

# 双翼振动的预处理数值方法和性能研究 (二)

王涛<sup>1</sup>、刘鹏飞<sup>2</sup>、杨国伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>康迪斯创科技股份有限公司, 北京, 100080

<sup>2</sup>加拿大科学院海洋技术研究所, 加拿大纽芬兰, 120932

<sup>3</sup>中国科学院力学研究所, 北京, 100080

**文 摘:** 本文利用非定常双时间 NS 方程的预处理方法对摆翼地效推进器进行了推力和推进性能的分析, 结果显示沉浮振动的推力和效率与速度的变化关系表现出一致性; 固定频率, 改变速度, 发现推力和效率存在极大值点; 随着频率增大, 极大值点右移。最大推力和效率的动力攻角为  $6^{\circ} - 9^{\circ}$ , 利用速度矢量图和压力云图显示了分离涡的输运和扩散, 再一次展示了地效的存在。

**关键词:** NS 方程, 翼形振动, 地效推进技术。

## Preconditioning Numerical Method and Performance Investigation of Plunging Dual-Foils (2)

Tao Wang<sup>1</sup>, Liu Pengfei<sup>2</sup>, Guowei Yang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CDSTR Tec. Co. Ltd., Beijing, 100080

<sup>2</sup> Institute for Ocean Technology, National Research Council Canada, NL, A1B 3T5

<sup>3</sup> Institute of Mechanics, Chinese academy of science, Beijing 100080

**Abstract:** This paper employs the preconditioning method for unsteady dual-time NS equations to evaluate and analyze the performance of symmetrical plunging dual-foils. The result shows that the trend of efficiency and thrust versus speed agreed well with previous experimental measurement. With a fixed frequency and changing speed, the maximum thrust and efficiency was obtained and with the increase of frequency the maximum thrust and efficiency shifted rightward. These dynamic angles of attack corresponding to the maximum points of thrust and efficiency fall in between 6 to 9 degrees. The vector graph and pressure nephogram showed the transportation and diffusion of vortex separation, revealed that the wing-in-ground effect occurred when dual-foils symmetrically plunging, and this resulted in an increase of averaged thrust and efficiency.

**Keywords:** NS equations, plunging foil, ground effect propulsion.

## 引 言

摆尾和扑翼是仿生推进最常见的两种表现形式。因为仿生推进没有螺旋桨产生的复杂涡系干扰及其噪声, 同时又具有良好的机动性能, 较好的安静性和较高的效率, 所以成为人们研究高性能推进技术的一个最原始的思想启蒙。

在水动力学领域, 由于鲸鱼的速度比较快(可以达到每小时 20 节), 所以很早就有人研究摆翼推进的机理<sup>[1,2]</sup>, 但是利用摆翼推进的航行器却非常少见, 原因是因为虽然摆翼推进的效率比较高, 而应用于实际工程上摆尾的尺寸却不能太大(比如, 按照鲸鱼摆尾和身体的比例给航行体做一个摆尾推进器是行不通的), 同时航行器前进时也不允许象鲸鱼一样上下或左右的晃动(因为要保持稳定性)<sup>[3]</sup>, 然而, 对称摆翼地效推进技术由于运动的对称性而

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40576047)。

**作者简介:** 王涛, 男, 山东人, 博士后, 高级工程师, 从事海洋船舶流体力学和空气动力学方面的研究。  
Email: [fluidy888@gmail.com](mailto:fluidy888@gmail.com), 通讯联系人: 刘鹏飞 研究员, Email: [Pengfei.Liu@nrc-cnrc.gc.ca](mailto:Pengfei.Liu@nrc-cnrc.gc.ca)。

