

# 矢量减摇装置及其控制系统设计

肖晶晶<sup>1</sup>, 王驰明<sup>2</sup>, 张 帅<sup>1</sup>, 姚恺涵<sup>1</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 厦门船舶重工股份有限公司, 福建 厦门 361026)

**摘要** 为实现船舶减摇系统的灵活性、快速响应特性、高效率、强环境适应性的要求,在水下矢量螺旋桨推进器的基础上,提出了一种基于二元矢量螺旋桨的主动矢量减摇装置。首先对该装置的结构设计方法进行了阐述,对螺旋桨推力进行了评估,并通过搭建基于组合导航系统的姿态检测模块,对船体姿态自平衡控制系统方案进行了设计。通过滑台重物往复移动模拟横摇激励,利用船模进行了零航速下的模拟减摇试验,并对该种减摇装置的特点进行了总结。

**关键词** 矢量减摇装置;姿态检测;控制方案;船模试验

中图分类号: U664.7

文献标识码: A

文章编号: 2095-7297(2019)02-0482-05

doi: 10.12087/oect.2095-7297.2019.02.01

## Design of a vector anti-rolling device and its control system

XIAO Jing-jing<sup>1</sup>, WANG Chi-ming<sup>2</sup>, ZHANG Shuai<sup>1</sup>, YAO Kai-han<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China;

2. Xiamen Shipbuilding Industry Co., Ltd, Xiamen, Fujian 361026, China)

**Abstract** In order to satisfy the requirements of the flexibility, fast response, high efficiency and strong environmental adaptability of the existing anti-rolling system, inspired by the underwater vector propeller thruster, a binary vector propeller-based active anti-rolling device is proposed. After summarizing this anti-rolling device, the mechanism design method is introduced, and the propeller thrust is evaluated. On the basis of the construction of integrated navigation system-based attitude detection module, the attitude self-balancing control system scheme is proposed. The simulated anti-rolling experiment at zero speed is carried out on the ship model by means of the roll motion excited by reciprocating moving weight driven by a linear sliding table. And finally, the characteristics of the anti-rolling device are summarized.

**Key words** vector anti-rolling device; attitude detection; control scheme; ship model experiment

## 0 引言

减摇系统是远洋船舶尤其是战术级舰艇在恶劣海况下保持安全航行的关键系统,是关系到我国发展远洋航行事业的战略性关键装备。船舶减摇技术已有近一百五十年的历史,在此期间人们曾提出过多种不同结构类型的减摇装置,目前常用的减摇装置主要有舭龙骨、减摇水舱、减摇鳍。舭龙骨通常作为辅助被动式减摇装置增加船舶横摇阻尼。减摇水舱有主动和被动两种形式,其减摇效果不受航速影

响,但其以占用较大舱内空间为代价。减摇鳍占用舱内体积小、易于控制,但其减摇效果易受航速的影响,零航速减摇鳍虽有理论分析其可行性,但应用并不成熟。而由于横摇阻尼随着航行速度的降低而减小,船舶在较低的速度下横摇幅度更大<sup>[1]</sup>。为了满足减摇系统在全航速范围内的减摇需求,提高减摇装置的响应效率,本文受水下矢量螺旋桨式推进器<sup>[2]</sup>启发,提出一种基于矢量螺旋推进舵的新型主动式船舶减摇系统<sup>[3]</sup>。为了满足减摇系统的快响应性要求,在对矢量减摇机构与船舶系统进行匹配设计的基础上,搭建

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-11-26

基金项目: 福建省海洋高新产业发展专项资金项目[2016]13号。

作者简介: 肖晶晶(1985—),女,博士,助理研究员,主要从事海洋工程装备和机电一体化系统方面的研究。

了快速响应姿态感知系统、构建了船舶姿态智能控制算法,在此基础上设计出矢量减摇系统整体试验平台,最后,通过模拟产摇、减摇的快速试验方法,系统性地验证了该种减摇方式的效果。

