

doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.03.010

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20130402.1600.006.html>

吊重作业起重船波浪中的运动响应

汪娟娟¹, 黄衍顺¹, 李怀亮², 谢维维²

1 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072

2 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452

摘要: 利用 MOSES 计算软件, 运用三维势流理论建立起重船系泊状态下的吊重作业计算模型, 计算吊重与船的六个自由度的运动, 对吊重绕吊臂吊点的摆动进行研究, 分析船舶系统的运动特性。在时域计算中, 引入风浪流海洋环境条件, 使计算条件更加符合工程实际。以一艘起重船为例, 选取船体重心和吊物质心为关键点, 改变系泊缆预张力, 使缆绳张力控制在安全范围内。通过改变起吊要素, 分析这些要素对吊重运动及船体运动的影响, 以及吊重摆动与船体横摇运动的相互影响。

关键词: 起重船; 吊重; MOSES; 运动响应; 作业概率

中图分类号: U661.32^{*1}

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2013)03-50-08

Lifts' Motion Response in Waves in the Hoisting Operation

WANG Juanjuan¹, HUANG Yanshun¹, LI Huailiang², XIE Weiwei²

1 School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Offshore Oil Engineering Co., Ltd, Tianjin 300452, China

Abstract: This paper establishes the computational model of hoisting operation in mooring floating cranes, based on the 3-D potential flow theory and the MOSES computing software. In particular, the movements of the hanging object and the crane are analyzed on six degrees of freedom, the swing motion of the hanging object around the boom point is investigated, and the kinetic characteristic of the ship is then presented. Also, when performing the calculation in the time domain, the model incorporates several marine parameters such as wind, waves and flow to make the result more accordant with engineering practice. To validate the proposed model, a particular floating crane is examined in experiments. The Center of Gravity(CG) of the hull and the center of the hanging object are first defined as two key points, and the tension on the mooring cable is correspondingly adjusted within a safe range. By gradually changing the hoisting condition, the movement of the hull and the hanging object can be analyzed, and the relationship between the rolling of the crane and swing of the object is revealed.

Key words: floating crane; hanging load; MOSES; motion response; probability of the operation

0 引言

有关吊重作业起重船波浪中的运动响应研究, 目前还没有非常成熟的成果^[1]。Todd 等^[2]通过对起重船起吊重物进行实验、分析, 得出起重船上吊杆起重机表现出经典的受迫球形摆的动力行

为的结论, 并提出起重船是典型的小阻尼系统, 可以忽略系统的结构阻尼。Herry 等^[3]在研究起吊重物时, 构建了由刚性无质量的吊索和一个吊重质点组成的起吊重物系统模型。Ren 等^[4]对起重船吊臂柔性对系统动力学特性的影响进行了分析, 研究中使用的模型为二维平面钟摆模型。船

收稿日期: 2012-08-15

网络出版时间: 2013-04-02 16:00

作者简介: 汪娟娟(1986-), 女, 硕士生。研究方向: 船舶与海洋工程结构物设计制造。E-mail: wangjuanjuan19@126.com

黄衍顺(1946-), 男, 教授。研究方向: 船舶与海洋工程结构物设计制造。E-mail: hysh4637@yahoo.com.cn

通信作者: 黄衍顺。

舶高频运动会对起重机产生很大的附加载荷,吊绳悬挂的起吊重物在船舶摇摆的诱发下也会产生受迫振动,使起重作业的安全受到威胁,以至无法作业^[5-6]。起重船以及吊重在海洋环境作用下可能出现的大幅摆动会降低吊装就位精度,增加吊重与其它结构碰撞的几率,对于工程作业而言,这都是很危险的^[7-8]。

本文将运用三维势流理论建立起起重船作业计算模型,对船体施行8点系泊。同时,建立吊重的质量矩阵,将吊重质点以吊绳与船体连接。考虑到实际海况,在时域计算中,引入风浪流海洋环境条件来计算起重船系泊状态下的运动响应。并将船体重心和吊重质心作为关键点,通过改变系泊缆绳预张力以及吊绳长度、吊重重量和吊距等起吊要素来分析这些要素对吊重运动及船体运动的影响,以及改变起吊要素,吊重摇摆与船体摇摆运动的相互影响。

1 基本理论

1.1 时域中辐射问题的势流理论

在线性化条件下,理论上可以求解满足相应边界条件和初始条件的非定常势函数。通过求解辐射流场的速度势函数,将运动浮体受到的水动力在正交直角坐标系中以分量的形式表达出来,如式(1)和式(2)所示^[9]:

$$F_{j(t)} = -\mu_{j,k} \ddot{x}_{k(t)} - \int_0^t \ddot{x}_{k(t-\tau)} L_{j,k(t-\tau)} d\tau \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu_{j,k} = \rho \iint_{S_0} \phi_{k(P,0)} n_j ds \\ L_{j,k(t)} = \rho \iint_{S_0} \frac{\partial \phi_{k(P,t)}}{\partial t} n_j ds \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_j 为作用于运动浮体的水动力在第 j 个自由度上的分量; j 为力分量的自由度 ($j=1, 2, \dots, 6$); k 为浮体运动分量的自由度 ($k=1, 2, \dots, 6$); $\mu_{j,k}$ 为附连水质量系数,其中 j, k 为定值时,表示浮体浸没部分的几何形状系数与时间无关; $x_{k(t)}$ 为浮体第 j 个自由度的位移, $\ddot{x}_{k(t)}$ 为 $x_{k(t)}$ 对时间的两阶导数; $L_{j,k(t-\tau)}$ 为自由液面记忆效应的时延函数; ρ 为流体密度; P 为流场中任意点的坐标。

