



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117094219 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 21

(21) 申请号 202311017964.2

G06F 113/08 (2020.01)

(22) 申请日 2023.08.14

G06F 119/14 (2020.01)

G06F 119/10 (2020.01)

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 杜特专 王永九 黄仁芳 黄剑霖 王静竹 王一伟

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 席卷

(51) Int. Cl.

G06F 30/27 (2020.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 30/15 (2020.01)

G06N 3/08 (2023.01)

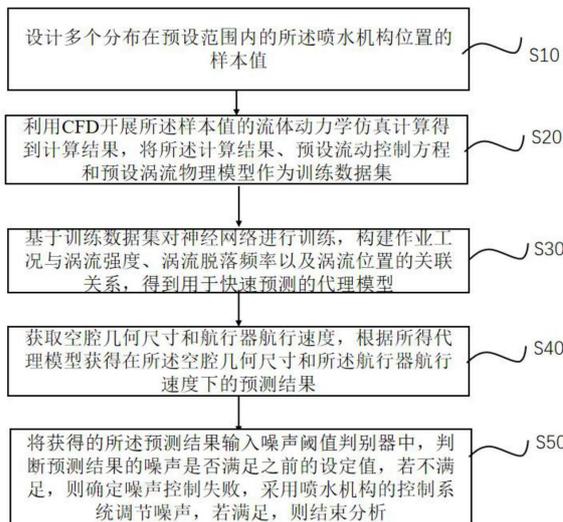
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质

(57) 摘要

本发明涉及了一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质。一种水下空腔噪声控制方法,用于空腔噪声控制装置中,包括:设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值;利用CFD开展流体动力学仿真计算得到计算结果,将计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集;基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型;根据所得代理模型获得在空腔几何尺寸和航行器航行速度下的预测结果;判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则用喷水机构的控制系统调节噪声。本发明提高降低水下航行器空腔噪声的灵活性和有效性。



1. 一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,用于空腔噪声控制装置中,所述空腔噪声控制装置包括一空腔、设置于所述空腔一侧的喷水机构和所述喷水机构的控制系统,包括:
设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值;

利用CFD开展所述样本值的流体动力学仿真计算得到计算结果,将所述计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集;

基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型;

获取空腔几何尺寸和航行器航行速度,根据所得代理模型获得在所述空腔几何尺寸和所述航行器航行速度下的预测结果,其中,所述预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置;

将获得的所述预测结果输入噪声阈值判别器中,判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则确定噪声控制失败,采用喷水机构的控制系统调节噪声,若满足,则结束分析。

2. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,所述确定噪声控制失败后还包括:将获取的预测结果反馈喷水机构的控制系统,通过该系统来调节喷水机构的喷水口张角、喷水速度和机构倾角;

对调节后流场的涡流信息利用所述噪声阈值判别器做进一步的判断,如果不满足要求,则需要下一轮的调节,直至满足所述设定值。

3. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,所述判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,具体包括:所述噪声阈值判别器基于所述预测结果判断噪声主频的幅值,判断预测结果的噪声主频的幅值是否满足之前的设定值。

4. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,所述预设流动控制方程主要包括连续性方程、动量守恒方程以及VOF模型的相分数方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho_m \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu_m \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right] \right\}$$

式中, \mathbf{U} 表示速度矢量; p 表示当地压力; \mathbf{I} 表示单位张量; μ_m 表示混合物粘度, $\mu_m = (1 - \alpha_a) \mu_1 + \alpha_a \mu_a$; ρ_m 表示混合物密度, $\rho_m = (1 - \alpha_a) \rho_1 + \alpha_a \rho_a$; μ_1 表示液体的粘度、 μ_a 表示气体的粘度、 ρ_1 表示液体的密度、 ρ_a 表示气体的密度、 α_a 表示气体的体积分;

VOF模型的相分数方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = 0$$

式中, α 表示计算域内各网格单元的相分数;

所述预设涡流物理模型,利用Q准则对涡进行识别和判断,

$$Q = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right]$$

式中, u 表示 x 方向的速度、 v 表示 y 方向的速度、 w 表示 z 方向的速度。

5. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,所述基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型,具体包括:

网络搭建过程中采用深度神经算子神经网络:网络输入 u 基于自变量 \vec{x} 控制,输入 \vec{y} 于另一自变量控制,并使用分支网Branch net和主干网Trunk net分别表示所述网络输入 u 经过流形 G 作用后在位置 \vec{y} 处的值,其统一公式得到:

$$G(u)(\vec{y}) \approx \sum_{k=1}^n b_k(u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)) t_k(\vec{y})$$

其中, $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)$ 为用于训练算子 $G(u)$ 的函数组,自变量 \vec{x} 为空腔流速及其他监测数据, m 为函数组数据的维度, \vec{y} 为算子 $G(u)(\vec{y})$ 的自变量, b_k 为分支网Branch net的变换, t_k 为主干网Trunknet的变换。

两组数据 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 和 \vec{y} 作为模型的输入,网络需要两个部分(分支网Branch net和主干网Trunk net)分别处理,其中主干网Trunk net以 \vec{y} 作为输入,输出 $t_k(\vec{y})$,分支网Branch net以 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 作为输入,输出 $b_k(u(\vec{x}))$,最后将两个网络结果相乘得到目标学习的算子 $G(u)(\vec{y})$;

