doi:10.11887/j.cn.201905019 http://journal.nudt.edu.cn

基于两阶段算法的半潜维修船功能舱室布局*

赵瑞嘉[1,2],谢新连[1,2],赵家保[1,2]
(1. 大连海事大学 综合运输研究所,辽宁 大连 116026;2. 大连海事大学 物流研究院,辽宁 大连 116026)

摘 要:以维修舱空间、舱室邻接、舱室全局位置三个指标为目标函数,以满足高初稳性要求、保证船舶浮态等为约束条件,建立技术可行前提下半潜维修船功能舱室布局优化模型。通过设计贪婪取走启发式算法与规划求解相结合的两阶段算法,实现对模型的求解。以载重为5×10^4 t的半潜船体为载体进行设计,得到半潜维修船功能舱室优化布局方案。随着维修设备质量系数的增加,可行的布局方案数呈上升趋势。该方法可提高半潜维修船在功能舱室布局过程中决策的科学性。

关键词:半潜维修船;维修舱;布局;两阶段算法
中图分类号:U662.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)05-134-06

Layout of functional tanks in semi-submersible repair vessels based on two-stage algorithm

ZHAO Ruijia[1,2], *XIE Xinlian*[1,2], *ZHAO Jiabao*[1,2]
(1. Integrated Transport Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Logistics Research Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A layout optimization model about functional tanks in semi-submersible repair vessels was established under the premise that relevant technologies can be reached. The objective function of this model was put forward under the consideration of three factors about maintenance and repair tanks, such as tank size, tank adjacency, and tank global position. The constraints of this model were set to meet initial metacentric height requirement and guarantee to float on even keel. This optimization model was solved by a two-stage algorithm of combining greedy dropping heuristic algorithm with programming solve. The functional tanks layout solution was obtained with the aid of a semi-submersible hull whose capacity reaches the level of 50 000 tons. This testified the rationality of this model and practicability of this algorithm. And the number of feasible layout solutions shows an upward trend with the increase of the maintenance equipment weight coefficient. This method can improve scientificity in decision-making process about functional tanks' layout in semi-submersible repair vessels.

Keywords: semi-submersible repair vessels; maintenance and repair tank; layout; two-stage algorithm

随着国家利益向远海方向拓展,船舶或大型海洋工程设备在海上航行或作业频繁,发生故障的风险也随之增大。当船舶或大型海洋工程设备的故障发生于远离岸基的水域且不适合长距离拖带时,运用半潜船将其运至岸基维修逐渐成为主要手段,但该方法存在费时、费力、费用昂贵的缺点。为保障我国远海权益,实现船舶与海洋工程设备的维修工作由岸基向远海拓展,在一定程度上缩短其上岸维修的时间、降低费用和风险,提高运输或生产作业效率,需加快发展远海维修保障体系建设。自航式半潜维修船作为远海维修保障体系建设的核心内容之一,是基于集成创新理念设计的集高技术与多功能于一体的新型船[1-2]。该新型船主要应用于远离岸基的海域,可为故障船舶或大型海洋工程设备提供技术支持、远海独立维修服务以及长距离运输等。由于半潜船具有宽阔甲板、重大件运输等特点,提出以半潜船体为载体设计自航式半潜维修船。考虑到维修以及备件库存能力对这类新型船设计的重要程度[3],合理布局维修舱、压载舱等功能舱室是一个关键问题。

关于布局问题,Ahmadi等[4]通过设计框架分析并归纳了各领域的多层设施布局问题的特征及解决方法,主要有遗传算法[5]、规划求解与粒子

* **收稿日期**:2018-06-07
基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2017YFC0805309);国家自然科学基金资助项目(61473053);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132019303)
作者简介:赵瑞嘉(1993—),男,河南新乡人,博士研究生,E-mail:zhaoruijia@dlmu.edu.cn;
谢新连(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xxlian@dlmu.edu.cn

