

空化器出水非定常垂直空泡的研究¹⁾

陈玮琪²⁾ 王宝寿 颜开 易淑群

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

摘要 对空化器朝水面高速运动产生的非定常垂直空泡进行了理论研究. 建立了受水面和重力影响下的水下垂直空泡长度变化数学方程, 从方程中导出了非定常垂直空泡长度计算公式, 利用公式计算了空化器出水后空泡从脱落、收缩到溃灭的时间. 对带空化器的航行体, 公式还可以计算脱落空泡溃灭高压作用在航行体上的位置, 最后给出了避免溃灭高压作用在航行体上的条件和判据.

关键词 空泡, 空泡溃灭, 时滞微分方程, 出水

中图分类号: O35 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-164

引言

当空化器带着空泡从水下朝水面垂直运动过程中, 由于水面及重力的原因, 空化器所产生的垂直空泡将受到压力梯度的影响而导致空泡的非定常变化. 当空化器穿越自由水面时, 空化器所带的空泡又会从空化器上脱落下来并停留在水面上, 称为剩余空泡. 剩余空泡在水面将会收缩, 当空泡收缩到很小以至于空泡发生溃灭时, 流体中将产生极高的压力, 称为溃灭高压. 如果空化器安装在航行体上, 这种溃灭高压将有可能对留在水中部分的航行体产生很强的破坏作用. 因此, 研究空化器出水空泡形状的变化具有重要的工程应用价值.

对于定常空泡, 确定空泡形状的数学问题可表述为寻找常压边界条件下的自由面形状问题. 但是, 对于沿空泡轴向的外部压力是任意变化的情况下, 确定空泡形状的问题就变得相当复杂, 也是空泡研究的一个重要问题. 工程上确定空泡形状的一个简单方法建立在 Logvinovich^[1] 提出的“空泡截面独立膨胀原理”上. 在此原理上, Paryshev^[2] 建立了一组描述空泡形状及泡压变化的非线性迟滞微分方程组, Kirschner^[3] 发展了一种有效的求解方法, 解决了一系列非定常空泡问题^[4], Vasin^[5] 计算了重力场中定常垂直空泡的形状. 在研究物体出水及空泡变化方面, 鲁传敬等^[6] 基于势流理论建立了有限厚度水层出水空泡溃灭力学模型. 罗金玲等^[7] 依据试验与理论分析了物体出水过程中的气

水动力学问题. 叶取源等^[8] 开展了轴对称体垂直出水的非线性数值解研究. 也有利用两相流模型对物体出水进行数值模拟. Yan 等^[9-10] 采用标记点 (marker and cell, MAC) 方法计算了轴对称体带泡出水. 颜开等^[11] 利用商业软件 Fluent 模拟了圆柱体出水空泡的问题. 蔡军辉等^[12] 用标记点法模拟了平头圆柱体垂直出水的黏性流动. 胡影影等^[13] 采用有限体积法 (volume of fluid, VOF) 方法研究了不同 We 和 Fr 下半无限长柱体出水问题.

上述工作大部分偏重于研究凸出水面的空泡形态及流场问题, 与之不同的是, 本文研究有限水深重力场中垂直空泡从水下产生到出水消失的全过程的变化. 有限水深对空泡有两方面的影响: (1) 当空化器从水下以任意速度朝水面运动时, 空化器的水深变化会导致沿空泡轴线的自由流体压力都会发生变化, 如何确定这种情况下的空泡长度是关键问题之一; (2) 当空化器穿越水面之后脱落的空泡, 即剩余空泡因失去空化器的能量来源将转而发生收缩, 收缩到极小时将产生溃灭高压. 为避免溃灭高压的破坏, 如何用简单方法估算出剩余空泡的收缩时间和溃灭高压的作用位置是第二个关键问题. 这个问题未见有过理论研究.

问题 (1) 与重力场中垂直定常绕流空泡形态的计算问题不同^[6], 在定常绕流问题中, 空化器的位置保持不变, 垂直方向的均匀来流 (流动方向可以朝上或朝下) 绕过空化器产生定常空泡, 此时空化器位

2012-05-31 收到第 1 稿, 2012-09-12 收到修改稿.

1) 水动力学重点实验室基金资助项目 (9140C220204110C2203).

