

# 基于硬件在环的螺旋桨负载模拟系统设计

罗成汉<sup>1,2</sup>

(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]** 针对螺旋桨负载模拟问题, 提出电动负载模拟的实验方案。分析了电动负载模拟系统的结构、功能和控制策略, 阐述四象限船桨建模方法, 并应用硬件在环技术, 进行基于硬件在环技术的螺旋桨负载模拟系统设计, 研究结果表明该方法能够将船桨模型和关键硬件集成在一起。系统采用转速闭环和转矩开环相结合的控制策略, 通过控制负载电机的电磁转矩来模拟螺旋桨负载特性, 进行螺旋桨负载特性的半实物仿真实验, 结果表明该方法是可行的。

**[关键词]** 负载模拟系统; 船桨模型; 硬件在环; 控制策略

**[中图分类号]** U 664.14

## Design of The Propeller Load Emulation System Based on The Hardware in The Loop

LUO Chenghan<sup>1,2</sup>

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

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture & Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** For the propeller load emulation, an experimental scheme for electric load simulation was proposed based on analyzing the propeller load characteristics, whose structure, function and control strategy were analyzed in the paper. The modeling method of four-quadrant ship-propeller model was described, hardware in the loop simulation was adopted, the design of propeller load emulation system based on hardware in the loop was carried out, the key hardware of electric propulsion platform and ship-propeller model were integrated. A method which combines close loop speed control and open loop torque control was adopted. The load characteristics of the propeller were simulated by controlling the electromagnetic torque of the load motor, the semi-physical simulation experiment of the propeller load characteristics was carried out. The simulation experimental results show that the method is effectiveness.

**Keywords:** load emulation system; ship-propeller model; hardware in the loop; control strategy

## 0 引言

船舶电力推进系统具有操纵性好、节能、环保的优点, 被视为极具潜力的船舶推进方式, 受到各方面的重视<sup>[1]</sup>。为了在实验室条件下进行船舶电力推进的研究, 迫切需要解决船舶电力推进平台带载测试的问题, 螺旋桨负载模拟系统的设计是关键所在。文献[2]采用直流电机作为负载电机, 对

直流电机控制策略进行研究；文献 [3 - 4] 对负载模拟原理进行了详细地分析，由于没有采用实时仿真控制器作为开发工具，系统设计需要进行底层硬件开发，系统的灵活性和实时性有待提高。

本文采用 dSPACE 实时仿真器，设计了基于硬件在环的螺旋桨负载模拟系统，系统由硬件系统、船桨模型系统及其监控系统组成，为推进电机的控制策略研究和性能测试提供试验平台。

## 1 负载模拟方法

负载模拟方法分为静态模拟和动态模拟两种<sup>[5]</sup>，静态模拟不考虑模拟系统和实际目标系统的转动惯量，根据船桨模型计算出当前船速和螺旋桨转速下的螺旋桨负载转矩，将其作为模拟系统中负载电机的转矩给定值。根据机组的运动方程可知<sup>[6]</sup>，在相同的转矩变化下，机组的动态过程取决于系统总的转动惯量，由于模拟系统和实际目标系统的转动惯量不同，采用静态模拟会造成模拟系统的动态过程与实际目标系统的动态过程存在较大差异。为了克服静态模拟存在的误差，需加惯性转矩补偿装置进行动态模拟，有两种常用方法：一是加惯性飞轮进行惯性转矩补偿，该方法降低了负载模拟系统的灵活性；二是采用惯性电模拟方法，在动态过程中根据加速度的变化计算出附加的惯性转矩，作为负载电机的惯性转矩给定值，通过控制负载电机的电磁转矩补偿部分转动惯量，实现动态模拟的目的<sup>[6]</sup>。

利用 dSPACE 实时仿真控制器，建立基于硬件在环的模拟系统，dSPACE 控制器实时采集推进电机的转速信号，将它送到船桨模型中，经船桨模型计算出螺旋桨负载转矩，并作为负载电机的转矩给定信号，直接控制负载电机的转矩，用于模拟螺旋桨负载。

## 2 硬件系统构成

### 2.1 控制系统结构

控制系统由变频器、上位监控计算机和 dSPACE 实时仿真控制器组成，控制系统如图 1 所示。dSPACE 实时仿真系统具有高速计算能力的硬件系统和方便易用的代码自动生成的软件环境，为螺旋桨负载模拟系统的研发提供了便利的硬件在环开发环境。

