

# R6160 船用双燃料发动机的性能仿真与优化研究

孟嗣斐, 曾宪友, 李利平, 周 军

(七一一研究所, 上海 200090)

**摘 要:** 针对改进型双燃料发动机燃烧效果较差的问题, 采用一维仿真的方法, 建立了 R6160 双燃料发动机模型。应用此模型研究了喷油正时、天然气喷气正时和过量空气系数对燃烧的影响; 对喷油正时和天然气喷气正时的改进效果进行了试验验证。试验结果表明: 合理调整喷油正时和天然气喷气正时能有效改进双燃料发动机的性能。

**关键词:** 双燃料发动机; 燃烧; 性能; 仿真; 试验

**中图分类号:** TK421<sup>+</sup>.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2015)03-0019-05

## The Research of Performance Simulation and Optimization for R6160 Marine Dual-fuel Engines

Meng Sifei, Zeng Xianyou, Li Liping, Zhou Jun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

**Abstract:** Aiming at the inferior combustion of the modified R6160 dual fuel engine, 1-D simulation method was employed to establish the engine's model. Based on this model, the influence of fuel injection timing, natural gas injection timing and excess air coefficient on combustion was studied. The effect of improved fuel injection timing and natural gas injection timing was verified through experiments. The results showed that the performance of engines could be improved by reasonably adjusting fuel injection timing and natural gas injection timing.

**Key words:** dual-fuel engine; combustion; performance; simulation; experiment

## 0 引 言

为适应日益严格的海事环保法规的要求, 必须要求船舶使用更为环保的发动机, 由此带动了以液化天然气 (LNG) 为动力的双燃料船舶发动机的快速发展。目前双燃料发动机研究已成为船舶发动机技术的一个重要发展方向<sup>[1]</sup>, 柴油机的双燃料改造是目前双燃料发动机研究的一个重要组成部分, 改造完成的双燃料发动机由于其原机并非混烧优化的限制, 燃烧效果差, 存在改进提升空间。

本文针对由柴油机改造的双燃料发动机燃烧效果差的问题, 采用一维仿真方法, 研究了喷油正时、天然气喷气正时和过量空气系数对双燃料发动

机性能的影响; 提出了改进方案并进行了验证。

## 1 模型建立

利用 GT-Power 对 R6160 改造型柴油-天然气双燃料发动机 (本文中双燃料发动机如不特殊说明, 均指 R6160 改造型天然气-柴油双燃料发动机) 建模。针对双燃料发动机燃烧过程的特点, 使用广安模型对燃烧过程进行模拟; 传热模型使用 Woschni 模型; 使用简单涡轮模型对涡轮增压器进行模拟<sup>[2]</sup>。建模完成后, 利用试验测得数据对不同的工况进行标定。标定结果显示所有误差均在 5% 范围内, 确定模型可用于对该型机进行性能分析计算。图 1 为标定完成后模型图, 表 1 为 50% 工况

收稿日期: 2015-01-05;

作者简介: 孟嗣斐(1991-), 男, 研究生在读, 主要研究方向为内燃机性能仿真与优化, E-mail: mongsifei3628@163.com。

下双燃料模式标定误差分析。

表 1 50%工况下双燃料模式部分数据标定误差

|                                    | 计算值     | 试验值     | 相对误差  |
|------------------------------------|---------|---------|-------|
| 功率/(kW)                            | 92.6    | 91.9    | 0.76% |
| 扭矩/(N·m)                           | 1 110.2 | 1 095.5 | 1.34% |
| 天然气消耗/(h)                          | 17.0    | 17.7    | 3.95% |
| 天然气替代率                             | 61.2%   | 59.6%   | 2.68% |
| 缸内最高燃烧压力/MPa                       | 6.8     | 6.7     | 1.49% |
| NO <sub>x</sub> /×10 <sup>-6</sup> | 658     | 689     | 4.50% |
| 增压后压力/MPa                          | 0.118 3 | 0.120 4 | 1.74% |
| 增压后温度 (K)                          | 318.02  | 318.15  | 0.04% |

