

船载重大件货物运动趋势直接计算方法

韩兵兵¹, 江心², 葛俊波², 王果², 刘靖娇²

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150009; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: **目的** 快速准确计算波浪诱导的船载重大件货物的运动趋势, 提升船舶航行安全。**方法** 基于直接计算方法, 考虑船舶自由度运动耦合效应、相位变化及摩擦力的有利影响, 提出一种船载重大件货物的运动趋势直接计算方法。进一步开展 21000TEU 集装箱船在不同航行工况、不同装载位置处的货物运动趋势及惯性载荷研究, 并与劳氏船级社的规范结果进行对比分析。**结果** 货物横向滑移多发生于横浪或最大横摇运动工况, 纵向滑移和翻转多发生于迎浪且船艏处垂向力过小工况。该方法计算结果准确可靠, 计算效率高。**结论** 研究成果可以为船载重大件货物的绑扎系固以及安全性校核提供指导, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 船舶; 重大件货物; 绑扎系固; 运动趋势; 惯性载荷; 安全校核; 直接计算

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0112-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.014

Direct Calculation Method for Multi-motion Trend of Major Cargoes on Ship

HAN Bingbing¹, JIANG Xin², GE Junbo², WANG Guo², LIU Jingqiao²

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150009, China;
2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

ABSTRACT: The work aims to quickly and accurately calculate the multi-motion trend of major cargoes on ships induced by waves, and improve the safety of ship navigation. A direct calculation method for multi-motion trend of major cargoes on ship was proposed based on the direct calculation method by taking into account the coupling effects of ship motion, phase changes and the beneficial effects of friction. Further researches were conducted on the multi-motion trend and inertial load of cargoes on the 21000TEU container ship under different navigation conditions and loading positions, and the comparative analysis was conducted with the criteria results of Lloyd's Register of Shipping. The lateral slippage mostly occurred in the condition of transverse waves or maximum roll motion, and the longitudinal slippage and flipping mostly occurred in the condition of facing waves and too small vertical force at the bow of the ship. The method was accurate and reliable, with high calculation efficiency. The results can provide a certain reference for the binding and fastening of major cargoes, as well as safety verification, and have certain engineering practical value.

KEY WORDS: ship; major cargo; binding and fastening; multi-motion trend; inertial load; safety verification; direct calculation method

收稿日期: 2024-08-09; 修订日期: 2024-09-16

Received: 2024-08-09; Revised: 2024-09-16

引文格式: 韩兵兵, 江心, 葛俊波, 等. 船载重大件货物运动趋势直接计算方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 112-120.

HAN Bingbing, JIANG Xin, GE Junbo, et al. Direct Calculation Method for Multi-motion Trend of Major Cargoes on Ship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 112-120.

大量海事调查表明, 重大件货物的系固失效是造成海难的原因之一。在波浪作用下, 船上货物在运输过程中容易出现滑移、跳跃、翻转等运动状态^[1]。尤其高海况条件下, 船舶重大货物的移位、碰撞, 可能致使船舶翻沉, 造成极大经济损失^[2]。由于缺少描述非标准货物和重大货物的专用技术文件, 作业人员主要依靠其他可用文件以及作业经验, 选择安全的货物的布置方案和捆扎方式^[3-4]。

针对船舶货物运输安全的研究, 国内外相关机构和研究人员从船体运动和货物惯性载荷计算入手, 开展了广泛的研究工作。对于船体运动的预报, LR (Lloyd's Register of Shipping) 规范^[5]ABS (American Bureau of Shipping) 规范^[6]给出一个与船长和方形系数有关的加速度系数, 代入船体运动幅值经验公式中进行预报。DNV (Det Norske Veritas) 规范^[7]采用相同的方法, 只是加速度系数中综合考虑了船型参数和航速的影响。上述规范只适用于一般船型和航速正常的单体船, 而美国海军规范^[8]根据不同海况、不同船型参数范围给出了船体运动幅值的选取对应表, 可以涵盖标准船型和特殊的军用船舶。惯性载荷计算方法分为经验公式法和直接计算法 2 种, LR 规范和 ABS 规范通过等效设计波法计算船体各自由度运动和加速度的占比系数, DNV 和美国海军规范通过幅值叠加计算组合惯性加速度, 然后考虑舰面装备的质量和系固位置, 计算舰面装备的惯性载荷。国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 货物系固安全操作规则 (CSS Code)^[9]将船体沿纵向划分 10 段、垂向划分 4 段, 给出不同位置处惯性载荷的经验数值表格。

对于货物运动趋势的分析, 主要依据 IMO 货物系固安全操作规则^[9], 但计算方法的保守性和滞后性, 已无法满足当前船载货物系固安全分析。为此, 许多学者开展了有航速船舶波浪中系固货物运动安全趋势分析。Kabaciński 等^[10]基于线性耐波性理论计算船舶运动, 对船载拖车的破坏模式进行了准静态分析, 表明迎浪和随浪是对于拖车系固最为不利的波浪方向。Kim^[11]、Ryrfeldt^[12-13]和 Poullos 等^[14]研究了波浪中航行船舶六自由度对船上货物的系固安全影响, 表明横摇运动是对船上货物的安全的影响最为严重的因素。Puisa^[15]总结了耐波性理论在船舶运动状态与短期预报、非标准重大件货物的捆扎中的应用。Ryrfeldt 等^[16]基于高海况下船舶大幅运动的纵向和横向加速度, 对于 IMO 规范中货物捆扎系统的预定义阈值进行了校核。Dallinga^[1]基于船舶横摇和纵摇的联合作用, 建立了滚装船舶上的货物系固系统计算方法。殷智锋^[17]以船舶甲板车辆系固为研究背景, 采用理论分析、数值仿真结合的方法, 对船舶航行典型横摇海况下车辆系固安全进行研究, 建立了系固绑绳力快速解析预报方法。现有的规范方法对于船体运动、惯性

