

DOI:10.11784/tdxbz202506036

地震大装置水下振动台流场均匀性控制研究

李健增^{1,2}, 孟祥飞², 范晓文³, 周默¹, 许栋⁴, 及春宁¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 国家超级计算天津中心, 天津 300457;

3. 天河超级计算淮海分中心, 临沂 276035; 4. 河海大学水利水电学院, 南京 210024)

摘要: 水下振动台是开展土木工程、海洋工程及地震工程等多学科交叉科研的重要试验设施, 其核心价值在于可在水下环境中复拟地震工况, 为结构与水耦合动力响应提供真实、可重复的实验场景. 试验区大型流场的精准、稳定及均匀性控制是开展高质量试验研究的先决条件, 直接影响着装置的适用范围以及试验结果的可靠性. 针对试验区大型流场调试过程中多变量相互影响与调优周期长的问题, 以国家大型地震工程模拟研究设施水下振动台大型流场环境为研究对象, 以流场均匀性为优化目标, 选取通道的入口流量和导流格栅的封堵布局为控制参数, 基于高保真计算流体动力学(CFD)数值模拟和集合卡尔曼滤波算法, 快速确定多变量参数取值, 提出分步调优的控制策略, 实现流场的均匀性控制. 该策略将纵向流动和横向流动做解耦, 首先调整格栅布局逐步逼近最优封堵组合, 从而避免纵向局部流速过大形成流动集中或流速过小产生回流; 其次, 通过优化算法调整横向各通道之间的相互影响, 进一步实现横向的流动均衡, 避免多变量同时扰动造成的耦合震荡. 仿真结果表明: 应用分步调优控制策略, 可以快速得到期望的目标流场, 显著提升调优效率, 为多控制参数条件下大型流场的方案设计和控制调优提供了新方法, 也可推广至其他具有相似需求的大型流控设施.

关键词: 集合卡尔曼滤波算法; 多变量优化; 流场均匀性

中图分类号: TV133.1

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)04-0419-11

Study on Flow Field Uniformity Control of Underwater Shaking Table at National Facility for Earthquake Engineering Simulation

Li Jianzeng^{1,2}, Meng Xiangfei², Fan Xiaowen³, Zhou Mo¹, Xu Dong⁴, Ji Chunling¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National SuperComputer Center in Tianjin, Tianjin 300457, China;

3. Tianhe Supercomputing Center of Huaihai, Linyi 276035, China;

4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The underwater shaking table is a key experimental facility for multidisciplinary research in civil, ocean and earthquake engineering, and its core value lies in its capability to simulate earthquake conditions in an underwater environment, providing a realistic and repeatable test scenario for the coupled dynamic response between structures and water. Generating a precise, stable and uniformly controlled large-scale flow field within the test area is essential for ensuring the application range of equipment and reliability of experimental results. However, achieving such flow conditions is challenged by the complex interactions among multiple variables, as well as the typically required lengthy tuning cycles. This study focused on optimizing the large-scale flow field environment of the underwater shaking table at the National Facility for Earthquake Engineering Simulation. Flow field uniformity was set as the optimization objective, with the inlet velocity of the flow channel and the blocking configuration of the diversion grille selected as key control parameters. Based on high-fidelity computational fluid dynamics (CFD) simulations and

收稿日期: 2025-06-26; 修回日期: 2025-11-05.

作者简介: 李健增 (1985—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, lijz@nscj-tj.cn.

通信作者: 及春宁, cnji@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52179076, 51979186, 51779175).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52179076, No. 51979186, No. 51779175).

the ensemble Kalman filter algorithm, the proposed approach enabled rapid determination of multivariate parameter sets. A stepwise tuning control strategy was proposed to efficiently regulate the flow field uniformity. This strategy decoupled vertical flow and horizontal flow. First, it adjusted the grille layout to gradually approach the optimal blocking combination, so as to prevent excessive local vertical flow velocity from leading to flow concentration or insufficient flow velocity from causing backflow. Second, it adjusted the mutual influence between horizontal flow channels through optimization algorithms to further achieve horizontal flow balance and avoid coupled oscillations caused by simultaneous disturbances of multiple variables. Simulation results demonstrated that the proposed strategy enabled rapid achievement of target flow conditions and significantly enhanced the tuning efficiency. This strategy provides a novel approach for the design and control of large-scale flow fields under multi-parameter constraints, and it can also be extended to other large-scale flow control facilities with similar requirements.

Keywords: ensemble Kalman filter algorithm; multivariate optimization; flow field uniformity

中国地处环太平洋地震带和欧亚地震带的交汇部位,地震活动频度高、强度大、分布广.随着经济社会的发展需求,跨海超长桥隧、大型水利工程、大型能源工程等重大项目都对抗震能力提出了更高要求.在全球能源转型背景下,海上风电作为清洁能源的重要载体发展迅猛,其基础结构(如单桩、导管架)长期承受地震与波浪耦合作用,而当前针对该场景的结构-流体耦合响应试验数据及理论支撑较为匮乏,亟需通过水下振动台试验开展相关研究.流场均匀性直接影响结构-流体耦合响应测试的准确性(如流场结构、动水压力等).水下振动台试验装置的成熟与完善为处于水环境中的工程结构抗震性能研究提供了条件,因此,大型振动台设备的研发和应用受到了持续和广泛的关注^[1-2].现阶段,大部分研究主要围绕陆上抗震试验台,包括野外原型试验、地震模拟振动台试验、伪动力试验、伪静力试验、模型动力特性试验、材料动力特性试验、土动力试验和故障诊断试验等^[3-8].针对水下振动台,目前的研究重点集中在动力载荷控制输出、流-固协调相似律设计、主动造波及被动消波、结构防水等方面^[9-13],针对试验区流场稳定及均匀性控制的研究较少.

大型流场的精准可控是开展水下振动试验的先决条件,也是工程结构与水体耦合抗震研究准确性的基础.现阶段,试验区流场控制是通过声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)、声学多普勒流速仪(acoustic Doppler velocimeter, ADV)、粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)、粒子追踪测速仪(particle tracking velocimetry, PTV)等测量技术对流场进行测量^[14-15],并配合泵体矩阵的反馈调试,对流场的均匀性进行控制.整个调控过程面临两大挑战:一是大型流场的准确测量存在较大困难,且用短时、局部测量流场代替长时、整体流场的偏差较大^[16];二是反馈的泵体矩阵面临着多

参数系统性和关联性调优的难题.针对上述问题,亟需设计 1 套调控仿真策略,对现实调优提供参考.本文以大型流场的计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟为基础,将流场的纵向与横向均匀性控制解耦分离,提出 1 种分层调优的控制策略:首先,利用正交分解方法对水道出口进行精准导流与分块封堵,实现流场的纵向均匀性;其次,引入非线性问题数据追踪领域的集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter, EnKF)算法,对不同水道特征参数进行迭代调优,实现流场的横向均匀性;最后,以国家大型地震工程模拟研究设施水下振动台的流场控制为例,验证本文提出的分层调优控制策略的有效性.本文研究成果可为类似大型流场均匀性控制提供参考.

