

基于 TOPSIS 的舰船抗沉辅助决策系统研究

张维英^{*1}, 林力², 林焰², 于欣¹, 金钊¹, 王琪², 毛晓旭¹

(1. 大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在舰船发生破损时,快速有效地实施损管,是维持舰船生命力的关键.而良好的抗沉辅助决策,是快速有效进行舰船抗沉的重要保障.针对现有抗沉辅助决策系统存在抗沉方案生成时间较长、实施较复杂的问题,将逼近理想解排序法(TOPSIS)应用于舰船不沉性系统研究,生成一套操作简便、抗沉方案生成快捷简便且易于实施、计算精确满足实际要求的舰船抗沉辅助决策系统.实船案例计算验证了系统的可靠性、快速性、操作便捷性,精确度满足实用要求.

关键词: 舰船损管技术;逼近理想解排序法(TOPSIS);不沉性;抗沉方案;辅助决策

中图分类号: U674.7

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201703009

0 引言

舰船在海上航行过程中可能要面临触礁、失火、碰撞等意外情况,在战斗中更是随时会遭受攻击,这些都可能造成舰体的破损进水、内部设备的损坏和火灾等危害,如果不及时消除和修复,就会造成舰船战斗力的丧失,严重时甚至会导致舰船沉没.此时就必须进行舰船损害管制,消除或减小损害,恢复舰船的生命力.

20世纪80年代舰船损管开始进入信息化时代,是舰船损管技术发展的一个重要阶段.1984年美国海军首先在“佩里”级护卫舰 FFG-30“雷德”号上试验了 Ballast 通用损管系统,1985年又在“斯普鲁恩斯”级驱逐舰 DD-969“彼得森”号上安装了一套 SNIPE 损管辅助系统^[1].随后,其他国家也先后开发了各自的损管监控系统,如德国的 SIMENS SINAVY BDCS 和 MTU Callosum BDCS、加拿大的 L-3 MAPPS I2BMS、意大利的 AVIO MASTER+ BDCS、法国的 SAMA 等.我国在20世纪80年代研制了 JDX 型安全保障综合检测报警系统,而在90年代中期建立了基于总线网络通信技术的 CJS 型损管监控系统,但是距离世界先进水平尚有一定差距^[2].

损管监控系统包括防沉与抗沉、火灾探测、核

生化监控、弹药库温度监控、灭火剂施放监控、舱门监控等模块,能够对舰船各类损害进行评估并给出损管辅助决策,同时控制自动化损管设备^[3].本文研究的目的是构建一种舰船抗沉辅助决策系统,精确度高于抗沉性标板图,快捷性能够尽量高于前人研究的系统,并且生成方案简单易实施.

1 不沉性系统的构建

舰船抗沉辅助决策系统是损管监控系统中的防沉与抗沉模块,其主要功能包括:

(1)监测并评估舰船破损进水情况,确定进水对舰船浮态和稳性的影响情况;

(2)评估实施各个抗沉舱对舰船浮态的影响,提供可实施的抗沉扶正方案;

(3)进行这些方案优选,确定最有效的扶正方案以供损管人员抗沉辅助决策参考.

在信息化时代,不沉性系统已经成为进行舰船抗沉决策的重要手段,对于舰船抗沉及损害快速修复具有重要意义和实用价值.

1.1 关键问题和解决方法

目前,进行舰船抗沉辅助决策时,普遍存在这样一对矛盾,即计算精确度与生成快速性、操作简便性的矛盾.现有抗沉辅助决策的手段主要有两

种: 抗沉性标板图和抗沉辅助决策系统^[4]. 抗沉性标板图最为简便也最为快捷, 但是使用精度严重不足, 只能计算一舱破损的情况, 而且严重依赖损管人员的经验. 抗沉辅助决策系统计算精确, 可以获得比较有效的抗沉方案, 但是抗沉方案生成需要一定时间, 而且使用复杂性也比抗沉性标板图要高.

以前进行的研究中, 为了保证获得比较精确有效的抗沉方案, 普遍使用各种优化方法用于舰船抗沉辅助决策方案设计, 有的甚至同时多种优化方法并用, 编制的抗沉辅助决策系统也相对比较复杂. 这样虽然使用精确性提高了, 但是系统计算过程复杂、方案生成较慢, 而且系统生成的较复杂抗沉方案也不易被正确执行. 舰船发生损害时维持舰船生命力的关键, 是做出正确的损管决策, 并能够及时正确地实施损管措施. 对实际舰船抗沉经验的总结表明, 进行抗沉决策的时间不得多于 2 min. 而舰员的素质往往参差不齐, 部分舰员在遇到紧急情况时容易慌乱, 进而导致损管中出现错误.