深度学习神经算子的branch net是由编码算子和逼近算子复合得到,加入使用深度学习算子 N 来逼近函数 G ,定义其中的误差函数,通过考虑概率测度定义L2范数:

$$\hat{\varepsilon} = \left(\int_X \int_U |G(u)(y) - N(u)(y)|^2 dy d\mu(u) \right)^{1/2}$$

网络的训练过程为:

网络的训练将所述计算结果和所述预设流动控制方程得到的运动数据和对应监测数据作为自变量 \vec{x} 输入,将所述预设涡流物理模型的涡流物理特性参数作为自变量 \vec{y} 输入,输出得到涡流特性与空间坐标,形成一个用于空腔涡流物理特性参数智能识别的深度算子;

将所述航行器航行速度、空腔几何尺寸和空腔涡流的深度算子神经网络输出作为输入数据,输出得到涡流强度、脱落频率与空间位置,训练以形成用于快速预测的代理模型。

6. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于,空腔噪声控制装置还包括位于所述空腔一侧壁的吸水系统、位于所述空腔另一侧壁的喷水机构、喷水管道、管道控制阀和喷水机构控制系统;其中,所述吸水系统通过所述喷水管道和喷水机构连接,所述管道控制阀和所述喷水机构控制系统安装在所述喷水管道中。

7. 根据权利要求1所述的一种水下空腔噪声控制方法,其特征在于:所述喷水机构位置样本值为 x/L ,其中, x 为喷水机构与空腔底部的距离, L 为空腔顶部到底部的距离;所述设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值,具体为:设计预设数量分布在预设范围内的 x/L 样本值,其中,所述样本值取值范围在 $[0.2, 0.8]$ 之间。

8. 一种水下空腔噪声控制装置,其特征在于:用于空腔噪声控制装置,所述空腔噪声控制装置包括一空腔、设置于所述空腔一侧的喷水机构和所述喷水机构的控制系统,包括:

样本采集模块,用于设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值;

仿真模块,用于利用CFD开展流体动力学仿真计算得到计算结果,将所述计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集;

模型生成模块,用于基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型;

预测模块,用于获取空腔几何尺寸和航行器航行速度,根据所得代理模型获得在所述空腔几何尺寸和所述航行器航行速度下的预测结果,其中,所述预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置的信息;

噪声阈值判别模块,将获得的所述预测结果,判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则确定噪声控制失败,采用所述喷水机构的控制系统调节噪声,若满足,则结束分析。

9. 根据权利要求8所述的一种水下空腔噪声控制装置,其特征在于:所述空腔噪声控制装置还包括:位于所述空腔一侧壁的吸水系统、位于所述空腔另一侧壁的喷水机构、喷水管道、管道控制阀和喷水机构控制系统;其中,所述吸水系统通过所述喷水管道和喷水机构连接,所述管道控制阀和所述喷水机构控制系统安装在所述喷水管道中。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于:存储介质中存储有指令,所述指令运行时执行如权利要求1-7中任一项所述的一种水下空腔噪声控制方法。

一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质

技术领域

[0001] 本发明涉及传感器技术领域。尤其涉及一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质。

背景技术

[0002] 海洋作为主要边疆和走向世界海域的必经战略通道,复杂的海洋环境和复杂化的战略任务需求对新一代水下航行器的性能提出了更高的要求。而如何提高水下航行器的隐蔽性,又成为了发展新一代水下航行装备和武器的研究重点。因此,不断强化水下航行器的隐蔽性已经成为提高海洋装备性能、海军综合突防能力的重要途径。

[0003] 空腔广泛存在于水下航行器的开孔部位,当航行器表面湍流边界层流经这些开孔时,在空腔口形成流动剪切层,剪切层会空腔口的导边、随边以及空腔内流体的相互作用,会在腔口形成较为剧烈的自持振荡,引起较大的速度和压力脉动,进而产生较为强烈的空腔噪声,严重影响水下航行器的隐蔽性。

[0004] 现有的空腔噪声控制方法主要是在空腔前安装扰流装置,改变空腔前缘处的湍流剪切层,从而实现空腔噪声的抑制,如中国专利文献公开的CN112699470A、CN114822464A等专利技术,但这些装置的安装位置与尺寸与来流速度紧密相关,很难实现在不同航速下的灵活改变。

[0005] 如何实现在不同航速下的灵活有效的抑制涡流与空腔的相互作用,以降低水下航行器空腔噪声,是亟需解决的问题。

发明内容

[0006] 本发明提供一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质。以解决在不同航速下灵活有效的抑制涡流与空腔的相互作用,以降低水下航行器空腔噪声的问题。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供一种水下空腔噪声控制方法,用于空腔噪声控制装置中,所述空腔噪声控制装置包括一空腔、设置于所述空腔一侧的喷水机构和所述喷水机构的控制系统,包括:

[0008] 设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值;

[0009] 利用CFD(Computational Fluid Dynamics,计算流体动力学)开展流体动力学仿真计算得到计算结果,将所述计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集;

