立发动机 GT-SUITE 一维计算模型,对改进方案进行计算分析,得到了具体的优化方案并通过台架进行试验测量,试验结果显示发动机各转速 EGR 率平均偏差从 3.1%减小为 1.2%,发动机缸内最高燃烧压力的偏差从 25%减小为 20%,发动机 EGR 均匀性大大提升。

**关键词:** 天然气发动机; EGR; 混合均匀性, 国 VI

**Abstract:** The causes for EGR uniformity of Stage VI natural gas engine is analyzed, and found that the exhaust pressure fluctuations will be harmful to each cylinder EGR flow distribution. The 13 improvement projects about two aspects has been put forward, one is EGR gas flow phase and the other is the flow uniformity. One dimensional calculation model of engine is build up by GT-SUITE, and the solution project has been calculated by this model, the specific optimization scheme was obtained and through bench testing measurement, experiment results show that the EGR rate deviation decreases from 3.1% to 1.2%, the deviation of cylinder maximum combustion pressure decrease from 25% to 20%, the engine EGR uniformity has been increased greatly.

**Key words:** natural gas engine; EGR; mixed uniformity; Stage VI

## 0 前言

天然气作为一种清洁能源一直受到国内外发动机行业的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。目前中重型天然气发动机选择当量燃烧路线达到国 VI 排放限值,当量燃烧与稀薄燃烧相比,发动机缸内热负荷和爆震风险大大增加,BSFC 也差于后者,采用高压冷却 EGR 可以降低热负荷和爆震倾向,同时降低 BSFC,但 EGR 对发动机缸内燃烧的影响也远大于过量空气,进入各缸的 EGR 率不一致会导致各缸燃烧差异加大,不利于发动机可靠耐久和排放标定,这就对进入发动机各缸的 EGR 均匀性提出了更高的要求。本文对天然气发动机 EGR 不均匀产生的原因进行了分析,建立发动机 GT-SUITE 一维计算模型,提出改进方案并进行了试验验证。

## 1 EGR 均匀性

### 1.1 EGR 均匀性试验

在一款重型天然气发动机上进行了各缸 EGR 率的测量,发动机布置图见图 1, EGR 从 123 缸排气歧管引出,经过 EGR 冷却器和 EGR 阀,再引入进气总管与空气、燃气进行混合。通过试验测量发动机进排气管中的 CO<sub>2</sub> 浓度,将消去大气中 CO<sub>2</sub> 浓度后的进排气 CO<sub>2</sub> 浓度相除,得到发动机的 EGR 率。受传感器布置限制,只对发动机 1 缸和 6 缸的 EGR 率进行了测量,试验结果见图 2。图 2(a)显示,发动机各缸 EGR 率偏差较大,最大扭矩转速 1200r/min 的 EGR 率偏差达到 5%,最大功率转速 1900r/min 的 EGR 率偏差达到 1.2%,这两个工况的平均偏差达 3.1%。图 2(b)显示各转速最高燃烧压力最大偏差达到 25%,123 缸燃烧压力变化趋势比较一致,456 缸燃烧压力变化趋势比较一致,说明 123 缸 EGR 率基本接近,456 缸 EGR 率基本接近。各缸最高燃烧压力与图 2(a)中的 EGR 率大小相关,低转速 1 缸 EGR 率较低,6 缸较高,故 123 缸最高燃烧压力高,456 缸最高燃烧压力低,高转速则相反。此外,

低转速最高燃烧压力偏差并没有像 EGR 偏差那样远高于高转速，说明 EGR 率绝对值越大，发动机燃烧过程对 EGR 率会越敏感。

发动机各缸最高燃烧压力偏差大反映出发动机各缸燃烧差异很大，发动机各缸缸内平均温度、传热量和排放物同样会有较大差别，因此发动机 EGR 不均匀会对发动机可靠性及排放标定带来很大挑战。