2) 陈玮琪, 高级工程师, 主要研究方向: 水动力学、空泡流和数学. E-mail: tiger_cwq@yahoo.com.cn

置上的自由流体压力为常数. 而本文中, 因空化器朝水面运动, 空化器位置上的自由流体压力是不断变化的, 由此导致沿空泡轴线的压力梯度也不断发生变化, 因此空泡只能是非定常空泡, 即便空化器本身的运动是定常的, 压力梯度的变化也会导致空泡是非定常的. 问题 (2) 与问题 (1) 紧密相关, 空化器出水后, 空泡长度是判断剩余空泡溃灭的关键因素. 从数学上讲, 当空泡长度收缩到 0 时就认为剩余空泡已溃灭消失.

考虑到空泡长度的重要性, 本文只研究空泡长度的变化而不考虑空泡形态的其他物理量, 例如直径等. 原则上, 利用 Paryhev 提出的非定常空泡流数学模型可以计算空泡长度, 但是在他的模型中共包含了 15 个方程, 利用这 15 个方程来求解空泡长度的变化就显得太复杂了. 因此本文首先建立了仅仅描述空泡长度变化的时滞微分方程, 不仅极大的简化了空泡长度的计算, 而且为研究剩余空泡溃灭时间打下了基础.

1 数学模型的建立

作者在文献 [14] 中已经建立了垂直空泡的数学模型, 为保持本文的完整性, 这里重新阐述一下建模过程.

设圆盘空化器以垂直水面的速度 $V(t)$ 朝水面运动, 空化器产生的轴对称空泡见图 1, 为方便处理, 设空泡尾部闭合在与空化器同直径的虚拟圆盘上. 忽略自由面效应.

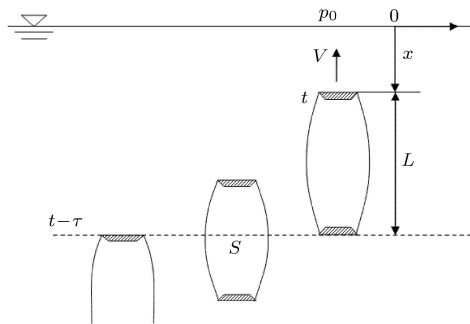


图 1 水下垂直空泡及坐标示意图

Fig.1 Vertical cavity under water and coordinate

设空化器半径为 R , 面积为 S_0 , 空泡压力为 $p_c = \text{const}$, 重力加速度为 g , 空泡长度为 $L(t)$, 空化器的空化阻力系数为 C_x . 根据空泡截面独立膨胀原理, 在 $(t - \tau)$ 时刻空化器穿越某一截面 (图 1 中虚线表示) 所形成空泡截面是独立膨胀的, 并在 t 时刻闭合

在空泡尾部的圆盘上. 描述空泡截面面积 $S(t)$ 膨胀规律的方程 [5]

$$\left. \begin{aligned} \dot{S} &= -k \frac{p_\infty - p_c}{\rho} \\ k &= \frac{4\pi C_x}{a^2} \\ \dot{S}_0 &= \dot{S}(t - \tau) = \frac{2\pi R C_x V(t - \tau)}{a} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, 压力 $p_\infty = p_0 + \rho g(x + L)$, p_0 为水面大气压, $x(t)$ 为 t 时刻空化器的位置坐标, 本文将坐标 0 点设在水面上, 水下 $x(t)$ 为正, 超出水面 $x(t)$ 为负, 而 $x(t)$ 的值就是空化器到水面的距离. S_0 是空泡截面在 $t = 0$ 的初始面积, 其值等于空化器的面积. ρ 是流体密度, a 是与空化器外形有关的常数.

显然, t 时刻的空泡长度 $L(t)$ 就是空化器从 $(t - \tau)$ 时刻运动到 t 时刻的路径长度

$$L(t) = \int_{t-\tau}^t V(v)dv \quad (2)$$

其中, 变量 τ 称为延迟变量, 它是 t 的函数 $\tau = \tau(t)$. 利用链式法则将积分方程 (2) 对时间 t 求导 (注意到积分符号上的 $\tau = \tau(t)$ 也是 t 的函数, 也需要求导), 得到关于空泡长度 $L(t)$ 的微分方程

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial t} - 1 \right) V(t - \tau) + V(t) \quad (3)$$

延迟变量 $\tau = \tau(t)$ 的表达式可以由方程 (1) 给出. 这里推导一下. 首先对方程 (1) 的二阶微分方程积分两次得到

$$S(v) = S_0 + \dot{S}_0(v - t + \tau) - k \int_{t-\tau}^t \int_{t-\tau}^t \frac{p_0 + \rho g(x + L) - p_c}{\rho} dv dv$$

