

基于回转体型艇身的电磁流体表面推进与矢量控制特性研究*

刘宗凯¹⁾²⁾ 顾金良^{1)†} 周本谋¹⁾ 纪延亮¹⁾ 黄亚冬¹⁾ 徐驰¹⁾

1)(南京理工大学瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

2)(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

(2013年10月30日收到; 2013年11月19日收到修改稿)

电磁流体表面推进是在推进体周围的导电流体中(海水、等离子体等)激励出电磁体积力, 并利用电磁体积力的反作用力达到推进的目的. 本文基于电磁场和流体力学的基本控制方程, 通过电磁场有限元方法探讨了电磁流体表面推进在回转体型艇身上的矢量控制效果, 并分析了在两种不同的电磁力作用区域下航行器周围的场强的分布特征以及受力情况. 结果表明: 这种控制方式可以在不改变航行器攻角和推力方向的情况下通过调控电磁力的作用范围来实现航行器姿态调整, 进而达到矢量推进与控制的目的; 在航行器表面施加控制方式A的电磁力可以使航行器获得一个抬头力矩, 而在控制方式B作用下航行器可以同时俯仰力矩和偏航力矩进行调整. 因此作为一种新兴的推进方式, 电磁流体推进不仅具有高速高效、操作简单、高有效载荷等特点, 而且矢量推进也成为电磁流体表面推进另外一个优势.

关键词: 表面推进, 回转体艇身, 航行器, 矢量控制

PACS: 47.65.-d, 47.10.ad, 47.85.L-

DOI: 10.7498/aps.63.074704

1 引言

浸入在海水中的航行器由于受到气涡、边界层扰动以及吃水深度等因素的制约, 作为目前水下运动体最主要的推进方式——螺旋桨推进逐渐成为制约该领域发展的主要瓶颈之一^[1]. 近年来, 人们为了提高螺旋桨推进的性能或者探索可替代螺旋桨的新型推进方式做了大量的研究工作, 并取得了一定的进展^[2,3]. 为了提高航行器在水面与水中运行的速度, 并降低其运行噪声, 人们发明了电磁流体推进. 电磁流体推进的基本原理为: 浸入弱导电流体(海水、等离子体等)中的物体, 由于其周围诱导磁场和电场比较微弱, 必须施加外加电场和磁场才能使其在近壁面激发出一种沿法向迅速衰减, 且能直接反映体积分布特征的电磁体积力(electromagnetic body forces 或 Lorentz forces(洛伦兹力);

少数文献也之称为“电磁彻体力”). 据电磁学弗莱明左手定律, 即导电流体在相互垂直的电场和磁场中受到电磁力的作用, 其反作用冲量可以推动受控体前进, 同时也具有边界层调控和减小阻力的特点^[4]. 由于其推进效率与磁场强弱密切相关, 20世纪80年代以来随着超导技术的发展, 磁流体推进系统的实用化才成为可能. 作为一种新兴的推进方式, 电磁流体推进具有高速高效、操作简单、高有效载荷、高生存能力和高隐蔽性等特点. 电磁流体表面推进是将航行器的外表面作为推进器的工作面, 这种推进方式具有结构简单、表面适应能力强的特点^[5].

随着现代科技的不断发展, 飞行器具有飞行高度高、速度快、机动性能强等特点, 同样对于拦截导弹和变轨航行器的控制精度和机动性能的要求也越来越高. 常规航行器转向或变轨所需的力主要通过改变迎角及侧滑角来实现, 由于飞行器转动与平

* 南京理工大学科研发展基金(批准号: XKF09058)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(批准号: CXZZ11_0231)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: kfiukai@126.com

移运动耦合较为剧烈,因此这也使得其变轨能力大大降低了.除此之外,这种间接力矩的操作会产生一定的时间滞后,特别是在外界介质层相对稀薄的区域,不能很好的满足高机动性能航行器的需要.直接力、流体动力复合控制就是直接对航行器施加力的作用并与流动控制相结合,从而达到消除力与力矩之间的耦合,消除或者减少了轨迹运动和姿态运动之间的耦合,进而达到了缩短响应时间的目的.复合力控制具有以下几个优势:复合力控制可以辅助气动力控制或者替代气动力控制,因此可以减少甚至消除传统飞行器控制的气动力部件,如水平和垂直尾翼.进而可以减少受控体质量,甚至可以减少雷达反射面,提高隐身能力;促进飞行器机动性的提高,缩短起降距离 [6,7].

随着前人对矢量控制研究的不断深入 [8], 矢量控制已不断成熟并应用于航行器姿态控制、位置保持和探空探测等领域 [9,10]. 人们通过安置在运载器质心附近的几组侧向喷射发动机来实现对其运动姿态(俯仰力矩、偏航力矩和滚转力矩)的实时调控 [11]. 针对飞行器由外太空返回大气层时高空大气比较稀薄的现实, Doman 等 [12] 在 2007 年应用 Lyapunovo 理论开发了航行器姿态的线性控制方法, 通过控制喷管脉冲来实现飞行器复合力控制. 此外 Ridgely 等 [13] 也数值模拟并分析了利用尾翼气动力和喷管直接力对飞行器的复合控制, 他推导了复合力控制下弹体 6DOF(自由度)的线性和非线性控制方程, 并着重分析了力与力矩之间的关系, 基于此通过反馈控制方法: 预测弹体力矩, 并通过反馈回来的参数对力矩进行修正, 从而实现对弹体姿态的调控. 2009 年 琚春光 等 [14] 通过在发动机气流喷射口处添加气流控制调节板的方式来调控气流推进方向实现对控制体的矢量推进控制. 他主要分析了在尾部气流调节板的控制下侧向力和轴向力随 NPR(燃烧室压力/外部环境压力)的变化情况. Chen 等 [15] 研究了通过电磁力来调控圆柱绕流周围流场, 达到消除涡街脱体抑制圆柱振动的作用. 王敏等 [16] 从推力矢量配置的角度分析了不同方式的侧向力矢量配置对航天器控制能力提高和结构优化的作用. 类似于上述方法, 电磁流体表面推进的另外一个控制优势就是矢量推进, 这种控制方式在航行器高速运动或者周围介质层较为稀薄的条件下具有明显的滞后性 [17,18]. 表面推进就可以在不安装外部机械调姿部件的条件下, 通过调节电磁力的加力区域和作用强度便可以实现航行器姿态的实时调整. 这种作用方式的机理是: 通过施

加在航行器艇身某一区域的电磁力对周围流体产生力的作用, 同时利用流体力和电磁力所产生的复合力共同实现对航行器姿态的调控. 本文主要分析了在两种不同作用区域和强度的电磁力作用方式下, 由电磁力和流体动力所产生的复合力对航行器矢量控制特性的影响.

