

文章编号: 1671 - 3559(2008)02 - 0183 - 06

船舶减摇技术研究进展

董美华, 马汝建, 赵 东

(济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022)

摘 要:综述船舶常用减摇装置的研究现状,指出单一减摇装置在功能上的局限性和大型船舶采用综合减摇装置的必要性,通过对目前出现的综合减摇装置和技术的研究现状分析,得出综合减摇装置的减摇性能远远好于单一减摇装置的性能,船舶减摇技术将来的主要发展趋势是大力发展综合减摇技术。

关键词:船舶减摇;减摇鳍;减摇水舱;舵减摇;综合减摇装置
中图分类号:U676.1 **文献标识码:**A

由于受到海浪、海风及海流等因素的影响,船舶在海上航行时不可避免地会产生各种摇荡,其中以横摇最为显著,影响也最大。众所周知,剧烈的摇荡对船舶的适航性、安全性、以及设备的正常工作、货物的固定和乘员的舒适性都会产生很大的影响。所以,一直以来人们都在寻求减小船舶摇荡的方法,研制出了许多船舶减横摇的装置。首先是单一减摇装置的陆续出现,像舳龙骨、移动重物、减摇鳍、减摇水舱以及舵减摇等常用减摇装置,它们对小型船舶的减摇效果比较好。其中,舳龙骨、减摇鳍和减摇水舱^[1]是目前比较成功的减摇装置。随着单一减摇装置发展的日益成熟,加上大型船舶出现以及对乘船的舒适性要求的提高,人们开始研究综合减摇技术以更好地满足生产生活的需要。目前所研究的综合减摇技术主要有以下几种形式:减摇鳍-减摇水舱综合减摇装置、减摇鳍-舵减摇综合减摇装置以及由减摇鳍、减摇水舱和抗静倾水舱组成的综合减摇装置。

1 船舶减摇装置简介

1.1 舳龙骨

早在 19 世纪初,帆船时代就已开始使用舳龙骨

来减小横摇,这是目前应用最广泛,也是最简单的减摇装置。它沿着船长方向安装在船的舳部,在横摇时扰动船体周围的流场,使船产生附加阻尼,并借以增加横摇阻尼从而达到减摇的目的。它在任何情况下都有效,在近似共振状态下减摇效果最明显^[2]。与其他减摇方式相比较,舳龙骨的显著优点是没有运动部件,且除了通常所做的清除船体表面的维护外无需其他维护。唯一的缺点是装上舳龙骨会使船舶阻力略有增加。另外,由于它简单、建造成本低、对航速影响小,且有一定的减摇效果(一般可减小横摇 30% 左右)等优点,目前几乎在所有海船都毫无例外地装有舳龙骨,它已成为海船船体的一部分。所以,在一般情况下所谓减摇装置系指舳龙骨以外的减摇措施和设备。

1.2 移动重物

通过移动重物来改变船体重心的位置,从而保证船舶的平稳性。它一般不会被单独使用以减小船舶横摇,大多数是对安装了舳龙骨的船舶在舵操作比较急的情况下进行辅助减摇。曾经就有 3.5 t 重的质量块被装到一艘 190 t 的日本位移高速探测舰上^[3]以及 500 t 重的质量块被装在“戴高乐”号法国航空母舰上来减小船舶横摇。为了抵消由于操舵而产生的倾侧力矩,人们对质量块的移动常采取自适应控制^[4]。但由于该减摇手段需要较大的能量来移动重物,并且响应比较慢以及它需要占用一定的船内空间,故目前不经常被使用。

1.3 减摇鳍

减摇鳍是一种最常用的主动式减摇装置,其构造主要包括机翼型的鳍(至少一对)、转鳍的液压传动装置和电气控制系统。通过控制鳍的运动,可以使鳍产生对抗横摇的扶正力矩,从而达到减小横摇的目的^[5]。

