

Numerical Simulation of Jetting Water/Air in the Bow of Underwater Vehicle against the Flow

Aiming Liu, Aokui Xiong, Yihui Liu

School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei
Email: lamfluid@126.com

Received: Dec. 6th, 2018; accepted: Dec. 19th, 2018; published: Dec. 26th, 2018

Abstract

According to Sedov's theory, this paper put forward the idea of jetting water/air in the bow of underwater vehicle against the flow, thus looking forward to reducing the high pressure in the bow and creating air layer to reduce friction resistance at the same time. The flow field around submarine is calculated by using Fluent. It shows that, on one hand, the stationary point can be pushed off the submarine by means of jetting water/air against the flow, and get thrust; on the other hand, the surface of submarine can be surrounded by air layer, thus reducing friction resistance. The resistance of the submarine can be reduced to 10% - 30% when jetting air/water in the bow of submarine against the flow.

Keywords

Reduce Resistance, Two-Phase Flow, Jetting Water/Air against the Flow, Sedov's Theory

水下航行体迎流喷水/气数值模拟研究

刘艾明, 熊鳌魁, 刘一慧

武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉
Email: lamfluid@126.com

收稿日期: 2018年12月6日; 录用日期: 2018年12月19日; 发布日期: 2018年12月26日

摘要

根据前苏联学者Sedov的研究, 在物体前缘迎流喷水可以获得助推力。基于此理论, 本文提出了在航行体前缘迎流喷水同时携带气体的构想, 以期在改善水下航行体驻点区域高压、减小压差阻力的同时, 减

小摩擦阻力。并以SUBOFF潜艇为研究对象,进行了水下航行体迎流喷水/气数值模拟研究。研究结果表明:迎流喷水可使驻点脱离前缘从而降低压差阻力,获得助推力;同时迎流气液同喷可在潜艇表面形成空气润滑层,降低摩擦阻力;气液混合喷时减阻率可达10%~30%。

关键词

减阻, 两相流, 迎流气液同喷, Sedov理论

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

减小在流体中运动物体的粘性阻力一直是人们关注的热点。粘性阻力分为摩擦阻力和压差阻力。摩擦阻力对外形不敏感,早期研究工作主要是通过减小表面粗糙度[1][2]来减小摩擦阻力,随着湍流理论的发展以及新材料的不断涌现,出现了种类繁多的减阻方法与思路,如消除或减小壁面黏附作用[3][4]、自适应壁[4][5]、优化或改变近壁面流动特性、改变近壁层流体物性等[6]。其中,在水中引入气体,在物体表面形成气体隔层/润滑的思想很早就有,与其它添加物质法相比,在物体表面引入空气显然具有无污染的优点。在水中引入气体有两种方式,即空化法和通气法。通气有顺流向和逆流向两种方式。顺流向通气是空气润滑意识下的自然选择,逆流向通气是在形成超空腔的指导思想下提出。逆流向喷气也可以在运动体表面形成空气润滑层,但是,需要极大的喷流速度才能获得足够的动量使得物体表面具有较高的气层覆盖率及较理想的减阻效果。前苏联著名学者 Sedov 提出,在物体前缘逆流喷水可以获得助推力[7],其原理在于逆流喷水可使流动驻点脱离前缘,改善驻点区域高压、减小压差阻力。

基于 Sedov 的理论和逆流喷气减阻的思想,本文提出了逆流气液混合喷方式的构想。在物体前缘逆流喷水同时携带气体,一方面逆流喷水使流动驻点脱离前缘从而降低压差阻力,获得助推力;另一方面,与顺流喷气相比,逆流喷气既容易保持物体外形又可以在摩擦阻力最大的物体前缘形成空气润滑,且在喷射的液体的携带下,能得到更好的气层覆盖率,优势明显。此外必须要指出的是在物体前缘设置喷射装置必然要消耗能量,会某种程度上削弱逆流喷水/气的减阻节能效果。因此如何选择喷水/气口面积,喷水/气速度达到较佳的减阻节能效果是本文思考的主要方向。

