



# 基于修正 Housner 模型的承船厢结构 动力响应研究\*

曹佳雷<sup>1</sup>, 陶桂兰<sup>2</sup>, 邓运侗<sup>1</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对地震作用下承船厢结构受力问题, 进行厢-水-船耦合动力响应研究。利用 ANSYS 软件建立承船厢系统有限元模型, 采用修正 Housner 理论模拟水-船耦合作用, 对比分析承船厢处于底部、中部和顶部 3 种工况下的动力响应。结果表明: 同一地震作用下, 承船厢位置从底部至顶部变化, 承船厢结构主纵梁中部位置的横河向、顺河向最大加速度、最大等效应力都随之增大; 当承船厢位于顶部时, 横河向、顺河向的最大位移分别为 263.31、0.174 mm, 最大加速度分别为 3 371.97、1.47 mm/s<sup>2</sup>, 最大等效应力为 52.76 MPa; 在进行承船厢设计时, 可将承船厢位于顶部的工况作为设计依据。

**关键词:** 承船厢; 动水压力; 有限元; 动力响应

中图分类号: U 642.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0117-06

## Dynamic responses of ship reception chamber based on modified Housner theory

CAO Jia-lei<sup>1</sup>, TAO Gui-lan<sup>2</sup>, DENG Yun-ti<sup>1</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** For the bearing capacity of ship reception chamber under earthquake, we study the coupling dynamic response of chamber-water-ship. Based on the ANSYS software, we establish a finite element model of ship reception chamber by the modified Housner theory to simulate the coupling action between ship and water, compare and analyze the dynamic responses of the system under three conditions including ship reception chamber at the bottom, middle and top. The results show that under the same earthquake condition, when the position of the ship reception chamber changes from bottom to top, the maximum stress, lateral and longitudinal acceleration all increase accordingly. The maximum lateral and longitudinal displacement and acceleration at the top are 263.31 mm and 0.174 mm, 3371.97 mm/s<sup>2</sup> and 1.47 mm/s<sup>2</sup> respectively, and the maximum equivalent stress is 52.76 MPa. In the design of ship reception chamber, the working condition of ship reception chamber at the top can be taken as the design basis.

**Keywords:** ship reception chamber; hydrodynamic pressure; finite element; dynamic response

升船机承船厢属于大型、受力复杂的空间薄壁结构, 厢内还存在水体和船舶的影响。地震作用下, 承船厢结构的变形以及船厢与水体、船舶的耦合动力响应将影响整个升船机结构运行的安全可靠。

对于承船厢与水体的相互作用, 已有学者做了相关研究。李海涛<sup>[1]</sup>详细推导承船厢内的流体运动方程, 并且采用刚体动力学、考虑厢内晃动水体的耦合, 建立包括承船厢、船体、厢内水体在内的动力分析模型; 朱仁庆等<sup>[2]</sup>采用水弹性理

收稿日期: 2020-04-24

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402002)

作者简介: 曹佳雷(1993—), 男, 硕士, 从事港口航道工程结构研究。

论建立整个提升系统的动力特性数值模型,研究流固耦合作用下,提升过程中承船厢内水体晃动、结构干模态等动力学问题;王晋媛等<sup>[3]</sup>对三峡升船机承船厢进行建模,模型中钢丝绳处理为杆单元,船厢处理为膜单元,水体处理为实体单元,对承船厢正常工况、断钢丝绳工况进行静力学分析;韩明岚<sup>[4]</sup>在流体力学的基础上建立三峡升船机船厢子系统船舶进出承船厢的数学模型,将水的运动看作是一个变边界问题,研究船舶和水体的相互作用;李艳<sup>[5]</sup>从承船厢中水体晃动响应速度势函数出发,假设水为理想流体、微幅波,详细推导承船厢中水体晃动模型的数学方程,模拟分析不同工况下的升船机动力响应;马洪伟<sup>[6]</sup>考虑承船厢内水船耦合作用,提出有船时承船厢内流固耦合 Housner 模型,对向家坝升船机整体系统模型进行动力分析。