1 流场建模与优化方法

1.1 流场建模

本文以国家大型地震工程模拟研究设施的水动力环境为基础进行建模,如图 1 所示.试验水池的具体参数详见表 1.

基于 CFD 软件建立高精度三维大型流场模拟模型,如图 2 所示.为了减少计算量,本文选取中间部分流场进行模拟,且采用刚盖假定,忽略自由表面的影响.计算域试验水池尺寸为 71 m × 20 m × 4 m,入口和出口各包含 5 台水泵.流场包括造流水泵(未显示)、整流盲沟、导流格栅、试验水池、回流导流装置.入流和回流水泵均给定边界流速,且两者的绝对值相等,计算域顶部边界采用自由滑移壁面条件,其他边界采用不可滑移壁面条件.湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型,其他设置见表 2.

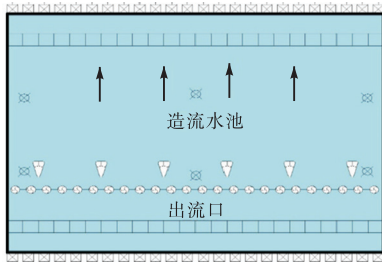
入口处导流结构如图 3 所示,其中导流格栅位于整流盲沟与试验水池之间,用于对流体进行第 1 次整

流,以改变流体的流动速度和流动方向.

流场均匀性优化目标区域位于水池中段. 在流场正中位置取垂向截面, 并排建立 5 个流场流速监测面, 其长度 a 为 3 600 mm, 高度 b 为 500 mm, 距水面距离 100 mm, 距侧向壁面距离 c 为 200 mm, 两个监测面之间距离 d 为 400 mm, 如图 4 所示.



(a) 大装置水动力环境实景



(b) 大装置水动力环境结构

图 1 大装置水动力环境

Fig.1 Hydrodynamic environment of large facility

表 1 水动力环境具体参数

Tab.1 Specific parameters of hydrodynamic environment

参数	说明
长×宽×高/(m×m×m)	95×69×3
最大流速/(m/s)	0.4, 入流与回流均通过 24 台变频水泵控制
整流段最大距离/m	9
稳定流段长度/m	15
平均流速与目标流速偏差	≤10%
稳流段时均流速沿程偏差	≤10%

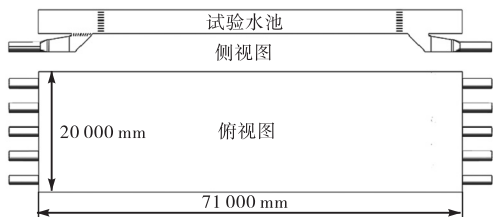


图 2 大型流场水动力数值模拟模型

Fig.2 Hydrodynamic simulation model of large-scale flow field

表 2 仿真模型设置

Tab.2 Setting of simulation model

项目	格式
压强	PRESTO
动量方程	2 阶迎风
湍动能输运方程	2 阶迎风
湍动能耗散率输运方程	2 阶迎风

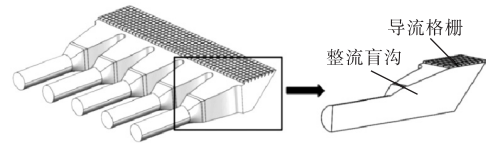
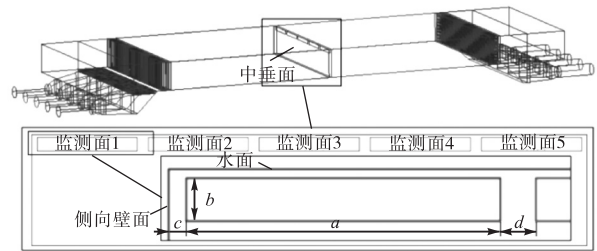


图 3 入口处导流结构

Fig.3 Diversion structure at the inlet



(a) 流场优化区域的俯视图



(b) 流场横截面监测区域

图 4 优化区域和流速监测面示意

Fig.4 Schematic of flow optimizing region and velocity monitoring cross-sections

模型采用混合非结构化网格进行空间离散, 导流叶片周边网格做局部加密, 如图 5 所示.

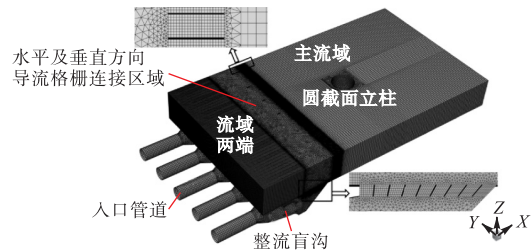


图 5 模型网格

Fig.5 Meshing of the model

1.2 网格无关性和精度验证

本节对 CFD 模型进行网格无关性验证. 在图 5 所示的流场中间放置 1 个直径为 3 m、高度为 3 m 的圆柱, 调整入流水泵流速, 在流场中部产生 1 个近似均匀流场. 通过对比圆柱的阻力系数来检验流场网格的收敛性. 表 3 给出了在高雷诺数条件下 5 种不同网格得到的阻力系数时均值, 以及不同学者给出的阻力系数试验值. 由表 3 可以看出, 当网格数量达到 8.50×10^6 时, 阻力系数收敛. 综合考虑计算效率与精度, 本文选取网格 3 开展后续数值模拟. 在网格 3 中, 流场优化目标区域采用 0.15 m 六边形网格, 导流

叶片周边加密区采用 0.05 m 的混合网格,连接过渡区网格增长率为 1.2.

由表 3 可知,对于圆柱阻力系数时均值,本文计算结果与试验结果吻合较好,证实了本文模拟结果的可靠性.

表 3 不同工况下圆柱绕流阻力系数对比

Tab.3 Comparison of drag coefficients for flow around cylinder under different operating conditions

序号	方法	网格数量	雷诺数 Re	阻力系数 C_d
1	本文模拟方法	2.50×10^6	3.3×10^5	0.570
			1.0×10^6	0.450
2	本文模拟方法	4.00×10^6	3.3×10^5	0.550
			1.0×10^6	0.430
3	本文模拟方法	8.50×10^6	3.3×10^5	0.470
			1.0×10^6	0.360
4	本文模拟方法	1.20×10^7	3.3×10^5	0.485
			1.0×10^6	0.360
5	本文模拟方法	1.70×10^7	3.3×10^5	0.490
			1.0×10^6	0.330
6	程霄翔等 ^[17] 试验方法	—	3.3×10^5	0.500
7	Ronald ^[18] 试验方法	—	1.0×10^6	0.300

1.3 未经优化流场

在未经优化条件下,设置 1~5 号入流水泵的流速为 1.32 m/s, 1~5 号回流水泵的流速为-1.32 m/s. 图 6 为计算得到的入水泵出口处的流场图,从图 6 中可以看出在未做优化的情况下,出口后部有明显的回流,流体主要从前部流出,因流道变窄,流速增加,进入水池的高速流体大部分集中在水池上部,导致流速纵向分布不均匀,且因存在回流导致流动不稳定.