## 1 矢量减摇装置原理

### 1.1 减摇装置的机构设计

针对科研平台、科考船等工作需求,从多功能、高效率、快响应、强环境适应性的角度出发,提出了一种矢量减摇装置。如图 1 所示为矢量减摇装置概述图。该装置主要基于二元矢量螺旋桨推进器组合而成,为使该减摇装置具有在全航速范围内减摇的功能,每个二元矢量螺旋桨既可以自旋又可以进行偏摆运动,即:沿桨轴自转及其轴向沿船长方向前后摆动。沿桨轴自转时,螺旋桨产生推力,进而产生抵抗海浪扰动的减摇力矩;此外,桨轴亦可沿船长方向前后摆动,摆动幅度可根据船舶航速适当调整:当桨轴垂直于水面时,可产生最大减摇效果;当桨轴向船首方向摆动时,可在减摇的同时用于船舶快速制动;当桨轴向船尾方向摆动时,兼具减摇及推进效果。

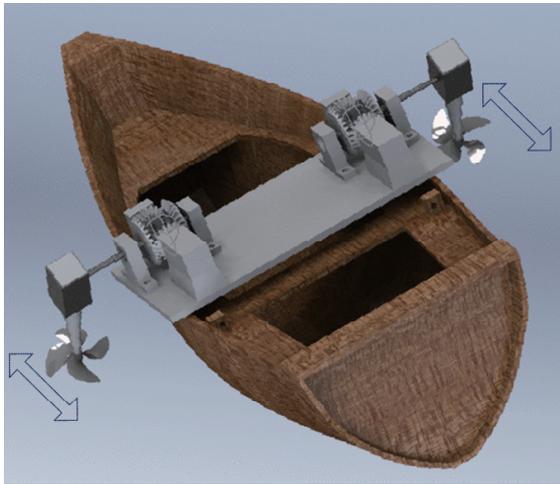


图 1 矢量减摇装置概述图

Fig 1 A schematic overview of the vector anti-rolling device

具体而言,矢量减摇装置的机构设计从拆装方便、对船体改动较小的角度出发,采用模块化设计方法。如图 2 所示,该装置相对船舷两侧成对布置,单侧模块主要由摇摆电机、传动机构(锥齿轮系)、可控式横向、纵向伸缩轴、螺旋桨自旋电机以及螺旋桨组成。通过调节装置的横向伸缩轴的长度,灵活改变船舶的横向减摇力矩的力臂;通过调节装置的纵向伸缩轴的长度,可使该装置适用于不同型深

的船舶;通过锥齿轮系的传动,可将摆臂电机的转动转化为螺旋桨轴的前后摆动。

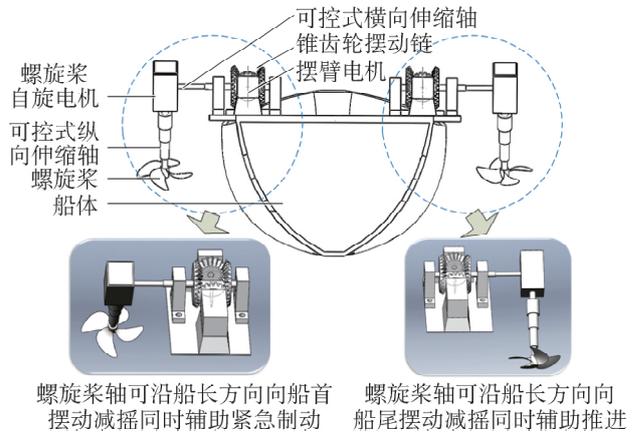
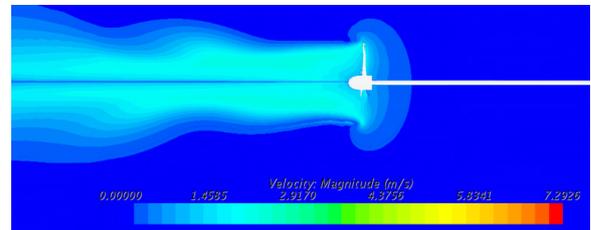


图 2 矢量减摇装置机构设计图

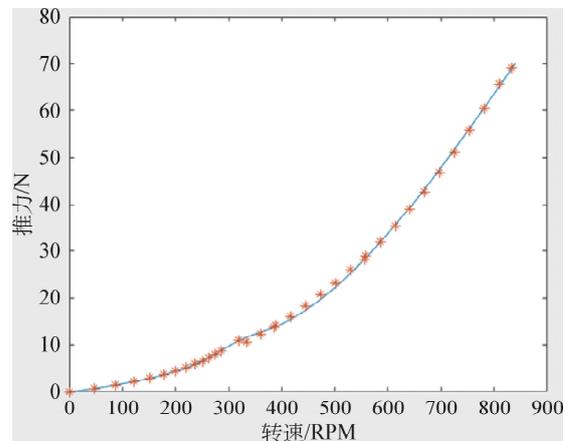
Fig 2 Mechanism design diagram of the vector anti-rolling device

