



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114580196 B

(45) 授权公告日 2022.08.16

(21) 申请号 202210270767.0

G06F 111/10 (2020.01)

(22) 申请日 2022.03.18

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114580196 A

CN 105183996 A, 2015.12.23

CN 114117968 A, 2022.03.01

CN 109751204 A, 2019.05.14

(43) 申请公布日 2022.06.03

CN 113835459 A, 2021.12.24

US 2005109257 A1, 2005.05.26

(73) 专利权人 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

YiweiWang等.Dynamic mode

decomposition and reconstruction of transient cavitating flows around a Clark-Y hydrofoil.《Theoretical and Applied Mechanics Letters》.2020,第10卷(第5期),327-332.

(72) 发明人 黄仁芳 丘润荻 王一伟 支玉昌
黄晨光 岳杰顺

王一伟等.高速航行体水下发射水动力学研究进展.《力学进展》.2018,259-298.

(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 焦海峰

审查员 霍玉明

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

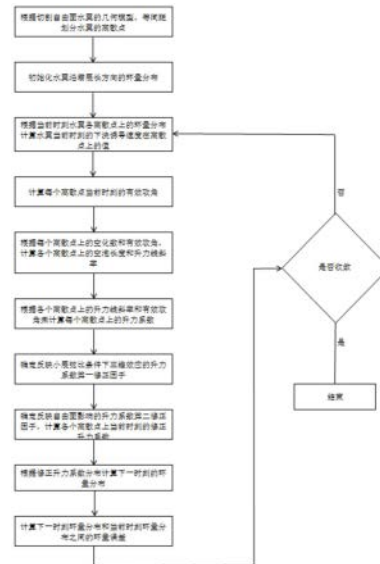
权利要求书4页 说明书14页 附图4页

(54) 发明名称

一种切割自由面水翼空泡长度预测方法

(57) 摘要

本发明提供了一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,包括:一、根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点;二、初始化水翼沿着展长方向的环量分布;三、计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值;四、计算每个离散点当前时刻的有效攻角;五、计算各个离散点上的升力线斜率;六、计算每个离散点上的升力系数;七、计算下一时刻的环量分布;八、判断步骤七和三的环量误差是否达到收敛条件,如果达到则计算收敛;否则,更新下一步迭代初始环量值,代入步骤三迭代计算。本发明建立了一种更加高效快速的计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,扩展了原始升力线算法的应用范围,为实验数据快速分析验证提供了行之有效的方法。



CN 114580196 B

1. 一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,其特征在于,包括方法步骤:

步骤一:根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点;

步骤二:根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系,初始化水翼沿着展长方向的环量分布;

步骤三:由Biot-Savart定理,根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值;

步骤四:由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系,计算每个离散点当前时刻的有效攻角;

步骤五:根据切割自由面水翼的运行工况,计算每个离散点上当前时刻的空化数;根据势流理论和实验结果,得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式,由此,根据每个离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度;然后,基于势流理论和实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式,根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率;

步骤六:依据水洞实验或小攻角假设,根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数;

步骤七:由Kutta-Joukowski定理,根据升力系数分布计算下一时刻的环量分布;

步骤八:判断步骤七得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件,如果所述环量误差达到收敛条件,则计算收敛,输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度;否则,步骤七中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值,代入步骤三,依次开展步骤三至步骤七的计算。

2. 根据权利要求1所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法,其特征在于,所述步骤三中,水翼上端设置为自由面边界条件,水翼下端设置为环量值为0的边界条件或采用自定义的翼尖涡边界条件。

3. 根据权利要求1所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法,其特征在于,所述步骤五中每个离散点上当前时刻空化数的公式为:

$$\sigma(z) = \frac{p_{atm} - p_c}{0.5\rho U^2} + \frac{z}{h} \frac{2}{Fr_h^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数, ρ 为水的密度, p_c 为液体发生相变的压力值, p_{atm} 为大气压力, U 为水翼前方的来流速度, z 为离散点与水面的距离, h 为浸没深度, Fr_h 为基于浸没深度的弗劳德数;

所述空泡长度与空化数之间的有理多项关系式的公式为:

$$\frac{L_c}{c} = \frac{\sum_{j=0}^{M_a} p_j \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^j}{\sum_{k=0}^{N_a} q_k \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^k} \quad (5)$$

其中, L_c 为空泡长度; $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数; α_{eff} 为有效攻角, c 为弦长; p_j 、 q_k 为有理多项关系式的系数, k 、 j 分别为公式(5)的阶数,该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_a 和 N_a ;

升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式的公式为:

$$a_0 = \frac{\sum_{l=0}^{M_b} r_l \left(\frac{L_c}{c}\right)^l}{\sum_{m=0}^{N_b} s_m \left(\frac{L_c}{c}\right)^m} \quad (6)$$

式中, a_0 为升力线斜率; r_l 、 s_m 为有理多项关系式的系数, l 、 m 分别为公式 (6) 的阶数, 该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_b 和 N_b 。

4. 根据权利要求1所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤六中所述升力系数的计算公式为:

$$C_{1-2D} = a_0 \sin(\alpha_{\text{eff}}) \quad (7)$$

其中 C_{1-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数, a_0 为升力线斜率, α_{eff} 为有效攻角。

5. 根据权利要求1所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤七所述下一时刻环量的公式为

$$\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} c U C_{1-2D}^{(n)}(z) \quad (8)$$

其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{1-2D}^{(n)}(z)$ 为各个离散点上当前时刻的升力系数, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

6. 根据权利要求5所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤八中所述下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$\Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (9)$$

其中, D 为松弛因子, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, $\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

7. 根据权利要求6所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 当浸深比大于4时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$, 当浸深比大于1小于4时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$, 当浸深比小于1时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$, 式中 A 为水翼的浸深比。

8. 一种切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 包括方法步骤:

步骤一: 根据切割自由面水翼的几何模型, 等间距划分水翼的离散点;

步骤二: 根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系, 初始化水翼沿着展长方向的环量分布;

步骤三: 由 Biot-Savart 定理, 根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值;

步骤四: 由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系, 计算每个离散点当前时刻的有效攻角;

步骤五: 根据切割自由面水翼的运行工况, 计算每个离散点上当前时刻的空化数; 根据势流理论和实验结果, 得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式, 由此, 根据每个离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度; 然后, 基于势流理论和

实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式,根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率;

步骤六:依据水洞实验或小攻角假设,根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数;

步骤七:由小展弦比升力系数公式,确定反映小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子;

步骤八:依据水翼的浸没深度,确定反映自由面影响的升力系数第二修正因子;并根据升力系数第一修正因子和升力系数第二修正因子,计算各个离散点上当前时刻的修正升力系数;

步骤九:由Kutta-Joukowski定理,根据修正升力系数分布计算下一时刻的环量分布;

步骤十:判断步骤九得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件,如果所述环量误差达到收敛条件,则计算收敛,输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度;否则,步骤九中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值,代入步骤三,依次开展步骤三至步骤九的计算。

9.根据权利要求8所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法,其特征在于,所述步骤五中每个离散点上当前时刻空化数的公式为:

$$\sigma(z) = \frac{p_{atm} - p_c}{0.5\rho U^2} + \frac{z}{h} \frac{2}{Fr_h^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数, ρ 为水的密度, p_c 为液体发生相变的压力值, p_{atm} 为大气压力, U 为水翼前方的来流速度, z 为离散点与水面的距离, h 为浸没深度, Fr_h 为基于浸没深度的弗劳德数;

所述空泡长度与空化数之间的有理多项关系式的公式为:

$$\frac{L_c}{c} = \frac{\sum_{j=0}^{M_a} p_j \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^j}{\sum_{k=0}^{N_a} q_k \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^k} \quad (5)$$

