

ISSN 0258-1825

CN 51-1192/TK

空气动力学学报

ACTA AERODYNAMICA SINICA

第36卷 第1期 Vol.36 No.1

2018.1

中国空气动力学会

目 次

主 编 推 荐

流体力学研究要创造应用理论 童秉纲, 余永亮 (1)

研 究 论 文

高超声速流存在局部稀薄效应的一个判据及相应的流动特性 陈 杰, 赵 磊 (4)

基于 CFD/CSD 方法的跨声速静气动弹性数值模拟应用研究 郭洪涛, 陈德华, 张昌荣, 吕彬彬, 王晓冰 (12)

Q-K 模型在氮氧离解复合反应中的评估 陈 浩, 李林颖, 张 斌, 刘 洪 (17)

合成射流低速射流矢量偏转控制的 PIV 实验研究 李斌斌, 姚 勇, 顾蕴松, 程克明 (22)

跨声速风洞现代试验设计方法应用研究 李 多, 曹军义, 张征宇, 黄叙辉 (26)

基于桨盘倾角的直升机涡环状态边界修正计算方法 马鸿儒, 穆志韬, 李洪伟, 孙文胜 (31)

基于参数化气动模型的机载导弹分离轨迹优化 宋文斌, 李 响, 王晓鹏, 左英桃 (35)

尾缘襟翼缝隙大小对风力机翼型气动性能的影响 贾亚雷, 韩中合, 安 鹏, 李恒凡, 董 帅 (41)

基于尾气排放控制尾涡的新型减阻方法研究 文 琪, 谷正气, 黄泰明, 陈 阵, 唐江明 (47)

DSMC 计算中碰撞对取样和时间推进环节的高效处理方法 屈 程, 王江峰 (52)

基于 DES 方法的倾转旋翼悬停计算研究 王 娜, 叶 靛, 戚姝妮 (57)

专栏——仿生空气动力学

仿生微型飞行器悬停飞行的空气动力学研究 吴江浩, 周 超 (64)

仿生飞行器非定常气动优化设计研究进展与挑战 肖天航, 罗东明, 郑祥明, 昂海松, 吉爱红 (80)

仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展 薛 栋, 宋笔锋, 宋文萍, 杨文青 (88)

仿生学气动噪声控制研究的历史、现状和进展 乔渭阳, 全 帆, 陈伟杰, 王勋年, 陈正武 (98)

动物飞行的空气动力学 孙 茂 (122)

蝙蝠飞行的空气动力学研究进展 余永亮 (129)

海鸥翼折转运动的数值模拟及分析 常兴华, 马 戎, 张来平 (135)

鸟翼表面非光滑结构流动控制机理研究 汪 睿, 李 典, 刘小民 (144)

间歇式俯仰转动扑翼的自主推进 戴龙珍, 张 星 (151)

低雷诺数下展弦比对仿生拍动翼推进性能的影响研究 苑宗敬, 韩佳坤, 陈 刚 (156)

英文编审: 姜 屹

责任编辑: 贾 峰

CONTENTS

Editor-in-Chief Recommend

Applied theory building is still required in fluid mechanics research TONG Binggang, YU Yongliang (1)

Research Articles

A criterion for the existence of local rarefaction effect in a hypersonic flow field and the corresponding flow characteristics CHEN Jie, ZHAO Lei (4)

Numerical applications on transonic static aeroelasticity based on CFD/CSD method GUO Hongtao, CHEN Dehua, ZHANG Changrong, LYU Binbin, WANG Xiaobing (12)

Assessment of Q-K model for nitrogen and oxygen dissociation-recombination CHEN Hao, LI Linyin, ZHANG Bin, LIU Hong (17)

PIV experiments on vector deflection control of low-speed synthetic jet LI Binbin, YAO Yong, GU Yunsong, CHENG Keming (22)

Applications of modern design of experiment method in transonic wind tunnel LI Duo, CAO Junyi, ZHANG Zhengyu, HUANG Xuhui (26)

Revised calculation method for helicopter vortex-ring state boundary based on flight attitude MA Hongru, MU Zhitao, LI Hongwei, SUN Wensheng (31)

Trajectory optimization for airborne missile separation based on parametric aerodynamic model SONG Wenbin, LI Xiang, WANG Xiaopeng, ZUO Yingtao (35)

Influence of gap size of trailing-edge-flap on aerodynamic performance of wind turbine airfoil JIA Yalei, HAN Zhonghe, AN Peng, LI Hengfan, DONG Shuai (41)

A new drag reduction method based on trailing vortex control by exhaust emissions WEN Qi, GU Zhengqi, HUANG Taiming, CHEN Zhen, TANG Jiangming (47)

High efficient processing method for DSMC calculation in chains of collision pair selection and time integration QU Cheng, WANG Jiangfeng (52)

Numerical study for tilt rotor in hover with detached eddy simulations WANG Na, YE Liang, QI Shuni (57)

Column—Bionic Aerodynamica

Review on aerodynamics of bionic micro air vehicle in hovering flight WU Jianghao, ZHOU Chao (64)

Progress and challenges in unsteady aerodynamic optimization design of bionic flapping-wings XIAO Tianhang, LUO Dongming, ZHENG Xiangming, ANG Haisong, JI Aihong (80)

Advances in coupling aeroelasticity and flight dynamics of bird inspired FMAV XUE Dong, SONG Bifeng, SONG Wenping, YANG Wenqing (88)

Review on aerodynamic noise reduction with bionic configuration QIAO Weiyang, TONG Fan, CHEN Weijie, WANG Xunnian, CHEN Zhengwu (98)

Aerodynamics of animal flight SUN Mao (122)

Progress in aerodynamics of bat flight YU Yongliang (129)

Numerical study on the folding mechanism of seagull's flapping wing CHANG Xinghua, MA Rong, ZHANG Laiping (135)

Numerical study on flow control mechanism of non-smooth surface structures of bird wings WANG Rui, LI Dian, LIU Xiaomin (144)

Self-propulsion of a flapping foil powered by intermittent pitching motion DAI Longzhen, ZHANG Xing (151)

Investigation on the influence of aspect ratio on the thrust performance of bionic motion wing under low Reynolds number YUAN Zongjing, HAN Jiakun, CHEN Gang (156)

流体力学研究要创造应用理论(1-3, doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0012)

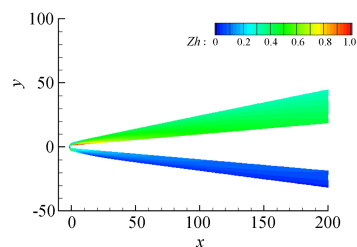
童秉纲, 余永亮

《空气动力学学报》编辑部特邀童秉纲院士撰文, 谈谈他对空气动力学学科发展的见解, 给研究人员提出希望和建议。童先生结合自己多年的研究经验, 进行了深入的思考。童先生指出, 技术科学与自然科学一样, 要从工程实践中抽象出科学问题, 建立力学模型, 以数学手段求解, 得到的结果须经过检验, 最后形成应用理论。近三十多年来, 童先生及其实验室在流体力学领域的研究工作, 极大地丰富和发展了钱学森“技术科学”思想。

