

文章编号: 1673-3851 (2011) 04-0534-06

物体高速出水实验装置研制及流场可视化

施红辉, 吴 岩, 周浩磊, 张晓萍, 周素云, 贾会霞, 章利特, 王 超, 董若凌

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 研制进行高速物体出水实验的实验设备。阐述水下高速物体出水时,物体、超空泡和尾迹与自由液面相互作用的实验研究结果。试验整个物体在水下高速运行直到完全出水的过程;演示空泡在水下形成及在自由液面附近溃灭的过程,并采用高速摄影仪记录下来。通过照片和数据分析,结果表明:当物体运动速度达到 40 m/s 左右,是从空化气泡发展成超空泡的临界速度;当速度小于 40 m/s 时,会出现局部空化,并且速度减弱时呈现振荡趋势;大于此速度,速度减弱时则呈线性;物尖露出水面前一刻的瞬时速度为出水前的谷底值;物体完全出水时,在自由面附近形成了有向上运动趋势的气液混合现象。

关键词: 高速物体出水; 超空泡; 自由面; 细长体

中图分类号: O359 **文献标识码:** A

0 引 言

空化是一种十分复杂的物理现象。当航行体在水中高速运动时,其表面某些部位的压力会因扰流的作用而降低,当流经这些部位的水因压力过低而蒸发汽化,使流场局部呈现水-汽二相流动时,就标志着流场中发生了空化现象^[1]。一般长度小于物体长度的空泡称为局部空泡,长度达到或超过物体长度的空泡称为超空泡^[2]。超空泡可以使水下高速运行的航行体获得 90% 的减阻量,是未来水下兵器降低阻力、提高航速、增大航程的重要手段和发展方向^[3]。超空泡主要分为自然超空泡和通气超空泡两种,前者依靠提高航行体的速度生成,后者依靠人工通气增加空泡内压强生成^[4-6]。与国外相比,我国对超高速空泡航行体流动特性和机理的研究基本上处在起步阶段。权晓波等^[7]的研究指出,物体出水时空化气泡的溃灭,对航行体的受力有显著影响。由于这个问题的强非线性和瞬态特性,无论是试验研究还是理论数值模拟都很困难,所以在国内外都未被很好解决。

研制了研究物体高速出水实验装置,可对高速细长体在水中形成的自然空泡到出水时空泡的变化进行观察,并可根据实验数据给出相关现象的理论分析。该实验方法可模拟水下航行体的高速运动,具有成本低,试验周期短的优点,是研究自然超空泡的发展变化规律^[8]、形态特征及其稳定性等基础问题的有效手段,也为下一步研究超高速范围内的超空泡实验提供了参考。

1 实验设备

物体高速出水实验装置包括高压气源、箱体支撑架、高速摄影仪、工控计算机、隔膜、弹丸捕获装置、水箱、水箱盖、平板、球阀;箱体支撑架的上端面和平板的中心开有等直径的通孔,平板下端面同轴焊有法兰,法兰向下依次安装第一隔膜和球阀,发射装置安放在球阀下面,发射装置的发射口中心始终对准球阀的阀口中心并与高压气源连接;平板的上端面与水箱的下端面固接,水箱盖与水箱的上端口通过铰链连接,水箱盖中

心开有通孔,水箱盖的上端面与弹丸捕获装置连接,水箱盖的下端面依次安装第二隔膜和法兰盖,水箱箱体四周设有观察窗口;高速摄影仪的摄像头对准观察窗口的液体自由面处,高速摄影仪与工控计算机相连。实验系统见图1。