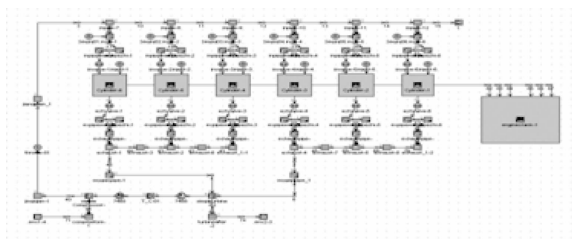


图 1 R6160 双燃料发动机模型总图

## 2 仿真分析研究

内燃机的工作过程极为复杂，影响因素众多。本文研究了喷油正时、天然气喷气正时和过量空气系数<sup>[3]</sup>对双燃料发动机性能影响，以及其对原柴油机性能的影响。

双燃料发动机燃烧形式为天然气与柴油混烧，由于替代率的差异，单独的柴油油耗和天然气气耗均不能很好地反映双燃料发动机的燃料消耗。所以对双燃料发动机的燃料消耗进行处理：将燃烧的天然气按照热值转化为柴油，然后和所耗柴油相加，得到双燃料发动机的综合燃油消耗量（后文简称油耗），即：

$$m_{\text{dual}} = m_{\text{diesel}} + m_{\text{NG}} \frac{H_{\text{uNG}}}{H_{\text{udiesel}}}$$

式中： $m_{\text{dual}}$ 为双燃料发动机的综合燃油的消耗量； $m_{\text{diesel}}$ 为柴油的消耗量； $m_{\text{NG}}$ 为天然气的消耗量； $H_{\text{uNG}}$ 为天然气的低热值，48.28 (MJ·kg<sup>-1</sup>)； $H_{\text{udiesel}}$ 为柴油的低热值，43.05 (MJ·kg<sup>-1</sup>)。

### 2.1 喷油时刻对双燃料发动机性能的影响

对于改造的双燃料发动机，在双燃料模式下，天然气在进气冲程进入缸内形成混合气，柴油在接近上止点时喷入缸内，使得混合气燃烧在上止点前完成，从而获得较高的等容度。不同的喷油正时对缸内压力升高率、燃烧温度以及排放都有很大的影响。

由于发动机存在 2 种不同的工作模式，为了保

证发动机在纯柴油模式下的工作稳定性，对喷油正时的改动应该限制在一定的范围内。本文选取喷油正时为：在原机喷油正时的基础上 ±5 (°)，图 2、3 为双燃料模式下的仿真结果。

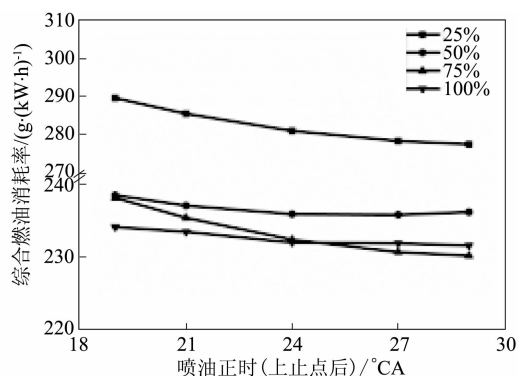


图 2 双燃料模式下喷油正时对油耗的影响

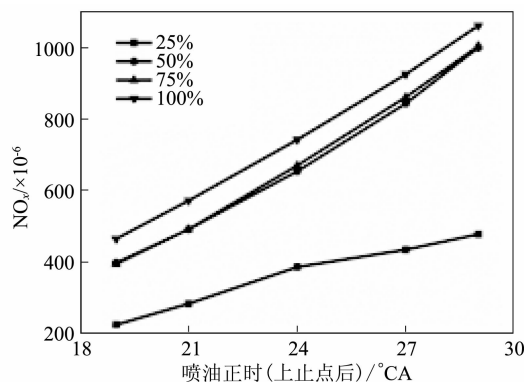


图 3 双燃料模式下喷油正时对 NO<sub>x</sub> 排放的影响

随着喷油正时的提前，发动机在双燃料模式下的综合油耗有所下降，如图 2 所示；发动机的 NO<sub>x</sub> 排放增加，如图 3 所示。

对缸内情况进行分析，随着喷油正时的提前，双燃料发动机各负荷工况下的缸内最高燃烧压力上升滞燃期增加，如图 4 所示。随着喷油正时提前，滞燃期变长，使燃油和空气混合时间变长，预混合燃烧比例增大，燃烧速率增加，气缸压力峰值和燃烧最高温度相应上升，进而 NO<sub>x</sub> 生成量增加。随着喷油正时的提前，柴油机燃烧相位前移，燃烧速率加快，后燃减少，循环热效率上升，从而使得双燃料燃油经济性改善，燃油消耗下降。