注意到 $S(v)$ 是固定位置空泡截面的面积. 在 t 时刻空泡截面面积闭合在与空化器面积相同的圆盘上, 因此 $v = t$ 时刻, $S(t) = S_0$. 代入上式并积分得到

$$S_0 = S_0 + \dot{S}_0 \tau - k \frac{p_0 + \rho g(x + L) - p_c}{\rho} \frac{\tau^2}{2}$$

整理得到

$$\tau = aR \cdot V(t - \tau) / [(p_0 - p_c) / \rho + g(x + L)] \quad (4)$$

由方程 (3) 和 (4) 得到描述重力场非定常垂直空泡长度变化的时滞微分方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial t} &= \left(\frac{\partial \tau}{\partial t} - 1 \right) V(t - \tau) + V(t) \\ \tau &= aR V(t - \tau) / [(p_0 - p_c) / \rho + g(x + L)] \\ \frac{\partial x}{\partial t} &= -V(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

方程组的待求变量为 (L, τ, x) , 初始值 $x(0) = H$, $L(0) = L_0$, $\tau(0) = \tau_0$, 需根据具体问题来确定.

从式 (4) 的推导可看出, 只要空泡压力 p_c 在延迟时间段 $\tau(t)$ 内是常数即可得到式 (4), 因此, 只要空泡压力 p_c 变化不是特别剧烈, 以至于在任何一个 $\tau(t)$ 内都可以近似看做常数, 则方程 (5) 都可以相当准确的近似成立.

当空化器做定常运动, 即 $V(t - \tau) = V(t) = V$ 时, 由式 (5) 的前两个方程立刻可得到空泡长度变化速度的公式

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V(t) - V(t - \tau) \left\{ 1 + aRgV^2(t - \tau) \left[\frac{p_0 - p_c}{\rho} + g(x + L) \right]^{-2} \right\} \quad (6)$$

空泡长度变化速度之所以重要, 是因为它极大地影响了空泡尾部闭合区域的最大压力 p_{\max} ^[15]

$$\frac{p_{\max}}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} + g(x + L) + \frac{1}{2} \left(V(t) - \frac{\partial L}{\partial t} \right)^2$$

2 模型的特殊解

一般情况下, 时滞微分方程组 (5) 没有解析解, 只能数值求解, 有关时滞微分方程组的数值求解方法可以参考相关文献, 这里不做研究. 但是, 如果空化器的速度是常数的特殊情况下, 它有解析解. 设空化器的速度 $V(t - \tau) = V(t) = V$, 代入式 (2) 得到 $L(t) = \int_{t-\tau}^t V(v)dv = V\tau$, 再考虑式 (4), 立刻得到

$$L = aR \cdot V^2 \left[(p_0 - p_c) / \rho + g(x + L) \right] \quad (7)$$

将式 (7) 无量纲化并整理后得到一个关于空泡长度 \bar{L} 的二次多项式

$$2\bar{L}^2 + \bar{L}(\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x}) - 2aFr^2 = 0 \quad (8)$$

其中, $\sigma_0 = \frac{2(p_0 - p_c)}{\rho V^2}$ 称为零空化数, $Fr = \frac{V}{\sqrt{Rg}}$ 是傅汝德数, $\bar{L} = \frac{L}{R}$, $\bar{x} = \frac{x}{R}$. 方程 (8) 有 2 个根, 其中有物理意义的根为

$$\bar{L} = \frac{\sqrt{(\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})^2 + 16aFr^2} - (\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})}{4} \quad (9)$$

从式 (9) 可看出, 当空化器顶水面时, $\bar{x} = 0$, 空泡长度为

$$\bar{L} = \frac{\sqrt{(\sigma_0 Fr^2)^2 + 16aFr^2} - \sigma_0 Fr^2}{4} \quad (10)$$

从推导过程中可看出, 只要在延迟时间段 $\tau(t)$ 内空化器的速度是匀速, 则式 (9) 就可成立. 因此, 如果空化器的运动速度变化不是特别剧烈, 以至于在任何一个较短的 $\tau(t)$ 内, 空化器的速度变化都较小, 则式 (9) 也可以相当准确的成立.

