

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2009.04.013

# 增压柴油机废气再循环 (EGR) 系统的优化设计

路琼琼, 申立中, 毕玉华, 颜文胜

(昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 废气再循环技术 (EGR) 是解决柴油机  $\text{NO}_x$  排放的有效措施之一. 以增压柴油机为研究对象, 对比分析了不同废气再循环方式的优劣; 解决了部分工况下进排压逆差问题; 通过建立带有 EGR 系统的柴油机模型和实验验证, 优化满足要求的 EGR 系统. 研究表明, 采用带有合适的进、喉口比例尺寸的文丘里管解决了进排压逆差问题, 不同工况下采用合适的 EGR 率保障了柴油机的工作性能, 并有效降低了  $\text{NO}_x$  的排放.

**关键词:** 柴油机; EGR 系统; 文丘里管

**中图分类号:** TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2009)04-0058-05

## Design and Optimization of Exhaust Gas Recirculation System for Turbo - Charged Diesel Engine

LU Qiong-qiong, SHEN Lizhong, BI Yu-hua, YAN Wen-sheng

(Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Applying exhaust gas recirculation system (EGR) to diesel is one of the most effective measures to reduce the emission of  $\text{NO}_x$ . Based on a turbo - charged diesel engine, the virtues and defects of different EGR modes are compared and analyzed. The problem of reverse pressure difference between intake air and exhaust gas is solved. The EGR system is designed and optimized through establishing and examining a diesel engine model with EGR. It is shown through the result that the problem of reverse pressure difference is solved by adopting the Venturi tube with appropriate proportion between intake and throat. Adopting appropriate EGR ratio at different conditions can not only guarantee diesel engine's performance but also decrease the amount of  $\text{NO}_x$ .

**Key words:** diesel engine; EGR system; venturi tube

### 0 前言

废气再循环 (EGR) 技术能有效降低  $\text{NO}_x$  的排放<sup>[1]</sup>. 为了满足更严格的排放标准, 目前欧洲国家不仅在轻型柴油机上采用 EGR 技术来降低  $\text{NO}_x$  排放, 而且已经开始将其应用在小型自然吸气重型柴油车上<sup>[2]</sup>. 我国已在 2003 年实施的欧 标准对  $\text{NO}_x$  的排放要求, 使得国产车采用 EGR 技术成为了必然. EGR 系统的控制方式有机械式和电控式. 要让此系统充分发挥作用, 需要采用电子控制方式, 但电控式控制成本高. 为了让 EGR 系统在我国应用更广泛, 我国现阶段仍然采用机械式控制方式.

但将 EGR 技术应用在增压柴油机上, 仍然需要解决很多实际问题. 如 EGR 引气方式的选择; 部分工况下进排压逆差问题<sup>[1]</sup>; 不同工况下 EGR 率的选择等等. 基于上述问题, 运用 AVL 公司的 BOOST 软件设计并优化了一种带有 EGR 系统的柴油机工作模型, 对模型进行模拟计算并对计算结果进行试验验证.

收稿日期: 2008 - 12 - 31.

第一作者简介: 路琼琼 (1984 - ), 女, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 内燃机电控技术. E - mail: qq1841004@yaho.com

### 1 废气再循环系统

EGR分为内部 EGR和外部 EGR。内部 EGR通过排气阀或者特殊设置阀门的开启来实现废气再循环。其结构简单、成本低,但不能对再循环废气进行冷却,对 NO<sub>x</sub> 排放的降低效果不如外部 EGR 明显<sup>[3]</sup>。外部 EGR是将排出的部分废气经由外部管路引入进气系统,路线有低压回路和高压回路。

低压回路直接联接压气机入口端和废气涡轮出口端实现 EGR。高压回路联接压气机后中冷器出口端和废气涡轮入口端实现 EGR<sup>[4]</sup>。低压回路压气机入口为负压,废气涡轮出口为正压,所以很容易实现 EGR,但废气会腐蚀、污染压气机和中冷器;高压回路不存在这个问题,然而在中大负荷时,由于增压进气压力提高,会导致排气压力低于进气压力。

