

引用格式: 胡靖华. 基于综合压载措施的试验舰加改装稳性控制[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(增刊 1): 55–60.

HU J H. Stability control for testing ship refitting through ballasts[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(Supp 1): 55–60.

基于综合压载措施的试验舰 加改装稳性控制



扫码阅读全文

胡靖华*

中国舰船研究设计中心, 上海 201108

摘要: [目的] 为解决试验舰加装被试装备和实施牵连工程后引起舰船重心升高的问题, 需采取适当的稳性控制措施。[方法] 根据实船情况, 选择利用原有压载水舱、新增压载水舱以及将淡水舱改用压载的组合方案, 使得在未加装固定压载的情况下满足稳性要求。鉴于该舰曾经加装过制淡装置, 淡水舱舱容允许降低, 并考虑到舰船为临时加改装, 将一个淡水舱装满淡水并管制使用, 而用“软”方法实现压载功能。作为补充措施, 提出利用制淡装置及时补充洗涤水的建议, 防止舰船使用中因淡水消耗过多而引起稳性下降。[结果] 结果表明, 在正常排水量下舰船重心高降低 0.31 m, 初稳性高增加 0.25 m, 抗风能力增加 9.64 m/s; 在满载排水量下舰船重心高降低 0.27 m, 初稳性高升高 0.24 m, 抗风能力增大 8.89 m/s。[结论] 所提压载方案可有效改善舰船稳性, 各种技术措施的灵活应用对舰船工程具有一定参考意义。

关键词: 试验舰; 加改装; 完整稳性; 控制措施; 压载

中图分类号: U661.22

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02439

Stability control for testing ship refitting through ballasts

HU Jinghua*

China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China

Abstract: [Objective] To address the problem of the increased height of the center of gravity caused by the installation of testing equipment and relevant supporting construction in refitting, it is necessary to apply adequate technical measures to control the stability of the testing ship. [Methods] According to the real ship environment, a combination of ballasting countermeasures is selected to satisfy the stability requirements, which involves using the existing ballast tanks, adding a new ballast water tank and changing a fresh water tank for ballasting, while fixed ballast is omitted. Considering that the testing ship is equipped with desalination devices, the fresh water tank capability can be reduced. As this refitting project is not permanent, a fresh water tank is selected to be filled with fresh water which is forbidden from consumption, realizing the ballasting function in a soft way. As an additional countermeasure, timely fresh water self-replenishment by the desalination devices is also suggested to prevent the stability from being reduced by over-consumption. [Results] With the above measures applied, in normal displacement, the height of the center of gravity is reduced by 0.31 m, the metacentric height (GM) is increased by 0.25 m and the maximum wind resistance ability is increased by 9.64 m/s; in full load displacement, the height of the center of gravity is reduced by 0.27 m, the GM is increased by 0.24 m and the maximum wind resistance ability is increased by 8.89 m/s. [Conclusions] The proposed ballast method is proven effective in controlling the stability of the ship, while the flexible application of various technical approaches has certain reference significance for naval architecture projects.

Key words: testing ship; refitting; intact stability; control measure; ballast

0 引言

具有良好的稳性是确保舰船安全航行和承担

使命任务的前提条件。试验舰因加装被试装备和实施牵连工程, 往往会引起重心升高和稳性下降。特别是某些被试雷达等装备的重量和尺度大、安

装部位高,对舰的稳性影响更为明显。因此,这就要求试验舰在加改装工程中必须对重量和重心进行严格控制,必要时还需采取适当的稳性改善措施,以确保加改装后的舰船稳性能够满足相关规范的要求。