其中, L_c 为空泡长度; $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数; α_{eff} 为有效攻角, c 为弦长; p_j 、 q_k 为有理多项关系式的系数, k 、 j 分别为公式(5)的阶数,该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_a 和 N_a ;

升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式的公式为:

$$a_0 = \frac{\sum_{l=0}^{M_b} r_l \left(\frac{L_c}{c} \right)^l}{\sum_{m=0}^{N_b} s_m \left(\frac{L_c}{c} \right)^m} \quad (6)$$

式中, a_0 为升力线斜率; r_l 、 s_m 为有理多项关系式的系数, l 、 m 分别为公式(6)的阶数,该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_b 和 N_b 。

10.根据权利要求8所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法,其特征在于,步骤七中所述反映小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子的表达式为:

$$F_1 = \frac{C_l^T}{C_{l-3D}^*} \quad (13)$$

式中, F_1 为升力系数第一修正因子, C_l^T 为考虑展弦比影响的水翼三维升力系数, C_{l-3D}^* 为未考虑展弦比影响的水翼三维平均升力系数, 即水翼上各个离散点的二维升力系数 C_{l-2D} 沿着展长方向的积分。

11. 根据权利要求8所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤八所述反映自由面影响的升力系数第二修正因子的表达式为:

$$F_2 = \frac{1+16A^2}{2+16A^2} \quad (14)$$

式中, A 为水翼的浸深比, F_2 为升力系数第二修正因子;

各个离散点上当前时刻的修正升力系数的表达式为:

$$C_{l-2D}^* = F_1 F_2 C_{l-2D} \quad (15)$$

式中, C_{l-2D}^* 为考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系数, F_1 为升力系数第一修正因子, C_{l-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数。

12. 根据权利要求8所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤九所述下一时刻环量的公式为

$$\Gamma_{new}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} c U C_{l-2D}^{*(n)}(z) \quad (16)$$

其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{l-2D}^{*(n)}(z)$ 为考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系数, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

13. 根据权利要求8所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 步骤十中所述下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$\Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{new}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (17)$$

其中, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, D 为松弛因子, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

14. 根据权利要求13所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 当浸深比大于4时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$, 当浸深比大于1小于4时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$, 当浸深比小于1时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$, A 为水翼的浸深比。

15. 根据权利要求8-14任一项所述的切割自由面水翼空泡长度预测方法, 其特征在于, 所述切割自由面水翼空泡长度预测方法适用于浸深比 $[0.5, \infty]$ 的情况。

一种切割自由面水翼空泡长度预测方法

[0001] 所属领域

[0002] 本发明涉及近自由面自然空化的数值模拟领域,具体涉及一种切割自由面水翼空泡长度预测方法。

背景技术

[0003] 空化是水力机械、海洋工程领域的一种极为复杂的非定常现象,伴随着空化初生、发展、脱落和溃灭,会造成水动力的时空演化,特别是空泡溃灭所产生的瞬态高压脉冲会对结构造成巨大的冲击载荷。航行体在接近水面运行的工况下不仅会受到空泡冲击载荷的影响,水面形状的变化也会影响航行体的运行稳定,航行体的运行状态又反过来作用在自由面形状的演化上,产生强烈的瞬时流场变化。对空化与自由面相互作用机理的深入认识,是工程上有效抑制不利空化发生、规避空化破坏的前提,具有重要科学意义和工程价值。在这种情况下,近自由面的自然空化产生将成为影响航行体稳定运行的不可忽视的问题。空化以不同尺度蒸汽空穴的产生、聚合、溃灭为特征,具有复杂的空泡/空泡团-湍流结构相互作用;自由表面的形态会随着时间变化,自然空化作用后产生的现象复杂,精确地实验测量非常困难,数值模拟是空化与自由面相互作用的重要研究手段。

[0004] 针对切割自由面水翼的自然空化问题,很多学者采用数值模拟方法对其进行研究。数值模拟中一般对纳维-斯托克斯方程进行离散,随后使用不同的湍流模型对方程进行模化封闭,使方程可放入计算机中使用迭代法求解。但此类方法计算量巨大,耗时较长,无法及时有效的对实验采集到的结果进行快速精确的评估。因此,发展可高效率计算水翼切割自由面问题的数值模拟方法具有重要性,也具有必要性。

[0005] Matlab作为大型商业软件,拥有易于编写的编译器和成熟的计算环境,为相关科研人员进行软件开发提供了平台,基于Matlab进行综合考虑空化与自由面相互作用的快速数值模拟研究,以实现切割自由面水翼运行过程中自然空化形态的快速模拟,对空化与自由面相互作用物理机制的深刻认识以及工程领域中关心的实际问题的解决具有重要指导意义。

发明内容

[0006] 本发明提供了一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,建立了更加高效快速的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,扩展了原始升力线算法的应用范围的同时为实验数据的快速分析验证提供了行之有效的方法,解决了现有技术中针对切割自由面水翼的自然空化无法及时有效的对实验采集到的结果进行快速精确评估的问题。

[0007] 一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,包括方法步骤:

[0008] 步骤一:根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点;

[0009] 步骤二:根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系,初始化水翼沿着展长方向的环量分布;

[0010] 步骤三:由Biot-Savart定理,根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼

当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值；

[0011] 步骤四：由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系，计算每个离散点当前时刻的有效攻角；

[0012] 步骤五：根据切割自由面水翼的运行工况，计算每个离散点上当前时刻的空化数；根据势流理论和实验结果，得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式，由此，根据每个离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度；然后，基于势流理论和实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式，根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率；

[0013] 步骤六：依据水洞实验或小攻角假设，根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数；

[0014] 步骤七：由Kutta-Joukowski定理，根据升力系数分布计算下一时刻的环量分布；

[0015] 步骤八：判断步骤七得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的所述当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件，如果所述环量误差达到收敛条件，则计算收敛，输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度；否则，步骤七中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值，代入步骤三，依次开展步骤三至步骤七的计算。

[0016] 进一步地，所述步骤三中，水翼上端设置为自由面边界条件，水翼下端设置为环量值为0的边界条件或采用自定义的翼尖涡边界条件。

[0017] 进一步地，所述步骤五中每个离散点上当前时刻空化数的公式为：

$$[0018] \quad \sigma(z) = \frac{p_{atm} - p_c}{0.5\rho U^2} + \frac{z}{h} \frac{2}{Fr_h^2} \quad (4)$$

[0019] 其中， $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数， ρ 为水的密度， p_c 为液体发生相变的压力值， p_{atm} 为大气压力， U 为水翼前方的来流速度， z 为离散点与水面的距离， h 为浸没深度， Fr_h 为基于深度的弗劳德数；

[0020] 所述空泡长度与空化数之间的有理多项关系式的公式为：

$$[0021] \quad \frac{L_c}{c} = \frac{\sum_{j=0}^{M_a} p_j \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^j}{\sum_{k=0}^{N_a} q_k \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^k} \quad (5)$$

[0022] 其中， L_c 为空泡长度； $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数； α_{eff} 为有效攻角， c 为弦长； p_j 、 q_k 为有理多项关系式的系数， k 、 j 分别为公式(5)的阶数，该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_a 和 N_a ；

[0023] 升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式的公式为：

$$[0024] \quad a_0 = \frac{\sum_{l=0}^{M_b} r_l \left(\frac{L_c}{c} \right)^l}{\sum_{m=0}^{N_b} s_m \left(\frac{L_c}{c} \right)^m} \quad (6)$$

[0025] 式中， a_0 为升力线斜率； r_l 、 s_m 为有理多项关系式的系数， l 、 m 分别为公式(6)的阶数，该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_b 和 N_b 。

