

基于横向二次射流的水下推力矢量方法

耿令波^{1,2}, 胡志强¹, 林扬¹, 衣瑞文^{1,2}, 杨翊¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 中国科学院大学 工程学院, 北京 100496)

摘 要: 提出一种基于横向二次射流的水下推力矢量技术,通过二次射流的横向速度场诱导主流发生偏转,建立了推力矢量偏角与流速偏角的数学关系,证明了通过主流偏转实现推力矢量偏转的有效性。通过数值计算方法分析了不同二次射流深度、不同二次射流/主流体积比及不同二次射流/主流速度比条件下主流偏转角度变化。结果显示:随着二次射流深度的增加,主流受到壁面阻碍作用增强,因而偏转角度减小。随着二次射流/主流体积比的减小,出口负压区所占比例减小,主流偏转角度增加,且当体积比减小到一定值后,负压影响可以忽略,主流不再随体积比而变化。主流偏转角度随速度比增加而增加,且在速度比一定的条件下,速度数值的变化对主流偏转没有影响。设计了一种主流为圆形射流的水下矢量推进器,对其数值分析结果揭示:当位于射流中剖面同侧的二次射流全部作动时,主流可以取得最大的偏转角度,且主流的偏转方向可以通过使不同的二次射流组合处于作动状态进行控制。

关键词: 横向; 二次射流; 水下推力矢量; 水下机器人; 矢量推进器

中图分类号: V211

文献标志码: A

Underwater thrust vectoring method based on cross second flow

GENG Lingbo^{1,2}, HU Zhiqiang¹, LIN Yang¹, YI Ruiwen^{1,2}, YANG Yi¹

(1. The State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Engineering College,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100496, China)

Abstract: A novel underwater thrust vectoring method based on cross second flow was proposed. In this method, the main flow can be deflected by the flow field induced by the cross second flow. A mathematical model relating the thrust vectoring angle to the flow vectoring angle was established. This model validated the feasibility of thrust vectoring through flow deflection. The effects of the depth of the second flow, the volume ratio as well as the velocity ratio of second flow to the main flow on the deflection angle were studied through numerical method. The numerical results showed that the deflection angle of the main flow decreased with the increase of the depth because of the variation of the adverse pressure at the nozzle. With the decrease of the volume ratio the deflection angle increased. And when

收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0301601)

作者简介: 耿令波(1988—),男,博士生,主要从事水动力的研究。

引用格式: 耿令波,胡志强,林扬,等. 基于横向二次射流的水下推力矢量方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 1922-1932. GENG Lingbo, HU Zhiqiang, LIN Yang, et al. Underwater thrust vectoring method based on cross second flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1922-1932.

the volume ratio was lower than a specific value, the deflection angle didn't vary any more. The deflection angle increased with the velocity ratio, and at a certain velocity ratio, the magnitude of the velocity had no effect on the deflection angle. Based on these numerical results, an underwater thrust vectored propulsor was designed. The simulation about this propulsor reveals that the maximum deflection angle can be realized when all the second jets at the same side of the midship section of the main flow are activated simultaneously. The deflection direction of the main flow can be controlled through activating different groups of second jets.

Key words: cross; second jet; underwater thrust vectoring; underwater robots; vectored thruster

目前大多数的水下机器人都采用推进器+操纵舵的方式实现姿态调节^[1-3]。虽然操纵舵可以实现有效的姿态控制,但会带来较大的附加阻力,影响机器人的快速性和整体推进效率。另外,当操纵舵偏转角度较大时,会发生流动分离现象,流动分离会使得控制效果大为减弱。

推力矢量技术通过直接改变推力方向实现姿态控制,不会产生操纵舵的失速现象,因而效率较高。从国内外 AUV(autonomous underwater robot)发展状况来看,矢量推进器在 AUV 领域已被实际应用,具有较好的应用前景。

目前水下推力矢量一般通过两种方式实现,一种是布置多对具有不同朝向的推进器,通过不同的推进器组合产生不同方向的推力。另一种是采用单个推进器,通过附加的机械机构来矢量调整推进器的朝向。

国防科技大学的高富东、潘存云等提出一种采用基于球齿轮的柔性传动轴机构的多推进器水下机器人,可保证水下航行器完成水陆条件下的多种运动状态^[4]。英国 BAE 系统公司推出的“泰利斯曼”近海 UUV(unmanned underwater robot)采用了多个推进器,推进系统配置包括 2 个固定主推进器,4 个管隧推进器,能够在零速度和后退运动时实现全向可控。美国麻省理工伍兹霍尔海洋研究所的 ABE,JASON 以及斯坦福大学的 OTTER 和 MBARI 公司的 Tiburon 也都属于此类^[5-7]。

这种多推进器构型设计的缺点是结构质量较大,且流体阻力较大,有些推进器只在机器人进行特定机动运动时才使用,平时都闲置不用,使得整体结构利用效率不高。

为此,一些研究者提出通过附加机械机构调整推进器朝向从而只使用一个推进器实现推力矢量的方法。天津大学的魏东杰提出一种采用 3-

RPS 与 SPS 组合机构的矢量推进器^[8],麻省理工学院(MIT)的 Nawrot 提出了一种采用万向联轴器的可偏转推进器,并应用于 Bluefin 水下机器人^[9]。Cavallo 等提出一种采用球形并联机构的矢量推进器,可以实现空间大角度偏转^[10]。华中科技大学的 Ba Xin 等提出一种采用 3-RPS 并联机构实现的矢量喷水推进器^[11]。

基于附加机构的推力矢量技术虽然没有增加推进器的数目,但需要设计额外的机械机构,增加系统的复杂性,且机械传动会消耗一部分能量,使得整体推进效率降低。

为了克服上述推力矢量方法的不足,本文提出了一种基于横向二次射流的推力矢量方法。该方法通过横向二次射流的切向速度场诱导主流发生偏转,进而实现推力方向的偏转。通过调整二次射流的速度,可调节主流的偏转角度,进而改变推力的偏转角度,从而实现推力矢量控制。该方法无需增加推进器的数目,也不需要设计额外的机械机构,因而具有结构简单、质量轻、附加阻力小的优点,且由于不受机械传动的限制,二次射流可以根据需要灵活布置,实现推力在整个空间范围内的偏转,大大提升水下机器人的流体性能及机动性能。

