

某渔业资源调查船柴电混合动力系统设计及应用

申 卿^{1,2}, 孟嗣斐^{1,2}

(1. 上海船用柴油机研究所, 上海 200090; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘 要: 基于船舶动力系统平台, 根据某渔业资源调查船运行工况, 从柴电混合动力系统运行模式分析、设备选型分析、推进轴系回转振动分析等方面着手, 开展柴电混合动力系统设计。设计的柴电混合动力系统与传统柴油机动力系统相比, 装机功率降低了 17.9%, 油耗降低了 6.5%。经实船应用, 各项性能指标均满足技术要求。

关键词: 柴电混合动力系统; 渔业资源调查船; 设计方案

中图分类号: U664.142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)04-0035-05

Design of Diesel-Electric Hybrid Power System for a Fishery Resource Investigation Vessel

Shen Qing^{1,2}, Meng Sifei^{1,2}

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090;

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: Based on the design platform of ship power system, according to the operation condition of a fishery resource investigation ship, the design of diesel-electric hybrid power system was carried out from the aspects of operation mode analysis, equipment selection analysis and rotary vibration analysis of propulsion shafting. Compared with the traditional diesel power system, the newly designed diesel electric hybrid system can reduce the installed power by 17.9% and fuel consumption by 6.5%. All the performance indexes were verified to meet with the technical requirements by onboard application.

Key words: diesel electric hybrid; power system; ship

0 引言

船舶运动性能由船体主尺度、结构阻力、动力系统和配置等因素决定, 其中动力系统是船舶的核心。设计船舶时须要根据不同的用途和结构配置不同的动力系统。渔业资源调查船主要用于调查海域渔业生物种类和资源, 兼顾海洋水质监测和海洋环境监测等, 因此, 近海渔业资源调查船须要在出航、返航和转移渔场作业时具有较高的航速, 在拖网调查作业时具有大拖力, 同时兼具应急返航能力^[1]。

近年来, 柴电混合推进动力系统已应用于火车轮渡、渔船、海洋工程船等^[2-5], 是新型船舶动力系统的一种趋势。针对某近海渔船功能需求, 通过

开展混合动力系统模式功能设计、系统匹配设计计算, 设计满足该船舶需求的柴电混合动力系统。

1 柴电混合运行模式

渔业资源调查船主要运行工况如下。

(1) 巡航工况: 进行海洋环境和渔业生态情况调查, 航速要求 6~8 kn;

(2) 高速航行工况: 渔业资源抢险或其他特殊工况, 航速要求 12 kn 以上;

(3) 正常航行工况: 渔业资源调查船从港口航行至作业地点, 以经济航速为主;

(4) 拖网工况: 拖网调查, 要求船舶在低航速情况下提供大拖力;

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2020-02-06

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目。

(5) 应急工况：如果主机故障瘫痪，须安全返航。

针对以上几种主要运行工况，合理应用柴电混合动力系统，可以有效降低主机的装机功率，提升低负荷时的主机能效，达到节能减排的目的。

针对目标船主要运行工况，开展柴电混合动力系统模式与功能初步设计。巡航及应急工况采用电机推进模式；正常航行工况采用柴油机推进模式；高速航行及拖网工况采用混合推进模式。

柴电混合动力系统主要由主推进柴油机、推进电机、齿轮箱、发电机组、配电板、变频器、轴系和螺旋桨等组成。同时，为保证该船在拖网工况下的大扭矩需求，螺旋桨型式采用调距桨。

具有三种运行模式的柴电混合推进动力系统如图1所示。三种运行模式分别为：柴油机直接推进模式，该模式下由柴油机单独驱动螺旋桨，轴带电机与齿轮箱脱排；电机直接推进模式，该模式下柴油机和齿轮箱脱排，由轴带电机单独驱动螺旋桨；柴电混合并车推进模式，该模式下由柴油机和轴带电机共同驱动螺旋桨。