改善舰船稳性的措施是船舶静力学的重要应用问题,属于经典范畴的内容,可分为两大技术途径:提高最小倾覆力矩和减小风倾力矩。前者包括降低重心、增加干舷、增加船宽、增加水线面系数、减小自由液面和悬挂重量、增大进水角,后者主要是减小影响受风面积的上层建筑长度和高度^[1]。上述措施对于新研制的舰船均可适用。但是,对于加改装船舶,改变船宽、型深等主尺度属于重大改装的范畴^[2],技术代价过大,一般难以实施,而通过压载措施降低重心的可行性较好,工程上较为常用。周巍等^[3]分析了我国上世纪研制的数型舰船在使用期内重量和重心的变化情况,并与完工交船时的数据进行比较,发现这些舰船改装后普遍都呈现了排水量增大和稳性下降的现象,最后均通过加装固定压载以保持足够的稳性。张祥瑞等^[4]在某船修改设计中采用油水代换系统,有效地解决了航行过程中因燃油消耗而引起船舶稳性下降的问题,满足了该船完整稳性的特殊设计要求。对于设计有大型吊机的船舶必须考虑起吊作业时的稳性及浮态,刘志杰等^[5]对采用上下分层压载水舱、压载水泵和重力自流联合注排水的大型浮吊的压载水动态调拨进行了优化,使作业过程中压载水调拨时间最短,在确保浮吊安全作业的条件下提高了压载的工作效率。由于船舶压载水会在不同地理位置的水体间转移外来物种,对海洋生态平衡造成威胁^[6],国外开始研究无压载水船舶(ballast-free ship)的概念,采用在压载吃水以下的主船体中设置纵向结构流道等形式,以代替传统的压载水舱。虽然从减少浮力的角度,该方案取消了常规压载水舱,但从增加重量的角度,其工作原理仍是基于压载,只是用动态流动的活水代替了压载水舱中的水^[7]。

综上所述,改善舰船的稳性存在很多技术途径,压载或基于压载原理的方法是最常用的有效措施,然而,若要在具体工程中有效应用压载,则需采取因地制宜的细化实施方案。本文针对试验舰的加改装工程中因加装被试装备和实施牵连工程而导致船舶重心上升和稳性下降的问题,将通过压载的技术途径改善其稳性。考虑到该工程并非永久性或长期性改装,根据实船状态,综合运用多种压载方法,在加改装工程存在多种约束条件的情况下,对该舰重心进行控制,以满足现有

规范对船舶稳性的要求。

1 舰船压载基本原理及方式

1.1 基本原理

设舰船重心 G 的坐标为 (x_G, y_G, z_G) , 浮心 B 的坐标为 (x_B, y_B, z_B) , 则在静水中的平衡方程为:

$$\begin{cases} W = \Delta = wV \\ x_B - x_G = (z_G - z_B) \tan \theta \\ y_B - y_G = (z_G - z_B) \tan \phi \end{cases} \quad (1)$$

式中: W 为重量; Δ 为排水量; w 为水的密度; V 为排水体积; θ 为纵倾角; ϕ 为横倾角。

若在坐标 (x, y, z) 处增加设置压载 p , 则新重心 G_1 的坐标为 $(x_{G_1}, y_{G_1}, z_{G_1})$, 新浮心 B_1 的坐标为 $(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$, 新的平衡方程为:

$$\begin{cases} W_1 = \Delta_1 = wV_1 \\ x_{B_1} - x_{G_1} = (z_{G_1} - z_{B_1}) \tan \theta_1 \\ y_{B_1} - y_{G_1} = (z_{G_1} - z_{B_1}) \tan \phi_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\Delta_1 = \Delta + p \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{G_1} = \frac{\Delta x_G + px}{\Delta + p} \\ y_{G_1} = \frac{\Delta y_G + py}{\Delta + p} \\ z_{G_1} = \frac{\Delta z_G + pz}{\Delta + p} \end{cases} \quad (4)$$

压载是通过改变舰船重量和重心而改变其在水中的平衡状态。压载后的舰船初稳性高和浮态可根据重量重心和静水力曲线经计算准确得到。

为便于分析压载的影响,假设舰船原处于正浮状态,且压载 $p \leq 10\% \Delta$, 则有以下近似关系:

$$\delta d = \frac{p}{wA_w} \quad (5)$$

式中: δd 为平均吃水增量; A_w 为水线面面积。

$$\overline{G_1 M_1} = \overline{GM} + \frac{p}{\Delta + p} \left(d + \frac{\delta d}{2} - z - \overline{GM} - \frac{\sum w_i i_x}{p} \right) \quad (6)$$

