

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711068

超空泡射弹尾翼流体动力特性实验分析

王 瑞^{1,2}, 党建军¹, 姚 忠²

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘 要: 为研究尾翼对超空泡流型发展及射弹流体动力的影响,在高速水洞中进行了通气条件下的超空泡射弹尾翼流体动力特性实验. 首先基于高速水洞搭建了通气空化绕流实验测试系统,同时根据射弹基本外形,按照相似理论设计了尾翼测力实验模型,为改变空泡壁面与尾翼的相对位置关系,用以研究穿刺高度对射弹尾翼流体动力特性的影响,实验中采用调整空泡尺寸或模型安装姿态来改变尾翼穿刺高度,最后对实验方案的合理性进行了充分的论证. 通过改变测试工况对超空泡射弹尾翼的流体动力特性开展实验研究,得到了不同穿刺条件下尾翼对空泡流型的影响规律及其流体动力特性. 研究结果表明:尾翼穿刺空泡以后,在其顶部和侧面生成的二次空泡将显著改变主体空泡的形态,且随着穿刺高度的增加,尾翼对主体空泡的影响更加明显;尾翼的流体动力主要产生于前缘沾湿部位,且随着穿刺高度的增加升力系数和阻力系数均显著增加;在尾翼穿刺空泡的条件下,其阻力系数和升力系数随攻角的增大而线性增加.

关键词: 射弹;超空泡;穿刺高度;流体动力特性;实验研究

中图分类号: O351.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)10-0137-06

Hydynamic characteristic of fins of supercavitation projectile

WANG Rui^{1,2}, DANG Jianjun¹, YAO Zhong²

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, Shaanxi, China)

Abstract: To study the influence regularity of the tail fin on the bubble flow pattern, the hydrodynamic characteristics of fins of supercavitation projectile were performed in water tunnel. The rationality of the test scheme was fully demonstrated. The test system of ventilation cavitation flow was constructed based on the high-speed water tunnel. Base on the basic shape of the projectile and the similarity theory, the tail force measurement test model was designed. Meanwhile, to change the relative location between the fins and the cavitation, the cavitation size or the model attitude was adjusted. The hydrodynamic characteristics of fins of supercavitation projectile were studied by changing the test conditions. The influence regularity of the tail fin on the bubble flow pattern and its hydrodynamic characteristics under different puncture conditions were obtained. The results show that the formation of secondary cavitation at the top and the side of the tail fin after the puncture of the tail significantly changed the shape of the main cavitation, and the impact of the tail fin on the main cavitation became more obvious with the increase of the puncture height. The hydrodynamic characteristics of the tail fin mainly came from the wetting part of the leading edge, and the lift coefficient and the drag coefficient increased significantly with the increase of the puncture height. The drag coefficient and the lift coefficient under puncture conditions increased linearly with the attack angle. The results can provide references for the optimization design of the shape of the supercavitation projectile and trajectory prediction.

Keywords: projectile; super cavity; puncturing height; Hydynamic characteristics; experimental investigation

超空泡减阻技术的基本原理是利用水介质的相变特性结合独特的外形设计生成附体超空泡,使得水下航行器犹如在空气中飞行一般,航行阻力得以大幅降低. 运用该项减阻技术的水下航行器可以实现超高航速和远航程^[1-2],其军事应用价值深受俄

罗斯、美国、德国等军事强国的重视,并基于此研发了数型超高速水中兵器,其中最具代表性的是“暴风雪”超空泡鱼雷,其水下的航速超过 200 kn,航程 10 km,该鱼雷的问世彻底颠覆了传统水中兵器的设计理念,并逐渐改变了海战的攻防模式^[3]. 除了超空泡鱼雷,超空泡减阻技术还在火炮武器弹药技术方面到了成功应用^[4]. 美国研发的机载快速灭雷武器系统(RAMICS)可发射水中声速级别的超空泡射弹,对水雷、鱼雷等水下威胁进行硬杀伤,显著提高了水面舰船的近程防御能力^[5].

