

核电超重核心设备远洋海运技术控制

王靓靓

(中远海运工程物流有限公司, 北京 100016)

摘要: 核电站超重核心设备运输安全至关重要, 远洋海运不可控因素多, 需要更为严格的技术控制。文章以核电超重蒸汽发生器海运为例, 对远洋海运应进行的技术性计算和控制进行了设计, 包括航道的安全性、船舶稳性、绑扎加固的可靠性以及海运加速度的计算及检测方法等。文章可供同类核电设备远洋运输借鉴。

关键词: 核电站; 海运; 大型货物; 加速度; 稳定性; 绑扎加固

中图分类号: U695

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2022) 03—0131—03

我国核工业飞速发展, 核电蒸汽发生器达 700t 以上, 需采用吃水较浅的船舶运输。国际运输航线可能会遇恶劣海况, 为防止设备内部合金 U 型管变形, 要求三维运输加速度不超过 $0.9g$ ($g=9.8\text{m/s}^2$), 需在运输前进行周密的技术设计并按照设计严格控制操作, 确保运输安全。

1 海运船舶的选择

1.1 内河航道条件

国内外河航道常难以获得详细的水文资料。对于潮汐河道, 可参考附近港口潮汐周期表进行吃水估算。潮汐常难以用标准数学函数曲线拟合, 考虑搁浅风险, 估算以更为可靠的方式进行。船舶以漂浮状态进出航道的吃水 d 应满足:

$$d \leq H_p - c \quad (1)$$

式中: H_p ——航道水深; c ——船底安全间隙。

考虑可靠性, 估算中将潮汐曲线假设为线性, 则半潮高以上时航道水深 H_p 所持续的时间为 (参看图 1)

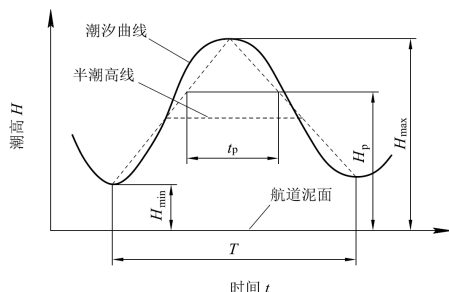


图 1 水深与持续时间估算原理图

$$t_p = \frac{T(H_{\max} - H_p)}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (2)$$

式中: $H_{\max}$ ——航道最大水深; $H_{\min}$ ——航道最小水深; T ——潮汐周期时间。

可以海船通过航道所需时间作为 t_p 代入式 (2) 求解出水深 H_p , 再代入式 (1) 即可求出船舶的安全吃水 d 为

$$d \leq H_{\max} - \frac{t_p(H_{\max} - H_{\min})}{T} - c \quad (3)$$

如为避免驳船转运环节及风险, 则需要选择远洋货轮装载后的吃水应小于 d 。当 d 值较小时, 需要选择浅吃水船舶, 或采用修正压载水使船底水平, 或排空压载水、减少淡水数量等方法来满足。

1.2 船舶稳性

国际海事组织 (IMO) 颁发相关稳性规则主要用于船舶建造及使用的稳性控制。在稳性校核的主要参数有横倾角 Φ 、复原力臂 GZ 、初稳性高度 GM 。计算船舶在不同横倾角 Φ 情况下的复原力臂 GZ , 绘制成图即为静稳性曲线图 (图 2)。

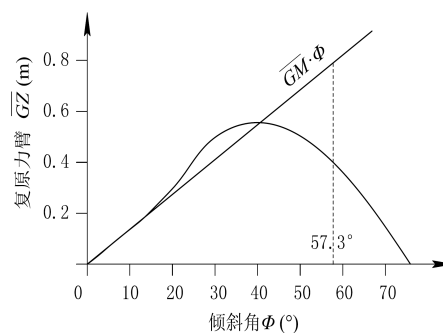


图 2 静稳性曲线图

可依据国际海事组织 IMO《船舶与海上设施法定检验规格》进行稳性校核计算。按照稳性手册要求正常装载时无需再计算, 但当货物超重且积载位置过高时就应注意校核稳性。以下为某核电蒸汽发生器装载后船舶的稳性核准, 将稳性计算报告书的主要结果列入表 1, 稳性曲线图见图 3, 显然稳性是能够满足规范要求的。

表1 稳性校核结果

	项目	计算结果	IMO 标准
1	复原力 0-30°	0.193	$\geq 0.055 \text{ m.rad}$
	臂曲线 0-40°	0.354	$\geq 0.09 \text{ m.rad}$
	下面积 30°~40°	0.161	$\geq 0.03 \text{ m.rad}$
2	横倾角 $\Phi=30^\circ$ 处的复原力臂 GZ	0.839	$\geq 0.2 \text{ m}$
3	最大复原力臂 $GZ_{\max}$ 对应的横倾角 Φ	36.6°	$\geq 25^\circ$
4	自由液面修正后的初稳性高度 GM	1.09	$\geq 0.15 \text{ m}$
5	稳定风压作用下的限制横倾角	5.4°	$\leq 16^\circ$
6	GZ 曲线下面积 B/A	2.423	≥ 1