据此本文针对 SUBOFF 潜艇模型,利用 FLUENT 软件进行了迎流喷水/气的减阻技术的数值模拟研究。研究不同喷水/气口面积、喷水/气速度对减阻效果的影响。

2. 数值计算模型的建立

2.1. 模型尺寸及网格划分

本文针对 David Taylor 研究中心与美国国防预研规划署(NSWCCD)共同发布的 SUBOFF [8]潜艇模型展开研究。潜艇模型艇体总长 L 为 4.356 m (缩尺比为 1:24),最大直径 D 为 0.508 m。喷气/水口设置在潜艇艏部。

计算域为圆柱体,如图 1 所示。沿潜艇纵向,来流入口距艇首取一倍艇长 L 使得湍流充分发展,潜艇尾部至流域出口取 $3L$ 以使得尾流场充分发展;沿潜艇径向取 $8D$ 以避免边界的干扰。采用六面体结构化网格,在距离艇体表面径向 $1.5D$ 的范围内对网格进行加密,且由外向内逐步加密;特别在艇体首尾线型变化较大的部位进行局部加密,以期能准确捕捉潜艇周围的流动特性。总网格数约 90 万。

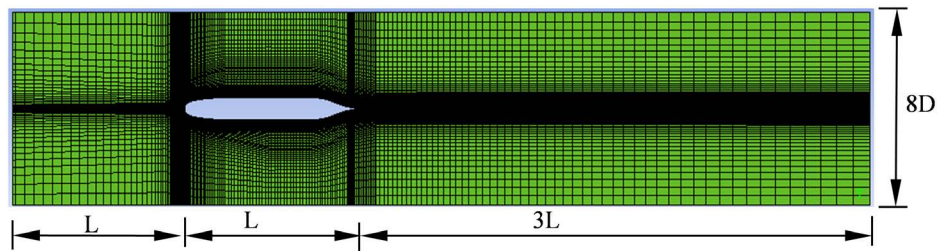


Figure 1. The sketch map computational domain and cells
图 1. 潜艇计算域与网格示意图

2.2. 边界条件及数值计算方法

流域入口为速度入口，来流速度为 5.144 m/s，即雷诺数为 2.32×10^7 ；出口为压力出口边界条件；潜艇表面为无滑移边界；顶部和底部边界为对称边界。

湍流模型采用 RNG 两方程模型，压力与速度的耦合使用 SIMPLEC 算法；采用有限体积法离散控制方程；水汽交界面采用 VOF 方法跟踪。

2.3. 减阻率与节能率的计算方法

在潜艇艏部逆流喷水可减小压差阻力，使潜艇运动消耗功率减小；但另一方面，逆流喷射的设置必然要消耗掉能量，使潜艇运动消耗功率增加。因此逆流喷射最终是否能够达到减阻节能的效果，要综合考虑这两方面的影响。

如果不喷射流体，则原潜艇受到的粘性总阻力 R_{t0} 为：

$$R_{t0} = R_{p0} + R_{f0} \quad (1)$$

式中 R_{f0} 为潜艇摩擦阻力、 R_{p0} 为压差阻力；分别由潜艇表面的切应力与压力积分求和得出。

在潜艇艏部设置喷口，逆流喷射流体时，考虑到喷射的流体会对喷射管道等装置产生力的作用，再通过力的传导，对潜艇产生一定影响。而喷射的流体会对喷射管道等装置产生的力主要与喷口处流体压力以及流体冲量有关[1]，故将喷口压力以及流体冲量计入到潜艇的压差阻力中，所以设置喷射后潜艇的总压差阻力 R_{tpj} ，其计算式为：

$$R_{tpj} = R_p + R_i + R_C \quad (2)$$

式中 R_p 根据潜艇壁面压力积分计算； R_i 表示喷口处的压力； R_C 为喷口喷出的流体对潜艇的冲量，其计算式为：

$$R_C = \rho_j v_j^2 S_j \quad (3)$$

式中 ρ_j 为喷射流体的密度， v_j 为喷射流体的速度， S_j 为喷口面积。

则有喷射潜艇总阻力 R_{tj} 为：

$$R_{tj} = R_{tpj} + R_{fj} \quad (4)$$

式中 R_{fj} 为有喷射潜艇表面的摩擦阻力。

故减阻率 μ 为：

$$\mu = (R_{t0} - R_{tj}) / R_{t0} \quad (5)$$

不喷射流体时潜艇航行消耗的功率 P_{s0} 为：

$$P_{s0} = R_{t0} V \quad (6)$$

式中 V 为潜艇航行速度。

有喷射流体潜艇运动所消耗的总功率 P_{sj} 为:

