

性能与排放

船用低速二冲程柴油机机电复合 增压技术影响机制研究

胡超¹, 杨名洋¹, 邓康耀¹, 钱跃华², 刘博²

(1. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中船动力研究院有限公司, 上海 201206)

摘要: 基于一维数值仿真方法对某型船用低速二冲程柴油机展开机电复合增压技术的电机/发电机功率影响机制研究。研究结果表明: 涡轮和压气机的效率是影响机电复合增压柴油机综合效率的关键因素; 调节电机/发电机功率可以推动涡轮和压气机的运行工况点向最佳效率圈迁移, 从而提高柴油机综合效率; 通过应用机电复合增压技术可实现该机型全工况综合油耗降低 0.5% ~ 2.1%。

关键词: 船用低速柴油机; 复合增压; 电机/发电机; 综合油耗

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)05-0021-06

Analysis on the Effect of the Electric-Motor-Generator Hybrid Turbocharging on the Two-Stroke Low-Speed Marine Diesel Engines

Hu Chao¹, Yang Mingyang¹, Deng Kangyao¹, Qian Yuehua², Liu Bo²

(1. Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 201206)

Abstract: The one-dimensional numerical simulation method was adopted to analyze the influence mechanism of electric-motor-generator power of hybrid turbocharger on the two-stroke low-speed marine engine. The results show that the efficiency of the turbine and compressor is the key factor affecting the overall efficiency of the hybrid turbocharging diesel engine; adjusting the electric-motor-generator power can push the turbine and compressor operating conditions towards the optimal efficiency circle, thereby improving the overall efficiency of the diesel engine; the hybrid turbocharging technology can reduce the overall fuel consumption of the engine by 0.5% ~ 2.1%.

Key words: low-speed marine diesel engine; hybrid turbocharging; electric-motor-generator; overall fuel consumption

0 引言

大型低速二冲程柴油机以其功率大、油耗低等显著优势在现代船舶动力领域得到广泛应用^[1]。为提高船舶的能源效率, 国际海事组织制定了“船舶能效设计指数 (EEDI)”, 这对低速二冲程

柴油机的节能减排提出了更加严格的要求^[2]。扫气过程是二冲程柴油机运行的关键环节之一。在合适的扫气压差下, 新鲜气体对气缸中的残余废气进行清扫的同时对气缸进行冷却^[3]。但由于低负荷起动时气量太少, 难以带动涡轮增压器产生足够的扫气压差, 故一般采用鼓风机进行辅助增压来增大

收稿日期: 2018-10-27; 修回日期: 2019-06-02

项目基金: 国家自然科学基金 51606121。

作者简介: 胡超(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为内燃机性能与仿真技术, HC1994@sjtu.edu.com。

扫气压差, 确保发动机安全启动和运行^[4]。但鼓风机工作效率一般在 50% 左右^[5]。气量充足或过盈情况下, 一般可采用调整废气旁通阀, 旁通部分废气至涡轮后端, 确保合适的扫气压差, 从而辅助加速工作载荷时的响应和改善部分负荷时的性能^[6]。但上述解决方案均造成整机效率降低。机电复合增压是指将电机/发电机 (Electric-Motor-Generator, EMG) 集成在涡轮增压器中, 在气量过低/过高时分别进行电动辅助增压/涡轮发电来保证高效率扫气, 提高整机效率的技术^[7]。在电气化趋势下, 该技术在车用动力领域备受关注。Millo^[8]、Bumby^[9] 和 Panting^[10] 的一维数值仿真结果表明: 机电复合增压技术可使车用发动机的燃油经济性提高 2%~6%。近些年来, 三菱重工展开针对大型低速二冲程柴油机的机电复合增压技术研究^[11-13]。试验证实: 该技术能有效提高燃油经济性 1% 左右, 但对该技术的影响机制的分析不够深入。

本文通过建立一维数值仿真模型, 对某型低速二冲程柴油机展开机电复合增压技术 EMG 对柴油机性能的影响规律分析, 探明柴油机综合效率提高的根本原因和关键影响因素; 基于该规律得到全工况下的最佳 EMG 功率控制策略, 并验证该技术在船用低速机上的节能潜力。