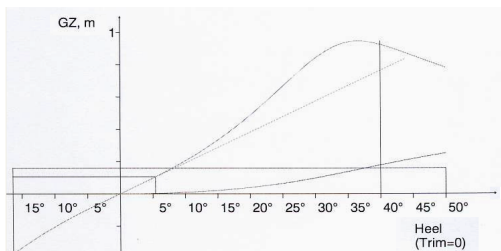


图3 蒸汽发生器运输静稳性曲线图

1.3 运输加速度

船舶在海上在三维方向产生摇荡,造成货物产生3个方向的加速度。国际海事组织IMO《货物积载和系固安全操作规则》提供了无限航区货物加速度的确定方法:

$$\begin{aligned} a_x &= a_{0x} \cdot k_1 \\ a_y &= a_{0y} \cdot k_1 \cdot k_2 \\ a_z &= a_{0z} \cdot k_1 \end{aligned}$$

式中: a_{0y}, a_{0x}, a_{0z} 为货物在不同位置时的横、纵、垂向基本加速度(见表2); k_1 为船长及航速修正系数; k_2 一船宽与初稳性高度比修正系数。

表2 基本加速度值表

垂向货位↓	横向加速度 a_{0y} (m/s ²)									纵向加速度 a_{0x} (m/s ²)
	7.1	6.9	6.8	6.7	6.7	6.8	6.9	7.1	7.4	
上甲板高位	7.1	6.9	6.8	6.7	6.7	6.8	6.9	7.1	7.4	3.8
上甲板低位	6.5	6.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.3	6.5	6.7	2.9
二层舱	5.9	5.6	5.5	5.4	5.4	5.5	5.6	5.9	6.2	2.0
底舱	5.5	5.3	5.1	5.0	5.0	5.1	5.3	5.5	5.9	1.5
纵向货位 (距船尾)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	L
垂向加速度 a_{0z} (m/s ²)										
	7.6	6.2	5.0	4.3	4.3	5.0	6.2	7.6	9.2	

注:表中L为船

表2中所列基本加速度值的条件为:无限航区;全年航行;25天连续航行;船长等于100米;服务航速15节;B/GM不小于13(B为船宽,GM为船舶未经自由液面修正的初稳性高度)。当本船的船长、航速及B/GM不符合上述条件时,应查IMO手册得相应的修正系数 K_1 和 K_2 进行修正计算。

对于某蒸汽发生器运输:船长97m,航速14节,

经查 k_1 修正系数表得 $k_1=0.99$; $B/GM=14.9$, 大于13, $k_2=1$; 货物装载在船的底舱0.6L的位置,可依据表2查得各向基本加速度值。则可求得货物的三维加速度值分别为:

$$\text{横向加速度 } a_y = 5.049 \text{ m/s}^2 = 0.515g$$

$$\text{纵向加速度 } a_x = 1.485 \text{ m/s}^2 = 0.152g$$

$$\text{垂向加速度 } a_z = 4.95 \text{ m/s}^2 = 0.505g$$

根据蒸汽发生器对运输加速度的限制要求,三维冲击加速度均应不超过0.9g,显然可以满足要求。

2 承载甲板的衬垫

蒸汽发生器多数只有两个运输托架,需采用枕木或钢梁衬垫方式对集中荷载进行分散,满足船舶甲板承载强度要求。需要校核船甲板单位面积承载力和衬垫底梁的强度。衬垫间隔一般距离不大于船的承载甲板龙骨间距(300~600mm)时,可按均布荷载计算。设货物托架按货物重心对称布置,则根据甲板单位面积承载力要求可计算得衬垫底梁的长度 r 为

$$r = \frac{mg}{nBp_0} \quad (4)$$

式中: m 一货物质量; n 一货物托架数量; p_0 一船甲板单位面积允许力。

根据单根底梁的强度可推导出计算衬垫底梁数量的公式为:

$$c = \frac{mg(r-s)^2}{8nr\sigma_p W_x} \quad (5)$$

式中: c 一个托架下的衬垫底梁数量; σ_p 一底梁材料允许拉应力; W_x 一底梁抗弯截面模量。

还应核算托架宽度范围内能否容纳下数量 c , 和为了均布荷载对衬垫梁之间间隙的要求,必要时调整底梁的规格尺寸或材料。

3 绑扎加固

货物在海运过程中产生三维加速度会造成货物在横向、纵向发生滑移或翻转,需要通过绑扎加固来解决。大型货物每次运输都需要进行专门的绑扎设计和工艺安排,因此是海运安全控制的重点。