$$P_{sj} = R_j V + E \tag{7}$$

式中 E 为单位时间通过喷口的流体能量, 其计算式为

$$E = \left(\frac{R_i}{\rho_j} + \frac{1}{2} v_j^2 \right) \rho_j Q \tag{8}$$

其中 Q 表示通过喷口的流体流量。

因此节能率 η 的计算式为:

$$\eta = (P_{s0} - P_{sj}) / P_{s0} \tag{9}$$

3. 水下航行体迎流单相喷水数值模拟

根据前述计算方法, 为了便于对比分析, 首先对不喷射时原潜艇模型流场进行了数值模拟, 得到了其阻力值。其次对潜艇前缘迎流单相喷水进行了数值模拟, 确定了较佳的喷水口面积以及喷水速度。在此基础上结合气液两相流的 VOF 模型, 对潜艇前缘迎流气液同喷进行了数值模拟研究, 得出喷气口面积、喷气流量对潜艇流场特性以及阻力的影响规律。

3.1. 喷水口设置

为了讨论喷水口面积对阻力性能的影响, 在艇体前缘分别设置面积不同的圆形喷水口, 如图 2 所示。喷水口面积见表 1。

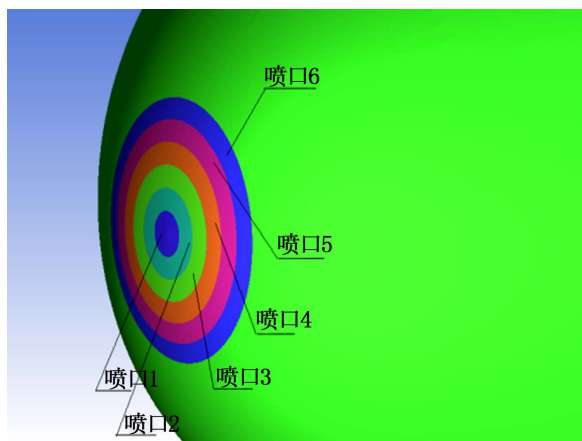


Figure 2. The sketch map of submarine at bow
图 2. 潜艇艏部喷水口局部放大示意图

分别计算不同喷水口面积, 不同喷水量时的流场, 具体计算条件为: 首先固定喷水口面积($S_w = 0.0004 \text{ m}^2$), 改变喷水速度(流量); 然后固定喷水速度(3 m/s), 改变喷水口面积。

Table 1. The area of spouts
表 1. 喷水口面积

喷水口	1	2	3	4	5	6
面积(m^2) $\times 10^{-3}$	0.40	1.57	3.51	6.22	9.67	13.83

3.2. 水下航行体迎流单相喷水计算结果分析

不喷射流体时, 原型潜艇模型的摩擦阻力 R_{f0} 为 217.65 N, 压差阻力 R_{P0} 为 28.02 N, 粘性总阻力 R_{t0} 为 245.67 N, 其运动消耗功率 P_{s0} 为 1263.73 W。

同一喷水口面积(0.0004 m^2)不同喷水速度以及同一喷水速度(3 m/s)不同喷水口面积时潜艇表面压力沿艇身分布如图 3, 图 4 所示。

由图 3 可知, 沿整个艇身, 喷水与不喷水两种情况下压力值基本重合, 迎流喷水对潜艇艇身的压力分布影响不大; 迎流喷水使得艏部压力明显降低, 且喷水速度越大, 压力降低越多。不喷水时, 潜艇艏部前端为驻点, 该处压力值最大; 在潜艇前缘迎流喷水导致艏部驻点脱离潜艇表面且前移, 潜艇前端不再是驻点, 故其艏部压力有明显降低。