减摇鳍可分为非收放式减摇鳍和可收放式减摇鳍两种。非收放式减摇鳍装置的鳍一直伸出在舷

收稿日期: 2007 - 10 - 31

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2006F58)

作者简介: 董美华(1983 -),女,山东定陶人,硕士生;马汝建(1956 -),男,山东章丘人,教授,硕士生导师。

外,按控制规律转动,产生升力。其主要优点是结构简单,几乎适用于各种大型船舶。但该鳍的升力系数较收放式鳍的升力系数小,因而在面积相等、航速一样的情况下,升力较小;当大型船舶在静水中航行时,鳍像舵龙骨一样,对船舶产生附加阻力。由于鳍一直伸出在舷外,故易损坏。非收放式减摇鳍装置的单鳍面积有 0.9 m^2 , 1.6 m^2 , 2.5 m^2 , 3.5 m^2 , 4.0 m^2 , 5.0 m^2 , 5.5 m^2 , 6.3 m^2 等近 10 种之多,以适应不同吨位及用途的大型船舶使用。收放式减摇装置的鳍在大型船舶遇风浪需要减摇时放出舷外,在控制信号作用下转鳍,产生稳定力矩。不用鳍时,将鳍收进舱内。其主要优点是鳍的升力系数较大,静水航行时鳍收进船舱,不产生附加阻力。缺点是多了一个收放机构,故需占用一定的船内空间,因此该型装置主要装在较“胖”船型的大型船舶上,如客船、车客渡船、滚装船、集装箱船等,也有装在舰艇上的。收放式减摇鳍装置的单鳍面积有 2.5 m^2 , 3.6 m^2 , 6.0 m^2 三种。

减摇鳍是一种最常用、减摇效果最好的主动式减摇装置^[6-14]。通常航速在 $10\text{ km/h} \sim 15\text{ km/h}$ 的减摇效果最好,减摇鳍减摇效率可达 90%。例如,1985 年英国“玛丽皇后”号在大风浪条件下进行了减摇性能实验。当减摇鳍工作时,船的横摇角平均在 2° 左右;而减摇鳍不工作时,横摇角达 25° ;可见减摇效果还是很好的^[15]。最近, S Surendran, S K Lee and S Y Kim^[16] 又对装有主动式减摇鳍(采用 PD 控制)的驱逐舰型舰在各种海况下的运动状况进行仿真分析,无数的仿真结果证明了这种减摇鳍在任意海况下都具有较好的减摇效果。

减摇鳍的最早专利是在 1889 年由约翰·桑尼克罗夫特获得的。1923 年日本的元良信太郎设计了第一套实用的减摇鳍,经装船实验得到了良好的减摇效果。1935 年英国的布朗兄弟公司设计的减摇鳍成功的应用到一艘 2 200 T 的海峡渡轮,从此减摇鳍得到了广泛的应用。目前许多国家海军的中高速大型船舶、许多商船和其它船舶都装有减摇鳍^[17-20]。

国内对主动式减摇鳍的研究从 20 世纪 60 年代开始,上海船舶设备研究所和哈尔滨工程大学等单位进行了大量的研究设计工作,并在各类船舶上得到成功的使用^[21]。减摇鳍是减摇效果最好的主动式减摇装置,但是减摇鳍结构复杂价格较高,需要经常维修保养,并且需要动力和控制系统。同时,减摇鳍还有一个致命的缺点:只有船舶的航速较高时减

摇鳍才可以有效地减摇,而船舶在低航速或零航速情况下,减摇鳍几乎不能进行减摇。主要原因跟减摇鳍的基本工作原理有关,即减摇鳍的工作需要有水流流过鳍的速度。当速度很小或为零时,鳍上的升力也变得很小,在零速时升力也同时消失了。

