

小型全电艇动力总成系统

李丽¹, 李素文^{1,2}, 朱永怀¹, 俞万能^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021, 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了提高小型船艇的操作性能和环保性能, 采用数字舵机和直流无刷电机设计一种小型吊舱式推进器, 并在此基础上以锂电池组作为动力能源, 结合 DSP (digital signal processing) 技术, 开发相应的推进控制系统。样船测试结果表明: 该小型全电艇动力总成系统能够满足船速、转向、续航能力等方面的性能要求, 运行稳定。

[关键词] 吊舱式推进器; 全电艇; DSP; PWM (pulse width modulation) 调速; 控制系统

[中图分类号] U 664.14

Research and Development of Power Assembly Systems for Small All-electric Boats

LI Li¹, LI Suwen^{1,2}, ZHU Yonghuai¹, YU Wanneng^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the operation performance and environmental protection performance of small boats, a small pod propeller was designed with digital steering gear and DC brushless motor. On this basis, the propulsion control system was developed by using lithium battery as power and DSP technology. The test results of the sample ship show that the power assembly system of the small all-electric boat can meet the performance requirements of ship speed, steering, endurance and other aspects, and the operation is stable.

Keywords: pod propeller; electric boat; DSP; PWM speed regulation; control system

0 引言

随着船舶推进技术的发展, 电力推进系统成为船舶技术发展的研究热点, 全电动船也成为面对当今能源范式的有效解决方案^[1-2]。全电艇将动力电池作为全艇的动力来源, 克服了传统柴油机船舶的排放缺陷, 具有无噪声、无污染、高效率的特点, 符合节能减排的要求^[3-5]。吊舱式推进器作为一种新型的船舶推进系统, 具有推进效率高, 节省船舶舱室空间, 机动性好的特点, 能充分发挥电力推进系统的优越性, 可以有效提高船舶的使用效能和总体性能^[6-10]。因此, 本文结合小型吊舱式推进器开发基于 DSP (digital signal processing) 推进控制系统, 设计并应用于样船的小型全电艇动力总成系统。

[收稿日期] 2019-09-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51679106); 福建省科技重大项目 (2018H6014)

[作者简介] 李丽 (1997—), 女, 硕士, 从事船舶电力推进及其控制研究。通信作者: 李素文 (1973—), 女, 硕士, 讲师, 从事机械设计研究。

1 样船参数要求

样船为小型全电艇, 具体结构参数如表 1 所示。全电艇主要包括船壳、动力电池、吊舱式推进器、DTU/GPS、监控摄像头等硬件设备, 船体质量约为 90 kg, 吃水深度约为 0.18m。设计要求: 最大航速 9.26 km/h; 吊舱推进器旋转角度可达到实际运行要求; 经济航速 (70% 转速/负荷) 下续航时间可以达到 2 h。

表 1 船体主要参数
Tab. 1 Parameters of the main hull

长度 Length/m	宽度 Width/m	高度 Height/m	自重 Dead weight/kg	吃水深度 Draft/m	舵叶面积 Rudder area/m ²	重心距中心距离 Distance between center of gravity and center/m
1.82	0.58	0.30	80	0.18	0.06	0.12

2 动力总成系统设计

本文针对小型船艇动力总成系统, 采用直流无刷电机和数字舵机, 并结合相关的电机控制算法, 自主设计适用于小型船艇的吊舱式推进器。采用锂电池代替传统热机为全艇各系统供电, 以 DSP (digital signal processing) 为核心控制器, 采集锂电池组和推进装置的数据, 开发全电艇推进控制系统。动力总成系统整体框架如图 1 所示, 研发流程如图 2 所示。