1 作用机理

1.1 作用机理

基于流动控制的推力矢量技术在航空领域研究较多,如基于引射效应的推力矢量技术,基于二次射流与科恩达效应的推力矢量技术,基于合成射流的推力矢量技术以及基于被动二次射流的推力矢量技术等^[12-14]。

然而,在水下机器人领域,推力矢量大都采用机械方式实现,基于流动控制的推力矢量技术研

究很少。相对于机械式方法,基于流动控制的推力矢量方法具有结构简单,质量轻,体积紧凑的优点。

本文提出的基于横向二次射流的推力矢量方法本质上属于流动控制技术,其原理如图 1 所示,在推进器的四周均匀布置二次射流装置,二次射流的速度方向与主射流速度方向垂直,这样在二次射流横向速度场的诱导下,主射流会发生一定角度的偏转,进而使得推力方向发生偏转。

当二次射流都处于作动状态或都处于静止状态时,整个系统是流场对称的,主流不发生偏转。而当部分二次射流处于作动状态时,流场不再对称,主流在二次射流作用下发生偏转。通过控制不同方位的二次射流处于作动状态,可以控制主流偏转的方向,而通过控制二次射流相对主流的速度大小,可以控制主流偏转的角度。这样,主流的偏转方向及偏转角度均可实现有效控制。

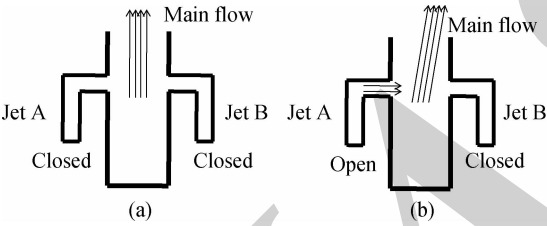


图 1 作用机理

Fig. 1 Working mechanism

1.2 推力偏角与流速偏角的关系

为了说明通过主流偏转实现推力矢量的有效性,本文建立推力矢量偏角与流速矢量偏角间的数学模型。

选择整个推进器壁面所围成的封闭体为控制体,如图 2 所示。假设入口速度及入口压强分别为 V_{in}, p_{in} ; 出口速度及出口压强分别为 V_{out}, p_{out} ; 在横向二次流的作用下,主流偏转角度为 β 。

忽略流体的摩擦力,则整个推进器(不包含螺旋桨或叶轮等直接产生推力的部件)所受到的流体作用力可以表示为,压强应力在推进器所有壁面的积分

$$F = \iint_S pn \, dS \tag{1}$$

式中 S 为推进器壁面。将压强应力在整个控制体的所有表面进行积分得到

$$\oint_{\partial V} pn \, dS = \iint_S pn \, dS + \iint_{S_{in}} pn \, dS + \iint_{S_{out}} pn \, dS \tag{2}$$

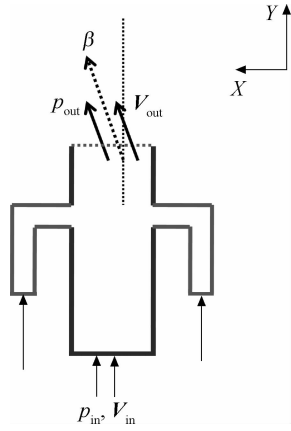


图 2 控制体

Fig. 2 Control volume

式中 ∂V 为整个控制体的内表面,由 S, S_{in} 及 S_{out} 组成; S_{in} 为入口截面; S_{out} 为出口截面; n 为控制体表面的外法线方向。由高斯定理将面积分转换为体积分

$$\begin{aligned} \iint_S pn \, dS + \iint_{S_{in}} pn \, dS + \iint_{S_{out}} pn \, dS = \\ \iiint_V \left(\frac{\partial p}{\partial y} j + \frac{\partial p}{\partial x} i \right) dV \end{aligned} \tag{3}$$

以整个控制体内部的流体为研究对象,在忽略重力的条件下,流体受到的外力主要是控制体壁面施加的作用力,此作用力与式(3)互为相互作用力,因而可得

$$\iiint_V \frac{D\mathbf{V}}{Dt} dV = - \frac{1}{\rho} \iiint_V \frac{\partial p}{\partial y} j \, dV - \frac{1}{\rho} \iiint_V \frac{\partial p}{\partial x} i \, dV \tag{4}$$

式(4)左边表示控制体的动量变化,即流出与流入控制体的动量差,可表示为

$$\iiint_V \frac{D\mathbf{V}}{Dt} dV = \dot{m}_{out} \mathbf{V}_{out} - \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} \tag{5}$$

式中 $\dot{m}$ 为质量流量, $\mathbf{V}$ 为平均流速。由式(1)~式(5),推进器壁面受到的流体作用力可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \iint_{\partial V} pn \, dS = \\ \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} - \dot{m}_{out} \mathbf{V}_{out} - \iint_{S_{in}} pn \, dS - \iint_{S_{out}} pn \, dS \end{aligned} \tag{6}$$

X 轴、 Y 轴的正向如图 1 所示,则法向及切向作用力可分别表示为

$$\begin{aligned} F_{nor} = \dot{m}_{in} V_{in} - \dot{m}_{out} V_{out} \cos \beta + \\ \iint_{S_{in}} p \, dS - \iint_{S_{out}} p \, dS \end{aligned} \tag{7}$$

$$F_{tan} = - \dot{m}_{out} V_{out} \sin \beta \tag{8}$$

假设流体速度在入口及出口的有效截面上满足均匀分布,则由连续方程可知 $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$, 也即

$$\iint \mathbf{V}_{in} \mathbf{n} dS = \iint \mathbf{V}_{out} \mathbf{n} dS \quad (9)$$