图 5、6 为纯柴油模式下喷油正时对油耗和 NO<sub>x</sub> 排放的影响。从中可以看出随着喷油正时的变化，油耗略有增加，NO<sub>x</sub> 排放急速上升。

在双燃料模式下，喷油正时为 -27 ~ -29°CA 之间综合油耗相差不多，但是 NO<sub>x</sub> 排放在 -29°CA 时明显上升，所以喷油正时 -27°CA 优于 -29°CA。在纯柴油模式下，喷油正时 -27°CA 明显较

-29°CA 存在油耗和排放上的优势。因此综合考虑纯柴油模式和双燃料模式, 将喷油正时提前3°CA, 可以减小综合燃油消耗率, 提高燃油经济性, 同时并不会对纯柴油模式下的发动机产生太大的影响。

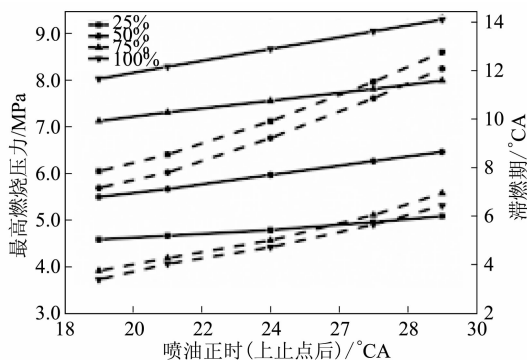


图4 双燃料模式下喷油正时对缸内爆压和滞燃期的影响

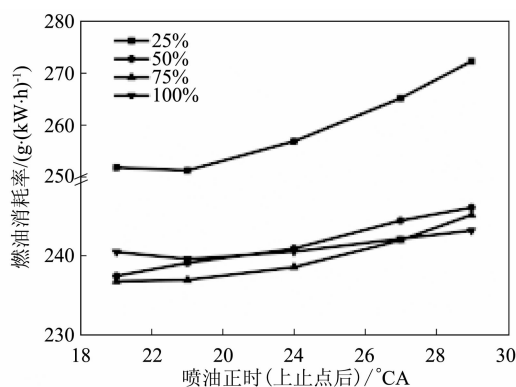


图5 纯柴油模式喷油正时对油耗的影响

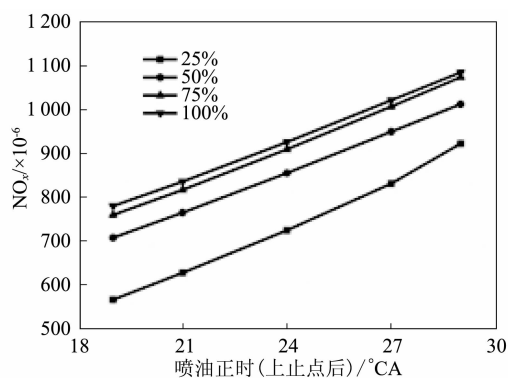


图6 纯柴油模式喷油正时对 NOx 的影响

## 2.2 天然气喷气时刻对双燃料发动机性能的影响

在双燃料模式下, 发动机采用进气歧管多点喷射技术。为获得较好的燃油经济性, 要求天然气在进入气缸后尽可能混合均匀, 同时又不至于随扫气进入排气管, 导致逃逸 HC 增加, 所以选择合适的天然气喷气时刻十分重要。本文选取天然气喷射时刻为 360 ~ 444°CA, 为了便于试验的实现, 每隔 12°CA 进行一次仿真计算。

随着天然气喷气正时的推迟, 发动机的油耗在喷气正时较大时会有所增加, 在高负荷时较为明显, 如图 7 所示。这是由于在高负荷时发动机转速较高, 并且需要喷射的天然气气量也较大, 所以需要的进气持续角更大。因此在较大的喷气正时时, 进气混合时间较少, 造成缸内天然气与空气混合不均匀, 缸内燃烧效果变差, 导致油耗增加。