而图 4 则表明喷水速度不变, 仅改变喷水口面积时, 对潜艇最前缘的压力影响不大, 最前缘压力的大小与喷水速度的关系较大, 与喷水口面积的大小基本无关。

此外, 从图 3、图 4 中均可看出, 喷水区域过后, 压力有一个明显下降再回升的变化, 反应出漩涡产生低压现象, 这些都对减阻产生有利的影响。

不同喷水速度, 不同喷水面积潜艇前缘迎流单相喷水数值模拟结果如表 2 和表 3 所示。

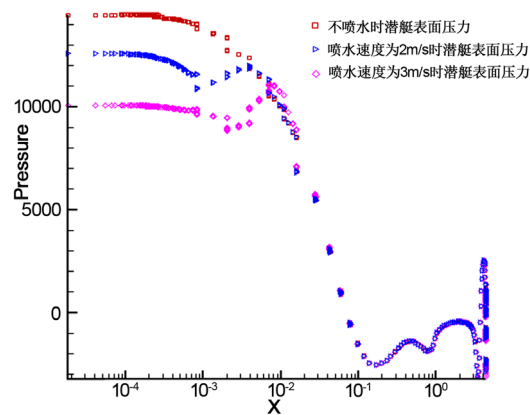


Figure 3. Pressure with longitudinal direction x of submarine at different injection velocity
图 3. 不同喷水速度潜艇表面压力沿潜艇纵向分布

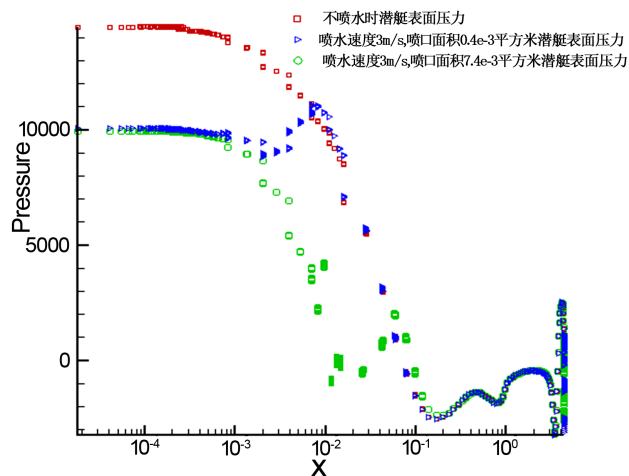


Figure 4. Pressure with longitudinal direction x of submarine at different spouts area
图 4. 不同喷水口面积潜艇表面压力沿潜艇纵向分布

Table 2. The result of simulation at different water injection velocity
表 2. 不同喷水速度时数值模拟结果($S_w = 0.0004 \text{ m}^2$)

喷水速度 V_w (m/s)	压差阻力 R_p (N)	反冲力 R_c (N)	喷口处压力 R_i (N)	总压差阻力 R_{ip} (N)	摩擦阻力 R_f (N)	总阻力 R_t (N)	减阻率 μ (%)	单位时间通过喷口的流体能量 E (w)	总功率 P_s (w)	节能率 H (%)
原艇 (不喷水)				28.02	217.65	245.67			1263.73	
1.0	20.34	0.39	5.24	25.98	217.64	243.62	0.83	0.2	1253.47	0.82
2.0	17.81	1.58	4.69	24.08	217.58	241.66	1.63	1.58	1244.69	1.53
2.5	16.22	2.46	4.36	23.05	217.52	240.57	2.08	3.08	1240.59	1.83
3.0	14.62	3.54	3.90	21.89	217.35	239.24	2.61	5.32	1235.99	2.19
3.5	14.43	4.83	3.53	22.79	217.11	239.9	2.35	8.45	1242.50	1.68
4.0	15.33	6.31	3.28	24.92	216.62	241.53	1.69	12.6	1255.04	0.69

Table 3. The result of simulation at different spouts area ($v_w = 3 \text{ m/s}$)
表 3. 不同喷口面积的数值模拟结果(喷水速度为 3 m/s)