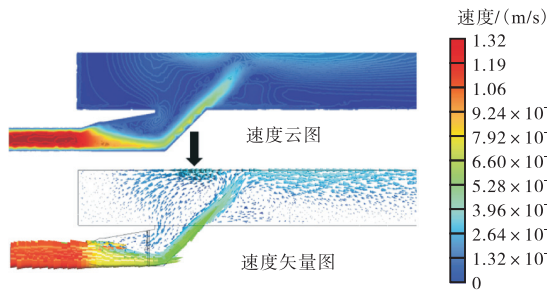


图 6 入水泵出口处流场
Fig.6 Flow field at the inflow pump exit

图 7 为自由水面以下 0.2 m 位置处的速度分布云图,可见各流道出口的流速不均匀,相邻流道的水体相互干扰,甚至在流场末端产生回转流动.

图 8 给出了不同流道流速的竖向分布,可以看出不同流道的流动形态差异较大.

图 9 为中垂面速度云图. 由图 9 可以看出,在不同水深、不同位置处速度差异性明显,中间及上部区域流速较高,但双侧底部流速较低. 中垂面最高流速

为 0.48 m/s,最低流速为 0.10 m/s.

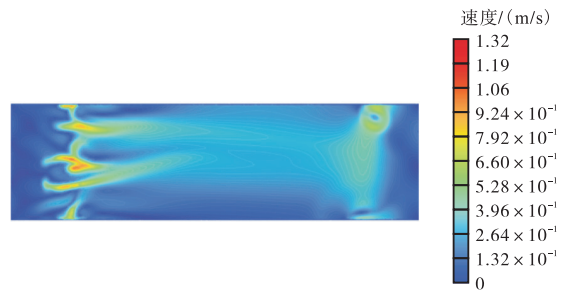


图 7 自由水面以下 0.2 m 处截面速度云图
Fig.7 Velocity contour map at cross-section, which is 0.2 m below the free water surface

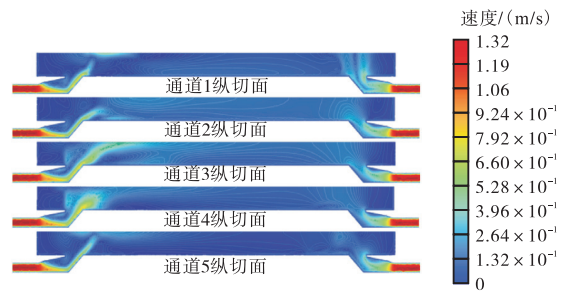


图 8 不同流道截面速度云图
Fig.8 Velocity contour maps at different flow channel cross-sections

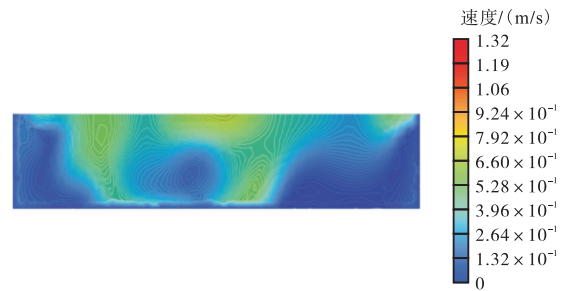


图 9 中垂面速度云图
Fig.9 Velocity contour map at middle vertical cross-section

1.4 EnKF 优化方法

有别于梯度下降和遗传算法的最优解探寻,水下振动台需要根据不同的试验工况提供不同的波流环境,应用场景属于典型的数据追踪. 与此同时,在多参数系统中因初始条件与边界条件复杂,难以做到完全的精准化建模,可以通过数据融合方法以可控参数代偿的形式修订得到目标场. EnKF 是 1 种可以用于强非线性动力学模型预测的数据追踪方法^[19]. 它的基本思想是由先前的系统状态和期望值估计当前状态,使用状态方程连接先前和当前状态,通过相应的估计和更新,使得系统能够不断更新至最优状态.

1.4.1 变量集合

首先,针对空间内影响流场均匀性的因素,分析其是否具有不确定性,从而确定边界条件参数中存在

的变量;随后,根据先验信息,在各变量的区间范围内进行初始采样,构建变量初始集合. EnKF 优化以蒙特卡罗思想为基础,变量集合的样本越大,结果越趋于统计性规律. 因此,初始集合的设计不会对最终结果产生影响,但会影响优化过程的收敛速度与收敛精度. 本文选取不同入流水泵的速度作为参数,因此模型边界条件中存在 5 个变量,各变量样本数为 m . 建立变量初始集合 E , 见式(1)和式(2).

$$E = \{z_1, z_2, \dots, z_m\} \quad (1)$$

$$z_j = \{x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^i\} \quad (2)$$

式中: z_j 为第 j 组变量样本; x_j^i 为第 j 组样本第 i 个变量, $i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2, \dots, m$.

1.4.2 误差协方差分析

将上述变量集合 E 中各样本代入 CFD 模型,经模拟求解得各样本对应的流场分布,并输出空间内测点位置的物理状态参数模拟值矩阵 \mathbf{P} , 见式(3)和式(4).

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_m] \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_j = [p_j^1, p_j^2, \dots, p_j^i]^T \quad (4)$$

式中: \mathbf{p}_j 为第 j 组样本对应的流场状态模拟值向量, $j = 1, 2, \dots, m$; p_j^i 为第 j 组样本中第 i 个状态参数的模拟值, $i = 1, 2, \dots, 5$, i 为期望场数据中包含的流场状态参数总数量.

由期望场数据平均值构建向量 \mathbf{U} , 见式(5), 并进一步计算 \mathbf{R} 、 \mathbf{C}_{xp} 和 \mathbf{C}_{pp} , 其中 \mathbf{R} 为仿真误差组成的协方差矩阵, \mathbf{C}_{xp} 为边界条件变量与流场模拟结果之间的协方差矩阵, \mathbf{C}_{pp} 为期望值对应的各模拟值之间的协方差矩阵, 具体见式(6)~(8). 通过误差协方差分析可获得变量与模拟结果之间的相关关系, 综合考虑误差影响, 并在此基础上计算出各误差在模拟值与期望值的差值中所占的权重, 即卡尔曼增益矩阵 \mathbf{K} , 见式(9). 基于先验信息的初始集合 E 会直接影响协方差, 进而对矩阵 \mathbf{K} 产生影响.

