

基于实测横摇角的客滚船车辆安全装载方案研究

龚昆朋^{1,2,3}, 郑彭军^{1,2,3*}, 徐进⁴

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波港航物流服务体系协同创新中心, 浙江 宁波 315211;
3.国家道路交通安全管理工程技术研究中心 宁波大学分中心, 浙江 宁波 315211; 4.舟山海事局, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为验证航区风力达到7级时车辆不绑扎方案的可行性, 开展了跟船实测最大横摇角等数据的工作, 结合惯性力的计算方法, 对装载车辆的安全性进行校核. 结果表明: 实际风力7级时, 典型客滚船装载车辆不绑扎也不会滑移和倾覆; 但当有涌浪等特殊海况时, 横摇角超过 10° 时, 不绑扎装载车辆不安全. 根据校核结果, 提出了简单实用、易于推广的车辆安全装载方法.

关键词: 客滚船; 车辆系固; 方案优化; 船舶横摇

中图分类号: U698.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 03-0095-04

客滚船兼具滚装船和客船的特点, 下层甲板空间较大可装载车辆, 上层有较大建筑物并可乘坐数百位乘客. 近年来, 客滚船安全事故频发, 其安全装载越来越受到重视.

目前, 客滚船车辆装载安全研究大多是借鉴滚装船的理论和方法. 文献[1-2]研究了集中在渤海湾的船舶, 假设其在最大横摇角(30°)时, 对车辆装载的安全性进行校核; 然而, 船上主要装载车辆类型不同, 影响车辆移动的内外因素较多, 因此难以量化. 文献[3-5]采用多种方法, 比较了海船加速度值. 文献[6-8]根据不同算法, 对船舶横摇预报进行了分析. 文献[9]利用拉格朗日方程建立了船舶和车辆多体系统的动力学方程, 分析车辆稳定性. 文献[10]对车辆和甲板进行了研究, 提出在一定天气条件下, 特定海域车辆运输可以不用绑扎. 上述研究主要解决了车辆绑扎状态下的安全校核问题. 但在客滚船实际航行中, 为了提高效率, 迫切需要有遮蔽航区和部分沿海航区在风力临界状态时的安全绑扎方案, 特别是基于实际海况确定车辆无绑扎时的安全性.

本文从当前客滚船运行现状出发, 建立了车辆理论模型, 通过实测最大横摇角等数据, 对车辆

的横向滑移和倾覆进行校核计算, 提出了客滚船车辆安全装载方案.

1 客滚船车辆安全装载的现状

通过调研舟山沿海航区7家营运公司, 共39条客滚船, 收集到沿海航区客滚船《系固手册》13本. 手册中对于车辆的装载要求基本一致(当恶劣海况风力高于蒲氏6级的航区不可避免时, 要求对货物进行绑扎). 手册也包括车辆系固受力计算书, 按照查表法取各方向加速度值对绑扎工具的强度进行安全校核^[1], 进而给出车辆绑扎所需要的绑扎工具数量. 然而通过查表法得到的绑扎方案, 并不适合客滚船运行的航程、海况等实际状况, 因而导致其与船员经验相冲突, 车辆绑扎方案得不到有效执行.

在实际营运中, 由于客滚船班期较多、航程时间较短、码头泊位资源紧张等因素, 许多遮蔽航区和部分沿海航区航线预报风力达到7级时, 在船员经验主义的影响下, 客滚船装载车辆未绑扎的情况较普遍. 舟山客滚船相较于渤海湾客滚船车辆甲板仅有一层, 船舶稳性较好, 积载高度较小, 影响车辆安全性的横向和垂向加速度值较小^[12]. 因

收稿日期: 2018-08-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 欧盟地平线2020计划项目(690713); 国家自然科学基金(51408321); 浙江省自然科学基金(LY15E080013); 宁波市自然科学基金(2016A610233).

第一作者: 龚昆朋(1991-), 男, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 客滚船安全. E-mail: gongkunpeng1002@163.com

*通信作者: 郑彭军(1965-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 船舶安全. E-mail: zhengpengjun@nbu.edu.cn

此,在确保安全的前提下可提高营运效率.车辆的安全装载须结合船舶实际结构和参数,通过长期观测和统计客滚船在不同风力等级下对应的横摇角和横摇周期,对在风力7级时车辆无绑扎的安全装载进行校核,进而提出符合客滚船实际的方案.