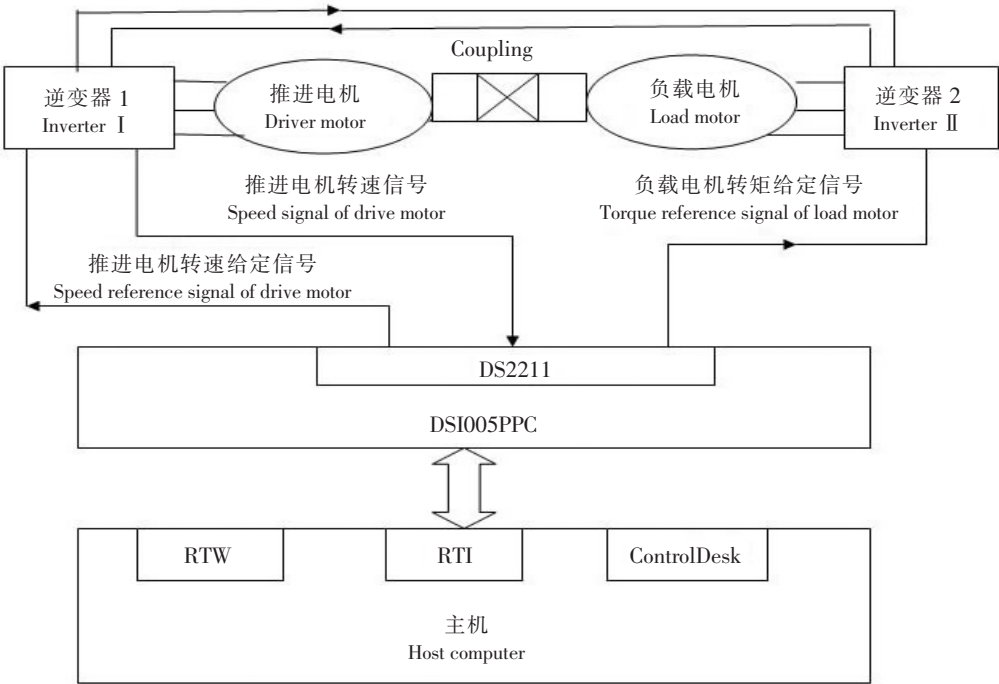


图 1 控制系统的结构图  
Fig.1 Structure of the control system

2.2 系统结构

螺旋桨负载模拟系统采用驱动电机 - 负载电机结构形式，如图 2<sup>[7]</sup> 所示。采用机械负载电动模拟技术，推进电机采用转速闭环控制方式，负载电机采用转矩开环控制方式，通过对负载电机的转矩控制，实现对推进电机加载的目的，为推进电机提供逼真的负载转矩。

3 四象限船桨数学模型

由船舶推进原理可知船舶航行时，船速和桨速任何一个发生变化都会引起进速比  $J$  的变化，进速比的变化将引起螺旋桨扭矩和推力的变化，因此在研究螺旋桨负载特性时，必须将船和桨作为一个整体考虑<sup>[8-9]</sup>。

螺旋桨的推力系数  $K_p$  和扭矩系数  $K_M$  是进速比  $J$  的函数，自变量  $J$  的定义域为  $(-\infty, \infty)$ ，当螺旋桨转速趋于零时， $J$  会出现趋于无穷大的情况，为了便于更好地研究，有界形式的螺旋桨特性参数被定义<sup>[10-11]</sup>如下：

$$J' = v_p / \sqrt{v_p^2 + n^2 D^2} = J / \sqrt{1 + J^2};$$

(1)

$$K'_M = M / \rho D^3 (v_p^2 + n^2 D^2) = K_M / \sqrt{(1 + J^2)};$$

(2)

$$K'_p = P / \rho D^2 (v_p^2 + n^2 D^2) = K_p / \sqrt{1 + J^2}.$$

(3)

式中： $v_p$  为螺旋桨相对于水的速度 (m/s)； $n$  为螺旋桨的转速 (r/s)； $D$  为螺旋桨的直径 (m)； $J$  为进速比； $J'$  为有界形式的进速比； $\rho$  海水密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $M$  为螺旋桨的扭矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )； $K_M$  为扭矩系数； $K'_M$  为有界形式的扭矩系数； $P$  为螺旋桨的推力 (N)； $K_p$  为推力系数； $K'_p$  为有界形式的推力系数。

有界形式的螺旋桨特性参数表示的船桨模型：

$$(m + \Delta m) dv_s / dt = P_e - R;$$

(4)

$$P_e = (1 - t) K'_p \rho D^2 (V_p^2 + n^2 D^2);$$

(5)

$$M = K'_M \rho D^3 (V_p^2 + n^2 D^2);$$

(6)

$$v_p = (1 - \omega) v_s.$$

(7)

式中： $m$ ， $\Delta m$  分别为船舶的质量和附加质量 (kg)； $v_s$  为船舶相对于水的速度 (m/s)； $P_e$  为螺旋桨的有效推力 (N)； $R$  为船舶总阻力 (N)； $t$  为推力减额； $\omega$  为伴流系数。

式 (1) 一式 (7) 为船桨四象限的数学模型。

4 实时仿真测试

在 simulink 中搭建了四象限船桨模型，利用 dSPACE 的 RTI 和 Matlab 的 RTW 工具将船桨模型转化为实时系统中的 C 代码，利用 ControlDesk 进行监控界面设计<sup>[12]</sup>。ControlDesk 提供虚拟仪表和图形化控件观测变量，方便实现对船桨模型运行过程中的参数在线监控和调整。