2 基本模型与数值方法

2.1 基本模型

图 1 为航行器回转体型艇身的结构示意图. 航行器前缘位于坐标原点, 航行器艇身轴线与 x 轴正半轴重合, 来流沿 x 轴向正方向流动. 整个艇身长 L , 其中半圆形头部的半径 $R = 0.06L$, 圆柱形艇身长 $L_0 = 0.69L$, 尾部圆锥体长 $L_1 = 0.25L$. 推进器(电极推进单元 [5]) 包裹在航行器艇身处, 如图 1 所示.

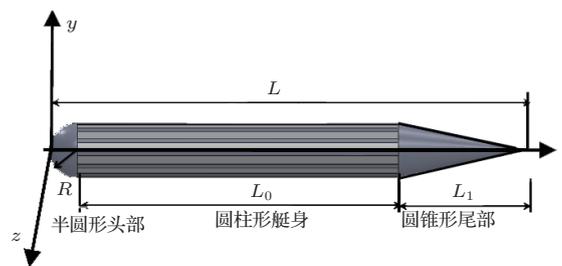


图 1 航行器艇身示意图

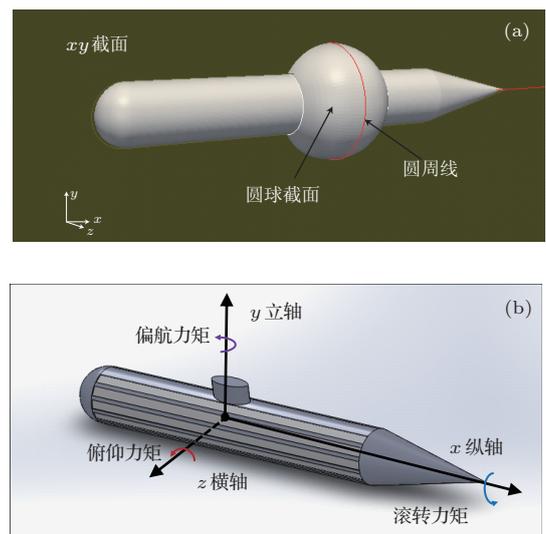


图 2 航行器 (a) 参考面标示图; (b) 力矩示意图

为了在下文中更好的分析, 这里定义了一些曲面和曲线, 如图 2(a) 所示. 圆球形截面, 其圆心位

于 $(L/2, 0, 0)$ 处, 圆球半径为 r ; 圆周线, 圆心位于 $(L/2, 0, 0)$ 处半径为 r 的圆周; xy 截面: 过原点垂直于 z 轴的截面; 艇身周线: 艇身外表面与 xy 平面的交线.

图 2(b) 为带控制塔的航行器回转体艇身力矩示意图, 控制塔的引入是为了更好的反映回转体的姿态特征. 力矩示意图中坐标原点位于航行器的重心. 如图所示 x 轴贯穿于航行器艇身的中轴线, 方向沿流向向后; y 轴垂直于零攻角时航行器艇身所放置的水平面, 方向向上; z 轴垂直于 x 轴和 y 轴所在的平面. 流场中的航行器艇身, 其力矩可以分解为三个部分: 绕纵轴 x 方向的移动称为滚转力矩;

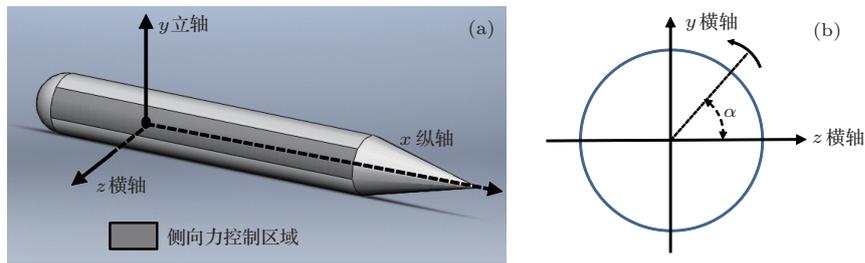


图 3 侧向电磁力控制示意图

绕立轴 y 方向的移动称为偏航力矩; 绕横轴 z 方向的移动称为俯仰力矩.

图 3 为矢量推进控制时航行器艇身电磁力作用范围示意图. 图 3(a) 中艇身周围的灰色区域为施加侧向力的区域, 这个区域可以随控制需求进行相应的调整. 图 3(b) 为航行器正视图, 其中 α ($0^\circ \ll \alpha \ll 360^\circ$) 为表面电磁力作用范围与 z 轴正半轴的夹角. 左图中灰色的加力区域对应于 $120^\circ \ll \alpha \ll 180^\circ$. 电磁流体表面矢量推进就是通过改变电磁力作用强度和区域范围来对航行器的各个方向力矩进行调整, 从而在不改变攻角和推进方向的基础上对航行器的姿态进行调整.

本文讨论了两种矢量推进控制的情况 A 与 B, 控制方式 A 是指加力区域关于正 y 轴对称正负 30° ($60^\circ \ll \alpha \ll 120^\circ$) 角区域; 控制方式 B 是指电磁力作用范围为 $270^\circ \ll \alpha \ll 360^\circ$, 即 z 轴正半轴和 y 轴负半轴所夹区域. 所研究的两种无量纲电磁力作用参数分别为 $N = 122$ 和 144 .

2.2 基本的控制方程与数值方法

对流场的数值模拟是基于基本的流动控制方程 [19] 来进行的:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho f_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \nabla^2 u_i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

数值模拟时长度通过艇身长 L 无量纲化, 时间通过弦长除以来流速度进行无量纲化. 即

$$x_i = \frac{x_i^*}{L}, u_i = \frac{u_i^*}{L}, p = \frac{2(p - p_0^*)}{\rho U_\infty^2}, t = \frac{t^* U_\infty}{L},$$

$$i = 1, 2, 3,$$

$$x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z;$$

$$u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w.$$

对变量进行无量纲化, * 表示有量纲量, p_0^* 为标准大气压, u, v, w 表示沿 x, y 和 z 方向的速度, U_∞

为来流速度. 其中 $f_i = N e^{-(\pi/a)d} e^*$ 为电磁力源项, 这里的电磁力仅仅沿壁面法线方向 e^* 衰减, $N = \frac{\pi J_0 B_0 c}{4 \rho U_\infty^2}$ 为无量纲电磁力作用参数, 表示电磁力强度与惯性力的比值; J_0 和 B_0 分别表示推进器表面最大电流密度和磁感应强度; a 为电磁力衰减常数, 这里 a 为航行器总长 L 的 $1/10$, d 为到航行器壁面的无量纲距离 [20].

