

[引用格式] 姚恺涵, 尤方俊, 张帅, 等. 船舶减摇装置的发展现状与趋势 [J]. 船舶物资与市场, 2019 (1): 16-20.

船舶减摇装置的发展现状与趋势

姚恺涵¹, 尤方俊², 张帅¹, 肖晶晶¹

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 中国船舶重工集团公司第七〇四研究所, 上海 200031)

摘要: 针对船舶在波浪中运动的不同自由度, 从减摇机理出发梳理了减摇装置的发展脉络, 指明其兴起及发展原因, 在综述船舶单自由度减摇装置的基础上, 对近年来出现的船舶多自由度减摇装置进行介绍, 并阐述船舶减摇领域的关键技术, 对今后船舶减摇装置的发展趋势进行预测。

关键词: 船舶减摇装置; 多自由度; 综合减摇; 全航速

中图分类号: U664.7

文献标识码: A

DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2019.01.001

0 引言

船舶在海浪中航行, 由于受到风、浪、海流等因素的影响, 将产生 6 个自由度的运动: 横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡。对这些运动的控制不当, 会引起姿态失稳, 危及船舶航行安全^[1]。

保持船舶姿态稳定的方法主要有: 1) 谐摇稳定——减小船舶的固有频率, 避开波浪扰动频率, 在船舶设计时考虑这一方面, 可降低共振发生率; 2) 阻尼稳定——增加系统的阻尼以减少横摇; 3) 平衡稳定——通过施加稳定力矩来抵抗波浪扰动力矩。目前船舶上安装的减摇装置皆从上述后两方面出发, 使船舶的各自由度运动保持在期望范围内, 保证船舶航行稳定性或装载平衡性。本文着重综述了船舶的横摇和纵摇减摇稳定装置, 并在单自由度减摇稳定装置描述的基础上, 关注近几年来船舶多自由度全航速减摇稳定装置的研究进展

及关键技术, 以期推动全航速多自由度船舶减摇装置的发展应用。

1 单自由度减摇装置

1.1 横摇独立减摇装置

横摇对船舶的安全运行影响最大, 但因横摇阻尼小、横摇倾覆力/力矩较小, 所以最易控制。横摇独立减摇装置包括舭龙骨、减摇水舱、移动重物、减摇陀螺、减摇鳍、减摇舵、阻尼板等, 表 1 列举了上述装置的发展历程。

1) 舭龙骨: 从增大船体阻尼的角度出发, Froude 提出沿船长方向、在船中两舷舭部外侧安装与舭部外板垂直的长条型板材 (即舭龙骨) 的方法进行减摇。其减摇原理为: 将横摇运动中船体的动能通过涡流的粘性效应转化为流体动能。

2) 减摇水舱: 在进行船舶损坏稳定性研究中, 研究人员

表 1 横摇独立减摇装置发展历程表

年份	减摇装置	船舶型号	设计者	减摇类型
1870	舭龙骨	-	Froude (英)	被动型
1880	减摇水舱	Inflexible	Watt and Froude (英)	被动型
1891	移动重块	Cecile	Thornycroft (英)	主动型
1906	减摇陀螺	Sea-Bar	Schlick (德)	被动型
1909	移动重块	Steamer	Crémieu (法)	被动型
1910	U 型减摇水舱	Ypiranga	Frahm (德)	被动型
1915	减摇陀螺	Conte di Savoia	Sperry Company (美)	主动型
1924	减摇陀螺 (双旋转轮)	Destroyer	Fieux (法)	被动型
1923	减摇鳍 (可变鳍角)	Matsu Maru	Motora (日)	主动型
1933	减摇鳍 (可变鳍面)	AvisoEstourdi	Kefeli (意)	主动型
1939	U 型减摇水舱	Hamilton	Minorsky (美)	主动型
1972	减摇舵	M.S. Peggy	van Gunsteren (荷)	主动型
1980	Magnus 转子稳定器	-	Theo Koop (荷)	主动型
约 1985	阻尼板	-	-	被动型
1998	纵拍式零航速减摇鳍	Boadicea	Dallinga (荷)	主动型
2006	Weis-Fogh 减摇鳍	-	Tsutahara (日)	主动型
2014	扑翼式零航速减摇鳍	-	Dallinga (荷)	主动型

