[文章编号] 1003－4684(2025)02-0085-07

# 浮箱式基础施工栈桥力学性能及水动力特性

刘耀东，彭瑶杰，李文涛

（湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为解决深水环境下传统施工栈桥无法满足工程需要的问题，结合传统施工栈桥和浮桥的特点，设计出了一种适合深水环境的新型施工栈桥形式—悬浮施工栈桥。针对悬浮施工栈桥的力学性能及其水动力特性，通过数值模拟对栈桥进行静力分析研究结构的稳固性，进一步基于势流理论，采用水动力分析软件 AQWA 对栈桥开展数值模拟，研究基础潜深、波浪频率、波浪入射角度对悬浮施工栈桥六自由度 RAO 的影响。结果表明：在浮箱基础中设置隔板能有效提高悬浮施工栈桥的稳固性，另外最不利荷载作用下栈桥最大位移为 34.7 mm，小于临时施工栈桥最大容许变形值；悬浮施工栈桥的垂荡 RAO 受波浪入射角度影响很小，纵摇 RAO 受浮箱基础潜深的影响最大，浮箱基础潜深选在 7 m 较为适宜。

[关键词] 施工栈桥；浮箱式基础；数值模拟；势流理论；水动力特性

[中图分类号] U445 [文献标识码] A

我国独特的海洋地理环境决定了修建跨海大桥是实现互联互通的必然选择。在深水环境修建跨海大桥离不开施工栈桥[1-2]的辅助。当水深超过 50 m 时，普通施工栈桥从环境适应性及建造经济性两方面均无法满足需求。悬浮施工栈桥结合了浮式桥梁[3]，与传统施工栈桥的特点，采用由锚索系统和深水锚碇固定的浮箱式基础代替普通的桩基承台系统，避免了深水基础施工，是一种适合深水环境的新型施工栈桥形式。与传统施工栈桥相比，悬浮施工栈桥能够克服深水、地震、环境扰动及复杂地质条件带来的基础施工困难，且方便回收利用。另外水下悬浮基础还能有效避免水流、波浪、水上飘浮物等不利因素的影响。因此悬浮施工栈桥是一种适合深海快速修建的绿色施工平台，能有效降低跨海大桥施工成本、加快施工进度，具有重大的理论研究和工程推广应用价值。

尽管已有许多学者对浮桥和悬浮隧道进行了模型试验和数值分析研究[4-11]，汤森等[4]采用 AQWA 软件研究了不同设计参数条件下深水浮式桥梁浮箱式承台的水动力特性，通过数值模拟和参数化分析出了不同参数对承台水动力特性的影响规律。孙建群等[7]采用将浮桥多模块化，通过水动力模型试验研究了规则波作用下的浮桥水动力响应和弯矩分布，得出了与数值结果相吻合的实验结果。但以上均没有涉及悬浮施工栈桥的研究。陈剑文等[12]对浅水中浮式栈桥单浮箱系泊系统及运动响应进行研究，发现浅水中交叉型半张紧式锚链系泊表现出良好的系泊性能，但相关研究并不涉及深水环境下的施工栈桥力学特性。苗玉基等[13]研究了复杂地形条件下浮式栈桥的运动响应，并探讨波浪圆频率及浪向角等因素对浮式栈桥运动响应的影响。何明辉等[14]设计了芜湖长江三桥的施工浮桥，浮桥设计采用“浮箱＋贝雷梁”结构，用于水中墩混凝土输送及人员通行，但该浮桥并不能用于施工车辆通行。

为了进一步研究深水环境下悬浮施工栈桥的力学性能和水动力特性，本文通过数值模拟分析优化浮箱基础内部构造，验证悬浮施工栈桥结构稳定性。基于三维势流理论，采用 AQWA 水动力分析软件分析不同水深，不同波浪入射下，悬浮施工栈桥的水动力影响规律，确定栈桥设计方案。

## 1 悬浮施工栈桥设计原理

如图 1 所示，栈桥上部结构为桥面板、分配梁、贝雷梁、垫梁，下部由钢管桩、浮式基础和锚索系统组成，悬浮体整体位于海平面下方。设计采用浮箱基础来替代传统施工栈桥的桩基础，在锚索系统的

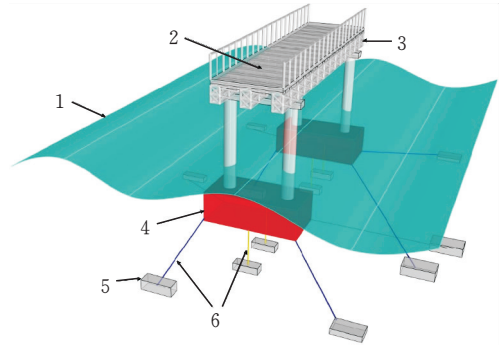
[收稿日期] 2023－02－18

[基金项目] 湖北省教育厅研究生教学改革研究项目(2021026)