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}^1, \mathbf{u}^2, \dots, \mathbf{u}^w]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_{xp} = \frac{1}{n-1} \sum (z_j - \bar{z}_j)(p_j - \bar{p}_j)^T \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{pp} = \frac{1}{n-1} \sum (p_j - \bar{p}_j)(p_j - \bar{p}_j)^T \quad (8)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{C}_{xp} (\mathbf{C}_{pp} + \mathbf{R})^{-1} \quad (9)$$

式中: σ 为仿真预估值对应的误差标准差, 本文取 0; \bar{z}_j 和 \bar{p}_j 分别为第 j 组边界条件变量样本及其仿真预估值的平均值.

1.4.3 变量修正

结合流动特性以及各要素之间的系统关联, 增加权重因子 γ 和表观松弛因子 G , 以表征各流道对当前流道速度的影响, 增强计算的合理性与稳定性. 通过式(10)~(13)修正变量并更新 E 与式(9)中的卡尔曼增益矩阵 \mathbf{K} .

$$D_j^i = |(p_j^i - p_w^i) / p_w^i| \quad (10)$$

$$\gamma_j^i = D_j^i / \sum_{j=1}^5 D_j^i \quad (11)$$

$$\mathbf{x}^i = \mathbf{x}^i + G \cdot \gamma \sum_{w=1}^5 \frac{\mathbf{C}_{x^i p^w}}{\mathbf{C}_{pp} + \mathbf{R}} (\mathbf{u}^w - \mathbf{p}^w) \quad (12)$$

$$E' = E \cup \{z\} \quad (13)$$

式中: D_j^i 为第 j 组样本对第 i 个监测面流速的变化比例; p_j^i 为第 j 组样本的第 i 个计算结果; p_w^i 为第 w 组样本的第 i 个计算结果, 这里取为计算基准; $\mathbf{C}_{x^i p^w}$ 为集合中第 i 个边界变量值与仿真计算值的协方差矩阵, \mathbf{x}^i 为更新后的变量值.

1.4.4 迭代收敛

水下振动台采用底部流量计与船载式流量计来测量流场的速度大小以及均衡性, 通过两种流量计的相互校核, 确定其真实测量误差约为 3%. 为便于仿真结果与实测结果相对应, 同时保障整体计算精度, 本文设定单通道的收敛条件为误差 $A < 3\%$, 与实验测量误差相同. 相邻通道的流速差的误差为单通道误差的 2 倍, 因此, 本文选取相邻通道的收敛条件为误差 $N < 6\%$, 见式(14)和式(15). 式(14)中, $w' = 1, 2, \dots, 5$; 式(15)中, $w = 1, 2, 3, 4$. 执行优化流程, 当所有监测面仿真结果的 A 、 N 均达到收敛判定标准, 则优化完成; 否则, 令变量集合 $E = E'$, 继续仿真求解步骤, 循环执行优化流程, 直至达到判定标准.

$$A^{w'} = |(u^{w'} - p^{w'}) / u^{w'}| \quad (14)$$

$$N^{w \sim (w+1)} = A^w + A^{w+1} \quad (15)$$

CFD 的输入和输出之间是典型的非线性关系, 通过设计优化 EnKF 方法, 以 CFD 输出结果追踪逼近期望值为目标, 最终反向推导出 CFD 的输入值.

2 分步优化控制策略

2.1 控制策略

本文采用仿真实验设计与 EnKF 寻优相结合的

方法,构建具有多元参数特点的水动力环境均匀性优化控制策略,用于水下振动台大型流场试验调试方案的前馈指导. 首先,基于流动特性按 Y (横向)和 Z (高度方向)两个维度分类设置仿真模型控制变量,将系统性优化控制做分步处理. 其次,通过设计开关型控制变量,利用枚举列表逐一计算探寻参数组的最优排列组合,实现 Z 维度的流场优化. 最后,引入 EnKF 方法,设计数值型变量之间的逻辑关联,借助迭代调优达成 Y 维度各参数之间的控制平衡和流场的定量稳定控制. 基于以上分步优化方案,可完成 Y 与 Z 两个维度的解耦,避免多参数协同控制过程中的盲目性和随机性,具体流程如图 10 所示.

