

性能与排放

船舶柴电混合动力系统在电力助推模式下的性能仿真研究

张艺川, 赵同宾, 周晓洁, 冯明志

(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 应用 AMESim 软件对船舶柴电混合动力系统建模并进行试验验证。试验验证表明: 所建立的模型稳态误差 $\leq 5\%$, 满足精度要求。采用所建立的模型仿真分析了 Booster 模式下系统在不同工况下的匹配特性; 并研究了柴油机与轴带电机稳定运行的控制策略。

关键词: 柴电混合动力系统; 轴带电机; 匹配特性; 仿真

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)03-0029-04

Simulation Study on Performance of Diesel-electric Hybrid Propulsion System in Booster Mode

Zhang Yichuan, Zhao Tongbin, Zhou Xiaojie, Feng Mingzhi

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: AMESim software was employed to establish the model of marine diesel-electric hybrid propulsion system and tests were carried out to verify this model. The test results show that the steady-state error of this model is $\leq 5\%$ and meets the accuracy requirements. Using this model, the matching characteristics of the system under different working conditions in Booster mode are analyzed, and the controlling strategy of stable operation of diesel engines and shaft generators are studied and put forward.

Key words: diesel-electric hybrid propulsion system; shaft generator; matching characteristics; simulation

0 引 言

柴电混合动力推进是由柴油机和轴带电机混合推进的新型动力模式。目前其主要有三种运行模式: (1) 正常航行时, 轴带电机作为发电机, 吸收柴油机功率, 称为 PTO (Power Take Off) 模式; (2) 加速或在冰区航行时, 轴带电机作为电动机与柴油机共同推进, 称为电力助推 (Booster) 模式; (3) 柴油机故障等紧急情况时, 轴带电机作为电动机单独推进, 称为应急 (Power Take me Home, PTH) 模式。Booster 和 PTH 模式都是将轴带电机作为电动机使用, 两者又统称为 PTI (Pow-

er Take In)^[1]。

作为一种新型技术, 国内对船舶柴电混合动力系统的研究尚处于初步探索阶段。国内文献多数都只是对系统原理及其应用情况的阐述, 或是对某一船舶推进系统结构的介绍^{[1][2][3]}。文献 [4] 对 PTH 模式下的柴电混合动力系统性能进行了仿真研究, 但 PTH 模式只在主机故障时作为应急推进启动, 其应用范围并不大。

Booster 模式在船舶阻力增大或需要加速航行时启动, 此时柴油机与轴带电机共同推进, 能有效提高船舶运行的机动性, 应用范围较广, 具有较好的研究价值。但目前国内对 Booster 模式下船舶柴

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 受国家科技支撑计划课题资助 (2014BAG04B02)。

作者简介: 张艺川(1990-), 男, 在读研究生, 主要研究方向为轮机工程, E-mail: zhang198760731@126.com。

电混合动力系统的性能研究仍较缺乏。

本文以七一一研究所船舶柴电混合动力系统试验平台为对象,应用 AMESim 软件^[5]对船舶柴电混合动力系统进行建模,对 Booster 模式下系统的特性进行仿真研究。研究结果可为船舶柴电混合动力系统的设计和研究提供参考和指导。

1 仿真模型的建立和校核

1.1 仿真模型的建立

表 1 柴油机主要参数

型号	气缸数	工作过程	气缸排列	缸径 × 冲程/mm × mm	最大功率/kW	额定转速/(r · min ⁻¹)
TBD234V8	8	四冲程	V 型, 60°	128/140	323	2 100

表 2 轴带电机主要技术参数

电机型号	相数	频率/Hz	极数	同步转速/(r · min ⁻¹)	额定电压/V	额定功率/kW
ZDDX-120/400-4	3	50	4	1 500	400	96

