

电控高压共轨柴油机配气相位优化设计研究

Research on Valve Timing Optimization Design for a Electronic Control Common Rail Diesel Engine

刘威 张波涛 刘利

(东风康明斯发动机有限公司，湖北 襄阳 441004)

摘要: 本文借助 GT-POWER 软件, 针对某 8.3 升电控高压共轨柴油机, 研究了配气相位对发动机燃油经济性的影响, 同时根据研究成果, 设计和试制了新凸轮轴, 通过发动机性能试验, 验证了模拟计算结果。研究结果表明, 优化设计的凸轮轴成功地改善了发动机全工况范围内 1.25% 的燃油经济性。

关键词: 电控柴油机; 配气相位; 优化设计; 燃油经济性; GT-POWER

Abstract: This paper described the research on valve timing optimization design for electronic control common rail diesel engine. Based on GT-POWER software, relationship between valve timing optimization design & engine fuel economy was studied for 8.3L electronic control common rail diesel engine. According to result studied, new camshaft was trial-done & engine performance test was done to validate the simulation result. The research showed that new camshaft with valve timing optimization design successfully improved engine fuel economy 1.25% in all operating area.

Key words: Electric control diesel engine; Valve timing; Optimization design; Fuel economy; GT-POWER

1 引言

随着环境、能源问题的日益突出, 国家对柴油机动力性、经济性、排放的要求也在不断提高, 如何更好地组织发动机热力过程, 是广大柴油机工作者努力的方向。其中, 发动机配气相位对柴油机的充气效率、泵气消耗起着至关重要的作用, 前者是影响发动机燃烧效率的最主要因素, 后者是影响发动机泵气损失的关键因素之一, 在优化配气相位时需要综合考虑两者的影响^[1-4]。目前配气相位优化研究可以采用试验和模拟两种方式, 试验优化的方式, 存在耗时长, 改进方向不易获得等问题; 随着计算机技术的发展, 模拟手段在配气相位优化上发挥了越来越重要的作用。本文使用 GT-POWER 软件, 针对某 8.3L 电控高压共轨柴油机燃油经济性改善进行配气相位优化设计, 同时试制凸轮轴样件, 通过台架试验验证发动机燃油经济性改进效果。

2 建立计算模型

本文的研究对象是某 8.3L 四缸电控高压共轨柴油机, 其基本参数如表 1 所示。

发动机型式	直列六缸四冲程
燃油系统	电控高压共轨
气缸直径	114mm
活塞行程	135mm
压缩比	16.6: 1
吸气方式	涡轮增压空空中冷
排放水平	国四
排放控制技术路线	SCR

表 1 柴油机基本参数表

按照发动机的主要结构参数，将该 8.3L 电控高压共轨柴油机抽象为进气系统（包括中冷系统）、排气系统、增压器及其旁通阀结构、喷油系统、配气机构、气缸和曲轴箱及电控系统等子模块，并按照发动机实际结构及逻辑关系建立 GT-POWER 计算模型，如图 1 所示。

计算模型总体在结构上分为两个部分：发动机性能件部分和电控逻辑部分^[5-7]。其中发动机性能件部分用以描述发动机本体性能件结构，电控逻辑部分用以描述发动机电控模块中各性能参数的计算逻辑。两者为交互关系：发动机性能件部分用于计算性能参数，输出给电控逻辑部分计算发动机控制参数；电控逻辑部分通过发动机性能件部分的输入，计算诸如喷油提前角、喷射压力、发动机保护、诊断等参数，为发动机本体部分输入性能控制参数，具体表征为准确输入燃油喷射规律^[8]。

