



自浮升降式航标的运动特性分析^{*}

刘宪庆^{1,2}, 邓皓天^{1,2}, 余葵^{1,2}, 张鑫³, 戴一锋³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
3. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院 400074)

摘要: 为适应三峡库区大水位变幅, 解决岸标布置和高度调整等问题, 提出了一种新型的自浮升降式航标。针对结构设计和环境荷载等因素对该新型航标运动特性的影响问题, 采用 MOSES(multi-operational structural engineering simulator)建立了三维水动力分析模型, 研究不同吃水、不同水深下结构在波浪和风浪流荷载作用下的垂荡运动响应。结果表明: 1) 吃水增加对改善结构的运动响应是有限的, 该结构在吃水 1.0 m 时运动特性最优; 2) 水深越大, 结构的运动响应特性越佳; 3) 风浪流作用下的运动特性优于波浪作用下的运动特性。

关键词: 自浮升降式航标; 运动特性; 吃水; 水深; 风浪流

中图分类号: U 644.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0100-06

Motion characteristics analysis of self-floating lift navigation mark

LIU Xian-qing^{1,2}, DENG Hao-tian^{1,2}, YU Kui^{1,2}, ZHANG Xin³, DAI Yi-feng³

(1.National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2.Key Laboratory of Ministry of Education for Water Conservancy and Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3.School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To solve the layout and height adjustment of shore beacon suitable for large variation of water level in the Three Gorges reservoir area, a novel type of self-floating lift navigation mark is proposed. Aiming at the influence of structural design and environmental load on motion characteristics of this navigation mark, a 3-D hydrodynamic model based on MOSES(multi-operational structural engineering simulator) is developed, and the heave responses of the structure under wave action and combined action of wind, wave and current are studied with different drafts and depths. The results show: 1) Improving the motion responses by the increase of draft is limited. The motion characteristics of the structure are optimal at 1.0 m draft. 2) The greater the water depth, the better the motion characteristics. 3) The motion characteristics under the combined action of wind, wave and current are better than those under the action of wave.

Keywords: self-floating lift navigation mark; motion characteristics; draft; water depth; wind, wave and current

航标作为“行轮的眼睛”, 是确保船舶安全通航的关键因素。为保障航标功能的正常发挥, 提

高航标维护正常率, 航道管理部门需不定期对航标进行检查、清洗、维护。三峡库区的水位在

收稿日期: 2021-07-07

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810402); 重庆市博士后研究项目特别资助项目(XM2019); 重庆英才计划·创新创业示范团队项目(CQYC201903204)

作者简介: 刘宪庆(1986—), 男, 博士, 讲师, 从事流体与结构相互作用的工作。

145~175 m变动, 当三峡库区蓄水达到175 m运行时, 库区水位抬升, 流速减缓, 瞿塘峡、巫峡、西陵峡内180 m高程(吴淞高程)岸标的维护较为方便; 但145 m水位运行时, 存在30 m水位差, 如图1所示, 岸标的维护需要在悬崖绝壁上开展攀爬作业, 维护难度大, 且悬崖上的设施随着时间推移日益陈旧, 存在极大的安全隐患^[1]。为了解决岸标布置和高度调整繁琐复杂的问题, 重庆交通大学联合长江重庆航道局首次提出了适应大水位变幅的自浮升降式航标, 并在三峡库区阎王扁区域进行了示范应用, 见图2a)^[2]。



