

中速大功率柴油机应用米勒循环的仿真与试验研究

李 翔, 任自中, 王新权, 朱 坚, 平 涛, 王洪锋

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 对某型中速大功率柴油机应用米勒循环进行了仿真计算研究, 并通过分析确定试验方案并进行试验验证。试验结果表明, 应用米勒循环使该型中速大功率柴油机 NO_x 排放降低 10.5%; 配合几何压缩比的增大和气门重叠角的缩小, 能有效改善米勒循环下发动机的经济性。该研究为中速大功率柴油机应用米勒循环提供了参考。

关键词: 中速大功率柴油机; 米勒循环; 压缩比; 气门重叠角

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)02-0021-04

Simulation and Experimental Investigation of Miller Cycle on a Medium-speed High-power Diesel Engine

Li Xiang, Ren Zizhong, Wang Xinquan, Zhu Jian, Ping Tao, Wang Hongfeng

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The miller cycle simulation research of a medium-speed diesel engine was conducted. And to verify the simulation results, testing program was determined and tests were carried out. The test results show that application of miller-cycle can reduce the NO_x emission by 10.5%, coupled with the compression ratio increasing and valve-timing overlap angle reduction, the economical efficiency could be improved effectively. This study provides a reference for the application of miller-cycle on high-power medium-speed diesel engine.

Keywords: high-power medium-speed diesel; miller-cycle; compression ratio; valve-timing overlap angle

1 概 述

随着全球环境的日益恶化, 船用柴油机的排放污染逐渐引起人们的重视, 其排放限制法规也逐步加强。由于船用柴油机的强化程度高, 其 CO_2 、 CO 和 HC 的排放相对较低, 而 NO_x 排放则比较严重。在这样的趋势下, 国际海事组织 IMO 针对船用柴油机 NO_x 排放的法规日益严格。根据 IMO 通过的 2011 年开始实施的 Tier II 排放标准的计算公式, 转速在 130 ~ 2 000 r/min 的柴油机的 NO_x 排放限制标准在 7.66 ~ 14.36 g/kWh 之间^[1]。

与此同时, 降低 NO_x 排放的相关技术近年来取得很大进展, 一般分为机内排放措施和机外排放

措施。其中机内排放措施的目的是通过降低燃烧温度来降低 NO_x 的生成, 主要采用高压共轨、缸内加水和进气加湿、充量调节及米勒循环、缸内均质预混合燃烧和低温燃烧等技术。其中米勒循环技术以其适用性强、技术限制较低, 被国外各大柴油机生产商最新研制的各型柴油机广泛采用^[2]。

米勒循环理论基于进气门关闭角 (intake-valve closing, IVC) 提到下止点之前的方式, 使缸内气体经历了一个膨胀过程后再开始压缩, 以此对进气终了时缸内气体的温度进行内部冷却, 从而降低缸内最高燃烧温度, 达到降低 NO_x 排放、改善柴油机燃烧排放性能的目的, 如图 1 所示^[3]。由于进气门提前关闭造成进气充量的减少, Miller 和 Lieber-

收稿日期: 2009-11-23; 修回日期: 2009-12-23

作者简介: 李翔(1982-), 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机工作过程及增压技术, Email: bluehover@vip.sina.com。

hem 后来又提出通过提高进气压力来补偿米勒循环工作过程造成的进气充量的不足^[4]。过去由于增压器压比的局限,不能有效弥补米勒循环工作过程中进气充量的不足,故米勒循环技术并未得到广泛的运用。近年来随着高压比增压器的问世,适用于中速柴油机的单级涡轮增压器的压比最高可达 5.8^[5],为实际应用米勒循环技术提供了广阔的空间。

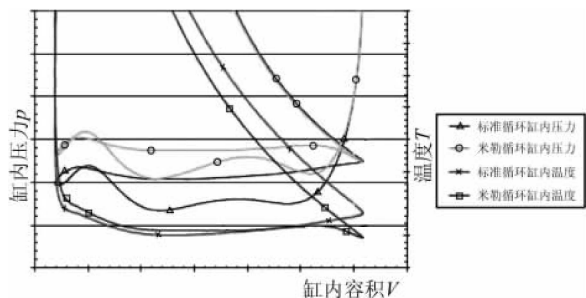


图 1 米勒循环与标准循环的低压示功图对比

本文根据上述技术背景,利用先进的仿真计算软件针对某型中速大功率柴油机米勒循环工作过程进行计算分析,同时对几何压缩比和气门重叠角进行优化分析。根据分析结果确定试验方案,并将仿真计算与试验做对比得出结论。