群相结合算法[6]、多阶段算法[7]、鲁棒优化[8]等。目前船舶舱室布局的研究大致从两个方向出发:一是考虑舱室与全船的位置关系,建立全船各区域的位置评价模型,处理全船范围内的舱室分组与布局[9];二是根据舱室之间的联系,以相对位置关系为目标处理小范围内舱室布局[10]。也存在综合考虑以上两方面进行研究的方法[11-12]。本文针对自航式半潜维修船的维修舱、压载舱等功能舱室布局问题,借鉴自航式半潜船船体特征,在保证船舶安全、技术可行的前提下,建立半潜维修船功能舱室布局优化模型,设计贪婪取走算法与规划求解相结合的方法解得半潜维修船功能舱室优化布局方案。

1　半潜维修船功能舱室布局优化模型

半潜维修船功能舱室布局问题研究是为了寻找最优的功能舱室布局方案,其核心是选择最优的维修舱位置。优化设计的目标是在设计规范及相关理论知识的基础上,使维修舱具有最大的舱室空间、最高的舱室邻接性、最近的维修作业区位置。为便于表示,建立船舶坐标系:以尾垂线与基平面的交点为坐标原点 o;基平面与中线面的交线为 x 轴,指向船首为正;尾垂线为 z 轴,向上为正;过坐标原点且垂直于 xoz 面的直线为 y 轴,指向右舷为正。

1.1　设计变量

有待布局的舱室 I 个,设置维修舱 m 个,为准确表述涉及的参数与变量,做出如下定义。

定义 1　将维修舱内维修设备的质量与维修舱内以压载水计量的满舱质量的比值记为维修设备质量系数。

定义 2　将压载舱的压载质量与其最大压载量的比值记为压载系数。

每个舱室布局为维修舱或压载舱的集合记为 μ。为了统一表示维修舱内的维修设备质量或压载舱内的压载量,引入集合 θ。两个集合的表达式见式(1)、式(2)。

$$\mu = \{\mu_i \mid i = 1,2,\cdots,I\} \tag{1}$$

$$\theta = \{\theta_i \mid i = 1,2,\cdots,I\} \tag{2}$$

其中:μ 为表征待布局舱室布局为维修舱或压载舱的集合;θ 为表征维修舱的维修设备质量系数或压载舱的压载系数的集合;I 为待布局舱室的数量;μ_i 为 0 或 1 的变量,当 i 舱布局为维修舱时 $\mu_i = 1$;当 i 舱布局为压载舱时 $\mu_i = 0$。当 $\mu_i = 1$ 时,$\theta_i = \alpha$,α 为维修设备质量系数;当 $\mu_i = 0$ 时,$\theta_i = \beta$,$\beta \in [0,1]$ 为压载系数。

1.2　目标函数

1.2.1　舱室的空间大小

维修舱的空间大小是影响维修作业能力的重要因素。布局为维修舱的舱室空间大小按式(3)计算。

$$Q^m = \sum_{i=1}^{I} Q_i \mu_i \tag{3}$$

式中:Q^m 为 m 个维修舱的空间大小总和;Q_i 为 i 舱的空间大小。

1.2.2　舱室之间的邻接

舱室之间的邻接是各种修船机械、机加工设备之间相互联系、共同开展维修作业的基础。采用各舱室之间距离的平均值表示 m 个维修舱之间的邻接关系,见式(4)。

$$d^r = \frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{i}\left(|x_i - x_j| + |y_i - y_j| + \varphi|z_i - z_j|\right) \tag{4}$$

式中:d^r 表示 m 个维修舱之间的平均距离;x_i,y_i,$z_i(x_j,y_j,z_j)$ 分别表示 $i(j)$ 舱室重心的 x 坐标、y 坐标、z 坐标;φ 为舱室垂向距离难度系数。

1.2.3　舱室的全局位置

维修舱在全船的位置是影响修船机械、机加工零件能否便捷快速地运送至主甲板维修作业区的重要因素。采用 m 个舱室与主甲板维修作业区中心的距离的平均值表示布局的维修舱的全局位置优劣,见式(5)。

$$d^g = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(|x_i - x_c| + \varphi|z_i - z_c|\right) \tag{5}$$

