

# 非正弦升沉运动对扑翼自主推进的影响

陈晓<sup>1,2</sup>, 曹勇<sup>1,2</sup>, 黄桥高<sup>1,2</sup>, 潘光<sup>1,2</sup>

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072;  
2.西北工业大学 无人水下运载技术工信部重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要:**为了研究仿生推进机理以及仿生机器人,弥补非自主推进的局限性,采用数值方法耦合求解流体动力与扑翼运动,建立扑翼-流体耦合的自主推进计算模型, $K$ 作为波形调节参数使波形由三角波变为正弦波以及方波,数值模拟了2个频率-升沉幅值组合下非正弦升沉运动的自主推进性能,研究在静水中不同运动波形对自主推进速度、自主推进效率以及流场结构的影响。结果表明非正弦波形对自主推进运动影响很大,随着 $K$ 的增大即越接近方波,速度振荡越剧烈,起动加速越快,前进位移与平均速度越大;随着 $K$ 的减小,自主推进效率及能量利用率不断增大,研究结果对仿生水下航行器的设计有一定指导意义。

**关键词:**扑翼;非正弦运动;自主推进;仿生推进;数值模拟

**中图分类号:**TP242; O351.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-2758(2022)02-0281-07

以鸟类和鱼类为代表的飞行生物和水生生物通过拍动翅膀或鳍获取推力和升力,从而可以灵活运动或远距离巡游,这是一种十分普遍的运动形式,其非凡的运动性能使仿生推进以及仿生机器人成为研究的热点<sup>[1-2]</sup>。

扑翼推进相较于传统推进器具有推进效率高的特点,一直以来大部分对于扑翼运动的研究集中于非自主推进的约束模型,即在给定来流中将翼型固定在原地运动,模拟向前游动<sup>[3-5]</sup>。这些研究揭示了扑翼运动产生推力的原因是反卡门涡街,但是忽略了翼型自身运动与流体动力之间的耦合,不符合真实生物运动情况,因此近年来自主推进得到越来越多的关注与研究。Vandenbergh等<sup>[6]</sup>通过实验发现平板翼型做升沉运动时的频率超过临界值则会自发沿水平方向推进,升沉频率和升沉幅值决定了自主推进的速度。Alben等<sup>[7]</sup>研究发现对称破缺和涡的相互作用是做扑翼运动的物体产生水平位移的原因,这也证明生物体的运动是拍动翅膀或鳍与流体相互作用的结果。Hu等<sup>[8]</sup>数值模拟了静水中对称

椭圆翼型做升沉运动时的自主推进,结果表明原有的对称涡状态被水平方向的自主推进打破,加速最终达到稳态速度并形成反卡门涡街,翼型在水平方向的被动运动不仅与拍动频率有关,还与翼型展弦比和密度比有关。Arora等<sup>[9]</sup>对静水中做升沉运动的二维平板翼型进行了数值仿真,研究了升沉频率、升沉幅值与密度比对自主推进效率、输入功率以及尾涡的影响,分析了涡与翼型的相互作用对推进速度的影响。Lin等<sup>[10]</sup>基于浸没边界法研究了NACA0012翼型在静水中分别做纯升沉运动、纯俯仰运动以及升沉俯仰运动的自主推进性能,结果表明升沉运动的自主推进速度以及推进效率高于俯仰运动。

以上自主推进的研究都是基于正弦运动,但是生物体外形、生存环境及习性不同,所以拍动模式多种多样,在以往翼型非自主推进的研究中,可通过控制扑翼运动的波形以提高推力或推进效率。Buren等<sup>[11]</sup>研究发现翼型做升沉运动时方波得到的推力大于正弦波和三角波。目前对运动轨迹的研究都是

**收稿日期:**2021-07-26      **基金项目:**国家自然科学基金(51879220,52001260)、国家重点研究发展计划(2016YFC0301300,2020YFB1313201)与中央高校基本科研业务费专项基金(3102019HHZY030019,3102020HHZY030018)资助

**作者简介:**陈晓(1993—),女,西北工业大学博士研究生,主要从事水动力学及水动力实验研究。

**通信作者:**曹勇(1988—),西北工业大学助理研究员,主要从事仿生航行器设计研究。e-mail:cao\_yong@nwpu.edu.cn

基于非自主推进,而自主推进研究较少。Wu 等<sup>[12]</sup>指出自主推进形成的流场完全不同于非自主推进的情况,所以很有必要研究非正弦运动对自主推进的影响。