[0026] 进一步地,步骤六中所述升力系数的计算公式为:

$$[0027] \quad C_{l-2D} = a_0 \sin(\alpha_{\text{eff}}) \quad (7)$$

[0028] 其中 C_{l-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数, a_0 为升力线斜率, α_{eff} 为有效攻角。

[0029] 进一步地,步骤七所述下一时刻环量的公式为

$$[0030] \quad \Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} c U C_{l-2D}^{(n)}(z) \quad (8)$$

[0031] 其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{l-2D}^{(n)}(z)$ 为各个离散点上当前时刻的升力系数, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

[0032] 进一步地,步骤八中所述下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$[0033] \quad \Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (9)$$

[0034] 其中, D 为松弛因子, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, $\Gamma_{\text{new}}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

[0035] 进一步地,当浸深比大于4时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$,当浸深比大于1小于4时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$,当浸深比小于1时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$,式中 A 为水翼的浸深比。

[0036] 在本发明的第二个方面,提供一种更适用于小展弦比与近自由面情况的切割自由面水翼空泡长度预测方法,包括方法步骤:

[0037] 步骤一:根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点;

[0038] 步骤二:根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系,初始化水翼沿着展长方向的环量分布;

[0039] 步骤三:由Biot-Savart定理,根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值;

[0040] 步骤四:由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系,计算每个离散点当前时刻的有效攻角;

[0041] 步骤五:根据切割自由面水翼的运行工况,计算每个离散点上当前时刻的空化数;根据势流理论和实验结果,得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式,由此,根据每个离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度;然后,基于势流理论和实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式,根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率;

[0042] 步骤六:依据水洞实验或小攻角假设,根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数;

[0043] 步骤七:由小展弦比升力系数公式,确定反映小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子;

[0044] 步骤八:依据水翼的浸没深度,确定反映自由面影响的升力系数第二修正因子;并根据升力系数第一修正因子和升力系数第二修正因子,计算各个离散点上当前时刻的修正升力系数;

[0045] 步骤九:由Kutta-Joukowski定理,根据修正升力系数分布计算下一时刻的环量分

布；

[0046] 步骤十：判断步骤九得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的所述当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件，如果所述环量误差达到收敛条件，则计算收敛，输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度；否则，步骤九中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值，代入步骤三，依次开展步骤三至步骤九的计算。

[0047] 进一步地，所述步骤五中每个离散点上当前时刻空化数的公式为：

$$[0048] \quad \sigma(z) = \frac{p_{atm} - p_c}{0.5\rho U^2} + \frac{z}{h} \frac{2}{Fr_h^2} \quad (4)$$

[0049] 其中， $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数， ρ 为水的密度， p_c 为液体发生相变的压力值， p_{atm} 为大气压力， U 为水翼前方的来流速度， z 为离散点与水面的距离， h 为浸没深度， Fr_h 为基于浸没深度的弗劳德数；

[0050] 所述空泡长度与空化数之间的有理多项关系式的公式为：

$$[0051] \quad \frac{L_c}{c} = \frac{\sum_{j=0}^{M_a} p_j \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^j}{\sum_{k=0}^{N_a} q_k \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^k} \quad (5)$$

[0052] 其中， L_c 为空泡长度； $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数； α_{eff} 为有效攻角， c 为弦长； p_j 、 q_k 为有理多项关系式的系数， k 、 j 分别为公式 (5) 的阶数，该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_a 和 N_a ；

[0053] 升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式的公式为：

$$[0054] \quad a_0 = \frac{\sum_{l=0}^{M_b} r_l \left(\frac{L_c}{c} \right)^l}{\sum_{m=0}^{N_b} s_m \left(\frac{L_c}{c} \right)^m} \quad (6)$$

[0055] 式中， a_0 为升力线斜率； r_l 、 s_m 为有理多项关系式的系数， l 、 m 分别为公式 (6) 的阶数，该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_b 和 N_b 。

[0056] 进一步地，步骤七中所述反映小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子的表达式为：

$$[0057] \quad F_1 = \frac{C_l^T}{C_{l-3D}^*} \quad (13)$$

[0058] 式中， F_1 为升力系数第一修正因子， C_l^T 为考虑展弦比影响的水翼三维升力系数， C_{l-3D}^* 为未考虑展弦比影响的水翼三维平均升力系数，即水翼上各个离散点的二维升力系数 C_{l-2D} 沿着展长方向的积分。

[0059] 进一步地，步骤八所述反映自由面影响的升力系数第二修正因子的表达式为：

$$[0060] \quad F_2 = \frac{1+16A^2}{2+16A^2} \quad (14)$$

[0061] 式中， A 为水翼的浸深比， F_2 为升力系数第二修正因子。

[0062] 各个离散点上当前时刻的修正升力系数的表达式为;

$$[0063] \quad C_{l-2D}^* = F_1 F_2 C_{l-2D} \quad (15)$$

[0064] 式中, C_{l-2D}^* 为考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系数, F_1 为升力系数第一修正因子, C_{l-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数。

[0065] 进一步地, 步骤九所述下一时刻环量的公式为

$$[0066] \quad \Gamma_{new}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} c U C_{l-2D}^*(z) \quad (16)$$

[0067] 其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{l-2D}^*(z)$ 为考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系数, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

[0068] 进一步地, 步骤十中所述下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$[0069] \quad \Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{new}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (17)$$

[0070] 其中, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, D 为松弛因子, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

[0071] 进一步地, 当浸深比大于 4 时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$, 当浸深比大于 1 小于 4 时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$, 当浸深比小于 1 时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$, A 为水翼的浸深比。

[0072] 进一步地, 所述切割自由面水翼空泡长度预测方法适用于浸深比 $[0.5, \infty]$ 的情况。

[0073] 本发明和现有技术相比具有有益效果:

[0074] 1、本发明的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法, 通过大展弦比机翼升力线理论和二维平板空化的理论解的结合, 综合考虑了复杂边界条件下相变空化的发生情况, 建立了更加高效快速的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法, 进而为实验数据的快速分析验证提供了行之有效的方法。

[0075] 2、本发明的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法, 通过考虑对小展弦比修正、近自由面修正以及基于试验数据的升力系数修正, 使其适用于小浸深比水翼的相变空化, 扩展了原始升力线算法的应用范围。

[0076] 3、本发明的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法, 应用于高速跨介质航行器的水面稳定性、全通气水翼的姿态调节、航行体出入水领域, 实现小浸深比水翼跨介质高效数值模拟, 有助于对空化与自由面相互作用物理机制的深入研究, 并能够解决相关工程问题。

附图说明

[0077] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案, 下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是示例性的, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据

提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0078] 图1为本发明实施1的流程图；

[0079] 图2为本发明实施方式中离散点和标记点的位置关系示意图；

[0080] 图3为本发明实施2的流程图；

[0081] 图4为本发明实施例中根据不同方法得到的空泡长度分布示意图；

[0082] 图5为本发明实施例中根据预测方法得到的相关参数沿水翼展长方向的分布示意图。

具体实施方式

[0083] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0084] 实施例1

[0085] 一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,建立了切割自由面水翼空泡长度计算方法,包括基于升力线理论的环量分布方程组、空泡长度与水翼运行工况的拟合关系,建立了高效快速的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,如图1所示,包括方法步骤:

[0086] 步骤一:根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点。

[0087] 对于给定的水翼模型,几何模型中可包括弦长 c ,展长 S ,浸深比 A ,几何攻角 α 等指标。根据前述几何图形相关的指标,可基于自主编写的代码划分水翼的计算网格点分布。

[0088] 具体为,将翼端表面沿水翼展长方向平均划分为 $k+1$ 个标记点(k 为奇数)各标记点的坐标记为 $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_{k-1}, \zeta_k$,并在两标记点之间建立一离散点,各离散点的坐标记为 $z_1,$

z_2, \dots, z_k ,其中 $z_i = \frac{\zeta_i + \zeta_{i-1}}{2}$,离散点 z 用于计算 z 处的下洗诱导速度,标记点 ζ 用于离散计算