高超声速流存在局部稀薄效应的一个判据及相应的流动特性(4-11, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0179)

陈杰, 赵磊

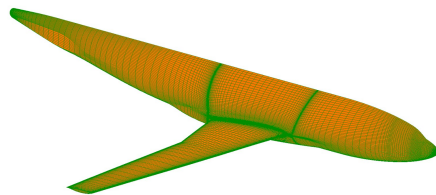
本文选取具有代表性的高超声速剪切流为研究对象, 采用直接模拟 Monte Carlo(DSMC)方法, 对剪切强度和稀薄程度不断增强的流动, 研究了分子运动速度分布函数以及剪切力的相应变化规律; 找到了一个可以判别气体稀薄效应程度的无量纲参数 Zh , 以及传统连续介质模型下的剪切力和由 DSMC 所得剪切力随参数 Zh 的增大而出现的有规律性的差别。



基于 CFD/CSD 方法的跨声速静气动弹性数值模拟应用研究(12-16, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0144)

郭洪涛, 陈德华, 张昌荣, 吕彬彬, 王晓冰

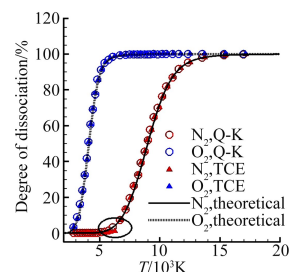
针对大型飞机跨声速静气动弹性问题, 基于 CFD/CSD 流固耦合方法开展了数值模拟应用研究。具体方法是: 采用 RANS 方程与静气动弹性平衡方程作为计算控制方程, CFD 采用多块对接结构化网格进行分区并行计算, 并利用多重网格技术加速收敛; 使用 RBF 结合 TFI 方法进行网格变形; 通过 TPS 插值实现多场数据交换。基于上述方法开发了计算程序, 并与典型风洞试验结果开展了对比研究, 验证了方法和程序的有效性。最后通过数值模拟结果, 分析了跨声速时静气动弹性对典型大型飞机机翼的几何变形、表面压力及气动性能的影响特性。



Q-K 模型在氮氧离解复合反应中的评估(17-21, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0189)

陈浩, 李林颖, 张斌, 刘洪

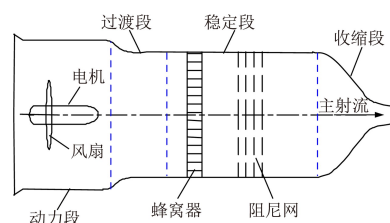
总能碰撞模型(TCE)是直接模拟蒙特卡洛(DSMC)方法中最为广泛使用的化学反应模型, 本文通过对比 TCE 模型对最近提出的量子-动力学(Q-K, quantum-kinetic)模型进行数值评估, 并对二者之间的差异给出合理的分析说明。研究表明, Q-K 模型在整个离解度范围内与理论值精准吻合, TCE 模型在低离解度时则具有较大的误差。在描述离解速率中的非平衡效应时, Q-K 模型与 Park 双温度模型高度吻合, 而 TCE 模型却高估了这种非平衡效应。此外, 本文结果还表明, TCE 模型实现的非平衡离解速率比 Q-K 模型更接近 Park 双温度模型的结果。



合成射流低速射流矢量偏转控制的 PIV 实验研究(22-25, 30, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0194)

李斌斌, 姚勇, 顾蕴松, 程克明

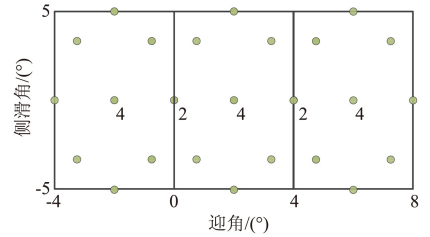
通过在二元矩形射流风洞出口两侧布置斜置扩张的斜出口合成射流激励器, 并调整到合适的扩张角, 在主射流未形成 Coanda 效应的前提下, 利用合成射流非定常扰动来“激发”诱导主射流剪切层, 使主射流发生矢量偏转。结合 PIV 测试技术, 对合成射流在不同电压和频率参数下控制低速主射流的时均流场进行了测试。



跨声速风洞现代试验设计方法应用研究(26-30, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0196)

李多, 曹军义, 张征宇, 黄叙辉

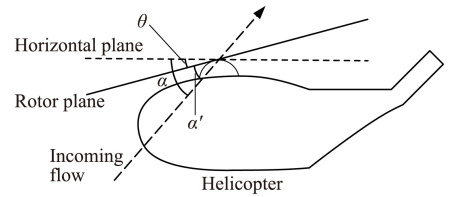
针对单变量风洞试验方法存在试验结果表达不直观、试验效率低、忽略变量间交互作用等缺点,在 $2.4\text{ m}\times 2.4\text{ m}$ 跨声速风洞开展了现代试验设计方法应用研究。分析了试验区间划分、数据量确定、数据点分布等试验设计重要环节,开展风洞试验获取了各试验点的气动系数,建立了试验数据的响应面模型,并通过查看额外试验点是否落入模型95%置信区间的方式评价了所建立模型的拟合精度。



基于桨盘倾角的直升机涡环状态边界修正计算方法(31-34, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0203)

马鸿儒, 穆志韬, 李洪伟, 孙文胜

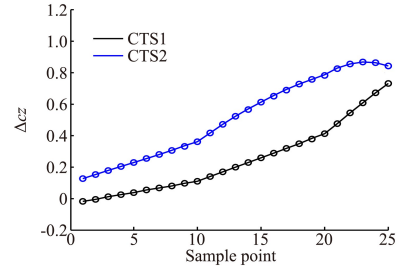
首先对模型试验直升机和实飞直升机下滑角进行了对比,明确了桨盘倾角是使理想涡环曲线存在误差的主要原因,分析了斜下滑时直升机各姿态角随前飞速度增大的变化趋势,结合平衡方程和高辛涡环判据,提出了计入桨盘倾角的实飞涡环状态边界计算方法,最后通过算例对计算方法进行了验证和分析。结果表明,基于桨盘倾角修正的涡环边界与试飞数据基本吻合,桨盘倾角对旋翼涡环临界值影响较大,且影响程度因机型而异。



基于参数化气动模型的机载导弹分离轨迹优化(35-40, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0207)

