

基于层次分析法的沉船扳正作业钢缆安全性评价模型

李振华

(交通运输部上海打捞局, 上海 200090)

摘要: 为实现对沉船扳正作业方案可行性的检验, 引入层次分析法, 开展对沉船扳正作业钢缆安全性评价模型的设计研究。计算沉船扳正作业中钢缆需求张力, 并引入层次分析法实现对安全性评价指标选择以及对权重的确定, 根据确定的指标权重, 构建沉船扳正作业钢缆安全性评价模型, 输出评价结果。通过将新评价模型应用于具体沉船事故的扳正作业当中, 可实现对钢缆安全性的量化评价, 得出的评价结果可实现对作业方案可行性的检验。

关键词: 层次分析法; 扳正; 安全性; 钢缆; 作业; 沉船

中图分类号: U657.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0022-03

引言

在遇到需要打捞的沉船时, 首先需要将沉没的船舶翻转并扶正, 而为了能够达到更加有效的扳正工作效果, 需要对沉船扳正作业的相关工作进行研究, 并针对各项所需的辅助工具在应用中的安全性进行分析^[1-2]。在进行抢险打捞过程中, 科学合理的打捞方案是取得成功的基础。现场情况受恶劣天气、海况因素影响发生变化时, 若能够实现对作业方案中各项影响安全性的因素进行调整, 并不断完善作业方案, 则能够确保作业任务的顺利进行。在进行沉船扳正作业时, 必须要用到钢缆材料完成沉船扳正工作^[3]。因此, 基于安全性评价的重要性, 以及钢缆在沉船扳正作业中占据的不可或缺地位, 引入层次分析法, 开展对沉船扳正作业钢缆安全性评价模型的设计研究。

一、基于层次分析法的沉船扳正作业钢缆安全性评价模型

1. 沉船扳正作业中钢缆需求张力计算

为实现对沉船扳正作业中的钢缆安全性进行评价, 需针对具体沉船事故当中扳正作业钢缆的需求张力进行计算。假设这沉船事故发生后, 沉船呈倒扣状态, 左舷船底略高, 船艏基本固定, 船艉会随潮水和流向而转动^[4]。针对沉船进行扳正作业需要在明确沉船内部结构、重量、舱室布置等关键参数的基础上对扳正作业方案进行设计。在进行沉船扳正作业时, 所使用的导缆通常长度不会超过 200m, 针对这种长度较短的钢缆, 在对其需求张力计算时, 可忽略钢缆本身的质量, 但在计算中不可忽略钢缆的刚度^[5]。假设在某一时刻起重机装置上某一吊点位置一定, 针对这一点上的钢缆需求张力进行计算, 其公式为:

$$T(t) = \begin{cases} k[l(t) - l_0] \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

上述公式中, $T(t)$ 表示为某一时刻 t 钢缆的需求张力; k 表示为钢缆的刚度; $l(t)$ 表示为在 t 时刻钢缆的长度; l_0

表示为钢缆未拉伸长度。在计算过程中, 若 $l(t)$ 大于 l_0 , 则按照公式上半部分进行计算; 若 $l(t)$ 小于或等于 l_0 , 则按照公式下半部分进行计算。公式中 $l(t)$ 又可通过下述计算得出:

$$l(t) = |X_1(t) - X_2(t)| \quad (2)$$

上述公式中, $X_1(t)$ 表示为在某一时刻 t 时沉船上连接点的坐标; $X_2(t)$ 表示为某一时刻 t 时起重机装置上吊带的坐标。根据上述公式, 得出在进行沉船扳正作业时钢缆的需求张力。将计算结果作为文中安全性评价模型的评价依据, 为后续模型输出结果提供对照条件。在杨氏模量 E 和截面积乘积 A 为常数时, 其表达式为:

$$EA = kl \quad (3)$$

若绞缆机在某一时刻开始收缆, 则其收缆速度可通过下述公式计算得出:

$$V = \frac{d}{dt} l(t) \quad (4)$$

根据上述公式得出收缆速度并为后续评价提供重要计算依据。

2. 基于层次分析法的安全性评价指标选择与权重确定

在明确沉船扳正作业中钢缆需求张力后, 利用层次分析法, 针对具体作业方案中影响钢缆张力的因素进行分析, 并从中挑选得到评价指标。在扳正作业中, 钢缆的张力主要受到沉船船体重量、绞缆机收缆速度、钢缆自身刚度、所在海域波浪载荷等因素影响。在钢缆的刚度发生变化时, 随着刚度的不断增加, 钢缆的张力也呈现出逐渐增加的趋势, 二者之间呈非线性关系。在收缆的过程中, 速度越快, 则钢缆张力达到稳定的时间越短, 但收缆速度增加时, 钢缆的张力波动范围越大。其与各个评价指标与钢缆之间均为逆向相关关系。

在明确各个评价指标后, 针对各个指标权重进行划分, 引入层次分析法, 得出各个指标层次分析的判别结果:

收稿日期: 2022-05-14

作者简介: 李振华 (1986-), 男, 交通运输部上海打捞局, 工程师。

$$\bar{a}_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L a_{ij}^k \quad (5)$$

上述公式中， L 表示为层次分析中的层次数量； k 表示为某一专家给出的层次分析判别数值。进一步得到合成权重为：

$$W^{(k)} = P^{(k)} P^{(k-1)} \dots P^{(2)} \quad (6)$$

上述公式中， W 为各项影响因素的合成权重； P 为各项影响因素的相对权重系数，即 $P^{(k)}, P^{(k-1)}, \dots, P^{(2)}$ 分别对应沉船船体重量、绞缆机收缆速度、钢缆自身刚度、所在海域波浪载荷等影响因素的权重系数。第 $k-1$ 层中 n 个元素的各个权重分量可表示为：

$$P^{(k)} = (P_1^{(k)}, P_2^{(k)}, \dots, P_l^{(k)})^T \quad (7)$$

在具体权重划分中，按照自上而下的原则计算各指标权重，若恰好计算第 $k-1$ 层上多个元素的各权重分量，则得到最终合成的权重数值。

3. 建立评价矩阵及模型结果输出

在建立评价矩阵时，在沉船扳正作业方案中提取上述评价指标，假设钢缆的张力在允许范围内，则沉船扳正作业能够达到安全作业效果，将这一思路作为评价依据，对评价矩阵构建如下所示：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ a_{12} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

上述公式中， A 表示为基于层次分析的评价矩阵， a_{ij} 表示为横列第 i 个纵列第 j 个评价指标，其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$; $j=1, 2, 3, \dots, m$ ，评价指标包含沉船船体重量、绞缆机收缆速度、钢缆自身刚度、所在海域波浪载荷等影响因素，分别对应 $a_{12}, a_{21}, a_{ij}, \dots, a_{nm}$ 。将上述公式计算得出的结果作为钢缆安全性评价结果，但是此时评价结果还不够精确，需要进一步优化，根据平阿基结果，计算钢缆的安全评价指标，安全评价指标的公式为：

$$A' = \frac{[11 \dots 1] A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}{n^2} \quad (9)$$

钢缆安全评价指标最大值为 1，当安全评价指标小于或等于 0 时，则此时说明作业方案中钢缆的张力不符合钢缆需

求张力要求，作业方案不可行；当安全评价指标大于 0 时，越接近 0，则钢缆安全性越差，越接近 1，则钢缆安全性越强，钢缆的张力越符合钢缆作业的需求张力。

二、实例应用分析

通过文中上述论述，在引入层次分析法的基础上，提出了一种针对沉船扳正作业钢缆安全性的评价模型，为了进一步验证这一模型的应用性能，选择以某次海上沉船事故作为依托，将其相关信息获取并作为基础，对沉船扳正作业当中钢缆的安全性进行评价，并对评价结果进行分析。以实际打捞案例“振和 168”轮作为实例应用分析，该船舶失联位置和发现位置如图 1 所示。



图 1 “振和 168”轮失联和发现位置

沉船失事海域位于台湾海峡，环境较为恶劣，风浪较大。现场风力阵风达到 9 级，浪高 5m 以上。沉船位置高潮水深接近 25m，距离沿岸素有“梅花风浪区”的梅花浅滩只有 8 海里，通常在遇到东北大风，该海域会形成浪高 4-5m 的巨浪。海上救助打捞作业时常常受到复杂的气象、海况条件等自然因素和沉船情况、工程进展等诸多条件影响，具体情况随时改变，无法预料的未知因素很多，导致打捞难度增加，此次“振和 168”打捞尤甚。沉船“振和 168”的相关信息记录如表 1 所示。

表 1 沉船相关信息记录表

序号	信息	参数
(1)	沉船主尺度	Loa × B × D=137m 18m × 8.6m
(2)	设计吃水	8.6m
(3)	空载吃水	2.817m
(4)	满载排水量	12,238t
(5)	空载排水量	5,417t
(6)	总吨	6,426t
(7)	沉船位置	北纬 25° 57.2' 东经 119° 50.2'
(8)	沉船状态	翻扣

针对该沉船事故信息，采取以下打捞方案：

搜寻工作完成后，将对沉船进行抽油工作，将沉船携带的重油等污染物抽出。抽油工作完成后，进行扳正作业。先在沉船上烧焊 20 个桩头，并布置 20 道钢缆，上海打捞局主作业船“大力号”和“勇士号”一同将沉船扳正到正浮状态。（若沉船上层结构插入海底，影响扳正，则在扳正之前需要将沉船上影响扳正的结构割除）。将沉船扳正到正沉状态后，选择部分压载舱、空舱进行压气排水，然后用“大力号”和

“勇士号”重新起吊使沉船舱口围板露出水面，经过必要的抽水封堵之后，使沉船达到安全自浮状态，将沉船拖到船东和海事局指定位置进行交船。方案中选择的钢缆 $\phi 110$ 、 $\phi 32$ 。在进行沉船扳正作业钢缆布置时，其基本流程为：焊接扳正桩头——镶嵌钢丝——布置 4 寸牵引钢缆——牵引 13 寸扳正钢缆——切割透气帽或封堵透气孔——机舱和 3#货舱充气、船艏抬浮——预埋起浮牵引钢缆和“小辫子”——挂钩和连接扳正钢缆——清除障碍物——扳正沉船，基本流程如下。