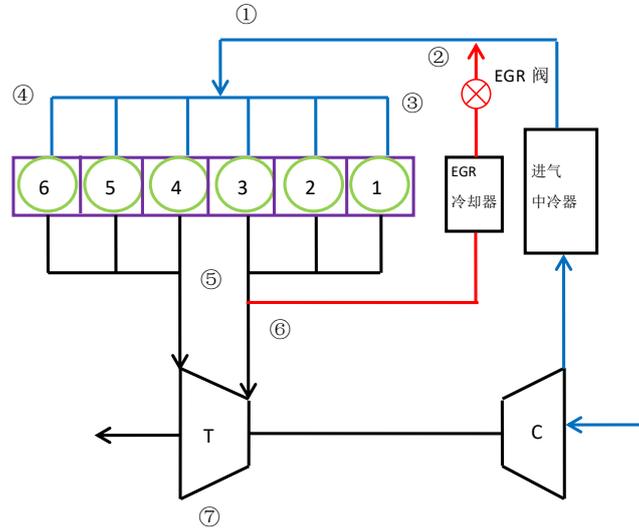


图 1 天然气发动机布置图

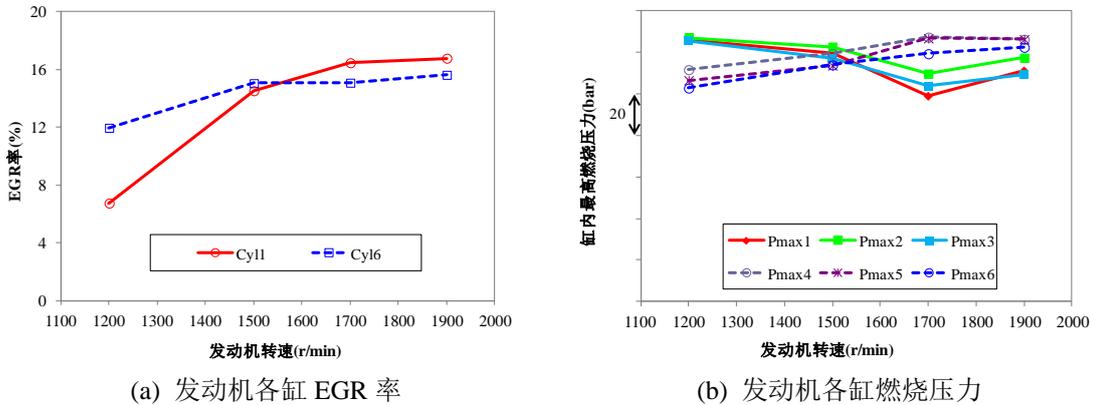


图 2 发动机 EGR 均匀性测量结果

## 1.2 EGR 均匀性分析

图 3 为 1200r/min 的 EGR 混合 CFD 静态计算结果，计算 EGR 混合均匀系数为 0.97，EGR 混合器本身已满足要求，但实际 EGR 偏差不满足要求，初步判断 EGR 混合不均匀是由排气不均匀的脉冲波动引起，因此利用 GT-SUITE 软件建立发动机一维计算模型，见图 4，通过一维换气过程计算来分析 EGR 不均匀产生的原因。

