

文章编号: 1000-4750(2011)02-0217-06

# 超空泡航行器三维流场仿真及性能分析

向 敏<sup>1</sup>, 吴 雄<sup>2</sup>, \*张为华<sup>1</sup>, 王中伟<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南, 长沙 410073; 2. 海军装备研究院, 航空所, 上海 200436)

**摘 要:** 提出了带进水管路超空泡航行器基本结构和性能评价方法。基于三维 Reynolds 平均 N-S 方程、Mixture 多相流模型和完全空化模型, 建立了超空泡航行器内外流仿真模型。开展了不同航行状态和空化器攻角下流场仿真, 分析了航速、航行攻角和空化器攻角对空泡形态、航行器水动力特性和进水管路性能等影响规律。研究表明: 航行攻角严重影响空泡对称性, 易造成航行器失稳; 空化器攻角对空泡形态对称性和进水管路性能影响较小, 能有效用于航行器控制。所得结论对超空泡航行器研制具有较强的理论指导意义。

**关键词:** 超空泡航行器; 数值仿真; 性能分析; 空化; 进水管路; 攻角

中图分类号: V211.48 文献标识码: A

## THREE-DIMENSIONAL FLOW FIELD SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS FOR A SUPERCAVITATING VEHICLE

XIANG Min<sup>1</sup>, WU Xiong<sup>2</sup>, \*ZHANG Wei-hua<sup>1</sup>, WANG Zhong-wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Aviation Department, Institute of Naval Arming Research, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** The configuration as well as the performance evaluating method was proposed for a supercavitating vehicle with a water pipe system. Based on three-dimensional Reynolds averaged N-S equations, a mixture multiphase model, and a full cavitation model, the numerical simulation method for the internal and external flow field of the supercavitating vehicle were developed. Then the simulations were carried out under various working conditions for the supercavitating vehicle with different attack angles. The function laws that the sailing speed, the sailing attack angle and the cavitator attack angle act on the cavity shape, the vehicle hydrodynamics and water pipe performance were obtained. The results show that the sailing attack angle can obviously change axial symmetry of the cavity, which will stimulate vehicle instability. The cavitator attack angle is effective for vehicle control due to its ignorable influence on the cavity symmetry and water pipe performance. The conclusions have some instructional significance in the development of supercavitating vehicles.

**Key words:** supercavitating vehicle; numerical simulation; performance analysis; cavitation; water pipe; attack angle

超空泡航行器是一种利用超空泡技术实现高效减阻的高速水下航行器。原理是在水与航行器表面之间形成稳定的气层, 减小水粘性阻力, 提高航行器速度<sup>[1]</sup>。为了实现超高速航行器高航速、大航

程特点, 超空泡航行器通常由高性能水冲压发动机推进<sup>[2]</sup>。水冲压发动机利用海水作为氧化剂提高发动机比冲, 而海水通常由雷头头部引入<sup>[3]</sup>。因此为了能够生成稳定、高效减阻、形态可控的超空泡,

收稿日期: 2009-07-21; 修改日期: 2010-03-05

作者简介: 向 敏(1982—), 女, 湖北人, 博士生, 从事多相流数值仿真研究(E-mail: xiangmin333@hotmail.com);

吴 雄(1977—), 男, 湖南人, 研究员, 博士, 从事海军装备武器研究(E-mail: wu\_xiong@163.com);

\*张为华(1962—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 院长, 从事航天推进工程研究(E-mail: zwh\_kjs@163.com);

王中伟(1965—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 从事运载火箭技术研究(E-mail: wang\_zhwei2001@163.com).

且保证发动机稳定可靠工作, 研究具有摄水功能的空化器和进水管路系统成为超空泡航行器研究的关键技术之一。美国宾州大学 David R Stinebring 等<sup>[3-5]</sup>已针对锥形、圆盘、球/环组合及拱/环组合空化器进行了试验研究, 测试了空化器阻力系数、升力系数和摄水性等。