喷口面积 S_w ($\times 10^{-3} \text{ m}^2$)	压差阻力 R_p (N)	喷口处压力 R_i (N)	反冲力 R_c (N)	总压差阻力 R_{ip} (N)	摩擦阻力 R_f (N)	总阻力 R_t (N)	减阻率 μ (%)	单位时间通过喷口的流体能量 E (w)	减阻率/ E
原艇(不喷水)				28.02	217.65	245.67			
0.39	14.62	5.24	3.55	22.06	217.35	239.41	2.55	5.33	0.00478
1.57	-26.4	18.60	14.12	6.32	216.1	222.43	9.46	21.27	0.00444
3.51	-85.87	37.24	31.56	-17.06	212.63	195.57	20.39	47.74	0.00427
6.22	-161.11	50.59	55.84	-44.67	206.74	162.06	34.03	84.7	0.00401
9.67	-214.09	52.20	86.85	-74.03	199.8	125.77	48.81	131.79	0.00370
13.83	-291.37	71.34	124.26	-95.77	192.52	96.75	60.62	189.35	0.00320

从表 2 可知, 潜艇在 5.144 m/s 来流速度下, 固定喷口面积(0.0004 m^2), 随着喷流速度的增加, 潜艇总阻力呈现先减后增的趋势; 迎流喷水主要改善的是潜艇艏部压力但摩擦阻力也略有降低, 潜艇减阻率 μ 、节能率 η 随喷流速度的增加呈现先增后减的规律, 在喷水速度为 3 m/s 时有最大值 2.61% 与 2.19%。

表 3 表明, 潜艇在 5.144 m/s 来流速度下, 固定喷水速度(3 m/s), 总阻力随着喷口面积的增加而逐步降低, 减阻率 μ 随着喷口面积的增加显著提高, 在喷水口面积为 $13.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 时, 减阻率可达 60%。

但随着喷口面积的增加, 喷射的流体对潜艇的反冲力 R_c 以及单位时间内通过喷口的流体能量 E 也随之增加。为了更清楚的揭示不同喷流面积下减阻率与喷射该流量的水所需付出的能量的关系, 引入减阻效能比这一参数, 它表示付出单位喷射流体需消耗的能量后所获得的减阻率, 计算结果表明减阻效能比(减阻率/ E)随喷口面积的增加逐渐降低。

因此可以得出, 尽管喷口面积越大, 减阻率越高减阻效果越好, 但所耗费的能量较多, 故并非喷口面积越大越好。此外, 也应考虑到在实际情况下, 潜艇前端开口对结构强度、流噪声的影响等等, 喷口面积也不宜过大。故选取喷水口面积 $S_w = 1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 喷水速度 $v_w = 3 \text{ m/s}$, 来进行气液混喷的数值研究。

4. 水下航行体迎流气液混喷数值模拟

迎流喷水可以减小潜艇的压差阻力, 但其对潜艇的摩擦阻力影响较小, 而在 SUBOFF 裸壳潜艇的总阻力中摩擦阻力占总阻力的 88.6%, 是其总阻力的主要组成部分。为减小潜艇的摩擦阻力, 考虑在潜艇艏部设置圆形/圆环形喷口, 内部圆形喷口喷水, 外部圆环形喷口喷气, 这样所喷射的液体将气体包裹在潜艇表面, 以期减小潜艇表面的摩擦阻力。

艏部中心圆形喷口喷水, 根据前文结果, 喷口面积 S_W 选取为 $1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 分别计算 4 种不同喷气口面积 ($SA_1 = 1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $SA_2 = 4.64 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $SA_3 = 8.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $SA_4 = 12.16 \times 10^{-3} \text{ m}^2$), 每种面积计算 7 种不同喷气量共计 28 种的两相流流场。

4.1. 水下航行体迎流气液混喷压力分布

喷气口面积一定 ($SA_3 = 8.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2$), 不同喷气量以及喷气流量一定 ($5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) 不同喷气口面积下潜艇表面压力分布分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出, 不论是固定喷气口面积改变喷气流量, 还是固定喷气流量改变喷气口面积, 对潜艇艇身的压力分布的影响都不太大, 仅对潜艇艏部喷气口附近的压力有所影响。