3.1 绑扎方法

考虑蒸汽发生器外壳上可利用的绑扎点(突出管等)对绑扎索具的耐受程度,有两种绑扎方案。

(1) 型钢焊接方案。在货物前后端设计型钢支撑架,防止货物纵向滑移和翻转。在两侧托架端面处,设计横向挡板,并将甲板、托架焊接在一起,防止货物的横向滑移和翻转。

(2) 索具绑扎方案。采用钢丝绳、螺旋松紧器、甲板固定耳环作为绑扎索具。纵向绑扎利用设备上的突出管作为固定点,在甲板上焊接多个耳环作为地锚。突出管强度由设备供应商根据绑扎最大力进行校核计算。横向利用设备的筒体进行绑扎,和货物接触的钢丝绳套有橡胶管,保护设备表面。

3.2 绑扎计算

国际海事组织 IMO 发布有《货物积载与系固安全操作规则》,可依据进行绑扎计算。货物在纵、横、垂三个方向上所受外力可利用下式求得:

$$F_{(x,y,z)} = ma_{(x,y,z)} + F_{w(x,y)} + F_{s(x,y)}$$

式中: $F_{w(x,y)}$ 一风压力, $F_{s(x,y)}$ 一浪拍击力,对于舱内货物可不计。

系固装置的允许工作负荷 MSL 由绑扎材料的破断强度确定(见表3),计算强度:

$$CS = \frac{MSL}{1.35}$$

对于货物的纵向、横向滑移校核,绑扎后不发生滑移的平衡条件为:

$$F_y = \mu mg + \sum CS_i f_i$$

$$F_x = \mu m(g - a_z) + \sum CS_i f_i$$

式中: CS_i 一第 i 个加固件的计算强度; μ 一衬垫摩擦系数(钢-木、钢-橡胶取 0.3); f_i 一系数($f = \mu \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \sin(\beta)$), α 、 β 为绑扎索具的垂向、横向夹角)。

表3 系固装置的允许工作负荷 MSL

系固装置	MSL	系固装置	MSL
卸扣、环、甲板孔、低碳钢花篮螺丝	50%Q	钢丝绳(一次性使用)	80%Q
纤维绳	33%Q	钢丝绳(可重复使用)	30%Q
链	50%Q	钢带	70%Q

注:表中 Q 为破断强度

对于蒸汽发生器运输,重力作用下的纵、横向抵抗力矩均大于翻倒力矩,翻倒绑扎校核安全。

4 运输三维加速度记录

货物海运会受到船舶正常的三维加速度影响(参看表2),但运输、装卸船过程可能遭遇意外造成货物滑移与碰撞并产生较大的三维冲击加速度。如果超出货

物限值,则可能造成货物内部构件的变形与位移损坏。对于精密货物可选择在本体两端各安装一个加速度记录仪以便于排除干扰,时长涵盖从发运到安装工地全程运输,唤醒设置选择适当值以确保意外事件被记录又可避免正常运输产生的加速度频繁记录,一般可设置为纵向 0.2g、横向 0.40g、垂向 0.3g。

运输完成后读取记录仪数据,如加速度在唤醒值之内,则无数据记录,说明运输过程正常。如果记录仪曾被唤醒并有数据,则会有唤醒时段整个加速度曲线,可依据加速度曲线和值大小分辨所发生的事件及危害。

5 结束语

(1) 海运技术控制的关键是预先设计。应使运输船舶吃水小于航道水深,船舶稳定满足要求,绑扎加固和衬垫安全,同时通过改变积载位置和调整船舶的初稳性高度使三维加速度小于限定值。所有计算应留有余量,并满足国际海运规范的要求。

(2) 在调研和计算基础上编制运输实施方案。其中,对绑扎加固和衬垫等应有详细的施工工艺图纸、材料和工具计划,并与发货地国家的材料和工具标准相一致,以便于海外安排实施。

(3) 派往海外的装船监装人员依据图纸和方案进行现场监督,特别是对绑扎加固的材料规格和焊缝的检验、衬垫防滑材料的布置等的检查,有助于使方案得到准确实施。

(4) 对加速度的记录可显示运输过程是否发生过对货物的较大冲击,直观有效的监督运输过程,对无法派人全程监运的远洋运输可起到有效的间接监督作用。

参考文献:

- [1] 蒋维清. 船舶原理 [M]. 人民交通出版社, 1992.
- [2] 沈玉如. 船舶货运 [M]. 大连海事大学出版社, 2006.
- [3] IMO IA292E. Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing[S]. International Maritime Organization Publication, 2003.
- [4] 中华人民共和国海事局. 船舶与海上设施法定检验规格 [S] 人民交通出版社, 1999.