宋文斌, 李响, 王晓鹏, 左英桃

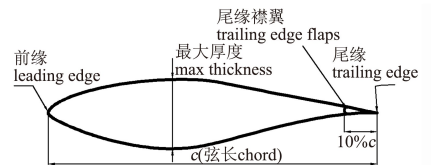
论述了机载导弹分离过程中导弹气动参数化建模的方法,并通过CFD计算数据和CTS风洞试验数据的对比,发现本文方法得到的模型预测值与实验值相吻合,验证了参数化建模及计算方法的可行性。在上述参数化气动模型基础上,为保证分离过程的安全性并且使分离终端时刻姿态稳定,构建了纵向平面内的分离轨迹优化问题,采用高斯伪谱法将其转化为非线性规划问题并通过序列二次规划算法求解。计算结果表明,优化得到的分离轨迹可以保证分离过程的安全平稳。



尾缘襟翼缝隙大小对风力机翼型气动性能的影响(41-46, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0209)

贾亚雷, 韩中合, 安鹏, 李恒凡, 董帅

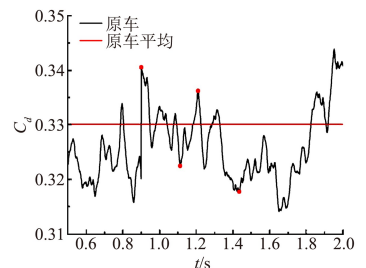
分离式尾缘襟翼在制造时不可避免留有缝隙,针对缝隙会对翼型气动性能产生影响,以S809翼型为研究对象,建立了三种缝隙的S809分离式尾缘襟翼模型及不带缝隙的整体式尾缘襟翼模型。分离式尾缘襟翼模型主体与尾缘襟翼之间采用均匀缝隙结构,缝隙大小分别为弦长的1%、2%、4%。采用商用软件fluent对三种缝隙襟翼模型和无缝隙的襟翼模型进行多迎角下的升阻力特性数值计算,并对不同缝隙襟翼模型和无缝隙襟翼模型周边流场、流线及压力分布进行了分析比较。



基于尾气排放控制尾涡的新型减阻方法研究(47-51, 822, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0229)

文琪, 谷正气, 黄泰明, 陈阵, 唐江明

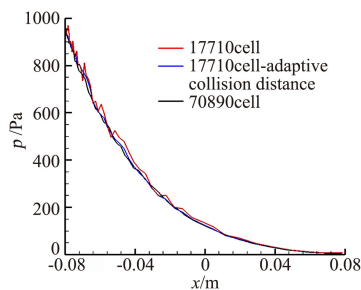
以某微型客车为研究对象,采用大涡模拟的计算方法,研究尾气排放控制尾涡的新型减阻方法。首先,通过风洞试验验证仿真方法的准确性;然后通过瞬态计算,分析了尾涡对气动阻力的影响机理,以及基于尾气排放控制尾涡的可行性;最后,研究了尾气管布置在不同位置时对减阻的影响。提出了尾气脉动排放来进行减阻,研究了尾气排放周期对减阻的影响,并对比分析了尾气以定常与脉动排放的减阻机理。



DSMC 计算中碰撞对取样和时间推进环节的高效处理方法(52-56, doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0230)

屈程, 王江峰

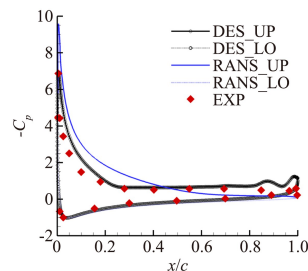
针对 DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)计算中的碰撞对取样和时间推进环节,发展了一类高效处理方法。首先引入碰撞距离的思想,发展了一种自适应碰撞距离的分子碰撞对选取方法;随后在自适应当地时间步长方法和 DSMC 方法数据结构特点的启发下,以模拟分子为最小时间步长调整单位,发展了一种自适应分子时间步长方法;最后以圆柱外形为例,验证了本文高效处理方法的可行性与正确性。



基于 DES 方法的倾转旋翼悬停计算研究(57-63, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0105)

王娜, 叶靓, 戚姝妮

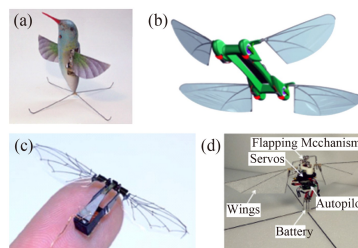
针对倾转旋翼悬停工作状态,在嵌套网格下数值求解非定常 Navier-Stokes 方程,研究了流场中的流动及旋翼/机翼间气动干扰。在网格系统中,采用了可自适应的背景直角网格,用于精确捕捉流场中的大尺度涡及其他流动细节。涡粘性计算采用了 Spalart-Allmaras(SA)的脱体涡模拟(Detached Eddy Simulations, DES)方法。计算结果与相应的雷诺平均 Navier-Stokes(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)方法结果进行了对比,目的在于考察采用不同计算方法得到的流场结构和气动力差异。



仿生微型飞行器悬停飞行的空气动力学研究(64-79, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0174)

吴江浩, 周超

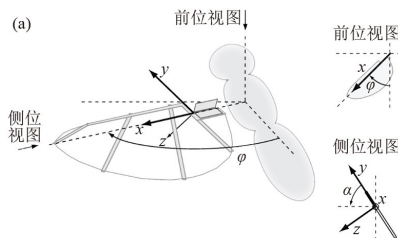
本文回顾了仿生微型飞行器悬停飞行空气动力学研究的相关进展。首先,介绍目前用于研究仿生微型飞行器空气动力学问题的一系列实验和数值仿真方法;然后,介绍悬停飞行下仿生微型飞行器高升力机理(如打开合拢机制、延迟失速等),并着重讨论了前缘涡稳定性等前沿问题;之后,介绍关于仿生微型飞行器的气动设计流程及方法的研究进展,包括仿生翼的流固耦合研究以及翼的几何、运动及结构参数优化设计研究;最后,对该领域未来的研究方向做了初步探讨。



仿生飞行器非常气动优化设计研究进展与挑战(80-87, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0171)

肖天航, 罗东明, 郑祥明, 昂海松, 吉爱红

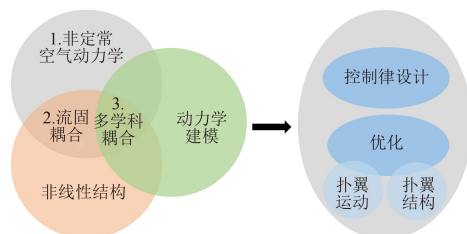
从气动建模、设计变量参数化和优化方法策略等方面,论述了仿生飞行器非常气动优化设计技术的应用和发展,总结了不同优化设计方法的优缺点,分析了发展趋势和未来的研究重点,为进一步开展仿生飞行器气动优化设计研究提供参考。



仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展(88-97, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0153)