[0010] 基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型;

[0011] 获取空腔几何尺寸和航行器航行速度,根据所得代理模型获得在所述空腔几何尺寸和所述航行器航行速度下的预测结果,其中,所述预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置的信息;

[0012] 将获得的所述预测结果输入噪声阈值判别器中,判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则确定噪声控制失败,采用所述喷水机构的控制系统调节噪声,若

满足,则结束分析。

[0013] 优选的,所述确定噪声控制失败后还包括:将获取的预测结果反馈喷水机构的控制系统,通过该系统来调节喷水机构的喷水口张角、喷水速度和机构倾角;

[0014] 对调节后流场的涡流信息利用所述噪声阈值判别器做进一步的判断,如果不满足要求,则需要下一轮的调节,直至满足所述设定值。

[0015] 优选的,所述判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,具体包括:所述噪声阈值判别器基于所述预测结果判断噪声主频的幅值,判断预测结果的噪声主频的幅值是否满足之前的设定值。

[0016] 优选的,所述预设流动控制方程主要包括连续性方程、动量守恒方程以及VOF模型的相分数方程:

$$[0017] \quad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U}) = 0$$

$$[0018] \quad \frac{\partial (\rho_m \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu_m \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right] \right\}$$

[0019] 式中,U表示速度矢量;p表示当地压力;I表示单位张量; μ_m 表示混合物粘度, $\mu_m = (1 - \alpha_a) \mu_l + \alpha_a \mu_a$; ρ_m 表示混合物密度, $\rho_m = (1 - \alpha_a) \rho_l + \alpha_a \rho_a$; μ_l 和 μ_a 分别表示液体和气体的粘度; ρ_l 和 ρ_a 分别表示液体和气体的密度; α_a 表示气体的体积分数。

[0020] VOF模型的相分数方程为:

$$[0021] \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = 0$$

[0022] 式中, α 表示计算域内各网格单元的相分数。

[0023] 所述预设涡流物理模型,利用Q准则对涡进行识别和判断,

$$[0024] \quad Q = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right]$$

[0025] 式中,u表示x方向的速度、v表示y方向的速度,w表示z方向的速度。

[0026] 优选的,所述基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型,具体包括:

[0027] 网络搭建过程中采用深度神经算子神经网络:网络输入u基于自变量 \vec{x} 控制,输入 \vec{y} 于另一自变量控制,并使用分支网Branchnet和主干网Trunknet分别表示所述网络输入u经过流形G作用后在位置 \vec{y} 处的值,其统一公式得到:

$$[0028] \quad G(u)(\vec{y}) \approx \sum_{k=1}^n b_k(u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)) t_k(\vec{y})$$

[0029] 其中, $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)$ 为用于训练算子G(u)的函数组,自变量 \vec{x} 为空腔流速及其他监测数据,m为该数据的维度, \vec{y} 为算子 $G(u)(\vec{y})$ 的自变量, b_k 为分支网Branchnet的变换, t_k 为主干网Trunknet的变换。

[0030] 两组数据 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 和 \vec{y} 作为模型的输入,网络需要两个部分(分支网Branch net

和主干网Trunknet) 分别处理,其中主干网Trunknet以 \vec{y} 作为输入,输出 $t_k(\vec{y})$,分支网Branchnet以 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 作为输入,输出 $b_k(u(\vec{x}))$,最后将两个网络结果相乘得到目标学习的算子。

[0031] 深度学习神经算子的bruchnet是由编码算子和逼近算子复合得到,加入使用深度学习算子N来逼近函数G,定义其中的误差函数,通过考虑概率测度定义L2范数:

$$[0032] \quad \hat{\varepsilon} = \left(\int_x \int_U |G(u)(y) - N(u)(y)|^2 dy d\mu(u) \right)^{1/2}$$

[0033] 网络的训练过程为:

[0034] 网络的训练将所述计算结果和所述预设流动控制方程得到的运动数据和对应监测数据作为自变量 \vec{x} 输入,将所述预设涡流物理模型的涡流物理特性参数作为自变量 \vec{y} 输入,输出得到涡流特性与空间坐标,形成一个用于空腔涡流物理特性参数智能识别的深度算子;

[0035] 将所述航行器航行速度、空腔几何尺寸和空腔涡流的深度算子神经网络输出作为输入数据,输出得到涡流强度、脱落频率与空间位置,训练以形成用于快速预测的代理模型。

[0036] 优选的,空腔噪声控制装置还包括位于所述空腔一侧壁的吸水系统、位于所述空腔另一侧壁的喷水机构、喷水管道、管道控制阀和喷水机构控制系统;其中,所述吸水系统通过所述喷水管道和喷水机构连接,所述管道控制阀和所述喷水机构控制系统安装在所述喷水管道中。

[0037] 优选的,喷水机构位置样本值为 x/L ,其中, x 为喷水机构与空腔底部的距离, L 为空腔顶部到底部的距离;所述设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值,具体为:设计预设数量分布在预设范围内的 x/L 样本值,其中,所述样本值取值范围在 $[0.2, 0.8]$ 之间。