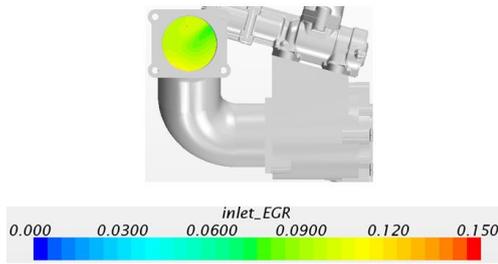


图 3 1200r/min 的 EGR 混合 CFD 计算结果

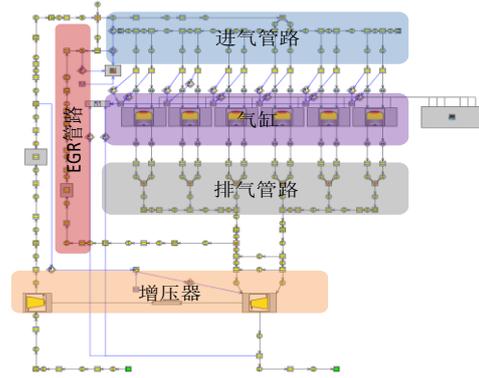


图 4 GT-SUITE 计算模型

图 5 为计算的 EGR 阀出口瞬时压力和流量曲线，虚线为每缸的进气门开启时刻。图 5(a) 的 EGR 阀出口压力波动表明 EGR 管路中的存在较大的脉冲能量，且只有三个波峰和波谷，这是因为 EGR 的引出方式为 123 缸单侧取气，使得进入进气管混合器的 EGR 流量是不均匀的。如图 5(b)，以 1 缸和 6 缸为列，假设 EGR 阀出口气体到各缸气道的距离一致，右侧红色阴影部分的流量积分平均值为 1 缸单个循环下进入的 EGR 流量，左侧紫色阴影部分的流量积分平均值为 6 缸单个循环下进入的 EGR 流量，图中 1 缸和 6 缸流量平均值分别为 0.027kg/s, 0.023kg/s, 这两缸 EGR 流量偏差为 15%。

图 6 为外特性不同转速的各缸 EGR 率计算结果，从图中可以看出，各缸 EGR 率偏差与试验值基本一致，但各缸 EGR 率绝对值的高低与试验相反，说明一维计算模型的进排气压力波微观预测结果可能与实际不完全相同，同时一维软件只能反映时间层面上的流动，无法捕捉空间层面的流动状态，但是一维计算的各缸 EGR 率偏差仍然有很好的参考价值。