本文提出超空泡航行器简易外形和进水管基本结构如图 1 所示。超空泡航行器由头部开孔圆盘

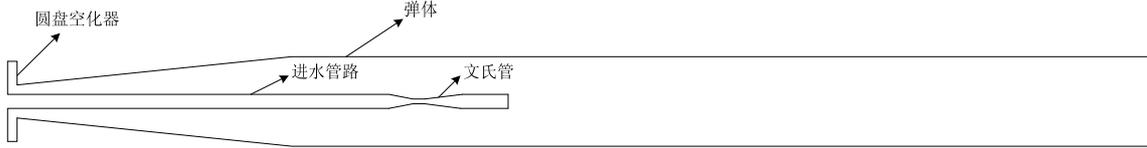


图 1 超空泡航行器结构简图

Fig.1 Schematics of a supercavitating vehicle

超空泡航行器通常由带攻角空化器提供部分控制力<sup>[6-7]</sup>, 流场存在强烈三维特性。为了研究航行状态、摄水空化器偏转等对流场影响, 本文拟建立三维数值仿真方法, 分析超空泡航行器性能, 为超空泡航行器设计提供指导。

## 1 物理模型和计算方法

本文针对超空泡航行器自然空化外流场和进水管内水冲压流动过程进行一体化仿真分析。从全流场的三维 Reynolds 平均 N-S 方程入手, 基于 Mixture(混合介质)多相流模型, 独立求解蒸汽相质量守恒方程, 并耦合描述蒸汽相、液相之间质量传递的自然空化模型, 模拟包含蒸汽和水的定常空泡流。

### 1.1 控制方程

基于各向同性三维 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程, 将汽、液两相组成的混合介质看成一种变密度单流体, 各相共享同一压力、速度场, 未考虑滑移速度。对混合物的连续方程和动量方程进行求解。计算中假定流动过程为等温过程, 忽略相变潜热, 因此不考虑能量方程。

混合相连续方程:

$$\frac{\partial(\mathbf{r}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}_m \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

混合相动量方程:

$$\frac{\partial(\mathbf{r}_m \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}_m \mathbf{v} \mathbf{v}^T) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mathbf{m}_m (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \mathbf{r}_m \mathbf{g} \quad (2)$$

蒸汽相连续方程:

空化器、椎柱形弹体和进水管路构成。其中进水管路由头部进水直管和尾部文氏管构成。文氏管包括收敛段、喉部圆柱段及扩散段 3 个部分。液体流经文氏管喉部时, 速度加快, 压力降低, 当静压低于该温度下的液体饱和蒸气压时, 就发生汽蚀现象, 形成气态流动区。出口压力进一步降低时, 通过文氏管的流量将不再发生变化, 因此文氏管能在发动机燃烧室压强波动时, 稳定进水管流量。

$$\frac{\partial(\mathbf{r}_m f_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}_m f_v \mathbf{v}) = \mathbf{r} \dot{\mathbf{m}}^- - \mathbf{r} \dot{\mathbf{m}}^+ \quad (3)$$

其中, 混合介质密度  $\mathbf{r}_m$  根据液相体积分量  $\mathbf{a}_l$  和蒸汽相体积分量  $\mathbf{a}_v$  加权平均获得:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{r}_l \mathbf{a}_l + \mathbf{r}_v \mathbf{a}_v \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{r}_l$  为液相密度;  $\mathbf{r}_v$  为蒸汽相密度;  $f_v$  为蒸汽相质量分数;  $\mathbf{r} \dot{\mathbf{m}}$  为由于空化等原因引起的质量输运。

应用由 Singhal 等<sup>[8]</sup>提出的完全空化模型(full cavitation model)描述空化过程。它考虑了相变过程中气泡的产生与消亡、气泡动力学、湍流压力脉动及速度脉动的影响, 流体中含有的不溶性(non-condensable)其它气体等空化发生时的主要物理过程。基于 Rayleigh-Plesset 方程描述蒸汽相与液相之间相变过程。

$$\mathbf{r} \dot{\mathbf{m}}^- = C_e \frac{V_{ch}}{t} \mathbf{r}_l \mathbf{r}_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\mathbf{r}_l}} f_v, \quad p < p_{sat} \quad (5)$$

$$\mathbf{r} \dot{\mathbf{m}}^+ = C_c \frac{V_{ch}}{t} \mathbf{r}_l \mathbf{r}_l \sqrt{\frac{2(p - p_{sat})}{3\mathbf{r}_l}} f_l, \quad p > p_{sat} \quad (6)$$

其中:  $V_{ch}$  为特征速度;  $t$  为液体表面张力;  $p_{sat}$  为液体饱和蒸气压;  $C_e$  和  $C_c$  是经验常数, 取  $C_e = 0.02$ ,  $C_c = 0.01$ 。