因而, $\mathbf{V}_{in} S_{in} = \mathbf{V}_{out} \cos \beta S_{out}$ 。假设入口与出口的截面积比为 $S_{in}/S_{out} = k$, 则

$$\dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} - \dot{m}_{out} \mathbf{V}_{out} \cos \beta = (1 - k) \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} \quad (10)$$

由伯努利方程可知

$$\iint_{S_{in}} \left(p_{in} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}_{in}^2 \right) dS = \iint_{S_{out}} \left(p_{out} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}_{out}^2 \right) dS \quad (11)$$

$$\iint_S \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}^2 dS = \frac{1}{2} \sum \rho \mathbf{V} dS \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{2} \dot{m} \mathbf{V} \quad (12)$$

因而

$$\begin{aligned} \iint_{S_{in}} p_{in} dS - \iint_{S_{out}} p_{out} dS = \\ \frac{1}{2} \dot{m}_{out} \mathbf{V}_{out} \cos \beta - \frac{1}{2} \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} = \\ \frac{1}{2} (k - 1) \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} \end{aligned} \quad (13)$$

这样, 法线方向的作用力

$$\mathbf{F}_{nor} = \frac{1}{2} (1 - k) \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in} \quad (14)$$

式中 $\mathbf{F}_{nor}$ 仅为推进器壁面所受到的流体作用力, 没有包含叶轮或螺旋桨产生的推力。假设螺旋桨或叶轮的入流速度为 0, 则螺旋桨或叶轮产生的推力可表示为 $T = \dot{m}_{in} \mathbf{V}_{in}$, 因此, 推进器的推力矢量偏角 Θ 满足

$$\begin{aligned} \tan \Theta = \frac{\mathbf{F}_{tan}}{T + \mathbf{F}_{nor}} = \\ \frac{-\mathbf{V}_{out}}{(1.5 - 0.5k) \mathbf{V}_{in}} \sin \beta = \frac{k}{1.5 - 0.5k} \tan \beta \end{aligned} \quad (15)$$

在本文研究中, 二次射流的体积远小于主射流(二次射流与主射流截面积比为 8 : 1), k 略大于 1, 因而

$$\tan \Theta = \frac{k}{1.5 - 0.5k} \tan \beta \approx \tan \beta \quad (16)$$

可见, 推力矢量偏角与出口流速偏角大致相等。因此, 通过主流速度偏转可以实现推力方向的偏转。

2 数值方法

2.1 控制方程与边界条件

在研究二次射流几何及流动参数对主流偏转角度影响时, 为了减小计算量, 采用二维网

格进行计算, 所有的数值计算均在 Fluent 中进行。本文研究的推进器主流直径为 60 mm, 主流速度为 5 m/s, 由此可以计算出流动所处的雷诺数为

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1000 \times 5 \times 0.06}{0.001005} = 298000 \quad (17)$$

在此雷诺数下, 流动为湍流。对湍流的数值计算方法一般包括直接数值模拟, 大涡模拟及雷诺时均方程, 直接数值模拟与大涡模拟计算量很大, 在工程应用中普遍采用雷诺时均方法对湍流进行模拟, 可以取得理想的精度。因此, 本文也采用雷诺时均方法对湍流进行数值计算。

按照不同的封闭形式, 雷诺时均方程又可分为单方程模型 (Spalart-Allmaras), 两方程模型 ($k-\epsilon$, $k-\omega$) 以及雷诺应力模型。 $k-\epsilon$ 湍流模型在模拟流动矢量偏转控制方面的有效性已经得到了验证^[13,15-16], 而 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在模拟流动分离及二次流时有很好的表现, 本文的推力矢量方法包含二次流, 因而为了取得较理想的数值计算结果, 本文选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型进行数值计算。

边界条件设置如图 3, 与推进器射流出口相对的外流域边界设置为压强出口, 其余外流域边界均设置为压强入口。二次射流及推进器主流の入流侧均设置为速度入口, 其余边界均设置为无滑移壁面。

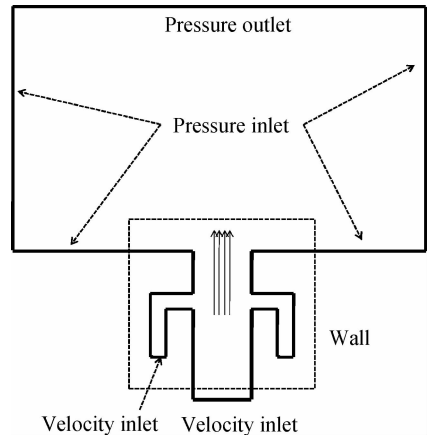


图 3 边界条件设置

Fig. 3 Boundary conditions

2.2 网格无关性验证

为了减小整体网格数目, 整个流域采用 3 种不同的网格尺度进行划分, 不同区域网格尺度定

义如图 4。推进器为主要研究对象,因而其网格尺度最小,网格尺度设定为 H_1 。远离推进器的外流域对结果影响较小,因而采用较粗的网格,其网格尺度设定为 H_3 。为了保证较好的网格连续性,在外流域与推进器之间设置网格加密区,加密区网格尺度设定为 H_2 ,3 种网格尺度满足 $H_2 = 3H_1, H_3 = 10H_1$ 。

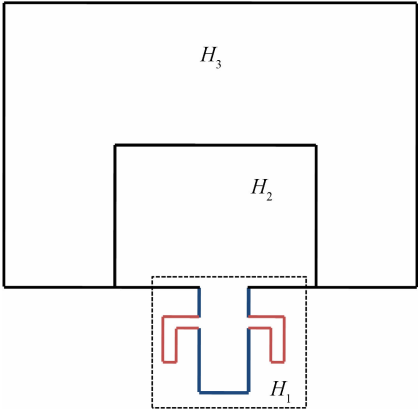


图 4 不同区域网格尺度设置

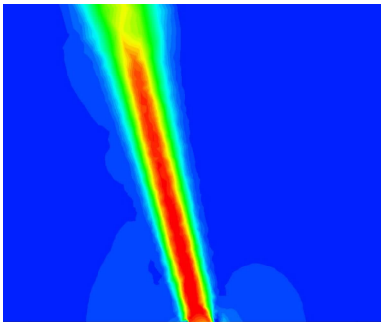
Fig. 4 Mesh size definition in different zones