首先将求解区域离散, 离散是通过将求解区域划分成许多小单元体, 本文是通过四面体单元进行离散的. 然后再给这些单元体编号, 并用一组整数给四面体所有结点编号. 同时使用 $4 \times M$ 数组储存这些单元体以及结点的信息, 以 $n(i, e)$, $i = 1, 2, 3, 4; e = 1, 2, 3, \dots, M$ 来表示, 其中 M 表示总共划分出小单元体的个数. 接下来建立相应的矩阵数组用来储存单元体与单元之间的位置关系以及单元结点之间的位置关系等, 此处不再一一列出. 然后求出相应的速度压力插值函数, 由于压力产生的动量传递是一阶的, 因此对压力的插值采用线性插值, 而有应变率导致的黏性流体传递是二阶的, 因此对速度插值采用二次逼近函数法. 求解时将速度和压力近似解(插值函数)代入无量纲流体控制方程及 $N-S$ 方程和连续方程, 再将方程写成矩阵形式联立方程并求解 [21,22].

3 场强分析

数值模拟在参数分别为: 无量纲来流速度 $U_\infty = 5$, 弦长雷诺数 $Re = 10^5$, 电磁力的作用区间为 $t = 2-4$ 的条件下进行. 对场强分布的讨论选择在 $t = 3.8$, 即电磁力稳定作用时刻. 图4为圆球截面处流向速度场分布图. 由图可以看出, 对于控制方式A来说, $N = 100$ 和144的情况速度较高的红色区域 ($u > 6$), 关于 y 轴对称并在正负约 30° 的范围内分布, 由于流向电磁力的作用壁面流体被加速, 流向速度提高, 在控制区域内边界层被削薄但依旧有较薄的边界层存在; 对比两幅图可以看当

$N = 100$ 时红色高速区域的范围较 $N = 144$ 时的小, 这是由于电磁力较弱, 给控制区域内部的流体注入动能较少, 流体流向速度增加的幅值也相对较小的缘故.

图5为以半径 $r = 1.5R$ 的圆周线上 u 分布曲线 (航行器中心位置 $x = 0.5L$ 为圆心, 半径 r , 如图2(a)). 由图5可以看出, 在未加力的区域, 流向速度等于远场速度5. 在电磁力作用区域里 $60^\circ \ll \alpha \ll 120^\circ$ 速度分别提高到6.07($N = 100$)和6.23($N = 144$); 在 $55^\circ \ll \alpha \ll 60^\circ$ 以及 $120^\circ \ll \alpha \ll 125^\circ$ 范围内速度 u 逐渐由远场速度5分别提高到5.5($N = 100$)和6($N = 144$).

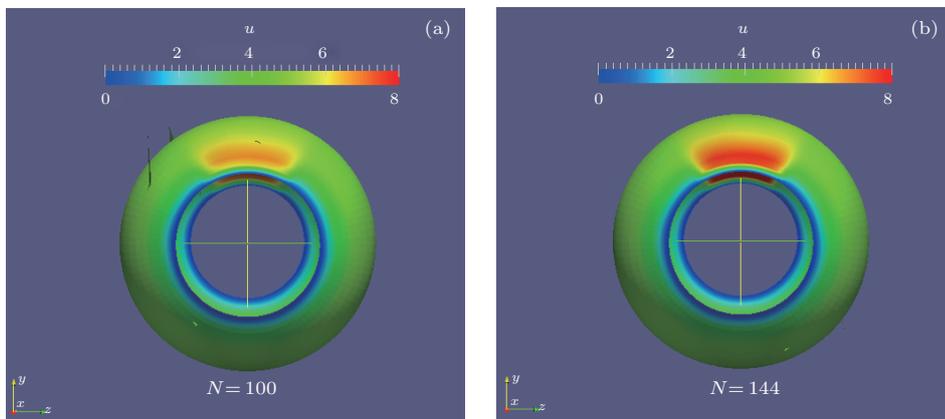


图4 (网刊彩色) 圆球截面上流向速度 u 的分布 ($t = 3.8$, 控制方式A)

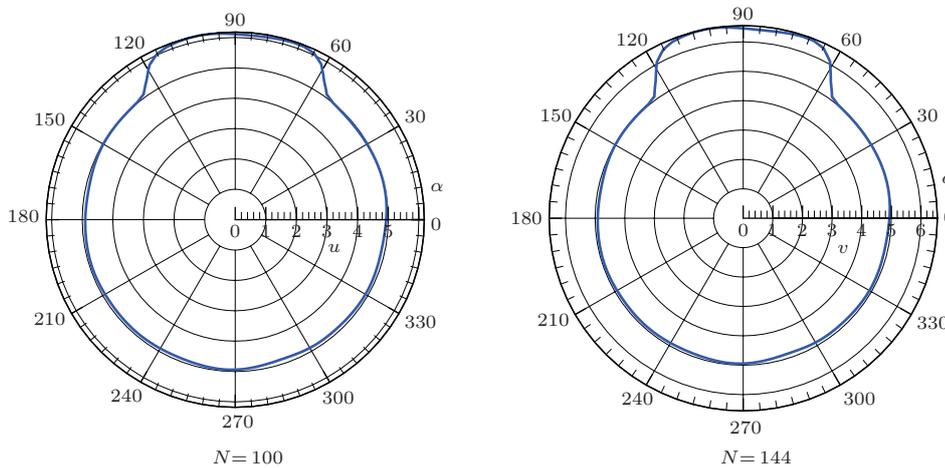


图5 半径 $1.5R$ 的圆周线上流向速度 u 的分布曲线 ($t = 3.8$, 控制方式A)

图6为圆球截面处流向速度场分布图. 由图可以看出, 对于控制方式B. 对于 $N = 100$ 和144的情况速度较高的红色区域 ($u > 6$)位于 z 正半轴和 y 负半轴之间 90° 的范围内, 对比两幅图可以看出 $N = 100$ 时红色高速区域的范围较 $N = 144$ 时候的小, 速度的最大值大约为8左右较来流速度5有

所提高.

图7为以半径 $r = 1.5R$ 的圆周线上 u 分布曲线. 图中高速区域依旧分布在 $270^\circ-360^\circ$ 之间速度大约为6.2($N = 100$), 6.4($N = 144$). 同时加力区域作用比较集中, 对未加力区域流场的扰动仅仅在 5° 范围内.

