

机电复合柔性增压系统对柴油机性能影响的研究

许康靖¹, 邓康耀¹, 杨名洋¹, 刘莹², 吴新涛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. 柴油机高增压国家重点实验室, 天津 300400)

摘要: 为解决传统涡轮增压发动机低转速增压不足和高转速排气能量未得到充分利用的问题, 提出了可实现压气机和涡轮解耦的机电复合柔性增压系统。针对某重型柴油机建立了机电复合柔性增压系统仿真模型, 计算分析了该系统对柴油机性能的影响规律及关键因素。研究表明: 该系统在中高转速工况系统综合效率最高可提升 2.66%, 原因主要在于涡轮发电系统回收利用了废气能量; 通过控制涡轮转速可实现全工况最佳涡轮效率, 优化后涡轮效率最高可提升 1.2%; 提高电动压气机功率能显著提升柴油机低速转矩, 1 100 r/min 工况下转矩最大可提升 24%, 且系统综合效率和燃油消耗率均得到改善。

关键词: 机电复合柔性增压系统; 柴油机; 综合效率; 转矩

中图分类号: TK421+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0036-07

Study of the Effect of Flexible Electric Turbo-Compound System on Diesel Engine Performance

Xu Kangjing¹, Deng Kangyao¹, Yang Mingyang¹, Liu Ying², Wu Xintao²

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 2. State Key Laboratory of Turbocharging Technology of Diesel Engine, Tianjin 300400)

Abstract: Aiming at solving the problems of conventional turbocharger such as lacking of boosting at low speed while exhaust energy surplusing at high speed, a flexible electric turbo-compound (F-ETC) system with compressor and turbine decoupling. Based on a heavy duty diesel engine, the simulation model of a F-ETC system was built, and the influence of the F-ETC system on diesel engine and key factors were analyzed. The research shows that the overall efficiency of the system can be improved at medium and high speed with a maximum increase of 2.66%, and main cause is that surplus waste gas energy is recovered by turbine power system. The best turbocharging efficiency, which is 1.2% higher after optimization, can be achieved by turbo speed controlling. The low-speed torque of diesel engine can be significantly increased with the increase of electric compressor. At 1 100 r/min, the maximum torque can be increased by 24%, and the system overall efficiency and BMEP can also be improved.

Key words: F-ETC system; diesel engine; overall efficiency; torque

0 引言

增压技术是实现发动机小型化的重要手段, 其中, 涡轮增压技术因其能够显著提高发动机动力性

和经济性而被广泛应用于柴油机。传统涡轮增压技术主要存在三个方面的缺点: 低速工况排气能量低, 增压压力不足; 高速工况排气能量富余, 导致增压过度, 造成能量浪费; “涡轮迟滞”效应影响

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51606121); 高技术船舶科研计划-船用低速机工程 (一期), 项目编号 CDGC01-KT0104。

发动机瞬态响应性能^[1]。针对以上问题，陆续提出了可变几何涡轮、二级增压、相继增压、机械复合涡轮增压、机电复合增压技术等^[2]涡轮增压技术并开展了相关研究和应用。其中，机电复合增压技术是当今发动机电动化趋势下的重点研究方向。

国内外企业和高校对各类结构方案的机电复合增压系统展开了诸多研究，其中，卡特彼勒^[3-7]、依维柯^[8-9]、帝国理工学院^[10-12]、巴斯大学^[13]等对电辅助式涡轮增压系统展开了研究。电辅助式涡轮增压系统在传统涡轮增压器的中间轴上集成一个高速电动/发电机，在发动机低速和高速工况下分别实现电动辅助增压和涡轮发电，可有效提升整机效率和低速转矩。约翰迪尔公司^[14]和 Ian Briggs^[15]等重点研究了应用在重型柴油机上的复合涡轮增压系统。该系统在传统涡轮增压器后串联一个动力涡轮发电系统回收废气能量，可显著提高系统燃油经济性。然而，以上机电复合增压系统均保留了传统涡轮增压器中涡轮和压气机同轴连接的状态，涡轮和压气机之间依然存在转速和功率约束，导致增压系统和发动机无法在所有工况达到最优匹配。为了解决此问题，本文提出一种将压气机与涡轮完全解耦的机电复合柔性增压系统，其特征是涡轮单独驱动高速电机发电，充分回收废气余热；压气机由高速电动机单独驱动，为发动机提供充足的增压压力，这样涡轮和压气机在所有工况下均可灵活控制，实现良好的匹配。

