

# 基于 GT-power 的船用柴油机配气正时的仿真研究

## Simulation Research on Valve Timing of Marine Diesel Engine base on GT-power

张东明 平涛 胡必柱

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所)

**摘要:** 利用 GT-Power 仿真软件搭建了船用中速柴油机一维预测模型, 仿真研究了进气门关闭时刻对目标机型燃烧过程、性能及排放的影响规律, 并借助优化算法确定了目标机型的配气正时。仿真结果表明: 采用配气正时可调技术可达到改善船用柴油机应用 EGR 技术后造成中低负荷的比油耗, 同时对排气温度和热负荷升高同样有积极的改善效果。

**关键词:** 船用柴油机、废气再循环、配气正时、GT-power

**Abstract:** The effect of valve timing on marine diesel engine performance、emission and combustion process were researched by GT-power simulation model. The valve timing of the marine diesel engine was optimized by optimization algorithm. The simulation results indicate that variable valve timing can improve the economy of fuel consumption of low load. And it also has positive effect to the higher exhaust temperature and thermal load by EGR.

**Key words:** Marine Diesel Engine、EGR、Valve Timing、GT-Power

### 1 概述

面对日益严重的大气污染, 提及对其防治人们往往想到的是道路机动车排放治, 而忽视了非道路移动源, 尤其是船用柴油机的排放污染物治理。而据统计, 2012 年上海进出港船舶 260 余万艘, 货物吞吐量为 7.36 亿吨, 集装箱吞吐量 3252.9 万 TEU, 两者均居世界首位。船舶对上海市主要 NOx 污染物总量的贡献达 50%, 已不容忽视。国际海事组织制定的 Tier III 排放法规 2016 年 1 月 1 日将于排放控制区强制执行, 此项排放法规的实施已经成为现阶段推动船用柴油机领域技术创新的主要驱动力。目前已经被试验证实能够满足此项法规的技术措施主要有两种: 选择性催化还原 (SCR) 技术和废气再循环 (EGR) 技术<sup>[1,2]</sup>。

目前, EGR 技术广泛应用于机动车发动机的 NOx 排放控制, 但该项技术的应用会降低发动机气缸内氧浓度, 造成燃烧恶化, 尤其在发动机的中低工况, 表现为燃油经济性和碳烟排放恶化。为了改善中低负荷燃油经济性, 可以采用两级增压技术或配气正时可调机构, 其中配气正时可调机构的设计相对简单, 且具有成本低、可靠性高的特点, 所以本文借助仿真软件研究了船用 EGR 柴油机满足 Tier III 排放的前提下配气正时的改变对低工况燃油经济性的改善效果。

### 2 仿真模型的搭建

本文的研究对象为船用中速柴油机，其基本参数如表 1 所示。仿真模型中采用 PID 控制器分别对有效功率、喷油压力、NO<sub>x</sub> 排放量进行闭环控制，并在计算过程中将其设置的模型收敛条件。图 1 为搭建的柴油机全模型。图 2 和表 2 为部分工况点 Di jet 燃烧模型和整机仿真模型的标定结果。标定结果表明，缸内压力和放热率曲线的试验与仿真结果吻合较好，仿真模型计算与试验结果误差小于 5%，满足工作过程仿真要求，所以认为经标定的仿真模型可用于研究对象配气正时的仿真研究。

额定转速/r/min	1000
标定功率/kW	1320
缸数	6
缸径/mm	210
冲程/mm	320
单缸排量/L	11.08
燃油系统	高压共轨
EGR 型式	高压 EGR
用途	发电辅机

