

# 海上液货补给方案多目标决策

邓薇<sup>1</sup>, 韩端锋<sup>1</sup>, 姚竞争<sup>1</sup>, 金鑫<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001

2. 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001

**摘要** 针对海上液货补给方案的决策问题, 采用加权法建立多目标决策数学模型, 利用层次分析法确定约束条件的权重矩阵。引入排列组合等数值计算方法计算出可行的补给方案。分别通过TOPSIS逼近理想解排序法与PSO粒子群优化算法带入所建立的数学模型进行迭代计算直到获得最优的补给方案。通过实际被补给需求给定的液货量, 利用上述方法进行数值模拟计算, 可以快速准确地提供补给方案的决策依据。

**关键词** 液货补给方案; 优化算法; 多目标决策; TOPSIS; PSO

海上补给是指补给船在航行过程中为己方水面舰艇随时补充燃油、食品、淡水、备品以及各类弹药的过程。补给燃油、淡水等液体称为液货补给。对于执行远洋航行任务的舰船, 干货及液货的消耗会对船舶本身带来极大的影响<sup>[1]</sup>。美国的“阿利伯克”级驱逐舰在没有补给的情况下满液货出港可行驶4400海里, 根本无法航行到达目的地10000海里以外的中东地区海域<sup>[2,3]</sup>。由此可见补给船在军事战略中的重要位置, 补给船在补给作业过程的安全问题能够影响整个作战编队的航行及执行任务的安全。液货补给需要补给船根据被补给船所需液货的种类以及需求量来决策相应的补给方案, 在补给的同时还必须要满足补给船自身的稳性及强度要求。

补给船液货补给方案决策的目的与集装箱船配载方案的目的是相同的, 可以借鉴其配载方法的原理, 遵循配载基本原则计算出最终的补给方案<sup>[4,5]</sup>。补给方案的选择过程是一个多变量、多目标的复杂决策问题, 包含了许多定性和不确定的因素, 实际工程问题可以转化为数学理论中的多目标决策优化问题, 通过TOPSIS分析方法和PSO粒子群优化算法<sup>[6,7]</sup>分别对目标约束函数进行寻优搜索, 比较得出更为快速且准确的补给方案决策, 为液货补给方案的优化选择提供了简便、高效的方法。

## 1 多目标决策算法

### 1.1 基于TOPSIS分析法的多优化算法原理

TOPSIS (technique for order preference by similarity to

ideal solution) 被称为逼近于理想解的排序方法。对于某多目标优化问题, 假设被评价的有  $m$  个对象, 每个对象有  $n$  个属性, 第  $i$  个对象的第  $j$  个属性的值为  $x_{ij}$ , 则定义判断矩阵  $V$ :

$$V = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

将式(1)进行归一化处理, 使得对象的各个分量的数量级相同:

$$V' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{i1} & \cdots & x'_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$x'_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^n x_{ik}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

由于对象不同属性的权重不一定相同, 于是加权判断矩阵构造为:

$$Z = V'B = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{i1} & \cdots & x'_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_j & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2015-06-11; 修回日期: 2015-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209057)

作者简介: 邓薇, 博士研究生, 研究方向为船舶与海洋工程结构物设计制造, 电子邮箱: dengwei1110@126.com

引用格式: 邓薇, 韩端锋, 姚竞争, 等. 海上液货补给方案多目标决策[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 293-298; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.041

$$= \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{i1} & \cdots & f_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4)中的加权判断矩阵可以获取评估对象的正负理想解:

正理想解:

$$f_j^* = \begin{cases} \max(f_{ij}), j \in J^* \\ \min(f_{ij}), j \in J' \end{cases} \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

负理想解:

$$f_j' = \begin{cases} \min(f_{ij}), j \in J^* \\ \max(f_{ij}), j \in J' \end{cases} \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中,  $J^*$  为效益型指标,  $J'$  为成本型指标。

采用欧氏距离计算出评估对象语理想值的距离:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - f_j^*)^2}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

$$S_i' = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - f_j')^2}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