1 数值仿真方法

基于某型低速二冲程柴油机, 采用 GT-Power 软件建立其一维仿真预测模型, 如图 1 所示。该型柴油机采用直流扫气和定压增压方式, 其主要参数如表 1 所示。增压系统配备有 1 台涡轮增压器以及 2 台鼓风机。鼓风机一般在 25%~35% 负荷启动, 此时利用开关单向阀 (阀门 1、2、3) 对进气管路进行切换。气量不足时, 涡轮前的废气能量不足以驱动涡轮增压器实现足够的扫气压差, 须打开阀门 1、2, 启动鼓风机并关闭阀门 3。此时空气从中冷器后由鼓风机管路进入扫气集管, 实现鼓风机辅助增压扫气。随着负荷上升, 涡轮前废气能量逐渐增加, 涡轮增压器正常运行。此时, 关闭阀门 1、2 和鼓风机, 打开阀门 3, 空气由中冷后直接进入扫气集管。该柴油机一维模型的燃烧模型采用直喷式柴油机多脉冲燃烧模型 (DI-Pulse), 缸内传热采用 WoschniGT 传热模型。涡轮和压气机建模采用 MAP 图。

表 1 某低速机主要参数

气缸数	压缩比	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	额定功率/MW
6	20	157	~5

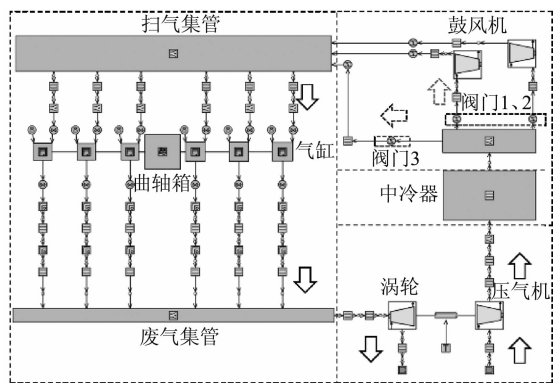


图 1 低速二冲程增压柴油机一维模型

模型标定结果如图 2 所示。图 2a) 比较了缸压曲线的仿真和试验数据, 最高压缩压力和最高燃烧压力误差均小于 2%。图 2b) 显示燃油消耗率 (BSFC)、涡轮前流量和涡轮前温度的试验和仿真预测结果也高度一致。其中, 25% 工况油耗误差主要和低负荷下鼓风机效率难以准确测量有关。总之, 该模型的主要参数误差均控制在 3% 以内, 表明该模型具有较高的可信度, 可用于进一步的分析和研究。

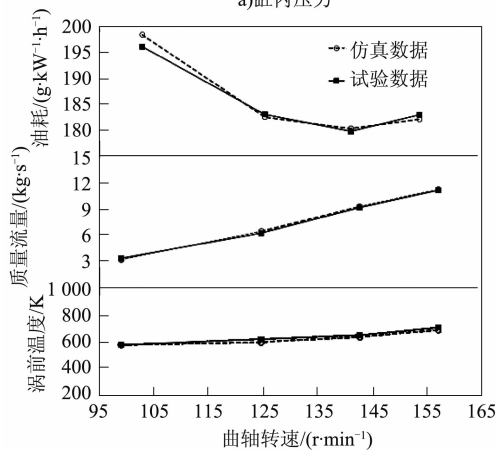
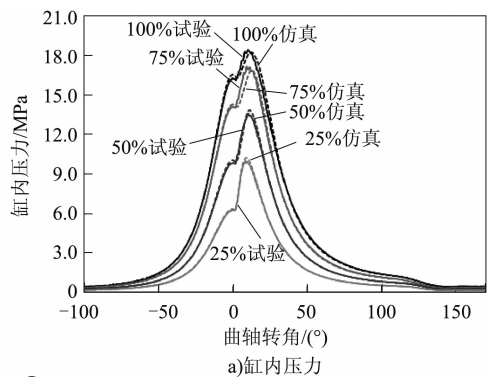


图 2 模型标定结果

基于上述标定的仿真模型建立机电复合增压模型 (GT-Power 与 Simulink 的耦合模型), 如图 3 所示。在涡轮轴上集成一个 PowerRot 模块, 对涡轮

传递至涡轮轴上的能量进行电动助力或发电回收，模拟机电复合增压技术的辅助增压和能量回收过程。另外，该模型采用PID控制器调节喷油量，保证功率与转速关系仍满足螺旋桨特性曲线。

