

水平超空泡发生装置的研制及相关实验研究

周素云, 施红辉, 胡青青, 胡俊辉

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 研制了水平发射细长体诱导产生超空泡的实验设备。采用高速摄影仪实时记录几种不同工况下细长体在水中高速航行的过程, 观察细长体水平高速入水后超空泡气液两相流形态发展变化过程。分析细长体的长径比和空化器头部形状对超空泡形态和稳定性的影响。根据实时记录的照片, 计算细长体的速度以及超空泡尺寸的变化, 并给出了空化数和超空泡无量纲尺寸之间的关系曲线, 然后与 Logvinovich 和 Savchenko 等提出的模型做了比较, 结果表明实验数据和模型的变化趋势基本一致。

关键词: 细长体; 超空泡; 长径比; 高速摄影

中图分类号: O352.1; O359

文献标志码: A

0 引 言

水下航行体受到的阻力约是空中飞行器阻力的1 000多倍, 这会导致传统水下兵器普遍存在速度慢、航程短、精度低的缺陷。当水下航行体的速度提高到一定程度, 或者在水中高速航行时, 其侧面压力会逐渐下降至流体的饱和压力, 使得该区域的流体汽化成蒸汽。当形成的气体包围了整个航行体时, 这一气体区域就被称为自然超空泡。此时航行体在空泡内工作, 就如同在空气环境中飞行一样, 可以有效降低航行体所受的粘性阻力。近年来, 超空泡技术及其在水下兵器领域的应用已经成为国际研究热点之一。水下超空泡高速射弹、超空泡高速火箭、超空泡高速鱼雷代表了当前水下新型高速兵器发展的三个重要方向, 其中水下超空泡高速射弹因其在扫雷中所呈现的重要应用前景而备受关注^[1]。此外水下高速航行体在海防、船舶、救生等方面也具有重大的意义。

水下航行体超空泡的发生不仅与流体的汽化压力有关, 还与液体中气核的大小和数量有直接关系。流场条件和运动体几何形状(运动体的头部形

状——空化器)等的不同, 使空泡呈现出不同的形状。超空泡流动涉及非定常多相流动的多个方面, 其流体运动机理十分复杂, 因而只有掌握了这些复杂流动及航行体运动规律, 才能有效利用这项先进技术。近年来学者们对于超空泡现象的研究取得了一定的成果, 但是相对于理论和数值模拟方面^[2-3], 通过实验手段取得的研究成果相对较少^[4], 数据还不充分。我国在高速物体诱导产生自然超空泡的基础试验研究方面离国际先进水平还有一定距离, 相关的研究单位大多是在水洞中进行。水洞属于反向运动设备, 它把射弹模型部分固定于工作区域内, 通过控制水流速度来获得射弹模型不同相对速度下的空泡形成特征, 一般针对低速超空泡射弹进行实验研究, 且试验受弗鲁德数 Fr 的影响较大, 空泡变形较严重, 难以准确分析空泡的形态特性^[5]。因此, 开发一种高速物体发射装置用于正向研究超空泡十分必要。

本文通过在自行研发的水平超空泡发生装置上的相关实验, 来验证了超空泡的形成机制, 并进一步研究细长体长径比和空化器头部形状对超空泡形态和超空泡尺寸的影响, 分析最高速度为 85.78 m/s

收稿日期: 2012-09-15

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(Z1110123)

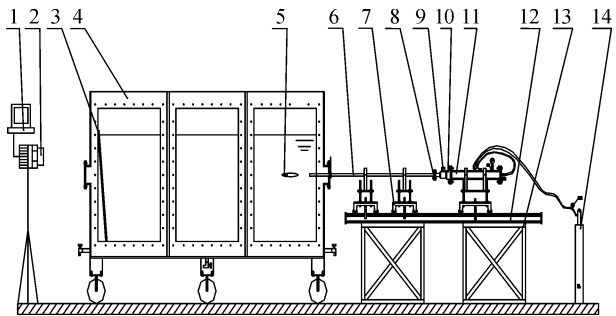
作者简介: 周素云(1988—), 女, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要从事超空泡流动的研究。

