

全回转起重船压载调拨方案优化决策分析

孟 珣^{1,2}, 唐 品¹, 李德江^{1,3*}, 孙龙龙⁴

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 烟台中集来福士海洋工程有限公司, 山东 烟台 264035; 4. 青岛瀚海海洋工程设计研究有限公司, 山东 青岛 266100)

摘 要:以多功能全回转起重船为研究对象,针对起重机起吊重物并做大角度回转作业工况,建立多目标优化数学模型,以各个压载舱调载量最大值最小、起重机起吊重物回转过程中船舶纵倾角最小和横倾角最小作为三个优化目标,利用多目标遗传算法,求解获得配载方案最优集,同时利用基于熵权的 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)方法,客观准确地得到压载调拨与吊机作业配合的最终配载方案。结果表明利用 AQWA(Advanced Quantitative Wave Analysis)静水力分析可较为准确地获得船舶重心与倾角的关系,且多目标优化方法可输出多个最优配载方案,多准则决策方法可结合工程经验和客观性输出最终配载方案,该优化决策方法可高效得到简单有效的起重船配载方案,为工程中的压载优化提供参考。

关键词:船舶压载调拨;多目标遗传算法优化;TOPSIS 多准则决策

中图分类号:U674.35

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)02-0096-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.02.002

引用格式:MENG X, TANG P, LI D J, et al. Analysis of optimization and decision-making of ballast allocation scheme for revolving crane vessel[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 96-106. 孟珣, 唐品, 李德江, 等. 全回转起重船压载调拨方案优化决策分析[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 96-106.

随着海洋开发技术的不断发展,模块化、大型化成为海洋工程建设的主要特点,而起重船作为海洋工程建设中的关键装备,也日趋重型化^[1]。起重船按照起重机械的结构形式,可分为固定扒杆式和回转式。对于全回转起重船,其起吊、回转作业时会导致船体纵向、横向倾斜,影响船舶自身安全,随着起重船起重量级的大型化,该问题更为突出^[2]。吊装物的重量产生巨大的倾覆力矩,静横倾角可能达到 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$,通过反向加载大量压载水以部分抵消吊重产生的倾斜力矩可使船舶处于安全浮态。回转起重机在船的左右舷带载回转时,倾覆力矩在短时间内反向,需要迅速调拨压载水,否则会使船舶倾斜加剧,威胁作业安全^[3]。

船舶配载过程需压载系统及压载水加载、调拨的支持,从而保证其安全高效工作,国内外针对船舶配载问题进行了相关研究。夏华波等^[4]对遗传算法进行了改进,提出种群全部交叉和分布式动态惩罚函数法等改进机制,对驳船配载中的调载水量分布进行优化,以便在较短时间内完成配载作业。Bara 等^[5]建立了运行状态的船体受力分析模型,基于图论,提出了吊装货物时压载系统稳性最优控制策略,以降低能耗。刘晓宇^[6]以起重船起吊回转工作过程中压载水总调拨量最小为优化目标,考虑稳性要求,建立起重船压载水调拨量优化模型。刘志杰等^[7]以起重船舶各压载舱室液位变化量为优化变量,压载舱压载水总调配量最小为优化目标,起重调配过程船体平衡为约束条件,建立了起重船舶压载水调配优化模型。潘伟等^[8]提出了一种起重船压载水调节数学模型,实现了在浮态满足规范要求下,起重船作业过程中吊臂匀速回转及压载水总调节

收稿日期:2021-03-05

资助项目:国家自然科学基金面上项目——浮式多体系统近场流固耦合与多体运动相关性研究(52071307);工业和信息化部高技术船舶科研项目——超大型海上油田设施一体化拆解装备关键技术研究(MC-201713-H02);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目——海上透水结构体设计技术研究(2020CXGC010702)

作者简介:孟 珣(1973—),女,副教授,博士,硕士研究生导师,主要从事浮式多体系统多场多体运动与动力相关性方面研究. E-mail: mengxun@ouc.edu.cn

*** 通信作者:**李德江(1982—),男,工程师,硕士,主要从事海洋工程结构物方面研究. E-mail: dejiang.li@cimc-raffles.com

(王 燕 编辑)

量最小的目的。陈伶翔等^[9]建立稳性计算模型,对起重机吊载工况进行模拟,分析在艏吊、艉吊和联合吊三种工况下平台在吃水一定时的横纵倾变化,并运用快速调载的方式将平台调平,给出了调平后的配载方案。

上述研究多以压载水总调拨量最小作为单一优化目标,起重机每回转一个小角度确定一次配载方案,在回转大角度时最终确定的配载方案较为复杂,增大操纵难度。因此,本文在起重机起吊重物并做大角度回转时,基于多目标遗传算法,以各个压载舱调载量最大值最小、起重机起吊重物并回转过程中船舶纵倾角最小和横倾角最小作为3个优化目标,以期获得配载方案最优集,并利用基于熵权的 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)方法,以期客观准确地得到最终的方案,为起重船压载调拨提供参考。

1 起重船压载调拨多目标优化及多准则决策方法

1.1 起重船浮态

在随船坐标系 $Ox'y'z'$ 中,以坐标值 (x'_G, y'_G, z'_G) 表示船舶重心 G 的位置,坐标值 (x'_B, y'_B, z'_B) 表示船舶浮心 B 的位置(图1),则船体在静水中任意状态下的平衡方程^[10]为

$$\begin{cases} W = \Delta \\ x'_B - x'_G = (z'_G - z'_B) \tan \theta, \\ y'_B - y'_G = (z'_G - z'_B) \tan \phi \end{cases} \quad (1)$$

