

米勒循环结合 EGR 的可调两级增压柴油机性能研究

李林剑^{1,2}, 胡志龙^{1,2}, 崔毅^{1,2}, 邓康耀^{1,2}, 李先南³, 王新权³

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

3. 七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 将米勒循环和 EGR 技术相结合, 研究二者综合使用降低 NO_x 排放的同时保持燃油经济性的潜力。开展了不同米勒正时结合低压和跨级 EGR 系统的负荷特性及推进特性工况试验, 得到了推进特性和发电特性在 NO_x 排放满足 IMO Tier III 要求下的最佳经济性控制策略。并进一步研究了针对万有特性的综合减排措施控制策略及效果。

关键词: 米勒循环; 废气再循环; 可调两级增压; 柴油机

中图分类号: TK421^{+.3} 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2017)06-0001-05

Study on Performance of Regulated Two Stage Turbocharged Diesel Engines Combined Miller Cycle with Exhaust Gas Recirculation

Li Linjian^{1,2}, Hu Zhilong^{1,2}, Cui Yi^{1,2}, Deng Kangyao^{1,2}, Li Xiannan³, Wang Xinquan³

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240; 3. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: EGR and Miller cycle were combined to study its potential on reducing the NO_x emission and maintain the fuel efficiency at the same time. The control strategies for optimized fuel efficiency under the constraints of IMO Tier III NO_x emission regulation were obtained by engine propulsion and generation characteristics tests, which were carried out under various combination of Miller timing and EGR type and degrees. The combined control strategies and its effect regarding to universal characteristics were also studied.

Key words: Miller cycle; exhaust gas recirculation; regulated two stage turbocharging; diesel engine

0 引言

国际海事组织 (IMO) 第三阶段船用柴油机 NO_x 排放法规已于 2016 年开始强制实施。为了应对 IMO Tier III 排放法规并提高燃油经济性, 采用的主要技术有: 两级增压^[1-2]、米勒循环^[3-4]、废气再循环^[5-6]、后处理^[7-8]、代用燃料^[9-10]以及余热能回收^[11-12]等。

米勒循环通过进气门早关或晚关, 使有效压缩

比小于膨胀比, 从而降低了压缩终点温度, 达到缸内低温效果, 是一种能同时改善内燃机热效率和 NO_x 排放的技术手段, 目前已受到越来越广泛的关注。然而随着排放法规越来越严格, 单独使用米勒循环技术已无法达到现行法规对 NO_x 排放的要求。EGR 技术能显著抑制柴油机缸内 NO_x 的生成, 但是大 EGR 率将导致燃油消耗显著恶化^[13], 所以在保持燃油经济性的同时, 仅使用 EGR 技术也很难满足 Tier III NO_x 排放标准。

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-07-13

作者简介: 李林剑(1991-), 男, 研究生, 主要研究方向为内燃机结构与性能设计, E-mail: 401157845@qq.com。

本文研究将米勒循环与 EGR 技术相结合降低柴油机的 NO_x 排放。由于米勒循环和 EGR 都会减少进入柴油机的新鲜空气量, 为了保持柴油机的功率, 须要增大进气压力, 所以采用可调两级增压系统对进气进行调节控制。

1 试验台架

设计并搭建了米勒循环结合 EGR 的可调两级增压柴油机试验台架。为了使台架能够实现米勒循环, 对进气凸轮型线进行了重新设计, 并设计了进排气系统和 EGR 系统管路。为了实现修改喷油策略的功能, 将柴油机的电控单元 (ECU) 更换成了可进行喷油参数设置的 ECKA 电控系统; 并且对可调两级增压系统旁通阀以及 EGR 阀的控制系统, 及试验台架的信号采集系统进行了设计开发。

试验所用柴油机的主要参数见表 1。米勒循环结合 EGR 的可调两级增压系统试验台架的总体结构及测试系统示意如图 1 所示。

表 1 试验柴油机基本参数

结构	直列 6 缸
缸径/mm	108
冲程/mm	130
排量/L	7
标定功率/kW	220
标定转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 200
最大扭矩转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 160

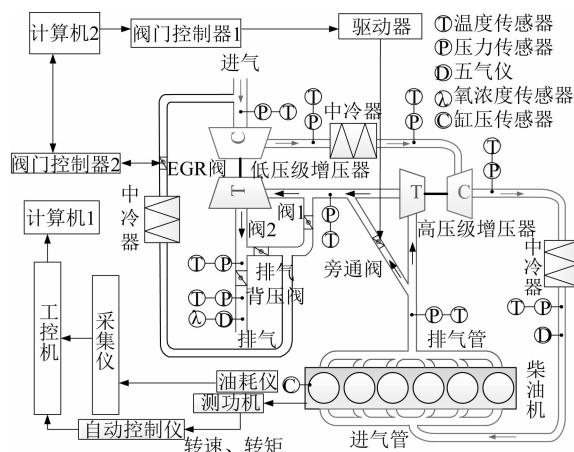


图 1 试验台架系统示意图

试验台架的高压级和低压级增压器串联布置, 高压级涡轮旁通阀用来调节排气经过高压涡轮的流量。进气系统的高低级压气机后各布置一个中冷器, 用来冷却压缩后的空气, 不仅提高了进气密度, 并且可以提高增压系统效率。通过调节台架中的阀 1、阀 2、EGR 阀, 实现低压和跨级 EGR。如图 1 所示, 当阀门 1 关闭, 阀门 2 开启, 低压涡轮