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 福建省海洋高新技术产业发展专项资金资助项目 ([2016]13 号); 福建省科技计划资助项目 (2016H6022)

作者简介: 姚恺涵 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶推进和减摇。

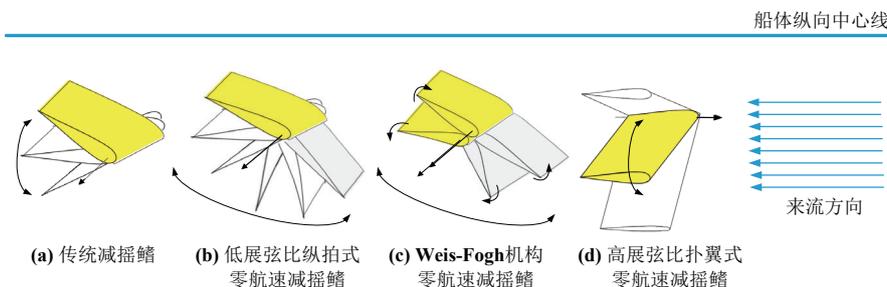


图1 传统减摇鳍与零航速减摇鳍分类对比图

观察到船内的水在某些条件下相对于波浪形状异相移动,水的重力可抵消波浪对船体的扰动力,从而产生减摇效果,因此出现了减摇水舱。以其中的水是否可受水泵作用而移动,分为主动式和被动式;以其自摇周期是否可受人为控制而改变,后者又可分为不可控被动式和可控被动式。减摇水舱适用于全航速航行条件下的船舶减摇,具有成本低、免维修、操作简单等优点;缺点是占用船内空间,故较适用于有较大空间的船舶。

3) 移动重物:与减摇水舱的作用机理相似,通过移动固体型重物改变船体重心的位置,从而保证船舶的平稳性,亦可分为主动式和被动式。利用重物在转动系统中沿径向方向运动时的科氏效应,日本横滨国立大学的 Hirakawa 等^[2]提出一种垂直重力减摇系统,但由于缺乏合适的致动器,该系统实际应用较为困难,目前应用较少。

4) 减摇陀螺:利用动力陀螺的物理特性,在将其进动轴沿船体横向布置时,通过旋转飞轮的角动量与飞轮进动振荡的组合产生稳定转矩,以抵抗横摇运动;其主要部件是一个具有转动惯量和角速度的飞轮。减摇陀螺的重量随船体的增大而增大、成本随之提高^[3],较适用于深V型尖艏船等小型的、固有横摇周期较短的船舶。

5) 减摇鳍:安装在船舶水下两侧的鳍型装置,按鳍面布置方式分为固定式、收放式及伸缩式,按适航条件分为传统型和零航速(全航速)型。

① 传统型减摇鳍

与飞机机翼的升力产生机理相似,当一定流速的流体(通常船舶速度高于10~15kn)流过鳍面时,由于上下表面存在压力差,鳍面上将产生与来流速度的平方成正比的升力,基于该升力作用,根据船舶横摇信号对鳍角进行调整,使之产生与波浪扰动力矩相反的扶正力矩以用于减摇。

② 零航速型减摇鳍

为了克服传统减摇鳍的弊端,实现全航速条件下的横摇减摇效果,零航速减摇鳍应运而生。综述现有文献,按照不同升力机制,零航速横摇减摇鳍主要分为3种类型,如图1所示。

低展弦比纵拍式零航速减摇鳍是世界首套零航速减摇鳍系统,与传统减摇鳍兼容性强,零航速时采用类似“划桨”的动作进行减摇;中高航速下采用传统减摇鳍的控制方式进行减摇,拓展了传统减摇鳍的工作条件,缺点在于所需功率较大、鳍轴易磨损、噪音较大。

受英国生物学家 Weis-Fogh 观察黄蜂的扑翼飞翔运动所提出的“挥翅拍击和挥摆急动”机构启发,一些学者^[4,5]进行了 Weis-Fogh 机构减摇鳍方面的研究,证明了 Weis-Fogh