通信作者: 施红辉, 电子邮箱: hshshi@zstu.edu.cn

的水下航行体自然超空泡形态随空化数的变化规律,以及超空泡与其内部航行体之间的相互作用,还有超空泡的发展过程等。需要说明的是,与水洞实验相比,本实验不会出现水洞实验中三种模型的支撑方式所带来的诸如影响超空泡前部来流流场、中部超空泡形状以及尾部空泡闭合及流场特性等问题,且它能反映自然超空泡形成发展的真实性。

1 实验装置和实验方法

图 1 所示为实验装置以及所采用的实验系统,它主要包括发射系统、观察系统、高速摄影系统三个部分。发射系统主要包括细长体 5、发射管 6、小车 7、管阀连接器 8、电磁阀 9、缸阀连接器 10、高压气缸 11、小车轨道 12、小车支撑架 13、高压气瓶 14 等,其中发射管、管阀连接器、电磁阀、缸阀连接器、高压气缸以及高压气瓶依次连接,细长体在实验前安装在发射管内,连接好的发射组件固定在小车上,小车安放在支撑架的轨道上,可以来回移动。发射管管长 1.6 m,其出口浸没在水中。高压气缸为内径 60 mm、壁厚 10 mm、长为 0.6 m 的圆柱体。观测系统主要包括观测水箱 4,其材质为 10 mm 厚的不锈钢板,其尺寸为 3 m×1 m×1.5 m,水箱的前后两侧分别开有大小为 0.8 m×1.1 m 的 6 个观察窗,观察窗上覆盖有机玻璃,便于拍摄。高速摄影系统包括工控计算机 1 和高速摄影仪 2,高速摄影仪与工控计算机相连,其摄像头正对水箱观测窗口。此外,水箱的前后还配备有照明灯,增加光的强度,以便达到好的拍摄效果。



1. 工控计算机,2. 高速摄影仪,3. 橡胶挡板,4. 观测水箱,
5. 细长体,6. 发射管,7. 小车,8. 管阀连接器,9. 电磁阀,
10. 缸阀连接器,11. 高压气缸,12. 小车轨道,
13. 小车支撑架,14. 高压气瓶

图 1 水平超空泡发生实验装置

实验程序为:安装好实验设备,打开管阀连接器,将细长体安放入发射管,移动小车,将发射管推入观测水箱内,往高压气缸内注气到所需压力,实验

细长体在高压气体的驱动下,在发射管中加速。管内空气在细长体的压缩下先喷入水中,随后穿过先导气体射入水中,同时打开高速摄影仪记录细长体水平射弹的过程,实验完毕,拉出发射管。

需要说明的是,在实验的过程中,通过减压阀来调节高压气缸的驻室压力 P ,进而获得细长体不同的出膛速度。细长体采用铝镁合金,头型选取三种,分别为平头,圆头和 90° 锥角尖头,其具体尺寸详见表 1,实物图见图 2。本实验中选用的注水高度为 $H=84\text{ cm}$,水平发射管中心线到自由面的高度 $Y=9\text{ cm}$,室温 28°C 。实验结果处理时,将所拍摄得到的图片用 photoshop7.0 放大到 A4 纸尺寸(210 mm×297 mm)之后,再进行物体位移的测量,其中选取发射管的中心线作为坐标 X 轴,与中心线垂直的拍摄窗口的左边边线作为坐标 Y 轴,在细长体的头部选取一个参考点,比较相邻两张图片中参考点的变化,可以得到细长体的位移 $x_i(i=0,1,2,\dots)$;再利用高速摄影仪的拍摄速度,得到细长体发生位移 x_i

表 1 航行体模型几何规格

编号	头型	长度 L/mm	直径 d/mm	长径比	质量 /g	密度 /(kg/m^3)
1	平头	24	6	4	1.74	1.86×10^3
2	平头	36	6	6	2.63	1.86×10^3
3	平头	48	6	8	3.56	1.86×10^3
4	圆头	36	6	6	1.62	2.55×10^3
5	90° 锥角	36	6	6	1.21	2.53×10^3