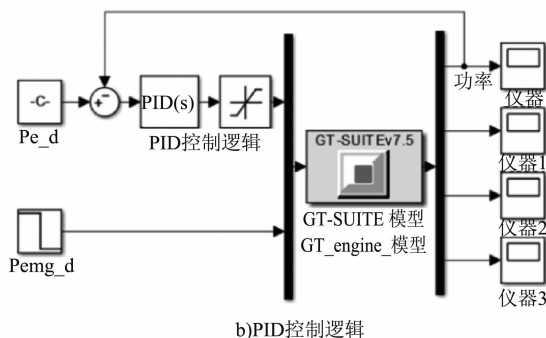
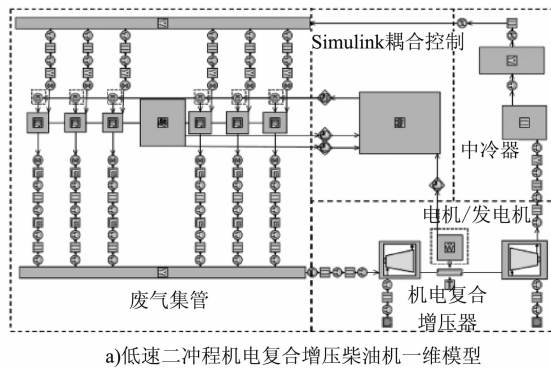


图3 机电复合增压模型以及PID控制逻辑

2 电机/发电机影响分析

机电复合增压的EMG集成在涡轮轴上，打破传统增压技术压气机和涡轮之间固定的功率平衡约束。EMG通常工作在两种模式，分别为电动辅助增压和涡轮发电模式。起动或低负荷时，废气能量不足以带动涡轮增压器正常工作，为确保合适的扫气压差和较高的扫气效率，此时EMG工作在电动辅助增压模式，给予涡轮轴额外的功率来辅助增压。而在气量充足或者过盈时，EMG工作在涡轮发电模式，从涡轮轴回收多余的能量。原理如图4所示。

为有效评估不同负荷下机电复合增压柴油机的效率，提出综合效率指标 η_{HT} ，如表达式1所示：

$$\eta_{HT} = \frac{E_{crank} + E_{EMG}}{E_{fuel}} = \eta_e + \frac{E_{EMG}}{E_{fuel}} \quad (1)$$

$$\eta_e = \frac{E_{crank}}{E_{fuel}} \quad (2)$$

式中： E_{crank} 为发动机曲轴的输出功率； η_e 为传统的内燃机热效率； E_{EMG} 为EMG的功率； E_{fuel} 为每秒消耗燃油的总能量。并且此处定义涡轮发电模式时 E_{EMG} 为正，电动辅助增压时 E_{EMG} 为负。

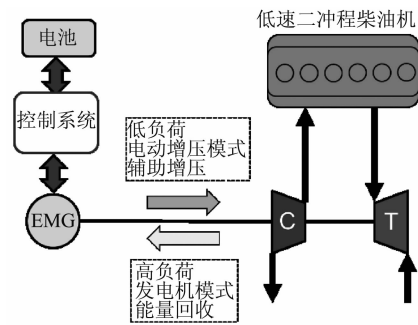
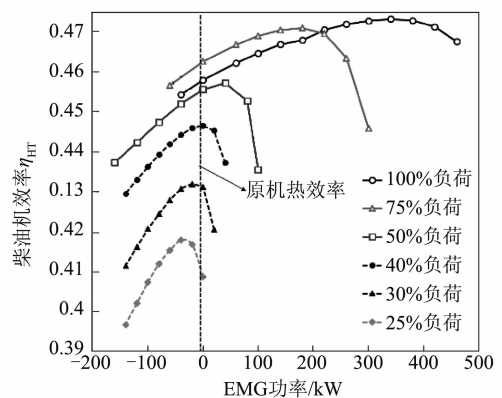
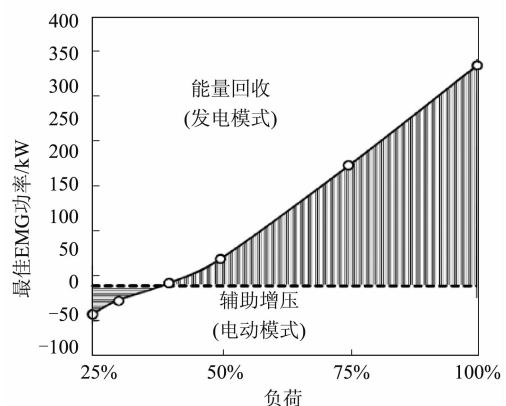