本文利用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 对抗沉舱进行排序, 顺序实施有效抗沉舱, 快速生成抗沉方案. 由于条件限制, 目前无法使用能进行船舶破损状况计算的三维建模软件, 只能对船舶进行 AutoCAD 二维建模, 并通过 MATLAB 软件编程来实现自己的抗沉辅助决策系统. 为了降低系统的复杂性, 提高操作简便性, 不沉性系统直接以 MATLAB 软件为基础. 所有需要的数据都直接输入 Excel 表格, 手动在 MATLAB 软件的主界面中输入破损状态后, MATLAB 软件会从 Excel 表格中读取数据并进行计算, 输出结果也直接写在 Excel 表格中.

1.2 不沉性系统的基本框架

首先, 构建抗沉辅助决策系统的基本框架, 确定系统的工作原理, 建立系统工作流程图, 如图 1 所示.

系统主要分为 3 个功能模块: (1) 舰船破损浮态和稳性计算模块; (2) 进行抗沉舱实施后影响计算和排序的抗沉舱计算模块; (3) 抗沉方案生成模块.

1.3 破损浮态和破舱稳性的计算

由于以计算静水中的破舱稳性为目标, 故选择使用确定性方法. 选择以《船舶不沉性理论》提供的损失浮力法^[5]建立平衡方程, 借鉴以前的研究成果并综合自身情况, 选择综合使用文献[6]中介绍的矩阵法和《舰船原理》中提供的损失浮力

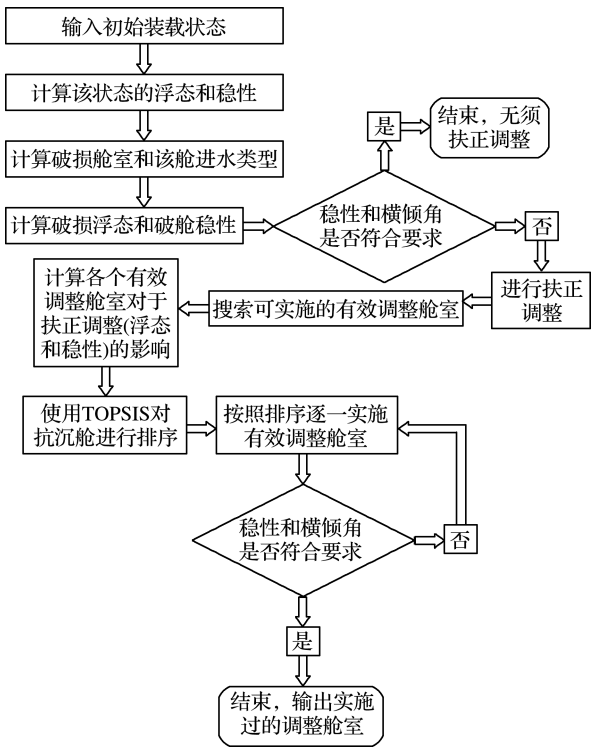


图 1 舰船抗沉辅助决策系统工作流程图
Fig. 1 Flowchart of warship counter-flooding decision-making aid system

法^[7]计算破损浮态. 综合使用《船舶不沉性理论》提供的损失浮力法^[5]和《舰船原理》中提供的损失浮力法^[7]计算破舱稳性.

1.3.1 破损浮态的计算 破损浮态的计算选择综合使用文献[6]中的矩阵法和文献[5]中的损失浮力法.

建立平衡方程:

$$\begin{aligned} \gamma V - P &= 0 \\ m_{xz} + m_{yz} \cdot \tan \theta &= 0 \\ m_{yz} + m_{xy} \cdot \tan \varphi &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} m_{xz} &= V \cdot Y_b - \frac{P}{\gamma} \cdot Y_g \\ m_{yz} &= V \cdot X_b - \frac{P}{\gamma} \cdot X_g \\ m_{xy} &= V \cdot Z_b - \frac{P}{\gamma} \cdot Z_g \end{aligned} \tag{2}$$

式中: V 为破损后的排水体积, X_b 、 Y_b 、 Z_b 为破损后的浮心坐标, θ 为横倾角, φ 为纵倾角.

平衡方程式(1)是非线性隐式的, 可以表示为

$$\begin{aligned} f_1(T_m, \tan \theta, \tan \varphi) &= 0 \\ f_2(T_m, \tan \theta, \tan \varphi) &= 0 \\ f_3(T_m, \tan \theta, \tan \varphi) &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

其中 T_m 为平均吃水。

引进向量表示, $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} T_m \\ \tan \theta \\ \tan \varphi \end{pmatrix}$, $\mathbf{F}(\mathbf{X}) =$

$\begin{pmatrix} f_1(\mathbf{X}) \\ f_2(\mathbf{X}) \\ f_3(\mathbf{X}) \end{pmatrix}$, 采用逐次线性化方法, 则平衡方程式

(1) 可以化为

$$D\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)(\mathbf{X} - \mathbf{X}_k) + \mathbf{F}(\mathbf{X}_k) = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中: $D\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$ 为 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 在 $\mathbf{X}_k$ 处的 Jacobi 矩阵^[6].