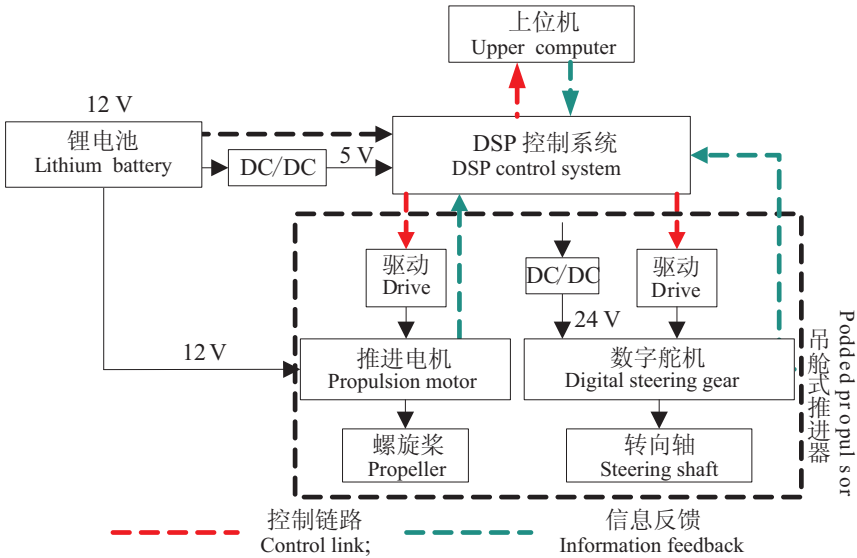


图 1 动力总成系统整体框架图
Fig. 1 Overall frame diagram of power assembly system

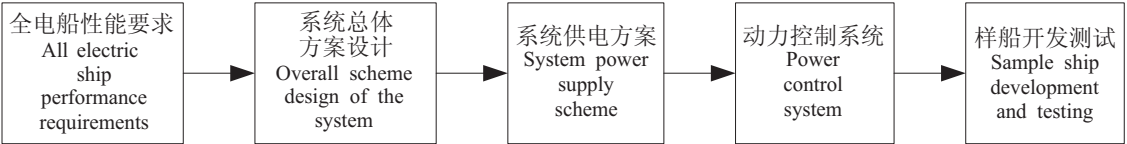


图 2 动力总成系统研发流程图
Fig. 2 The flow chart for development power assembly system

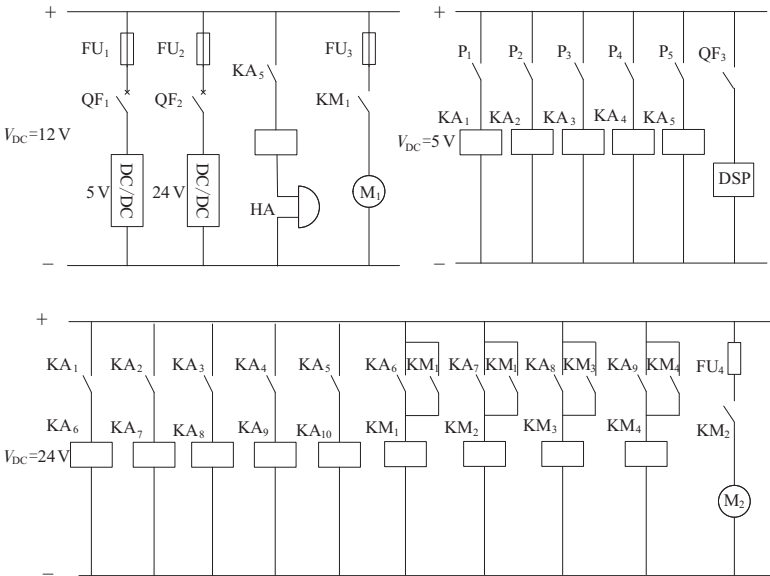
选择一组 12V、175 A·h 的锂电池作为动力源为整船供电。由于锂电池组固定提供 12 V 直流电, 故需经过 12 V/5 V 的降压电源为 DSP 控制器供电, 经过 12 V/24 V 升压电源为数字舵机供电, 推进电机选用 12 V 直流无刷电机, 由锂电池组直接供电。

3 控制系统设计

直流无刷电机作为全快艇的推进电机，其额定功率为 480 W，最大电流为 60 A，最大转速为 1100 r/min。吊舱式推进器采用基于 DSP 控制的数字舵机进行转向控制，具体结构如图 3 所示。

全快艇运动控制系统以 TI 公司生产的型号为 TMS320F2812 的 DSP 为核心控制器^[11]。DSP 开发板内部具有 2 个时间管理器 EV 模块，共可产生 4 路独立的 PWM 波形和 12 路互补的 PWM 波形；1 个 ADC 采样模块；2 路 SCI 串口通信接口；1 路局域网通信控制器 CAN 总线接口。DSP 开发板的 A/D 模块采集推进器的电压、电流信息；时间管理器 EVA 模块用于控制数字舵机；EVB 模块用于控制推进电机；电池管理系统所采集到的电压、电流、SOC（state of charge）、温度等电池组信息通过 CAN 总线通信方式传输给 DSP 控制器；1 路串行通信接口 SCI 配置成 SCI-485 通信方式与毫米波雷达进行数据交互^[12-14]。全快艇与上位机的数据交互以 DTU 为传输基站，经 DSP 处理后的数据信息经 RS-232 串口发送到 DTU，DTU 将串口数据转换为 IP 数据或将 IP 数据转换为串口数据，通过 4G 移动通信网络传送到上位机^[15]。