克服了这一问题,同时对称摆翼的另一个特长是能够利用两翼之间的干扰产生的地效作用而使推力提高<sup>[4]</sup>,这就是本文研究对称摆翼振动的原因。

然而,对称摆翼在高速流场中(比如  $M>0.3$  时)中的研究表明<sup>[5]</sup>,要能产生大推力和高性能,需要进一步提高振动频率,但是高频振动会给机构带来非常大的危害,要在低频振动时产生所需的推力,需要较低的流场环境。本文利用可压的非定常多块网格隐式耦合求解程序研究低速不可压流场问题,引入了预处理方法,目的在于平衡方程内在的时间尺度,通过改变时间导数,使得用数值方法来求解方程时能更有效、更精确。预处理数值方法的详细推导过程可以参加文献《双翼振动的预处理数值方法和性能研究(一)(非定常双时间 NS 方程的预处理数值方法)》,本文是在上述文献的基础上,对摆翼振动进行数值模拟和性能分析,探索摆翼振动的内在规律<sup>[5]</sup>。

### 1 翼型运动形式

翼型的振动分为沉浮振动(plunge/heave motion)和俯仰摆动(pitch motion)两种运动形式,为了简化运动形式,无论是沉浮的振幅  $h_y$  (plunge/heave amplitudes) 还是摆动的摆角幅度  $\Delta\alpha$ , 都按照正弦或者余弦规律变化。如图 1 和 2 所示:

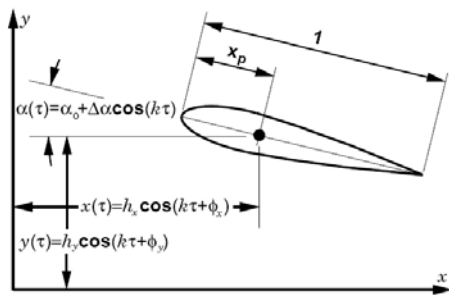


图 1 翼型振动规律描述

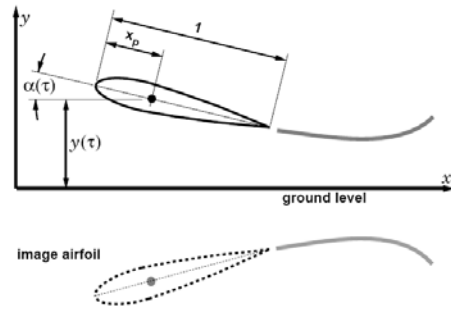


图 2 对称运动的地效应示意图

### 2 翼形布置方式、多块网格与运动参数

摆翼使用的翼型为 NACA0014, 计算的五种布置如图 3 所示。使用 H 型多块网格对计算区域进行离散, 如单摆翼/静止翼和双摆翼/静止翼的布置为例, 它的多块网格如图 4 所示。网格在上游、下游和法向方向扩展为 8-10 个弦长, 壁面第一层网格的厚度大约为弦长的  $10^{-5}$ 。

用代数法首先生成高度正交和光滑的初始网格, 然后, 再用椭圆方法加入边界控制函数进行光滑。再用三维求解系统求解二维问题时, 二维网格被扩展成两层网格, 并使用对称边界条件。

因为摆翼在垂直方向上产生振动, 而静止翼是固定的, 所以需要自适应的动态网格。本文用 TFI 方法进行网格变形。然而, 当摆翼振幅比较大的时候, 为了避免网格扭曲, 在实现 TFI 方法以后, 还需要用椭圆方法对局部网格进一步光滑。

在静止翼壁面使用非滑移边界条件, 摆翼表面流体的壁面速度等于摆翼的速度。摆翼的

运动方程为  $h = \frac{y_0}{2} - h_0 \cos(ft)$ , 其中,  $h_0$  表示平均振幅(弦长的倍数),

$h_0 = 0.4c, y_0 = 1.4c$ ,  $f$  表示摆翼的振动频率。

依此可以给出诱导频率  $k = fc/2V_\infty$ ，摆翼壁面上的密度和压力值由内点外插法得到。在相邻块的内部边界上，两个网格点的流场值要与整个流场相对应。在远场的进口和出口边界上，使用无反射边界条件进行计算。