减摇鳍能产生较大升力、启动性良好,具有实际应用前途,难点是该类型鳍涉及2个鳍面,机械结构复杂,与普通减摇鳍不兼容,工作模式切换困难,成本高,可靠性差。

具体而言,低展弦比纵拍式零航速减摇鳍存在3方面的问题。1)展弦比低,为获得足够减摇力矩,鳍角较大,导致稳定性较低、阻力较大;2)减摇鳍的安装位置易与前后端的舭龙骨发生干涉;3)仅鳍轴后方鳍面的划水推力为有效减摇推力,减摇效率有待提高。鉴于上述问题,借鉴扑翼飞行器的原理,出现了高展弦比扑翼式零航速减摇鳍^[6]。通过与传统鳍型的扑翼运动进行对比研究实验,证明了该鳍型的优点:1)不会与舭龙骨产生相互影响;2)该鳍在减摇过程中鳍角较小,鳍根部距离鳍轴较短,可有效减少升力损失。虽然该类型减摇鳍的建模和测试研究还不够成熟,但实验结果已经表明了其在较低航速条件下的优越性。

6) 减摇舵

1967年,Taggart观察到集装箱船在操舵时会引起船舶的过度横摇现象。受这一现象启发,一些学者对舵减摇装置进行研究。舵减摇的原理为低频运动影响艏摇,高频运动影响横摇,通过舵对横摇和艏摇的响应差异控制舵角来实现减摇。其减摇效果由控制器直接决定,因此研究主要集中在控制算法、船舶模型的不确定性影响及舵机的非线性系统的研究上^[7]。舵减摇装置优点在于造价低、所占船内空间小、维修方便;缺点是低航速时舵效较差。

7) Magnus 效应转子稳定器

受德国物理学家 Magnus 博士发现的 Magnus 效应启发,荷兰开发出了基于该效应的新型转子稳定器 RotorSwing^[8],通过安装在船体侧面的转子产生升力。如图2所示,与传统减摇鳍有效升力约65%相比, Magnus 转子稳定器所产生的垂直升力全部用以抵抗船舶的横摇运动,已成功应用中低速(3~12kn)游艇的减摇控制上^[9,10],减摇效果达到了95%,但其阻力随船舶速度增加而增大,能量损失也随之增大,无法适应高航速船舶的减摇要求。

8) 阻尼板

阻尼板出现较早,于20世纪80年代产生,在2000年美国上映的电影《完美风暴》中,即可见船上安装有该种减摇装置,由于其良好的零航速下的减摇效果,并且属于完全被动式减摇装置,无需消耗任何能量,目前渐渐引起了国内造船业的重视。如图3(a)所示,阻尼板减摇装置由水下减摇阻尼板①和水上可回收固定部分②组成,其回收布置形式分别如图3(f)、3(g)所示,图3(g)为其完全回收状态,通过放松缆绳将固定杆由竖直状态向下放置为水平展开状态,随后如图3(f)所示通过放松缆绳将减摇阻尼板由固定杆的端部下放

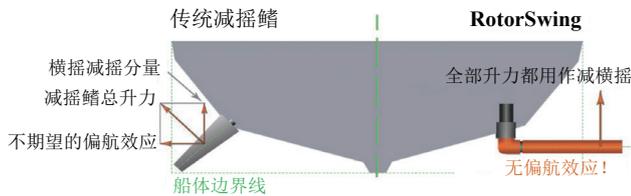


图2 Magnus 转子稳定器 RotorSwing 与传统减摇鳍的对比图

至水下特定深度位置，即可使其切换至图 3(a) 所示的工作状态。经过 30 多年的发展，水下减摇阻尼板的形式也多种多样，包括但不限于图 3(b)、(e)、(f) 中所示的多种样式。这些减摇阻尼板的共同特征是随船舶航行时，不会过多地增加船舶的航行阻力。最新出现的阻尼板形式如图 3(b)、(c)、(d) 所示^[11]，由图可看出，该阻尼板由多块仅可单向开合的子窗板组成，当船舶左右舷摇摆加深阻尼板的入水深度时，子窗板由于受到水的向上推力可打开；反之当船舶摇摆带动阻尼板向上运动时，子窗板闭合增加船舶的横摇阻尼，从而可显著改善船舶的耐波性。