采用标准  $k$ - $\epsilon$  湍流模型封闭 N-S 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r}_m k) + \nabla \cdot (\mathbf{r}_m \mathbf{v} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mathbf{m} + \frac{\mathbf{m}_t}{S_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \mathbf{r}_m \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r}_m k) + \nabla \cdot (\mathbf{r}_m \mathbf{v} \epsilon) =$$

$$\nabla \cdot \left[ \left( m + \frac{m_t}{s_e} \right) \nabla e \right] + \frac{e}{k} (C_{1e} G_k - C_{2e} r_m e) \quad (8)$$

式中： $m_t$  为湍流粘度， $m_t = r C_m \frac{k^2}{e}$ ； $G_k$  为由平均速度梯度引起的湍流动能， $G_k = 2m_t \nabla v$ ； $s_k$ 、 $s_e$  分别为  $k$  和  $e$  的 Prandtl 数，模型中各常数取值： $s_{1e} = 1.44$ ， $s_{2e} = 1.92$ ， $C_m = 0.09$ ， $s_k = 1.0$ ， $s_e = 1.3$ 。

### 1.2 数值方法与计算网格

通过有限体积法离散控制方程。压力梯度项采用 Standard 格式离散，动量方程的差分格式选用二阶迎风格式，湍流输运方程的差分格式选用一阶迎风格式，压力-速度耦合采用 PISO 算法。

超空泡航行体计算网格采用六面体结构网格，在壁面、弹体尾部、进水管喉部等参数变化梯度较大的区域进行加密。网格分布如图 2、图 3 所示。

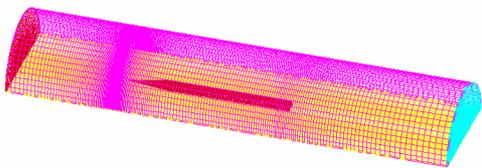


图 2 计算流场网格分布  
Fig.2 Computational grids in the whole flow field

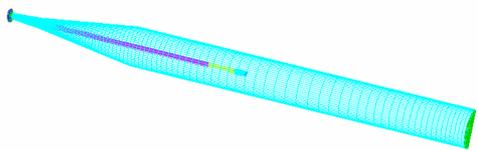


图 3 弹体表面网格分布  
Fig.3 Computational grids in the vehicle surface

## 2 模型验证

为了验证模型准确性，对文献[9]中圆柱体表面自然空化流场进行数值仿真，得到蒸汽相体积分数及压力系数  $C_p$  分布如图4、图5所示。并将不同空化数  $s$  下仿真结果与试验数据进行比较(图6)。研究表明，仿真结果与试验结果一致，模型准确性得到验证。

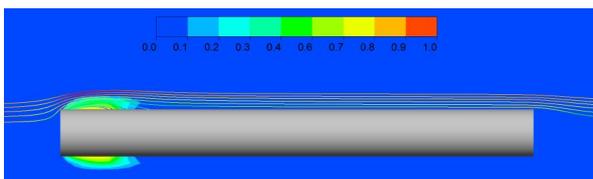


图4 蒸汽相体积分数分布( $s=0.5$ )  
Fig.4 Vapor volume fraction distribution ( $s=0.5$ )

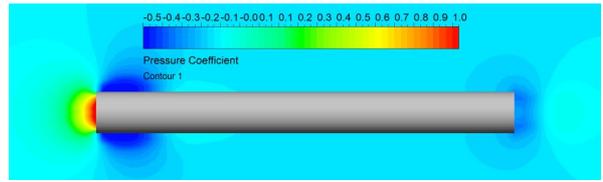


图5 圆柱体表面压力分布( $s=0.5$ )  
Fig.5 Pressure contours for the cylinder body ( $s=0.5$ )

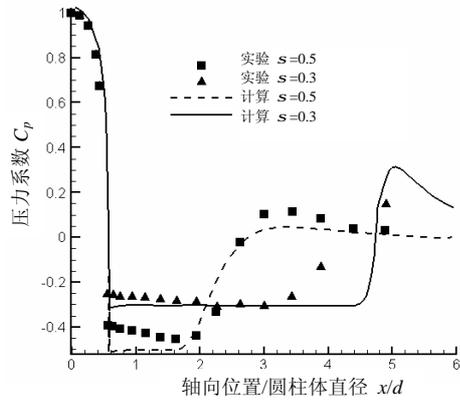


图6 圆柱体表面压力分布  
Fig.6 Pressure distribution at several cavitation numbers

## 3 计算结果与讨论

超空泡航行器性能由航行器水动力特性及进水管路摄水性综合评定。航行体水动力系数定义为：

$$\text{阻力系数: } C_d = \frac{R_x}{0.5 r_l v_\infty^2 S}$$

$$\text{升力系数: } C_l = \frac{R_y}{0.5 r_l v_\infty^2 S}$$

式中： $v_\infty$  为自由来流速度； $S$  为模型后段圆柱体截面积。

依据文氏管性能参数定义<sup>[10-11]</sup>，提出由流量系数  $f$  评价进水管摄水性。 $f$  定义为进水管路流量与基于 Bernoulli 速度  $V_t$  的理想流量的比值：

$$f = \frac{m \dot{V}}{r_l V_t A_t} \quad (9)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_{sat})}{r_l}} \quad (10)$$