表 1 柴油机基本参数

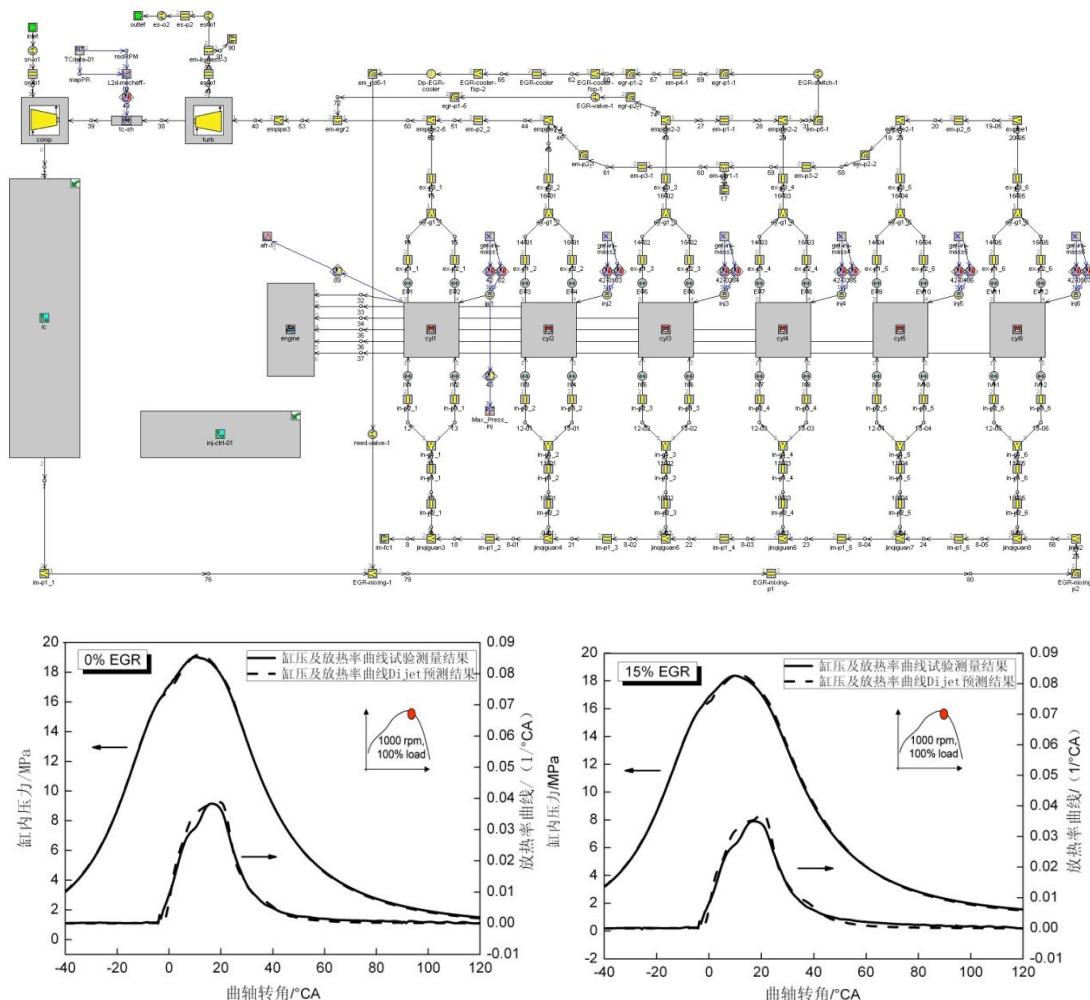


图 1 GT-Power 仿真全模型

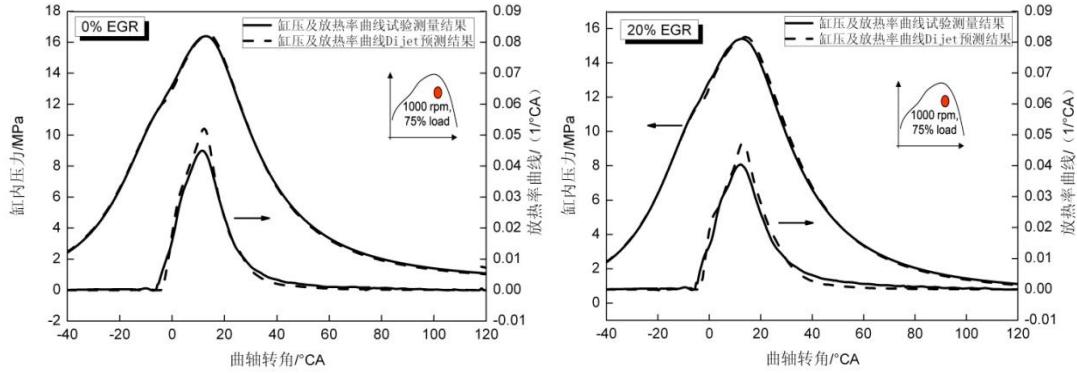


图 2 Dijet 燃烧模型标定结果

性能参数	100% 负荷			50% 负荷		
	试验	仿真	误差	试验	仿真	误差
功率/kW	1320	1319.3	0.05%	660	659.91	0.01%
爆压/MPa	20.4	20.9	2.16%	10.1	10.6	4.8%
油耗/(g/kWh)	194.5	195.74	0.6%	226.5	226.3	0.8%
NOx/(g/kWh)	11.21	10.68	4.7%	5.9	5.61	4.9%