后排气通过 EGR 中冷器和 EGR 阀流入低压压气机前, 实现低压 EGR。当阀门 2 关闭, 阀门 1 开启, 高压涡轮后排气通过 EGR 回路流入低压压气机前, 实现跨级 EGR。试验中 EGR 率的测量通过测量进排气 CO_2 浓度的方法来确定。通过更换不同进气凸轮型线的凸轮轴来实现米勒循环。试验台架可以进行米勒循环结合两种 EGR 方式 (低压、跨级) 的不同 EGR 率试验。

2 推进特性控制策略及性能研究

对于柴油机稳态性能, 主要考虑降低排放和油耗率, 但是这两者之间会有矛盾, 因此在确定系统控制策略时须要兼顾两者之间的相互影响。

推进特性最佳控制策略通过以下试验来确定: 在原机进气正时和米勒 35 进气正时 (进气关 35° BTDC) 下, 对推进特性 25%、50%、75%、100% 四个工况点, 在低压和跨级 EGR 系统方式下, 进行不同 EGR 率的试验。根据前期研究, 小 EGR 率无法满足 Tier III 排放要求, 所以各工况点的起始 EGR 率为 18%, 以 2% 的步长逐渐增加, 直至该试验点的比 NO_x 排放降到 $2.1 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 以下。在每个工况点, 调节高压涡轮旁通阀的开度 (完全开启为 90°, 完全关闭对应 0°), 待 EGR 率以及发动机的运行状态稳定后, 记录各状态参数和性能参数。

图 2 为采用原机正时结合 EGR 及米勒 35 正时结合 EGR 的两种措施, 寻求 NO_x 排放满足 Tier III 要求, 同时使发动机经济性最优的 EGR 率及高压涡轮旁通阀控制策略。从图中可以看出: 在 25% 负荷点, 两种措施的燃油经济性最优的 EGR 方式都是跨级系统; 而在另外三个工况点, 低压 EGR 系统的经济性更优。原机正时方案的高压涡轮旁通阀最佳控制策略为: 25% 负荷时旁通阀开度为 20°, 50% 负荷时旁通阀完全关闭, 75% 和 100% 负荷对应的旁通阀开度为 10° 和 15°。米勒结合 EGR 方案的高压涡轮旁通阀最佳控制策略为: 四个工况点旁通阀开度分别为 10°、0°、0° 和 6°。由于采用米勒正时后, 为了保持进气充量, 须要更高的增压压力, 因此相比于原机正时, 涡轮旁通阀的开度都要减小。

从图中还可以发现: 两种控制策略下的不透光烟度变化规律相似; 燃油经济性方面, 原机正时方案在 25% 和 50% 负荷要好于米勒正时方案, 而在 75% 和 100% 负荷时, 米勒正时方案更优。这主要是由于低工况时, 使油耗率出现急剧上升的 EGR 率边界值要大于使 NO_x 排放小于 $2.1 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$

的 EGR 率值,此时只采用 EGR 方法来满足 NO_x 排放对油耗率的影响较小,所以直接采用增加 EGR 率的方法油耗率更优;而在高工况时,油耗率出现急剧上升的 EGR 率边界值要小于 NO_x 排放小于 $2.1 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 所需的 EGR 率值,此时将 EGR 和米勒循环两种措施结合,使满足 NO_x 排放要求的 EGR 率可以降低到油耗出现急剧增加的 EGR 率边界值,所以在 75% 负荷和 100% 负荷,米勒 35 结合 EGR 的方案油耗率更低。上述两种方案的综合油耗率分别为 $214.6 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 和 $213.4 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,较原机油耗率分别上升了 5.7% 和 5.2%。综合上述分析可知:如果发动机的进气正时能够根据运行工况的不同在上述正时中变化,那么基于满足 Tier III NO_x 排放的经济性最优的推进特性控制策略如表 2 所示。