载荷和货物运动趋势的计算主要基于经验公式^[18-21], 存在一定程度上的保守性和滞后性。相关的直接计算方法的研究较少且不够全面^[22-25], 难以满足当前船载货物安全计算的快速性、准确性需求。本文通过考虑波浪中船舶六自由度运动耦合, 建立了船体惯性载荷计算模型和货物运动趋势校核模型, 给出了货物发生不同运动趋势的分析方法。通过计算实例分析船舶不同航行工况、不同装载位置处货物的运动趋势, 并与 LR 规范计算结果进行了对比。该方法为绑扎方案的选取以及货物安全性校核提供参考。

1 组合惯性加速度模型

如图 1 所示, 建立固船坐标系 $Gxyz$ 和随船平动坐标系 $G\hat{x}\hat{y}\hat{z}$ 。固船坐标系原点 G 在船舶重心上, x 轴正向指向船艏, y 轴正向指向左舷, z 轴向上为正。随船坐标系原点位于未扰动的水平面上, \hat{z} 轴向上为正。固船坐标系随船发生平动和转动, 随船平动坐标系只随船舶平动。

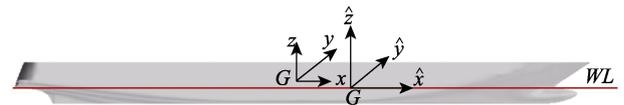


图 1 船体坐标系
Fig.1 Coordinate system of ship

目前 IMO 提供惯性加速度静力学计算方法, 没有考虑各自由度运动之间的耦合影响, 实际海况下考虑各自由度运动的耦合影响才能使计算结果更为准确。本研究中, 首先根据劳氏船级社规范^[5], 定义船舶运动的 6 种危险工况如下: MC1, 迎浪状态最大垂向加速度; MC2, 横浪状态最大横摇加速度; MC3, 斜浪状态最大纵摇加速度; MC4, 斜浪有航速状态最大横摇加速度; MC5, 斜浪状态最大横向和垂向组合加速度; MC6, 横浪状态最大垂荡加速度。研究发现, 纵摇极限工况和横摇极限工况涵盖了船舶运动时货物各种惯性载荷最大的情况。因此, 本文只对纵摇极限工况和横摇极限工况进行货物运动安全趋势分析。

在随船平动坐标系 $G\hat{x}\hat{y}\hat{z}$ 下, 任意点在 x 、 y 、 z 三个方向的组合加速度可表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = -\omega^2 \begin{bmatrix} 0 & -\eta_6 & \eta_5 \\ \eta_6 & 0 & -\eta_4 \\ -\eta_5 & \eta_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

组合加速度值从随船坐标系 $G\hat{x}\hat{y}\hat{z}$ 转化到固船坐标系 $Gxyz$:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \eta_6 & -\eta_5 \\ -\eta_6 & 1 & \eta_4 \\ \eta_5 & -\eta_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

得到船上任意点在 x 、 y 、 z 方向的组合加速度：

$$\begin{aligned} a_x &= -\omega^2[(\eta_1 - y\eta_6 + z\eta_5) + \eta_6(\eta_2 + x\eta_6 - z\eta_4) - \eta_5(\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4)] \\ a_y &= -\omega^2[(\eta_2 + x\eta_6 - z\eta_4) - \eta_6(\eta_1 - y\eta_6 + z\eta_5) + \eta_4(\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4)] \\ a_z &= -\omega^2[(\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4) + \eta_5(\eta_1 - y\eta_6 + z\eta_5) - \eta_4(\eta_2 + x\eta_6 - z\eta_4)] \end{aligned} \quad (3)$$

由于高阶小量对于计算结果影响很小，可以忽略，并考虑结合重力加速度的分量：

$$\begin{aligned} a_{\hat{x}} &= \ddot{\eta}_1 - y\ddot{\eta}_6 + z\ddot{\eta}_5 - g \sin(\eta_5) \\ a_{\hat{y}} &= \ddot{\eta}_2 + x\ddot{\eta}_6 - z\ddot{\eta}_4 + g \sin(\eta_4) \\ a_{\hat{z}} &= \ddot{\eta}_3 - x\ddot{\eta}_5 + y\ddot{\eta}_4 - g \cos(\eta_4) \cos(\eta_5) \end{aligned} \quad (4)$$

最终，可得船上任意点处的货物组合惯性加速度为：

$$a_x = C_{xS}a_{\text{surge}} + C_{xP}a_{\text{pitch}}z - C_{xY}a_{\text{yaw}}y - g \sin(C_{xG}\psi) \quad (5)$$

$$a_y = C_{yS}a_{\text{sway}} - C_{yR}a_{\text{roll}}z + C_{yY}a_{\text{yaw}}x + g \sin(C_{yG}\varphi) \quad (6)$$

式中： $a_{(x,y,z)}$ 为固船坐标系下纵向、横向和垂向加速度统计值； $\hat{a}_{(x,y,z)}$ 为随船平动坐标系下纵向、横向和垂向加速度统计值； $\eta_{(1-6)}$ 为船体六自由度运动统计值； x, y, z 分别是计算点与重心之间的纵向、横向和垂向距离； a_{surge} 、 a_{sway} 、 a_{heave} 、 a_{roll} 、 a_{pitch} 、 a_{yaw} 分别为船舶纵荡、横荡、升沉、横摇、纵摇、艏摇加速度统计值； C_{xS} 、 C_{xP} 、 C_{xY} 、 C_{xG} 、 C_{yS} 、 C_{yP} 、 C_{yY} 、 C_{yG} 、 C_{zS} 、 C_{zP} 、 C_{zG} 为各工况六自由度运动和加速度的占比系数； ψ 为船舶纵摇角； φ 为船舶横摇角。