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(51579209)

作者简介: 王 瑞(1984—),男,博士研究生;

党建军(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王 瑞, wangrui293@163.com

超空泡减阻技术具有诱人的应用前景,但是因为附体超空泡的存在,超空泡航行体的流体动力布局模式及其所表现出来的运动特性都与传统全沾湿水下航行器有明显不同^[6]. Logvinovich^[7]提出的“空泡截面独立扩张原理”成为预测超空泡外形及空化物体阻力的基本方法, Savchenko 等^[8-10]对于超空泡绕流问题从实验和理论层面都进行了充分的研究,其中对于超空化流场的空泡外形描述、流体动力特性以及实验测试方案等方面的贡献为研究超空泡航行器和高速射弹奠定了良好的基础. 基于已有的研究成果, Serebryakov 等^[11-12]对极小空化数的空化绕流问题开展理论研究,将超空泡流动的基本理论扩展至水中亚音速、跨音速和超音速,详细探讨了 Ma 对于超空泡形态和空化器阻力特性的影响. Hrbues^[5]基于高速摄影技术对超音速射弹开展实验研究,研究了非定常空泡流型和水下激波特性,并给出了空泡轮廓和激波形状数据,被广泛用于验证水下超音速超空化绕流数值模型.

已有研究结果表明,即便设计良好的超空泡射弹在航行过程中也存在尾翼的间歇沾湿,且尾翼的存在对于超空泡射弹的稳定航行是不可缺少. 尾翼的优化设计对于增加有效射程也至关重要. 因此,为了改善弹道品质、增加有效射程,超空泡射弹尾翼的优化设计及其在空泡穿刺条件下的流体动力等问题受到了重视. 裴讓等^[13]基于高速水洞研究了舵控制面的流体动力特性及其对主体空泡形态的影响,其研究主要针对大展弦比的楔形尾翼,并且涉及改变穿刺比的问题;栗夫园等^[14]基于高速水洞研究了空泡流型问题,主要研究了模型附体对空泡形态的影响,对于流体动力特性涉及较少;邢彦江等^[15]研究了通气条件下尾翼楔角对空泡流型和流体动力特性的影响,其研究主要针对超空泡航行器的控制面,并不适用于高速射弹. 从已有的文献资料来看,国外对于射弹的研究主要集中在流场和空泡方面,对于弹形优化和流体动力特性的研究较少;中国对于超空泡问题的研究主要集中在以超空泡航行器为背景的中低速度空化绕流领域,以高速射弹为研究对象的空泡流型和流体动力的实验研究较少^[16]. 本文基于高速水洞,搭建通气空化绕流实验系统,采用变则模型实验方案,对超空泡射弹翼型的空泡绕流以及流体动力特性开展实验研究,研究结果对于超空泡射弹的外形优化和弹道预报具有一定参考价值.

1 实验原理及设备

1.1 实验原理

从文献资料来看,超空泡射弹的相关实验主要

分为实物实验和模型实验两类. 实物实验主要根据实弹射击弹道,采用高速摄影技术和图像识别技术,用于研究射弹的空泡流型、水中激波、弹道散布规律及速度衰减特性等. 然而,由于超空泡射弹尺度小、速度高、非定常运动剧烈,实物实验难以精确内测. 因此,基于高速水洞的变则模型实验也广泛用于超空泡射弹的流体动力特性测试. 本研究基于超空泡流相似理论,使用变则尾翼空化绕流水洞测力模型研究超空泡射弹的尾翼流体动力特性.

超空泡射弹在水中的航行速度一般在 $300 \sim 1\,000\text{ m/s}$ 范围,其空化数的量级为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$. 然而,高速水洞速度一般小于 18 m/s ,最小空化数一般不低于 0.1 . 因此,基于高速水洞研究超空泡射弹尾翼的流体动力特性,必须对空化器进行适当放大,进而得到与尾翼模型相匹配的超空泡.

为了研究不同穿刺高度对于射弹尾翼流体动力特性的影响,需要改变空泡壁面与尾翼的相对位置关系. 实验中主要通过调整空泡尺寸或者模型安装姿态来改变尾翼的穿刺高度. 基于同一测试模型,通过改变空化器的尺度,并配合调整通气量、水洞工作的速度,实现空泡尺度的调节;通过调整测试模型的安装俯仰角,改变空泡与尾翼的相对位置关系.

实验中采用高速相机记录空泡的生成和发展过程,采用三分力天平测试尾翼的轴向力、侧向力以及侧向力矩.