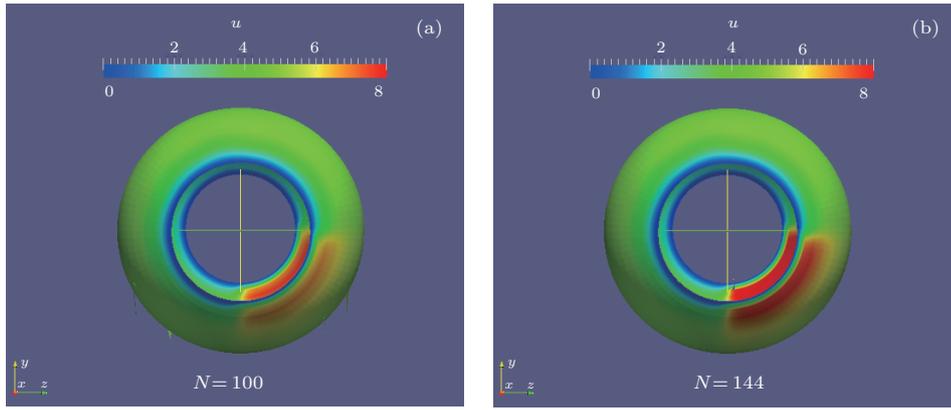


图6 (网刊彩色) 圆球截面上流向速度 u 的分布 ($t = 3.8$, 控制方式 B)

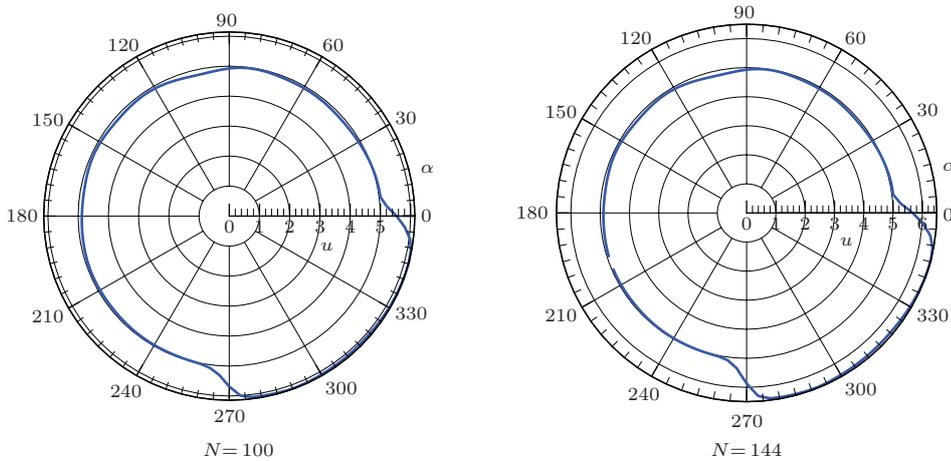


图7 半径 $1.5R$ 的圆周上流向速度 u 的分布曲线 ($t = 3.8$, 控制方式 B)

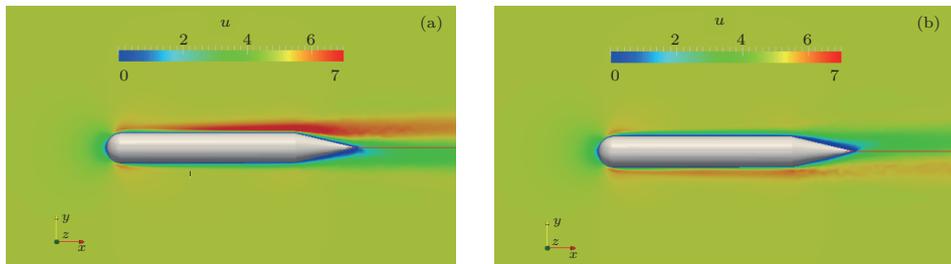


图8 (网刊彩色) xy 截面处流向速度 u 的分布 ($t = 3.8, N = 100$) (a) 控制方式 A; (b) 控制方式 B

图8为 xy 截面处, 电磁力稳定作用时 $t = 3.8$ 流向速度场分布. 图8(a)和(b)分别为控制方式A和控制方式B. 由图8(a)可以看出由于控制方式A的加力范围位于 $60^\circ - 120^\circ$, xy 截面通过加力区域的因此在飞行器上表面有红色高速区域出现. 如图8(b)所示, 此时电磁力作用范围 $270^\circ - 360^\circ$, 高速区域位于飞行器的下方, 同时由于 xy 截面位于这种加力方式下电磁力作用区域的边缘, 因此飞行器下表面受到未加力区域流体的影响比较显著, 流向速度较图8(a)控制区域中心慢, 因此较控制方

式A中的红色高速区域速度小.

图9为飞行器艇身周线处(外表面与 xy 截面交线)压力分布, $t = 3.8, N = 144$. 由图可以看出在飞行器施加控制方式A的侧向电磁力以后, 其前缘半圆型头部的上表面 ($y > 0$) 压力减少较多, 头部上表面压力最小约为5较下表面最小-8高3, 随着流体绕过飞行器头部流体的压力逐渐升高, 相对于未有电磁力作用的下表面, 上表面的压力回升的较快, 因此负压力区覆盖范围小, 这主要是由于电磁力对前端绕流流体分离的抑制作用所引起的. 随之

在航行器艇身的圆柱体部分压力基本趋于一致, 但有微小的差异, 上表面 $y > 0$ 的压力略微高于下表面 $y < 0$ 约 0.1. 航行器尾缘附近上表面的压力由于流体流速的增加压力迅速减小到 -8.2 , 而下表面压力减少微弱大约在 -1.5 左右, 绕过尾缘区域进入尾部区域时上下表面的压力趋于一致, 这是由于电磁力施加以后流体后涌尾缘处形成压力空穴的原因.