2 计算模型

2.1 惯性力模型

重大件货物的尺度相较于船体不可忽略，直接将物体视为一个质量点进行惯性力计算会造成计算结果偏差较大。本文将物体离散成若干个质量点，分别求解每个质量点的惯性力和力矩后进行叠加。货物的质心根据质量点的坐标和质量计算：

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{m'} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{m'} \\ z_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{m'} \end{cases} \quad (7)$$

根据各质量点的惯性组合加速度值计算各质量

点的惯性载荷：

$$F_{xi} = m_i \cdot a_{xi}; F_{yi} = m_i \cdot a_{yi}; F_{zi} = m_i \cdot a_{zi} \quad (8)$$

将各质量点的惯性载荷进行叠加，即可得到货物整体的惯性载荷：

$$\begin{cases} F_x = \sum_{i=1}^n (F_{xi}) \\ F_y = \sum_{i=1}^n (F_{yi}) \\ F_z = \sum_{i=1}^n (F_{zi}) \end{cases} \quad (9)$$

式中： F_{xi} 为各质量点处的纵向惯性力； F_{yi} 为各质量点处的横向惯性力； F_{zi} 为各质量点处的垂向惯性力； x_i, y_i, z_i 分别为离散后的质量点的纵向、横向和垂向坐标。

2.2 惯性力矩模型

分别对不同运动趋势下的货物所受惯性力矩 M 进行计算。对于货物绕 x 轴的横向翻转，横向翻转惯性力矩 M_x 正方向为自船艏向船艉顺时针为正，如图 2 所示。

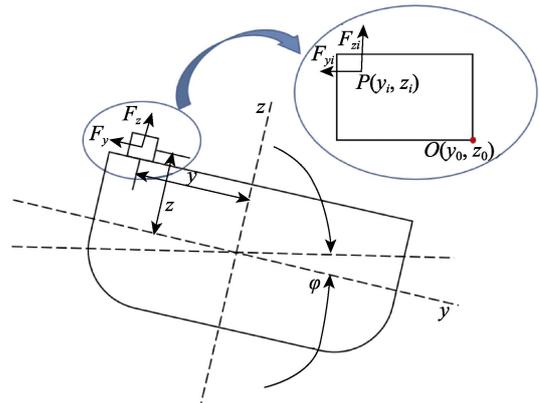


图 2 横摇翻转示意图
Fig.2 Schematic diagram of roll

横向翻转惯性力矩 M_x 为：

$$M_x = \sum_{i=1}^n [F_{zi} \cdot (y_i - y_0) - F_{yi} \cdot (z_i - z_0)] \quad (10)$$

对于货物绕 y 轴转动的纵向翻转，纵向扭矩惯性力矩 M_y 正方向为自右舷向左舷顺时针为正，如图 3 所示。

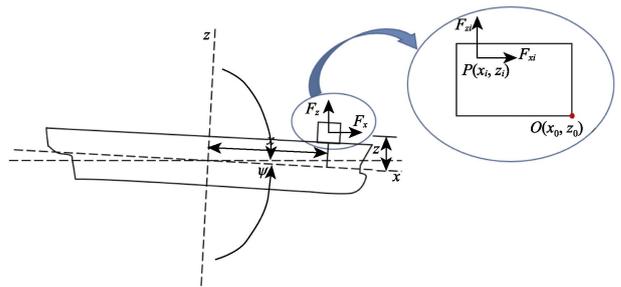


图 3 纵摇翻转示意图
Fig.3 Schematic diagram of pitch

纵向扭矩惯性力矩 M_y 为:

$$M_y = \sum_{i=1}^n [-F_{zi} \cdot (x_i - x_0) + F_{xi} \cdot (z_i - z_0)] \quad (11)$$

对于货物绕 z 轴的转动, 水平转动惯性力矩 M_z 正方向为 z 轴正向, 如图 4 所示。

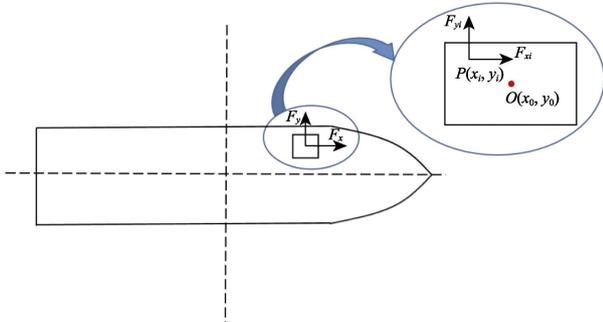


图 4 水平转动示意图

Fig.4 Schematic diagram of horizontal twist

水平转动惯性力矩 M_z 为:

$$M_z = \sum_{i=1}^n [-F_{xi} \cdot (y_i - y_0) + F_{yi} \cdot (x_i - x_0)] \quad (12)$$

式中: x_0 、 y_0 、 z_0 分别为货物旋转重心的纵向、横向和垂向坐标。

2.3 最大静摩擦力 (矩) 模型

货物发生平动或转动时, 会产生与相对运动方向相反的摩擦力阻碍货物运动, 其摩擦力为:

$$\begin{cases} f = \mu \cdot F_z & F_z < 0 \\ f = 0 & F_z \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

物体发生翻转时, 摩擦力作用可忽略不计, 因此摩擦力矩为 0。物体发生转动时, 摩擦力的方向为切线方向, 则力臂为质量点到转动中心的水平距离, 其摩擦力矩为:

$$M_f = \sum_{i=1}^n [\mu \cdot F_{zi} \cdot \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}] \quad (14)$$