高压回路中排气压力低于进气压力时,废气就不能顺利进入进气管。目前解决这个问题的方法包括内部 EGR法,在进气管安装节流阀装置,在排气管处安装加压装置,在进气管内安装文丘里管,利用进排气压力波动等。在进气管内安装文丘里管是一种简单且效果显著的解决方法<sup>[1]</sup>。

### 2 EGR 率

EGR率定义为再循环的废气量与吸入气缸的总进气量之比。目前,EGR率的定义式多达 10 余种,但基本上分为质量流量型 (EGR<sub>m</sub>)、容积流量型 (EGR<sub>v</sub>)和二氧化碳浓度型 (EGR<sub>CO<sub>2</sub></sub>)。研究设计选用容积流量型计算 EGR 率<sup>[5]</sup>。

$$EGR_v = \frac{V_m}{V_a + V_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V<sub>m</sub>为进气状态下引入的排气体积; V<sub>a</sub>为吸入汽缸的空气体积。

### 3 EGR 系统的优化设计

以增压中冷柴油机为研究对象,性能参数见表 1, EGR 系统选用外部 EGR 中的高压回路,应用 boost 软件建模如图 1<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 EGR 系统进气管路设计

EGR 进气管路连接排气腔和 EGR 阀,保证一定数量的废气能够进入再循环状态。主要参数是管径和管长,设计直径为 30 mm,管长 750 mm。

#### 3.2 EGR 阀体的设计

EGR 阀控制整个 EGR 过程的废气流量。管路 18 和节流阀 R1 组成 EGR 阀,如图 1。EGR 管路选用 3 种管径: 12 mm, 24 mm 和 36 mm;为合理选择管径,运用 Boost 软件计算这 3 个方案的流量,结果如图 2。其中 12 mm 管径的管路,进气流量过小,不能达到预想的降低 NO<sub>x</sub> 的要求; 36 mm 管径的管路流量相比 24 mm 管径的增加并不大,而且由计算得出:各个方案的最大 EGR 率分别为 15%, 34% 和 40%;考虑到管径不宜过大,且柴油机

表 1 柴油机性能参数表

Tab 1 The parameters table of diesel performance

型 式	立式、直列、水冷、四冲程
缸径 ×行程	95 ×105 (mm)
气缸数	4
压缩比	18 1
最大扭矩 /转速	235/2 000 ~ 2 200 (N·m/r·min <sup>-1</sup> )
额定功率 /转速	68/3 200 (kW/r·min <sup>-1</sup> )