本文通过对流体动力与扑翼运动的耦合求解,数值模拟翼型非正弦升沉运动的自主推进,研究不同运动波形对自主推进速度、自主推进效率以及流场结构的影响。

## 1 计算模型与数值计算方法

本文采用弦长为  $c$  的 NACA0012 翼型,研究其在静水中自主推进的问题,设定推力和推进方向沿  $x$  轴负方向,如图 1a) 所示。

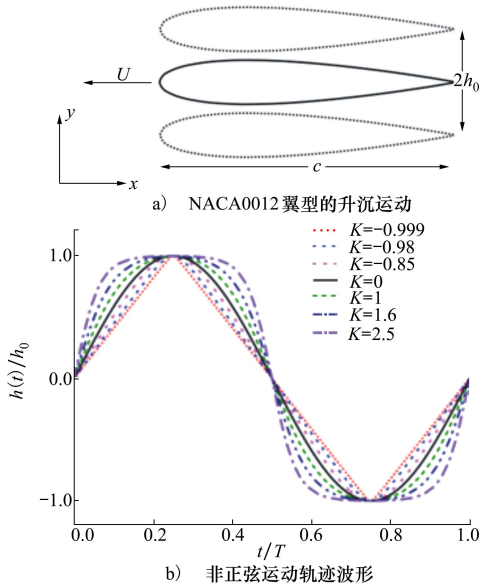


图 1 扑翼的自主推进问题

根据 Lu 所采用的运动学方程<sup>[13]</sup>,定义扑翼非正弦升沉运动方程为

$$h(t) = \begin{cases} \frac{h_0 \sin^{-1}[-K \sin(2\pi ft)]}{\sin^{-1}(-K)}, & -1 \leq K < 0 \\ h_0 \sin(2\pi ft), & K = 0 \\ \frac{h_0 \tanh[K \sin(2\pi ft)]}{\tanh K}, & K > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $h(t)$  为瞬时升沉运动幅值;  $h_0$  为最大升沉幅值;  $f$  为扑动频率;  $K$  为波形调节参数,当  $K$  增大时,升沉运动波形从三角波 ( $K = -1$ ) 变为正弦波 ( $K =$

$0$ ),最终变成方波 ( $K \rightarrow \infty$ )。本文  $K$  取  $-0.999, -0.98, -0.85, 0, 1, 1.6, 2.5$ , 波形变化如图 1b) 所示。

由于流体与扑翼的相互作用,扑翼通过自身升沉运动可在水平方向上自主推进,根据牛顿第二定律,运动控制方程为

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} = F_x \quad (2)$$

式中:  $X$  为翼型水平位置;  $F_x$  是翼型表面流体作用力的水平分量;  $m = \rho_s s$  是翼型质量,  $\rho_s$  和  $s$  分别代表翼型密度和面积。在本文中,质量比定义为  $\bar{m} = m/m_f = 10$ ,其中  $m_f = \rho s$  是与翼型等面积的流体质量,  $\rho$  是流体密度。具体计算过程如图 2 所示。

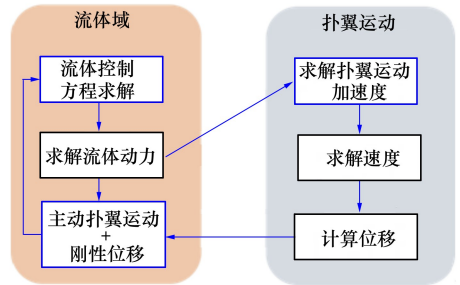


图 2 自主推进计算流程

为了衡量自主推进性能,引入以下参数:

平均推进速度

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3)$$

平均输入功率

$$\bar{P}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left( F_y(t) \frac{dh(t)}{dt} \right) dt \quad (4)$$