积分。各个坐标之间的间距可设置为 $\delta x = \frac{S}{k-1}$ 。根据水翼的几何模型,可将水翼各个位置的弦长可定义为 c_1, c_2, \dots, c_k 。

[0089] 每个离散点在弦长方向上一般布置于距离水翼前缘约1/4倍弦长处。

[0090] 在水翼展长方向上,水翼离散点的分布是受下洗诱导速度的计算策略所影响的,下洗诱导速度的计算公式由下列奇异积分给定:

$$[0091] \quad v^n(z) = \int_0^S \frac{\frac{\partial \Gamma^n(\zeta)}{\partial \zeta}}{4\pi(z-\zeta)} d\zeta \quad (1)$$

[0092] 其中, z 、 S 、 $v(z)$ 、 ζ 分别为离散点与水面的距离、水翼的展长、下洗诱导速度和翼面上任一点与水面的距离,上标 n 代表第 n 次迭代的当前时间步的序号, Γ^n 为第 n 次迭代时的环量值。

[0093] 由于翼面上任一点的距离可以取为水翼离散点的距离,此时该点与水翼离散点重合,此时该积分的值趋于无穷,无法计算。故在进行数值离散时一般选取两套坐标点,用于

计算积分的称为离散点,用于表示积分的称为标记点,标记点与离散点之间的距离为二分之一倍的网格尺寸。离散点与标记点的位置关系如图2所示,其中以 z 表示离散点,以 ζ 表示标记点。

[0094] 本发明中根据改进的升力线理论建立了切割自由面水翼的数值计算模型。

[0095] 升力线理论的环量分布方程组是一系列以环量作为核心变量的方程组。由环量导出的各种物理量经过一系列方程变换可以再次计算出环量,这样的一次过程被视为一次迭代。

[0096] 原始的升力线理论中,升力系数仅与升力系数斜率和有效攻角有关,该理论仅用于计算空气动力学中大展弦比机翼的受力分布。为了将升力线理论推广到空化流动中,我们将空化水翼的空泡长度理论公式插入了原始升力线理论的代码中,并添加了小展弦比水翼近似,使该方法适用于小展弦比的水翼。

[0097] 升力线理论求解时所需的各项物理参数包括离散点的数量 k ,标记点的数量 $k+1$,来流的速度值 U ,重力加速度值 g ,水的密度 ρ ,液体发生相变的压力值 p_c ,大气压力设定值 p_{atm} ,水翼各位置的几何攻角 $\alpha_{2D}(z)$,水翼各位置的弦长 $c(z)$ 。

[0098] 步骤二:根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系,初始化水翼沿着展长方向的环量分布。

[0099] 初始环量分布可选用三角形环量分布、均匀环量分布或椭圆形环量分布其中的一种。由于椭圆环量分布的收敛速度更快,更符合机翼环量稳态时的分布规律,本申请实施方式中初始环量分布优选为椭圆形环量分布。

[0100] 环量分布可初始化为椭圆形环量分布,根据环量分布方程确认环量初始值沿离散点与水面的距离的分布。环量分布方程可定义为:

$$[0101] \quad \Gamma_0 = \Gamma_{init} \sqrt{1 - 2 \left(\frac{z}{S} \right)^2} \quad (2)$$

[0102] 其中, Γ_{init} 为环量的启动值, S 为水翼的展长, z 为离散点与水面的距离, Γ_0 为环量的初始值沿离散点与水面的距离 z 的分布。

[0103] 步骤三:由Biot-Savart定理,根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值。

[0104] 根据当前时刻环量分布计算当前下洗诱导速度分布包括离散环量和标记点求下洗诱导速度的积分关系式,确定积分关系式在整个水翼的边界条件形式以及各个离散点上的离散格式。

[0105] 整个水翼的边界条件形式可以被离散为如下关系:

$$[0106] \quad \left. \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \right|_{z=0} = \frac{\Gamma_1 - (-\Gamma_1)}{dx}$$

$$[0107] \quad \left. \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \right|_{z=S} = \frac{8\Gamma_{k+1} - 9\Gamma_k + \Gamma_{k-1}}{3dx}$$

[0108] 具体地, Γ_1 为标号第一个离散点上的环量值, $\left. \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \right|_{z=0}$ 为自由边界条件上的导数值,

$\left. \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \right|_{z=s}$ 为翼尖上的导数值, dx 为离散点划分出的一个网格的宽度, k 为离散点的数量, Γ_k 为标号第 k 个离散点上的环量值, Γ_{k-1} 为标号第 $k-1$ 个离散点上的环量值, Γ_{k+1} 为标号第 $k+1$ 个离散点上的环量值。

[0109] 具体地, 水翼上端可设置为自由边界条件, 切割自由面水翼通常运行在受约束的水槽中, 其中上表面为自由面边界, 下表面为壁面, 为了与实验相吻合, 我们将上下表面边界条件分别设置为自由面边界条件或壁面边界条件。壁面边界条件要求壁面处的环量值为 0, 而自由面边界条件要求壁面处的环量导数值为 0。水翼下端即翼尖可设置为环量值为 0 的边界条件, 或是采用用户自定义的翼尖涡边界条件, 根据经验公式设定翼尖处的环量值。

[0110] 在一个可能的实施方式中, 所述各个离散点上的离散格式可由 Biot-Savart 定理导出, 该定理借用了电磁学中对于磁场的计算方式, 描述了机翼上各处的环量对机翼某处下洗诱导速度的影响。根据 Biot-Savart 定理, 各点的下洗诱导速度可采用如下离散关系式表达:

$$[0111] \quad v^n(z_m) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^k \frac{\Gamma_i^n - \Gamma_{i-1}^n}{z_i - \frac{\zeta_i + \zeta_{i-1}}{2}} \delta x$$

[0112] 式中, z 、 Γ 、 $v(z)$ 、 ζ 分别为离散点与水面的距离、离散点上的环量、下洗诱导速度和翼面上任一点与水面的距离; m 为 k 个离散点中的一个, 范围为 $[1, k]$, 上标 n 代表第 n 次迭代的当前时间步的序号, i 为级数循环的计数标号, Γ_i^n 为第 i 个点上第 n 次迭代的环量值, Γ_{i-1}^n 为第 $i-1$ 个点上第 n 次迭代的环量值, z_i 为第 i 个离散点, ζ_i 为第 i 个标记点, ζ_{i-1} 为第 $i-1$ 个标记点。

[0113] 步骤四: 由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系, 计算每个离散点当前时刻的有效攻角。

[0114] 使用下列离散公式计算下洗诱导速度和攻角之间的关系:

$$[0115] \quad \frac{v^n(z)}{U} + \sin(\alpha_{\text{eff}}^n(z)) - \sin(\alpha_{2D}^n(z)) = 0 \quad (3)$$

[0116] 其中, U 为水翼前方的来流速度, $\alpha_{\text{eff}}^n(z)$ 为离散点 z 处第 n 次迭代的有效攻角, $\alpha_{2D}^n(z)$ 为离散点 z 处第 n 次迭代的几何攻角。

[0117] 在每个离散点 z_m 上使用公式 (3) 可给出每一个位置上的有效攻角的值, 将这些值按照横坐标 z 排列便可得到有效攻角的值在水翼上的分布。

[0118] 步骤五: 根据切割自由面水翼的运行工况, 计算每个离散点上当前时刻的空化数; 根据势流理论和实验结果, 得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式, 由此, 根据每个离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度; 然后, 基于势流理论和实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式, 根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率。