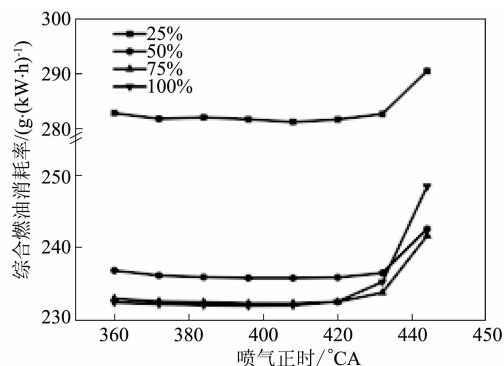


图7 喷气正时对油耗的影响

随着天然气喷气正时的推迟, 发动机的  $\text{NO}_x$  排放先略微上升, 之后下降, 在高负荷时下降较为明显, 如图 8 所示。这是由于在喷气正时较小时, 部分天然气会在扫气阶段内喷入缸内, 导致部分燃气未经燃烧直接流入排气管, 这样, 参与燃烧的燃料总量下降, 燃烧放热量减少, 生成的  $\text{NO}_x$  量降低。在喷气正时较大, 尤其是高负荷时, 需要的进气持续角较大。天然气的进气混合时间较少, 造成缸内天然气与空气混合变差, 缸内燃烧放热量降低, 导致  $\text{NO}_x$  排放下降。

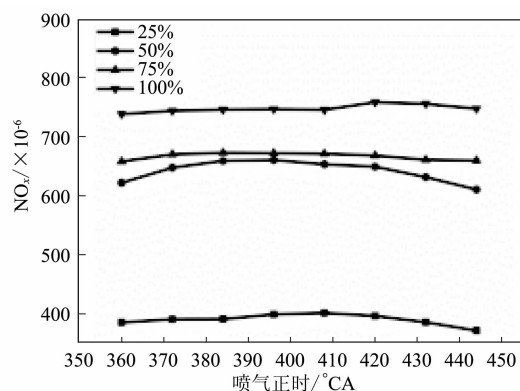


图8 喷气正时对 NOx 的影响

通过仿真计算可知, 在喷气正时为 384 ~ 408°CA 时, 发动机的排放和油耗性能均较好。但是为了保证发动机在更高的替代率情况下也有较好的性能, 所以选取较小的喷气正时作为优化的结果。

## 2.3 过量空气系数对双燃料发动机性能的影响

对于 R6160 船用发动机, 其过量空气系数较

大, 因此适当地降低进气量可以有效改善发动机的性能。为了实现对过量空气系数的控制, 在压气机前添加了节气门 (如图 9 所示), 通过调节节气门开度来控制。由于节气门对进气流量的调节作用在节气门开度小于  $20^\circ$  时较为明显, 所以对节气门的开度调节维持在一个较小的度数。

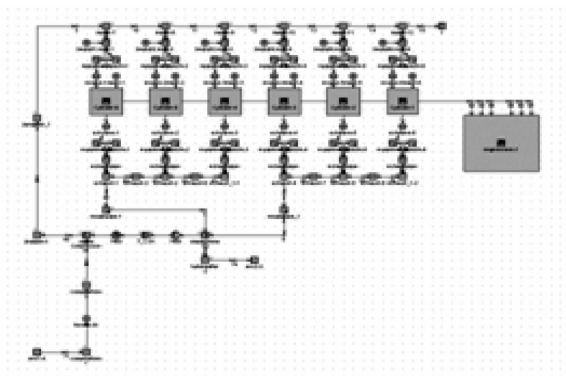


图 9 加节气门后系统图

随着节气门开度的减少, 燃烧放热率明显增大, 如图 10 所示。由放热率曲线可以看出, 发动机尾燃比例增多。低负荷下, 随着节气门开度的减小, 燃烧放热率峰值增大, 这主要是因为节气门开度的减小导致进气量减少, 使过量空气系数趋近于最佳值, 燃烧放热率峰值增大。在满负荷工况下, 在节气门开度为  $5^\circ$  时, 燃烧放热总量有明显下降, 这是由于此时的进气量已经不能满足燃料的充分燃烧, 燃烧效果下降, 燃烧放热量减少。

从图 11 中可以看到: 随着节气门开度的减小, 发动机  $\text{NO}_x$  排放明显增大, 这主要是由燃烧最高温度升高导致。在 100% 负荷, 节气门开度为  $5^\circ$  时,  $\text{NO}_x$  排放的降低是由进气量过低和燃烧放热量减少综合影响导致。