1.2 频域中辐射问题的势流理论

频域中,分析浮体处于含有自由液面的理想流体中对流场产生的扰动的影响。当流场达到稳定状态时,流场存在满足拉普拉斯方程及满足边

界条件的速度势函数,即 $\phi_{(P,t)} = \phi_{(P)} e^{-i\omega t}$ 。

根据拉普拉斯方程定解条件,可利用格林函数法求解空间辐射速度势函数 $\phi_{j(P)}$,从而将运动浮体受到的水动力在正交直角坐标系中以分量的形式表达出来,如式(3)和式(4)所示^[10]:

$$F_{j(t)} = -\mu_{j,k} \ddot{x}_{k(t)} - \mu_{j,k} \dot{x}_{k(t)} \quad (3)$$

$$\mu_{j,k} + i \frac{\lambda_{j,k}}{\omega} = \rho \iint_{S_0} \phi_{k(P)} \frac{\partial \phi_{j(P)}}{\partial n} ds \quad (4)$$

式中: $\mu_{j,k}$ 为附连水质量系数; $\lambda_{j,k}$ 为阻尼系数,当 j, k 为定值时,阻尼函数由浮体运动频率的函数决定。目前,附连水质量和阻尼系数既可以通过数值计算方法求得,也可以利用物理模型实验方法得到。

1.3 水动力在时域与频域中的转化

在线性化条件下,通过傅立叶变换来实现水动力由频域到时域的转化,如式(8)所示。

$$\mu_{j,k(\omega)} = \mu_{j,k} + \int_0^\infty L_{j,k(t)} \cos(\omega t) dt \quad (5)$$

$$\lambda_{j,k(\omega)} = \omega \int_0^\infty L_{j,k(t)} \sin(\omega t) dt \quad (6)$$

$$\mu_{j,k} = \mu_{j,k(\infty)} \quad (7)$$

$$L_{j,k(t)} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda_{j,k(\omega)} \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega \quad (8)$$

2 实例计算与结果分析

2.1 起重船基本数据

计算所需的基本数据如表1所示。

表1 计算基本参数
Tab.1 Basic parameters

总长 L/m	175
型宽 B/m	48
型深 m	16.5
吃水 m	11.5
排水量 t	83 936.0
重心纵坐标 x/m	104.105
重心横坐标 y/m	0.166
重心垂坐标 z/m	19.49
R_x/m	15.36
R_y/m	50.71
R_z/m	50.71
起吊货物重量 t	2 800.0
吊点纵坐标 x/m	178.38
吊点横坐标 y/m	0
吊点垂坐标 z/m	62.68

注:惯性半径采用经验公式求得, $R_x = 0.32L$, $R_y = R_z = 0.29B$ 。

2.2 结果分析

实例计算中,风速取为 31.8 m/s,流速取为 1.08 m/s。

起重船纵向起吊,起重机布置在船尾,起重示意图如图 1 所示。

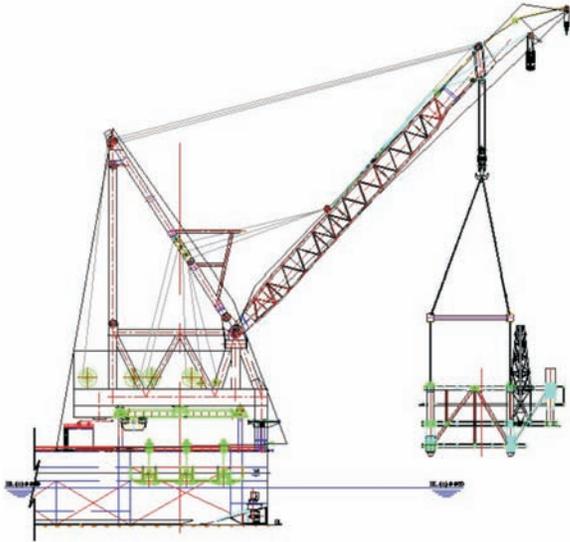


图1 起重示意图
Fig.1 Abridged general view of hoisting

2.2.1 吊重的运动

本文以吊重重量 2 800.0 t,吊距 41.66 m,波高 1.5 m 为例进行分析。由于船的横摇运动要比纵摇运动显著,而 90°浪向下船的横摇运动最大,故选取 90°浪向时吊重的摇摆运动进行分析。

实例计算中,吊绳的刚度取足够大,经计算对比,吊绳的轴向拉伸可忽略不计。计算的海况为规则波。

激励的前 1 000 s 内,吊重的摇摆角度如图 2~图 5 所示。

由图可知,吊重吊绳长度在 36~66 m 之间时,随着吊重吊绳长度的增加, R_x , R_y 呈递增趋势,且 R_x 的增速要快于 R_y 。其中, R_x 为吊重绕 x 方向的摇摆角度, R_y 为吊重绕 y 方向的摇摆角度。

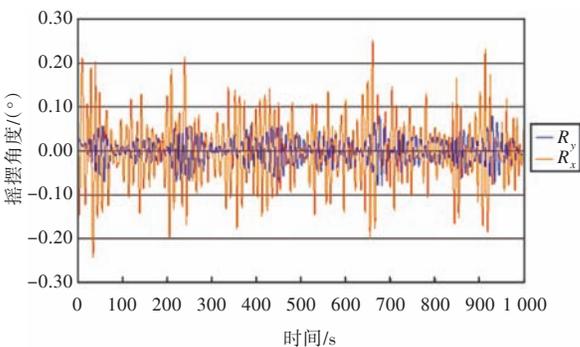


图2 吊绳 36 m 长时的吊重摇摆角度曲线
Fig.2 Curves of the cargo swing angle with a 36 m lifting rope