实验用水箱2材质为5 mm厚的不锈钢板,尺寸600 mm×600 mm×1 000 mm。水箱四面均开有相同大小的观察窗4,材质为5 mm厚的有机玻璃板,尺寸800 mm×300 mm。在水箱顶部盖板中央,安装有一捕获从水中射出弹体的装置3,此装置类似法兰,一端封闭,一端开口,空腔内填充黏土,当弹体从水中射出,打入其中,从而减弱弹体速度,便于回收。水箱下端的球阀5,连接水箱底部与外界,既可作为弹体入射口,又可用作为水箱的排水口。支撑架的材质为Q235方形钢。整个支架的尺寸为840 mm×840 mm×1 500 mm(不含脚轮)。由于之后的实验还需要进一步采用轻气炮作为弹体发射装置,所以支撑架下方要留下足够大的空间。

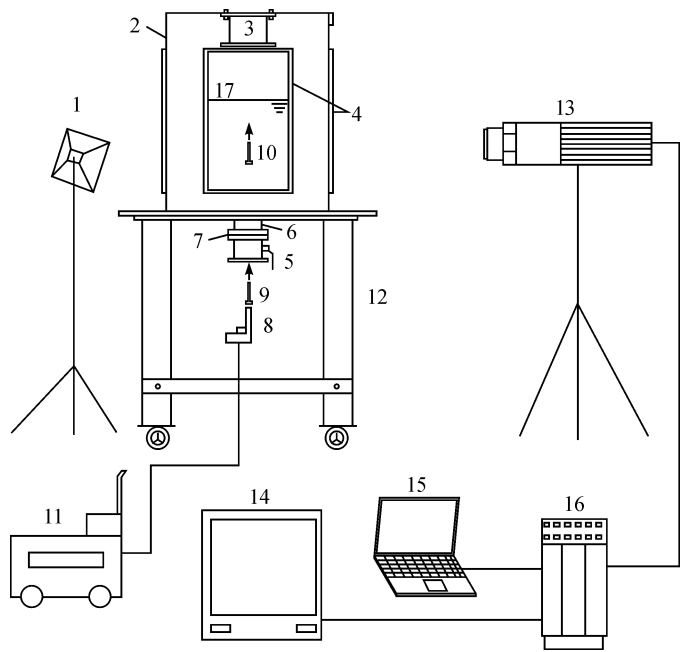
发射装置8为美特T50SA型号射钉枪(使用气压0.5~0.8 MPa),弹体为射钉枪专用钢钉,并由额定排出压力(表压)为0.8 MPa的直联便携式空气压缩机11为射钉枪提供动力。射钉的尺寸如图2所示。除此之外还有拍摄系统:高速摄影仪(PHOTRO公司的FASTCAM-super 10KC),它由摄像头13、控制器15和监视器14等3大组件组成,同时还配有摄影灯、电脑用于数据收集和存储。实验中,水箱中的水面为静止,并处于常温常压状态。为了确保曝光的进光量从而获得清晰的拍摄效果,实验中在水箱观察窗适宜的位置上贴有均光纸以使得背景光均匀地照射在需观察的对象上。

实验时,试验物体通过高压气源所释放的气体被驱动、加速,并通过发射装置发射进入放有液体的水箱,当试验物体自上而下和自下而上地通过液体自由面时,产生了伴随超空泡产生的入水和出水的流场。所产生的超空泡流具有较清晰的汽/液两相流内外边界,配合使用各种光学仪器和流场可视化仪器,就可以研究和了解空泡内气体的平衡状态、自由面与超空泡的相互作用、汽/液界面的不稳定性、湍流边界层的发展等复杂的流体动力学行为过程。

2 实验方法

2.1 实验步骤

a)在箱体底部圆孔接口法兰6与球阀5连接处放置2~5层锡箔纸7,防止水箱注入水之后泄漏,之后紧固球阀螺丝。b)向水箱中注入适量的水,并且在注入的过程中多次开合球阀阀门,检查密闭是否良好。c)打开光源以及高速摄影仪,通过监视器来调整光源位置及摄影仪的焦距,使得实验观察对象在监视器中显示为最佳效果。d)给空气压缩机加压,使其达到额定功率,射钉枪装钉,与空压机连接。应注意的是,在此过程中要严格按照射钉枪的正确使用方法操作,防止意外发生。e)将球阀手柄置于开启位置,射钉枪垂直向上对准球阀口发射,钢钉穿过锡箔纸在水中高速运行(见图1中的10),并最终冲出水面。f)用高速摄影仪详细记录



