

高速客船的动力运行特性

陈有兵^{1,2}, 尹晓青^{1,2}, 于洪涛², 杜计划², 孙辰龙²

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴重机股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为研究船舶动力匹配状况,以配套某型号电控发动机的近海高速旅游客船为研究对象,分析定距螺旋桨的运行特性,采集高速客船实际航程满载、空载的运行数据,分析客船在各个工况下的转矩、转速分布特点,并结合柴油机的性能曲线分析船舶动力匹配情况。结果表明:高速客船载客数量对船舶推进特性曲线影响不大;该船舶发动机工作时能够达到额定转速和额定转矩,匹配较为合理,游船运行转矩-转速落点多在经济区域边缘。该客船配套较重螺旋桨后可将运行点向上偏移到经济油耗区。该研究可为近海高速客船动力系统配套提供参考。

关键词:高速客船;电控柴油机;运行特性;船舶动力

中图分类号:U664.121

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)06-0066-06

引用格式:陈有兵,尹晓青,于洪涛,等.高速客船的动力运行特性[J].内燃机与动力装置,2022,39(6):66-71.

CHEN Youbing, YIN Xiaoqing, YU Hongtao, et al. Dynamic operation characteristics of high speed passenger ship[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(6):66-71.

0 引言

近年来,随着经济的发展和人民生活水平的提高,近海旅游业逐渐兴起,高速客船的运行特性越来越被关注。船舶设计是一门高度综合、涉及多个学科的科学技术,船舶的设计性能和主要参数通常通过理论分析和试验手段获取^[1],与实际工况存在一定的误差。为了保证船舶具有良好的动力性和经济性,在船舶动力系统配套和选型设计时,应充分了解船舶的运行特性,并对现有同类船舶进行配套分析,从中汲取经验。

虽然有研究表明排放污染主要来自工厂和陆上交通工具^[2],但是在港口、码头等局部地区船用发动机是主要的污染源^[3]。因此,研究船舶运行工况和船舶动力的合理匹配对节能减排有重要意义。

采集所设计船舶运行线路上其他同类船舶的运行数据,为船舶设计提供有力的数据支持,使所设计船舶符合线路的运行规律和特点,安全运行、节能降耗。本文中以配套某型号电控发动机的高速旅游客船为研究对象,分析高速客船的实际运行数据和在线路上的运行特性,研究船舶动力配套优化,使船舶在不同工况下均运行在经济油耗区。

1 定距螺旋桨运行特性

螺旋桨是目前中小型船舶普遍采用的推进器,按螺距是否可变分为定距桨和变距桨^[4]。柴油机驱动螺旋桨在水中旋转产生推力,克服船舶航行阻力,使船舶维持一定航速运行,因此螺旋桨的型式、运行工况的差异,决定了螺旋桨特性曲线的不同,特别是螺旋桨进程比不同。对于同一螺旋桨,进程比越小,产生的推力越大^[5-6]。螺旋桨的进程比

收稿日期:2022-05-05

第一作者简介:陈有兵(1981—),男,山东青州人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电控系统开发,E-mail:chenyb@weichaihm.com。

$$\lambda_p = \frac{v_p}{n_p D} = \frac{h_p}{D}, \tag{1}$$

式中: v_p 为船速, m/s; n_p 为螺旋桨转速, r/min; D 为螺旋桨直径, m; h_p 为螺旋桨每转的进程, m/s。

$\lambda_p = 0$ 时表示船舶静止, 在系泊试验或者测量船舶最大拉力时会出现这种情况。

对于螺旋桨直径为定值的船舶, 螺旋桨的吸收转矩

$$M_p = C_2 n_p^2, \tag{2}$$

式中 C_2 为系数。

螺旋桨的吸收功率

$$P_p = C n_p^3, \tag{3}$$

式中 C 为系数。

不同进程比下的螺旋桨特性曲线如图 1 所示, 图中 $\lambda_p = 0, \lambda_{p3} < \lambda_{p2} < \lambda_{p1}$ 。由图 1 可知, $\lambda_p \neq 0$ 时, 同一螺旋桨转速下, 进程比越大, 所需功率越小。