1.2 实验设备

超空泡射弹尾翼流体动力特性实验研究基于西北工业大学高速水洞实验室开展. 水洞采用封闭循环式管道结构,工作段尺寸为 $\Phi 400\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$,工作段流速 $0 \sim 18\text{ m/s}$ 连续可调,工作压力 $20 \sim 300\text{ kPa}$ 连续可调,最低自然空化数为 0.1 ,高速水洞如图 1 所示. 为了便于数据采集,实验中采用高速摄像机进行图像采集,用于记录超空泡形态和空泡在尾翼上的沾湿位置.

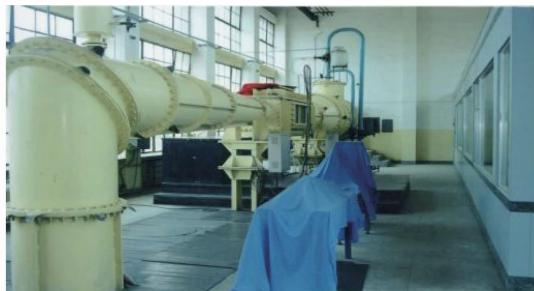


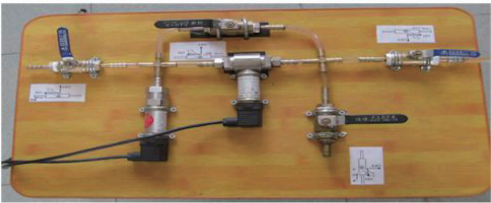
图 1 高速水洞实验室

Fig. 1 High speed water tunnel

为实现对实验模型的自动通气以及流量的控制,实验通过设计加载 ALICAT 质量流量计,实现通气流量的控制功能,通气流量为 0 ~ 200 SLPM,精度达到 1%;通过压差测量传感器来获得空泡内压力;采用三分力杆式内置天平测试超空泡射弹尾翼的测力情况,测力天平与数据采集设备相连,可实时采集天平测试的力和力矩,测量具有及时性和准确性.测控系统单元如图 2 所示.



(a) 质量流量计



(b) 压差测量传感器



(c) 测力天平

图 2 测控系统单元

Fig. 2 Measurement and control unit

2 实验模型及测试方案

2.1 尾翼实验模型设计

根据射弹基本外形,按照相似理论对尾翼测力实验模型进行设计,其实验模型由空化器、圆锥段、圆柱段、尾翼、通气连接器等组成,如图 3 所示.

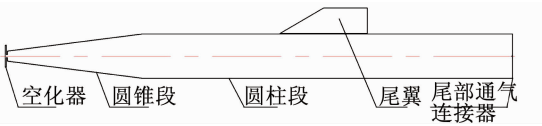


图 3 实验模型外形

Fig. 3 Shape of test model

由于尾翼测力时只需要尾翼附近的流场相似,为获得合适的空泡形态与尾翼处空泡穿刺高度,空化器的尺寸按相似理论设计为 20、24、28、32 mm 这 4 个系列,单尾翼尺寸按相似理论对超空泡射弹的实际尾翼进行等比例放大,有大、中、小 3 种,分别如图 4 所示,翼型参数如图 5 与表 1 所示. 为方便实验模型安装与拆卸,超空泡射弹尾翼实验模型的前锥段与天平安装段根据几何相似原则按照等比例放

大,并根据传感器尺寸、通气管等安装要求设计模型内部结构.

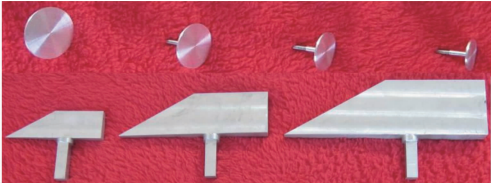


图 4 实验中采用的不同规格的空化器和尾翼

Fig. 4 Cavilator model and tail wing model

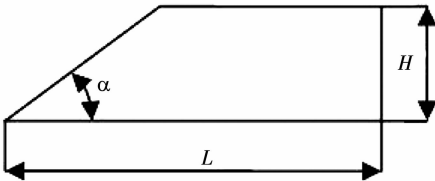


图 5 翼型示意

Fig. 5 Tail wing model

表 1 3 种翼型参数

Tab. 1 Sizes of three fins

规格	$\alpha / (^\circ)$	L / mm	H / mm
“大”	30	160	46.0
“中”	30	120	34.5
“小”	30	80	23.0

2.2 实验方法

为了弱化模型尾部的垂直支撑杆对空泡流型和实验结果的影响,将测试模型安装采用尾支撑,并且采用翼型导流罩对支撑杆进行隔离,模型在水洞中的安装情况如图 6 所示. 天平线路和通气管经导流罩内的管道连接到模型内部,避免了线路和气管外露对流场和空泡的影响. 压缩空气经流量控制器接至由实验模型引出的通气管路,流量控制器和内置天平信号接至实验测控系统.

