中国科学: 技术科学 2022 年 第 52 卷 第 6 期: 893 ~ 910
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

鸟翼空气动力学机理的研究现状和进展综述

宋笔锋[1,2], 稂鑫雨[1], 薛栋[1*], 杨文青[1,3], 包晗[1], 刘丹[1], 吴涛[1], 刘康[1], 宋文萍[1,3], 王跃[1]

1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;
2. 西北工业大学深圳研究院, 深圳 518057;
3. 西北工业大学长三角研究院, 太仓 215400;
* E-mail: xuedong@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-31; 接受日期: 2021-06-16; 网络版发表日期: 2021-11-08
国家重点研发计划(编号: 2017YFB1300102)、国家自然科学基金(批准号: 11872314, U1613227, 11902103)和陕西省重点研发计划(编号: 2020GY-154, 2020ZDLGY06-05, 2021ZDLGY09-10)资助项目

摘要 首先, 本文力图比较客观全面地回顾、总结和分析影响鸟翼气动特性的四种因素间单独与耦合效应的空气动力学机理研究的现状和存在的问题. 其次, 在分析和研究现有成果的基础上, 根据计算和实验手段等的进步与限制, 提出了需要进一步研究的问题、策略和方法. 文中涉及的四种主要因素包括鸟翼静态几何外形、四种宏观扑动方式、翼的展弦向动态柔性变形和最近比较受关注的三种小尺度流动控制结构等. 文中所讨论的通过力系和涡系分析, 在充分考虑翼的静态几何外形、宏观扑动形式及翼的动态柔性变形影响的条件下, 进一步揭示三种小尺度流动控制结构单独的气动机理和作用的策略和方法, 以及探索这四种因素相互耦合条件下, 自然界鸟翼的气动机理和作用的策略和方法, 具有一定的理论价值. 本文的观点、方法和结论对提高仿生飞行器具有参考意义.

关键词 鸟类飞行机理, 宏观扑动, 翼梢开缝, 小翼羽, 前后缘锯齿

1 引言

在鸟的飞行中, 翼是最基本也是最重要的升力和推力产生部件, 其与昆虫和蝙蝠的飞行方式有很大不同[1]. 影响鸟翼空气动力学特性的主要因素包括: 静态几何外形、多自由度扑动、动态柔性变形和多种小尺度的流动控制结构. 其中, 静态几何外形主要指其在非运动状态下鸟翼的平面形状和翼剖面(翼型)等, 该外形可以看成飞行中鸟翼动态几何形状的初始值; 宏观扑动主要指鸟翼的挥舞、扭转、前后扫掠、展向折叠等4种主要扑动运动形式; 动态柔性变形主要指鸟翼在空气动力和运动惯性力作用下沿翼展展向和弦向的弹性变形; 小尺度流动控制结构特指鸟翼上存在的翼梢开缝、前/后缘锯齿和前缘小翼羽等微小型结构等, 见图1.

目前, 国内外关于鸟翼的静态几何外形参数、宏观扑动和翼的动态柔性变形等已有较多研究成果, 并出现了基于这些研究成果的仿鸟飞行器, 如德国Festo公司的Smart bird[2]、美国的蜂鸟[3]、荷兰的DelFly系列[4], 以及本论文作者团队的“信鸽”[5]和南京航空航天

引用格式: 宋笔锋, 稂鑫雨, 薛栋, 等. 鸟翼空气动力学机理的研究现状和进展综述. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 893–910
Song B F, Lang X Y, Xue D, et al. A review of the research status and progress on the aerodynamic mechanism of bird wings (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 893–910, doi: 10.1360/SST-2020-0515

© 2021 《中国科学》杂志社

图 1 (网络版彩图)附属于白鸽翅膀的几种典型小尺度流动控制结构

Figure 1 (Color online) Several typical small-scale flow control structures attached to pigeon wings.

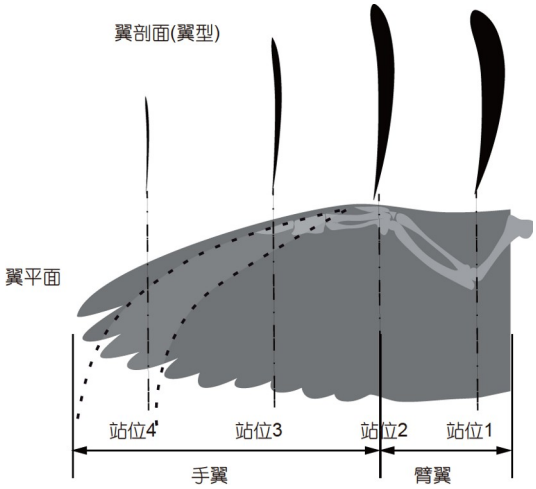

图 2 鸟类翅膀典型平面和沿翼展方向不同站位剖面形状

Figure 2 Typical planform of bird wing and cross-sectional shape of different stations along the spanwise direction.

大学的“金雕”[6]等.

关于鸟翼小尺度流动控制结构对飞行中流场结构和气动力的作用研究相对较少也较晚，但近几年的最新研究[7~9]已初步证明几种小尺度流动控制结构对翼的气动力有特殊的贡献. 例如，文献[10~12]的初步研究分别指出：翼梢开缝可降低的阻力系数达到30%(平飞状态)；前缘锯齿的升阻比增量达到39.2%(起降状态)；只占鸟翼展长17.5%的前缘小翼羽可以带来22%的升力增量(起降状态).

本文试图就以上四种影响鸟翼空气动力学特性因素的单独和相互耦合的空气动力学机理研究的现状、存在的问题和后续研究方向进行评述和分析.

2 研究现状回顾

以下分别针对鸟翼的静态几何外形、宏观扑动、动态柔性变形、附属于鸟翼的小尺度流动结构各自的气动机理，以及这四种因素的同步协调耦合运动气动机理研究的发展状况予以回顾分析.

2.1 鸟翼的静态几何形状研究

鸟类翅膀典型的静态几何外形可用其平面外形和剖面外形(翼型)来描述, 如图2所示.

关于鸟翼的静态几何外形的研究历史悠久，最早可追溯到Norberg[13]、Videler等人[14]、Liu等人[15]、Bachman[16]的研究. 近年来, 随着空气动力学数值仿真计算和实验手段的能力和水平不断提高，仍然有不少新的研究出现.

2.1.1 关于平面几何外形

鸟类翅膀的平面几何形状参数包括翼面积、展弦比、后掠角等. 不同的翼面积、展弦比以及后掠角会对其升力、阻力以及推力产生重要影响.

在不考虑扑动的飞行状态下，翅膀不同的展弦比和后掠角会显著改变其升阻力特性. 2016年，英国曼彻斯特大学的Lees等人[17]和美国蒙大拿大学的Van Oorschot等人[18]通过选取真实鸟类翅膀标本进行几何测量和风洞试验，分别研究了不同攻角下翅膀展弦比和后掠角对翅膀升力和阻力的影响. 结果表明，大展弦比翅膀通过降低诱导阻力呈现较好的低阻性能；伸展的翅膀在小攻角下具有较大的升力系数，而后掠的翅膀则在大攻角下具有较大的升力系数.

在悬停飞行时，扑翼展弦比和翼面积分布会对扑翼升力产生重要影响. 伦敦大学的Phillips等人[19]、香港科技大学的Fu等人[20]以及香港理工大学的Shahzad等人[21]通过构建仿生扑翼实验模型和计算模型，依次研究了悬停状态下刚性扑翼展弦比、柔性扑翼展弦比、柔性扑翼翼面积分布对扑翼产生升力的影响. 结果表明，不论是刚性翼还是柔性翼，适当的展弦比通过产生较大的前缘涡和维持前缘涡的稳定性方面取得折中, 能够使扑翼维持较大的升力. 不同的扑翼面积分布，使扑翼不同展向剖面在惯性载荷和气动载荷作用

下产生不同程度的扭转变形，翼面扭转通过改变前缘涡的大小以及翼上下表面压差力的作用方向，从而改变扑翼升力的大小.

在扑动前飞状态下，目前关于平面形状参数的影响研究还较少，仅有个别研究关注了采用对称翼型和对称扑动方式的鸟翼展弦比对推力性能的影响. 2018年，西安交通大学苑宗敬等人[22]的数值模拟结果研究表明，扑动前飞时，随着展弦比的增加，NACA0012扑动翼的推力性能先增大后减小.

2.1.2　关于剖面几何外形(翼型)

根据翅膀剖面外形的不同，鸟类翅膀一般被简化为两段，内段的臂翼和外段的手翼. 臂翼和手翼具有不同形状的剖面翼型(如图2)，典型的臂翼剖面较弯、较厚, 而手翼剖面则较平、较薄. 此外, 鸟类飞行时, 翅膀不同展向站位处的翼型还具有不同的动态扭转角[23].

非扑动飞行时，翼型的弯度和厚度对升阻特性的研究很早就已开展[24], 作用也已明晰, 这里不再赘述.

扑动前飞状态，鸟类翅膀剖面翼型的弯度、厚度及其排布方式是其产生高升力的重要机制. 翅膀剖面扭转虽然减小了翅膀升力的大小，但同时通过降低诱导阻力提高了扑翼的升阻比(在此指升力和诱导阻力的比值)和展向效率因子[25].

2015年，荷兰格罗宁根大学的Thielicke等人[26]通过风洞实验研究了仿鸟翅膀模型剖面翼型的弯度、厚度对前缘涡和升力的影响，从剖面几何外形特征揭示了鸟类翅膀产生高升力的机制. 结果表明，弯翼和薄翼都能起到增升的效果. 在小的斯特劳哈尔数(St)下，弯翼通过增加束缚环量增加升力，并且其还能够通过抑制前缘分离，实现气动效率的提升；在大的St下，薄翼能够促进前缘涡的产生从而实现增加升力的效果. 而鸟类翅膀在扑动飞行过程中，翼尖到翼根剖面由于挥舞位移依次降低，导致其局部斯特劳哈尔数St逐渐减小，这样翼尖平而薄的剖面和翼根弯而厚的剖面刚好可以各自发挥其产生升力的优势. 2018, Thielicke等人[27]进一步通过风洞实验研究了刚性扑翼模型的剖面翼型的扭转角对其升力和升力效率的影响，结果表明，下扑阶段，翼型较大的负扭转通过抑制前缘涡的产生减小了升力；但与此同时，剖面扭转通过减小分离实现附体流动，降低了由于涡脱落带来的能量损耗，从而起到降低产生扑翼升力能耗的作用.