式中: f 为摩擦力; M_f 为摩擦力矩; μ 为摩擦因数, $\mu=0.3$ 。

2.4 货物运动趋势判断

1) 纵向滑移, 根据货物纵向惯性力符号可以判断货物纵向滑移趋势。若 $F_x > 0$, 则货物有向船艏纵向滑移的趋势; 若 $F_x < 0$, 则货物有向船艉纵向滑移的趋势。根据货物纵向惯性力与最大纵向静摩擦力的对比, 可进一步判断是否发生纵向滑移。当纵向惯性力绝对值大于最大纵向摩擦力绝对值时, 则货物将产生纵向滑移, 如式 (15) 所示。

$$|F_x| > |f| \quad (15)$$

2) 横向滑移。若 $F_y > 0$, 则货物有向左舷横向滑移的趋势; 若 $F_y < 0$, 则货物有向右舷横向滑移的

趋势。根据货物横向惯性力与最大横向静摩擦力的对比, 可进一步判断是否发生横向滑移。当横向惯性力的绝对值大于最大横向摩擦力绝对值时, 则货物将产生横向滑移, 如式 (16) 所示。

$$|F_y| > |f| \quad (16)$$

3) 垂向跳跃。垂向跳跃不受摩擦力影响, 本文垂向惯性力 F_z 已经考虑了重力加速度的影响, 因此如果货物发生垂向跳跃, 则:

$$F_z > 0 \quad (17)$$

4) 横向翻转。规定货物向船舶左舷横向翻转力矩为 M_{x1} , 向船舶右舷横向翻转力矩为 M_{x2} 。当货物有向左舷翻转的趋势时:

$$M_{x1} < 0 \quad (18)$$

当货物有向右舷翻转的趋势时:

$$M_{x2} > 0 \quad (19)$$

5) 纵向翻转。规定货物向船首纵向翻转力矩为 M_{y1} , 向船尾纵向翻转力矩为 M_{y2} 。当货物有向船艏翻转的趋势时:

$$M_{y1} > 0 \quad (20)$$

当货物有向船艉翻转趋势时:

$$M_{y2} < 0 \quad (21)$$

6) 水平转动。规定货物有正向转动的趋势时:

$$M_z > 0 \quad (22)$$

货物有正向转动的趋势时:

$$M_z < 0 \quad (23)$$

根据货物转动力矩与最大水平静摩擦力矩的对比, 则可进一步判断是否会发生转动。如式 (24) 所示, 当转动力矩的绝对值大于最大摩擦力矩绝对值时, 则货物将产生转动。

$$|M_z| > |M_f| \quad (24)$$

3 算例验证

3.1 模型参数

基于直接计算方法对 21000TEU 集装箱船进行计算。船舶参数和货物参数见表 1。采用北大西洋海况, 取超越概率为 1×10^{-8} , 计算得到各自由度运动和加速度的长期统计值, 见表 2。

表 1 船舶和货物参数表
Tab.1 Ship and cargo parameters

参数	数值	参数	数值
垂线间长 L_{pp}/m	386.00	货物长度 L_c/m	86.00
船宽 B/m	58.60	货物宽度 B_c/m	22.50
型深 D/m	33.50	货物高度 H_c/m	4.00
吃水 T/m	16.10	货物重心高度 H_{cg}/m	2.00
航速 V/kn	22.00	货物质量 W_c/t	300.00

表2 船舶自由度运动与加速度长期值
Tab.2 Degrees of freedom and long-term acceleration values of ship

参数	数值/m	参数	数值/(m·s ⁻²)
纵荡	13.64	纵荡加速度	0.59
横荡	9.65	横荡加速度	1.65
垂荡	14.42	垂荡加速度	3.33
横摇	0.48	横摇加速度	0.05
纵摇	0.12	纵摇加速度	0.03
艏摇	0.07	艏摇加速度	0.01

表3 货物质心位置坐标
Tab.3 Coordinates for position of cargo center of mass

编号	x/m	y/m	z/m	编号	x/m	y/m	z/m
1	-128	-19.5	35.5	6	0	19.5	35.5
2	-128	0.0	35.5	7	128	-19.5	35.5
3	-128	19.5	35.5	8	128	0.0	35.5
4	0	-19.5	35.5	9	128	19.5	35.5
5	0	0.0	35.5				

3.2 同一高度、不同位置货物运动趋势对比

选取甲板上9个不同位置(如图5所示),分别计算货物质心高度,见表3。

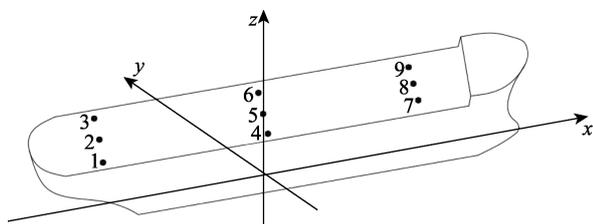


图5 甲板货物位置分析
Fig.5 Position analysis of deck cargo

3.2.1 惯性力对比

基于劳氏船级社规范^[5]定义的船舶运动的6种危险工况,考虑到每种工况对应2个极值点,故对同一工况的2个极值点进行区分(如MC1_1和MC1_2)。甲板不同位置处,MC1和MC2下惯性力与最大静摩擦力计算结果分别见表4和表5。

甲板不同位置处,MC1和MC2下惯性力与最大静摩擦力的计算结果对比如图6所示。可以看出,同一横向位置处的纵向惯性力 F_x 大小相同,不同横向位置处纵向惯性力数值差异不大;同一纵向位置处的横向惯性力 F_y 大小相同,不同纵向位置处的横向惯性力差异较大;横摇较大的工况(MC2)纵向力很小,横向力较大,不同位置处的垂向力差异较小,且在