2 计算模型的建立和标定

根据该型柴油机各部件的结构参数和技术规格,运用 AVL BOOST 软件搭建了仿真模型,如图 2 所示。选用 AVL BOOST 中的 Two Zone Table 燃烧模型对缸内燃烧过程进行仿真计算,该模型依据用户输入的燃烧放热率来对缸内燃烧过程进行仿真计算,其算法是将燃烧区域分为已燃区和未燃区,分别计算燃烧产物和燃烧温度,能够对 NO_x 等排放物进行仿真预测计算^[6]。

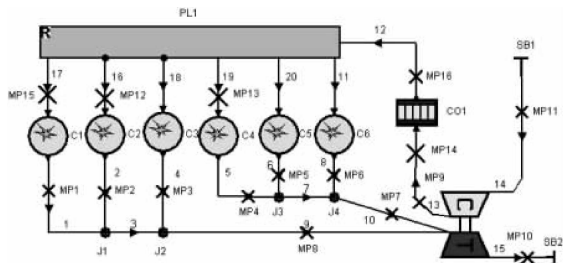


图 2 某型中速大功率柴油机仿真计算模型

仿真模型标定结果如表 1 所示。表中各项仿真参数与试验的相对误差均在合理范围之内,模型标

定良好,可以用于下一步的仿真计算。

表 1 试验测试值与仿真标定值的对比

主要性能参数	仿真值与试验值的相对误差
输出功率/kW	0.12%
有效燃油消耗率/(g/kWh)	0.05%
最高燃烧压力/MPa	1.67%
涡轮前排气温度/℃	-3.92%
涡轮后排气温度/℃	-5.45%
中冷前气体温度/℃	2.25%
中冷后气体温度/℃	-3.22%
中冷后增压压力/kPa	-1.72%
NO_x /(g/kWh)	-0.47%

3 计算分析

3.1 米勒正时的确定

根据标定好的计算模型,对该型中速柴油机应用米勒循环进行仿真预测计算,计算结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着进气门关闭角即米勒正时(Miller Timing)的提前,为了保证进气充量一致,即不同进气门关闭角的过量空气系数基本不变,就需要增压器有更高的压比来提供更高的进气压力。从图中可以看出米勒循环抑制 NO_x 生成的作用明显,最高燃烧压力也随着米勒正时的提前而显著降低;但是在经济性方面,随着米勒正时的提前,油耗率不断增加,这种趋势在进气门早于 530°CA 关闭时尤为明显。

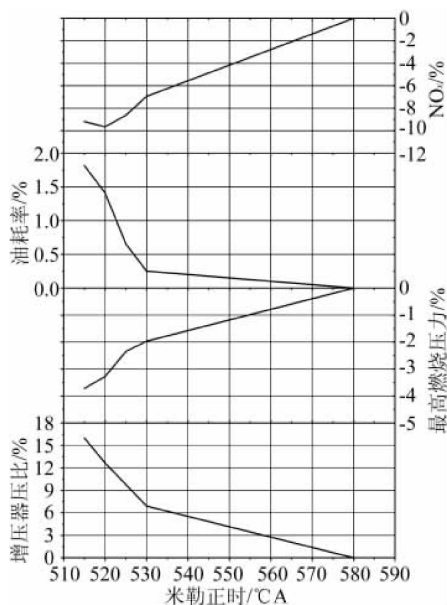


图 3 某型中速柴油机应用米勒循环的仿真计算结果 (相对原机变化的百分比,过量空气系数保持一致)

从图4a的低压示功图中可以看出,由于进气门在下止点前提前关闭,而此时活塞继续下行到达下止点。这段过程中气缸内的工质在经历了一个短暂的膨胀过程后开始压缩,致使压缩冲程开始时缸内压力较低,从而降低了最高燃烧压力。