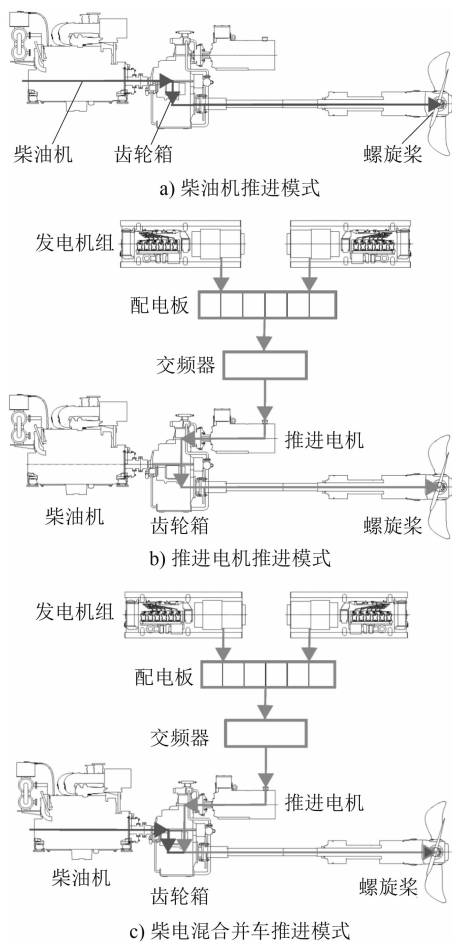


图1 柴电混合动力系统

2 系统设计

2.1 设备选型分析

该船艏部船型狭窄，无法采用多柴油机推进系统，因此选用单机单桨推进配置。根据有效功率（表1），利用船舶动力系统设计平台分析和初步设计该船柴电混合动力系统。该设计平台嵌套了主流柴油机型号和螺旋桨图谱，可根据船舶有效功率曲线自动匹配主推进动力系统和螺旋桨主要参数。本文采用该设计平台初步确定柴油机及推进电机的参数（图2）。在柴电并车推进模式下，该船最大航速可以达到设计航速（12 kn）；在电机推进模式下，可以达到巡航航速（6~8 kn）。

表1 有效功率

航速/kn	有效功率/kW
8	84
9	126
10	194
11	320
12	454
13	604
14	790



图2 柴油机和推进电机功率分配、型号选择界面

与该船柴电混合动力系统匹配的主要设备参数如表2。

2.2 航速计算

按照所选设备参数与船舶阻力数据，利用船舶动力系统设计平台开展该船快速性预报，将相关参数代入船舶动力系统设计平台，计算各运行工况航速，结果见表3。

通过扭转振动计算分析可知：推进动力系统在转速为 855 ~ 2 090 r/min 时无转速禁区，可长期可

靠地运行。当柴油机各缸正常运行时,为保证齿轮副安全,柴油机转速不得低于 270 r/min;当柴油机故障导致一缸熄火,为保证齿轮副安全,柴油机转速不得低于 620 r/min。

2.4 推进轴系回旋振动分析

在零螺距和满螺距运行状态下,计算推进轴系的回旋振动,结果见表 4。

表 4 回旋振动综合计算结果

项目	频率比	固有频率/ ($r \cdot \min^{-1}$)	临界转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	衡准
零螺距	1	959.30	959.30	好
	1/4	881.94	220.49	好
满螺距	1	979.35	979.35	好
	1/4	885.76	221.44	好

由上表可知:零螺距时,一次共振转速为 959.30 r/min,大于轴系额定转速的 20% 以上;叶片次共振转速为 220.49 r/min,不在 0.85 ~ 1 倍轴系及螺旋桨额定转速范围内。满螺距时,一次共振转速 979.35 r/min,大于轴系额定转速的 20% 以上;叶片次共振转速 221.44 r/min,不在 0.85 ~ 1 倍轴系及螺旋桨额定转速范围内,满足船级社规范要求。

2.5 轴系和螺旋桨强度分析

按照船级社规范对轴系和螺旋桨强度进行计算,在理论计算基础上选取轴系和螺旋桨实际生产加工的尺寸。理论计算数据和实际取值见表 5。

表 5 轴系和螺旋桨理论计算尺寸和实际取值

单位: mm

项目	理论计算	实际取值
螺旋桨轴直径	143.97	160.00
螺旋桨轴前轴承直径	165.56	175.00
螺旋桨轴后轴承直径	175.64	185.00
0.35R 剖面处叶截面厚度	60.16	30.51
0.6R 剖面处叶截面厚度	73.11	46.95

3 实船应用

3.1 航行试验结果

动力系统设备按照设计生产验收并交付船厂后,由船厂和动力系统集成商开展安装调试。系泊试验合格后,根据符合船级社规范的航行试验大纲对动力系统各项性能进行验证。分别开展了柴油机推进工况、电机推进工况和柴电并车推进工况航行试验。各试验工况运行记录如表 6 ~ 表 8 所示。