2.2　鸟翼宏观扑动方式研究

翅膀的扑动方式和扑动规律对鸟类飞行过程中高升力和大推力的形成至关重要. 典型的鸟类翅膀宏观扑动包含挥舞、扭转、扫掠和折叠[28~31]，如图3所示，其中挥舞运动是最基本的扑动形式，其他运动通过与挥舞运动的叠加, 起到不同的作用.

早期，研究人员通过将鸟类翅膀的挥舞运动简化为二维翼型的沉浮运动，揭示了扑翼产生推力的机理[32,33]，并进一步研究了运动参数(如减缩频率和St)对沉浮翼型产生推力大小的影响[34]. 通过将三维翅膀的挥舞和扭转运动简化为二维翼型的沉浮和俯仰运动，发现沉浮和俯仰运动的耦合能够带来翼型推力特性的大幅改善[35]，且两种运动的相位差在90°左右时，能够获得最优的推进效率[36]. 通过将鸟类翅膀的前后扫掠运动简化为翼型的前后振荡，发现了俯仰沉浮翼型的下扑前扫和上扑后掠运动都有利于提升推力和推进效率[37]. 进一步的研究表明，在鸟类慢飞时的下扑阶段，向前扫掠还能够起到一定的增加升力的作用，并且随着飞行速度的改变，鸟类会自动调整扫掠运动规律以改变其气动作用效果[38,39]. 鸟类翅膀的折叠运动会导致展长的动态变化，人们通过简化模型的变展长扑动研究发现，展向折叠运动能够增加翼的瞬时和平均升力系数[40]. 进一步的研究表明，翅膀的折叠运动还能

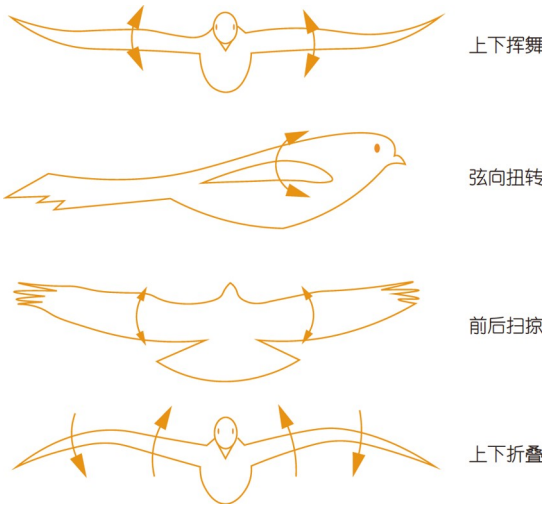

图 3　(网络版彩图)鸟翼挥舞、扭转、扫掠、折叠示意图
Figure 3　(Color online) Schematic diagram of bird wing's flapping, twisting, sweeping, and folding.

够提高其产生升力的效率并减小能量的消耗[41~43].

2.3 鸟翼的动态柔性变形效应研究

动态柔性变形对翅膀的推力、升力和功耗会产生显著的影响. 鸟类翅膀在扑动过程中存在着显著的柔性变形, 2008年, Usherwood[44]通过对鸽子翅膀标本在旋转状态时翼面变形的测量发现, 随着气动载荷的增加, 翼尖的柔性变形程度越大. 2011年, Crandell等人[45]发现了鸽子翅膀标本在上扑阶段存在独特的翼尖翻转现象, 这一柔性变形特征使得鸽子翅膀在上扑时仍能产生身体重量36%的升力. 2015年, Wolf等人[46]利用三维立体摄影测量技术发现猫头鹰翅膀的剖面翼型弯度在下扑行程中逐渐增加, 在上扑行程中逐渐减小. 2016年, Winzen等人[47]利用PIV对仓鸮的翅膀周围流场进行了测量, 发现随着雷诺数的增加, 仓鸮翅膀剖面翼型弯度逐渐减小, 弯度自适应的变化有助于在翼面维持近似恒定的气动载荷, 并且大迎角下的弯度变形有助于减小流动分离.

Shyy等人[48]全面综述了柔性扑翼气弹方面的研究进展, 指出适当的弦向和展向柔性对推力和推进效率均有提升作用, 但过高的柔性会造成推力损失. Heathcote等人[49]对弦向和展向柔性对扑翼推力的影响做了比较深入的实验研究. 2007年, Heathcote等人[49]通过水洞实验研究了扑动翼的弦向柔性对推力和推进效率的影响. 研究发现, 适当柔度的扑动翼可以提高推力系数和推进效率, 且柔性扑动翼在变形相位角为95°~100°时, 推进效率最高; 流场结构和力系数测量结果进一步表明, 尾涡强度越强, 推力越大, 前缘涡越弱, 推进效率越高. 2008年, Heathcote等人[50]采用同样的实验方法进一步研究了NACA0012矩形扑动翼的展向柔性对推力系数和推进效率的影响. 结果表明, St大于0.2时, 具有适当展向柔性的扑动翼推进效率较高, 过大的展向柔性会造成翼根和翼尖的挥舞运动反向, 对推力产生不利影响. 2009年, Wu等人[51]通过实验研究了扑翼气动特性与动态柔性变形的关系. 研究结果表明, 扑动翼的结构特性对气动特性的影响很大, 过柔和过刚的扑动翼结构都不能获得好的气动特性和气动效率. Kang等人[52]利用CFD/CSD (computational fluid dynamics/computational structural dynamics)耦合求解方法研究了弦向柔性、展向柔性对扑翼推进效率的影响, 发现机翼在其共振频率附近扑动时的推力最大, 且当以一阶固有频率一半的频率扑动时对应的推进效率最佳.

在研究鸟类柔性变形的气动机理所涉及的计算方法方面, 国内外开展了不少研究[53~57].

Zhu[58]发展了一套基于三维边界元法和二维非线性薄钢板结构动力学模型方法的气动结构耦合分析求解器, 并将数值模拟结果与 Heathcote等人[50]做沉浮运动的柔性扑翼实验结果进行对比, 验证了算法的正确性, 还分析了惯性载荷在机翼柔性结构变形中所起的作用, 并且探讨了展向柔性变形和弦向柔性变形对气动力的影响, 结果表明, 展向柔性结构变形能够明显提高扑翼的推力特性.

Liani等人[59]发展了一套基于非定常面元法和二维结构动力学方程的气动结构耦合求解器, 研究了不同频率下柔性扑翼的气动弹性响应, 通过对做沉浮运动的碳纤维平板矩形机翼在不同频率下的气动结构耦合特性进行数值计算, 发现在计算考虑的所有频率范围内, 柔性结构变形对扑翼气动特性有显著影响.

作者团队也在多项国家自然科学基金的资助下, 开展了考虑扑翼动态柔性变形影响的研究[60~63]. 如杨文青[60]发展了基于非定常雷诺平均N-S方程和结构静力学有限元方法的气动结构耦合求解器, 初步研究了考虑柔性变形的微型扑翼气动特性. 但是该方法没有考虑到惯性力和运动加速度的影响, 而对于碳杆-薄膜结构扑翼飞行器, 惯性力和运动加速度的影响是不应忽视的. 陈利丽[61]在其研究基础上, 进一步发展了基于结构动力学方法的扑翼CFD/CSD耦合求解程序, 通过考虑惯性力的影响, 更加精确地模拟柔性扑翼的气动结构特性, 发现相比于刚性扑翼, 采用合适的碳杆布局和碳杆直径实现的柔性扑翼, 能够同时得到较优的升力和推力特性.

2.4 小尺度流动控制结构的空气动力学机理研究

2.4.1 翼梢开缝的作用

鸟类的翼梢开缝, 即沿弦向和展向分裂和散布的初级飞羽的外侧部分, 如图4所示, 它被认为是进化过程中提高飞行效率的产物. 许多鸟类的翅膀上能观察到翼梢开缝结构, 像鹰、雕、秃鹫这类大型的滑翔鸟类的翼梢开缝会更加明显, 小型的、非滑翔鸟类的翼梢开缝虽不显著, 但也同样重要[64,65]. 鸟类处于起飞、降落、平飞以及机动状态时, 均能观察到翼梢开

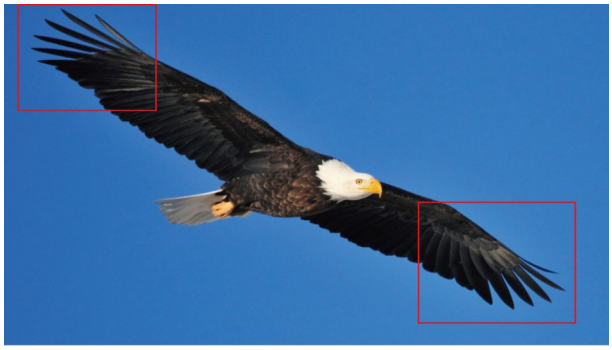

图 4　(网络版彩图)海雕的翼梢羽毛开缝
Figure 4　(Color online) Wingtip slots structure of bald eagle.

缝结构的存在.

多年来, 生物学家对翼梢开缝的功能存在很多猜测, 包括降低噪声、防止羽毛磨损、减少翼的扭转、控制和稳定滚转以及偏航、防止失速、增加升力和减小阻力等[66]. 学者们围绕这些猜测展开了研究, 目前, 关于翼梢开缝对鸟翼气动性能作用主要有以下三个方面.