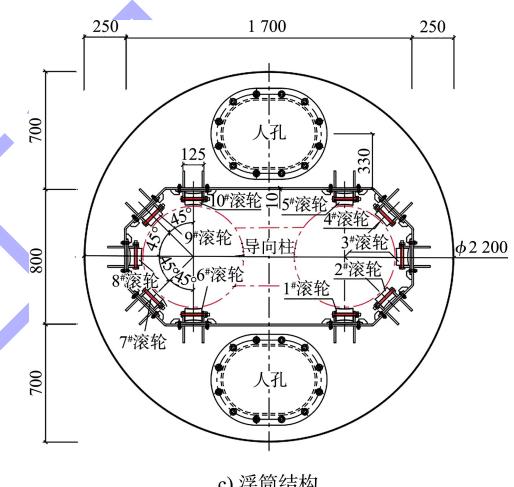
图1 现有航标及检修作业

自浮升降式航标设施运行过程中, 首先受到波浪的作用, 三峡水库蓄水后, 库区水位大幅上升、水域扩大, 在风力的作用下会形成风成浪, 且由于航道能力提升, 通航船舶吨位显著提高, 船舶航行会产生船行波^[3-7]; 其次受到水流的作用, 三峡库区呈现典型的山区河流特征, 河道窄深、水位陡涨陡落、水流湍急, 水流速度复杂^[8]; 再次受到风的作用, 瞿门地处瞿塘峡入口, 经遇风类型为典型的地方性风, 主要是峡谷特殊的地理位置与湿润气候产生的峡谷大风^[9]。自浮升降式航标设施作为一种新型航标, 在风浪流作用下的运动响应特性不甚明确。因此, 通过MOSES建立动力学分析模型, 分析浮动单元在波浪以及风浪流作用下的运动特性, 研究结构设计和环境荷载等因素对运动特性的影响规律, 为自浮升降式航标设施的设计、施工与推广应用提供参考和依据。



a) 自浮升降式航标

b) 航标组成



c) 浮筒结构

图2 新型绝壁航标 (高程: m; 尺寸: mm)

1 模型建立及测试组合

1.1 航标结构

如图2b)所示, 自浮升降式航标设施主要由两个单元构成: 一是导向柱和连接架组合而成的固定单元, 二是浮筒和罐形标组合而成的浮动单元。导向柱由2根直径为0.6 m、壁厚为10 mm的钢管通过钢板连接而成, 钢管中心间距为0.9 m, 上部通过连接架连接于绝壁上端, 下部通过基础加锚杆结构连接于岸边礁石上, 不锈钢管内部填充混凝土以保证结构的强度、刚度和稳定性; 浮筒采用不锈钢结构, 直径为2.2 m, 套设在导向柱上, 在浮筒内侧距离筒底1.0、2.0 m处各设置10个滚轮, 滚轮的存在既保证浮动单元随着水位变化沿着导向柱滑动, 又限制结构在水平面内的运动, 并将环境荷载作用在浮动单元上的荷载传

递到导向柱上，浮筒上部设置罐形标确保航标的可视性，用于指引过往船舶航行，见图 2c)。

1.2 测试组合

为了较好地预测自浮升降式航标的运动特性和变化规律，采用正交试验设计方法。采用正交组合的方法安排测试组合，单个因素设置 3 个水平数。三峡库区每年都会经历 145 ~ 175 m 的水位变化，航标工作水深为 159.5 ~ 175.1 m，选取的水深 D 分别为 164.5、169.5、175.5 m，距离固定平台的距离分别为 5.0、10.0、15.0 m；其次，由于三峡库区蓄水前最大风浪波高不超过 1.0 m，因此结合现场对部分船长、水手、渔民的调研统计，选取 30 a 一遇波浪参数，即波高 0.9 m、波周期 3.5 s；根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》的要求，选取奉节地区 50 a 重现期的风速为 25.0 m/s^[10]；在风浪流的作用下，航标吃水过大容易造成浮筒上部进水，进而引起结构质量增加以及连接件锈蚀，航标吃水过小容易引起结构稳定性下降及连接件受力不均匀，因此选取的浮筒吃水分别为 0.5、1.0、1.5 m，吃水的变化是通过浮筒内部分舱压载进行的，吃水从 0.5 m 增加到 1.0 m、从 1.0 m 增加到 1.5 m 的压载量都是 1.334 t。测试组合的参数见表 1，其中质心位置为距离筒底中心点的坐标。

表 1 测试组合

组合	吃水/m	水深/m	质量/t	质心位置/m	荷载工况
1	0.5	15	1.334	(0,0,1.778)	波浪
2	1.0	15	2.668	(0,0,1.389)	波浪
3	1.5	15	4.001	(0,0,1.259)	波浪
4	0.5	15	1.334	(0,0,1.778)	波浪+风+流
5	1.0	15	2.668	(0,0,1.389)	波浪+风+流
6	1.5	15	4.001	(0,0,1.259)	波浪+风+流
7	1.0	5	2.668	(0,0,1.389)	波浪
8	1.0	10	2.668	(0,0,1.389)	波浪
9	1.0	15	2.668	(0,0,1.389)	波浪
10	1.0	5	2.668	(0,0,1.389)	波浪+风+流
11	1.0	10	2.668	(0,0,1.389)	波浪+风+流
12	1.0	15	2.668	(0,0,1.389)	波浪+风+流