其中:d^g 表示 m 个维修舱距主甲板维修作业区中心的距离的平均值;x_c,y_c 分别为主甲板维修作业区中心的 x 与 z 坐标。

1.3　约束条件

由于船舶本身舱室空间有限,布局 m 个维修舱可能会导致压载舱容紧张,影响船舶的潜浮能力与安全。考虑到规范要求一般半潜船应在规定的风、浪外界环境条件下进行半潜作业,如基本无浪的平静水域,或蒲氏风级、有义波高限制下的水域,此时船舶受风、浪影响产生的倾斜角度较小;因此在进行舱室的优化布局时引入初稳性高度值作为安全性的约束,按式(6)计算。

$$GM = KB + BM - KG - \delta \cdot GM_f \tag{6}$$

式中:GM 为经自由液面修正后的初稳性高度;KB 为船舶浮心高度;BM 为船舶横稳心半径;KG 为船舶重心高度;$\delta \cdot GM_f$ 为自由液面对初稳性高度的修正值。

通过 Maxsurf 软件建立船体三维立体模型，KB、BM 的值可由船体模型在相应吃水或排水量处的浮心与稳心确定。KG 的计算较为复杂，除空船、各种负载等质量外，还需要重点计算维修舱与压载舱的质量，按式(7)计算。

$$KG = \{\sum_{i=1}^{I}(1-\mu_i)W_i\theta_i[(z_i-z_i')\theta_i+z_i'] + \sum_{i=1}^{I}\mu_i W_i\theta_i z_i^{\mathrm{m}} + M_0^z\}/(\sum_{i=1}^{I}W_i\theta_i + W_0) \tag{7}$$

式中：z_i' 为 i 舱的舱底 z 坐标值；z_i^{m} 为 i 舱布局为维修舱时维修设备的重心 z 坐标值；W_i 为 i 舱的装载能力；W_0 为空船、各种负载等质量的总和；M_0^z 为空船、各种负载等质量在 z 轴方向的力矩总和。

$\delta \cdot GM_{\mathrm{f}}$ 只与自由液面的大小、船舶排水量有关。为便于计算，各舱室的自由液面大小取舱室不同水位下自由液面大小的平均值。故 $\delta \cdot GM_{\mathrm{f}}$ 按式(8)计算。

$$\delta \cdot GM_{\mathrm{f}} = \sum_{i=1}^{I}(1-\mu_i)\lceil\theta_i(1-\theta_i)\rceil I_i^x\rho/\Delta \tag{8}$$

式中：$\lceil\cdot\rceil$ 为向上取整函数，当空舱或满舱时，$\lceil\theta_i(1-\theta_i)\rceil$ 为 0，其他状态时为 1；I_i^x 为 i 舱自由液面面积对其倾斜轴线的横向惯性矩；ρ 为海水密度；Δ 为船舶排水量。

1.4 模型建立

半潜维修船功能舱室布局优化模型的目标是在满足约束的条件下追求舱室空间最大、舱室之间的邻接与舱室的全局位置最小。由于 d^{r} 与 d^{g} 属于同一量级，因此引入权重因数 ω_1 与 ω_2 将两个目标合并。若决策者强调维修舱的邻接关系，则 $\omega_1 > \omega_2$；若决策者强调维修舱的全船位置，则 $\omega_1 < \omega_2$。因此目标函数可由式(9)表示。

$$\max\ F = Q^m/(\omega_1 d^{\mathrm{r}} + \omega_2 d^{\mathrm{g}}) \tag{9}$$

约束条件为：

$$m = \sum_{i=1}^{I}\mu_i \geqslant 1 \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{I}W_i\theta_i - W_{\mathrm{B}} \geqslant 0 \tag{11}$$

$$GM \geqslant \underline{GM} \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{I}W_i\theta_i y_i + M_0^y = 0 \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^{I}W_i\theta_i x_i + M_0^x - \Delta x_{\mathrm{F}} = 0 \tag{14}$$

$$\theta_i = \mu_i\alpha + (1-\mu_i)\beta, \forall i = 1,2,\cdots,I \tag{15}$$

$$\mu_i \in \{0,1\}, \forall i = 1,2,\cdots,I \tag{16}$$

其中：F 为目标函数；ω_1，ω_2 为权重系数；W_{B} 为所需压载质量；$\underline{GM}$ 为规范要求的初稳性高度的最低限值；M_0^x，M_0^y 为空船、各种负载等质量在 x，y 轴方向的力矩总和；x_{F} 是浮心的 x 坐标值。式(10)表示布局为维修舱的数量应不小于 1；式(11)表示维修设备质量与压载水质量不小于船舶所需的压载质量；式(12)表示船舶的初稳性高度应不低于其最低限值；式(13)、式(14)表示船舶在 x 轴和 y 轴方向上保持平衡，即船舶处于正浮状态；式(15)、式(16)为变量的约束。