[第一作者] 刘耀东(1969－)，男，山东滕州人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为桥梁结构理论、大型桥梁基础施工技术、有限元仿真分析及结构计算。

[通信作者] 彭瑶杰(1997－)，男，湖北天门人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为桥梁结构有限元分析。

约束下，浮箱基础各个方向的位移都能得到有效控制。施工栈桥采用节段拼装设计，刚性铰连接。在主桥施工过程中，施工人员及车辆均可通过栈桥实现日常交通的目的。其施工方法主要为先预制悬浮箱体承台，拼接好钢管支撑，将悬浮箱体承台运输到水中指定位置，向悬浮箱体承台内注水使悬浮箱体承台下沉到水面以下，接着将固定缆索与悬浮箱体承台底部和水底固定连接再排放悬浮箱体承台内的水使悬浮箱体承台上浮，固定缆索得到预张力，待水排尽后，即建造完成一个悬浮箱体承台基础；然后采用上述方法建造多个悬浮箱体承台基础，接着在钢管桩上安装上部结构组件构成悬浮施工栈桥。




1—海平面；2—桥面板；3—贝雷梁桁架；
4—悬浮箱体；5—锚碇；6—系泊缆

图 1 悬浮施工栈桥概念模型

## 2 静力分析

悬浮施工栈桥总共划分 157 769 个单元，使用 ANSYS 对模型进行求解，桥面和基础采用 SHELL181 单元模拟，贝雷梁及钢管柱采用 BEAM188 单元模拟。数值模型如图 2 所示。

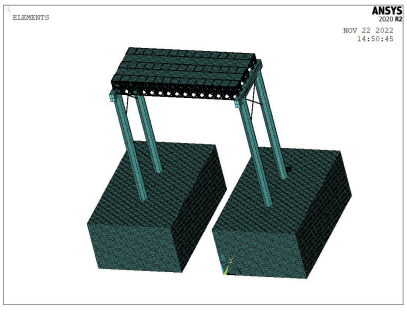
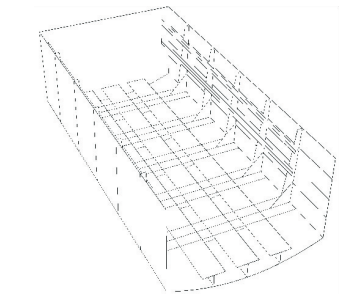
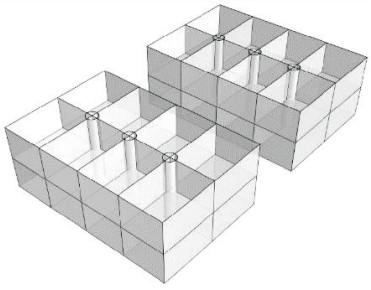



图 2 数值模型

为了研究栈桥在正常使用极限状态下的应力应变情况，对不同工况下的实桥进行了数值模拟分析，栈桥节段桥面宽 6 m、长 12 m，桥面板下部为钢桁架，钢管桩，浮箱基础为长 12 m、宽 8 m、高 5 m 的长方体钢结构。钢管柱与浮箱连接处属于局部高应力区，参考如图 3a 所示船底构造，通过在浮箱内部设置隔板如图 3b 来减小浮箱在高应力区的变形。



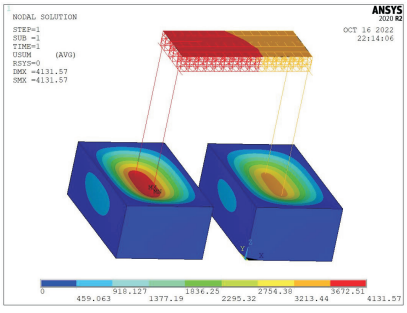
(a)船舶底部构造



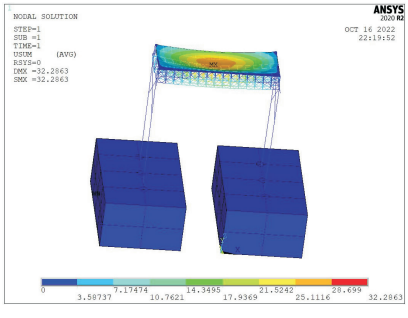
(b)浮箱内部构造

图 3 悬浮基础结构

图 4 为相同荷载作用下 15 mm 厚无隔板浮箱基础与 5 mm 厚有隔板浮箱基础的位移云图。从图 4a、b 可以看出，在相同荷载作用下，有隔板的悬浮箱体变形更小，仅为 3 mm 左右。且悬浮箱体设置隔板后，抵抗撞击能力更强。在应对损坏或漏水等突发情况时，能给施工人员提供更多时间。