1.3 模型建立

由于模型比较复杂，采用 MOSES 自带的体-面-线-点的自上而下的建模方法建立模型，分别为结构在水深为 15、10、5 m 工况下的模型网格划

分^[11]，见图 3。导向柱上端和下端通过固定连接器约束 x 、 y 和 z 方向的自由度，在浮筒内侧距离筒底 1.0 和 2.0 m 处分别设置 10 个固定连接器约束 x 、 y 方向的自由度来模拟滚轮，刚度均为 1 000 kN/m，同时分别设置 10 个弹性连接器来考虑 z 方向滚轮与导向柱之间的滑动约束，弹性连接器的刚度为 1 kN/m。通过软件内置的时域分析模块分析浮动单元在波浪以及风浪流联合作用下结构运动响应特性。

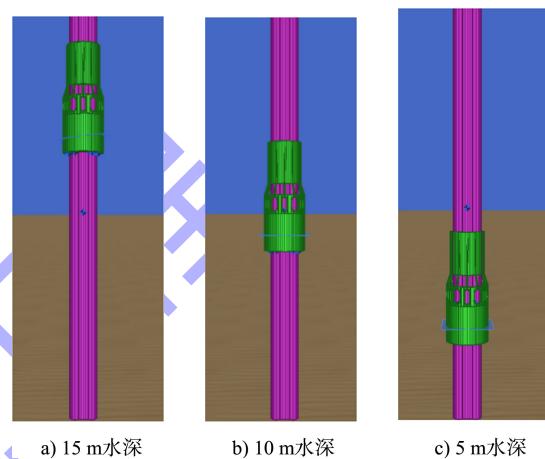


图 3 数值分析模型

2 数据分析

2.1 吃水对浮动单元运动响应的影响分析

图 4、5 分别为浮动单元在波浪稳定作用阶段垂荡位移、加速度随吃水变化的时程变化曲线和幅值变化柱状图。从图 4a) 和图 5a) 可以看出，垂荡位移和加速度的时程变化都呈周期变化，加速度的变化周期为波浪周期，而垂荡位移的变化周期除了有波浪周期的影响，还有一个较大的周期影响，考虑是由滚轮与浮筒之间的摩擦因素造成的。

从图 4b) 可以看出，垂荡位移幅值随着吃水的增大呈先减小后增大的趋势，吃水 h_d 从 0.5 m 增大到 1.0 m 时降幅为 24.2%，而吃水从 1.0 m 增加到 1.5 m 时增幅仅为 1.38%。原因是水波属于表面波，垂荡作用力随着吃水的增大而减小，吃水越大则水质点的振幅和运动越不明显。