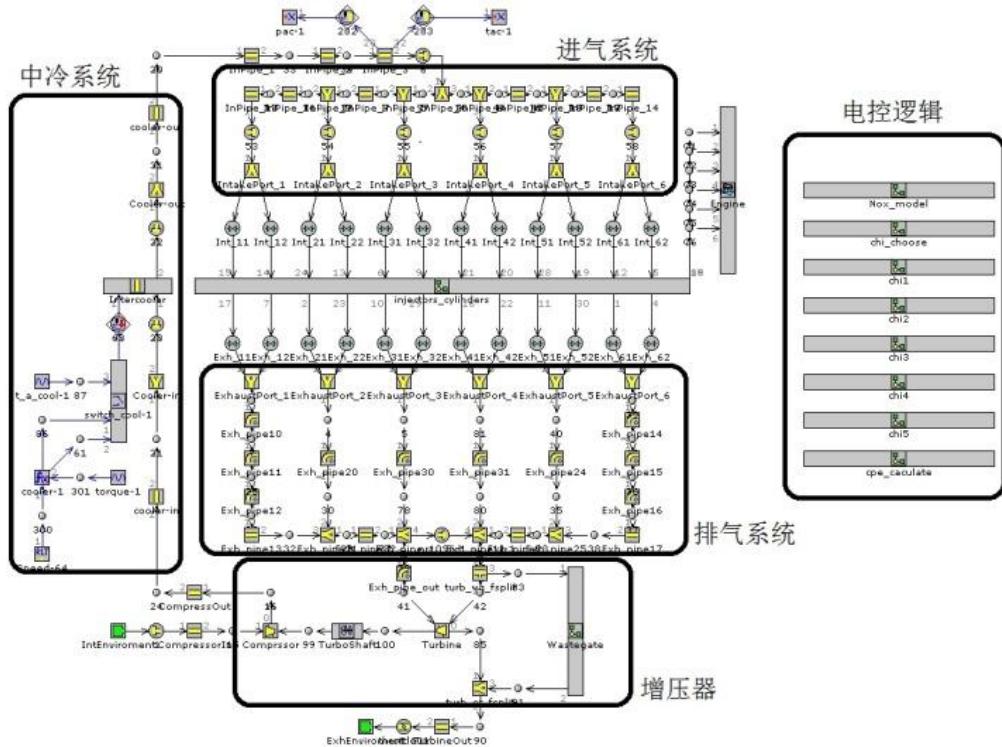


图 1 发动机计算模型图

3 标定计算模型

模型搭建完成后，需要对其计算精度进行标定，使得模型计算结果与实际相同，并具有预测性。本文基于该 8.3L 电控高压共轨柴油机，在其全工况范围内进行了计算模型标定，值得注意的是，一般模拟仿真研究只针对少数特征工况点进行模拟，进而通过局部工况点反映发动机整个工况面上的

性能表现，该方式在预测除标定工况点以外的工况点性能上具有局限性。本文中模型标定考虑了全工况范围内工况点的模型精度，标定基于缸压曲线进行，具体到性能参数上考虑功率、扭矩、比油耗、空气消耗量、爆压、增压器转速、各节点位置压力\温度等。该模型不受标定工况点的限制，在工况面上任何位置均具有良好的预测性，进而计算模型能够更加全面地、直接地预测发动机性能^[5]。模型精度标定结果显示：额定功率点、最大扭矩点缸压曲线标定结果符合性良好，如图 2 和图 3 所示。

进一步地，模型在工况面上性能参数模拟误差结果：发动机工况面上比油耗模拟误差，如图 4 所示；发动机工况面上比油耗模拟误差，如图 5 所示；发动机工况面上空气消耗量模拟误差，如图 6 所示。