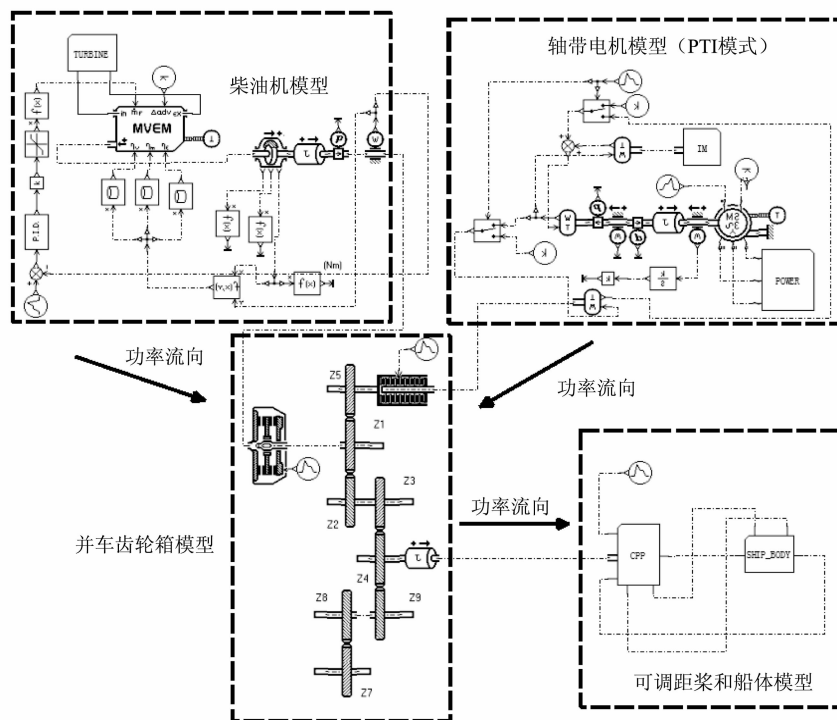


图 1 仿真模型示意图

1.2 模型的稳态校核

将 Booster 模式下轴带电机转速、功率和螺旋桨功率与试验数据做对比,如图 2 所示。由对比结果可得,柴电混合动力系统模型稳态仿真计算结果与实际结果最大误差 $\leq 5\%$,能满足精度要求,可以进行下一步仿真计算工作。

2 Booster 模式的匹配仿真分析

在 Booster 模式下,柴电混合动力系统能提高

表 1 和表 2 分别为柴油机和轴带电机的基本参数。图 1 为柴电混合动力系统试验平台中柴油机、轴带电机、齿轮箱和螺旋桨部分的模型。须要说明的是,试验平台推进系统中螺旋桨部分以螺旋桨模拟装置代替。模拟装置为一个直流电机,可以根据提供的螺旋桨特性曲线(或数据库)对电机进行扭矩和转速控制,以达到模拟螺旋桨特性的目的。螺旋桨模拟装置以可调距桨模式运行。

动力输出功率,使船舶加速航行或克服因为恶劣海况增加的船舶阻力。下面将通过四个工况来研究 Booster 模式下的匹配特性:一是负荷上升到超出柴油机单机推进能力时,轴带电机启动的过程;二是轴带电机接排的过程;三是轴带电机接排后,柴电并车满功率推进过程;四是负荷降低,柴油机可单机推进时,轴带电机卸除的过程。

2.1 轴带电机启动过程

60 ~ 103 s 为轴带电机启动过程,系统采用辅

助小电机外力启动。图 3 为 8、10 和 13 kW 三个不同容量的小电机启动轴带电机时的参数变化。60 s 时辅助小电机启动并拖动轴带电机, 轴带电机转速逐渐上升。由仿真结果可见, 容量越大的小电机加速时间越短, 其中 13 kW 的加速时间最短, 为 13 s; 8 kW 的加速时间最长, 为 23 s。轴带电机到达额定转速后, 于 88 s 转入发电模式, 并和柴油发电机并网。由仿真结果可见, 容量越大的小电机在发电状态下越稳定。95 s 辅助小电机逐渐降低输出功率, 在输出功率为 0 时断开, 轴带电机转入电动机运行。若要求轴带电机启动时间较短 (30 s 内), 而且系统运行的经济性和可靠性较高, 10 kW 的小电机可满足选型要求。