根据已有的研究成果,升船机承船厢系统的研究主要集中在厢内水动力特性或厢体结构受力等方面,很少针对地震作用进行厢-水-船耦合动力响应研究。因此,本文以金沙江下游某拟建大型垂直升船机为工程背景,利用 ANSYS 有限元软件建立模型,以已有修正 Housner 模型为基础,考虑厢内流固耦合、水船作用,探讨厢-水-船耦合动水压力计算模型及承船厢结构动力响应,为合理的抗震措施提供依据。

## 1 工程概况

该拟建升船机位于金沙江下游某河段,设计通航船舶为 3 000 吨级,对应的升船机类别为Ⅲ级大型垂直升船机。拟建升船机塔柱结构的建基面高程为 563.1 m,上游最高通航水位为 782 m,下游最低通航水位为 581.4 m,最大提升高度 200 m,拟采用钢丝绳卷扬式结构,主要包括塔柱、承船厢、提升系统等。单侧塔柱宽 15 m、长 141.5 m、高 231.4 m;承船厢宽 25.6 m,有效长度为 110 m,总长度为 130 m。为保证升船机运行适应下游水位变动的能力,承船厢水深偏大取 4.7 m。厢内水体质量 1.16 万 t,初估船厢结构质量为 5 600 t,承船厢带水总质量 1.72 万 t。承船厢悬吊钢丝绳数量

为 192 根,直径 88 mm,其中重力平衡绳数量为 128 根,转矩平衡绳数量为 64 根。主提升机由 8 套卷扬机、8 套滑轮组和 1 套机械同步轴系统组成。卷筒名义直径 7.6 m,每个卷筒布置 4 根提升绳和 4 根平衡绳,绳槽节距为 95 mm,卷筒长度为 6.8 m。

工程所处境地主要玄武岩,岩性坚硬,位于地震基本烈度为 8 度的场区。国家地震局对此场区的地震峰值加速度做了专题论证。结果表明,场地 50 a 超越概率为 63%、10%、5%、2% 的基岩地震动峰值加速度分别为 66、209、276、376  $\text{cm/s}^2$ 。根据《水工建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>,升船机属于乙类非壅水结构,其设计地震加速度代表值的概率水准应取 50 a 内超越概率 5%。因此,确定此次地震荷载的峰值加速度值为 276  $\text{cm/s}^2$ 。

## 2 动水压力计算模型

承船厢内水体在地震作用下产生晃动,其产生的动水压力部分通常可以简化分解为脉冲压力项和对流压力项。脉冲压力与脉冲运动导致的惯性力有关,而且所产生的动水压力与加速度成正比,方向相反;对流压力则是因为水体振动而产生的动水压力。在计算模型中,通常用弹簧-集中质量体系模拟上述水流作用。

### 2.1 规范计算模型

《水电工程水工建筑物抗震设计规范》<sup>[8]</sup>给出地震动水压力及附加质量的计算公式,计算模型见图 1。

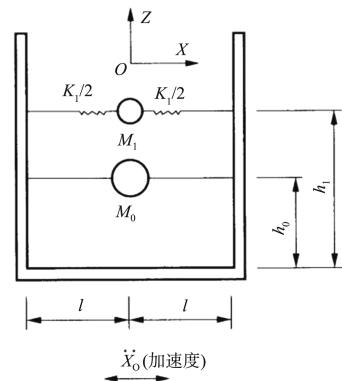


图 1 《水电工程水工建筑物抗震设计规范》动水压力计算模型

1) 受冲击动水压力作用。在横向水平地震作用下,厢体内冲击动水压力的作用,对船厢壁,

可作为沿高程分布的固定于各侧壁上的水平向附加质量  $M_0$  考虑, 当  $H/l \leq 1.5$  时, 按式(1)计算; 当  $H/l > 1.5$  时, 按式(2)计算:

$$M_0(z) = \frac{M}{2l} \left[ \frac{z}{H} + \frac{1}{2} \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right] \sqrt{3} \tanh \left( \frac{\sqrt{3}l}{H} \right) \quad (1)$$

$$M_0 = \frac{M}{2H} \quad (2)$$

式中:  $M_0(z)$  为水深  $z$  处的附加质量;  $M$  为沿承船厢轴向单宽长度的水体总质量;  $H$  为厢内水深;  $l$  为半厢宽。