2 算法设计

上述模型类似于组合问题，当待布局舱室数 I 与布局的维修舱数量 m 较大时，会出现组合爆炸。如 $I=85$，$m=4$ 时，可能的方案数多达 2.02×10^6 种。若将该问题按照 0－1 整数规划问题求解，随着待布局舱室数的增多，可选方案数 2^n 将出现指数爆炸。因此参考贪婪取走启发式算法的思想进行算法设计。贪婪取走启发式算法的基本思想是依据贪婪准则从初始状态一步一步向下搜索，直到找到满足该问题的优化解[13－14]。在半潜维修船功能舱室布局优化模型中，设置初始解为全部待布局舱室，依据贪婪准则取走待布局舱室，贪婪准则的设定需考虑舱室的空间大小、舱室间的邻接程度、舱室的全船位置等因素，按照目标函数值增量最大的规则设定。为保证求解方案的全局最优，在该算法中加入局部搜索替代方法进行修正，即用已取走的待布局舱室代替保留的待布局舱室，通过比较目标函数值的变化决定是否替换。

为简化计算，对模型进行分解，第一阶段解决维修舱的布局问题，并将结果 μ^* 传递至第二阶段，第二阶段解决压载舱布局的合理性与安全性问题，通过 GM 值的计算返回第一阶段判断约束式(19)是否成立。

第一阶段：

$$\max\{F(\mu^*)\} \tag{17}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i=1}^{I}\mu_i^* \geqslant 1 \tag{18}$$

$$GM(\mu^*,\theta^*) \geqslant \underline{GM} \tag{19}$$

$$\mu_i^* \in \{0,1\}, \forall i = 1,2,\cdots,I \tag{20}$$

第二阶段：

$$\max\ GM(\mu^*,\theta^*) \tag{21}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i=1}^{I}W_i\theta_i^* - W_{\mathrm{B}} \geqslant 0 \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^{I} W_i \theta_i^* y_i + M_0^y = 0 \tag{23}$$

$$\sum_{i=1}^{I} W_i \theta_i^* x_i + M_0^x - \Delta x_F = 0 \tag{24}$$

$$\theta_i^* = \mu_i^* \alpha + (1 - \mu_i^*)\beta, \forall i = 1,2,\cdots,I \tag{25}$$

在对模型分解之后,第二阶段可采用规划求解程序实现全局最优解的计算。

下面说明该两阶段算法与原模型优化解的等效性。对于式(12),GM 的计算与 θ 密切相关,而 θ 要满足式(11)、式(13)、式(14)、式(16)。因此在第一阶段根据贪婪取走算法每确定一个可能的功能舱室布局方案,就通过第二阶段的模型探寻满足式(19)的最优压载方案 θ,即可说明这一功能舱室布局方案在安全性上是满足要求的,属于可行的方案。但该可行方案是否为最优方案,还需通过式(17)确定。故半潜维修船功能舱室布局优化模型求解算法步骤如下。

步骤 1:初始化,令当前 I 个待布局舱室全部添加至维修舱集合,即 $m = I$。

步骤 2:计算维修舱质量与压载舱满舱时质量之和,若小于 W_B,转步骤 3,否则转步骤 4。

步骤 3:计算目标函数值,并计算若取走某一舱室时目标函数值的增量,取走增量最大对应的 n 舱室。若存在相同的最大增量,则取走空间小的舱室,若为左右对称的舱室,则先取走右舷舱室,转步骤 5。

步骤 4:调用规划求解程序求解第二阶段模型,解得 GM。若 GM 小于$\underline{GM}$,转步骤 3,否则保存当前方案至可行方案集中,再转步骤 3。

