

用容积阻力系数评价超空泡减阻能力的研究*

杨春英, 郜冶, 熊永亮

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:在水下高速航行的空化器尾部的低压区会形成空泡。文中利用二维轴对称模型,对5种不同空化器下的超空泡流动进行了数值模拟。提出了容积阻力系数的方法来判断不同空化器的减阻能力,利用数值方法获得了几种空化的容积阻力系数,获得了其随空化数的变化规律,并拟合成了代数公式。文中结论可供超空泡航行体的研究与设计参考。

关键词:空化器;超空泡;容积阻力系数;数值模拟

中图分类号:TJ630.1 **文献标志码:**A

The Research on Evaluating Drag Reduction Ability of Supercavitation with Volume Drag Coefficient

YANG Chunying, GAO Ye, XIONG Yongliang

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Cavity would be formed at low pressure zone behind the cavitator of the high speed under-water vehicle. Five kinds of supercavitating flow by different cavitator were simulated by two-dimensional axis-symmetry method. Volume drag coefficient was employed to describe the drag reduction ability of different cavitator. General rule of volume drag coefficient was obtained. An algebraic formula was fitted by the result of simulation. The paper can be a reference for investigation and design of under-water supercavitating vehicle.

Keywords: cavitator; supercavitation; volume drag coefficient; numerical simulation

0 引言

当水超空泡航行体高速航行时,其空化器后面的压力低于水在常温下的饱和压力,空化器后的水蒸气形成一个空泡将航行体包围。空泡的形成对水中超高速武器的减阻能起到非常积极的作用,这使得超空泡武器成为了水中兵器的一个新的发展方向。乌克兰和俄罗斯的学者率先在此领域做了大量的研究。其中 Logninovich^[1-2]的空泡独立性原理为非稳态超空泡变化的复杂规律提供了一个近似有效的研究方法。独立性原理认为当物体通过所要研究的平面时,在这个平面的空泡的截面面积只与无穷远处与此时空泡内的压差、物体的速度、尺寸和所受阻力相关,这一理论的结论与乌克兰科学院的一些试验符合的较好。根据这一原理可知对于某一确定超空泡航行体工作时其阻力与其超空泡外形也具有确定性关系。国内许多学者对不同空化器产生的空泡外形和阻力

规律进行了研究,指出某些空化器能够产生更大的空泡,然而这类空化器也会带来更大的阻力^[3-5]。Gabrielly 与 Von Karman 指出航行器的效率在于在所需的工况下竟可能减小航行器阻力 D 与航行器质量 M 的比值^[6]。因而,为了保证超空泡减阻的效率,需要统筹考虑空化器上的阻力和其诱导空泡尺寸。为了提高航行器的工作效率需要使容积阻力系数获得最小的值。对于超空泡航行体而言,其阻力完全由空化器确定,为了提高航行器的效率,应在超空泡状态下使航行体的体积趋近于空泡的容积。文中利用数值计算方法,研究不同空化数下不同空化器的容积阻力系数规律。

1 控制方程组

由于水下超高速航行体通常具有轴对称的外形,通常可以认为超空泡流动是一种轴对称的流动,因而有必要将方程展开成轴对称的形式进行计算。其中

* 收稿日期:2010-09-10

作者简介:杨春英(1972-),女,河北乐亭人,副教授,硕士,研究方向:传热与流体流动。

混合相的连续性方程和蒸汽相的质量漂移方程在圆柱坐标系下的形式可以表达为：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_m v_{rm}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m v_{zm}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \alpha_v \rho_v v_{rv}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_v \rho_v v_{zv}) = \Gamma_v \quad (2)$$

对于 r, z 两个方向的动量关系式可以表示为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_{rm}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_m v_{rm} v_{rm}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m v_{zm} v_{zm}) = \\ -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho_m g_{mr} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r(\bar{\tau}_{rr} + \tau_{rr}^T)] + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\tau}_{rz} + \tau_{rz}^T) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_{zm}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_m v_{rm} v_{zm}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m v_{zm} v_{zm}) = \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho_m g_{mz} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r(\bar{\tau}_{rz} + \tau_{rz}^T)] + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\tau}_{zz} + \tau_{zz}^T) \end{aligned} \quad (4)$$

其中质量平均速度可写为：

$$\mathbf{v}_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k / \rho_m \quad (5)$$