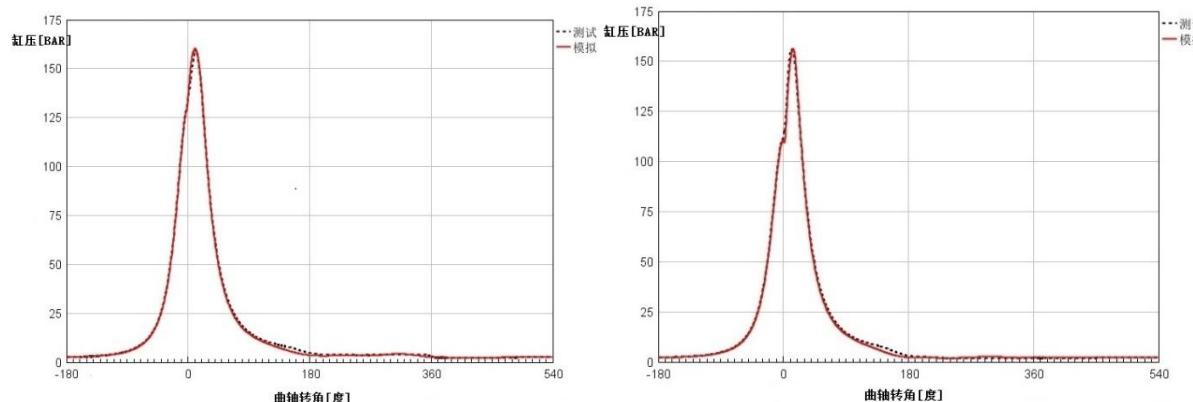


图 2、3 额定功率点（左）、扭矩点（右）缸压曲线标定图

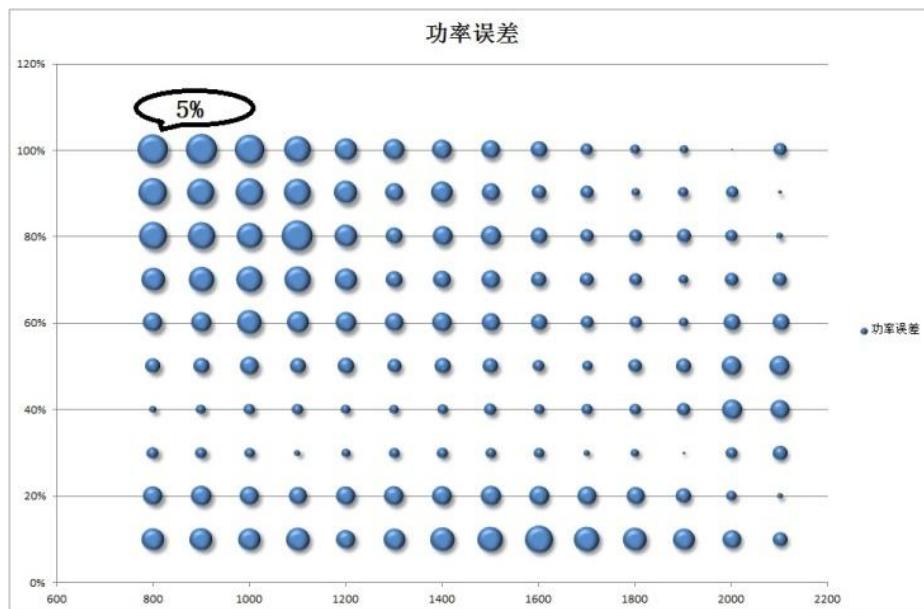


图 4 发动机工况面上功率模拟误差图

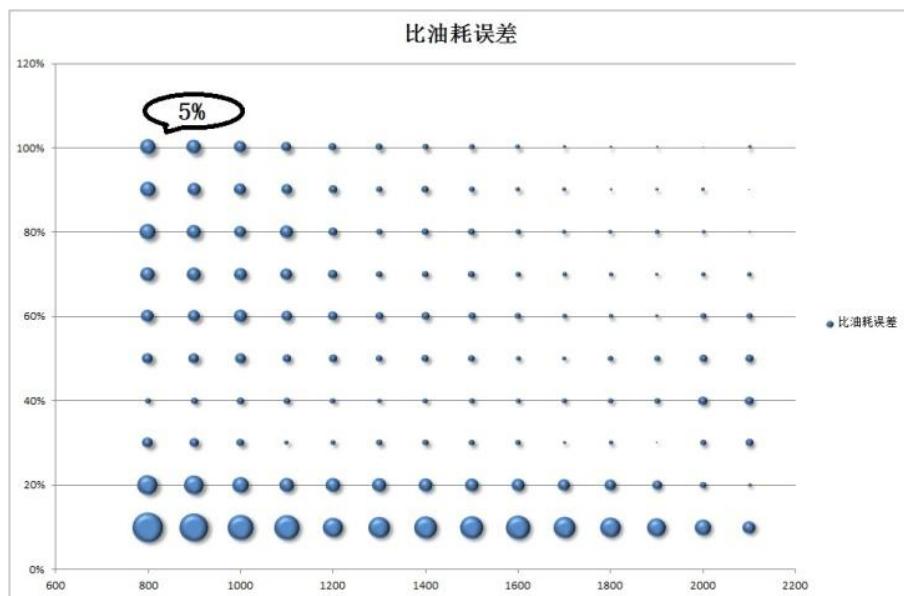


图 5 发动机工况面上比油耗模拟误差图

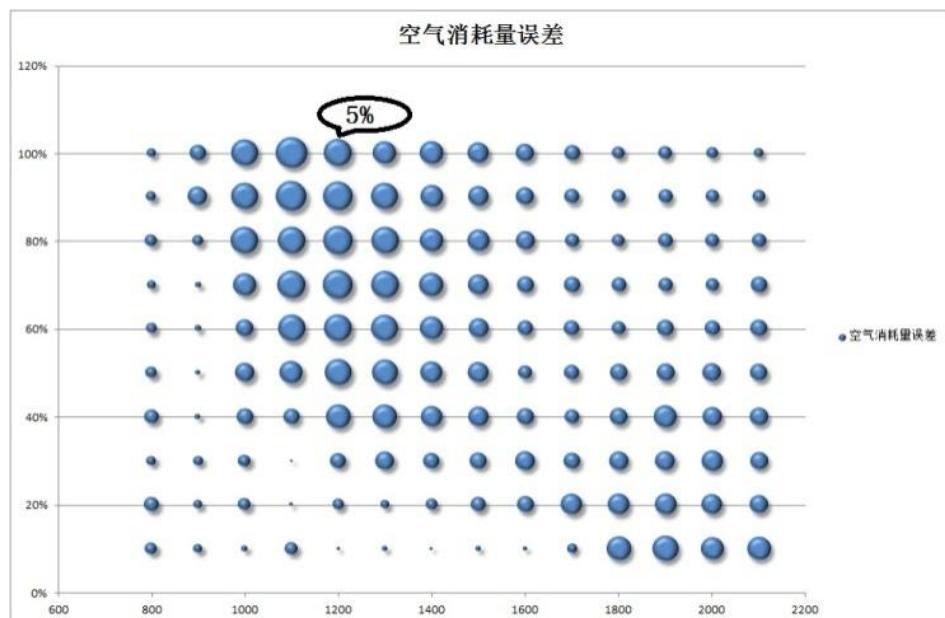


图 6 发动机工况面上空气消耗量模拟误差图

图 4、图 5 及图 6 的结果显示，发动机 900rpm 以上转速范围、20% 负荷率以上的工况范围内，最大误差小于 5%，平均误差约为 2% 左右 $((\text{模拟值} - \text{实测值}) / \text{实测值} * 100\%)$ 。

综合而言，本文的计算模型在大部分工况点具有较高的精度，在传统模拟仅针对少数工况点基础上，实现了基于工况面的模拟仿真，全面提升了模型的预测能力。

4 研究配气相位

凸轮轴作为发动机配气机构的主要部件，决定了发动机换气过程，是影响发动机性能的关键零件之一，而其中决定其特性的因素可以抽象出四个关键相位角度：进气提前角、进气迟闭角、排气提前角、排气迟闭角，四个角度对发动机换气过程的各个阶段起着至关重要的作用。

本文针对配气相位对发动机燃油经济性的影响进行分析，进而对凸轮轴进行优化设计，以提高发动机的燃油经济性。具体地研究分为两个步骤：

- (1) 进气提前角、进气迟闭角、排气提前角、排气迟闭角单因子研究。通过单因子的研究，识别