由式(2)(3)可知:

$$v_p = \lambda_p n_p D = \lambda_p D \sqrt{\frac{M_p}{C_2}}, \tag{4}$$

$$v_p = \lambda_p n_p D = \lambda_p D \sqrt[3]{\frac{P_p}{C}}. \tag{5}$$

由式(4)(5)可知: 当 $\lambda_p \neq 0$ 且 λ_p 越大时, 同一船速的需求功率和转矩越小; 相同转矩和功率下, λ_p 越大, 船速越快。

船舶在某一水域运行, 航速与螺旋桨转速成正比关系。但是, 同一水域不同工况下船舶的进程比不同, 导致相同航速的需求功率和需求转矩不同。

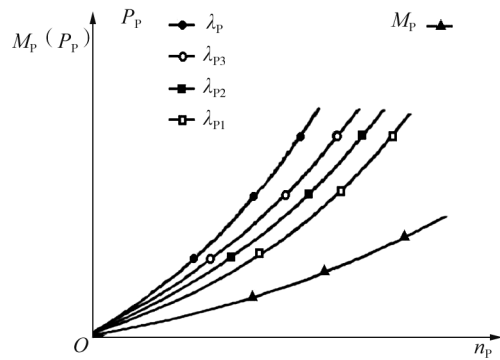


图 1 不同进程比螺旋桨特性曲线

2 船-机-桨配合特性

船、机、桨是一个有机整体, 主机将燃料的内能转化为旋转动能输出, 螺旋桨将主机发出的旋转能(转矩)转换为推进能(推力)使船体运动, 船体是能量的接受者^[7]。合理的船、机、桨配合可得到最佳的能量转化效率。船舶在稳定工况下运行, 忽略各种能量损失, 可认为柴油机的输出转矩和螺旋桨维持转速的需求转矩达到平衡, 即螺旋桨特性曲线与柴油机油门特性曲线交点的连线即为该船舶柴油机的推进特性曲线。柴油机加、减速工况功率-转速如图 2 所示, 图中的曲线 I、II、III 即为推进特性曲线。

推进特性曲线理论上是稳态曲线, 船舶加、减速时不可能严格按照曲线运行, 会有偏离。船舶在不同的航道航行时螺旋桨进程比不同, 不同的天气状况或其它环境条件也会对进程比产生影响^[7], 因此真实数据表现为一个区域, 该区域遵循推进特性的运行趋势。

图 2 中, 曲线 1、2、3、4 为柴油机不同负荷的速度特性曲线。稳态工况下, 假设柴油机在点 $c-a$ 间运行, 但却不是从点 c 沿曲线 I 过渡到点 a , 而是先到达能够克服当前瞬时加速度的最大功率点 b , 然后再慢慢过渡到点 a ^[8], 渐进加速时的路径为 $c-b'-a''-b''-a'-b'''-a$ 。实际运行中, b' 、 b'' 、 b''' 点的功率要

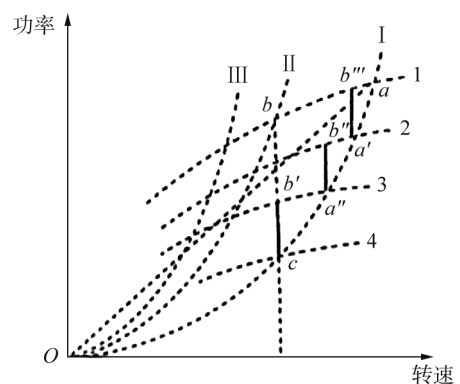


图 2 柴油机加、减速工况功率-转速图

比点 a'' 、 a' 、 a 高, 原因为起始点的加速度大于终点。如果能够做到中间连续加速, 没有停顿, 可能的路径有 $c-b'-b''-b'''-a$ 和 $c-b'-b''-a$, 具体路径与加速度有关。

船舶在大负荷工况运行时, 假设在点 a'' , 负载突然增大, 此时发动机转速下降, 输出功率增加, 因此可能到点 b' 或者点 b 运行, 当负载撤销时又会回到点 a'' 。

3 船-机-桨配合特性分析

以一艘配套某型号电控发动机的高速旅游客船为研究对象, 分析其空载和满载工况的运行特点及其船-机-桨匹配的合理性。高速客船主要技术参数如表 1 所示。

表 1 高速客船主要技术参数

船体总长/m	船长/m	满载排水量/t	定额乘客/人	主机功率/kW	螺旋桨类型	螺旋桨直径/mm	齿轮箱速比
28	24.15	59.2	95	368	整体式定矩桨	920	2.545 : 1