本文针对某重型柴油机，基于一维数值仿真，研究分析机电复合柔性增压系统对柴油机性能影响规律及关键影响因素，并探究其影响机制，挖掘该系统在提升柴油机动力性和燃油经济性方面的潜力，为进一步推进先进涡轮增压技术发展提供新思路。

1 仿真模型构建

本研究针对的试验发动机为某款增压共轨喷射重型柴油机，其性能参数见表 1。采用 GT-Power 软件建立原机的一维数值仿真模型并基于试验数据完成标定。机电复合柔性增压柴油机相比于原机改变了涡轮增压系统结构，如图 1 所示。压气机和涡轮实现解耦，解除了传统增压器中压气机和涡轮间转速和功率平衡的约束。压气机单独由电动机供电，而涡轮则单独驱动发电机回收排气能量。基于原机模型搭建的机电复合柔性增压柴油机的仿真计算模型如图 2 所示。

表 1 试验柴油机的主要参数

缸数、排列	6 缸、直列
排量/L	7.14
缸径 × 行程/(mm × mm)	108 × 130
压缩比	18
标定功率/kW	220
标定转速/(r · min ⁻¹)	2 100

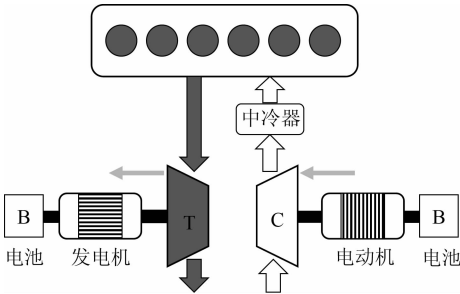


图 1 机电复合柔性增压柴油机结构示意图

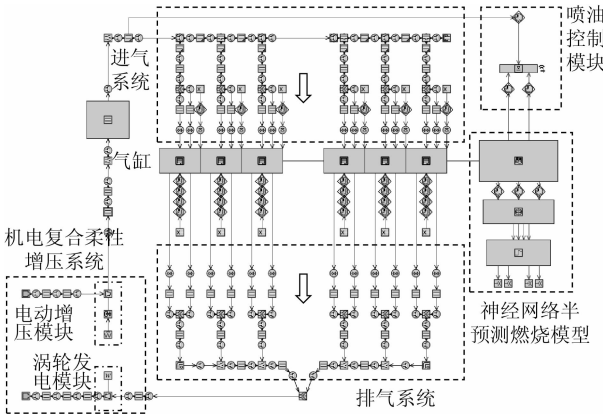


图 2 机电复合柔性增压柴油机模型

模型中，考虑过量空气系数的变化对燃烧过程的影响，采用基于神经网络的 DI-Wiebe 半预测模型来模拟缸内燃烧放热规律；输入发动机转速、进气流量和燃油流量 3 项参数，输出为 DI-Wiebe 模型中的 4 项关键参数。采用 Woschni 模型模拟缸内传热过程。进排气管路采用一维简化方式。中冷器模型的建立通过增大 PiPe 模块的管壁面积、传热系数和设定其目标壁温实现。压气机和涡轮机模型的特性采用离散化数据 Map 图谱描述。机电复合柔性增压系统由电动压气机模块和涡轮发电模块组成，电动压气机模块采用动力单元模拟电动机供电功能，控制压气机功率；涡轮发电模块采用转速边界控制涡轮的运行状态。另外模型中还加入了喷油控制模块，其目的是通过调节喷油量控制柴油机的平均有效压力达到目标值。