从图 5b) 可以看出，垂荡加速度幅值随着吃水的增大呈现先减小后增大的趋势，原因是由于小吃水情况下垂荡作用力大、附加质量小，导致

其加速度较大; 而在大吃水情况下, 由于质心较低, 在垂向作用力变化不明显的情况下, 向下运动的加速度越大。

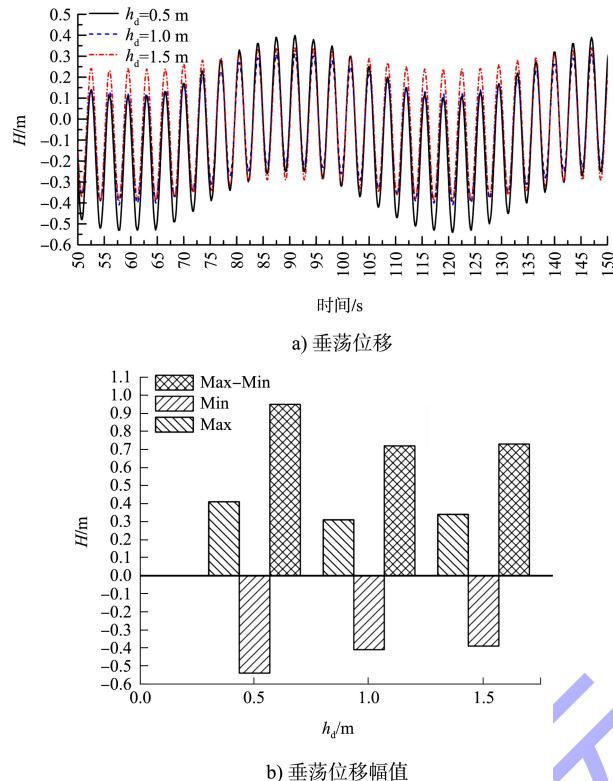


图4 波浪稳定作用阶段垂荡位移随吃水的变化

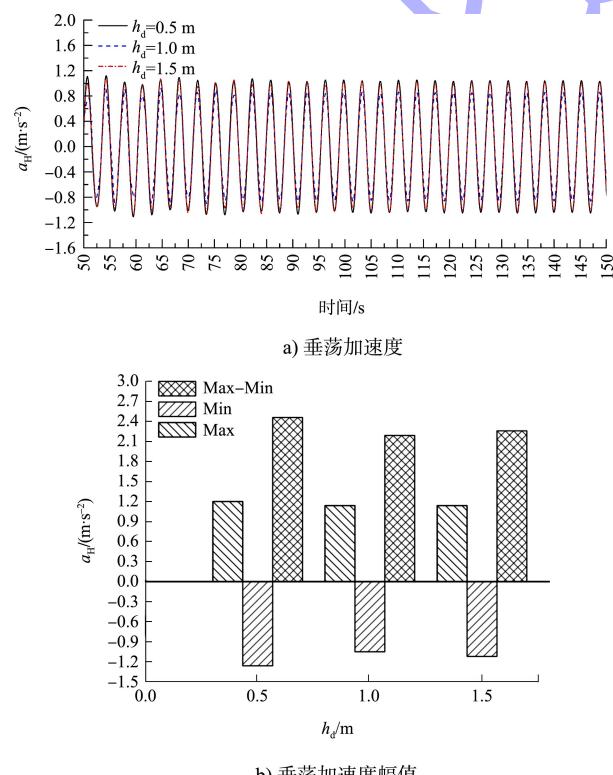


图5 波浪稳定作用阶段垂荡加速度随吃水的变化

图6、7分别为浮动单元在风浪流稳定作用阶段垂荡位移、加速度随吃水变化的时程变化曲线和幅值变化柱状图。可以看出, 风浪流作用下的垂荡加速度和速度的时程变化、垂荡位移和加速度的幅值变化趋势都类似于波浪作用下的变化趋势。但对比图5b)和图7b)的结果可以看出, 风浪流作用下的加速度幅值都小于波浪作用下的加速度幅值, 原因是由于计算中波浪、风和流的方向是一致的, 作用于浮动单元上部的风荷载和下部的流荷载将浮动单元紧靠在固定单元上, 导致由波浪力-摩擦力-惯性力构成的平衡系统在下沉或上浮的过程中都会受到风荷载和流荷载构成的力偶的减速效应, 从而导致加速度幅值减小。