[0119] 根据势流理论分析, 稳态情况下二维平板水翼绕流的空泡长度即每个离散点上当前时刻空化数的公式为:

$$[0120] \quad \sigma(z) = \frac{p_{atm} - p_c}{0.5\rho U^2} + \frac{z}{h} \frac{2}{Fr_h^2} \quad (4)$$

[0121] 其中, $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数, ρ 为水的密度, p_c 为液体发生相变的压力值, p_{atm} 为大气压力, U 为水翼前方的来流速度, z 为离散点与水面的距离, h 为浸没深度, Fr_h 为基于浸没深度的弗劳德数。

[0122] 所述基于浸没深度的弗劳德数可写为 $Fr_h = \frac{U}{\sqrt{gh}}$ 。

[0123] 所述空泡长度与空化数之间的有理多项关系式的公式为:

$$[0124] \quad \frac{L_c}{c} = \frac{\sum_{j=0}^{M_a} p_j \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^j}{\sum_{k=0}^{N_a} q_k \left(\frac{\sigma(z)}{2\alpha_{eff}} \right)^k} \quad (5)$$

[0125] 其中, L_c 为空泡长度; $\sigma(z)$ 为每个离散点上当前时刻的空化数; α_{eff} 为有效攻角, c 为弦长; p_j 、 q_k 为有理多项关系式的系数, j 、 k 分别为公式5的阶数, 该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_a 和 N_a ;

[0126] 公式(5)在无量纲空泡长度大于或小于1的时候计算的空泡长度精度较高。

[0127] 水翼升力系数斜率可表达为与攻角之间的函数关系, 这个函数关系可以通过实验或数值模拟得到, 也可以通过简化理论公式给出, 我们采用简化理论公式的方法。

[0128] 升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式的公式为:

$$[0129] \quad a_0 = \frac{\sum_{l=0}^{M_b} r_l \left(\frac{L_c}{c} \right)^l}{\sum_{m=0}^{N_b} s_m \left(\frac{L_c}{c} \right)^m} \quad (6)$$

[0130] 式中, a_0 为升力线斜率; r_l 、 s_m 为有理多项关系式的系数, l 、 m 分别为公式6的阶数, 该有理多项关系式的最高阶数分别为 M_b 和 N_b 。需要说明的是, 无量纲空泡长度和无量纲升力线斜率的计算可以通过上述公式来完成, 也可以通过数值模拟或实验结果拟合后得到一个适宜的值。

[0131] 步骤六: 依据水洞实验或小攻角假设, 根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数。

$$[0132] \quad C_{1-2D} = a_0 \sin(\alpha_{eff}) \quad (7)$$

[0133] 其中 C_{1-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数, 由升力线斜率 a_0 和有效攻角 α_{eff} 计算得到。需要说明的是, 可通过公式(7)计算得到升力系数, 但公式(7)仅适用于小攻角情况下, 在大攻角情况下, 需要进行失速的修正, 可使用实验得到的升力系数分布公式替换该公式。

[0134] 步骤七: 由Kutta-Joukowski定理, 根据升力系数分布计算下一时刻的环量分布。

[0135] Kutta-Joukowski定理一般用于描述低速情况下自由来流绕封闭物体流动时环量与升力的关系, 步骤七中对每个二维截面使用Kutta-Joukowski定理, 可推出下一时刻环量

的公式为:

$$[0136] \quad \Gamma_{new}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} cUC_{l-2D}^{(n)}(z) \quad (8)$$

[0137] 其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{l-2D}^{(n)}(z)$ 为各个离散点上当前时刻的升力系数由公式7计算得到, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

[0138] 步骤八:判断步骤七得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的所述当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件,如果所述环量误差达到收敛条件,则计算收敛,输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度;否则,步骤七中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值,代入步骤三,依次开展步骤三至步骤七的计算。

[0139] 如果 $|\Gamma_{new}^{(n)}(z_m) - \Gamma^{(n)}(z_m)| < \varepsilon \Gamma^{(n)}(z_m)$ 对于 $m=1, 2, \dots, k$ 均成立,其中 $\varepsilon = 10^{-8}$,则认为计算收敛,输出此时各个截面的环量 $\Gamma^n(z_m)$ 、升力线斜率 $a_0(z_m)$ 和空泡长度 $L_c(z_m)$;否则通过下列公式(9)计算得到用于下一步迭代的初始环量值后返回步骤三进行下一次计算。

[0140] 下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$[0141] \quad \Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{new}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (9)$$

[0142] 其中, D 为松弛因子, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

[0143] 当浸深比大于4时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$,当浸深比大于1小于4时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$,当浸深比小于1时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$,式中 A 为水翼的浸深比。

[0144] 上述实施例提供的计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,通过大展弦比机翼升力线理论和二维平板空化的理论解的结合,综合考虑了复杂边界条件下相变空化的发生情况,建立了更加高效快速的一种计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,进而为实验数据的快速分析验证提供了行之有效的方法。

[0145] 实施例2

[0146] 在另一个实施例中,本发明提供了一种切割自由面水翼空泡长度预测方法,在考虑了大展弦比机翼升力线理论和二维平板空化的理论解结合的基础上,进一步增加了水翼的小展弦比修正和水翼的三维效应修正,可以扩展原始升力线算法的应用范围。如图3所示,包括以下步骤:

[0147] 步骤一:根据切割自由面水翼的几何模型,等间距划分水翼的离散点。

[0148] 步骤二:根据离散点的位置与初始环量的椭圆函数关系或线性函数关系,初始化水翼沿着展长方向的环量分布。

[0149] 步骤三:由Biot-Savart定理,根据当前时刻水翼各离散点上的环量分布计算水翼当前时刻的下洗诱导速度在离散点上的值。

[0150] 步骤四:由各离散点的下洗诱导速度、来流速度和水翼几何攻角之间几何关系,计算每个离散点当前时刻的有效攻角。

[0151] 步骤五:根据切割自由面水翼的运行工况,计算每个离散点上当前时刻的空化数;根据势流理论和实验结果,得到空泡长度与空化数之间的有理多项关系式,由此,根据每个

离散点当前时刻的空化数和有效攻角来计算各个离散点上的空泡长度;然后,基于势流理论和实验结果推导的升力线斜率与空泡长度之间的有理多项关系式,根据每个离散点上的空泡长度来计算各个离散点上的升力线斜率。

[0152] 步骤六:依据水洞实验或小攻角假设,根据各个离散点上的升力线斜率和有效攻角来计算每个离散点上的升力系数。

[0153] 上述步骤内容和实施例1中步骤一至六的内容、公式相同,此处不再赘述。

[0154] 步骤七:由小展弦比升力系数公式,确定反映小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子。

[0155] 传统的升力线模型假设水翼的展弦比大于10,仅有满足此要求的水翼才能被简化为一个一维的物体并离散计算。但在切割自由面水翼的相关研究中这个展弦比是不现实的,一般情况下水翼的展弦比被限制在1附近。针对小展弦比的情况,我们采用了如下的升力系数修正模型,使该模型可计算的水翼展弦比降至4以下,该修正通过计算平板机翼的三维升力系数并将其权重按加权平均方法分配到各个截面上,使得各截面的二维升力系数修正值可被计算。

[0156] 该修正首先计算的是三维升力系数值:

$$[0157] \quad C_l^T = \frac{Ar}{2 + \sqrt{Ar^2 + 4}} a_0 \sin(\alpha_{2D}) \quad (10)$$

[0158] 式中,Ar为展弦比, C_l^T 为考虑展弦比影响的水翼三维升力系数, α_{2D} 是水翼的几何攻角。

[0159] 三维升力系数的效应要通过二维升力系数和二维升力系数斜率在展向的平均值来给出,如下式所述:

$$[0160] \quad C_{l-3D}^* = \frac{1}{S} \int_0^S C_{l-2D}(\xi) d\xi \quad (11)$$

$$[0161] \quad a_0^* = \frac{1}{SC_{l-3D}^*} \int_0^S \frac{C_{l-2D}(\xi)^2}{\alpha_{2D}(\xi)} d\xi \quad (12)$$