为了保证数值计算方法的正确性,本文首先进行了网格无关性验证。进行网格无关性验证时,采用了 3 种不同尺度的网格,分别定义为 Fine 网格、Medium 网格、Carse 网格,其网格尺度设定如表 1。

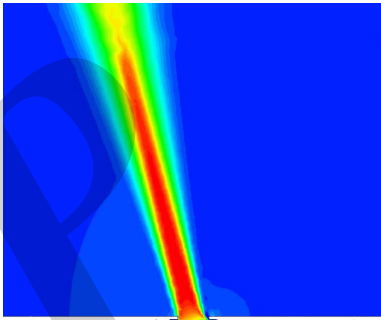
在相同的条件下,利用 3 种网格对主流偏转进行数值计算,不同网格尺度下计算得到的主流偏转如图 5,可以看出主流偏转角度(α)对网格尺度变化并不敏感。虽然主流偏转角度一致,3 种网格尺度所对应的流场在细节上仍有较大差异,在流场细节上,Medium 网格与 Fine 网格的计算结果较为接近,而 Coarse 网格计算得到的主流边界并不光滑。因而,基于精度和计算量的综合考虑,本文后续均采用 Medium 尺度网格进行计算。

表 1 不同网格尺度设定
Table 1 Mesh size in different cases

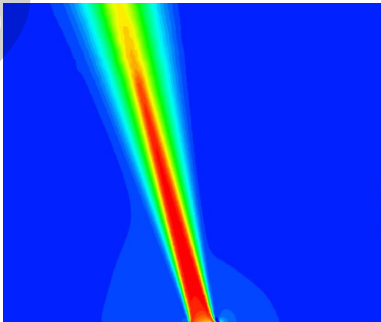
网格	H_1/mm	H_2/mm	H_3/mm
Coarse	4	12	40
Medium	2	6	20
Fine	1	3	10



(a) Coarse网格



(b) Medium网格



(c) Fine网格

图 5 不同网格尺度下主流偏转角度($\alpha=15^\circ$)
Fig. 5 Deflection angle under different mesh sizes
($\alpha=15^\circ$)

3 结果分析

本文通过二次射流实现主流偏转角度的控制,因而,接下来重点研究二次射流的几何参数及流动参数对主流偏转角度的影响。

本文所研究的二次射流的几何参数主要包括,二次射流的深度(l)以及二次射流与主流的体积比 $s=s_j:s_{\text{main}}$,几何参数的定义如图 6,所研究的二次射流的流动参数主要是流速。

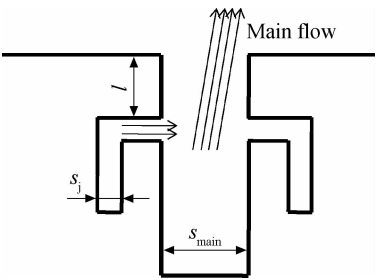


图 6 几何参数定义

Fig. 6 Definition of geometrical parameters

3.1 不同深度的影响

本文研究了二次射流位于不同深度时对主流偏转角度的影响,二次射流的深度定义如图 6。图 7 给出了不同二次射流深度条件下,主流偏转

角度的变化,可以看出,主流偏转角度随着二次射流深度的增大呈现出单调递减的趋势。

图 8 给出了二次射流位于不同深度时的速度矢量图以及压强云图,可以看出,随着二次射流深度增加,由于壁面的存在,主流偏转受到壁面的阻碍作用,且深度越大,阻碍作用越强,因而主流偏转角度减小。另外,从图 8 中还可以看出,随着二次射流深度的增加,主流背部出现负压区,负压区的存在本身也会对主流偏转起到阻碍作用。

图 9 给出了不同二次射流深度下出口截面(二维时为一条线)的压强分布曲线,可以看出随着深度的增加,负压区所占的比重逐渐增加。负压区比重越大,负压对主流偏转的抑制作用越强,因而,主流偏转角度越小。