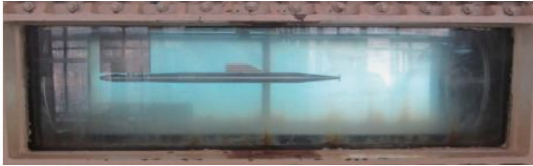


图 6 实验模型的水洞安装情况

Fig. 6 Installation of model

实验过程中记录尾翼在全沾湿条件下和空化条件下的流体动力. 在水洞稳定工作在设定工况(工作段水速和压力达到预定值)后,首先在全沾湿测力条件下改变攻角测试尾翼模型的阻力(轴向力)和升力(侧向力);然后开启通气控制系统,以预先设定的通气量为模型通气,待超空泡充分发展至稳定状态,由测控系统记录空化条件下不同攻角的尾

翼模型受到的阻力和升力. 实验中通过舵角仪调整尾翼模型的攻角, 使用高速摄像机拍摄空泡形成过程及空泡形态. 水洞实验的测试方案如图 7 所示.

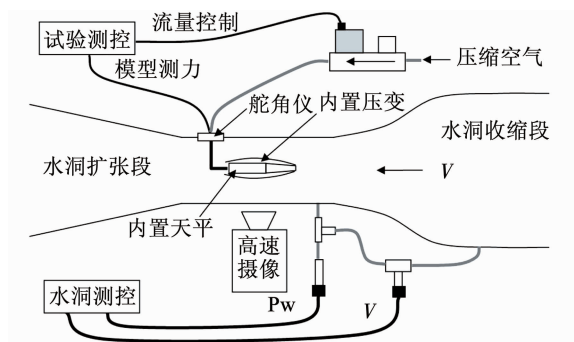


图 7 测力实验方案

Fig. 7 Testing program

2.3 实验数据处理

尾翼测力实验主要获得有空泡形态、阻力、升力等实验数据, 阻力系数 C_D , 升力系数 C_L 分别通过下式计算获得:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho SV^2}, C_L = \frac{F_L}{0.5\rho SV^2}.$$

式中: F_D 为阻力; F_L 为升力; S 为圆柱段最大面积; V 为实验水速.

2.4 变则模型实验

根据相似理论, 模型实验不仅要满足无因次相似准则数相等, 实验模型和原型还必须满足几何相似. 对于某些实验, 实验模型无法满足与原型完全几何相似, 只能或只需满足部分几何相似, 称为变则模型实验^[14].

射弹的头部流体动力主要来自前端面, 尾部流体动力主要来自尾翼, 其余部分被空泡包围. 所以射弹头部测力实验只要满足前端面附近流场相似, 尾部测力实验只要满足尾翼处流场相似, 无需全流场相似, 因此本文可以采用变则模型测力实验, 而对于全沾湿测力实验则采用完全几何相似模型.

变则模型与原型流体动力系数换算关系为:

$$C_{D1} = \frac{k_{VT}}{\lambda_{VT}} C_{D2}, C_{L1} = \frac{k_{VT}}{\lambda_{VT}} C_{L2}.$$

式中: k_{VT} 为考虑空泡曲率变化引起的流体动力增大引入的经验系数, 可通过 CFD 模拟对照实验数据得到; λ_{VT} 为缩比系数.