[0038] 第二方面,本发明还涉及一种水下空腔噪声控制装置,用于空腔噪声控制装置,所述空腔噪声控制装置包括一空腔、设置于所述空腔一侧的喷水机构和所述喷水机构的控制系统,包括:

[0039] 样本采集模块,用于设计预设数量分布在预设范围内的 x/L 样本值,其中, x 为喷水机构与空腔底部的距离, L 为空腔顶部到底部的距离;

[0040] 仿真模块,用于利用CFD开展流体动力学仿真计算得到计算结果,将所述计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集;

[0041] 模型生成模块,用于基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型;

[0042] 预测模块,用于获取空腔几何尺寸和航行器航行速度,根据所得代理模型获得在所述空腔几何尺寸和所述航行器航行速度下的预测结果,其中,所述预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置的信息;

[0043] 噪声阈值判别模块,将获得的所述预测结果,判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则确定噪声控制失败,采用所述喷水机构的控制系统调节噪声,若满足,则结束分析。

[0044] 优选的,空腔噪声控制装置还包括:位于所述空腔一侧壁的吸水系统、位于所述空腔另一侧壁的喷水机构、喷水管道、管道控制阀和喷水机构控制系统;其中,所述吸水系统通过所述喷水管道和喷水机构连接,所述管道控制阀和所述喷水机构控制系统安装在所述喷水管道中。

[0045] 第三方面,本发明还涉及一种计算机可读存储介质,存储介质中存储有指令,所述指令运行时执行上述的一种水下空腔噪声控制方法。

[0046] 本发明涉及的一种水下空腔噪声控制方法、装置及介质,相比于现有技术,有以下有益效果:

[0047] 基于训练数据集对神经网络进行训练得到快速预测的代理模型,通过已训练完成的参数集实现快速输出预测结果,根据输入条件快速得到当前条件下的空腔涡流物理特性参数,用于水下空腔涡流强度、脱落频率和空间位置的快速预报,为空腔噪声的控制提供基础,并通过喷水射流的方式调整达到降噪效果,以提高不同航速和空腔尺寸下降低水下航行器空腔噪声的灵活性和有效性。

附图说明

[0048] 图1为本发明实施例一中一种水下空腔噪声控制方法的方法流程图一;

[0049] 图2为本发明实施例一中一种水下空腔噪声控制方法的方法流程图二;

[0050] 图3为本发明实施例一中一种水下空腔噪声控制方法的空腔噪声控制装置;

[0051] 图4为本发明实施例二中一种水下空腔噪声控制装置的结构示意图;

[0052] 图5为本发明实施例一和二中深度神经算子神经网络获取目标学习算子的网络结构图。

具体实施方式

[0053] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。可以理解的是,此处所描述的具体实施例仅仅用于解释本发明,而非对本发明的限定。另外还需要说明的是,为了便于描述,附图中仅示出了与本发明相关的部分而非全部结构。

[0054] 实施例一

[0055] 一种水下空腔噪声控制方法,请参阅图1-3、5,用于空腔噪声控制装置,空腔噪声控制装置包括一空腔1、设置于空腔1一侧的喷水机构6和喷水机构控制系统5,包括:

[0056] S10:设计多个分布在预设范围内的喷水机构位置的样本值。

[0057] 本实施中,喷水机构位置样本值为 x/L ,其中, x 为喷水机构与空腔底部的距离, L 为空腔顶部到底部的距离;设计多个分布在预设范围内的喷水机构位置的样本值,具体为:设计预设数量分布在预设范围内的 x/L 样本值,其中,样本值取值范围在 $[0.2, 0.8]$ 之间。空腔噪声控制装置主要包括:空腔1、吸水系统2、管道控制阀3、喷水管道4、喷水机构控制系统5和喷水机构6。吸水系统2位于空腔一侧壁,喷水机构6位于空腔1另一侧壁,吸水系统2通过喷水管道4和喷水机构连接,管道控制阀3和喷水机构控制系统5安装在喷水管道4中。当来流沿着图示方向从左至右流动时,会在空腔的腔口处产生剪切层,并形成涡流,进而形成较为强烈的空腔噪声。其中,管道控制阀主要是用来控制管道中水的流量以及装置的运行与停止,喷水机构控制系统5用来调节喷水机构喷水口张角 θ_2 、喷水速度 v 和机构倾角 θ_1 。

[0058] 在具体实施过程中,喷水机构6的位置对涡流抑制效果和空腔噪声控制效果具有重要影响。因此需要给出喷水机构6的具体安装位置,从而实现空腔噪声的最优控制。这其中主要优化的参数是喷水机构与空腔底部的距离参数 x ,最终优化的目标是能够实现对空腔噪声降噪75%以上。

[0059] 选取一定范围内的设计变量做为输入变量,本实施例中,将 x/L 的范围初步设计在 $[0.2, 0.8]$ 之间,并将样本值均匀的分布在设计范围之内,这里可以考虑50个样本分布。

[0060] S20:利用CFD开展样本值的流体动力学仿真计算得到计算结果,将计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集。

[0061] 本实施例中,预设流动控制方程主要包括连续性方程、动量守恒方程以及VOF模型的相分数方程:

$$[0062] \quad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U}) = 0$$

$$[0063] \quad \frac{\partial (\rho_m \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu_m \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right] \right\}$$