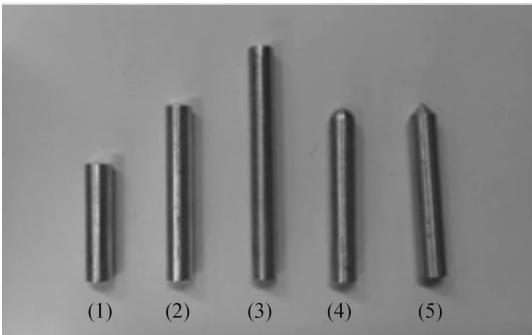
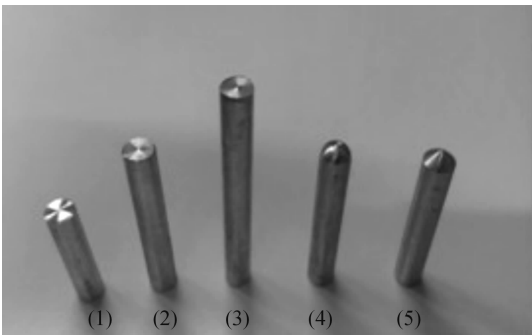


图 2 五种不同几何规格的细长体(5005 铝镁合金)

所用的时间,进而计算出该段时间内细长体的平均速度 V_i (该速度并不是膛口速度,而是进入拍摄区域后某时刻的速度),进入拍摄区域后的初始速度列于表2中。这样测得的物体运动速度的误差为 2.3% [5]。实验中,高速摄影仪拍摄速度为 $1\,000$ 帧/s,曝光时间为 $1/8\,000$ s。表2给出了5个工况的实验条件。

表2 五种不同工况下的实验参数

工况号	头型	初始速度 $V_i/(m/s)$
1	平头	50.73
2	平头	81.42
3	平头	62.65
4	圆头	85.78
5	90° 锥角	28.45

注:驻室压力 P_0 1.1 MPa,注水高度 H 84 cm,实验水深为 Y 9 cm。

2 实验结果与分析

2.1 航行体长径比对超空泡稳定性的影响

对于水下高速航行体来说,长径比过小,航行体可能会在水中发生偏转或翻转,出水弹道不直;如果长径比过大,重量过重、速度较低,航行体将不能形成完全超空泡形态。现选取直径均为 6 mm、长度分别为 24 、 36 mm 和 48 mm 的平头圆柱体的细长体,用 1.1 MPa 氮气驱动,拍摄得到实验结果见图3~图5。