原柴油机模型全负荷工况下的校验结果如图

3~图5所示。结果表明:发动机缸压曲线的仿真和试验结果吻合度较高,最高燃烧压力误差均小于3%;发动机的主要性能参数如燃油消耗率BSFC、转矩、涡前温度和压力的仿真误差均控制在5%以内,表明模型精度良好。图5展示了机电复合柔性增压柴油机模型计算结果中柴油机有效热效率随过量空气系数的变化趋势,与试验结果对比,两者能较好吻合,说明仿真模型可以表征过量空气系数变化对发动机缸内工作过程及性能的影响。

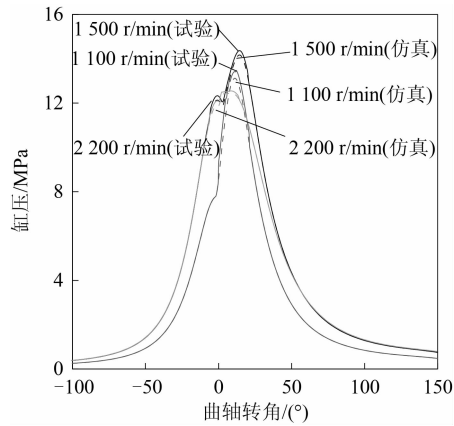


图3 缸压曲线

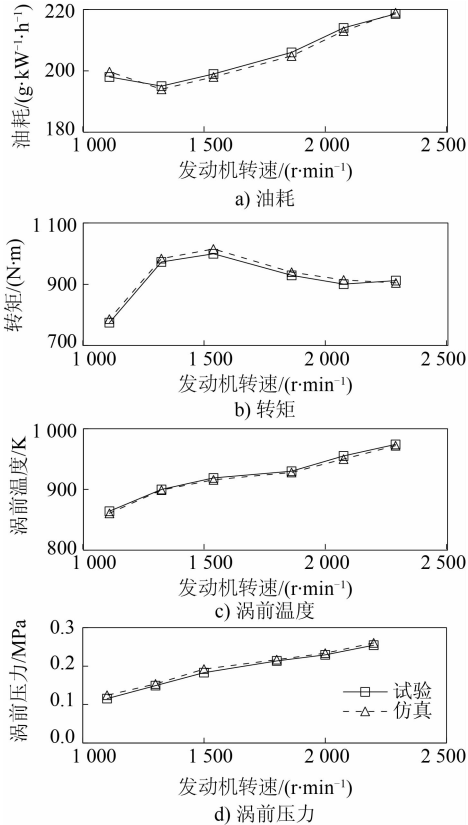


图4 柴油机主要性能参数

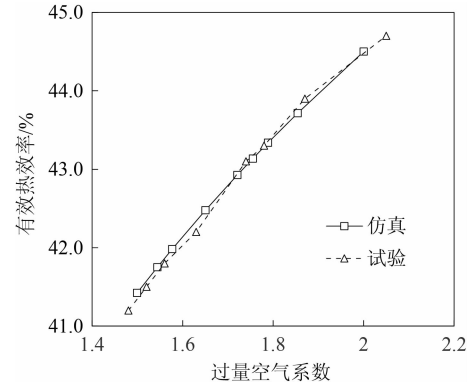


图5 柴油机有效热效率随过量空气系数的变化

2 机电复合柔性增压系统性能影响分析

机电复合柔性增压系统由独立工作的涡轮发电系统和电动压气机系统组成。发动机产生的废气全部流经涡轮发电系统,充分回收废气能量,提升发动机总系统效率;电动压气机系统提供充足的增压压力,能够有效提升发动机的低速转矩。本文分别研究分析涡轮发电系统和电动压气机系统对发动机系统性能影响规律及关键影响因素,挖掘机电复合柔性增压系统在提升柴油机动力性和燃油经济性方面的潜力。

为评估机电复合柔性增压柴油机系统的效率,提出系统综合效率指标 η_{FT} , 见式(1)。

$$\eta_{FT} = \frac{P_e + P_t \eta_{mt} - P_c \eta_{mc}^{-1}}{P_{fuel}} \quad (1)$$