[0064] 式中, \mathbf{U} 表示速度矢量; p 表示当地压力; \mathbf{I} 表示单位张量; μ_m 表示混合物粘度, $\mu_m = (1 - \alpha_a) \mu_l + \alpha_a \mu_a$; ρ_m 表示混合物密度, $\rho_m = (1 - \alpha_a) \rho_l + \alpha_a \rho_a$; μ_l 和 μ_a 分别表示液体和气体的粘度; ρ_l 和 ρ_a 分别表示液体和气体的密度; α_a 表示气体的体积分数;

[0065] VOF模型的相分数方程为:

$$[0066] \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = 0$$

[0067] 式中, α 表示计算域内各网格单元的相分数;

[0068] 所述预设涡流物理模型,利用 Q 准则对涡进行识别和判断,

$$[0069] \quad Q = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right]$$

[0070] 式中, u 表示 x 方向的速度、 v 表示 y 方向的速度, w 表示 z 方向的速度。

[0071] 根据上述实例,根据实际的工程经验,将 x/L 的范围初步设计在 $[0.2, 0.8]$ 之间,并将样本值均匀的分布在设计范围之内,这里我们考虑50个样本分布。通过CFD仿真计算和实验验证,对不同位置下空腔降噪效果进行对比,发现 x/L 参数范围在 $[0.45, 0.55]$ 之间的布置位置对空腔降噪效果最为明显,可以达到75%以上。

[0072] S30:基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型。

[0073] 其中,作业工况是指作业的空腔几何尺寸和航行器航行速度。

[0074] 在一些实施例中,S30中包括S31-S33:

[0075] S31网络搭建过程中采用深度神经算子神经网络:网络输入 u 基于自变量 \vec{x} 控制,输入 \vec{y} 于另一自变量控制,并使用分支网Branchnet和主干网Trunknet分别表示所述网络输入 u 经过流形 G 作用后在位置 \vec{y} 处的值,其统一公式得到:

$$[0076] \quad G(u)(\vec{y}) \approx \sum_{k=1}^n b_k(u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)) t_k(\vec{y})$$

[0077] 其中, $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)$ 为用于训练算子 $G(u)$ 的函数组, 自变量 \vec{x} 为空腔流速及其他监测数据, m 为该数据的维度, \vec{y} 为算子 $G(u)(\vec{y})$ 的自变量, b_k 为分支网 Branchnet 的变换, t_k 为主干网 Trunknet 的变换。

[0078] 如图5所示, 两组数据 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 和 \vec{y} 作为模型的输入, 网络需要两个部分 (分支网 Branchnet 和主干网 Trunknet) 分别处理, 其中主干网 Trunknet 以 \vec{y} 作为输入, 输出 $t_k(\vec{y})$, 分支网 Branchnet 以 $(\vec{x}, u(\vec{x}))$ 作为输入, 输出 $b_k(u(\vec{x}))$, 最后将两个网络结果相乘得到目标学习的算子。

[0079] 深度学习神经算子的 bruchnet 是由编码算子和逼近算子复合得到, 加入使用深度学习算子 N 来逼近函数 G , 定义其中的误差函数, 通过考虑概率测度定义 L2 范数:

$$[0080] \quad \hat{\varepsilon} = \left(\int_X \int_U |G(u)(y) - N(u)(y)|^2 dy d\mu(u) \right)^{1/2}$$

[0081] S32: 网络的训练过程为:

[0082] 网络的训练将计算结果和预设流动控制方程得到的运动数据和对应监测数据作为自变量 \vec{x} 输入, 将预设涡流物理模型的涡流物理特性参数作为自变量 \vec{y} 输入, 输出得到涡流特性与空间坐标, 形成一个用于空腔涡流物理特性参数智能识别的深度算子。

[0083] S33: 将航行器航行速度、空腔几何尺寸和空腔涡流的深度算子神经网络输出作为输入数据, 输出得到涡流强度、脱落频率与空间位置, 训练以形成用于快速预测的代理模型。

[0084] S40: 获取空腔几何尺寸和航行器航行速度, 根据所得代理模型获得在空腔几何尺寸和航行器航行速度下的预测结果, 其中, 预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置。

[0085] S50: 将获得的预测结果输入噪声阈值判别器中, 判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值, 若不满足, 则确定噪声控制失败, 采用喷水机构的控制系统调节噪声, 若满足, 则结束分析。

[0086] 其中, 噪声阈值判别器可以通过 Powell 涡声方程对预测的涡流结果进行求解:

$$[0087] \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} - \nabla^2 p_s = \nabla \cdot \left[\rho_0 (\vec{\omega} \times \vec{u}) + \nabla \left(\rho_0 \frac{u^2}{2} \right) \right]$$

[0088] 其中, p_s 是与密度扰动量相对应的声压扰动量; ρ_0 为不可压缩流体密度; c 为当地声速; $\vec{\omega}$ 为涡矢量; \vec{u} 为速度矢量。该方程建立了声扰动与涡矢量、速度矢量之间的关系, 通过将预测结果输入到该方程内, 就可以求解获得时域声源和声压扰动量, 判断求解获得的时域声源和声压扰动量是否符合预设值来确定噪声控制是否失败。