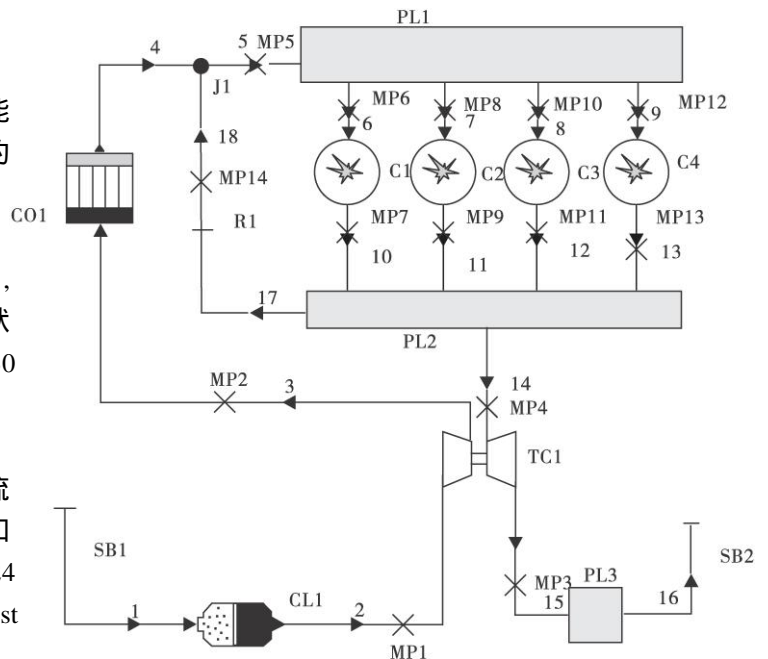


图 1 带 EGR 系统的柴油机工作过程仿真模型

Fig 1 The simulation model of the diesel with EGR system

最大 EGR率不超过 40%的设计要求<sup>[6]</sup>,所以最终确定采用管径为 24 mm的管路.

### 3.3 EGR系统出口管路设计

出口管路保证废气能顺利进入进气管,并且尽可能小地影响进气流动.采用文丘里管来解决高压回路在部分工况排气压力低于进气压力的问题.文丘里管结构如图 4.

文丘里管尺寸用 FRE软件优化,方案如表 2

表 2 不同文丘里管方案

Tab 2 The different projects of Venturi tube

方案	进口与喉口直径比	计算进出口压力差 /MPa	降压幅度 /%
1	50 28	0.004	2.2
2	50 20	0.006	3.0
3	50 20	0.019	9.7
4	50 15	0.052	26.0

比较上述 4种方案:方案 1、方案 2、方案 3降压幅度小,均不能满足排气逆差的要求.方案四降压幅度 26%,可以解决进排气压逆差.所以选用第 4种方案的文丘里管尺寸.

### 3.4 EGR率的确定

分别模拟计算了最大扭矩转速 2 000 r/min时,增压柴油机的负荷特性与额定转速 3 200 r/min时,不同负荷下,不同 EGR率对发动机性能的影响.

图 4给出的是最大扭矩转速 2 000 r/min时,柴油机模拟计算和试验得出的负荷特性曲线.

从图 4(a)中都可以看出,中小负荷时,EGR率的变化对燃油消耗率影响不大,但 12%的 EGR率下的燃油消耗率不仅比 5% EGR率下的燃油消耗率小,而且比原机小.原因是随着引入排气量的增大,提高了缸内的混合气的温度,促进了燃烧,使油耗有所减少.说明此时宜采用较大 EGR率.当负荷进一步加大,EGR率的增加会使燃油消耗率开始增大,尤其是在全负荷工况,大 EGR率的燃油消耗率明显比小 EGR率的燃油消耗率高,并高于原机.因为负荷的增加会使发动机的过量空气系数减小,引入废气后,过量空气系数进一步减小,尤其是当 EGR率过高时,由于再循环排气的燃烧惰性、高温以及缸内氧浓