3.1 空载工况

船舶航行试验去程空载, 分为加速、高速运行、冲浪、到港减速和港口停泊 5 个阶段; 海上浪高 1.5 m 左右, 耗时 45 min, 冲浪阶段(第 0~1100 秒和第 1400~1800 秒)油门不停变化, 通过冲浪的方式使船舶尽量平稳; 稳速运行(第 1100~1400 秒和第 1800~2600 秒)阶段油门较大, 保持恒定。对空载行程各运行阶段的路谱进行筛选, 绘制成转速-转矩散点图, 如图 3 所示。由图 3 可以更加直观了解不同运行阶段发动机运行时转速-转矩的落点区域和发动机运行特点。

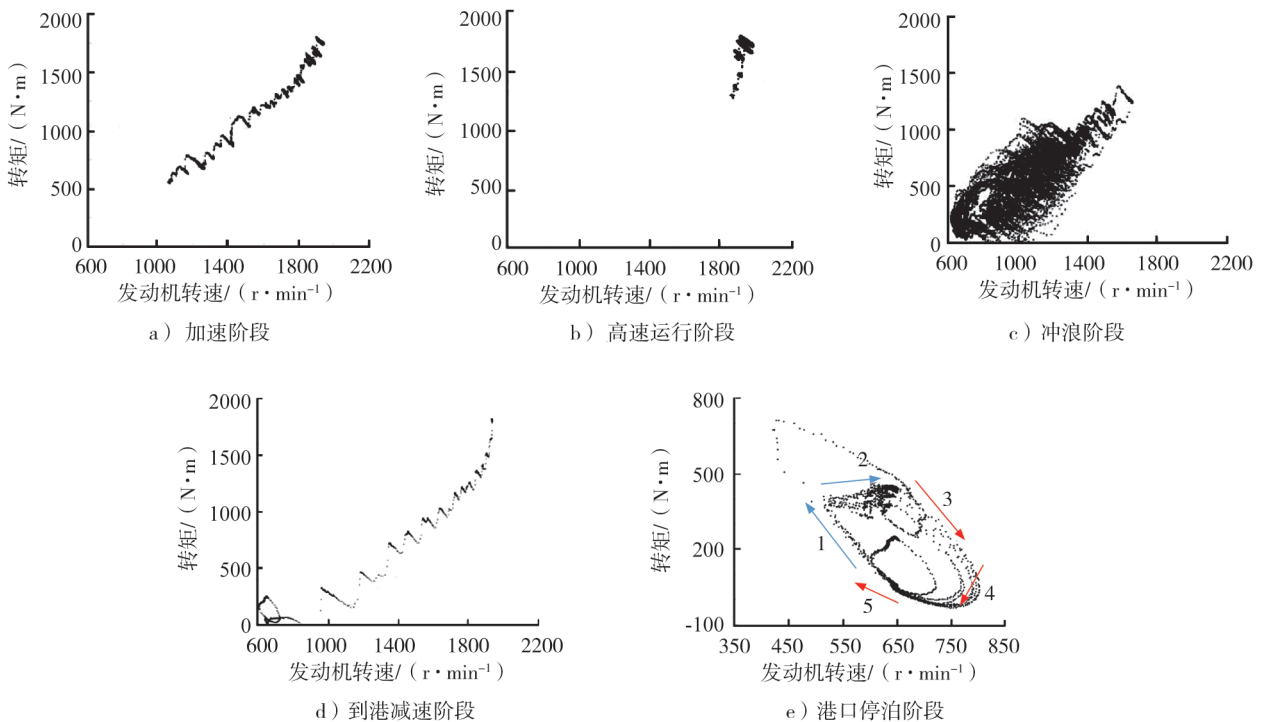


图 3 空载各工况转速-转矩散点图

由图 3 可知: 高速运行阶段油门开度基本保持最大, 转速-转矩落点较集中; 加速和到港降速阶段转速-转矩落点则各形成一条与推进曲线几乎平行的区域, 由于加速阶段需求转矩较大, 落点落在降速区域上方; 冲浪阶段油门频繁变化, 油门和负载的共同作用增大该阶段转速-转矩落点范围, 转速为怠速到 1500 r/min, 转矩为 0~1400 N·m; 港口停泊阶段转速-转矩落点呈现很多嵌套的椭圆形, 从速度变化可知

