

# 重大件货物海上运输倾覆稳定性校核方法简析

王超<sup>1</sup>, 张岩<sup>1</sup>, 王南海<sup>2</sup>

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451; 2. 能威(天津)海洋工程技术有限公司, 天津 300392)

**摘要:** 重大件货物在海上运输途中须进行绑扎固定, 避免其受船体运动倾覆力的影响而发生位移或翻转运动, 造成货物损毁。在海上运输途中, 货物的倾覆稳定性起着至关重要的作用, 其校核结果直接关系到整个运输方案的可行性与否。本文结合 DNV 和 ABS 船级社规范, 阐述了重大件货物海上运输结构稳定性校核的计算方法与过程, 为运输方案的前期设计提供了理论数据支持。

**关键词:** 重大件货物; 海上运输; 倾覆力; 稳定性校核

**中图分类号:** U698

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006—7973 (2021) 11—0041—03

船舶在海上运输途中, 会受到风浪等环境载荷的作用产生摇荡运动, 其甲板上方载运的货物, 比如导管架、上部模块, 或者大型浮式工程船, 会随着船舶一起运动,

从而受到加速度产生的惯性载荷的作用。同时, 外部环境风也会作用到货物上, 从而产生风压作用力。所以, 海上运输的货物需要进行系固。这样可以避免货物受船

报备制度, 严格落实安全隐患整改闭环管理<sup>[2]</sup>。

## 3.2 提升船员履职尽责能力

渡运单位应对新任职船员实行三级安全教育, 驾驶员实行上岗前检查, 杜绝疲劳驾驶及酒后驾驶, 对所有船员定期开展安全教育培训并考核, 熟练应急操作, 提升专业素养, 及时掌握船员心理职业健康状况, 有针对性地进行疏导培训, 建立健全船员考核管理机制, 着力加强船员安全意识与责任心, 形成“人人都是安全员、人人都是监督员”的良好氛围。

## 3.3 加强信息化技术的运用

近日, 江苏省交通运输厅印发了《智慧交通产业发展(2021—2023年)》、《5G、北斗等新技术推广应用(2021—2023年)》等文件, 为水上交通运输渡运单位指明了方向, 在传统的安全管理基础上逐步加强信息化技术手段在安全渡运生产的运用, 基于 AIS 系统、5G+北斗系统、人工智能、大数据以及物联网技术, 加强岸基监控系统、船舶安全预警平台建设, 集成天气预警、江面船舶航行动态监管、智能避碰预警、船员行为分析、人车货统计识别系统、渡船积载平衡报警等安全智能辅助功能, 将进一步提升安全渡运管理水平。

## 3.4 规范航行避让行为

《长江江苏段船舶定线制(2021年)》中规定渡船为“让路船”, 渡船驾驶员穿越航道时应和附近船舶加强联系, 明确会让意图, 不得盲目穿越。渡运单位应与海事部门加强协作, 建议通过灯光、浮标等标识出渡运区域范围, 同时通过 AIS 系统电子海图, 由航道部门

划定标识渡运水域, 对偏离渡运水域的渡船触发报警并提醒调度人员, 对进入渡运水域的其他船舶进行提醒。渡运区域的边界指示应当清晰明了, 上下水船要能准确地判断渡运区域位置, 提醒渡船尽量在渡运水域内航行, 同时建议海事部门交管中心通过 VHF 要求进入渡运水域的船舶加强沟通瞭望, 与渡船主动联系, 明确各自意图, 避免船舶碰撞<sup>[3]</sup>。

## 4 结语

江苏渡口分布多, 渡运量依然较大, 渡运是水上交通安全的重大风险源, 需要渡运单位时刻紧绷安全生产这根弦, 做到落实安全生产主体责任, 提升船员专业素养, 履职尽责, 加强信息化技术在安全渡运中的运用, 规范在航船舶避让行为, 如此才能打造全方位安全可靠的渡口, 营造安全的渡运环境条件, 促进长江渡运生产步入安全化、标准化、信息化的道路, 使水上交通安全管理工作迈上新的台阶。

## 参考文献:

- [1] 郑哲峰. 长江江苏段渡口渡船安全管理研究 [D]. 大连海事大学, 2018.
- [2] 乔梁, 何日光. 渡运安全监管研究 [C]// 中国航海学会 2014 年海事管理学术年会优秀论文集. 2014.
- [3] 刘春启, 张娇凤. 江苏长江客汽渡安全管理现状及发展建议 [J]. 水运管理, 2017, 039(010):18-20,26.