平均动能

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} m u(t)^2 dt \quad (5)$$

推进效率

$$\eta = \frac{E}{\bar{P}_i T} \quad (6)$$

式中:  $T$  是运动周期;  $F_y$  是翼型表面流体瞬时作用力的垂直分量;  $E$  是巡游时每周期的平均动能,作为输入功<sup>[14]</sup>。另外为了评估扑翼自主推进时的能量利用率,本文采用速度功率比<sup>[15]</sup>表示推进单位距离所需要的能量,定义为能量利用率,可表示为

$$\Omega = \frac{\bar{u}}{\bar{P}_i} \quad (7)$$

为了便于比较,文中推进速度、输入功率系数以无量纲形式分别表示为

$$U = \frac{u}{2\pi fh_0} \quad (8)$$

$$C_p = \frac{P}{1/2\rho(2\pi fh_0)^3 c} \quad (9)$$

数值计算中,流体运动的控制方程为二维黏性不可压缩流场中的时间平均连续性方程和雷诺平均 Navier-Stokes 方程 (RANS), 可以表示为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{u}$  是流体速度;  $p$  是流体压力;  $\nu$  是流体动力学黏性系数。

本文采用 Ansys FLUENT 软件以及层流模型进行计算,采用 PISO 算法对连续方程中的压力和速度进行耦合,动量离散采用二阶迎风格式。翼型升沉运动以及自主推进运动通过用户自定义方程 (UDF) 实现。

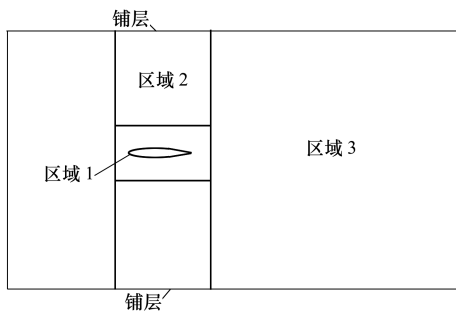


图 3 数值计算区域

由于扑翼自主推进的存在,本文采用整体移动的策略,可大大减少网格量。计算域为  $50c \times 30c$  的长方形,翼型前缘距离入口边界  $15c$ ,如图 3 所示。整个流域被分为 3 个区域:翼型置于区域 1,采用非结构网格,边界层为结构网格,第一层高度为  $10^{-3}c$ ,实现升沉运动;区域 2 为结构网格,动网格方法采用动态铺层,网格只在边界随扑翼运动生成与消失,所以区域 1 以及两域相接的部分没有网格变化;区域 3 为结构网格,捕捉尾涡更为精确。这样的设置使计算更稳定,并且可以提高计算效率。

## 2 计算方法验证

为验证网格无关性,选取 3 种网格尺寸,其数量

为  $2.7 \times 10^5, 4 \times 10^5, 5 \times 10^5$ 。图 4 为  $f=0.3, h_0/c=0.4$  时,翼型做正弦升沉运动时巡游速度的变化曲线,可以看到网格 2 与网格 3 的结果无明显差异,所以后续仿真计算采用网格 2。

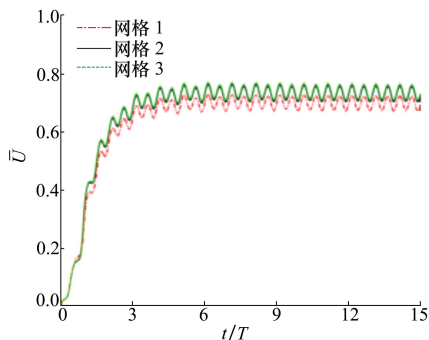


图 4 网格的无关性验证

为验证数值计算方法的准确性,与文献[11]中  $f=0.15$  时翼型做纯升沉运动的结果进行对比,如图 5 所示。在不同升沉幅值下的平均速度和自主推进效率与文献[11]结果基本吻合,故本文的数值计算方法正确有效。

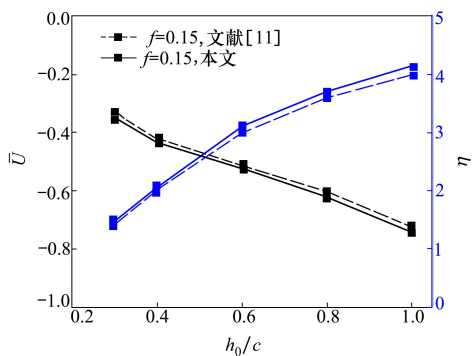


图 5 数值计算方法验证

## 3 数值计算结果与分析

本文主要讨论非正弦升沉运动对扑翼自主推进的影响,由文献[11]中纯升沉运动分析可知: $f=0.3$  时自主推进效率随升沉幅值先增大后减小,在  $h_0/c=0.4$  处自主推进效率最大; $f=0.15$  时自主推进效率随升沉幅值持续增大,在  $h_0/c=1$  处自主推进效率最大。因此本文针对以上 2 种情况分别分析非正弦波形下的自主推进性能以及流场结构。