(a)15 mm 厚无隔板浮箱位移




(b)5 mm 厚有隔板浮箱位移

图 4 不同结构的悬浮基础位移云

栈桥具体工况根据活载作用下的最不利截面内力包络图确定，同时考虑车辆荷载的实际轮距，计算工况[15]如表 1 所示。

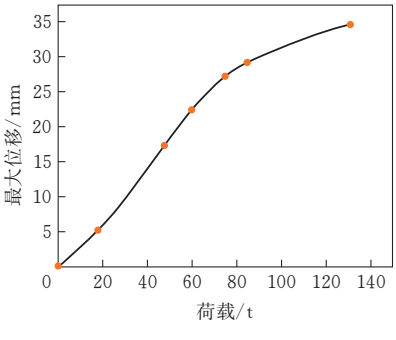
**表 1　数值模拟工况**

| 工况 | 布载方式 | 数值/t |
|---|---|---|
| 1 | 18t 单辆混凝土罐车布载 | 18 |
| 2 | 18t＋30t 两辆混凝土罐车布载 | 48 |
| 3 | 30t＋30t 两辆混凝土罐车布载 | 60 |
| 4 | 75t 吊车布载 | 75 |
| 5 | 75t＋10t 吊车＋吊重布载 | 85 |
| 6 | 131t 履带式旋挖机布载 | 131 |

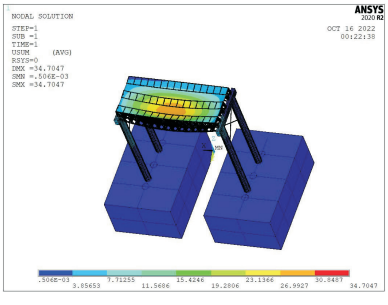
工况 1 为单辆混凝土罐车偏心和居中布载，工况 2、3 均为两辆混凝土罐车会车，工况 4、5 为吊车居中和偏心布载，工况 6 为旋挖机居中和偏心布载。其中单辆混凝土罐车自重 18 t，满载车辆总重 30 t。吊车自重 75 t，最大吊重 10 t。履带式旋挖机重 131 t。混凝土罐车考虑两辆车会车的情况，其余均考虑中心、偏心行驶时两种情况。

采用 ANSYS 对模型进行分析后，栈桥最大位移值见图 5a，最不利荷载作用下栈桥的位移云图见图 5b。贝雷梁与上行固定梁之间的连接结点和固定梁体系连接结点，是应力集中的局部高应力区，也需要进行静力学分析，其桁架结构在最不利荷载作用下位移图及应力云图如图 6 所示。

从图 5a 可看出，栈桥变形随着荷载的增加而增加。但总体变形值在可控范围内。其中在最不利工况即 131 t 履带式旋挖机偏心荷载下栈桥的最大变形为 34.7 mm，小于最大容许变形值。图 6 表明，在最不利荷载作用下贝雷梁与上行固定梁之间的连接结点和固定梁体系连接结点的局部高应力区的变形最大值为 9.52 mm，连接处的最大应力为 96 MPa，均在允许范围内。故悬浮施工栈桥的整体连接稳定可靠。

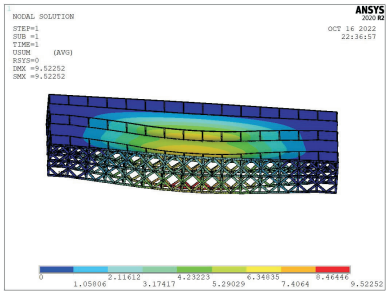



(a)各工况作用下最大位移

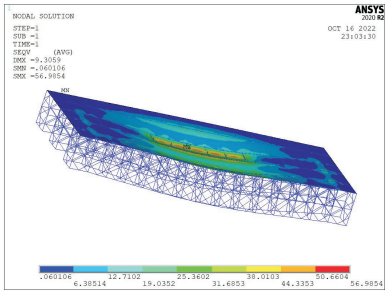



(b)最不利荷载作用下位移

图 5　悬浮施工栈桥位移




(a)贝雷梁位移云




(b)贝雷梁应力云

图 6　最不利荷载作用下贝雷梁位移及应力

此外，在工程设计中，尤其是浮桥设计，除了研究栈桥在静水压力作用下结构的稳定性，还应考虑水动力学作用下栈桥的运动特性。

## 2　水动力分析

### 2.1　理论基础

所谓势流，即流体中速度场为标量函数(即速度势)梯度的流，其特点是无旋、无黏、不可压缩[16]。将浮体边界作为波动着的流体边界的一部分，先确定在浮体边界上浮体对入射波的散射速度势和未受浮体扰动的入射波的速度势，两者迭加后即为浮体边界上扰动后的速度势。对于简谐传播的波浪中具有浮动刚体的流场，其速度势[17]按照线性理论通常可以分为三个部分：