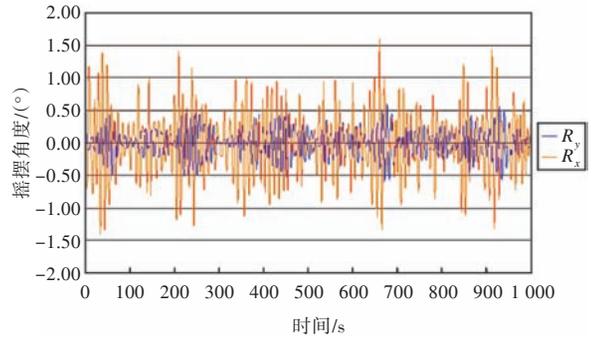


图3 吊绳 46 m 长时的吊重摇摆角度曲线
Fig.3 Curves of the cargo swing angle with a 46 m lifting rope

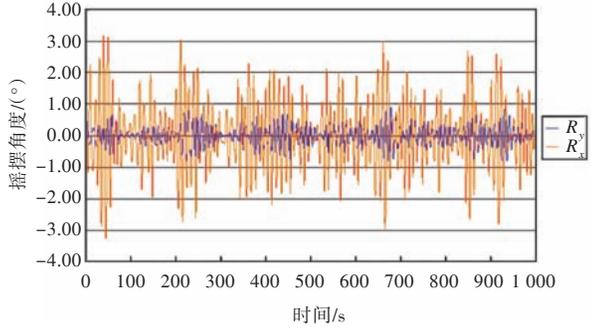


图4 吊绳 56 m 长时的吊重摇摆角度曲线
Fig.4 Curves of the cargo swing angle with a 56 m lifting rope

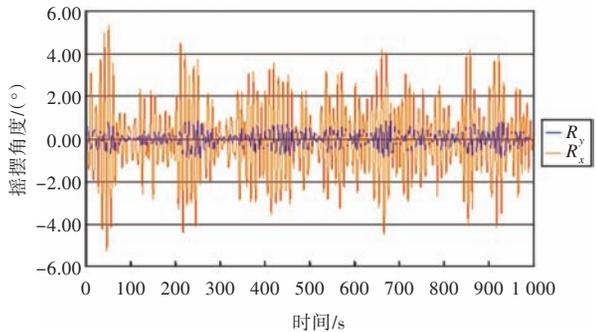


图5 吊绳 66 m 长时的吊重摇摆角度曲线
Fig.5 Curves of the cargo swing angle with a 66 m lifting rope

由于吊重摇摆的方向与空间上的摇摆幅值无法从数据上对应,所以只给出了 xy 矢量和方向摇摆的幅值,后面将对船与吊重摇摆运动的情况进行分析。吊重矢量和方向摇摆运动的幅值如图 6~图 9 所示。

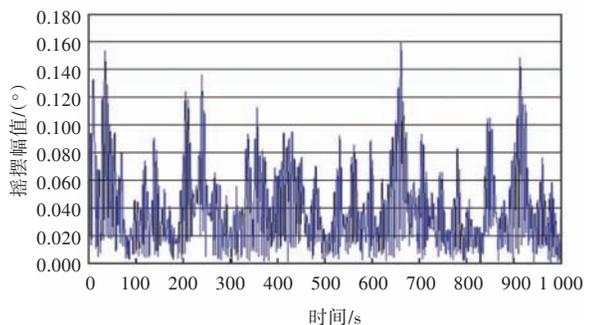


图6 吊绳 36 m 长时吊重矢量和方向摇摆幅值
Fig.6 Sway amplitude of the cargo in vector direction with a 36 m lifting rope

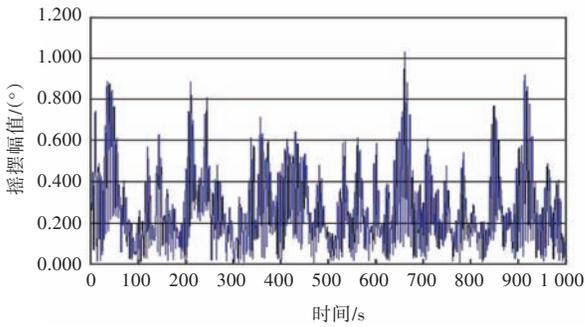


图7 吊绳46 m长时吊重矢量和方向摇摆幅值

Fig.7 Sway amplitude of the cargo in vector direction with a 46 m lifting rope

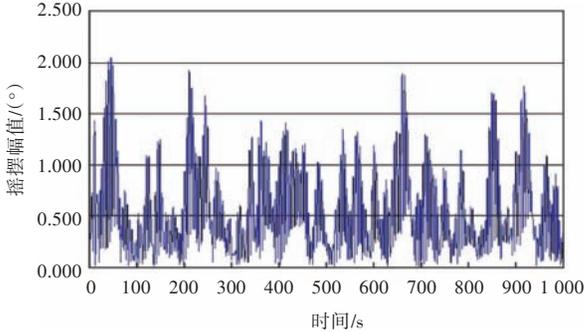


图8 吊绳56 m长时吊重矢量和方向摇摆幅值

Fig.8 Sway amplitude of the cargo in vector direction with a 56 m lifting rope

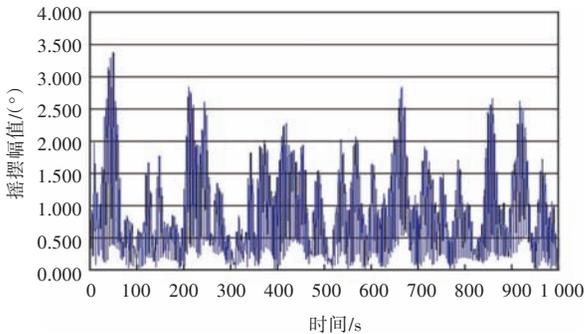


图9 吊绳66 m长时吊重矢量和方向摇摆幅值

Fig.9 Sway amplitude of the cargo in vector direction with a 66 m lifting rope

由图中可看出,随着吊绳长度的增加,吊重本身单摆运动的固有周期增大,吊重摇摆幅值也加大,而幅值随时间的变化趋势则理论上不变。

2.2.2 相同吊重、吊距,不同吊绳长度时吊重与船摇摆运动的相互影响分析

由于吊重绕 x 方向的摇摆运动较大,所以主要分析这个方向的运动,绕 y 方向的摇摆运动只列出主要数据加以参考。

RAO 为船舶运动的幅值响应算子。吊绳长度为 36 m 时,船的 RAO 曲线如图 10 和图 11 所示。

可以看出,此时船的固有横摇周期为 13~15 s,固有纵摇周期为 9~10 s。吊绳长度为 46, 56, 66 m 时,船的横摇、纵摇 RAO 曲线图几乎没有变化,受篇幅所限,此处不再列出。