图4 机电复合增压原理图

图5a)为6种不同负荷下(25%~100%)综合效率 η_{HT} 随EMG功率的变化趋势。从图中可以发现：每一负荷均存在一个最佳的EMG功率，使得综合效率达到峰值。进一步统计各个负荷的最佳EMG功率，如图5b)所示。其中，25%负荷时最佳EMG功率为-40 kW，即在该负荷下，EMG工作在电动辅助增压模式，并提供40 kW功率进行电动辅助增压。100%负荷时最佳的EMG功率为+375 kW，即在该负荷下，EMG工作在发电机模式，并从涡轮轴回收375 kW的功率用于发电。最佳EMG的功率等于0 kW的点为EMG模式切换点，此时，负荷为38%左右。



a) 综合效率随电机/发电机功率的变化趋势



b) 最佳电机/发电机功率随负荷变化趋势

图5 EMG功率影响分析

为探明影响综合效率的关键因素,针对 EMG 功率对机电复合增压发动机性能的影响做进一步分析。由上文可知:EMG 通过电动辅助增压或发电回收,解除了传统涡轮增压器固定的功率平衡约束,满足表达式 (3):

$$E_{\text{EMG}} = (E_{\text{T}} - E_{\text{C}}) \eta_{\text{MG}} \quad (3)$$

其中: E_{T} 为涡轮传递给涡轮轴的功率; E_{C} 为涡轮轴传递给压气机的功率; η_{MG} 为 EMG 的效率。为了方便计算,EMG 效率假设为常数。

结合式 (1)、(2) 和 (3),综合效率指标 η_{HT} 可进一步表述为式 (4):

$$\eta_{\text{HT}} = \eta_{\text{e}} \left(1 + \frac{E_{\text{exh}} \eta_{\text{T}}}{E_{\text{crank}}} - \frac{E_{\text{intake}}}{E_{\text{crank}}} \frac{1}{\eta_{\text{C}}} \right) \quad (4)$$

其中: E_{exh} 为涡轮入口的废气能量; E_{intake} 为压气机出口的新鲜空气能量 (增压能量); η_{e} 为传统的内燃机热效率; η_{T} 和 η_{C} 分别为涡轮和压气机的效率。此时,柴油机的曲轴输出功率 E_{crank} 没有变化。故影响热效率的主要 5 个因素为:传统热效率、涡轮和压气机的效率、涡前废气能量及压气机后的增压能量。

图 6a) 为 100% 负荷涡轮发电模式下,柴油机主要性能参数随发电功率的变化趋势。利用原机参数对这些参数进行无量纲化处理。从中可以看出:当涡轮发电功率为 480 kW 时,涡前废气温度剧烈升高 30% 左右,而此时增压压力和流量显著下降 21% ~ 31%。这是由于涡轮发电使得传递到压气机的功率减少,导致增压压力和流量的下降。根据表达式 (4) 进行分析:质量流量和增压压力的减少导致增压能量 E_{intake} 减少,有利于提升综合效率 η_{HT} 。与此同时,涡前排气压力和质量流量的降低也导致涡前排气能量 E_{exh} 减少,但涡前排温的上升在一定程度上缓解了涡前废气能量下降趋势,但无法扭转。从图 6b) 可以发现:当发电功率为 480 kW 时,传统热效率已经下降近 7.5%。这是因为进入气缸的新鲜空气显著减少,造成缸内燃烧严重恶化。而传统热效率的降低将引起综合效率 η_{HT} 的降低。因此,通过上述性能参数的趋势分析,可以有效地解释高负荷发电模式下综合效率峰值产生的原因。而且从图 6b) 可以发现:该综合效率峰值所对应的发电功率,与涡轮和压气机的效率峰值所对应的发电功率非常相近。