类似地, 由式 (9) 求导可以给出空化器匀速运动时的空泡长度变化速度的无量纲化公式

$$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \bar{t}} = \frac{aFr^2}{\left[\frac{1}{2}\sigma_0 Fr^2 + (\bar{x} + \bar{L}) \right]^2 + aFr^2}$$

3 空化器出水后的空泡长度

式 (10) 给出了空化器顶水面时的空泡长度. 当空化器出水时, 水面会微凸, 然后超出水面以上的空泡部分将在水面大气压的作用下溃灭, 并重新封闭在水面以下, 见图 2. 因此, 实际空泡长度 \bar{L}' 应该是空化器到空泡末端的长度 \bar{L} 扣除空化器出水高度 $|\bar{x}|$ (为了简化, 这里忽略水面凸起的高度), 即实际空泡长度应该是水面到空泡末端的距离.

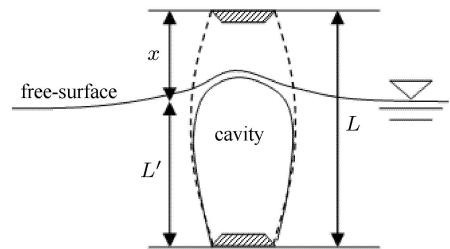


图 2 空化器出水空泡示意图, 虚线表示无水面的空泡外形
Fig. 2 Cavity of exit-water cavitator, dotted line represents the possible cavity if no water surface

空化器出水后, 忽略自由面效应, 则水面以下的空泡截面独立膨胀原理仍然成立, 即水面以下的空泡截面的膨胀并不受出水空化器的影响. 因此, 很容易看出, 以空化器到空泡末端的距离所表示的空泡长度 \bar{L} 的计算公式 (9) 仍然成立, 只是公式中的 \bar{x} 表示空化器的坐标位置, 当空化器出水后 \bar{x} (或 x) 是负的 (这时, 水面以下的流体静压仍然可以表示为 $\rho g(L + x)$). 所以, 实际的空泡长度应该为

$$\bar{L}' = \bar{L} + \bar{x} = \frac{\sqrt{(\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})^2 + 16aFr^2} - (\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})}{4} + \bar{x} \quad (11)$$

4 水面空泡的溃灭高压现象

现在考虑出水空泡的一个极为特殊的现象. 从式 (11) 可以看出, 空化器出水后, \bar{x} 的值是负数, 因此随着空化器离开水面的距离增大, 实际空泡长度 $\bar{L}' = \bar{L} + \bar{x}$ 有可能变为 0, 这意味着整个空泡收缩到了一个极小体积并发生溃灭, 从流体力学理论可以知道, 空泡全部溃灭瞬间会产生极高的压力. 如果空化器不是一个圆盘, 而是一个较长的圆柱, 则水面剩余空泡溃灭所产生的高压就有可能作用在圆柱体上, 给圆柱体造成结构上的破坏 (见图 3).

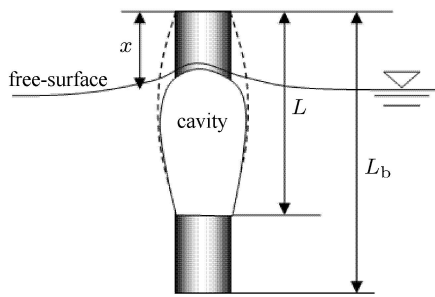


图 3 圆柱体空化器与空泡位置的关系
Fig. 3 The position of cylinder and cavity

现在来计算出水空泡长度 $\bar{L}' = 0$ 时的空化器出水位置. 由式 (11) 可以得到方程

$$\frac{\sqrt{(\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})^2 + 16aFr^2 - (\sigma_0 Fr^2 + 2\bar{x})}}{4} + \bar{x} = 0 \quad (12)$$

化简并求出 \bar{x}

$$\bar{x} = -\frac{2a}{\sigma_0} \quad (13)$$

即当空化器出水高度为 $\frac{2a}{\sigma_0}$ 时, 水面以下的空泡长度 \bar{L}' 就收缩到 0, 整个空泡发生了溃灭. 因此, 如果空化器是一个半径为 R_n , 长度为 L_b 的圆柱体, 其无量纲长度为 $\bar{L}_b = \frac{L_b}{R_n}$ 的圆柱体, 显然可以看出, 当

$$\bar{L}_b > \frac{2a}{\sigma_0} \quad (14)$$

空泡溃灭产生的高压肯定就会作用在圆柱体上, 而且作用位置在距离圆柱体头部 $2a/\sigma_0$ 处.