1.2 横摇综合减摇装置

虽然独立减摇装置的研究已经比较成熟，但仅采用单一装置进行减摇在功能上存在很大的局限性，包括：适应航速的局限性、减摇效率的局限性以及遭遇浪向的局限性。为突破这些局限性，针对船舶横摇的综合减摇装置应运而生，主要包括舵 - 鳍、减摇鳍 - 减摇水舱、舵 - 可控被动水舱等综合

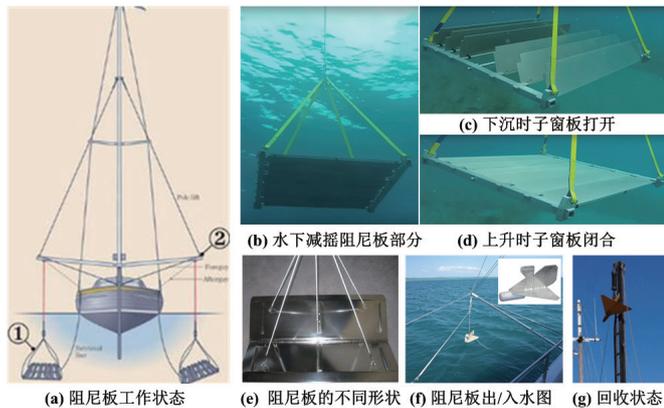


图3 减摇阻尼板示意图

减横摇系统。

早在 1972 年探索舵减摇的稳定理论之初，Carley 和 Duberley 就指出减摇舵和减摇鳍的综合减摇性能较两者独立使用效果好，使得舵鳍联合控制成为研究热点。而通过设计合理的联合控制器，舵鳍联合减摇装置还能在减少横摇的同时保证航向的准确性，实现船舶艏摇和横摇的同时控制。

针对船舶的减横摇及静倾问题，金鸿章等提出了由减摇鳍、U 型被动减摇水舱和抗静倾平衡水舱组成的船舶综合减摇系统，这种设计方法综合了减摇鳍与减摇水舱的优点，通过二者的合理配置，可产生互补的效果，能够应用于全航速下的减摇。中船重工第 704 研究所研发了“减摇鳍 - 可控被动减摇水舱联合控制器”，可工作于独立和联合 2 种模式，以充分发挥 2 种减摇方式的优势，并于 2015 年 3 月顺利完成试航^[12]，实现了该联合减摇系统的智能化管理。

官英双等利用减摇舵和可控被动式减摇水舱组成联合减横摇系统，提出基于广义预测控制 (GPC) 的减摇控制策略^[13]，在各种海情下的宽频率范围内都有良好的减摇效果。

1.3 纵摇减摇装置

纵摇稳定性是船舶尤其舰船耐波性评估中的重要因素之一。由于船舶受到的纵摇作用力频率范围广、所需的稳定力矩大，因此纵摇不易控制，除了通过改进船体设计尽可能减少纵摇和垂荡运动外，各国研究人员开发出了多种安装于船体两端的纵摇减摇装置，包括艏鳍、艉鳍、 π 型舵、涵道螺旋桨副翼、尾压浪板、斜舵等，表 2 列举了部分减纵摇装置的发展历程，并在图 3 中给出了示意图。

部分减纵摇装置如图 4 所示。由于船舶和波浪之间的相对运动在船舶位置最为剧烈，因此艏鳍减纵摇装置应运而生：艏鳍可以布置在船体艏部或固定在船舶龙骨下方的支柱上；随后艏、艉鳍组合及宽水平船龙骨的减纵摇装置试验相继进行，但由于空化、渗气、振动等问题，上述装置无法进入实用；艉鳍通常安装在船舶推进螺旋桨前侧，没有艏鳍的渗气等问题，主动式艉鳍的减摇效果随波高的增加而增加，而被动式艉鳍无减纵摇效果；涵道螺旋桨副翼通过对涵道螺旋桨的尾流进行整流而减少船舶纵摇；与涵道螺旋桨副翼相似， π 型舵亦可产生尾流的整流作用，其适用于双舵或多舵的船舶对象，连接在双舵底部的水平翼面用于俯仰控制，垂直方向舵用于航向控制；作为艏鳍组合减摇装置研究的一部分，Kaplan 等考察了单独采用喷气襟翼控制下斜舵的减纵摇效果：