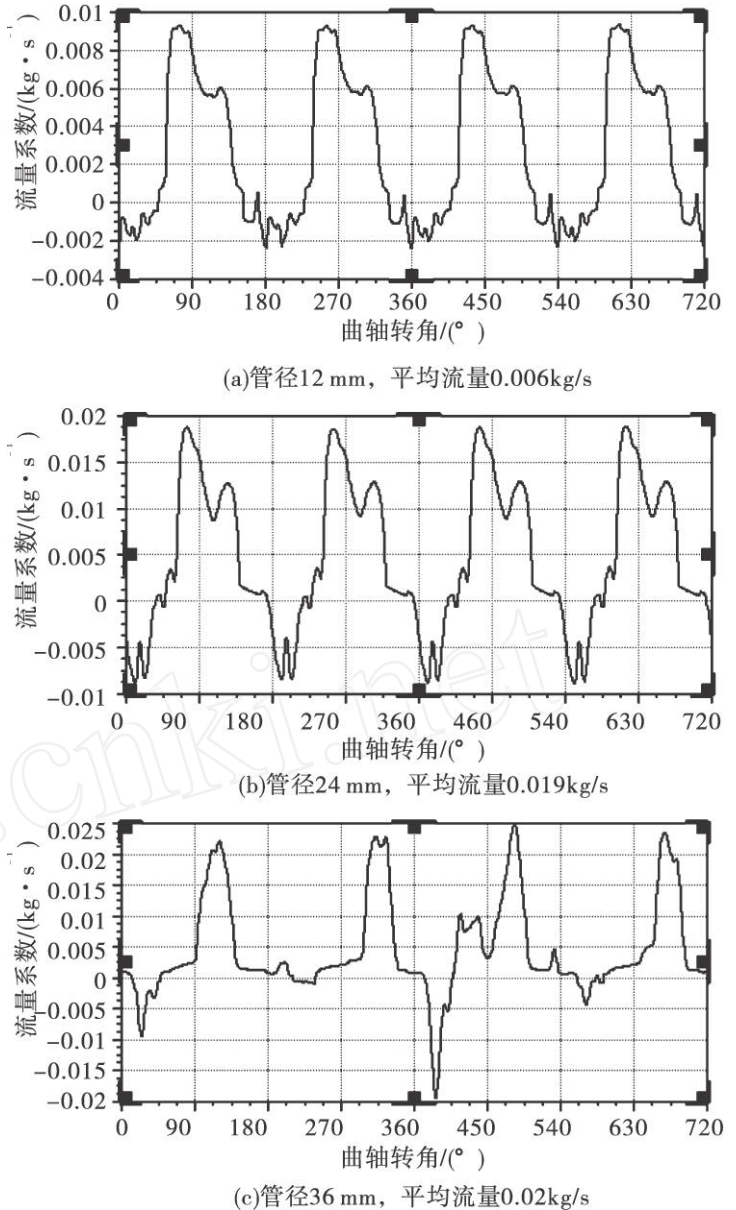


图 2 不同 EGR管路直径的进气流量特性  
Fig 2 The characteristics of inlet flow among different diameters for EGR pipeline

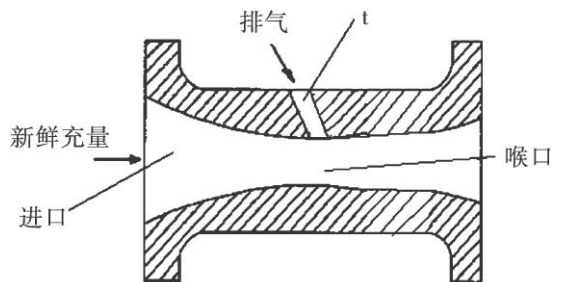


图 3 文丘里管结构  
Fig 3 The structure of Venturi tube

度的下降,都会使燃烧恶化,增大油耗.说明在大负荷时应采用小 EGR 率,全负荷或接近全负荷时,应尽量不引入废气来保证柴油机正常工作.图 4 (b)中的试验结果同模拟计算结果一致.

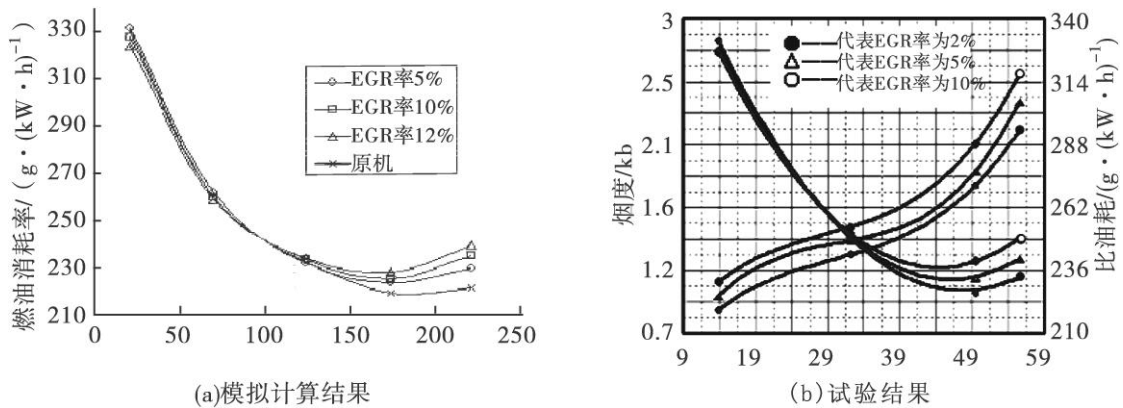


图 4 不同 EGR 率下负荷特性曲线 (2000 r/min)