出影响本文发动机燃油经济性的配气相位显著因子，进而为下一步凸轮轴优化设计指明方向。

(2) 进气相位、排气相位的研究。进行该项研究时，保持凸轮型线不变，整体改变型线位置相对于发动机上止点的位置。根据该研究结果，直接试制凸轮轴样件，用于发动机性能对比试验。该研究方式具有不改变配气机构的动力学特性，能够快速得到凸轮轴样件的优点。

其中，模拟分析基于全工况面上的工况点进行，即 900rpm 至 2100rpm，40% 至 100% 负荷率范围内工况点，如表 2 所示。

表 2 模拟分析的工况点信息

负荷率%	900rpm	1100rpm	1300rpm	1500rpm	1700rpm	1900rpm	2100rpm
100%	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点
80%	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点
60%	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点
40%	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点	工况点

4.1 研究配气相位四个角度单因子

本文通过单独改变配气相位四个关键角度，研究配气相位对发动机燃油经济性的影响的显著性因子，进而为凸轮轴优化设计提供依据。具体方法是：保持燃烧上止点至凸轮最高升程相隔角度不变，单独将进排气凸轮升程上升段持续时间、下降段持续时间乘以一个系数，例如本文中的 0.95 和 1.05 倍，达到单独改变四个角度的目的，如表 3 所示。