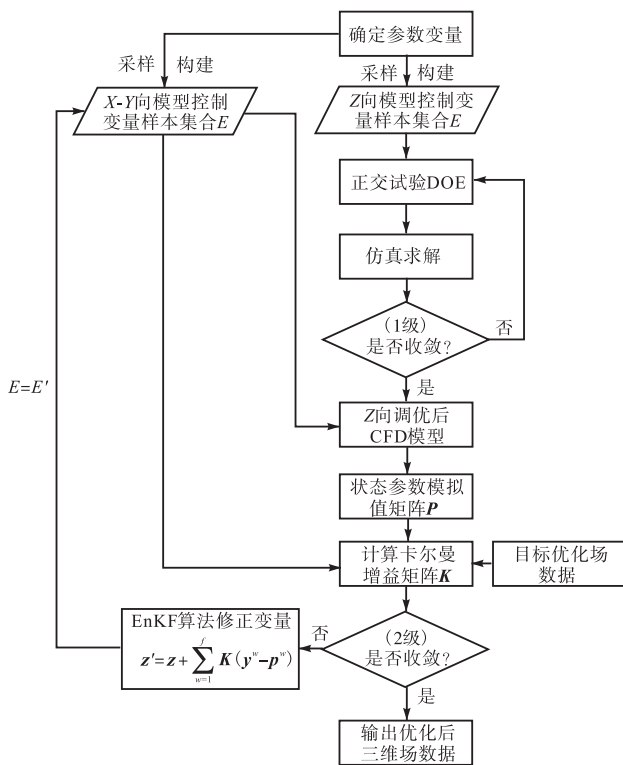


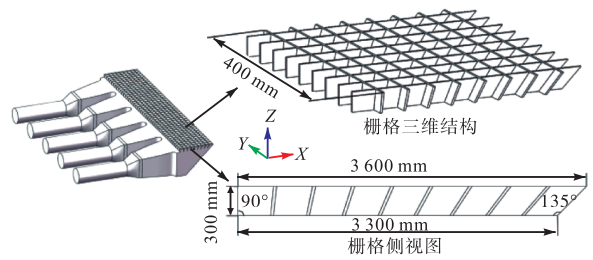
图 10 优化流程

Fig.10 Flow chart of optimization

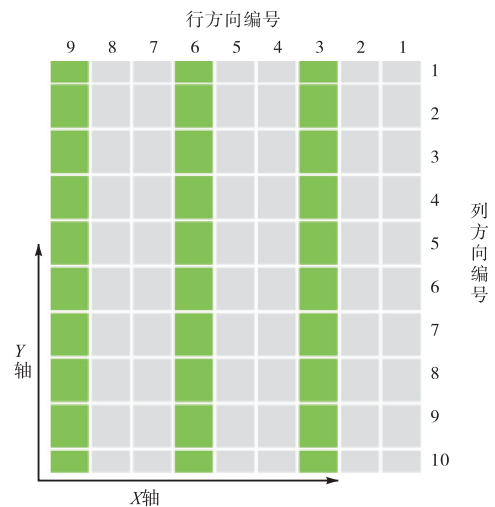
该技术路线主要由 4 个部分组成,分别为高精度 CFD 模拟、多级优化目标设计、EnKF 数据追踪计算以及迭代寻优^[20]. 首先,由 CFD 模拟完成分步优化方案下的流场分析,获取流场仿真数据;其次,设计不同维度下的优化收敛标准,确定用于对标仿真结果的目标场数据;最后,利用数据追踪算法对变量样本、模拟结果和目标场数据进行分析计算,循环迭代修正控制变量参数直至收敛. 以上各部分间的数据交互通过超级计算机脚本控制程序完成,包括超算节点及 CFD 软件调用、提取模拟结果和计算数据、将修正的变量参数返回计算模型等,最终输出数据追踪计算后所得的三维流场分布和相应的输入控制参数.

2.2 流场的纵向优化设计

为实现纵向流动的稳定可控,在盲沟入口与回流口处设置导流格栅,导流格栅如图 11 所示,其中单一流道的格栅沿 X 轴底面长度为 3 300 mm,顶面长度为 3 600 mm, X 轴正方向一侧角度为 135°, X 轴负方向一侧角度为 90°,沿 Y 轴方向宽度为 4 000 mm,沿 Z 轴高度为 300 mm. 格栅的壁厚为 30 mm,在 X 轴方向上将出口分为 9 个部分,每个栅格下底面长度均为 340 mm,上顶面长度均为 370 mm. 在 Y 轴方向上将出口分为 10 个部分,中间 8 个栅格的宽度均为 410 mm,两侧栅格宽度均为 210 mm. 栅格数量共计 90 个,高度均为 300 mm.



(a) 导流格栅结构



(b) 导流格栅编号

图 11 导流格栅结构与编号

Fig.11 Structure and series numbers of diversion grille

通过导流格栅将入流水泵出口分割成 9 行 10 列共计 90 个栅格,按 X 轴负方向将 9 行导流栅格编号设为 1~9,其中 1~3 行设为组 1,4~6 行设为组 2,7~9 行设为组 3. 通过对子域锁扣盖板可进行有效封堵,以调整纵向出流的流动速度、方向和流动布局,从而对纵向流场进行控制. 为确定最优纵向流场,以组为单位,以行号为水平值,开展 3 因素 3 水平仿真试验,如表 4 所示,每组试验只开放 3 行格栅,其余 6 行均保持封堵状态.

表 4 3因素3水平仿真试验

Tab.4 Three-factor three-level simulation test

工况编号	开放行	工况编号	开放行	工况编号	开放行
1	1,4,7	10	2,4,7	19	3,4,7
2	1,4,8	11	2,4,8	20	3,4,8
3	1,4,9	12	2,4,9	21	3,4,9
4	1,5,7	13	2,5,7	22	3,5,7
5	1,5,8	14	2,5,8	23	3,5,8
6	1,5,9	15	2,5,9	24	3,5,9
7	1,6,7	16	2,6,7	25	3,6,7
8	1,6,8	17	2,6,8	26	3,6,8
9	1,6,9	18	2,6,9	27	3,6,9

图 12 给出了部分封堵策略下的流场状态. 高流速区位于前排栅格, 由于前排栅格倾角较小, 而后排倾角较大, 因此放开前排栅格会产生更大的 X 向速度. 后排栅格主要起到分流作用, 并且可以阻止出口以及后方区域产生回流, 实现整体流动的稳定. 提取出口下游 9 m 位置(9 m 以后为试验区)的流速进行流场特性分析. 如图 12(a) 所示, 工况 9 开放了第 1、6、9 行栅格, 在这种前排栅格封堵过多且与后排放开栅格保持较大间距的布局下, 格栅中射出的流体流速相对较低. 在流体向上流动的过程中, 受到剪切力的作用, 其与周围流体快速发生能量交换. 在检测面位置, 有效流动层的厚度达到 3.0 m. 然而, 由于流速过低, 在试验区之前出现了涡流. 如图 12(b) 所示, 工况 20 开放了第 3、4、8 行栅格, 缩小前、后排栅格的间距. 这一布局使得射出的流体流速显著增加, 有效避免了流动过程中因能量耗散所产生的涡流, 从而提高了流动的稳定. 然而, 过高的流速导致充分发展

段的层厚仅为 1.0 m. 相比之下, 工况 18(见图 12(c)) 在避免涡流的同时, 其充分发展段的层厚达到 1.5 m.

综上所述, 工况 18 在整体稳定性和有效流场厚度之间实现了良好的平衡, 故可作为流场纵向优化的首选方案, 并为后续横向优化工作奠定基础.

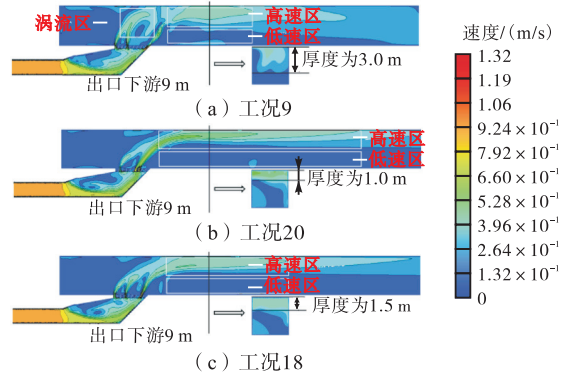


图 12 不同工况条件下的流速分布

Fig.12 Velocity distribution under different working conditions

2.3 流场的横向优化设计

根据第 1.4 节给出的 EnKF 优化方法, 对流场横向均匀性进行优化.

2.3.1 建立变量集合

按照式 (1) ~ (4) 创建用于优化设计的变量集合 E_1 , 见表 5, 其中, $x^i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 是基于先验经验随机给出的 CFD 模型入口流速, $p^i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 是以 x^i 为输入参数模拟得到的监测面的速度.