式(5)中两相的混合密度为：

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (6)$$

以上各式中 $\bar{\tau}$ 为流体的粘性力,由流体的本构方程得出, τ^T 为湍流应力,根据 Boussinesq 假设,构建湍流模型,从而将湍流的作用模化为一个类似粘性力的湍流应力。本质上是将湍流这种复杂流动现象简化成了一种特殊的流体。文中是通过标准壁面函数法结合 RNG $k-\epsilon$ 二方程模型考虑湍流的作用。对于超空化流动该湍流模型相对于标准 $k-\epsilon$ 二方程模型能够避免对湍流粘性的过高估计。

式中 α_k 为 k 相的容积分数。式(2)中 Γ_v 是由 Rayleigh-Plesset 方程和汽泡的有限尺寸得出的汽相形成和溃灭的源项。具体形式如下^[7]：

$p < p_v$ 时：

$$\Gamma_v = C_e \frac{V_{ch}}{\rho_m \zeta} \rho_l^2 \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\rho_l}} (1 - \alpha_v) \quad (7)$$

$p > p_v$ 时：

$$\Gamma_v = -C_c \frac{V_{ch}}{\rho_m \zeta} \rho_l^2 \rho_v \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{3\rho_l}} \alpha_v \quad (8)$$

对于两相相变的临界压力取为：

$$p_v = \left(p_{sat} + \frac{1}{2} p_{turb} \right) \quad (9)$$

式中由湍流动能 k 描述的湍流脉动压力为：

$$p_{turb} = 0.39 \rho k \quad (10)$$

式中下标 l 和 v 分别表示液相和汽相, V_{ch} 为近似于当

地湍流的特征速度,其大小用 \sqrt{k} 表示, k 为湍流动能, ζ 为液体的表面张力, p_{sat} 为给定温度下液相的饱和蒸汽压力, C_e 和 C_c 为经验系数,经实验校正取 $C_e = 0.02, C_c = 0.01$ 。

2 有空化与无空化时阻力系数随时间变化特征

图 1(a)~图 1(c)是对应航行体在发射 20ms 后的空泡轮廓图,航行体以 130m/s 的速度发射后自由滑行。图中所处的时刻与试验中图 1(d)所处的时刻基本一致(试验中未记录高速摄像时对应的发射时间,但可以通过速度与摄像的距离大致推断)。试验与模拟的空泡外形基本相似,而且尾部都有一个脱落的空泡,这是由于在发射后,航行体的速度最大,且此时对应的阻力最大,此后航行体的速度与阻力都有大幅度的下降,因而航行体在发射后必然快速生成最大尺度的超空泡,此后随着航行体的速度快速的下降,大量的水蒸气来不及同时凝结,从而导致了部分水蒸气以脱落的方式离开了空泡。通过这种非定常的特殊现象可以表明数值计算具有一定的精度和可信度。

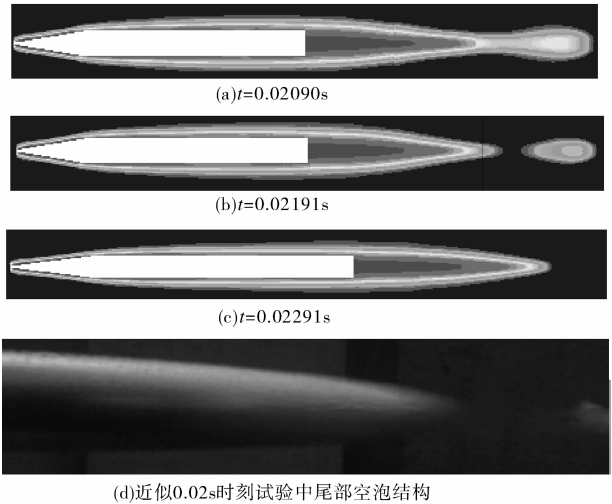


图 1 非稳态计算与试验中航行体周围形成的超空泡

图 2 是航行体以 130m/s 的发射速度发射后速度衰减得很快,0.06s 后速度已经衰减到 40m/s,同样在考虑超空泡情况下速度虽然降低的也很快,但是相对于无空泡时已经大出很多。由于本算例只设计了 20m 的航

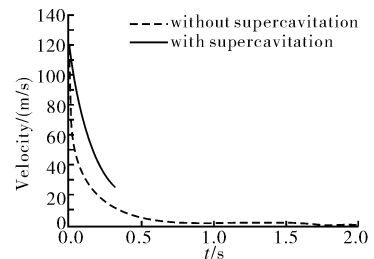


图 2 无推力下航行体的速度时间曲线

行距离,当航行体完成 20m 的航行后停止计算,所以超空泡航行体在有剩余速度 26m/s 时结束了计算,而同时无空化现象时航行体到最终速度为 0 时的航行距离仅有 14m,图中曲线与横轴所形成的面积代表航行距离,图中曲线的斜率反映了航行体在阻力作用下的加速度。在发射后航行体速度快速下降,这是由于一方面发射初期,没有来得及形成超空泡流动,使得粘性阻力在此时起主导作用,另一方面,由于航行体周围流体处于静止状态,与航行体速度差别处于最大值,因而使得粘性阻力在此时有最大值造成。