在激励的前 1 000 s 内,吊重与船的横摇运动如图 12~图 15 所示。

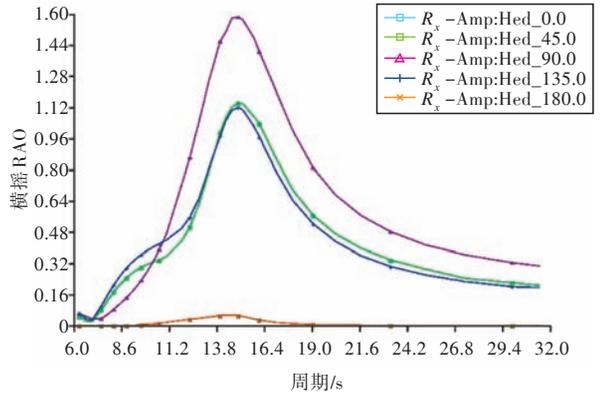


图10 船的横摇RAO

Fig.10 Ship's rolling RAO

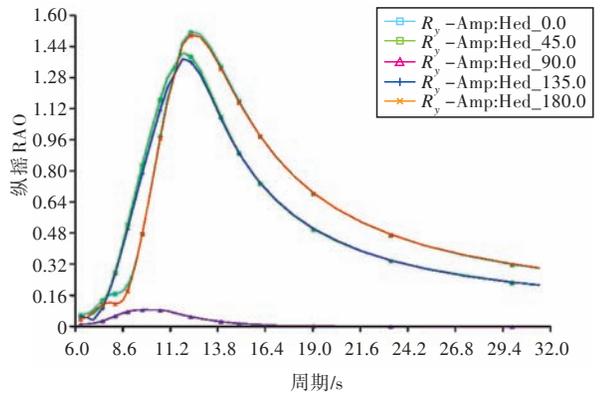


图11 船的纵摇RAO

Fig.11 Ship's pitching RAO

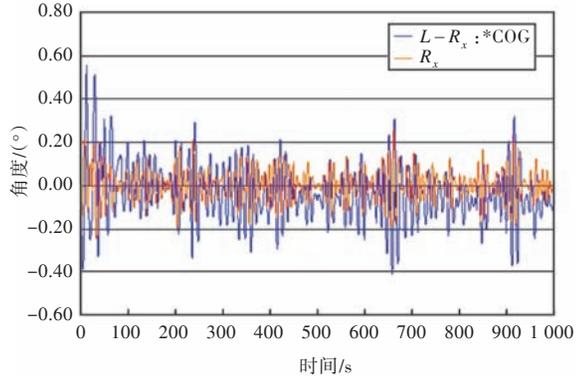


图12 吊绳36 m长时吊重与船的横摇运动对比

Fig.12 Roll of cargo and ship with a 36 m lifting rope

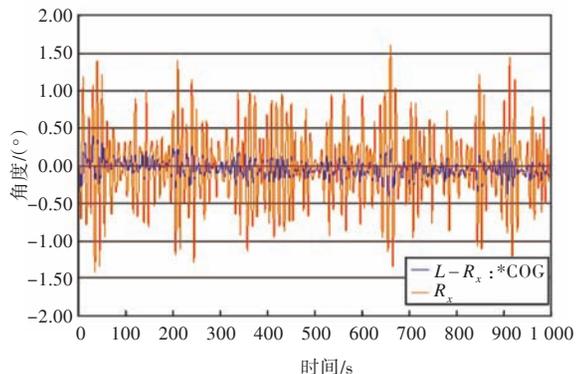


图13 吊绳46 m长时吊重与船的横摇运动对比

Fig.13 Roll of cargo and ship with a 46 m lifting rope

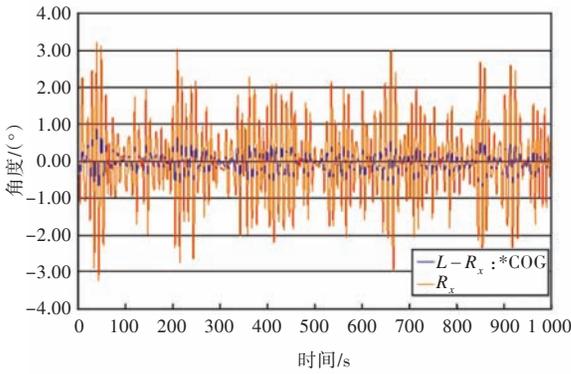


图 14 吊绳 56 m 长时吊重与船的横摇运动对比
Fig.14 Roll of cargo and ship with a 56 m lifting rope