表 3 配气相位单因子分析设置

配气相位	0.95倍	基础值	1.05倍
进气提前角（度）	138.7	146	153.3
进气迟闭角（度）	163.4	172	180.6
排气提前角（度）	171	180	189
排气迟闭角（度）	167.2	176	184.8

模拟分析结果显示，在模拟研究工况范围内，配气相位四个关键角度单因子对燃油经济性影响的结果如下。

4.1.1 排气提前角的影响

0.95 倍排气提前角时，发动机燃油经济性平均优化约 0.74%（该值为模拟所有工况点燃油经济性优化的算术平均值，后文均采用此方式统计），如图 7 所示；1.05 倍排气提前角时，发动机燃油经济性平均劣化约 1.0%，如图 8 所示。

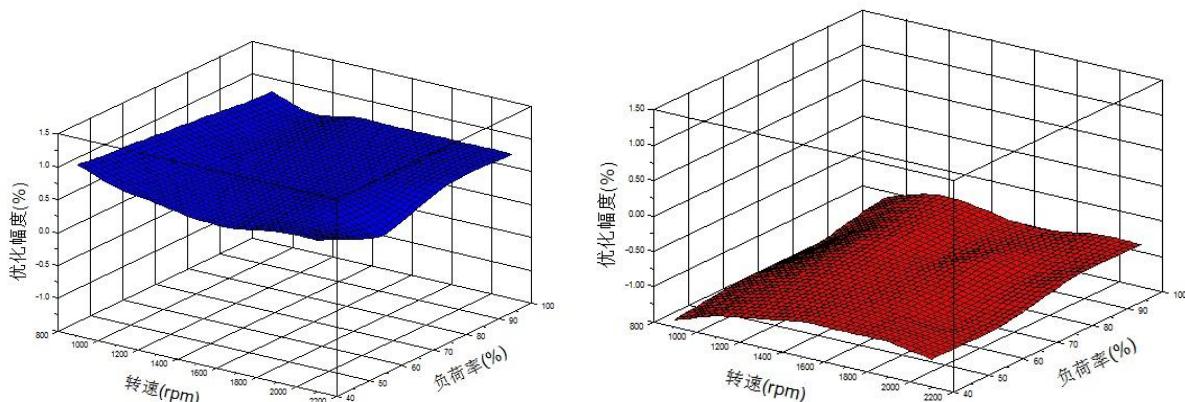


图 7、8 排气提前角对燃油经济性的影响（0.95 倍左，1.05 倍右）

4.1.2 排气迟闭角的影响

0.95 倍排气迟闭角时, 发动机燃油经济性平均劣化约 0.2%, 如图 9 所示; 1.05 倍排气迟闭角时,发动机燃油经济性平均劣化约 0.1%, 如图 10 所示。

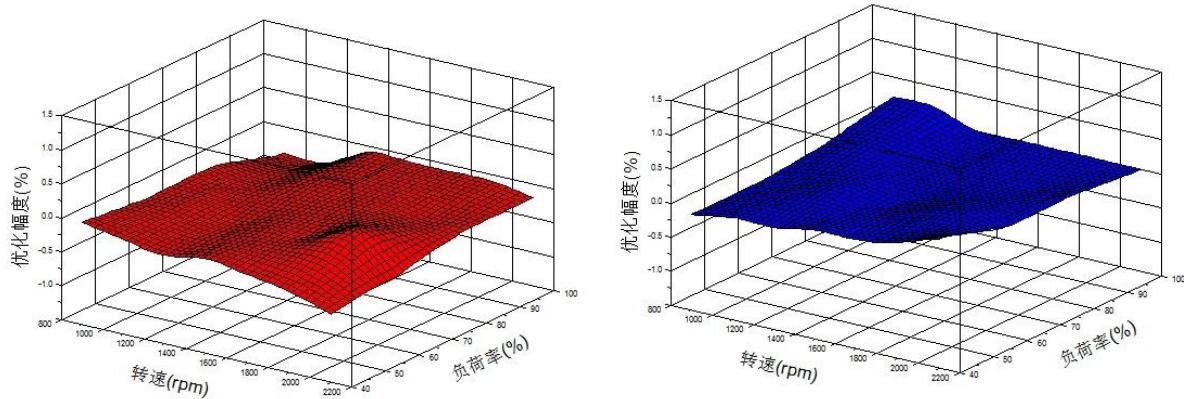


图 9、10 排气迟闭角对燃油经济性的影响 (0.95 倍左、1.05 倍右)