薛栋, 宋笔锋, 宋文萍, 杨文青

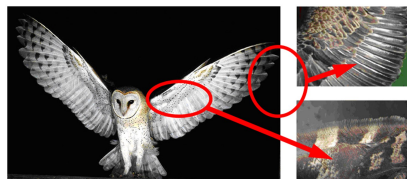
仿鸟型扑翼飞行器在飞行机动性和飞行效率上有巨大发展潜力,针对该类飞行器的气动机理、气动/结构耦合研究、飞行稳定性分析方法以及扑动翼的柔性对飞行稳定性的影响等方面进行了国内外现状的分析和总结。目前仿鸟型扑翼飞行器的发展还面临着诸多难题,尤其在非常气动机理、气动/结构耦合的尺度律以及气动/结构/飞行力学的耦合方法等方面亟需进一步的突破和发展。



仿生学气动噪声控制研究的历史、现状和进展(98-121, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0162)

乔渭阳, 全帆, 陈伟杰, 王勋年, 陈正武

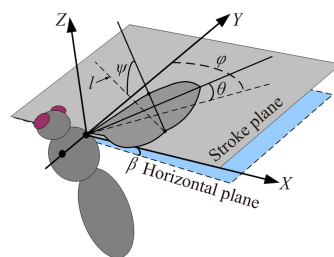
飞机/发动机噪声控制技术是目前绿色航空概念的主要目标之一,也是航空领域大国间竞争的关键技术。以“师法自然”为核心的仿生学气动噪声控制,得到了前所未有的重视和研究,为气动噪声控制提供了新的思想,并构成了气动噪声控制的新方向。以飞机/发动机湍流宽频噪声控制为对象,首先回顾了仿生学气动噪声控制技术的研究历史,并详细介绍了机翼/叶片尾缘和前缘的仿生学降噪研究现状和发展动态,分析了目前仿生学气动噪声控制理论和主要问题及未来的研究重点和发展方向。



动物飞行的空气动力学(122-128, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0195)

孙茂

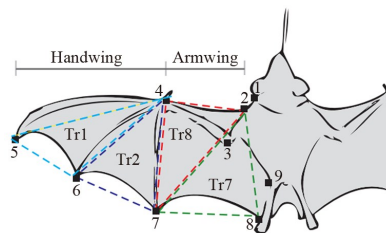
昆虫、鸟和兽(蝙蝠)的飞行是由作用于其上的气动力所决定的。了解这些力的产生机制和规律,是研究相关动物的比较生理学、行为学、生态学及进化的基础,也能为发展新型飞行器提供仿生学指导。本文介绍了近二十年来该领域的主要研究进展,并讨论未来发展趋势和需要开展的工作。文中依次讨论了昆虫、鸟类和蝙蝠拍动飞行的空气动力学机理;最后提出了今后5~10年的工作建议。



蝙蝠飞行的空气动力学研究进展(129-134, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0207)

余永亮

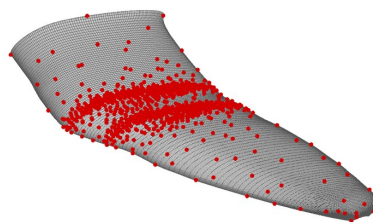
首先,根据研究工具的进步程度,把对蝙蝠飞行的研究分为了三个历史阶段,即在第一和第二阶段通过获得部分“静态”的数据来研究,在第三阶段对蝙蝠翅膀飞行中的动态变形进行测量和流场结构测量。然后陈述了蝙蝠翼的特征,飞行中挥拍运动及变形规律特征,并简述了特征的四类变形模型(扭转变形、弦向弓形变形、展向弯曲变形和翼面积改变)。有了初步的变形模型后,对主动变形产生非正常空气动力产生机制和气动性能调控进行了探讨。最后提出了当前对蝙蝠飞行的空气动力学研究面临的困难和挑战。



海鸥翼折转运动的数值模拟及分析(135-143, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0168)

常兴华, 马戎, 张来平

扑翼的非正常流动及气动特性分析对微型飞行器设计具有重要意义。本文采用动态混合网格技术以及非正常数值计算方法,对海鸥翼的拍动过程进行了数值研究。采用基于径向基函数的插值技术实现网格的变形,为了提高插值效率,发展了基于最大物面误差的参考点选择算法。基于文献观测数据建立了海鸥翼的三维模型,并设计了相应的拍动以及变形规律,对拍动角、折转角的影响进行了分析。



鸟翼表面非光滑结构流动控制机理研究(144-150, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0156)

汪睿, 李典, 刘小民

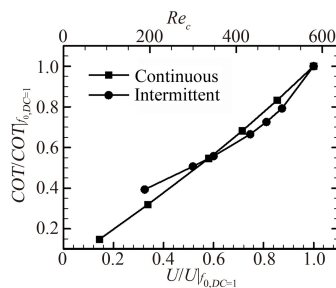
本文拟通过对鸽子翅翼表面非光滑结构对仿生翅翼气动性能影响的研究,揭示了鸟类翅翼表面非光滑结构的流动控制机理,从而为飞行器的优化设计提供理论参考。首先结合逆向工程技术和3D扫描结果对活体鸽子进行翅翼的仿生重构,分别建立了光滑结构和非光滑结构的仿生翅翼模型。然后采用数值模拟方法对仿生鸽子翅翼模型进行空气动力学特性分析,研究了滑翔状态下飞行速度和飞行迎角对仿生翅翼气动性能的影响。在18m/s的飞行速度条件下,对不同飞行姿态时光滑仿生翅翼和非光滑仿生翅翼的气动性能及其流动结构进行了分析比较。



间歇式俯仰转动扑翼的自主推进 (151-155, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0198)

戴龙珍, 张星

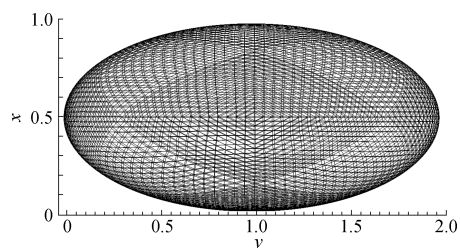
很多飞行和游动的生物采用主动驱动和被动滑行交替的运动方式。本研究通过比较间歇式和连续式驱动扑翼的自主推进性能, 试图回答间歇式驱动能否节省能耗的问题。研究采用数值方法求解耦合的 Navier-Stokes 方程和扑翼运动的动力学方程。我们模拟了不同频率的连续式驱动以及给定频率不同占空比的间歇式驱动。结果表明, 在达到相同平均推进速度条件下, 如果推进速度较高间歇式驱动所需的能耗更低, 如果速度较低则连续式驱动的能耗较低。我们还对比了连续式和间歇式驱动产生的不同流场结构。该研究得到的结果可以为高效仿生水下航行器的设计提供帮助。



低雷诺数下展弦比对仿生拍动翼推进性能的影响研究 (156-162, doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0147)