计算出各个对象贴近理想值的距离,称为贴近度  $C_i^*$ :

$$C_i^* = S_i' / (S_i^* + S_i'), \quad i=1,2,\dots,m \quad (9)$$

利用简单的排序思想对贴近度的大小进行排序,就可以将优秀的评估对象选出来,从而得到理论的最优解。

## 1.2 基于粒子群算法的智能优化方法

粒子群优化算法(PSO)<sup>[8,9]</sup>就是生物群体觅食行为这一搜索特性,应用到求解优化问题当中的方法。在粒子群算法中,每个粒子代表一个潜在的解。设每个粒子的维度为  $D$ , 共  $n$  个粒子,其中  $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  表示第  $i$  个粒子的当前位置;  $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  表示第  $i$  个粒子的当前速度变化率;第  $i$  个粒子目前的历史最好位置为  $p_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ , 记为  $pBest$ ; 对于粒子群整个群体目前的历史最优位置值用  $p_g=(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$  表示, 记为  $gBest$ , 对整个粒子群算法进行迭代的时候,第  $i$  个粒子位置与速度变化率的更新表达式如下:

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1 \text{rand}() [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 \text{rand}() [p_{gd}(t) - x_{id}(t)] \quad (10)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq d \leq D \quad (11)$$

其中,  $c_1, c_2$  为正常数,称为加速因子;  $\text{rand}()$  为  $[0,1]$  之间的随机数;  $w$  为惯性因子。

根据具体问题对第  $d$  维的位置和速度的取值范围设置为  $[-x_{d\max}, x_{d\max}]$  和  $[-v_{d\max}, v_{d\max}]$ 。粒子群算法在对适应度函数进行迭代或者初始化的过程中,如果在某一维中的位置和速度都超过了边界,那么就将速度和位置值取边界值。

本文中粒子的规模<sup>[10]</sup>选取 40 个,搜索的维度设置为 6,  $x_i$  为第  $i$  个舱中排出的油量,最后一个舱更新的油量用需求量减去前面所有排出油量的和即可。速度和位置的更新采用公式(10)和(11)进行即可。

## 2 海上液货补给决策问题的描述

### 2.1 海上液货补给方案决策数学模型的建立

补给方案的决策过程是一个需要考虑多变量、多属性的多目标优化问题,本文以大型补给船为例,利用多目标优化方法对补给方案决策模型进行描述,采用加权法<sup>[11]</sup>进行计算。

进行方案决策时,需要明确本船的液货舱的舱容相关参数以及船体的稳性和强度状态。由于不同的液体舱室有自身固定的位置,固定的舱容以及对船舶自身稳性的特点影响,所以从不同舱室中分配燃料将会对船舶的稳性以及总纵强度会有不同的影响。当有补给需求的时候,需要决策从哪些补给舱中分配燃料,在满足补给量的前提下还需要同时满足以下条件<sup>[12,13]</sup>:

- 1) 补给船自身的横倾角要小于  $0.5^\circ$ ;
- 2) 补给船纵倾值范围为  $-0.9 \sim 0$  m 之间;
- 3) 补给船自身的初稳性高  $GM > 0.75$  m;
- 4) 在满足以上基础上尽量少的动用压载水舱去调节船舶的自身稳性和强度。

图 1 所示为本文研究对象:某大型补给船所承受的最大剪力与最小剪力曲线,两条曲线之间的区域为剪力的可行域。图 2 中所示为本船最大弯矩曲线与最小弯矩曲线,两条曲线之间的区域为弯矩的可行域。