### 1.2 螺旋桨推力评估与控制方法

为提高减摇效果,采用 CFD 方法,分析零航速时船模所用螺旋桨的推力与转速的关系,如图 3 所示。通过计算,航速为 0 kn 时,采用曲线拟合方法,得出推力与转速的关系为:



(a) 推力与转速关系的计算分析



(b) 推力与转速的关系曲线

图 3 推力转速关系图

Fig 3 Relationship between the force and the rotate speed

$$F = 5.7 \times 10^{-8} v^3 + 3.9 \times 10^{-5} v^2 + 0.012v + 0.1 \quad (1)$$

其中： $F$  为推力， $v$  为转速 ( $r \cdot \min^{-1}$ )。由图 3(b)可知，推力与转速近似抛物线关系，在螺旋桨转速为  $833 r \cdot \min^{-1}$  时，推力可达到 69 N。

由于螺旋桨自转电机的转速和供电电压呈一定关系，可以得出一个近似的二阶振荡环节的转速相对于电压的传递函数：

$$G(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{500}{s^2 + 15s + 225} \quad (2)$$

进而可以根据所需推力对螺旋桨电机的电压进行调节控制，以获得相应的稳定力矩，提高减摇效果。

## 2 矢量减摇装置的控制系统设计

### 2.1 船体高精度姿态检测模块搭建

船舶姿态测试系统是船体姿态的感知系统，多物理量、多自由度组合的船舶姿态辨识系统的建立是提高船舶耐波性，增强其在风浪中的姿态稳定性的前提。

如图 4 所示，本方案主要采用高精度 MEMS 惯性测量单元 STIM300 (内部集成 3 个高精度陀螺仪、3 个高稳定性的加速度计和 3 个高稳定性的侧斜仪)以及双天线 GPS 接收机构建基于组合导航系统的高动态、高可靠的船舶姿态检测系统。以导航

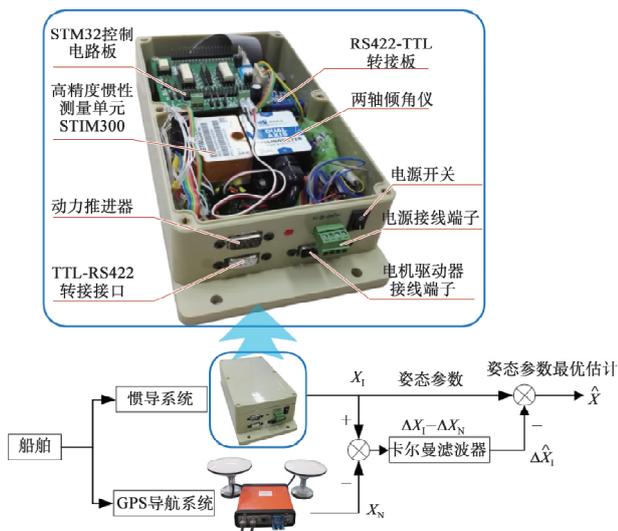


图 4 基于组合导航的船舶姿态检测模块设计  
Fig. 4 Design of ship attitude detection module based on integrated navigation

参数作为估计对象，采用直接卡尔曼滤波法实现对船体姿态的高精度实时检测，获得了船体航向角、俯仰角以及横摇角的姿态数据<sup>[4,5]</sup>。

### 2.2 船体姿态自平衡控制系统方案设计

依据上述船体姿态检测系统的输出信号，设计姿态调节控制算法，构建船舶整体姿态调节闭环控制系统<sup>[6]</sup>，研究控制系统参数与控制精度、响应速度等关键指标相互关系，最终实现船体自适应闭环控制工作。图 5 所示为矢量减摇装置的整体控制方案。