[0089] 本实施例中, 确定噪声控制失败后还包括 S51: 将获取的预测结果反馈喷水机构控制系统, 通过喷水机构控制系统来调节喷水机构的喷水口张角、喷水速度和机构倾角, 其中机构倾角为机构放置机身方向相对于水平面的夹角。

[0090] 本申请在涡流产生区通过融合物理信息的神经网络进行预测,基于深度神经算子构建高精度代理模型,对不同来流速度和不同空腔几何尺寸下的涡流流场信息进行输出,将产生涡流强度、涡流脱落频率以及涡流空间位置坐标信息传递给喷水机构控制系统5,该喷水机构控制系统可以对获得信息进行收集和提取,如图3所示,并调节喷水机构的喷水速度 v 、机构倾角 θ_1 和喷水口张角 θ_2 ,开展一定喷水强度的作业抑制涡流的产生进一步减少噪声的发出。

[0091] 对调节后流场的涡流信息利用噪声阈值判别器做进一步的判断,如果不满足要求,则需要通过喷水机构的控制系统进行下一轮的调节,直至满足设定值。

[0092] 其中,调节喷水机构的喷水速度 v 、机构倾角 θ_1 和喷水口张角 θ_2 ,对调节后流场的涡流信息利用噪声阈值判别器做进一步的判断。其中,可以再次执行S40-S50,将当前的空腔几何尺寸和航行器航行速度输入代理模型进行预测,并判断噪声是否满足设定值。如果不满足要求,则需要下一轮的调节,直至满足设定值。此处的下一轮调节和判断即调节喷水机构的喷水速度 v 、机构倾角 θ_1 和喷水口张角 θ_2 并对调节后流场的涡流信息利用噪声阈值判别器做进一步的判断。

[0093] 实施例二

[0094] 如图3-5所示,一种水下空腔噪声控制装置,本实施例的水下空腔噪声控制装置装置可为带有中央处理器的控制中心,如个人电脑、上位机、服务器等电子设备实现,用于空腔噪声控制装置的噪声智能控制,空腔噪声控制装置包括一空腔1、设置于空腔1一侧的喷水机构6和喷水机构控制系统5。

[0095] 本实施例中,如图3所示,空腔噪声控制装置还包括:位于空腔1一侧壁的吸水系统2、位于空腔另一侧壁的喷水机构6、喷水管道4、管道控制阀3和喷水机构控制系统5;其中,吸水系统2通过喷水管道4和喷水机构6连接,管道控制阀3和喷水机构控制系统5安装在喷水管道4中。当来流沿着图示方向从左至右流动时,会在空腔的腔口处产生剪切层,并形成涡流,进而形成较为强烈的空腔噪声。其中,管道控制阀主要是用来控制管道中水的流量以及装置的运行与停止,喷水机构控制系统5用来调节喷水机构的喷水速度 v 、机构倾角 θ_1 和喷水口张角 θ_2 。

[0096] 水下空腔噪声控制装置还包括:样本采集模块71、仿真模块72、模型生成模块73、预测模块74以及噪声阈值判别模块75。

[0097] 样本采集模块71,用于设计多个分布在预设范围内的所述喷水机构位置的样本值。

[0098] 具体的,可以设计预设数量分布在预设范围内的 x/L 样本值,其中, x 为喷水机构与空腔底部的距离, L 为空腔顶部到底部的距离。

[0099] 仿真模块72,用于利用CFD开展流体动力学仿真计算得到计算结果,将计算结果、预设流动控制方程和预设涡流物理模型作为训练数据集。

[0100] 模型生成模块73,用于基于训练数据集对神经网络进行训练,构建作业工况与涡流强度、涡流脱落频率以及涡流位置的关联关系,得到用于快速预测的代理模型。

[0101] 预测模块74,用于获取空腔几何尺寸和航行器航行速度,根据所得代理模型获得在空腔几何尺寸和航行器航行速度下的预测结果,其中,预测结果至少包括涡流强度、涡流脱落频率和涡流位置的信息。

[0102] 噪声阈值判别模块75,将获得的预测结果,判断预测结果的噪声是否满足之前的设定值,若不满足,则确定噪声控制失败,采用喷水机构的控制系统调节噪声,若满足,则结束分析。

[0103] 本实施例的一种水下空腔噪声控制装置,其实现过程方法和效果均与实施例一描述的一种水下空腔噪声控制方法相同,在此不再赘述。

[0104] 实施例三

[0105] 本发明涉及一种计算机可读存储介质,存储介质中存储有指令,指令运行时执行实施一的一种水下空腔噪声控制方法,其运行时实现过程方法和效果均与实施例一描述的一种水下空腔噪声控制方法相同,在此不再赘述。

[0106] 需要说明的是,在本文中,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

[0107] 以上仅为本发明的优选实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是利用本发明说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其他相关的技术领域,均同理包括在本发明的专利保护范围内。