式中: $\overline{G_1 M_1}$ 为新的初稳性高; $\overline{GM}$ 为原初稳性高; d 为原吃水; w_i 为新增自由液面的液体密度; i_x 为新增自由液面的横向惯性矩。若压载措施未新增自由液面,则 $\sum w_i i_x = 0$ 。由式(6)可见,当压载高度 $z < d + \frac{\delta d}{2} - \overline{GM} - \frac{\sum w_i i_x}{p}$ 时,压载后舰船的初稳性高增加^[1],该规律可用于改善舰船的稳性。

1.2 常用压载方式

目前,常用的舰船压载措施主要包括固定压

载和压载水舱,此外,油水代换在工作原理上也属于一种动态压载。固定压载大多采用生铁、铅、混凝土等材料制成压载块固定于舱底等区域,对于铅和混凝土有时还可采用直接浇筑方式。鉴于固定压载的密度大,在艏尖舱、轴隧、底舱等空间受限部位也可根据船体内部的实际情况灵活设置。这种方式压载效率较高,但在舰船使用过程中不能根据实际情况进行调整。

压载水舱是通过加注海水来实现压载的,其具有压载量大、可根据需要灵活调整等优点,广泛应用于潜艇的潜浮和均衡操作^[8]和两栖战舰、浮船坞、半潜船等的上浮及下潜,以及水面舰船浮态调整和油水消耗后的稳性补偿等。按照压载系统的注排方式,可以分为压载水泵注排水、重力浸水注水/压载水泵排水和重力浸水注水/压缩空气排水等多种方式^[9],如何选择,主要取决于各种舰船的使用需求。

油水代换系统通过向燃油舱加注海水来弥补燃油消耗造成舰船的重量和重心变化,最早应用于潜艇。此方法可减少燃油消耗对潜航状态下潜艇的排水量和重心位置造成影响,后来在驱逐舰和护卫舰等水面舰船上也开始得到应用,主要是防止燃油消耗后舰船重心升高和稳性下降,尤其适用于主船体内空间受限,难以设置独立压载水舱的舰船^[10]。

1.3 适用于加改装的非常规压载方式

1.3.1 利用淡水舱压载

目前,舰船淡水保障能力已日益得到重视,新研制舰船普遍配置有海水反渗透等制淡装置,不少原来未配置制淡装置的在役舰船也开始加装,以满足远航需求。根据 GJB 4000-2000《舰船通用规范》(以下称规范),对于未配置制淡装置的水面舰船,要求按全部自给力 and 编制人员数计算淡水定额;而对于配置有制淡装置的水面舰船,自给力 7 昼夜及以上的按 7 昼夜配置,7 昼夜以下的按 5 昼夜配置。对于原设计未配置制淡装置而自给力较大的水面舰船,一般都具有较大的淡水舱舱容,在加装制淡装置后,由于淡水舱舱容只需满足 7 昼夜的需求,这就为将部分富裕的淡水舱(洗涤水舱)改作压载用途提供了可能性。由表 1 所示算例可见,在加装制淡装置后,某舰的淡水舱总装载量相对于规范要求的裕度从加装前的 5% 提高到了 288%,存在很大的改装潜力。

利用富裕的淡水舱压载有 2 种方法:若是永久性 or 长期性改装,可将特定的淡水舱改为压载水舱,改造相关管系,通过压载水系统加注海水

压载;若是临时压载措施,还可以对特定的淡水舱加注淡水并实施使用管制,在不改变淡水系统物理状态的情况下,将其改为压载用途,但需得到舰船使用方的同意和密切配合,且在使用中通过严格的管理措施来确保技术措施的落实。

表 1 制淡装置加装前后对淡水舱舱容需求的影响(算例)
Table 1 Effects of desalination device on the capacity of fresh water tank before and after installation (calculation example)

项目	加装前	加装后
舰员和参试人员/人	220	220
人均淡水供给额度/(kg·d ⁻¹)	60	60
淡水舱需满足的自给力/d	30	7
生活淡水/t	396	92.4
应急淡水/t	1.98	1.98
机械用水/t	18.2	18.2
淡水舱所需总净装载量/t	416.18	112.58
淡水舱实际总装载量/t	436.7	436.7
淡水舱实际总装载量与所需总净装载量之比	1.05	3.88