式中:分子表示柴油机系统净输出功率, P_e 、 P_t 、 P_c 分别为柴油机曲轴输出功率、涡轮和压气机功率, kW; η_{mt} 为涡轮发电系统中机械效率和发电机效率的乘积; η_{mc} 为电动压气机系统中机械效率和电动机效率的乘积; P_{fuel} 为每秒柴油机燃油消耗的总能量, kW。为了简化计算,假设涡轮和压气机的机械效率均为常数 0.95^[15], 发电机和电动机的效率均为常数 0.94^[16-17]。

传统的柴油机有效热效率 η_e 如式(2)所示。

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_{fuel}} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)得到式(3),可以看出:系统综合效率取决于传统柴油机有效热效率、曲轴功率、涡轮发电功率和电动压气机功率。

$$\eta_{FT} = \eta_e \left(1 + \frac{P_t \eta_{mt} - P_c \eta_{mc}^{-1}}{P_e} \right) \quad (3)$$

涡轮和压气机功率如式(4)和(5)所示。

$$P_t = \dot{m}_e c_{p,e} T_{t,in} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_t} \right)^{\frac{\kappa_e - 1}{\kappa_e}} \right] \eta_t \quad (4)$$

$$P_c = \dot{m}_a c_{p,a} T_{c,in} [(\pi_c)^{\frac{\kappa_a-1}{\kappa_a}} - 1] \eta_c^{-1} \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_e$ 和 $\dot{m}_a$ 分别为涡轮进口废气流量和压气机进口空气流量, kg/s ; $c_{p,e}$ 和 $c_{p,a}$ 分别为废气定压比热和空气定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $T_{t,in}$ 和 $T_{c,in}$ 分别为涡轮和压气机进口温度, K ; π_t 和 π_c 分别为涡轮膨胀比和压气机增压比; κ_e 和 κ_a 分别为废气和空气的绝热指数; η_t 和 η_c 分别为涡轮和压气机效率。综合来看, 系统综合效率受传统柴油机有效热效率、发动机曲轴功率以及涡轮和压气机的气体流量、压比和效率等参数的影响。

系统动力性能指标为柴油机输出转矩 T_{iq} , $\text{N} \cdot \text{m}$ 。柴油机的平均有效压力决定了输出转矩, 其表达式如式 (6)。

$$p_{me} = \frac{\phi_c H_u \eta_e p_s}{R \phi_a l_0 T_s} \quad (6)$$

式中: p_{me} 为平均有效压力, MPa ; ϕ_c 和 ϕ_a 分别为充量系数和过量空气系数; H_u 为燃料低热值, J/kg ; l_0 为柴油化学计量空燃比; R 为空气气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; p_s 为进气管压力, MPa ; T_s 为进气管温度, K 。可以看出: 柴油机转矩与增压压力、过量空气系数和发动机有效热效率等参数关系密切。

2.1 涡轮发电系统性能影响分析

为了研究传统涡轮增压器解耦后的涡轮发电系统对发动机系统性能的影响, 保持进气增压压力和喷油量与原机一致, 涡轮转速与原机涡轮转速相同, 计算全负荷工况机电复合柔性增压柴油机系统的综合效率和相关参数, 与原机的对比如图 6 所示。由图 6a) 可知: 在发动机低转速工况时, 机电复合柔性增压柴油机系统综合效率 η_{FT} 相比于原机热效率 η_e 略有降低, 主要原因是发电机和涡轮在能量传递过程中有能量损失。而在中高速行驶工况时, η_{FT} 有明显的提升, 并且转速越高, 提升幅度越大, 在 2200 r/min 时升高率达 2.2% 。这是由于在柴油机达到 1500 r/min 以上的中高速行驶时, 原机涡轮开启了废气旁通阀, 排出多余废气, 且转速越高, 废气旁通阀的开度越大; 而机电复合柔性增压柴油机中涡轮废气旁通阀始终关闭, 废气全部流经涡轮做功发电, 回收了更多的废气能量。由图 6b) 可知: 发动机在中高速行驶时, 转速越高, 废气流量提升率越大, 机电复合柔性柴油机的涡轮功率提升率越大, 并且柴油机净输出功率的提升率也随之增大; 而燃油消耗率相比原机略有增加。主要原因是涡轮发电系统导致柴油机排气背压增大, 涡