图 3 与图 4 是对应于尾部无推力作用的两种情况下航行体的阻力系数(阻力系数的截面面积取航行体的最大截面面积,速度取该时刻航行体的速度),由于阻力系数存在数量级的差别,所以不便将其放到一个图中比较。从两图中可以看出不考虑超空泡减阻时阻力系数一直在 1 以上,并近似以时间的二次关系增加,由航行体的速度时间关系可以得出航行体在速度下降后其阻力几乎不变。而超空泡航行体的阻力系数在高速阶段几乎不变,其大小也远小于无空泡情况,当速度进一步降低后不能维持超空泡状态,在这一段非稳定的过程中阻力会大幅度上升,随后粘性阻力逐渐增大使得阻力系数快速升高。

图 5 与图 6 是当航行体在 5000N 推力下航行的速度、阻力系数随时间的变化关系。从图中看出两种情况的速度都有很大提高,在 20m 后两种情况都基本达到平衡,超空泡状态下平衡后的速度可达 90m/s,对于无空泡

状态,该推力所能维持的速度为 39m/s。图 6 也能得出两者有较大的差别,从而可见超空泡有非常好的减阻能力。

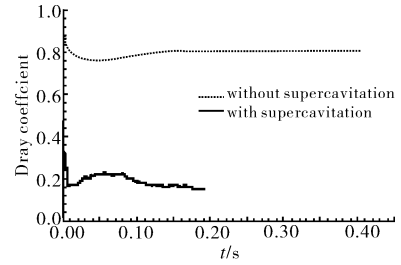


图 6 有推力航行时的阻力系数

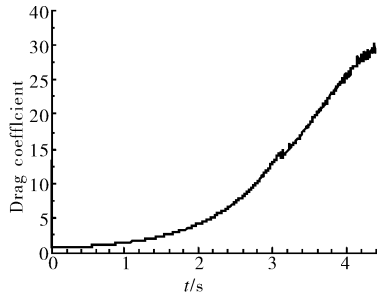


图 3 无空化现象时的阻力系数

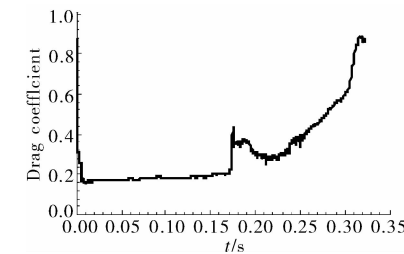


图 4 有超空泡时的阻力系数

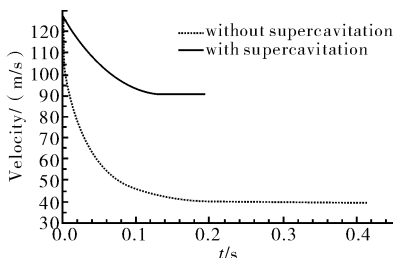


图 5 有推力下航行体的速度时间曲线

3 超空泡航行体容积阻力系数的计算结果分析

入口边界上使用速度入口,出口边界条件选择压力出口。计算中压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法,对流项差分格式均采用精度较高稳定性较好的二阶迎风格式。对于汽化方程将其松弛因子适当改小为 0.05,为了促进代数方程迭代求解收敛速度,计算中采用了多重网格的 FMG (full multigrid cycle) V (3,2) 循环,保证了每次由疏网格向密网格延拓时,稀疏网格上的解都达到一定的收敛标准。这里以图 7 中所示的五种空化器为研究对象,分别模拟不同的空化器在不同的空化数下的容积阻力系数关系。对于数值计算而言,许多文献^[5,7]取尾部压力出口边界的压力值为 P_∞ 的方法是不可取的,尾部压力边界的压力值是在阻力、湍流等因素作用下受损后的压力,其大小低于未受扰动处压力,从而使得出的空化数小于真正计算的实际空化数,这也是这些文献计算误差较大的主要原因。