苑宗敬, 韩佳坤, 陈刚

研究自然界中生物的非定常运动对于人类开发新概念飞行器和水下航行器具有重要指导意义。本文采用浸入边界格子玻尔兹曼方法 (IB-LBM), 发展了一套三维 IB-LBM 并行求解器。以 NACA0012 仿生拍动翼为对象, 在中国天河 2 号超级计算机上对不同展弦比在低雷诺数条件下对其推进性能影响进行大规模数值。捕捉到了 NACA0012 拍动翼尾迹区中的精细涡系结构及其演化过程, 给出了 NACA0012 翼拍动过程中产生的非定常力的变化趋势。



“仿生空气动力学”专栏引言

鸟、蝙蝠(兽)和昆虫是大自然创造的“飞行器”或“微型飞行器”，它们是飞行的佼佼者。在数亿年的飞行史中，经过自然界的不断“实验”和“选择”，在形态、运动方式、利用“新奇”的空气动力学和飞行动力学原理等方面，达到了完美的程度。人类在研制无人机及微型飞行器时应向它们借鉴。“仿生空气动力学”研究动物飞行的空气动力学原理及拍动式飞行器的气动设计，是当前空气动力学的热点问题之一。近十多年来该方向取得了良好的研究成果，但也存在许多未解决的问题。本专栏推出一系列综述文章和一些相关的研究论文，以期人们对该方向研究的发展情况有深入了解。

综述文章包括仿生微型飞行器的空气动力学研究、仿生飞行器的气动优化问题、仿生飞行器的气动/结构/飞行力学耦合研究等三篇论文，以及一篇仿生学气动噪声控制论文，还包括二篇动物(鸟，蝙蝠，昆虫)飞行的空气动力学的论文。研究论文有四篇，涉及鸟翼的绕流及一般拍动翼的流动机理及气动性能的研究。

我们希望这些论文能激发相关学者的思考，使这一热点方向有进一步的发展。

《空气动力学学报》编辑部

2018年02月



专栏组稿专家简介：

孙茂，北京航空航天大学教授。长期从事动物飞行的生物力学研究，在昆虫飞行的空气动力学和飞行动力学领域做出了系统的创新成果。研究成果使人们对自然界飞行的认识取得重要进展；被用于昆虫比较生理学/神经生物学研究和微型飞行器研制。曾应邀在国际顶尖综述刊物《现代物理评论》上发表昆虫飞行力学的长篇综述论文。被著名刊物 J. Exp. Biol. 三次撰文介绍。2014 年以来连续入选爱思唯尔高引学者。获教育部自然科学一等奖、国家自然科学基金二等奖。

文章编号: 0258-1825(2018)01-0151-05

间歇式俯仰转动扑翼的自主推进

戴龙珍^{1,2}, 张星^{1,2,*}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要:很多飞行和游动的生物采用主动驱动和被动滑行交替的运动方式。本研究通过比较间歇式和连续式驱动扑翼的自主推进性能, 试图回答间歇式驱动能否节省能耗的问题。研究采用数值方法求解耦合的 Navier-Stokes 方程和扑翼运动的动力学方程。我们模拟了不同频率的连续式驱动以及给定频率不同占空比的间歇式驱动。结果表明, 在达到相同平均推进速度条件下, 如果推进速度较高间歇式驱动所需的能耗更低, 如果速度较低则连续式驱动的能耗较低。我们还对比了连续式和间歇式驱动产生的不同流场结构。该研究得到的结果可以为高效仿生水下航行器的设计提供帮助。

关键词:扑翼; 自主推进; 间歇式俯仰转动; 浸入边界方法

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0198

Self-propulsion of a flapping foil powered by intermittent pitching motion

DAI Longzhen^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2,*}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Many animals adopt intermittent gaits (burst-and-coast or flapping-and-gliding) during flying or swimming. We compare the performances of self-propelled foils driven by intermittent and continuous pitching motions, and attempt to answer the question whether the intermittent gaits are more efficient. Numerical simulations are conducted by solving the Navier-Stokes equations together with the dynamics equations of the foil. We study cases of continuous pitching at various frequencies and also cases of intermittent pitching at a fixed frequency but different duty cycles. The results indicate that, for a given cruising speed, the continuous gait is more efficient at lower speed, while the intermittent gait is more efficient at higher speed. The different flow structures produced by the continuous and intermittent gaits are presented. The results obtained in this work can benefit the design of efficient bio-inspired underwater vehicles.

Keywords: flapping foil; self-propulsion; intermittent pitching; immersed boundary method

0 引言

很多生物在飞行和游动中均采用主动驱动和被动滑行交替 (flap-and-glide/burst-and-coast) 的间歇式推进^[1-9]。一些已有的研究表明, 在移动同样距离的条件下, 间歇式驱动的游动可以有效地节省能量消耗^[2,3,6,10-15]。间歇式驱动的飞行与游动问题又可细

分为两大类, 它们的节能机理也不尽相同。

第一类问题中动物的身体密度大于所处的流体介质 (如鸟类和一些水生哺乳动物)。动物采用间歇式驱动和上下起伏的运动轨迹, 可以有效地利用重力势能来增大水平移动的距离^[1-2]。第二类问题中动物的身体密度和所处的流体介质接近 (如某些鱼类)。这类间歇式驱动的节能机理则包括黏性和无黏两种。

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (NSFC11372331, NSFC11772338, NSFC11232011, NSFC11572331)

作者简介: 戴龙珍 (1991-), 女, 博士研究生, 研究方向: 生物推进。E-mail: Janet1991@126.com

通信作者: 张星* (1970-), 男, 研究员, 研究方向: 流体力学数值方法, 生物推进与流固耦合。E-mail: zhangx@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 戴龙珍, 张星. 间歇式俯仰转动扑翼的自主推进[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 151-155.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0198 DAI L Z, ZHANG X. Self-propulsion of a flapping foil powered by intermittent pitching motion[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(1): 151-155.

黏性机理又称为 Bone-Lighthill 边界层薄化假设,即主动游动比滑行时的边界层变薄,因此摩擦阻力更大^[3-4,6,16]。无黏机理又称为 Garrick 机理,即间歇式驱动改变了产生推力的附加质量力与产生诱导阻力的环量力之比值^[13]。

目前,绝大多数关于仿生扑翼推进的流体力学研究主要针对连续式的垂直振荡(plunging)和俯仰旋转(pitching)两种驱动方式。近期,一些学者受到生物间歇式驱动启发,开始研究间歇式驱动扑翼的推进问题。Floryan 等^[14]通过水槽实验,测量了不同占空比(duty cycle)条件下间歇式俯仰旋转驱动扑翼的平均推力和平均输出功率。他们的研究表明,间歇式驱动普遍比连续式驱动在能效利用率方面占优。同时,他们还发现占空比的改变基本不影响一个完整驱动周期内产生的涡的位置与强度。Moored 等^[15]针对间歇式俯仰旋转驱动的扑翼推进问题,开展了无黏和有黏的数值模拟。无黏的数值模拟结果表明,在相同推进速度的条件下,间歇式驱动在能效方面占优。有黏的数值模拟结果表明,在一定的速度范围内,间歇式驱动在能效方面占优。上述实验和数值研究的主要目标是比较连续式和间歇时驱动的推进性能,对于间歇式驱动的流场结构研究较少,也缺少详细的描述。