前排温升高, 柴油机泵气损失增大, 导致柴油机曲轴输出功率有所降低, 但是涡轮功率的增加相比于油耗增加对系统综合效率的影响更为突出, 从而提升了系统综合效率。

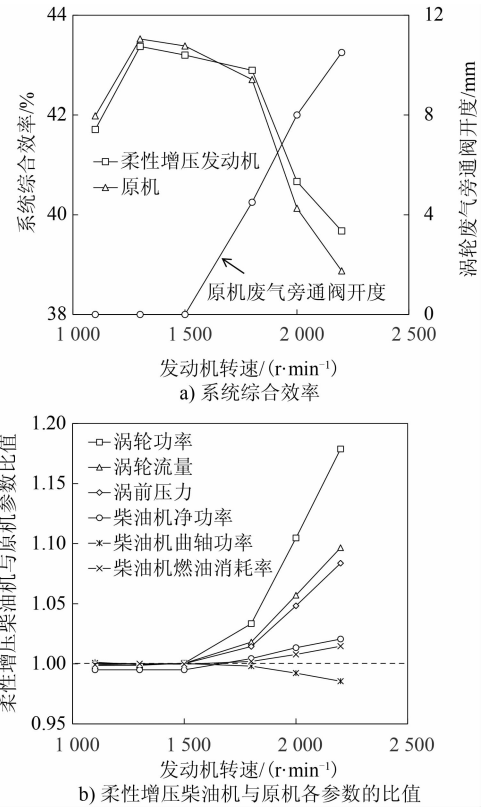


图6 全负荷工况, 机电复合柔性增压柴油机
和原机各参数对比

涡轮发电系统中涡轮转速可实现独立控制, 可通过控制涡轮转速使得涡轮效率在发动机任意工况均处于高效区, 从而实现系统综合效率的最优化。涡轮效率与涡轮速比 u/c_0 存在对应关系, 其中: u 是涡轮工作叶轮平均圆周速度, 直接取决于涡轮转速; c_0 是废气等熵流出速度, 与涡前温度和压力相关。通过仿真计算得到柴油机全负荷各转速工况下涡轮效率和涡轮速比的对应关系, 如图 7 所示。可以看出: 最佳涡轮效率对应的 u/c_0 集中在 $0.67 \sim 0.7$ 的区间内。经计算: 当 $u/c_0 = 0.68$ 时可实现全工况的最佳涡轮效率。

图 8 为通过涡轮转速控制优化前后涡轮效率、转速以及系统综合效率的对比。可以看出: 各转速工况的涡轮效率均得到了提升, 提升率为 $0.4\% \sim 1.2\%$, 并且在 2200 r/min 时效果最好; 优化后最高涡轮效率对应的涡轮转速均大于原涡轮转速。另外, 涡轮转速优化后各转速工况下系统综合效率均得到提升, 在 2200 r/min 时达到最大, 相比于原柴油机效率提升了 2.66% 。