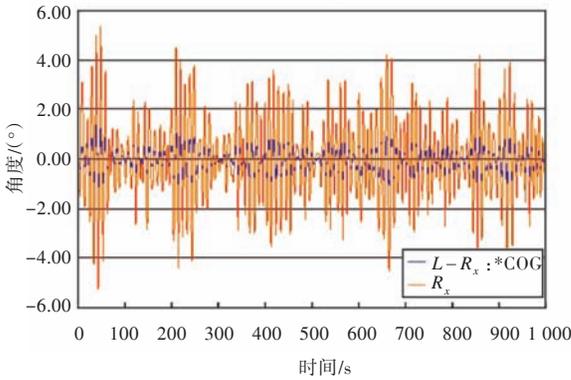


图 15 吊绳 66 m 长时吊重与船的横摇运动对比
Fig.15 Roll of cargo and ship with a 56 m lifting rope

图中, $L-R_x$ 为船的横摇角度。随着吊绳长度的增加,吊重绕 x 方向的摇摆运动幅值也逐渐增加。当长度为 56 m 和 66 m 时,船的横摇运动幅值不同,但相位和周期较接近。

2.2.3 相同吊绳长度、吊距,不同吊重时吊重与船摇摆运动的相互影响分析

以 40 m 吊距,吊绳长 47.1 m,波高 1.5 m 为例,分析吊重分别为 1 000, 2 800, 4 000 t 时,前 1 000 s 内的吊重摇摆幅值。船的 RAO 曲线如图 16~图 21 所示。