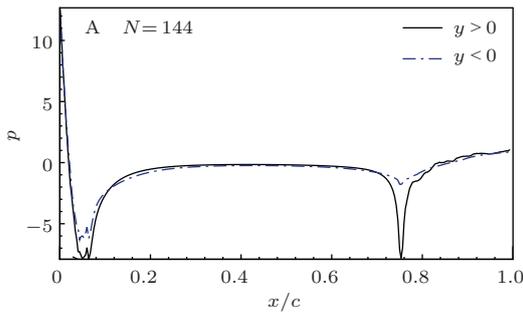


图9 航行器艇身周线处压力曲线 ($t = 3.8$, 控制方式 A)

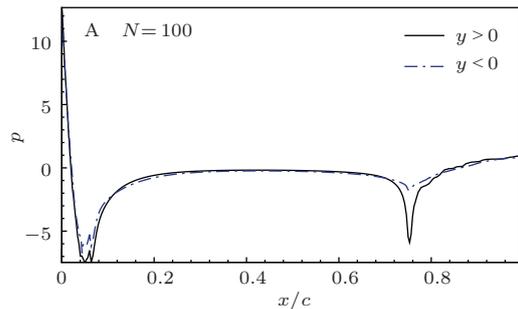


图10 航行器艇身艇身周线处压力曲线 ($t = 3.8$, 控制方式 A)

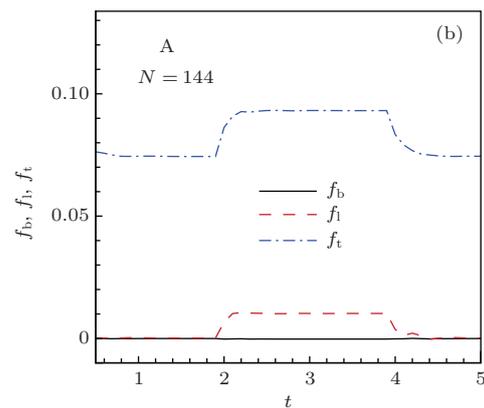
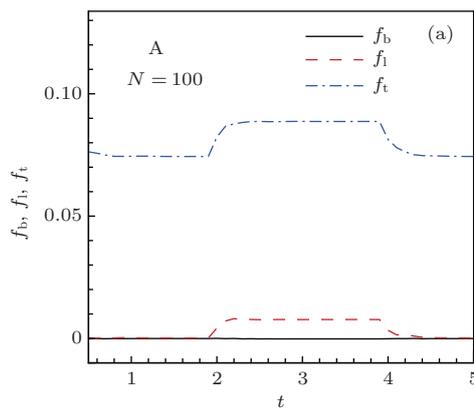


图11 流体力随时间的变化曲线 (控制方式 A)

由图 11 (b) 来看当更大强度的电磁力作用以后航行器艇身所受到的 x 方向的阻力较之前的有所增大, 大约稳定在 $f_t = 0.092$. 而对于这两种情况

图 10 为航行器艇身周线处压力分布曲线, $t = 3.8$, $N = 100$. 如图所示当电磁力作用以后航行器艇身前后缘压力也产生了一定的差异, 对比图 9 可以看出当电磁力较弱的时候, 前缘上表面压力基本一致, 当 $N = 100$ 较 $N = 144$ 尾缘处的压力有所提升, 因此更强的电磁力会产生更大的升力; 电磁力越大也会引起航行器艇身上表面后部压力越小, 航行器会产生一个低头力矩 (力矩有一个微小的增加). 同时对于上下表面的压力积分来说, 上表面压力较下表面减少, 航行器艇身也受到一个升力.

4 受力分析

接下来对不同强度和不同矢量控制方式下, 航行器艇身的受力情况进行了着重分析. 其中 f_t , f_l , f_b 分别表示流体力所产生的压差力和黏性力在 x , y , z 方向的合力 (对于 f_t 即 $f_t = f_{prx} + f_{shx}$); f_{lorx} , f_{lozy} , f_{lorz} 分别表示电磁力沿 x , y , z 方向的分力; m_x , m_y , m_z 分别为流体动力在三个方向上的力矩系数; m_{fx} , m_{fy} , m_{fz} 分别为电磁力在三个方向上的力矩系数; 力矩系数是通过力矩除以动压、回转体表面积以及回转体弦长三者的乘积得到的. 电磁力作用的时间范围为 $2 \ll t < 4$.

图 11 为流体力在三个方向的分量随时间的变化曲线. 由图 11 (a) 所示, 在未加力时刻 f_t 为 0.075, 当作用强度 $N = 100$ 的流向电磁力开始作用以后 f_t 逐渐升高到 0.088, 而后随着电磁力的撤销逐渐回落.

未加力时候 f_l 始终为零, 当不同强度电磁力作用以后 f_l 有略微的升高分别达到大约 0.008 和 0.011. f_l 的升高是由于电磁力施加区域为 $60^\circ \ll \alpha \ll 120^\circ$

即航行器的上侧(正 y 轴), 当电磁力作用以后这个区域的流向速度增大, 压力减小(在上壁面前后缘处压力减少的最为显著, 但是在圆柱体艇身壁面略有提高, 这是由于电磁力对绕流分离的抑制作用造成的, 如图 9 所示, 但是对于这个艇身来说压力减少起到主导作用) 这样就引起航行器艇身出现了沿 y 正方向的压差力进而造成了 f_1 的升高. 电磁力越大前后缘位置处的流速越大压力越小, 压差力就相应的增加, 因此图 11 (a) 中 $f_1 \approx 0.009$, 而图 11 (b) 中 $f_1 \approx 0.011$ 但增加并不显著.

图 12 为流体动力引起的各个方向力矩随时间的变化曲线. 由图 12 (a) 可以看出由于此时航行器零攻角因此未加力时 m_x, m_y, m_z 均为零, 当使用控制方式 A 的电磁力作用以后背风面流体的流速增加, 在此区域的壁面所受到的 x 正向的摩擦力增加, 因此就产生了一个 z 负向的力矩, 力矩系数 $m_z \approx -0.00017$. 在加力初期俯仰力矩系数 m_z 出现了一个较大负值, 随后又逐渐回升趋于稳定; 当力刚撤销时又出现一个正的峰值, 这主要是由于加力初期在电磁力作用下流体向下游移动, 同时也会

在背风面电磁力作用区域形成一个较高的压力区域, 并随着高速流体后移. 这个压力较高区域的出现和消失对航行器艇身力矩的影响是非常显著的, 加力初期这个压力较高的区域沿着航行器的上表面由上游向下游传递, 而电磁力撤销以后传递方向正好相反, 因此会造成 m_z 在加力初期和撤力初期一负一正的波动. 图 12 (b) 为在作用参数 $N = 144$ 的电磁力作用稳定时刻 $m_z \approx -0.00015$, 此时虽然电磁力强度增加但是 m_z 却略有增大, 这主要是由于更强的电磁力作用以后航行器前后缘的压力差的改变所引起, 并在一定程度上抵消了 x 方向黏性力所引起的 m_z 的减小, 但这种差别很小往往可以忽略.

图 13 为电磁力沿 x 正方向的强度. 由图可以看出对于 A 控制方式 x 方向的电磁力分别约为 0.13 和 0.24, 此时电磁力作用范围为 60° , 因此电磁力强度是整个圆柱形艇身加力强度的 $1/6$, 相对于流体动力来说流向电磁力的作用效果起到主导作用, 同时电磁力作用较为稳定, 不会产生波动.