反之, 如果圆柱体的长度 \bar{L}_b 是固定的, 则空泡溃灭高压不会作用在圆柱体上的条件为 $\bar{L}_b < \frac{2a}{\sigma_0}$, 将不等式改写为有量纲的形式

$$\rho V^2 \cdot aR_n / (p_0 - p_c) > L_b \quad (15)$$

由此可以得出空泡压力必须满足

$$p_c > p_0 - \rho V^2 aR_n / L_b = p_1 \quad (16)$$

或写为另一种容易进行压力比较的无量纲形式

$$\frac{2p_c}{\rho V^2} > \frac{2p_0}{\rho V^2} - \frac{2aR_n}{L_b} = \frac{2p_1}{\rho V^2}$$

式中, p_1 可以看做是出水空泡溃灭高压不会作用在物体上的临界空泡压力, 式 (16) 可以作为溃灭高压是否作用在物体上的判据.

由式 (13) 还可以给出剩余空泡从脱离空化器到溃灭消失所需的时间. 因为已知空化器的运动速度是 V , 所以剩余空泡从产生到消失的时间为

$$T = \frac{|\bar{x}R|}{V} = \frac{2aR}{V\sigma_0} = \frac{a\rho RV}{p_0 - p_c} \quad (17)$$

式 (17) 表明, 出水速度越高、空泡压力越大, 剩余空泡消失时间越长. 由于空泡溃灭消失时间 T 与空泡压差 $p_0 - p_c$ 呈倒数关系, 因此提高空泡压力、降低压差是增大剩余空泡消失时间 T 的最好办法. 空泡溃灭消失时间 T 越长, 就能越有时间让出水空化器远离溃灭高压的破坏影响. 这已经在实际问题中获得了验证.

5 试验与计算

为了检验非定常空泡长度时滞微分方程组 (5) 的有效性, 进行了试验验证. 如果方程 (5) 得到试验验证, 则由其推导出的特殊解 (9), (11) 和 (17) 也能获得验证.

为了方便测量非定常空泡的长度, 在试验中取圆柱体作为空化器, 长度为 L_b , 试验装置见图 4, 初始水深为 H , 圆柱体从筒中弹射出来, 通过在圆柱体

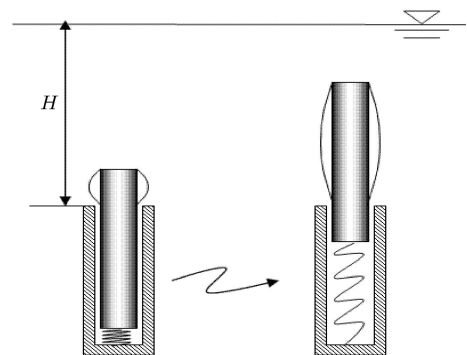


图 4 水下非定常空泡长度测量试验示意图

Fig. 4 The measure method of unsteady cavity length under water

表面布置压力传感器,可以测量出空泡长度和空泡压力的变化,通过圆柱体内部的加速度传感器又可以测量出圆柱体的轴向运动速度并换算出位置坐标.

由于本文验证的是非定常空泡长度变化,因此空化器的轴向运动速度可以是任意的,没有特殊要求,以试验中测量到的速度为准.考虑到消除试验中其他外界因素对空泡长度的影响,只取圆柱体尾部出筒之前的水下运动阶段的测量数据作为验证依据.按照不同水深、不同运动速度和不同空泡压力,进行了多次试验.限于篇幅这里取其中一次试验的测量结果作为示例.

试验测量到的初始水深 $\bar{H} = 2.9$, 圆柱体长度 $\bar{L}_b = 1.96$, 不同水深的无量纲速度曲线 $-\bar{x}-Fr$ 和零空化数曲线 $-\bar{x}-\sigma_0$ 见图 5. 由方程 (5) 及式 (9) 计算的空泡长度与试验测量的对比见图 6.

从图 6 可看出,时滞微分方程 (5) 和式 (9) 的计算结果与试验测量结果都比较接近,其中时滞微分方程 (5) 的计算结果与试验结果更吻合.这是由于式 (9) 是在空化器做定常运动的条件下得到的,未能