$$\varphi(x,y,z,t)=\varphi_r+\varphi_\omega+\varphi_d \tag{1}$$

式中，$\varphi_r$ 为辐射势，由浮体自身运动扰动流场产生；$\varphi_\omega$ 为入射势，$\varphi_d$ 为波浪穿过浮体后产生的波浪绕射势。其中，$\varphi_r$ 与 $\varphi_d$ 统称为扰动势。

低频运动下的波浪载荷谱的表达式为：

$$S_{F2-}(\Delta\omega)=8\int_0^\infty S(\omega)S(\omega+\Delta\omega)\left[\frac{F_i(\omega+\frac{\Delta\omega}{2})}{\xi_a}\right]^2\mathrm{d}\omega \tag{2}$$

式中，$S(\omega)$ 为波浪谱，$F_i(\omega+\frac{\Delta\omega}{2})$ 为频率为 $\omega+\frac{\Delta\omega}{2}$ 的平均波浪漂移力。

由牛顿第二定律：

$$F_i(t)=M\ddot{x} \tag{3}$$

式中，$F_i(t)$ 为波浪力，$M$ 为浮体广义质量、附加质量，$\ddot{x}$ 为浮体运动加速度与角加速度。

则悬浮施工栈桥在波浪荷载作用下的频域运动方程为：

$$(M+\Delta M)\ddot{X}+B'\dot{X}+K_mX=F_i(t) \quad (4)$$

式中，$(M+\Delta M)$ 为浮体广义质量加附加质量，$B'$ 为系泊状态下的系统阻尼，$K_m$ 为系统恢复力系数，$F_i(t)$ 为波浪激励力。

## 2.2 水动力模型与计算条件

如图 7 所示，栈桥所有浮式基础都设置在水面下。不同水深下系泊刚度变化也影响着悬浮施工栈桥的运动响应，但在海洋环境下水深对系泊刚度的影响会变得更加复杂，因此本文主要就相同水深下的系泊系统进行了研究。为了研究栈桥的合理布置方案，根据栈桥具体设计参数及工作环境，初步拟定浮式基础按潜深 1、3、5、7 m 四种深度布置。同时为了探究悬浮施工栈桥的运动特性，利用 AQWA 水动力分析软件进行数值模拟计算栈桥的运动幅值响应算子 RAO(response amplitude operator)，即波浪波幅到浮箱六个自由度运动量的一个传递函数，针对每种布置方案，计算工况按浮箱基础潜深、波浪频率及入射角进行组合，共计 320 个工况(表 2)。

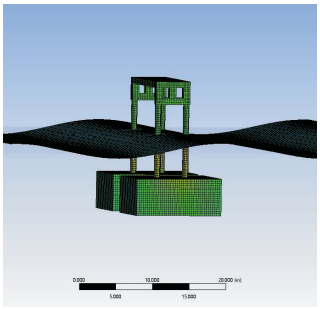


图 7 悬浮施工栈桥模型

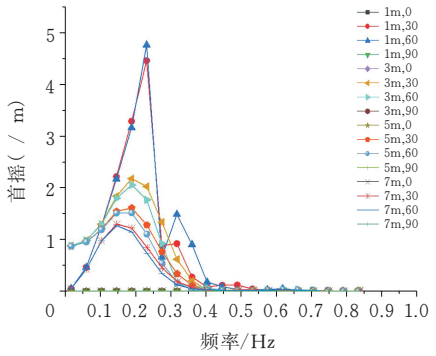
**表 2 水动力计算工况**

| 方案 | 基础潜深 | 波浪高度 | 波浪频率 | 水流入射角度 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 m | 1 m | 0～1 Hz，20 组 | 0°,30°,60°,90° |
| 2 | 3 m | 1 m | 0～1 Hz，20 组 | 0°,30°,60°,90° |
| 3 | 5 m | 1 m | 0～1 Hz，20 组 | 0°,30°,60°,90° |
| 4 | 7 m | 1 m | 0～1 Hz，20 组 | 0°,30°,60°,90° |