表4 MC1 工况惯性力和最大静摩擦力

Tab.4 Inertia force and maximum static friction force under MC1 condition

位置	MC1_1				MC1_2			
	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N
1	-329.3	-200.4	-3 166.1	-949.8	329.3	200.3	-2 699.6	-809.9
2	-353.2	-200.4	-3 108.5	-932.5	353.1	200.3	-2 757.2	-827.1
3	-377.1	-200.4	-3 050.9	-915.2	377.1	200.3	-2 814.8	-844.4
4	-329.3	-42.8	-2 074.5	-622.3	329.3	42.7	-3 791.2	-1 137.3
5	-353.2	-42.8	-2 016.9	-605.0	353.1	42.7	-3 848.8	-1 154.6
6	-377.1	-42.8	-1 959.3	-587.7	377.0	42.7	-3 906.0	-1 171.9
7	-329.3	113.9	-988.6	-296.5	329.3	-113.9	-4 877.2	-1 463.1
8	-353.2	113.9	-930.	-279.2	353.1	-113.9	-4 934.8	-1 480.4
9	-377.1	113.9	-873.3	-62.0	377.0	-113.9	-4 992.4	-1 497.7

表5 MC2 工况惯性力和最大静摩擦力

Tab.5 Inertia force and maximum static friction force under MC2 condition

位置	MC1_1				MC1_2			
	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N
1	1.5	841.2	-2 493.4	-748.0	-1.5	-841.2	-3 070.2	-921.0
2	-0.8	841.2	-2 653.7	-796.1	0.8	-841.2	-2 909.9	-872.9
3	-3.1	841.2	-2 814.1	-844.2	3.1	-841.2	-2 749.6	-824.8
4	1.5	856.5	-2 493.2	-747.9	-1.5	-856.5	-3 070.5	-921.1
5	-0.8	856.5	-2 653.5	-796.0	0.8	-856.5	-2 910.2	-873.0
6	-3.1	856.5	-2 813.8	-844.1	3.14	-856.55	-2 749.8	-824.9
7	1.5	871.7	-2 492.9	-747.8	-1.5	-871.7	-3 070.7	-921.23
8	-0.8	871.7	-2 653.2	-795.9	0.8	-871.7	-2 910.4	-873.1
9	-3.1	871.7	-2 813.6	-844.0	3.1	-871.7	-2 750.1	-825.0

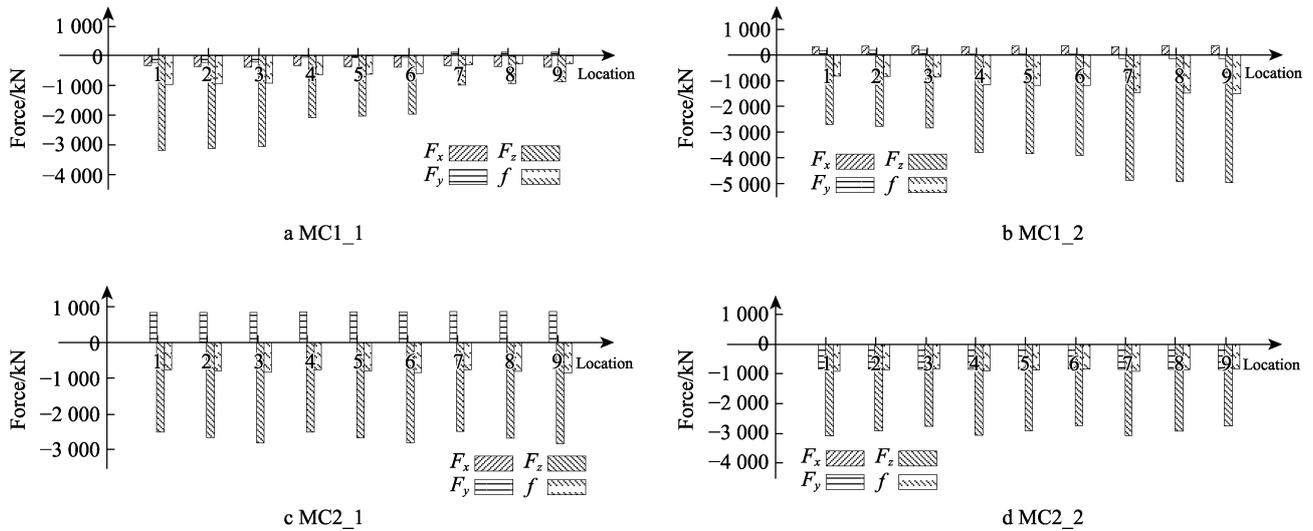


图 6 MC1 和 MC2 下惯性力与最大静摩擦力的计算结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results of inertia force and maximum static friction force under MC1 and MC2

MC2_1 工况下, $|F_y| > |f|$, 货物会发生横向滑移; 纵摇较大的工况 (MC1) 横向力较小, 纵向力数值较大, 船艏处垂向力变化明显, 此时位于船艏处的货物由于 $|F_x| > |f|$, 货物会发生纵向滑移。

3.2.2 惯性力矩对比

MC1 和 MC2 工况下惯性翻转力矩计算结果见表 6 和表 7。甲板不同位置处, MC1 和 MC2 下惯性力矩惯性翻转力矩计算结果如图 7 所示。由惯性力对

表 6 MC1 工况惯性力和最大静摩擦力

Tab.6 Inertia force and maximum static friction force under MC1 condition

位置	MC1_1				MC1_2			
	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N
1	36 148.1	-35 090.3	-142 040.7	130 248.9	29 841.8	-30 900.0	-110 189.0	121 980.1
2	35 500.0	-34 442.2	-139 609.1	127 725.1	30 490.1	-31 548.2	-112 622.7	124 504.2
3	34 851.6	-33 793.6	-137 183.2	125 197.2	31 138.4	-32 196.4	-115 045.4	127 032.1
4	23 552.2	-23 124.6	-95 099.6	83 309.0	42 438.1	-42 865.6	-157 127.5	168 920.3
5	22 904.2	-22 476.4	-92 666.9	80 784.1	43 086.3	-43 513.7	-159 558.2	171 445.0
6	22 255.8	-21 828.3	-90 242.8	78 257.9	43 734.5	-44 161.8	-161 986.3	173 971.7
7	11 022.0	-11 221.3	-48 405.3	36 613.6	54 967.8	-54 769.2	-203 822.1	215 615.3
8	10 373.9	-10 573.0	-45 975.4	34 088.1	55 615.9	-55 417.4	-206 251.2	218 140.6
9	9 725.6	-9 924.8	-43 545.1	31 563.0	56 264.3	-56 065.7	-208 681.8	220 666.2