式中, W 为船舶重量; Δ 为排水量; θ 为纵倾角,通常以向首部倾斜为正,向尾部倾斜为负; ϕ 为横倾角,通常以向右舷倾斜为正,向左舷倾斜为负。

起重船在作业时,应按照《船舶与海上设施起重设备规范》^[11]规定,允许船舶最大纵倾角为 2° ,最大横倾角为 5° 。在图1中, $Oxyz$ 为固定在地表的惯性坐标系。在惯性坐标系中,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) ,则平衡状态的方程为

$$\begin{cases} x_G = x_B \\ x_G = x'_G \cos \theta + z'_G \sin \theta \\ y_G = y_B \\ y_G = y'_G \cos \phi + z'_G \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ 为纵倾角; ϕ 为横倾角; x'_G, y'_G 和 z'_G 为船舶重心在随船坐标系下的纵向、横向与垂向坐标。

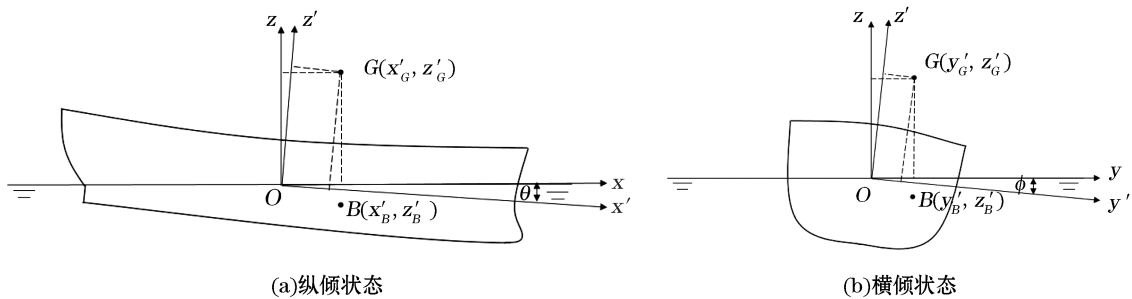


图1 静水中的船舶任意状态

Fig.1 Free position of a vessel in the calm water

1.2 多目标优化

起重船在完成重物起吊和大角度回转作业过程时,在起吊前压载方案的基础上,需要配合吊机作业完成2次压载调拨。本文建立起重船配载方案优化数学模型,利用遗传算法,其中优化目标可为单个目标或多个目标,求解优化模型得到最优解或最优解集。

1.2.1 起吊前加载优化数学模型

由式(1)导出船体在正浮时的平衡方程为

$$\begin{cases} W = \Delta \\ x'_B = x'_G \\ y'_B = y'_G = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中, W 为船舶重量, Δ 为排水量; x'_B 与 y'_B 为船舶浮心在随船坐标系下的纵向与横向坐标; x'_G 与 y'_G 为船舶重心在随船坐标系下的纵向与横向坐标。

起吊前的加载方案以船舶初稳性高 GM 最大为优化目标, 利用单目标遗传算法求解得到最优解, 优化约束条件的公式为

$$\begin{cases} W = \Delta \\ \theta = \phi = 0 \\ 0 \leq G_i \leq G_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{i=1}^N G_i = C \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

式中, W 为船舶总重量, Δ 为排水量; θ 为纵倾角, ϕ 为横倾角; $0 \leq G_i \leq G_{\max}$ 表示 N 个压载舱中压载水加载量的约束; $\sum_{i=1}^N G_i = C$ 表示船舶吃水一定时压载水总量保持不变。

1.2.2 起吊重物时压载调拨优化数学模型

起重船在起吊重物时, 需完成一次压载调拨, 在压载泵工作功率一定的情况下, 各压载舱调拨量最大值决定配载时间, 为保证起重机可在较短时间内起吊重物并且船舶处于安全浮态, 调拨方案以各个压载舱调拨量最大值最小、平衡状态时船舶纵倾角最小和横倾角最小作为 3 个优化目标, 利用多目标遗传算法求解得到最优解集, 优化约束条件的公式为

$$\begin{cases} W = \Delta \\ 0 \leq \theta \leq 2 \\ 0 \leq \phi \leq 5 \\ 0 \leq M_i \leq M_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{i=1}^N G_i = C \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases}, \quad (5)$$

式中, W 为船舶总重量, Δ 为排水量; θ 为纵倾角, ϕ 为横倾角; $0 \leq M_i \leq M_{\max}$ 表示 N 个压载舱压载水调拨量的约束; $\sum_{i=1}^N G_i = C$ 表示调拨时压载水总量保持不变。

1.2.3 起吊重物回转时压载调拨优化数学模型

从实际全回转起重船的作业工况看, 为保证吊物不会出现剧烈的摆动, 吊臂应保持匀速回转。起重船起吊重物大角度回转时, 相应压载舱的压载泵以一定功率开始调拨压载水, 压载舱内的压载水量不断变化, 回转至指定位置时, 最大调拨量的压载舱压载泵结束工作。为保证配载作业可在较短时间内完成并且船舶在此过程中处于安全浮态, 将起重机大角度回转分为 S 个阶段, 调拨方案以各个压载舱调拨量最大值最小、回转过程中各阶段船舶纵倾角最大值最小和横倾角最大值最小作为 3 个优化目标, 利用多目标遗传算法求解得到最优解集, 优化约束条件的公式与式(5)一致。