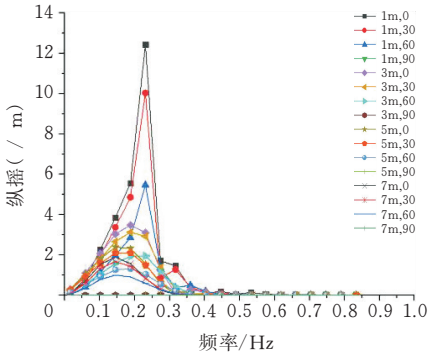
图 8 为各工况下模型计算后栈桥六自由度 RAO 图，可得出以下结论：

1)由图 8a、b、c 可发现，随着栈桥基础潜深的增加，栈桥的首摇、纵摇、横摇等 RAO 值会在波浪频率较小时达到最大值。且 RAO 值达到极小值后，均会有个突然增大的过程，其中首摇 RAO 和纵摇 RAO 变化较为明显。

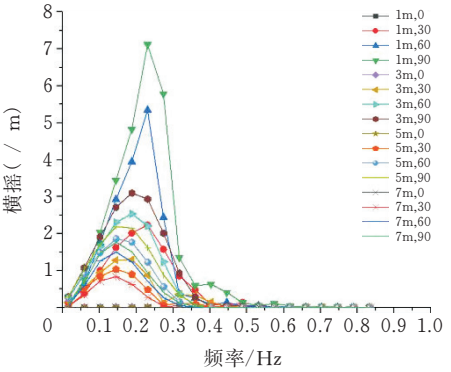
2)由图 8a-e 可知，栈桥的首摇、纵摇、横摇、纵荡、横荡受波浪入射角度的影响较大。横摇 RAO 在波浪入射角度为 60°～90°时的值较大；纵摇随着水流入射角度的增大而减小，波浪入射角度为 30°～60°时，首摇 RAO 值较大。纵荡 RAO 随着水流入射角度的增大而减小，在 0°～30°时其纵荡 RAO 值较大；而横荡随着水流入射角度的增大而增大，在 60°～90°时其横荡 RAO 值较大。由图 8f 可发现，栈桥的垂荡受潜深和波浪入射角度影响较小，随着波浪频率的增大，垂荡 RAO 急剧减小，且在波浪频率达到 0.4 Hz 后，各工况下的垂荡 RAO 都趋于 0。