(1) 翼梢开缝有减阻作用. 美国杜克大学的Tuker[66]建立了反映诱导阻力系数的翼展系数M(如式(1)), 通过对比不同类型开缝翼梢的翼展系数, 发现了翼梢开缝存在减少诱导阻力的作用, 流场观测显示翼梢开缝对翼尖涡的破碎是其影响诱导阻力的关键.

$$M = 1 / k^{1/2}, \tag{1}$$

式中, k为诱导阻力系数, 可表示为

$$k = \mathrm{d}D / \mathrm{d}L^2 \pi q b^2, \tag{2}$$

式中, D为阻力, L为升力, q为动压, b为翼展.

1995年, Tuker[67]又深入研究了翼梢开缝在哈里斯鹰的滑翔飞行中起到的作用, 通过剪断去除活的哈里斯鹰的翼梢羽毛, 发现总阻力与滑翔速度和翼梢开缝的数量有关, 有翼梢的哈里斯鹰的翅膀承受的阻力比无翼梢的要小. 2010年, 马来西亚雪兰莪大学的Hossain等人[10]利用风洞实验测试了不同上反角的开缝翼梢的气动力后发现, 带有上反角的翼梢开缝可以提高升力, 降低阻力. 2017年, 英国牛津大学的Kleinheerenbrink等人[8]通过粒子图像测速法(particle image velocimetry, PIV)测量了在风洞中无约束飞行的寒鸦翼梢周围的气流及其尾迹, 发现翼梢开缝使鸟类在扑动和滑翔时都会产生独特的多核心涡尾迹, 他们认为开缝翼梢是为了提高扑动飞行的性能而进化的. 2018年, 美国伊利诺伊大学香槟分校的Lynch等人[68]对比了不同翼梢迎角、开缝宽度和上反角的鸟翼气动性能后得出结论, 翼梢开缝宽度对鸟翼的影响与翼梢的非平面/平面性(有/无上反角)对鸟翼的影响无关, 开缝宽度与上反角对鸟翼的气动性能影响互不干扰, 非平面翼梢能够减少诱导阻力.

(2) 翼梢开缝对于升力的作用机理还不明确. 2001年, 美国佐治亚理工学院的Smith等人[65]对比不同空间位置的翼梢小翼和原始鸟翼, 发现平直的开缝翼梢相较同等面积的基础翼能产生更多的升力, 增加开缝翼梢的扭转角和上反角都能不同程度地增加升力, 进而提高升阻比. 2013年, 美国俄克拉何马州立大学的Mitchell等人[69]在风洞中测试了不同开缝长度的鸟翼升力, 发现虽然不开缝的鸟翼比开缝翼的面积小, 它的气动性能却更好, 且翼梢长度过大会使得升力性能逐渐变差. 2014年, 印度斯坦大学的Saiteja等人[70]对比了有无翼梢开缝的两组鸟翼气动性能后提出, 开缝翼梢会降低升力系数, 但同时也减小了阻力, 因此开缝翼梢的升阻比会增大. 同年, 澳大利亚维多利亚大学的Fluck等人[71]使用了一种考虑黏性效应的改进型升力线模型来研究翼梢数量、上反角和扭转角对鸟翼升阻力的影响. 结果表明, 增加开缝翼梢的扭转角可以缓解失速, 每个翼梢以不同的上反角垂直展开后, 在升阻比、失速特性和最大可实现升力等方面均有较好提升. 2018年, 马来西亚国际伊斯兰大学的Siddiqui等人[72]研究了柔性和上反角对开缝翼梢的影响, 发现带有上反翼梢的刚性翼具有最大升力系数, 柔性对减阻和延缓失速有着积极的作用. 作者团队[73]在2017年通过风洞实验方法对比研究了分别覆盖羽毛和薄膜的扑翼的空气动力学特性, 发现羽毛翼在上扑阶段形成的翼梢开缝能够减小该阶段的负升力, 从而产生更大的平均升力.

(3) 翼梢开缝有增大偏航力矩的作用. 1981年, 美国波特兰州立大学的Withers[64]对比了开缝鹰翼和秃鹫单根羽毛的气动特性, 发现鸟类翼梢羽毛开缝显著地增大了偏航力矩, 他提出翼梢羽毛开缝的主要作用是为了帮助鸟类调整姿态和转向. 2006年, 德国达姆施塔特工业大学的Sachs等人[74]研究了带后掠角的开缝翼梢的作用后得出, 与翼梢无后掠角的鸟翼相比, 当存在侧滑角时, 带后掠角的开缝翼梢能产生较大的航

向静稳定力矩, 并随升力系数的增大而显著增大.

翼梢开缝在鸟类飞行中起到的显著作用激发了飞行器设计者的灵感. 德国Festo公司设计的“雨燕”(BionicSwift)采用了可重叠/展开的仿真羽毛翼[75]. 在上扑时机翼的羽毛张开, 形成类似翼梢开缝的现象(图5), 使得空气流过翅膀而减少上扑阻力; 在下扑时开缝闭合, 产生更多的升力.

此外, 空客公司公布的“猛禽”(Bird of Prey)概念机[76]和佐治亚理工大学对美国海军陆战队“龙眼”(DragonEye)无人机的改进机型[77], 都是翼梢开缝结构在飞行器设计方面具有应用前景的有效证明(图6和7).

2.4.2 前/后缘锯齿的作用

前缘锯齿常见于白鸽(如图1所示)等鸟类翅膀前端靠近身体连接处, 呈现细密状绒毛锯齿结构. 后缘锯齿在鸟类中的存在更加广泛, 只要是覆羽类鸟类如白鸽、大雁和北极燕鸥等, 翅膀展开后羽毛鳞次栉比地排列即可在端头形成明显的锯齿结构.

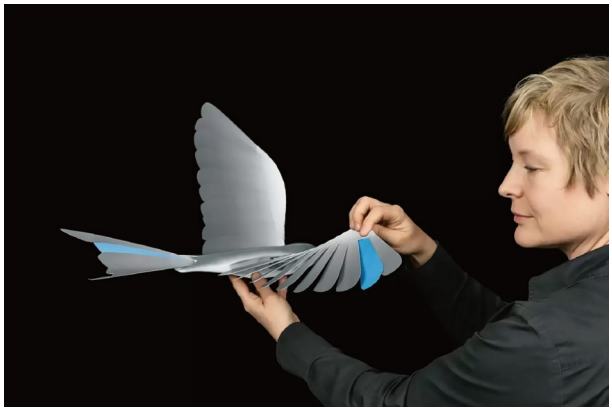

图 5 (网络版彩图) Festo公司设计的仿鸟机器人“雨燕”[75]
Figure 5 (Color online) BionicSwift, a bird-like robot designed by Festo [75].

图 6 (网络版彩图)空客公司发布的“猛禽”概念飞机[76]
Figure 6 (Color online) Airbus' "Bird of Prey" [76].

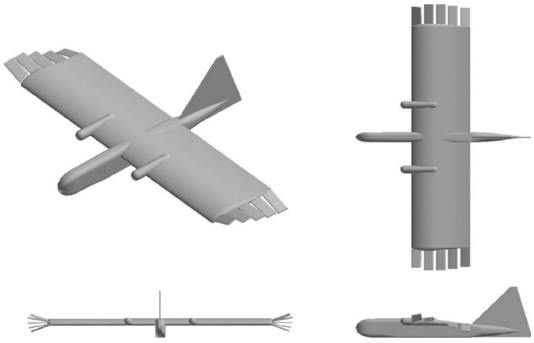

图 7 (网络版彩图)应用仿鸟翼梢开缝的“龙眼”无人机[77]
Figure 7 (Color online) Application of the wingtip slots structure on the DragonEye unmanned aerial vehicle [77].

无论是在鸟类飞行的巡航平飞阶段, 还是在鸟类飞行的起飞降落阶段, 只要鸟类翅膀展开, 前/后缘结构就会起一定的作用. 目前, 国内外的研究人员围绕前/后缘噪声的控制作用开展了大量研究[9,78~82], 证实了前/后缘锯齿的降噪效果, 阐明了降噪机理, 并成功应用于螺旋桨、风力机叶片的仿生降噪设计. 同时, 前/后缘锯齿对气动作用的影响开始得到国内外学者的关注. 通过分析, 本文作者认为鸟翼前/后缘锯齿的气动作用主要存在以下方面.

(1) 在起飞、降落等大攻角状态起到抑制流动分离, 有增加升力的作用. 2017年, 俄亥俄州立大学的Wang等人[9]采用空气动力学数值仿真软件Starccm+、笛卡尔网格、k-ε湍流模型, 研究了仿鸟前缘锯齿对垂直轴风力机性能的影响. 研究发现锯齿前缘叶片能够很好地抑制流动分离, 在失速攻角区有明显的增升作用, 进而增大整体转矩, 最终增大功率输出. 2014年上海交通大学Wang等人[83]采用空气动力学数值仿真软件Fluent, 对来流雷诺数为$Re=1\times10^6$和$Re=1\times10^3$的静态NACA0010无限展长鸟翼分别进行了全层流和全湍流仿真探究, 研究显示, 低雷诺数下前缘锯齿对静态鸟翼气动特性影响很小, 高雷诺数下前缘锯齿表现为涡流发生器的作用, 会诱发一系列前缘涡系, 引发边界层内动量剧烈交换, 进而抑制过失速攻角气流分离, 提高起降时的升力. 2013年, 中国科学院Zhang等人[11]用风洞测力实验与PIV流场测量的方式对雷诺数

Re=5×10^{4}的带前缘凸起(锯齿)的无限展长鸟翼的气动特性进行了探究. 研究的测力结果表明, 前缘锯齿在较低失速攻角(13°)下对气动性能有一定损害, 在高过失速攻角下起到明显增升减阻的效果, 升阻比增量最高可达39.2%. 2011年, 北京大学Zhang等人[84]通过求解采用全湍流RANS方程, 研究了正弦函数状前缘锯齿对水平轴风力机叶片气动特性的影响, 研究证明在高风速、失速状态下前缘锯齿会使叶片前缘形成复杂高速的涡系, 并向后脱出, 从而显著降低了叶片前缘上表面的压力, 进而增加升力.