利用富裕的淡水舱压载是压载水舱的一种非常规实现方式,可有效解决主船体内空间受限难以增设压载水舱的问题,对于技术条件合适的舰船可显著降低加改装工程的实施难度。

1.3.2 利用制淡装置补偿淡水消耗

除了将部分富裕的淡水舱进行整体改造作为压载用途外,在实际使用中还可利用制淡装置对其他淡水舱(尤其是洗涤水舱)及时补充淡水,防止因消耗过多而使舰船稳性下降。考虑到目前国内舰船海水反渗透制淡装置的实际使用情况^[11],日常使用时反渗透淡化水可用于洗涤水的补充。

利用制淡装置补偿淡水消耗的措施与油水代换系统在原理上类似,表 2 对两者进行了对比。海水制淡用于压载时采用同种液体进行消耗补偿,不影响液舱中的液体品质,无需油水分离操作。虽然此措施一般只能间歇工作,不能始终保持满舱状态,与油水代换系统的补偿效果相比存在一定差距,但系统构成简单得多,对洗涤淡水舱舱容较大的舰船,其补偿效果也较好,可以作为实际使用过程中的一种补充压载手段。

表 2 海水制淡与油水代换用于压载的对比
Table 2 Comparison between desalination and oil-water exchanging for ballasting

所用系统/设备	压载物	压载部位	是否同种介质	压载效果	实施难度
制淡装置	淡水	淡水舱	是	较好	简单
油水代换系统	海水	燃油舱	否	好	复杂

某试验舰加装制淡装置时,将淡化水注入艏部1号淡水舱,通过洗涤水系统向全舰用户供水,该舱蓄水量满足如下关系式:

$$W_t = W_0 - \int_0^t q_c dt + \int_0^t q_i dt = W_0 - \bar{q}_c t + \bar{q}_i t \quad (7)$$

式中: W_t 为 t 时刻的蓄水量; W_0 为初始蓄水量; q_c 和 $\bar{q}_c$ 分别为瞬时和平均用水量; q_i 和 $\bar{q}_i$ 分别为制淡装置的瞬时和平均产水量。

假设该舱处于高位蓄水的初始状态,初始蓄水量为 100 t,平均用水量为 14 t/d,制淡装置的平均产水量为 14 t/d,部分补水时则为 12 t/d。为使该舱既可保持较大的蓄水量,又可与最高液位之间留有适度的裕量,避免液位控制器频繁启闭,保证制淡装置连续稳定运行,故从第 2 天起开始启用制淡装置。

由图 1 可见,在上述使用模式下,艏部 1 号淡水舱的蓄水量保持在 86 t 左右,比返航到港排水量时的典型装载状态增加约 66 t。仅该项措施就使试验舰在返航到港排水量时的重心高度下降约 0.06 m,初稳性高增加 0.05 m,抗风能力增大约 1.48 m/s,压载效果明显。此项措施有效减少了因淡水消耗对稳性产生的不利影响。

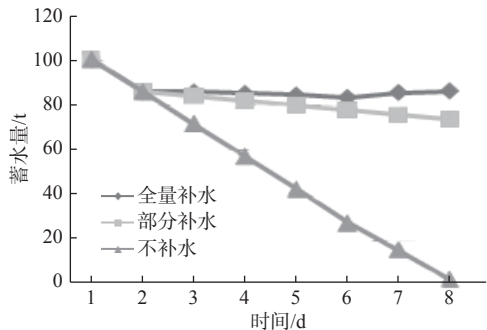


图 1 使用制淡装置对某淡水舱蓄水量变化的影响

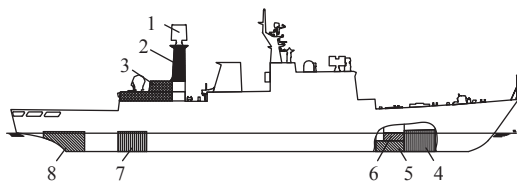
Fig. 1 Storage of a fresh water tank affected by desalination device