2 装载车辆安全判定依据

船舶在波浪中的复杂运动可以分解为一系列简单运动的合成:纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇.车辆除受重力外,横摇产生的惯性力对装载车辆横向滑动影响最大,其次是纵摇和垂荡.由于船舶的横摇角一般远大于纵摇角,且装载车辆一般依靠手刹,前后滑动情况极少发生,因此装载车辆安全事故主要是横向滑动和横向倾覆所造成.车辆所受横向力主要有3部分组成(图1).

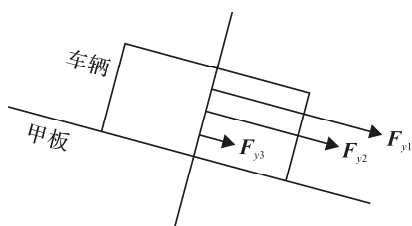


图1 车辆横向受力分析

选取装载车辆在最不利情况下的惯性力进行分析,即当船舶横摇角、纵摇角以及垂荡值均达到最大时,分析此时的惯性力.车辆横向力由重力横向分量 F_{y1} 、横摇加速度惯性力横向分量 F_{y2} 和垂荡加速度惯性力横向分量 F_{y3} 组成^[13].

$$F_y = mg \sin \varphi_a + m(4\pi^2 \varphi_a z_0 / T_\varphi^2) + m(4\pi^2 / T_h^2) z_m \sin \varphi_a, \quad (1)$$

其中: φ_a 和 θ_a 分别为最大横摇角和纵摇角; T_φ 和 T_h 分别为横摇周期和垂荡周期; z_0 为车辆重心沿型深方向与横摇中心垂向距离; z_m 为最大振幅,通常取浪高的一半.

车辆的垂向受力如图2所示.

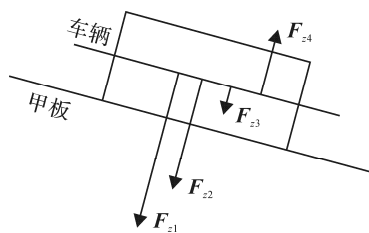


图2 车辆垂向受力分析

垂向加速度计算公式为:

$$F_z = m4\pi^2(\varphi_a y_0 / T_\varphi^2) + m4\pi^2(\theta_a x_0 / T_\theta^2) + m(4\pi^2 / T_z^2) z_m \cos \varphi_a \cos \theta_a, \quad (2)$$

其中: T_z 为纵摇周期; x_0 和 y_0 分别为车辆重心距纵摇轴和横摇轴的垂向距离.

式(2)中各部分依次是横摇加速度惯性力垂向分量 F_{z2} 、纵摇加速度惯性力垂向分量 F_{z3} 和垂荡加速度惯性力垂向分量 F_{z4} . 当重力的垂向分量 F_{z1} 与相反方向的垂向受力 F_z 差值最小时,阻止车辆移动的静摩擦力 f_m 最小,也是车辆安全装载校核的最差工况.

当装载车辆采取无绑扎保护措施时,要保证车辆不横向滑移,车辆所受横向外力 F_y 必须小于静摩擦力 f_m ,即

$$F_y \leq \mu(mg \cos \varphi_a - F_z), \quad (3)$$

其中: μ 是橡胶和钢板间的摩擦系数,取0.3.

车辆受力如图3所示.

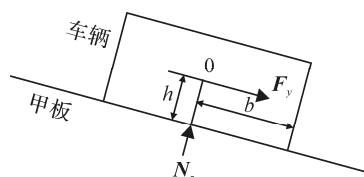


图3 车辆受力与力矩示意图

图3中横向分力与车辆的重心高度 h 之积为车辆所受的倾覆力矩 M_1 ,甲板支撑力 N_z 与车辆重心至车轮的横向间距 b 之积是阻止车辆发生倾覆的平衡力矩 M_2 . 要确保车辆不倾覆,则倾覆力矩须小于平衡力矩^[14],即

$$F_y h \leq (mg \cos \varphi_a - F_z) b. \quad (4)$$

综上,只需收集不同航区、不同海况下影响船舶运动的参数,如最大横摇角等关键数据,计算装载车辆是否横向滑移和倾覆,即可对装载车辆的安全性进行判定.