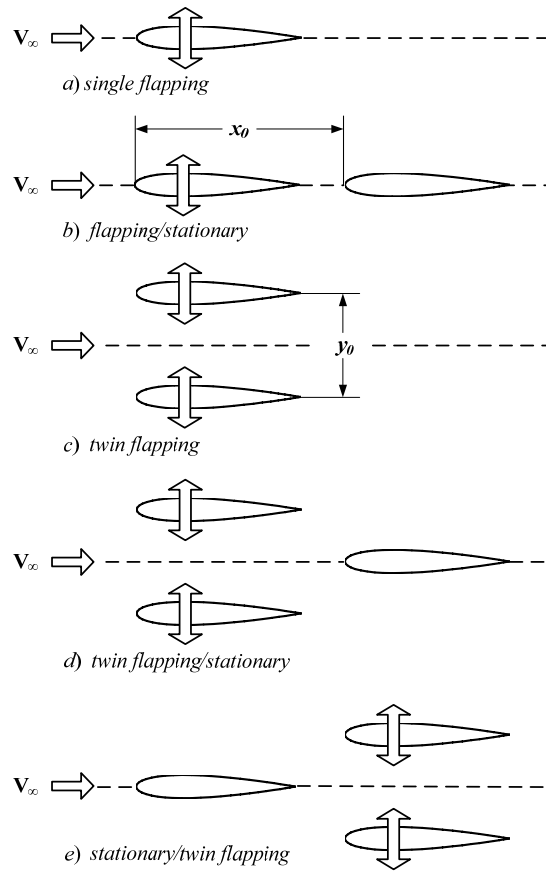
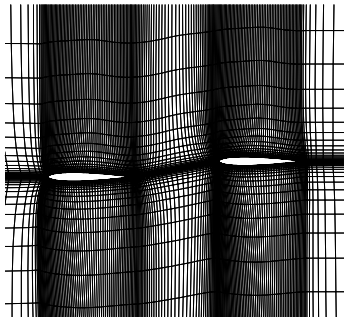
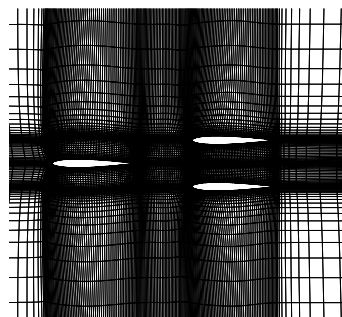


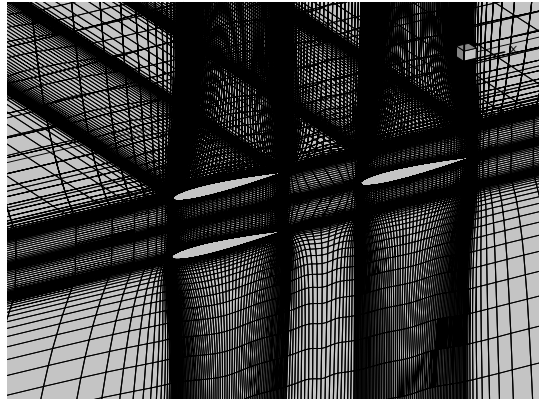
图3 几何布局方式



(a) 摆翼/静止翼布置方式



(b) 静止翼/双摆翼



(c) 双摆翼/静止翼 (3D)