随着节气门开度的减小, 在中低负荷工况下, 燃油消耗率先降低后升高, 在高负荷工况下, 燃油消耗率会随节气门开度的减小而逐渐升高, 如图 12 所示。产生上述现象的原因是, 随着过量空气系数的变化, 越趋近于化学计量空燃比, 燃油消耗率越低, 相反, 远离化学当量比则会导致燃油消耗率的升高。

从图 13 中可以看到: 随着节气门开度的减少, 发动机的排温有明显的上升。由于 R6160 发动机对排气温度有限制 ( $460^\circ\text{C}$ ), 所以在中高负荷建议将节气门全开。

根据仿真结果可知, 在低负荷情况下 (25% 负荷时过量空气系数为 3.418), 节气门开度为  $8^\circ$  时, 发动机的综合性能较好; 在中高负荷时, 由于

排气温度和发动机输出功率的限制, 所以节气门完全打开。

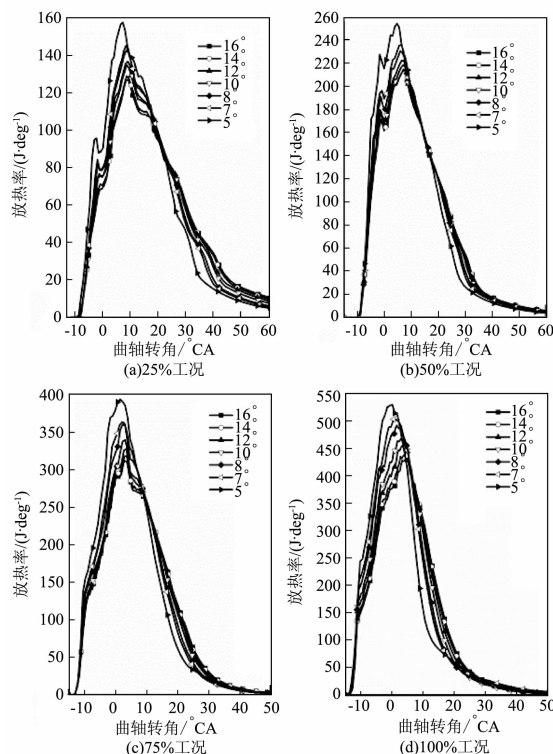


图 10 过量空气系数变化对双燃料模式下的燃烧放热率的影响

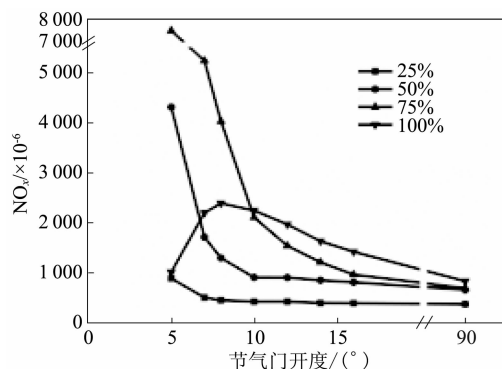


图 11 过量空气系数对双燃料模式下的  $\text{NO}_x$  排放的影响

### 3 试验验证

上述优化策略中, 喷油正时和喷气正时的优化是作用于全工况的, 过量空气系数的优化是作用于部分负荷工况的。考虑到试验实现的难易程度, 本文对喷油正时、喷气正时的优化方案进行试验验证。

#### 3.1 喷油时刻

分别在纯柴油模式和双燃料模式下进行喷油正时改变的验证: 将喷油正时提前  $3^\circ\text{CA}$ , 将试验测得数据与原机数据进行对比 (如图 14、图 15 所示, 其中实线表示  $\text{NO}_x$  排放值, 虚线表示综合燃