1.3 多准则决策方法

利用多目标优化得到的最优解集, 以主观判断和工程经验获得最终的配载方案, 缺乏客观性。因此本文

引入多准则决策概念,利用基于熵权的 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)方法,客观准确地得到最终的方案。TOPSIS 法通过对有限评价方案与理想目标相比较,按与理想目标的接近程度对各个方案进行排序,以此评价现有方案的优劣。在本文中,除了将 3 个优化目标作为决策属性外,考虑到自由液面对初稳性高的不利影响,在完成压载调拨后,尽可能保证较多的满舱数量,因此将满舱数量作为第四个决策属性,并假定各压载舱内压载水量达到 90%即为满舱。

2 算例分析

本文以多功能全回转起重船为研究对象,其船体主尺度参数见表 1。该起重船拥有 12 个压载舱用于压载调拨,左、右舷对称布置 6 个(图 2),编号为 5-2P,5-2S,6-2P,6-2S,7-2P,7-2S,8-2P,8-2S,9-2P,9-2S,10-2P 和 10-2S。压载舱为空间立方体,底部垂向坐标均为 3.2 m,顶部垂向坐标均为 16 m,各个压载舱矩形底面的长与宽如图 2 所示,其中 6-2P,6-2S,7-2P,7-2S,8-2P,8-2S,9-2P 和 9-2S 压载舱用于调节船舶横倾,5-2P,5-2S,10-2P 和 10-2S 压载舱用于调节船舶纵倾,起重机位于起重船左舷。该起重船构成部分及重心位置如表 2 所示,其中基平面、中纵剖面 and 尾部铅垂面的交点作为原点,起重机臂架和偏心转台的重心坐标为起重机未作业时的坐标。

表 1 半潜起重船主尺度参数

Table 1 Main dimensions of a semi-submersible crane vessel

主尺度参数	参数值/m
全船长	233
型宽	56
型深	16
设计吃水	9

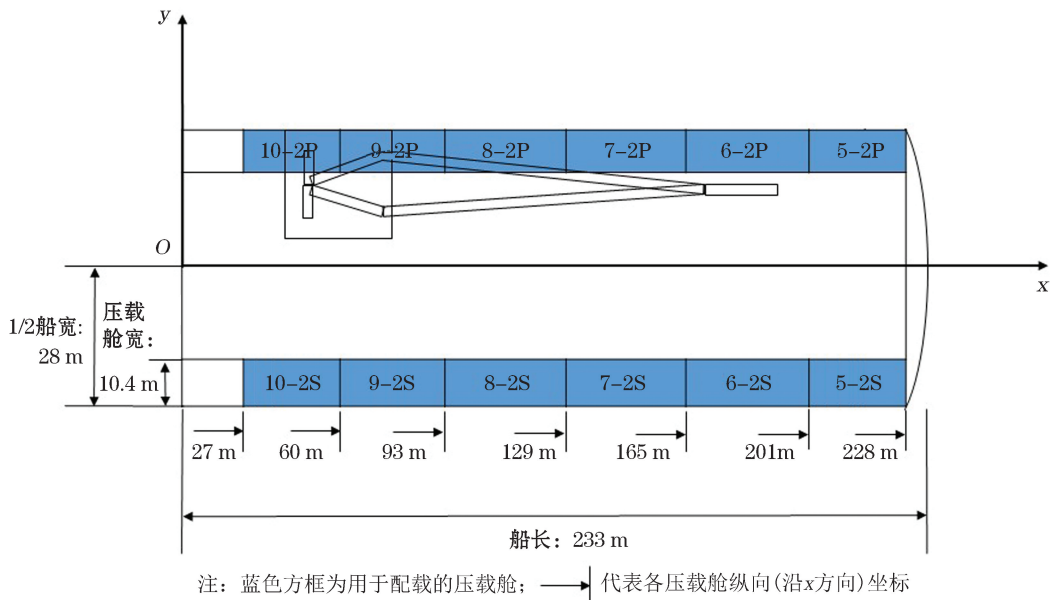


图 2 起重船压载舱布置及相关尺寸

Fig.2 Layout and related dimensions of the ballast tanks of crane vessel

表 2 起重船构成部分及重心位置

Table 2 The components and gravity center position of the crane vessel

构成部分	质量/t	重心坐标/m		
		X	Y	Z
空船	47 300	127.381	1.052	17.231
臂架	1 660	122.533	18.500	54.980

续表				
构成部分	质量/t	重心坐标/m		
		X	Y	Z
偏心转台	3 540	32.800	18.500	49.200
其他	11 453.4	135.000	-12.744	10.844

2.1 起重机起吊前的加载方案

起重机起吊前,船舶吃水为 8.7 m。基于船体的三维模型,利用 AQWA(Advanced Quantitative Wave Analysis)软件完成静水力计算,正浮时,船舶浮心 B 在三维模型坐标系中的坐标为(115.090 14 m,0 m,4.603 972 6 m),排水量为 90 154.771 88 t,水线面相对 x 轴的面积二阶矩为 2 804 765.5 m^4 。基于 1.2 节的优化数学模型,利用 MATLAB(Matrix Laboratory)软件编写单目标遗传算法,初始种群为 50 个,交叉率为 0.9,变异率为 0.7,迭代次数为 200 次,求解得到的配载方案见表 3,由此得到最大初稳性高为 21.021 9 m,相应重心高度为 15.470 4 m。