4.1.3 进气提前角的影响

0.95 倍进气提前角时, 发动机燃油经济性平均劣化约 0.1%, 如图 11 所示; 1.05 倍进气提前角时,发动机燃油经济性平均劣化约 0.1%, 如图 12 所示。

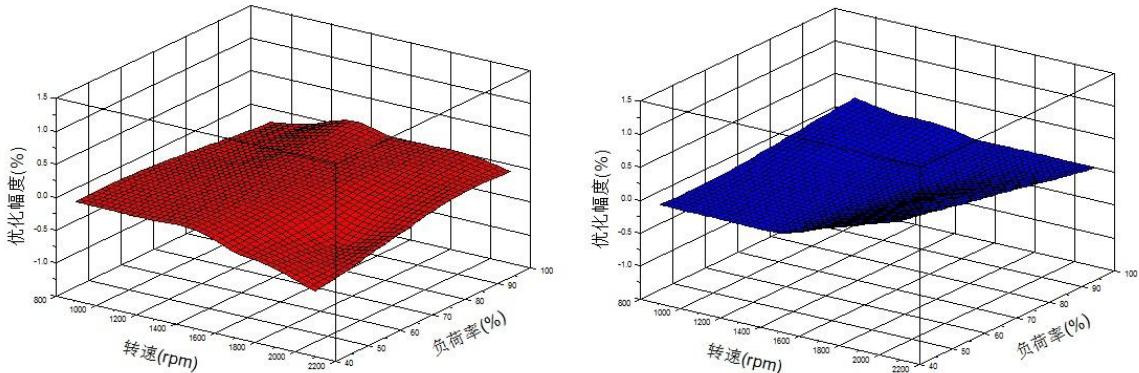


图 11、12 进气提前角对燃油经济性的影响 (0.95 倍左、1.05 倍右)

4.1.4 进气迟闭角的影响

0.95 倍进气迟闭角时, 发动机燃油经济性平均劣化约 0.1%, 如图 13 所示; 1.05 倍进气迟闭角时,发动机燃油经济性平均劣化约 0.1%, 如图 14 所示。

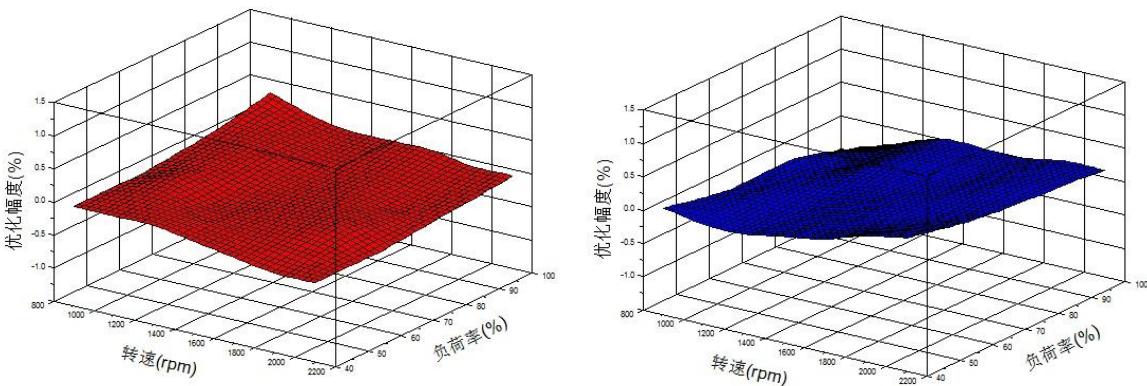


图 13、14 进气迟闭角对燃油经济性的影响 (0.95 倍左、1.05 倍右)

综合上述研究, 排气提前角在文中调整范围内对燃油经济性优化达到 0.74%, 为影响发动机燃油经济性的最显著性因子。

分析改变排气提前角对燃油经济性影响的原因如下, 理论上排气提前角对发动机燃油经济性的影响主要表现为膨胀损失与推出损失两个方面, 最优的排气提前角应设计为膨胀损失与推出损失之和最小。具体到本文的研究课题, 说明发动机目前的排气提前角过大, 即排气门打开过早, 造成发动机膨胀损失过大, 燃气对活塞做功的有效行程缩短, 造成排气损失与推出损失之和偏大, 最终导致燃油经济性偏差。