本文通过 Navier-Stokes 方程和牛顿方程的耦合求解,开展连续式和间歇式俯仰旋转扑翼自主推进问题的有黏数值模拟。研究目标是考查一定雷诺数范围内间歇式驱动能否提高能效,同时对间歇式驱动和连续式驱动产生的流场结构进行对比分析。

1 计算模型

1.1 问题描述与控制方程

我们考虑一个俯仰旋转驱动薄板翼的自主推进问题。扑翼的弦长为 L , 旋转角度随时间的变化规律可以采用如下的分段函数描述(如图 1 所示):

$$\theta(t) = \begin{cases} Tr(t)[\theta_0 \sin(2\pi ft)], & 0 \leq t < T_b \\ 0, & T_b \leq t < T_{cyc} \end{cases} \quad (1)$$

$$Tr(t) = \begin{cases} \{\tanh(mt)\tanh[m(t-1)]\}^2, & DC < 1 \\ 1, & DC = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 θ_0 为转角幅值, f 为扑动频率。 T_{cyc} 为一个包含主动扑动与被动滑行的完整周期, $T_b = 1/f$ 为一个完整周期中主动扑动的时间, $DC = T_b/T_{cyc}$ 为占空比。 $Tr(t)$ 为主动驱动和被动滑行之间的光滑过渡函数(为文献[15]中过渡函数的平方), 其中 m 是过渡区长短的控制参数。

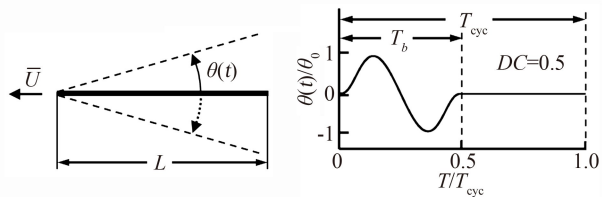


图1 俯仰旋转扑翼的自主推进问题

Fig. 1 Self-propulsion of a pitching foil

我们假设流动为二维层流。流动可以由如下无量纲形式的不可压缩 Navier-Stokes 方程描述:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re_f} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

其中 \mathbf{u} 和 p 代表流体的速度和压力。本研究采用浸入边界方法求解流体方程,即通过引入适当的体积力源项 \mathbf{f} 间接地实现扑翼表面的无滑移边界条件。因此, \mathbf{f} 同时代表了扑翼和流体间的相互作用力。无量纲化的参考长度、参考速度和参考时间分别为 L 、 fL 和 $1/f$ 。雷诺数的定义为: $Re_f = fL^2/\nu$, 这里 ν 是流体的运动学黏性系数。

薄板翼可以在水平方向上自主推进(竖直方向的位移通过俯仰旋转指定)。薄板翼在水平方向的运动可以由如下无量纲形式的牛顿第二定律描述:

$$\beta \frac{d^2 X}{dt^2} = \sum F_x \Delta s \quad (5)$$

其中 $\beta = (\rho_s \delta) / (\rho_f L)$ 为质量比, 这里 ρ_s 和 ρ_f 分别代表扑翼和流体的密度, δ 为扑翼的厚度。 F_x 代表沿扑翼表面分布的(无量纲)拉格朗日力水平分量, Δs 为拉格朗日网格的无量纲宽度(与求解流体方程欧拉网格的无量纲宽度相等)。在浸入边界方法中,沿物面分布的拉格朗日力与出现在流体动量方程中的体积力源项可以通过适当的插值方法相互转换。

1.2 计算方法与计算网格

我们采用直接加力的浸入边界方法处理运动边界,采用离散流函数方法求解不可压 NS 方程^[17]。我们采用欧拉方法离散时间牛顿方程中的时间导数项,并且采用松耦合方法实现流体和动力学方程的耦合。我们在前期工作中,已经通过大量的标准算例,对该求解器进行了严格的验证^[17-18]。

本研究采用多块拼接的直角坐标网格(如图 2 所示),以运动翼周围的矩形区域为网格最密的中心块,围绕它向外增加环形块;每增加一块,网格的几何尺寸加倍。该文中总计算区域为 $[-23L, 23L] \times [-6L, 6L]$, 网格总数为 85 万,一共用了 5 个块。其中,中心块所占区域为 $[-15L, 15L] \times [-L, L]$, 网格尺寸为 $0.01L$ 。

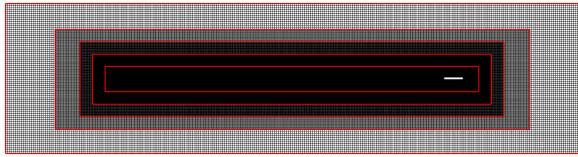


图 2 计算区域和网格划分(白色直线为初始时刻的薄板翼)
Fig. 2 Computational domain and meshing
(the white line denotes the initial position of the thin flat plate)

1.3 控制参数

为了在相同推进速度的条件下对比连续式驱动和间歇式驱动的推进效率。我们模拟了在基准频率 f_0 驱动下, 占空比为 0.2-0.9 的间歇式驱动的自主推进问题。同时, 我们还模拟了 0.3-0.9 倍基准频率下连续式驱动(占空比为 1.0)的自主推进问题。模拟采用的驱动频率和占空比如表 1 所示。数值模拟采用的其它参数(雷诺数、质量比、转角幅值和过渡区控制参数)如表 2 所示。

表 1 数值模拟所用的驱动频率和占空比

Table 1 Driving frequencies and duty cycles in the simulations

	频率比 (f/f_0)	占空比 (DC)
连续式	1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.5, 0.3	1.0
间歇式	1.0	0.2, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9

表 2 模拟所用的其它控制参数

Table 2 Other parameters used in the simulations

Re_f	β	θ_0	m
600	0.1	7°	7.0

注: 雷诺数 Re_f 基于基准频率 f_0 得到, 其它驱动频率下的雷诺数可以按比例进行换算。

2 结果与讨论

2.1 瞬时推进速度

图 3 对比了连续式驱动($f=0.7 f_0$)和间歇式驱动($DC=0.5$)条件下(两者的平均推进速度相同), 头部的水平速度随时间的变化规律。由图可见, 间歇