第 k 次近似时, 以浮态参数修正值为未知数的逐次线性化方程组可以化为如下的矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{X}_k)}{\partial T_m} & \frac{\partial f_1(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \theta} & \frac{\partial f_1(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \varphi} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{X}_k)}{\partial T_m} & \frac{\partial f_2(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \theta} & \frac{\partial f_2(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \varphi} \\ \frac{\partial f_3(\mathbf{X}_k)}{\partial T_m} & \frac{\partial f_3(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \theta} & \frac{\partial f_3(\mathbf{X}_k)}{\partial \tan \varphi} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta T_{m,k} \\ \delta \tan \theta_k \\ \delta \tan \varphi_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1(T_{m,k}, \tan \theta_k, \tan \varphi_k) \\ f_2(T_{m,k}, \tan \theta_k, \tan \varphi_k) \\ f_3(T_{m,k}, \tan \theta_k, \tan \varphi_k) \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (5)$$

于是, 第 $k+1$ 次近似时的浮态参数为

$$\begin{aligned} T_{m,k+1} &= T_{m,k} + \delta T_{m,k} \\ \tan \theta_{k+1} &= \tan \theta_k + \delta \tan \theta_k \\ \tan \varphi_{k+1} &= \tan \varphi_k + \delta \tan \varphi_k \end{aligned} \quad (6)$$

根据文献[6], 按照船舶静力学原理, 可以求得下列偏导数:

$$D\mathbf{F}(\mathbf{X}_k) = \begin{pmatrix} S & S \cdot Y_f & S \cdot X_f \\ S \cdot (Y_f + Z_f \cdot \tan \theta) & I_{xf}(1 + \tan^2 \theta) + I_{xyf} \cdot \tan \theta \cdot \tan \varphi + S \cdot Y_f(Y_f + Z_f \cdot \tan \theta) + M_{xy} & I_{yf}(1 + \tan^2 \theta) + I_{xyf} \cdot \tan \theta \cdot \tan \varphi + S \cdot Y_f(Y_f + Z_f \cdot \tan \theta) \\ S \cdot (Y_f + Z_f \cdot \tan \varphi) & I_{xf} \cdot \tan \theta \cdot \tan \varphi + I_{xyf} \cdot (1 + \tan^2 \varphi) + S \cdot Y_f(X_f + Z_f \cdot \tan \varphi) & I_{yf}(1 + \tan^2 \theta) + I_{xyf} \cdot \tan \theta \cdot \tan \varphi + S \cdot X_f(X_f + Z_f \cdot \tan \varphi) + M_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4), 求解方程 $D\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)(\mathbf{X} - \mathbf{X}_k) + \mathbf{F}(\mathbf{X}_k) = \mathbf{0}$ 可得破损后的平均吃水 T_m 、横倾角的正切值 $\tan \theta$ 、纵倾角的正切值 $\tan \varphi$, 以及浮心坐标 X_b 、 Y_b 、 Z_b 。

破损后吃水变化的计算, 采用文献[5]的损失浮力法:

平均吃水变化量

$$\Delta T = T_0 - T_m \quad (9)$$

剩余干舷

$$\frac{\partial V}{\partial T_m} = S$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tan \theta} = S \cdot Y_f$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tan \varphi} = S \cdot X_f$$

$$\frac{\partial V \cdot X_b}{\partial T_m} = S \cdot X_f$$

$$\frac{\partial V \cdot X_b}{\partial \tan \theta} = I_{xyf} + S \cdot X_f \cdot Y_f$$

$$\frac{\partial V \cdot X_b}{\partial \tan \varphi} = I_{yf} + S \cdot X_f^2$$

$$\frac{\partial V \cdot Y_b}{\partial T_m} = S \cdot Y_f$$

$$\frac{\partial V \cdot Y_b}{\partial \tan \theta} = I_{yf} + S \cdot Y_f^2$$

$$\frac{\partial V \cdot Y_b}{\partial \tan \varphi} = I_{xyf} + S \cdot X_f \cdot Y_f$$

$$\frac{\partial V \cdot Z_b}{\partial T_m} = S \cdot Z_f$$

$$\frac{\partial V \cdot Z_b}{\partial \tan \theta} = I_{xf} \cdot \tan \theta + I_{xyf} \cdot \tan \varphi + S \cdot Y_f \cdot Z_f$$

$$\frac{\partial V \cdot Z_b}{\partial \tan \varphi} = I_{yf} \cdot \tan \varphi + I_{xyf} \cdot \tan \theta + S \cdot X_f \cdot Z_f \quad (7)$$