2) 受流动水压力作用。在横向水平地震作用下, 对流动水压力的作用, 可作为在  $h_1$  高度处与厢体内壁相连的弹簧-质量体系考虑, 其等效质量  $M_1$ 、等效弹簧刚度  $K_1$  和高度  $h_1$  可分别按式(3)~(5)计算:

$$M_1 = 2\rho_w H l \left[ \frac{1}{3} \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{l}{H} \tanh \left( \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H}{l} \right) \right] \quad (3)$$

$$K_1 = M_1 \cdot \frac{g}{l} \sqrt{\frac{5}{2}} \tanh \left( \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H}{l} \right) \quad (4)$$

$$h_1 = H \left( 1 - \frac{\cosh \left( \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H}{l} \right) - 2}{\sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H}{L} \sinh \left( \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H}{L} \right)} \right) \quad (5)$$

式中:  $\rho_w$  为液体密度;  $L$  为承船厢宽;  $M_1$  为等效质量;  $H$  为厢内水深;  $l$  为半厢宽;  $K_1$  为等效弹簧刚度;  $h_1$  为等效质量高度。

### 2.2 修正 Housner 模型

《水电工程水工建筑物抗震设计规范》的公式未考虑到漂浮船舶的影响, 因而马洪伟在此基础上提出一种修正的 Housner 模型, 见图 2。

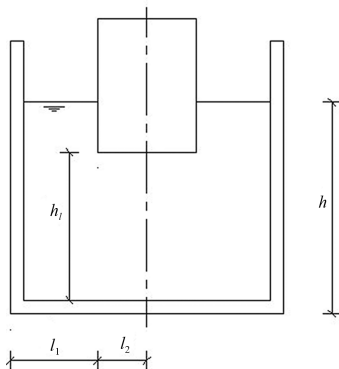


图 2 修正 Housner 计算图示

由于动水压力与厢内流体的质量密切相关, 当厢内有船时, 水体总量减小, 从而影响动水压力值, 因此根据厢内水体质量的变化对此项进行了修正, 充分考虑了船舶在承船厢中的作用力, 其公式见式(6)~(10):

修正后脉冲压力项:

$$M_0 = m_1 \cdot \frac{hl_2 + h_1 l_1}{h(l_1 + l_2)} \cdot \frac{\sinh \left[ \frac{\sqrt{3}(l_1 + l_2)}{2h} \right]}{\sqrt{3}(l_1 + l_2)} \quad (6)$$

$$h_0 = \frac{3}{8} h \quad \left( \frac{h}{2(l_1 + l_2)} \leq 1.5 \right) \quad (7)$$

式中:  $M_0$  为脉冲压力项集中质量;  $m_1$  为单位长度水体质量;  $h$  为厢内水深;  $h_0$  为脉冲压力作用高度;  $h_1$  为船底到厢底距离;  $l_1$  为半船宽;  $l_2$  为一侧船壁至厢壁的距离。

修正后对流压力项:

$$M'_1 = \rho(hl_2 + h_1 l_1) \left[ \frac{\sqrt{10}h}{12(l_1 + l_2)} \tanh \left( \frac{\sqrt{10}h}{l_1 + l_2} \right) \right] \quad (8)$$

$$K'_1 = \frac{5}{6} \rho \cdot \frac{hl_2 + h_1 l_1}{h} g \tanh^2 \left( \frac{\sqrt{10}h}{l_1 + l_2} \right) \quad (9)$$

$$h'_1 = \frac{hl_2 + h_1 l_1}{l_1 + l_2} \left( 1 - \frac{\cosh \frac{\sqrt{10}h}{l_1 + l_2} - 1}{\frac{\sqrt{10}h}{l_1 + l_2} \sinh \frac{\sqrt{10}h}{l_1 + l_2}} \right) \quad (10)$$