为弥补减摇鳍功能的不足,近来出现了一种新的方法即采用特殊鳍形的减摇鳍来对零速或系泊状态下的船舶进行减摇,文献[22-24]介绍了这种新方法,并讨论了同减摇水舱相比这种方法在零速下减摇具有的优点。减摇鳍零速减摇的概念是在 1998 年由 M. Boadicea 提出的,装备的减摇鳍可以在漂流或系泊下进行减摇。在零速模式下上述系统中的减摇鳍以另外一种工作方式减摇,并且在航行模式下这种系统仍然可以满足期望的减摇效果。到目前为止已经有 18 只船安装或更换了这种零速减摇系统。零速减摇系统是应用划桨原理进行减摇,这里桨用鳍来代替。与普通鳍的形状和对称性不同,这种鳍的对称性很低,并且增加了弦长使其能扫过最大的面积。这种形状的鳍可以在减摇鳍尾缘附近和大片集水面积处产生高速,从而使鳍获得较大的升力。2005 年,纂志刚^[25]研究了零航速减摇鳍的工作原理,分析了零航速下减摇鳍按加速-匀速-减速运动时升力产生的原因,并传统减摇鳍的工作原理和工作方式进行了比较。另外,还建立了零航速减摇鳍升力模型,并运用 Matlab 编程进行仿真,最终验证了升力模型的有效性。但是该技术存在动力消耗、磨损、撕裂和噪声等问题,最关键的是零速减摇的能力问题,不能满足舰艇在海上作业时的要求。

1.4 减摇水舱

减摇水舱是另一种减小船舶横摇的有效装置,迄今为止它已经有 100 多年的发展历史^[26]。自从 1911 年佛拉姆成功推出被动 U 型水舱后,目前已经有各种减摇水舱应用到上千艘各类船舶,特别在 20 世纪 50 年代后,减摇水舱得到很大发展。目前英国国家物理实验室、Brown 兄弟公司、德国英特灵公司、美国 Flume 稳定系统公司和日本的三菱重工等都设计和生产了许多减摇水舱^[27-30]。

与减摇鳍相比,减摇水舱的最大优点是船舶在任何航速下(即使停泊时)依然有较好的减摇效果,也就是说减摇效果与航速无关。另外,减摇水舱还有自动化、免维修、操作简单、成本低及可靠性高等特点,还可用来抗横倾和检测稳性,是目前发展的方向。它的基本原理是在船的 $2/3$ 或 $1/2$ 总长的两舷

侧设置两对水舱,通过检测船的横摇角及横摇角速度选择不同水舱组合,控制气阀的启闭,使水舱内水的横向流动周期和方向与船的摇摆运动周期同步,方向相反,从而达到削减摇摆幅度的目的。但是,其减摇效果不如减摇鳍的减摇效果好,且减摇水舱需占用船内空间,故只适用于有较大空间的船舶。

由于减摇水舱装置可将摇摆角度从 30° 减至 15° ,减幅达 50% ,故由横摇而致的危险性可大大降低;另外,船舶摇摆角每增加 1° ,船舶阻尼摇摆力就要相应地增加 $0.5\% \sim 0.9\%$, 50% 的减幅将大大节省能源。由于减摇效果与船的航速无关,因此减摇水舱可广泛用于低速航行船舶或停泊作业的工程船舶。减摇水舱从减摇原理来分可以分为被动式减摇水舱、可控被动式减摇水舱和主动式减摇水舱三种,而从结构上可以分为 U 形水舱、平面槽形水舱等。目前,减摇水舱在货船、客船和工作船上都得到了成功的应用^[31]。

1.4.1 被动式减摇水舱

被动式减摇水舱是当船舶横摇时,水舱中的水产生往复运动,从而产生抵抗横摇的稳定力矩的一种减摇装置。关于减摇水舱的研究可以追溯到 1860 年,直到 1911 年,德国人佛拉姆才成功地提出了被动式 U 型减摇水舱。被动式减摇水舱因其简便、可靠、经济、不需附加功率,且在低速或无航速情况下都有较好的减摇效果,而成为众多船舶采用的减摇装置之一^[32-34]。但是,被动式减摇水舱只有在船舶谐摇周期附近才有较好的效果,而在较低的横摇周期下,甚至增摇。