式中: S 为破损后的水线面面积, X_f 、 Y_f 、 Z_f 为破损后的漂心坐标, I_{xf} 、 I_{yf} 、 I_{xyf} 为破损后的过漂心的坐标轴的惯性矩。

则矩阵方程中的 Jacobi 矩阵 $D\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$ 可化为

$$F = D - T_m \quad (10)$$

艏艉吃水变化量

$$\Delta T_f = \Delta T + \left(\frac{L}{2} - X_f \right) \tan \varphi \quad (11)$$

$$\Delta T_a = \Delta T - \left(\frac{L}{2} + X_f \right) \tan \varphi$$

则破损后的艏艉吃水

$$T_f = T_{f0} - \Delta T_f \quad (12)$$

$$T_a = T_{a0} - \Delta T_a$$

1.3.2 破舱稳性的计算 破舱稳性的计算选择综合使用文献[5]和文献[7]中的损失浮力法.

根据文献[5],由船舶静力学知识可知:

$$\begin{aligned} h &= Z_b + r - Z_g \\ H &= Z_b + R - Z_g \end{aligned} \tag{13}$$

则破损后的稳性为^[5]

$$\begin{aligned} h &= h_0 - (\Delta Z_b + \Delta r - \Delta Z_g) \\ H &= H_0 - (\Delta Z_b + \Delta R - \Delta Z_g) \end{aligned} \tag{14}$$

式中: h 为剩余初稳性高, H 为破损后的纵稳性高.

由于对于 3 种舱室都使用损失浮力法,不考虑 Z_g 的变化.

破损后浮心变化量 ΔZ_b 为^[5]

$$\Delta Z_b = Z_b - Z_{b0} \tag{15}$$

对于第一类进水舱:

破损后初稳性高的损失量 Δh 和纵稳性高的损失量 ΔH 为^[5]

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 - \frac{T_0}{2} - \sum z_g \right) \\ \Delta H &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 - \frac{T_0}{2} - \sum z_g \right) \end{aligned} \tag{16}$$

对于第二类进水舱:

破损后横稳性半径的损失量 Δr 与纵稳性半径的损失量 ΔR 为^[5]

$$\begin{aligned} \Delta r &= \frac{i_x + S_0 \cdot X_{f0}^2 - S \cdot X_f^2}{V} \\ \Delta R &= \frac{i_y + S_0 \cdot Y_{f0}^2 - S \cdot Y_f^2}{V} \end{aligned} \tag{17}$$

破损后初稳性高的损失量 Δh 和纵稳性高的损失量 ΔH 为^[5]

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 + \frac{T_0}{2} - \sum z_g - \sum \frac{i_x}{v} - \Delta r \right) \\ \Delta H &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 + \frac{T_0}{2} - \sum z_g - \sum \frac{i_y}{v} - \Delta R \right) \end{aligned} \tag{18}$$

对于第三类进水舱:

破损后横稳性半径的损失量 Δr 与纵稳性半径的损失量 ΔR 为^[5]

$$\begin{aligned} \Delta r &= \frac{i_{sx} + S_0 \cdot X_{f0}^2 - S \cdot X_f^2}{V} \\ \Delta R &= \frac{i_{sy} + S_0 \cdot Y_{f0}^2 - S \cdot Y_f^2}{V} \end{aligned} \tag{19}$$

破损后初稳性高的损失量 Δh 和纵稳性高的

损失量 ΔH 为^[5]

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 + \frac{T_0}{2} - \sum z_g - \sum \frac{i_x}{v} - \Delta r \cdot \frac{S_0}{S} \right) \\ \Delta H &= \frac{\sum v}{V} \left(T_0 + \frac{T_0}{2} - \sum z_g - \sum \frac{i_y}{v} - \Delta R \cdot \frac{S_0}{S} \right) \end{aligned} \tag{20}$$

对于各类进水舱室,剩余初稳性高 h 和纵稳性高 H 均为^[5]

$$\begin{aligned} h &= h_0 - \Delta h \\ H &= H_0 - \Delta H \end{aligned} \tag{21}$$

1.4 抗沉舱的选择

选择抗沉舱时,先列出所有压载水舱,即所有可以参与抗沉过程的舱室.如果某压载水舱已经破损则予以排除,剩下的压载水舱即为可用抗沉舱.

1.5 抗沉舱的排序

1.5.1 TOPSIS

(1)TOPSIS 的求解思路

TOPSIS 是解决多属性决策问题的方法之一,借助理想解和负理想解给方案集中各个方案进行排序.该方法将每个方案的 n 个属性值转化为 n 维空间向量所指向的一个点,通过计算这个点与理想解点和负理想解点的空间欧氏距离,即可判定这个方案的优劣程度.