(2) 具有抑制动态入流导致升力波动的作用. 2018年, 上海交通大学与日本千叶大学合作研究中心的Rao等人[85,86]利用大涡模拟方法对仿猫头鹰前缘锯齿翼模型的气动鲁棒特性进行了探究, 仿真雷诺数为6000. 研究采用了两种方向互相垂直的正弦振荡入流, 对比了带仿猫头鹰前缘锯齿翼模型与光滑翼模型的气动响应. 结果显示, 前缘锯齿能有效抑制动态入流导致的升力波动. 他们的结论认为, 前缘锯齿能够起到稳定飞行, 提高抗风性的作用.

2.4.3　前缘小翼羽的作用

小翼羽位于鸟类的手翼和臂翼的交界处, 由指骨以及2~3片羽毛组成, 绝大部分鸟类均具有小翼羽[87], 如白鸽、老鹰等; 但由于不同的鸟类生活习性不同, 小翼羽的进化程度也有所不同[88]. 图8所示为白鸽的骨骼解剖图[89], 图中的小翼指即为支撑小翼羽的指骨.

关于小翼羽的研究和讨论最早可追溯至20世纪70年代[90]. 近些年来, 随着仿生技术关注度越来越高, 关于小翼羽的研究也逐渐增多, 并且已经取得了一些不错的成果. 当前的研究发现, 小翼羽多用于鸟类的起飞和降落阶段, 通过主动控制展开, 起到延缓流动分离, 增加升力的作用, 类似于固定翼飞机的增升装置[12].

目前的研究对于小翼羽增升作用的气动机理主要有两个设想, 分别是前缘缝翼效应[12,91]和涡流发生器效应[7].

(1) 小翼羽类似前缘缝翼有增升效应. Meseguer等人[12,91]通过截取鸽子翅膀的几何特征, 先后构建了带有小翼羽的二维翼型和三维鸟翼模型并进行了风洞实验, 研究了不同攻角下小翼羽对于气动特性的影响. 二维翼型的实验结果显示, 小翼羽具有前缘缝翼的功能,

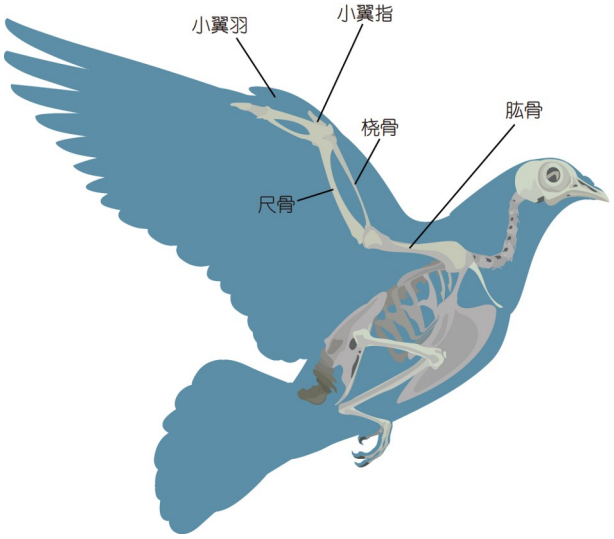

图 8　(网络版彩图)白鸽的骨骼解剖图[89]
Figure 8　(Color online) Skeleton diagram of pigeon [89].

大攻角时, 张开的小翼羽通过降低上表面的逆压梯度, 从而起到延缓流动分离、增加升力的作用. 三维鸟翼实验结果表明, 在合适的小翼羽几何参数下, 小翼羽是非常有效的高升力装置, 其长度虽然只有鸟翼展长的17.5%, 但其最大能带来22%的升力增量.

(2) 小翼羽有类似涡流发生器的增升效应. 通过诱导下洗流, 将自由来流中的动量注入边界层内, 增加边界层内的动量, 起到抑制流动分离, 增加升力的作用. Lee等人[7]利用风洞实验进行了有/无小翼羽的喜鹊翅膀的静态气动特性的研究, 结果显示小翼羽能提升1.3%~12.7%的升力, 延缓失速5°~10°, 同时数字粒子图像测速(digital particle image velocity, DPIV)得到的流场结果表明, 大攻角时, 小翼羽梢部形成的流向涡会在翅膀上表面诱导较强的下洗流, 通过将自由来流中的动量传输到速度较低的近壁面边界层, 起到抑制流动分离、增加升力的作用.

(3) 有关于小翼羽应用方面的研究, 通过构建仿小翼羽的前缘装置, 进行了不同几何参数的研究. Mandadzhiev等人[92,93]仿照鸟类前缘小翼羽构建了类小翼羽的前缘装置, 并在风洞中研究了不同小翼羽偏转角和相对攻角的影响. 结果显示, 小翼羽大多在大攻角下起增升作用, 并且较大的偏转角和较小的相对攻角能起到较好的增升效果. Ito等人[94,95]在Mandadzhiev等人研究的基础上, 进行了类似的风洞实验, 额外研究了不同小翼羽与翼根间距离的影响, 结果显示小翼羽的

增升效果对于与翼根间的距离很敏感，起到最大增升效果的距离大约在半展长附近.

此外, 还有一些关于小翼羽其他作用的研究, 例如在大迎角之下，不对称地布置小翼羽可以起到控制滚转的作用[96]. 小翼羽的展开是作用于其上的气动力被动导致的，因此可能更多地起到感知气动力、降低失速风险的作用[97].

基于以上的研究, 我们可以提出猜想: 鸟类在机动状态时, 可能通过小翼羽来感知气动力, 降低失速的风险, 同时通过不对称地展开小翼羽(例如左右小翼羽展开的幅度不一致)起到一定控制姿态的作用. 2019年, 作者团队[98]利用求解RANS方程，初步开展了关于非定常情况下小翼羽作用的研究，研究初步发现，考虑非定常运动之后, 在小迎角(对应未失速状态)时, 小翼羽展开大多会减小升力，增加阻力; 而在大迎角(对应失速状态)时，对于大部分几何参数的组合，小翼羽展开则能明显提升升力，延缓流动分离，并且减小阻力. 但由于进行的是二维情况的计算，与鸟类真实情况存在一定的差异, 因此还需要更深入的研究.

3 存在问题的归纳与分析

问题一　翼的静态几何外形、宏观扑动与翼的动态柔性变形三者间相耦合的空气动力学机理与作用机制需要进一步深入研究. 具体表现在以下三个方面.

(1) 扑动与翅膀静态几何外形的耦合对翼的升力和推力等的影响规律及其气动机理的研究还很少.

自然界绝大多数鸟类都采用扑动前飞的方式进行巡航平飞, 其翅膀扑动既是升力来源也是推力来源, 前飞过程中翅膀初始平面几何形状特征必将对翼的气动性能产生重要影响; 翼型剖面的弯度、厚度和扭转在翅膀扑动过程中对升力的影响及其机理已经明晰，但对推力的影响规律及其作用机理仍值得进一步探索; 关于翅膀剖面翼型的扭转，目前的研究仍局限于刚性宏观扑动，这与鸟类扑动过程中动态柔性改变扭转角差异较大，且已有研究只给出了下扑阶段扭转对流场涡结构的影响，无法真实反应鸟类翅膀整个扑动过程中动态扭转的气动作用及机理.

(2) 挥舞、扭转、扫掠和折叠这四种宏观扑动耦合的气动机理中，绝大部分研究都基于简化模型或简化扑动方式, 需要进一步深化研究.

2013年，段文博等人[99]对鸟类展向伸缩折叠翼的风洞试验研究指出展缩有利于鸟类低速飞行. 2019年1月, Chang等人[100]在*Science Robotics*上发表关于鸟类沿翼展滑展的研究和飞行样机(图9(a)). 2020年, Ajanic等人[101]在同一期刊展现了鸟类展向伸缩运动(图9(b))在无人机姿态控制方面的巨大优势与应用潜力. 作者团队最新的翼展缩实现机构和飞行样机如图10所示. Chang等人[100]和Ajanic等人[101]样机的滑展和作者团队的展缩机构可看成是鸟翼折叠的一种形式. 目前的研究表明，翼的展缩会对翼的气动特性产生重要的影响, 但与之相关的流动机理研究还很少见.

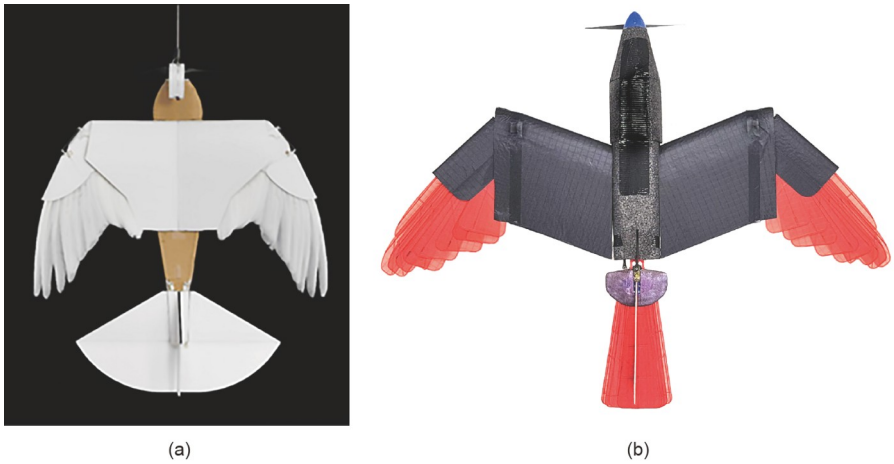

图 9　(网络版彩图) Chang等人[100](a)与Ajanic等人[101](b)制作的可实现滑展运动的样机

Figure 9　(Color online) Bird-inspired robots with feathered morphing wings developed by Chang et al. [100] (a) and Ajanic et al. [101] (b).

图 10　(网络版彩图)作者团队的鸟翼展缩机构和飞行验证样机
Figure 10　(Color online) Bird-inspired wing morphing mechanism developed by author team and the corresponding flapping wing's flight test.

目前对四种宏观扑动的气动机理均有一定结论, 但值得注意的是, 绝大部分的研究都基于简化模型或仅在挥舞运动上叠加某一运动的简化扑动展开, 并不能完全揭示各个运动的作用机理. 同时, 大部分文献采用二维模型进行研究, 忽略了扑翼强烈的三维流动效应, 无法真实反映出宏观扑动对扑翼前缘涡、翼尖涡等的影响, 而复杂涡系的精确捕捉是揭示鸟类产生高升力和大推力机理的重要基础.