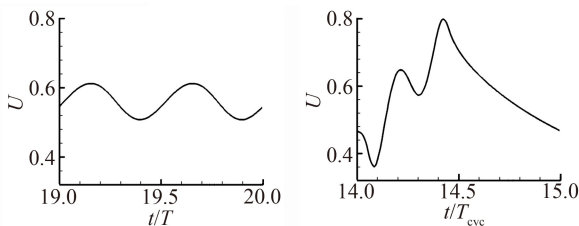


图 3 一个周期内头部水平速度随时间的变化

(左右分别对应 $f=0.7 f_0$ 的连续式驱动和 $DC=0.5$ 的间歇式驱动, $T=1/f$ 为连续性运动的周期)

Fig. 3 Horizontal velocity of the head as a function of time
(left and right plots correspond to the continuous actuation with $f=0.7 f_0$ and the intermittent actuation with $DC=0.5$ respectively)

式驱动的主动段存在两段加速和两段减速的复杂历程, 完全不同于连续式驱动的简谐振荡规律。间歇式驱动的滑行段是一个速度单调下降的减速段。

2.2 水平力与侧向力

图 4 对比了连续式驱动($f=0.7 f_0$)和间歇式驱动($DC=0.5$)条件下(两者的平均推进速度相同), 水平合力随时间的变化规律。如图可见, 间歇式驱动产生的水平合力在主动段出现了三个波峰和两个波谷, 完全偏离了连续式驱动对应的(近似)简谐振荡规律。进入被动段后, 水平合力表现为缓慢下降的阻力。

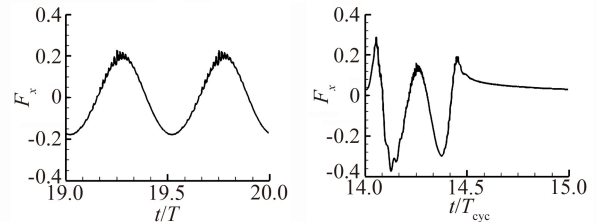


图 4 一个周期内水平合力随时间的变化

(左右分别对应连续式驱动 $f=0.7 f_0$ 和 $DC=0.5$ 的间歇式驱动, $T=1/f$ 为连续性运动的周期)

Fig. 4 Resultant horizontal force as a function of time
(left and right plots correspond to the continuous actuation with $f=0.7 f_0$ and the intermittent actuation with $DC=0.5$ respectively)

图 5 对比了连续式驱动($f=0.7 f_0$)和间歇式驱动($DC=0.5$)条件下, 侧向合力随时间的变化规律。间歇式驱动产生的侧向合力在主动段出现两个波峰和两个波谷, 同样完全偏离了(近似)简谐振荡的规律。在进入被动段后, 侧向合力出现了一段时间的高频振荡, 然后才逐渐衰减到零。

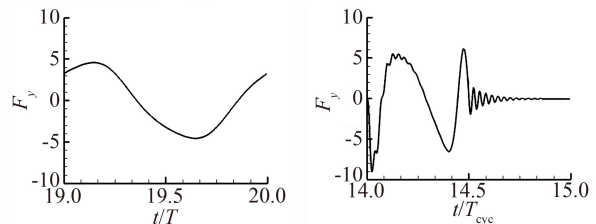


图 5 一个周期内侧向合力随时间的变化(左右分别对应连续式驱动 $f=0.7 f_0$ 和 $DC=0.5$ 的间歇式驱动, $T=1/f$ 为连续性运动的周期)

Fig. 5 Resultant lateral force as a function of time
(left and right plots correspond to the continuous actuation with $f=0.7 f_0$ and the intermittent actuation with $DC=0.5$ respectively)

2.3 运动能耗

我们首先定义两个衡量推进性能的重要指标, 即平均推进速度和平均单位质量的输入功率:

$$\bar{U} = \frac{1}{T_{\text{cyc}}} \int_0^{T_{\text{cyc}}} u_x|_{s=0} dt \quad (6)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{T_{\text{cyc}}} \int_0^{T_{\text{cyc}}} (F_x u_x + F_y u_y) ds dt \quad (7)$$

这里 \bar{U} 和 \bar{P} 为平均速度和平均输入功率, u_x 和 u_y 为水平和侧向速度。本研究的数值模拟采用无量纲形式的控制方程。因此,这里得到的 \bar{U} 和 \bar{P} 均为无量纲量。

我们用单位质量单位距离的能耗(COT)来衡量推进效率,COT的定义为:

$$COT = \frac{\bar{P}^*}{m \bar{U}^*} \quad (8)$$

这里 \bar{P}^* 和 \bar{U}^* 分别是有量纲的输入功率和推进速度, m 是扑翼的质量。COT的纲量是加速度,它与式(6)和式(7)中定义无量纲量之间存在如下关系:

$$COT = \frac{f^2 L}{\beta} \cdot \frac{\bar{P}}{\bar{U}} \quad (9)$$

连续式和间歇式驱动的能耗与推进速度关系如图6所示(推进速度和能耗用基准频率 f_0 的连续式驱动的结果进行了归一化,并且在横坐标上对应给出了以推进速度定义的雷诺数 $Re_c = \bar{U}^* L / \nu$)。由图可见,如果推进速度较小,相同速度下连续式驱动的能耗更低。反之,如果推进速度较大,则相同速度下间歇式驱动的能耗更低。两种驱动方式的能耗在 Re_c 约为 340 时基本持平。

在 Moored 等的有黏数值模拟中,雷诺数的范围是 2500 至 7500,比本文雷诺数大约高一个量级。他们观察到的 COT 随推进速度的变化规律和本文的结果在定性上基本一致^[15]。

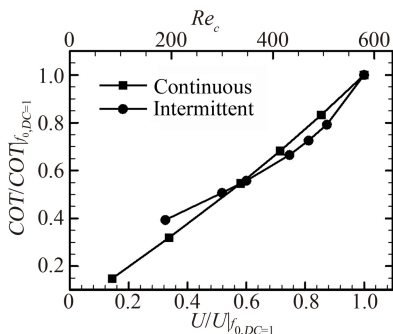


图6 COT随推进速度的变化

Fig. 6 Variation of COT with the cruising velocity

2.4 流场结构

连续式和间歇式推进得到的流场结构如图7所示,这里以推进速度定义的雷诺数为 340(对应于图6中的COT趋势转变点)。

如图7所示,在连续式推进中,一个扑动周期内有两个涡从尾缘脱落。脱落的涡在尾迹中以反卡门

涡街的形式水平排列。因此,流场的平均速度剖面可以保持上下对称。在间歇式推进中,一个完整的周期(括主动驱动和被动滑行)内有三个涡从尾缘脱落。其中,逆时针旋转的涡(红色代表的涡)由于涡之间的相互作用被撕裂为两部分,并且和顺时针旋转的涡(蓝色代表的涡)组成上下两排涡对。由于上面一排涡对的强度明显低于下面一排流场的,平均速度剖面上下对称性被打破。可以推断,间歇式驱动将会带来平均侧向力不为零的问题。这也是在仿生水下航行器的设计中需要考虑的问题。