1. 光源, 2. 水箱, 3. 捕获装置, 4. 观察窗, 5. 球阀, 6. 箱底法兰, 7. 锡箔纸, 8. 射钉枪, 9. 刚出枪的钢钉, 10. 射入水中的钢钉, 11. 空气压缩机, 12. 支撑架, 13. 高速摄影仪, 14. 监视器, 15. 电脑, 16. 控制器, 17. 水面

图1 实验系统示意

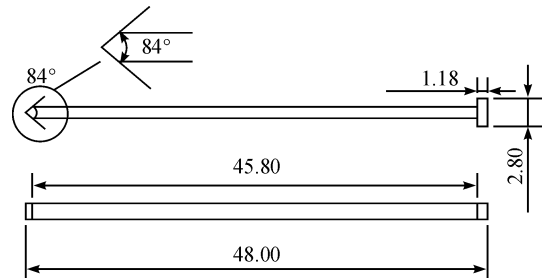


图2 实验用钉及尺寸(mm)

整个过程,拍摄速度为 1 000 帧/s,拍摄时长为 2 s,并实时存储实验数据。

2.2 实验条件

几种不同工况的实验参数见表 1。

3 实验结果及讨论

对上述几种工况下的细长体出水实验进行高速拍摄。高速摄影仪拍摄在实验中采用 1 000 帧/s 的实验形貌,即每相邻两张图片之间间隔为 1 ms。通过专业图片处理软件 photoshop7.0 测量出细长体单位时间的位移和角度,计算出细长体在水下及出水过程中的瞬时速度^[9]。本实验测量钉体位移时为了减小误差,采用两个基准面,分别是水面和照片的底部,测量出钉尖与这两个基准面的距离,然后分别求得两组速度,取其平均值。从而尽量减小因量程较短时肉眼观察尺寸所产生误差。

实验工况:水深 H 为 350 mm、驱动压力 P 为 0.9 MPa(绝对压力)时拍摄到的细长体出水情形见图 3。照片示出的发亮的钉身是因为金属物体表面的反光所致。这说明此时物体表面还没有被超空泡覆盖。而钉头和钉尾的反光发亮,则说明局部空化的形成,因为球状或半球状的气泡表面正是良好的反光面。

图 4 显示相应的时间与速度的关系。由图 4 可见,在钉尖露出水面之前,速度不是呈直线下降,而是在振荡过程中减弱;在钉尖刚刚露出水面前,速度达到出水前的谷底值;在逐渐出水的过程中,速度略有升高,之后也在振荡中减小。图 4 中示出了在第 15~16 ms 时,尖钉开始出水(如第一个向上指的箭头所示);在 25 ms 时,钉体完全出水(如第二个向下指的箭头所示)。图 4 左半部分有一曲线为速度拟合曲线,它表示钉尖出水前细长体的速度变化趋势。获得的拟合公式为:

$$V=58.45t^{-0.2816}-16.12(\text{m/s}) \quad (1)$$

式中速度 V 的单位为 m/s,时间 t 的单位为 ms。

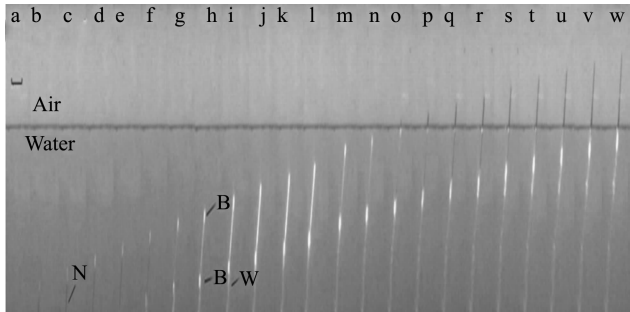


图 3 细长体出水的高速摄影照片

注:c中N表示钉体(Nail),h中B表示气泡(Bubble),i中W表示尾迹(Wake),a中黑色线段为照片比例尺,其实际长度为20 mm。

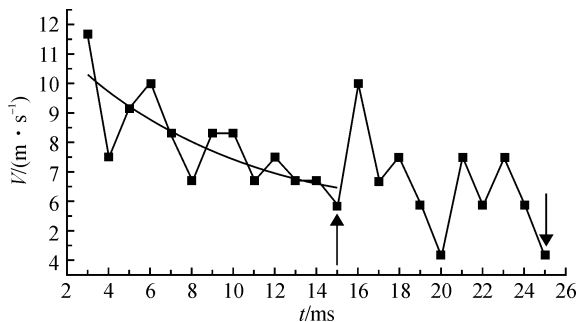


图 4 细长体速度的变化过程

注:箭头所指分别为钉尖出水前一刻和钉体完全出水时的瞬时速度。

图 5 为工况在水深 H 为 250 mm,驱动压力 P 为 0.8 MPa(绝对压力)的情况下拍摄的细长体出水情形。

图 6 为相应的时间与速度的关系。图 6 可以看出,速度比之前有所提高,钉尖出水前整个过程的速度振荡不如之前那么强烈。与之前相似的是,在钉尖露出水面前,速度依然还是出水前的谷底值,在逐渐出水的过程中,速度略有升高,之后也在振荡中减小。图 6 中示出了在第 9~10 ms 时,钉尖开始出水(如第一个向上指的箭头所示);在 16 ms 时,钉体完全出水(如第二个向上指的箭头所示)。图 6 左半部分有一曲线为速度拟合曲线,它表示钉尖出水前细长体的速度变化趋势。获得的拟合公式为:

$$V=54.5t^{-0.7512}(\text{m/s}) \quad (2)$$

式中速度 V 的单位为 m/s,时间 t 的单位为 ms。

当速度不足 20 m/s 的时候,由于钉体在头部和尾部产生了局部空泡,而中间部位还是处在水中,钉体此时是在混合介质的状态下运行,增大了其运行时的不稳定性。被空泡包裹的部分,物体必将与空泡边界面上水体碰撞,产生弹跳^[10],这也就不难解释为什么钉体在钉尖完全出水之前速度的减弱会呈现一个振荡的趋势;当钉尖露出水面时,钉体所带的空泡在水面附近会开始溃灭,此时附连质量力、浮力和阻力都迅速下降,