观察比较三组图片,图3(b)较3(a)细长体的行驶轨迹已经略有向上偏转,图3(b)~图3(f)可以看出明显的偏转;图3(f)~图3(k)的过程中细长体的

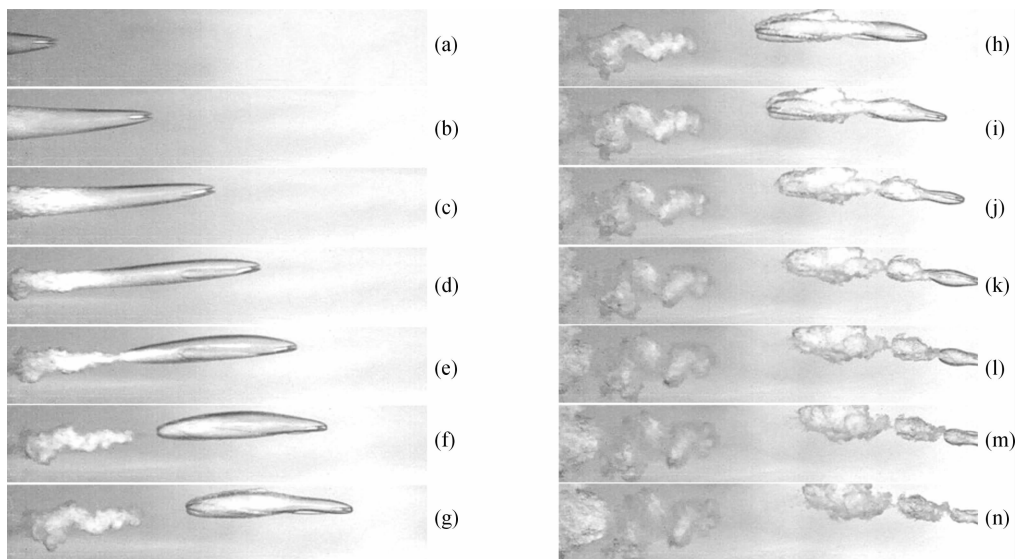


图3 工况1(直径为 6 mm、长度为 24 mm 的平头航行体水平入水)超空泡图像

注:相邻两幅照片之间的时间间隔为 2 ms

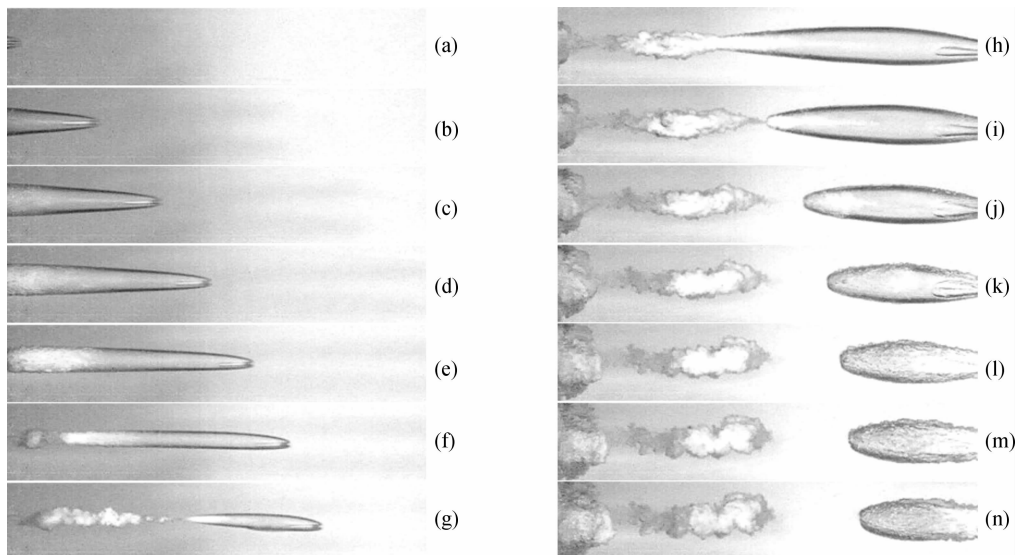


图4 工况2(直径为 6 mm、长度为 36 mm 的平头航行体水平入水)超空泡图像

注:相邻两幅照片之间的时间间隔为 1 ms

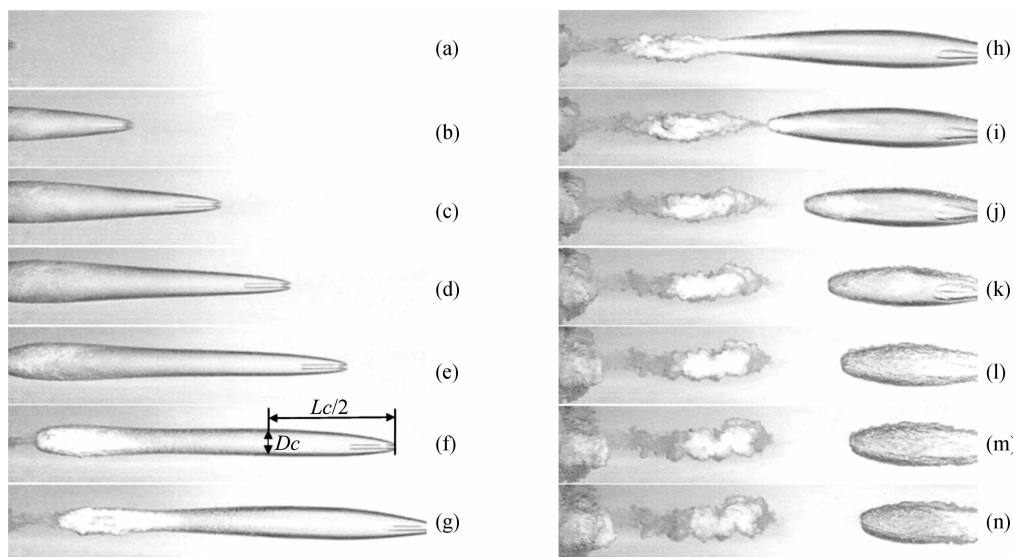


图5 工况3(直径为6 mm、长度为48 mm的平头航行体水平入水)超空泡图像

注:相邻两幅照片之间的时间间隔为2 ms

头部又开始慢慢向下偏转,在整个航行的过程中,细长体诱导产生的超空泡迅速减小;而观察另外两组图片可发现,从图4(a)~图4(g)和图5(a)~图5(g)航行体基本上是水平前进;图5中长径比为8的细长体诱导产生的超空泡尺寸相较于前两者明显要大许多,超空泡的形状也更加接近于理想的椭球体,航行体行进的距离也更加远。这就说明了适当地增加长径比,有利于水平运动的细长体产生稳定和持久的超空泡。

2.2 航行体头型对超空泡稳定性的影响