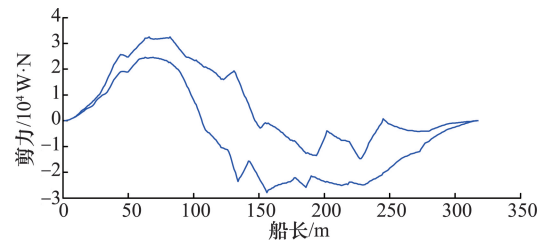


图 1 补给船剪力包络曲线

Fig. 1 Maximum and minimum shearing force curves of ship

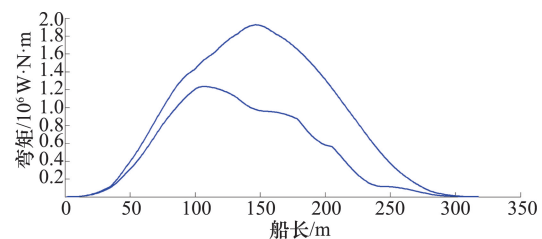


图 2 补给船弯矩包络曲线

Fig. 2 Maximum and minimum moment curves of ship

通过对目标函数的线性组合可将多目标优化问题(MOP)转换为单目标优化问题(SOP),其具体的数学模型表示为

$$\begin{aligned} \min F(f_i) &= w_1 f_i(\alpha) + w_2 f_i(t) + w_3 f_i(GM) \\ \text{subject to} & \begin{cases} |\alpha| < 0.5^\circ \\ -0.9 \text{ m} \leq t \leq 0 \text{ m} \\ GM > 0.75 \text{ m} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $F(f_i)$  为目  $f_i$  为第  $i$  种可行的补给决策方案,  $\alpha$  为补给船自

身的横倾角,  $t$  为补给船自身的纵倾值,  $GM$  为补给船自身的初稳性高,  $w_1, w_2, w_3$  分别对应于横倾角权重、纵倾值权重和初稳性高权重。

$$f_i(\alpha) = \frac{|\alpha_i|}{\max\{|\alpha_i|\} - \min\{|\alpha_i|\}} \text{ 为横倾角目标函数。}$$

$$f_i(t) = \frac{|t_i|}{\max\{|t_i|\} - \min\{|t_i|\}} \text{ 为纵倾值目标函数。}$$

$$f_i(GM) = \frac{GM_{\max} - GM_{\min}}{GM_i} \text{ 为初稳性高 } GM \text{ 目标函数。}$$

### 2.2 权重的确定

根据决策者的偏好, 并且将偏好转换为用数值描述, 记  $B_i$  对于  $B_j$  的偏好为  $a_{ij}$ , 则所有偏好构成  $3 \times 3$  的判断矩阵  $A$ 。横倾角、纵倾值、初稳性高所占的权重的 3 个子目标的判断矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过对该矩阵的特征值以及特征向量的计算, 得出特征向量并进行归一化权重为  $w=(w_1, w_2, w_3)=(0.5, 0.25, 0.25)$ , 则上述的目标函数的具体表达形式就为:

$$\begin{aligned} \min_i F(f_i) &= 0.5f_i(\alpha) + 0.25f_i(t) + 0.25f_i(GM) \\ \text{subject to } &\begin{cases} |\alpha| < 0.5^\circ \\ -0.9 \text{ m} \leq t \leq 0 \text{ m} \\ GM > 0.75 \text{ m} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

上式为针对液货补给方案决策问题所建立的最终数学模型。

### 2.3 备选方案的生成与优选方案

本文中的补给船有 6 个货燃油舱、6 个货柴油舱、1 个货喷气燃油舱、2 个货淡水舱以及 28 个压载水舱。根据横倾角、纵倾值、初稳性高的计算公式可以求出船舶的一些重要参数。利用已知的静水力参数表以及船的包络曲线, 采用三次样条插值分析方法进行补给船稳性与强度的数值计算<sup>[14,15]</sup>, 具体的计算流程如图 3 所示。

假设初始补给船出港为满载状态: 船的排水量为 48000 t, 初始横倾角为  $-0.18^\circ$ , 纵倾值为  $-0.507 \text{ m}$ , 初稳性高  $GM$  为  $1.553 \text{ m}$ , 艏吃水为  $10.516 \text{ m}$ , 尾吃水为  $11.023 \text{ m}$ , 重心坐标为  $(-2.381, -0.005, 12.092)$ 。

## 3 液货补给方案决策问题的工程解法

某一时刻, 某船对该补给船提出补给要求, 其中燃油需求量为 600 t, 柴油需求量为 400 t, 喷气燃料油的需求量为 200 t, 淡水的需求量为 100 t。通过对各种方案进行遍历求解<sup>[16]</sup>可以得出多种方案。

海上液货补给作业时, 产生补给方案根据是否动用压载水舱而分为两类: 一类为只需要分配补给燃料就可以将船舶的稳性参数调节到可行范围的方案; 另一类为补给燃料的同时需要动用压载水舱来调节船舶稳性参数来达到可行范围的方案。所有的方案都隐含一个标志位参数: 压载水舱。不