表 2 试验与计算结果对比

### 3 仿真结果分析

文献[3]指出进气门关闭角度是影响柴油机充气效率、油耗和扭矩的重要因素，而排气提前角和气门重叠角对柴油机性能的影响有限，因此，本文只针对进气门关闭时刻进行优化，进气门关闭时刻（IVC，Intake Valve Closing Time）研究范围为 510-540° CA，同时进气门开启持续期和气门升程保持不变。

为研究进气门正时调整对性能的造成的影响，计算方案中柴油机各工况的转速、NOx 排放量、喷油时刻、喷油压力和排气门正时等边界保持一致。

#### 3.1 进气门关闭时刻对发动机性能的影响

##### 2.1 进气门正时调整对性能的影响

图 3 为进气门关闭时刻对燃油经济性的影响。从图中可以看到，进气门关闭时刻推迟，各工况下的燃油消耗率都有所改善，但中高负荷改善幅度非常有限，而低负荷工况改善幅度明显。图 4 为 IVC 对最高爆压压力的影响。从图中可知，随着 IVC 的推迟，最高爆发压力明显升高，在标定工况 IVC 迟于 522° CA 时，最高燃烧压力超过了 22Mpa。究其原因为 IVC 推迟减弱了 Miller 循环强度，有效压缩比增大，造成了燃烧前热力学最高倒拖压力的升高，详见图 5。热力学最高倒拖压力 ( $P_{mot}$ ) 定义如下：，其中， $P_{soc}$  为燃烧前缸内最高压力； $V_{soc}$  为燃烧始点缸内容积； $V_{tdc}$  为上止点气缸容积； $\gamma_{soc}$  为燃烧始点混合气的绝热指数；

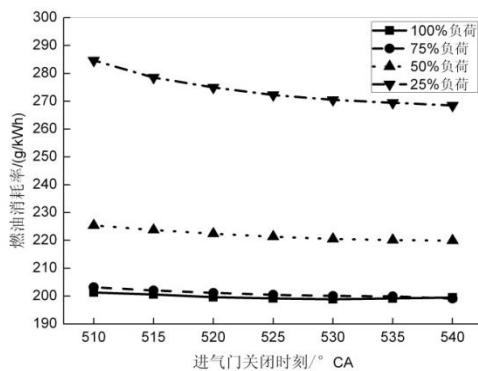


图 3 IVC 对燃油经济性影响

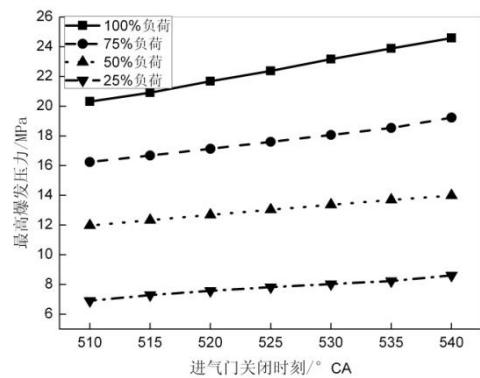


图 4 IVC 对最高燃烧压力影响

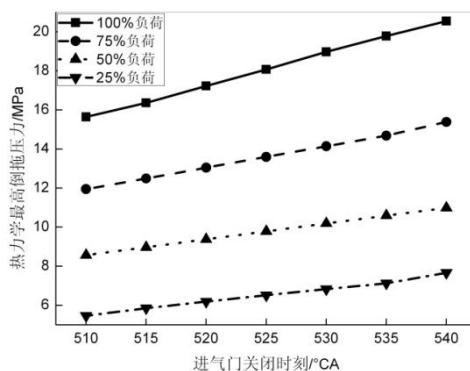


图 5 IVC 对热力学最高倒拖压力影响

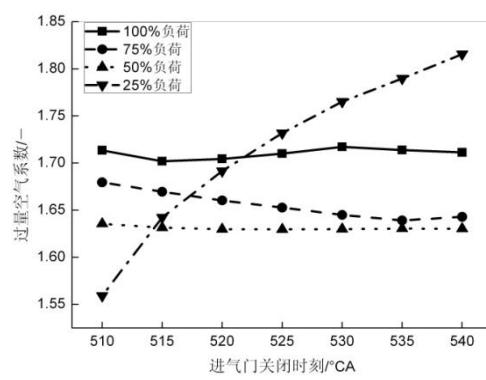


图 6 IVC 对缸内过量空气系数影响

图 6 为 IVC 调整对过量空气系数的影响。从图中可知，中高负荷随着 IVC 时刻推迟过量空气系数没有明显变化，25% 负荷随着 IVC 时刻推迟过量空气系数有明显升高。造成此现象的主要原因是进气门关闭时刻推迟会使 NOx 排放量增加，而柴油机模型通过 PID 控制器保持了 NOx 排放量不变，所以 EGR 率就会一定程度升高。但即使如此，25% 负荷的空气进气量还是发生了显著提高，这将对该工况的燃油经济性和碳烟排放改善产生积极作用。