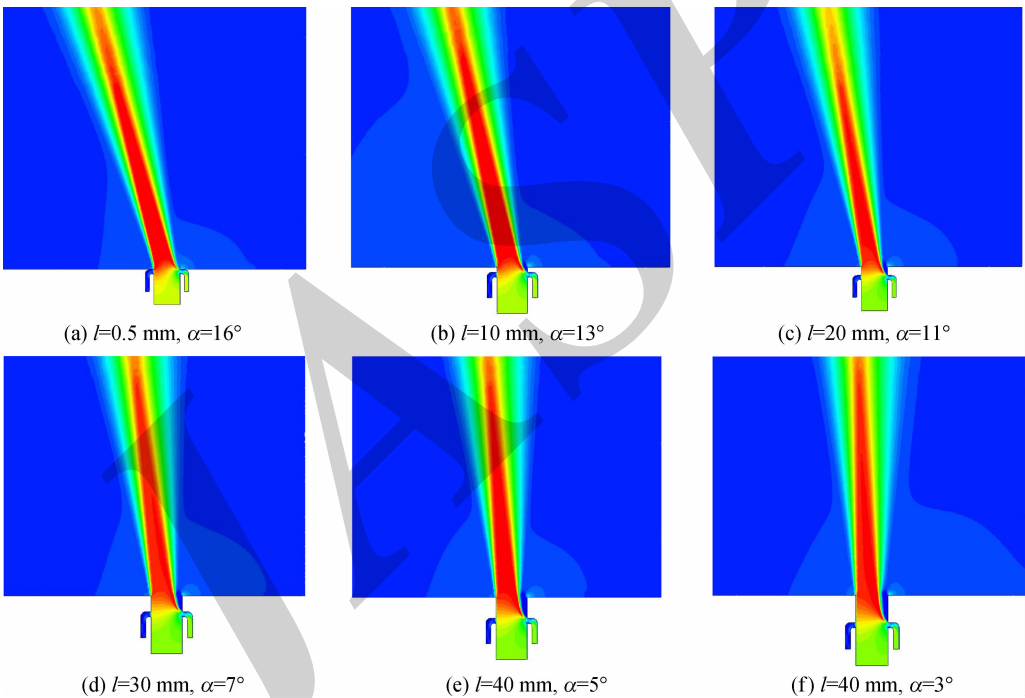


图 7 不同位置时主流偏转角度

Fig. 7 Deflection angle under different depths

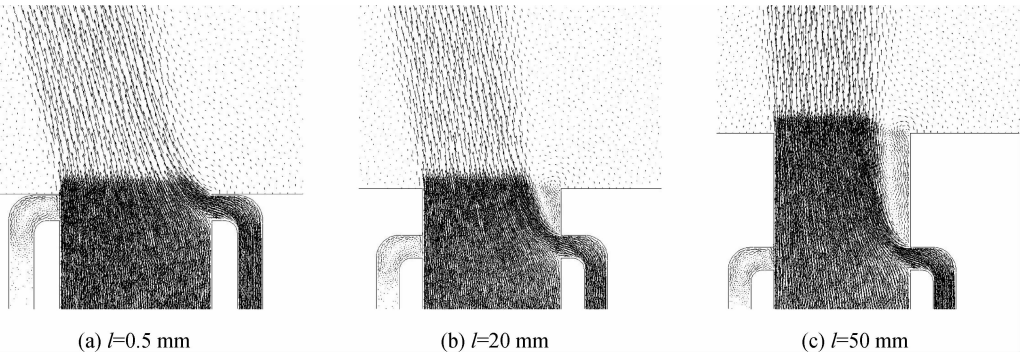


图 8 不同深度时的速度矢量图及压强云图

Fig. 8 Velocity and pressure contour under different depths

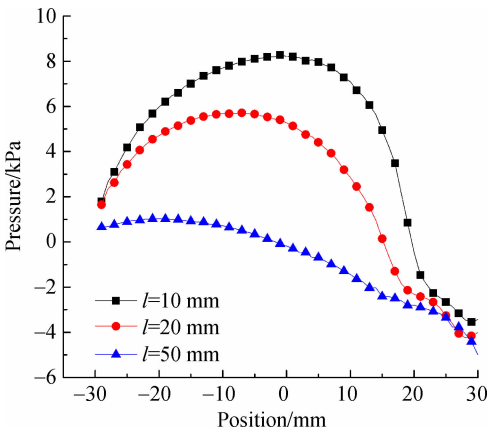


图 9 主流出口位置横向压强分布
Fig. 9 Velocity distribution at the nozzle

3.2 不同体积比的影响

为了研究二次射流对主流偏转作用的强弱,本文分析了二次射流与主流体积比对主流偏转角度的影响,本文所研究的体积比从 1 : 2 至 1 : 14 变化。不同算例中,除了体积比变化外,其他条件完全相同。