表 5 样本集合 E_1

Tab.5 Sample set E_1

样本	入口流速/(m/s)					监测面流速/(m/s)				
	x^1	x^2	x^3	x^4	x^5	p^1	p^2	p^3	p^4	p^5
1	1.557	1.496	1.384	1.583	1.480	0.354	0.324	0.358	0.325	0.350
2	1.641	1.502	1.333	1.512	1.412	0.374	0.334	0.334	0.310	0.321
3	1.611	1.485	1.329	1.490	1.385	0.363	0.353	0.341	0.299	0.322
4	1.553	1.421	1.360	1.455	1.412	0.358	0.316	0.341	0.309	0.328
5	1.521	1.402	1.354	1.435	1.388	0.350	0.312	0.330	0.310	0.317
6	1.533	1.467	1.254	1.422	1.324	0.358	0.323	0.339	0.286	0.306
7	1.476	1.361	1.316	1.390	1.356	0.341	0.302	0.329	0.298	0.312
8	1.463	1.341	1.310	1.368	1.317	0.338	0.305	0.324	0.279	0.304
9	1.440	1.322	1.271	1.366	1.300	0.334	0.296	0.321	0.290	0.301
10	1.429	1.300	1.262	1.322	1.287	0.326	0.293	0.312	0.284	0.294

2.3.2 误差协方差分析

根据集合 E_1 中 p^i 的整体分布特性, 将式 (5) 中期望场流速 u^w 的大小设定为 0.3. 在此基础上, 将集合 E_1 中的数据代入式 (7) ~ (9) 中计算, 得到 C_{xp} 和 C_{pp} .

2.3.3 变量的修正

流体流动阻力与不同流道之间的流动剪切力以

及 2 次流掺混扰动效应密切相关^[21]. 鉴于此, 本文在进行迭代优化前, 需先确定式 (11) 中的参数因子 γ , 以表征各流道的流动控制参数受自身流道和相邻流道影响权重的不同.

以集合 E_1 中第 10 组样本的计算结果 p_{10}^i 作为基准, 采用单因素对照法, 建立集合 E_2 . 在集合 E_2 中,

x_j^i 表示第 j 组工况中第 i 个入口的流速. 当 $i = j$ 时, 过模拟得到的 5 个监测面的流速, 见表 6. $x_j^i = 1.4$; 当 $i \neq j$ 时, $x_j^i = 1.3$. p^i 是以 x_j^i 为输入参数通

表 6 单因素对照组集合 E_2
Tab.6 Single-factor control group set E_2

	入口流速/(m/s)					监测面流速/(m/s)				
	x^1	x^2	x^3	x^4	x^5	p^1	p^2	p^3	p^4	p^5
对照组	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	0.274	0.303	0.312	0.298	0.306
试验集工况 1	1.40	1.32	1.32	1.32	1.32	0.310	0.300	0.312	0.287	0.302
试验集工况 2	1.32	1.40	1.32	1.32	1.32	0.318	0.303	0.330	0.289	0.300
试验集工况 3	1.32	1.32	1.40	1.32	1.32	0.262	0.298	0.328	0.298	0.308
试验集工况 4	1.32	1.32	1.32	1.40	1.32	0.274	0.302	0.321	0.304	0.313
试验集工况 5	1.32	1.32	1.32	1.32	1.40	0.277	0.299	0.307	0.296	0.307

将集合 E_2 中数据代入式(10)和(11), 计算得到监测面流速变化比例 D 和影响权重因子 γ , 用以对后续的集合数据的更新做修订.

2.3.4 循环迭代收敛

将集合 E_1 的数据代入式(7)、(8)、(9)和(12)进行迭代计算, 具体迭代过程见表 7. 在计算过程中, 以式(14)和(15)所设定的条件作为收敛性的判断准则. 通过 54 步迭代计算后, 所有 A^w 的值均低于 2%, 且 $N^{w-(w+1)}$ 的值低于 3%, 表明计算已达到收敛状态.

为减低 EnKF 优化的计算成本并缩短迭代所需时间, 本文在式(12)中引入表观松弛因子 G . 如表 8 所示, 随着 G 取值的增加, 迭代次数从 54 次显著减少至 4 次, 迭代效率提升了 92.6%, 这表明在合理范围内增大 G 取值可有效减少优化收敛所需的迭代次数, 进而大幅提升优化速度. 然而, 若 G 取值选取不当, 一味单调递增则可能导致计算发散(如 G 取值为 100 时), 最终使优化迭代过程失败.

表 7 迭代过程中误差绝对值比率 A^w 的变化
Tab.7 Changes in absolute error ratio A^w during iteration process

迭代次数	误差绝对值比率 $A^w/\%$					迭代次数	误差绝对值比率 $A^w/\%$				
	A^1	A^2	A^3	A^4	A^5		A^1	A^2	A^3	A^4	A^5
1	9.49	-2.08	1.88	-5.10	-3.11	28	8.34	4.13	-0.89	-3.68	-1.34
2	9.33	-1.01	3.20	-6.63	-1.80	29	9.25	-0.32	-0.85	-2.24	-3.46
3	9.99	-3.74	2.35	-5.64	-2.29	30	8.01	0.38	3.93	-1.57	1.14
4	7.80	1.09	2.37	-7.22	-0.88	31	6.19	-0.50	0.17	-1.59	0.30
5	8.25	0.97	2.46	-7.12	-1.47	32	2.96	2.31	-4.01	-3.29	-0.66
6	9.92	-2.49	3.35	-4.96	-1.75	33	6.71	-1.14	2.29	-4.65	-0.37
7	7.14	-0.17	3.07	-8.08	-0.63	34	6.84	0.11	1.21	-2.43	-4.57
8	9.57	-2.38	3.13	-5.14	-1.94	35	6.24	-3.02	2.21	-0.15	-1.08
9	9.12	-0.86	2.06	-7.36	-0.90	36	8.15	0.28	-1.70	-0.54	-2.10
10	7.43	-5.67	1.97	-7.64	-1.51	37	8.14	3.52	1.49	-0.77	-0.71
11	5.53	-2.83	2.01	-6.07	-2.49	38	3.62	3.11	0.54	-6.04	1.74
12	8.68	-1.38	0.92	-5.07	-1.86	39	5.93	0.66	-0.28	-1.71	1.93
13	7.07	0	1.42	-5.84	-1.56	40	6.18	0.47	1.97	1.78	0.68
14	7.35	0.34	1.39	-5.31	-0.94	41	8.01	-2.64	0.13	-3.40	0.74
15	7.91	-3.57	0.18	-1.39	-0.39	42	6.45	-5.28	-1.28	-2.41	-0.78
16	8.74	-0.10	3.93	-2.58	0.47	43	6.72	-1.85	-1.56	-5.61	-0.41
17	8.11	4.07	3.09	-0.92	-2.50	44	8.12	-1.49	3.13	-2.69	-1.26
18	7.29	0.85	-2.45	-2.58	-0.98	45	3.69	-3.61	-0.04	-3.37	-0.17
19	5.62	-3.22	0.04	-1.25	-1.79	46	6.82	-0.02	-0.80	-3.29	-1.92
20	5.64	-1.05	1.19	4.34	-0.27	47	5.16	-1.74	1.79	-4.54	-0.23
21	5.19	-2.94	3.91	0.66	-0.47	48	8.50	-0.55	4.46	-2.57	-0.03
22	5.86	-1.30	1.44	-2.51	1.36	49	5.17	1.72	3.31	-3.22	-1.50
23	7.42	-0.70	2.37	2.18	-2.44	50	7.50	-2.90	-1.41	0.11	-3.52
24	2.83	3.74	-1.38	-5.38	3.44	51	6.22	-4.20	-0.04	-3.47	-2.68
25	0.67	-1.40	1.20	-3.58	-0.10	52	4.46	4.74	2.32	-6.06	-1.31
26	8.51	-3.32	0.74	-2.20	-2.26	53	5.25	-1.71	1.85	-0.38	-3.26
27	7.44	-3.20	1.03	1.62	-1.90	54	0.72	1.61	-1.37	1.25	-0.86