该阶段油门开度为0,发动机处于怠速运行状态,落点为椭圆形是由怠速状态船舶齿轮箱合排、脱排导致。齿轮箱合排时,发动机转速从怠速点下降,输出转矩上升,沿图3e)中1—2路径运行,路径2基本是水平过渡,这是由于合排时转矩瞬间加大后维持在某个转矩不变,转速在电控柴油机调节下回升到怠速点;脱排时转矩下降转速上升,最后又回到怠速点,沿3—4—5路径运行,从而形成近似椭圆的落点区域,多次合、脱排即形成多个椭圆的嵌套。

由图3c)可知:转速-转矩落点主要集中在低转速区域,这与低转速时油门开度频繁变化冲浪和怠速停船有关,瞬时转矩需求大,油门变化频繁,造成转矩的范围较宽;对照图2,冲浪阶段对应的路径为c—b'—a"—b"—a'—b"—a,对比发现实际工况点b'、b"、b"'的功率高于点a"、a'、a;高转速下油门稳定,加减速操作少,因此运行与推进特性曲线的偏离较少;在降速过程中,随着油门的逐渐降低,转矩先下降后上升,转速先是小幅下降,而后下降较大,发动机在新的转速和转矩点达到平衡。

3.2 满载工况

回程耗时58 min,游船满载运行,分为出港、加速、高速运行、到港降速和港口停泊5个阶段;满载运行时油门长时间保持在最大开度,转速波动比较小;船身较重,能够抵抗一定强度的风浪冲击,因此没有冲浪过程,出港后船舶以最大油门航行,直到到达港口。采集回程游船满载各阶段转速-转矩散点图如图4所示。