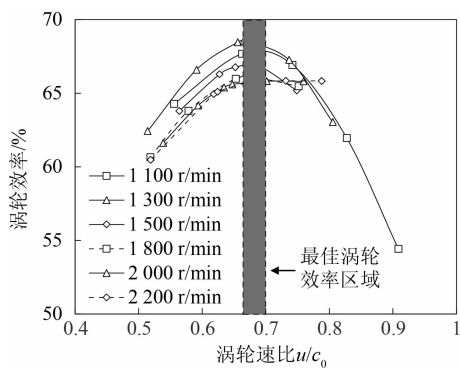


图7 全负荷工况下涡轮效率和涡轮速比对应关系

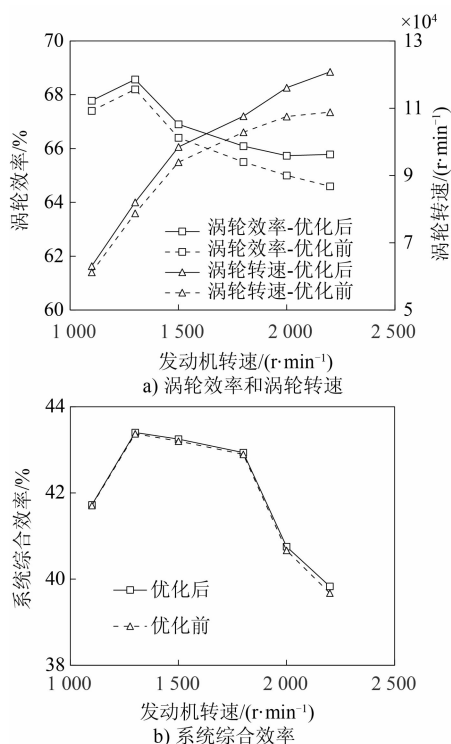


图8 涡轮效率优化前后各参数对比

2.2 电动压气机系统性能影响分析

为研究分析电动压气机系统在提升柴油机低速转矩上的潜力,通过控制电动压气机功率和柴油机喷油量改变柴油机的输出转矩,转矩升高会使缸内最高燃烧压力随之增大,若最高燃烧压力过大将导致气缸、连杆等部件的热负荷和机械负荷过大,所以须设定最高燃烧压力边界。本研究中以原机最高转矩点对应的最高燃烧压力作为极限值。

图9展示了机电复合柔性增压柴油机在低速工况下动力性潜在优化区域,以原柴油机最高平均有效压力为极限值。为研究低速转矩实际优化区域及关键因素影响规律,仿真计算中在改变电动压气机功率的同时调节喷油量,喷油量的调节通过控制目标平均有效压力 p_{me} 实现,而目标 p_{me} 处于原机 p_{me} 和最高 p_{me} 之间;针对1100 r/min 低速工况,以原

机1100 r/min 全负荷工况 p_{me} 为基准,以一定步长提高 p_{me} ,选取若干个点,如图9中A、B、C的 p_{me} 分别为基准值的1、1.1、1.2倍,D为极值点。

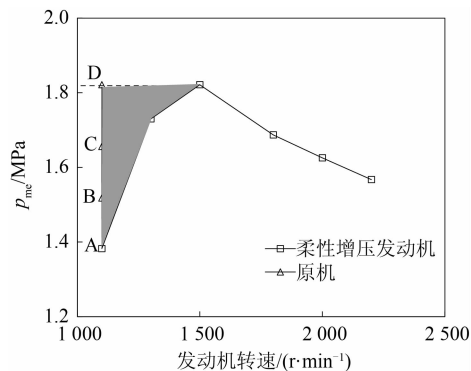


图9 机电复合柔性增压柴油机低速动力性潜在优化区域

如图10所示,在过量空气系数相同的情况下,电动压气机功率增大,增压压力增大,平均有效压力随之增大。在平均有效压力相同的情况下,随着电动压气机功率的增大,过量空气系数随之增大,以最高燃烧压力边界点为增压极限。当电动压气机功率相同即增压压力相同,为达到更高的平均有效压力,过量空气系数逐渐降低,即喷油量增加,缸内燃油混合气浓度增大;而过量空气系数过低将导致缸内燃烧恶化,影响柴油机效率和排放性能。所以为了不失一般性,以原机最低稳定运行转速1100 r/min、全负荷工况点的过量空气系数1.5,作为机电复合柔性增压柴油机过量空气系数的极限值。另外可以发现:1100 r/min 工况下无法达到柴油机最高转矩点(D点),原因在于最高转矩所需的增压压力和循环喷油量较高,超出了最高燃烧压力极限。