理想解是方案集中并不存在的一个虚拟最佳方案,它的每个属性值都是决策矩阵中该属性的最好值;而负理想解是方案集中的虚拟最劣方案,它的每个属性值都是决策矩阵中该属性的最差值.

若一个方案相对于另一个方案,靠近理想解的同时,又远离负理想解,则为更优方案.在方案集中,最靠近理想解同时又最远离负理想解的方案即为最优方案,最远离理想解同时又最靠近负理想解的方案即为最劣方案.据此,可以对方案集中所有方案进行排序,确定各个方案的优先性^[8].

TOPSIS 具有如下特点:可客观地对多指标情况下的各方案进行综合评价;可根据评估者的主观偏好来对各方案进行综合评价;概念简单,计算过程清晰,可操作性强.

(2)TOPSIS 的算法步骤^[8]

步骤 1 用向量规范法,求得规范化决策矩阵

决策矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})$,规范阵 $\mathbf{Z} = (z_{ij})$,则

$$z_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2} \quad (22)$$

步骤2 构成加权规范阵 $\mathbf{X}$

加权规范阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})$, 权重 $\mathbf{W} = (w_j)^T$ 由决策人给定, 则

$$x_{ij} = w_j \cdot z_{ij} \quad (23)$$

步骤3 确定理想解和负理想解

设理想解 $\mathbf{x}^*$ 的第 j 个属性值为 x_j^* , 负理想解 $\mathbf{x}^0$ 的第 j 个属性值为 x_j^0 , 则理想解

$$x_j^* = \begin{cases} \max x_{ij}; & \text{效益型} \\ \min x_{ij}; & \text{成本型} \end{cases} \quad (24)$$

负理想解

$$x_j^0 = \begin{cases} \min x_{ij}; & \text{效益型} \\ \max x_{ij}; & \text{成本型} \end{cases} \quad (25)$$

步骤4 计算各方案到理想解与负理想解的距离

备选方案 x_i 到理想解的距离

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_j^*)^2} \quad (26)$$

备选方案 x_i 到负理想解的距离

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_j^0)^2} \quad (27)$$

步骤5 计算各方案的指标值 C_i^* , 即优劣程度

$$C_i^* = d_i^0 / (d_i^0 + d_i^*) \quad (28)$$

步骤6 按 C_i^* 由大到小排列方案的优劣次序

1.5.2 TOPSIS 确定抗沉舱排序 利用 TOPSIS 对抗沉舱进行排序的流程图如图 2 所示。

首先使用与计算破损浮态和稳性相同的方法, 计算各个可用抗沉舱对于舰船的影响参数。选择其中对舰船扶正影响较大的参数, 剩余初稳性高 h 、横倾角 θ 、纵倾角 φ 、剩余干舷 F 、艏吃水 T_i 和艉吃水 T_a , 作为评价抗沉舱优劣的指标。

利用式(22), 将每个抗沉舱影响参数 h 、 θ 、 φ 、 F 、 T_i 、 T_a 作为 y_{ij} 进行规范化, 形成规范阵 $\mathbf{Z}$ 。

本次研究根据舰船损管经验和战例分析的成果, 对权重做如下设定: $\mathbf{W} = (0.450 \ 0.300 \ 0.100 \ 0.100 \ 0.025 \ 0.025)^T$, 以适应抗沉舱影响参数的特点。根据式(23), 求出加权规范阵 $\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{Z}$ 。

以剩余初稳性高 h 尽可能大, 剩余干舷 $F = D - T_m$, 横倾角 θ 和纵倾角 φ 为 0, 艏吃水 T_i 和艉吃水 T_a 都等于 T_m 为最优解, 反之之为最劣解。

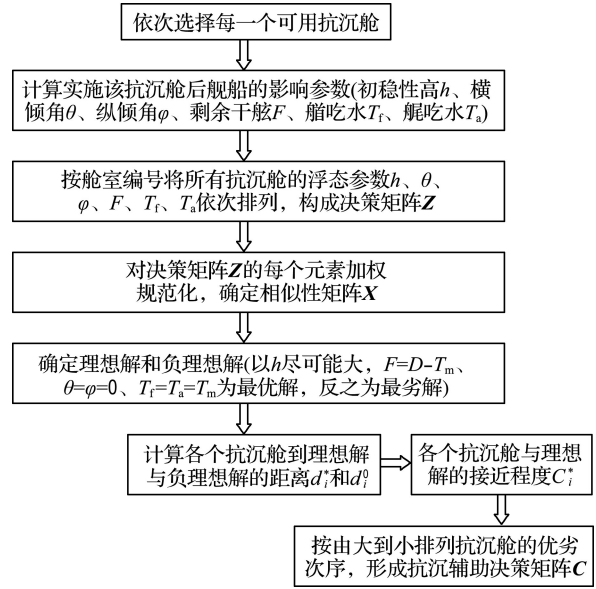


图2 TOPSIS 进行抗沉舱排序流程图

Fig. 2 Flowchart of counter-flooding tanks sequencing by TOPSIS

用式(26)和式(27)计算各方案到理想解和负理想解的距离 d_i^* 和 d_i^0 , 并利用式(28)求出各个抗沉舱的优劣程度 C_i^* , 形成抗沉辅助决策矩阵 $\mathbf{C}$ 。