### 3.1 自主推进过程中的推进性能

图 6 表示在  $f=0.15, h_0/c=1$  (低频) 时扑翼从

静止起动后加速到巡游的过程中瞬时推进速度  $U$  随波形参数  $K$  的变化曲线。当速度以一定幅值稳定波动时,认为进入巡游阶段,速度的周期平均值恒定不变,该速度成为巡游速度。由图可以看出,非正弦波形对自主推进运动速度影响很大, $K$  越大即越接近方波,振荡幅值越大。当  $K = 2.5$  时最大振荡幅值约为 0.25; 当  $K = 0$  时以正弦波运动,速度幅值为 0.05。另外,起动加速过程受波形影响很大,方波加速最快, $K = 2.5$  时约 2 个运动周期可达到稳态巡游,而正弦波需 8 个运动周期。图 7 为加速 - 巡游过程中的位移变化,可以更加直观地看到在每个运动时刻只有  $K = -0.85$  的位移小于正弦波,其余波形的位移均大于正弦波,即同一时间条件下,以方波做升沉运动时翼型“游/飞”得最远。综上可知,在  $f = 0.15, h_0/c = 1$  时采取除  $K = -0.85$  外的任一非正弦波形都可得到更大的自主推进速度和更高的自主推进位移。

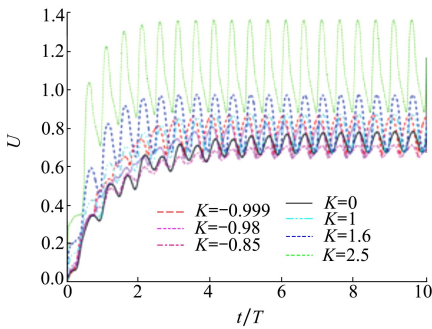


图 6  $f = 0.15, h_0/c = 1$  瞬时推进速度

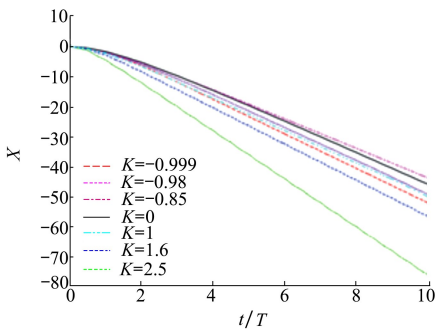


图 7  $f = 0.15, h_0/c = 1$  瞬时位移

当  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  (高频) 时,扑翼从静止起动后加速到巡游的过程中瞬时推进速度  $U$  随波形参数  $K$  的变化曲线如图 8 所示。由图可以看出,与低频存在明显差别, $K > 0$  时的非正弦波形对自主推进运动速度影响很大, $K$  越大即越接近方波,振荡幅

值越大。当  $K = 2.5$  时最大振荡幅值约为 0.1。当  $K \leq 0$  时,非正弦波形对自主推进运动速度大小影响很小,起动加速时间也大致相同。加速 - 巡游过程中位移变化如图 9 所示,可以看到当  $K \leq 0$  时每个时刻的位移差别很小。当  $K > 0$  时运动位移均大于正弦波,即同一时间条件下,三角波与正弦波在整个运动过程中位移大致相同,以方波做升沉运动时翼型“游/飞”得最远。综上可知,在  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  时采取  $K > 0$  时的任一波形都可得到更大的自主推进速度和更高的自主推进位移。