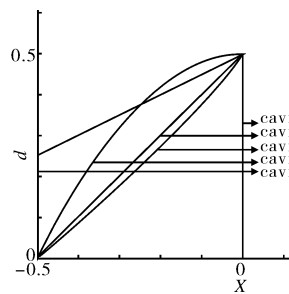


图 7 计算中采用的五种空化器母线

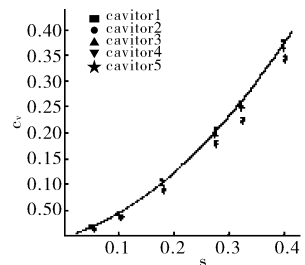


图 8 各种空化器对应不同空化数下的容积阻力系数

通过大量的数值计算可以得出图 8 所示的不同空化器对应的容积阻力系数随空化数的变化关系。从图中可以看出,随着空化数的降低,容积阻力系数快速的减小,其潜在的减阻能力快速的增加。对于绕流问题通常采用的以迎流面积为指标的阻力系数,其大小与空化数存在线性关系,并且其斜率相对较小,不容易真实分辨各种空化器在不同空化数下的减阻能力,通过容积阻力系数可清楚地看到其减阻能力近似以二次曲线关系变化,对于圆盘形空化器,其容积

阻力系数随空化数的关系可以拟合式(11)的形式。随着空化数的降低,容积阻力大幅下降。对于 5 种不同的空化器外形,其容积阻力系数略有不同,随着空化数的下降,各种空化器对应的容积阻力系数差别逐渐减小,在空化数稍大的情况下,具有最大阻力系数的圆盘形空化器对应的容积阻力系数也最大,具有突出母线外形的空化器 4 的阻力系数最低(以上五种空化器在同一空化数的阻力系数 $c_{v1} > c_{v2} > c_{v3} > c_{v5} > c_{v4}$),其容积阻力系数也最小,但这一差别随着空化数的降低而减小。

$$c_v = 1.539\sigma^2 + 0.3096\sigma \quad (11)$$

4 结束语

文中所提出的容积阻力系数可视为超空泡状态的极限效率的指标,对于实际的超空泡航行体不可能完全占据整个空泡空间,但为了提高超空泡的效率,应尽可能提高空泡的利用率,实际的工程设计中可以乘以一个大于 1 的数作为其富余系数。

对于实际超空泡流动中,空化数极小,从文中的计算结果可知不同的空化器的容积阻力系数趋于一致。因而从超空泡减阻效率的角度来看,各种空化器的差距不大,对于空化器的选择应当更多重视空化器的可靠性,控制能力,工艺制造的方便程度,对航行体稳定性影响及其研究是否成熟。

此外,利用容积阻力系数的特性可以事先回避空

化器的选型,提早进行发动机推力设计等问题的研究。

参考文献:

[1] Logvinovich G V. Hydrodynamics of flow with free boundaries[M]. Naukova Dumka, Kiev, 1969.

[2] Vasin A D. The principle of independence of the cavity sectors expansion (Logvinovich's principle) as the basis for investigation on cavitation flows[C]//RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium, February, 12-16, 2001.

[3] 贾力平, 张嘉钟, 于开平, 等. 空化器线形与超空泡减阻效果关系研究[J]. 船舶工程, 2006, 28(2): 20-23.

[4] 袁绪龙, 张宇文, 王育才. 高速超空化航行体典型空化器多相流 CFD 分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 53-59.

[5] 王海斌, 张嘉钟, 魏英杰, 等. 空泡形态与典型空化器参数关系的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(2): 251-257.

[6] Gabrielly Y, Von Karman Th. What price speed: Specific power required for propulsion of vehicles[J]. Mechanical Engineering, 1950, 72(10): 775-781.

[7] Singhal A K, Athavale M M. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124: 617-624.

(上接第 222 页)

4 结论

综上所述,通过该方法的介绍,阐述了外场可靠性鉴定试验中的要点和原则,针对两个关键问题进行探讨,完善了火箭炮外场可靠性鉴定试验应用方法。当试验经费不足或者没有试验设备的条件下,该方法简单有效、方便实用。但必须指出,由于在总故障数较大的情况下,出现的情况更多,分析相对复杂,所以在总故障数较小的情况下比较适用,具有一定推广价值,同类产品可以参考。

参考文献:

[1] 杨为民. 可靠性维修性保障性总论[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.

[2] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.

[3] 国防科学技术工业委员会军用标准化中心. GJB450A-2004 装备可靠性工作通用要求[S]. 2004.

[4] 国防科学技术工业委员会军用标准化中心. GJB899-1990 可靠性鉴定和验收试验[S]. 1990.

[5] 国防科学技术工业委员会军用标准化中心. GJB899-1990 可靠性鉴定和验收试验[S]. 修改单 1, 1998.