表 7 MC2 工况惯性力和最大静摩擦力

Tab.7 Inertia force and maximum static friction force under MC2 condition

位置	MC1_1				MC1_2			
	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N	F_x/N	F_y/N	F_z/N	f/N
1	26 011.8	-30 090.2	-107 219.7	107 219.1	36 579.8	-32 501.2	-132 021.2	132 021.7
2	27 815.2	-31 893.8	-114 114.2	114 110.8	34 777.0	-30 697.4	-125 125.9	125 129.7
3	29 618.8	-33 697.9	-121 008.7	121 001.7	32 972.7	-28 894.0	-118 231.3	118 238.7
4	25 978.7	-30 117.2	-107 209.3	107 208.5	36 613.6	-32 473.7	-132 031.2	132 032.4
5	27 782.8	-31 921.8	-114 103.4	114 100.0	34 810.0	-30 670.3	-125 136.0	125 140.2
6	29 586.1	-33 724.9	-120 997.8	120 991.2	33 005.4	-28 866.5	-118 241.8	118 249.1
7	25 944.8	-30 146.4	-107 199.1	107 197.6	36 646.3	-32 445.3	-132 041.5	132 042.8
8	27 748.8	-31 950.7	-114 093.2	114 090.0	34 843.2	-30 641.4	-125 147.1	125 151.0
9	26 011.8	-30 090.2	-107 219.7	107 219.1	36 579.8	-32 501.2	-132 021.2	132 021.7

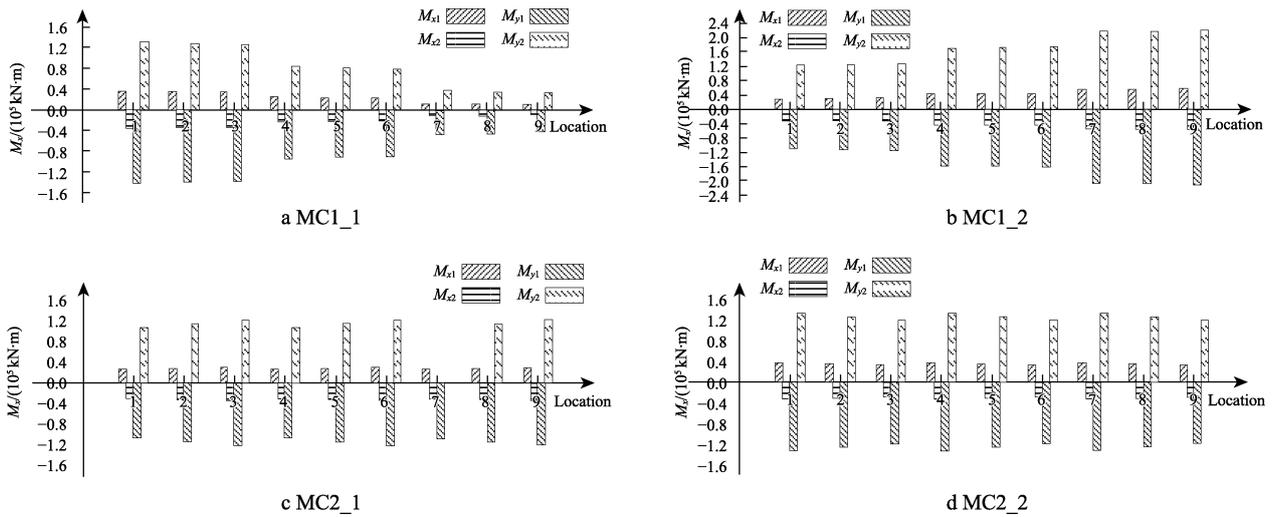


图7 MC1和MC2下惯性翻转力矩
Fig.7 Inertia rollover torque under MC1 and MC2

比分析可知，该工况下垂向力差异较小，因此其惯性翻转力矩的数值差异也较小，即 M_{x1} 与 M_{x2} 数值差异不大，方向相反。进一步分析可知，惯性力矩 $M_{x1} < 0$ 、 $M_{x2} > 0$ 、 $M_{y1} > 0$ 、 $M_{y2} < 0$ ，货物不会发生翻转。由于纵向力臂较长，货物的纵向翻转力矩大于横向翻转力矩。由于垂向惯性力一般比水平惯性力大很多，不同位置处货物翻转力矩的变化趋势与垂向力的趋势基本相同，因此MC1工况下艏艉位置容易发生翻转。

3.2.3 水平转动与最大静摩擦力

水平扭矩和最大静摩擦力矩的计算结果见表8。研究发现，不同装载位置下的水平扭矩相同，MC1工况下的水平扭矩大于MC2工况下的水平扭矩。根据计算结果，水平扭矩都远小于摩擦力能提供的最大静摩擦力矩，因此只要货物有方向向下的垂向力，货物就很难发生转动。