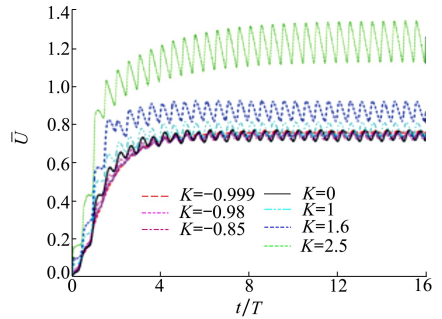


图 8  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  瞬时推进速度

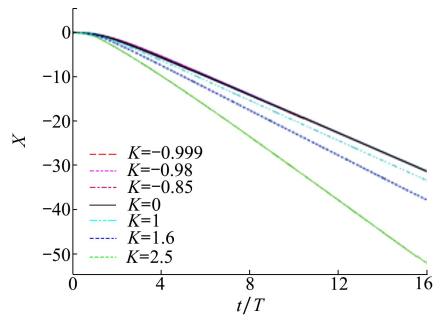


图 9  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  瞬时位移

### 3.2 自主推进过程中的效率

自主推进效率与自主推进速度以及输入功率密切相关,为此,分析非正弦波形对平均推进速度以及平均输入功率的影响。图 10 为  $f = 0.15, h_0/c = 1$  (低频) 的情况。波形参数  $K$  对平均速度以及平均输入功率影响很大,均以  $K = -0.85$  为临界点,取得最小  $\bar{U}$  与  $\bar{C}_p$ 。当  $K > -0.85$  时, $K$  越大则平均速度及平均输入功率越大,在  $K = 2.5$  时取得平均速度最大值为 1.14,相较于正弦波运动的 0.75 提高了 52%。非正弦波形对自主推进效率与能量利用率的影响如图 11 所示。随着  $K$  的增大,自主推进效率不断减小,在  $K = -0.999$  时取得自主推进效率最大值为 5.26%,相较于正弦波运动的 4.01% 提高了 31%。 $K < 0$  时

能量利用率大于正弦波,意味着翼型在单位输入功下的推进距离更远,或者推进单位距离所需要的能量更少, $K > 0$  时能量利用率小于正弦波。

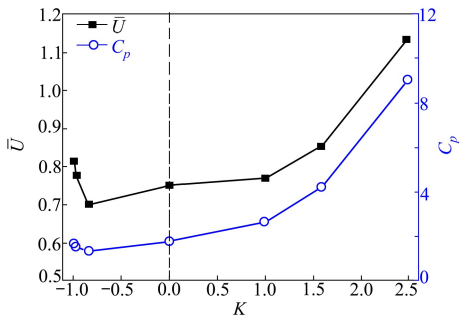


图 10  $f = 0.15, h_0/c = 1$  平均速度与输入功率

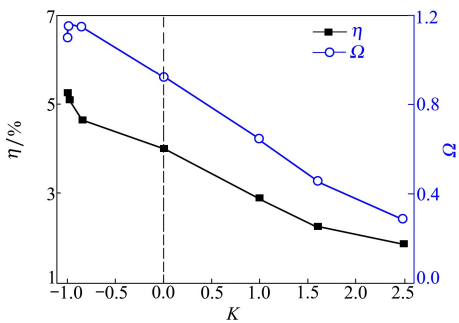


图 11  $f = 0.15, h_0/c = 1$  推进效率与能量利用率

当在  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  (高频) 时,由图 12 可以看出, $K \leq 0$  时, $K$  对平均速度以及平均输入功率影响很小; $K > 0$  时, $K$  越大则平均速度及平均输入功率越大,在  $K = 2.5$  时取得平均速度最大值为 1.25,相较于正弦波运动的 0.75 提高了 40%。图 13 表示非正弦波形对自主推进效率与能量利用率的影响。可以看出,随着  $K$  的增大,自主推进效率单调递减,在  $K = -0.999$  时取得自主推进效率最大值为 8.66%,相较于正弦波运动提高了 17.3%。随着  $K$  的减小,能量利用率逐渐增大,表示翼型在单位输入功下的推进距离更远,或者推进单位距离所需要的能量更少。