钉体也会发生速度的变化^[11],这就是钉体出水时速度也会略有升高的缘故,但是总的趋势还是减弱的。

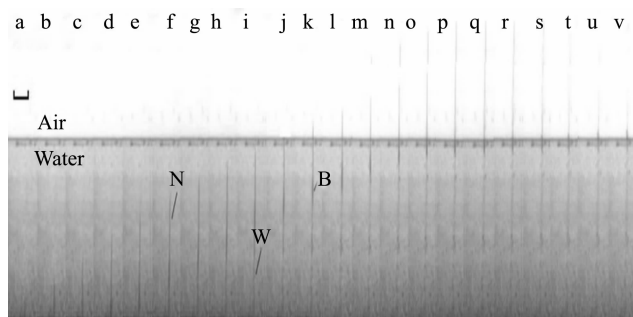


图 5 细长体出水的高速摄影照片

注:f中 N 表示钉体(Nail),k 中 B 表示气泡(Bubble),i 中 W 表示尾迹(Wake),a 中黑色线段为照片比例尺,其实际长度为 30mm。

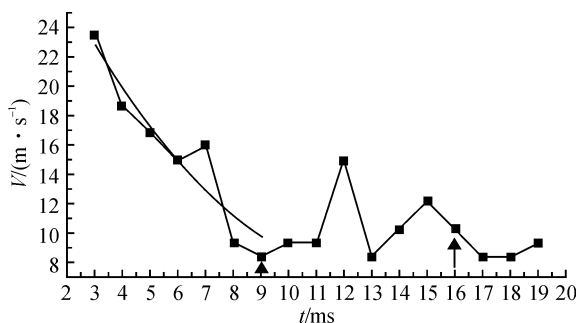


图 6 细长体速度的变化过程

注:箭头所指分别为钉尖出水前一刻和钉体完全出水时的瞬时速度。

图 7 为工况在水深 H 为 300 mm,驱动压力 P 为 0.9 MPa(绝对压力)的情况下拍摄到的细长体出水情形。可以看到,当入水速度提升至 40 m/s 左右时,细长体的空泡更加明显。

图 8 为相应的时间与速度的关系。与之前相同的一点是,钉尖刚出水面前一刻的瞬时速度依然为细长体在水下速度的最低点。图 8 中示出了在第 5~6 ms 时,钉尖开始出水(如向上指的箭头所示)。图 8 左半部分有一曲线为速度拟合曲线,表示钉尖出水前细长体的速度变化趋势。获得的拟合公式为:

$$V = 58.45t^{-0.2816} - 16.12(\text{m/s}) \quad (3)$$

式中速度 V 的单位为 m/s,时间 t 的单位为 ms。

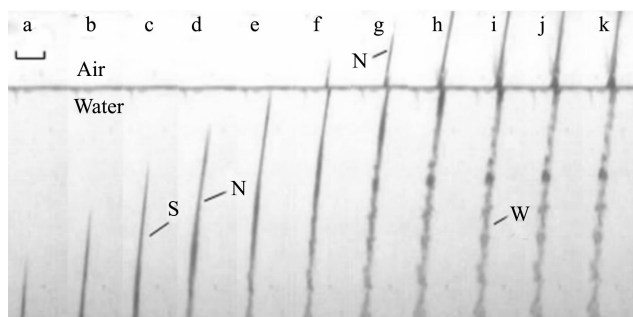


图 7 细长体出水的高速摄影照片

注:d 中 N 表示出水前被空泡包裹的钉体(Nail),g 中 N 表示冲出水面并脱离空泡的部分钉体(Nail),c 中 S 表示超空泡(Supercavitation),i 中 W 表示尾迹(Wake),a 中黑色线段为照片比例尺,其实际长度为 15 mm。

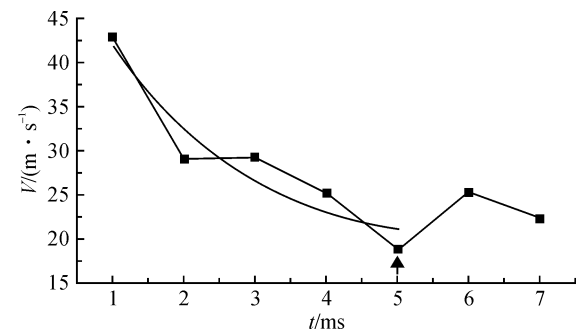


图 8 细长体速度的变化过程

注:箭头所指为钉尖出水前一刻的瞬时速度。

图 9 为工况在水深 H 为 250 mm,驱动压力 P 为 0.9 MPa(绝对压力)的情况下拍摄到的细长体出水情形。可以看出,出水时钉体明显变细,可以从图像和速度上判断出产生了超空泡。