表 3 起重机未起吊前配载方案
Table 3 The scheme of ballast allocation before crane lifting load

压载舱编号	配载方案中各压载舱加载量/t	压载舱编号	配载方案中各压载舱加载量/t
10-2P	3 929.5	10-2S	3 941.5
9-2P	3 294.1	9-2S	3 243.9
8-2P	2 735.2	8-2S	2 768.2
7-2P	1 873.1	7-2S	1 879.8
6-2P	1 020.4	6-2S	1 011.4
5-2P	248.4	5-2S	255.8

2.2 起重机起吊重物时的配载方案

起重机 90°起吊 5 000 t 重物,配载方案采用 6-2P 与 6-2S,7-2P 与 7-2S,8-2P 与 8-2S,9-2P 与 9-2S,10-2P 与 5-2P,10-2S 与 5-2S 互拨方式,压载水总量保持不变,此时船舶吃水为 9.120 9 m,正浮时船舶浮心 B 在三维模型坐标系中的坐标为(114.677 86 m, 0 m, 4.830 325 m),排水量为 95 154.771 88 t,水线面相对 x 轴的面积二阶矩为 2 846 263 m^4 。此时起重机臂架重心坐标变为(37.2 m, 49.23 m, 127.07 m),起重机偏心转台重心坐标变为(37.2 m, 14.1 m, 49.2 m),起吊重物的坐标为(37.2 m, 54.5 m, 68.5 m)。

由式(2)导出,在随船坐标系中,船舶重心的纵、横坐标公式为

$$\begin{cases} x'_G = \frac{x_G - z'_G \sin \theta}{\cos \theta} \\ y'_G = \frac{y_G - z'_G \sin \varphi}{\cos \varphi} \end{cases}, \tag{6}$$

式中, x'_G , y'_G 和 z'_G 为船舶重心在随船坐标系下的纵向、横向、垂向坐标; x_G 与 y_G 为船舶重心在惯性坐标系下的纵向与横向坐标; θ 为纵倾角; φ 为横倾角。

利用 AQWA 计算不同纵倾角、横倾角时浮心的坐标,利用拟合程序得到倾斜角 θ 与浮心 x 方向坐标值(基于惯性坐标系)的函数关系公式为

$$x_B = -184.3 \exp(-0.04281\theta) + 182.5, \quad (7)$$

式中, x_B 为船舶浮心在惯性坐标系下的纵向坐标, θ 为纵倾角。

同理,利用拟合程序得到倾斜角 ϕ 与浮心 y 方向坐标值(基于惯性坐标系)的函数关系公式为

$$y_B = 312.6 \exp(-0.001476\phi) - 312.6, \quad (8)$$

式中, y_B 为船舶浮心在惯性坐标系下的横向坐标, ϕ 为横倾角。

采用互拨配载方式时,因为 6-2P 与 6-2S, 7-2P 与 7-2S, 8-2P 与 8-2S, 9-2P 与 9-2S 舱室底面积相等,互拨不改变船舶重心在 z 方向的坐标值;而 10-2P 与 5-2P, 10-2S 与 5-2S 舱室底面积相差不大,互拨对船舶重心在 z 方向的坐标值影响很小,所以起重机 90° 起吊 5 000 t 重物时,压载水调配时假定不改变船舶重心在 z 方向的坐标值,即 $z'_G = 9.1360$ m。在惯性坐标系中,平衡状态下, $x_G = x_B$, $y_G = y_B$,代入式(6)得出在船舶未倾斜处于正浮时,重心和浮心在 x 和 y 方向的相对位置与纵倾角 θ ,横倾角 ϕ 的关系公式为

$$\Delta x_{GB} = X_G - X_B = \frac{-184.3 \exp(-0.04281\theta) + 182.5 - 9.1360 \sin \theta}{\cos \theta} + (116.5 - 114.67786), \quad (9)$$

$$\Delta y_{GB} = Y_G - Y_B = \frac{312.6 \exp(-0.001476\phi) - 312.6 - 9.1360 \sin \phi}{\cos \phi} - 0, \quad (10)$$

式中, Δx_{GB} 与 Δy_{GB} 为在船舶未倾斜处于正浮时,重心和浮心在纵向(x 方向)、横向(y 方向)的相对位置; θ 为纵倾角; ϕ 为横倾角。

基于本文中优化数学模型,利用 MATLAB 软件编写多目标遗传算法,初始种群为 50 个,最优个体系数为 0.3,迭代次数为 200 次,停止代数为 200,求解得到的压载调拨方案 Pareto 最优解见图 3,图中横、纵倾角均取绝对值。基于本文中多准则决策,利用基于客观熵权的 TOPSIS 方法对 Pareto 最优解排序,得到 90° 起吊 5 000 t 重物最终的压载调拨方案与候选方案一和方案二,如表 4 所示。其中各压载舱调拨量最大值的熵权为 0.1871,横倾角的熵权为 0.1779,纵倾角的熵权为 0.1716,满舱个数的熵权为 0.4636。