1.4.2 可控被动式减摇水舱

可控被动式减摇水舱是对被动式减摇水舱的一个重要改进。它通过人为地控制水舱中水的流动,使其在各种横摇周期下都能产生满意的效果。可控被动式减摇水舱的两舱液体的流动是根据船舶的横摇情况而受控的,控制作用一般是由两水舱之间的节流阀来实现。可控式减摇水舱有以下优点^[35]:

(1) 减摇效果不受船速的限制,即使船速等于零也不受影响。(2) 消耗的能量小。这是因为可控式减摇水舱内水的横向流动是利用船舶本身在波浪上横摇运动所聚集的能量,即利用波能使水舱内的水作横向流动,只有压缩空气管路及主阀启闭要消耗一些能量。(3) 造价低、维修费用小。这是因为整套装置几乎没有活动的零部件,且不与水接触,所以构造简单,零部件不易磨损和锈蚀,使用时间长。

1.4.3 主动式减摇水舱

主动式减摇水舱是在两舱之间加入了一个水泵,它可以根据船舶的横摇情况把一个水舱内的水转移到另一个水舱。由于主动式减摇水舱需要在很短的时间内转移大量的水到另一个水舱,在实现起来很困难,故一般很少采用。

近 20 年来,随着人们对船舶减摇要求的提高,以及计算机和自动控制技术的发展,对减摇水舱进行了较为广泛的研究,取得了突破性的进展,相继提出了一些高性能的减摇水舱(像 U 型管水舱^[36]),并成功地应用到数艘实际船上。可控被动水舱正在成为船主要求的必备装置之一。其中特别是新发展的可控被动式减摇水舱与均衡水舱兼用的新型水舱得到更广泛应用。英国布朗兄弟公司和德国英特灵公司都有这类新型水舱系列产品,并在数百艘船上得到应用。例如丹麦多艘大型火车轮渡及多艘货船上都装有德国英特灵公司提供的多功能可控被动水舱,我国“极地号”南极考察运输船和粤海火车轮渡装有该公司提供的被动水舱。这种水舱具有减横摇和抗横倾等功能,实际航行效果良好。实践证明,这种水舱特别适用于滚装船、车客轮渡、集装箱船、钻探船等。它不仅可以减摇和抗倾,而且可以提高装卸效率,减少运输成本^[37-41]。

1.5 舵减摇

与减摇鳍、减摇水舱相比,舵减摇是一项较新的减摇技术,它最早由荷兰在 20 世纪 70 年代提出。船舶的横摇周期一般在 $7 \sim 15$ s 之间,而艏艉摇一般在 $20 \sim 40$ s 之间,靠舵对横摇和艏艉摇响应的差异,控制舵角,以达到一定的减摇效果。目前的实验研究表明,舵减摇的效果可达 60% 左右。由于它不需要一套专门的减摇装置,因此在船舶工程界倍受关注。

舵减摇的理论基础是^[42]:舵的低频运动主要影响船舶的艏摇,而舵的高频运动则主要影响船舶的横摇,同时也增加了船舶的航行阻力,但比减摇鳍的要小。与减摇鳍相比,利用舵在操舵时产生的横摇力矩进行减摇的舵减摇装置造价低、所占船内空间少、使用维修方便,故舵减摇技术引起了人们的广泛关注。但其需要高速操纵器以及低船速时舵效较差。1972 年, Cowley 和 Lambert 探讨了用舵作为稳定装置的可能性,并在一艘商船上试验成功,因而引起人们的关注。80 年代荷兰、瑞典等国家开展了舵减摇装置的研究。1984 年,瑞典歌德堡船模实验水池开始研制型号为 ROLL - NIX 的舵减摇装置,到 1990 年已经生产 60 多套,安装在 $160 \sim 11\,000$ t 级