[0162] 式中 C_{l-3D}^* 为未考虑展弦比影响的水翼三维平均升力系数, ξ 为翼面上任一点与水面的距离, $C_{l-2D}(\xi)$ 为水翼上各个离散点的二维升力系数,可通过公式(7)得到; a_0^* 为未考虑展弦比影响的水翼平均升力系数斜率; $\alpha_{2D}(\xi)$ 为水翼各个截面处的几何攻角。

[0163] 所述升力系数和升力系数斜率可被写为离散形式,离散形式采用二阶精度的梯形积分公式得到,并最终参与到程序迭代计算的过程中,如下式所述:

$$[0164] \quad C_{l-3D}^* = \frac{1}{S} \sum_{m=0}^{n-1} C_{l-2D}(z_m)(z_{m+1} - z_m)$$

$$[0165] \quad a_0^* = \frac{1}{SC_{l-3D}^*} \sum_{m=0}^{n-1} C_{l-2D}(z_m) a_0(z_m)(z_{m+1} - z_m)$$

[0166] 其中, C_{l-3D}^* 为未考虑展弦比影响的水翼三维平均升力系数, a_0^* 为未考虑展弦比影响的水翼平均升力系数斜率, $C_{l-2D}(z_m)$ 为水翼上各个离散点的二维升力系数, $a_0(z_m)$ 为各个截面上不同的二维升力系数斜率,S为水翼的长度。

[0167] 采用第一修正因子 F_1 来表示三维放大效应的平均值,第一修正因子将求出的二维升力系数在各个截面上按照修正因子的值逐一放大,得到修正后各截面上的升力系数值。最终,小展弦比条件下三维效应的升力系数第一修正因子 F_1 的表达式为:

$$[0168] \quad F_1 = \frac{C_l^T}{C_{l-3D}^*} \quad (13)$$

[0169] 式中, F_1 为升力系数第一修正因子, C_l^T 为考虑展弦比影响的水翼三维升力系数, C_{l-3D}^* 为未考虑展弦比影响的水翼三维平均升力系数,即水翼上各个离散点的二维升力系数 C_{l-2D} 沿着展长方向的积分。

[0170] 步骤八:依据水翼的浸没深度,确定反映自由面影响的升力系数第二修正因子;并根据升力系数第一修正因子和升力系数第二修正因子,计算各个离散点上当前时刻的修正升力系数。

[0171] 在一个可能的实施方式中,假设水翼由一点涡代替,自由面上方对称布置一相同的点涡以满足自由面边界条件,可得到有限水深下升力线斜率和无限水深下升力线斜率的比值大小,该比值可定义为第二修正因子 F_2 。该假设推导的公式在浸深比大于0.5的情况下可起到修正作用。

[0172] 根据简化后的理论解,第二修正因子 F_2 与浸深比在某一具体截面上的表达式即反映自由面影响的升力系数第二修正因子的表达式为:

$$[0173] \quad F_2 = \frac{1+16A^2}{2+16A^2} \quad (14)$$

[0174] 其中,A为水翼的浸深比, F_2 为升力系数第二修正因子。由于切割自由面水翼上的点涡在不同深度均有分布,第二修正因子应当改写为在所有截面上产生总效应的平均值,表达式可写为:

$$[0175] \quad F_2^* = \frac{1}{S} \int_0^S F_2(z) dz$$

[0176] 其中,S为水翼展长,z为离散点与水面的距离。代入前式积分后可得到平均化后 F_2 的修正值 F_2^* :

$$[0177] \quad F_2^* = 1 - \frac{\arctan(2\sqrt{2}A)}{4\sqrt{2}A}$$

[0178] 上述因子也正好可以使用展弦比来表示,展弦比与浸深比、几何攻角的关系可写作 $Ar=2A\cot(\alpha_{2D})$,将该式代入到 F_2^* 可求得 F_2^* 与展弦比和攻角之间的关系式:

$$[0179] \quad F_2^* = 1.78Ar \frac{\tan(\alpha_{2D})}{1+1.78Ar \tan(\alpha_{2D})}$$

[0180] 式中Ar为展弦比,将该修正因子代入表达式,并结合第一修正因子 F_1 可得到各个离散点上当前时刻的修正升力系数的表达式为:

$$[0181] \quad C_{l-2D}^* = F_1 F_2 C_{l-2D} \quad (15)$$

[0182] 式中, C_{l-2D}^* 为考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系

数, C_{l-2D} 为水翼上各个离散点的二维升力系数, 由公式7可计算得到。

[0183] 针对小展弦比的情况, 采用本发明的升力系数修正模型, 可计算的水翼展弦比范围扩展到大于0.5的情况, 原始方法中适用于展弦比大于4的情况, 本方法中对原始方法进行了扩展, 使该方法可以计算展弦比接近1甚至小于1的水翼。本发明预测方法中添加升力系数第二修正因子后, 适用展弦比范围扩展为 $[1, \infty]$; 添加了升力系数第一修正因子和升力系数第二修正因子后, 适用展弦比范围扩展为 $[0.5, \infty]$ 。

[0184] 步骤九: 由Kutta-Joukowski定理, 根据修正升力系数分布计算下一时刻的环量分布。

[0185] Kutta-Joukowski定理一般用于描述低速情况下自由来流绕封闭物体流动时环量与升力的关系, 步骤七中对每个二维截面使用Kutta-Joukowski定理, 得到下一时刻环量的公式为

$$[0186] \quad \Gamma_{new}^{(n)}(z) = \frac{1}{2} c U C_{l-2D}^{*(n)}(z) \quad (16)$$

[0187] 其中, c 为弦长, U 为来流速度, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值, $C_{l-2D}^{*(n)}(z)$ 为第 n 次迭代时考虑小展弦比和自由面影响的各个离散点上当前时刻的修正升力系数, n 为第 n 次迭代的当前时间步的序号。

[0188] 步骤十: 判断步骤九得到的下一时刻环量分布和步骤三得到的所述当前时刻环量分布之间的环量误差是否达到收敛条件, 如果所述环量误差达到收敛条件, 则计算收敛, 输出各个离散点的环量、升力线斜率和空泡长度; 否则, 步骤九中下一时刻的环量分布更新为下一步迭代的初始环量值, 代入步骤三, 依次开展步骤三至步骤九的计算。

[0189] 如果 $|\Gamma_{new}^{(n)}(z_m) - \Gamma^{(n)}(z_m)| < \epsilon \Gamma^{(n)}(z_m)$ 对于 $m=1, 2, \dots, k$ 均成立, 其中 $\epsilon = 10^{-8}$, 则认为计算收敛, 输出此时各个截面的环量 $\Gamma^n(z_m)$ 、升力线斜率 $a_0(z_m)$ 和空泡长度 $L_c(z_m)$; 否则通过下列公式(16)计算得到用于下一步迭代的初始环量值后返回步骤三进行下一次计算。

[0190] 下一步迭代的初始环量值的公式为:

$$[0191] \quad \Gamma^{(n+1)}(z) = \Gamma^{(n)}(z) + D(\Gamma_{new}^{(n)}(z) - \Gamma^{(n)}(z)) \quad (17)$$

[0192] 其中, $\Gamma^{(n+1)}(z)$ 为下一步迭代的初始环量值, $\Gamma^{(n)}(z)$ 为当前时刻环量值, D 为松弛因子, $\Gamma_{new}^{(n)}(z)$ 为下一时刻环量值。

[0193] 本步骤中, 采用了亚松弛迭代法进行计算, 该迭代法设置为:

[0194] 当浸深比大于4时所述松弛因子取为 $D = 0.05 + 0.05e^{4-A}$, 当浸深比大于1小于4时所述松弛因子取为 $D = 0.1 - \frac{1}{15}(A-4)$, 当浸深比小于1时所述松弛因子取为 $D = 0.4 - 0.1e^{A-1}$, 式

中 A 为水翼的浸深比。

[0195] 上述各个公式中, $U, \alpha_{eff}, \alpha_{2D}, C_{l-2D}, c, a_0, \Gamma$ 分别为来流速度、有效攻角、几何攻角、二维升力系数、弦长、升力线斜率和环量。上标 n 代表当前迭代时间, $n+1$ 代表下一迭代时间。两迭代时间之间使用亚松弛迭代法计算下一步环量值, 给定迭代收敛误差限制, 当两迭代时间之间环量误差小于该限制时, 认为该模型达到收敛, 求解结束。模型收敛时则会得到水翼上的环量在空间 (z 方向) 的分布情况, 根据环量的分布情况还可计算出水翼每个截面上的受力分布和空泡长度分布。

[0196] 本发明提供的计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法在计算速度上有着极大的优势,而且在精度上不亚于传统计算方法。传统数值方法需要针对几何模型划分足够量的网格,并进行长时间的并行计算,得到大量的数据后方可得到空泡长度分布。本数值模拟方法根据势流理论对水翼周围的流动进行了恰当的简化,极大的降低了计算量。

[0197] 在一个具体实施例中,本发明提供的数值模拟方法与实验对比的结果如图4所示,图4给出了原版升力线程序、修正升力线程序计算得到的空泡长度在翼展方向的分布曲线,并与实验得到的分布曲线进行了逐一对比。通过本申请提出的方法预测得到的空泡长度分布,与原始的方法比较,本申请提出的方法预测的空泡与实验结果更为接近。如图5所示,使用本方法,除了可以得到空泡长度的分布(图4所示)之外,还能得到有效攻角 α_{eff} 、升力线斜率 a_0 、升力系数 C_{1-2D} 和空泡长度 L_c/C 等沿着水翼展长方向的分布。图4和图5是实验中的一个实施例,当变化工况时,得到的分布图随之变化。

[0198] 在另一个具体实施例中,对比了有效攻角在 5° 和 10° 、弗劳德数在19-27之间、浸深比 A 在0.5、1.0和1.5等12种情况下的结果,计算结果表明本算法与实验结果吻合较好,能准确计算空泡长度的分布情况。经过实际计算测试,本算法计算上述的每个实施例的时间均不超过五分钟,大规模数值模拟所需的时间均在两个小时以上,说明了本方法的高效性。对本算法的计算测试还表明,该算法在 $A=1.5$ 的时候计算结果精度最为可靠,当 A 接近1.0时,本算法的计算精度会有所下降,但这并不影响我们给出足够可靠的空泡长度分布,在 A 大于1的时候计算结果精度普遍为最优情况。

[0199] 本发明提供的计算切割自由面水翼空泡长度的数值模拟方法,可以应用于高速跨介质航行器的水面稳定性、全通气水翼的姿态调节、航行体出入水等领域,实现了小展弦比水翼跨介质高效数值模拟,有助于对空化与自由面相互作用物理机制的深入研究,并能够解决相关工程问题。