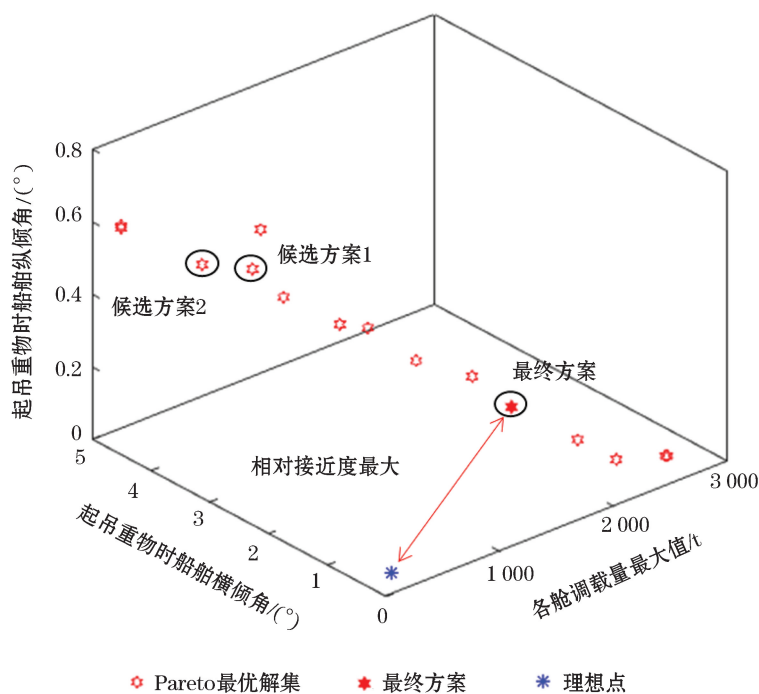


图 3 90° 起吊 5 000 t 重物压载调拨方案 Pareto 图

Fig.3 The Pareto map of ballast allocation scheme for lifting a load of 5 000 t at 90°

表 4 压载调拨方案最优集
Table 4 The optimal set of ballast allocation schemes

压载调拨方案相关参数	最终方案对应参数值	候选方案一对应参数值	候选方案二对应参数值
9-2P 至 9-2S 调拨量/t	995.3	927.8	916.7
8-2P 至 8-2S 调拨量/t	1 777.1	1 160.6	772.9
7-2P 至 7-2S 调拨量/t	1491.4	1 147.9	521.5
6-2P 至 6-2S 调拨量/t	925.0	454.5	323.9
10-2P 至 5-2P 调拨量/t	252.3	204.8	210.4
10-2S 至 5-2S 调拨量/t	1 726.5	961.2	816.6
各压载舱调拨量最大值/t	1 777.1	1 160.6	916.7
横倾角/(°)	1.309	2.558	3.519
纵倾角/(°)	0.188	0.374	0.405
满舱个数	2	1	1
相对接近度	0.799 9	0.504 0	0.489 8

基于最终方案和 2 个候选方案,起重机起吊 5 000 t 重物逆时针回转 90°时,假设不进行压载调拨,在回转过程中船舶横倾角及纵倾角的变化如图 4 所示,分析表明,起重机 90°起吊 5 000 t 重物后,船舶处于左倾、尾倾状态,逆时针回转 90°时,若不进行压载调拨,船体由左倾状态向右倾状态过渡,整个回转过程中船舶横倾角不超过 5°、纵倾角不超过 2°,满足规范^[11]要求。且起吊 5 000 t 重物后,船体左倾角度越大,完成逆时针回转后右倾角度越小。

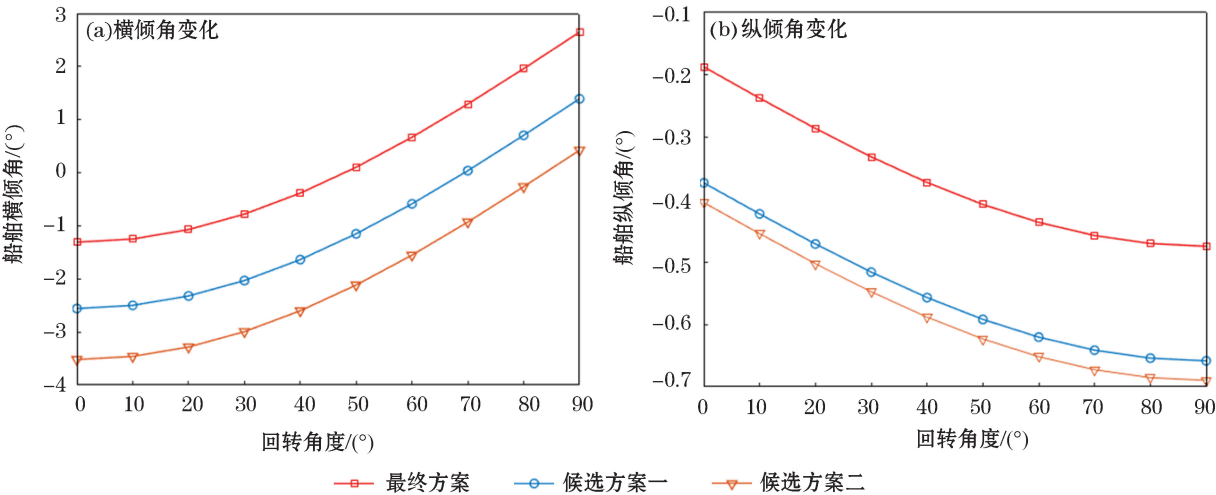


图 4 不进行压载调拨时回转过程中船舶横、纵倾角变化

Fig.4 Changes of the heel and trim angles of the vessel during rotating at the time without ballast allocation