故从三维翅膀多自由度耦合扑动规律出发, 结合流动涡结构的变化, 进一步研究各个宏观扑动方式对扑翼气动力、气动效率的影响及其作用机理仍很有必要.

(3) 翼的动态柔性气动机理研究需要考虑与翼的静态几何外形和宏观扑动的耦合效应.

翼的弦向柔性和展向柔性对推力和推进效率等气动参数的影响规律均有定论, 适当的柔性能使翼的推进性能最佳. 但已有的研究大都在一定假定外形下, 研究宏观扑动参数和结构参数对翼的动态柔性变形和气动性能的影响, 存在结构模型较为简化、气动外形较为简单的问题, 并不能很好地反映鸟类翅膀外形和结构的主要特征. 因此, 有必要针对实际鸟类翅膀, 进一步开展其材料和结构属性的测量研究. 在此基础上, 构建结构特性仿真程度较高的计算或实验模型, 深入研究翅膀静态几何外形参数和宏观扑动参数变化对翼的动态柔性气动性能的影响规律.

问题二　自然界鸟类飞行中, 鸟翼的静态几何外形、强烈的宏观扑动和动态柔性变形各自独立的, 尤其是它们共同与三种小尺度流动控制结构构成的协同耦合运动的气动机理研究目前还未见到公开的研究或成果发表. 其表现在以下两个方面.

(1) 翼的静态几何外形、宏观扑动和动态柔性变形各自对小尺度流动控制结构气动机理和作用的影响研究目前基本空白.

鸟翼的静态平面形状和翼型(剖面形状)、宏观扑动(挥舞、俯仰、扫掠和折叠)及翼的动态柔性变形这三种因素是鸟类产生高升力/大推力的主要因素, 而小尺度流动控制结构的作用需要与实际飞行中翼的静态平面形状、宏观扑动和翼的动态柔性变形耦合才能充分体现出来.

作者认为由于空气动力学数值仿真计算精度的限制、高精度实验手段的不完善性以及计算与实验模型简化的合理性等原因, 目前对小尺度流动控制结构的研究还基本处于运用不同手段来判断或证明这些小尺度流动控制结构对翼的气动力确有显著影响这样的定性研究的阶段, 对小尺度流动控制结构的气动机理和作用阶段整体尚不完全明了和确定.

(2) 同时考虑翼的静态几何外形、四种宏观扑动和动态柔性变形, 与三种小尺度流动控制结构协同运动耦合的气动机理这种最复杂情况, 国内外还没有看到可以解决这个问题的计算或实验研究公开发表.

在文献[102,103]中作者团队目前所建立的实验系统上, 进一步采用小尺度流动控制结构的实验模型, 初步开展的扑动与前缘锯齿结构耦合研究发现: 两者耦合情况下, 扑动的前缘锯齿, 可以对增加推力、改善升力有放大器的作用. 依此推测, 在扑动条件下, 包括翼梢开缝和前缘小翼羽, 小尺度流动控制结构都有类似的放大器作用. 同样, 翼的静态几何外形和翼的动态柔性变形都会严重影响三种小尺度流动控制结构的

空气动力学机理和作用机制.

问题三　不考虑翼的静态几何外形、四种宏观扑动和动态柔性变形时，小尺度流动控制结构各自的气动机理与作用机制研究还基本处于运用不同手段来判断或证明这些结构对翼的气动力确有显著影响的定性研究的阶段，对小尺度流动控制结构的气动机理和作用阶段，整体尚不完全明了和确定，缺乏主要参数对气动特性的定量化影响规律研究.

例如，翼梢开缝对升力的作用、前缘锯齿的抗风稳定性作用及小翼羽的主动不对称展开产生附加横滚力矩的作用和小翼羽对阻力的影响等气动机理和作用目前还不清楚.

目前的计算和实验模型中，采用二维简化模型的情况比较多，而更接近真实情况的三维形状和尺寸的影响研究则比较少；目前的大多数研究，涉及这些小尺度流动控制结构的形状、尺寸、与气流的相对角度及其在飞行中独立的动态变化规律等影响的研究很少; 由于以往的关注程度不够, 同时由于小尺度流动控制结构的变化幅度与翼的宏观扑动幅度相比较不显著，导致对它们的几何形状和运动方式等的观测数据仍不完善.

有必要结合新的活体观测数据，借助于翼的解剖结构、运动学分析、基于高精度空气动力学数值仿真及精细风洞实验手段获得的六分量力与涡结构，全面地研究这些小尺度流动控制结构的二维和三维静态形状参数、与气流的相对角度和运动方式和对气动机理的影响规律，进一步明确这些小尺度流动控制结构的主要功能和作用.

问题四　研究手段和方法需要完善.

目前的小尺度流动控制结构气动机理和作用机制研究中, 大多不考虑与其他三种因素的耦合, 计算模型和实验模型都比较简化.

从力系角度，对于相对尺度较大的翼梢开缝结构, RANS方法基本可以满足精度要求. 对于相对尺度较小的小翼羽和前缘锯齿等结构，使用雷诺平均/大涡模拟混合方法(Reynolds-averaged Navier-Stokes/Large Eddy simulation, RANS/LES混合)、大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)、格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Methods, LBM)等方法的计算精度基本能满足通过力系来进行机理研究的需求. 实验研究的难度也能适应常规的低雷诺数风洞和PIV流场显示技术的能力.

但从精细的涡系结构分析看, 无论是翼梢开缝, 还是前后缘锯齿和小翼羽，都分别需要借助于比当前方法精度更高的CFD方法并发展能力更强的流固耦合实验方法. 具体表现在以下四个方面.

(1) 在仅考虑与鸟翼的刚体宏观扑动耦合的情况下，RANS及改善精度的RANS，并充分运用并行计算技术及国家超算中心条件，基本上可以满足空气动力学仿真计算的需要, 但对涡的模拟能力有限.

为了改善与鸟翼刚体宏观扑动RANS的涡模拟能力不足问题, 近年来已有使用RANS/LES混合、LES、LBM和粒子涡方法(particle vortex method, PVM)等求解方法的运用出现. 但由于计算能力的限制, 基于LES, LBM和PVM可能只适合于更简化的外形和扑动情况. 随着计算技术的快速发展，对复杂外形和复杂扑动情况，采用更先进的LES、LBM和适度的简化模型匹配, 进行复杂涡系结构的探索研究，有助于发现新的气动机理，如中国科学院力学研究所的何国威院士团队等[40,42]利用LES结合浸没边界法，分别计算了可展向收缩的平板模型和可展向收缩的仿蝙蝠翅膀的三维模型, 发现了动态改变翼展具有可观的增升效果.

(2) 对于考虑鸟翼柔性引发的弹性变形问题, 国内外研究也已比较多[51,54~57,61,63,104,105]，并得到多项国家自然科学基金的资助.

目前国内外形成的基本计算能力是基于RANS的CFD/CSD方法，该类方法同样基本上可以满足与鸟翼的宏观扑动和动态柔性变形相耦合情况的空气动力学仿真计算的需要, 但对涡的模拟能力仍然非常有限.

为了提高流固耦合求解方法对涡的模拟能力，目前国际上也开始采用RANS/LES混合、LES或LBM来替代流固耦合求解中RANS的运用.

(3) 在鸟翼的流固耦合实验方法研究方面需要大力推进.

这不仅可以弥补RANS求解方法在流固耦合情况时对涡的模拟能力不足问题，而且可以弥补LES或者LBM在求解流固耦合问题时计算量太大的问题. 同时, 计算方法的结果和实验方法的结果可以相互印证，这对所获得结果的可信度有根本性的帮助.

(4) 小尺度流动控制结构空气动力学机理和作用机制研究中，除充分运用空气动力学仿真计算和精细的风洞实验手段外，通过观测鸟翼特征点在巡航平

飞、机动和起降过程中的运动轨迹和运动参数(速度和加速度等)[28,106], 分析其规律, 或者通过鸟翼的解剖结构分析, 都是重要的补充手段.

问题五　翅膀运动规律数据缺乏, 测量方法需要完善. 主要体现在以下两个方面.

(1) 多摄像头识别关键位置标记点的方法可以获得鸟类翅膀表面各典型标记点的运动轨迹, 但对本文所讨论的鸟类翅膀扑动中包含的挥舞、扭转、扫掠、折叠的复杂运动, 特别是翅膀的柔性变形及小尺度流动控制结构在运动中的细节形态参数变化的精确捕捉较为困难.

(2) 在目前公开发表文献中, 关于文中重点关注的"小尺度流动结构与翼的静态初始几何外形、宏观扑动运动、翼的柔性变形等同步协调的运动参数测量与建模", 几乎未见到公开发表的研究成果.

4　鸟翼空气动力学机理的研究对策和方法

针对以上问题, 本文提出的鸟翼空气动力学机理的研究对策与方法如图11所示.

关于计算空气动力学和实验空气动力学方法. 计算空气动力学方法主要指RANS、RANS/LES混合、LES、DNS、LBM等细致度不同的CFD计算方法; 实验空气动力学方法主要指满足低雷诺数和低湍流度要求的风洞实验测力和用于流场观测的DPIV方法等.

关于涡系. 相比于六分量测力实验, 涡系的分布和强度的演化研究更有助于了解各种参数, 特别是小尺度流动控制结构的小量级参数等对翼的气动特性影响的细节, 这非常有助于气动机理和影响规律研究. 图12是关于鸟翼运动时最基本的涡系简化示意图.

关于计算模型和实验模型的抽象与简化. 考虑到研究过程中, 全真对象的精细计算虽然非常需要, 但精细的CFD方法, 如LES, DNS和LBM等方法要求的计算资源, 在较复杂的情况下会超过高性能计算能提供的计算资源; 同时, 实验的复杂程度也可能会导致实验无法进行. 因此, 需要在研究中从获得的运动规律参数化模型中, 抽象并简化出既能反映所研究对象的本质, 又能满足高精细度CFD方法和实验方法的资源和能力限制的系列化计算和实验模型.