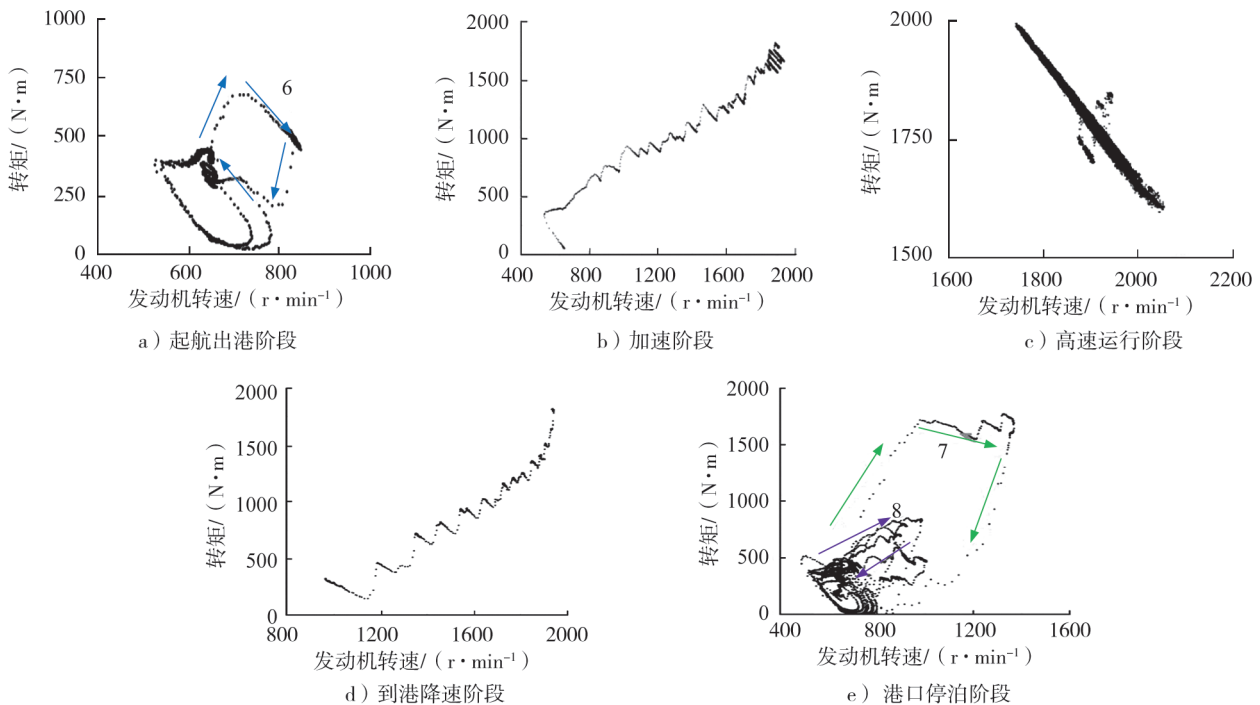


图4 满载各阶段转速-转矩散点图

由图4可知:1)满载运行没有空载时的冲浪阶段,加速和减速阶段区别十分明显,港口停泊阶段特征不明显;2)起航出港和港口停泊时发动机在相同的转速范围内运行,由于船舶是重载运行,靠岸停泊阶段驾驶员经常加油门进行船舶姿态调整,出现如图4a)、e)中的油门循环6、7、8,其中,循环7为本次停泊的一次猛加油门过程,导致转速上升到1400 r/min,转矩达到1750 N·m,继续2次小幅油门后,将油门调整到0,转矩迅速下降,受螺旋桨的惯性对发动机作用,发动机转速下降滞后于转矩;3)空载和满载的加、减速阶段的散点图区别明显。

跟船出港后时发动机油门始终运行在最大开度,与图3高速运行阶段类似,没有加、减速操作,与推进特性的吻合较好。低速区域宽的很重要原因是由于怠速停船时的操作,此时的加速度增大以适应工况的调整。

3.3 船-机-桨配合校核

船-机-桨最优匹配可使推进装置的整体性能达到最佳状态,以最高的推进效率做功,使燃油消耗率达到最低^[9]。为了研究该船船-机-桨匹配状况,可将该航程的运行工况对应到发动机万有特性曲线上,如果落点大部分在经济油耗区域,说明匹配较合理,否则需要进行优化。

该游船海上空载和满载工况对柴油机输出转矩的影响主要体现在落点区域上,空载时在低速段落点较多,而满载工况落点多数在高转速大转矩区且比较集中。负载对运输时间影响较大,满载时发动机在满油门的额定转速运行,满载航行时间比空载多 13 min,这表明满载时螺旋桨每转一圈船舶前进距离比空载时短,即负载影响了船舶的进程比,也说明螺旋桨的特性曲线整体向上偏移^[10]。

高速客船要求高转速,在配套柴油机时应使其尽量工作在该柴油机万有特性曲线的经济油耗区^[11],即要求船舶满载航行时,发动机应运行在额定转速和额定转矩下,能够发出额定功率,船舶应达到额定航速^[12]。

高速客船空载和满载运行工况点在万有特性曲线上的分布如图 5 所示,图中蓝色为船舶运行转矩-转速的落点,绿色为经济油耗区,红色为高油耗区域。由图 5 可知:该船舶发动机工作时能够达到额定转速和额定转矩,匹配较为合理;但游船运行落点多在经济区域边缘,没有达到最省油的经济油耗区。