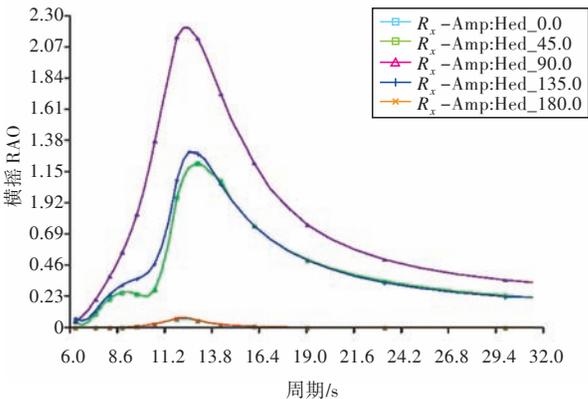


图 16 吊重 1 000 t 时船的横摇 RAO
Fig.16 Ship's rolling RAO with 1 000 t cargo

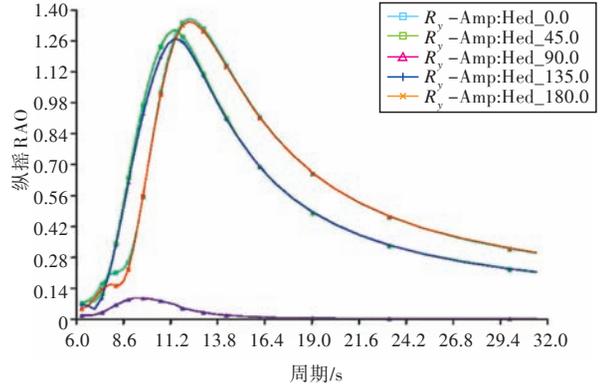


图 17 吊重 1 000 t 时船的纵摇 RAO
Fig.17 Ship's pitching RAO with 1 000 t cargo

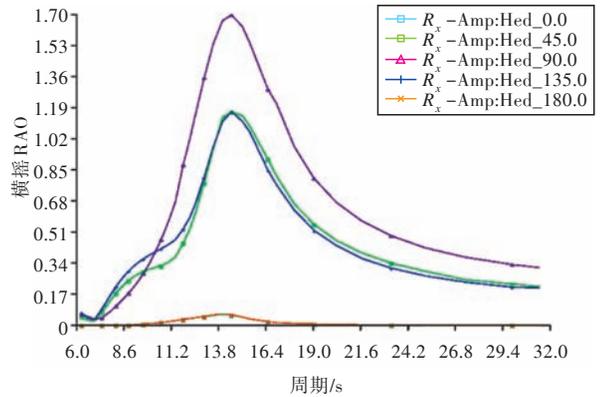


图 18 吊重 2 800 t 时船的横摇 RAO
Fig.18 Ship's rolling RAO with 2 800 t cargo

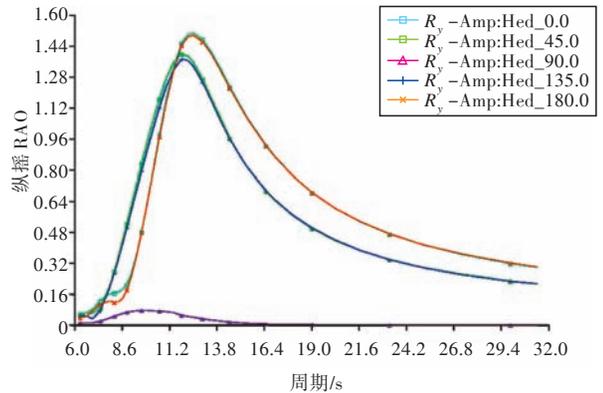


图 19 吊重 2 800 t 时船的纵摇 RAO
Fig.19 Ship's pitching RAO with 2 800 t cargo

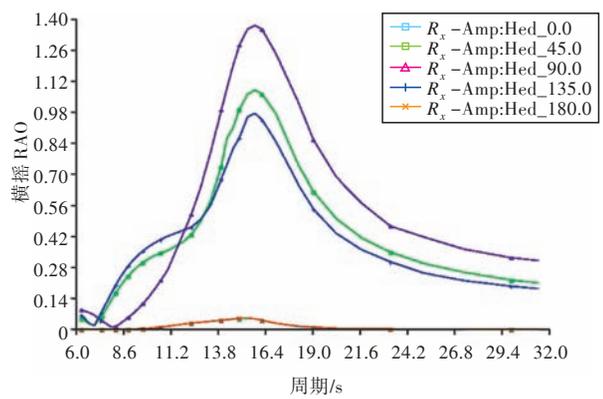


图 20 吊重 4 000 t 时船的横摇 RAO
Fig.20 Ship's rolling RAO with 4 000 t cargo

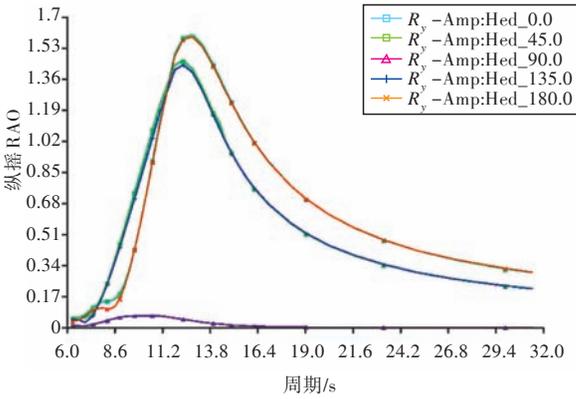


图21 吊重4 000 t时船的纵摇RAO

Fig.21 Ship's pitching RAO with 4 000 t cargo

此时,船的固有周期如表2所示。

表2 船的固有周期
Tab.2 Ship's natural period

吊重/t	船的固有横摇周期/s	船的固有纵摇周期/s
1 000	12~14	9~10
2 800	14~16	9~10
4 000	15~17	9~10

在激励的前1 000 s内,吊重与船的横摇运动如图22~图24所示。

不同吊重重量下,起重船与吊重横摇运动幅值如表3所示。

由图表可看出,随着吊重重量的增加,船的横摇幅值和纵摇幅值均递减,但纵摇幅值变化不明显;吊重绕x方向和y方向的摇摆幅值均减小,但绕y方向的摇摆幅值变化不明显。

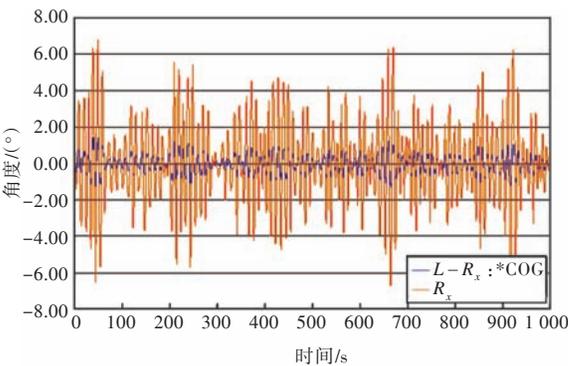


图22 吊重1 000 t时与船的横摇运动对比

Fig.22 Roll of cargo and ship with 1 000 t cargo

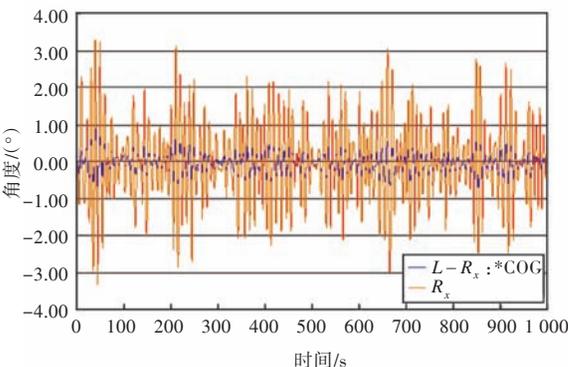


图23 吊重2 800 t时与船的横摇运动对比

Fig.23 Roll of cargo and ship with 2 800 t cargo

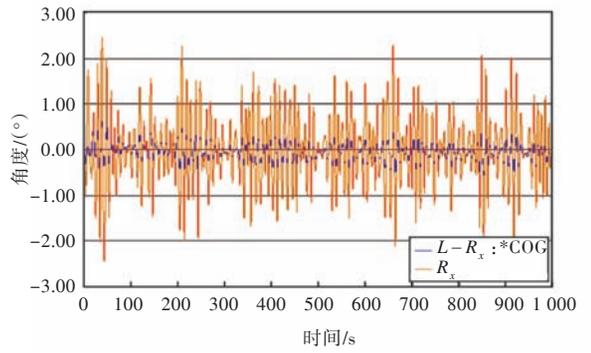


图24 吊重4 000 t时与船的横摇运动对比

Fig.24 Roll of cargo and ship with 4 000 t cargo

表3 不同吊重重量船与吊重横摇运动对比
Tab.3 Roll of cargo and ship with different cargos

		吊重重量/t		
		1 000	2 800	4 000
吊重	R_x	最大幅值	7.481	3.525
		平均幅值	1.785	0.845
船	R_y	最大幅值	1.083	1.095
		平均幅值	0.261	0.255
船	R_x	最大幅值	1.416	0.883
		平均幅值	0.358	0.184
船	R_y	最大幅值	1.785	1.780
		平均幅值	1.568	1.586