全快艇动力总成系统中的直流无刷电机和数字舵机的控制系统，如图 4、图 5 所示。 M_1 为直流无刷电机（推进电机）； M_2 为数字舵机；HA 为电池状态报警器；DC/DC 为升压/降压电源； P_n 为 DSP 的 I/O 口； FU_n 为熔断器； QF_n 为空气开关； KA_n 为中间继电器； KM_n 为接触器；其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。DSP 通过 RS-232 串口接收上位机控制指令，当接收到直流无刷电机 M_1 的启动指令后，DSP 开关信号在 P_1 置位， KA_1 中间继电器（5V）线圈得电，常开闭合；驱动 24 V 中间继电器 KA_6 线圈得电，常开闭合；接触器 KM_1 主触点闭合，辅助触点闭合（自锁），完成电机启动命令。数字舵机启动原理相同。



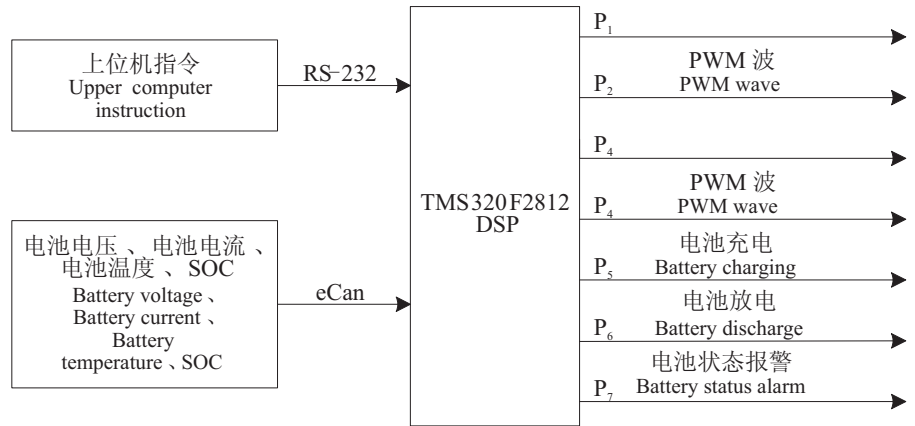


图5 数字舵机控制系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the control system

4 样船测试

为了验证所设计的小型全电艇动力总成系统是否满足性能要求, 于2019年4月至7月在福建厦门水上运动中心先后进行了多次航行测试。

4.1 速度性能测试

将水面全电艇航速分为DS档(微速)、S档(慢速)、H档(半速)、F档(全速)四个档位, 其速度分别为1.5, 3.6, 6.4, 9.3 km/h。电机的具体运行参数如表2所示。

根据样船速度测试数据, 绘制出速度从零加速到各个档位的时间-速度图, 如图6所示。结合表2和图6的内容可以看出, 样船从零加速至各个档位的加速时间较短, 且加速至各档位后运行平稳, 速度无明显波动。最高档速度可以达到9.3 km/h, 加速时间为3.2 s, 满足最高船速要求。

4.2 转向性能测试

为了验证数字舵机控制的灵敏性和准确性, 本文分别对设定航速、转舵角度下的巡回半径进行了测试。取舵角范围 $[-60^{\circ}, +60^{\circ}]$, 分别对不同航速、转舵角度下的转弯半径进行了测试。在测试过程中, 由于没有航行轨迹绘制图, 所以测试完成后需对MySQL数据库存储的数据进行分析处理。根据经纬度、船速、转舵角度等数据作运算分析, 结合航速和航向大小变化进行数据拟合, 得到样船运动轨迹图, 如图7所示。图中①②③④分别为船速在9.0, 6.0, 3.5, 1.5 km/h时, 舵角增加至 60° 的航行轨迹。并且以此方法得到了不同给定航速、航向下的巡回半径, 如表3所示。表3中, 当船速为9.3 km/h, 舵角 $\varphi > 30^{\circ}$ 时, 船舶横倾角大于 15° , 海水会漫过全电艇甲板, 故未进行测试。图7和表3的内容可以表明, 本文所设计开发的小型全电艇动力总成系统可以满足不同航速下转舵的灵活性和准确性要求。

表2 直流无刷电机运行参数

Tab.2 DC Brushless motoroperation parameters

档位 Gear	船速 Ship speed /($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	加速时间 Acceleration time /s	稳定时间 Stabilization time /s	电机转速 Motor speed /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
DS	1.5	1.2	2.0	180
S	3.6	2.0	2.5	480
H	6.4	2.6	3.5	780
F	9.3	3.2	4.5	1 100