步骤 5:从维修舱集合中删去 n 舱室,并将 n 舱室添加至压载舱集合中。将当前维修舱集合中的某一舱室与压载舱集合中的某一舱室置换,若目标函数值变大,则保存置换后的舱室集合,否则保留原舱室集合。令 $m = I - 1$,若 $m = 0$,转步骤 6,否则转步骤 2。

步骤 6:选择可行方案集中目标函数值最大的方案作为最优方案,若可行方案集为空集,则无可行方案。

3　算例分析

以船长 228 m、船宽 43 m、型深 13 m 的半潜船体为例,空船及各种负载的质量为 28 869 t,重心坐标为(120.45 m,0.00 m,11.35 m)。船内共有 85 个待布局舱室,采取由下而上、从后至前、先中间后左右舷的编号方式对 85 个舱室进行编号。各待布局舱室的重心坐标值、舱底 z 坐标值、自由液面面积对其倾斜轴线的横向惯性矩等数据均已知。此外,模型中涉及的参数取值有 $\alpha = 0.6$,$\varphi = 1.5$,$\omega_1 = \omega_2 = 0.5$。在算法之初,考虑维修舱内作业高度需求,将待布局舱室中高度不超过 2.5 m的舱室直接取走,添加至压载舱集合,剩余 61 个待布局舱室。在保证船舶能安全下潜至设计的最大沉深(吃水 27 m)的前提下,通过编程运算,共产生 7 组可行方案,如图 1 所示。

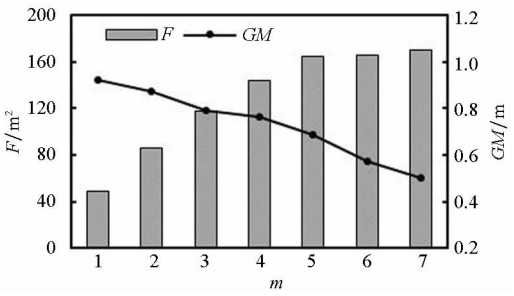


图 1　可行方案目标值

Fig. 1　Objective value of feasible solutions

图 1 中条形图的每一条代表一种可行方案,其高度表示目标函数值 F;折线为每一种可行方案对应的初稳性高度值 GM。其中:$m = 1$ 表示选择 27 号舱布局为维修舱;$m = 2$ 表示选择 26 ~ 27 号舱布局为维修舱;$m = 3$ 表示选择 26 ~ 28 号舱布局为维修舱;$m = 4$ 表示选择 26 ~ 29 号舱布局为维修舱;$m = 5$ 表示选择 26 ~ 30 号舱布局为维修舱;$m = 6$ 表示选择 26 ~ 30、32 号舱布局为维修舱;$m = 7$ 表示选择 26 ~ 30、32 ~ 33 号舱布局为维修舱。由图 1 可知,在维修设备质量系数 $\alpha = 0.6$ 的情况下,目标函数值 F 随着维修舱数量的增加而增加,但初稳性高度值 GM 呈下降趋势,即目标函数值越大,对应的初稳性高度值越小。此时最优方案为 $m = 7$,即布局 7 个维修舱,78 个压载舱,其变量值见表 1。

表 1　最优方案的变量值

Tab. 1　Variate value in best solution

变量	舱室编号			
	1 ~ 19,21 ~ 25,31,34 ~ 79,82 ~ 85	20	26 ~ 30,32 ~ 33	80 ~ 81
μ_i	0	0	1	0
θ_i	1.00	0.17	0.60	0.50

为了进一步探明维修设备质量系数 α 对功能舱室布局方案的影响,采用变参数分析法对 α 做敏感性分析。当 α 变大时,即增加维修设备质量,船

舶整体的重力增大,缓解了压载舱容的紧张局面,故可进一步增大维修舱的空间;反之,则需减小维修舱的空间,如图2所示。区域Ⅰ为 $\alpha=0.4$、$\alpha=0.5$ 时的可行方案,最优方案为 $m=5$;区域Ⅰ~Ⅱ为 $\alpha=0.6$ 时的可行方案,区域Ⅰ~Ⅲ为 $\alpha=0.7$ 时的可行方案,区域Ⅰ~Ⅳ为 $\alpha=0.8$ 时的可行方案,最优方案均为 $m=7$。可以看出,随着 α 的增大,可行方案数不断增多,但最优的维修舱数量并不无限增大。选择目标值较大且较为接近的三个方案 $m=5$、$m=6$、$m=7$ 研究 α 对船舶初稳性高度的影响,三种方案的布局情况如图3所示。