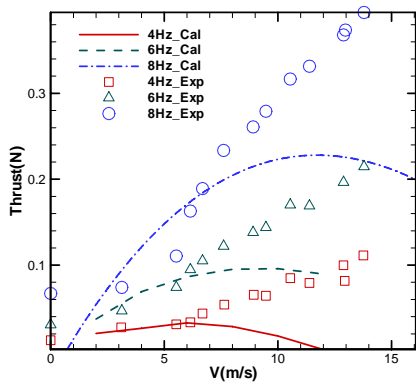
图4 多块网格布置

### 3 结果分析与讨论

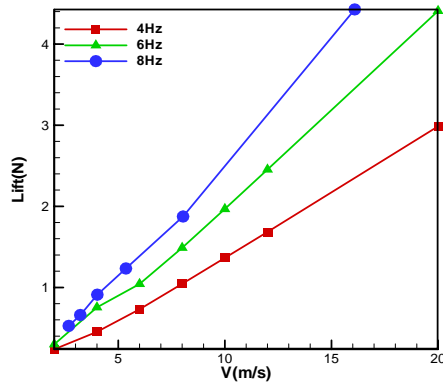
NS 方程预测值比面元法和试验值<sup>[6]</sup>小, 其原因不仅是考虑了粘性阻力, 同时试验过程中翼型在展向的弹性作用, 客观上增大了振动的振幅, 使得试验翼型的展向平均振幅大于计算振幅, 但是计算却没有模拟这种弹性的结果。

计算结果表明, 对摆翼地效推进的推力系数(推力)随着频率的增加而增加, 但是就同一频率而言, 最大的效率点与最大的推力点相对应, 对于最大的推力系数(推力)和推进效率, 存在着最佳的来流速度和诱导频率。对于不同的频率而言, 其最大推力对应的速度是逐渐增加的, 比如, 频率 4, 6, 8Hz 对应的最大推力分别为 0.1, 0.7, 1.6 (N), 其对应的速度点为 6, 9 和 12m/s, 但是从效率图可以看出, 对应最高效率的诱导频率却基本在相同的范围内, 大约在 0.8 至 1.2 之间, 所对应的动力攻角  $\alpha_{dyn}$  大约在 (6-10) 度, 受力分析表明, 来流速度  $U_\infty$ 、振幅  $h_0$  和振动频率  $f$ , 决定着动力攻角  $\alpha_{dyn}$  的变化。动力攻角  $\alpha_{dyn}$  在振动过程中具有两方面的作用: 第一, 它决定着振动翼型的升力有多少比例转化成推力, 因为翼型  $x$  方向的力是由升力和阻力在  $x$  方向分力所组成。第二, 动力攻角  $\alpha_{dyn}$  决定着流场特性的变化, 即分离点的产生和分离涡脱离下泄的过程。鉴于此, 如果能找出不同频率下振动翼型失速的临近参数, 同时确定最佳的动力攻角, 对于合理选择地效推进器的工作范围, 提高推进性能具有一定的理论和工程价值。

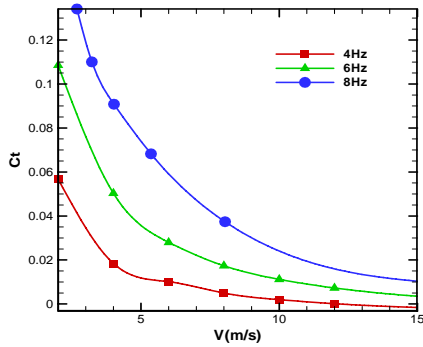
当然, 推进效率的下降也并不是完全由失速和分离所控制, 因为翼型动力攻角太小, 也会导致推力下降, 推进效率低下。