式中:  $M'_1$  为一阶对流压力项集中质量;  $K'_1$  为一阶对流压力项弹簧刚度;  $h$  为厢内水深;  $h_1$  为船底到厢底距离;  $h'_1$  为一阶对流压力作用高度;  $l_1$  为半船宽;  $l_2$  为一侧船壁至厢壁的距离;  $\rho$  为液体密度。

### 3 有限元模型

本文采用 ANSYS 软件建立承船厢结构的有限元模型。承船厢的主纵梁结构为薄壁钢结构, 长 130 m、宽 2.4 m、高 10 m、板厚 0.1 m, 因而采用 SHELL181 单元(4 结点有限应变单元)来模拟。该单元的每个结点有 6 个自由度, 即沿结点坐标系  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的平动位移和绕各轴的转动位移, 主要应用于模拟薄壳至中等厚度壳单元结构, 特

别适用于大转动、大应变非线性分析。有限元中,承船厢材料弹性模量取 200 GPa,密度取  $7.85 \text{ t/m}^3$ 。

承船厢的主横梁与次横梁为工字截面钢梁,由两块翼缘板、两块梁腹板组成,板厚均为 0.1 m。其中,主横梁腹板高 4.5 m,上下翼缘宽 1.1 m。次横梁腹板高 3.25 m,上下翼缘宽 0.7 m。同样采用 SHELL181 单元模拟,模型见图 3。

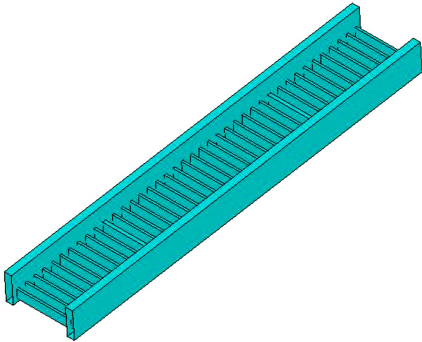


图3 船厢主纵梁、横梁模型

船舶为 3 000 吨级货船,尺寸为  $88 \text{ m} \times 16.3 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$  (总长 $\times$ 型宽 $\times$ 吃水)。水域尺寸为  $124 \text{ m} \times 18.4 \text{ m} \times 4.7 \text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 水深)。水、船模型以及水船产生的作用力,在有限元中运用修正 Housner 理论建立起一套包含弹簧、刚性杆、集中质量点的简化耦合模型,见图 4。建模过程中,将承船厢内水体每隔 1 m 分为一段,模型参数为: $h$  为 4.7 m, $h_1$  为 1.2 m, $l_1$  为 1.05 m, $l_2$  为 8.15 m, $M_0$  为 45.695 05 t, $h_0$  为 1.762 5 m, $M_1'$  为 1.830 405 t, $h_1'$  为 0.938 m, $K_1'$  为 21.828 47 kN/m。

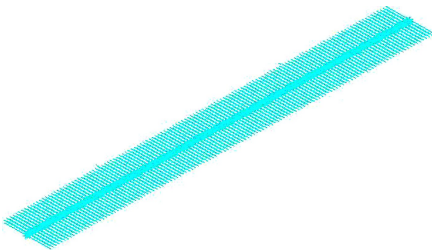


图4 弹簧、刚性杆、集中质量点模型

ANSYS 中建立的承船厢、弹簧、刚性杆、集中质量点简化耦合模型,见图 5。承船厢的钢丝绳为钢绞线,采用 LINK180 单元(3D 有限应变杆单元)模拟,见图 6。该单元可承受轴向拉压但不能承受弯矩,每个结点具有 3 个自由度,即沿结点

坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平动位移,主要用来模拟桁架、连杆、索等。有限元模型中材料弹性模量取 200 GPa,密度取  $7.85 \text{ t/m}^3$ ,截面面积取  $6\,082 \text{ mm}^2$ 。为了平衡承船厢拉力,有限元模型中通过在钢丝绳顶端施加竖直向上的集中力起到平衡作用,总计 192 个吊点,每个吊点力为 1 360 kN。

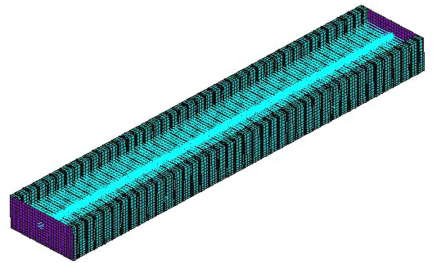


图5 承船厢有限元模型

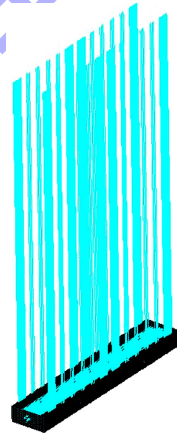


图6 承船厢有限元模型

承船厢与塔柱间由导向机构连接,在有限元模型中通过 COMBIN14 单元模拟,刚度设置为  $65 \text{ MN/m}^{[9]}$ 。考虑到实际结构中承船厢可以有微小的转动,故 COMBIN14 单元承船厢接触部分设置为铰接,而另一端则固定在空间中,与实际结构位置对应。

本文主要研究地震作用下承船厢的动力响应,因而对其余升船机结构构件进行了一定简化。建模中直接将通过塔柱有限元模型计算得到加速度时程曲线在钢丝绳顶端结点输入。

#### 4 动力计算参数

本文采用时程分析法计算地震作用效应时,以阻尼比为 5% 的设计反应谱为目标谱,利用规范

反应谱和程序合成人工地震波作为输入地震动。通过单独建立塔柱模型计算得到塔柱顶部的加速度时程曲线, 作为承船厢系统的地震荷载输入。

根据地震设防烈度和设计加速度峰值的对应关系, 将程序生成的人工地震波幅值按照水平加速度峰值为  $0.276g$  来调整, 从而得出人工波加速度时程曲线。本文合成的 3 条人工波见图 7, 地震持续时间为 20 s, 时间间隔 0.02 s, 对其进行相干性检查, 确保地震动各分量之间的相关系数均不大于 0.3。根据《水电工程水工建筑物抗震设计规范》, 对地震设防烈度为 8 度及以上的地区, 必须同时考虑竖向地震作用, 其加速度值取水平方向的  $2/3$ 。因此, 本文在进行动力时程计算时, 同时输入了水平向与竖向的地震加速度。

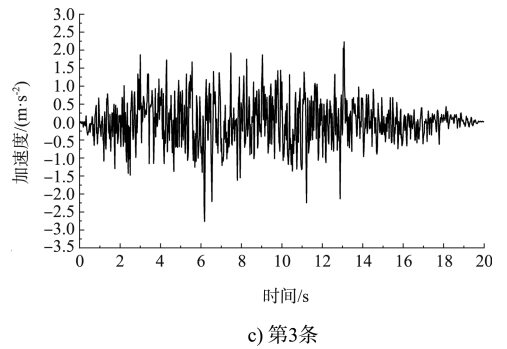
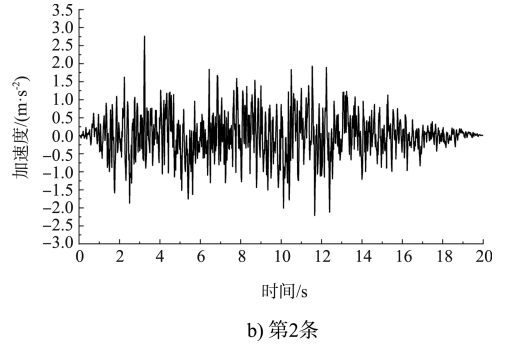
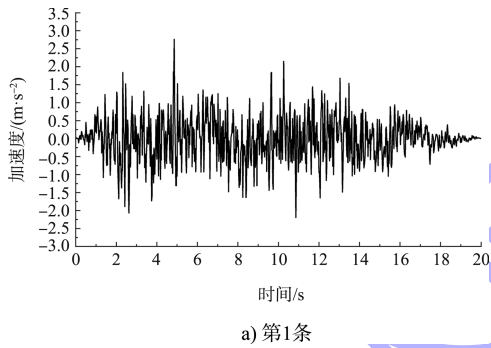