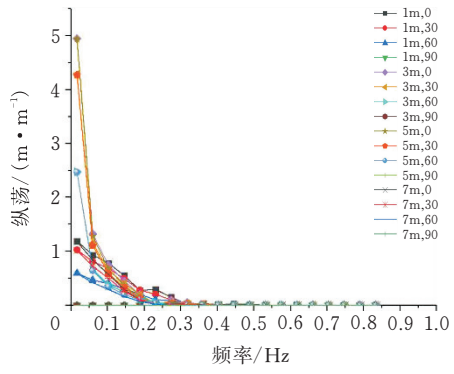

(a)首摇 RAO



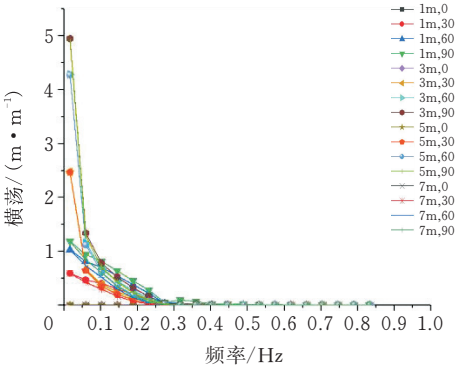

(b)纵摇 RAO



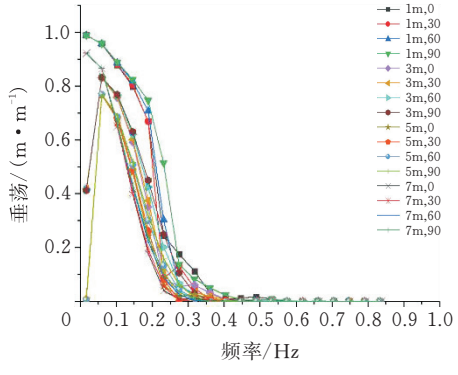

(c)横摇 RAO




(d)纵荡 RAO




(e)横荡 RAO



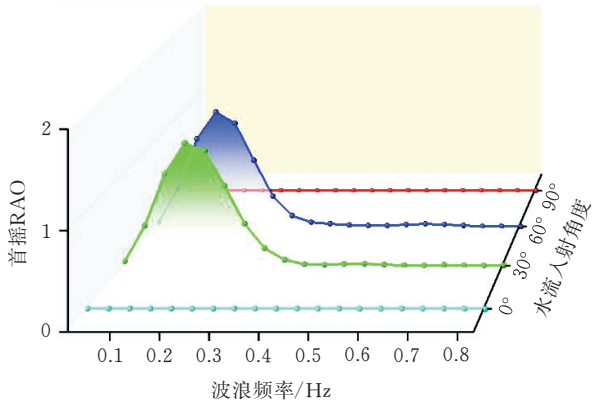

(f)垂荡 RAO

图 8　各工况下浮算子数据

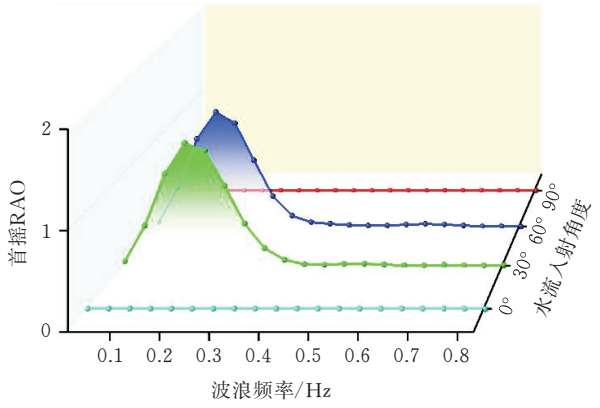
3)由图 8 可知，栈桥的首摇、纵摇、横摇、纵荡、横荡受基础潜深的影响较大，其中纵摇所受影响最大，随着潜深的增加，纵摇急剧减小，而纵荡和横荡在潜深逐渐增加时会出现增大后又减小的现象。

4)从由图 8 可知，基础潜深为 1 m 时，其各自由度的 RAO 均较大，基础潜深为 3 m 和 5 m 时，其横荡及纵荡 RAO 较大，而当基础潜深为 7 m 时，其各自由度的 RAO 均较小，且随着波浪频率的变化其 RAO 变化趋势也较为平缓。从经济角度考虑，虽然潜深 1 m、3 m 和 5 m 相对 7 m 较小，前期利于施工从而节省成本，但浮箱基础易受水位变化影响降低承载力，带来危险的同时后期运营成本也更高。故栈桥基础潜深选 7 m 最为合适。

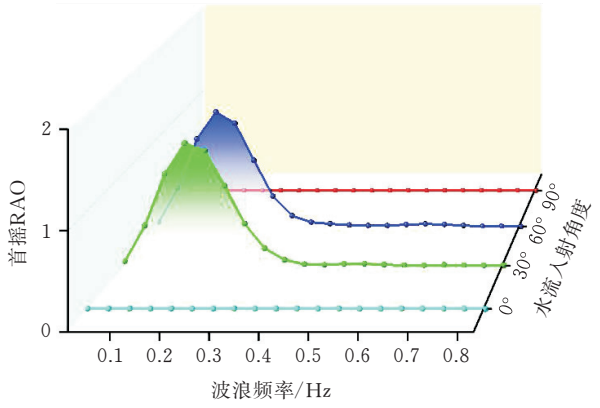
图 9 为浮式基础布置潜深为 7 m 时的六自由度 RAO 数据瀑布图，由图 9a 可知，栈桥在波浪频率为 0.15 Hz，水流入射角度为 30°～60°时，首摇达到较大值 1.3 °/m。由图 9b 可知，波浪频率为 0.15 Hz，水流入射角度为 0°～30°时，栈桥的纵摇值达到 1.8 °/m。从图 9c 可发现，栈桥的横摇在波浪频率为 0.15 Hz，水流入射角度为 60°～90°时有较大值。从图 9 可知，栈桥的纵摇、横摇、首摇的 RAO 均在波浪频率为 0.15 Hz 时达到最大值，且随着波浪频率增大，在 0.4 Hz 处时，各方向水流入射下栈桥的纵摇、横摇、首摇各 RAO 值均趋于 0。