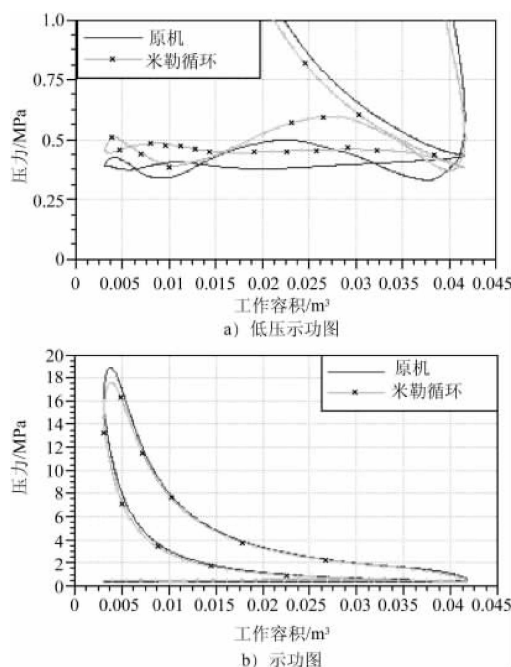


图4 米勒循环与标准循环在示功图上的差异

米勒循环能有效减少 NO_x 的生成,降低发动机的最高燃烧压力,但是随着米勒正时的提前,油耗率逐渐增加,当进气门早于 530°CA 关闭时,发动机的油耗率明显升高。这是由于进气门在下止点之前关闭,造成实际的压缩冲程变短,有效工作容积减少,有效压缩比小于膨胀比,从图4b的示功图上可以看出,米勒循环下示功图的有效面积较小,致使平均指示压力较低,油耗率升高。

3.2 气门重叠角的影响

增压柴油机中燃烧室扫气的气门重叠角很重要,它影响到进排气损失、气缸充量大小、残余废气的多少、零件热负荷的高低。通常来说,过大的气门重叠角使换气损失较大,可以通过调整气门重叠角来优化换气过程、降低换气损失。气门重叠角的影响如图5所示,从图中可以看出,发动机运用米勒循环后,较小的气门重叠角使排气压力降低,进气压力线升高,从而降低了泵气损失,使经济性得到改善。从图6可以看出,较小的气门重叠角有利于降低燃油消耗率,但是随着气门重叠角变小,发动机的排气温度会随之升高。在气门重叠角选取时要综合考虑燃油消耗率和排温。

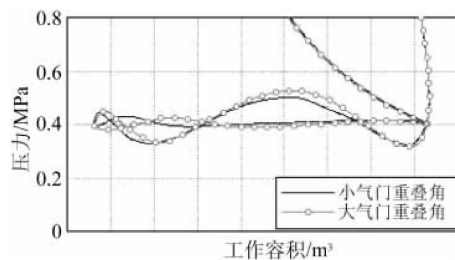


图5 气门重叠角对应的低压示功图

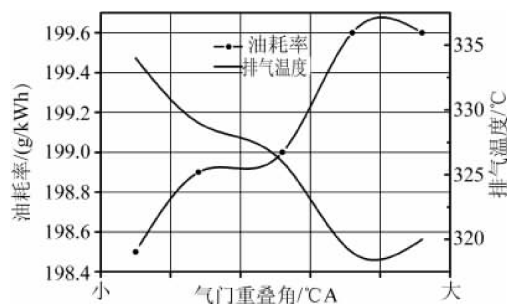


图6 不同气门重叠角对油耗率和排温的影响
(相对原机变化的百分比)

3.3 压缩比的影响

一般来讲,适当增大几何压缩比能够使发动机的燃油经济性得到改善,但是随着几何压缩比的增大,缸内的最高燃烧压力也随之提高。米勒循环能有效降低发动机的最高燃烧压力,基于这点优势,在保证最高燃烧压力不超过原机水平的前提下,可以通过适当增大几何压缩比来提高发动机的循环热效率,以此改善米勒循环的燃油经济性。调节进气压力使过量空气系数保持一致,增大几何压缩比对性能的影响,如图7所示。