图 10 给出了不同体积比条件下主流偏转角度变化,可以看出,随着体积比的减小,主流偏转角度逐渐增加,最后稳定在 13°。

图 11 给出了 3 种不同体积比条件下的流场速度矢量图,从图中可以看出,当体积比较大时,流体偏转受到壁面的阻碍作用,因而,此时主流偏转角度较小。

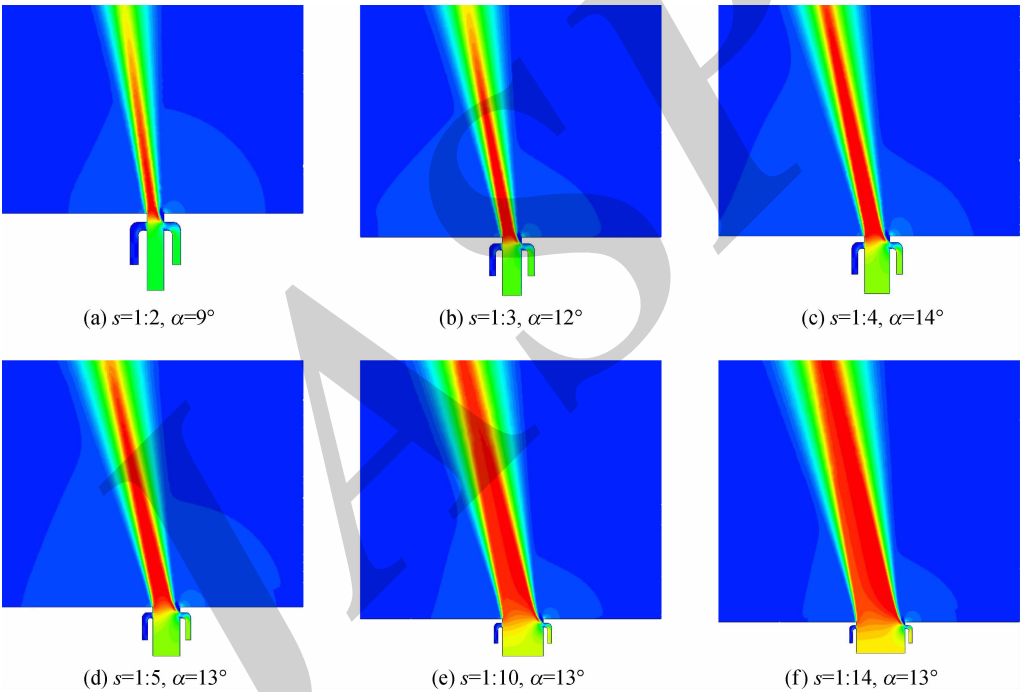


图 10 不同体积比时主流偏转角度
Fig. 10 Deflection angle under different volume ratio

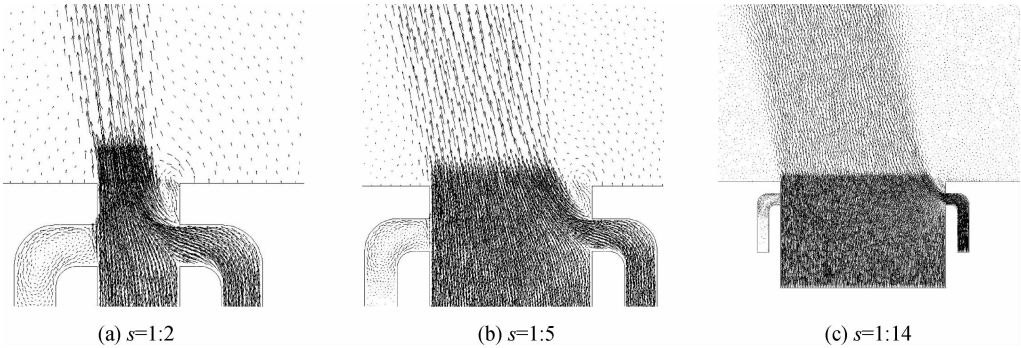


图 11 不同体积比时的速度矢量图
Fig. 11 Velocity vector under different volume ratio

另外,从图 12 给出的出口压强分布曲线可以看出,当体积比较大时,低压区在整个出口长度上所占的比例较大,低压区对主流的偏转起阻碍作用,因而当体积比较大时,主流的偏转角度较小。随着体积比的减小,低压区所占的比例减小,对主

流偏转的阻碍作用有所减弱,因而主流偏转角度开始增加。

由于不同体积比条件下,二次射流与主流的速度比相同,因此二次射流所诱导出的横向速度场相同,这样,在壁面阻挡作用和负压区可以忽略的条件下,不同体积比所最终达到的主流偏转角度相同。

3.3 不同速度比的影响

本文提出的基于二次射流的推力矢量技术,可以通过控制二次射流的速度实现主流偏转角度的控制,因此,本文接下来研究二次射流与主流速度比对主流偏转角度的影响。主流速度(v_a)固定为 5 m/s,二次射流的速度(v_m)分别设定为 5,10,15 m/s。图 13 给出了不同速度比($v=v_a/v_m$)条件下的主流偏转,可以看出,随着速度比的增加,主流的偏转角度增大。从速度矢量图中可以看出,随着二次射流速度的增加,二次射流对主流的推挤作用明显增强,这种推挤作用正是主流发生

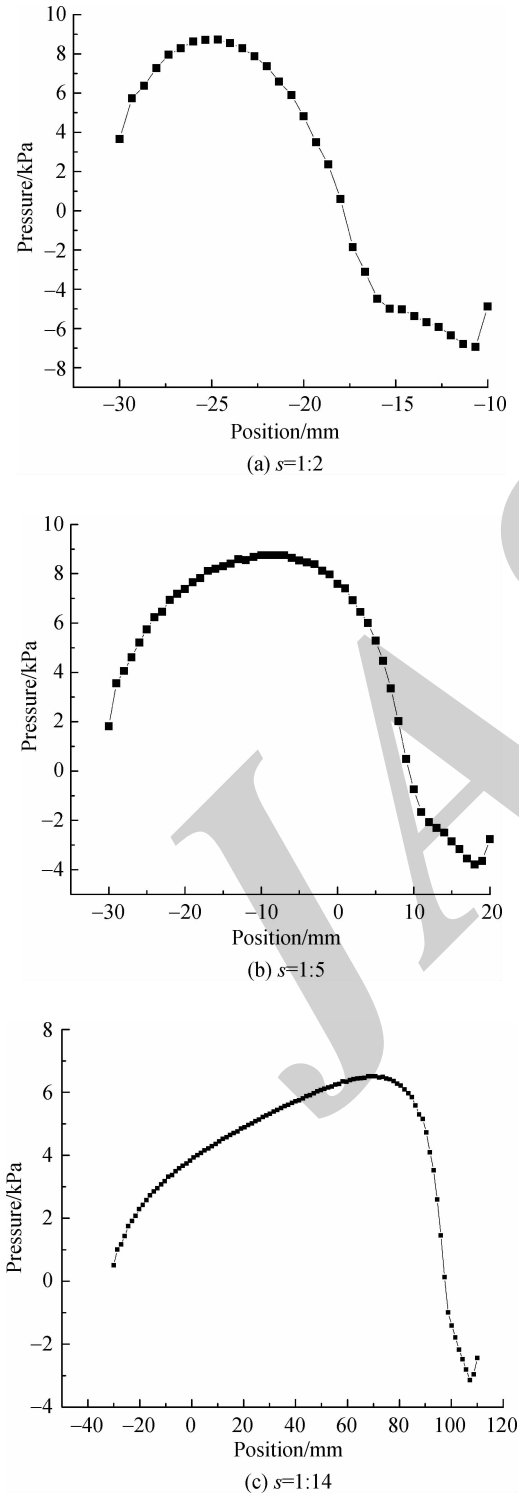


图 12 不同体积比时出口横向压强分布
Fig. 12 Velocity distribution at the nozzle under different volume ratio