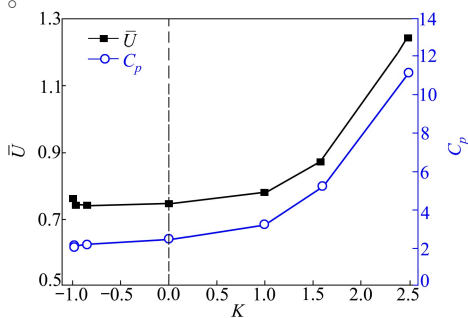


图 12  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  平均速度与输入功率

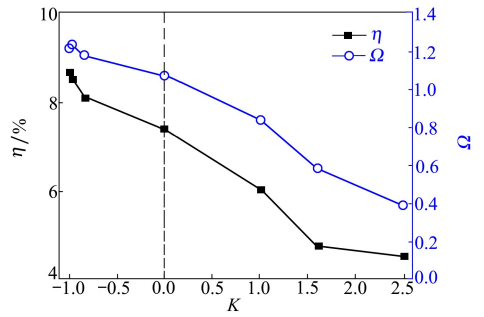


图 13  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  推进效率与速度功率比

### 3.3 自主推进过程中的流场结构

扑翼自主推进达到稳定巡游状态时的流场涡结构如图 14 所示。非正弦波形对尾涡结构存在非常明显的影响。图 14a) 为  $f = 0.15, h_0/c = 1$  的流场,当  $K \leq 0$  时一个运动周期生成一个正涡与一个负涡,分别上下水平排列形成反卡门涡街,具有较优的运动性能;当  $K > 0$  时一个运动周期生成两对涡并分别向上向下散开,带来较大的侧向力,造成较大的能

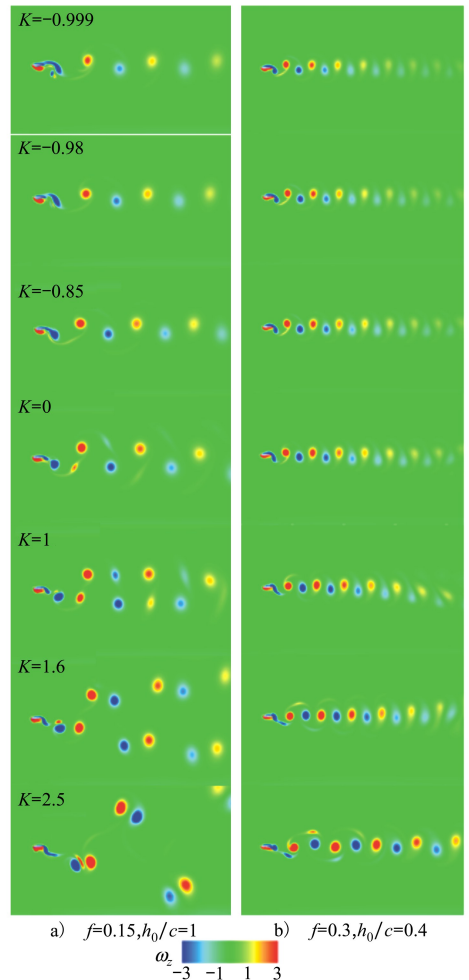


图 14 流场涡结构随波形的变化

量耗散,所以  $K = 2.5$  的波形对应的推进效率以及能量利用率较低。图 14b) 为  $f = 0.3, h_0/c = 0.4$  的流场,由于游动速度提高,各种波形均形成反卡门涡街,随着  $K$  的增大,涡强逐渐增大,故在  $K = 2.5$  处形成最大自主推进速度。

## 4 结 论

本文通过数值模拟耦合求解流体动力学方程与扑翼运动学方程,建立自主推进计算模型,研究了在静水中非正弦升沉运动对扑翼自主推进的影响,讨论了波形参数  $K$  对自主推进速度、位移、平均推进速度、平均输入功率、自主推进效率与能量利用率的影响,得到如下结论:

1) 非正弦波形对自主推进运动速度影响很大,  $K$  越大即越接近方波,瞬时速度振荡越剧烈,振荡幅

值越大,平均速度越大,起动加速过程越快,自主推进的位移越大,以方波做升沉运动时翼型“游/飞”得最远;

2) 波形参数  $K$  对自主推进效率影响很大,随着  $K$  的增大,自主推进效率不断减小,在  $K = -0.999$  时取得自主推进效率最大值,相较于正弦波运动提高了 31%;

3)  $K < 0$  时能量利用率大于正弦波,意味着翼型在单位输入功下的推进距离更远,或者推进单位距离所需要的能量更少;