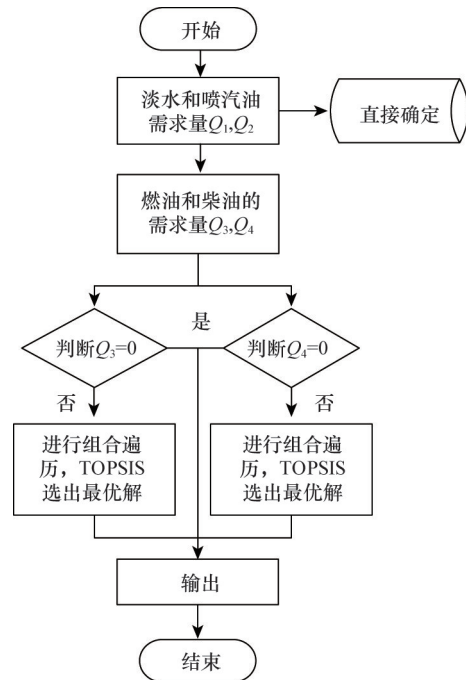


图3 液货补给方案决策计算流程

Fig. 3 Calculation flow chart of liquid cargo replenishment decision-making scheme

动用压载水舱的方案有更高的优先被选权。根据这样的条件, 利用 TOPSIS 逼近理想解方法从可行方案中选择中最佳方案。

按照表 1 中的方案进行补给后, 船舶状态的参数数值更新如表 2 所示。

表 1 根据 TOPSIS 逼近理想解方法得到的最优方案

Table 1 Optimal replenishment scheme by TOPSIS method

补给舱号	液货补给量/t
1号货燃油舱( $R_1$ )	0
2号货燃油舱( $R_2$ )	0
3号货燃油舱( $R_3$ )	0
4号货燃油舱( $R_4$ )	0
5号货燃油舱( $R_5$ )	285
6号货燃油舱( $R_6$ )	315
1号货柴油舱( $C_1$ )	0
2号货柴油舱( $C_2$ )	0
3号货柴油舱( $C_3$ )	200
4号货柴油舱( $C_4$ )	200
5号货柴油舱( $C_5$ )	0
6号货柴油舱( $C_6$ )	0
1号货淡水舱( $S_1$ )	50
2号货淡水舱( $S_2$ )	50
货喷气燃油( $P$ )	200

表2 补给后的船舶状态参数数值

Table 2 The value of ship state parameters after the replenishment

状态参数	排水量/t	艏吃水/m	尾吃水/m	重心坐标	$\alpha/^\circ\text{C}$	$t/\text{m}$	$GM/\text{m}$
参数值	46700	10.157	10.909	(-2.5,-0,12.1)	0.005	-0.83	1.581

图4和图5为补给船的终态剪力和弯矩曲线图,中间的曲线为沿着船长方向的剪力与弯矩曲线,可以看出都处于虚线的包络线之间,满足强度的要求。

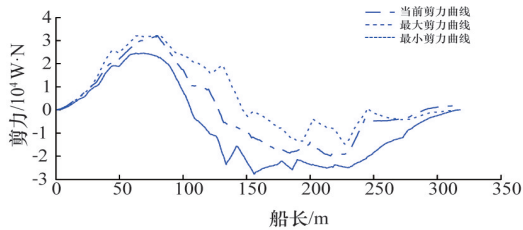


图4 剪力曲线

Fig. 4 Force curve of ship

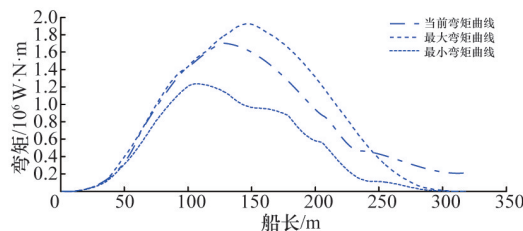


图5 弯矩曲线

Fig.5 Moment curve of ship

#### 4 液货补给方案决策问题的粒子群解法

为了更加快速以及准确的决策出补给方案,应用粒子群算法针对单一工况进行计算,假设柴油需求量为100 t。每一个粒子的位置值就是各个油舱所要分配的排油量,带入稳性的计算公式,求出补给船的横倾角、纵倾值、初稳性高 $GM$ 。将3个值进行线性组合,得出适应度函数 $f(x_1, x_2, x_3)=0.5x_1+0.25x_2+0.25x_3$ ,反复进行迭代直到适应度函数值之间的误差在一定误差之内停止迭代,给出最优的排油方案,其流程图如图6。