表 8 不同表观松弛因子 G 条件下迭代次数对比

Tab.8 Comparison of iteration times under different values of characterization relaxation factor G

序号	G	迭代次数	监测面流速/(m/s)				
			p^1	p^2	p^3	p^4	p^5
1	1	54	0.302	0.305	0.296	0.304	0.297
2	5	19	0.295	0.298	0.298	0.298	0.302
3	10	12	0.295	0.302	0.300	0.297	0.305
4	20	7	0.295	0.298	0.302	0.294	0.304
5	50	4	0.294	0.300	0.302	0.293	0.307
6	100	—	—	—	—	—	—

经过格栅封堵纵向流场优化和基于 EnKF 算法的横向流场优化,流场整体达到均匀稳定,如图 13 ~ 15 所示.

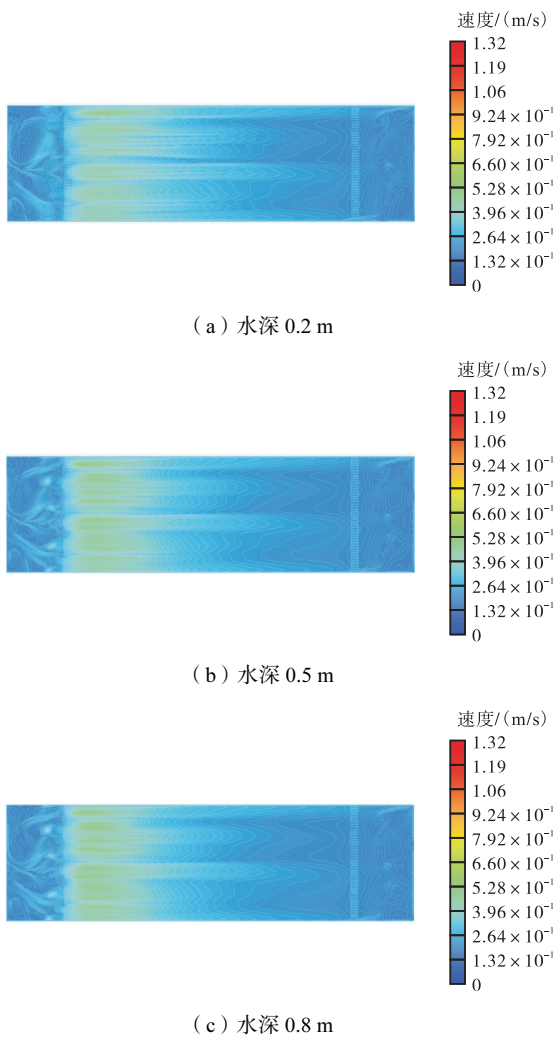


图 13 不同水深处的速度云图

Fig.13 Velocity contour maps at different water depths

表 9 为地震大装置水动力场最终的试验检测结果,设计指标具体包括:充分发展段小于 9 m、稳定流动段大于 15 m、稳定段平均流速偏差小于 10% 和稳定段时均流速沿程偏差小于 10%. 图 13 分别给出了不同水深处(0.2 m、0.5 m 和 0.8 m)3 个截面的流速水

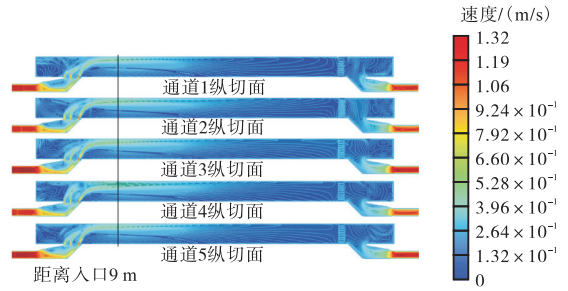


图 14 不同通道纵切面的速度云图

Fig.14 Velocity contour maps at different longitudinal cross-sections of channels



图 15 不同垂直截面的速度云图

Fig.15 Velocity contour maps at different vertical cross-sections

表 9 水动力场流速监测数据

Tab.9 Hydrodynamic field flow velocity monitoring data

测试方法	平均流速/(m/s)
本文计算	0.3(各流道偏差小于 2%)
走航式 ADCP	0.313

平分布,5 个监控面最高流速为 0.305 m/s,最低流速为 0.297 m/s,横向速度差值小于 2%. 图 14 为 1~5 通道的纵切面速度分布,各通道在距离入口 9 m 截面处均达到充分发展阶段,具有较好的一致性. 图 15 为距离入口 23 m、30 m 和 38 m 处的 3 个垂直截面的速度分布,在 15 m 长的稳定流动段内 5 个监控面内平均流速由 0.282 m/s 降低到 0.264 m/s,沿程流速衰减 6.3%,以上数据与表 1 中地震大装置的指标相符合.

综上所述,基于 CFD 和 EnKF 方法的分步调优控制策略在国家大型地震工程模拟研究设施水下振动台流场均匀性控制方面达到了良好效果.

3 结论

本文以国家大型地震工程模拟研究设施水下振动台大型流场为研究对象,基于高保真 CFD 数值模拟和 EnKF 优化算法,提出分步调优的控制策略,实现流场的均匀性控制,得出如下结论.

(1) 以导流格栅的分区控制和入流水泵的流速调整为参数,运用 CFD 数值模拟与 EnKF 参数寻优

相结合的方法,形成了 1 套完整可行的流场均匀性控制策略。

(2) 在纵向调优中,格栅封堵的目标主要是控制格栅流道的流速以产生均匀的目标流场。前排栅格流速低而后排栅格流速高时,出口处易产生漩涡,使流场稳定性变差。前排栅格流速高而后排栅格流速低时,高流速区集中在表层,使得有效流场的厚度偏小。

(3) 随着表现松弛因子 G 的增大,EnKF 的迭代收敛过程显著加速。然而,过大的 G 取值会降低迭代过程的稳定性,并可能导致迭代发散,目前本研究仅验证了 G 取值对收敛速度的影响规律,但未建立普适性的选取原则或自适应策略,建议在后期应用时谨慎选取。