表 2 减纵摇装置发展历程表

年份	减摇装置	船舶型号	设计者	减摇类型
1879	艏鳍 (图 3(a))	SS Warrimoo	E. De Rusett(英)	被动型
1933/1935	艏艉鳍组合	-	M. Kéféli(法)/G.Kempf(德)	被动型
1946	船龙骨	-	A. Perelmutr(苏联)	被动型
1958/1962	艉鳍 (图 3(b))	Mariner-class ship	P. Spens(美)	主动型
1962	涵道螺旋桨副翼 (图 3(c))	DE 1006	Eastern Research Groups(美)	被动型
1966	喷气式襟翼	Forrestal 级航空母舰	P. Kaplan et. al(美)	主动型
1980	π 型舵 (图 3(d))	Hamilton-class cutters	U.S.Navy(美)	被动型
1981	斜舵 (图 3(e))	FFG 7/CG 47 级船	Kaplan and Jiang(美)	主动型
1984	尾压浪板 (图 3(f))	-	Lloyd and Davies(英)	主动型
1985	半潜体	SSB 船型	木原和之(日)	被动型
2003	半潜体与艏鳍组合 (图 3(g))	单体排水式圆舳导弹护卫艇	蔡新功等(中)	被动型
2005	十字型抗纵摇舵 (图 3(h))	S175 船型	缪国平等(中)	被动型

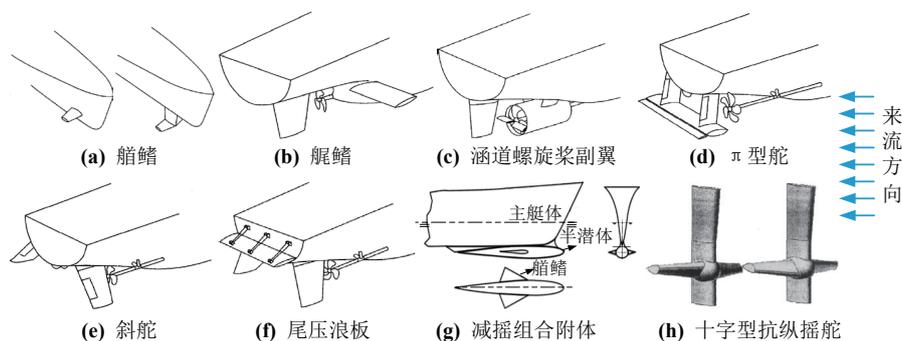


图4 部分减纵摇装置图

作为独立减摇装置,斜舵同样利用螺旋桨尾流产生升力,可同时控制横摇、纵摇及航向,试验证明其纵摇减摇效果较好,具有广阔的发展和前景^[14];此外,主动式尾压浪板通过改变压浪板俯仰角动态调整船的纵倾,但效果不明显。

另一方面,还出现了针对常规单体排水式圆舭导弹护卫艇的半潜体加船鳍的组合附体减纵摇及针对单桨单舵船舶的十字型被动式抗纵摇舵等减纵摇方案,并通过试验验证了其应用可行性。

2 多自由度减摇装置

2.1 多自由度独立减摇装置

进入21世纪以后,各种高性能船舶成功开发并应用,对减摇装置提出了更高的要求。以小水线面双体SWATH船为例,美国IEI公司通过采用4只减摇鳍安装在其潜体内侧,可同时实现横摇、纵摇及垂荡稳定控制,亦可使其工作在随波模式,避免甲板上浪,效果明显。

此外,为了改进Magnus稳定器在船舶航速较高(大于12kn)情况下因阻力增加而能量消耗较大的问题^[8],荷兰学者对传统减摇鳍进行了改进,开发出新型三轴减摇装置——减摇鳍Wing^[15],该鳍在中、高航速下采用传统减摇鳍的工