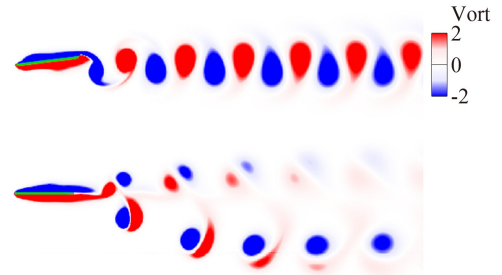


图7 连续式驱动(上)和间歇式驱动(下)的流场结构对比

Fig. 7 Comparison of the flow structures in continuous (upper) and intermittent (lower) propulsions

3 结论

我们通过数值模拟研究了连续式和间歇式俯仰转动驱动的扑翼自主推进问题。研究表明,在同样推进速度的前提下,如果推进速度较低,连续式推进所需能耗较低;如果推进速度较高,则间歇式推进所需能耗较低。研究还发现,间歇式驱动产生的流场结构呈现明显的上下不对称性,因此会产生一定的平均侧向力。本研究得到的结果对于仿生水下航行器的设计有一定的参考价值。

致谢:感谢国家超级计算天津中心提供的计算机时。

参 考 文 献:

- [1] Haury L, Weihs D. Energetically efficient swimming behavior of negatively buoyant zooplankton [J]. Limnology and Oceanography, 1976, 21(6): 797-803.
- [2] Gleiss A C, Jorgensen, S J, Liebsch N, et al. Convergent evolution in locomotory patterns of flying and swimming animals[J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 2555-2559.
- [3] Weihs D. Energetic advantages of burst swimming of fish[J]. Journal of Theoretical Biology, 1974, 48(1): 215-229.
- [4] Weihs D. Energetic significance of changes in swimming modes during growth of larval anchovy[J]. Fishery Bulletin, 1980, 77(3): 597-604.
- [5] Videler J J. Swimming movements, body structure and propulsion in cod Gadus morhua[J]. Symposia of the Zoological Society of London, 1981, 48: 1-27.

- [6] Videler J J, Weihs D. Energetic advantages of burst-and-coast swimming of fish at high speeds[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 97(4): 169-178.
- [7] Blake R W. Functional design and burst-and-coast swimming in fishes[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1983, 61(11): 2491-2494.
- [8] Muller U K, Stamhuis E J, Videler J J. Hydrodynamics of unsteady fish swimming and the effect of body size: comparing the flow fields of fish larvae and adults [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(2): 193-206.
- [9] Fish F E, Fegely J F, Xanthopoulos C J. Burst-and-coast swimming in schooling fish (*Notemigonus Crysoleucas*) with implications for energy economy[J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology*, 1991, 100(3): 633-637.
- [10] Wu G H, Yang Y, Zeng L J. Kinematics, hydrodynamics and energetic advantages of burst-and-coast swimming of koi carps (*Cyprinus carpio koi*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(12): 2181-2191.
- [11] Yang Y, Wu G H, Yu Y L, et al. A study on flow physics of burst-and-coast swimming of koi carp (*Cyprinus carpio koi*) based on measurements and numerical simulations[J]. *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*, 2010, 1(1): 30-38.
- [12] Chung M H. On burst-and-coast swimming performance in fish-like locomotion[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2009, 4(3): 036001.
- [13] Akoz E, Moored K W. Unsteady propulsion by an intermittent swimming gait[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 834: 149-172.
- [14] Floryan D, Van Buren T, Smits A J. Forces and energetics of intermittent swimming[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2017, 33(4): 725-732.
- [15] Moored K, Akoz E, Liu G, et al. Disentangling the inviscid and viscous energy saving mechanisms of intermittent swimming[C]//47th AIAA Fluid Dynamics Conference, 2017.
- [16] Lighthill M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 1971, 179(1005): 125-138.
- [17] Wang S Z, Zhang X. An immersed boundary method based on discrete stream function formulation for two- and three-dimensional incompressible flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230: 3479-99.
- [18] Zhu X J, He G W, Zhang X. Numerical study on hydrodynamic effect of flexibility in a self-propelled plunging foil[J]. *Computers & Fluids*, 2014, 97(6): 1-20.

《空气动力学学报》第六届编委会名单

顾问：张涵信 俞鸿儒 童秉纲 周 恒 邓小刚

主编：唐志共

副主编：任玉新 张来平 王志川 沈 清 张新宇

赵 宁 孙 茂 高正红 Zhijian WANG(美国)

编委：(以下排名按拼音顺序排列)

白 鹏 白 文 蔡广平 蔡晋生 曹 伟 陈坚强 陈平剑 程克明

丁 航 段卓毅 高 超 高剑军 顾 明 桂业伟 何 枫 何开锋

黄 勇 华 俊 黄章峰 雷娟棉 梁习锋 黎作武 刘 洪 李晓东

李新亮 廖达雄 刘 君 黎 军 刘沛清 刘 伟 罗振兵 马汉东

毛枚良 倪鸿礼 孙泉华 余振苏 史志伟 宋文萍 谭慧俊 唐 伟

陶建军 王健平 王晋军 王文正 王勋年 王延奎 王运涛 蔚喜军

吴军强 招启军 许春晓 杨 超 杨基明 杨彦广 杨希明 叶友达

叶正寅 尤延铖 余永亮 袁先旭 易 贤 郑 耀

Chaoqun LIU(美国) Chiwang SHU(美国) Kun XU(中国香港)

Shan ZHONG(英国) Xiaolin ZHONG(美国)

编辑部主任：孙宗祥

编 辑：贾 峰 徐 燕 王 颖

英文编审：姜 屹

空气动力学学报

(双月刊,1980年创刊)

第36卷第1期(总第168期)2018年02月

Acta Aerodynamica Sinica

(Bimonthly started in 1980)

Vol.36 No.1(No.168) Feb.,2018

主办单位 中国空气动力学会

编辑出版 空气动力学学报编辑部

621000(四川绵阳二环路南段

6号13信箱11分箱)

主 编 唐 志 共

印 刷 绵阳教育印刷厂

国内发行 绵阳市邮政局(全国各邮政局订购)

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(北京399信箱,100048)

网 址 <http://www.kqdlxxb.com/>

电子邮箱 kqdlxxb@163.com

Sponsored by China Aerodynamics Research Society

Edited & Published by the Editorial Board of

Acta Aerodynamica Sinica(P. O. Box 13-11, 6 South
Section of Second Ring Road, Mianyang, Sichuan, China)

Editor-in-chief Tang Zhigong

Printed by Mianyang Education Printing Co.,
Ltd

Distributed Abroad by China International Book
Trading Co. (P. O. Box 399, Beijing, 100048, China)

Website: <http://www.kqdlxxb.com/>

E-mail: kqdlxxb@163.com

邮发代号:62-27

国外代号:4786Q

定 价:30.00元

ISSN 0258-1825



9 770258 182186