图 10 为相应的时间与速度的关系。速度的变化规律也与图 7 的工况下大致相同。图 10 中示出了在第 5~6 ms 时,钉尖开始出水(如向上指的箭头所示)。图 10 左半部分有一曲线为速度拟合曲线,它表示钉尖出水前细长体的速度变化趋势。获得的拟合公式为:

$$V = 58.08t^{-0.3984}(\text{m/s}) \quad (4)$$

式中速度 V 的单位为 m/s,时间 t 的单位为 ms。

由这两组增速后的实验可以看出,物体被空泡完全包裹,形成了超空泡,钉尖出水面之前,在单一介质中,钉体运行比较稳定,速度也是呈接近线性递减的趋势;在钉体逐渐出水面之后,空泡溃灭,产生了与之前速度较低时相同的状况,但是当钉体完全出水时,在液面附近观察到的并不完全是一个气泡,而是气泡破灭时泡中的负压吸气与钉体带出的水混合在一起,形成一个气液混合物。由于本研究只实验了细长体,所以所得的结论还有待于进一步实验来证明。

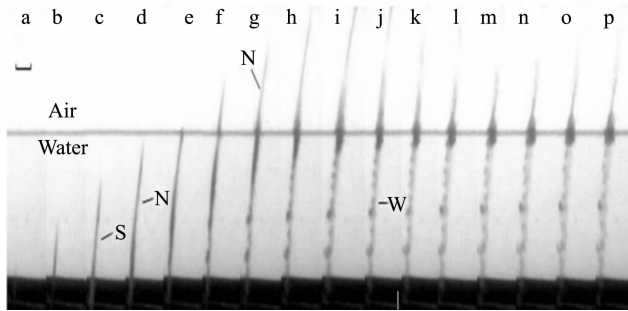


图9 细长体出水的高速摄影照片

注:d中N表示出水前的钉体(Nail),g中N表示冲出水面并脱离空泡的部分钉体(Nail),c中S表示超空泡(Supercavitation),j中W表示尾迹(Wake),a中黑色线段为照片比例尺,其实际长度为15 mm。

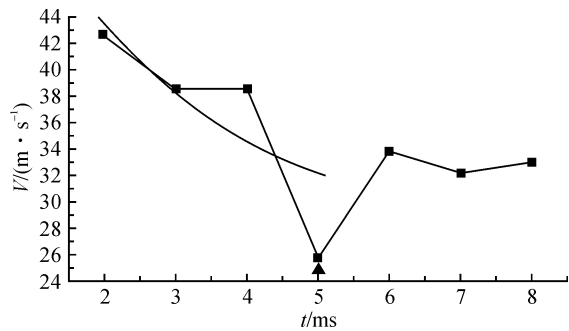


图10 细长体速度的变化过程

注:箭头所指的是钉尖出水前的瞬时速度。

根据以上实验及其数据可判断约40 m/s的速度是出现超空泡的一个临界点(此实验条件下),并且计算此时的空化数 K ,它的表达式^[12]为 $K=(p_0-p_v)/0.5\rho v^2$,其中 p_0 、 p_v 、 v 分别是外部压力、水的汽化压力、来流速度,查得此时温度下水的汽化压力值为4.2 kPa,代入可得到 $K=0.12$,与空化数小于0.1时会出现自然汽化超空泡现象^[10]的理论相吻合。从图3~图10的不同工况的实验结果可以看出,细长体跨越自由面时,也就是从水中刚进入空气中之时,物体有一个明显的加速趋势,这是因为物体脱离水体进入空气后阻力下降的缘故。物体出水时会受到因速度变化引起的额外的作用力,在设计水下航行体时这是必须考虑的因素之一。

4 结论

设计了用于研究三维水箱中垂直向上超空泡实验装置,观察了细长体高速出水面的过程。实验结果:

a)验证了空化数小于0.1时会出现自然汽化超空泡,速度达到40 m/s左右为空泡与超空泡的临界速度;b)当速度小于40 m/s时,会出现局部空泡,并且速度减弱呈现振荡趋势;大于此速度,速度减弱则呈线性;c)钉尖露出水面一刻的瞬时速度为出水前的谷底值,即细长体是从水中刚进入空气中之时,有一个明显的加速趋势;d)钉体完全出水时,在自由面附近形成了有向上运动趋势的气液混合流体。

参考文献:

- [1] 柯乃普 R T, 戴利 J W, 哈密脱 F G. 空化与空蚀[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
- [2] 颜开, 褚学森, 许晟, 等. 超空泡流体动力学研究进展[J]. 船舶力学, 2006, 10(4): 148-155.
- [3] 杨莉, 张庆明. 超空泡技术的应用现状和发展趋势[J]. 战术导弹技术, 2006(5): 06-10.
- [4] Savchenko Y N. Control of supercavitation and stability of supercavitating motion of bodies[C]//Ukrainian Academy of Sciences Kiev Inst of Hydromechanics. Proceedings of the Special Course on Supercavitating Flows. Brussels, 2001: 11-12.
- [5] Kuklinski R, Henoeh C, Castano J. Experimental study of ventilated cavities on dynamic test model[C]//California Institute of Technology. Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation. California, 2001: 33-35.
- [6] Vlasenko Y D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds[C]//National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Hydromechanics. Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation. Osaka, 2003: 15-16.
- [7] 权晓波, 李岩, 魏海鹏, 等. 航行体出水过程空泡溃灭特性研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(4): 545-549.
- [8] Savchenko Y N. Supercavitation-problems and perspectives[C]//California Institute of Technology. Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation. California, 2001: 19-20.
- [9] 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): 175-179.
- [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.
- [11] 罗金玲, 毛鸿羽. 导弹出水过程中气/水动力学研究[J]. 战术导弹技术, 2004(4): 23-25.
- [12] 张学伟, 魏英杰, 张嘉钟, 等. 模型结构对通气超空泡影响的实验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 203-208.

Development of Water Exit Test Facility of High-Speed Body and Flow Visualization of the Flow Field

SHI Hong-hui, WU Yan, ZHOU Hao-lei, ZHANG Xiao-ping, ZHOU Su-yun,
JIA Hui-xia, ZHANG Li-te, WANG Chao, DONG Ruo-ling

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

Abstract: This paper describes a study on the interaction of supercavitation and free surface when underwater high-speed blunt body exits from the water surface. A slender metal nail is shot into a water tank from its bottom. The nail moves upwards as an underwater high-speed moving body until it completely leaves the water surface and enters the above air space. The experiment demonstrates the formation of cavitation in the water and near the free surface as well as the collapse of the bubbles. The flow field is visualized by using a high-speed camera. The experimental results indicate that the speed of 40 m/s is the critical speed from which cavitation transits into supercavitation. When the speed is less than 40 m/s, partial cavitation on the slender body appears. The body speed exhibits an oscillatorily decreasing trend. Above the critical speed, the body speed decreases linearly. The instantaneous velocity of the nail tip just exiting water free surface is the lowest. There is a gas-liquid mixture phenomenon near the free surface when the nail body leaves the water surface completely.

Key words: water exit of high-speed body; supercavitation; free surface; slender body

(责任编辑: 杨元兆)

(上接第 528 页)

Study on Alignment Method of a Laser Synthetic Wavelength Interferometer

WEI Ruo-fei, YAN Li-ping, YAO Xi-guo, YANG Tao, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The alignment method of the laser synthetic wavelength interferometer is studied. A method for the alignment of the laser synthetic wavelength interferometer is proposed by using a four-quadrant detector. The alignment principle of the laser synthetic wavelength interferometer and the signal processing method are described. The alignment measuring experiment of the reference corner cube is carried out. The experimental result shows that the standard deviations are reduced from 7.038 mV to 1.6 mV in the direction of x and from 30.118 mV to 1.119 mV in the direction of z . The alignment measuring experiment of the measurement corner cube is carried out. The experimental result shows that the standard deviations are reduced from 3.2049 mV to 1.202 mV in the direction of x and from 2.831231 mV to 0.673 mV in the direction of y . These results show that the proposed alignment method is reasonable and feasible.

Key words: laser interferometer; alignment; four-quadrant detector(QD)

(责任编辑: 杨元兆)