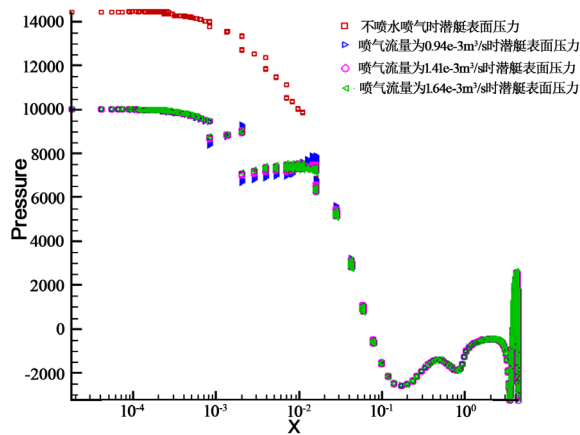


Figure 5. Pressure with longitudinal direction x of submarine at different air flow rate ($SA_3 = 8.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)
图 5. 不同喷水口面积潜艇表面压力沿潜艇纵向分布 ($SA_3 = 8.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)

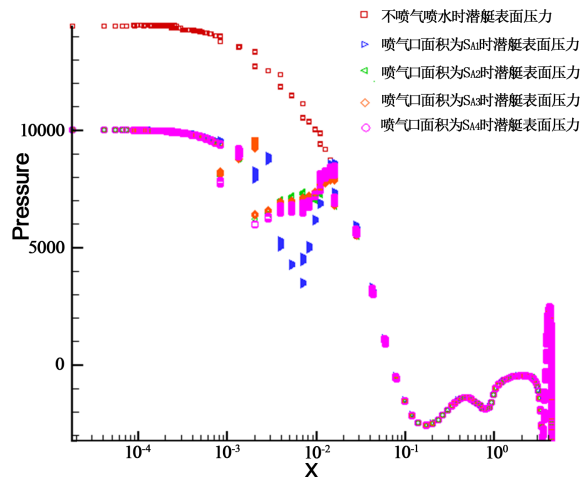


Figure 6. Pressure with longitudinal direction x of submarine at different spouts area ($Q = 5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)
图 6. 不同喷口面积潜艇表面压力分布 ($Q = 5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

图 5 表明喷气面积固定的情况下，改变喷气流量对潜艇表面压力影响很小，不同喷气流量下潜艇表面的压力曲线基本是重合的。并且都出现了压力下降再回升的变化，这主要是因为迎流喷水在艇艏处产生了漩涡低压区。

由图 6 可见喷气流量固定的情况下，改变喷气口面积同样主要影响喷口附近的压力。喷气口面积较小时，压力有更加明显的下降再回升的变化。

图 7 给出了喷气流量为 $5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ，不同喷气面积时潜艇艏部的流速矢量图。

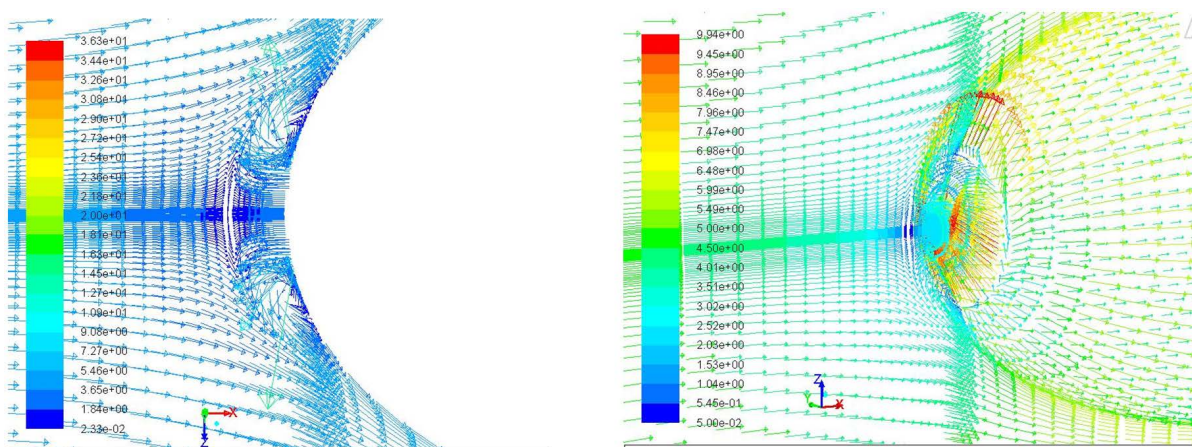


Figure 7. Velocity of submarine at different area of jet exhaust ($Q = 5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