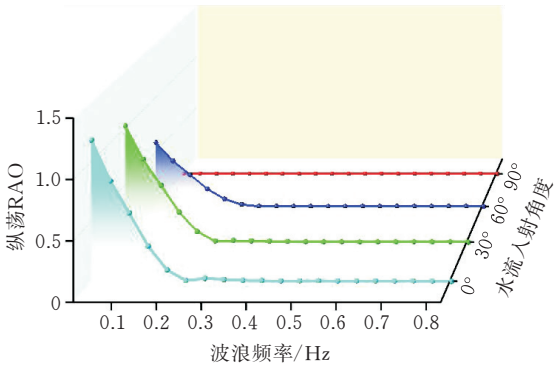

(a)首摇 RAO



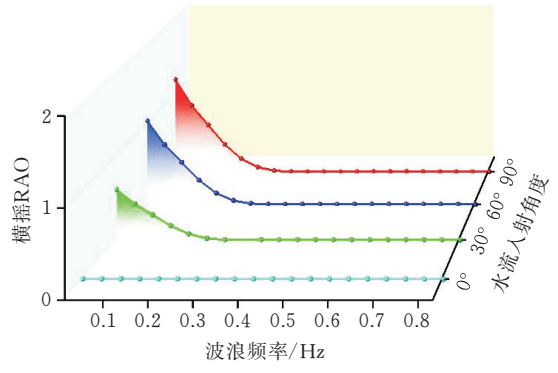

(b)纵摇 RAO



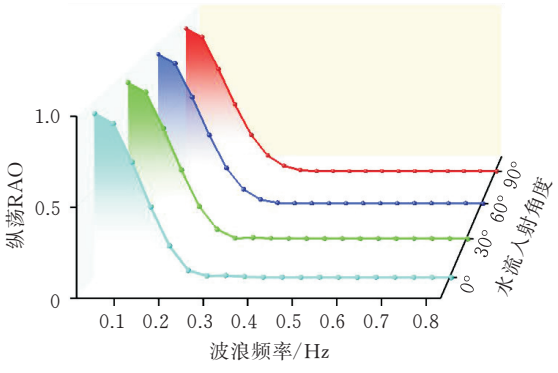

(c)横摇 RAO




(d)纵荡 RAO



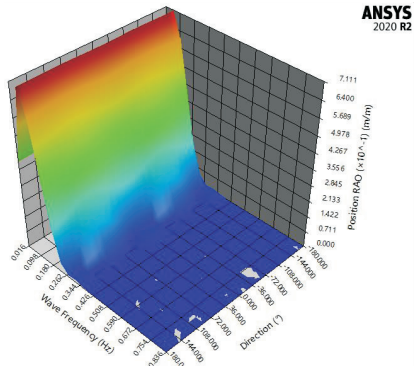

(e)横荡 RAO



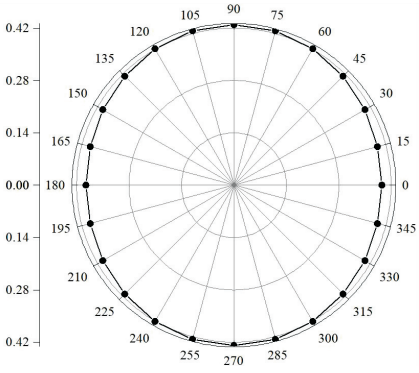

(f)垂荡 RAO

图 9 基础潜深 7m 下 RAO 数据瀑布图

由图 9d、e、f 可知，各方向水流入射下栈桥的纵荡、横荡、垂荡 RAO 值都随着波浪频率的增加而减小，且随着波浪频率增大，在 0.4 Hz 处时，各方向水流入射下栈桥的纵荡、横荡、垂荡 RAO 值均已趋于 0。随着水流入射角度的变化，栈桥的垂荡 RAO 变化均不明显，且各个角度水流入射下栈桥的垂荡 RAO 在波浪频率增加时，其值变化趋势都相同。为深入探究在相同波浪频率下栈桥的垂荡 RAO 值在不同角度水流入射下的影响，根据栈桥频域计算原数据如图 10a 所示，绘制出了规则波高 1 m、频率 0.15 Hz、−180°～180°波浪入射角下栈桥的垂荡数据图，每个入射角间距为 15°，共计 25 个工况，各个入射角下的垂荡值如图 10b 所示。由图 10 可发现，随着波浪入射角度从 0°开始增加，栈桥的垂荡变化极小，且在栈桥的对称轴两侧，其垂荡值均完全对称，这与栈桥的结构外形有关。同时其垂荡值在 90°或 270°的波浪入射下最大，在 0°或 180°的波浪入射下最小，但其差值很小，所以波浪的入射角度对该栈桥的垂荡值影响极小。在实际工程中，若要减小该悬浮施工栈桥的垂荡，可以在浮箱基础上增设垂荡板[18]，或增大波浪频率。




(a)频域计算数据




(b)各入射角悬浮栈桥垂荡值

图 10 悬浮施工栈桥垂荡数据

## 3 结论与讨论

1)该悬浮施工栈桥力学性能良好，设置隔板的浮箱基础能有效提高悬浮施工栈桥承载能力。

2)浮箱基础潜深、波浪频率和水流入射角度变化对悬浮施工栈桥各自由度响应有重要影响，浮箱基础潜深变化对纵摇影响更大，波浪入射角度变化对垂荡影响很小。

3)根据频域计算结果，该悬浮施工栈桥的纵摇、横摇、首摇 RAO 随着潜深的增加而减小，悬浮施工栈桥的纵荡和横荡 RAO 先增大后减小。

4)从各工况下水动力运动响应分析及经济性考虑，该悬浮施工栈桥的浮箱基础潜深为 7 m 较为适宜。

基于现有基础，下一步可通过对风、浪、流联合作用下悬浮施工栈桥的系泊系统进行深入分析，探究悬浮施工栈桥的时域运动响应以及在不同水深的

适应性，同时并考虑是否可以建立数值模拟及物理模型试验双向验证，不断提高在深水环境下悬浮施工栈桥施工的理论指导地位，拓宽悬浮施工栈桥的实际工程应用范围。

[ 参 考 文 献 ]


[1] 姚华.平潭海峡公铁大桥大小练岛水道桥施工技术[J].桥梁建设，2020，50(01)：7-12.