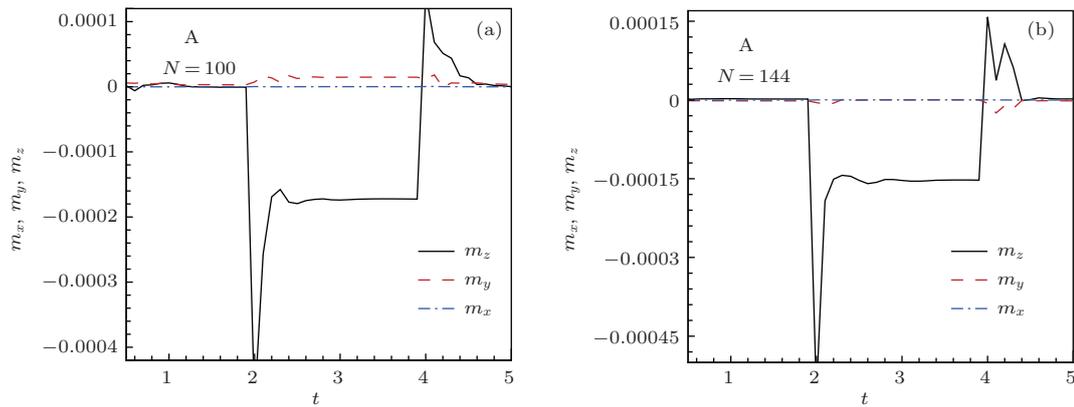


图 12 流体产生的力矩系数随时间的变化曲线 (控制方式 A)

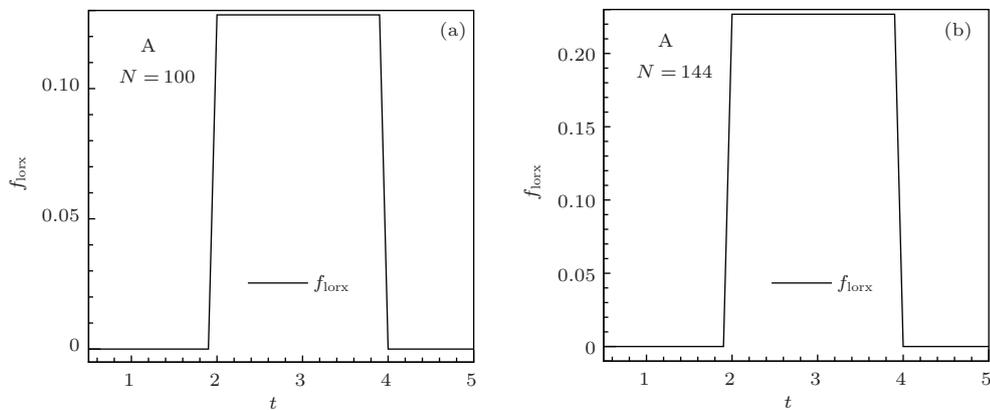


图 13 电磁力随时间的变化曲线 (控制方式 A)

图 14 为不同强度的电磁力作用以后, 电磁力所产生的三个方向的力矩系数. 由于控制方式 A 加力是关于 y 轴对称的, 因此电磁力的合力仅仅产生了沿 z 负方向的俯仰力矩的变化, 大约为 -0.0056 . 此时电磁力忽略了电磁场与流场之间的耦合作用, 因此在整个加力区域为定值, m_{tz} 也保持不变. 当 $N = 144$ 时, $m_{tz} = -0.00824$. 相比较流体力所产生的力矩来说电磁力直接产生的力矩在合力矩中起到主导的作用.

图 15 为航行器艇身所受到的各个方向的流体力随时间的变化曲线. 对比图 15 (a) 和 (b) 可以看出在施加侧向电磁力(控制方式 B)前后 f_t , f_l , f_b 具有一致的分布. 当电磁力未作用的时候 f_t 大约为 0.075, 随着电磁力的施加 f_t 分别增加到

0.096 和 0.105, 电磁力强度越大其周围流场流速越大, 航行器艇身受到的阻力也就越大. 对于 f_l 即沿 y 方向的力, 由图可以看出未加力时 f_l 为零, 当施加电磁力后 f_l 分别达到 $-0.008(N = 100)$ 和 $-0.01(N = 144)$, 这种变化主要是由于控制方式 B 的加力区域位于航行器的下表面 (y 负半轴区域), 加力以后这个区域的流体流速增加压力减小 (与控制方式 A 情况类似), 所以航行器艇身下方压力小于上方, 进而 y 方向的升力为负值. 同样对于 f_b 也出现了一个大的增加, 但由于 B 控制方式加力区域位于 z 正轴方向, 加力以后这个区域压力也减小, 因此出现一个正的 f_b , 且 f_b 分别达到约为 $0.0077(N = 100)$ 和 $0.089(N = 144)$.

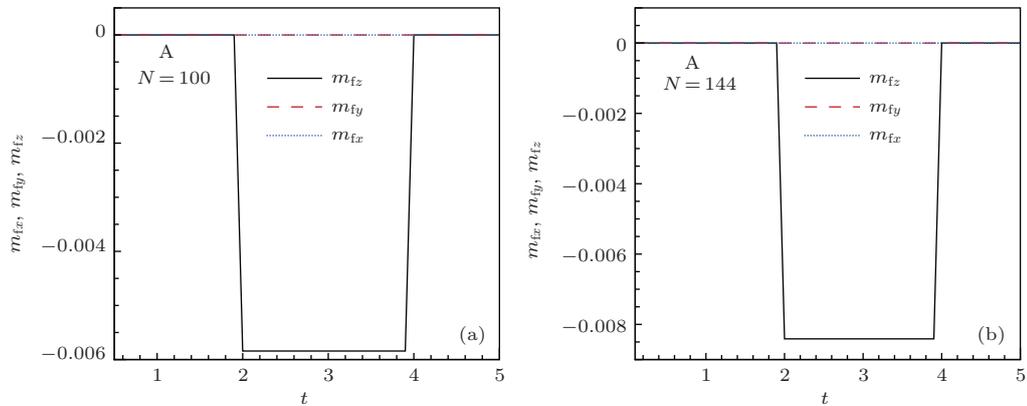


图 14 电磁力产生的力矩随时间的变化曲线 (控制方式 A)