体运动倾覆力的影响而发生倾覆，甚至毁坏，同时也可以避免货物坠入海中导致货物的损失<sup>[4]</sup>。

本文的目的在于参考以往已经实施的项目经验，同时根据挪威船级社（DNV）和美国船级社（ABS）的规范标准等要求，对重大件货物海上运输倾覆稳定性校核的规范计算方法和步骤作简单介绍。

## 1 货物倾覆稳定性校核方法

### 1.1 常规货物

导管架、上部模块等常规货物，其底部支撑结构面积较小，且结构强度相对较弱，为避免海上运输途中的倾覆，通常使用焊接斜拉筋和筋板的方式进行绑扎固定。对于此类型货物的倾覆稳定性及固定结构详细设计，可以使用海洋工程专业计算软件进行直接计算。

### 1.2 重大件货物（大型工程船等浮体货物）

对于重大件货物而言，其结构形式的特点和使用方式，直接决定了与常规货物的绑扎固定方式的不同：

- （1）绑扎固定结构与货物之间，尽量减少焊接，或者不焊接；
- （2）货物绑扎固定结构设计时，不考虑由于船舶横摇和纵摇产生的惯性力弯矩因素，固定结构只允许承受单方向的正压力；
- （3）货物底部直接由固定在载运船舶甲板的枕木支撑，在垂直方向上不设计固定结构。

综合考虑上述 3 个方面的因素影响，重大件货物海上运输倾覆稳定性不能使用软件直接计算得到，则需要使用规范计算方法和步骤进行校核。

## 2 重大件货物倾覆稳定性校核步骤

重大件货物和运载船舶是两个独立分开的个体，固定结构只是限制货物的水平运动。对于重大件货物的倾覆稳定性而言，通常更关注在船舶横向的倾覆稳定性；而在船舶长度方向，其纵摇运动较小，货物在此方向发生倾覆的可能性更小。当船舶发生横摇运动时，货物在惯性力和风载荷的作用下，会产生横向倾覆的趋势。如图 1 显示了重大件货物与运载船舶之间的相对关系。

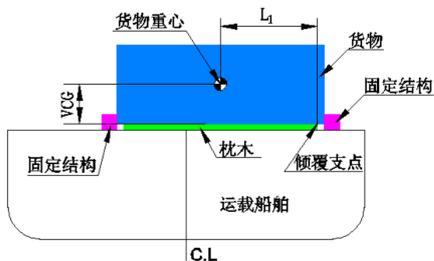


图 1 重大件货物与运载船舶的相对关系

图中，VCG：货物重心至枕木上表面的垂直距离；L<sub>1</sub>：货物重心至倾覆支点的水平距离，即货物回复力臂。

图 1 中所示各个部分，对应关系如下：

- （1）倾覆支点通常定义在货物底部与枕木上表面接触处；
- （2）固定结构焊接在运载船舶甲板上方，且与货物两侧不焊接；
- （3）枕木固定材料使用钢质扁铁，并焊接固定至运载船舶甲板上。

货物的侧向倾覆稳定性校核，需同时考虑风载荷弯矩、风倾载荷弯矩，以及由于船舶运动产生的惯性力载荷弯矩的迭加影响。惯性力载荷主要包括三个部分：横荡加速度产生的惯性载荷、横摇加速度产生的惯性载荷、垂荡加速度产生的惯性载荷。

### 2.1 风载荷弯矩

参考 ABS 船级社的相关规范标准，货物受到的环境风速，以距离海平面以上 15.3m 处为基准面。此外，风载荷计算时，以下两种风速需要同时考虑<sup>[2]</sup>：

- （1）持续时间为 1 小时的平均风速；
- （2）持续时间为 1 分钟的阵风风速。

目前，ABS 规范给出风压计算公式<sup>[2-3]</sup>：

$$F_w = 0.0623V_k^2 C_k C_s A / 1000 \quad (1)$$

其中，C<sub>s</sub>：货物结构件的形状系数；C<sub>k</sub>：货物结构件的高度系数；A：货物结构件在迎风方向的投影面积；V<sub>k</sub>：设计计算风速。

对于公式（1）中涉及到的货物结构件的形状和高度系数，参照美国船级社规范第 3 节相关内容的规定和建议，对货物结构进行分块取值，通过上述公式对各个分块进行风载荷的计算；然后，将各个分块的风载荷进行迭代求和计算，进而得到所需要的重大件货物所受到的风载荷。

所以，作用至重大件货物底部枕木上表面处的风载荷弯矩计算为：

$$M_w = F_{w-Total} \times VCG \quad (2)$$

### 2.2 风倾载荷弯矩

重大件货物在海上运输过程中，运输船舶与货物整体受到风载荷的作用时，在船舶横向会发生一个很小角度的倾斜。此横倾角可以通过专业的水动力软件 MOSES 计算得到；计算横倾角时，同时考虑了 2.1 章节规定的两种风速。