其中： $A_t$  为文氏管喉部面积； $P_0$  为来流总压。

### 3.1 流场参数分布

对超空泡航行器内外流进行数值仿真，得到不同空化数下空泡形态，如图 7 所示。



$s=0.024$

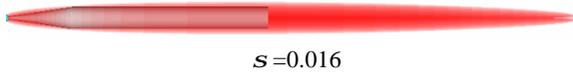


图 7 不同空化数下蒸汽相体积分数等值面( $a_v=0.5$ )  
Fig.7 Isosurfaces of vapor volume fraction at different cavitation number ( $a_v=0.5$ )

在外流场，空泡首先在空化器后、航行器表面锥柱交界处及航行器尾部等低压区形成。航行器尾部存在明显的尾部回流流。随着空化数减小，空泡长度和直径增加，逐渐形成包裹整个航行器的超空泡。由图 8 可知，进水管内空化发生区域主要位于文氏管扩张段。水流从进口的收缩段到中间断面，流速逐渐加大，致使压力逐渐降低，而后进入扩张段，流速又突然降低。在扩张段壁面处由于突然扩张而产生一个低压区，致使空泡体积增大，空泡得以滞留。

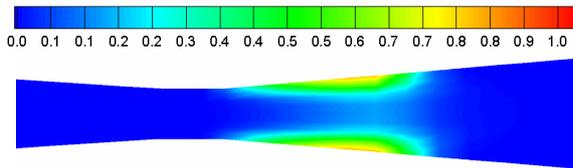


图 8 进水管路对称面水蒸气体积分数分布 ( $s=0.024$ )  
Fig.8 Vapor volume fraction contours at the symmetric plane of the water pipe

图 9 给出了弹体和进水管路表面压力分布。空化器表面由于受高速来流冲击作用形成高压。弹体表面发生空化处压力均匀分布。由于进水管路沿程能量损失，进水管壁面静压逐渐降低。进入文氏管内部后，静压从收敛段入口到喉部处迅速下降，在喉部附近达到水饱和蒸汽压。此后随着流通面积的不断增大，静压逐渐升高，在出口附近达出口反压。

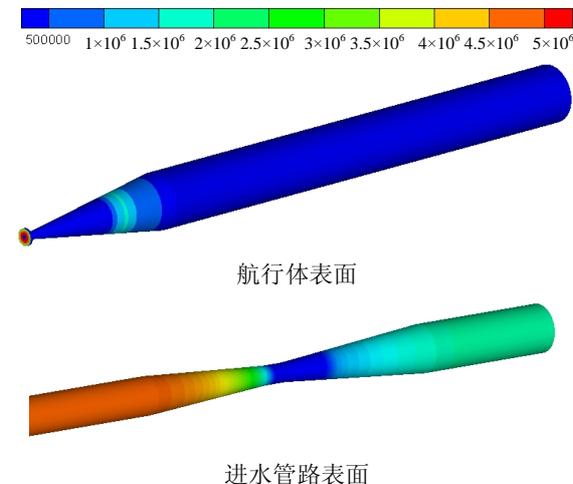


图 9 压力分布云图  
Fig.9 Pressure contours

### 3.2 航速和航行攻角影响分析

超空泡航行器从发射到巡航需经历不同的航行状态。图 10 给出了航行器阻力系数随航速变化曲线。其中  $C_p$  为航行器压阻系数， $C_f$  为摩阻系数， $C_d$  为航行器总阻力系数。由图可知，随航速增加，航行器摩阻和压阻系数均急剧减小，航速增加到一定程度后，阻力系数基本保持不变。这是由于航速增加时，空化数减小，空泡长度和直径增加，形成超空泡后，总阻力系数降低约 80%。此后阻力系数基本保持不变。图 11 给出了不同航速下进水管路流量系数变化规律。航速增加时，文氏管进出口压差增大，文氏管空化效果增强，造成流量系数增大。