在实际工程中,为确保起重机安全作业,要求船舶最大横倾角和最大纵倾角为 1°,因此根据工程要求,本文修改优化模型中的约束,在其他条件不变的情况下重新完成求解,得到的压载调拨方案见图 5,图 5 中横、纵倾角均取绝对值。利用基于客观熵权的 TOPSIS 方法对 Pareto 最优解排序,得到 90°起吊 5 000 t 重物最终的压载调拨方案,见表 5。其中各压载舱调拨量最大值的熵权为 0.367,横倾角的熵权为 0.368 2,纵倾

角的熵权为 0.261 8,满舱个数的熵权为 0。

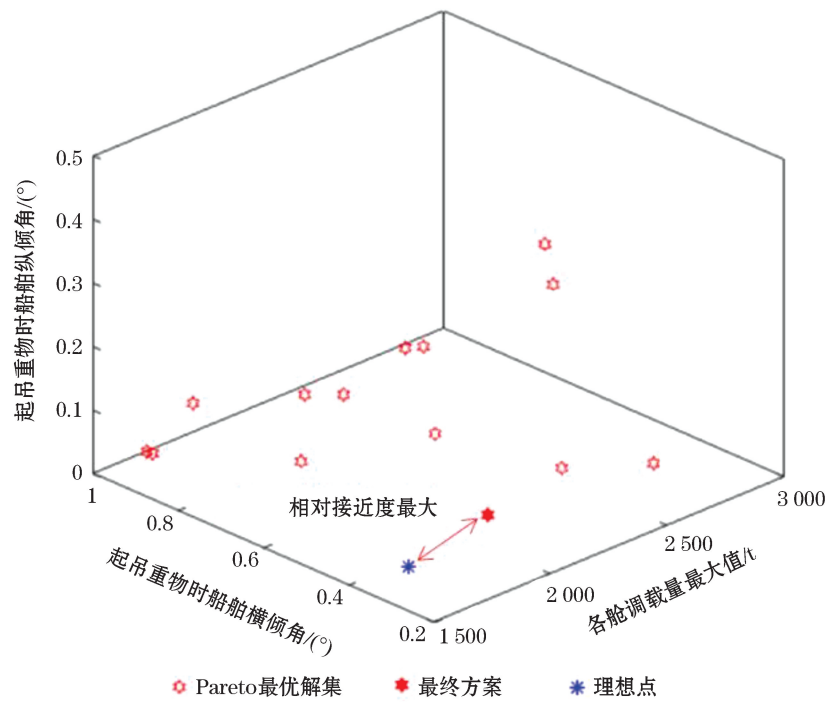


图 5 根据工程要求的 90°起吊 5 000 t 重物压载调拨方案 Pareto 图

Fig.5 The Pareto map of ballast allocation scheme for lifting a load of 5 000 t at 90° according to engineering requirements

在 90°起吊 5 000 t 重物时,对比满足规范要求下得到的最终配载方案发现,横、纵倾角不超过 1°约束下获得的最终配载方案中,各压载舱调拨量增大,但横、纵倾角均很大程度地减小。

表 5 90°起吊 5 000 t 重物压载调拨最终方案

Table 5 The final scheme of ballast allocation for lifting a load of 5 000 t at 90°

压载调拨最终方案相关参数	对应参数值	压载调拨最终方案相关参数	对应参数值
9-2P 至 9-2S 调拨量/t	1 258.4	各压载舱调拨量最大值/t	2 118.4
8-2P 至 8-2S 调拨量/t	2 118.4	横倾角/(°)	0.413
7-2P 至 7-2S 调拨量/t	1 871.5	纵倾角/(°)	0.013
6-2P 至 6-2S 调拨量/t	1 011.6	满舱个数	2
10-2P 至 5-2P 调拨量/t	978.6	相对接近度	0.903 8
10-2S 至 5-2S 调拨量/t	1 874.6		

2.3 起重机回转过程中的配载方案

在起重机完成 5 000 t 重物起吊后,当逆时针回转 90°时,配载方案依旧采用互拨方式,逆时针回转 90°后起重机臂架重心坐标变为(6.47 m, 18.5 m, 127.07 m),起重机偏心转台重心坐标变为(41.6 m, 18.5 m, 49.2 m),起吊重物坐标为(1.2 m, 18.5 m, 68.5 m)。

本文将 90°回转过程分为 9 个阶段,每个阶段回转 10°并计算相应的船舶纵倾角、横倾角,基于本文中的

优化数学模型,以 9 个阶段船舶纵倾角最大值最小、横倾角最大值最小、各个压载舱调载量最大值最小作为 3 个优化目标,利用 MATLAB 编写多目标遗传算法,初始种群为 50 个,最优个体系数为 0.3,迭代次数为 100 次,停止代数为 100,求解得到的压载调拨方案,如图 6 所示,图中横、纵倾角均取绝对值。