水下高速航行体的头型对它的弹道稳定性也有较大的影响。再选择直径6 mm、长度36 mm,头型分别圆头和90°锥角的2种细长体,用1.1 MPa压力的

氮气驱动,实验结果见图6和图7。通过比较图4、图6和图7可知:3种空化器的超空泡外型基本上接近长椭球体,与大多数水洞试验的结果相符^[4,7],但在相同驱动压力下,平头细长体最能形成较为稳定的水平入水弹道,圆头和90°锥角细长体的水平入水弹道稳定性依次递减。从图6(b)~图6(i)可以看出圆头型航行体运动过程中头部普遍向下偏转。这是由于细长体的尾部撞击空泡壁,原本闭合的空泡壁产生缺口,超空泡被打断,使超空泡的稳定性遭到破坏^[4,7]。再观察图7所示的90°锥角的细长体在水中的运动情况,因为航行体在进入拍摄区域后速度仅为28.45 m/s(见表2和图7(a)~7(b)),该工况的速度在5个工况中最小,所以出现了由完全空化向局部空化的转

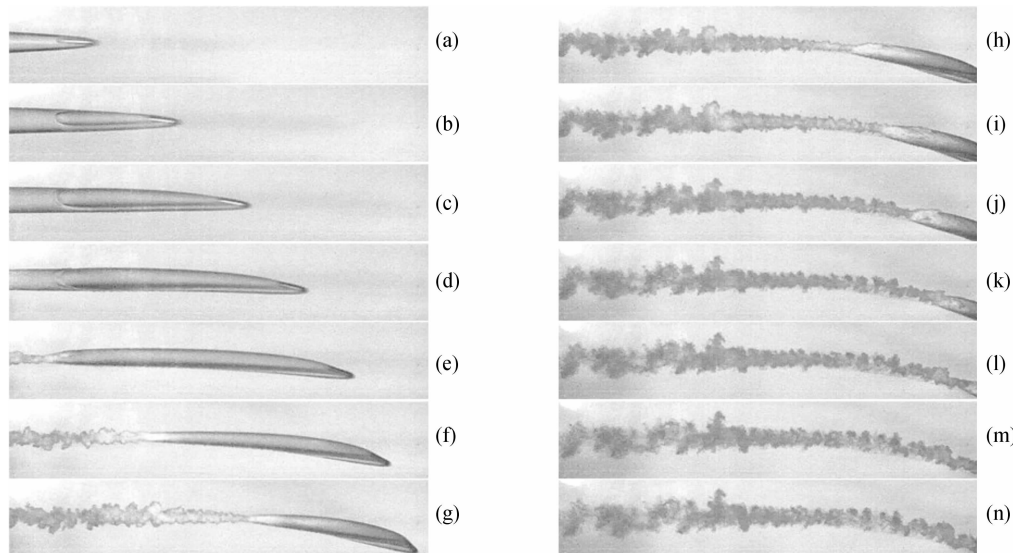


图6 工况4(直径为6 mm、长度为36 mm的圆头航行体水平入水)超空泡图像

注:相邻两幅照片之间的时间间隔为1 ms

变(如图 7(c)),最终空泡全部溃灭(如图 7(k))的现象。实验表明头部为锥角容易使航行体轨道发生偏转。总之,细长体头形对空泡的形成和稳定性有一定的影响:平头形状的航行体稳定性最佳,即圆盘空化