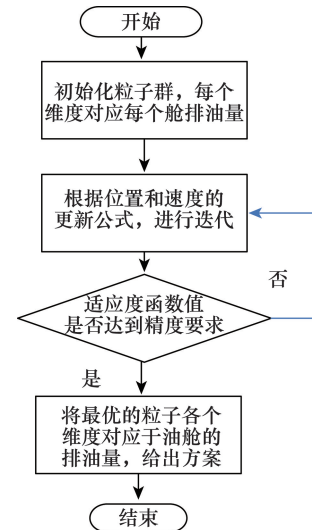


图6 粒子群算法迭代流程图

Fig. 6 Iterative flow chart of PSO algorithm

表3为适应度函数值的精度误差为 $10^{-3}$ 时,迭代5次后适应度函数值达到了精度范围内的结果,最优的解决方案如表中对应的液体舱排油量, $C_1\sim C_6$ 分别对应为油舱1~油舱6的油品排出量, $F$ 为在该种排油量的情况下粒子群算法中适应度函数的值。油舱1~油舱6的排出量分别为38.06、0.62、0、0.54、1.97、58.81 t,在这样的方案下,横倾角可以达到 $0^\circ$ ,纵倾值为 $-0.55\text{ m}$ ,初稳性高为1.59 m,这些性能参数符合了约束条件,从而证明了该方法的有效性。

等分遍历和排列组合的方式都是一种人为的先将对方案进行构造,然后对有限个构造出来的方案进行船舶性能参数的计算和校核,如果方案的结果满足约束条件,则可以作为可行方案。粒子群算法的优势在于方案并不是有限个,而是和迭代的次数有关系,其精度是可以由迭代误差或者迭代次数来控制的<sup>[17]</sup>。由于排列组合的方式从时间上来讲最占优

表3 精度为 $10^{-3}$ 的粒子群算法迭代结果

Table 3 Iterative calculation results for accuracy of  $10^{-3}$

迭代次数	$C_1/\text{t}$	$C_2/\text{t}$	$C_3/\text{t}$	$C_4/\text{t}$	$C_5/\text{t}$	$C_6/\text{t}$	$F$	$\alpha/^\circ\text{C}$	$t/\text{m}$	$GM/\text{m}$
1次迭代	10.35	0	0	0	7.88	81.77	4.61	0.34	-0.53	1.6
2次迭代	37.69	0.59	0	0.8	1.97	58.94	2.96	0.01	-0.55	1.59
3次迭代	37.69	0.59	0	0.8	1.97	58.94	2.96	0.01	-0.55	1.59
4次迭代	38.06	0.62	0	0.54	1.97	58.94	2.93	0	-0.55	1.59
5次迭代	38.06	0.62	0	0.54	1.97	58.94	2.93	0	-0.55	1.59

势,而且满足工程上的误差要求,所以采用排列组合的方式为最终算法,进而用TOPSIS算法选出前几种最优的方案。

## 5 结论

从工程计算、数值计算方面,进行了液货补给方案的决策数值仿真计算,得出如下结论:

1) 液货补给方案的决策问题是一个多目标、多属性的优化问题,利用数值计算排列组合方案可以快速找到可行方案域。

2) 采用TOPSIS逼近理想解排序法在符合补给船补给约束条件要求的情况下,对可行域中的补给方案进行优化选择,排除不理想的方案,得到最优化的补给方案。

3) 考虑到计算精度以及快速决策问题,引入粒子群智能优化算法,对可行补给方案进行迭代搜索,更加准确以及快速的决策出适应度函数最好的的补给方案。从数学意义上将该问题解决,也克服了工程应用的解决方案中时间复杂度与解的精度之间的矛盾,得到了可靠性较高的决策结果,为决策者提供了便利可靠的参考。通过比较分析两种算法的优缺点,根据补给作业快速方面的要求选择TOPSIS来决策补给方案。粒子群优化算法可以从数学计算的角度为未来的配载作业智能化提供依据。