的各种船舶上。1990年,荷兰自行研制的 ASSA 型舵减摇自动驾驶仪安装在 M 级护卫舰的首制舰上。八十年代初,中国大型船舶科技研究中心就展开了舵减摇的理论和实验研究,主要是研究安装舵减摇装置的可行性,并探讨了舵减摇的最优控制规律和舵减摇的效果。九十年代以来,对舵减摇的研究更为深入,理论研究表明舵减摇装置具有较高的减摇效果。我国在舵减摇方面的研究也是集中在军舰上的应用。

2 船舶减摇装置的发展

虽然对单一的减摇技术的研究已经相当成熟,但是采用单一的减摇装置在功能上却存在很大的局限性。主要体现在(1)在大型船舶航速上的局限性:减横摇最有效的减摇鳍表现最为明显。(2)在减摇效率上的局限性:尽管减摇水舱的减摇效率与大型船舶的航速无关,但减摇效果远远达不到军用大型舰艇的要求。(3)航向上的局限性:减摇鳍在横浪下减摇效果最好,在迎浪、特别是尾斜浪下的减摇效果不理想;被动减摇水舱在海浪低频扰动或者尾斜浪下,严重时产生增摇等负面影响。综合上述三方面考虑,为了使大型舰艇在各种航态下(包括零航速时)能够很好地综合平衡,最好的方法是综合考虑减摇鳍、减摇水舱和舵减摇的性能,对船舶进行综合减摇。

2.1 减摇鳍 - 被动水舱综合减摇

基于对减摇鳍及减摇水舱的优缺点的分析,赵为平等^[43]于 2004 年在探讨船舶减摇鳍和减摇水舱两种减摇装置的基础上,针对大型船舶提出减摇鳍和减摇水舱综合减摇的技术,并建立了“船舶 - 减摇鳍 - 被动水舱”系统数学模型。通过分析和比较各种减摇装置他们发现:这种综合减摇装置结合了鳍与水舱的优点,同时弥补了鳍与水舱各自存在的不足,能够在任何航态下(包括零航速时)具有一定的减摇能力。接着,陈放等^[44]以 RO - RO 船为对象,研究船舶在减摇鳍和双减摇水舱综合减摇装置作用下的动力学模型,对综合减摇控制系统进行建模研究,设计了减摇鳍和双减摇水舱的综合平衡控制系统。并提出了采用以低容量减摇鳍和小体积双减摇水舱作为减摇装置的综合减摇技术。2007 年,于立君等^[45]采用了减摇鳍 - 减摇水舱综合减摇的数学模型,对综合减摇数学模型在实验装置上的实现方法进行了仿真分析,验证了用该综合减摇实验装置来模拟综合减摇系统的实现方法是可行的。现

有的资料显示,目前已有减摇鳍和减摇水舱共同装备同一船舶的先例,但是,他们都是基于这样的思想装备船舶减摇装置的:在船舶中高航速下,单独使用减摇鳍进行减摇;在低航速下,采用减摇水舱。德国英特灵公司也提到他们公司的减摇鳍和减摇水舱具有兼容性,但是进一步的研究目前还没有记载。

2.2 减摇鳍 - 舵减摇综合减摇

对于水平运动的控制,传统的做法是采用一对或两对减摇鳍,用于减小横摇幅度,而克服艏摇则采用一个或多个舵。众所周知,舵的作用会产生横摇,而减摇鳍的作用也会产生艏摇,如果独立设计减摇和航向保持系统,要求的鳍容量就会很大,当在较低的海况下航行时,必然造成鳍容量的浪费。由舵减摇的思想可知,在高海况下,用舵来辅助减摇可以降低鳍的设计容量,同时,也可以减少横荡和保持航向。20 世纪 80 年代以来提出了舵和鳍的联合减摇,并且证明了舵鳍的联合减摇装置可以有效地提高在多种船舶工况下的减摇效果。由于船舶舵鳍联合装置将减摇鳍与自动舵各自的优点结合起来,可以实现对横荡、横摇、艏摇等进行稳定控制,因此是当前船舶运动研究的热点之一。早在 1981 年, Kallstrom 采用多变量线性二次型控制理论对舵鳍进行综合控制,在控制航向与减摇两个方面取得优异性能^[46]。2001 年,法国的“戴高乐”号航母上装有两对减摇鳍和舵减摇装置^[47]。哈尔滨工程大学和上海交通大学等单位也对舵鳍联合控制问题进行了研究^[48]。