器最有利于航行体的稳定性,与其比较,锥形空化器的空泡脱体点位置靠后些,粘湿面积大,不利于航行体的超空泡减阻特性和超空泡形态的稳定性。易文俊等^[8]在其数值计算中也发现了类似的现象。

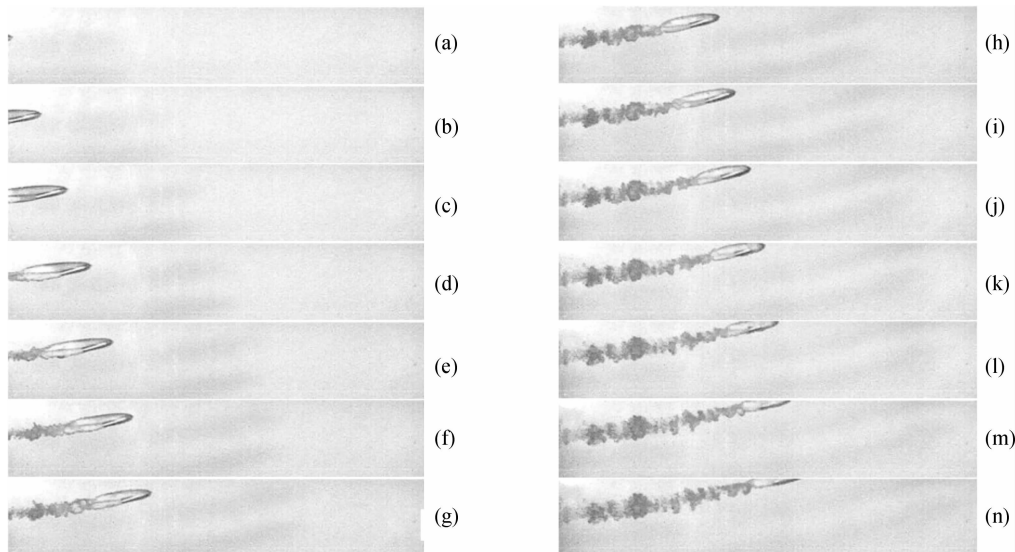


图7 工况 5(直径为 6 mm、长度为 36 mm 的尖头 90°航行体水平入水)超空泡图像

注:相邻两幅照片之间的时间间隔为 1 ms

2.3 水平入水过程中超空泡几何尺寸变化规律

根据 Logvinovich 空泡截面独立膨胀原理,自然超空泡的几何形态接近于一个回转椭球体,现定义超空泡直径 D_c 为椭球中截面的直径,在实际的射弹照片中取超空泡的最大宽度;定义超空泡长度 L_c 为椭球的长轴,在实际的射弹照片中取超空泡头部到超空泡最大直径处距离的 2 倍^[4,6],如图 5(f)所示。定义超空泡相对宽度 \overline{D}_c 为超空泡直径 D_c 和航行体直径 D_n 的比值,即 $\overline{D}_c = D_c/D_n$;定义超空泡相对长度 \overline{L}_c 为超空泡长度 L_c 和航行体直径 D_n 的比值,即 $\overline{L}_c = L_c/D_n$; L_n 为航行体的纵向长度。

Logvinovich 认为^[9]超空泡的无量纲直径 \overline{D}_c 和无量纲长度 \overline{L}_c 满足如下半经验公式:

$$\overline{D}_c = \sqrt{\frac{c_{x0}(1+\sigma)}{k\sigma}} \quad (1)$$

$$\overline{L}_c = \frac{1}{\sigma} \sqrt{c_{x0}(1+\sigma) \ln \frac{1}{\sigma}} \quad (2)$$

式中: σ 为空化数^[10],其表达式为

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{0.5\rho v_\infty^2} \quad (3)$$

式中: P_∞ 为参考流体压力(绝对压力),一般取物体前方未扰动处液流静压; v_∞ 为流场速度,通常取与 P_∞ 相应的来流速度; P_v 为液体的汽化压力; ρ 为液体密度。在圆盘空化器情况下 $c_{x0} = 0.82$, $k = 0.9 \sim$