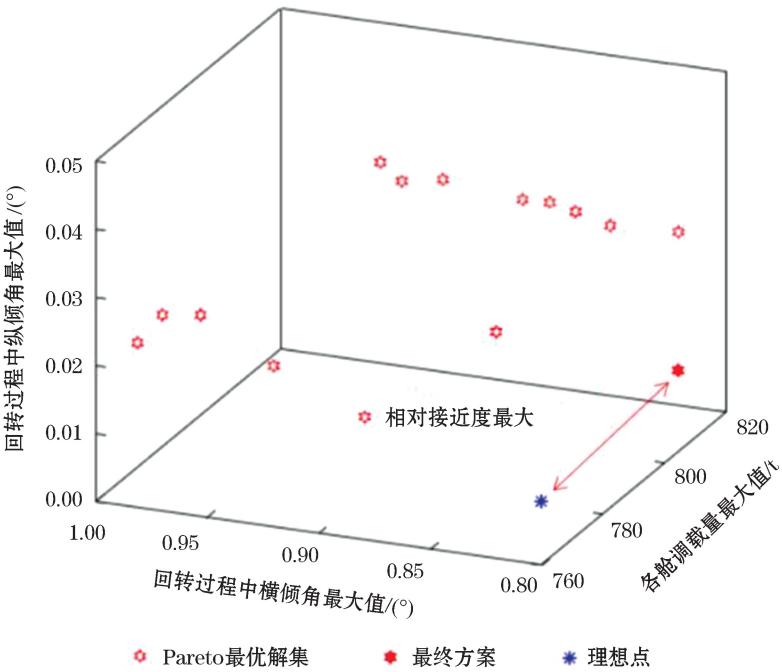


图 6 起吊 5 000 t 重物逆时针回转 90°压载调拨方案 Pareto 图

Fig.6 The Pareto map of ballast allocation scheme for lifting a load of 5 000 t when rotating 90° counterclockwise

利用基于客观熵权的 TOPSIS 方法,得到起吊 5000 t 重物逆时针回转 90°最终的压载调拨方案,见表 6。其中各压载舱调拨量最大值的熵权为 0.329,横倾角的熵权为 0.293,纵倾角的熵权为 0.378,满舱个数的熵权为 0。

表 6 起吊 5 000 t 重物逆时针回转 90°压载调拨最终方案

Table 6 The final scheme of ballast allocation for lifting a load of 5 000 t when rotating 90° counterclockwise

压载调拨最终方案相关参数	对应参数值	压载调拨最终方案相关参数	对应参数值
9-2S 至 9-2P 调拨量/t	809.7	各压载舱调拨量最大值/t	819.3
8-2S 至 8-2P 调拨量/t	808.9	横倾角/(°)	0.821
7-2S 至 7-2P 调拨量/t	819.3	纵倾角/(°)	0.005
6-2S 至 6-2P 调拨量/t	817.7	满舱个数	0
10-2P 至 5-2P 调拨量/t	428.7	相对接近度	0.946 5
10-2S 至 5-2S 调拨量/t	737.1		

回转过程中基于最终优化方案进行压载调拨时船舶横、纵倾角的变化如图 7 所示,分析可知,若要求船舶横、纵倾角不超过 1°,在回转过程中不进行压载调拨时,船体横倾角会达到 3.6°,不满足要求,而优化决策后船体横倾角最大减小 2.727°,纵倾角最大减小 0.270°。

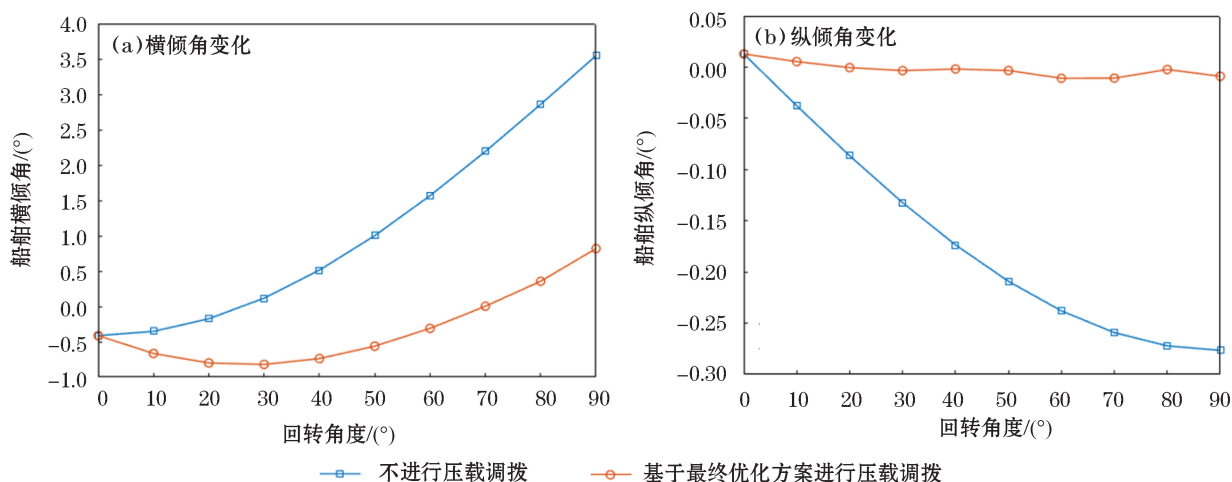


图7 回转过程中基于最终优化方案进行压载调拨时船舶横、纵倾角变化

Fig.7 Changes of the heel and trim angles of the vessel during the rotating at the time when adjusting the ballast allocation based on the finally optimized scheme