为了验证该设计方法的可行性，进行船舶分级启动性能测试。第一级启动在 0 ~ 40 s，而在 120 ~ 150 s 开始第二级启动，总的运行时间设为 500 s，通过 ControlDesk 开发的实时监控软件得到螺旋桨转矩曲线和螺旋桨推力曲线，如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可知，仿真曲线与螺旋桨理论特性曲线一致<sup>[11]</sup>。

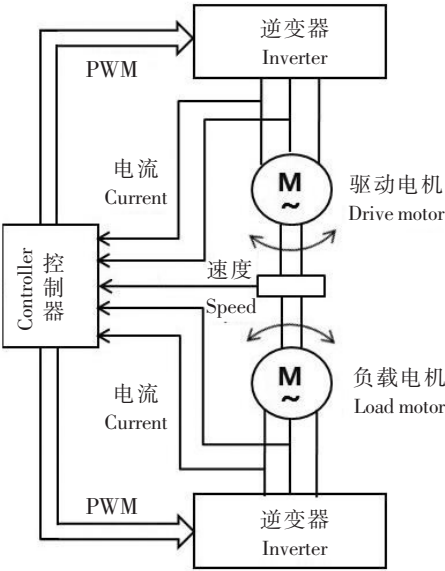


图 2 螺旋桨负载模拟系统的结构

Fig.2 Structure of the propeller load emulation system

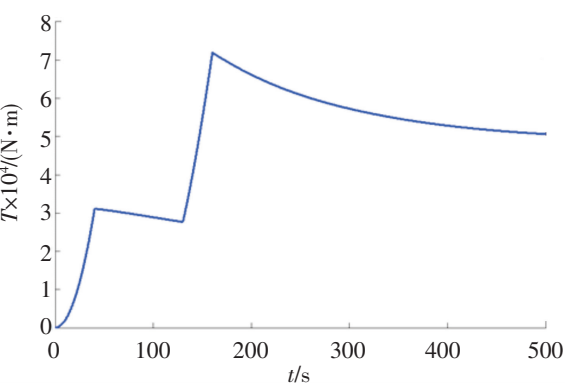


图3 螺旋桨转矩曲线  
Fig.3 Curve of a propeller torque

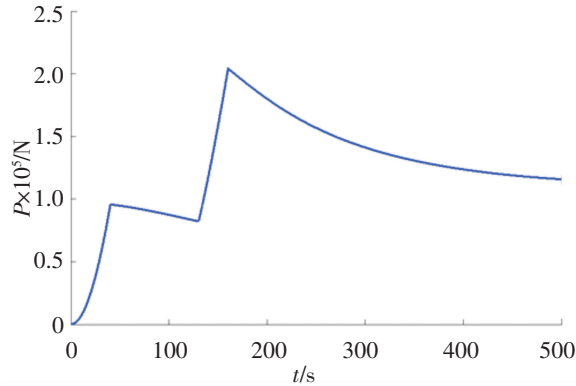


图4 螺旋桨推力曲线  
Fig.4 Curve of a propeller thrust

5 结论

本文介绍了基于硬件在环的螺旋桨负载模拟系统设计方法，推进电机采用转速控制、负载电机采用转矩控制的方式能够动态模拟螺旋桨负载特性，为船舶电力推进系统的测试提供实验平台，方便进行不同工况下的负载测试实验，模型参数设置方便，灵活性强，实验表明该方法是有用的。

[ 参 考 文 献 ]

[1] HODGE C G. Modern applications of power electronics to marine propulsion systems [J]. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, 2002, 8(14): 9-16.

[2] 霍峰, 姜新建. 舰船推进电机及螺旋桨负载模拟系统研究 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(2): 118-122.

[3] 张丛, 沈爱弟. 船舶电力推进螺旋桨负载模拟系统的研发 [J]. 船舶工程, 2011, 33(4): 25-27.

[4] 刁利军, 沈茂盛, 林文立, 等. 电力推进负载模拟原理分析和实现 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 70-75.

[5] 陈杰. 变速定桨风力发电系统控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011, 3: 43-49.

[6] 王皖君, 张为公. 电动负载中惯量电模拟实现方法 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 109-112.

[7] 李宗帅, 董春. 国外基于电动技术的机械负载模拟的现状 [J]. 机械, 2007, 34(3): 1-3.

[8] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004: 41-48.

[9] 李殿璞. 船舶运动与建模 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008: 334-348.

[10] LI DIAN-PU, WANG ZONG-YI, CHI HAI-HONG. Chebyshev fitting way and error analysis for propeller atlas across four quadrants [J]. Journal of Marine Science and Application, 2002, 1(1): 52-59.

[11] 李殿璞, 王宗义, 池海红. 螺旋桨特性四象限 Chebyshev 拟合式的建立与深潜艇直航全工况运动仿真的实现 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(7): 935-939.

[12] 罗成汉. 船舶电力推进模拟平台的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 126-127.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)