2.2.4 相同吊绳长度、吊重,不同吊距的吊重与船摇摆运动的相互影响分析

船的RAO曲线如图25和图26所示。

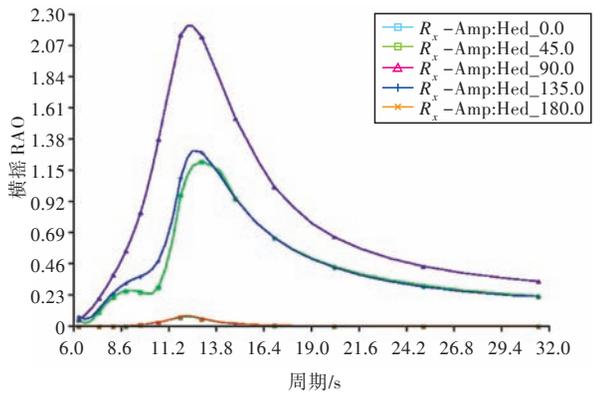


图25 船的横摇RAO

Fig.25 Ship's rolling RAO

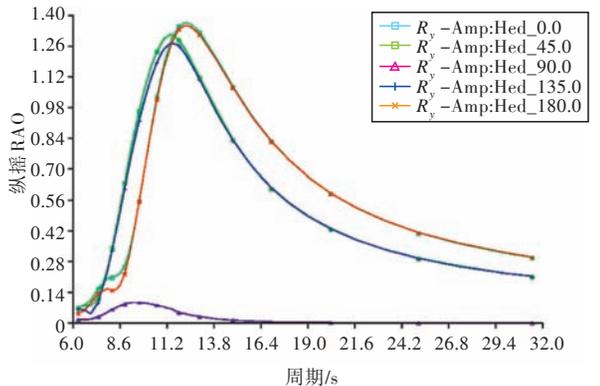


图26 船的纵摇RAO

Fig.26 Ship's pitching RAO

由图可看出,此时船的固有横摇周期为11~13 s,固有纵摇周期为9~10 s。当吊距为50,55,60 m时,船的横摇和纵摇RAO曲线图几乎没有变化,受篇幅所限,此处不再列出。

在激励的前1 000 s内,吊重与船的横摇运动如图27~图30所示。

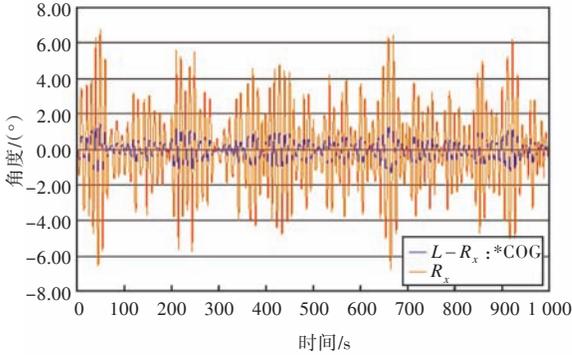


图27 吊距45 m时吊重与船的横摇运动对比

Fig.27 Roll of cargo and ship with 45 m lifting distance

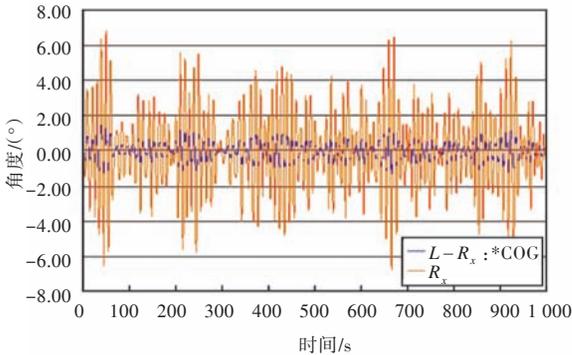


图28 吊距50 m时吊重与船的横摇运动对比

Fig.28 Roll of cargo and ship with 50 m lifting distance

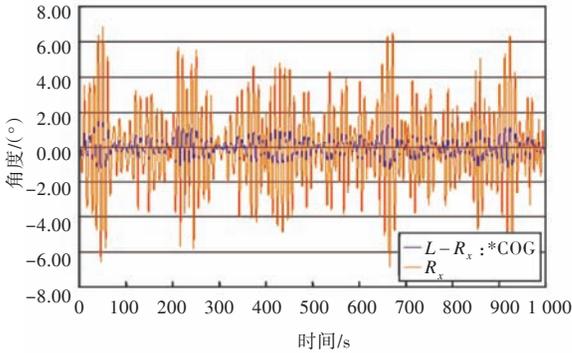


图29 吊距55 m时吊重与船的横摇运动对比

Fig.29 Roll of cargo and ship with 55 m lifting distance

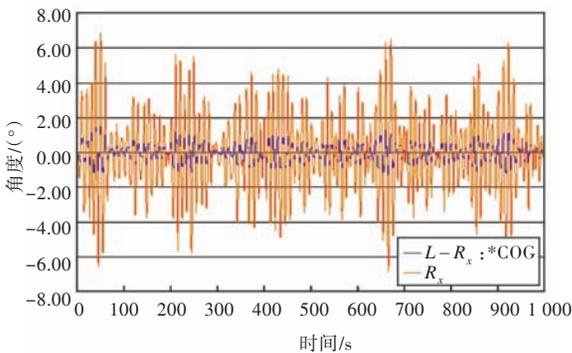


图30 吊距60 m时吊重与船的横摇运动对比

Fig.30 Roll of cargo and ship with 60 m lifting distance

不同吊距下,起重船与吊重横摇运动幅值如表4所示。

表4 不同吊距船与吊重横摇运动对比

Tab.4 Roll of cargo and ship with different lifting distances

		吊距/m				
		45	50	55	60	
吊重	R_x	最大幅值	7.518	7.555	7.592	7.629
		平均幅值	1.793	1.801	1.809	1.816
	R_y	最大幅值	1.091	1.099	1.108	1.118
		平均幅值	0.262	0.264	0.266	0.267
船	R_x	最大幅值	1.421	1.426	1.430	1.435
		平均幅值	0.360	0.361	0.362	0.363
	R_y	最大幅值	1.785	1.785	1.785	1.785
		平均幅值	1.568	1.568	1.568	1.568

由图表中可看出,随着吊距的增加,船的横摇幅值递增,但增量很小;而纵摇幅值则几乎没有变化。吊重绕 x 方向及 y 方向的摇摆幅值均增加,但增量很小。由此可见,改变吊距对船及吊重的摇摆运动的影响不大,吊距不是个敏感因素。

在本算例中,谱峰周期约为10 s,MOSES频域分析的结果表明,横摇与纵摇固有周期均较接近于谱峰周期,因此易受海浪的影响。

3 结论

本文对起重船在波浪中系泊状态下的运动响应进行了研究。在时域计算中,引入了风浪流海洋环境条件,以船体重心和吊重质心为关键点,通过改变系泊缆预张力及起吊要素,分析了不同浪向、吊重吊绳长度、吊重和吊距情况下,吊重运动及船体运动的变化情况,得到如下主要结论:

1) 当吊绳长度在36~66 m之间时,随着吊绳长度的增加, R_x 、 R_y 呈递增趋势,且 R_x 的增速要快于 R_y 。随着吊绳长度的加大,吊重本身单摆运动的固有周期加大,吊重摇摆幅值也加大,而幅值随时间的变化趋势理论上则没有改变。

2) 随着吊重重量的增加,船的横摇幅值和纵摇幅值均递减,但纵摇幅值变化不明显;吊重绕 x 方向及 y 方向的摇摆幅值均减小,但绕 y 方向的摇摆幅值变化不明显。

3) 随着吊距的增加,船的横摇幅值递增,但幅值增量很小,而纵摇幅值则几乎没有变化。吊重绕 x 方向和 y 方向的摇摆幅值均增加,但增量很小。由此可见,改变吊距对船及吊重的摇摆运动影响不大,吊距不是敏感因素。

参考文献:

[1] CHIN C, NAYFEH A H, ABDEL-RAHMAN E. Non-

- linear dynamics of a boom crane[J]. Journal of Vibration and Control, 2001, 7(2):199-220.
- [2] TODD M D, VOHRA S T, LEBAN F. Dynamical measurements of ship crane load pendulation[C]//Oceans'97 MTS of IEEE Conference Proceedings, 1997: 1230-1236.
- [3] HERRY R J, MASOUD Z N, NAYFEH A H, et al. Cargo pendulation reduction of ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation[J]. Journal of Vibration and Control, 2001, 7(8):1253-1264.
- [4] REN H L, WANG X L, HU Y J, et al. Dynamic response analysis of moored crane-ship with a flexible booms[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(1): 26-31.
- [5] POSIADALA B. Effect of vibration in hoist system on dynamics of truck crane [J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1996, 76 (S5) : 403-404.
- [6] 王赣城, 金长明, 陈云文. 吊杆式船载起重机吊绳非线性动力学建模与分析[J]. 噪声与振动控制, 2010 (2):23-27.
Wang Gancheng, Jin Changming, Chen Yunwen. Non-linear dynamic modeling and analysis of cable in boom ship-mounted crane [J]. Noise and Vibration Control, 2010(2):23-27.
- [7] 董艳秋, 韩光. 起重船吊物系统在波浪中的动力响应[J]. 中国造船, 1993(1):64-71.
DONG Yanqiu, HAN Guang. Dynamic response of lifting load system of crane vessel in waves[J]. Shipbuilding of China, 1993(1):64-71.
- [8] SARKAR A, TAYLOR R E. Dynamics of mooring cables in random seas [J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16(2):193-212.
- [9] 余建星, 董文斌, 戴恩志. RMFC模型在新型拼接式海上栈桥码头三维运动响应计算中的应用[J]. 港工技术, 2006(4):1-4.
YU Jianxing, DONG Wenbin, DAI Yuzhi. The application of RMFC model in the three-dimensional motion response calculation of new concatenation type maritime quay of landing stage [J]. Port Engineering Technology, 2006(4):1-4.
- [10] 唐友刚. 海洋工程结构动力学[M]. 天津:天津大学出版社, 2008:43-72.

[责任编辑:卢圣芳]



(上接第5页)

- effect of hovering height to helicopter shipboard controllability [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(8):1907-1910.
- [8] 吕俊军. 80年代以来的反舰导弹进攻及其防御作战评估[J]. 飞航导弹, 1993(4):34-37.
- [9] O'ROURKE R. Navy DDG-51 and DDG-1000 destroyer programs: Background and issues for Congress[R]. Washington DC: Library of Congress, 2010.
- [10] 吴晓光, 徐青, 吴宏敏, 等. 国外水面舰船50年[M]. 北京:兵器工业出版社, 2005.
- [11] 徐悦, 张振鹏, 陈小庆. 舰载导弹垂直发射技术研究进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(3):22-25.
XU Yue, ZHANG Zhenpeng, CHEN Xiaoqing. Progress of investigation on ship-based missile vertical launching technology[J]. Missile and Space Vehicles, 2007(3):22-25.
- [12] 颜仲新, 郑长军, 胡海. “伯克”级驱逐舰反导能力分析[J]. 舰载武器, 2002(3):45-49.
YAN Zhongxin, ZHENG Changjun, HU Hai. Analysis about the antimissile capabilities of US Navy's "Burke" class destroyer [J]. Shipborne Weapons, 2002(3):45-49.
- [13] NICHOLAS J, STRATTAN R D. Low observable technology for future surface combatants[J]. Naval Engineers Journal, 1996, 108(5):49-56.
- [14] BEEDALL R. Type 45 ("D" class) destroyer Daring class [EB/OL]. [2011-05-18]. <http://navy-matters.beedall.com/daring1-1.htm>.
- [15] 船电技术编辑部. 先进的电力推进船舶·军用篇图文集[J]. 船电技术, 2011(增刊1):27.
- [16] GILMORE J M. The navy's DD(X) destroyer program [R/OL]. (2005-07-19). <http://www.cbo.gov/publication/16994>.
- [17] 奚秀娟, 李佳伟. 舰艇射频集成技术总体设想[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(4):1-5.
XI Xiujian, LI Jiawei. General considerations of shipboard RF integration technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2008, 3(4):1-5.
- [18] 龚昌奇. 船舶造型及舱室设计方案的模糊综合评价[J]. 武汉交通科技大学学报, 1996, 20(5):589-593.
GONG Changqi. Fuzzy evaluation for ship mold-making and accommodation design[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1996, 20(5):589-593.

[责任编辑:易基圣]