将抗沉辅助决策矩阵 $\mathbf{C}$ 与舱室编号对应后, 就形成了抗沉舱室优劣程度表。而按照抗沉辅助决策矩阵 $\mathbf{C}$ 中 C_i^* 从大到小的顺序对抗沉舱进行排序, 形成的就是抗沉舱室排序表。

1.6 抗沉方案的生成

文献[9]中使用 TOPSIS、文献[10]中使用 M-H 法和文献[11]中使用 AHP 法进行扶正, 都是采用一定的多属性决策方法, 对可用抗沉舱的有效性进行排序, 再按照有效性顺序逐一实施抗沉舱, 当船舶的浮态和稳性达标后就可以停止迭代, 生成的抗沉方案就是最终的抗沉方案。因为对抗沉舱的有效性进行过排序, 并从有效性最高的抗沉舱开始实施, 所以在扶正计算开始时, 就能保证初始抗沉方案生成的正确指向性, 省去了假设初始扶正方案并判定该方案是否正确, 再判断是否符合扶正要求的迭代过程, 不但方案生成耗时较少, 而且生成的方案简单易行。

借鉴以前的研究成果, 本次研究也按照这一思路来设计系统抗沉方案的生成。系统以舰船的剩余稳性和浮态参数作为目标函数, 以已破损的舱室不能作为调整舱室作为约束条件, 按照抗沉舱室排序表中的排序逐一实施有效调整舱室, 当

船舶的浮态和剩余稳性达到指定范围内时($\theta<\pi/60$,初稳性高 $h>0$),扶正过程即告停止,扶正舱室的实施顺序即为最终的抗沉方案。

输出的结果只有破损后的船舶信息、抗沉舱实施的顺序和实施扶正后的效果,实际使用中只需要对照舱室编号表,按顺序实施抗沉舱即可,以期达到提高方案简单性的目的。

2 实船案例分析

系统编制结束后,需要选择一艘实船进行算例验证计算,验证系统是否达到设计要求并具有可靠性。

由于保密性原因,此次实船算例验证计算未使用军用舰船,使用的是某海事局溢油应急处置船作为算例。

2.1 数据准备

首先需对算例船所有可能进水的舱室进行编号,形成舱室编号表。

接着,需要计算各个舱室影响到船舶浮态和稳性的舱室要素,将其汇入舱室要素表中。

不同载况船体水下要素输入船体要素表中不同的 sheet 中,计算时根据载况不同分别读取。其中 $type=1$ 代表空载状况, $type=2$ 代表标准状况, $type=3$ 代表满载状况。

2.2 系统验证计算

2.2.1 破损情况的计算 选择标准载况作为初始装载状态,系统的 MATLAB 输入界面中输入 $type=2$;假定左舷 No.1 压载水舱(即 2 号舱)破损,破损类型为第三类进水舱,在系统中输入该舱室编号和进水舱类型, $i=2, st=3$ 。运行抗沉辅助决策计算程序 *stability*。

系统的破损浮态和稳性计算模块会计算出此时船舶的稳性和浮态,见表 1。

2.2.2 抗沉舱的选择和排序 系统会根据船舶的横倾角 θ 和初稳性高 h 判断是否需要扶正,如 $\theta\geq\pi/60$ 或 $h\leq 0$ 则需要扶正,反之则无须进行扶正。

如果系统判断需要扶正,则运行抗沉舱计算模块。抗沉舱计算模块会采用计算浮态和稳性相同的方法,计算出各个抗沉舱对于破损后的舰船浮态和稳性的影响(已破损的舱室填 0 补位),见表 2。

之后,系统会使用 TOPSIS,计算各个抗沉舱的优劣程度(已破损的舱室同样填 0 补位)。

接着,系统会对使用 TOPSIS 计算得到的抗沉舱的优劣按照由大到小的顺序进行排序,排序的结果即为抗沉舱排序表(已破损的舱室同样填 0 补位),见表 3。

表 1 破损情况表
Tab.1 Table of damaged situation

舱室编号	初稳性高/m	纵稳性高/m	横倾角/rad	纵倾角/rad	剩余干舷/m	艏吃水/m	艉吃水/m
2	3.282 5	114.54	-0.066 2	0.011 3	1.469 8	3.755 4	3.371 7