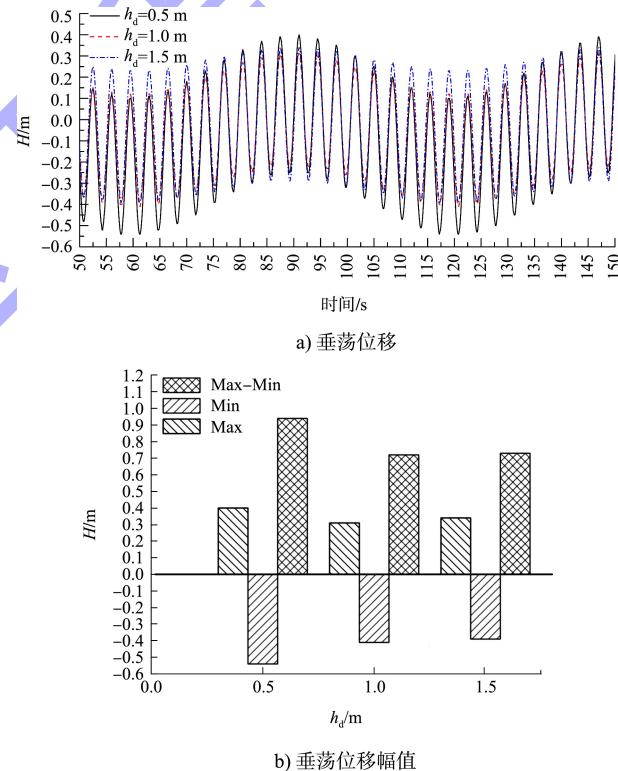


图6 风浪流稳定作用阶段垂荡位移随吃水的变化

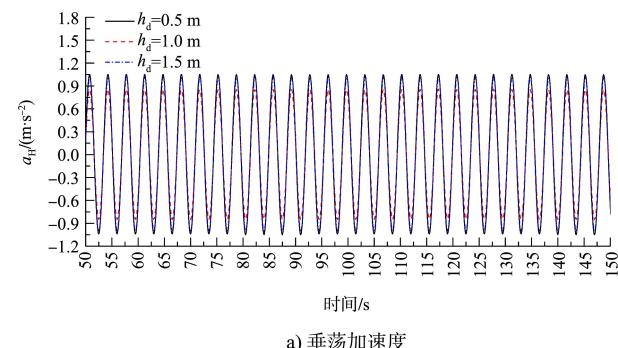


图7 风浪流稳定作用阶段垂荡加速度随吃水的变化

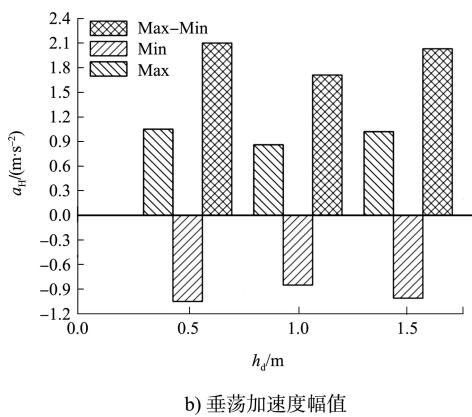


图 7 风浪流稳定作用阶段垂荡位移随吃水的变化

2.2 水深对浮动单元运动响应的影响分析

图 8、9 分别为浮动单元在波浪作用下不同水深的垂荡位移、加速度的时程变化曲线和幅值变化柱状图。从图 8a) 和图 9a) 可以看出, 垂荡位移和加速度的时程变化都呈规则变化趋势。从图 8b) 可以看出, 垂荡位移幅值随着水深的增加呈减小的趋势, 水深越小则向下运动的幅值越大, 原因是由于浅水效应^[12-13], 随着浮筒与水底的距离减小, 流速增大、压力减小, 使得浮动单元产生额外的下沉从而加剧了结构的垂荡位移。