表 6 柴油机推进工况试验结果

项目	参数	50% 负荷	75% 负荷	100% 负荷	100% 负荷 (短时)
柴油机	功率/kW	466	746	932	1 007
	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 702	1 701	1 702	1 900
	滑油压力/MPa	0.638	0.565	0.549	0.574
	冷却水温度/℃	65.4	75.2	79.3	77.9
	左列排气温度/℃	406	447	474	476
	右列排气温度/℃	409	448	470	474
螺旋桨	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	275	275	275	305
推进齿轮箱	主离合器工作油压/MPa	1.886	1.89	1.9	1.9
船舶	航速/kn	8.5	12.0	13.1	13.5

表 7 电机推进工况试验结果

项目	参数	工况
电机	功率/kW	123
	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 000
	电压/V	390
螺旋桨	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	184
推进齿轮箱	主离合器工作油压/MPa	0.426
	PTI 离合器工作油压/MPa	1.484
船舶	航速/kn	6.3

表 8 柴电并车推进工况试验结果

项目	参数	工况 1	工况 2
柴油机	功率/kW	932	1 007
	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 700	1 900
	滑油压力/MPa	0.549	0.574
	冷却水温度/℃	79.3	77.9
	左列排气温度/℃	474	476
	右列排气温度/℃	470	474
电机	功率/kW	180	200
	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 610	1 800
	电压/V	390	410
	电流/A	320	322
螺旋桨	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	275	305
推进齿轮箱	主离合器工作油压/MPa	1.89	1.9
	PTI 离合器工作油压/MPa	1.49	1.5
船舶	航速/kn	13.45	13.7

根据实船试验结果,柴电混合动力系统在该船各工况下均运行正常;各运行模式下实测航速均大于设计要求;所有工况设备参数均满足要求。

3.2 经济性分析

该船选用柴电混合动力系统,柴油机装机功率降低了 17.9%。针对船舶使用工况特点,开展能

耗分析，结果如表 9、表 10。若该船选用柴油机作为推进动力，燃油消耗量为 333.01 t/y；选用柴电混合系统，燃油消耗量为 311.49 t/y。与采用常规

柴油机推进系统相比，采用柴电混合推进动力系统后该渔业资源调查船可节油 6.5%。

表 9 常规柴油机推进系统油耗

工况	推进方式	主机功率/kW	主机油耗/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	柴发功率/kW	柴发油耗/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	年工作时间/h	耗油量/t
最大航速	柴油机推进	1 227	215	160	201	100	29.60
巡航工况		746	221	160	201	800	157.62
低速科考工况		570	235	160	201	800	132.89
静音科考工况		120	270	160	201	200	12.91
全船年总耗油/(t·y ⁻¹)							333.01

表 10 柴电混合动力系统油耗

工况	推进方式	主机功率/kW	主机油耗/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	柴发功率/kW	柴发油耗/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	年工作时间/h	耗油量/t
最大航速	柴电并车	1 007	214	380	202	100	29.22
巡航工况	柴油机推进	746	210	160	201	800	151.05
低速科考工况	柴油机推进	570	220	160	201	800	126.05
静音科考工况	电机推进			126	205	200	5.17
全船年总耗油/(t·y ⁻¹)							311.49

4 结论

根据某渔业资源调查船运行工况，设计了柴电混合动力系统。该动力系统与常规柴油机动力系统相比，装机功率降低了 17.9%，油耗降低了 6.5%。经实船应用，各项性能指标均满足技术要求。为后续类似作业工况船舶的动力系统设计提供了参考。

参考文献

[1] 罗殿军, 龚希武. 近海渔业资源调查船推进系统设计研究 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2015, 34 (2): 181-186.

[2] 赵同宾, 周晓洁, 邱爱华, 等. 新型高效的船舶柴电混合动力技术及应用 [C] //中国科协技术协会. 第十七届中国科协年会论文集, 2015: 1-6.

[3] 都劲松, 史斌杰, 石浩舰, 等. 金枪鱼延绳钓船机电混合动力系统节油效果分析 [J]. 渔业现代化, 2016, 43 (1): 52-55.

[4] 邓颖, 王小红, 刘波, 等. 9600HP 海洋油气增产作业船柴电混合推进系统设计 [J]. 船海工程, 2017, 46 (6): 98-100.

[5] 刘亮清, 邱爱华, 赵同宾, 等. 柴电混合动力系统技术研究 [C] //中国造船工程学会. 第二十届中国国际船艇展暨高性能船学术报告会暨中国国际游艇设计建造技术论坛论文集, 2015: 1-7.