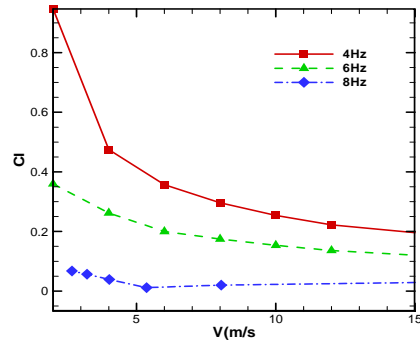
(a) 推力随速度变化



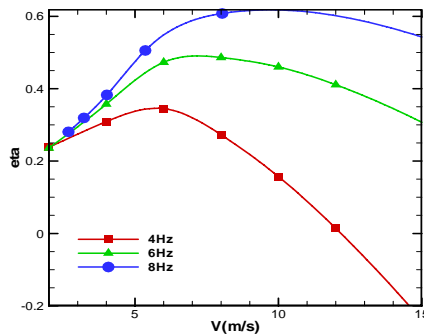
(b) 升力随速度的变化



(c) 推力系数



(d) 升力系数



(e) 效率

图 5 双摆翼地效推进器的推进性能指标随着速度的变化

由图 5 可见, 当频率为 4Hz 时, 最大推力的速度是  $V|_{T_{max}} = 6m/s$ ;  $f = 6Hz$  时, 最大推力的速度是  $V|_{T_{max}} = 9m/s$ ;  $f = 8Hz$  时, 最大推理的速度范围是  $V|_{T_{max}} = 12m/s$ 。由推力曲线可以看出, 当  $\Delta V = |V - V_{T_{max}}| \leq 2m/s$ , 推力不会有大的变化, 说明地效推进器在一定的速度范围内保持高效率平稳运行, 这对于工程问题有重要意义。

表 1、2、3 分别记录了在不同的速度下,  $K, Strouhal, Re, \alpha_{dyn}, \eta, T, L$  的对应关系。并给出了翼型产生分离的情况。由表中可见, 最大推力和最高效率一般发生在没有分离或者轻微分离的状态附近, 其对应的动力攻角为  $6-9^\circ$ 。

$$K = \frac{2\pi fc}{U_\infty}, St = \frac{fh_0}{U_\infty}, Re = \frac{U_\infty \cdot c}{\nu}$$

表 1.  $f=4Hz; c=0.064mm \quad \nu=0.157 \times 10^{-4}$

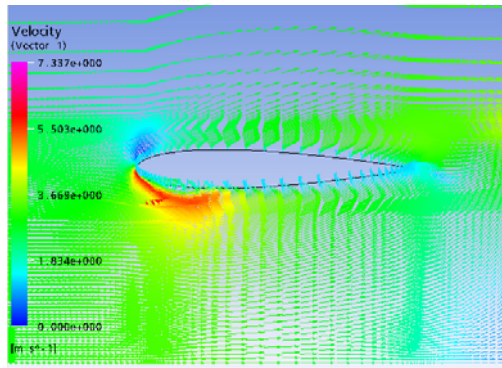
$U_\infty$	2	4	6	8	10	12	20	30
K	0.8042	0.4021	0.2681	0.2011	0.1608	0.1340	0.0804	0.0536
St	0.0512	0.0256	0.0171	0.0128	0.0102	0.0085	0.0051	0.0034
Re ( $\times 10^3$ )	8.15286	16.305	24.458	32.611	40.764	48.917	81.528	122.29
$\alpha_{dynmax}$ (度)	17.8329	9.1377	6.1206	4.5981	3.6813	3.0691	1.8426	1.2286
Fluid state (separation/stall)	重度	轻度	微度	—	—	—	—	—
效率	0.23816	0.30913	0.34501	0.27288	0.15712	0.014095	-0.73617	-1.8611
推力(N)	0.020453	0.026497	0.032791	0.028488	0.017459	0.001636 1	-0.09525 6	-0.2653
升力 (N)	0.23844	0.45213	0.73084	1.0441	1.3632	1.683	2.9852	3.3376