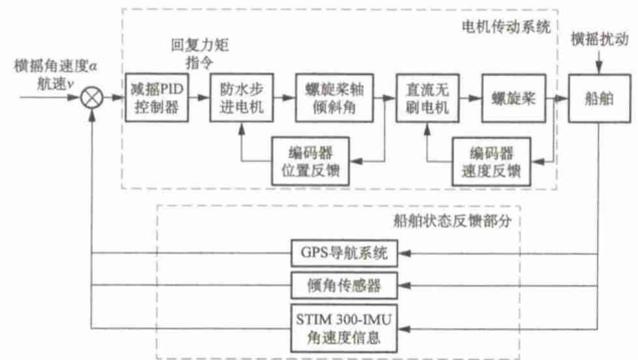


图 5 整体控制方案设计  
Fig. 5 Overall control scheme design

在三级海况下，通过反复定性试验来调节 PID 控制器的三个参数，最后能得到较好控制效果的 PID 参数为： $K_p = 1.2$ ， $K_i = 25$ ， $K_d = 0.1$ ，阶跃响应曲线如图 6 所示。

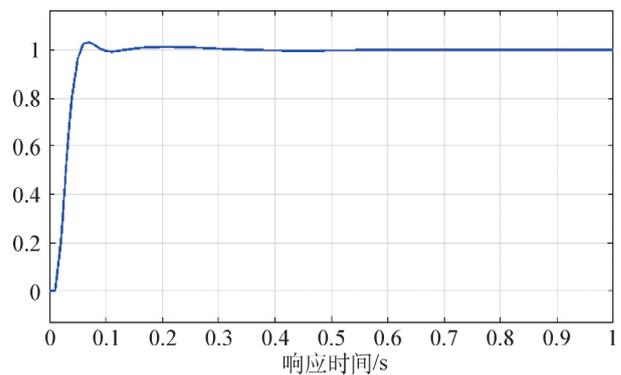


图 6 系统阶跃响应曲线  
Fig. 6 Step response curve of the system

根据图 5 所示控制方案，搭建以 stm32 控制板为核心的硬件结构如图 7 所示。在系统中，STM32 核心板通过串口读取 STIM300 及 GPS 接收机的数据信号，通过姿态解算及卡尔曼滤波算法获得船舶

的航速及姿态等信息,进一步根据航速控制螺旋桨轴的摆动角度;根据横摇角速度等信息控制船舷左右两侧螺旋桨的转速,实现船舶姿态的稳定控制。

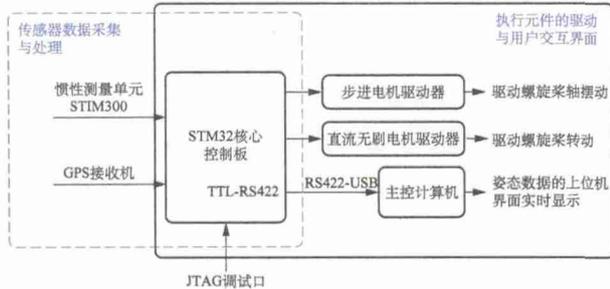


图 7 硬件结构框图  
Fig. 7 Hardware block diagram

### 3 矢量减摇装置试验台搭建与试验结果分析

如图 8 所示,利用滑台搭载重物的往复移动使木制船模模拟产生横摇激励的方法,通过对比二元矢量推进螺旋桨开启前/后船模横摇的两种不同情况,来验证船模在零航速条件下采用该矢量减摇装置的减摇效果。通过改变重物质量,完成了多组试验条件下的模拟减摇试验。

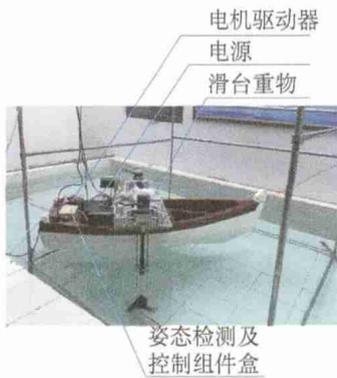


图 8 零航速下船模减摇试验布置图  
Fig. 8 General layout of ship model stabilization trial at zero speed

图 9 所示为以滑台安装板上的重物设置为 1 KG、往复运动周期为 4.8 s 时,减摇前后船模横摇角度曲线对比图。需要注意的是,由于姿态数据来自试验过程中随机记录的时长约 10 个往复运动周期的姿态角,起始记录时刻不固定,此处两组数据曲线强调横摇角度的幅值大小对比,因此不需要关注零时刻初始横摇角的幅度大小。