Fig 4 The curves of load characteristics under different EGR ratio

图 5 给出的是额定功率转速 3 200 r/min 时,不同负荷下扭矩和燃油消耗率随 EGR 率变化关系曲线.从图中可以看出,不同负荷下,EGR 率的变化对扭矩影响不大.而对于燃油消耗率,中小负荷宜采用大 EGR 率.

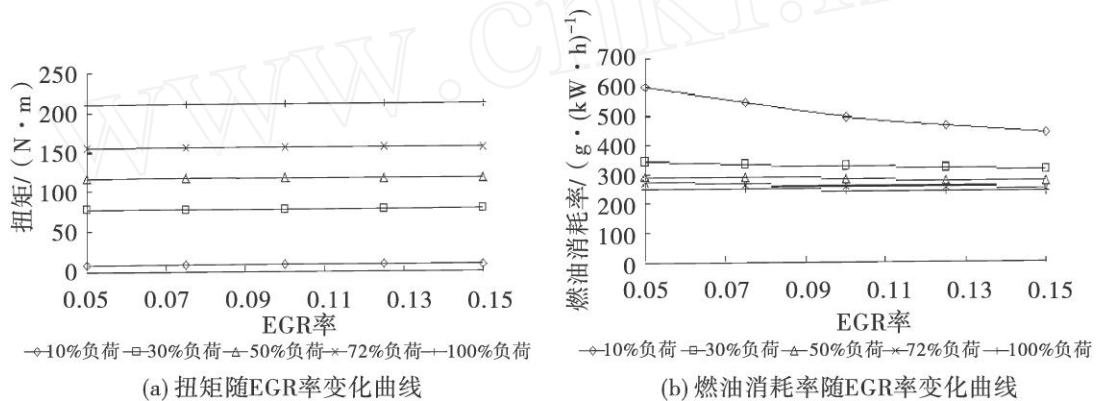


图 5 不同负荷下扭矩和燃油消耗率随 EGR 率变化曲线 (3200 r/min)

Fig 5 The curves of torque and fuel consumption with different EGR ratio under different load

### 4 试验验证

#### 4.1 NO<sub>x</sub> 的排放验证

将优化后的 EGR 系统安装在柴油机上,进行了原机与使用 EGR 系统后的 B 工况排放对比,对比结果见图 6,7<sup>[21]</sup>.

图 6,7 分别是最大扭矩转速和额定功率转速下加装带文丘里管的 EGR 系统和原机 NO<sub>x</sub> 排放的对比图.从图 6,7 中可以看出,优化 EGR 系统后,其 NO<sub>x</sub> 的排放效果明显比原机好.

#### 4.2 不同 EGR 率燃油消耗率验证

表 3 为模拟计算与实验得出的 2 000 r/min 时不同 EGR 率对应的比油耗数据对照表.从表中可以看出实验所得数据与模拟计算结果一致.在中小负荷时,随着 EGR 率的增加,燃油消耗率在降低,并且较高 EGR 率时油耗较小;随着负荷增大,燃油消耗率在增加,并且较小 EGR 率下的油耗较小;而在全负荷或接近全负荷时,燃油消耗率增加幅度变大.再次说明,中小负荷时宜采用较大 EGR 率,在大负荷时宜采用较小 EGR 率,在全负荷或接近全负荷时,不宜引入废气.