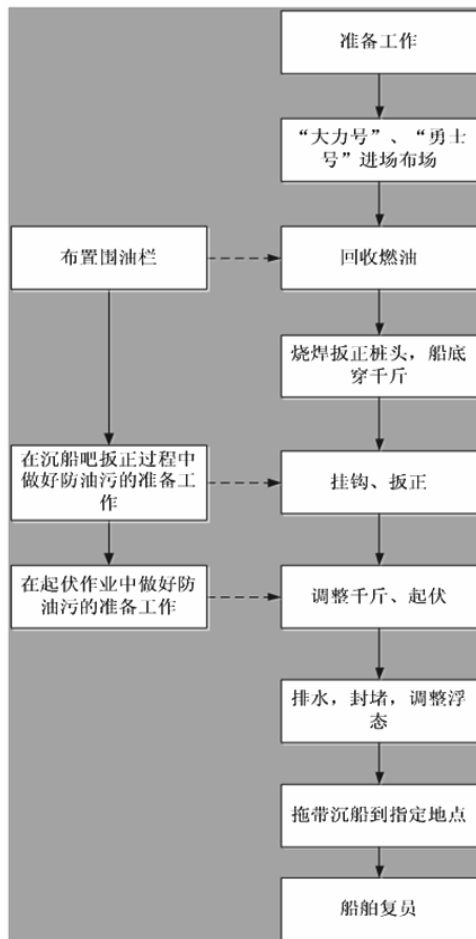


图 2 基本流程

在明确上述沉船扳正作业的基本方案以及所需钢缆的基本规格后。针对该钢缆作业，应用文中提出的评价模型对钢缆的安全性进行评价。利用文中上述论述内容，首先完成对

沉船扳正作业中钢缆的需求张力，并利用文中评价模型得出作业方案中各个规格钢缆的安全性评价结果，将得到的两组数据进行比较，并绘制成表 2 所示。

表 2 各规格钢缆安全性评价结果与需求张力对比

钢缆规格	需求张力 (kN)	实际钢缆张力 (kN)	钢缆安全评价指标	
			标	内
$\phi 110$	50~60	53.3	0.98	是
$\phi 80$	15~25	20	0.97	是
$\phi 48$	5~15	10	0.98	是
$\phi 32$	0~10	5.5	0.96	是
$\phi 12$	0.5~1.5	1	0.98	是

从表 2 中得到的数据可以看出，各个规格下钢缆的实际张力均在需求张力范围内，通过文中评价模型得到的钢缆安全评价指标也均在 0.95 以上。因此，从得出的结果可以看出，针对这一沉船事故，采用上述作业方案具备极高的安全性，该作业方案可行。

三、结束语

现代化施工过程中，统筹是方法，管理是手段。为了顺利完成这次打捞任务，上海打捞局投入了大量的船舶、设备及人力资源。作业船舶由于受沉船状态和天气等各方面因素影响经常需要移位等作业。为了保证尽快地完成本次沉船救助打捞任务，现场经常会多个作业面同时施工。为了统筹安排打捞现场的船舶、设备及人员，在作业的过程中需要对与作业相关的各类材料、设备进行安全性评价，以此才能够确保作业的安全和有效。同时，在评价模型得出的结果基础上，能够实现对各类资源的充分利用，合理调整施工方法和步骤，逐步理顺施工现场各个环节，保证了施工进度。

参考文献

- [1] 李军.《夏长》号沉船打捞过程中扳正驳船运动响应分析[J].广东造船, 2019, 38(6): 30-33.
- [2] 王金龙, 孙继刚, 段明昕. "振和 168" 轮救助打捞工程难船扳正分析[J]. 广东科技, 2015, 24(14): 112-114.
- [3] 潘德位, 林成新, 孙德平等. 大倾角搁浅船舶扳正过程分析[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(2): 50-58.
- [4] 吴建成. 沉船扳正封尾力计算[J]. 船海工程, 2020, 49(1): 27-29.
- [5] 黄利琼, 王立, 刘海. 基于模糊层次综合评价法的疫情影响下高处作业安全管理体系评估[J]. 石油化工建设, 2022, 44(1): 50-53.

(上接第 21 页)

[4] Rafał Szlapczynski. A New Method of Ship Routing on Raster Grids, with Turn Penalties and Collision Avoidance[J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 27-42.

[5] 孟祥杜. 无人船路径规划算法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2017.

[6] 陈佳. 无人驾驶救助船路径规划算法的研究[D]. 武汉: 武

汉理工大学, 2013.

[7] 刘琨, 张永辉, 任佳. 基于改进人工势场法的无人船路径规划算法[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 99-104.

[8] 张文拴. 基于改进势场蚁群算法的无人船路径规划研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.