[2] 王东辉，张立超.平潭海峡公铁两用大桥栈桥设计[J].桥梁建设，2015，45(04)：1-6.

[3] 程斌，向升. 深水浮式桥梁研究应用进展[J]. 土木工程学报，2021，54(02)：107-126.

[4] 汤淼，向升，程斌.深水浮式桥梁浮箱式承台水动力特性分析[J].世界桥，2021，49(06)：78-84.

[5] WATANABE E，UTSUNOMIYA T. Analysis and esign of floating bridges [J] . Prog Struct Eng ater 2003，5：127-44.

[6] 黄恒，陈徐均，施杰，等.移动荷载作用下考虑纵向连接间隙的浮桥结构计算 [J].兵工学报，2020，41(08)：1665-1674.

[7] 孙建群，姜鹏宇，宋春辉，等.则波作用下多模块浮桥的水动力性能试验[J].哈尔滨工程大学学报，2019，40(01)：162-167.

[8] 王欢欢，杨勋，金先龙.移动载荷作用下海岸囊式浮桥动力响应分析[J].振动与冲击，2016，35(14)：202-208.

[9] SATO M，KANIE S，MIKAMI T. Mathematical analogy of a beam on elastic supports as a beam on elastic foundation[J]. Applied Mathematical Modelling，2008，32：688-699.

[10] 干湧.水下悬浮隧道的空间分析与节段模型试验研究[D]. 浙江：浙江大学，2003.

[11] 林亨，项贻强，陈政阳，等.轨道不平顺激励下悬浮隧道车隧耦合振动响应分析[J].振动与冲击，2019，38(01)：1-7.

[12] 陈剑文，王志东，付佳，等.浅水中浮式栈桥单浮箱系泊系统及运动响应特性[J].舰船科学技术，2015，37(05)：42-46.

[13] 苗玉基，陈徐均.复杂地形条件下浮式栈桥运动响应的频域分析[J].中国造船，2017，58(02)：108-117.

[14] 何明辉，刘爱林，胡雄伟.芜湖长江三桥施工浮桥设计[J].世界桥梁，2021，49(02)：25-30.

[15] 沈海鹏，陈徐均，黄恒，等.基于多重静态子结构的浮桥接头受力分析[J]. 港工技术，2019，56(05)：31-38.

[16] FALTINESN O M.船舶与海洋工程环境载荷[M].杨建民，肖龙飞，葛春花，译.上海：上海交通大学出版社，2008.

[17] 刘周.三种典型半潜式浮式风机基础水动力性能比较分析 [D]. 广州：华南理工大学，2020.

[18] 郑建才，赵伟文，万德成.带分形孔垂荡板浮式风力机性能的大涡模拟分析[J].中国造船，2022，63(02)：1-12.


# Study on Mechanical Properties and Hydrodynamic Characteristics of Floating Box Foundation Construction Trestle


LIU Yaodong，PENG Yaojie，LI Wentao

(*School of Civil Engin.，Architecture and Environment，Hubei Univ.of Tech.，Wuhan* 430068，*China*)



**Abstract**：In order to solve the problem that the traditional construction trestle cannot meet the needs of the project in the deep water environment，combined with the characteristics of the traditional construction trestle and the floating bridge project，a construction trestle form suitable for the deep water environment-suspension construction trestle is designed. Aiming at the mechanical properties and hydrodynamic characteristics of suspension construction trestle，first，the static analysis of the trestle is carried out by numerical simulation to study the stability of its structure. Based on the potential flow theory，the hydrodynamic analysis software AQWA is used to carry out numerical simulation of the trestle to study the influence of foundation depth，wave frequency and wave incident angle on the six-degree-of-freedom RAO of suspension construction trestle. The results show that the suspension construction trestle with diaphragms on the pontoon foundation has good stability. The maximum displacement of the trestle under the most unfavorable load is 34.7 mm，which is less than the maximum allowable deformation value of the temporary construction trestle. The heave RAO of the suspension construction trestle is less affected by the incident angle of the wave，and the pitch RAO is most affected by the depth of the pontoon foundation. The pontoon foundation depth of 7 m is more suitable.



**Keywords**：construction trestle；floating box foundation；numerical simulation；potential flow theory；hydrodynamic characteristics

[责任编校：裴　琴]