图 7. 不同喷气口面积时潜艇艏部速度矢量图($Q = 5.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

艏部迎流喷射的流体在来流的作用下，会顺流向后流动，同时由于流体的粘性会带走部分艏部的液体，周围的流体要补充这部分被带走的流体所占据的空间，会在潜艇前缘产生漩涡。而迎流喷气不断增加喷气口面积时，迎流喷出的气体不断补充了部分被带走的流体所占据的空间，从而使得艏部因迎流喷水产生的漩涡区的到改善，流场不那么紊乱，且喷气口面积越大时这种现象越明显。

4.2. 水下航行体迎流气液混喷阻力计算结果与分析

表 4 给出了喷气口面积为 $SA_4 = 12.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 不同喷气量的计算结果，其余三种喷气口面积，不同喷气量的计算结果与此类似，在此不再赘述。

Table 4. The result of simulation at different air flow rate ($SA_4 = 12.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)

表 4. 不同喷气量计算结果($SA_4 = 12.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)

喷气流量 ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	总压差阻力 R_{tP} (N)	摩擦阻力 R_f (N)	总阻力 R_t (N)	减阻率 μ (%)	单位时间通过喷 口的流体能量 E_a (w)	总功率 P_s (w)	节能率 η (%)
原艇		217.65	245.67			1263.73	
0 (只喷水)	6.34	216.1	222.44	9.50	21.27	1165.43	7.78
1.90	7.26	207.54	214.80	12.57	21.41	1126.34	10.87
3.80	5.78	198.66	204.44	16.78	21.56	1073.22	15.08
5.70	3.65	190.28	193.93	21.06	21.72	1019.30	19.34
7.60	4.04	182.08	186.12	24.24	21.89	979.31	22.51
9.44	5.42	175.96	181.38	26.17	21.78	954.82	24.44
11.52	5.61	168.22	173.83	29.24	22.23	916.42	27.48
13.24	4.44	164.24	168.67	31.34	22.38	890.02	29.57

同一喷气流量下($Q = 13.24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)不同喷口面积时的计算结果如表 5 所示。

Table 5. The result of simulation at different the area of air injection ($Q = 13.24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)
表 5. 不同喷气口面积计算结果($Q = 13.24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

喷气口面积 ($\times 10^{-3} \text{ m}^2$)	总压差阻力 R_{tP} (N)	摩擦阻力 R_f (N)	总阻力 R_t (N)	减阻率 μ (%)	单位时间通过喷 口的流体能量 E (w)	总功率 P_s (w)	节能率 η (%)
原艇		217.65	245.67			1263.73	
0 (只喷水)	6.34	216.1	222.43	9.50	21.27	1165.43	7.78
SA1	7.07	185.19	192.27	21.74	21.96	1010.98	20.00
SA2	6.59	169.56	176.14	28.30	21.76	927.84	26.58
SA3	3.32	168.04	171.35	30.25	22.02	903.46	28.51
SA4	4.44	164.24	168.67	31.34	22.38	890.02	29.57

从表 4 和表 5 可以看出, 不论喷气流量与喷气口面积的大小, 潜艇前缘气液同喷时减阻效果都优于单相喷水情况, 减阻率、节能率都比单相喷水时大。

喷气口面积不变时, 随着喷气流量的增加, 摩擦阻力基本保持相同的梯度显著降低。相比不喷气情况, 随着喷气流量的增加, 摩擦阻力最大可降低约 24%; 总阻力随着喷气流量的增加而减小, 相比仅迎流喷水情况, 气液混喷时总阻力最大可降低约 20%, 而相比不喷水不喷气时, 气液混喷时总阻力最大可降低约 30%。