3 实船算例

选择舟山3条沿海航区客滚船进行长时间的跟船实测,记录横摇角等数据(表1).表1中的数据是在船舶每个航次过程中的实际风力和波浪等级组合下,通过横摇测量装置,统计对应的最大横摇角和横摇周期得到.

表 1 客滚船实测数据

船名	航线	风力等级	风向	浪级	最大横摇角/(°)	横摇周期/s
通达三号	衢山—小洋山	7	NE	3	2.0	5~6
		7	NE	4	3.0	7~8
		8	NE	3~4	4.0	8
蓬莱仙岛	三江—衢山	7	NE	4	4.0	8
		8	SE	3	4.0	7
		8	E	3	8.0	8
高运	高亭—鱼山	7	SE	2	1.5	5
		8	WS	3~4	3.0	6

从表 1 可知, 沿海航区船舶在实际航行中横摇角较小, 即使在实际风力 8 级, 风浪 4 级时, 横摇角也在 4°~8°之间, 属于线性横摇范围. 沿海航区船舶在 7 级风及以下时, 船舶横摇角普遍为 2°~4°, 在实际风力达到 8 级, 且风向与航向垂直时, 最大横摇角可以达到 8°. 为验证船舶在海上遭遇突发恶劣海况如涌浪时船舶装载车辆的安全性, 选取比统计数据更大的横摇角 10°, 固定周期 8 s 进行理论计算和对比, 以校核船舶装载车辆的安全性.

以通达三号船和蓬莱仙岛船为例, 按第 2 节方法对装载车辆进行安全性分析. 船舶主要参数为: 通达三号船总长 70.20 m, 型宽 15.00 m, 型深 5.50 m, 满载吃水 3.10 m, 载车 32 辆; 蓬莱仙岛船总长 74.20 m, 型宽 16.00 m, 型深 5.50 m, 满载吃水 3.50 m, 载车 46 辆. 根据对称性原则以及船舶运动特性, 按照最差工况进行分析. 车辆安全性校核选取的位置如图 4 所示(点 1 位置)^[15].

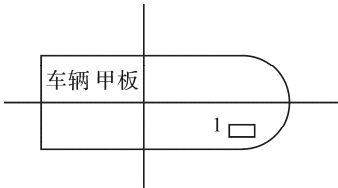


图 4 车辆装载校核点选择

选取典型的装载车辆进行横向滑移和倾覆计算校核, 计算结果见表 2. f_m/F_y 与 M_2/M_1 比值越大, 摩擦力与平衡力矩相对也越大, 装载车辆横向滑移和倾覆的可能性就越小. 车辆安全校核取安全系数 C 为 1.5, 当有一个比值小于该系数时, 装载的车辆就有滑移或倾覆的风险, 不满足安全性要求, 需要对其按照要求酌情绑扎.

由表 2 可知, 通达三号船在横摇角最大为 4°

时, 车辆在不绑扎时满足安全装载的要求; 但在恶劣海况下, 理论上最大横摇角为 10°, 装载车辆在不绑扎措施时, 车辆会发生滑移, 造成安全隐患. 同理, 蓬莱仙岛号船在最大横摇角为 8°, f_m/F_y 与 M_2/M_1 比值很小, 不满足安全系数的要求, 已经接近车辆滑动的临界点, 一旦船舶横摇角达到 10°, 车辆会发生横向滑动. 因此, 在船舶航行过程中, 要保证船舶的横摇在安全范围内, 保证装载车辆的安全性, 一旦超过最大安全横摇角, 则需要按照要求对车辆酌情绑扎.

表 2 装载车辆安全校核结果

船名	最大横摇角/(°)	横摇周期/s	f_m/F_y	M_2/M_1	C 不小于 1.5 是否满足
通达三号	3	7	3.28	5.95	是
	4	8	2.46	4.47	是
	10	8	0.97	1.76	否
蓬莱仙岛	4	7	2.15	4.41	是
	8	8	1.21	2.19	否
	10	8	0.96	1.35	否

客滚船装载车辆安全装载方案见表 3. 结合船舶公司开航自律标准, 船长在开航前制定绑扎方案时可以根据船舶最大横摇角决定装载车辆是否需要绑扎, 并准备合理数量的绑扎工具.