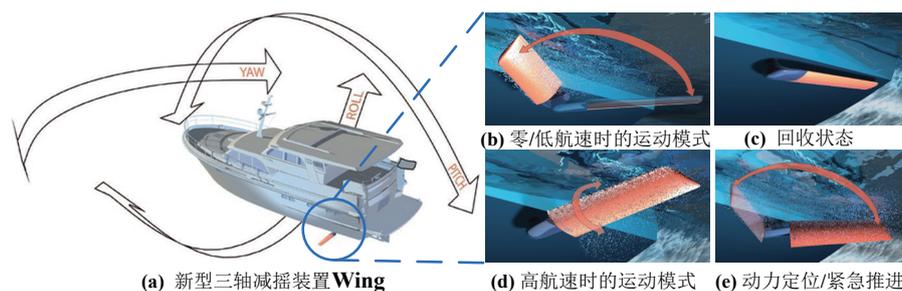


图5 三轴减摇装置WING

作方式,零、低航速下采用鳍面绕鳍垂直轴转动的方式进行前后摆动拍水来产生升力,最新实验证明这种减摇鳍在全航速下均具有非常好的减摇效果,是目前除主动式斜舵外,另一种能够同时实现横摇、纵摇、艏摇三轴主动运动控制的新型多自由度独立减摇装置。

如图5所示,该鳍可以绕安装在船舱内的旋转轴作大角度摆动(图5(b),新型运动方式),又能以船舱外鳍根部流线型旋转单元为基座绕自身鳍长轴转动(图5(d),传统减摇鳍运动方式)。鳍面(2个自由度,可绕垂直旋转轴前后摆动及绕其自身水平鳍长轴转动)为高展弦比薄片形状;其自身根部旋转基座(1个自由度,可绕垂直旋转轴前后摆动)设计为流线型,一方面可在船舶长时间航行时有效降低阻力、减少能量损失,另一方面可增加减摇鳍的减摇力臂长度,提高减摇鳍总升力中有效升力的百分比,增强减摇效果。

相对传统减摇装置,这一减摇鳍优点突出^[16],鳍面和旋转基座的动作配合还可以实现折叠回收(图5(c))、紧急推进及动力定位(图5(e))的功能,应用前景广阔。但需要解决在零航速、动力定位及紧急推进模式下所需驱动力及能源消耗较大的问题。

2.2 多自由度综合减摇装置

横荡、横摇和艏摇之间的交叉耦合作用影响减摇鳍的性能,若对上述3种运动进行综合控制,将会得到最佳的控制效果。为了有效减少船舶多个运动自由度的运动,保证船舶在全航速条件下的航行稳定性,在横摇综合减摇系统的基础上,依托舵鳍联合减摇装置,通过对控制器的优化设计,能够实现横荡-横摇-航向的联合稳定控制。

Kallstrom采用多变量线性二次型控制理论对舵鳍进行航向、减摇综合控制,实验表明该装置可以稳定横荡、横摇与艏摇运动;刘胜等^[17]在常规舵鳍联合减摇系统的基础上,提出利用舵/翼舵-鳍/翼鳍的鲁棒综合协调控制的方法,在提供所需扶正力矩基础上,尽可能减小主舵、主鳍的运动幅度,可降低能耗,改善航向/横摇控制效果,提高系统可靠性;Carletti等^[18]采用舵鳍可变结构控制器(VSC)设计,实现了横荡、横摇与航向的整体控制。除此之外,舵鳍联合减摇系统的相关控制方法还包括PID控制器、LQG(线性二次高斯控制器)、 H_∞ 控制器、自适应模糊控制器、神经网络控制器等,是当前的船舶运动稳定性研究的热点之一。

3 船舶姿态稳定控制的关键技术与发展趋势

3.1 船体多方位姿态的控制

现代舰船的发展对保持其自身姿态稳定性提出了越来越高的标准,以满足客轮舒适性、军舰安全性等要求。为使船舶在各种海况下均能获得较好的减摇效果,多种单自由度减摇装置的联合控制或同时减横摇纵摇和垂荡等运动的多自由度独立减摇装置的应用已经成为减摇技术研究领域的热点之一。

3.2 船体姿态的准确感知与超前预测

船体姿态变化的输出相较于系统所受到的外部激励而言,响应时间上存在一定的滞后,这就降低了船舶抗倾翻控制系统的响应速度。因此需要对船体姿态进行准确感知与超前预测,设计具有提前补偿功能的预测模型控制器。模型的计算效率和指定时长下的预报精度是极短期预报模型的2个性能评价指标,线性预报理论如时间序列分析法计算复杂度低、但精度往往不满足要求;非线性系统理论的预报方法如神经网络预报方法精确度高,但实时性差。因此,复合预报方法是未来极短期预报研究的发展方向:一是在预报模型中引入预处理手段,克服非线性非平稳性对预报模型的影响,提高预测精度;二是多种预测模型的切换和融合,提高结果可靠性。