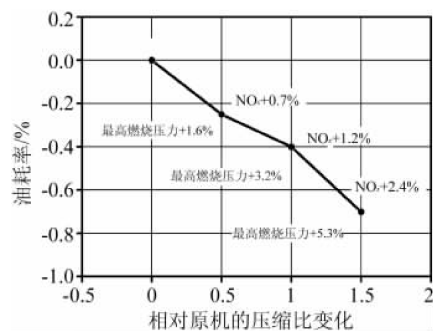


图7 压缩比对应用米勒循环的影响(相对原机变化的百分比,过量空气系数保持一致)

从图7可以看出,随着几何压缩比的增大,油耗率逐步下降;而发动机的爆发压力明显上升,且 NO_x 也略有提高。由此可见,增大几何压缩比能弥补米勒循环对经济性产生的不利影响,改善其燃油经济性,但要兼顾发动机的机械负荷,使其不能超

过发动机所能承受的最高燃烧压力。

3.4 小结

通过性能仿真计算可以看出,柴油机应用米勒循环对降低 NO_x 排放的作用较为明显,但单独应用米勒循环不能使发动机的各项性能达到最优化,需要对其它工作过程参数进行优化。综合上述计算分析并进行多方案匹配计算,得出一种综合性能最优的方案,可以使 NO_x 降低 8%,油耗率增加 0.3%,最高燃烧压力下降 1.1%。该方案有效降低了 NO_x 的排放,且经济性没有明显恶化,发动机运行的负荷水平也没有增加,因此将该方案作为试验研究方案进行验证。

4 试验验证

根据仿真计算确定的方案,重新设计了发动机配气凸轮的型线,调整气缸垫片厚度,使发动机的几何压缩比提高,对发动机的燃油消耗、进排气系统、缸内工作状态和 NO_x 排放进行了试验测量分析,缸内工作状态以第二缸测试数据为准。应用米勒循环后的试验测试数据与原机数据第对比如表 2 所示。

表 2 应用米勒循环后的试验测试值与原机的对比

主要性能参数	米勒循环与原机的对比
有效燃油消耗率/(g/KWh)	+0.1%
最高燃烧压力/MPa	-0.56%
涡轮前排气温度/°C	+5.1%
涡轮后排气温度/°C	-0.64%
中冷前气体温度/°C	+7.2%
中冷后气体温度/°C	+0.81%
中冷后增压压力(相对压力)/kPa	+20.69%
NO_x 排放/(g/kWh)	-10.53%

如表 2 所示,采用米勒循环、缩短气门重叠角并增大压缩比的方案可行。发动机的最高燃烧压力

基本保持在原来的水平, NO_x 排放下降明显,降幅为 10.5%;油耗率略有上升,增幅仅为 0.1%。

5 结 论

(1) 某型船用中速大功率柴油机应用米勒循环能够有效降低 NO_x 的排放,降幅达 10.5%。

(2) 在应用米勒循环的同时对其它工作过程参数进行优化,适当地将几何压缩比提高,并使气门重叠角缩短了 22 °C A,以此来改善应用米勒循环下发动机的燃油经济性,使米勒循环得到合理利用。

(3) 某型中速大功率柴油机应用米勒循环的仿真与试验研究对米勒循环的实际应用进行了深入分析,对各型中速大功率柴油机应用米勒循环具有普遍意义。

参考文献

- [1] Marine Environment Protection Committee, Report of The Marine Environment Protection Committee On Its Fifty-seven Session[R], IMO, 2008.
- [2] 冷先银,隆武强. 现代船用柴油机 NO_x 排放的机内净化技术[J]. 柴油机, 2009, 31(3): 19-23.
- [3] Mr. Christer Wik, Mr. Bjorn Hallback. Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine[C]. Vienna, CIMAC. 2007.
- [4] Yaodong Wang, Shenchuo Zeng, Jincheng Wuang. Experimental investigation of applying miller cycle to reduce NO_x emission diesel engine[J]. Proceedings of the Institution Mechanical Engineers. 2005.
- [5] ABB. <http://www.abb.com.cn/turbocharging/>. 2009.
- [6] AVL. BOOST v5.1-Users Guide[R]. 2008.
- [7] 周龙保,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.