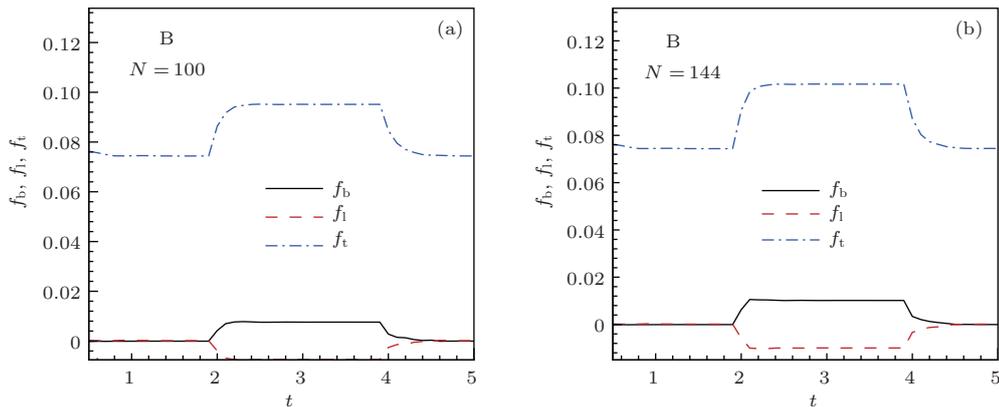


图 15 流体力随时间的变化曲线 (控制方式 B)

图 16 为三个方向的流体动力引起的力矩随时间的变化曲线. 由图可以看出当电磁力(控制方式 B)作用以后航行器艇身的俯仰力矩系数 m_z 和偏航力矩系数 m_y 都发生了变化, 而滚转力矩始终为零. 对于 $N = 100$ 的情况, 在加力初期 m_z 和 m_y 都

产生了一个较大的阶跃到达约 0.00045, 随后又降低到了 0.00014 附近, 控制方式 B 的加力区域也具有一定的对称性因此稳定作用以后 m_z 和 m_y 的大小基本一致. 对于 $N = 144$ 的情况, 在加力初期 m_z 和 m_y 的峰值达到 0.0005 较 $N = 100$ 略微增大, 但

是稳定时刻 m_z 和 m_y 大约在 0.0003 较之前有所降低, 引起这种情况的原因和控制方式 A 的情况类似是由于前后缘压力差所引起的. 当电磁力撤销以后它们又降低为 0.

图 17 为 x 方向的电磁力随时间变化曲线. 当电磁力作用以后 f_{lorx} 也有一定的提高分别达到 $f_{\text{lorx}} = 0.19$ 和 0.28 . 由于此时的电磁力仅有流向的, 因此其他几个方向为零. 同时由于此时电磁力作用在 90° 的范围内, 相对于控制方式 A 的 60° 范

围电磁力的强度有所增加, 因此控制方式 B 的电磁力合力是控制方式 A 的 1.5 倍.

图 18 为电磁力所产生的力矩随时间的变化曲线. 由图可以看出, 电磁力所产生的俯仰力矩以及偏航力矩 m_{fz} 和 m_{fy} 的大小完全一样, 分别达到 0.0058 和 0.0085. 相对于流体动力产生的力矩来说电磁力所产生的力矩大约是它们的 40—50 倍, 因此电磁力对力矩的改变作用是最主要的.

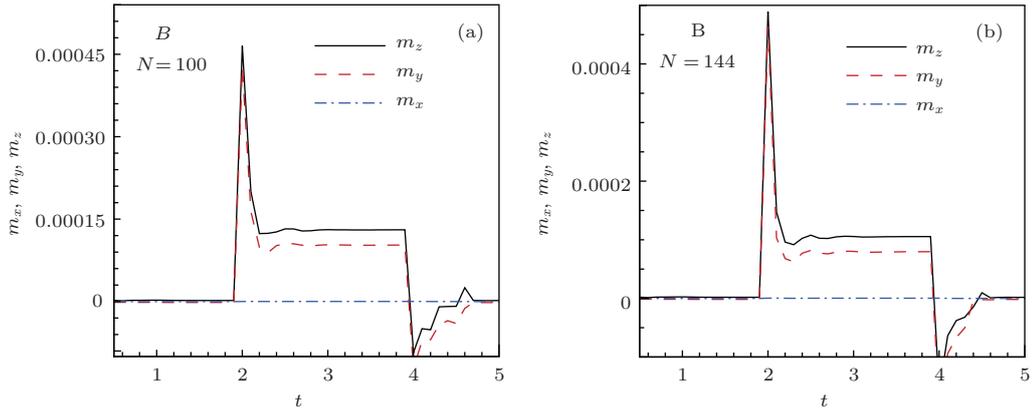


图 16 流体产生的力矩随时间的变化曲线 (控制方式 B)

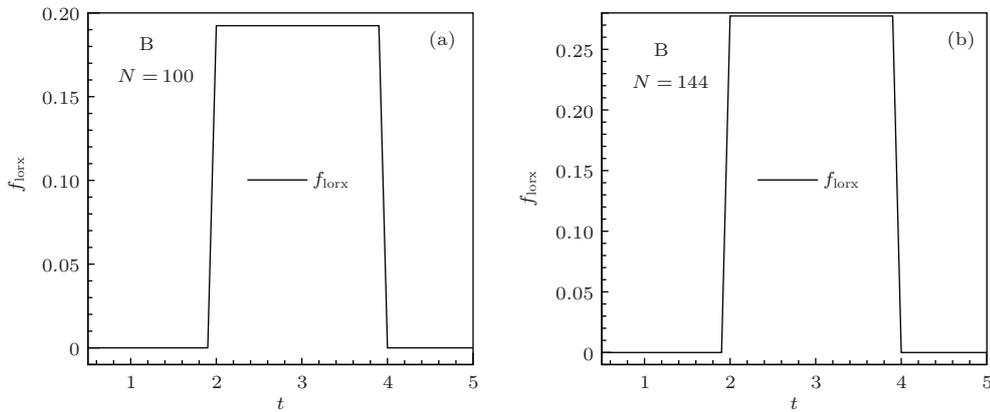


图 17 电磁力随时间的变化曲线 (控制方式 B)

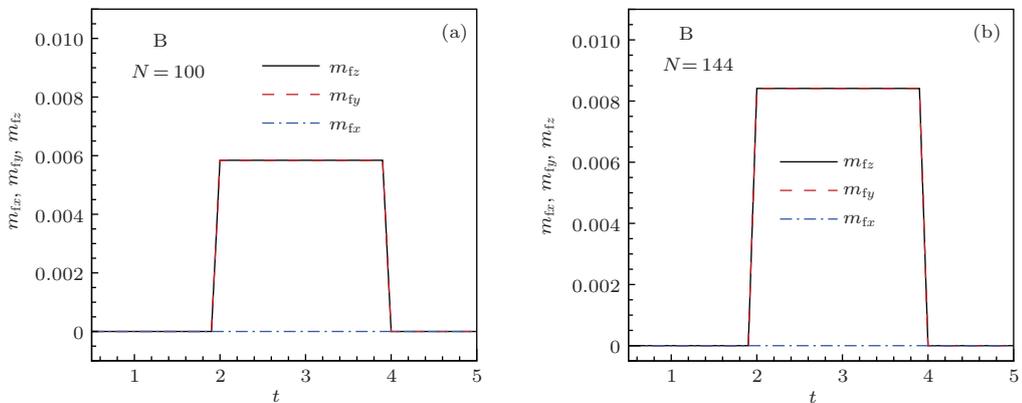


图 18 电磁力产生的力矩随时间的变化曲线 (控制方式 B)