4.2 研究配气相位角优化

综合考虑配气相位单因子对发动机燃油经济性的影响趋势, 认为排气提前角减小, 即排气门推迟打开, 排气迟闭角增大, 排气门推迟关闭均有利于发动机燃油经济性的改善, 换句话说, 推迟整个排气相位有利于发动机燃油经济性的改善。因此, 本文研究了进气相位不改变、排气相位整体推迟对发动机燃油经济性的影响。本文研究以 2 度凸轮轴转角为间隔推迟排气相位进行计算分析, 具体地分为推迟 2 度、4 度、6 度、8 度、10 度、12 度、14 度共 7 个水平进行计算分析。

模拟计算结果显示, 随着排气相位的滞后, 发动机燃油经济性逐渐优化, 最优燃油经济性出现在推迟 10 度凸轮轴转角的排气相位上, 燃油经济性平均优化 2%。即最优相位在推迟 10 度凸轮轴转角, 如果继续推迟, 由于推出损失变大成为主要影响因素, 导致推迟 10 度排气相位以后的发动机燃油经济性恶化。计算结果如图 15 所示。

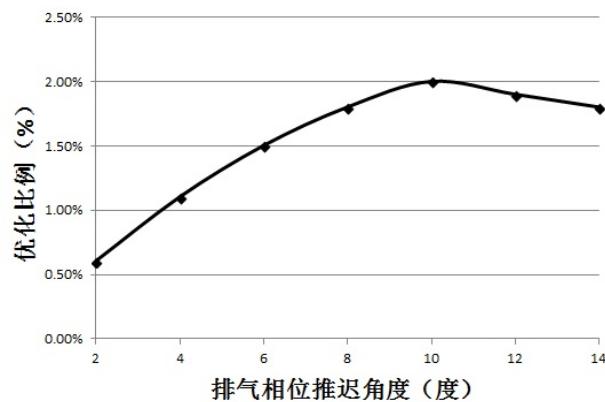


图 15 排气相位与燃油经济性优化关系

4.3 分析气门与活塞位置

在研究配气相位对发动机燃油经济性影响的同时, 需要综合考虑气门与活塞的位置关系, 即需

要研究推迟排气相位后排气门与活塞运动轨迹的干涉问题, 如图 16 所示。经过配气机构运动学分析, 排气门与活塞顶的最小间隙如表 4 所示。

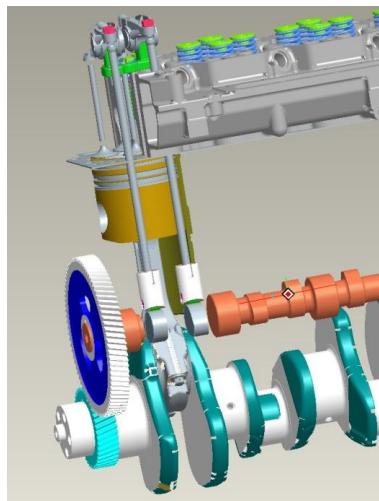


图 16 配气机构结构示意图

表 4 排气门与活塞顶最小间隙

排气相位延迟	排气门与活塞最小间隙
基础线	1.435mm(358° CA)
延迟5度	1.073mm(357° CA)
延迟6度	0.377mm(356° CA)
延迟7度	0.139mm(355° CA)
延迟8度	0.002mm(352° CA)
延迟9度	0.042mm(349° CA)
延迟13度	0.065mm(343° CA)

按照康明斯设计标准,发动机排气门与活塞顶之间的最小间隙需要大于 1mm,因此考虑按照推迟 5 度凸轮轴转角的排气相位进行凸轮轴样件试制。在这种情况下,活塞顶无需增加避阀坑,发动机的压缩比不发生变化。