2 某试验舰加改装工程的综合压载及稳性控制

2.1 工程背景概述

试验舰加改装工程涉及了加装被试系统和被试雷达等装备,在完成自身试验的基础上,再进行相互间的配合试验。加装被试雷达前,该舰已完成了被试系统的加装和试验,此时舰船稳性虽仍满足规范的要求,但已接近临界状态。对于加装被试雷达,因其天线重量较大,为满足架高要求,需安装在后桅的顶部,但超过了后桅的设计承载能力,需对后桅的主体结构进行加强,但又进一步造成较高部位的重量增加。被试雷达系统

其他重量较大的设备及相关参试设备均布置安装在艉部上层建筑所在区域的试验舱内,如图 2 所示。根据估算,上述加改装方案及其牵连工程相当于在驾驶室顶部的高度位置增加了约 23 t 的重量,对全舰的重量和重心影响较大(使全舰重心高度升高约 0.06 m),导致舰船的稳性难以满足规范要求。



1-被试雷达天线; 2-新建的桅杆主体结构; 3-试验舱区域; 4-1,2 号淡水舱; 5-1,2 号压载水舱; 6-5 号压载水舱(原空舱); 7-3,4 和 5 号淡水舱; 8-3,4 号压载水舱

图 2 某试验舰加改装方案

Fig. 2 Refitting scheme of a testing ship

受各种因素的制约,该加改装工程及各被试装备的试验任务难以更改,必须对试验舰采取适当的稳性改善措施,确保舰船的稳性满足规范要求,在确保安全的前提下完成试验任务。

2.2 综合压载方案

试验舰当时服役已超过 10 年,一直承担着繁重的试验任务。因此,试验采用的稳性改善措施必须技术成熟、风险可控、效果良好、施工便利、易于恢复。经综合评估,决定采用压载的技术途径。

利用试验舰的现有 4 个压载水舱(共 283 t 压载水)。舰船底部区域只有少量舱室直达外底,空间有限,设备的管系较多,其他大部分区域都为液舱。而便于加设固定压载的区域多位于液舱顶部,距基线位置较高,压载效果不如液舱,且还会影响上部舱室的空间利用,若集中布置大量固定压载需对船体结构进行局部加强。此外,固定压载方式施工量较大、成本较高、试验任务结束后状态较难恢复,故宜作为保底的最终措施。

试验舰在加装某被试系统时,为了适配被试装备的安装高度,艏部试验区发射井内设置有一个局部的结构平台,其与发射井底部所在的 4 甲板之间形成了高 2 m 的空舱。但是,该空舱内结构密集、空间狭小,顶部平台之上已安装高精度的被试装备,并已完成标校。为便于施工、提高压载的舱容利用率,以及尽可能减少火工作业对船体变形的影响,采取了压载水方式,将此空舱改造为 5 号压载水舱,加设的管系与压载水系统相连,使之可装载约 28 t 压载水。

试验舰的原设计未配置制淡装置,数年前加

装了 2 台 30 t/d 的海水反渗透制淡装置,淡水舱舱容与规范要求相比有较大的裕度,可将 2 号淡水舱改为压载用途。考虑到本次加改装属于临时性质,压载的目的在于降低重心高度,只需增加固定载荷,无需动态调拨,故实施此压载措施时采用了“软”改装方案。即将 2 号淡水舱装满淡水但不使用,通过使用管制,在不改变淡水系统物理状态的情况下,将该舱改为压载用途。上述方案避免了淡水系统与压载水系统的相关管系的改造,减小了施工范围,便于试验任务完成后的状态恢复。

该试验舰日均淡水消耗约 14 t,加装的 2 台 30 t/d 的海水反渗透制淡装置在“一备一用”的工作模式下,每天的制淡量基本可满足正常条件下的淡水消耗需求。因此,利用制淡装置对 1,3 号淡水舱及时补充洗涤水,在合适的管理使用模式下,使洗涤淡水舱始终保持在较大的装载量状态,减少了因淡水过量消耗对稳性的影响。

根据上述分析,确定了如下 4 种基本压载措施:

- 1) 利用试验舰原有的 4 个压载水舱压载,共可装载 283 t 压载水,记为 B₁;
- 2) 将发射井底部空舱改为 5 号压载水舱,可

- 装载约 28 t 压载水,记为 B₂;
- 3) 将 2 号淡水舱装满淡水并实施使用管制,改为压载用途,可装载 110.5 t 淡水,记为 B₃;
- 4) 如上述措施仍不能满足要求,根据需要加装固定压载,记为 B₄。
- 此外,还确定了以下补充压载措施:利用制淡装置对 1,3 号淡水舱及时补给洗涤水,记为 B₅。但该措施在稳性核算时不予计入,仅用于指导使用。
- 实际采用的压载方案可为基本压载措施的组合,按 B₁, B₁∧B₂, B₁∧B₂∧B₃, B₁∧B₂∧B₃∧B₄ 的优先顺序实施,即先采用 B₁ 并进行稳性校核,若不满足要求,则在其基础上再叠加 B₂,依次类推,直至稳性满足规范要求。
- 根据试验舰加改装时的技术状态,对实施各组压载方案后的稳性进行了校核,结果表明,采用 B₁∧B₂∧B₃ 压载措施后舰船的稳性已满足规范要求。因此,在实际使用过程中 5 个压载水舱和 2 号淡水舱始终保持满舱状态,没有采用 B₄ 固定压载的措施,有效降低了工程成本。尤其值得一提的是, B₃ 和 B₅ 压载措施确保了在实船使用过程中有效发挥作用。各淡水舱和压载水舱的装载情况如表 3 所示。

表 3 改装前后部分液舱的用途					
Table 3 Relevant liquid tanks and their usage before and after refitting					
舱名	最大有效装载量/t	改装前用途	改装后用途	所属压载措施	装载状态
1号淡水舱	110.5	洗涤	洗涤	B ₅	较满
2号淡水舱	110.5	洗涤	压载	B ₃	满
3号淡水舱	105.7	洗涤/饮用	洗涤/饮用	B ₅	较满
4号淡水舱	—	饮用	饮用	—	—
5号淡水舱	—	饮用	饮用	—	—
1号压载水舱	51.5	浮态调整/压载	压载	B ₁	满
2号压载水舱	51.5	浮态调整/压载	压载	B ₁	满
3号压载水舱	90.0	浮态调整/压载	压载	B ₁	满
4号压载水舱	90.0	浮态调整/压载	压载	B ₁	满
5号压载水舱（原发射井底舱）	28.0	空舱	压载	B ₂	满

2.3 压载和稳性控制效果

根据倾斜试验结果,对试验舰采用综合压载措施后的稳性进行了计算。各排水量状态下始终保持 5 个压载水舱和 2 号淡水舱均为满舱状态。由于实际使用中制淡装置补充淡水可能存在各种状态,对此尚无正式规定,因此 B₅ 仅作为使用建议,计算结果中不包含该措施带来的影响。各排水量状态的稳性控制结果如表 4 所示。由表可见,采用综合压载措施后,舰船的重心高度明显

表 4 采用压载后的稳性控制效果				
Table 4 Stability control effect after ballasting				
排水量状态	压载措施	重心高度降低/m	初稳性高增大/m	抗风能力增大/(m·s ⁻¹)
返航到港排水量	B ₁ ∧B ₂ ∧B ₃ ∧(B ₅)*	0.38	0.31	12.18
标准排水量	B ₁ ∧B ₂ ∧B ₃	0.35	0.27	10.38
正常排水量	B ₁ ∧B ₂ ∧B ₃	0.31	0.25	9.64
满载排水量	B ₁ ∧B ₂ ∧B ₃	0.27	0.24	8.89

注: (B₅)*表示使用建议, 计算结果中不包含该措施带来的影响。

降低,有效补偿了加改装工程引起的重心上升带来的不利影响。初稳性高和抗风能力均得到较大的提升,该舰的稳性全面满足了规范的相关要求。在加改装工程结束后,该舰作为被试雷达及被试系统等装备的海试平台,成功保障完成了相关的试验任务,此外还经受了远海航行的考验,充分证明了综合压载方案是提升该舰稳性的有效技术措施。

3 结 语

为解决某试验舰因加装被试装备和实施牵连工程引起的重心升高的问题,本文采用了由各种压载水措施组成的综合压载方案,在未用固定压载的情况下满足了规范的稳性要求。在舰船使用过程中利用压载水改善稳性完全符合相关规范的条款规定和原则精神。