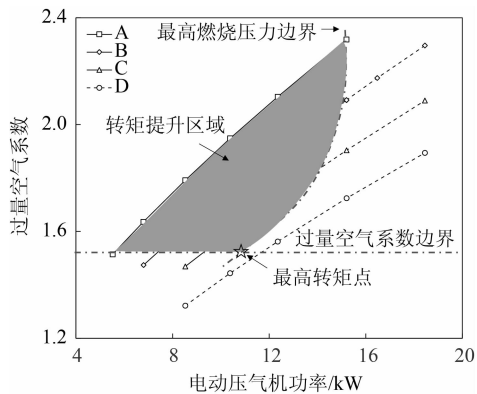


图10 1100 r/min 工况下发动机转矩潜在提升区域及边界

最高燃烧压力边界线与过量空气系数边界线包围的区域即为低速转矩有效提升区域,两者交点即为可提升的最高转矩点。通过计算得到该柴油机在1100 r/min 和1300 r/min 两个低转速工况下可以

达到的最高转矩, 如图 11 所示。其中: 1 100 r/min 工况下, 机电复合柔性增压柴油机转矩相比于原机最高可提升 192 N·m, 提升了近 24%。

图 12 展示了在低速全负荷工况下, 最大程度提升低速转矩后柔性增压柴油机系统综合效率和燃油消耗率与原机的对比。可以看出: 在低速全负荷工况, 机电复合柔性增压柴油机系统综合效率均略高于原机, 并且燃油消耗率也得到明显改善。表明柔性增压系统对于改善柴油机动力性和系统综合效率均有促进作用。

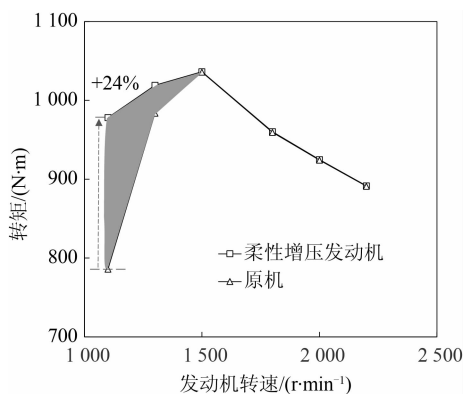


图 11 机电复合柔性增压柴油机转矩与原机的对比

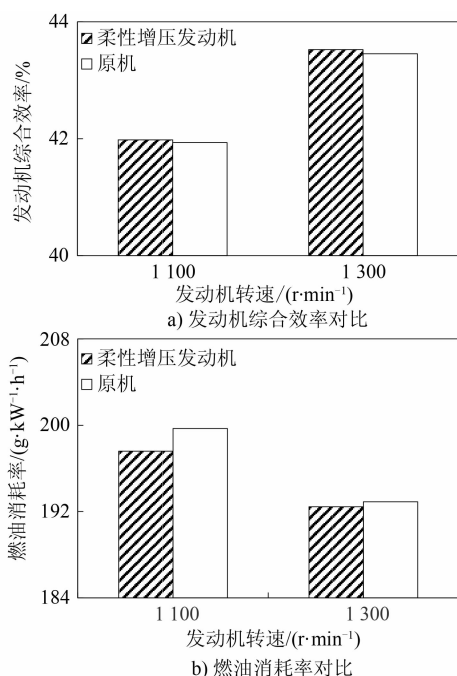


图 12 低速全负荷工况下机电复合柔性增压柴油机系统综合效率和燃油消耗率与原机的对比

3 结论

(1) 在中高转速工况, 机电复合柔性增压系统可使柴油机系统综合效率提升 2.66%, 主要原因是涡轮增压系统回收了原机在中高转速旁通的废

气能量。

(2) 通过控制涡轮转速可实现全工况最佳涡轮效率, 各转速工况涡轮效率提升 0.4% ~ 1.2%, 并能促进系统综合效率的提高。

(3) 通过提高电动压气机功率可以提升柴油机低速转矩, 转矩有效提升潜力的区域由最高燃烧压力边界和过量空气系数边界包围形成。在该区域内, 1 100 r/min 工况下转矩最大可提升 24%; 同时, 在最大程度提高转矩后, 系统综合效率略高于原机, 且燃油消耗率也得到明显改善。