[0200] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

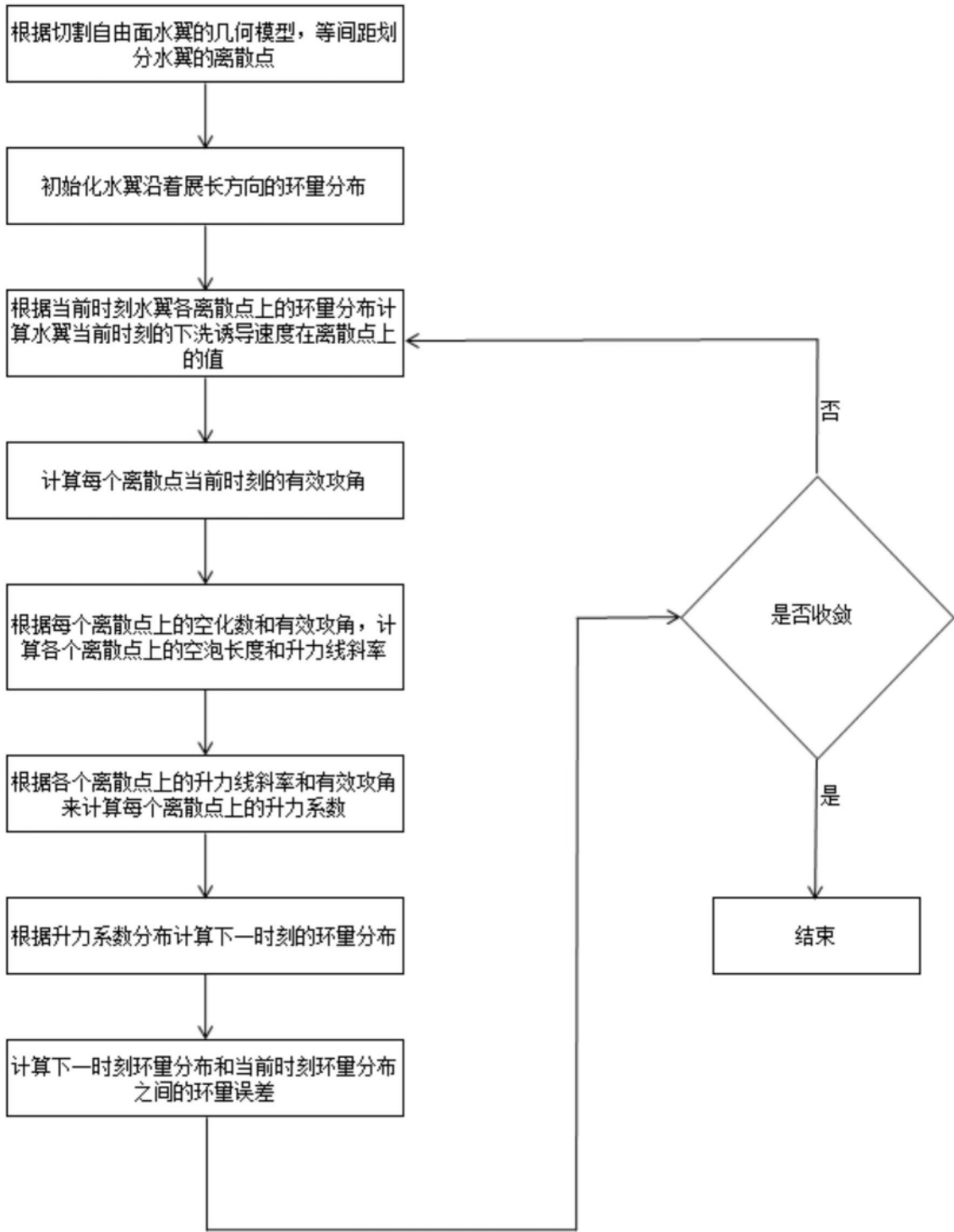


图1

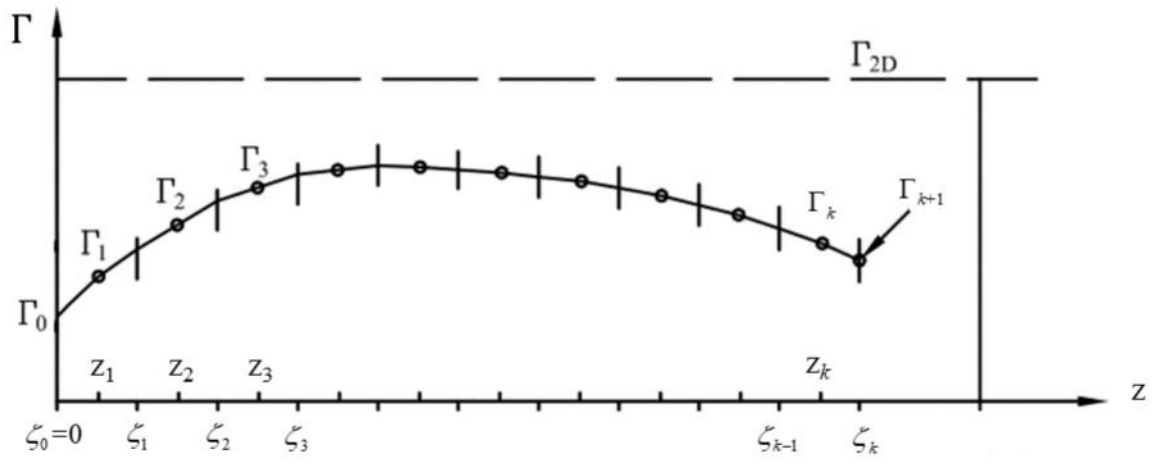


图2

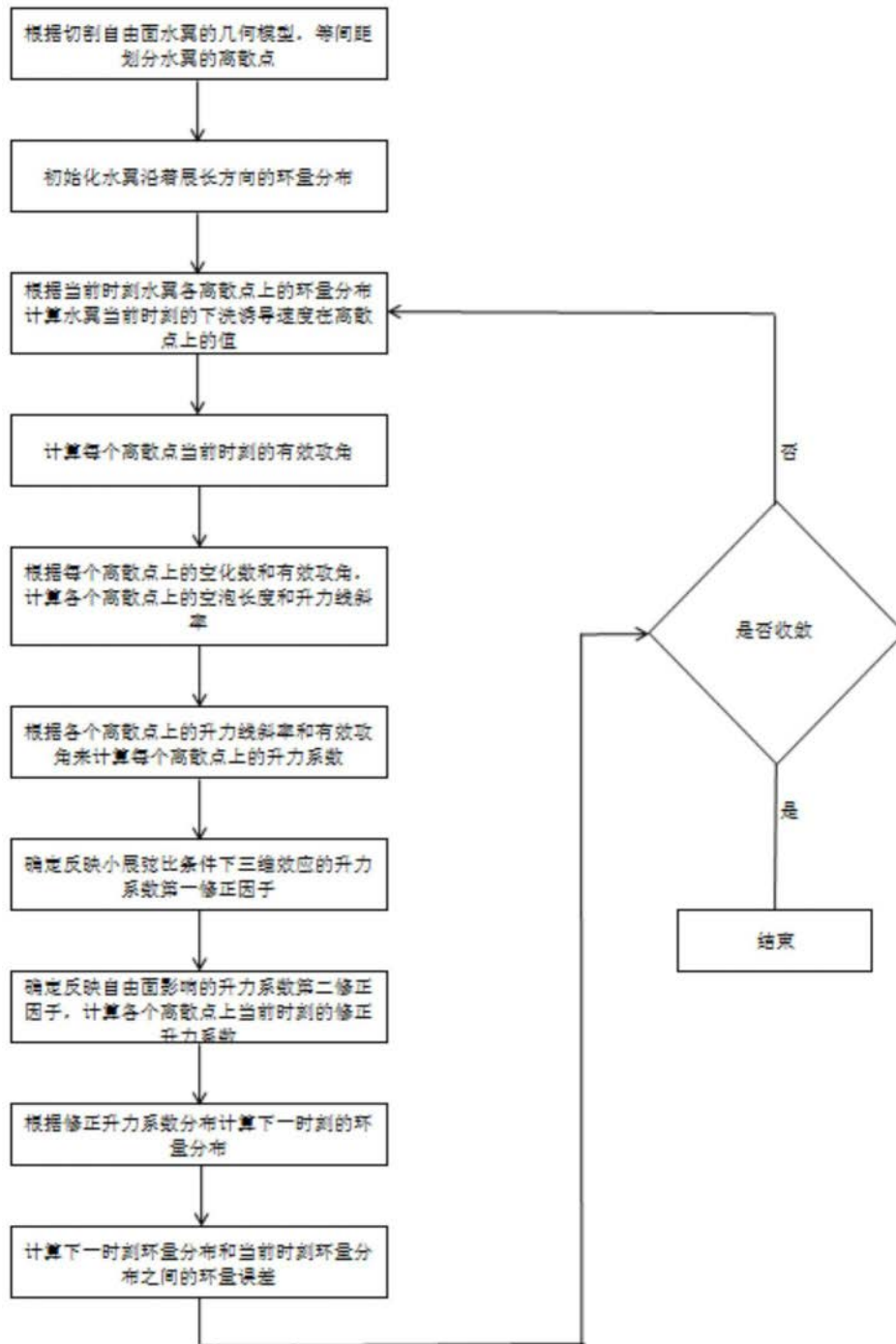


图3

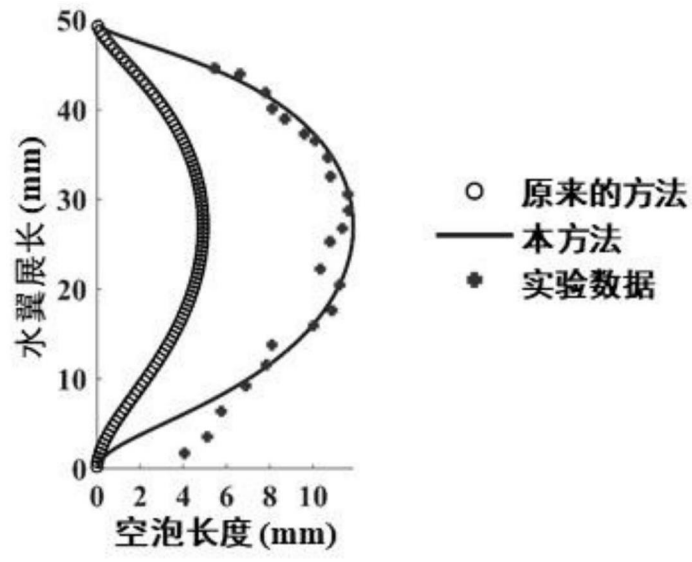


图4

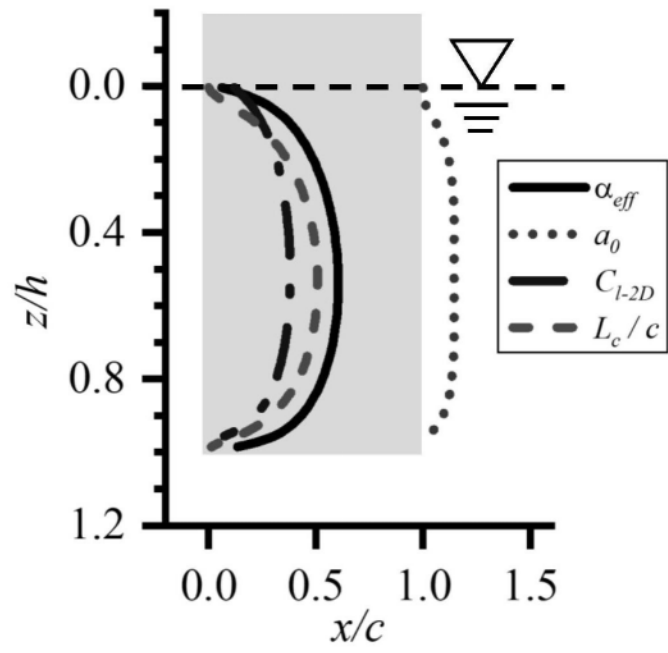


图5