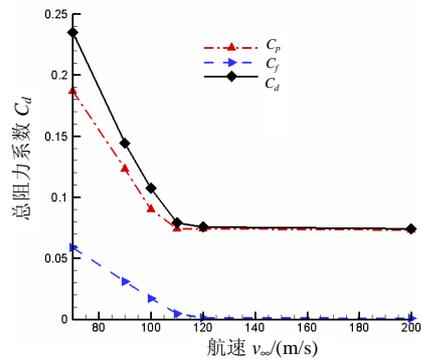


图 10 阻力系数随航速变化  
Fig.10 Drag coefficient vs. sailing velocity

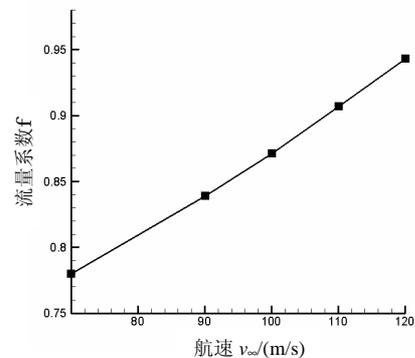


图 11 进水管路流量系数随航速变化  
Fig.11 Mass flux coefficient of water pipe vs. sailing velocity

航行攻角影响空泡形态，进而影响航行器水动力特性。图 12 为航行攻角  $a_s$  为  $5^\circ$  时空泡形态。小攻角下迎流面与逆流面空泡即存在强烈非对称性。由非对称因子(迎流面与逆流面空泡长度比  $l_u / l_d$ ) 衡量空泡非对称性。由图 13 可知，空泡非对称性随航行攻角增加而迅速增强。可见航行攻角对空泡形态存在较大影响。进水管路流量系数随攻角增加下降 3%，在小攻角下基本可以保持流量的稳定性。

图 14 给出了航行器升力系数、阻力系数随航

行攻角变化规律。阻力系数随攻角增加而减小，而摩阻系数则随攻角增加而增加。原因是攻角增加时，空泡非对称性增强，弹体表面粘性系数增大，造成摩阻增加。随着攻角增大，航行体可能与空泡壁面发生碰撞，碰撞程度严重时可能会导致超空泡溃灭，从而导致航行体失稳。



图 12 带攻角航行时蒸汽相体积分数等值面 ( $\alpha_s=5^\circ, \alpha_v=0.5$ )

Fig.12 Isosurfaces of vapor volume fraction at attack angle of sailing ( $\alpha_s=5^\circ, \alpha_v=0.5$ )

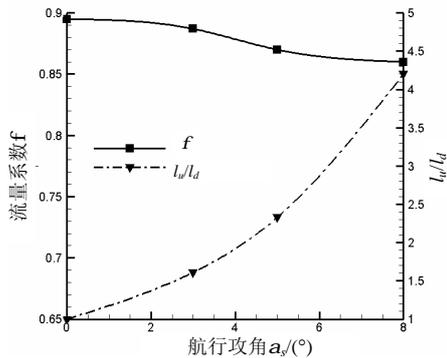


图 13 进水管路质量流量系数、非对称因子随航行攻角变化  
Fig.13 Mass flux coefficient of water pipe and non-symmetric factor vs. sailing attack angle

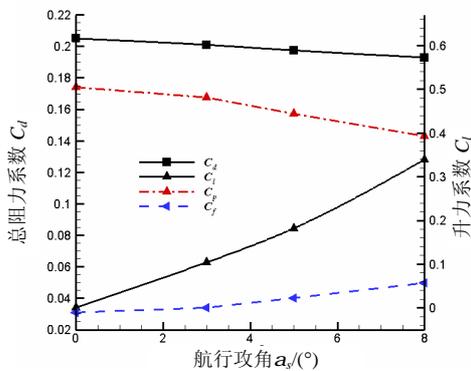


图 14 航行器升阻系数随航行攻角变化规律

Fig.14 Drag & lift coefficients vs. sailing attack angle

### 3.3 空化器攻角影响分析

超空泡航行器通常由空化器偏转一定角度提供升力，对航行器起控制作用，因此具有重要的研究意义。图 15 为空化器带攻角时空化器表面网格分布。

图 16 为空化器攻角  $\alpha_c$  为  $8^\circ$  时空泡形态。空化器偏转也造成空泡形态不对称，但相对于航行攻角，影响较小。

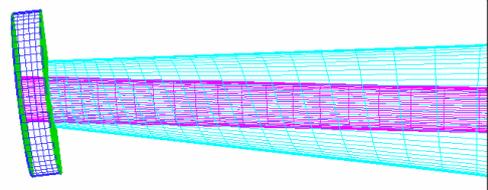


图 15 空化器表面网格

Fig.15 Computational grid in the cavitator region



图 16 空化器带攻角时空化器表面网格  
( $\alpha_c=8^\circ, \alpha_v=0.5$ )