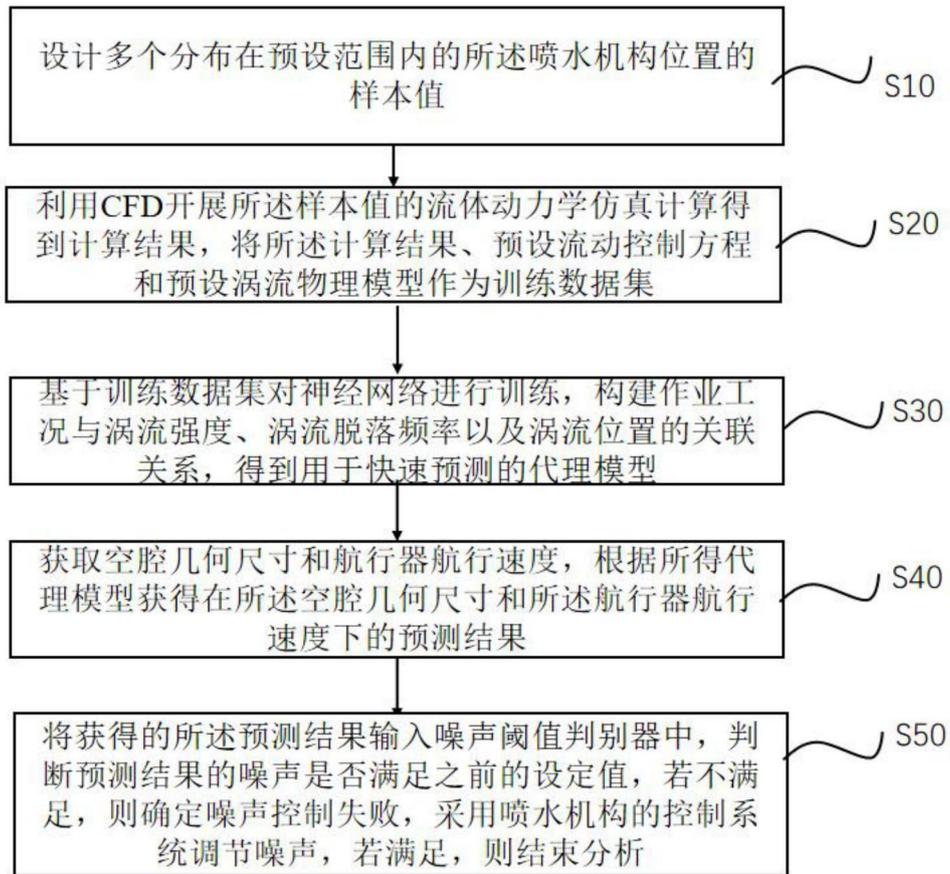


图1

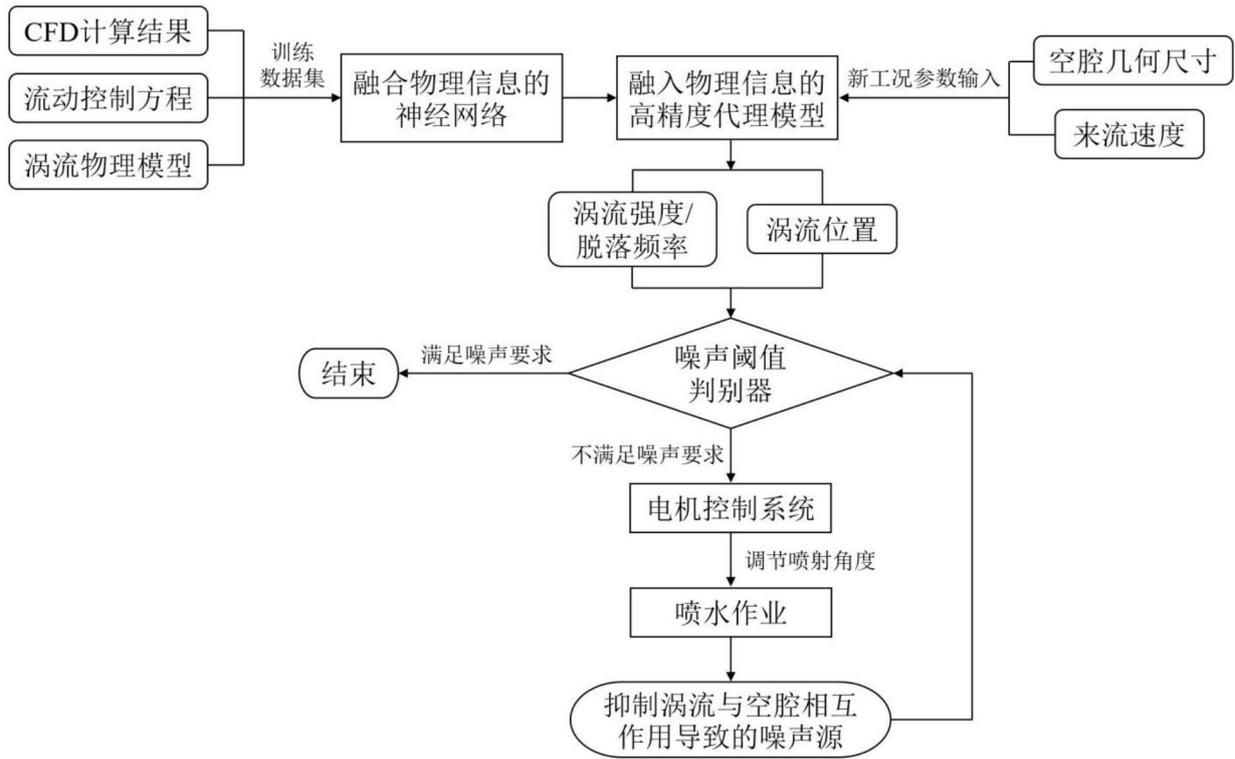


图2

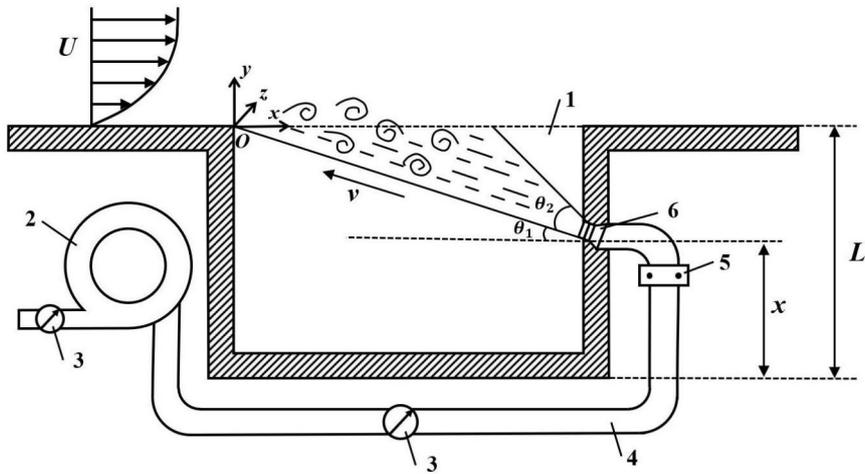