表1所示的关于四种基本要素对扑动翼气动特性作用的基本推测, 是基于当前国际上的研究成果初步归纳总结出的影响鸟翼气动特性的四种要素的基本作用的推测, 可用于大致指导研究中具体的技术路线和方案的确定.

具体的研究内容如下.

(1) 鸟翼活体的静态几何外形、宏观扑动、翼的动态柔性变形和小尺度流动控制结构同步协调的运动参数测量方法与运动学建模方法.

建立能精细地反映鸟翼的宏观扑动和动态柔性变形及三种小尺度流动控制结构的几何学和运动学规律的同步协调运动参数化模型.

(2) 在典型鸟翼静止和不考虑动态柔性变形情况的几何外形下, 小尺度流动控制结构各自的气动机理与作用机制.

在获取鸟翼特征点运动轨迹和运动参数观测数据基础上, 通过运动学分析和鸟翼的解剖结构分析, 综合

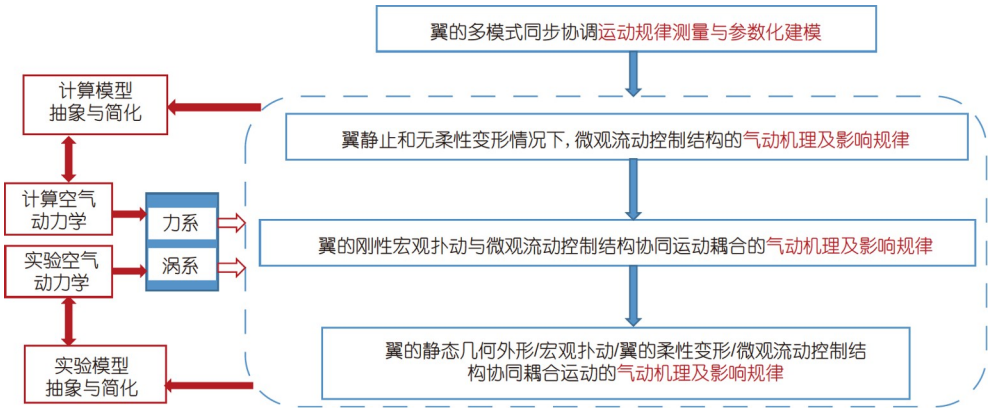

图 11　(网络版彩图)本文关于鸟翼空气动力学机理研究的对策与方法

Figure 11　(Color online) The strategies and methods of investigating the aerodynamic mechanism of bird flight in this paper.

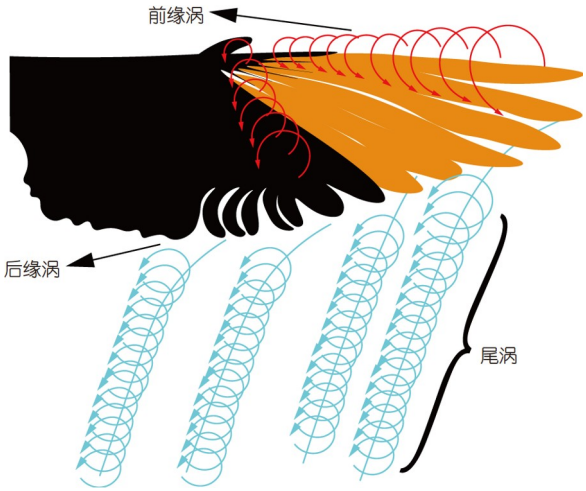

图 12 (网络版彩图)鸟翼运动时的基本涡系分布图

Figure 12 (Color online) Skeleton diagram of the vortex structure around the flapping bird wing.

运用改善精度的RANS、RANS/LES混合、LES、LBM等CFD技术, 并结合模型风洞实验方法(含PIV或数字图像相关法(digital image correlation, DIC)), 研究典型鸟翼外形下三种小尺度流动控制结构各自的二维静态模型、三维实体及飞行中它们的动态运动规律等对翼的气动影响机理; 揭示它们各自对翼的涡系的形成、发展、稳定和脱落, 及气动特性的主要影响参数与影响规律.

(3) 鸟翼刚性宏观扑动下小尺度流动控制结构的气动机理与作用机制.

在获取鸟翼特征点运动轨迹和运动参数观测数据的基础上, 通过运动学和鸟翼的解剖结构分析, 综合运用RANS/LES混合、LES、LBM等CFD技术, 及"基于低速低湍流度风洞中能模拟鸟的4种复合扑动的测量系统"的实验手段(含PIV/DIC). 首先, 研究鸟翼在刚性宏观扑动与三种小尺度流动控制结构各自单独构成的协同运动耦合影响下的气动机理, 揭示三种小尺度流动控制结构各自单独对鸟翼涡系形成、发展、稳定和脱落及气动特性的主要影响参数与影响规律; 其次, 探索揭示翼的刚性宏观扑动与三种小尺度流动控制结构共同同步运动构成的协同运动的耦合对鸟翼涡系形成、发展、稳定和脱落及气动特性的主要影响参数与影响规律.

(4) 鸟翼的静态几何外形、宏观扑动、动态柔性变形及三种小尺度流动控制结构协同耦合运动影响下的气动机理研究.

综合运用改善精度的RANS、RANS/LES混合、LES、LBM等CFD/CSD技术, 以及"基于低速低湍流度风洞中能模拟鸟的4种宏观扑动和动态柔性变形的同步测量系统"上发展的可以反映三种小尺度流动控制结构涡效应的气动机理的实验方法(含PIV/DIC). 首

表 1 四种基本要素对扑动翼气动特性作用的基本推测(基于当前研究)

Table 1 Basic speculation on the effect of four basic elements on the aerodynamic characteristics of bird wing (based on current research)

	翼的小尺度流动控制结构			翼的静态几何外形		翼的宏观扑动运动			翼的柔性效应		
	翼梢开缝	前后缘锯齿	前缘小翼羽	平面形状	翼型(剖面形状)	挥舞(上下扑动)	扭转	前后扫掠	折叠	展向	弦向
平飞	升力、阻力、推测横滚控制力矩	未知	推测无作用	升力、阻力	升力、阻力、俯仰力矩	推力	推力	推力	升力	推力	推力
机动(含抗风、捕食、逃生等)	推测横滚控制力矩	升力波动	未知	升力、阻力	升力、阻力、俯仰力矩	推力	推力	推力	升力	推力	推力
起飞	未知	升力	升力	升力、阻力	升力、阻力、俯仰力矩	推力	推力	推力	升力	推力	推力
降落	未知	升力	升力	升力、阻力	升力、阻力、俯仰力矩	推力	推力	推力	升力	推力	推力

先，研究鸟翼的静态几何外形、宏观扑动、动态柔性变形与三种小尺度流动控制结构各自单独运动所构成的协同运动的耦合影响下的气动机理，揭示它们各自对鸟翼涡系的形成、发展、稳定和脱落及气动特性的主要影响参数与影响规律; 其次, 探索揭示鸟翼的静态几何外形、宏观扑动、动态柔性变形与三种小尺度流动控制结构共同同步所构成的协同运动的耦合对鸟翼涡系的形成、发展、稳定和脱落及气动特性的主要影响参数与影响规律.

需要特别指出的是, (i) 在研究的全过程中, 需要系统研究并建立满足高精度要求和计算量限制的各类运动学、CFD和CSD等细致度不同的分析计算模型; (ii) 系统研究并建立满足高精度要求和实验难度限制的各种细致度不同的实验分析模型; (iii) 在各类计算分析与实验模型的建立过程中, 需要关注各种环境参数、几何参数与材料参数等的分散性对模型鲁棒性的影响.

5　结论

本文的主要结论如下：需要进一步深入研究翼的静态几何外形、宏观扑动与翼的动态柔性变形三者间相互耦合的空气动力学机理与作用机制；以上三种因素与翼梢开缝等小尺度流动控制结构构成的协同耦合运动的气动机理研究基本空白，其研究对解释鸟翼空气动力学机制非常关键；只有从研究鸟翼涡系的形成、发展、稳定和脱落的主要影响参数与影响规律出发，通过计算和实验手段的改进和完善、计算和实验模型的抽象分解与简化等，才有可能使问题真正得以解决.

需要特别说明的是，鸟类翅膀表面的绒毛形成的表面粗糙结构也能够起到流动控制的效果[107~109]，其实质属于一种微观流动控制结构，在本文小尺度流动结构中虽暂未系统涉及翅膀羽毛的相关研究，但其基本研究思路与文中提及的三种微流动控制结构类似.