4) 本研究的结果对仿生水下航行器设计有一定的参考价值,当需要较大的前进速度时可选择较大的波形参数使波形趋近于方波,当注重较大的推进效率与能量利用率时可选择较小的波形参数使波形趋近于三角波。

## 参考文献:

- [1] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44  
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44 (in Chinese)
- [2] PLATZER M F, JONES K D, YOUNG J, et al. Flapping wing aerodynamics: progress and challenges[J]. AIAA Journal, 2008, 46(9): 2136-2149
- [3] ANDERSEN A, BOHR T, SCHNIPPER T, et al. Wake structure and thrust generation of a flapping foil in two-dimensional flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 812: 1-12
- [4] DENG J, SUN L, TENG L, et al. The correlation between wake transition and propulsive efficiency of a flapping foil: a numerical study[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(9): 33-53
- [5] YOUNG J, LAI J. Oscillation frequency and amplitude effects on the wake of a plunging airfoil[J]. AIAA Journal, 2004, 42(10): 2042-2052
- [6] VANDENBERGHE N, ZHANG J, CHILDRESS S. Symmetry breaking leads to forward flapping flight[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 506: 147-155
- [7] ALBEN S, SHELLEY M. Coherent locomotion as an attracting state for a free flapping body[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(32): 1163-1166
- [8] HU J, XIAO Q. Three-dimensional effects on the translational locomotion of a passive heaving wing[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 46: 77-88
- [9] ARORA N, GUPTA A, SANGHI S, et al. Flow patterns and efficiency-power characteristics of a self-propelled, heaving rigid flat plate[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66: 517-542
- [10] LIN X, WU J, ZHANG T. Performance investigation of a self-propelled foil with combined oscillating motion in stationary fluid[J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 33-49
- [11] BUREN T V, FLORYAN D, QUINN D, et al. Nonsinusoidal gaits for unsteady propulsion[J]. Physical Review Fluids, 2017, 2(5): 1-13
- [12] WU T Y. On theoretical modeling of aquatic and aerial animal locomotion[J]. Advances in Applied Mechanics, 2001, 38: 291-353
- [13] LU K, XIE Y H, ZHANG D. Numerical study of large amplitude, nonsinusoidal motion and camber effects on pitching airfoil

propulsion[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 36(1): 184-194

- [14] KERN S, KOUMOUTSAKOS P. Simulations of optimized anguilliform swimming[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209: 4841-4857
- [15] QUINN D B, LAUDER G V, SMITS A J. Flexible propulsors in ground effect[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(3): 036008

## Nonsinusoidal motion effect on a self-propelled heaving foil

CHEN Xiao<sup>1,2</sup>, CAO Yong<sup>1,2</sup>, HUANG Qiaogao<sup>1,2</sup>, PAN Guang<sup>1,2</sup>

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.Key Laboratory of Unmanned, Underwater Vehicle Technology of Ministry of Industry and Information Technology,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanism of bionic propulsion and bionic robots, to make up for the limitations of traditional propulsion with a uniform incoming flow, numerical methods are used to couple fluid dynamics and flapping foil motions, and a flapping-fluid coupling self-propulsion calculation model is established in this paper.  $K$  is used as the waveform adjustment parameter to change the waveform from triangle wave to sine wave and square wave. The self-propulsion performances of non-sinusoidal heave motion under two frequency-heaving amplitude combinations are numerically simulated to study the influence of different motion waveforms on self-propulsion velocity, efficiency and flow field structure in still water. The results show that the non-sinusoidal waveform has a great influence on the self-propulsion. With the increase of  $K$ , the closer to the square wave, the more violent the speed oscillation, the faster the starting acceleration, the greater the forward displacement and the average speed, as  $K$  decreases, self-propulsion efficiency and energy utilization continue to increase. The results of this study have certain guiding significance for the design of bionic underwater vehicles.

**Keywords:** heaving foil; nonsinusoidal motion; self-propulsion; bionic propulsion; numerical simulation

**引用格式:**陈晓,曹勇,黄桥高,等.非正弦升沉运动对扑翼自主推进的影响[J].西北工业大学学报,2022,40(2):281-287  
CHEN Xiao, CAO Yong, HUANG Qiaogao, et al. Nonsinusoidal motion effect on a self-propelled heaving foil[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(2): 281-287 (in Chinese)