4.4 验算排气相位优化

推迟 5 度凸轮轴转角的排气相位的燃油经济性优化计算结果如图 17 所示。具体地计算的发动机平均比油耗优化约 1.3%。

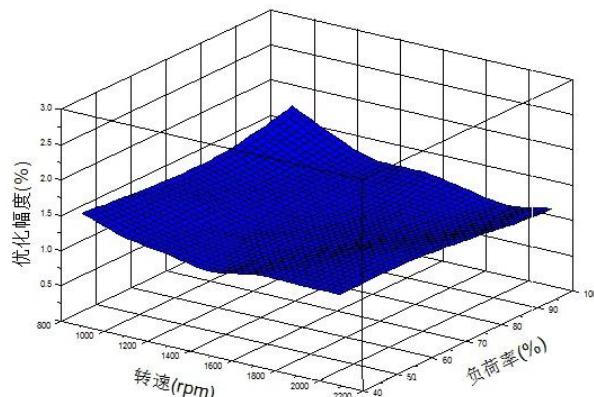


图 17 推迟 5 度排气相位燃油经济性优化计算

5 验证优化凸轮轴

根据上述排气相位优化验算结果，即排气相位推迟 5 度，试制了新凸轮轴样件，然后装配到发动机样机上，进行发动机性能试验验证，确认发动机燃油经济性的改善效果。

发动机性能对比试验结果如图 18 所示。试验结果显示，各工况点燃油经济性平均优化 1.25%，总体水平与模拟计算结果（平均优化 1.3%）相当，不同的是试验结果显示发动机中低转速区优化比例大于模拟计算结果，高速区优化比例小于模拟计算结果。综合而言，基于模拟计算优化设计的凸轮轴成功地改善了发动机的燃油经济性 1.25%。

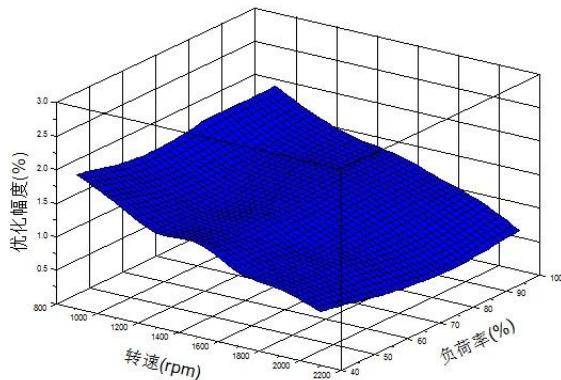


图 18 推迟 5 度排气相位燃油经济性优化试验结果

6 结 论

- (1) 模拟计算优化设计的凸轮轴成功地改善了本文研究的 8.3L 柴油机的燃油经济性 1.25%。
- (2) 凸轮轴排气相位推迟 5 度时，模拟计算的发动机燃油经济性平均优化 1.3%，与发动机性能试验结果平均优化 1.25% 非常接近，满足工程要求。
- (3) 本文研究的 8.3L 柴油机的排气提前角是影响发动机燃油经济性的最显著因素。
- (4) 对于本文研究的 8.3L 柴油机，保持排气凸轮型线不变，整体推迟排气相位有利于发动机燃油经济性的改善。

5 参考文献

- [1] 张海燕. 配气定时对柴油机性能影响的数值模拟分析. 柴油机设计与制造, 2006, 14(4): 22-26.
- [2] 邵治家, 白敏丽, 吕继组. 配气相位对 6106 柴油机的性能影响. CDAJ-China 中国用户论文集, 2007.
- [3] Achuth Munnannur, Song-Charng Kong and Rolf D. Reitz. Performance Optimization of Diesel Engines with Variable Intake Valve Timing Via Genetic Algorithms. SAE 2005-01-0374.
- [4] J. L. Chesa Rocafort, M. M. Andreatse, W. H. Green et al. A Modeling Investigation into the Optimal Intake and Exhaust Valve Event Duration and Timing for a Homogenous Charge Compression Ignition Engine. SAE 2005-01-3746.
- [5] 刘威, 张波涛, 刘利, 等. 电控高压共轨柴油机智能仿真模型应用研究. 柴油机, 2014.(4):19-22.
- [6] 郑广勇. 工作过程计算在发动机开发中的应用. 汽车技术, 2003(9): 16-22.
- [7] 邱森, 黄锦成, 张志强, 等. 仿真计算软件在高压共轨电控柴油机标定优化中的应用. 内燃机与动力装置, 2008 (6) : 6-8.
- [8] 王金虎, 徐劲松, 张学文, 等. 柴油机高压共轨燃油喷射系统控制策略研究[J]. 现代车用动力, 2009. (1): 16-20.