对于2个不同工况下不同位置处货物的惯性载荷以及安全运动趋势的对比见表9。研究发现，对于

表8 水平转动和最大静摩擦力矩
Tab.8 Horizontal rotation and maximum static friction torque

位置	MC1_1		MC1_2		MC2_1		MC2_2	
	$M_z/(N \cdot m)$	$M_f/(N \cdot m)$						
1	806.1	-21 754.3	-806.1	-18 548.9	78.3	-17 132.3	-78.3	-21 095.5
2	806.1	-21 358.4	-806.1	-18 944.8	78.4	-18 233.9	-78.4	-19 993.9
3	806.0	-20 962.5	-806.0	-19 340.8	78.4	-19 335.4	-78.4	-18 892.4
4	806.0	-14 253.9	-806.0	-26 049.4	78.3	-17 130.5	-78.3	-21 097.2
5	806.0	-13 857.9	-806.0	-26 445.3	78.3	-18 232.2	-78.3	-19 995.6
6	806.0	-13 462.1	-806.0	-26 841.1	78.3	-19 333.7	-78.3	-18 894.0
7	806.0	-6 792.5	-806.0	-33 510.6	78.3	-17 129.0	-78.3	-21 098.9
8	806.0	-6 396.6	-806.0	-33 906.7	78.4	-18 230.4	-78.4	-19 997.3
9	806.0	-6 000.7	-806.0	-34 302.6	78.4	-19 331.9	-78.4	-18 895.9

表9 不同位置处货物惯性载荷以及运动趋势对比
Tab.9 Comparison of inertia load and multi-motion trend of cargoes at different positions

工况	惯性力	翻转力矩	水平扭矩
MC1	横向力和纵向力变化不大且数值较小，垂向力变化较大，货物会发生纵向滑移，船舶位置也容易发生横向滑移和垂向跳跃	翻转力矩变化趋势与垂向力变化趋势基本相同，船舶艉处货物容易发生横向翻转和纵向翻转	扭矩差异不大，只有垂向力方向向上货物会发生转动
MC2	横向、纵向、垂向惯性力数值变化不大，纵向力约为0，横向力较大且大于静摩擦力，货物将会发生横向滑移	翻转力矩差异不大，且货物不会发生翻转	扭矩差异不大，且货物不会发生转动

迎浪状态下最大垂向加速度, 不同位置处横向力和纵向力变化不大, 横向力较小, 垂向力变化较大, 货物会发生纵向滑移, 船艏位置也容易发生横向滑移和垂向跳跃。翻转力矩变化趋势与垂向力变化趋势基本相同, 船艏艙处货物容易发生横向翻转和纵向翻转。水平扭矩方面, 不同位置处扭矩差异不大, 只有垂向力方向向上货物才会发生转动。对于横浪状态下的最大横摇运动, 不同位置处的横向、纵向、垂向惯性力数值变化不大, 纵向力几乎为 0, 横向力较大, 且基本都大于静摩擦力, 因此所有位置处货物都会发生横向滑移。不同位置处翻转力矩差异不大, 且货物不会发生翻转。水平扭矩方面, 不同位置处扭矩差异不大, 货物不会发生转动。

3.3 不同高度货物运动趋势对比

船舶发生纵摇运动时, 不同高度处货物的受力如图 8 所示。可以看出, 位于船体重心高度以上物体, 其纵摇产生的惯性力与重力的分力方向相同, 位于船体重心以下的物体, 其纵摇产生的惯性力与重力分量相反, 因此甲板处的物体比船底板上的物体受到的纵向力大。船艏右舷处, 不同甲板高度 ($z_d=0$ 、12.8、23.0、33.5 m) 处货物的纵向力计算结果见表 10。结果表明, 在 2 个幅值点处, 随着垂向高度的增加, 货物的纵向力逐渐增大, 与理论和实际情况相符。

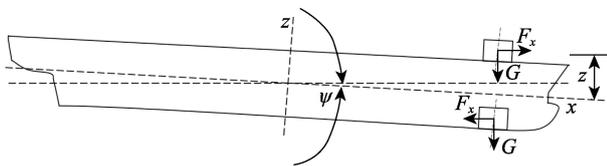


图 8 船舶纵摇时不同高度处货物的受力示意图
Fig.8 Loading diagram of cargoes at different heights during pitch

表 10 MC1 工况船艏右舷不同高度处纵向力
Fig.10 Longitudinal force at different heights on starboard bow under MC1 condition

工况	$z_d=0$ m	$z_d=12.8$ m	$z_d=23.0$ m	$z_d=33.5$ m
MC1_1	45.10	153.69	240.23	329.31
MC1_2	-45.10	-153.69	-240.23	329.31

货物在船舶发生横摇运动时的受力如图 9 所示。可以看出, 位于船体重心高度以上的物体, 其横摇产生的惯性力与重力的分力方向相同, 位于船体重心以下的物体其横摇产生的惯性力与重力分量相反。因此, 甲板处的物体比船底板上的物体受到的横向力大。船艏右舷处, 不同甲板高度的货物横向力计算结果见表 11。结果表明, 在 2 个幅值点处, 随着垂向高度的增加, 货物的横向力逐渐增大。此外, 研究发现, 垂向加速度与垂向位置无关, 因此不同垂向位置处的垂向力数值相同。不同垂向位置处的横向和纵向惯性力矩主要受垂向力的影响, 变化较小, 可

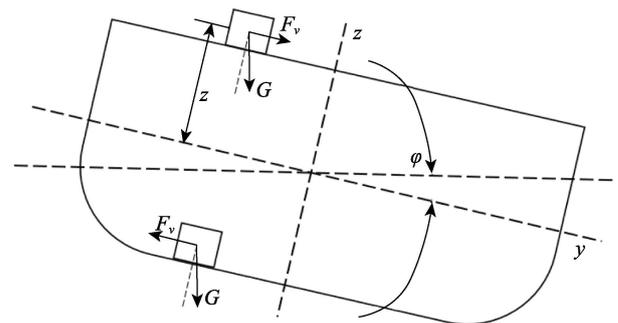


图 9 横摇时货物的横向受力
Fig.9 Lateral loading diagram of cargoes during roll

表 11 MC2 工况船艏右舷不同高度处纵向力
Fig.11 Lateral force at different heights on starboard bow under MC2 condition