图 7 人工生成地震波

利用 ANSYS 中 Block Lanczos 特征值提取方法提取 3 种工况下的承船厢特征振型参数(频率、周期)<sup>[10-11]</sup>, 见表 1。采用瑞利阻尼计算, 求得升船机结构的阻尼系数见表 2。

表 1 承船厢系统特征振型参数

振型	升船机位于底部工况		升船机位于中部工况		升船机位于顶部工况	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
承船厢一阶	2.768 0	0.36	2.769 1	0.36	2.769 1	0.36
承船厢二阶	3.470 5	0.29	3.468 3	0.29	3.469 5	0.29

表 2 升船机结构阻尼系数

工况	结构	$\alpha$		$\beta$	
		质量	刚度	质量	刚度
升船机位于底部	塔柱结构	0.044 680	0.055 950		
	承船厢	0.193 405	0.000 510		
升船机位于中部	塔柱结构	0.040 935	0.061 073		
	承船厢	0.193 393	0.000 511		
升船机位于顶部	塔柱结构	0.040 199	0.062 189		
	承船厢	0.193 423	0.000 510		

注:  $\alpha$  为质量阻尼系数;  $\beta$  为刚度阻尼系数。

### 5 承船厢位于不同高度对其动力响应的影响

为了探究承船厢竖向位置的变化对其动力响应产生的影响, 在考虑船舶作用的情况下, 分 3 种工况进行计算, 即承船厢位于底部、中部和顶部,

计算结果见表 3、4。

表 3 各工况下船厢顶部高程点最大位移及加速度

承船厢位置	最大位移/mm		最大加速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	
	横河向	顺河向	横河向	顺河向
底部	262.88	0.038	3 371.68	0.273
中部	262.43	0.075	3 371.69	0.319
顶部	263.31	0.174	3 371.97	1.470

表 4 各工况下不同高程点最大应力

工况	相对于承船厢	最大 Mises 应力/MPa
	底部(0 m)高程/m	
承船厢位于底部	10.000	23.852
	9.066	5.006
	6.263	4.157
	4.500	1.756

续表 4

工况	相对于承船厢底部(0 m) 高程/m	最大 Mises 应力/MPa
承船厢位于中部	10.000	34.181
	9.066	8.636
	6.263	5.738
	4.500	2.272
承船厢位于顶部	10.000	52.757
	9.066	22.554
	6.263	17.939
	4.500	6.423

由表 3 可看出, 随着承船厢位置的升高, 横河向最大位移先减小后增大, 顺河向最大位移值随之增大, 由于承船厢系统刚度较大, 两者变化的幅度都不大。随着承船厢位置的升高, 横河向、顺河向最大加速度随之增大。由表 4 可看出, 承船厢各高程点的最大等效应力 (Mises 应力) 也随着承船厢位置的升高而增大。这表明, 钢丝绳长度的减小会使得承船厢的最大应力值增大。