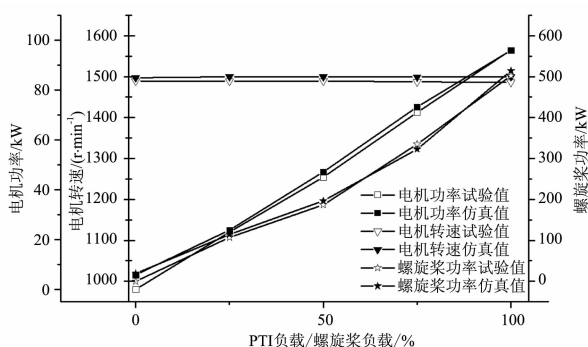


图2 仿真数据和试验结果对比图

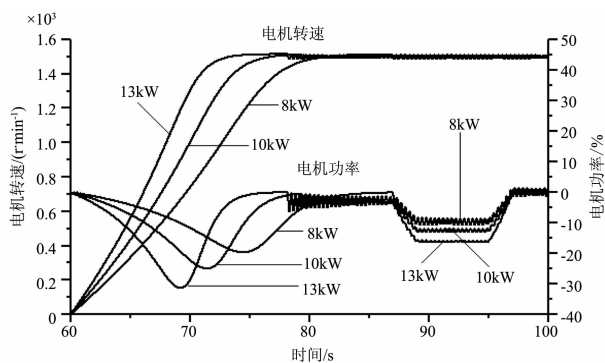


图3 轴带电机启动过程系统特性图

2.2 轴带电机接排过程

100 ~ 115 s 为轴带电机接排过程, 图 4 为轴带电机接排过程系统特性图, 虚线和实线分别代表分级接排前后系统的参数变化。

采用分级接排前, 由于接排瞬间电机转速和齿轮箱转速有微小的差异, 电机输出功率出现了一个瞬态峰值, 幅度达到 25%。采用分级接排后, 尽管电机和齿轮箱也存在一个转速差, 电机功率在 1 s 内只出现了小幅波动, 很快就恢复了平稳, 整个过程没有出现瞬态峰值。可见 Booster 模式下采取分级接排有利于系统的稳定运行。

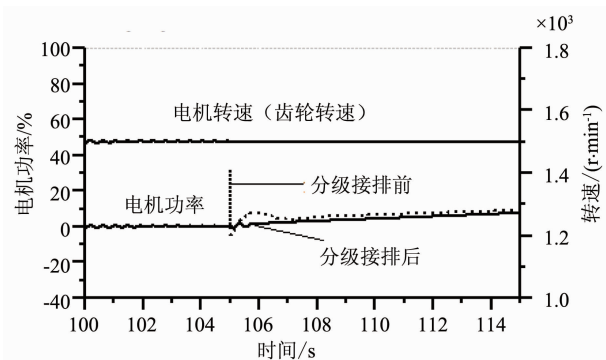


图4 轴带电机接排过程系统特性图

采用分级接排的方式, 能使接排过程变得平稳, 保护电机正常运行。具体方式是在轴带电机接排时, 先使离合器工作油压保持在一个较小值, 限制其传递扭矩的最大值。在系统平稳之后, 逐渐把工作油压调整至额定值。

由于 Booster 模式下轴带电机和齿轮箱转速较为相近, 接排过程的冲击不会太大。从选型的角度研究 Booster 模式下轴带电机接排过程并不够典型。选型要求应该考虑 PTH 模式下的接排过程, 因为此时轴带电机满转速, 而螺旋桨转速为 0, 此时对电机的冲击应该是最大的。

2.3 柴电并车推进过程

115 ~ 160 s 为柴电并车推进过程, 图 5 为柴电并车推进过程系统特性图, 其中虚线和实线分别代表采取负荷分配控制前后系统的参数变化。

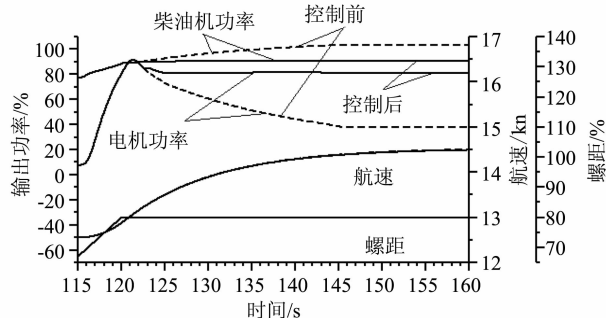


图5 柴电并车推进过程系统特性图

115 s 轴带电机接排后, 115 ~ 120 s 船体负荷上升, 柴油机和轴带电机的输出功率也相应上升。采取负荷分配控制前, 在负荷加载完毕后, 柴油机由于调速器积分环节的作用, 处于超负荷 (105% 额定功率) 状态, 对柴油机的稳定运行非常不利。采取负荷分配控制后, 主机在达到稳定时不再超负荷运行, 输出功率稳定在 90% 额定功率, 电机功率也稳定在 80% 额定功率。由图可见, 加入控制环节后, 系统的可靠性得到了有效提高。