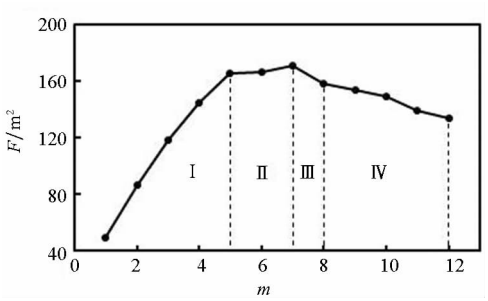
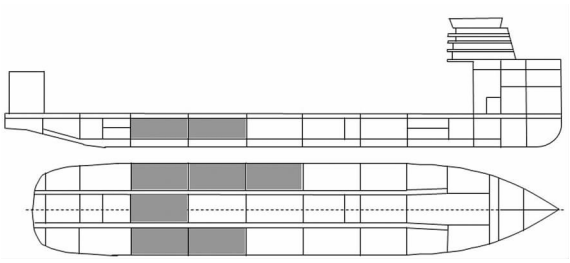


图2 α 对 m 的影响分析

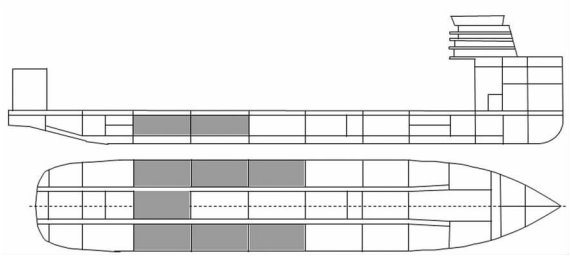
Tab. 2 Analysis of effect in m by α



(a) $m=5$



(b) $m=6$



(c) $m=7$

图3 维修舱布局方案图

Tab. 3 Layout of maintenance and repair tanks

图4为针对方案 $m=5$、$m=6$、$m=7$ 的敏感性分析,可以看出初稳性高度 GM 随着 α 的增大而增大。但对于方案 $m=6$,当 $\alpha=0.5$ 时,其压载方案不能满足规范要求的初稳性高度0.5 m(图4中虚线所示)最小限值;当 $\alpha=0.4$ 时,不存在可行的压载方案。对于方案 $m=7$,当 $\alpha=0.4$、$\alpha=0.5$ 时,不存在可行的压载方案。若装载的维修设备质量较大,如 $\alpha=0.8$,则不会影响船舶安全下潜至设计的最大沉深;若装载的维修设备质量较小,如 $\alpha=0.4$,则可能出现无可行的压载方案或初稳性高度值达不到规范要求,即船舶难以下潜或安全下潜至设计的最大沉深的情况。

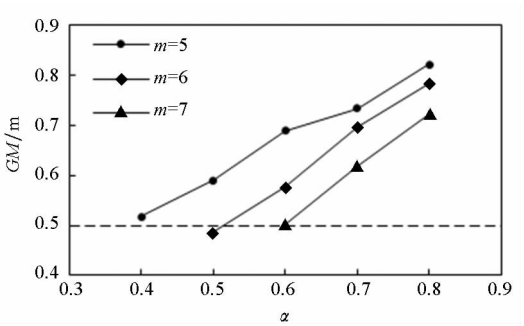


图4 α 对 GM 的影响分析

Tab. 4 Analysis of effect in GM by α

4 结论

为了解决半潜维修船功能舱室布局问题,建立技术可行前提下的半潜维修船功能舱室布局优化模型,得到以下结论:

1)算例的结果表明该模型能够较好地反映半潜维修船功能舱室布局问题。目标函数中考虑维修舱的舱室空间大小、舱室间的邻接关系、舱室的全局位置这三种因素得到的维修舱布局方案较为合理,该目标函数能够作为衡量舱室布局的目标。