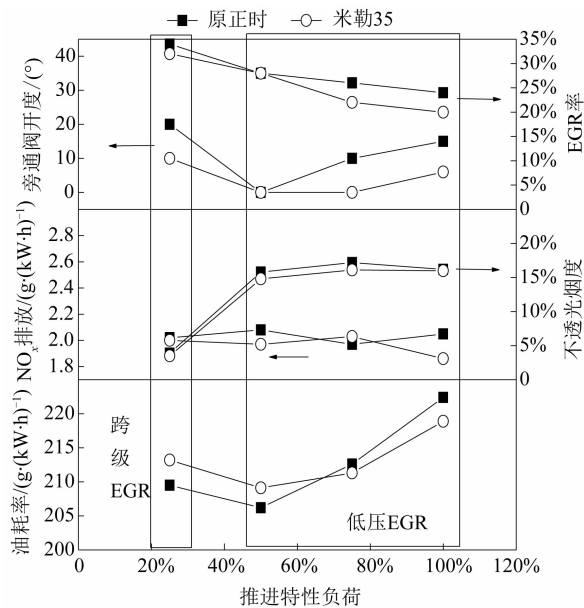


图2 推进特性控制策略

表2 推进特性下满足 Tier III 排放的经济控制策略

工况	进气正时方案	旁通阀开度/ (°)	EGR 方式	EGR 率
25%	原机正时	20	跨级	34%
50%	原机正时	0	低压	28%
75%	米勒 35	0	低压	22%
100%	米勒 35	6	低压	20%

在低负荷单独采用跨级 EGR,且 EGR 较高;在中高负荷采用低压 EGR 结合米勒循环。这种控制策略的推进特性综合油耗率为 $212.9 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,较原机上升了 4.9%。

3 发电特性控制策略及性能研究

为了研究发动机按发电特性运行时的最佳控制

策略,对发动机转速 $1500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 下,25%、50%、75%、100% 4 个负荷工况进行试验。试验方法与推进特性类似,最终目标是确定 4 个工况点的比 NO_x 排放下降到 $2.1 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 以下时,燃油经济性最优的旁通阀、EGR 方式及 EGR 率的控制策略。发电特性控制策略如图 3 所示。

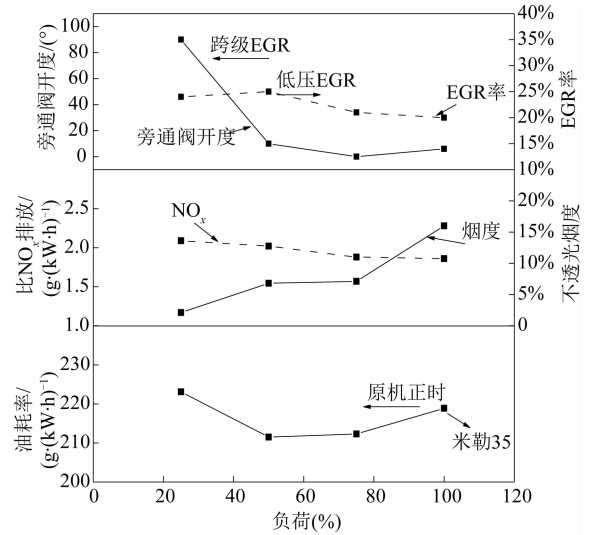


图3 发电特性控制策略

可以看出:发电特性的低压和跨级 EGR 系统的切换边界为 50% 负荷点,负荷不超过 50% 时采用跨级 EGR 系统经济性更好,当负荷大于 50% 时应采用低压 EGR 系统。高压涡轮旁通阀在 4 个工况点的最佳开度分别为 90° 、 10° 、 0° 、 6° 。与图 2 中推进特性旁通阀和 EGR 系统的控制策略相比:发电特性工况跨级和低压 EGR 系统的切换边界负荷由 25% 负荷提升到了 50% 负荷点,高压涡轮旁通阀在低负荷时开度变大。这些变化主要是由于发电特性与推进特性相比,在 25% 和 50% 工况点对应的扭矩大幅减小,而且发动机转速比推进特性时的要高,给增压系统提供的气量充足,增加旁通阀开度能保证发动机进气量的同时减小泵气损失,所以增大旁通阀开度有利于降低发动机油耗。与推进特性相比:发电特性满足 NO_x 排放要求的 EGR 率和不透光烟度在各个工况点都有所降低(100% 负荷点除外,两者 100% 负荷工况重合)。另外,与推进特性最佳控制策略在 75% 和 100% 负荷采用米勒 35 结合 EGR 不同,发电特性只须在 100% 负荷采用该方案。主要是因为 EGR 率的下降,75% 负荷使用的 EGR 率还未使油耗率出现急剧上升的情况,米勒循环无法在该工况体现出油耗方面的优势。按照以上的控制策略运行,发电特性下的综合油耗率为 $214.7 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。