1.0,该公式适用于空化数在 0~0.25 的范围。

Savchenko^[11]提出了适用于空化数范围 0.012~0.057 的经验公式:

$$\overline{D}_c = \sqrt{3.659 + \frac{0.761}{\sigma}} \quad (4)$$

$$\overline{L}_c = \left(4.0 + \frac{3.595}{\sigma}\right) \quad (5)$$

利用公式(1)~(5),结合从图 3~图 7 所给实验图片测得的数据,分别绘制出超空泡的无量纲直径和无量纲长度随空化数的变化关系,如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,在公式各自适用的空化数范围内,本实验测量所得的超空泡无量纲直径的变化趋势和超空泡无量纲长度的变化趋势与 Logvinovich 和 Savchenko 等提出的半经验公式基本一致,工况 2、工况 4 和工况 5 的实验值与经验公式的计算值非常接近,在空化数 $\sigma = 0 \sim 0.015$ 的范围内,本实验值和计算值基本相符。从几组数据的统计来看,本实验结果更加接近于 Savchenko 的经验结果,这在一定程度上验证了本研究方法的正确性。然而,实验结果也出现了一些特殊的情况,如图 8 中工况 1 和工况 3 的实验结果与模型值略有出入,工况 3 情况下,超空泡无量纲直径随空化数的增加先下降后又上升,对于超空泡直径 D_c 的这种增大现象,分析其原因有以下两个方面:(a)由于航行体后半段航行速度比较低,其空化数并不在 Logvi-

novich 和 Savchenko 提出的半经验公式的适用范围内;(b)观察图 5(e)~图 5(l)可知,航行体向前运动的过程中,超空泡逐渐开始脱落(如图 5(f)),分成前后两个空泡,然后空泡开始溃灭,导致超空泡尾部形成一股再进入射流,而这股射流将会导致超空泡尺寸的增大。工况 1 情况下,实验值比经验值略高一些,在图 3(d)~图 3(h)中,航行体的尾部与空泡壁面发生碰撞,导致空泡的尺寸增大,这些结果与 Savchenko 的实验结果有一定的出入。