计算结果表明, 在进行承船厢设计时, 可将承船厢位于顶部的工况作为设计依据。承船厢位于顶部时的动力响应见图 8~11。

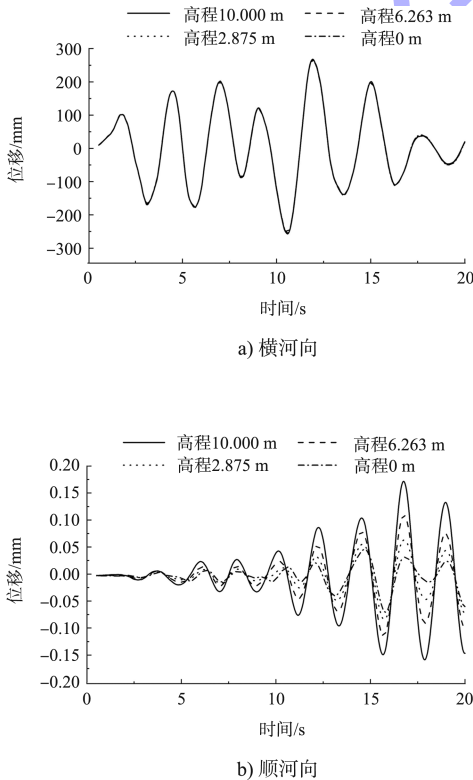


图 8 承船厢位于顶部时的位移响应

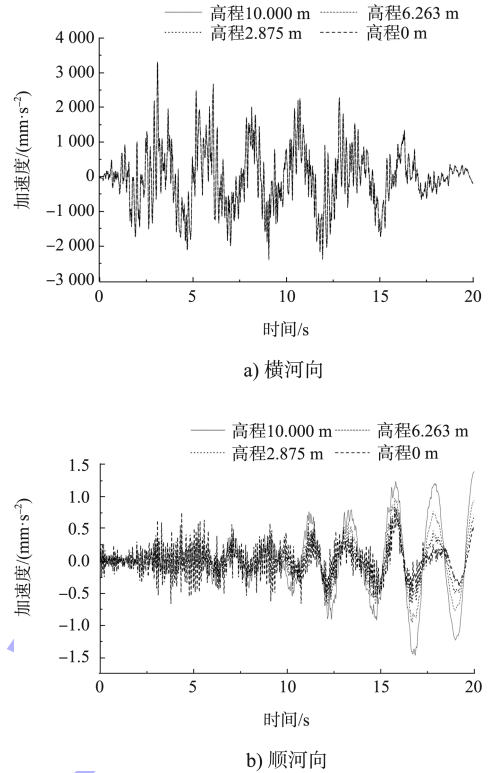


图 9 承船厢位于顶部时的加速度响应

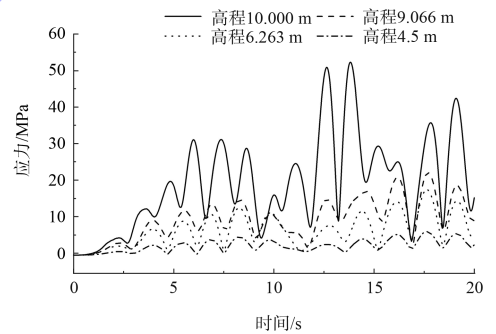


图 10 承船厢位于顶部时的 Mises 应力曲线

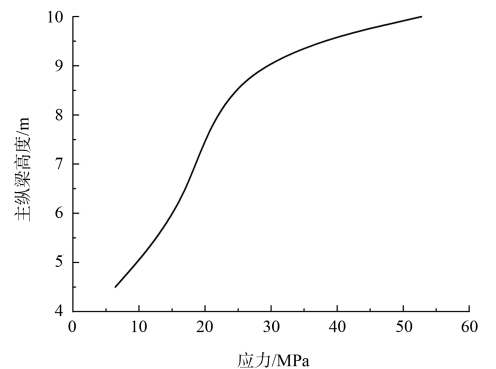


图 11 承船厢位于顶部时主纵梁中点位置最大应力变化曲线