图3

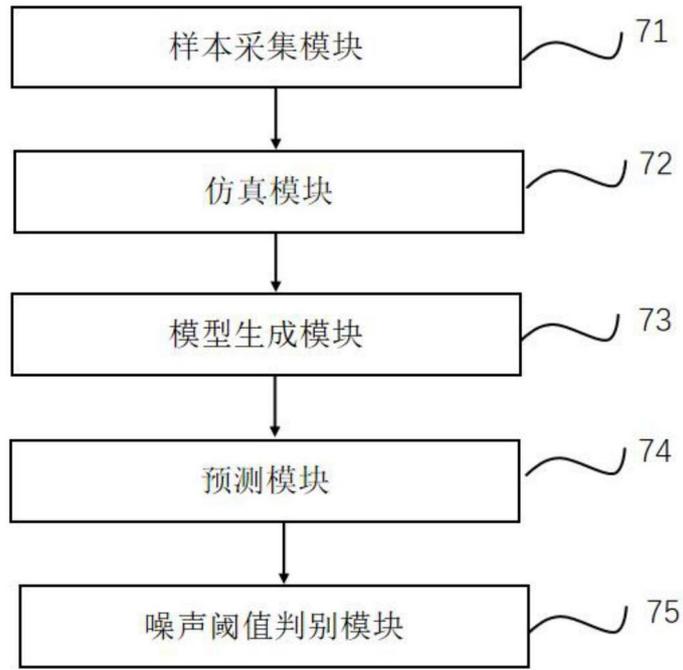


图4

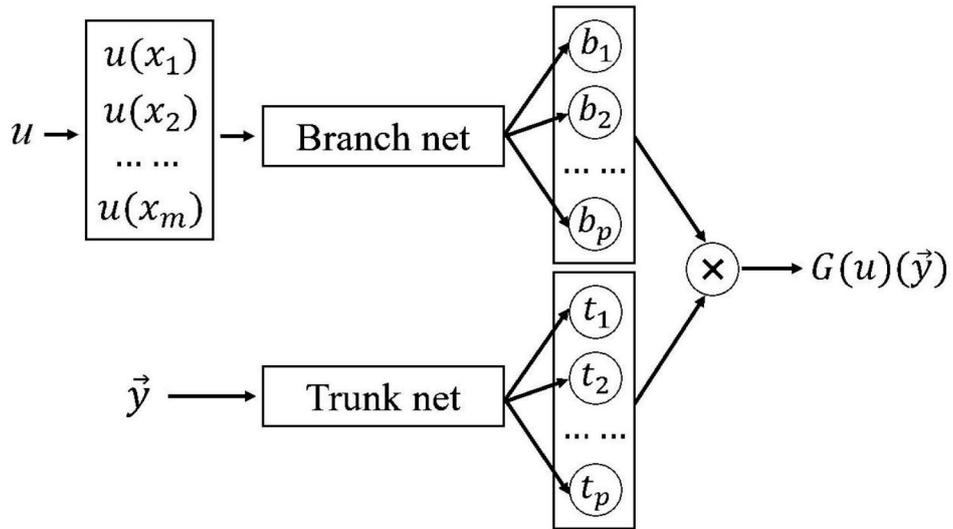


图5