喷气面积不变时, 减阻率与节能率都随着喷气流量的增加而增加。除了喷口面积为 SA₁ 的情况减阻率与节能率在喷气流量较大时变化稍平缓外, 其余喷口面积的流量增大约 7 倍时, 减阻率与节能率可增加约 20%左右。整体而言, 迎流气液同喷的情况下, 不同喷气口面积下减阻率与节能率可达到 10%~30%。

喷气流量不变时, 增加喷气口的面积, 摩擦阻力同样有所减小, 但没有随流量的增加减小的显著, 喷口面积增大约 6 倍时, 摩擦阻力最大可降低约 11%。总的来说, 迎流气液同喷对减小摩擦阻力效果显著; 总阻力也随着喷气口面积的增大而降低, 但没有随流量的增加减小的显著, 喷口面积增大约 6 倍时, 总阻力最大可降低约 12%。喷气流量不变时, 减阻率与节能率同样随着喷口面积的增加而增加。

综上所述, 不论是增加喷气口面积还是增加喷气流量, 对减小潜艇的总阻力都是有利的, 且都明显优于迎流单相喷水时的阻力性能。在实践中, 可以结合实际情况, 综合考虑喷口对潜艇结构强度、总布置以及流噪声等方面的影响, 选取合适的喷口面积与喷气流量的组合来达到降低潜艇总阻力的目的。

5. 结论

本文基于 Sedov 理论, 提出了在物体前缘迎流喷水同时携带气体的构想。并针对 SUBOFF 潜艇模型, 在来流速度为 5.144 m/s, 雷诺数为 2.32×10^7 的条件下, 利用 FLUENT 软件, 对潜艇前缘单相喷水以及气液同喷进行了数值模拟研究。研究结果表明:

1) 迎流喷射流体可以使得潜艇艏部驻点脱离潜艇表面前移, 从而减小其压差阻力。迎流气液混合喷既可使流动驻点脱离前缘从而降低压差阻力, 又可在潜艇表面形成空气润滑, 达到减少摩擦阻力的目的。

2) 单相喷水且喷水面积固定时, 减阻率以及节能率随喷水速度的增加呈先增后减的变化特点。在喷水速度为 3 m/s 时减阻率与节能率有最大值, 分别为 2.61%与 2.19%。喷水速度固定时, 单相喷水潜艇阻力随喷水面积的增加而减小, 减阻率随着喷水面积的增加显著增加, 在喷口面积为 $13.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 时减阻率可达 60.62%。但减阻效能比随着喷水面积的增加, 呈现递减的变化特点。

3) 气液同喷且喷气口面积不变时, 摩擦阻力随着喷气流量的增加显著降低。相比仅单相喷水情况, 摩擦阻力最大可降低约 24%, 总阻力最大可降低约 20%; 喷气流量不变时, 摩擦阻力最大可降低约 11%, 总阻力最大可降低约 12%。整体而言, 迎流气液同喷的情况下, 减阻率与节能率可达到 10%~30%。

数值模拟研究表明潜艇前缘迎流喷水/气减阻性能良好, 但想要将这种减阻技术成功的应用于实践中, 其节能效果尚需实验验证; 此外在潜艇前缘开口势必对潜艇结构强度以及潜艇噪声等产生影响, 这些都需要进一步的研究。

基金项目

国家自然科学基金(51309182)。

参考文献

- [1] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [2] 王英奎, 江春波, 李玲. 流动减阻的研究综述[J]. 水力发电, 2008, 34(2): 67-70.
- [3] 余永生, 魏庆鼎. 疏水性材料减阻特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(2): 60-66.
- [4] Gray, J. (1936) Studies in Animal Locomotion: The Propulsive Power of the Dolphin. *Experimental Biology*, **13**, 192-199.
- [5] Toms, B.A. (1948) Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers. *Proceedings of the First International Congress on Theology*, **2**, 135-141.
- [6] 陈东浩. Toms 现象与减阻技术的历史及现状[J]. 化工进展, 1986(1): 32-34.
- [7] л.и.谢多夫. 连续介质力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S. (1989) Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models. David Taylor Research Center, Bethesda, Montgomery County, Maryland.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org