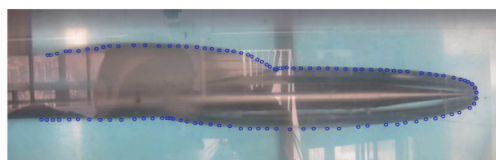
3 结果与分析

超空泡射弹在水中航行时, 头部空化器诱导形成超空泡, 然而尾翼对于空泡流型的影响并不明确. 根据独立膨胀原理的理论计算结果显示, 当射弹尾翼位于空泡中截面之前时, 随着空化数的进一步减

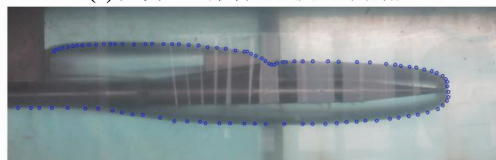
小, 尾翼截面的空泡外形发展规律一致且空泡尺度变化不超过 7%. 在试验过程中, 首先对空化器和尾翼进行了组合选型实验, 通过标定尾翼的穿刺高度 $1/4H$ 、 $1/2H$ 、 $3/4H$, 最终确定了 24 mm 空化器与“中”规格尾翼的组合模型能够较好的获得 3 种穿刺空泡的状态. 实验中水洞速度取 9 m/s, 通过控制水洞工作压力和通气量来调整实验中的空化数, 开展射弹尾翼通气空化绕流实验.

3.1 空泡形态特性

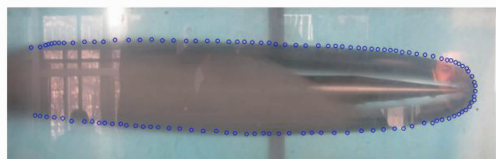
图 8 给出了通过调节水洞工作压力和通气量, 获得不同尾翼穿刺高度条件下的空泡流型, 对应通气空化数见表 2, 其中: 图 8(a) 为尾翼 $3/4H$ 穿刺空泡时的空泡流型, 图 8(b) 为尾翼 $1/2H$ 穿刺空泡的空泡外形图, 图 8(c) 为尾翼 $1/4H$ 穿刺空泡的空泡外形图, 同时通过边缘处理, 获得了与之对应的较为清晰的空泡边缘. 表 2 给出了不同穿刺高度下的空化数. 可以看出, 随着通气量的增加, 导致空化数逐渐减小, 空泡尺度逐渐变大, 尾翼处空泡发展过程为尾翼 $3/4H$ 穿刺、尾翼 $1/2H$ 穿刺、尾翼 $1/4H$ 穿刺. 超空泡发展到尾翼处后, 超空泡在尾翼前缘形成不同高度的穿刺, 穿刺面上部分的尾翼前缘形成空化器端面, 与之接触的水二次空化形成尾翼空泡, 除穿刺面上部分的尾翼前缘面与水接触, 尾翼两侧面与水不再接触; 空泡在尾翼处形成穿刺后, 对空泡的形状和空泡闭合形式产生较大的影响, 主要体现在对空泡尺度的发展有抑制作用, 表现为尾翼前面出现漩涡, 呈现“凹坑”, 而且随着穿刺高度的增加, 这种典型现象越明显, 同时导致翼型附近的空泡径向尺度减小, 主体空泡呈现明显非对称性.



(a) 尾翼 $3/4H$ 穿刺空泡及边缘轮廓



(b) 尾翼 $1/2H$ 穿刺空泡及边缘轮廓



(c) 尾翼 $1/4H$ 穿刺空泡及边缘轮廓

图 8 不同尾翼穿刺高度对应的流场空泡流型

Fig. 8 Shape of cavity under different puncture conditions

表 2 不同穿刺高度对应的通气空化数
Tab.2 Cavitation numbers of different puncture conditions

穿刺高度	3/4H	1/2H	1/4H
通气空化数	0.036	0.032	0.021

3.2 阻力特性

实验通过调整通气量,获得空泡在尾翼处不同穿刺高度下的流体动力特性,并通过舵角仪调整模型攻角,获取尾翼在不同攻角状态下的阻力特性.

图 9 所示为空泡在尾翼处不同穿刺高度下的阻力特性曲线.可以看出,同一攻角下,随着刺穿高度的增大,阻力系数逐渐增大;受攻角的影响,阻力系数呈现不同的增长趋势,随着攻角增大,增长趋势变缓,这主要是由于随着攻角增大,尾翼处出现二次空化,生成新的附体空泡,进而出现阻力系数不再随着穿刺高度增加而剧烈增大.结合图 7 亦可以看出,头部空化器生成的主空泡将穿刺面下部分的尾翼前缘端面及尾翼侧面包裹,尾翼生成的二次空泡将穿刺面上部分尾翼侧面包裹,整个尾翼仅有迎流面穿刺空泡的部分发生沾湿,且尾翼的该部分沾湿面亦为阻力的主要来源.