图 7 和图 8 分别为进气门关闭时刻调整对支管排放和最高燃烧温度的影响。从图中可以得知，随着 IVC 的推迟，支管排温和最高燃烧温度明显降低，这一结果对缸内热负荷改善具有积极的作用。

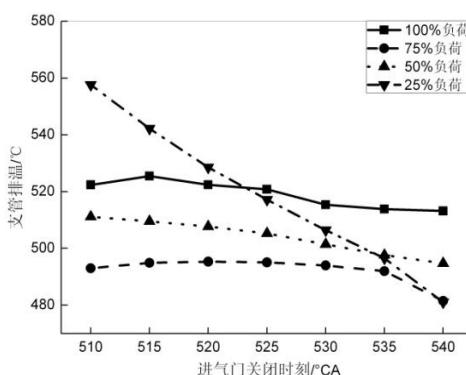


图 7 IVC 对支管排温影响

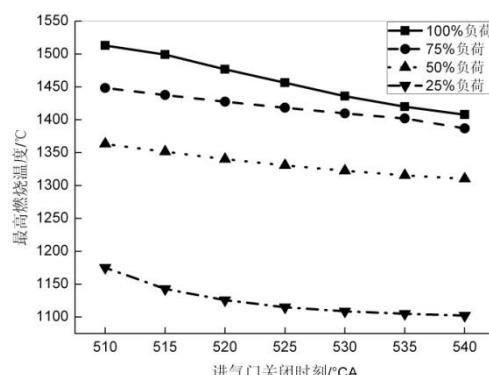


图 8 IVC 对最高燃烧温度影响

## 2.2 进气门正时调整对燃烧过程的影响

图 9 为 IVC 对滞燃期和最高压力升高率的影响。从图中可知，进气门关闭时刻越晚，滞燃期越短，对应的最高压力升高率也有所下降，燃烧会相对柔和。众所周知，EGR 会造成燃烧滞燃期的延长<sup>[4]</sup>，但随着 IVC 的推迟，即使 EGR 率有所增大，滞燃期依然会缩短。

图 10 和图 11 分别为 IVC 调整对 CA50 和 90% 放热量持续角的影响。从图中可知，进气门关闭时刻推迟，CA50 和 90% 放热量持续角都有所延长，说明随着 IVC 的推迟燃烧放热过程放缓，且燃烧持续期延长，这正是 IVC 的推迟不会大幅度改善柴油机中高负荷燃油经济性的原因所在。