2.3 减摇鳍 - 减摇水舱 - 抗静倾水舱综合减摇

此外,由于装载的不平衡,风和海流对船体的静压、运行中局部舱室的破损等都会引起船舶的静倾,因此目前在一些大型的滚装船、轮渡或者集装箱船上,都装有抗静倾的均衡水舱。抗静态倾斜的平衡水舱在减小船舶的横倾方面有广泛的应用^[49-51]。国际上对减摇鳍、减摇水舱和抗静倾水舱系统这三种装置的个体研究已很成熟,应用也很广泛^[52]。如果采用减摇鳍和减摇水舱来修正船舶的静倾,则会损失减摇装置较大的减摇容量,所以提出了减摇鳍、减摇水舱和抗静倾水舱三者综合的船舶减摇装置^[53]。金鸿章等^[54]提出了采用减摇鳍、减摇水舱和抗静倾的平衡水舱组成船舶综合平衡系统,并通过分析和讨论验证了这种综合系统的优越性。第二年,他们^[55]又以高速滚装船为例,建立了“船舶 - 减摇鳍 - 被动式 U 型水舱”系统的运动方程,并进行了计算机仿真,结果表明综合减摇系统的减摇性能

远远好于单独使用减摇鳍和减摇水舱的性能,并且在各种航态下(包括零航速)都能达到减摇要求。贲成华等^[56]提出了由两对减摇鳍、双被动式减摇水舱和抗静倾的平衡水舱组成的综合减摇系统,并通过建模仿真验证了该综合系统的优越性,即船舶在各种航速、浪向和海情下都能有效地减小横摇,并能补偿由于各种因素引起的静倾。需要指出的是减摇水舱、抗横倾水舱可以用一个兼有减摇和抗横倾双重功能的水舱来代替,这样就减少了水舱对船内空间的占用。

目前的理论研究已充分表明:采用综合减摇装置可以使船舶在各种航态下获得较好的减摇效果。由于目前对减摇鳍、减摇水舱、舵减摇等单一减摇装置的研究已很成熟,并且对综合减摇装置性能的优越性也做了进一步的理论研究,因此各种减摇装置的综合控制是今后减摇技术发展的新趋势。科研工作的重点是研究出一个完善的切实可行的控制系统,以实现对整个减摇装置的综合控制,从而实现各种装置的协调组合,资源的合理配置以及船舶最大限度的平衡。

3 结论与展望

本文对单一减摇装置以及综合减摇装置的工作原理和性能特点进行了详细综述。通过分析比较可知:单一减摇装置在功能上具有一定的局限性,而综合减摇装置综合了单一减摇装置的优点,可以满足船舶在各种航态下的减摇要求,并且其减摇性能远远好于单一减摇装置的减摇性能,是目前减摇装置发展的巅峰。但是,如果对船舶采用以上几种综合减摇方案进行减摇,将必须提供专门的减摇鳍驱动装置,并且对已有船舶的结构改造程度比较大,这样将造成船舶减摇成本的提高。因此,为了节约成本,目前的许多船舶都未安装减摇装置,少数安装了却又不能满足减摇要求,造成海上事故不断发生。综上所述,综合减摇装置面临的主要问题是减摇成本比较高。对此,我们可以通过发展船舶的综合控制技术,使得减摇鳍的驱动力来源于减摇系统本身,而不需额外添加,从而降低减摇成本。对于改造成本高的问题,可以通过大力发展新的综合减摇技术来解决。只有降低了减摇成本,综合减摇装置才能更广泛地应用到各类船舶上,才能从根本上保证船舶航行的安全。

参考文献:

[1] 植木修次. 船舶减摇装置当前动向[J]. 渔船, 1997(327): 29 -

43.