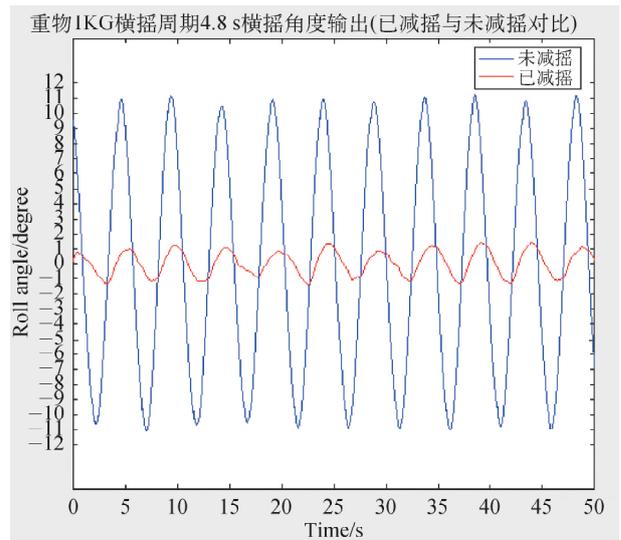


图 9 减摇效果对比图  
Fig. 9 Comparison of anti-rolling effect

根据螺旋桨开启前后的横摇角度数据对比可得出,未减摇最大横摇角度  $11.2346^\circ$ ,横摇峰值的均方根为  $10.7501^\circ$ ;减摇后最大横摇角度  $1.4911^\circ$ ,横摇峰值的均方根为  $1.0292^\circ$ ,减摇效果达到了 86.7%。根据 ISO 船舶耐波性衡准标准,安全性标准为横摇峰值均方根为  $4^\circ$  以内,舒适性标准为均方根值为  $3^\circ$  以内,减摇后效果均满足舒适性标准,说明了船模在零航速下采用该减摇装置能够达到很好的减摇效果。

### 4 结 语

1) 矢量减摇装置为受水下矢量螺旋桨式推进器启发而设计的新型主动式减摇装置,该装置采用模块化设计方法,拆装方便,可移植性强。但由于该装置凸出安装在舷侧,推进效率较低且不利于船舶停靠,容易与岸边发生碰撞,导致桨轴产生弯曲现象,因此矢量减摇系统需结合船型开发,将该系统与船体设计融为一体;

2) 针对该种减摇方式研发了高精度姿态检测模块,搭建了相应的自平衡运动控制系统,实现了船舶姿态的稳定控制;

3) 通过零航速船模试验可知,该类主动式减摇装置在零航速条件下实现了较好的减摇效果,验证了规则波条件下船体姿态平衡控制算法的有效性,在未来海上试验的试验研究中,需进一步增强控制算法的鲁棒性,实现不规则波扰动前提下船舶姿态稳定的快速控制。

## 参 考 文 献

- [1] Liang Li-hua, Zhao Peng, Zhang Song-tao, et al. Simulation and analysis of Magnus rotating roll stabilizer at low speed[J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 491 - 500.
- [2] Gonzalez Louis Andrew. Design, modeling and control of an autonomous underwater vehicle[J]. Be Thesis, 2004.
- [3] 王凌云, 肖晶晶, 孙道恒等. 一种用于船舶减横摇的摇摆伸缩臂减摇装置: 中国, CN201810833904.0 [P]. 2018 - 12 - 28.  
Wang Ling-yun, Xiao Jing-jing, Sun Dao-heng, et al. An anti-rolling device with swing telescoping shafts: China, CN201810833904.0 [P]. 2018 - 12 - 28.
- [4] 崔留争. MEMS-SINS/GPS 组合导航关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2014.  
Cui Liu-zheng. Research on the key technologies of MEMS-SINS/GPS integration navigation system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [5] 孟秀云, 王语嫣. 一种 SINS/GPS 紧组合导航系统的改进自适应扩展卡尔曼滤波算法[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(6): 625 - 630.  
Meng Xiu-yun, Wang Yu-yan. An improved adaptive extended kalman filtering algorithm of SINS/GPS tightly-coupled integrated navigation system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(6): 625 - 630.
- [6] 梁利华, 孙明晓, 栾添添. 减摇鳍升力反馈自适应控制系统设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(11): 1739 - 1744.  
Liang Li-hua, Sun Ming-xiao, Luan Tian-tian. Design of adaptive control system for lift feedback of fin stabilizer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(11): 1739 - 1744.