表 3 车辆安全装载方案

船名	航线	最大横摇角/(°)	车辆装载方案
通达三号	衢山—小洋山	4	无需绑扎
		10	要求绑扎
蓬莱仙岛	三江—衢山	4	无需绑扎
		8	酌情绑扎
		10	要求绑扎

4 结语

本文提出了通过实测客滚船最大横摇角数据和车辆惯性力计算相结合的方法来校核计算沿海航区客滚船装载车辆的安全性. 同时, 根据车辆横向移动和横向倾覆的计算结果, 验证了沿海航区 7 级风时车辆不绑扎方案的可行性. 在实测不同风力、不同浪级下最大横摇角的基础上, 提出了更为切合实际操作的船舶车辆装载方案, 为船长决策提供指导. 通过实例发现, 通达三号船在沿海航区允许开航的海况下, 在最大横摇角 4°时, 船舶装载

车辆在无绑扎措施下不会横向倾覆和滑移,满足安全航行的要求.蓬莱仙岛船在最大横摇角为 8° 时,虽能保证装载车辆不会倾覆,但其横向滑动已趋近临界值,一旦最大横摇角达到 10° ,装载车辆的安全性不能保证,故须按要求进行系固.

由于海上风浪、船舶航线、气候等不确定因素,本文得到的结果虽有一定的局限性,但仍可通过该方法为制定符合船舶实际运行时车辆的安全装载方案提供参考.

参考文献:

- [1] 郑云峰. 滚装船车辆绑扎系固系统动态模拟及安全性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2002.
- [2] 沈华, 郑云峰. 滚装船的车辆绑扎系统的动态模拟和安全评估[C]//大连国际海事技术交流会. 大连: 大连海事大学出版社, 2002:76-77.
- [3] IMO. Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing[M]. London: CPI Books Limited, 2011:51-64.
- [4] 邱文昌, 安鸣. 对多种方法确定的海船加速度值的比较研究[J]. 航海技术, 2006(1):14-16.
- [5] 黄贤俊. 重大件货物海运受力分析与 IMO 指南[C]//第五届中国国际救捞论坛论文集. 北京: 海洋出版社, 2008:228-231.
- [6] 于超. 基于极限学习机的船舶横摇预测与控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [7] 张泽国, 尹建川, 胡江强, 等. 基于灰色模型粒子群优化算法的自适应神经模糊推理系统模型的船舶横摇运动预报分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(33):124-129.
- [8] 范海平. 基于卡尔曼滤波技术的船舶横摇预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [9] Zhao D X, Zhao Y, Hou J W, et al. Simulation of vehicle dynamic behavior on Ro-Ro ship[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012(182/183):1095-1100.
- [10] Jia J. Investigations of vehicle securing without lashings for Ro-Ro ships[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2007, 12(1):43-57.
- [11] 中国海事局. 国内航行海船法定检验技术规则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011:555-561.
- [12] 张超. 浅谈琼州海峡客滚船货物系固计算中加速度的确定方法[J]. 中国水运月刊, 2012, 12(7):5-6.
- [13] 秦皓. CTU 内货物的安全装载系固研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [14] 张安西. 威连线客滚船车辆安全装载与系固的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [15] 郭际, 邓乐. 内河滚装船车辆系固计算方法[J]. 航海工程, 2017(6):62-66.

Safe loading scheme for Ro-Ro passenger ships based on maximum roll angle

GONG Kun-peng^{1,2,3}, ZHENG Peng-jun^{1,2,3*}, XU Jin⁴

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Collaborative Innovation Center of Ningbo Port Logistics Service System, Ningbo 315211, China;

3.National Road Traffic Management Engineering Technology Research Center, Ningbo University Sub-center, Ningbo 315211, China; 4.Zhoushan Maritime Safety Administration, Zhoushan 316000, China)

Abstract: In order to verify the rationality of vehicle lashing free scheme on the Ro-Ro passenger ships under wind scale of 7, a method of safety loading verification using historical measurement of maximum roll angle and dynamics analysis is proposed. The results show that at the wind scale of 7, the lashing-free loading scheme can be adopted by the typical Ro-Ro ships. However, when there are special sea conditions such as high swell, the vehicle needs to be lashed when the expected maximum roll angle exceeds 10° . Finally, based on the results of the study, the safe loading scheme of the vehicle is proposed, which is simple, practical and easy for wide applications.

Key words: Ro-Ro passenger ship; vehicle securing; scheme optimization; ship rolling

(责任编辑 史小丽)