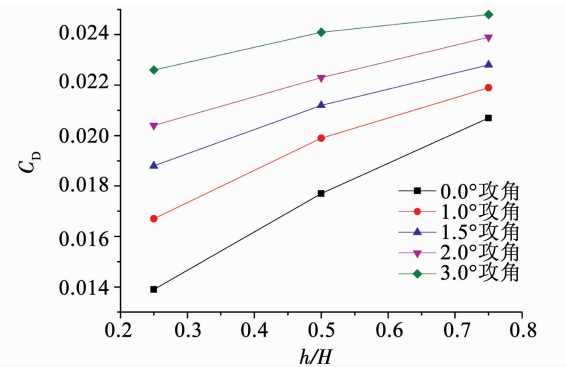


图 9 尾翼阻力系数随穿刺高度的变化曲线
Fig.9 Drag coefficient vs puncture conditions

因此,超空泡射弹外形设计时,在不影响航行稳定性的情况下,应尽量减小尾翼翼展,可使尾翼触水时不至于引起阻力的过分增加;在不影响尾翼二次空泡形成的情况下,应尽量降低前缘端面厚度,以降低尾翼前缘端面在空泡穿刺时的沾湿面积,从而有效降低射弹的航行阻力.

3.3 升力特性

图 10 所示为射弹尾翼在不同穿刺高度条件下的升力特性.可以看出,在同一攻角下,整个穿刺高度区间内,升力系数随着穿刺高度的增加而增大,几近呈线性关系;随着攻角增大,升力系数在穿刺区间内的增长趋势明显,攻角越大,升力系数变化率越大.

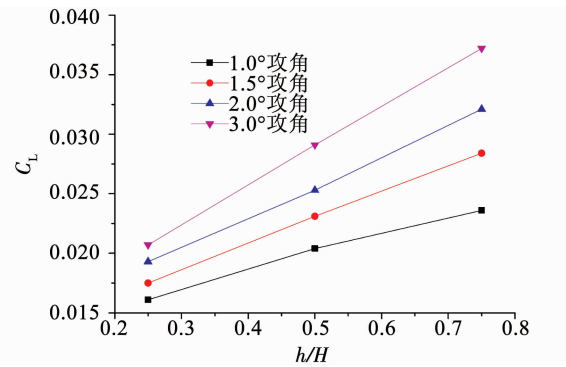


图 10 尾翼升力系数随穿刺高度的变化曲线
Fig.10 Lift coefficient vs puncture conditions

4 结 论

- 1) 根据空化流相似原理,基于高速水洞采用人工通气方式设计实验方案,可用于研究超空泡射弹尾翼的流体动力特性.
- 2) 尾翼穿刺空泡以后将对主体超空泡的发展产生显著的影响,在尾翼的侧面和顶部出现清晰地二次空化区,不仅改变了主体空泡的形态,更会对主体空泡的发展有迟滞作用;并且随着穿刺高度的增加,二次空化区对主体空泡的影响更为显著.
- 3) 尾翼空泡的穿刺高度对阻力和升力特性有重要影响.尾翼空化后穿刺高度越大阻力系数越大,并且随攻角增大不同穿刺高度对阻力系数的影响变小;而升力系数对刺穿高度较为敏感,随着穿刺高度的增加而线性增大.

参考文献

[1] KIRSCHNER I N, FINE N E, UHLMAN J S, et al. Supercavitation research and development [J]. Undersea Defense Technologies, Waikiki, HI, 2001: 1

[2] 罗凯, 李代金, 党建军, 等. 考虑空泡延迟特性的超空泡飞行器运动控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 41

LUO Kai, LI Daijin, DANG Jianjun, et al. Motion control model of supercavitating vehicle considering time-delay effect of supercavitation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 41. DOI: 10.3969/j. issn. 1671 - 1637. 2010. 03. 007.

[3] KIRSCHNER I, UHLMAN J, PERKINS J. Overview of high-speed supercavitating vehicle control [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone, Colorado: AIAA, 2006: 6442 DOI: 10.2514/ 6.2006 - 6442.