表 2.  $f=6\text{Hz}$ :  $c=0.064\text{mm}$   $\nu=0.157 \times 10^{-4}$

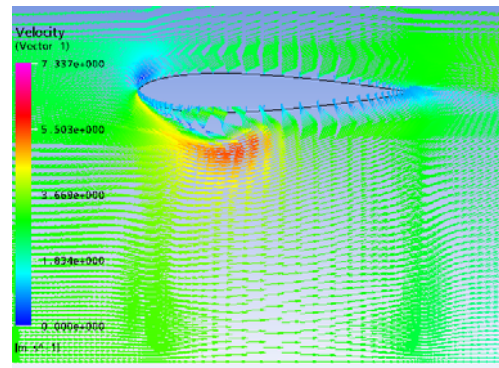
$U_\infty$	2	4	6	8	10	12	20	30
K	1.2064	0.6032	0.4021	0.3016	0.2413	0.2011	0.1206	0.0804
St	0.0768	0.0384	0.0256	0.0192	0.01536	0.0128	0.00768	0.00512
Re ( $\times 10^3$ )	8.15286	16.305	24.458	32.611	40.764	48.917	81.528	122.29
$\alpha_{dyn\text{ma}}$ : (度)	25.7596	13.5647	9.1377 6	6.8788	5.51253	4.5981	2.7627	1.8426
Fluid state (separation/stall)	翼面分离	尾部轻度	尾部微 度	—	—	—	—	—
效率	0.2709	0.4163	0.5439	0.5508	0.5166	0.4587	0.0833	-0.5806
推力(N)	0.0312	0.0571	0.0714	0.0770	0.0763	0.0704	0.0138	-0.0992
升力 (N)	0.2987	0.75455	1.0427	1.4888	1.9675	2.4538	4.4086	5.3765

表 3  $f=8\text{Hz}$ :  $c=0.064\text{mm}$   $\nu=0.157 \times 10^{-4}$

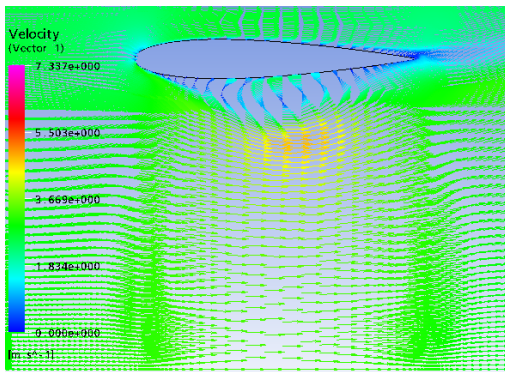
$U_\infty$	2.68	3.22	4.02	5.36	8.04	16.09	32.17
K	1.2004	0.9991	0.8002	0.6602	0.4001	0.1999	0.0100
St	0.0764	0.0636	0.0509	0.0382	0.0255	0.0127	0.0064
Re ( $\times 10^3$ )	10.92	13.13	16.39	21.85	32.77	65.59	131.14
$\alpha_{dyn\text{ma}}$ : (度)	25.6479	21.7829	17.7498	13.4997	9.0930	4.5725	2.2906
Fluid state (separation/stall)	翼面重度	翼面中度	翼面中轻 度	尾部轻微	—	—	—
效率	0.2795	0.3178	0.3813	0.5036	0.6057	0.5082	-0.0999
推力(N)	0.0566	0.0669	0.0860	0.1153	0.1421	0.1398	-0.0302
升力 (N)	0.52606	0.66024	0.91055	1.2338	1.8748	4.4267	6.8743