当重大件货物和运输船舶整体出现横倾角时，货物

的重量在船舶横向上会产生一个与运输船舶甲板平行的分量。此分量即为风倾载荷：

$$F_{\theta} = W \times \sin\theta \quad (3)$$

式中， $W$ ：货物重量； $\theta$ ：船舶横倾角度。

因此，风倾载荷作用至枕木上表面的弯矩为

$$M_{\theta} = F_{\theta} \times H_w \quad (4)$$

式中， $H_w$ ：货物风压中心至枕木上表面的垂直距离。

### 2.3 惯性载荷弯矩

计算重大件货物的惯性载荷方法，其过程与常规海上结构物运输类似：首先使用水动力计算软件 MOSES 计算得到由于船舶运动在货物重心处的 6 个自由度的最大加速度：横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇；然后，将横摇角加速度和横荡加速度产生的惯性载荷，计算得到其作用至枕木上表面处的弯矩。

(1) 横摇角加速度产生的惯性载荷弯矩

$$M_{rot} = W \times R_{xx}^2 \times a_{rot} \quad (5)$$

式中， $W$ ：货物重量； $R_{xx}$ ：货物重心对运载船舶中纵轴的质量回转半径； $a_{rot}$ ：货物重心处横摇角加速度。

(2) 横荡加速度产生的惯性载荷弯矩

$$M_{sway} = W \times a_{sway} \times VCG \quad (6)$$

式中， $W$ ：货物重量； $VCG$ ：货物重心至枕木上表面的垂直距离； $a_{sway}$ ：货物重心处横荡加速度。

因此，货物总的惯性载荷作用至枕木上表面的弯矩为：

$$M_{iner} = M_{rot} + M_{sway} \quad (7)$$

### 2.4 货物倾覆弯矩

使用上述计算得到的重大件货物受到的风载荷弯矩、风倾载荷弯矩和惯性载荷弯矩结果，参考挪威船级社规范，将各个载荷参考公式进行迭加计算，进行求解货物倾覆弯矩，其计算公式如下<sup>[1]</sup>：

$$M_{Total} = M_{m\theta} + M_{mw} + \sqrt{M_{iner}^2 + M_{dyn}^2} \quad (8)$$

式中， $M_{dyn} = M_{e\theta} - M_{m\theta} + M_{ew} - M_{mw}$

$M_{m\theta}$ ：平均风产生的风倾载荷弯矩； $M_{e\theta}$ ：阵风产生的风倾载荷弯矩； $M_{mw}$ ：平均风产生的风载荷弯矩； $M_{ew}$ ：阵风产生的风载荷弯矩； $M_{iner}$ ：惯性载荷弯矩。

### 2.5 货物倾覆力臂计算

货物在倾覆弯矩作用下，会发生横向倾覆的趋势，其倾覆力臂按照如下公式计算：

$$L_2 = M_{Total}/W_{min} \quad (9)$$

其中， $W_{min}$ 为考虑垂荡加速度的影响之后，货物的最小重量，即

$$W_{min} = W \times (1 - a_v) \quad (10)$$

式中， $W$ ：货物重量； $a_v$ ：货物重心处的垂荡加速度。

### 2.6 货物倾覆稳定性校核

将计算得到的货物倾覆力臂  $L_2$  与回复力臂  $L_1$  做比值，即

$$Ratio = L_2/L_1$$

根据上述比值  $Ratio$  的大小，可以对货物在海上运输途中是否会发生倾覆，进行定量分析校核。货物倾覆稳定性的校核衡准，如下所示：

(1) 当  $Ratio \geq 1.0$  时，货物会发生倾覆；

(2) 当  $Ratio < 1.0$  时，货物不会发生倾覆。

## 3 结论

本文基于实际工程经验，介绍了重大件货物海上运输倾覆稳定性校核的计算流程。此计算流程所涉及到的分析较多，包括风载荷弯矩、风倾载荷弯矩、惯性载荷弯矩、货物倾覆弯矩和货物倾覆力臂的求解过程，上述各个载荷之间是彼此联系，并且是逐级来进行计算的；此设计流程引用的船级社规范也比较多，用到了美国船级社 (ABS) 相关海洋工程规范，同时也涉及到了浮体货物海上运输方案设计的挪威船级社 (DNV) 规范。此外，此设计流程也涉及到水动力理论的应用，水动力计算使用到了专业计算软件 MOSES 的辅助，同时应用了理论力学和结构力学的专业知识。

此重大件货物海上运输倾覆稳定性校核方法，经过了实际项目的验证，其计算方法和步骤是可行且有效的。货物倾覆稳定性的校核结果，是货物海上运输方案是否可行的前提，为运输方案的具体实施提供了理论数据支持，同时保证了海上运输的安全性。

参考文献：

[1] Det Norske Veritas, 0030/ND Guidelines for Marine Transportations.

[2] American Bureau of Shipping, Rules for Building and Classification of Mobile Offshore Drilling Units[S], 2017.

[3] 潘斌, 苑金民. 作用在海洋移动式平台上的风载荷 [J]. 海洋工程, 1997,15 (2): 32-37.

[4] 汪骥, 王兆麒, 李瑞, 刘玉君, 宋宜伦. 重大件货物系固绑扎方案中倾覆力计算方法 [J]. 造船技术, 2016 年第 6 期.