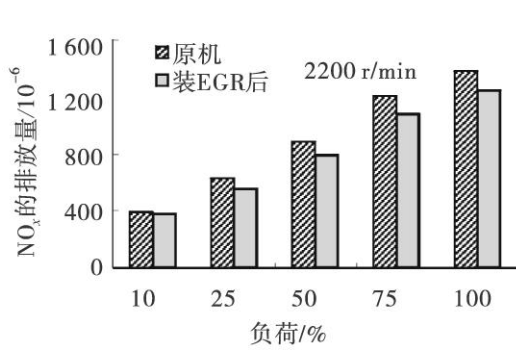


图6 最大扭矩转速下装EGR系统与原机 NO<sub>x</sub>排放的对比曲线

Fig.6 NO<sub>x</sub> discharge contrastive curve of torque at peak HP rotational speed with EGR and original machine

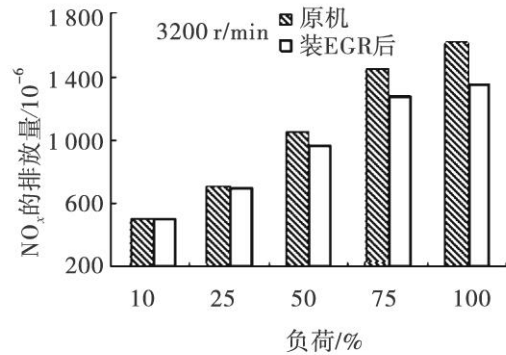


图7 额定功率转速下装EGR系统和原机 NO<sub>x</sub>排放的对比曲线

Fig.7 NO<sub>x</sub> discharge contrastive curve of rated rotational speed with EGR and original machine

## 5 结论

1)在进气管并联文丘里管系统解决了增压柴油机进排压逆差问题,优化后的文丘里管进口和喉口直径比值为 50 15.

2)运用 Boost软件对 EGR 系统的进出口管路、阀体进行优化设计;优化后的 EGR 系统对扭矩,燃油消耗率影响不大,并且可有效降低 NO<sub>x</sub> 的排放.

3)柴油机运行在中低负荷工况时,应采用较大 EGR 率,在大负荷工况,应采用较小 EGR 率,全负荷或接近全负荷时,不宜引入废气.

表 3 2000 r/min 时不同 EGR 率对应的比油耗

Tab 3 The fuel consumption corresponding to different EGR ratio at 2000 r/min

负荷 / %		原机	EGR 率 5%	EGR 率 10%	EGR 率 12%
10	实验	323.5	330.1	322.2	315.4
	模拟	330.9	332.1	328.3	324.5
30	实验	254.4	265.6	260.4	252.4
	模拟	260.2	262.6	260.25	259.16
50	实验	232.0	230.1	242.7	246.4
	模拟	233.4	232.3	233.9	234.7
72	实验	216.2	218.5	228.7	237.5
	模拟	220.8	224.35	225.98	228.5
100	实验	212.8	214.4	230.7	250.6
	模拟	222.7	230.1	235.65	240.2

## 参考文献:

- [1] 颜文胜,申立中,郑伟.文曲利管在增压中冷柴油机 EGR 系统中应用的研究 [J].农业机械学报,2006(6):5-8
- [2] SUSUMU KOHKETSU, KAZUTOSH IMORI, KENJI SAKAI, et al. EGR Technologies for a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine [J]. SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 1997(3):97-104.
- [3] 李文祥,葛蕴珊,刘金玉.内部 EGR 在增压柴油机的应用研究 [J].内燃机工程,2006(6):43-46
- [4] 杜常清.用 EGR 技术降低柴油机 NO<sub>x</sub> 排放的研究发展 [J].拖拉机与农用运输车,2005(2):59-64
- [5] 庄兵,罗福强,李占成.内燃机废气再循环 (EGR) 率评价方法研究 [J].农机化研究,2006(8):203-205.
- [6] 楼狄明,周岳敏,谭丕强,等.车用增压涡流室柴油机 EGR 系统的设计和试验 [J].车用发动机,2006(4):30-33.