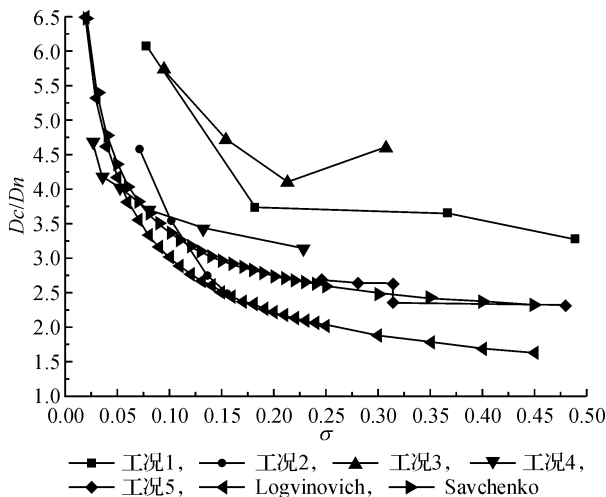


图8 超空泡无量纲直径随空化数的变化规律

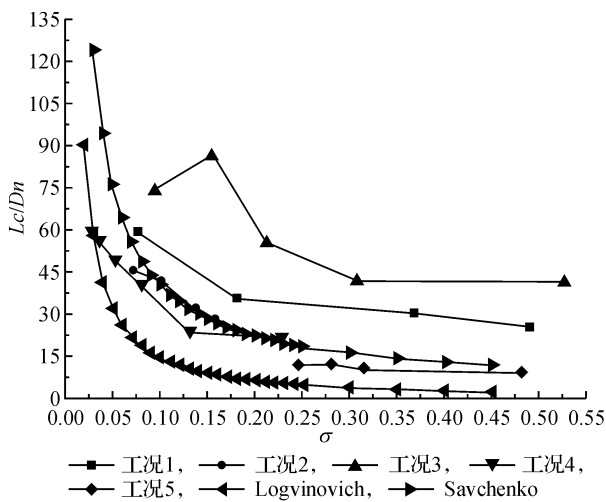


图9 超空泡无量纲长度随空化数的变化规律

3 结论

(a)在细长体水平入水诱导产生超空泡的过程中,超空泡的稳定性与航行体的头部和航行体的长

径比有关,其中平头的空化器更加利于产生稳定的超空泡,而圆头的又优于尖头的;适当地增加长径比有利于超空泡的稳定性,长径比较低的航行体容易发生翻转。(b)根据实验数据得出了空化数和超空泡无量纲尺寸之间的关系曲线,并与 Logvinovich 和 Savchenko 等人提出的半经验公式做了对比,验证了本文研究方法的正确性。实验数据与半经验公式的比较结果验证了小空化数下经验公式的准确性,但是在航行体速度较低,空化数较大的情况下,由于空泡的脱落、溃灭将导致空泡尺寸的增大。(c)超空泡尾部的再进入射流会导致超空泡尺寸的增大,航行体与空泡壁面的碰撞也会使空泡的尺寸增大,这些因素都会使得 Savchenko 等人的经验公式失效。

参考文献:

- [1] 曹伟,魏英杰,王聪,等. 超空泡技术现状、问题与应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 571-579.
- [2] 金大桥,王聪,魏英杰,等. 水下射弹自然超空泡减阻特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 202-209.
- [3] 李东旭. 水下超空泡高速射弹数值分析与试验[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(10): 25-30.
- [4] 曹伟,王聪,魏英杰,等. 自然超空泡形态特性的射弹试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 175-181.
- [5] 吴岩. 物体高速出入水实验装置研制及流场可视化[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
- [6] 周浩磊. 水下高速航行体发射系统的设计及超空泡流场特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- [7] Shi H H, Kume Makoto. Underwater acoustics and cavitating flow of water entry[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(4): 375-382.
- [8] 易文俊,王中原,熊天红,等. 水下射弹典型空化器的超空泡形态特性分析[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 103-106.
- [9] Logvinovich G V. 自由边界流动的水动力学[M]. 施红辉,译. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [10] 王献孚. 空化泡和超空化泡流动理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 15-16.
- [11] Savchenko Y N. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies[C]//Proc Fourth International Symposium on Supercavitating Flows, Brussels: RTO-AVT and VKI, 2001: 12-24.

(下转第 249 页)

Design Method of Reverse Solution of Pitch Curve of Non-Circular Gear Based on Addendum Discrete Points

CAO Ning-hui¹, LI Ge¹, XU Yue-ping², WEI Xue-wen², CHEN Xiao-liang¹, ZHANG Ji-zhao¹, BAO Jun-feng¹

(1. School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Xiaojing Machinery Manufacturing Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: This paper puts forward a numerical calculation method of non-circular gear pair based on addendum discrete points according to the relationship between addendum curve and pitch curve of gear and reverse engineering principle; uses numerical values in MATLAB and Pro/E software to calculate the function of curve analysis through coordinates of non-circular gear addendum point measured; determines data of pitch curve of non-circular gear and obtains the data of pitch curve of mating driven gear based on conjugation principle. Non-circular gear pair designed and processed with this method has been successfully applied practically, ensuring the feasibility of this method.

Key words: discrete points; non-circular gear; reverse; numerical calculation

(责任编辑: 朱松英)

(上接第 223 页)

Development of Horizontal Supercavity Generating Facility and Relevant Experimental Study

ZHOU Su-yun, SHI Hong-hui, HU Qing-qing, HU Jun-hui

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper develops an experimental device launching slender body horizontally and inducing the production of supercavity; records the process of high-speed sailing in water of slender body under several different working conditions in real time by using a high-speed camera; observes the morphological development and change process of supercavity gas-liquid two-phase flow after the slender body enters water horizontally at high speed; specifically analyzes the influence of length to diameter ratio of slender body and the head shape of cavitator; calculates the speed of slender body and the change of supercavity size according to pictures recorded in real time and provides the relation curve between cavitation number and supercavity dimensionless size; and then compares models put forward by Logvinovich and Savchenko etc. The result shows that experimental data and the variation trend of model are basically consistent.

Key words: slender body; supercavity; length to diameter ratio; high-speed photography

(责任编辑: 张祖尧)