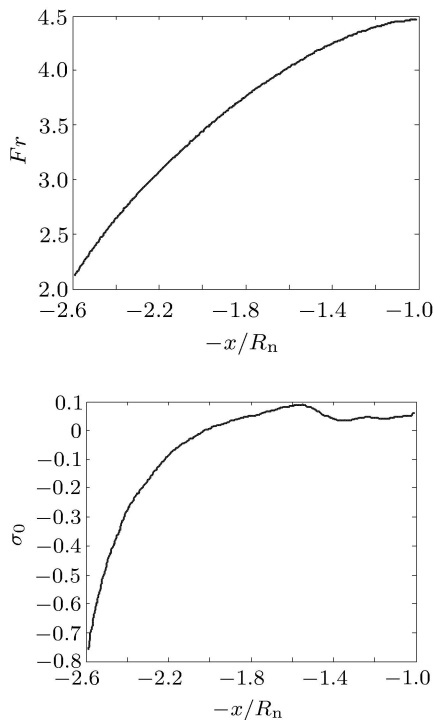


图 5 测量的 $-\bar{x}-Fr$ 和 $-\bar{x}-\sigma_0$ 曲线

Fig. 5 Experimental curve of $-\bar{x}-Fr$ and $-\bar{x}-\sigma_0$

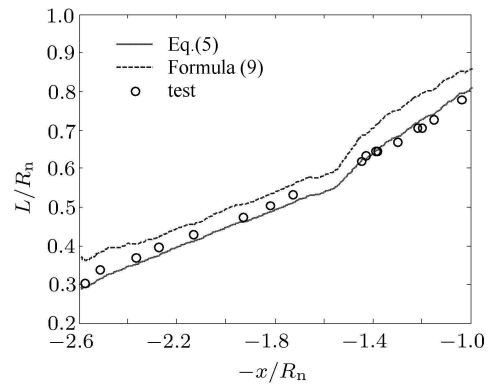


图 6 计算的空泡长度与试验测量结果的对比^[15]

Fig. 6 The comparison of calculation and test length of cavity^[15]

考虑空化器非定常运动带来的时滞性. 而通过求解方程 (5), 运动的非定常性就能计入到求解过程中.

避免空泡溃灭高压作用在物体上的判据式 (16) 也可以进行试验验证. 其方法是, 同时测量空泡的实际压力 p_c 变化及空泡长度 L 的变化, 其中空泡长度是通过测量空泡头部及尾部在物体上的位置来确定. 然后利用式 (16) 计算出理论上的空泡临界压力 p_1 , 比较测量空泡压力 p_c 与计算临界压力 p_1 的大小, 同时注意空泡的头部与尾部是否在物体上就收缩为 0, 如果空泡在物体表面上收缩为 0, 则表示溃灭高压就已经作用在物体上, 否则不然. 图 7 和图 8 分别给出了 2 次试验的结果对比. 图 7(a) 试验中, 在接近水面时空泡测量压力 $p_c < p_1$, 从对应的图 7(b) 可看出, 空泡头部与尾部在物体的 0.8 位置处相交, 表明溃灭高压已作用在物体表面上. 图 8(a) 试验中空泡测量压力 $p_c > p_1$, 从对应的图 8(b) 可看出, 一直到整个物体出水, 空泡头部与尾部都没有在物体表面上相交, 表明溃灭高压没有作用在物体表面上. 注意到试验中空泡压力及航行体速度都是非定常的, 而式 (16) 是在定常条件下推导出来的. 但是从公式的推导过程可看出, 只要空泡压力及物体速度在较短的延迟时间内都不是变化太大, 则定常公式对于非定常问题也是足够适用的. 对于定常空泡压力及速度下的试验检验将在以后有条件的情况下进行.

6 结 论

航行体在有限水深重力场中的空泡特性受水面及重力的影响, 表现出新的特点. 本文基于空泡截面

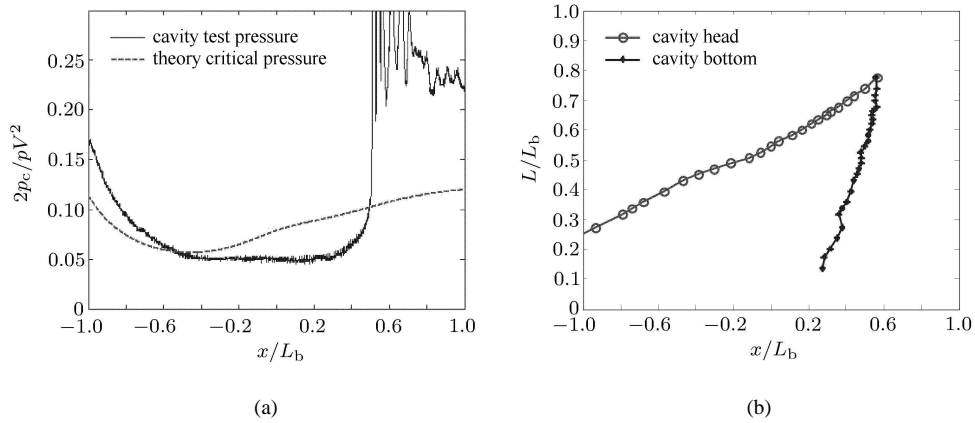


图 7 测量空泡压力低于临界压力的试验结果

Fig. 7 The experimental results if cavity pressure less than the critical pressure