EGR 和米勒循环会推迟整个缸内燃烧相位有关。所以,要大幅度降低 NO_x 排放,同时保持燃油经济性,还须要对发动机其它的设计参数进行调整,如发动机的几何压缩比、喷油正时等。

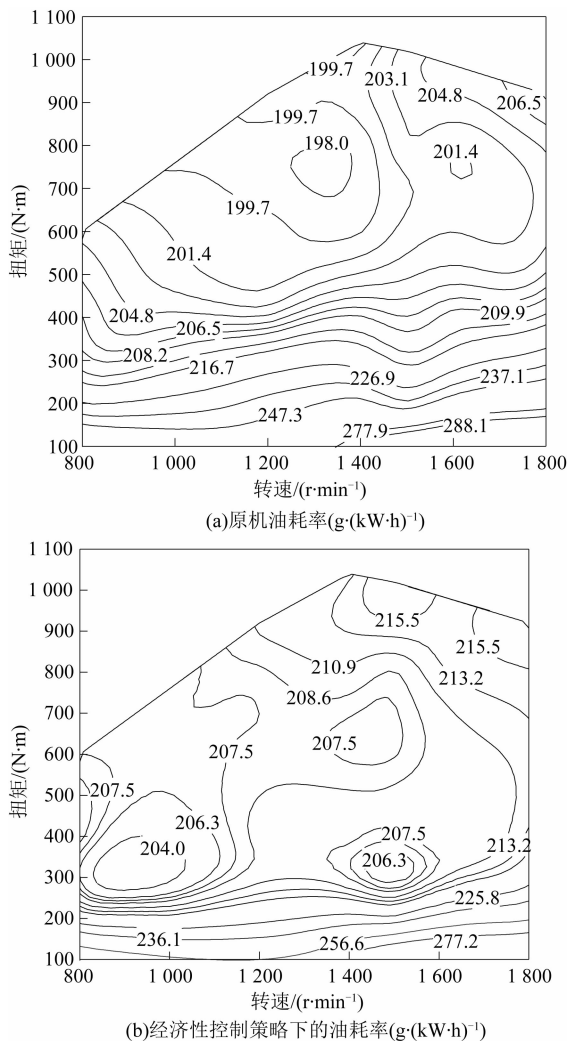


图5 油耗率比较

5 结 论

本文开展了米勒循环结合 EGR 的可调两级增压系统的性能试验研究,获得了推进特性、发电特性以及万有特性下在满足 NO_x 排放要求时的经济性控制策略,如下:

(1) 对于米勒正时,在高速高负荷时采用较大米勒正时,而在低速低负荷时趋向于采用原机正时;

(2) 对于 EGR 方式,在低负荷采用跨级 EGR,其他区域采用低压 EGR,而且随转速负荷增加 EGR 率逐步降低;

(3) 涡轮旁通阀在低负荷时全开,随着负荷增加,旁通阀开度先减小甚至关闭,然后再逐步增加。

参考文献

- [1] 张哲. 柴油机大小涡轮三阶段相继增压系统稳态与瞬态性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [2] 刘博. 柴油机可调二级涡轮增压系统研究 [D]. 上海交通大学, 2011.
- [3] MILLO F, GIANOGGIO M, DELNERI D. Combining dual stage turbocharging with extreme Miller timings to achieve NO_x emissions reductions in marine diesel engines [C]. PAPER NO.: 210, In CIMAC Congress 2010, Bergen.
- [4] CODAN E, VLASKOS I. Turbocharging medium speed diesel engines with extreme Miller timing [C]. Proceedings of the 9th Turbocharging Conference, Dresden, Germany, September. 2004: 23-24.
- [5] Yu B, KUM S M, LEE C E, et al. Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system [J]. Energy, 2013, 49: 375-383.
- [6] SQUAIEUA L L, MARINSC A, LACAVA P T, et al. Strategies for emission control in diesel engine to meet Euro VI [J]. Fuel, 2013, 104: 183-193.
- [7] 管斌. 低温选择性催化还原氮氧化物的基础研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [8] JOHNSON T V. Review of diesel emissions and control [J]. International Journal of Engine Research, 2009, 10 (5): 275-285.
- [9] BASHA S A, GOPAL K R, JEBARAJ S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (6): 1628-1634.
- [10] RAMADHAS A S, JAYARAJ S, MURALEEDHARAN C. Use of vegetable oils as IC engine fuels—a review [J]. Renewable energy, 2004, 29 (5): 727-742.
- [11] YANG J. Develop thermoelectric technology for automotive waste heat recovery [C]. DOE2009 vehicle technologies annual merit review and peer evaluation meeting, 2009.
- [12] SHU G, LIANG Y, WEI H, et al. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013 (19): 385-401.
- [13] YAO M F, ZHANG Q C, LIU H F, et al. Diesel engine combustion control: medium or heavy EGR [C]. SAE 2010-01-1125.