5 结 论

本文基于航行器回转体型的艇身通过有限元方法,对电磁流体表面推进中矢量推进特性进行了分析,主要结论如下: 1) 由于表面推进方式的特殊性,因此这种控制方式可以在不改变航行器攻角和推力方向的情况下通过调控电磁力的作用范围来实现航行器姿态调控,进而达到矢量推进与控制的目的. 2) 在航行器表面施加控制方式A的电磁力可以使航行器获得一个抬头力矩;而在控制方式B作用下航行器可以同时俯仰力矩和偏航力矩进行调整. 3) 相对于流体动力产生的力矩来说电磁力所产生的力矩大约是它们的40—50倍,因此电磁力对力矩的改变作用是最主要的.

参考文献

- [1] Hsiao C T, Pauley L L 1999 *J Fluid Eng.* **121** 3
- [2] Wu G L, Yan J 2008 *Guang Dong Shipbuilding* **4** 2 (in Chinese) [吴光林, 严谨 2008 广东造船 **4** 2]
- [3] Gur O, Rosen A 2009 *J. Aircraft* **46** 1
- [4] Mei D J, Fan B C, Huang L P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6786 (in Chinese) [梅栋杰, 范宝春, 黄乐萍 2010 物理学报 **59** 6786]
- [5] Liu Z K, Zhou B M, Liu H X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084701 (in Chinese) [刘宗凯, 周本谋, 刘会星 2011 物理学报 **60** 084701]
- [6] Mason M S, Crowther W J 2004 2nd AIAA Flow Control Conference (Portland: American Institute of Aeronautics and Astronautics) p2210
- [7] Kowal H J 2003 *Can. Aeronaut. Space J.* **48** 2
- [8] Howse M 2003 *Power Eng.* **17** 35
- [9] Landau D, Chase J, Randolph T 2011 *J. Spacecraft Rockets*, **48** 467
- [10] Martinez-Sanchez M, Pollard J E 1998 *J. Propul. Power* **14** 688
- [11] Schroeder W K 1999 *Fuzzy logic autopilot synthesis for a nonlinearly behaved thruster-controlled missile* (Arlington: University of Texas at Arlington) pp46—128
- [12] Doman D B, Gamble B J, Ngo A D 2007 *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit* (Hilton Head: American Institute of Aeronautics and Astronautics) p6778
- [13] Ridgely D B, Drake D, Triplett L 2007 *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit* (Hilton Head: American Institute of Aeronautics and Astronautics) p6771
- [14] Ju C G, Peng X B, Liu Y 2009 *Sci. China Technol. Sc.* **39** 505 (in Chinese) [据春光, 彭小波, 刘宇 2009 中国科学 E 辑: 技术科学 **39** 505]
- [15] Chen Z H, Fan B C, Aubry N 2006 *Chinese Phys. Lett.* **23** 154
- [16] Wang M, Xie Y C 2010 *Sci. China Technol. Sc.* **40** 912 (in Chinese) [王敏, 解永春 2010 中国科学 E 辑: 技术科学 **40** 912]
- [17] Hua M D, Hamel T, Morin P 2009 *IEEE T. Automat. Contr.* **54** 1837
- [18] Xia Y, Fu M 2003 *Overview of Flight Vehicle Control-Compound Control Methodology for Flight Vehicles* (Berlin: Springer Berlin Heidelberg) pp49—54
- [19] Ren Y X, Chen H X 2006 *The Basics of Computational Fluid Dynamics* (Beijing: Tsinghua University Press) pp13—34 (in Chinese) [任玉新, 陈海昕 2006 计算流体力学基础 (北京: 清华大学出版社) 第13—34页]
- [20] Liu Z K, Zhou B M, Liu H X 2013 *Fluid Dyn. Res.* **45** 3
- [21] Jiang C B, Zhang R L, Ding Z P 2007 *Computational Fluid Dynamics* (Beijing: China Electric Power Press) pp161—169 (in Chinese) [江春波, 张永良, 丁则平 2007 计算流体力学 (北京: 中国电力出版社) 第161—169页]
- [22] Joel H F, Milovan P 2002 *Computational Methods for Fluid Dynamics* (Berlin: Springer-Verlag) pp164—206

Investigation of electromagnetic hydrodynamics propulsion and vector control by surfaces based on a rotational navigation body*

Liu Zong-Kai¹⁾²⁾ Gu Jin-Liang^{1)†} Zhou Ben-Mou¹⁾ Ji Yan-Liang¹⁾
Huang Ya-Dong¹⁾ Xu Chi¹⁾

1) (*Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

2) (*Automation College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 30 October 2013; revised manuscript received 19 November 2013)

Abstract

Realization of electromagnetic hydrodynamics (MHD) propulsion by surfaces needs an electromagnetic body force generated in a conductive fluid (such as seawater and plasma, etc.) around the navigation body. Furthermore, the reaction force against the electromagnetic body force could be used to propel. Based on the basic control equations of electromagnetic field and fluid mechanics, the vector control effect has been analyzed by virtue of field intensity and force distribution characteristic on the rotational navigation body, under two different force action areas. Results show that the navigation attitude adjustment could be realized by this control method without changing attacks and propulsion directions. An upward force moment could be achieved by the control model A. Accordingly, both of the pitching moment and yaw moment could be changed by the control model B. Thus, as a new way of propulsion, the MHD propulsion by surfaces offers several advantages, such as high speed, high efficiency, easy operation, high payload etc. Additionally, in this paper, the vector propulsion has been proved to be one of the remarkable advantages for MHD propulsion by surface.

Keywords: propulsion by surface, rotational navigation body, navigation, vector control

PACS: 47.65.-d, 47.10.ad, 47.85.L-

DOI: 10.7498/aps.63.074704

* Project supported by the Scientific Research Development Foundation of Nanjing University of Science and Technology, China (Grant No. XKF 09058), and the Jiangsu Province Ordinary University Graduate Student Research Innovation Project, China (CXZZ11_0231).

† Corresponding author. E-mail: kfliukai@126.com