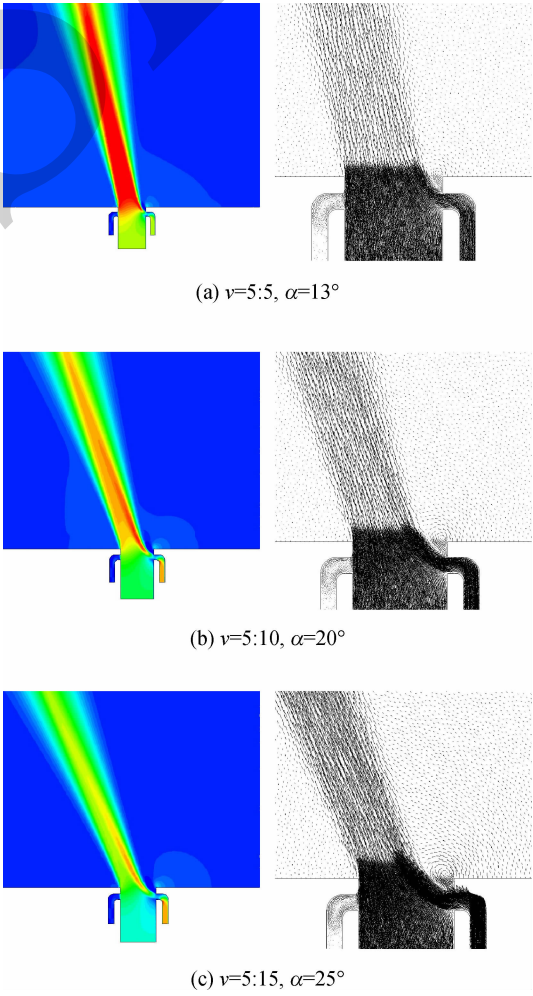


图 13 不同速度比时的主流偏转
Fig. 13 Deflection angle under different velocity retio

偏转的内在原因。

另外,本文还分析了在速度比相同的条件下,二次射流/主流不同速度值对偏转角度的影响。在该分析中,主流与二次射流速度比设定为 1,速度大小分别取 2,5,8,12 m/s。从图 14 给出的速度矢量图中可以看出,当速度比一定时,速度数值的大小对偏转角度没有影响。

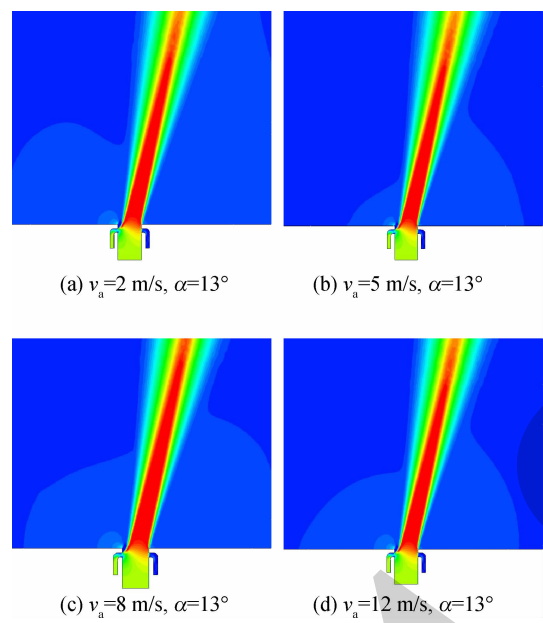


图 14 同一速度比、不同主流速度时偏转角度
Fig. 14 Deflection angle under the same velocity ratio while different velocity magnitude

4 水下矢量推进器

根据前文的计算结果,本文设计了一种矢量推进器,其外形如图 15,主喷管为圆柱形,在主喷管的周围均匀布置了 6 个二次射流喷管,二次射流速度方向沿主喷管的径向,与主射流速度方向垂直。

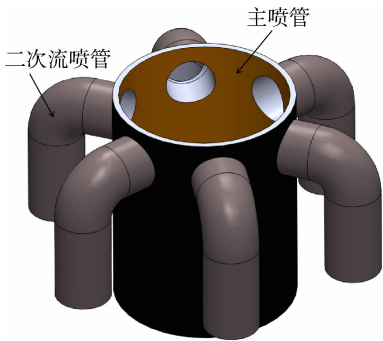


图 15 水下矢量推进器概念设计
Fig. 15 Underwater thrust vectoring propulsor

对该矢量推进器进行了数值计算,分析了作动二次射流数目(N)对主流偏转角度的影响,计算中,主流与二次射流的速度均设定为 5 m/s,作动的多个二次射流在空间位置上满足连续相邻。从图 16 可以看出,随着作动二次射流数目的增加,主流偏转角度呈现先增加后减小的趋势,当作动二次射流数目为 2 或 3 时,主流偏转角度达最大,最大偏转角度为 17°。

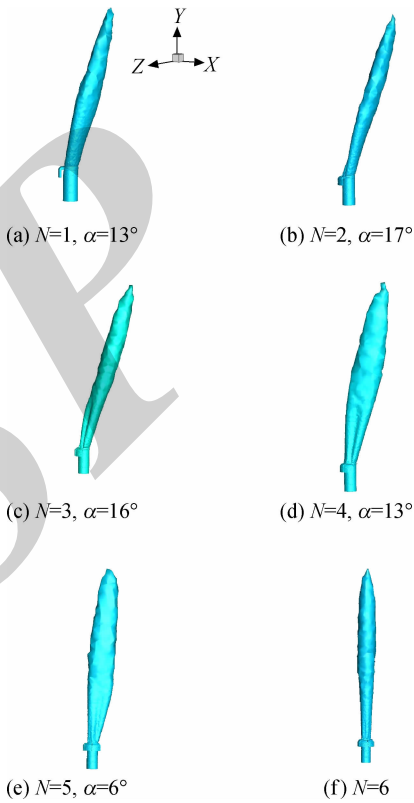


图 16 不同数目的二次射流作用时主流的偏转
Fig. 16 Deflection angle under different number of activated second jet

二次射流的喷管直径为主流的 1/5,当只有一个二次射流作用时,与主射流相比,二次射流的动量很小,因而二次射流对主流的推挤作用有限,引起的主流偏转角度较小。随着作动二次射流数目的增加,二次射流的动量增强,对主流的推挤作用增强,使得主流偏转角度增加。

当同时作动的二次射流数目超过 3 个时,第 4 个射流与另外 3 个处于主射流中剖面的不同侧,此时,二次射流的作用会相互削弱,因而主流偏转角度减小。当全部二次射流同时作用时,推进系统完全对称,此时各二次射流的作用相互抵消,主射流不偏转。