- [2] 段祥云,段学民. 渔船横摇减摇装置 - 艏龙骨[J]. 河北渔业, 1998(3): 26 - 28.
- [3] Koike Y, Tanida K, Mutaguchi M, et al. Development of Hybrid anti-rolling device for ships and test at sea[J]. Recent progress on science and Technology, 1997(6): 20 - 26.
- [4] Sirehna Heel Compensator Control[DB/OL]. <http://www.ec-nantes.fr/sirehna/gallery/PaCdG/PaCdG.htm>, 2005.
- [5] 许叙遥. 船舶减摇技术的若干研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [6] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [7] 陶尧森. 减摇水舱的研究与进展[J]. 中国造船增刊 - 船舶耐波性专辑, 1991(1): 313 - 323.
- [8] 施内克鲁特. 船舶水动力学[M]. 咸培林, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [9] 纽曼 JN. 船舶流体动力学[M]. 周树国, 译. 北京: 人民交通出版社, 1986.
- [10] 李积德. 船舶耐波性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [11] A H 霍洛季林, A H 什梅列夫. 船舶耐波性和在波浪上的稳定措施[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [12] 勃拉哥维辛斯基 C H. 船舶摇摆[M]. 魏东升, 奚祖声, 汪希龄, 译. 北京: 高等教育出版社, 1959.
- [13] 王汇英. 舵对船舶横摇的横摇稳定系统[J]. 航海技术, 1991(1): 15 - 20.
- [14] H R 马涅采夫. 船舶不沉性理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [15] 王华羽. NJ 系列减摇鳍技术手册[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997.
- [16] S Surendran, S K Lee, S Y Kim. Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3): 542 - 551.
- [17] 张晓宇. 非线性系统鲁棒控制及其在力控鳍中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [18] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1999.
- [19] 吴见. 襟翼减摇鳍的水动力性能与减摇效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999.
- [20] 孟克勤. 大型船舶减摇装置[J]. 机电设备, 2003(3): 11 - 14.
- [21] 余音, 胡毓仁, 金咸订. 船舶在波浪中非线性横摇研究的现状和发展[J]. 船舶力学, 2000(2): 73 - 77.
- [22] Dallinga R P. Roll Stabilization at Anchor: Hydrodynamic Aspects of the Comparison of Anti-Roll Tanks and Fins[R]. Amsterdam: Project 2002, 2002.
- [23] Dallinga R P, Wieringen H M Van. Passenger Comfort on Motor Yachts[R]. Amsterdam: Project 97, 1997.
- [24] Dallinga R. P. Roll Stabilization of Motor Yachts: Use of Fin Stabilizers in anchored Conditions[R]. Amsterdam: Project 99, 1999.
- [25] 慕志刚, 金鸿章. 减摇鳍在零航速下升力的研究及仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [26] Reza Moaleji, Alistair R, Greig. On the development of ship anti-roll tanks[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(1): 103 - 121.