3.3 全航速减摇技术

为使船舶在各种航态下均能获得较好的减摇效果,多种减摇装置的联合控制以及全航速减摇装置的研究是减摇技术研究领域的发展趋势。全航速减摇装置如减摇鳍的零航速下升力产生机理、升力反馈技术、不同航速下的切换策略是实现全航速下高效率减摇的关键问题。其中,升力反馈技术的难点在于升力测量方案的实现,构建升力反馈控制系统,减少实际值与理论升力需求值之间的误差,是实现系统自动化、提高减摇效率、减少能量损耗的重要途径。

4 结语

本文综述的船舶减摇装置的研究进展,从单自由度减摇装置,包括横摇独立、综合减摇装置、纵摇减摇装置,到多自由度减摇装置,包括多自由度独立、综合减摇装置这几个方面进行综述,阐明了各装置的减摇机理、兴起及发展的原因,重点关注了零航速减摇鳍的新进展,并简述了船舶姿态稳定控制的关键技术。除文中所述减摇装置以外,目前也已出现多种新型减摇方式:如磁流体减摇及喷水舵龙骨减摇等。通过文献综述发现,船舶减摇装置的设计由船舶单自由度运动控制向多自由度运动控制发展,控制器的设计由经典控制理论向智能控制理论发展,紧凑、高效、多自由度、全航速的船舶减摇装置是未来的发展方向。

参考文献

- [1] PEREZ T, BLANKE M. Ship roll damping control[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(1): 129-147.
- [2] HIRAKAWA Y, HIRAYAMA T, KAKIZOE K, et al. Sea trial of prototype vertical weight stabilizer (VWS) anti-rolling system for small ships[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2014, 19(3): 292-301.
- [3] 朱航, 陈少楠. 陀螺减摇器在渔业船舶上的应用探讨[J]. 中国水运月刊, 2014, 14(7):149-152.
- [4] 李梦玉, 刘超, 章社生. WEIS-FOGH 机构水动力学研究与进展 [C]// 全国水动力学研讨会并周培源诞辰 110 周年纪念大会, 2012.
- [5] 王帆. 零航速减摇鳍仿生机理及控制关键技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] DALLINGA R P, RAPUC S. Merits of flapping roll stabilizer fins[R]. HISWA Symposium, 2014.
- [7] 郑智林, 杨国豪. 船舶舵减摇控制方法综述 [J]. 世界海运, 2013, 36(10):41-44.
- [8] KOOP M T. Method for actively damping a ship's motion as well as such an active roll stabilization system[P].US 9527557 B2, 2016.
- [9] LIANG Li-hua, ZHAO Peng, ZHANG Song-tao. Research on hydrodynamic characteristics of Magnus rotor wing at medium/low speed[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2016: 2413-2418.
- [10] LIANG L, ZHAO P, ZHANG S, et al. Simulation and analysis of Magnus rotating roll stabilizer at low speed[J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 491-500.
- [11] <http://www.youtube.com/watch?v=QKT8mq9wcAs>
- [12] 宋芳. 船舶减摇进入智能时代 [J]. 中国船检, 2015(5): 96-97.
- [13] 官英双, 彭秀艳, 赵希人. 基于自适应 GPC 的舵和水舱联合减摇系统研究 [J]. 微计算机信息, 2012(10): 14-16.
- [14] CHEN Hong-li, GONG Luo, XIA Xiao-jing. Research on ship slanting rudder anti-pitching intelligent adaptive Generalized Predictive Control[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2015:1619-1623.
- [15] <https://www.rotorswing.com/wp-content/uploads/2015/11/WING-yacht-stabilizer-from-Rotor-Swing.pdf>
- [16] <https://www.rotorswing.com/wp-content/uploads/2016/01/Fins-versus-Wing-white-paper.pdf>
- [17] 余辰光. 船舶舵 / 翼舵 - 鳍 / 翼鳍数字控制系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [18] CARLETTI C, GASPARRI A, IPPOLITI G, et al. Roll damping and heading control of a marine vessel by fins-rudder VSC[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(20):34-39.