工况	$z_d=0$ m	$z_d=12.8$ m	$z_d=23.0$ m	$z_d=33.5$ m
MC2_1	45.10	153.69	240.23	329.31
MC2_2	-45.10	-153.69	-240.23	329.31

以忽略不计。扭矩小于最大摩擦力矩, 货物不会发生转动运动。

4 结论

本文针对国际海事组织的货物系固安全操作规则的局限性, 提出了一种直接计算方法, 用于分析和计算 21000TEU 集装箱船在不同航行工况和装载位置下货物的运动趋势及其载荷特性。通过对比分析得出以下结论:

- 1) 在横浪或最大横摇运动中, 货物易受到较大的横向力, 可能导致横向滑移。
- 2) 在迎浪或最大纵摇运动或最大垂向加速度工况下, 货物受到较大的纵向力, 特别是船艏处的货物可能发生纵向滑移、翻转或垂向跳跃。
- 3) 垂向力通常比水平力大得多, 并且横向力和纵向力产生的转动扭矩会相互抵消, 因此货物通常不容易发生转动。然而, 当垂向力向上或数值很小时, 货物可能会发生转动。此外, 随着垂向高度的增加, 货物所受的横向力和纵向力增大, 从而更容易发生水平滑移。

这些结论表明, 对于集装箱船的货物系固安全分析, 必须考虑不同的航行工况和装载位置, 以准确评估货物的运动趋势和潜在风险, 以确保货物运输的安全性和可靠性。

参考文献:

[1] DALLINGA R P. Safe Securing of Trailers and Deck Cargo[C]// Proceedings of the 12th International Conference and Exhibition on Marine Transport Using Roll-on/Roll-off Method. Gothenburg: [s. n.], 1994.
[2] ACANFORA M, MONTEWKA J, HINZ T, et al. Towards

- Realistic Estimation of Ship Excessive Motions in Heavy Weather. a Case Study of a Containership in the Pacific Ocean[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 138: 140-150.
- [3] ANDERSSON P, JAGELĚÁK J, LIND E, et al. Report from Pulling Tests with Used Lashing Equipment[J/OL]. MariTerm AB, 2009: 1-52[2009-09-29]. <https://en.mariterm.se/wp-content/uploads/2016/08/Main-report-2009-09-29.pdf>.
- [4] BALCER L. Location of Ship Rolling Axis[J]. *Polish Maritime Research*, 2004, 1(11): 3-7.
- [5] LR. Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships: LR-RU-001[S]. England: Lloyd's Register of Shipping, 2019.
- [6] ABS. Rules for Building and Classing Steel Vessels: Certification of Container Securing Systems December 2024[S]. American: American Bureau of Shipping, 2019.
- [7] DNV. Rules for Classification-of Ships: DNV-RU-SHIP[S]. Norway: DET NORSKE VERITAS, 2016.
- [8] USA NAVY. A Ship Motion and Attitude: DOD-STD-1399[S]. American: SECTION301, 1986.
- [9] ORGANIZATION I M. CSS Code[M]. London: International Maritime Organization, 2021.
- [10] KABACIŃSKI J, WIŚNICKI B. Accuracy Analysis of Stowing Computations for Securing Non-Standard Cargoes on Ships According to IMO CSS Code[J]. *Polish Maritime Research*, 2009, 16(2): 67-71.
- [11] KIM Y D. A Quantitative Assessment on a Tension of Securing Rope to Evade Marine Accidents Caused by Improper Cargo-Securing[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2015, 21(3): 297-302.
- [12] RYRFELDT A. A Study on the Influence of Ship Roll Characteristics on the Risk of Cargo Shifting[J]. *J Mar Technol*, 2004, 41(2): 51-59.
- [13] RYRFELDT A. Probabilistic Assessment of the Risk of Cargo Shifting Onboard Ships in Waves[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2003.
- [14] POULIOS P, THEMELIS N, SPYROU K J, et al. Dynamics of Lashed Trailers on Board Ships under the Combined Effect of Roll and Pitch Motions[C]// 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM2007). Varna: [s. n.], 2007.
- [15] PUIISA R. Optimal Stowage on Ro-Ro Decks for Efficiency and Safety[J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2021, 20(1): 17-33.
- [16] RYRFELDT A, KÄLLSTAM T. Practical Design of Ships and Other Floating Structures[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 253-259.
- [17] 殷智锋. 航行船舶装载车辆约束载荷及响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- YIN Z F. Research on Restrained Load and Response of Vehicles Loaded on Navigation Ships[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [18] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. The Stewart Platform Manipulator: A Review[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, 35(1): 15-40.
- [19] HUA J. A Probabilistic Study of Simultaneous Effect of Ship Motions on the Cargo Shifting Onboard[J]. *Mar Technol*, 1996, 33(1):25-34.
- [20] LING D C, TIAN B J, LIU Y G. Amendments to the Methods of Non-Standardized Cargo Unit Securing Assessing[C]// 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Beijing: IEEE, 2020.
- [21] STERNSSON M, BJÖRKENSTAM U. Statistical Study of Lashing Forces Measured On-Board a PCTC Vessel[J]. *Marine Structures*, 2003, 16(4): 345-354.
- [22] SURENDRAN S, LEE S K, REDDY J V R, et al. Non-Linear Roll Dynamics of a Ro-Ro Ship in Waves[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(14/15): 1818-1828.
- [23] TURNBULL S R, DAWSON D. The Securing of Rigid Semi-Trailers on Roll-on/Roll-off Ships[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39(1): 1-14.
- [24] YANG D W, WANG Q, QI X W. Research on Ship's Wave-Enduarability in Navigation[C]// 2019 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). Xiangtan: IEEE, 2019.
- [25] 朱海明. 重大件货陆运及海运系固校核方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- ZHU H M. Research on the Checking Method of Heavy Goods' Fastening by Land and Sea[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.