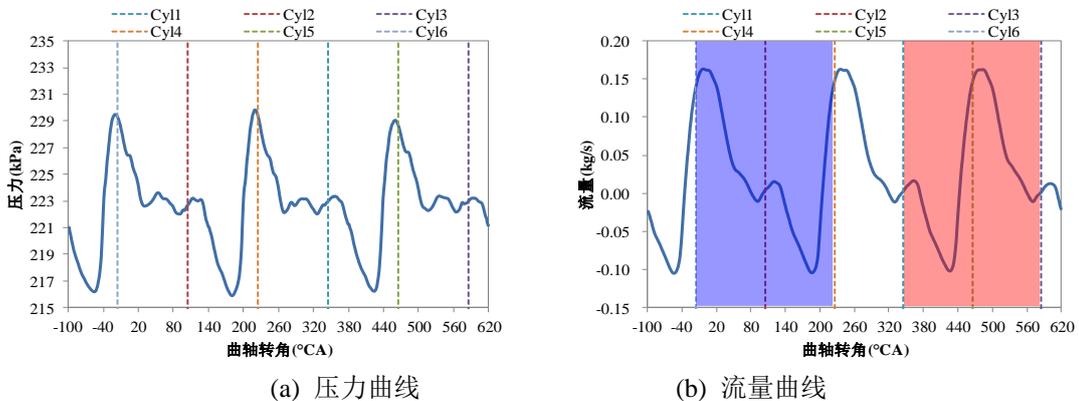


图 5 EGR 阀出口压力和流量曲线

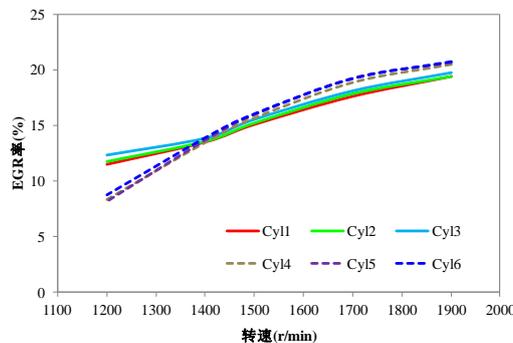


图 6 不同转速的 EGR 率计算结果

## 2 方案设计

根据以上分析可以看出,如果要改善 EGR 不均匀,有两种途径可以实现,一种是改变 EGR 气体流动变化的相位,使进入 6 个缸的 EGR 流量产生一定的重叠区域。另一种是让 EGR 气体流量波动变得更加均匀,使进入 6 个缸的 EGR 流量积分值相等。针对以上两种途径,提出以下几种方案见表 1。具体实施方案可分为:调整混合器出口的进气总管尺寸(对应图 1 中的位置①),包括管径管长;调整 EGR 管路尺寸(对应图 1 中的位置②),包括管径管长;调整进气总管进气位置(对应图 1 中的位置③、④),包括从 1 缸进气和 6 缸进气;在排气歧管出口法兰出口增加一个阀孔(对应图 1 中的位置⑤);把单侧 EGR 取气方式改为双侧 EGR 取气(对应图 1 中的位置⑥);将现有的双流道涡轮增压器更换为单流道涡轮增压器<sup>[5]</sup>(对应图 1 中的位置⑦)。

表 1 EGR 均匀性优化方案

方案类型	方案描述	方案参数	方案号
改变 EGR 流动相位	进气总管 (混合器出口 段)	直径减小 10%	1
		直径增加 10%	2
		长度减小 20%	3
		长度增加 20%	4
	EGR 管路	直径减小 10%	5
		直径增加 10%	6
		长度减小 20%	7
		长度增加 20%	8
进气总管进气 位置	从 1 缸进气	9	
	从 6 缸进气	10	
改善 EGR 流动均匀 性	排气管阀孔	-	11
	双侧 EGR 取气	-	12
	单流道增压器	-	13

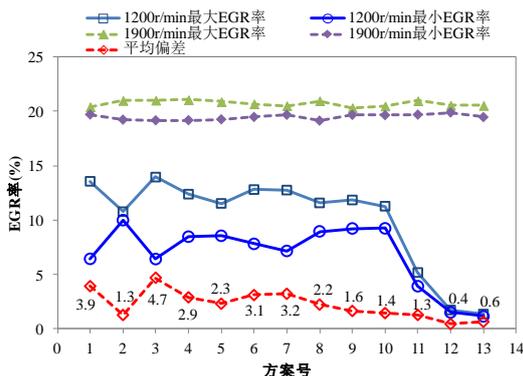


图 7 不同方案 EGR 率计算结果

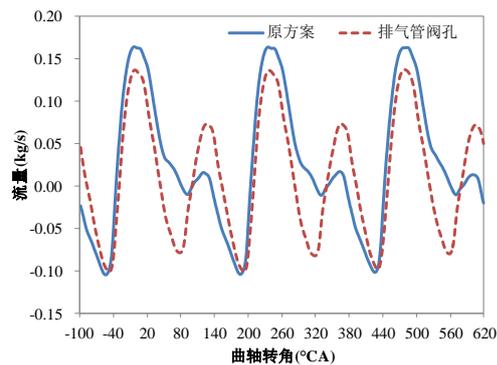


图 8 排气管阀孔方案与原方案的 EGR 流量曲线

不同方案的 EGR 率计算结果见图 7,由图可知,调整进气总管(方案 1~方案 4)只有方案 2 的 EGR 率平均偏差小于 2%,其他三个方案都无法平衡高低速的 EGR 率偏差;调整 EGR 管路(方案 5~方案 8)无法满足 EGR 率偏差要求;调整进气总管进气位置(方案 9~方案 10)的 EGR 率偏差分别为 1.6%、1.4%,它改变了 EGR 气体进入各缸的时间和相位,提升了 EGR 率均匀性;排气管阀孔(方案 11)的 EGR 率偏差为 1.3%,其 EGR 流量曲线计算结果见图 8,排气管阀孔方案的 EGR 能从 123 缸和 456 缸同时取得,大大改善了 EGR 流量波动均匀性,但 1200r/min 的 EGR 率绝对值下降 5%;双侧 EGR 取气和单流道增

压器(方案 12 和方案 13)与排气管阀孔方案原理类似,这两个方案提升 EGR 率均匀性的效果更好,但 1200r/min 的 EGR 率绝对值下降 9%,需要重新匹配增压器,或者采用单向阀来提升 EGR 率。