图 7 为在 25% 负荷下机电复合增压柴油机的主要性能参数。从图 7a) 中可以看出:参数趋势与图 6 的发电模式正好相反。涡前排气温度急剧下降,并且增压压力和质量流量快速增大。根据表达式 (4),增压能量增加会导致综合效率下降。从

图 7b) 可以看出:在 40 kW 以下时,压气机、涡轮以及传统内燃机热效率得到有效提升。大于 40 kW 左右时,压气机效率和传统热效率以较慢的速度继续升高,这有利于综合效率的提升;但涡轮的效率开始下降,阻碍了综合效率的提升。

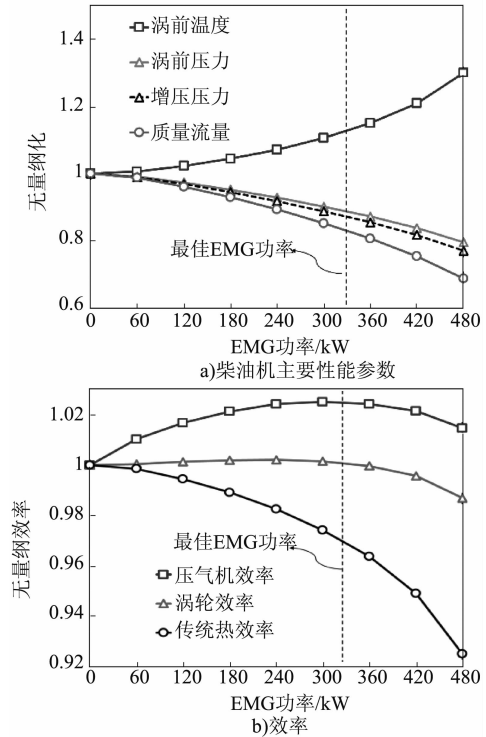


图 6 100% 负荷涡轮发电模式主要参数

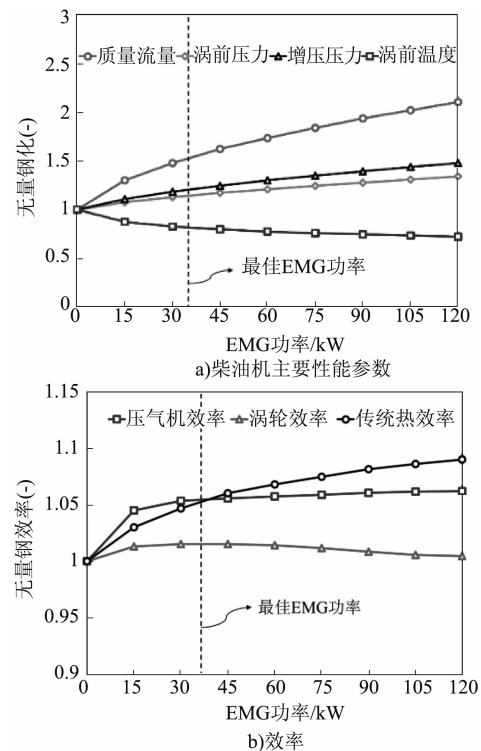


图 7 25% 负荷电动辅助增压模式主要参数

综上所述可以发现：与 100% 负荷类似，机电复合柴油机的综合效率其实是由涡轮前废气能量、增压能量、柴油机传统热效率以及涡轮/压气机的效率共同决定。此处，压气机和涡轮的最佳效率也是在综合效率峰值对应的最佳 EMG 功率附近。

上述图 6b) 和图 7b) 涡轮/压气机效率变化趋势是由于 EMG 功率变化引起涡轮/压气机运行工况点移动导致。如图 8 所示，对于压气机而言，当处于涡轮发电回收模式，EMG 发电功率增大使得涡轮传递给压气机的能量减少，因此压气机运行点逐渐向流量和压比减小的方向移动。压气机运行点先向最佳效率圈移动，而后逐渐远离最佳效率点，横贯压气机最佳效率圈，导致图 6b) 中压气机效率呈先上升后下降的趋势。而当处于电动辅助增压模式时，EMG 功率增加将使得压气机的流量和压比逐渐上升，同样使得压气机效率变化如图 7b) 所示。同理对于涡轮而言，EMG 功率引起的工作点的变化也会导致涡轮效率呈现图 6b) 和图 7b) 的变化趋势。从上述分析可知，EMG 功率是通过改变涡轮和压气机的功率之间的关系（表达式 (3)），推动压气机和涡轮的运行点向最佳效率圈移动，从而提升综合效率 η_{HT} 。