1) 在综合压载方案中,始终保持5个压载水舱和2号淡水舱为满舱状态,共可装载421.5 t压载用水,相比原船最大压载水装载能力283 t,增加了138.5 t,相当于原有装载能力的49%。采用上述压载措施后,该舰在正常排水量时重心高度降低0.31 m,初稳性高增加0.25 m,抗风能力增加9.64 m/s;满载排水量时重心高度降低0.27 m,初稳性高升高0.24 m,抗风能力增大8.89 m/s,全面满足了规范的相关要求,并成功经受了实船使用考验。

2) 在新增的138.5 t定常压载中,近80%是通过对2号淡水舱进行使用管制实现的。若计及利用制淡装置对洗涤淡水舱补充淡水,综合压载方案中“软”方法所占比重更大。所提方案有效减少了加改装的施工量,降低了工程成本,且便于试验结束后的状态恢复,取得了很好的成效。

3) 对淡水舱的使用管制以及利用制淡装置补充淡水等“软”方法的实际使用效果在很大程度上取决于舰员的使用。该舰全体舰员严明的组织纪律、高效的组织管理和优秀的人员素质,对确保综合压载方案在该舰的使用过程中有效可靠地发挥作用,并最终出色地完成试验任务起到了十分重要的作用。

4) 本文采用的综合压载措施对同类舰船的临时性加改装工程具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 盛振邦,杨尚荣,陈雪深. 船舶静力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
SHEN Z B, YANG S R, CHEN X S. Ship statics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992 (in Chinese).
- [2] 孙安林,王中华. 海船重大改装的判别与规范指引[J]. 船舶工程, 2019, 41(4): 95–99.
SUN A L, WANG Z H. Discrimination and normative guidelines for major conversion of sea-going ships[J]. Ship Engineering, 2019, 41(4): 95–99 (in Chinese).
- [3] 周巍,张维俊. 水面舰船研制过程中重量重心控制办法[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(4): 1–5.
ZHOU W, ZHANG W J. Control methods of weight and center of gravity in ship design and construction[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(4): 1–5 (in Chinese).
- [4] 张祥瑞,王文刚. 基于油水代换系统的船舶完整稳性分析研究[J]. 船舶, 2009, 5(5): 5–9.
ZHANG X R, WANG W G. Ship intact stability based on oil-water replaceable system[J]. Ship & Boat, 2009, 5(5): 5–9 (in Chinese).
- [5] LIU Z J, JIANG J Y, GAN Z Q, et al. Ballast water dynamic allocation optimization model and analysis for safe and reliable operation of floating cranes [J]. Annals of Operations Research, 2019.
- [6] BAILEY S A. An overview of thirty years of research on ballast water as a vector for aquatic invasive species to freshwater and marine environments[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2015, 18(3): 261–268.
- [7] KOTINIS M, PARSONS M G, LAMB T, et al. Development and investigation of the ballast-free ship concept[J]. Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2005, 112(9): 206–240.
- [8] 邵开文,马运义. 舰船技术与设计概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 597–598, 662–670.
SHAO K W, MA Y Y. Introduction to technology and design of ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 597–598, 662–670 (in Chinese).
- [9] 毛献群,钟涛. 坞式舰船压载系统研究[J]. 船舶, 2005, 16(5): 12–14.
MAO X Q, ZHONG T. Study of ballast system for dock type ship[J]. Ship & Boat, 2005, 16(5): 12–14 (in Chinese).
- [10] 王凤良,王一帆. 某型船油水代换系统设计和试验方法改进探讨[J]. 船舶, 2017, 28(3): 54–60.
WANG F L, WANG Y F. Improvement of design and experiment method for oil-water replaceable ship system[J]. Ship & Boat, 2017, 28(3): 54–60 (in Chinese).
- [11] 钱卫忠. 舰船饮用水和洗涤水系统现状及其改进设计[J]. 造船技术, 2016, 44(5): 89–91.
QIAN W Z. Improvement of marine and warship's fresh water system[J]. Marine Technology, 2016, 44(5): 89–91 (in Chinese).