参考文献

1 Sun M. Aerodynamics of animal flight (in Chinese). Acta Aerodyn Sin, 2018, 36: 122–128 [孙茂. 动物飞行的空气动力学. 空气动力学学报, 2018, 36: 122–128]

2 Send W, Fischer M, Jebens K, et al. Artificial hinged-wing bird with active torsion and partially linear kinematics. In: Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences. St. Maarten, 2012. 1148–1157

3 Keennon M T, Klingebiel K, Won H, et al. Development of the nano hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle. In: Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, 2012. 588

4 Karásek M, Muijres F T, De Wagter C, et al. A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns. Science, 2018, 361: 1089–1094

5 Yang W, Wang L, Song B. Dove: A biomimetic flapping-wing micro air vehicle. Int J Micro Air Vehicles, 2018, 10: 70–84

6 Ang H S. Design principles and strategies of micro air vehicle (in Chinese). Acta Aeronaut Et Astron Sin, 2016, 37: 69–80 [昂海松. 微型飞行器的设计原则和策略. 航空学报, 2016, 37: 69–80]

7 Lee S, Kim J, Park H, et al. The function of the alula in avian flight. Sci Rep, 2015, 5: 9914

8 Kleinheerenbrink M, Johansson L C, Hedenström A. Multi-cored vortices support function of slotted wing tips of birds in gliding and flapping flight. J R Soc Interface, 2017, 14: 20170099

9 Wang Z, Zhuang M. Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios. Appl Energy, 2017, 208: 1184–1197

10 Hossain A, Rahman A, Iqbal A, et al. Drag analysis of an aircraft wing model with and without bird feather like winglet. Int J Aer Mech Eng, 2011, 5: 1887–1892

11 Zhang M M, Wang G F, Xu J Z. Aerodynamic control of low-Reynolds-number airfoil with leading-edge protuberances. AIAA J, 2013, 51: 1960–1971

12 Meseguer J, Franchini S, Pérez-Grande I, et al. On the aerodynamics of leading-edge high-lift devices of avian wings. Proc Institut Mech Eng Part G-J Aerospace Eng, 2005, 219: 63–68

13 Norberg U M. Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution. Berlin: Springer, 1990. 1–5

14 Videler J J, Stamhuis E J, Povel G D E. Leading-edge vortex lifts swifts. Science, 2004, 306: 1960–1962

15 Liu T, Jones S, Kuykendoll K, et al. Avian wing geometry and kinematics. AIAA J, 2006, 44: 954–963
16 Bachmann T. Anatomical, morphometrical and biomechanical studies of barn owls' and pigeons' wings. Dissertation for Doctoral Degree. Aachen: RWTH Aachen University, 2010
17 Lees J J, Dimitriadis G, Nudds R L. The influence of flight style on the aerodynamic properties of avian wings as fixed lifting surfaces. Peer J, 2016, 4: e2495
18 Van Oorschot B K, Mistick E A, Tobalske B W. Aerodynamic consequences of wing morphing during emulated take-off and gliding in birds. J Exp Biol, 2016, 219: 3146–3154
19 Phillips N, Knowles K, Bomphrey R J. The effect of aspect ratio on the leading-edge vortex over an insect-like flapping wing. Bioinspir Biomim, 2015, 10: 056020
20 Fu J, Liu X, Shyy W, et al. Effects of flexibility and aspect ratio on the aerodynamic performance of flapping wings. Bioinspir Biomim, 2018, 13: 036001
21 Shahzad A, Mumtaz Qadri M N, Ahmad S. Numerical analysis of high aspect ratio flexible wings in flapping motion. J Appl Fluid Mech, 2019, 12: 1979–1988
22 Yuan Z J, Han J K, Chen G. Investigation on the influence of aspect ratio on the thrust performance of bionic motion wing under low Reynolds number (in Chinese). Acta Aerodyn Sin, 2018, 36: 156–162 [苑宗敬, 韩佳坤, 陈刚. 低雷诺数下展弦比对仿生拍动翼推进性能的影响研究. 空气动力学学报, 2018, 36: 156–162]
23 Altshuler D L, Bahlman J W, Dakin R, et al. The biophysics of bird flight: Functional relationships integrate aerodynamics, morphology, kinematics, muscles, and sensors. Can J Zool, 2015, 93: 961–975
24 Shyy W, Lian Y, Tang J, et al. Aerodynamics of low Reynolds Number Flyers. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 1–5
25 Muijres F T, Johansson L C, Bowlin M S, et al. Comparing aerodynamic efficiency in birds and bats suggests better flight performance in birds. PLoS ONE, 2012, 7: e37335
26 Thielicke W, Stamhuis E J. The influence of wing morphology on the three-dimensional flow patterns of a flapping wing at bird scale. J Fluid Mech, 2015, 768: 240–260
27 Thielicke W, Stamhuis E J. The effects of wing twist in slow-speed flapping flight of birds: Trading brute force against efficiency. Bioinspir Biomim, 2018, 13: 056015
28 Berg A M, Biewener A A. Wing and body kinematics of takeoff and landing flight in the pigeon (*Columba livia*). J Exp Biol, 2010, 213: 1651–1658
29 Carruthers A C, Thomas A L R, Taylor G K. Automatic aeroelastic devices in the wings of a steppe eagle *Aquila nipalensis*. J Exp Biol, 2007, 210: 4136–4149
30 Ros I G, Bassman L C, Badger M A, et al. Pigeons steer like helicopters and generate down- and upstroke lift during low speed turns. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 19990–19995
31 Chin D D, Lentink D. Flapping wing aerodynamics: From insects to vertebrates. J Exp Biol, 2016, 219: 920–932
32 Betz A. Ein beitrag zur erklaerung segelfluges. Z Flugtech Motorluftschiffahrt, 1912, 3: 269–272
33 Von Kármán T, Burgers M J. Aerodynamic Theory. Berlin: Springer, 1934. 1–5
34 Ashraf M A, Young J, S. Lai J C. Oscillation frequency and amplitude effects on plunging airfoil propulsion and flow periodicity. AIAA J, 2012, 50: 2308–2324
35 Yu M, Wang Z J, Hu H. High fidelity numerical simulation of airfoil thickness and kinematics effects on flapping airfoil propulsion. J Fluids Struct, 2013, 42: 166–186
36 Koochesfahani M M. Vortical patterns in the wake of an oscillating airfoil. AIAA J, 1989, 27: 1200–1205
37 Bansmer S E, Radespiel R. Flapping flight: High thrust and propulsive efficiency due to forward gliding oscillations. AIAA J, 2012, 50: 2937–2942
38 Izraelevitz J S, Triantafyllou M S. Adding in-line motion and model-based optimization offers exceptional force control authority in flapping foils. J Fluid Mech, 2014, 742: 5–34
39 Koekkoek G, Muijres F T, Johansson L C, et al. Stroke plane angle controls leading edge vortex in a bat-inspired flapper. Comptes Rendus Mécanique, 2012, 340: 95–106
40 Wang S, Zhang X, He G, et al. Lift enhancement by dynamically changing wingspan in forward flapping flight. Phys Fluids, 2014, 26: 061903

41 Bahlman J W, Swartz S M, Breuer K S. How wing kinematics affect power requirements and aerodynamic force production in a robotic bat wing. Bioinspir Biomim, 2014, 9: 025008

42 Wang S, Zhang X, He G, et al. Lift enhancement by bats' dynamically changing wingspan. J R Soc Interface, 2015, 12: 20150821

43 Chang X H, Ma R, Zhang L P. Numerical study on the folding mechanism of seagull's flapping wing (in Chinese). Acta Aerodyna Sin, 2018, 36: 135–143 [常兴华, 马戎, 张来平. 海鸥翼折转运动的数值模拟及分析. 空气动力学学报, 2018, 36: 135–143]

44 Usherwood J R. The aerodynamic forces and pressure distribution of a revolving pigeon wing. In: Taylor G K, Triantafyllou M S, Tropea C, eds. Animal Locomotion. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. 429–441

45 Crandell K E, Tobalske B W. Aerodynamics of tip-reversal upstroke in a revolving pigeon wing. J Exp Biol, 2011, 214: 1867–1873

46 Wolf T, Konrath R. Avian wing geometry and kinematics of a free-flying barn owl in flapping flight. Exp Fluids, 2015, 56: 1–8

47 Winzen A, Roidl B, Schröder W. Combined particle-image velocimetry and force analysis of the three-dimensional fluid-structure interaction of a natural owl wing. Bioinspir Biomim, 2016, 11: 026005

48 Shyy W, Aono H, Chimakurthi S K, et al. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity. Prog Aerospace Sci, 2010, 46: 284–327

49 Heathcote S, Gursul I. Flexible flapping airfoil propulsion at low Reynolds numbers. AIAA J, 2007, 45: 1066–1079

50 Heathcote S, Wang Z, Gursul I. Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. J Fluids Struct, 2008, 24: 183–199

51 Wu P, Ifju P, Stanford B, et al. A multidisciplinary experimental study of flapping wing aeroelasticity in thrust production. In: Proceedings of the 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm, 2009. 2009-2413

52 Kang C K, Aono H, Cesnik C E S, et al. Effects of flexibility on the aerodynamic performance of flapping wings. J Fluid Mech, 2011, 689: 32–74

53 Kodali D, Medina C, Kang C, et al. Effects of spanwise flexibility on the performance of flapping flyers in forward flight. J R Soc Interface, 2017, 14: 20170725

54 Zhang X W, Zhou C Y, Xie P. Numerical study on the effect of flapping wing deformation on aerodynamic performance in hovering flight (in Chinese). J Harbin Inst Tech, 2012, 44: 115–119 [张兴伟, 周超英, 谢鹏. 扑翼柔性变形对悬停气动特性影响的数值研究. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44: 115–119]

55 Zhou C Y, Zhou J Y, Wang C, et al. Numerical study on the effect of flexiblity of a flapping wing on its aerodynamic performance (in Chinese). Eng Mech, 2013, 30: 13–18 [周超英, 朱建阳, 汪超, 等. 柔性扑翼气动性能的数值研究. 工程力学, 2013, 30: 13–18]

56 Fairuz Z M, Abdullah M Z, Zubair M, et al. Effect of wing deformation on the aerodynamic performance of flapping wings: Fluid-structure interaction approach. J Aerosp Eng, 2016, 29: 04016006

57 Deng S, Xiao T. Effect of flexion on the propulsive performance of a flexible flapping wing. P I Mech Eng G-J Aer, 2016, 230: 2265–2273

58 Zhu Q. Numerical simulation of a flapping foil with chordwise or spanwise flexibility. AIAA J, 2007, 45: 2448–2457

59 Liani E, Guo S, Allegri G. Aeroelastic effect on flapping wing performance. In: Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, 2007. 2412

60 Yang W Q. Numerical simulation of flowfield over flapping-wing micro air vehicle based on overset grids (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010. 123–129 [杨文青. 基于重叠网格的扑翼飞行器绕流数值模拟研究. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2010. 123–129]

61 Chen L L. Aeroelastic analysis and optimization of flapping-wing micro air vehicle by numerical simulation (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013. 53–63 [陈利丽. 微型扑翼气动结构耦合计算及优化设计研究. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2013. 53–63]

62 Xue D. The influence of structural parameters and body movement on the performance of flapping wing (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. 32–40 [薛栋. 结构参数和机体运动对扑翼性能的影响研究. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2018. 32–40]