2)通过对模型的分解,并设计了贪婪取走启发式算法与规划求解相结合的两阶段算法,能够高效求解模型,避免陷入组合爆炸或指数爆炸的困境。

3)通过对维修设备质量系数 α 的敏感性分析,探究了其对维修舱布局方案以及初稳性高度的影响规律。

综上所述,该方法为半潜维修船功能舱室布局优化问题提供了一个有效途径,可提高半潜维修船在功能舱室布局过程中决策的科学性。

参考文献(References)

[1] 谢新连,桑惠云,张扬. 一种舰船远海维修保障新方

案[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(12): 50 – 54.
XIE Xinlian, SANG Huiyun, ZHANG Yang. A novel scheme for ship repair support at sea [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(12): 50 – 54. (in Chinese)

[2] 赵瑞嘉, 谢新连, 魏照坤. 半潜维修船船型多目标优化与单目标优化比较研究 [J]. 中国造船, 2018, 59(2): 205 – 212.
ZHAO Ruijia, XIE Xinlian, WEI Zhaokun. Comparative research on multiple-objective optimization and single-objective optimization to semi-submersible repair vessels [J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(2): 205 – 212. (in Chinese)

[3] 徐立, 李庆民, 胡毅钧, 等. 有限维修能力下多级保障系统装备时变可用度评估及保障方案优化 [J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(1): 128 – 136.
XU Li, LI Qingmin, HU Yijun, et al. Equipment time-varying availability evaluation and support project optimization for multi-echelon support system with finite repair capacity[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(1): 128 – 136. (in Chinese)

[4] Ahmadi A, Pishvaee M S, Jokar M R A. A survey on multi-floor facility layout problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 107: 158 – 170.

[5] Kia R, Khaksar-Haghani F, Javadian N, et al. Solving a multi-floor layout design model of a dynamic cellular manufacturing system by an efficient genetic algorithm [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(1): 218 – 232.

[6] Chang J L. Optimal multi-floor plant layout based on the mathematical programming and particle swarm optimization[J]. Industrial Health, 2015, 53(6): 491 – 497.

[7] Ahmadi A, Jokar M R A. An efficient multiple-stage mathematical programming method for advanced single and multi-floor facility layout problems [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(9/10): 5605 – 5620.

[8] Izadinia N, Eshghi K. A robust mathematical model and ACO solution for multi-floor discrete layout problem with uncertain locations and demands [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 96: 237 – 248.

[9] 杨德庆, 朱金文. 船舶舱室总体声学布局优化设计通用模型及解法[J]. 中国造船, 2014, 55(2): 38 – 48.
YANG Deqing, ZHU Jinwen. A general model for ship cabins acoustic layout optimization design and its solution method[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(2): 38 – 48. (in Chinese)

[10] Neghabi H, Tari F G. An optimal approach for maximizing the number of adjacencies in multi floor layout problem[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(11): 3462 – 3474.

[11] 王宇, 黄胜, 廖全蜜, 等. 基于引力搜索算法的船舶舱室布置方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 131 – 139.
WANG Yu, HUANG Sheng, LIAO Quanmi, et al. A method for ship compartment layout design based on gravitational search algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(1): 131 – 139. (in Chinese)

[12] 王宇, 黄胜, 廖全蜜, 等. 基于引力搜索算法的舱室分布方案设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 48 – 52.
WANG Yu, HUANG Sheng, LIAO Quanmi, et al. Design of the layout of ship cabins using a gravitational search algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(1): 48 – 52. (in Chinese)

[13] 关怀庆, 张毕西, 欧江艳. 贪婪取走启发式算法在离散网络选址中的研究[J]. 系统科学学报, 2010, 18(3): 49 – 52.
GUAN Huaiqing, ZHANG Bixi, OU Jiangyan. The study of greedy dropping heuristic algorithm in discrete network location[J]. Journal of Systems Science, 2010, 18(3): 49 – 52. (in Chinese)

[14] 李晓君, 谢新连. 基于竞争的半潜维修船最佳配备数量及选址[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(1): 25 – 29.
LI Xiaojun, XIE Xinlian. Study on the best equipped number and location of semi-submersible vessel maintenance based competition [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(1): 25 – 29. (in Chinese)