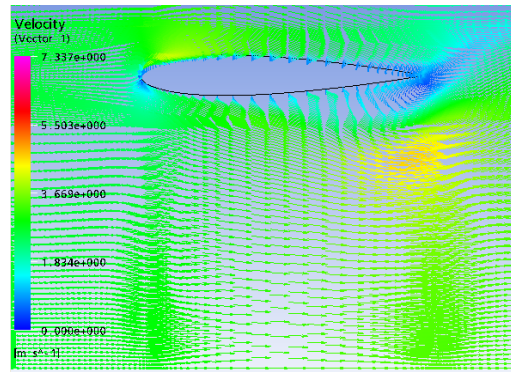
(a)翼型头部初始分离



(b)翼型首部产生分离涡



(c)分离涡运动到翼面中部

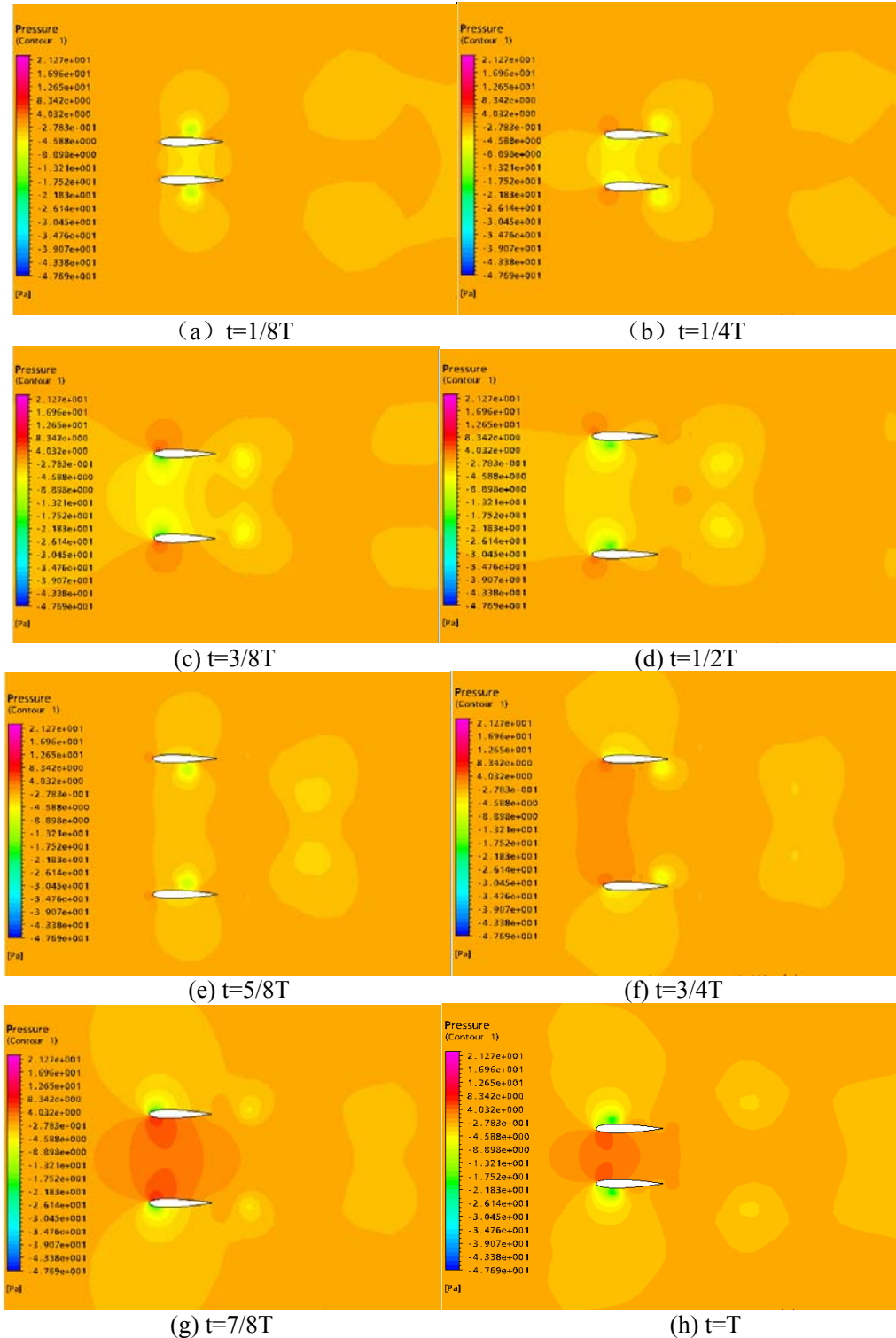


(d)分离涡运动到翼面中部

工况:  $\text{Re}=10920$ ,  $f=8\text{Hz}$ ,  $U_\infty=2.68\text{m/s}$ ,  $h_0=0.4c$

图 6 翼型表面失速涡由首部向尾部的传播过程—矢量场

图 6 矢量场展示了地效双摆翼由首部向尾部运输的过程。观察可见, 分离涡在首部尺寸较小, 沿翼型向后运动过程中, 尺寸增大, 但旋转强度减小, 说明能量在衰减到了尾部的低压中心消失, 意味着分离涡基本扩散。图 7 的压力云图与图 8 的矢量场的工况相同, 图中记录了压力中心的形成、在不同相位的具体位移以及运输和扩散过程。由于存在强烈分离涡和能量耗散, 该工况的效率 and 推力非常低:  $\eta = 0.2795, T = 0.0566N$ 。图 8 展示了频率为 8hz 下不同速度下推力和升力的时间变化历程。