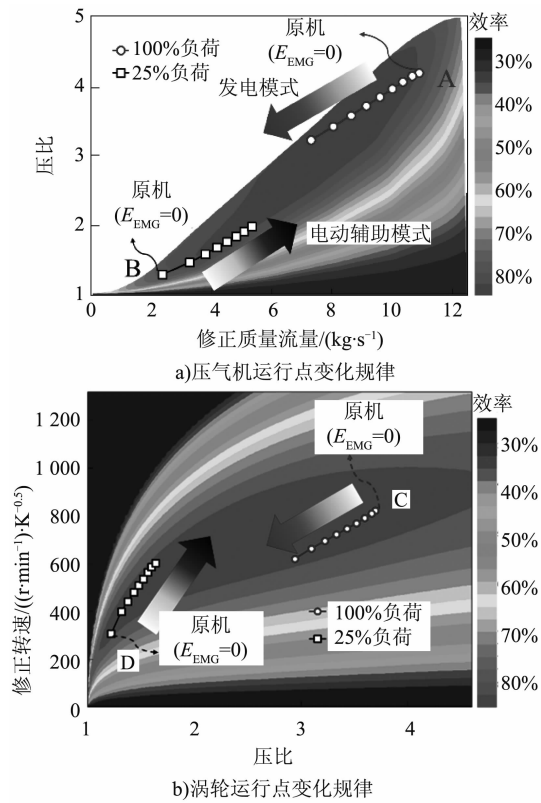


图 8 EMG 功率对于涡轮增压器工况点影响

分别统计各个负荷下对应的涡轮、压气机和发动机效率峰值各自对应的最佳 EMG 功率，如图 9 所

示。压气机和涡轮的效率峰值所对应的最佳 EMG 功率和发动机效率峰值对应的最佳 EMG 功率基本保持一致；并且发动机效率峰值所对应的 EMG 功率曲线落在压气机和涡轮效率峰值最佳 EMG 功率曲线之间。这表明决定综合效率 η_{HT} 的最佳 EMG 功率因素主要是压气机和涡轮的效率；并且压气机和涡轮效率峰值对应的最佳 EMG 功率平均值曲线与发动机最佳 EMG 功率曲线非常接近。因此可以通过判定压气机和涡轮的最佳效率对应的 EMG 的平均值来近似决定发动机的最佳 EMG 功率。

低速机循环工况分别为 MAN、MHI 和 AAB 三种典型的工况^[13] 负荷分布统计如图 10a) 所示。不同负荷的燃油经济性的提升如图 10b) 所示。其中，100% 负荷燃油经济性提升明显，BSFC 下降达 3.7%。而低负荷时 BSFC 均略微下降。根据图 10 加权得到全循环工况综合油耗提升情况如表 2 所示。其中，MAN 循环工况下，燃油经济性收益达到 2.1%，其余两个工况油耗收益在 0.5% 左右。也即，在不重新匹配涡轮和压气机的前提下，机电复合技术可实现原机综合油耗下降 0.5% ~ 2.1%。

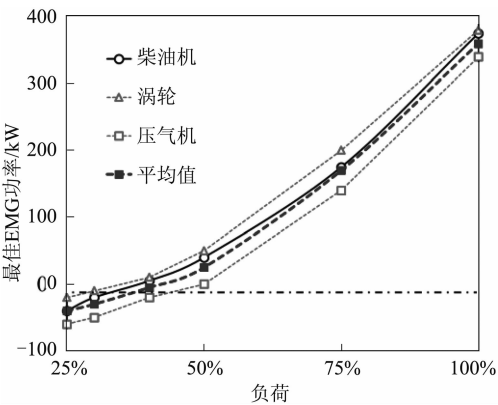


图 9 涡轮/压气机最佳 EMG 功率变化规律

表 2 不同循环工况全负荷综合油耗

工作循环	原机/ ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	机电复合/ ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	收益
MAN	182.9	178.2	2.1%
MHI	191.6	189.2	0.5%
AAB	192.1	189.7	0.4%