### 参考文献(References)

- [1] 余建星, 顾鹏. 海上液货补给技术[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 103-106.  
Yu Jianxing, Gu Peng. The technique of liquid cargo supplying on the sea[J]. Ocean Technology, 2005, 24(4): 103-106.
- [2] 何林. 补给航行中大型船舶受力分析及对航行性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
He Lin. Mechanics analysis of large marine and effect on navigation performance in underway replenishment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [3] 卫天. 突破远洋的束缚中国远洋补给能力及未来发展[J]. 中国海军, 2010, 10(1): 20-35.  
Wei Tian. The PLA-Navy's deep-sea replenishment capability and its future[J]. The Chinese PLA-Navy, 2010, 10(1): 20-35.
- [4] 王照宁. 集装箱船舶自动配载系统管理模型的建立与研究[J]. 大连海运学院学报, 1994, 20(2): 70-84.  
Wang Zhaoning. A study at the manage-model of container Ship's automatic load plan[D]. Journal of Dalian Marine College, 1994, 20(2): 70-84.
- [5] 孙一方. 基于NURBUS技术的散货船配载仪设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.  
Sun Yifang. Design of the bulk carrier loading software based on NURBS technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [6] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995(4): 1942-1948.
- [7] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. Cui Xunxue. Multi-objective evolutionary algorithm and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [8] Eberhart R C, Kennedy J. A New optimizer using particle swarm[J]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, 1: 39-43.
- [9] 刘璘. 基于粒子群算法的多目标函数优化问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.  
Liu Lin. Research on multi-objective optimal based on PSO algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [10] Jiang M, Luo Y P, Yang S Y. Stochastic convergence analysis and parameter selection of the standard particle swarm optimization algorithm [J]. Information Processing Letters, 2007, 102(1): 8-16.
- [11] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.  
Yang Bao'an, Zhang Jingke. Research on multi-objective decision analysis theories, methods and application[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2008.
- [12] 杨彩虹. 船用装载仪相关技术的研究与开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
Yang Caihong. Research and development of loading computer for ships [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [13] 刘文艳. 综合试验舰浮辅助决策系统研发[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.  
Liu Wenyan. Research on the decision system of ship's buoyancy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012
- [14] 杨代盛. 船体强度与结构设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.  
Yang Shengdai. Strength and structure design of ship[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992.
- [15] 黄胜, 任万龙, 王超, 等. 多目标粒子群算法在翼型优化的应用[C]. 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议, 2013: 185-189.  
Huang Sheng, Ren Wanlong, Wang Chao, et al. The application of multi-objective particle swarm algorithm in hydrofoil optimization[C]. Proceedings of the 25th National Conference on Hydrodynamics & 12th National Congress on Hydrodynamics, 2013: 185-189.
- [16] 张成静. 康复训练中的排列组合原理与潜力分析[J]. 数理医药学杂志, 2013, 26(1): 110-111.  
Zhang Chengjing. The principle and potential analysis of permutation and combination in rehabilitation training[J]. Journal of Mathematical Medicine. 2013, 26(1): 110-111.
- [17] 王莹. 基于粒子群优化算法的无功优化及规划[D]. 天津: 天津大学, 2005.  
Wang Ying. Reactive power optimization and planning based on particle swarm optimization algorithm[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

## Multi-objective decision-making method in liquid cargo replenishment schemes

DENG Wei<sup>1</sup>, HAN Duanfeng<sup>1</sup>, YAO Jingzheng<sup>1</sup>, JIN Xin<sup>2</sup>

1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract** For solving decision problem about liquid cargo replenishment scheme, the mathematic model of scheme-decision problem is built based on weighting method. In order to simplify the model, the multi-objective problem (MOP) can be change into a single objective problem (SOP). The weight matrix of three sub-object is determined through analysis hierarchy process (AHP). Permutation and combination method is used to find all possible replenishment schemes and technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) theory and particle swarm optimization (PSO) algorithm are taken into the mathematic model to calculate best solutions from possible replenishment schemes respectively. The simulated numerical results indicate that the effectiveness of mathematic model and reliability of algorithm proposed in this paper, also can improve efficiency and security of liquid cargo replenishment.

**Keywords** replenishment scheme decision; optimal method; multi-objective decision; TOPSIS theory; PSO algorithm

(责任编辑 吴晓丽)