3 结 论

本文以多功能全回转起重船为研究对象,建立了起吊前加载优化数学模型,并利用单目标遗传算法求解获得作业前的压载方案。基于该压载方案,建立了起吊重物时及起吊重物回转时压载调拨优化数学模型,并利用多目标遗传算法求解得到压载调拨方案的最优解集。针对该最优解集,引入基于熵权的 TOPSIS 多准则决策方法,客观准确地得到压载调拨与吊机作业配合的最终配载方案,以保证起重船安全高效地完成作业。同时得到以下结论:

1)利用 AQWA 静水力分析可较为准确地获得船舶重心与倾角的关系,为多目标优化提供起重船作业过程中的船体倾角变化;优化将输出多个最优配载方案供实际工程参考。

2)基于熵权的 TOPSIS 多准则决策方法可结合工程经验和客观性输出最终配载方案,最终配载方案能较大程度地减小船体横倾角,以满足实际工程要求。

参考文献(References):

- [1] SUN L M. Development of hoisting salvage at sea and its basic equipment large crane vessel in china[J]. Ship Engineering, 2013, 35(1): 5-8, 12. 孙鲁闽. 我国海上起重打捞作业及其基础装备大型起重船的发展[J]. 船舶工程, 2013, 35(1): 5-8, 12.
- [2] QING Z, JIAN-JIE Z, JI H, et al. A method of dynamic modeling of a large floating crane and its external excitations[J]. Advanced Materials Research, 2010, 139/141: 2440-2445.
- [3] ZHANG Z M, XU D Z, ZHANG C, et al. Technical problems in ship type development of large crane ship[J]. Ship & Boat, 2005(1): 10-15. 张志明, 徐丹铮, 张超, 等. 大型起重船型开发的若干技术问题初探[J]. 船舶, 2005(1): 10-15.
- [4] XIA H B, JI Z S, ZHANG M X. Application of improved genetic algorithm in barge stowage planning analysis[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010, 5(6): 51-55. 夏华波, 纪卓尚, 张明霞. 改进遗传算法在驳船配载中的应用[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(6): 51-55.
- [5] BARA C, CORNOIU M, POPESCU D. An optimal control strategy of ballast system used in ship stabilization[C]//IEEE 20th Mediterranean Conference on Control and Automation. New York, USA. 2012: 878-883.
- [6] LIU X Y. Research on ballast water allocation scheme optimization of full-revolving floating crane[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. 刘晓宇. 全回转起重船压载水调拨方案优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [7] LIU Z J, LIU X Y, XIONG W, et al. Optimization model of ballast water allocation for crane ship[J]. Journal of Traffic and Transporta-

- tion Engineering, 2017, 17(2): 83-89. 刘志杰, 刘晓宇, 熊伟, 等. 起重船舶压载水调配优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 83-89.
- [8] PAN W, XIE X L, BAO T T, et al. Ballast water allocation optimization of revolving crane vessels[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(1): 189-195. 潘伟, 谢新连, 包甜甜, 等. 全回转起重船作业压载水调节优化研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(1): 189-195.
- [9] CHENG L X, MO G, ZHU J H. Optimization on stowage and stability of semi-submersible lifting disassembly platform in process of crane hoisting[J]. China Offshore Platform, 2021(1): 47-50. 陈伶俐, 莫刚, 朱见华. 半潜式起重拆解平台吊装过程中配载及稳性优化[J]. 中国海洋平台, 2021(1): 47-50.
- [10] SHENG Z B, LIU Y Z. Principle of naval architecture[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [11] China Classification Society (CCS). Rules for the lifting appliances on ships and offshore installations: chapter 3 crane elevator and springboard[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 22. 中国船级社. 船舶与海上设施起重设备规范: 第三章 起重机、升降机与跳板[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 22.

Analysis of Optimization and Decision-Making of Ballast Allocation Scheme for Revolving Crane Vessel

MENG Xun^{1,2}, TANG Pin¹, LI De-jiang^{1,3}, SUN Long-long⁴

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Key Laboratory of Ocean Engineering in Shandong, Qingdao 266100, China;

3. Yantai CIMC Raffles Offshore Limited, Yantai 264035, China;

4. Qingdao Hanhai Marine Engineering Design & Research Co. Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: A multi-objective optimization mathematical model is established for revolving crane vessel with multi-functions and under the conditions of the crane lifting load and doing large-angle rotation operation. By taking the minimization of the maximal allocation value of each ballast tank and the minimization of both the trim and the heel angles of the vessel during the crane lifting and revolving as three optimization objectives, an optimal set of ballast allocation schemes is worked out by using the multi-objective genetic algorithm, and then the final scheme for the coordination of ballast allocation and crane operation is objectively and accurately obtained by using TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) method which is based on entropy weight. The results show that the relationship between the gravity center and the inclination of the crane vessel can be accurately obtained through hydrostatic analysis using the AQWA (Advanced Quantitative Wave Analysis) method and several optimal ballast allocation schemes can be output by the multi-objective optimization method. The final ballast allocation scheme can be output by using multi-criteria decision-making method and combining engineering experience and objectivity. By using the above method, a simple and effective ballast allocation scheme can be obtained, thus providing references for the optimization of ballast scheme in the project.

Key words: ballast allocation of vessel; optimization by using multi-objective genetic algorithm; multi-criteria decision-making through TOPSIS

Received: March 5, 2021