表 2 抗沉舱对扶正贡献情况表
Tab.2 Table of contribution of counter-flooding tanks to insubmeribility

舱室编号	初稳性高/m	纵稳性高/m	横倾角/rad	纵倾角/rad	剩余干舷/m	艏吃水/m	艉吃水/m
2	0	0	0	0	0	0	0
3	3.319 5	114.58	0.000 4	0.022 0	1.327 5	4.131 5	3.059 2
4	3.291 4	114.56	-0.107 2	0.014 6	1.407 4	3.790 5	3.196 4
5	3.291 4	114.56	-0.023 4	0.014 6	1.407 4	3.790 5	3.196 4
14	3.295 8	114.56	-0.126 2	0.009 3	1.378 7	3.635 9	3.377 2
15	3.295 8	114.56	-0.003 7	0.009 3	1.378 7	3.635 9	3.377 2
23	3.279 6	114.54	-0.078 2	0.009 5	1.447 6	3.574 3	3.302 2
24	3.279 6	114.54	-0.053 6	0.009 5	1.447 6	3.574 3	3.302 2
25	3.385 0	114.65	-0.102 6	0.016 9	1.362 1	3.916 4	3.174 6
26	3.385 0	114.65	-0.026 8	0.016 9	1.362 1	3.916 4	3.174 6
27	3.431 8	114.70	-0.119 0	0.013 2	1.314 1	3.834 8	3.330 2
28	3.431 8	114.70	-0.009 1	0.013 2	1.314 1	3.834 8	3.330 2
29	3.390 8	114.66	-0.104 6	0.008 1	1.356 1	3.617 4	3.434 1
30	3.390 8	114.66	-0.024 6	0.008 1	1.356 1	3.617 4	3.434 1

表 3 抗沉舱优劣程度排序和实施顺序表

Tab. 3 Table of effectiveness and implementation sequences of counter-flooding tanks

舱室编号	优劣程度	实施顺序
3	0.821 0	1
23	0.186 2	
24	0.184 5	
29	0.171 6	
14	0.169 2	
30	0.166 2	
15	0.161 0	
4	0.137 1	
5	0.131 4	
27	0.114 3	
25	0.106 7	
28	0.106 4	
26	0.101 1	
2	0	
		0

2.2.3 抗沉方案的生成 扶正计算模块会按照抗沉舱排序表顺序实施抗沉舱,并计算扶正后的浮态和稳性.当浮态和稳性达标($\theta<\pi/60,h>0$)后,实施过程停止.实施抗沉舱的顺序和过程,即为抗沉辅助决策方案,见表3.

最后,系统会把破损后的船舶信息、抗沉舱实施的顺序和实施扶正后的效果,统一写入舰船扶正情况表中,见图3.

破损舱室	初稳性高(m)	纵稳性高(m)	横倾角(rad)	纵倾角(rad)	剩余干舷(m)	舱吃水(m)	舰吃水(m)
2	3.2825	114.54	-0.0662	0.0113	1.4698	3.7554	3.3717
实施顺序	I	II	III	IV	V	VI	VII
实施舱室	3						
扶正后	初稳性高(m)	纵稳性高(m)	横倾角(rad)	纵倾角(rad)	剩余干舷(m)	舱吃水(m)	舰吃水(m)
	3.3195	114.58	0.0004	0.022	1.3275	4.1315	3.8592

图 3 舰船扶正情况表

Fig. 3 Table of warship insubmeribility situation

2.3 计算结果分析

系统最终的输出结果,也就是显示在操作人员面前的,只有舰船扶正表(图3).其他表只填写在 excel 表格中,只有必要时才调出,以实现操作简便的特点.

验证计算结果表明,进行扶正后,实船的初稳性高比扶正前有所提高且大于零,横倾角 θ 减小到指定范围内($\theta<\pi/60$),纵倾角 φ 和艏艉吃水差(T_1-T_a)有所增大、剩余干舷 F 有所减小,但均在可接受范围内.因而可以证明,不沉性系统提供的抗沉方案正确有效,且在一舱破损情况下计算精确度能够基本满足实际要求.

整个破损计算耗时不足 2 min,实现了编制系统时提出的对于快速性要求.

3 结 语

为了提高系统的简便性和快速性,系统选择直接基于 MATLAB 软件进行计算;为了尽可能提高抗沉方案生成的快速性和方案的可实施性并保证足够计算精度,选择综合使用损失浮力法和矩阵法计算破损浮态和破舱稳性,使用 TOPSIS 快速生成抗沉方案.系统建立过程中以保证系统易操作性、方案生成快速性、方案简单性为主要目标,兼顾计算精确性,保证不沉性系统更好地适应实际中的抗沉辅助决策.