63 Chen L L, Song B F, Song W P, et al. Numerical aerodynamic-structural coupling research for flexible flapping wing (in Chinese). Acta Aerodyna Sin, 2015, 33: 125–133 [陈利丽, 宋笔锋, 宋文萍, 等. 柔性扑翼气动结构耦合特性数值研究. 空气动力学学报, 2015, 33: 125–133]

64 Withers P C. The aerodynamic performance of the wing in red-shouldered hawk *Buteo lznearzs* and a possible aeroelastic role of wing-tip slots. Lbis, 1981, 123: 239–247

65 Smith M, Komerath N, Ames R, et al. Performance analysis of a wing with multiple winglets. In: Proceedings of the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Anaheim, 2001. 2407
66 Tucker V A. Gliding birds: Reduction of induced drag by wing tip slots between the primary feathers. J Exp Biol, 1993, 180: 285–310
67 Tucker V A. Drag reduction by wing tip slots in a gliding Harris' hawk, Parabuteo unicinctus. J Exp Biol, 1995, 198: 775–781
68 Lynch M, Mandadzhiev B, Wissa A. Bioinspired wingtip devices: A pathway to improve aerodynamic performance during low Reynolds number flight. Bioinspir Biomim, 2018, 13: 036003
69 Mitchell T, Jacob J. Evaluation of bird-wing-inspired features on biomimetic UAVs. In: Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, 2013. 89
70 Saiteja A, Suresh C. Computational analysis of slotted wing tips at low reynolds number. Int J Sci Res Tech, 2014, 3: 360–363
71 Fluck M, Crawford C. A lifting line model to investigate the influence of tip feathers on wing performance. Bioinspir Biomim, 2014, 9: 046017
72 Siddiqui N A, Aldeeb M, Asrar W, et al. Experimental investigation of a new spiral wingtip. Int J Avia Aero Aero, 2018, 5: 6
73 Yang W Q, Song B F. Experimental investigation of aerodynamics of feather-covered flapping wing. Appl Bionics Biomech, 2017, 11: 3019640
74 Sachs G, Moelyadi M A. Effect of slotted wing tips on yawing moment characteristics. J Theor Biol, 2006, 239: 93–100
75 FESTO. BionicSwift: Safe aerial acrobatics as a swarm. 2021, https://www.festo.com/group/en/cms/13787.htm
76 AIRBUS. An Airbus futuristic conceptual airliner "takes flight" to inspire next-generation engineers. 2019, https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2019/07/airbus-conceptual-airliner-to-inspire-new-generation-engineers.html
77 Shelton A, Tomar A, Prasad J, et al. Active multiple winglets for improved unmanned-aerial-vehicle performance. J Aircraft, 2006, 43: 110–116
78 Scully M. Computation of helicopter rotor wake geometry and its influence on rotor harmonic airloads. Dissertation for Doctoral Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1975
79 Webster R, Chen J, Whitfield D. Numerical simulation of a helicopter rotor in hover and forward flight. In: Proceedings of the 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 1995. 193
80 Sheffer S, Alonso J, Martinelli L, et al. Time-accurate simulation of helicopter rotor flows including aeroelastic effects. In: Proceedings of the 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 1997. 399
81 Chen W, Qiao W, Wang L, et al. Rod-airfoil interaction noise reduction using leading edge serrations. In: Proceedings of the 21st AIAA/CEAS aeroacoustics conference. Dallas, 2015. 3264
82 Chen W, Qiao W, Wang X, et al. An experimental and numerical investigation of airfoil instability noise with leading edge serrations. In: Proceedings of the 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Lyon, 2016. 2956
83 Wang Y, Hu W, Zhang S. Performance of the bio-inspired leading edge protuberances on a static wing and a pitching wing. J Hydrodyn, 2014, 26: 912–920
84 Zhang R K, Wu V D J Z. Aerodynamic characteristics of wind turbine blades with a sinusoidal leading edge. Wind Energ, 2012, 15: 407–424
85 Rao C, Ikeda T, Nakata T, et al. Owl-inspired leading-edge serrations play a crucial role in aerodynamic force production and sound suppression. Bioinspir Biomim, 2017, 12: 046008
86 Rao C, Liu H. Aerodynamic robustness in owl-inspired leading-edge serrations: A computational wind-gust model. Bioinspir Biomim, 2018, 13: 056002
87 Videler J J. Avian Flight. Oxford: Oxford University Press, 2006
88 Lee S I, Choi H. Characteristics of the alula in relation to wing and body size in the Laridae and Sternidae. Anim Cells Syst, 2017, 21: 63–69
89 Chin D D, Matloff L Y, Stowers A K, et al. Inspiration for wing design: how forelimb specialization enables active flight in modern vertebrates. J R Soc Interface, 2017, 14: 20170240
90 Nachtigall W, Kempf B. Vergleichende untersuchungen zur flugbiologischen funktion des Daumenfittichs (Alula spuria) bei vögeln. Zeitschrift für vergleichende Physiologie, 1971, 71: 326–341
91 Meseguer J, Álvarez J C, Meseguer E, et al. The alula: A leading edge, high lift device of birds. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2003
92 Mandadzhiev B A, Lynch M K, Chamorro L P, et al. Alula-inspired leading edge device for low Reynolds number flight. In: Proceedings of the ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Stowe, 2016
93 Mandadzhiev B A, Lynch M K, Chamorro L P, et al. An experimental study of an airfoil with a bio-inspired leading edge device at high angles

of attack. Smart Mater Struct, 2017, 26: 094008

94 Ito M R, Duan C, Chamorro L P, et al. A leading-edge alula-inspired device (LEAD) for stall mitigation and lift enhancement for low Reynolds number finite wings. In: Proceedings of the ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Antonio, 2018

95 Ito M R, Duan C, Wissa A A. The function of the alula on engineered wings: A detailed experimental investigation of a bioinspired leading-edge device. Bioinspir Biomim, 2019, 14: 056015

96 Linehan T, Mohseni K. Investigation of a sliding alula for control augmentation of lifting surfaces at high angles of attack. Aerospace Sci Tech, 2019, 87: 73–88

97 Austin B, Anderson A M. The alula and its aerodynamic effect on avian flight. In: Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. Seattle, 2007. 797–806

98 Bao H, Yang W, Ma D, et al. Numerical simulation of flapping airfoil with alula. Int J Micro Air Veh, 2020, 12: 1–15

99 Duan W B, Ang H S, Xiao T H. design and wind tunnel test of an active morphing wing ornithopter (in Chinese). Acta Aeronaut et Astron Sin, 2013, 34: 474–486 [段文博, 昂海松, 肖天航. 主动变形扑翼飞行器的设计和风洞测力试验研究, 航空学报, 2013, 34: 474–486]

100 Chang E, Matloff L Y, Stowers A K, et al. Soft biohybrid morphing wings with feathers underactuated by wrist and finger motion. Sci Robot, 2020, 5: y1246

101 Ajanic E, Feroskhan M, Mintchev S, et al. Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities. Sci Robot, 2020, 5: eabc2897

102 Wang L G. Research on the system design and development approach for biomimetic flapping-wing micro air vehicle (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013. 149–153 [王利光. 微型扑翼飞行器系统设计与原理样机研究. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2013. 149–153]

103 Fu P. Research on wind tunnel experimental method and application of flapping-wing micro air vehicle (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. 78–98 [付鹏. 微型扑翼飞行器风洞实验方法与应用研究. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2017. 78–98]

104 Huang M Y, Xiao T H, Ang H S. Design of an ornithopter with multisection flexible morphing wings (in Chinese). J Aerospace Power, 2016, 31: 1838–1844 [黄鸣阳, 肖天航, 昂海松. 多段柔性变体扑翼飞行器设计. 航空动力学报, 2016, 31: 1838–1844]

105 Deng S, Percin M, van Oudheusden B, et al. Experimental investigation on the aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping wing micro air vehicle. Int J Micro Air Vehicles, 2014, 6: 105–115

106 Chin D D, Lentink D. Birds repurpose the role of drag and lift to take off and land. Nat Commun, 2019, 10: 1–10

107 Klän S, Bachmann T, Klaas M, et al. Experimental analysis of the flow field over a novel owl based airfoil. Exp Fluids, 2009, 46: 975–989

108 Lentink D, de Kat R. Gliding swifts attain laminar flow over rough wings. PLoS ONE, 2014, 9: e99901

109 Van B E, De K R, Elsinga G E, et al. Feather roughness reduces flow separation during low Reynolds number glides of swifts. J Exp Biol, 2015, 218: 3179–3191

A review of the research status and progress on the aerodynamic mechanism of bird wings

SONG BiFeng[1,2], LANG XinYu[1], XUE Dong[1], YANG WenQing[1,3], BAO Han[1], LIU Dan[1], WU Tao[1], LIU Kang[1], SONG WenPing[1,3] & WANG Yue[1]

[1] *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*
[2] *Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;*
[3] *Yangtze River Delta Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Taicang 215400, China*

First, this paper tries to review, summarize, and analyze the current status and problems of the aerodynamic mechanism research on the independent and coupling effects among the four factors that would affect the aerodynamic characteristics of bird wings—objectively and comprehensively. Second, based on the analysis and study of the current research results, according to the progress and limitations of calculation and experimental means, the paper puts forward the problems, strategies, and methods that need further study. The four main factors considered in this paper include the static geometric shape of the bird's wing, four kinematic modes, the dynamic chord- and span-wise flexible deformation of the wing, and three kinds of small-scale flow-control structures that have recently attracted more attention. In this paper, in full consideration of wing static geometry appearance, kinematic modes, and dynamic, flexible deformation, by the analysis of the forces and vortex on a bird's wing, the strategies and methods to further clarify the individual aerodynamic mechanism and function of the three small-scale flow-control structures are proposed. Furthermore, under the condition of mutual coupling among the four factors, the strategies and methods to obtain the aerodynamic mechanism of a real bird wing are also put forward. The viewpoints, methods, and conclusions of this paper have guiding and reference value for improving a bionic aircraft.

bird flight mechanism, flapping wing, wingtip slit, alula, leading and trailing edge serrations

doi: 10.1360/SST-2020-0515