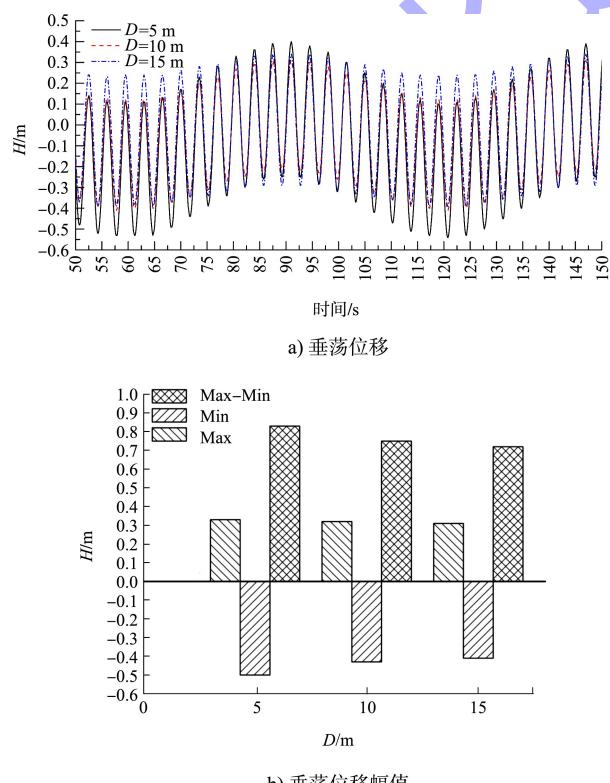


图 8 波浪稳定作用阶段垂荡位移随水深的变化

从图 9b) 可以看出, 垂荡加速度的幅值随着水深的增加呈现先增加后下降的趋势, 原因是水深 D 由 5 m 增加到 10 m, 浅水效应弱化, 引起波浪力-摩擦力-惯性力构成的平衡系统呈加速下沉或上浮的趋势; 水深从 10 m 增加到 15 m, 主要是由于垂荡作用力随着水深的增加而减小从而造成结构加速度减小。

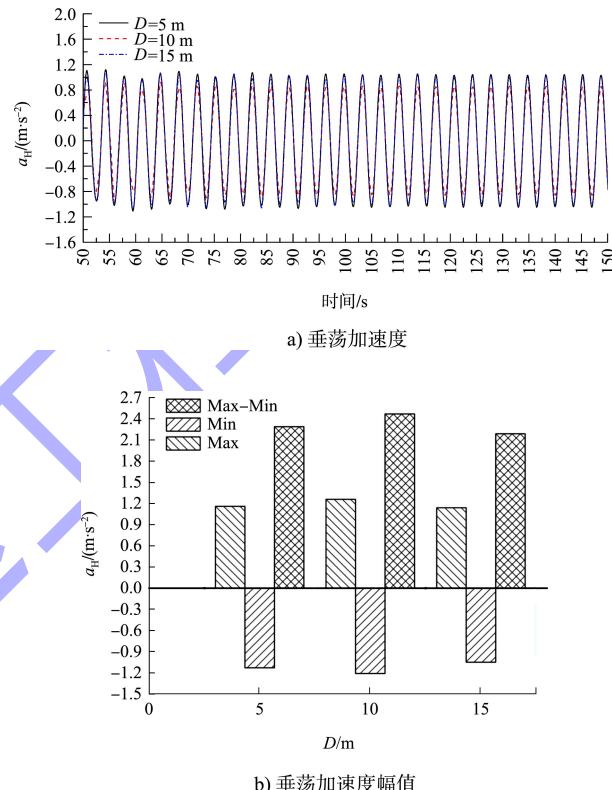
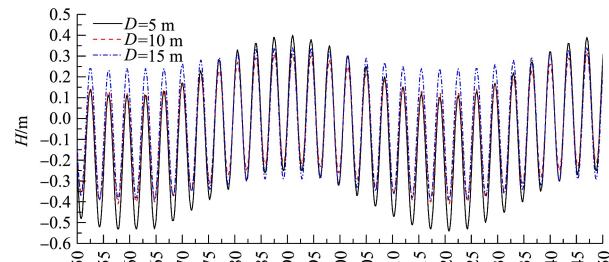


图 9 波浪稳定作用阶段垂荡加速度随水深的变化

图 10、11 分别为浮动单元在风浪流作用下不同水深的垂荡位移、加速度的时程变化曲线和幅值变化柱状图。可以看出, 风浪流作用下的垂荡加速度和速度的时程变化、垂荡位移和加速度的幅值变化趋势都类似于波浪作用下的变化趋势。但是, 对比图 9b) 和图 11b) 的结果可以看出, 水深 5、10、15 m 时波浪作用和风浪流作用的加速度幅值分别为 2.29 和 1.64 m/s^2 、 2.47 和 1.72 m/s^2 、 2.19 和 1.71 m/s^2 , 风浪流作用下的加速度幅值和幅值变化都小于波浪作用下的幅值和幅值变化。原因是由于风荷载和流荷载构成的力偶减速效应引起波浪力-摩擦力-惯性力构成的平衡系统的竖向运动减弱, 从而导致加速度幅值减小; 风荷载和