通过上述分析可知,为了达到最大的主流偏

转效果,应使3个相邻的二次射流同时作用。此时,主流向中间二次射流所在的方位偏转。由于本文设计的二次射流呈 60° 间隔均匀布置,因而主流可以在整个空间以 60° 间隔连续偏转。由于推力矢量偏角与流速偏角大致相当,因而,推力也可以在整个空间以 60° 间隔进行偏转,可以提供水下机器人所需要的俯仰力矩及偏航力矩,满足机器人不同机动运动的需要。此时,该推进器可以同时取代传统水下机器人的推进器及操纵舵,因而整个机器人所受到的流体阻力会大大减小。

目前常用的喷水推进器通过液压系统驱动位于喷口处的戽斗,实现主流的偏转,液压传动系统重量较大,且需要设计复杂的轴系,结构复杂。且由于轴系传动的限制,主流只能在水平面内偏转(左右方向),即只能提供机器人偏航力矩。本文提出的推力矢量方法无需液压系统及传动轴系,因而重量和结构复杂性大大降低。且不受传动的限制,二次射流装置可以根据需要在空间灵活布置,可以实现推力在整个空间范围的偏转,同时提供偏航力矩及俯仰力矩,大大提升水下机器人的机动性。

5 结论及下一步工作

本文提出了一种新的推力矢量方法,该方法采用横向二次射流实现主流的偏转,通过本文的分析可知:

1) 本文建立的推力偏角与流速偏角的数学模型,显示,当主射流体积远大于二次射流时,推力矢量偏角和流速矢量偏角大致相同,因而,通过流速偏转可以实现推力矢量。

2) 二次射流的深度对主流偏转有较大影响,为了取得最大的偏转效果,应使二次射流的出口位置尽量接近主射流的喷口。

3) 主流与二次射流的速度比决定主流偏转角度大小,在速度比一定的条件下,速度本身数值的大小对主流偏转没有影响。

4) 当主流与二次射流的体积比大于某一值时,体积比对偏转角度不再有影响。

5) 对于圆形主射流,要取得最大的偏转效果,应使得主射流中剖面一侧的二次射流同时作用,而主射流的偏转方向可以通过不同的二次射流组合进行控制。

6) 本文下一步的工作重点是对提出的推力矢量方法进行实验验证,并最终将其应用于水下机器人。

参考文献:

- [1] 蒋新松,封锡盛,王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2000.
- [2] 吴宝山,潘子英,陈纪军,等. 潜艇组合翼舵的水动力非线性特性研究[J]. 船舶力学,2008,12(1):54-58.
WU Baoshan, PAN Ziyang, CHEN Jijun, et al. Investigation on nonlinear characteristics of normal force on stern-plane of submarine by CFD simulation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(1): 54-58. (in Chinese)
- [3] 郭春雨,杨晨俊,马宁. 襟翼舵的敞水及桨后水动力性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(11):108-111.
GUO Chunyu, YANG Chenjun, MA Ning. Research of the hydrodynamic performance of flap rudder on open water and behind propeller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(11): 108-111. (in Chinese)
- [4] 高富东,潘存云,杨政,等. 多矢量推进水下航行器6自由度非线性建模与分析[J]. 机械工程学报,2011,47(5):93-100.
GAO Fudong, PAN Cunyun, YANG Zheng, et al. Nonlinear mathematics modeling and analysis of the vectored thruster autonomous underwater vehicle in 6-DOF motions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 93-100. (in Chinese)
- [5] YOERGER D R, BRADLEY A M, WALDEN B B, et al. Surveying a subsea lava flow using the autonomous benthic explorer (ABE)[J]. International Journal of Systems Science, 1998, 29(10): 1031-1044.
- [6] WANG H H, ROCK S M, LEE M J, et al. OTTER: the design and development of an intelligent underwater robot [J]. Autonomous Robots, 1996, 3(2): 297-320.
- [7] YUH J. Design and control of autonomous underwater robots: a survey[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(1): 7-24.
- [8] 魏东杰. 水下机器人并联式矢量推进器设计与研究[D]. 天津:天津大学,2013.
WEI Dongjie. Design and research of the underwater robot vectored thruster with parallel mechanism [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [9] NAWROT M T. Conceptual design of a thrust-vectoring tailcone for underwater robotics[R]. Boston, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [10] CAVALLO E, MICHELINI R C, FILARETOV V F, et al. Conceptual design of an AUV equipped with a three degrees of freedom vectored thruster[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2004, 39(4): 365-391.
- [11] BA Xin, LUO Xiaohui, SHI Zhaojun, et al. A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2013, 74(3): 133-140.
- [12] 肖中云,顾蕴松,江雄,等. 一种基于引射效应的流体推力矢量新技术[J]. 航空学报,2012,33(11):1966-1974.
XIAO Zhongyun, GU Yunsong, JIANG Xiong, et al. A new fluidic thrust vectoring technique based on ejecting

mixing effects[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(11):1966-1974. (in Chinese)

[13] 邓雄,夏智勋,罗振兵,等. 合成双射流矢量特性影响因素分析[J]. *推进技术*, 2014, 35(8):1131-1138.

DENG Xiong, XIA Zhixun, LUO Zhenbing, et al. Analysis of impact factors on vectoring characteristic of dual synthetic jet actuator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(8):1131-1138. (in Chinese)

[14] 曹永飞,顾蕴松,程克明. 基于被动二次流的射流偏转比例控制[J]. *航空学报*, 2015, 36(3):757-763.

CAO Yongfei, GU Yunsong, CHENG Keming. Proportional control of jet deflection with passive secondary flow[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3):757-763. (in Chinese)

[15] 吴雄,张为华. 固体火箭发动机二次喷射控制矢量喷管流场仿真[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(2):22-25.

WU Xiong, ZHANG Weihua. Simulation of the flowfield in secondary injection vector control nozzle for solid rocket motor[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(2):22-25. (in Chinese)

[16] 陈著,单勇,沈锡钢,等. 射流控制反推力装置流场数值研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(9):1181-1187.

CHEN Zhu, SHAN Yong, SHEN Xigang, et al. Numerical study on thrust reverser controlled with secondary flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(9):1181-1187. (in Chinese)

(编辑:叶 青)