油消耗率)。

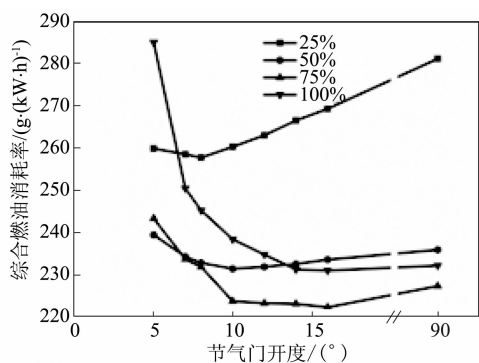


图 12 过量空气系数对双燃料模式下的综合燃油消耗率的影响

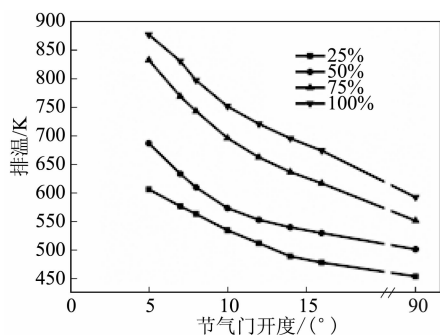


图 13 过量空气系数对双燃料模式下的排气温度的影响

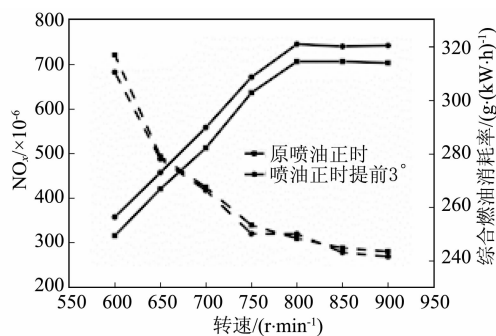


图 14 喷油正时试验验证（双燃料模式）

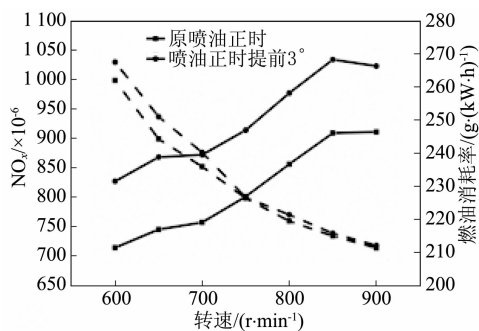


图 15 喷油正时试验验证（纯柴油模式）

在图 14 中，综合燃油消耗率在 $800(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 时提高，这是由替代率的上升导致的，原机为 51%，改进后为 54%。在双燃料模式下，油耗率有所下降，最

高下降  $7(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ， $\text{NO}_x$  排放最高上升  $45 \times 10^{-6}$ 。在纯柴油模式下，油耗率和  $\text{NO}_x$  排放均有上升趋势，油耗率最高上升  $6(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ， $\text{NO}_x$  排放值最高上升  $125 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2 喷气正时

由于 R6160 船用机主要在内河使用，所以工作转速一般不会过高，选取常用转速  $700(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$  进行试验验证，结果如图 16 所示。

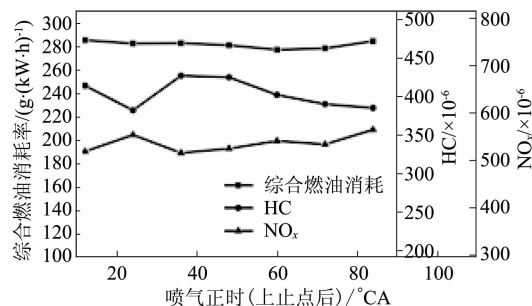


图 16 喷气正时试验验证

从图 16 中可以看出，在上止点后  $24 \sim 48^\circ \text{CA}$  综合燃油消耗率几乎不变，在上止点后  $84^\circ \text{CA}$  油耗率出现上升，从  $278.5(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$  上升为  $285.1(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ，符合仿真结论。此外，在上止点后  $24^\circ \text{CA}$  时，HC 排放较好，可以认为此时为最优喷气正时。

## 4 结论

(1) 建立了 R6160 双燃料发动机的仿真模型，标定误差在 5% 以内，仿真结果与试验结果在趋势和数值上具有一致性，可以用于仿真计算。

(2) 提前喷油正时能够改进双燃料模式下的燃烧状态，但是会使纯柴油模式下的燃烧状态恶化。对于 R6160 发动机，提前喷油正时  $3^\circ \text{CA}$ ，在不会过度影响纯柴油模式的情况下改进双燃料模式油耗，最高可以降低  $7(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。

(3) 对于双燃料多点喷射，天然气喷气正时存在综合效果较好的喷射区间，但是为了保证在高负荷下进气的可靠性，一般将喷气正时适当提前，对于 R6160 发动机，设置为上止点前  $24^\circ \text{CA}$ 。

### 参考文献

- [1] 谭月静, 黄学武. 内河柴油/LNG 双燃料动力船舶发展现状及建议 [J]. 水运管理, 2013 (2), 35 (2).
- [2] 周松. 内燃机工作过程仿真技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [3] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.