(工况:  $f = 8Hz, U_{\infty} = 2.68m/s, h_0 = 0.4c$ )

图 7 翼型运动的八个相位的压力云图

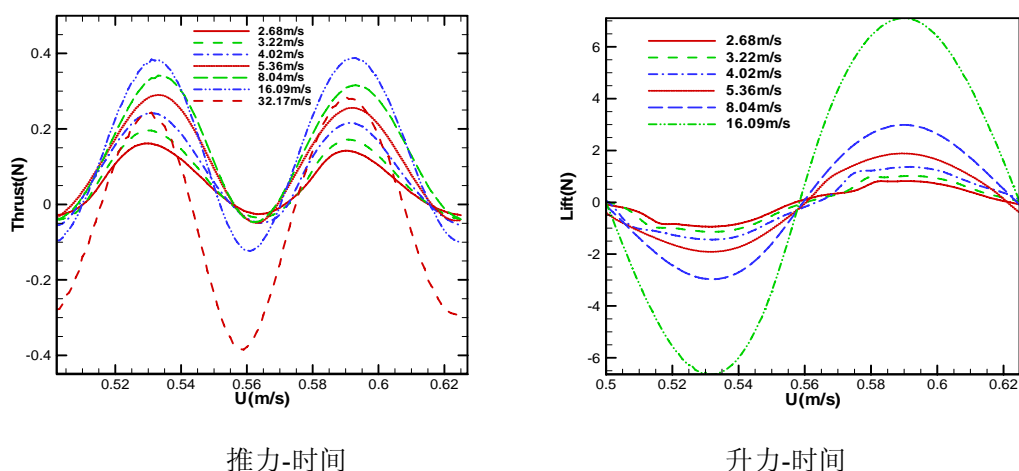


图 8 8Hz 频率下不同速度下推力和升力随着时间的变化

### 4 结束语

本文利用非定常双时间 NS 方程的预处理方法对摆翼地效推进器进行了推力和推进性能的分析。数值结果显示了沉浮振动的推力性能。推力和效率与速度的变化关系表现出一致性，固定频率，改变速度，发现推力和效率存在极大值点。随着频率增大，极大值点右移。最大推力和效率的动力攻角为  $6^{\circ} - 9^{\circ}$ ，利用速度矢量图和压力云图显示了分离涡的输运和扩散，再一次展示了地效的存在，揭示了推力和效率提高的原因，分离涡（失速涡）是降低推进性能的原因之一。

### 参考文献

- [1] Knoller, R., "Die Gesetze des Luftwiderstandes," Flug- und Motortechnik (Wien), Vol. 3, No. 21, 1909, pp. 1-7.
- [2] Von Kármán, T. and Burgers, J. M. General Aerodynamic Theory –Perfect Fluids, Division E, Vol. II, Aerodynamic Theory, Ed. Durand, W. F., 1943, pp. 308.
- [3] Pengfei Liu, "Propulsive performance of a twin-rectangular-foil propulsor in a counter-phase oscillation," September 2005, Vol. 49, No. 3, Journal of Ship Research (JSR), pp. 207-215.
- [4] Pengfei Liu and Neil Bose, "Propulsive performance from oscillating propulsors with spanwise flexibility," Proc. R. Soc. London, Vol. 453, No. 1963, August 1997, pp. 1763-1770.
- [5] 王涛, 摆翼地效推进技术的数值模拟和性能研究, 中国科学院力学研究所博士后研究报告, 2006.10.
- [6] K.D. Jones, M.F. Platzer, "Flapping-wing propulsion for a micro air vehicle" AIAA-2000-0897