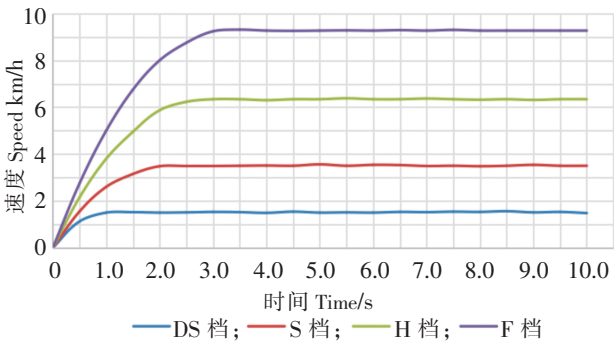


图6 样船速度测试

Fig.6 Speed test of the Sample ship

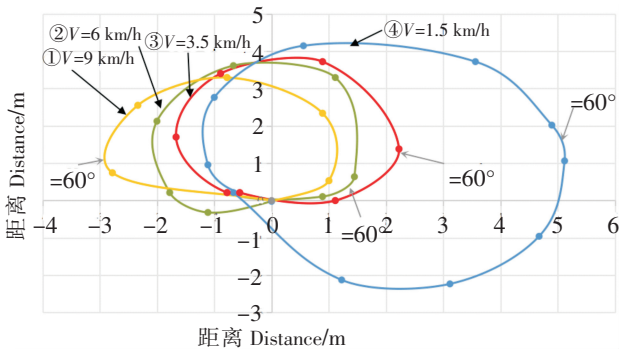


图 7 样船运动轨迹

Fig.7 The moving trajectory of the sample ship

4.3 续航能力测试

一般情况下电池最佳运行时间在 SOC 处于 90% ~ 30% 之间，为测试所选锂电池是否能够满足全电艇续航能力要求，剩余续航力按全电艇运行至 SOC 为 10% 计算。在整个样船试航过程中，以经济航速运行 2 h 后，电池剩余电量 43%，理论剩余续航力 1.7 h。全电艇续航能力满足要求，并且续航时间远超于期望的续航时间。

5 结论

本文以小型水面全电艇动力总成系统为研究对象，将锂电池组作为动力源为全艇供电，采用数字舵机和直流无刷电机及相应的控制算法，设计了小型水面全电艇的吊舱式推进器，并将其应用在相应样船上；采集电池管理系统和推进器的数据，结合 DSP 技术，开发了相应的全艇动力控制系统；根据全电艇设计参数和性能要求，研发了小型全电艇动力总成系统，并对所设计样船进行测试。测试结果表明，本文自主设计的小型吊舱式推进器运行正常，控制精度高，转舵灵活；锂电池组、推进电机、数字舵机的选型均能满足水面全电艇性能要求，最高船速可以达到 9.3 km/h，经济航速下续航时间满足 3.7 h，该小型全电艇动力总成系统运行平稳。

[参 考 文 献]

[1] PIZZO A D, POLITO R M, RIZZO R, et al. Design criteria of on-board propulsion for hybrid electric boats [C]. Rome: 2010 XIX International Conference on Electrical Machines, 2010: 3303-3308.

[2] FREIRE T, SOUSA D M, BRANCO P J C. Modeling the electric chain of an electric boat [C]. Lisbon: IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool Lisbon, 2011: 813-816.

[3] 韩烨. 新能源在船舶中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[4] 郑晖. 吊舱电力推进交流传动系统的设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

[5] 李炯, 刘彦呈, 张洁喜, 等. 开关电源在现代船舶上的应用分析 [J]. 造船技术, 2013(3): 34-37, 52.

[6] 乔鸣忠, 于飞, 张晓锋. 船舶电力推进技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 171-180.

[7] ISLAM M F. Effects of geometry variations on the performance of podded propulsion [J]. Trans, 2007, 11(3): 17-20.

[8] 童佳俊. 岛际小型电动船舶的锂电池管理系统研究与设计 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.

[9] 严新平. 新能源在船舶上的应用进展及展望 [J]. 船海工程, 2010, 39(6): 111-115, 120.

[10] 周乃义. 岛际小型电动船舶永磁同步电机控制器的研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2015.

[11] 王睿, 赵勇. 基于 DSP 的风能并网逆变器的研究与设计 [J]. 电子设计工程, 2018(12): 127-130, 134.

[12] 冯金钊. 无速度传感器永磁电动机伺服系统关键技术研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2010.

[13] 袁帅. 基于双 DSP 的信封机多轴同步控制系统的设计研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2011.

[14] 刘金江. 小型纯电动汽车电池管理系统的开发 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

[15] 徐皞. 4G 移动网络在机场行李处理监控系统中的应用 [J]. 电工技术, 2015: 42-43.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)