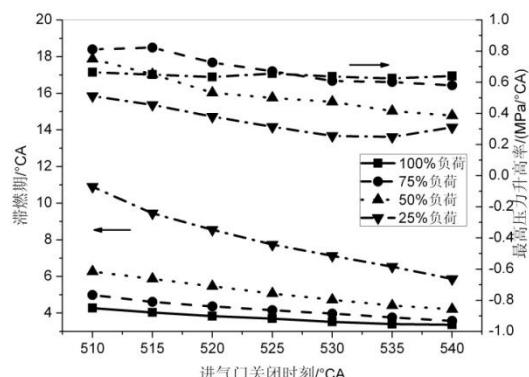


图 9 IVC 对滞燃期和最高压升率的影响

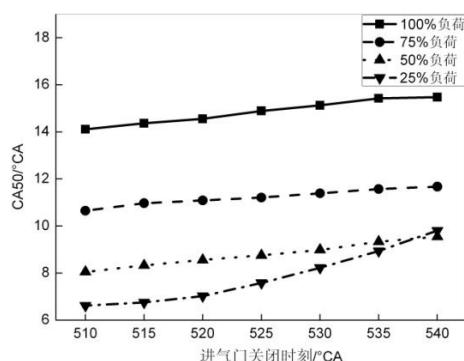


图 10 IVC 对 CA50 的影响

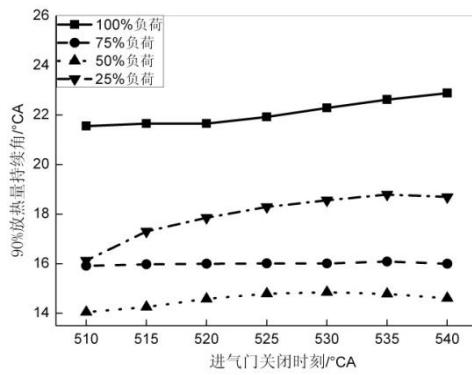


图 11 IVC 对 CA90 的影响

## 3 进气门配气正时优化结果

借助 GT-power 软件的 DOE 后处理模块的最优化功能，保持动力性指标和排放指标不变的情况下，以燃油经济性最佳为目标，对进气门配气正时和供油参数进行了多参数多目标优化计算，图 12 和图 13 为 IVC 部分优化结果示例。从图中可知，额定工况优化结果为 519° CA，而 25% 负荷对应的最优关闭时刻晚于额定负荷，为 540° CA。图 14 为各工况优化前后燃油经济性对比。从图中可以得知，如果借助进气门配气正时可变机构使各工况运行在其最佳的配气正时下，那么柴油机中低负荷工况的燃油经济性可以得到明显改善。

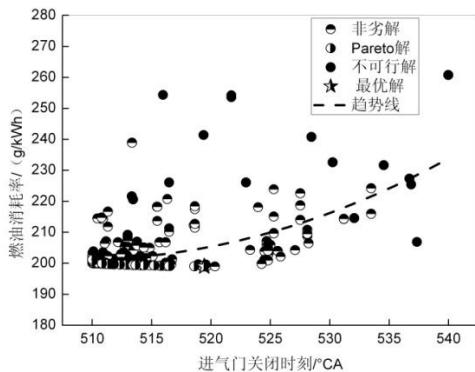


图 12 额定工况 IVC 优化结果

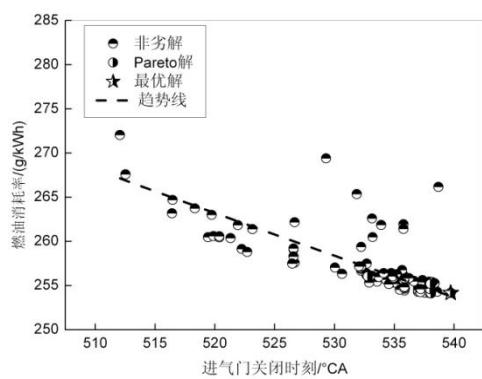


图 13 25% 负荷 IVC 优化结果

## 4 结论

- 1) 随着进气门关闭时刻推迟，柴油机燃油消耗率有所改善，但为了保持排放指标，IVC 推迟会造成 EGR 率增大，这会使燃烧放热过程放缓，且燃烧持续期延长，所以中高负荷改善幅度非常有限，而低负荷过量空气系数会有所提高，所以低负荷经济性可得到大幅度改善。
- 2) 进气门关闭时刻推迟，柴油机有效压缩比增大，燃烧前热力学最高倒拖压力升高，致使最高爆发压力随之提升，所以高负荷工况进气门关闭时刻不宜过晚。
- 3) 进气门晚关，柴油机支管排温和最高燃烧温度明显降低，这一结果对排气温度和热负荷都有积极的改善效果。
- 4) 优化结果表明，额定负荷进气门早关，部分负荷进气门晚关的可变气门正时策略可以改善采用 EGR 技术的船用中速柴油机中低负荷工况的燃油经济性。

## 5 参考文献

- [1] Georg Tinschmann, Dirk Thum. Sailing towards IMO Tier III – Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines. CIMAC, 2010, Paper No.274.
- [2] Kazuhiro Akihama, Yoshiki Takatori and Kazuhisa Inagaki. Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature. SAE Paper 2001-01-0655.
- [3] 邵治家, 白敏丽, 等. 配气相位对 6106 柴油机的性能影响研究. 内燃机工程, 2008 年
- [4] Heywoods J. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGrawHill, 1988: 539-553

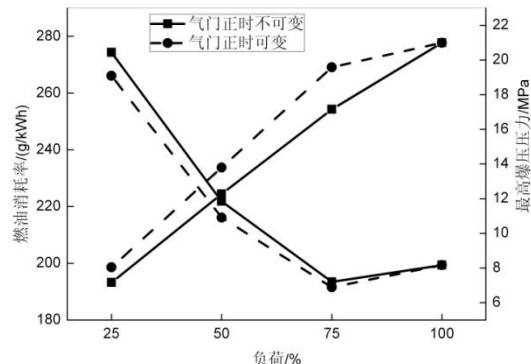


图 14 IVC 优化前后燃油经济性对比