综上所述,调整进气总管尺寸和总管进气位置有可能实现 EGR 均匀性目标,但需要经过一维三维耦合计算后确定最终详细参数;调整 EGR 管路尺寸无法改善 EGR 均匀性;双侧 EGR 取气和单流道增压器的 EGR 改善效果最好,但低转速 EGR 率下降较大,需要重新匹配增压器;排气管阀孔方案 EGR 均匀性改善效果适中,但 EGR 率有一定的下降。由于发动机开发时间和结构的限制,优先采用排气管阀孔方案进行试验验证,再组织其他方案的进行开发。

### 3 试验验证

图 9 为排气管阀孔方案的试验验证结果, 1200r/min 的 EGR 率偏差达到 1.5%, 1900r/min 的 EGR 率偏差达到 0.9%,这两个工况的平均偏差达 1.2%,各转速最高燃烧压力最大偏差达到 20%,EGR 均匀性得到明显改善,此次试验高转速控制的 EGR 率要高于原机方案,会在一定程度上增加各缸燃烧差异。

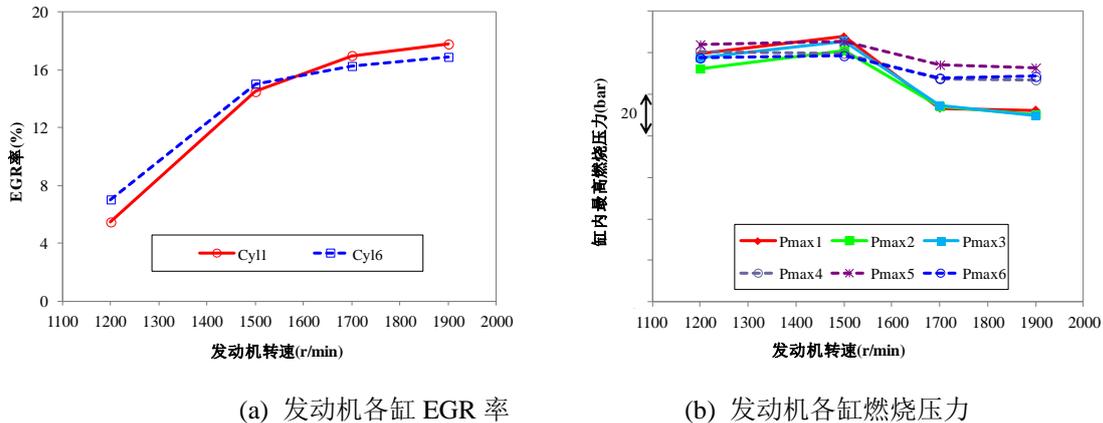


图 9 发动机 EGR 均匀性测量结果

### 4 结论

- 调整进气总管尺寸和总管进气位置有可能实现 EGR 均匀性目标,但需要经过一维三维耦合计算后确定最终详细参数;调整 EGR 管路尺寸无法改善 EGR 均匀性;双侧 EGR 取气和单流道增压器的 EGR 改善效果最好,但低转速 EGR 率下降较大,需要重新匹配增压器。
- 排气管阀孔方案使 1200r/min 的 EGR 率偏差达到 1.5%, 1900r/min 的 EGR 率偏差达到 0.9%,较大提升了发动机各缸 EGR 均匀性。
- 一维软件虽然无法捕捉空间层面的流动状态,但能反映时间层面上的气体流动,对优化发动机的 EGR 均匀性仍有很好的指导意义。

## 参考文献

- [1] 蒋德明, 黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] George Karavalakis, Maryam Hajbabaei and Thomas Durbin. Influence of Different Natural Gas Blends on the Regulated Emissions, Particle Number and Size Distribution Emissions from a Refuse Hauler Truck[C]. SAE Paper 2012-01-1583, 2012.
- [3] Marco Chiodi, Alessandro Ferrari and Oliver Mack. Improvement of a High-Performance CNG-Engine based on an innovative Virtual Development Process[C]. SAE Paper 2011-24-0140, 2011.
- [4] 马义, 王晓辉, 李红洲. 欧 VI 天然气发动机关键技术研究[J]. 车用发动机, 2016(2): 71-75.
- [5] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.