[4] 金大桥. 水下动能射弹空泡形态及流体动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010

JIN Daqiao. Research of cavity shape and hydrodynamic characteristics of underwater kinetic energy projectile[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010

[5] HRUBES J D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(1): 57. DOI: 10.1007/s003480000135

[6] LI Daijin, LUO Kai, HUANG Chuang, et al. Dynamics model and control of high-speed supercavitating vehicles incorporated with time-

- delay[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2014, 15(3/4): 221. DOI: 10.1515/ijnsns-2013-0063
- [7] LOGVINOVICH G V. Hydrodynamics of free-boundary flows: NASA- TT- F- 658[R]. Washington DC: Translated from the Russian, 1972
- [8] SAVCHENKO Y N. Supercavitation-problems and perspectives [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation. Pasadena, CA: [s. n.], 2001
- [9] SAVCHENKO Y N, VLASENKO Y D, SEMENENKO V N. Experimental studies of high-speed cavitated flows[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 1999, 26(3): 365. DOI:10.1615/InterJFluidMechRes.v26.i3.80
- [10] SAVCHENKO Y N. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies [R]. Brussels: VKI Specical Course on Supercavitating Flows, 2001
- [11] SEREBRYAKOV V, KIRSCHNER I, SCHNERR G H. High speed motion in water with supercavitation for sub-, trans-, supersonic mach numbers [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. Ann Arbor, Michigan: CAV2009, 2009
- [12] SEREBRYAKOV V V, KIRSHNER I N, SCHERR G H. Some problems of high speed motion in water with supercavitation for sub-, trans- and supersonic mach numbers[C]//Proceedings of the X International Scientific School. Moscow/Cheboksary: Cheboksary Department of Moscow State Open University, 2008: 73
- [13] 裴譔, 张宇文, 袁绪龙, 等. 尾翼对超空泡航行器形态及力学特性影响实验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(1): 23. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9897. 2011. 01. 005
- PEI Xuan, ZHANG Yuwen, YUAN Xulong, et al. Exploring experimentally effect of tail wing on shape and dynamics characteristics on super-cavitation vehicle [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(1): 23. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9897. 2011. 01. 005
- [14] 栗夫园, 张宇文, 党建军, 等. 锥形空化器流体动力特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 1040. DOI:10.3969/j. issn. 1000-1093. 2014. 07. 016
- LI Fuyuan, ZHANG Yuwen, DANG Jianjun, et al. Research on hydrodynamic characteristics of conical cavitator [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7): 1040. DOI:10.3969/j. issn. 1000-1093. 2014. 07. 016
- [15] 邢彦江, 张嘉钟, 曹伟, 等. 尾翼楔角对通气超空泡特性影响实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(1): 25
- XING Yanjiang, ZHANG Jiazhong, CAO Wei, et al. Experimental investigation of the effect of tail wings wedge angle on ventilated supercavity hydrodynamic [J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 2013, 45(1): 25
- [16] 贾力平, 王聪, 于开平, 等. 空化器参数对通气超空泡形态影响的实验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 159. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750. 2007. 03. 027
- JIA Liping, WANG Cong, YU Kaiping, et al. Experimental investigation of cavitator parameters effecting on ventilated supercavity shape [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 159. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750. 2007. 03. 027

(编辑 张 红)

(上接第 136 页)

- [13] 黄志刚, 孙铁志, 杨碧野, 等. 平头锥型回转体高速入水结构强度数值分析[J]. 爆炸与冲击[2018-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.03.20180124.1638.004.html>
- HUANG Zhigang, SUN Tiezhi, YANG Biye, et al. Numerical analysis of structural strength of high speed water entry for a cone-shaped flatted revolutionbody [J]. Explosion and Shock Waves [2018-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.03.20180124.1638.004.html>
- [14] 宋武超, 王聪, 魏英杰, 等. 不同头型回转体低速倾斜入水过程流场特性数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(7): 661. DOI:10.15918/J.TBIT001-0645.2017.07.01
- SONG Wuchao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Numerical simulation of the flow field characteristics of low speed oblique water entry of revolution body [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 661. DOI:10.15918/j. tbit001-0645.2017.07.001
- [15] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
- [16] 宋武超. 小型回转体低速倾斜入水过程流场特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
- SONG Wuchao. Study on flow field characteristics of small-scale revolution body during water entry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [17] 马庆鹏. 高速射弹入水过程多相流程特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014
- MA Qingpeng. Investigation of multiphase flow characteristics induced by water entry of high-speed projectiles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014

(编辑 张 红)