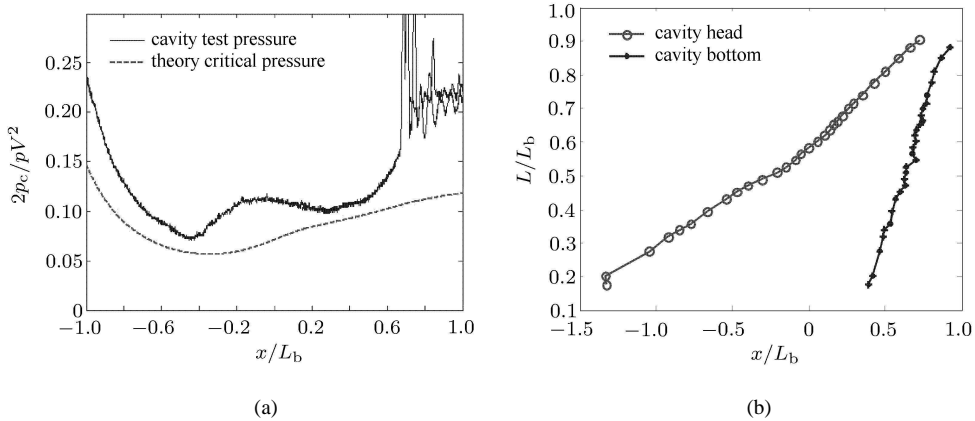


图 8 测量空泡压力高于临界压力的试验结果

Fig. 8 The experimental results if cavity pressure greater than the critical pressure

独立膨胀原理, 结合有限水深及水面的影响, 从理论上分析了垂直空泡长度的变化规律, 得到了有限水深出水空泡长度变化公式, 计算了空化器出水后剩余空泡的溃灭时间, 获得了避免溃灭高压作用在物体上的条件和判据. 本文建立的时滞微分方程也完全可以描述空化器从水面朝水下运动时所产生的空泡长度变化, 研究过程完全类似. 另外, 本文仅考虑了空泡压力为常数的情形, 对于空泡压力任意变化的情况, 也可以通过类似的方法建立起相关方程, 只是难以获得解析形式的解. 试验中没有对式 (11) 和式 (17) 进行直接验证, 原因是试验技术条件所限, 未能获得有效试验数据. 希望有条件者能完成.

参 考 文 献

- 1 Logvinovich GV. Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries. New York: Halsted Press, 1973
- 2 Paryshev EV. Mathematical modeling of unsteady cavity flows. In: Proceeding of Fifth Int.Symp.on Cavitation,Osaka,Japan, 2003
- 3 Kirschner IN. A robust solver for delay differential equations. In: Proceeding of Third International Summer Scientific School, Kemerovo, Russia, 2006
- 4 Kirschner IN. Implementation and extension of Paryshev's model of cavity dynamics. In: Proc. of SuperFAST'2008, Saint-Petersburg, Russia, 2008
- 5 Vasin AD. The principle of independence of the cavity sections expansion (Logvinovich's Principle) as the basis for investigation on cavitation flows. RTO AVT Lecture Series, 2001
- 6 鲁传敬, 李杰. 水下航行体出水空泡溃灭过程及其特性研究. 见: 吴有生, 周如莘, 颜开等编. 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰 110 周年纪念大会文集. 无锡, 2012 年 8 月 25-28 日. 北京: 海洋出版社, 2012. 54-67 (Lu Chuanjing, Li Jie. Research of the cavity collapse of the exit-water body. In: Wu Yousheng, Zhou Ruping, Yan Kai, et al. eds. In: Proceeding of the 11th National congress on Hydrodynamics & 24th National Conference on Hydrodynamics and Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Pei-Yuan's Birth, Wuxi, 2012-8-25-28. Beijing: Ocean Press, 2012. 54-67 (in Chinese))
- 7 罗金玲, 毛鸿羽. 导弹出水过程中气/水动力学的研究. 战术导弹技术, 2004, 4: 23-25 (Luo Jingling, Mao Hongyu. Research on aerodynamics and hydrodynamics in exiting water process of mis-