参考文献

- [1] 周龙保, 刘忠长, 高宗英. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 65-85.
- [2] RICARDO M, APOSTOLOS P, YANG M, et al. Overview of boosting options for future downsized engines [J]. Science China-technological Sciences, 2011, 54 (2): 318-331.
- [3] HOPMANN U, ALGRAIN M C. Diesel engine electric turbo compound technology [C]. Future Transportation Technology Conference & Exposition, 2003.
- [4] MAECELO A. Controlling an electric turbo compound system for exhaust gas energy recovery in a diesel engine [C]. 2005 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, 2005: 259-264.
- [5] GERKE F G. Diesel engine waste heat recovery utilizing electric turbocompound technology [R]. Office of Entific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [6] WINWARD E, RUTLEDGE J, CARTER J, et al. Performance testing of an electrically assisted turbocharger on a heavy duty diesel engine [C]. 12th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, 2016.
- [7] XUE X, RUTLEDGE J. Potentials of electrical assist and variable geometry turbocharging system for heavy-duty diesel engine downsizing [C]. SAE Paper, 2017.
- [8] MILLO F, MALLAMO F, PAUTASSO E, et al. The potential of electric exhaust gas turbocharging for HD diesel engines [C]. SAE 2006 World Congress & Exhibition, 2006.
- [9] RYDER O, SUTTER H, JAEGER L. The design and testing of an electrically assisted turbocharger for heavy duty diesel engines [C]. Proceedings of the IMechE 8th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, 2006, 157-166.
- [10] TERDICH N, MARTINEZ-BOTAS R. Experimental efficiency characterization of an electrically assisted turbocharger [C]. SAE Technical Paper, 2013.
- [11] COPELAND C, TERDICH N, MARTINEZ-BOTAS R,

- et al. Off-road diesel engine transient response improvement by electrically assisted turbocharging [C]. SAE Paper, 2011.
- [12] TERDICH N, MARTINEZ-BOTAS R, ROMAGNOLI A, et al. Mild hybridization via electrification of the air system; electrically assisted and variable geometry turbocharging impact on an off-road diesel engine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136 (3): 1-12.
- [13] DIMITRIOU P, BURKE R, ZHANG Q, et al. Electric turbocharging for energy regeneration and increased efficiency at real driving conditions [J]. Applied Sciences, 2017, 7 (4): 350-375.
- [14] John Deere Moline Technical Center. Turbo compounding: a technology who's time has come [R]. 2005.
- [15] BRIGGS I, MCCULLOUGH G, SPENCE S, et al. A parametric study of an exhaust recovery turbogenerator on a diesel-electric hybrid bus [C]. Asme Turboexpo, 2013.
- [16] HOUNTALAS D T, KATSANOS C O, LAMARIS V T. Recovering energy from the diesel engine exhaust using mechanical and electrical turbocompounding [C]. SAE Technical Paper, 2007-01-1563.
- [17] JANG S M, CHO H W, CHOI S K. Design and analysis of a high-speed brushless DC motor for centrifugal compressor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2573-2575.
- [18] SOONG W L, KLIMAN G B, JOHNSON R N, et al. Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36 (3): 706-713.

(上接第 35 页)

3 总结

本文对主机用 TBD620V16 柴油机限制特性油量标定进行了研究,并验证了 DEUTZ-MWM 公司提供的限制特性曲线图适用于目前部分国产化配置的 2 240 kW/1 860 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) TBD620V16 柴油机,按该图限制特性曲线标定燃油限值能够保证柴油机安全可靠运行。

在实际生产工作中,为保证 TBD620 系列柴油机限制特性油量标定的准确性,出厂试验中应采用监控柴油机最高燃烧压力、涡轮增压器转速和涡前

排气温度等限制参数,通过对每台机进行配机试验的方法来完成柴油机限制特性功率的标定,保证柴油机作为主机使用时能够在燃油限制特性功率范围内安全可靠运行,以避免因限制特性功率设置较低导致在试航过程中部分工况拉不上转速,或因限制特性功率设置较高导致超负荷运行,排温高、拉缸等故障发生。

参考文献

- [1] 陆威嵩.现代船用柴油机特性曲线的研讨 [J]. 柴油机, 2005, 27 (4): 15-20.