采用负荷分配控制能合理分配并车推进时柴油

机和轴带电机所承受的负荷。目前较为通用的方法是主动调节主机的转速（电机转速保持不变），通过改变离合器两端的转速差来调整承受扭矩大小，从而调整柴油机的输出功率。此时轴带电机会自动调整其输出功率，直到系统稳定。

对应在仿真模型中加入一个控制环节，对柴油机功率、电机功率进行监测。若实际值与设定值有偏差，控制环节会产生一个负反馈信号，信号将传至调速器，信号强弱与偏差大小成正相关。

考虑到船舶航行的经济性和可靠性，负荷分配控制策略设定为：当需求功率在 90% 柴油机额定功率以内，负荷全部由柴油机承担；当需求功率超过 90% 柴油机额定功率时，超出部分由电机来承担，直到电机输出功率达到 90% 额定功率。

2.4 轴带电机脱排过程

160 ~ 250 s 为轴带电机脱排过程，图 6 为轴带电机脱排过程系统特性图，虚线和实线分别代表采取分级降速前后系统的参数变化。

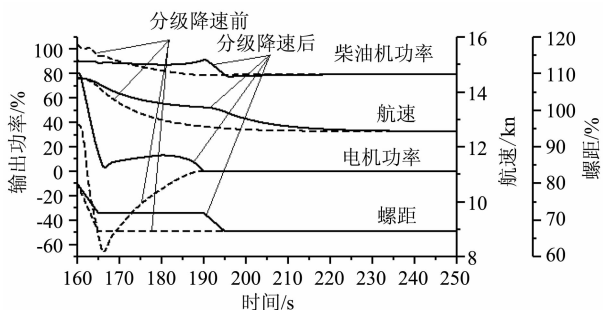


图 6 轴带电机卸除过程系统特性图

160 ~ 165 s 负荷下降，柴油机和轴带电机的输出功率也相应下降。采取分级降速前，由于电机的响应速度较快，输出功率很快变为负值（这在实际操作中是不允许的，而且轴带电机有逆功率保护的设计）。采用分级降速后，需求功率先下降到柴油机额定功率的 90%，此时电机功率虽然响应速度快，但输出功率一直保持为正，此时柴油机输出功率基本保持不变，整个过程柴油机和轴带电机都运行在正常的工作范围内。仿真结果表明：采用分

级降速有利于提高系统运行的可靠性；但是，采用分级降速后船体航速达到稳定的时间较长，降低了船舶的机动性。

采取分级降速能控制负荷变化的幅度。由于电机对负荷的响应较快，在负荷卸除时可以先降低部分负荷，然后保持一段时间，再降低部分负荷，如此，始终保证电机输出功率为正值，直到满足柴油机单机推进的条件后，轴带电机脱排。采用分级调速系统稳定性较好，但可能会以降低船舶航行的机动性为代价。

3 结论

(1) 应用 AMESim 软件建立柴电混合动力系统试验平台仿真模型并进行稳态校核。此模型稳态最大误差 $\leq 5\%$ ，满足精度要求。

(2) 针对 Booster 模式四个工况中柴电混合动力系统的特性进行了仿真计算。结果表明：选用 10 kW 的小电机，轴带电机就能快速且稳定地启动；采用分级接排后，轴带电机输出功率的瞬态峰值得到有效控制；采用负荷分配控制后，柴油机在和轴带电机并车推进时能够运行在额定功率范围内；采用分级降速后，轴带电机在 Booster 模式卸除过程中保持正常运行。

参考文献

- [1] 孟宪尧, 韩新洁, 白广来. 海上作业多用途工作船自动控制系统 (三) - 轴带发电机控制模式的分析 [J]. 世界海运, 2004, 27 (5): 8-9.
- [2] 宋华屏. 16400t 化学品船的 PTI/PTO 系统研究 [J]. 江南集团技术, 2003, 3: 11-25.
- [3] 李飞. 轴带发电机的 PTI 模式介绍 [J]. 江苏船舶, 2005, 22 (3): 32-33.
- [4] 周庆波, 艾钢, 赵同宾, 等. 柴-电混合动力系统应急推进模式仿真研究 [J]. 船舶工程, 2011, 33 (4): 16-19.
- [5] 周晓洁, 赵同宾, 陈金涛, 等. AMESim 仿真技术在船舶推进系统中的应用 [J]. 船舶工程, 2009, 31 (6): 28-31.