Fig.16 Isosurfaces of vapor volume fraction at attack angle of cavitator ( $\alpha_c=8^\circ, \alpha_v=0.5$ )

表 1 给出了不同空化器攻角下空泡和航行器水动力参数。取弹体锥段上下表面空泡长度平均值作为空泡长度  $L_c$ 。随着攻角增加， $L_c$  逐渐减小。若航行时通过人工通气形成包裹航行体的空泡，则需增大通气量。随攻角增加，进水管路流量系数基本保持不变，因此空化器偏转对进水管路性能影响可以忽略。空化器阻力系数随攻角增加而减小，升力系数随攻角增加而增加。阻力系数变化规律与非超空泡航行器的结果相异。这主要是由于空化器开孔造成的。空化器攻角增加时，进水管路与空化器交界面面积增加，造成空化器表面压力作用面积减小，从而空化器阻力系数减小。对于带进水管路超空泡航行器，空化器偏转依然可以较好地应用于航行器控制。

表 1 不同空化器攻角下参数

Table 1 Parameters at various attack angle of the cavitator

攻角/ $^\circ$	$L_c/D_n$	流量系数	空化器阻力系数	空化器升力系数
0	7.12	0.895	0.0783	0
3	6.17	0.887	0.0745	0.00457
5	4.83	0.870	0.0727	0.00762
8	4.16	0.860	0.0668	0.0121

## 4 结论

本文提出了带进水管路超空泡航行器基本结构和性能评价方法，建立了超空泡航行器内外流三维仿真模型，对不同航行状态和空化器攻角下航行器内外流场开展了稳态数值仿真，得出以下几点结论：

(1) 随航速增加，空化数减小，空泡长度增加，阻力系数减小；空泡完全包裹超空泡航行器时，总

阻力系数相对于全湿流约降低 80%。

(2) 航行攻角严重影响空泡形态对称性, 使摩擦增加, 且易造成航行器失稳。

(3) 空化器攻角增加, 造成空泡长度减小; 小空化器攻角对空泡形态对称性影响较小。

(4) 空化器存在小攻角时, 进水管路流量系数基本保持不变。空化器偏转依然可以较好地应用于带进水管路超空泡航行器控制。

#### 参考文献:

- [1] 黄海龙. 圆盘空化器超空泡形态三维数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 78—84.  
Huang Hailong. Numerical simulation on the shape of natural supercavity based on full three dimensional disk-cavitator [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(1): 78—84. (in Chinese)
- [2] Kam W Ng. Overview of the ONR supercavitating high-speed bodies program [J]. AIAA 2006-6440.
- [3] David R Stinebring, Robert B Cook. High-speed supercavitating vehicles [J]. AIAA 2006-6441.
- [4] David R Stinebring. Basic research into high-speed supercavitating bodies [R]. ONR Project N00014-97-1-0126.
- [5] David R Stinebring, Michael L Billet. Developed cavitation-cavity dynamics. VKI Special Course on Supercavitating Flows. Brussels: RTO-AVT and VKI, 2001. RTO-EN-010(5).
- [6] Ivan N Kirschner. Overview of high-speed supercavitating vehicle control [J]. AIAA 2006-6442.
- [7] Ba'lint Vanek. Theoretical aspects of high-speed supercavitation vehicle control [C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minnesota, USA.
- [8] Singhal A K, Athavale M M, Li H Y, Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002(124): 617—324.
- [9] Kunz, R F, J W. Lindau, multiphase CFD modeling of developed and supercavitating flows. VKI Special Course on Supercavitating Flows [R]. Brussels: RTO-AVT and VKI, 2001. RTO-EN-010(13).
- [10] Changhai Xu, Stephen D Heister. Modeling cavitating venturi Flows [J]. AIAA 2002-3699.
- [11] 韩泉东. 空间变推力液体火箭发动机流量调节及燃烧过程仿真研究[D]. 北京: 国防科技大学, 2006.  
Han Quandong. Numerical simulation research on the mass flux control scheme and combustion process of variable thrust liquid propellant space rocket engine [D]. Beijing: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)