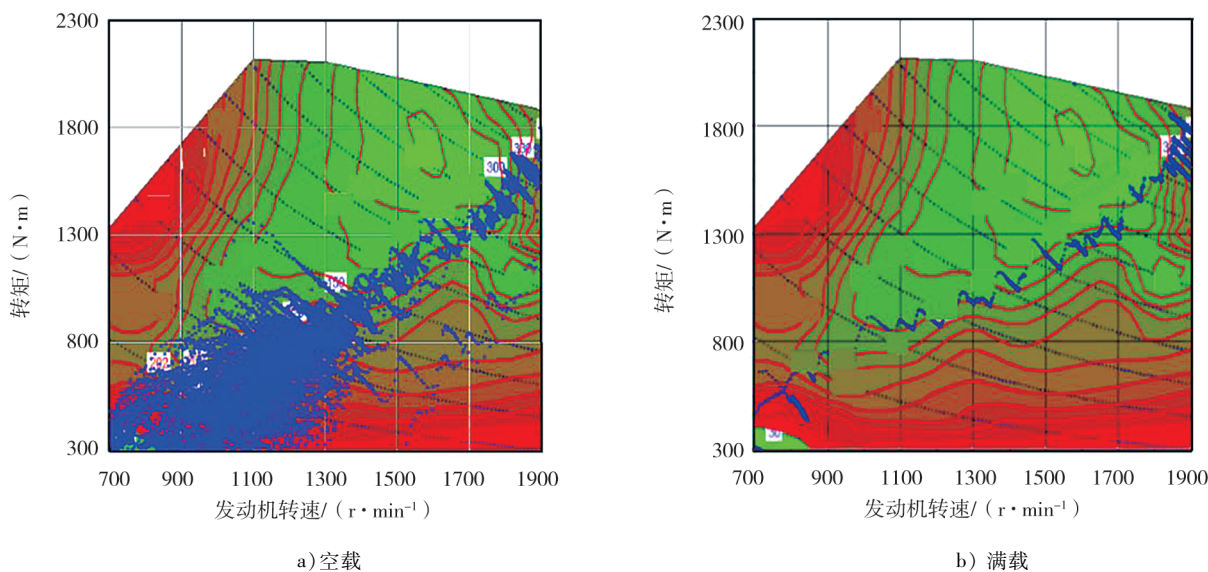


图 5 高速客船空载、满载运行点在万有特性曲线上的分布图

高速客船由于载客质量远小于船舶本身,因此在动力匹配时无需将推进特性曲线匹配到经济油耗区偏下位置以实现在重载时船舶运行到经济油耗区域,而是可直接将推进特性曲线匹配到最经济油耗区域,重载时推进特性曲线不会有太大变化,仍然会落在经济油耗区。

该客船配套质量较大螺旋桨后,运行落点向上偏移到经济油耗区。

4 结论

- 1) 船舶阻力增大,进程比减小,航速降低,在高速客船上体现的尤为明显。
- 2) 高速客船载客数量对船舶推进特性曲线影响不大。
- 3) 港口内船舶一般运行在低速区域,出港后一般最大转速运行以提高运送效率。
- 4) 该客船配套可以适当选择较重螺旋桨,将运行点向上偏移到经济油耗区。
- 5) 在进行船舶动力匹配时应仔细研究船舶主机的性能和船舶的设计要求,认真调研用户的操作习惯和使用工况,设计出符合客户需求的性能优越的船舶动力系统。

参考文献:

- [1] 谢云平. 船舶设计原理[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [2] 尹晓青,陈有兵,孟庆健,等. 电控柴油机船舶动力特性匹配研究[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(6):42-47.
- [3] VLADIMIR A. ZHUKO V, IVAN I, et al. Theory and design of marine internal combustion engines[D]. St. Petersburg, Russia:Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2018.
- [4] 季洋阳,田桂中,周宏根. 船用螺旋桨先进制造技术研究进展[J]. 舰船科学技术,2015,37(5):9-15.
- [5] 崔哲. 基于螺旋桨敞水特性曲线的船-机-桨匹配研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [6] 胡洋. 波浪中螺旋桨的水动力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [7] 姜雅乔. 长江航标维护船舶能效状态评估及异常致因分析[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- [8] 陈奎. 船艇发动机的应用匹配及优化[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [9] 徐筱欣. 船舶动力系统[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007:36-37.
- [10] 秦宝山,邓忠起,高宪军. 船机桨工况匹配与船舶节能[J]. 船舶工业技术经济信息,2002(7):35-37.
- [11] 李帆. 以柴油机为动力的大型船舶机桨匹配研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [12] 李闯,李志. 船舶螺旋桨推进形式研究[J]. 船电技术,2016,36(12):68-73.

Dynamic operation characteristics of high speed passenger ship

CHEN Youbing^{1,2}, YIN Xiaoqing^{1,2}, YU Hongtao²,
DU Jihua², SUN Chenlong²

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China;

2. Weichai Heavy Machinery Co., Ltd., Weifang 261001, China

Abstract: In order to study the ship power matching, take the offshore high-speed passenger ship equipped with an electronic control engine as the research object, the operation characteristics of fixed pitch propeller, the full load and no-load operating data of the high-speed passenger ship during the actual voyage are collected. The torque and speed distribution characteristics of the passenger ship under various working conditions and the ship power matching in combination with the performance curve of the diesel engine are analyzed. The results show that the number of passengers carried by high-speed passenger ships has little influence on the ship propulsion characteristic curve. The ship's engine can reach the rated speed and rated torque when working, and the matching is acceptable. The cruise ship's running torque speed impact point is mostly at the edge of the economic region. When the passenger ship is equipped with heavier propellers, the operating point can be shifted upward to the economic fuel consumption area. This research can provide reference for the matching of power system of offshore high-speed passenger ships.

Keywords: high speed passenger ship; electronically controlled diesel engine; operating characteristics; ship power

(责任编辑:郎伟锋)