- sile. *Tactical Missile Technology Jul*, 2004, 4: 23-25 (in Chinese))
- 8 叶取源, 何友声. 轴对称体垂直出水的非线性数值解. 应用力学学报, 1990, 3(3): 25-30 (Ye Queyuan, He Youshen. Numerical solution to nonlinear problem of vertical water exit for an axisymmetric body. *Journal of Applied Mechanics*, 1986, 3(3): 25-30 (in Chinese))
 - 9 Chu XS, Yan K, et al. Numerical simulation of water-exit of a cylinder with cavities. In: Proceeding of 9th International Conference on Hydrodynamics, Shanghai, China, 2010
 - 10 Liu ZY, Yi SQ, Yan K, et al. Numerical simulation of water-exit cavity. In: Proceeding of 5th International Symposium on Cavitation, CAV2003, Osaka, Japan, 2003
 - 11 颜开, 王宝寿. 出水空泡流动的一些研究进展. 见: 朱德祥, 等编. 第二十一届全国水动力学研讨会文集. 济南, 2008年8月23-26日. 北京: 海洋出版社, 2008. 9-16 (Yan Kai, Wang Baoshou. Research developments of the exit-water cavity. In: Zhu Dexiang et al. eds. In: Proceeding of the 24th National Conference on Hydrodynamics. Jinan, 2008-8-23-26. Beijing: Ocean Press, 2008. 9-16 (in Chinese))
 - 12 蔡军辉, 何友声, 叶取源. 平头圆柱体垂直出水粘性流动的数值模拟. 水动力学研究与进展, 1990, 5(4): 115-121 (Cai Junhui, He Yousheng, Ye Qu yuan. Numerical simulation of the viscous flow around a flat-nosed cylinder during its vertical water exit. *Journal of Hydrodynamics*, 1990, 5(4): 115-121 (in Chinese))
 - 13 胡影影, 朱克勤, 席葆树. 半无限长柱体出水数值模拟. 清华大学学报, 2002, 42(2): 235-238 (Hu Yingying, Zhu Keqin, Xi Baoshu. Numerical simulation of a semi-infinite cylinder exited from water. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(2): 235-238 (in Chinese))
 - 14 陈玮琪, 王宝寿, 颜开等. 重力场中非定常垂直空泡长度时滞微分方程. 见: 吴有生, 周如莘, 颜开等编. 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰110周年纪念大会文集. 无锡, 2012年8月25-28日. 北京: 海洋出版社, 2012. 108-114 (Chen Weiqi, Wang Baoshou, Yan Kai, et al. Delay Differential equations of unsteady vertical cavity length in gravitational field. In: Wu Yousheng, Zhou Ruping, Yan Kai, et al. eds, Proceeding of the 11th National Congress on Hydrodynamics & 24th National Conference on Hydrodynamics and Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Pei-Yuan's Birth, Wuxi, 2012-8-25-28, Beijing: Ocean Press, 2012. 108-114 (in Chinese))
 - 15 陈玮琪, 王宝寿, 易淑群等. 非定常空泡闭合区域最大压力的理论研究. 力学学报, 2012, 44(4): 701-708 (Chen Weiqi, Wang Baoshou, Yi Shuqun, et al. A theoretical investigation on the maximum pressure of the unsteady cavity closure position. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechani*, 2012, 44(4): 701-708 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

STUDY ON THE UNSTEADY VERTICAL CAVITY OF THE EXIT-WATER CAVITATOR¹⁾

Chen Weiqi²⁾ Wang Baoshou Yan Kai Yi Shuqun
(China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China)

Abstract The unsteady vertical cavity produced by the underwater cavitator moving rapidly towards the water surface is investigated theoretically. The mathematical model of the unsteady vertical cavity under water is presented; the formula of the vertical cavity length influenced by the gravity and water surface is derived, and the life span of cavity shedding from exit-water cavitator is also obtained from the formula. For the underwater body with cavitator, the acting position in the body of the high-pressure produced by the collapsed cavity is also calculated by the formula; moreover, the condition and criterion of keeping the underwater body from collapse high-pressure is presented.

Key words cavity, cavity collapse, delay differential equations (DDEs), exit water

Received 31 May 2012, revised 12 September 2012.

1) The project was supported by the Foundation of Science and Technology on Hydrodynamics Laboratory (9140C220204110C2203).

2) Chen Weiqi, senior engineer, research interests: hydrodynamics, cavity flow and mathematics. E-mail: tiger_cwq@yahoo.com.cn