流荷载的作用使得结构紧靠在固定单元上降低了浅水效应的影响, 从而导致加速度幅值变化变小。



a) 垂荡位移

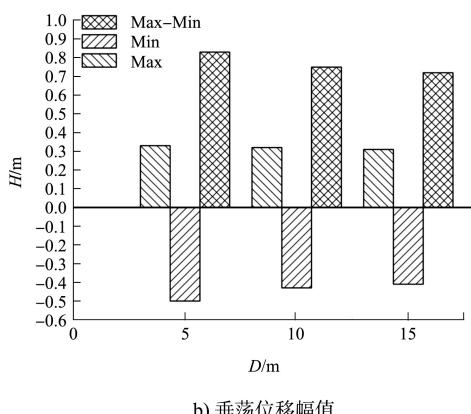
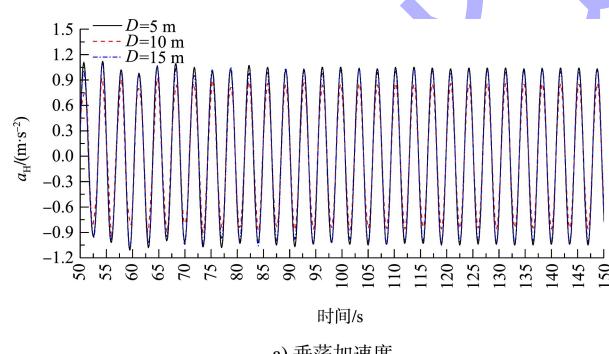


图 10 风浪流稳定作用阶段垂荡位移随水深的变化



a) 垂荡加速度

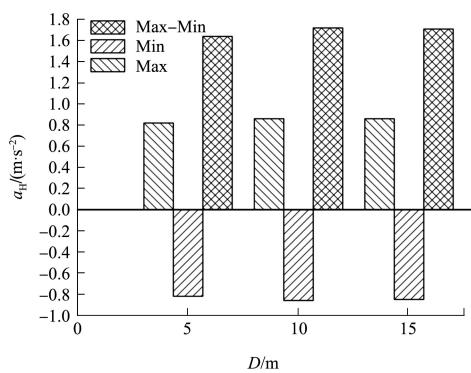


图 11 风浪流稳定作用阶段垂荡加速度随水深的变化

3 结论

1) 随着吃水的增加, 结构的垂向位移和加速度呈现先下降后增大的趋势, 吃水 1.0 m 的运动响应特性最优。

2) 随着水深的增加, 结构的垂向位移呈下降的趋势, 而垂向运动的加速度幅值呈先增加后降低的趋势, 水深越大, 运动响应特性越好。

3) 由于风荷载、流荷载与结构的相互作用, 风浪流作用下结构的运动响应优于波浪单独作用下的运动响应。

参考文献:

- [1] 杜红远.库区航标维护中的不安全因素分析及安全防护对策[J].城市建设理论研究(电子版), 2012(9): 1-5.
- [2] 程永舟, 李建习, 资津, 等.风浪作用下库岸孔隙水压力响应试验研究[J].水利水运工程学报, 2008(3): 29-34.
- [3] 马明生, 许光祥.三峡库区风浪波要素计算方法的初步研究[J].华北水利水电学院学报, 2005, 26(3): 10-12.
- [4] 裴得道, 许文年, 郑江英, 等.水库消落带植被混凝土抗侵蚀性能研究[J].三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(6): 45-47.
- [5] 马明生.库区波浪对土质边坡冲刷机理及稳定性研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2007.
- [6] 刘志伟.波浪作用下库岸泥沙起动机理与岸坡防护研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2006.
- [7] 陈力, 段唯鑫.三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析[J].水文, 2014, 34(1): 30-34.
- [8] 刘俊, 胡江, 张文, 等.山区河流航标船系泊锚石系统失稳机制试验研究[J].水运工程, 2021(6): 147-152.
- [9] 马晓冬.库区偶然荷载对钢桁架拱桥的施工安全影响分析[D].武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [10] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S].北京: 人民交通出版社, 2010.
- [11] 高巍.Bentley MOSES 软件入门及应用[M].北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [12] LACKENBY H.The effect of shallow water on ship speed[J].The ship builder and the marine engine builder, 1964, 76(1): 21-26.
- [13] 张伟.浅水效应对船舶的影响及经验估算方法[J].船舶与海洋工程, 2019, 35(3): 6-12.