3 结论

- (1) 在不同负荷下均存在某一特定的最佳 EMG 功率使发动机的综合效率达到峰值，并且最佳 EMG 功率随负荷率提升而增大。
- (2) 揭示了机电复合增压技术的影响机制：

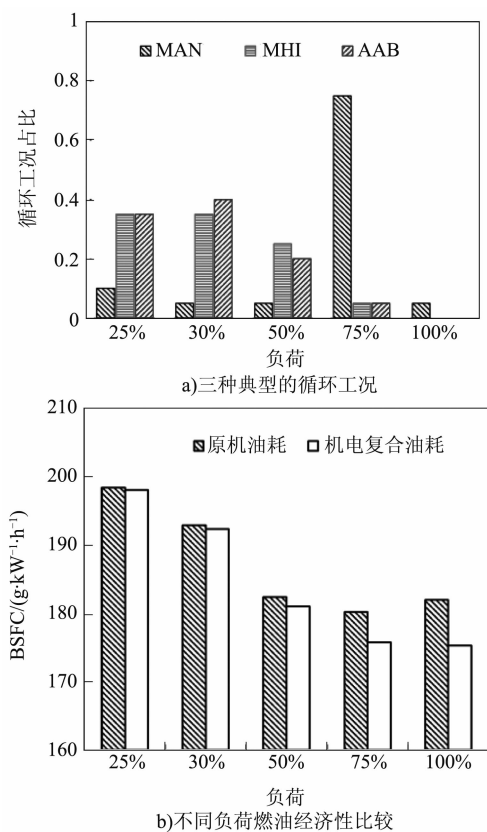


图 10 典型循环工况以及燃油经济性比较

通过调节 EMG 功率改变涡轮和压气机功率之间的关系, 推动压气机和涡轮的工况运行点向最佳效率圈移动, 从而提升影响综合效率 η_{HT} 。

(3) 仿真结果表明: 机电复合增压技术在不同循环工况下, 可实现船用低速二冲程柴油机燃油经济性提升 0.5% ~ 2.1%, 在节能减排方面具有显著的优势。

参考文献

- [1] WOODYARD D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines [M]. Butterworth-Heinemann, 2009.
- [2] PANG K M, KARVOUNIS N, WALTHER J H, et al. Numerical investigation of soot formation and oxidation processes under large two-stroke marine diesel engine-like conditions using integrated CFD-chemical kinetics [J]. Applied Energy, 2016, 169: 874-887.
- [3] 周龙保, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 陶一凯. 低速二冲程柴油机废气再循环仿真研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [5] 许安定, 张俊杰. 船用辅助鼓风机性能曲线可视化研究 [J]. 船舶工程, 2017, 39 (S1): 121-123.
- [6] SAMOKHIN S, ZENGER K. Robust and adaptive wastegate control of turbocharged internal combustion engines [C]. Proceeding of American Control Conference, 2014: 3219-3224.
- [7] BRIGGS I, MCCULLOUGH G, SPENCE S, et al. A parametric study of an exhaust recovery turbogenerator on a diesel-electric hybrid bus [C]. ASME Turbo EXPO, GT2013-94492.
- [8] MILLO F, MALLAMO F, PAUTASSO E, et al. The potential of electric exhaust gas turbocharging for HD diesel engines [C]. SAE Technical paper, 2006-01-0437.
- [9] BUMBY J, CROSSLAND S, CARTER J. Electrically assisted turbochargers: Their potential for energy recovery [J]. IEEE Xplore, 20060612.
- [10] PANTING J, PULLEN K R, MARTINEZ-BOTAS R F. Turbocharger motor-generator for improvement of transient performance in an internal combustion engine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2001, 215 (3): 369-383.
- [11] SHIRAISHI K, ONO Y. Hybrid Turbocharger with integrated High Speed Motor-generator [R]. Technical Review: Mitsubishi Heavy Industries Ltd, 2007, 44 (1).
- [12] SHIRAISHI K, ONO Y, SUGISHITA K. Development of large marine hybrid turbocharger for generating electric power with exhaust gas from the main engine [R]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2010, 47 (3): 53-58.
- [13] ONO Y, SHIRAISHI K, YAMASHITA Y. Application of a large hybrid turbocharger for marine electric-power generation [R]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2012, 49 (1): 29-33.