此次研究由于实际条件限制(缺乏 NAPA、COMPASS 等软件)未能三维建模计算,因而该舰船抗沉辅助决策系统必然存在计算精确性较低的问题.尤其是船舶多舱连破的情况,二维建模的简单叠加是无法模拟出真实情况的多舱破损对船舶的叠加影响.因而在实船案例计算中,选择验证一舱破损情况.实船案例的验证计算表明,此次编制的舰船辅助抗沉决策系统能够基本满足实际的计算精确度要求,而且该舰船不沉性系统的确实实现了最主要的设计目标:(1)操作相对简单;(2)抗沉方案生成快捷、耗时少;(3)生成的方案简单易懂、易实施.

参考文献:

[1] 方万水,李 炜,吴先高. 舰船损管监控系统发展概述[J]. 舰船科学技术, 2002, 24(6):37-39.
FANG Wanshui, LI Wei, WU Xiangao. The generalization of damage control system's development for naval ships [J]. Ship Science and Technology, 2002, 24(6):37-39. (in Chinese)

[2] 王平团,房玉吉,张 扬. 舰船生命力的“保姆”——舰船损管监控系统[J]. 舰船知识, 2015(4):33-36.
WANG Pingtuan, FANG Yuji, ZHANG Yang. Warship damage control monitoring system [J]. Naval and Merchant Ships, 2015(4): 33-36. (in Chinese)

[3] 韩 伟,周佳宇,刘克荣. 舰船损管监控系统的设计考虑[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(5):58-62, 71.
HAN Wei, ZHOU Jiayu, LIU Kerong. Design considerations of damage control and monitoring system for ships [J]. Chinese Journal of Ship

- Research, 2007, **2**(5):58-62,71. (in Chinese)
- [4] 浦金云,金涛,邱金水,等. 舰船生命力[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:386-443.
- PU Jinyun, JIN Tao, QIU Jinshui, *et al.* **Ships Survivability** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:386-443. (in Chinese)
- [5] 马涅采夫 Н Я. 船舶不沉性理论[M]. 键链,译. 北京:国防工业出版社, 1977:294-308.
- МАЛЫЦЕВ Н Я. **Ships Unsinkable Theory** [M]. JIAN Lian, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 1977:294-308. (in Chinese)
- [6] 赵晓非,林焰. 关于解船舶浮态问题的矩阵方法[J]. 中国造船, 1985(3):55-64.
- ZHAO Xiaofei, LIN Yan. Matrix methods for solving ship floating state problem [J]. **Shipbuilding of China**, 1985(3):55-64. (in Chinese)
- [7] 卢晓平. 舰船原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:85-96.
- LU Xiaoping. **Ships Principle** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:85-96. (in Chinese)
- [8] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003:151-214.
- YUE Chaoyuan. **Decision-making Theory and Method** [M]. Beijing: Science Press, 2003:151-214. (in Chinese)
- [9] OLCER A I, MAJUMDER J. A case-based decision support system for flooding crises onboard ships [J]. **Quality and Reliability Engineering International**, 2006, **22**(1):59-78.
- [10] HU Lifan, MA Kun, JI Zhuoshang. A M-H method-based decision support system for flooding emergencies onboard warship [J]. **Ocean Engineering**, 2013, **58**:192-200.
- [11] 孔庆福,曾凡明,吴家明,等. 舰艇浮稳性保持与优化计算机辅助决策系统[J]. 舰船科学技术, 2006, **28**(1):22-26.
- KONG Qingfu, ZENG Fanming, WU Jiaming, *et al.* The computer-aided-decision system for maintenance and optimization of warship floatation performances and stability performances [J]. **Ship Science and Technology**, 2006, **28**(1):22-26. (in Chinese)

Study of floodability decision-making aid system of warship based on TOPSIS

ZHANG Weiying^{*1}, LIN Li², LIN Yan², YU Xin¹,
JIN Zhao¹, WANG Qi², MAO Xiaoxu¹

(1. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Quick and efficient damage control is the key to maintain the vitality of warship when the naval vessel is damaged. As a result, excellent counter-flooding decision-making aid is an important guaranty for quickly and efficiently implementing anti-flooding action. Aiming at solving the problem that the present counter-flooding decision-making aid system always provides counter-flooding decision which is time-consuming and complexly operating, the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is applied to the naval vessel floodability system. In this way, a counter-flooding decision-making aid system with the characteristics of easy, fast and simple implementation in providing counter-flooding scenario and enough accuracy in actual requirements, is built. Finally, a ship case is used as a simulation example to test that the reliability, rapidity, convenience for operation and accuracy of the system exactly meet the requirements in engineering.

Key words: warship damage control technology; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); floodability; counter-flooding scenario; decision-making aid