(4) 本文以地震大装置水动力环境的均匀稳定控制为例展开了讨论与分析。经过优化,不同通道内部的速度差值小于 2%,稳定流动段内沿程流速衰减低于 10%。

(5) 基于 CFD 数值模拟与 EnKF 参数寻优相结合的分步优化方法有效加强了多控制参数条件下系统综合调控的流程性与处理精度。然而,受限当前计算环境的模拟速度,其主要应用场景为试验开始前的虚拟方案设计以及为多参数的系统调控提供前馈指导,并不适用于装置运行过程中的实时调整。

参考文献:

- [1] 俞聿修, 史向宏. 不规则波作用于群桩的水动力系数[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 138-147.
Yu Yuxiu, Shi Xianghong. The hydrodynamic coefficient of irregular waves acting on pile groups[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(2): 138-147(in Chinese).
- [2] 云高杰, 柳春光. 某深水大跨桥梁水下振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(12): 59-66, 177.
Yun Gaojie, Liu Chunguang. A study on the underwater shaking table test of a certain deep-water long-span bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12): 59-66, 177(in Chinese).
- [3] 姜忻良, 邓振丹, 韩 阳, 等. 大比例缩尺模型振动台试验及有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(2): 109-113.
Jiang Xinliang, Deng Zhendan, Han Yang, et al. Large-scale shaking table test and finite element model for Tianjin Library[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(2): 109-113(in Chinese).
- [4] 徐龙河, 单 旭, 吕 杨, 等. 钢框架-剪力墙模型结构振动台试验与损伤分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(12): 1127-1132.
Xu Longhe, Shan Xu, Lü Yang, et al. Shaking table tests and damage analysis of a steel frame-shear wall model structure[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(12): 1127-1132(in Chinese).
- [5] 邵长江, 肖正豪, 漆启明, 等. 摩擦摆支座隔震铁路连续梁桥振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 292-298, 306.
Shao Changjiang, Xiao Zhenghao, Qi Qiming, et al. Shaking table test on a railway continuous girder bridge with friction pendulum bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 292-298, 306(in Chinese).
- [6] 高 营, 李忠献, 李 宁. 基于 RSAPS 平台的钢筋混凝土墩柱损伤分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(4): 345-350.
Gao Ying, Li Zhongxian, Li Ning. Damage analysis of reinforced concrete members based on RSAPS[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2017, 50(4): 345-350(in Chinese).
- [7] 徐炳伟, 姜忻良. 大型复杂结构-桩-土振动台模型试验土箱设计[J]. 天津大学学报, 2010, 43(10): 912-918.
Xu Bingwei, Jiang Xinliang. Soil chamber design of shaking test table for large-scale soil-pile-complex structure interaction[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(10): 912-918(in Chinese).
- [8] 高会会, 裴向军, 崔圣华, 等. 大型振动台试验饱水白云岩相似材料配比研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(2): 71-76.
Gao Huihui, Pei Xiangjun, Cui Shenghua, et al. Study on the similar materials ratio of saturated dolomite in large shaking table test[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(2): 71-76(in Chinese).
- [9] 白志刚, 魏茂兴. 基于时域模型的一种新的波浪能计算方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(6): 491-497.
Bai Zhigang, Wei Maoxing. A new method for calculating wave power based on time domain model[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2014, 47(6): 491-497(in Chinese).
- [10] 王 磊, 吕忠达, 王 飞, 等. 深水大直径桥墩水下振动台试验研究[J]. 桥梁建设, 2025, 55(1): 110-116.

- Wang Lei, Lü Zhongda, Wang Fei, et al. Underwater shaking table test of deep-water large diameter pier[J]. *Bridge Construction*, 2025, 55(1): 110-116(in Chinese).
- [11] 郑人逢, 牛志伟. 水下振动台竖向动水附加质量特征与机理试验研究[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(1): 134-142.
Zheng Renfeng, Niu Zhiwei. Experimental study on characteristics and mechanism of dynamic vertical water added mass of underwater shaking table[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(1): 134-142(in Chinese).
- [12] 吴 堃. 地震作用下水-桥墩相互作用机理及水下振动台试验协调相似律研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2019.
Wu Kun. Study on Mechanism of Water-Pier Interaction Under Earthquake Excitations and Coordinative Similitude Law for Underwater Shaking Table Tests[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2019(in Chinese).
- [13] 常文浩. 基于协调相似律的水下振动台试验挂板缩尺模型方法及其应用[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2021.
Chang Wenhao. Scale Model Design Using Attached Plates and Its Application for Underwater Shaking Table Test Based on Coordinative Similitude Law[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2021(in Chinese).
- [14] 赵洪洋, 贺治国, 林颖典, 等. 海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验项目建设及教学[J]. *实验科学与技术*, 2025, 23(1): 130-136.
Zhao Hongyang, He Zhiguo, Lin Yingdian, et al. Construction and teaching of the virtual simulation experiment project for fluid flow around ocean engineering environment[J]. *Experimental Science and Technology*, 2025, 23(1): 130-136(in Chinese).
- [15] 韩冰洁, 扎西才让, 谭 理. 基于 UAV 与 ADCP 勘测地形数据的河道高精度模拟应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2024, 47(8): 186-188, 191.
Han Bingjie, Zhaxi Cairang, Tan Li. High-accuracy simulation of river channels based on UAV and ADCP photogrammetric topographic data[J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2024, 47(8): 186-188, 191(in Chinese).
- [16] 赵爱博, 徐大伟, 奚子惠, 等. 船行波对 H-ADCP 影响分析研究[J]. *海洋技术学报*, 2024, 43(1): 47-54.
Zhao Aibo, Xu Dawei, Xi Zihui, et al. Influence analysis of ship waves on H-ADCP [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2024, 43(1): 47-54(in Chinese).
- [17] 程霄翔, 赵 林, 葛耀君. 高超临界雷诺数区间内二维圆柱绕流的实测研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 214701.
Cheng Xiaoxiang, Zhao Lin, Ge Yaojun. Field measurements on flow past a circular cylinder in transcritical Reynolds number regime[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 214701(in Chinese).
- [18] Ronald L P. *Incompressible Flow*[M]. New York: Wiley Inter-science, 1984.
- [19] Geir E. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [20] 钱玮昕, 唐 铭, 董建锴, 等. 基于 CFD-EnKF 数据同化的室内多物理场精确预测技术的初步探讨与应用[J]. *建筑科学*, 2022, 38(10): 236-242, 259.
Qian Weixin, Tang Ming, Dong Jiankai, et al. Discussion and application of indoor multiphysics accurate prediction technology based on CFD-EnKF data assimilation[J]. *Building Science*, 2022, 38(10): 236-242, 259(in Chinese).
- [21] 陈 群, 任建勋, 过增元. 流体流动场协同原理及其在减阻中的应用[J]. *科学通报*, 2008, 53(4): 489-492.
Chen Qun, Ren Jianxun, Guo Zengyuan. The principle of fluid flow field synergy and its application in drag reduction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(4): 489-492(in Chinese).

(责任编辑:武立有)