- [27] Bass D W. Roll Stabilization for Small Fishing Vessels Using Paravanes and Anti-rolling Tanks[J]. Marine Technology, 1998, 35(4): 74 - 84.
- [28] 樊社军. 可控被动式减摇水舱的理论与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 1990.
- [29] 寺尾裕. 新型被动可控式减摇水舱的系统模拟和海上试验[J]. 关西造船协会志, 1993(219): 75 - 88.
- [30] 赖志昌. U型减摇水舱及试验摇摆台实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [31] 赖志昌. 船舶减摇水舱试验台架及仿真方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [32] Thongchai Phairoh, Jen - Kuang Huang Adaptive ship roll mitigation by using a U - tube tank[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3): 403 - 415.
- [33] 船舶设计实用手册编辑委员会. 船舶设计实用手册总体分册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [34] 冯铁城, 朱文蔚, 顾树华. 船舶操纵与摇荡[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [35] 曲筱杰. 可控式减摇水舱在船舶上的使用[J]. 江苏船舶, 1997, 15(3): 15 - 18.
- [36] Thongchai Phairoh, Jen - Kuang Huang Modeling and analysis of ship roll tank simulator systems[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(8): 1037 - 1053.
- [37] 杨燮庆, 刘友勤. 国外火车渡船技术现状及在我国的适用性探讨[J]. 船舶, 1993(1): 19 - 31.
- [38] 杨燮庆, 沈永红, 刘燕斐. 国外测量船技术现状及其发展趋势[J]. 船舶, 2000(3): 6 - 14.
- [39] McCallum D N. Passive Anti - roll Tanks Design Considerations[R]. ADA022312, 1973(3): 1 - 20.
- [40] 张富明. 船舶抗横倾系统及设备的开发[J]. 机电设备, 2002(5): 19 - 24.
- [41] Lewison G R G Optimum Design of Passive Roll Stabiliser Tank[J]. The Royal Institution of Naval Architect, 1976(1): 31 - 45.
- [42] 孔金标, 钱国梁. 新型舵减摇系统[J]. 船舶性能研究, 1992(66): 73 - 84.
- [43] 赵为平, 金鸿章. 大型水面舰艇综合平衡系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [44] 陈放, 金鸿章. 鳍水动力应用及鳍和水舱综合减摇系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [45] 于立君, 金鸿章, 王辉, 等. 减摇鳍 - 减摇水舱综合减摇实验装置的研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(2): 25 - 35.
- [46] Kallstrom C G Control of Yaw and Roll by Rudder/Fin Stabilization System[C]. Proceeding of SCSS '81, 1981.
- [47] 中国船舶信息中心. 现代海军武器装备手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [48] 刘博实, 王科俊. 利用进行船舶舵鳍联合减摇智能控制系统的设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2001(3): 76 - 80.
- [49] 顾洁, 译. 可控被动减摇水舱和主动抗横倾系统相结合的原理和应用[J]. 船舶, 1995(6): 21 - 30.
- [50] 黄国荣, 译. 减摇装置和 NTER NG防侧倾系统[J]. 机电设备, 1983(12): 36 - 38.
- [51] 董玉民. NTER NG减摇水舱[J]. 机电设备, 1992(1): 29 - 32.
- [52] Gawad A, Ragab S A, Nayfeh A H, et al Roll stabilization by anti - roll passive tanks[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(5): 457 - 469.
- [53] Samoilescu G, Radu S Stabilizers and stabilizing systems on ships[C]. Targu Jiu: 8th International Conference on Navy Academy, 2002.
- [54] 金鸿章, 赵为平, 慕志刚, 等. 大型船舶综合平衡方法研究[J]. 船舶力学, 2004, 8(4): 42 - 47.
- [55] 金鸿章, 赵为平, 慕志刚, 等. 大型船舶综合减摇系统的研究[J]. 中国造船, 2005, 46(1): 29 - 35.
- [56] 贲成华, 金鸿章. 船舶水舱 - 鳍减摇和抗倾系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

Research Progress of Ship Anti - rolling Technology

DONG Meihua, MA Ru-jian, ZHAO Dong

(School of Mechanical Engineering,
University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The working principle, performance characteristics and research situations of anti - rolling devices are introduced in detail The advantages and disadvantages are analyzed and compared It is pointed out that the function of a single anti - rolling device is limited, thus it is necessary to use integrated anti - rolling devices for large ships According to the analysis of the current integrated stable devices, it can be seen that the performance of an integrated anti - rolling device is far better than a single anti - rolling device The conclusion is that the integrated stable device is the development trend in the area

Key words: ship roll stabilization; fin stabilizers; anti - rolling tanks; anti - rolling rudder; integrated anti - rolling device